

Y 1024508

分类号: TF538.6

密 级: 公开

UDC: \_\_\_\_\_

单位代码: 1 0 0 0 8

北京科技大学  
硕士学位论文

论文题目: 高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统设计



学 号: S20040206  
作 者: 金岩辉  
专 业 名 称: 安全技术及工程

2007年01月25日

## 摘 要

高炉喷吹煤粉是现代高炉炼铁生产广泛采用的技术，其意义在于降低焦比，降低生铁成本，改善高炉的冶炼过程。国内高炉喷吹煤种以无烟煤为主，由于我无烟煤资源有限，不能满足高炉喷煤技术长远发展的需要。由于贫瘦煤具有基本无结焦核，挥发分比无烟煤略高，燃烧性和反应性比无烟煤好等特点，被越来越多的机构重视开发成为高炉喷吹煤。但与无烟煤相比，贫瘦煤的挥发分较高，而其安全性尚未进行系统研究。因此，系统研究贫瘦煤的安全性，解决高炉喷吹贫瘦煤过程中整个喷吹系统安全问题，必将促进高炉炼铁技术的发展，节省炼铁成本，带来巨大的社会效益和经济效益。

本文在分析高炉喷煤系统工艺流程的基础上，结合预先危险性分析和事故树等分析方法，对储煤场、干燥气、制粉、输送以及喷吹等子系统进行了危险源辨识和安全评价工作。其次通过建立数值回归方程和解耦控制运算等数学方法，分别建立了关于贫瘦煤最低着火温度和最大爆炸压力的计算模型，和关于各喷吹子系统数学监控计算模型。最后将相关数学计算模型进行集成，应用 Visual Basic 6.0 开发了“高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统”，该系统具有模型计算、信息收集、信息查询和统计分析等功能，能够为高炉喷吹贫瘦煤系统提供软件支持平台。

根据在首钢、武钢等现场所获得现场的运行数据，利用“高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统”软件对高炉喷吹贫瘦煤的实际过程进行了仿真模拟，取得了理想的效果，从而对模型的合理性和实用性进行了验证。

本文的研究成果能够为我国高炉安全喷吹贫瘦煤提供技术支持，有利于节省我国炼铁生产的成本、减小环境的污染，符合我国可持续发展的需要。

**关键字：**高炉喷吹；贫瘦煤；自动监控系统

## **Research on security monitored control system for meager-lean coal injection in BF**

### **Abstract**

Injecting coal dust in blast furnace(BF) is a kind of technology widely used for modern BF iron-making production in order to reduce the ratio of coke, improve the iron-making cost and smelting process of BF. Anthracite coal was the main coal for BF injection before, but the resource of anthracite coal is limited and can not sustain the long-term development of BF injection technology. Volatility of meagre-lean is higher than anthracite coal and the combustibility and reactivity is better than anthracite coal. So while the meagre-lean coal is regarded as the coal for BF injection by more and more institutions, research of its security should be made completely. Settling the security of BF injection system using meagre-lean will not only develop the technology of BF iron-making but also save the cost of iron-making. And it can create good economic and social returns at the same time.

This study introduced the process flow of BF injection and identified every danger elements in the technology process of BF based on safety assessment theory. Mathematical models of meagre-lean coal's Minimum Ignition Temperature and Maximum Explosion Pressure and monitor models of each system were constructed through regression equation and decoupling control calculation. The software named security monitor system for meagre-lean coal injection in BF was programmed using Visual Basic 6.0. And this software can be used in model calculating, information gathering and statistic analyzing. It can also provide information support for meagre-lean coal injection in BF.

Finally, a survey was conducted in iron-making of ShouGang and WuGang. Analog simulation of practical process was made by the security monitor system for meagre-lean coal injection in BF based on some operating information. And perfect results were obtained and the practicability and rationality of the models are proved.

Our research production can provide technical support for injecting meagre-lean coal in BF safely in our country, save cost of iron-making production, reduce environmental pollution and extend the kind of coal for BF injection. So this production brought great economic and social benefits.

**Key Words: blast furnace injection; meager-lean coal; automatic monitored control system**

## 独 创 性 说 明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

签名： 金岩辉 日期： 2007.3.9

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵循此规定)

签名： 金岩辉 导师签名： 王彦哲 日期： 2007.3.9

## 引 言

高炉喷吹煤可以节约焦炭、降低成本，是现代高炉炼铁生产的重大技术进步。过去，高炉以喷吹无烟煤或无烟煤与烟煤的混合煤为主，近几年随着喷煤量的迅速增长，喷吹用煤资源已经成为限制高炉喷煤发展的瓶颈。研究开发我国储存丰富的贫瘦煤喷吹技术，对钢铁行业扩大喷吹煤种的选择范围，从而进一步降低炼铁生产成本具有重要的意义。

在全面推广高炉喷吹贫瘦煤技术的过程中，需要涉及到贫瘦煤安全性的机理研究、喷吹工艺流程的危险源辨识和安全性评价，以及贫瘦煤在高炉喷吹生产过程中的安全性验证等内容。但到目前为止，国内科研机构对以上相关内容的研究还处于起步阶段。

本文将以潞安贫瘦煤的爆炸性研究数据为基础，结合对高炉喷煤工艺危险源的辨识和安全性分析，通过建立关于贫瘦煤最低着火温度和最大爆炸压力的计算模型以及关于监控喷吹系统的数学计算模型，并应用计算机自控技术实现模型对高炉喷吹贫瘦煤的控制功能，为高炉喷吹贫瘦煤的安全生产提供技术支持，保证炼铁生产的安全性、连续性和稳定性，提高企业的安全生产绩效。

## 1 文献综述

高炉喷吹煤粉是从高炉风口内向炉内直接喷吹磨细了的无烟煤粉、烟煤粉或这两者的混合煤粉，以替代焦炭起提供热量和还原剂的作用，从而降低焦比，降低生铁成本<sup>[1]</sup>。它是现代高炉冶炼的一项重大技术革命，是炼铁系统结构优化的中心环节，有着重大的战略意义。

高炉喷吹工艺流程包括原煤储运系统、制粉系统、煤粉输送系统、喷吹系统。整个煤粉在储运、制粉、输送过程中，会产生大量的煤粉，对工人的身体健康和周围的环境都产生了巨大的危害<sup>[2]</sup>。由于煤具有一定的挥发性，当煤粉浓度达到临界浓度时，而且周围环境氧气浓度达到 15% 以上时，就可能引起煤粉爆炸，发生事故。特别是在制粉系统和输送过程中，煤粉的挥发性大，很容易引起爆炸，发生重大的事故<sup>[3]</sup>。在喷吹系统中，喷吹时由于在高炉喷吹口处温度高、氧气浓度大，煤具有较大的挥发性，煤粉浓度很容易达到  $1500\text{mg}/\text{m}^3$  的爆炸界限，爆炸性危险性较大，影响高炉的生产。

煤尘的爆炸行为可以区分为两类：一类是燃烧速度加剧，燃烧反应释放的热量来不及散逸，从而发生瞬间积累，在有限空间(密闭容器)内引起其周围介质温度骤然升高，气体体积急剧膨胀而发生的爆炸；另一类是由于爆炸而导致火焰传播速度急剧增加，形成具有高能量的冲击波，从而产生爆炸<sup>[4]</sup>。实际煤尘的爆炸很可能是这两类的合成。

例如，1963 年 3 月 10 日上午 10 时 20 分，首钢一高炉 4 号热风炉因燃烧阀不严漏风，传送风后热风漏入燃烧器，而由燃烧器相连的焦炉煤气管道上最下面的阀门下边粘有焦油沥青，上面的阀门也不严，使过量焦炉煤气经阀门进入与燃烧气出口相连的喷吹煤粉输送气管道，从而导致输煤管线内气固流中的 CO 含量过高而引发爆炸<sup>[5]</sup>。炸坏  $\text{Ø}160\text{mm}$  输煤总管和一支  $\text{Ø}108\text{mm}$  烟气支管， $\text{Ø}35\text{mm}$  螺栓被炸断 13 根，经过一昼夜的抢修才恢复生产，造成损失生铁产量 2100 吨、焦炭 392 吨的严重后果。

因此，根据我国高炉喷煤的技术装备现状，在进行高炉喷煤的工艺设计和有关的技术改造中，应该遵循防治结合、以防为主的技术原则，加强对喷煤系统各个环节的安全监测力度，并采用全自动的安全保护和报警设施，从而有效地保证喷煤系统运行的稳定性和高炉生产的连续性<sup>[6]</sup>。

### 1.1 国内外高炉喷煤的安全措施

#### 1.1.1 国外高炉喷煤的安全措施

目前，国外采取防止煤尘爆炸的防护方法主要集中在系统氧浓度的监控和引爆火源的消除方面<sup>[7]</sup>。国外高炉喷吹煤粉的安全防爆措施概括起来可分为两大类：

一类是采用惰性气氛防爆, 又称全系统连续惰化。即在制粉系统用热风炉废气和燃烧炉烟气作为惰化气体和干燥介质, 在输粉和喷粉系统充氮气, 使系统中气氛的含氧浓度维持在安全值(8%~12%)以下。通过监测仪表和自动化装置, 控制温度、压力、氧浓度和 CO 浓度等重要工艺参数, 以保证全过程在惰化气氛下工作, 从而确保系统的防火防爆。日本和欧洲国家的高炉多数应用这类安全防爆系统。如日本加古川 2 号高炉, 川崎 5 号高炉、瑞士 SSAB 公司的律勒欧厂 2 号高炉及奥克塞洛松德(Oxelosund) 厂的 2 号和 4 号高炉等<sup>[8]</sup>。这类防爆技术具有积极的保护和预防效果, 对烟煤的自然有抑制作用, 能有效地控制煤粉火焰的传播, 消除产生爆炸的可能性。但要求备有足够的氮气和方便采用的热风炉废气。

另一类是在制粉系统采用化学药剂灭火, 采取抑爆措施, 在喷吹系统采用连续惰化与抑爆相结合的措施。如美国阿姆科公司的 1 号高炉 1981 年改造建成第三代喷吹烟煤系统, 即在制粉系统采用敏感元件和高速喷射化学灭火剂等抑爆装置, 在粉仓和喷煤罐则采用抑爆装置与充氮相结合的措施。后来日本新日铁、荷兰霍戈文以及韩国光阳厂的高炉相继地采用了这种防爆系统。这类方法的优点是一旦发生着火和爆炸, 能快速自身灭火和阻爆, 但对检测元件要求极高, 维护工作量大, 且不能抑制煤粉的自然<sup>[9]</sup>。

从目前发展趋势看, 国外大型高炉喷吹煤粉多数采用了第一类防爆系统。

### 1.1.2 国内高炉喷煤的安全措施

国内经过技术改造和技术引进, 国内主要采用惰性气体防爆系统, 并在鞍钢、武钢、首钢和宝钢等大型高炉上成功的进行了安全喷吹的工艺实践。现在我国炼铁厂的喷煤系统主要采用的安全措施如下<sup>[9]~[11]</sup>:

(1)降低系统内部气氛含氧浓度, 系统内部气氛惰化, 减少系统漏风。利用高炉热风炉废气作为制粉系统的干燥剂以减少系统的含氧量, 从而破坏煤粉自燃条件; 使用惰性气体  $N_2$  作为保护性气体; 在煤粉容易沉积的布袋集尘器上使用  $N_2$  作为防吹风的气体, 并在煤粉仓及厂内设置  $N_2$  管道; 采用监测仪监测制粉系统的含氧量; 严格控制磨煤机的出口温度, 加强对布袋集尘器及煤粉仓的温度监测; 喷吹罐采用  $N_2$  充压; 制粉系统全负压操作, 不让煤粉向外泄漏; 系统内的气体要经过惰化, 使其氧浓度始终处在 $\leq 12\%$ 的条件下; 煤粉仓也要经常惰化; 高压容器的充压和流化均使用氮气, 随时监测系统内的气氛比率, 一旦某气体比率超标, 保护系统自动开启  $N_2$  保护, 以保护系统喷吹作业的安全。

(2)消除系统火源, 防止系统内部积粉, 防止外部积粉和漏粉, 防止系统内部结露, 消除静电火花和明火。为防止煤粉在仓内堆积成死料柱, 煤粉仓采用双曲线煤斗, 煤

粉仓装满后总储存时间不宜过长；

(3)在制粉设备、煤粉仓、输煤管道及储煤罐、喷吹罐等压力容器处改进防爆泄漏装置，采用定压防爆膜。

(4)加强监测力度，包括喷煤系统温度控制、压力和气体流量测控、CO 和氧的浓度监测；在磨煤机、布袋、煤粉仓等处需设置氧浓度监测系统，以便在达到最大值时，紧急充氮并停机。

(5)采用全自动的安全保护和报警设施。包括：当喷吹罐的压力及温度超过安全范围时，能自动报警及自动泄压；喷吹压力低于高炉热风压力时，自动中断喷煤。

(6)常规防火设施。包括在各操作室设干粉灭火器；粉仓、布袋增设灭火设施。煤粉制备系统的磨煤机、粗粉分离器、脉冲布袋收尘器和煤仓均设有防爆装置及蒸汽灭火装置。

## 1.2 高炉喷煤实时安全监控系统综述

### 1.2.1 高炉喷煤实时安全监控系统的技术基础

如果说高炉喷吹煤粉的“基础自动化”改造，用计算机实现高炉喷煤过程各控制子工序的自动化控制，是实现高炉喷煤自动化控制的基石，那么在今天信息化时代，建立喷煤工艺流程的计算机网络系统，实现喷煤过程的“信息化”，则是实现整个高炉冶炼过程“智能控制自动化”不可或缺的组成部分<sup>[12]</sup>。

在基础自动化改造中，人们用 2~3 台计算机在喷煤主控室替代几十块高炉喷煤系统中的仪表与模拟盘，实现了高炉喷煤进程工艺参数的集中监控。这毕竟只是高炉生产中应用计算机的初级阶段。

以信息网络化为基础，“高炉喷煤实时安全监控系统”可以实现喷吹过程信息与数据的资源共享，实现管理部门、技术部门、与喷吹主控室、各操作岗位在管理决策——技术分析——操作控制上的三位一体应用。与基础自动化中的信息集中监控相比，“高炉喷煤实时安全监控系统”对信息的处理与应用则是更高一级的应用阶段。

在网络化运行的“高炉喷煤实时安全监控系统”中，技术厂长可以直接监控喷煤系统工长的实时操作情况，可以对高炉生产进行宏观优化决策；技术科工程师可以在线进行喷煤操作的优化技术分析；数据库主机实时记录的数据在网络上的及时传送，实现了工长操作过程信息预处理和模型计算的自动化；工长在工作站的人机会话界面上看到的信息不再仅仅室原是数据，而是包括经过复杂工艺计算和数学模型处理得到的、对操作控制具有重要指导价值的规律性结论和提示<sup>[13]</sup>。

信息网络化为高炉喷煤过程的智能控制自动化打下了坚实的基础。

### 1.2.2 高炉喷煤过程中应用实时安全监控系统的必要性

高炉喷煤过程中应用实时安全监控系统，主要是因为以下几方面要求：

#### (1) 实现安全生产现状的要求

由于煤粉是易燃易爆物品，因而在煤粉生产、输送、喷吹的整个过程中，都要保证各环节的安全可靠性。实现高炉喷吹企业采用计算机自动监测和控制系统对喷煤实施全过程监测，控制煤粉的温度和粉尘中的氧含量，在开、停机时进行消防充氮，并结合喷吹用煤的特性以及现场的喷吹流程，采用配煤、贮煤场配煤、磨煤机增设除铁器消除研磨过程中电火花等多项措施，提高整个喷煤流程的安全性具有重大意义<sup>[14]</sup>。

在炼铁过程中，煤粉的制备、储存、输送以及喷吹过程有着较大的安全隐患，因此这个过程的工艺参数不仅可以反映安全信息，对操作人员了解设备运行情况及时发现处理问题，并做出下一步操作的决策也有着非常重要的影响，而这些参数数量多且变化快，因此对这些数据进行实时、可靠的监测就非常重要。

#### (2) 实现节能降耗，压缩生产成本的要求

高炉炼铁作为钢铁联合企业的上游工序，其能耗约占企业能耗 60%，成本约占 1/3<sup>[15]</sup>。而高炉喷煤工艺分别占高炉炼铁总能耗的 40%，炼铁总成本的 20%。显然，高炉喷煤系统的节能降耗在企业降低生产成本中占有重要的地位。在挖掘高炉生产潜力的各种措施之外，推进高炉喷煤过程的自动化监控当然是生产企业的首选目标。

#### (3) 加强喷煤系统运行的稳定性，保证高炉顺行的要求

由于喷吹煤粉过程操作控制的复杂性，我们时常看到喷煤系统发生的工艺故障导致的事故，给高炉生产带来巨大的损失。越是大型高炉，这种经济损失越大。如果仍然停留在工长各自经验操作的基础上，类似事故就难免再次发生。随着喷煤装备的复杂性与操作技术水平的提高，要进一步保证喷煤系统运行的稳定性，仅靠工长个人经验是难以实现的<sup>[16]</sup>。

高炉喷煤实时安全监控系统作为人的智力劳动的延伸，作为专业操作人员经验与智慧的结晶，各种知识、规则借助于计算机技术和信息技术的进步，能够及时地、自动地判断喷吹过程中发生的各种异常状况，从而避免了人为的疏忽，为工长精细化操作赢得了时间和经验<sup>[17]</sup>。这样，使用高炉喷煤实时监控取得经济效益也就是顺理成章的事情了。

### 1.2.3 安全监控预警系统设计要求

一般情况下，计算机监控系统是由过程控制级设备、监控控制级设备、管理级设备组成的多级体系，它们通过网络相连接<sup>[18]-[19]</sup>。过程级设备从过程对象采集实时数据，按预先组态好的控制策略，接受操作人员的控制指示，实现对过程对象实时控制；

操作人员通过监控级设备，监视过程对象及控制装置的运行情况，并通过网络，向过程即发出指令，敢于过程对象的控制，同时可进行数据分析和报表打印；管理级设备可以接受监控管理级按规定的格式远传过来的数据，供统一调度。

近年来，人工智能等方面的理论和实际应用技术也逐渐引入到劳动保护和安全生产领域，产生了新型、快捷的监测仪器和监控系统<sup>[20]</sup>。完善的监控预警系统应兼有过程控制和安全监控及预警的功能。其设计思想有两个目的<sup>[21]-[22]</sup>。

(1)生产工艺的过程控制和安全监控之间的矛盾具有普遍性。因为企业以完成生产任务为中心，过程控制使生产工艺稳定，并带来效益；安全监控虽然不能直接带来直接的经济效益，但是通过安全监控保证系统正常运行，从而间接带来较大的经济效益。若所设计的系统既能对生产工艺进行比较理想的控制，使企业受益，又能在异常情况时发出预警信息，紧急情况下恰到好处地自动采取措施，把安全技术渗透到工艺中去，避免事故的发生或将事故危害和损失降到最低程度。

(2)单纯的安全监控预警系统不可能经常动作，因为异常状态不可能经常出现，长时间处于正常工况，过程控制系统发挥主要作用，安全监测预警系统显然用处很少。不少案例表明，一旦出现事故前兆，安全监控系统的预警行为可能引不起人们的注意而酿成大祸。鉴于此，现代生产工艺的过程控制和安全监控预警功能应融为一体，组成一个包括过程控制，安全状态信息监测与实时仿真预警、应急控制、自诊断以及专家决策功能的综合系统。

设计工业危险源安全监控及预警系统，运用安全科学的理论和方法，借鉴系统论、控制论和信息论及相邻学科的经验，对危险源进行全面的安全评估，给出相应的对策<sup>[23]</sup>。对其中可采用监控预警措施来防止事故发生或将事故抑制在最小范围的危险工艺设备和作业环境，需要找出表征危险源安全状态信息的可观测参数，确立有效的防护措施并自动、可靠地实现。

#### 1.2.4 计算机实时安全监控系统在高炉生产过程中的应用

武钢 5 号高炉实时监控计算机系统分为两级。第一级由 PLC 电气控制系统、TDC-3000 数字控制系统和红外摄像仪计算机系统组成；第二级为监控计算机系统。该机为 SOLAR SPS5/70 型，字长 16 位，内存 8MB，有浮点运算器和 I/O 处理。系统控制范围包括：贮矿槽、槽下配料上料、无料钟炉顶、高炉本体，热风炉等主要工艺生产设备，并与煤粉喷吹、干法除尘、TRT 法鼓风机站和高炉渣水装置等有信息联系<sup>[24]</sup>。

### 1.2.4.1 系统组成

SOLAR SPS5/70 机采集和贮存一级计算机送来的全部信息和数据。这些数据有原料数据、生产工艺数据、生产过程数据等的加工处理，还有设备方面等信息。

这些信息根据高炉的生产特点及要求，无论在高炉主控室还是在机房，均可方便地进行人机会话，随时可查看实时或历史的各种数据，以及查看模拟画面、趋势曲线、连续控制回路故障显示、生产报表、在线统计、数学模型等信息。全部监控软件是在 BOS-16 操作系统下，使用 SOLAR 计算机的专用语言 PL-16 编程。主要监控程序流程图如图 1.1 所示。

### 1.2.4.2 主要应用软件功能与特点

#### (1) 主要应用软件功能与特点

- 1) 启动/保存应用程序；
- 2) 打开各类文件；
- 3) 建立 SEMAPHORES(信号灯)；
- 4) 初始化 ZDR 和 CDA；
- 5) 屏幕初始化；
- 6) 每 20s 把 ZDR 和 CDA 数据存入指定文件；
- 7) 启动“查询”程序。

#### (2) 存数值程序

1) 存数值是由连接 TDC—3000 程序每 20s 启动一次；

2) 在 CDA 中读来自 TDC—3000 和 PLC 的数据；

3) 在 ZDR 中读不同时间段的趋势曲线数据，如果读到了，则显示相应的趋势曲线；

4) 分别将不同时间段的数据经处理后送入相应的数据文件；

5) 每 20s 返回“启动/保存”主程序并启动计算程序。

#### (3) 计算程序

- 1) 计算和写数据
- 2) 在 CDA 中写入数据

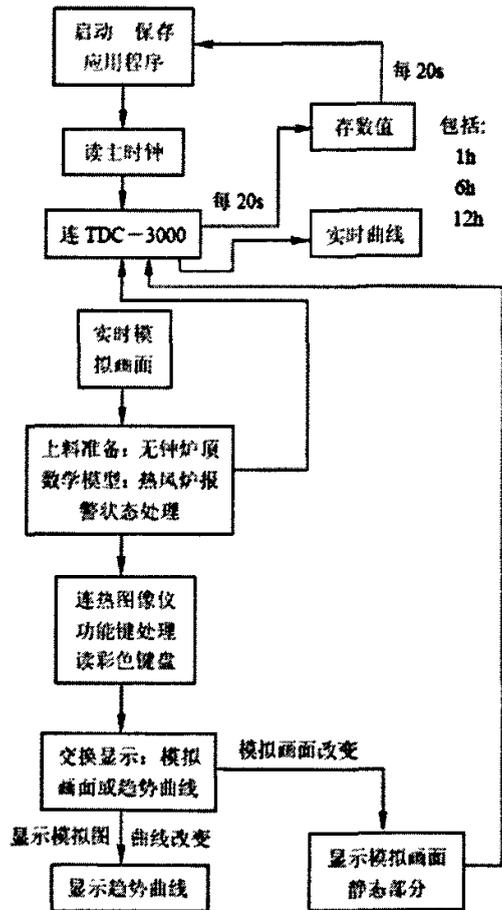


图 1.1 主要监控程序流程图

#### (4) 查询程序

查询程序管理输入信息，这个程序周期地监视各终端，当有信息输入，“查询”程序存数据到公共数据区，并启动“输入/输出”管理程序，把终端号送入该程序。

#### (5) 输入/输出管理程序

这一程序分析进入的数据，如果用户任务被请求，该程序标出特征。根据不同的生产操作要求，信号的要求也就不同，因此在软件设计中采用积木式结构，将整个系统的调用分为若干个子系统，而每个子系统又由若干个程序包组成。每个程序可完成某一方面的独立功能。由于高炉系统庞大，数据读写频繁，因此，在程序设计中尽量使程序少占内存。在程序设计中，采用分支调用，使用覆盖技术，对于每一个程序包，均由一个根程序和若干个分支程序组成。在系统运行中，根程序常驻内存，而各个分支程序均由根程序调用。每次调一个分支程序到覆盖区执行，这样既节省了程序占用的内存空间和系统的开销，而且在系统调整时也便于分支的剪接和调整。主要分支模块如图 1.2 所示。

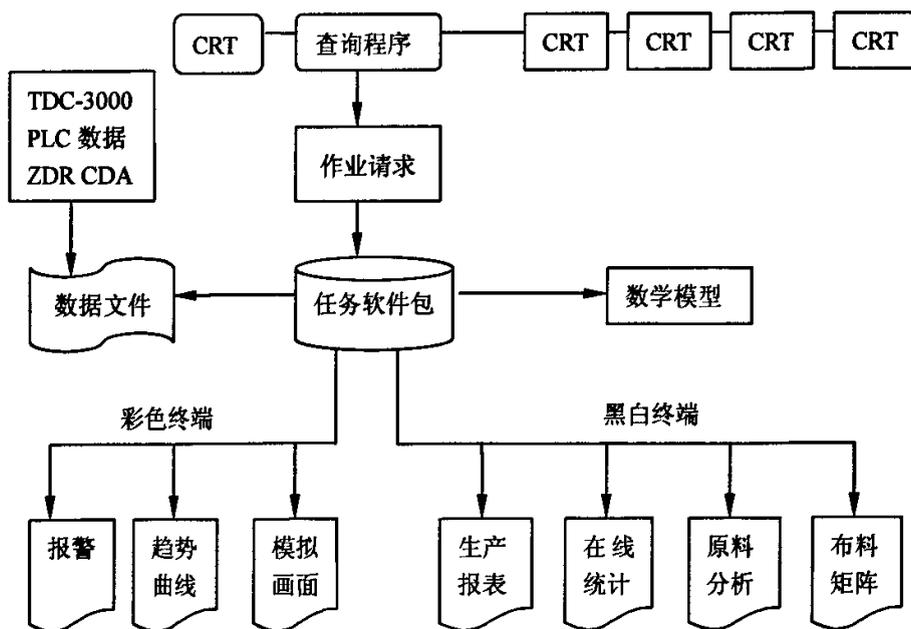


图 1.2 输入输出管理系统结构图

SOLAR 计算机有一个离线的工作后台，专门用于应用程序的维护及开发。

### 1.2.4.3 监控计算机信息流的结构设计

监控机的生产信息来自于一级计算机，这些信息以点对点的串行通讯方式由监控机与一级机的通讯协议来完成。

监控机中设有与 PLC 的通讯任务，一旦监控机启动，则送给 PLC 一特定的信号，PLC 接到信号后将按规定的原则将高炉的各种数据信息发送给监控机预先定义的变量地址，这些地址以文件的形式存在计算机内存。

根据 SOLAR 机和 PL-16 语言的特点，设计出数据信息流的逻辑结构，存贮结构和物力结构，如图 1.3 所示。

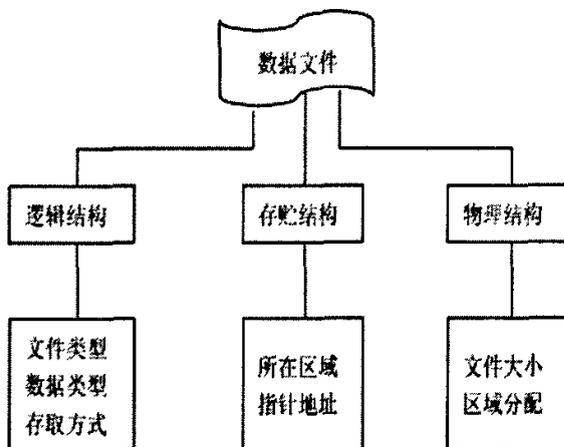


图 1.3 数据信息流逻辑结构图

根据数据文件的结构，设计程序就变得十分清楚。以生产报表为例，对这些数据文件的描述如下：

- (1) 文件名，扩展名；
- (2) 文件号；
- (3) 功能；
- (4) 功能部件；
- (5) 文件存取方式；
- (6) 是永久文件(或临时文件)；
- (7) 记录数；类型、长度。

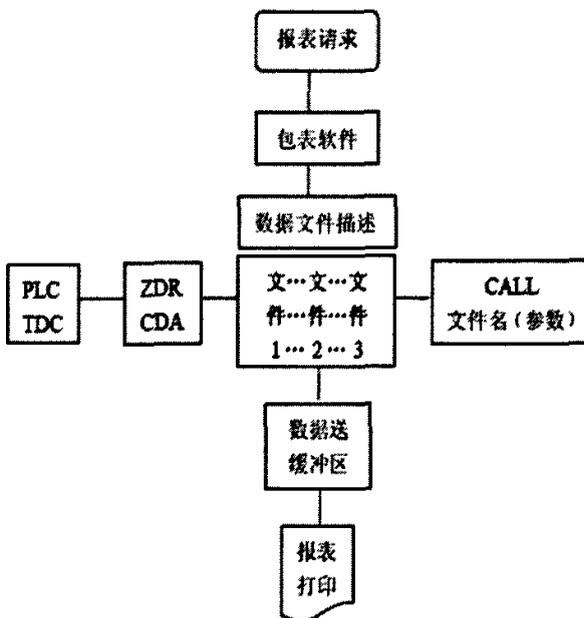


图 1.4 报表处理流程图

根据报表请求发出的参数就可以确定出记录的指针位置,如图 1.4 所示。指针的位置是根据文件的大小,记录的长度计算而得出。PL—16 语言使用起来就像其他高级程序设计语言,但它也具有汇编语言的特点。对于文件的调用,PL—16 语言可用简单的 CALL 文件名(参数),就将指定的参数带入文件及程序段中进行操作。这些参数可以是常量,也可以是变量。PL—16 语言对于软件的维护和开发是十分方便的。

#### 1.2.4.4 监控信息系统的特点

- (1) 具有广泛的人机交互环境,便于不同层次的应用人员进行检索、系统综合和分析预测。
- (2) 程序编制灵活,功能强,采用积木式结构,扩充方便,易于开发。
- (3) 优化的信息存贮结构,妥善解决了信息的自治与共享。
- (4) 数据操作方便,灵活,易于掌握。

自从武钢五号高炉投产以来,该系统已成功地达到了预期的效果。监控 SOLAR 机与过程机的联机使用,信息交换、分析处理各种生产工艺数据,使该系统对生产起到了较好的监控作用,同时也发挥了生产管理的潜在功能。

本系统投入运行后,运行稳定、可靠,目前在高炉监控信息系统方面仍处于先进行列。

### 1.3 课题的技术路线和主要研究内容

本文是根据潞安贫瘦煤的特性,在测定出高炉喷吹用潞安贫瘦煤的安全行为参数的基础上,通过数学建模并结合工业生产中高炉喷煤的流程,深入探索研究高炉喷吹贫瘦煤的安全监测及调控参数,并编制出高炉喷吹贫瘦煤实时安全监控系统的计算机程序。

#### 1.3.1 技术路线

本文采用的技术路线如图 1.5 所示。通过对高炉喷煤系统工艺流程的研究以及结合现场的实际喷吹工艺,对喷吹过程中的各个环节进行危险源辨识,并建立安全监控评价模型;再通过对大量现场运行数据进行数学分析,将各个模型进行集成,开发高炉喷煤实时安全监控系统;最后对所开发的软件进行实例应用。

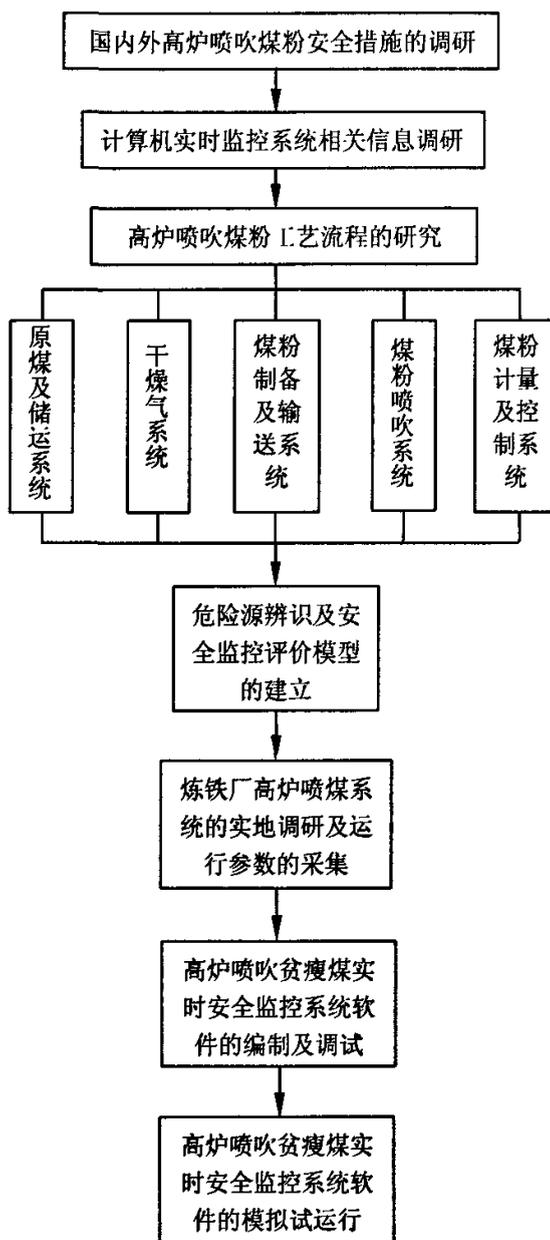


图 1.5 本文技术路线流程图

### 1.3.2 主要研究内容

本课题主要研究高炉喷吹贫瘦煤工艺的安全性问题，具体研究内容包括如下 5 部分：

(1) 高炉喷煤系统工艺流程的研究，包括五个方面的内容：原煤性能及储运系统，干燥气系统，煤粉制备及输送系统，煤粉喷吹系统以及煤粉的计量与控制技术，为高

炉喷煤系统危险源辨识及安全性评价提供了理论基础。

(2) 潞安贫瘦煤的爆炸性参数测定, 包括对煤粉的挥发分、最低着火点、最低可燃浓度、爆炸烈度、最大压力上升速率、最大爆炸压力等参数。

(3) 高炉喷煤系统进行实地调研, 就喷吹系统的实际运行参数进行现场采集, 再应用安全评价原理对高炉喷煤系统的危险性因素进行分析, 建立安全监控评价的量化模型。

(4) 高炉喷吹贫瘦煤安全操作参数的确定及其监控程序的编制。通过以上三步的研究, 制定出高炉喷吹潞安煤相应的操作控制参数(如热风炉、中速磨、集粉器、储煤罐、喷煤罐等地点的安全温度、安全氧量、安全压力等参数), 并结合现场的实际喷吹工艺, 编制出喷吹贫瘦煤安全操作及调控的计算机程序, 为高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统的运行提供软件平台的支持。

(5) 利用计算机仿真技术, 模拟高炉喷煤的实际运行流程, 对所编写的高炉喷煤实时安全监控软件进行实际应用, 验证该软件的可行性和实用性, 并根据应用中出现的问题对软件进行后期调试, 从而确保系统的稳定性。

## 1.4 课题的研究意义

高炉喷吹煤粉是现代高炉炼铁生产广泛采用的技术, 也是高炉冶炼结构优化的关键<sup>[25]</sup>。随着喷吹技术的发展, 如何选择适合喷吹的煤源越来越重要。目前宝钢、鞍钢、包钢等大型企业既喷吹无烟煤又可以喷吹烟煤, 而一些中小企业则只能喷吹无烟煤。无烟煤因变质程度高、挥发分低而燃烧率较低。随着适宜喷吹用无烟煤资源的减少, 无烟煤的灰分也在逐步增高。烟煤变质程度较大, 而且喷入直吹管后在管壁周围分布较多, 容易粘附在喷枪头及管壁上, 形成结渣。因此选择适宜高炉喷吹而又不与炼焦争煤源的煤种无疑具有较大的经济效益<sup>[26]</sup>。

贫煤、贫瘦煤具有基本无结焦, 挥发分及置换比比无烟煤略高, 燃烧性和反应性比无烟煤好等特点, 且贫煤、贫瘦煤质地软、易于磨制, 采用该煤种, 不但可节省磨煤系统的电耗, 提高磨煤机产量, 还可改善煤气利用及还原过程, 高炉喷吹易于接受高温及高富氧率。此外, 与无烟煤相比, 贫瘦煤资源分布广, 可就近喷吹, 缓解运输紧张状况和节省运输的费用等。因此, 贫煤、贫瘦煤被越来越多的机构重视开发成为高炉喷吹煤<sup>[27]</sup>。但贫煤、贫瘦煤与无烟煤相比, 具有挥发分较无烟煤高, 而其安全性尚未进行系统研究、分析与试验等问题。因此, 系统研究贫煤、贫瘦煤的安全性, 解决高炉喷吹贫瘦煤过程中整个喷吹系统安全问题, 必将促进高炉炼铁技术的发展, 节省炼铁成本, 减少环境污染, 并带来巨大的社会效益和经济效益。

本文提出并设计的高炉喷吹贫瘦煤实时安全监控是一种较为先进的实时安全生

产监控软件，能够解决目前我国一些中小型高炉急于提高喷吹贫瘦煤喷吹量但没有大量资金购置国外先进喷煤安全监控软件的矛盾，使中小型钢铁企业在安全提高喷煤量降低焦比的同时也压缩了企业升级设备软、硬件的成本，为企业带来直接的经济效益；同时，通过高炉喷吹贫瘦煤实时安全监控的实施运行，使企业的安全生产水平提高，带来间接的经济效益；高炉喷吹贫瘦煤实时安全监控的最终目标是保证高炉炼铁过程顺行的基础上，保障喷煤系统一线职工的生命安全，促进生产的同时也促进社会和谐发展，从而带来良好的社会效益。

## 2 高炉喷吹煤粉工艺调研与分析

建立高炉喷煤实时安全监控系统的基础是以高炉喷吹煤粉的工艺流程为主要依据,综合考虑喷吹煤粉的理化性参数和工艺性能,并结合喷煤的计量与自控技术,确定高炉喷煤工艺的安全监控参数及操作步骤。因此,本章通过对原煤性能及储运、干燥气系统、煤粉制备及输送系统、煤粉喷吹系统和煤粉的计量与控制技术五个环节进行系统而又全面的阐述,为高炉喷煤系统危险源的辨识及安全性评价提供了理论基础。

### 2.1 原煤性能及储运

#### 2.1.1 煤的分类

不同的煤在外表特征、理化性质和工艺性质上都有很大的差别。根据成煤物质和成煤条件不同,人们把煤分为三大类:腐植煤、残植煤和腐泥煤。腐植煤是人类使用最多的煤,按其煤化程度可分为泥煤(泥炭)、褐煤、烟煤和无烟煤四大类<sup>[28]</sup>。

泥煤与褐煤的工业价值不大,且不适于远地运输和长期储存,只可作为地方性燃料在产区附近使用。

烟煤是一种炭化程度较高的煤。它的挥发分较少,密度较大(真密度  $1.2\sim 1.45\text{kg/m}^3$ ),吸水性较小,含碳量增加,氢和氧的含量减少。烟煤是冶金工业和动力工业不可缺少的燃料,也是化学工业的重要原料。烟煤的最大特点是具有粘结性,这是其他固体燃料所没有的,因此它是炼焦的主要原料。有关部门又根据粘结性的强弱及挥发分产率的大小等物理化学性质,进一步将烟煤分为:长焰煤、气煤、肥煤、结焦煤、瘦煤和贫煤等不同的品种。其中,长焰煤和气煤的挥发分含量高,因而容易燃烧和适于制造煤气。结焦煤具有良好的结焦性,适于生产优质冶金焦炭,但因在自然界储量不多,通常在不影响焦炭质量的情况下与其他煤种混合使用。近年来由于适于炼焦的煤在减少和炼焦工艺对环境的污染破坏,炼焦生产的发展受到限制,因此大量采用高炉喷吹煤粉来代替焦炭,烟煤中凡结焦性差的煤可用来做高炉喷吹用煤,如贫、瘦煤、结焦性很差的气煤。

无烟煤是矿物化程度最高的煤,也是年龄最老的煤。它的特点是密度大(真密度  $1.4\sim 1.7\text{kg/m}^3$ ),含碳量高,挥发分极少,组织致密而坚硬,吸水性小,适于长途运输和长期储存。无烟煤的主要缺点是受热时容易爆裂成碎片,可燃性差,不易着火。但由于其发热量大(约为  $29000\text{J/kg}$ ),灰分少,含硫量低,因此受到重视,是我国现行高炉喷煤的主要煤源。

另外,煤还可以根据其用途进行分类,各国及各行业采用不同的分类方法,我国煤的分类见表 2.1。

表 2.1 我国煤的分类

| 大类  | 小类    | 分类指标及范围             |                  | 大类       | 小类    | 分类指标及范围             |                  |
|-----|-------|---------------------|------------------|----------|-------|---------------------|------------------|
| 名称  | 名称    | 挥发分<br>$V_{daf}/\%$ | 胶质层厚<br>度 $Y/mm$ | 名称       | 名称    | 挥发分<br>$V_{daf}/\%$ | 胶质层厚<br>度 $Y/mm$ |
| 无烟煤 |       | 0~10                |                  | 肥煤       | 2号焦肥煤 | <26                 | >30              |
| 贫煤  |       | >10~20              |                  |          | 气肥煤   | >37                 | >25              |
| 瘦煤  | 1号瘦煤  | 14~20               | 0~8              | 气煤       | 1号肥气煤 | >30~37              | >9~14            |
|     | 2号瘦煤  | 14~20               | >8~12            |          | 2号肥气煤 | >30~37              | >14~25           |
| 焦煤  | 瘦焦煤   | 14~18               | >12~25           |          | 1号气煤  | >37                 | >5~9             |
|     | 主焦煤   | >18~26              | >12~25           |          | 2号气煤  | >37                 | >9~14            |
|     | 焦瘦煤   | >20~26              | >8~12            |          | 3号气煤  | >37                 | >14~25           |
|     | 1号肥焦煤 | >26~30              | >9~14            | 弱粘<br>结煤 | 弱粘结1号 | >20~26              | 0~8              |
|     | 2号肥焦煤 | >26~30              | >14~25           |          | 弱粘结2号 | >26~37              | 0~9              |
| 肥煤  | 1号肥煤  | 26~37               | >25~30           | 不粘<br>煤  |       | >20~37              | 0                |
|     | 2号肥煤  | 26~37               | >30              | 长焰<br>煤  |       | >37                 | 0~5              |
|     | 1号焦肥煤 | <26                 | >25~30           | 褐煤       |       | >40                 |                  |

注：从贫煤到长焰煤 8 个煤种统称为烟煤。

煤按用途分类一般是采用适合本国的工业分类方案即按照不同工业用途对煤提出的各种要求进行分类的,我国分类方案是以煤的干燥无灰基挥发分( $V_{daf},\%$ )和胶质层最大厚度( $Y,mm$ )为分类指标。所谓胶质层厚度是模拟工业条件,对装在煤杯中的煤样进行单侧加热,测定其产生的胶质层厚度  $Y$ 。一般煤的  $Y$  值越大,粘结性越好。 $Y$  值随煤的变质程度呈现有规律性的变化,一般当煤的  $V_{daf}$  为 30%左右时,  $Y$  出现最大值; $V_{daf}<13\%$ 的煤和  $V_{daf}>50\%$ 的煤,  $Y$  值几乎为零。我国煤分类是以炼焦煤为主的,从表 2-1 可以看出,  $V_{daf}$  在  $>14\sim 20$ , 而  $Y$  在  $0\sim 8$  或  $Y>8\sim 12$  的是瘦煤, 而  $V_{daf}>26\sim 37$ ,  $Y$  在  $>25\sim 30$  是肥煤; 处于瘦煤与肥煤之间的为焦煤。这三种煤都是炼焦的主要配煤。

高炉喷吹煤粉是用来代替焦炭的, 所以它用的煤是属于非粘结性煤, 也就是非炼焦煤<sup>[29]</sup>。喷吹用煤在煤分类中属于无烟煤、烟煤中的贫煤、瘦煤、以及不粘煤。

### 2.1.2 煤的物理性质

(1) 视密度：指 20℃时煤(包括煤的孔隙)的质量与同体积水的质量之比。过去叫做视比重，按我国法定计量单位规定应叫做视(相对)密度<sup>[30]</sup>。其表示符号：ARD(Apparent Relative Density)。

(2) 真密度：指 20℃时煤(不包括煤的孔隙)的质量与同体积水的质量之比。过去叫做真比重，按我国法定计量单位规定应叫做真(相对)密度。其表示符号：TRD(True Relative Density)。

(3) 表面积：指单位重量的煤粒，其表面积的总和叫做这种煤在该粒度范围下的比表面积，单位为 mm<sup>2</sup>/g。煤的比表面积是煤的重要性质，对研究煤的破碎、着火、燃烧反应等性能均有重要意义。

(4) 可磨性及可磨性指数：煤的可磨性是指煤研磨成粉的难易程度。它主要与煤的变质程度有关，不同牌号的煤具有不同的可磨性，一般来说，焦煤和肥煤的可磨性指数较高，即易磨细，无烟煤和褐煤的可磨性指数较低，即不易磨细。此外还随煤的水分和灰分的增加而减小，同一种煤，水分和灰分越高，其可磨性指数就越低。

可磨性及可磨性指数是反应喷吹煤性能的重要指标，工业上根据可磨性来设计磨煤机，估算磨煤机的产率和能耗，或根据煤的可磨性来选择合适某种特定型号磨煤机的煤种和煤源<sup>[31]</sup>。

某一种煤的可磨性指数是将此种煤磨碎到与标准煤同一细度所消耗电能的比值(K)：

$$K = \frac{\text{标准煤磨碎到一定细度所消耗的电能}}{\text{某种煤磨碎到同一细度所消耗的电能}}$$

历史上常用的有苏式可磨性指数(K<sup>BT</sup>)及哈氏可磨系数(HGI)两种，现在国标规定使用哈氏指数。

哈氏可磨性指数的理论依据是磨碎定律，即将固体物料磨碎成粉时所消耗的能量与其所产生的新表面积成正比，其计算公式：

$$K = \frac{k}{E} \cdot \Delta S \quad \text{公式(2-1)}$$

式中  $E$ —磨碎物料时所消耗的有效能，kJ；

$k$ —常数，与其他的能量消耗有关；

$\Delta S$ —物料研磨后增加的表面积，mm<sup>2</sup>；

$K$ —物料可磨性指数。

由于直接测量研磨中消耗的有效能量  $E$ 、常数  $k$  和比表面积  $S$  都很困难，因此不能从  $E$  和  $k$  求出可磨性指数的绝对值。哈氏法可磨性指数的计算公式是选择美国宾夕

法尼亚州某煤矿的煤为基准煤，并规定其哈氏指数为 100，采用反推法推导出来的。省略推导过程，哈氏可磨性指数计算公式为：

$$K=13+6.93(50-m) \quad \text{公式(2-2)}$$

式中 50—研磨前试样总重 50g；

$m$ —200 号筛上物质量。

虽然用公式计算较为简便，但由哈氏法的原理可知，只有确保测定条件符合要求时，公式计算才能得到准确的结果，所以用计算法求得的结果误差较大，国际上已不大采用。

目前普遍校准图法来处理试验结果。即用国际可磨性标准煤样(由美国标准与材料试验协会[ASTM]统一提供)对仪器设备进行校正，做出标准可磨性指数值与 200 号筛筛下物质量，从标准图中查出可磨性指数值。这样，就可以消除由于仪器设备及操作人员带来的系统误差，从而得到准确的、在国际上都一致的可磨性指数测定结果。

我国几种常用喷吹煤哈氏可磨系数如表 2.2 所示。

表 2.2 我国常用喷吹煤哈氏可磨系数表

| 喷吹煤种    | 哈氏可磨系数 HGI |
|---------|------------|
| 阳泉喷吹无烟煤 | 70~85      |
| 晋城喷吹无烟煤 | 75~90      |
| 邯郸喷吹无烟煤 | 70~85      |
| 大同喷吹烟煤  | 40~50      |
| 神府喷吹烟煤  | 40~60      |
| 潞安喷吹贫瘦煤 | 50~60      |

### 2.1.3 高炉喷吹用煤的性质及工艺性能

高炉喷吹用煤的性能应能满足高炉冶炼工艺要求和对提高喷吹量和置换比有利，以便替换更多的焦炭，因此选用的喷吹煤种应满足以下要求<sup>[29]</sup>：

- (1) 煤的灰分越低越好，灰分含量应与使用的焦炭灰分相同，一般要求  $A < 15\%$ 。
- (2) 硫含量越低越好，煤的含硫量应与使用的焦炭含硫量相同，一般要求  $S < 1.0\%$ 。
- (3) 胶质层越薄越好， $Y < 10\text{mm}$ ，以免在喷吹过程中结焦，堵塞喷枪和风口影响喷吹和高炉正常生产。

(4) 煤的可磨性好，高炉喷煤需要将煤磨到一定细度，例如-200 目达到 65%~85%，可磨性好，则制粉消耗的电能就少，可降低喷吹费用。

(5) 煤的燃烧性能好，即其着火温度低，反应性强等，这可以使喷入高炉的煤粉能在有限空间和时间内尽可能多地气化，少量未及气化的煤粉也因反应性好而与高炉

煤气中的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  反应而气化, 不给高炉冶炼带来麻烦。另外燃烧性能好的煤也可以磨得粗一些, 即-200 目占的比例少一些, 这为降低磨煤能耗和费用提供了条件。

(6) 煤的发热值越高越好, 喷入高炉的煤粉是以前放出的热量和形成的还原剂  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  来代替焦炭在高炉内提供热源和还原剂。因此煤的发热值越高, 在高炉内放出热量越多, 置换的焦炭量也越多。

满足以上条件的配煤或单一煤种在制粉系统中经磨煤机加工成细粉, 对这样煤粉的要求就是粒度、温度和水含量<sup>[32]-[33]</sup>。

(1) 粒度: 它影响煤粉在风口前燃烧带中的燃烧率, 显然煤粉越细比表面积越大, 在风口前的燃烧速度就快, 燃烧率可以提高, 但是煤粉磨得越细, 能耗越大, 磨煤机出力减少, 制粉费用增加, 目前认为, 喷吹无烟煤时, 粒度应小些, -200 目的达到 70%~80%; 而喷吹烟煤粒度则可大些-200 目的达到 60%~65%即可, 而含结晶水的烟煤, 在高炉富氧率较高时, 粒度还可以更粗些, 例如西欧一些高炉喷吹的这种烟煤平均粒度达到 0.5mm。

(2) 温度: 煤粉的温度控制在 70~80℃, 主要是保证煤粉载体——烟气中的饱和水蒸汽不结露, 冷凝的水被煤粉吸附, 影响其运输, 严重时还会使布袋“挂肠”, 管路堵塞。

(3) 水分: 煤粉的水分控制在 2.0%以下。水分大一方面影响煤粉的输送, 另一方面喷入高炉后, 在风口前燃烧带煤粉燃烧时, 带入的水分要分解, 加剧  $t_{\text{m}}$  的下降, 增加补偿热, 无补偿手段时要降低喷吹量。

#### 2.1.4 原煤储运系统工艺流程

原煤储运系统的一般工艺流程如图 2.1 所示<sup>[34]</sup>。



图 2.1 原煤储运系统流程图

原煤通过火车、汽车、船等运到煤场进行贮存与堆放。必须建高炉原煤贮存场, 以便堆放原煤。原煤场一般不设在高炉周围。因煤场占地面积较大, 而且还要考虑便于原煤的贮存、装卸及转运, 故各炼铁厂应根据自己的具体情况确定煤场的位置。煤场一般应设置在制粉车间的主厂房附近。原煤的贮存量应根据煤源距厂区的远近、运输条件、气候及环境条件等来定。若煤源分散、运输条件较差, 雨雪天气多, 则煤场贮煤应适当多些, 反之则可少些。

原煤在煤场由抓斗或装载机送入贮煤槽或漏斗, 经由给煤机、皮带秤、除铁器、筛分破碎装置及运煤机被送到主厂房的原煤仓中。从煤场到原煤仓, 大多采用两种运输方式。一种是用皮带运输机, 它的优点是简单可靠, 维护操作方便。皮带机的提升角度一般定在  $16^\circ$ , 最大不超过  $18^\circ$ , 皮带宽一般为 650mm。另一种是采用斗式提升机和埋刮板输送机, 此两种设备均可倾斜或垂直提升原煤, 其特点是断面尺寸小, 占地面积少、提升高度高, 密封性好, 从而使输煤系统结构紧凑, 但其维护、维修费用较高。为控制原煤粒度和除去原煤中的杂物, 在原煤贮运过程中还须设置筛分破碎装置和除铁器。筛分破碎既可以控制磨煤机入口的原煤粒度, 又可以去除某些纤维状物质。而除铁器则主要用于清除煤中的磁性金属杂物。

## 2.2 干燥气系统

### 2.2.1 干燥气的作用及特性

#### (1) 干燥气在制粉过程中的作用<sup>[35]</sup>

1) 原煤含水分较高, 通常在 6% 以上, 在制成煤粉过程中必须降至 2% 以下, 干燥气就是给制粉系统提供热量, 用来干燥煤粉的介质, 是制粉系统的干燥剂。

2) 干燥气在制粉系统具有一定的运动速度, 可以携带煤粉进行转运和分离。

3) 干燥气能降低煤粉制备系统的含氧浓度, 是制粉系统的惰化剂。

#### (2) 干燥气的种类及适合的煤种

制粉干燥气分: 燃烧炉干燥气、热风炉烟气干燥气和混合干燥气三种。

1) 燃烧炉干燥气: 是将高炉煤气在燃烧炉内燃烧后, 再兑入一定量的冷空气, 使烟气温度降到  $300^\circ\text{C}$  左右, 再经磨煤机入口的负压, 抽入磨煤机中干燥煤粉。它的温度、流量易控制, 但含氧量高, 适合于无烟煤的制粉系统。

2) 热风炉烟气干燥气: 高炉热风炉烧炉时的烟气亦可做为磨制煤粉的干燥气, 既可利用它的余热, 又能惰化制粉系统的气氛, 是实现烟煤制粉系统安全的重要条件。它的温度偏低、波动又大, 一般单独使用较少, 只有在热风炉烟气温度较高的中小高炉制粉系统中有所应用。

3) 混合干燥气: 混合干燥气是热风炉烟气和燃烧炉烟气混合起来的气体, 前者的温度在  $150\sim 300^\circ\text{C}$ , 用量一般为 90%~95%, 后者为  $900\sim 1000^\circ\text{C}$ , 用量占 5%~10%。两者混合后的温度可控制在磨煤机入口要求的范围内( $200\sim 280^\circ\text{C}$ )。此种干燥气, 工艺系统运行可靠, 完全可以满足制粉磨煤机的要求。它适合磨制各种煤, 特别是烟煤, 是制粉系统的常用干燥气。

#### (3) 混合干燥气的组成及其各自的特性

混合干燥气是由 90%~95% 的热风炉烟气和 5%~10% 的燃烧烟气组成。无论是

热风炉的烟气，还是燃烧炉的烟气，都是燃烧高炉煤气的燃烧产物，所以它们成分组成基本相同，只是热风炉烟气含水蒸气偏高、温度较低；而燃烧炉烟气含氧偏高、温度高。其具体特性见表 2.3。

表 2.3 干燥气的组成及其特性

| 项目<br>种类 | 化学成分/%          |                |                |                  | 温度/℃     | 在干燥气中所占比例/% |
|----------|-----------------|----------------|----------------|------------------|----------|-------------|
|          | CO <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O |          |             |
| 热风炉烟气    | 22~25           | 0.5~1.0        | 68~72          | 5~8              | 150~300  | 90~95       |
| 燃烧炉烟气    | 22~25           | 1.0~2.0        | 68~72          | 3~6              | 900~1000 | 5~10        |

### 2.2.2 干燥气系统工艺流程

制粉常用干燥气系统是由烟气引风机、燃烧炉、助燃风机和烟气管道等组成，其工艺流程见图 2.2<sup>[34]</sup>。

热风炉烟气从热风炉烟气总烟道由引风机抽到干燥气发生炉(燃烧炉)与由燃烧炉燃烧高炉煤气新产生的高温烟气相混合，达到 200~280℃送给磨煤机。

以热风炉烟气作为干燥气的主气源，燃烧炉燃烧高炉煤气的高温烟气作为温度不足时的补充气源，同时备用少量的焦炉煤气作为引火及正常生产时的辅助燃料，以防止高炉煤气阀热量值低而易脱火。

干燥气系统与磨煤机有串联布置和并联布置两种方式。

- (1)串联布置：一个干燥气发生炉的干燥气，单独送给一台磨煤机。
- (2)并联布置：多台或一台干燥气炉发生的干燥气同时可送给多台磨煤机。

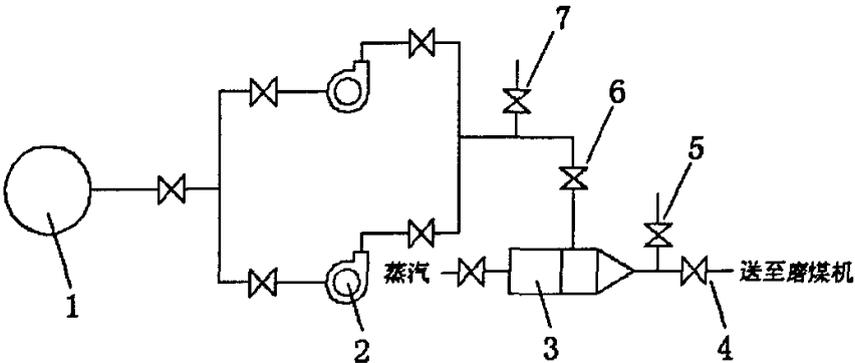


图 2.2 混合干燥气系统工艺流程图

1-热风炉烟气主烟道；2-烟气引风机；3-燃烧炉；4-干燥气隔断阀；  
5-干燥气放散阀；6-烟气调节阀；7-烟气放散阀

串联布置的特点是：

- (1)易控制、能全面满足磨煤机的要求；
- (2)设备配套、减少浪费；

(3)它的缺点是一座干燥气炉出了故障，该磨煤机就得停产。

并联布置的特点是：

(1)有备用炉可相互转换，因干燥气系统故障磨煤机停机机会少；

(2)对干燥气的温度、流量的准确控制较准。

## 2.3 煤粉制备及输送系统

### 2.3.1 制粉系统工艺流程与装置

高炉喷吹煤粉的粉煤制备的任务是将原煤安全地加工成符合喷吹要求的粉煤，主要是粒度要达到 200 目的占 70%以上，水分含量低于 2.0%，并将制备好的煤粉输送到煤粉仓<sup>[36]</sup>。

现在广泛采用的粉煤制备工艺示于图 2.3 所示，这一工艺的特点是煤的烘干和磨细同时进行；烘干煤粉的热烟气又同时是煤粉输送的载体，为将合格的煤粉与输送载体分离设置了常规的旋风和布袋收粉装置。

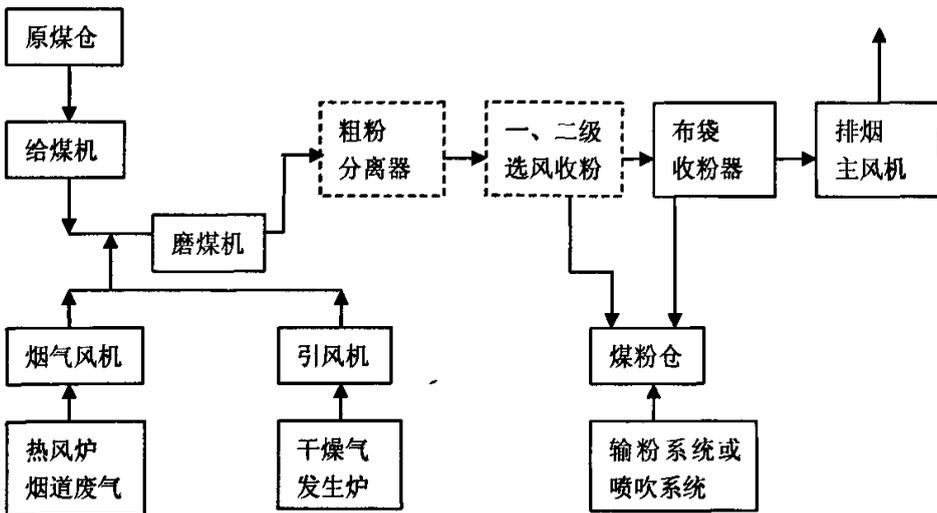


图 2.3 煤粉制备工艺流程

随着技术的进步，这一工艺中的主要设备在不断更新，例如 90 年代新建和大修改造投产的生产线将慢速的球磨机改为中速的碗式或平盘磨煤机，它们自身带有粗粉分离设施，工艺流程中就不再设粗粉分离器，又如高浓度布袋收粉器允许入口浓度达到  $500\sim 1000\text{g}/\text{m}^3$ ，出口排放浓度小于  $50\text{mg}/\text{m}^3$ ，采用这种布袋收粉器后就可以将离心收粉装置去掉；再如粉煤制备系统采用全程负压操作，省去热风炉烟气引风机、排烟风机和布袋后的二次风机，仅在布袋后设置一台主排烟风机等。

(1) 磨煤机的种类：块状物料细磨成粉状使用的磨按其碾磨元件运转速度分类可分为低速、中速和高速三种磨，高速磨用于碾磨硬质物料，在煤粉制备中不使用。目前我国用于磨煤的主要是低速的筒式钢球磨煤机和中速的碗式或平盘式磨煤机。

筒式球磨机长期使用在发电厂磨煤，我国第一代喷煤设计时，绝大部分使用这类磨煤机，其特点是设备价格低，设备简单易维修，对煤质要求不严，但是它占地面积大，耗电量大而且噪音大。

中速碗式磨煤机在我国最早用于喷煤制粉的是上钢一厂。现在 90 年代新设计建造或大修改造的均已采用，国外喷煤均采用此类磨煤机，其特点是设备投资高、结构复杂、维修量大，对煤质要求严格，适宜于磨质地较软的烟煤，但其具有密封性好、占地面积小、耗电量少(仅为球磨机的 50%)，噪音小(小于 85dB)等优点。

(2) 煤粉制备系统给煤机应满足制粉煤量要求并调节煤量灵活准确，同时要保证设备的密封性能好、漏风率低、坚固耐用、易维护等要求。常用给煤机包括以下几种：

1) 圆盘给料机：圆盘给料机又有敞开式和封闭式两种，一般制粉系统常用封闭式。煤量可通过调节挡板插入深度、给煤机圆盘转速和套筒的高度进行控制。这种给煤机具有给料均匀稳定易调节，设备体积小的优点，但漏风系数较大，密封性差，已不能满足喷吹烟煤的要求，生产上多数用于无烟煤系统。

2) 埋刮板给料机：这种给料机是可调速电动机带动链轮和链条，链条上装设刮板在壳体内轨道上滑移，将原煤仓排出的原煤刮出并输送到磨煤机内。煤量大小通过调节埋刮板机变速电动机的转速进行控制，也可以通过刮板机的输料厚度和出口调节煤量。这种给煤机调节煤量灵活稳定，且密封性好，有利于减少磨煤机入口漏风与系统含氧量，是常用于生产高挥发分煤粉的给煤设备。其缺点是结构复杂，维护量大、对原煤质量要求较严，但是目前仍被广泛使用。

3) 电磁振动给煤机：这种给煤机由给煤槽和电磁振动器组成。其工作原理为电流通过电磁铁线圈为半波整流脉充信号，正半波通电带磁，铁芯发生动作，负半波断电失磁，铁芯停止动作并借助弹簧使其恢复原位，料槽内的煤即不断被振动向前移动进入磨煤机下煤管内。这种给煤机结构简单、无传动器件、易于维护，但不适于输送水分高、粘性大的煤种，且对环境温度与湿度要且苛刻，环境温度不能低于 20°，仅

在我国部分北方地区用于无烟煤系统。

(3) 旋风分离器也称细粉分离器,在老式制粉系统中被广泛采用,有一级旋风分离器,还有二级旋风分离器。但是随着袋式分离器的发展,新建多数制粉系统为减小系统阻力,简化工艺,减少不安全因素,已取消一、二级旋风分离器,仅设袋式分离器一次分离。不过为了减轻袋式分离器的负荷,如减少其维护工作量,仍有一些新建制粉系统采用一级旋风分离器。

旋风分离器形式比较多,但运行原理大体相同,即通过离心力的作用使多数煤粉颗粒碰撞外筒内壁,使其沿筒壁下落至收集斗,更细的煤粉颗粒随气体由出口排出。旋风分离器入口气速为  $16\sim 25\text{m/s}$ ,除尘效率为一级  $85\%\sim 95\%$ ,二级为  $40\%\sim 55\%$ 。

(4) 袋式收尘器也叫精收粉器,在我国煤粉生产中广泛采用。按分离方式可分为内滤和外滤两种;按清灰形式又分自然除灰、机械除灰和逆气除灰 3 种(在逆气除灰中按其逆气方式又分脉冲式和回转式反吹 2 种),其中后 2 两种在煤粉制备中正在广泛采用。

### 2.3.2 煤粉输送系统工艺流程与装置

#### (1) 煤粉的输送方式

煤粉的输送有两种方式可供选择,即采用煤粉罐装专用卡车或采用管道气力输送,而气力输送连续性好、能力大且密闭性好,是高炉喷煤中最普遍采用的煤粉输送方式。

借助管道将煤粉送入气流中,并使其成为悬浮状态而输送的方法称为煤粉的气力输送。若往输煤管道内送入高压空气,使输煤管道内压力高于大气压力,此时的气力输送成为压送式气力输送。而当输送管内的压力低于大气压力时,气力输送称为(真空)吸入式气力输送。目前,压送式气力输送在煤粉输送中应用最为广泛<sup>[37]</sup>。

#### (2) 煤粉输送工艺和设备

随着喷煤技术的发展,国内外不少企业,喷煤已采用直接喷吹工艺,不再设输送煤粉设施。但是有些企业,高炉座数较多,高炉附近场地狭窄,不具备直接喷煤的条件,仍采用集中制粉分散喷吹工艺,还需设置粉煤输送设施来满足高炉喷煤需要,如鞍钢由于高炉数量较多就采用集中制粉,为了实现任一制粉系统生产的煤粉可以输送到任何一座高炉使用,设置了复杂而且庞大的输煤管网和阀组以实现其供粉灵活性。输煤系统工艺流程见图 2.4。

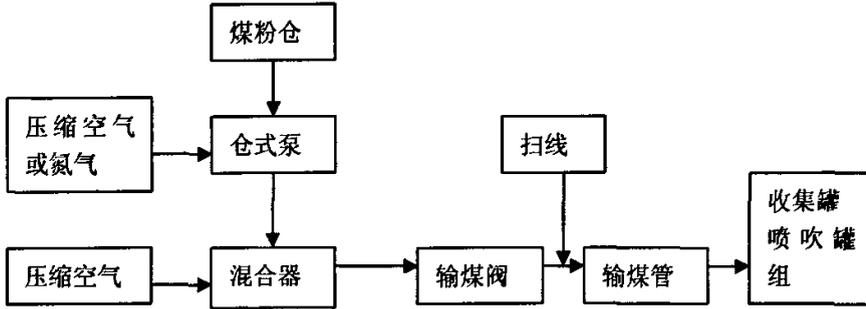


图 2.4 输送煤粉工艺流程

煤粉仓的煤粉装入仓式泵后，用压缩空气或氮气流化(喷吹高挥发分煤)后进入混合器，再用压缩空气输送，经输煤阀输煤管线网送到喷吹系统的收煤罐。当收煤罐充满后，停止送煤并用压缩空气将管道内积存煤粉吹扫干净，等待下一次输送煤粉。

### (3) 煤粉输送条件

由制粉仓式泵把煤粉输送到喷吹站的收粉罐应具备以下基本条件：

1) 输送风在输煤管道内具有一定的速度。要使煤粉在输煤管道内顺利运行，就必须使煤粉颗粒在管道内处于悬浮状态。因为煤粉颗粒受重力作用而沉降，当输送介质在输送管道内流动时又产生推力而使其前进，而且输送介质速度越高，煤粉颗粒越易悬浮，反之越易沉降。当输送介质流速达到一定值时，煤粒就不会沉降而处于悬浮状态，此流速就被称之为悬浮速度或叫沉降速度。因此，为使煤粉在输煤管内顺利地被输送，就必须具有一定的输送介质速度。

可由下列两种方法计算<sup>[38]</sup>：

$$V_{沉} = 5.11 \sqrt{\frac{\gamma_s \cdot d}{\gamma_a}}, \text{ m/s} \quad \text{公式(2-3)}$$

实际输送时为可靠起见输送介质速度应高于沉降速度  $V_{沉}$ ，即： $V_{送} = K \cdot V_{沉}$ ，式中  $K$  为输送系数，水平输送煤粉时取 1.75。

$$V_{基} = d \sqrt{\frac{4g(\gamma_s - \gamma_a)^2}{225\mu\gamma_a}} \quad \text{公式(2-4)}$$

式中  $d$ —煤粉颗粒直径，mm；

$\gamma_s$ —煤粉真密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$\gamma_a$ —输送介质密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$\mu$ —煤粉浓度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$g$ —重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

由以上公式看出:煤粉悬浮速度与煤粉直径、真密度和输送介质密度有关。一般应控制输送介质流速在  $5\text{m/s}$  以上。因此,对于一定管径的输煤管道,必须具有足够的输送介质流量来保证在输煤管道内输送介质的流速。

2) 要有足够的输送介质压力。由仓式泵出来的煤粉必须具备足够的输送压力来克服输粉系统的压力损失,才能推动煤粉由仓式泵到喷吹站的收煤罐。两相流输送的压力损失包括纯输送介质流动的压力损失和被输送煤粉运动的压力损失总和,即:

$$\Delta P_g = \Delta P_a + \Delta P_s \quad \text{公式(2-5)}$$

式中  $\Delta P_a$ —输送介质的压力损失;

$\Delta P_s$ —被输送煤粉的压力损失。

$$\Delta P_a = \lambda_a \frac{L \gamma_a V_a^2}{D \cdot 2} \quad \text{公式(2-6)}$$

$$\Delta P_s = \lambda_s \frac{L \gamma_a V_a^2}{D \cdot 2} \mu_s \quad \text{公式(2-6)}$$

$$\Delta P_g = (\lambda_a + \lambda_s \mu_s) \times \frac{L \cdot \gamma_a \cdot V_a^2}{D \cdot 2} \quad \text{公式(2-7)}$$

式中  $\lambda_a$ 、 $\lambda_s$ —介质和煤粉的压力损失系统;

$\mu_s$ —固气比,  $\text{kg/kg}$ ;

$L$ 、 $D$ —输送管道长度与内径,  $\text{mm}$ ;

$\gamma_a$ —介质密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$V_a$ —介质速度,  $\text{m/s}$ 。

$\Delta P_a$ 、 $\Delta P_s$  应包括输送管道全长度上摩擦阻损和局部阻损以及末端即收粉罐的动压头。

3) 防止堵塞措施。在输送过程尤其长距离等径管道输送,可能出现煤堵塞管道。因此,必须放置防止堵塞与处理堵塞的措施。等径管道输送末端压力低,输送介质速

度不易堵塞，而始端压力高，速度低易于堵塞。所以，堵塞一般易发生在始端，为此，应在始端附近设放煤粉阀，以便堵塞时打开此阀放出煤粉。

## 2.4 煤粉喷吹系统

### 2.4.1 高炉喷煤系统工艺流程

高炉喷煤系统工艺流程如图 2.5 所示<sup>[39]</sup>。仓式泵的煤粉被输送到喷吹系统的收煤罐，经倒罐后进入喷煤罐、喷煤罐用压缩空气或氮气加压力后，经混合器，通过管道或者煤粉分配器分配到高炉各风口的喷煤枪喷入高炉。

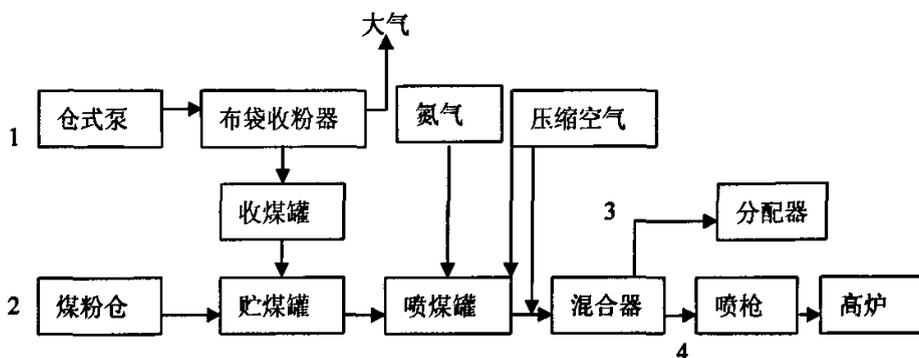


图 2.5 喷煤工艺流程

1—间接喷吹；2—直接喷吹；3—单管路加分配器；4—多管路

根据高炉喷吹煤粉工艺流程布置可分为两种模式：

(1) 直接喷吹，即集制粉，输送和喷吹三位一体的方式。这种喷吹形式，简化了喷吹工艺流程和设施，不仅降低了工程投资，而且减少了喷吹煤粉的中间环节。对喷吹易燃易爆煤粉，可大大降低不安全因素，因此对于高炉附近场地宽裕的大型高炉尤为适用。

(2) 间接喷吹，即集中制粉通过煤粉输送管道把煤粉输送到各高炉喷吹站，进行分散喷吹的方式。这种喷吹形式的特点与直接喷吹形式相反，适用高炉数目多且高炉附近场地狭窄的企业。两种喷吹模式特点见表 2.4。

表 2.4 直接喷吹与间接喷吹特点比较

| 项目 \ 喷吹模式 | 直接喷吹    | 间接喷吹 |
|-----------|---------|------|
| 建设投资额     | 较少      | 较多   |
| 占地面积      | 少       | 多    |
| 适应单位      | 1~2 座高炉 | 多座高炉 |
| 喷吹压力      | 高       | 较低   |
| 对高炉适应性    | 稍差      | 好    |
| 设备维护检修量   | 较少      | 较多   |
| 生产管理与安全   | 较好      | 可以   |

### 2.4.2 煤粉喷吹的主要装置

喷吹系统由不同形式的喷吹罐组、收煤罐和分配器装置等组成。煤粉喷吹通常是在喷吹罐组内充以压缩空气，再自混合器引入二次压缩空气将煤粉经管道和喷枪喷入高炉风口。

(1) 喷吹罐：通常由串罐式和并列式两种布置方式组成。

1) 串罐式，即将收煤罐、贮煤罐与喷吹罐重叠设置。煤粉由输煤管道输送到喷吹塔的收煤罐，并通过上钟阀煤粉由收煤罐落入中间贮煤罐，当贮煤罐煤粉装满后，喷吹罐内煤粉降低到最低料位时，贮煤罐充气均压，开下钟阀，贮煤罐煤粉落入喷吹罐并被喷吹到高炉内。串罐式喷吹罐可连续喷吹，喷吹量稳定，厂方占地面积小，大型高炉可视喷吹量设双系列或多系列。

2) 并列式，即由两台或三台喷煤罐并列布置。由一台喷煤罐喷吹煤粉，另一台喷煤罐贮煤，两台或三台喷煤罐交替使用。并列式工艺流程简单，可大大降低喷吹设施高度，工程投资省，煤粉计量容易，可与单管路分配器配合使用，所以国内多数中小型高炉广泛采用。两种喷吹方式特点见表 2.5。

表 2.5 串联与并联喷煤罐组特点比较

| 内容 \ 布置方式  | 串联喷吹罐组  | 并联喷吹罐组 |
|------------|---------|--------|
| 建设投资额      | 多       | 少      |
| 占地面积       | 小       | 大      |
| 消耗能源       | 多       | 少      |
| 设备维修费      | 大       | 小      |
| 适用的喷煤罐出粉方式 | 单管路与多管路 | 只适用单管路 |

(2) 收煤罐：常采用大面积布袋收粉器收集喷吹煤粉。这种收粉装置过滤风速低，排放气体粉尘浓度低，寿命比前一种延长 3~4 倍，整体阻力小，不易积粉，有利于提高仓式泵输煤速度。现代高炉喷吹烟煤或混合煤时广泛采用，例如我国鞍钢、本钢、包钢、首钢均已采用。

(3) 分配器：形式较多，有环式、瓶式、盘式、鼓式、圆球式、锥式等。但是最常用的分配器为盘式和锥式两种形式。盘式和锥式分配器结构简单，煤粉和介质沿固定流向出入，阻损小不积粉，分配煤量均匀。由于内壁电镀耐磨材质，寿命已大大提高可满足生产要求，所以这两种分配器已广为生产采用。

煤粉喷吹装置应具有以下主要功能：

- (1) 能安全、可靠、连续不断地把合乎高炉要求的煤粉喷入高炉内；
- (2) 具有完善的煤粉计量手段，按照高炉要求随时调节喷入高炉的煤粉量；
- (3) 能实现高炉圆周均匀喷吹和煤粉在风口区域充分燃烧。

#### 2.4.3 浓相喷煤概述

目前浓相喷吹煤粉尚没有确切定义。我国高炉喷吹煤粉浓度在  $5\sim 30\text{kg/m}^3$  范围内，这种喷吹浓度大家一致称为稀相喷吹。因此我们理解浓相喷吹应该比稀相喷吹高一倍以上，即喷吹煤粉浓度大于  $40\text{kg/m}^3$  才能认可为浓相。

实现煤粉浓相喷吹得基本方法如图 2.6 所示，输入流化罐的煤粉，经流化板流态化，在流化区域与上出料管道之间的压差的作用下，排出流化罐外，由总管补气器补充气体改变煤粉输送状态，调节适宜的煤粉喷吹量，由分配器分配煤粉喷入高炉风口。气体流化速度直接影响输送管路的固气比和输送速度，因此，喷煤罐内气体流化速度应控制在煤粉的临界流化速度  $v_{mf}$  和悬浮速度  $v_f$  之间，此时输送煤粉浓度最大，否则固气比下降影响浓相喷吹。

浓相喷吹的优点是：喷吹浓度高，消耗输送介质量少，煤粉在管道内流速低，对节省能源，减少管道磨损，提高煤粉喷吹量都有良好的作用。其缺点是设备比较复杂，价格较高，对煤粉掺有杂物要求严格，需用输送介质的压力也比较高。

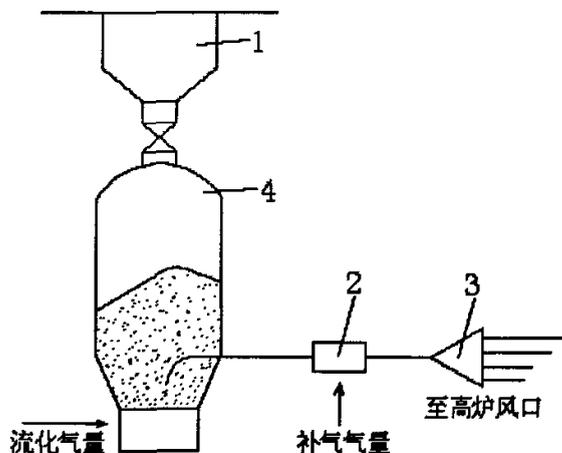


图 2.6 煤粉浓相输送装置示意图

1—喷煤罐；2—补气罐；3—分配器；4—流化罐

## 2.5 高炉喷吹煤粉的计量与控制技术

### 2.5.1 喷煤计控仪表

煤粉计量结果既决定着喷煤操作及设备设置的形式，同时又受喷吹工艺条件的影响，它是高炉操作人员掌握和了解喷煤效果，并根据炉况变化实施调节的重要依据。煤粉计量水平的高低，直接反映了高炉喷煤技术的发展水平。目前煤粉计量仪表主要有两大类，即常规计量仪表和特殊计量仪表<sup>[41]</sup>。

#### (1) 常规计量仪表

在高炉喷吹煤粉的制备、输送和喷吹系统中的常规计量仪表，是指在系统和控制过程不需要作很大改动就能实现测量、控制各种自然量功能的各种仪表。这些仪表主要包括常规温度和压力仪表系列，部分常规流量、重量仪表系列和料位仪表系列等。控制仪表由传感变送器、隔离器件和运算、显示、调节控制仪表和计算机系统组成。高炉煤粉系统要求所有仪表必须具备静电隔离和防爆功能，特别是与工况直接接触的传感变送仪表器件。

温度测量传感器的选用，依照温度区间不同，采用的形式也不同，如表 2.6 所示。

表 2.6 高炉喷煤系统测温方式

| 喷煤应用温度范围  | 温度传感种类      | 典型应用场所举例          |
|-----------|-------------|-------------------|
| -30~+300℃ | 热电阻或铜-康铜热电偶 | 煤粉仓、喷煤罐等贮煤系统、输粉系统 |
| -30~+800℃ | 镍铬-考铜热电偶    | 煤粉仓、喷煤罐等贮煤系统、输粉系统 |
| 0~1300℃   | 镍铬-镍硅热电偶    | 烟气风机、球磨机出入口等      |
| 0~1600℃   | 铂铑-铂热电偶     | 燃烧炉等              |
| 0~1800℃   | 双铂铑热电偶      | 燃烧炉等              |
| 0~2300℃   | 光学测温        | 高炉风口等             |

通常，压力测量方式主要有两种：在气体介质及含有极少量粉尘，不能造成粉尘沉积堵塞管路的气固两相流体介质的测量中，可使用气体引出式压力变送器；在含有高粉尘浓度的气固两相流的测量中，必须使用膜盒式或直测式压力变送器，以防止粉尘堵塞，保证测量精度。对高炉煤粉系统的气体流量测量，大都采用节流式流量计测方式。

## (2) 特殊计量仪表

在高炉喷吹煤粉的制备、输送和喷吹系统中，特殊计量仪表是指在煤粉系统的测量和控制过程中，工艺上有特殊要求，而不能直接使用常规测量和控制手段的部分仪表、一氧化碳浓度分析仪表，用于煤粉喷吹、输送管网的煤粉质量流量计，用于喷吹系统的重量连续计量装置等。对于高炉喷吹煤粉的制备、输送和喷吹系统中的特殊计量仪表的要求，主要表现在满足特殊工艺需要。气体成分分析仪表需满足运行在含高浓度粉尘、接近或达到饱和湿度的多相流介质的工况下；煤粉质量流量计需满足运行在煤粉煤质、成分、水分等诸多条件不断变化的不稳定气固两相流介质工况下；喷吹系统的重量连续计量装置，需满足对高炉连续喷吹得工艺条件，不间断地测得罐内实际煤粉量。所有这些仪表都必须在线连续工作，具有防爆、防静电、防结露、抗干扰、响应速度快、测量精度高等功能。

## 2.5.2 喷煤自动控制技术

高炉喷吹煤粉自动控制包括自动倒罐、煤粉总体流量自动控制、煤粉分配自动控制和优化燃烧自动控制等。

自动倒罐是根据高炉连续喷吹的需要，把喷煤罐间歇式工作，通过自动倒罐使煤粉喷吹变成连续工作的自动控制过程。这一控制过程的实现，是根据工艺需要，通过电气连锁实现逻辑控制的过程<sup>[37]</sup>。

煤粉总流量自动控制，是根据工艺要求对单位时间内喷进高炉的总煤粉量进行控

制，使之达到流量稳定，总量符合要求。这一控制可以通过计算机实现，也可以通过自动化仪表来实现。它主要包括流量检测单元、控制伺服单元和控制单元三大部分。如图 2.7 所示，通过煤粉流量计及电子秤获得煤粉的流量信号和即时重量信号，经模/数变换将模拟量变成数字量，输送给控制单元。控制单元将输入的流量信号和重量信号进行处理，与工艺要求的流量设定值进行比较，计算出调节量，输出给数/模变换器，变成模拟量，通过控制伺服单元对喷吹系统的煤量进行控制。全部控制实现闭环。控制技术的关键是工艺与自动化的接口技术，即煤粉流量测量和伺服机构。煤粉流量测量的实现方式主要有：使用测量煤粉流量的气固两相流量计，如电容浓度煤粉流量计、相关测速煤粉流量计、及阻损法煤粉流量计等；使用电子秤将两个即时重量之差与这段时间之比的计算煤粉流量等。煤粉流量伺服控制的实现方式主要有：改变喷煤罐压力；改变喷煤罐体流化状态；改变喷煤罐下煤口大小；综合使用以上三种方式；使用流化床上出料管路补气改变管路阻力；使用星形给料装置、螺旋给料装置等机械给料装置；使用可调量给料装置等。

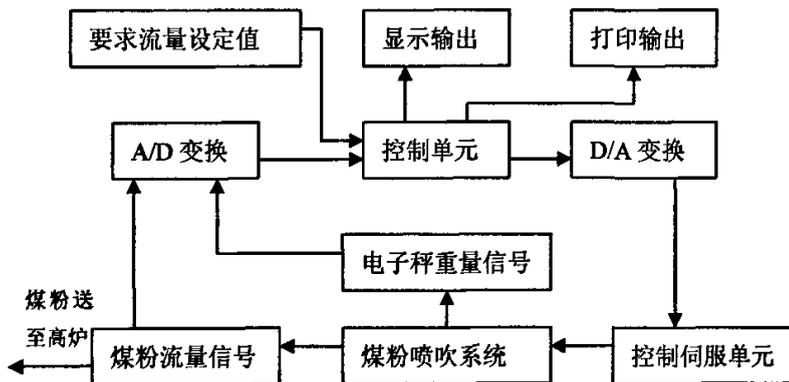


图 2.7 煤粉总流量控制原理框图

## 2.6 本章小结

高炉喷吹煤粉的工艺流程是建立高炉喷煤实时安全监控系统的基础，本章通过对原煤性质、原煤储运系统、干燥气系统、制粉系统、煤粉输送系统、煤粉喷吹系统以及煤粉的计量与控制技术几个环节进行系统而又全面的阐述，为高炉喷煤系统危险源的辨识及安全性评价提供了依据。

### 3 高炉喷吹贫瘦煤安全监控模型研究

#### 3.1 喷吹用潞安贫瘦煤理化性及爆炸性研究

##### 3.1.1 潞安贫瘦煤的理化性分析

贫煤、贫瘦煤的性质介于高挥发性烟煤与无烟煤之间，具有基本无结焦核，挥发分比无烟煤略高，燃烧性和反应性比无烟煤好等特点。我国近年来喷吹优质弱粘煤和不粘煤等烟煤数量不断增加，积累了不少有益经验和数据。就普遍的喷吹技术而言，贫煤、贫瘦煤煤种可以作为优质的喷吹煤种。潞安矿业集团的几个矿区贫煤、贫瘦煤的煤质特性如表 3.1 所示<sup>[42]</sup>。

表 3.1 贫煤、贫瘦煤煤质特征

| 分析编号 Sample No.  | 1     | 2     | 3     | 4     |
|--|-------|-------|-------|-------|
| 样品名称 Sample Name   | 五阳    | 漳村    | 常村    | 王庄    |
| 分析项目 Item  |       |       |       |       |
| 工业分析 Proximate Analysis                                      |       |       |       |       |
| 水分 $M_{ad}$ Moisture %                                       | 1.42  | 1.05  | 0.45  | 0.43  |
| 灰分 $A_d$ Ash %   | 9.01  | 9.62  | 9.13  | 9.19  |
| 挥发分 $V_{daf}$ Volatile matter %                              | 14.85 | 15.01 | 12.72 | 14.30 |
| 固定碳 $FC_d$ Fixed Carbon %                                    | 77.48 | 76.82 | 79.31 | 77.82 |
| 全硫 $S_{t,d}$ Total Sulfur %<br>(干燥基) (dried basis)           | 0.36  | 0.30  | 0.29  | 0.30  |
| 低位发热量 Net Calorific Value MJ/kg<br>$Q_{net,ar}$ (As Receive) | 29.50 | 28.23 | 29.44 | 29.50 |
| 低位发热量 Net Calorific Value cal/g<br>$Q_{net,ar}$ (As Receive) | 7050  | 6750  | 7040  | 7050  |
| 元素分析 Ultimate Analysis<br>(无水无灰基) (Dry ash-free basis)       |       |       |       |       |
| 碳 $C_{daf}$ Carbon %   | 93.44 | 93.73 | 91.51 | 91.24 |
| 氢 $H_{daf}$ Hydrogen %                                       | 4.16  | 3.82  | 4.16  | 4.26  |
| 氮 $N_{daf}$ Nitrogen %                                       | 1.40  | 1.48  | 1.36  | 1.39  |
| 氧 $O_{daf}$ Oxygen %   | 0.60  | 0.64  | 2.65  | 2.78  |

| 粘结指数 $G_{R,1}$ Caking index                          | 36    | 14    | 11    | 14    |
|--|-------|-------|-------|-------|
| 灰熔融性 Ash Fusibility      °C<br>(Reducing Atmosphere) |       |       |       |       |
| 变形温度 Deformation Temperature                         | 1200  | 1210  | 1340  | 1280  |
| 软化温度 Softening Temperature                           | >1450 | >1450 | 1410  | 1450  |
| 半球温度 Hemispherical Temperature                       | >1450 | >1450 | 1420  | >1450 |
| 流动温度 Flow Temperature                                | >1450 | >1450 | >1450 | >1450 |

目前，宝钢已喷吹烟煤和无烟煤的混合煤，武钢等大型企业也在进行高炉喷吹煤系统改造，实现混合喷吹。因此，积极利用介于高挥发性烟煤与无烟煤间的贫瘦煤用于高炉喷吹非常及时，也比较可行。在我国，喷吹贫瘦煤的储量非常丰富、可选择性好，能够保证高炉长期喷煤的需求，最重要的是我国喷吹贫瘦煤的价格低，能有效的节约高炉炼铁炼钢的成本。

### 3.1.2 潞安贫瘦煤最低着火温度的试验研究

#### (1) 煤粉浓度对最低着火温度的影响

试验条件：煤粉粒度 100 目以下；炉管尺寸=Ø3.65×21.6cm=0.226×10<sup>-3</sup>m<sup>3</sup>；喷气压力=0.5MPa；煤样为常村贫瘦煤和漳村贫瘦煤，试验结果见表 3.2 和表 3.3<sup>[43]-[48]</sup>。

表 3.2 煤粉浓度对常村贫瘦煤最低着火温度的影响

| 煤粉质量(mg) | 煤粉浓度(g/m <sup>3</sup> ) | 煤粉最低着火温度(°C) |
|----------|-------------------------|--------------|
| 20       | 88.50                   | 520          |
| 30       | 132.74                  | 470          |
| 40       | 177.99                  | 450          |
| 50       | 221.24                  | 430          |
| 60       | 265.49                  | 420          |
| 70       | 309.73                  | 400          |
| 80       | 353.98                  | 390          |
| 90       | 398.23                  | 380          |
| 100      | 442.48                  | 380          |

表 3.3 煤粉浓度漳村贫瘦煤对最低着火温度的影响

| 煤粉质量(mg) | 煤粉浓度(g/m <sup>3</sup> ) | 煤粉最低着火温度(°C) |
|----------|-------------------------|--------------|
| 20       | 88.50                   | 400          |
| 30       | 132.74                  | 380          |
| 40       | 177.99                  | 370          |
| 50       | 221.24                  | 350          |
| 60       | 265.49                  | 340          |
| 70       | 309.73                  | 340          |
| 80       | 353.98                  | 330          |
| 90       | 398.23                  | 320          |
| 100      | 442.48                  | 320          |

从以上数据可以看出：常村贫瘦煤和漳村贫瘦煤的最低着火温度随煤粉浓度的增大而下降，但是降低幅度是逐渐减小的。在各个浓度上，常村贫瘦煤的最低着火温度高于漳村贫瘦煤的最低着火温度。常村贫瘦煤在浓度从 88.5g/L 变化到 442.48g/L 时，最低着火温度为 520~380°C；漳村贫瘦煤在浓度从 88.5g/L 变化到 442.48g/L 时，最低着火温度为 400~310°C。

### (2) 喷粉压力对最低着火温度的影响

试验条件：煤粉粒度 100 目以下；炉管尺寸=Ø3.65×21.6cm=0.226×10<sup>-3</sup>m<sup>3</sup>；煤粉浓度=221.24g/L(即煤粉质量 50mg)；煤样为常村贫瘦煤和漳村贫瘦煤，试验结果见表 3.4 和表 3.5。

表 3.4 喷粉压力对常村贫瘦煤最低着火温度的影响

| 喷气压力(MPa) | 煤粉最低着火温(°C) |
|-----------|-------------|
| 0.10      | 370         |
| 0.15      | 370         |
| 0.20      | 380         |
| 0.25      | 380         |
| 0.30      | 380         |
| 0.35      | 390         |
| 0.40      | 410         |
| 0.45      | 420         |
| 0.50      | 430         |

表 3.5 喷粉压力对漳村贫瘦煤最低着火温度的影响

| 喷气压力(MPa) | 煤粉最低着火温度(°C) |
|-----------|--------------|
| 0.10      | 320          |
| 0.15      | 320          |
| 0.20      | 330          |
| 0.25      | 330          |
| 0.30      | 330          |
| 0.35      | 340          |
| 0.40      | 340          |
| 0.45      | 350          |
| 0.50      | 350          |

从以上数据可以看出：常村贫瘦煤和漳村贫瘦煤的最低着火温度随喷粉压力的降低而下降。在压力从 0.10MPa 变化到 0.50MPa 时，常村贫瘦煤的煤最低着火温度为 370~430°C，漳村贫瘦煤的最低着火温度为 310~340°C。

(3) 最低着火温度计算模型的建立

在许多实际生产和科研中，影响某一变量  $y$  的因素往往不只是一个，而是多个。研究变量  $y$  与多个因素  $x_1, x_2, \dots, x_k$  之间的定量关系的问题称为多元回归分析，如果变量  $y$  和  $x_1, x_2, \dots, x_k$  之间的内在联系是线性的，则称为多元线性回归分析<sup>[49]</sup>。

多元线性回归的数学模型式可写成矩阵的形式

$$y = X\beta + \varepsilon$$

为了估计参数  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ，我们采用最小二乘法，设  $b_0, b_1, \dots, b_k$  分别是参数  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  的最小二乘估计，则回归方程为

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

$$\text{设 } B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, \tilde{X} = \begin{bmatrix} x_{11} - \bar{x}_1 & x_{12} - \bar{x}_2 & \dots & x_{1k} - \bar{x}_k \\ x_{21} - \bar{x}_1 & x_{22} - \bar{x}_2 & \dots & x_{2k} - \bar{x}_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} - \bar{x}_1 & x_{n2} - \bar{x}_2 & \dots & x_{nk} - \bar{x}_k \end{bmatrix}, \tilde{y} = \begin{bmatrix} y_1 - \bar{y} \\ y_2 - \bar{y} \\ \vdots \\ y_n - \bar{y} \end{bmatrix}$$

$$L = \tilde{X}^T \tilde{X}, L_y = \tilde{X}^T \tilde{y} \tag{公式(3-1)}$$

$$\text{则 } \begin{cases} B = L^{-1}L_y \\ b_0 = \bar{y} - \sum_{j=1}^k b_j \bar{x}_j \end{cases}$$

回归方程是否真正反映了  $y$  与  $x_1, x_2, \dots, x_k$  之间的变化规律，还要进一步作方

差分析。

总偏差平方和

$$S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n [(y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y})] = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = S_{\text{回}} + S_{\text{余}}$$

$$\text{式中 } S_{\text{回}} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2, S_{\text{余}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

总偏差平方和自由度公式为

$$f_{\text{总}} = f_{\text{回}} + f_{\text{余}} \quad \text{公式(3-2)}$$

式中

$$f_{\text{总}} = n - 1$$

$$f_{\text{回}} = k$$

$$f_{\text{余}} = f_{\text{总}} - f_{\text{回}} = n - k - 1$$

$$F = \frac{S_{\text{回}} / k}{S_{\text{余}} / (n - k - 1)} \quad \text{公式(3-3)}$$

因此，可用自由度为 $(k, n-k-1)$ 的随机变量  $F$  进行检验。在给定的显著性水平  $\alpha$  下，若从试验观察值算出的  $F \leq F_{\alpha}(k, n-k-1)$ ，则说明回归偏差和所反映的波动并不明显比剩余偏差平方和所反应的波动大，即回归效果不显著。反之则回归效果显著，回归方程基本反映了变量  $y$  与  $x_1, x_2, \dots, x_k$  之间的变化规律。

设实验中最低着火温度  $T$  与煤粉质量浓度  $\rho$ ，喷吹压力  $P$  之间的关系为  $T = b_0 + b_1\rho + b_2P$ ，通过计算得出两种煤粉不同的数学模型及方差分析，结果如表3.6所示。查表可知  $F_{0.01}(2,15) = 6.36$ ，所以上线性回归高度显著，可以很好地反映变量间的变化关系。

表 3.6 实验数据的数学模型与方差分析

| 分析结果    | 常村贫瘦煤                                   | 漳村贫瘦煤                                   |
|---------|---|---|
| 数学模型    | $T = 413.0634 - 0.3544\rho + 206.5108P$ | $T = 302.0003 - 0.0311\rho + 119.4199P$ |
| 回归偏差平方和 | 24074.17                                | 4531.81                                 |
| 剩余偏差平方和 | 2819.97                                 | 5208.26                                 |
| 统计量 $F$ | 64.03                                   | 6.53                                    |

## 3.1.3 潞安贫瘦煤爆炸压力的试验研究

## (1) 潞安贫瘦煤最大爆炸压力、压力上升速率的测定

试验条件：煤粉粒度 100 目以下；固定氧浓度 20.6%；煤粉浓度分别为：50g/m<sup>3</sup>、100g/m<sup>3</sup>、150g/m<sup>3</sup>、200g/m<sup>3</sup>、250g/m<sup>3</sup>、400g/m<sup>3</sup>、500g/m<sup>3</sup>、600g/m<sup>3</sup>、750g/m<sup>3</sup>、1000g/m<sup>3</sup>。测出不同浓度下常村贫瘦煤和漳村贫瘦煤的最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率<sup>[50]-[56]</sup>。漳村贫瘦煤和常村贫瘦煤的爆炸强度试验结果如表 3.7 和表 3.8 所示。

表 3.7 漳村贫瘦煤试验结果

| 煤粉浓度(g/m <sup>3</sup> ) | 最大爆炸压力(MPa) | 最大爆炸压力上升速率(MPa/s) |
|-------------------------|-------------|-------------------|
| 50                      | 0.3092      | 13.38             |
| 100                     | 0.5021      | 14.16             |
| 150                     | 0.5753      | 23.29             |
| 200                     | 0.6160      | 31.97             |
| 250                     | 0.6236      | 38.65             |
| 300                     | 0.6576      | 39.46             |
| 350                     | 0.6768      | 39.73             |
| 400                     | 0.6517      | 39.90             |
| 450                     | 0.6367      | 38.43             |
| 500                     | 0.5872      | 37.17             |
| 550                     | 0.5723      | 32.74             |
| 600                     | 0.5575      | 26.76             |

表 3.8 常村贫瘦煤试验结果

| 煤粉浓度(g/m <sup>3</sup> ) | 最大爆炸压力(MPa) | 最大爆炸压力上升速率(MPa/s) |
|-------------------------|-------------|-------------------|
| 50                      | 0.2609      | 9.34              |
| 100                     | 0.5176      | 16.88             |
| 150                     | 0.5792      | 25.77             |
| 200                     | 0.6159      | 28.19             |
| 250                     | 0.6364      | 34.53             |
| 300                     | 0.6646      | 35.94             |
| 350                     | 0.6693      | 36.47             |
| 400                     | 0.6626      | 36.68             |
| 450                     | 0.6418      | 35.92             |
| 500                     | 0.6118      | 32.85             |
| 550                     | 0.5744      | 30.23             |
| 600                     | 0.5624      | 27.75             |

由以上数据可以看出，潞安贫瘦煤粉存在一个爆炸浓度  $C_m$ ，当煤粉浓度  $C$  小于  $C_m$  时，其爆炸压力和压力上升速率随浓度的增加而增大；当  $C$  大于  $C_m$  时，其爆炸压力和压力上升速率随浓度的增加而减小。但常村贫瘦煤的最大爆炸压力以及压力上升速率较漳村贫瘦煤的略小，证明爆炸猛烈度比漳村贫瘦煤稍弱。

## (2) 潞安贫瘦煤最大爆炸压力计算模型的建立

由微积分知识可知，任一函数都可以分段用多项式来逼近。因此，对许多实际一元变量问题，我们可以用多项式模型来分析。多项式回归可以处理相当多的非线性问题<sup>[49]</sup>。

如果一元回归问题中的变量  $y$  与  $x$  的关系是  $k$  次多项式，在  $x_t$  处  $y$  的观察值的随机误差  $\varepsilon_t(t=1, 2, \dots, n)$  服从正态分布  $N(0, \sigma^2)$ ，并且相互独立，就可以得到多项式回归的数学模型。

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + \beta_2 x_t^2 + \dots + \beta_k x_t^k + \varepsilon_t \quad (t=1, 2, \dots, n)$$

若令

$$x_{t1} = x_t, x_{t2} = x_t^2, \dots, x_{tk} = x_t^k$$

那么就把多项式回归模型转化成了一般的多元线性回归模型

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \beta_2 x_{t2} + \dots + \beta_k x_{tk} + \varepsilon_t \quad (t=1, 2, \dots, n)$$

这样，我们就可以用解决多元线性回归的办法去解决多项式回归的问题了。因此，多项式回归方程可设为

$$\hat{y} = b_0 + b_1 X_1(x) + b_2 X_2(x) \quad \text{公式(3-4)}$$

若自变量取值是等间隔时，只要选取

$$\begin{cases} X_1(x) = x - \bar{x} \\ X_2(x) = (x - \bar{x})^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \end{cases}$$

就可使系数矩阵  $A$  成为对角矩阵，即

$$A = \begin{bmatrix} n & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n X_1^2(x_i) & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{i=1}^n X_2^2(x_i) \end{bmatrix} \quad \text{公式(3-5)}$$

相关矩阵  $C$  和常数矩阵  $d$  分别为

$$C = A^{-1} = \begin{bmatrix} C_{00} & 0 & 0 \\ 0 & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & C_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_1^2(x_i)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_2^2(x_i)} \end{bmatrix} \quad \text{公式(3-6)}$$

$$d = X^T y = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n y_i X_1(x_i) \\ \sum_{i=1}^n y_i X_2(x_i) \end{bmatrix} \quad \text{公式(3-7)}$$

于是得回归系数矩阵为

$$b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = Cd = \begin{bmatrix} \bar{y} \\ \frac{\sum_{i=1}^n y_i X_1(x_i)}{\sum_{i=1}^n X_1^2(x_i)} \\ \frac{\sum_{i=1}^n y_i X_2(x_i)}{\sum_{i=1}^n X_2^2(x_i)} \end{bmatrix} \quad \text{公式(3-8)}$$

回归偏差平方和  $S$  回可分解为各次正交多项式的偏回归平方和:

$$S_{\text{回}} = \sum_{j=1}^2 b_j d_j - n\bar{y}^2 + nb_0 \bar{y} = \sum_{j=1}^2 b_j d_j = S_1 + S_2 \quad \text{公式(3-9)}$$

式中  $S_1$  和  $S_2$  分别为一次和二次正交多项式的偏回归平方和

$$S_j = b_j d_j = C_{jj} d_j^2 = \frac{d_j^2}{\sum_{i=1}^n X_j^2(x_i)}, (j=1,2) \quad \text{公式(3-10)}$$

所以在正交多项式回归中, 偏差平方和的分解公式为

$$S_{\text{总}} = S_{\text{回}} + S_{\text{余}} = S_1 + S_2 + S_{\text{余}} \quad \text{公式(3-11)}$$

正交多项式回归的回归方程和回归系数的检验表见表 3.9 所示。

表 3.9 方差分析表

| 误差来源 | 偏差平方和 S  | 自由度 f | 平均偏差平方和              | F 比   | 显著性 |
|------|--|-------|----------------------|---|-----|
| 回归方程 | $S_{\text{总}}=S_{\text{回}}+S_{\text{余}}$                                       | 2     | $S_{\text{回}}/2$     | $\frac{S_{\text{回}}/2}{S_{\text{余}}/(n-3)}$ |     |
| 一次项  | $S_1 = C_{11}d_1^2$  | 1     | $S_1$                | $\frac{S_1}{S_{\text{余}}/(n-3)}$            |     |
| 二次项  | $S_2 = C_{22}d_2^2$  | 1     | $S_2$                | $\frac{S_2}{S_{\text{余}}/(n-3)}$            |     |
| 剩余   | $S_{\text{余}}=S_{\text{总}}-S_{\text{回}}$                                       | n-3   | $S_{\text{余}}/(n-3)$ |   |     |
| 总计   | $S_{\text{总}}=\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2$ | n-1   |                      |   |     |

设实验中最大爆炸压力 P 与煤粉质量浓度  $\rho$  之间关系可表示为  $P=b_0+b_1X_1(\rho)+b_2X_2(\rho)$ ，通过计算得出两种煤粉不同的数学模型及方差分析分别如表 3.10、表 3.11 所示。查表可知  $F_{0.01}(2,12)=6.93$ ， $F_{0.05}(1,12)=4.75$ 。回归方程和二次项回归系数的检验结果非常显著，一次项回归系数检验结果显著，因此所得回归方程能较好地反映 y 与 x 的变化规律。

表 3.10 常村贫瘦煤浓度-爆炸压力影响计算

| 误差来源 | 偏差平方和 S   | 自由度 f | 平均偏差平方和     | F 比         | 显著性  |
|------|---|-------|-------------|-------------|------|
| 回归方程 | 0.094766098   | 2     | 0.047383049 | 10.66217576 | 非常显著 |
| 一次项  | 0.023336093   | 1     | 0.023336093 | 5.251108278 | 显著   |
| 二次项  | 0.071430005   | 1     | 0.071430005 | 16.07324324 | 非常显著 |
| 剩余   | 0.035552255   | 8     | 0.004444032 |             |      |
| 总计   | 0.10698226  | 10    |             |             |      |
| 回归方程 | $P=0.5805+0.2555(\rho-0.3273)-2.9262[(\rho-0.3273)^2-0.032438]$ |       |             |             |      |

表 3.11 漳村贫瘦煤浓度-爆炸压力影响计算

| 误差来源 | 偏差平方和 S   | 自由度 f | 平均偏差平方和     | F 比         | 显著性  |
|------|---|-------|-------------|-------------|------|
| 回归方程 | 0.116919097   | 2     | 0.058459549 | 8.970040832 | 非常显著 |
| 一次项  | 0.031855174   | 1     | 0.031855174 | 4.887862042 | 显著   |
| 二次项  | 0.085063924   | 1     | 0.085063924 | 13.05221962 | 非常显著 |
| 剩余   | 0.052137599   | 8     | 0.0065172   |             |      |
| 总计   | 0.137201523   | 10    |             |             |      |
| 回归方程 | $P=0.5832+0.1371(\rho-0.3273)-3.1925[(\rho-0.3273)^2-0.032438]$ |       |             |             |      |

## 3.2 高炉喷煤系统危险有害因素分析

### 3.2.1 分析方法概述

任何生产系统,在其寿命周期内都有发生事故的可能。区别只在发生的频率和事故的严重程度(即风险大小)不同而已。在一定条件下,如果对危险性失去控制或防范不周,就会发生事故,造成人员伤亡和财产损失。为了抑制危险性,使其不发展为事故,或减少事故造成的损失,就必须对它有充分的认识,掌握危险性发展为事故的规律,也就是要充分提示系统存在的所有危险性及其形成事故的可能性和发生事故的损失大小,从而衡量系统客观存在的风险大小。这就是系统危险性的辨识过程,发现和测出新的危险性和危险性的变化<sup>[57]</sup>。计算其事故发生率及严重度(危险的定量化),预示其风险率。

根据系统危险性辨识的判断确定需要整改或改造的技术设施和防范措施,使辨识的危险性得到抑制和消除,在技术上可靠,经费上合理,系统最终达到所要求的安全指标(或国家标准),这就是危险性控制能力的评价<sup>[58]</sup>。

预先危险性分析(Preliminary Hazard Analysis,简称 PHA)是在进行某项工程活动(包括设计、施工、生产、维修等)之前,对系统存在的各种危险因素(类别、分布)、出现条件和事故可能造成的后果进行宏观、概略分析的系统安全分析方法。其目的是早期发现系统的潜在危险因素,确定系统的危险性等级,提出相应的防范措施,防止这些危险因素发展成为事故,避免考虑不周所造成的损失。

事故树分析(Fault Tree Analysis,缩写 FTA)又称故障树分析,是一种演绎的系统安全分析方法。它是从要分析的特定事故或故障开始,层层分析其发生原因,一直分析到不能再分解为止;将特定的事故和各层原因(危险因素)之间用逻辑门符号连接起来,得到形象、简洁地表达其逻辑关系(因果关系)的逻辑树图形,即事故树。通过对事故树简化、计算达到分析、评价的目的。

安全检查表(SCL)是评价人员在对评价对象充分讨论、分析基础上,列出检查单元、部位和检查项目、检查要求,然后对照可行性研究报告的有关内容,逐项进行检查。

道化学火灾、爆炸指数评价法是对工艺装置及所含物料的潜在火灾、爆炸和反应性危险逐步推算的方法进行客观的评价。该方法根据单元物质系数 MF、工艺条件(一般工艺危险系数 F1 和特殊工艺危险系数 F2),通过一系列系数计算(单元火灾爆炸指数 F&EI、影响区域、破坏系数 DF 计算)确定单元火灾爆炸危险程度(基本最大可能财产损失及采取安全措施后的实际最大可能财产损失 MPPD、最大可能损失工作日 MPDO 和停产损失 BI),并与安全指标比较,最后判定事故损失能否被接受。

### 3.2.2 系统主要危险因素及分析

危险因素是指能对人造成死亡或对物造成突发性损坏的因素。有害因素是指能影响人的身体健康，导致疾病，或对物造成慢性损坏的因素。危险、有害因素分析是安全评价的重要环节，也是安全评价的基础<sup>[59]</sup>。

据统计，高炉喷煤生产中工伤事故占据前五位的事故类别是：火灾、生产粉尘、机械伤害、中毒窒息和爆炸。武钢 1386~2516m<sup>3</sup> 的 4 座高炉及宝钢的 1 号高炉喷煤系统 1994~2000 伤亡事故统计见表 3.12。

表 3.12 武钢及宝钢高炉事故按事故类别统计表

|      |      |      |      |      |     |      |     |
|------|------|------|------|------|-----|------|-----|
| 国标代号 | 08   | 017  | 03   | 015  | 13  | 023  |     |
| 类别名称 | 火灾   | 生产粉尘 | 机械伤害 | 中毒窒息 | 爆炸  | 其他伤害 | 合计  |
| 事故人次 | 21   | 18   | 13   | 9    | 7   | 16   | 84  |
| 比率   | 25.0 | 21.4 | 15.5 | 10.7 | 8.3 | 19.1 | 100 |

由上表可见，火灾、生产粉尘、机械伤害、中毒窒息、爆炸五类事故占事故总数的 80.9%，这五类事故应作为我们重点防范对象。另外，爆炸事故虽然造成的人员伤亡比例只列第五位，但事故造成的重伤死亡及事故损失比其它事故的后果严重许多，应引起我们的高度重视。

高炉喷煤生产过程中危险有害因素分布见表 3.13。

表 3.13 生产过程中危险有害因素分布

| 装置、设备及场所<br>危险有害因素 |      | 煤场及运煤设施 |   |   |   | 制粉喷吹系统 |   |   |   | 热风炉系统 |   |   |   | 燃烧炉系统 |   |   |   |
|--------------------|------|---------|---|---|---|--------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|
|                    |      | A       | B | C | D | A      | B | C | D | A     | B | C | D | A     | B | C | D |
| 1                  | 危险因素 | 物体打击    |   |   |   |        | √ |   | √ | √     |   | √ |   |       |   |   |   |
| 2                  |      | 车辆伤害    | √ |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 3                  |      | 机械伤害    | √ | √ | √ | √      |   | √ | √ |       | √ | √ |   | √     |   |   |   |
| 4                  |      | 起重伤害    | √ |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 5                  |      | 触电      |   |   |   |        | √ |   | √ | √     |   | √ | √ |       | √ | √ |   |
| 6                  |      | 淹溺      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 7                  |      | 烫伤      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 8                  |      | 火灾      | √ | √ | √ | √      | √ | √ | √ | √     | √ | √ | √ | √     | √ | √ | √ |
| 9                  |      | 高处坠落    |   |   |   |        | √ |   | √ | √     |   | √ |   |       |   |   |   |
| 10                 |      | 坍塌      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 11                 |      | 放炮      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 12                 |      | 火药爆炸    |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 13                 |      | 化学爆炸    | √ |   |   |        | √ | √ | √ | √     | √ | √ | √ | √     | √ |   |   |
| 14                 |      | 物理爆炸    |   |   |   |        | √ | √ |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 15                 | 有害因素 | 中毒窒息    |   |   |   |        | √ | √ | √ | √     | √ | √ | √ | √     | √ |   |   |
| 16                 |      | 其他伤害    |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 17                 |      | 生产粉尘    | √ |   |   |        | √ | √ | √ |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 18                 |      | 毒物      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 19                 |      | 噪声震动    |   |   |   |        |   |   |   |       | √ |   |   |       |   |   |   |
| 20                 |      | 高温      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 21                 |      | 低温      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 22                 |      | 辐射      |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |
| 23                 |      | 其他伤害    |   |   |   |        |   |   |   |       |   |   |   |       |   |   |   |

### (1) 煤气爆炸

热风炉系统使用高炉煤气和焦炉煤气作为主要燃料。煤气是多种气体的混合物，其中一氧化碳、氢气、甲烷都是易燃易爆气体。煤气含量达到一定限度，遇明火会发生爆炸。

煤气管道阀门泄漏，煤气泄漏在作业环境中达到爆炸极限范围时，遇明火会发生爆炸；煤气管道、除尘器、热风炉、燃烧炉等煤气系统检修，若煤气置换不彻底就动火很可能造成爆炸事故；煤气管路系统不严密，有空气渗入并形成爆炸性混合物遇明火也可能造成爆炸事故。

煤气爆炸事故通常发生在停送煤气、带煤气作业、煤气设备管道检修动火作业，煤气大量泄漏等情况。加强上述作业时的安全管理是防止煤气爆炸事故的一项重要的工作。

引起煤气爆炸事故的主要因素有：煤气设备动火时，没有吹扫干净，盲目动火造成煤气爆炸；检修煤气设备没有可靠切断，串漏煤气点火时造成爆炸；处理煤气泄漏时，由于没有安全措施或没有按规定的操作程序和方法进行；煤气大量泄漏的区域，通风不好情况下，遇到明火发生爆炸；煤气设施、管道中的煤气与空气的混合物在爆炸极限范围内，遇到火花产生爆炸。

### (2) 煤粉燃烧及爆炸

在卸煤、煤粉制备、输送过程中会产生煤尘。如果煤尘或煤粉在空气中达到一定浓度，在外界高温、碰撞、摩擦、振动等引起的电火花和明火的作用下会引起爆炸，爆炸后产生的气浪还会使沉积的煤尘飞扬，造成二次爆炸事故。

煤粉爆炸的危险性和很多因素有关，如挥发分含量、煤粉细度、气粉混合物浓度、流速、温度、湿度和输送煤粉的气体中成分比例等。

挥发分越大，越容易发生自燃、爆炸。

煤粉细度。煤粉越细越易自燃和爆炸。

气粉混合物的浓度。煤粉浓度是影响煤粉爆炸的重要因素。爆炸浓度为  $41\sim 57\text{g/m}^3$ ，在实际运行中一般是很难避免危险浓度的。因此，制粉系统尤其应重视防爆问题。

在运送煤粉的气体中，氧的比例成分越大，爆炸的可能性也就越大。

气粉混合物的流速。制粉系统中煤粉管道应具有一定的倾斜角。气粉混合物在管内流速应适当，过低易造成煤粉沉积，过高又会引起静电火花，导致爆炸。一般流速在  $16\sim 30\text{m/s}$  比较合适。

气粉混合物或煤粉的温度不能过高，过高则易引起爆炸。

煤粉过度干燥容易自燃或爆炸。

高炉喷煤采用烟煤与无烟煤混合喷吹，烟煤粉粒度为  $5\sim 10\mu\text{m}$  时，高温表面沉积

粉尘 5mm 厚的引燃温度大于 430℃，对容易发生煤粉爆炸的地方，需要重点加以防范。如卸煤场、运煤机械、储煤罐、磨煤机、煤粉的气力输送和喷煤设备等各作业场所。

### (3) 机械伤害

主要发生在原煤储运及原煤运输的过程中。造成机械伤害事故的主要因素：

- 1) 机械设备制造质量不合格或设计上本身就存在缺陷。
- 2) 设备控制系统失灵，造成设备误动作，导致事故发生。
- 3) 电源开关布局不合理，一种是有了紧急情况不便立即停车；另一种是几台机械开关设在一起，极易造成误开机引发事故。

### (4) 中毒及窒息

燃烧炉中的高炉、焦炉煤气中含有一氧化碳分别为 25%和 6%，煤气属于有毒气体。在干燥气系统中如果发生煤气泄漏或者在设备检修、故障处理过程中容易发生一氧化碳中毒事故。

煤气中的 CO 气体是无色、无味、无刺激性的气体，它与人体血红蛋白的亲合力比氧与血红蛋白的亲合力快 300 倍，分解时慢 3600 倍，由于比重与空气相近，泄漏到空气中易被人体吸入造成中毒。在设备管道泄漏及工作地点通风不良的情况下，会造成 CO 气体存积，人员过量吸入 CO 气体对健康有害甚至会危机人的生命。

作为惰化性气体，氮气在高炉喷煤系统的各个环节都被大量使用。氮气虽然无毒，但氮气浓度较高时，空气中氧含量会降低，氧含量若低于 18%，就会使人缺氧窒息。

### (5) 粉尘

能较长时间悬浮于空气中的固体微粒称为粉尘，而生产性粉尘是指因生产活动而产生的在作业环境空气中漂浮的粉尘。生产性粉尘的危害是冶金企业存在的严重职业卫生危害。粉尘对人体的主要危害是导致肺组织的纤维化，引起尘肺，严重影响职工的身体健康。

高炉喷煤生产过程中可能产生生产粉尘的作业区间有：储煤场、储煤罐、煤粉制备车间和煤粉输送系统。

## 3.3 原煤储运系统安全监控模型

### 3.3.1 原煤储运系统危险性评价

#### (1) 单元危险有害因素

##### 1) 燃煤火灾

煤是一种可自燃物质，在不需外界火源作用下，会在常温空气中缓慢地发生氧化反应放出热量，当放出热量多于向周围环境散失的热量时，就会造成热量蓄积导致自燃

度逐渐升高达到自燃点而引起燃烧。除了自燃因素外，其他如明火、高温都可能引起煤堆或输煤皮带的火灾事故。

### 2) 机械伤害事故和触电事故

本单元的机械设备较多，机械设备的带病运行、作业人员违章操作和电气部分的安全防护装置损坏等，是造成机械伤害事故和触电事故发生的重要原因。

### 3) 煤尘危害

卸煤和输煤扬尘会造成环境污染，影响人体健康。

## (2) 预先危险性分析

对本单元危险、危害性因素的分析，采用预先危险性分析法，评价见表 3.14。由分析结果可知，煤场最主要的危险性因素为火灾事故。

表 3.14 煤场及运煤设施单元预先危险性分析

| 事故         | 形成事故原因   | 事故后果             | 危险指数 | 措施  |
|------------|--|------------------|------|---|
| 煤自燃        | 1.输煤皮带系统积煤、积煤粉尘过多，长时间未清理。<br>2.煤场的煤长期堆放，煤堆堆放较松散。                           | 引起煤场火灾或输煤皮带系统火灾。 | 11   | 1.对输煤皮带系统的积煤、积粉应清理干净，皮带上不得有存煤。<br>2.一旦发现贮煤冒烟或着火，应采用 CO <sub>2</sub> 或大量水灭火，切不可用小水量灭火。<br>3.原煤场四周设置消防水管网。<br>4.按规定时间对堆放时间过长的煤堆，进行倒堆操作。 |
| 皮带机等造成机械伤害 | 1.防护设施损坏或不符合规定。<br>2.员工不符合安全规程，身体直接接触运行或处于故障中的皮带机。                         | 造成人员伤亡。          | 9    | 1.在机械运行中或出现事故且未停机时禁止接触转动部分。<br>2.机械转动部分设置安全护栏。<br>3.制定安全操作规程，加强安全教育，增强职工安全意识。   |
| 皮带火灾       | 1.皮带上煤堆积时间过长，煤缓慢氧化、发生自燃。<br>2.输送已经自燃的煤。<br>3.皮带附近有易燃物，着火后引燃皮带。<br>4.遇其它火源。 | 财产损失和人员伤亡。       | 11   | 1.皮带上禁止积煤，胶带机停机后应及时清理。<br>2.及时清除附近的易燃物，防止机油或柴油、汽油泄漏。<br>3.禁止在皮带机附近进行电焊、气焊等明火作业，如必须进行时要采取可靠的安全措施。                                      |
| 粉尘伤害       | 1.原料倒运过程大量粉尘飞扬。<br>2.胶带机跑煤，煤尘溢出。   | 患职业病             | 14   | 1.设置除尘系统，并维护好使其正常运转。<br>2.原煤运输系统的扬尘点可采用洒水方式进行压尘。<br>3.加装胶带机连锁装置，防止煤尘溢出。   |

### (3) 煤场火灾事故树分析

- 1) 画出事故树图见 3.1。
- 2) 求最小割集

由贮煤场火灾事故树的成功树得出结构函数式：

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 A_2 \\
 &= (B_1 X_1 X_2)(B_2 + B_3 + X_3) \\
 &= [(C_1 + X_4) X_1 X_2](C_2 + C_3 + X_8 + X_5 + X_3) \\
 &= (X_4 + X_{11} X_{12} X_{13}) X_1 X_2 (X_3 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10}) \\
 &= (X_1 X_2 X_3 X_4) + (X_1 X_2 X_4 X_5) + (X_1 X_2 X_4 X_6 + X_1 X_2 X_4 X_7) + (X_1 X_2 X_4 X_8) + (X_1 X_2 X_4 X_9) + (X_1 X_2 X_4 X_{10}) \\
 &\quad + (X_1 X_2 X_{11} X_{12} X_{13} X_3) + (X_1 X_2 X_{11} X_{12} X_{13} X_5) + (X_1 X_2 X_{11} X_{12} X_{13} X_6) + (X_1 X_2 X_{11} X_{12} X_{13} X_7) + \\
 &\quad (X_1 X_2 X_{11} X_{12} X_{13} X_8) + (X_1 X_2 X_{11} X_{12} X_{13} X_9) + (X_1 X_2 X_{11} X_{12} X_{13} X_{10})
 \end{aligned}$$

由该事故树的 13 个基本事件，得到 14 个最小割集：

$$\begin{aligned}
 K_1 &= (X_1, X_2, X_3, X_4) & K_2 &= (X_1, X_2, X_4, X_5) & K_3 &= (X_1, X_2, X_4, X_6) \\
 K_4 &= (X_1, X_2, X_4, X_7) & K_5 &= (X_1, X_2, X_4, X_8) & K_6 &= (X_1, X_2, X_4, X_9) \\
 K_7 &= (X_1, X_2, X_4, X_{10}) & K_8 &= (X_1, X_2, X_3, X_{11}, X_{12}, X_{13}) \\
 K_9 &= (X_1, X_2, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_5) & K_{10} &= (X_1, X_2, X_6, X_{11}, X_{12}, X_{13}) \\
 K_{11} &= (X_1, X_2, X_7, X_{11}, X_{12}, X_{13}) & K_{12} &= (X_1, X_2, X_8, X_{11}, X_{12}, X_{13}) \\
 K_{13} &= (X_1, X_2, X_9, X_{11}, X_{12}, X_{13}) & K_{14} &= (X_1, X_2, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13})
 \end{aligned}$$

### 3) 结构重要度分析

结构重要度顺序为

$$I(1) = I(2) > I(4) > I(11) = I(12) = I(13) > I(3) = I(5) = I(6) = I(7) = I(8) = I(9) = I(10)$$

通过贮煤场火灾事故树的分析得知，控制外来火源进入贮煤场和防止燃料自燃是防止贮煤场火灾的重点。在严格管理和控制火源进入贮煤场的基础上应采取一定的燃料堆场降温措施，防止燃料自燃。

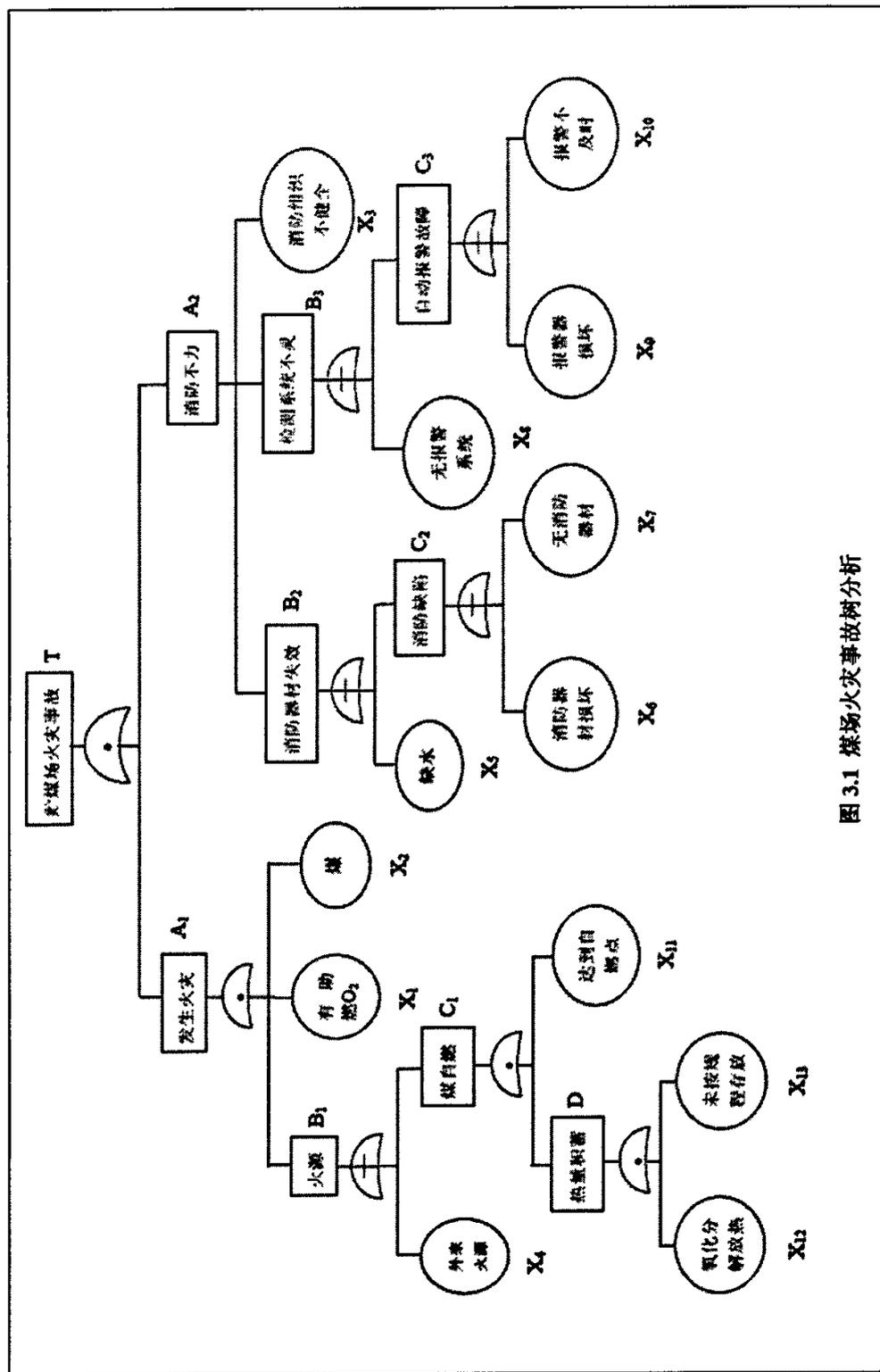


图 3.1 煤场火灾事故树分析

#### (4) 小结

经过以上分析,本单元可能发生的事故有:煤自燃、机械伤害、皮带火灾和粉尘危害。危险指数为 9~14。危险指数为 9 的,会造成人员伤亡或财产损失,是不希望有的危险,应立即采取措施。危险指数为 11~14 的,处于事故状态边缘,暂时不会造成人员伤亡或财产损失,但具有潜在的危险,应采取措施予以排除。

#### 应注意的问题

- 1) 煤场的储煤时间不得超过一年,避免原煤储存时间过长引起自燃。
- 2) 对胶带机的负荷电流、马达转速及轴瓦温度等运行参数进行实时监控,防止因胶带机运行故障造成火灾、机械伤害或停产等事故。
- 3) 储煤场内及胶带机周边应设置煤尘监测点,定时监测环境大气中的煤尘浓度,煤尘浓度超标时应采取相应的抑尘措施。

#### 3.3.2 储煤场安全监测模型的研究

储煤场原煤经过长期大量的堆积以后,随着时间缓慢进行的氧化而发热,使煤的温度逐渐升高,最终导致自燃起火<sup>[60]</sup>。自然起火是在温度缓慢上升的同时,按如下过程进行的:煤的堆积——低温氧化发热——放热——内部干燥——温度急剧上升——自燃起火<sup>[61]</sup>。它几乎都是从煤的内部发生,一旦发生火灾很难简单灭火。

煤的自燃是由其化学成分、空间结构、物理性能等内在因素和供氧散热条件等外界因素共同作用所决定的<sup>[62]</sup>。自然堆积的煤其粒度分布一般呈自然分选状态,大多数煤堆都经历过自热和自燃阶段。由于新煤的堆积,把原来的自热和自燃层覆盖,形成新的自热或自燃层,故整个煤堆从内到外温度均较高。深部的煤因浅部碎煤覆盖,空气渗透阻力增加,氧气浓度低,处于窒息状态,而煤体所储存的热能却散失缓慢,新表层对煤堆内部热能的释放起了隔护作用,由于内部向外导热,故新表层自燃发展很快。地面储煤堆表面直接与空气接触,供氧条件好,散热条件亦好,故不是初自热层。煤堆深部蓄热条件虽好,可氧气扩散有困难,供氧不足造成窒息,故也不是自热层。因此,煤堆最初的自热是有一定的深度范围的。由此可见,地面煤堆表层浅部及深部各点温度值分布有所不同,自热层与自燃层的分布都是温度的函数,快捷而准确地测读各点温度值,对防止煤堆自燃是至关重要的。

李树刚、徐精彩对大同矿务局煤峪口矿地面露天煤场 60 个测点进行监测,对 10 万个观测数据进行分项处理后建立起火风压 $\Delta h$ 、渗透风速  $U$ 、每平方米煤堆渗透空气流量  $Q$  及氧化带范围  $Y$  随空隙率  $\varepsilon$  和煤温  $t$  函数变化关系的数学模型。该模型建立在以下假设条件基础上:

- (1) 忽略氧扩散进入煤堆内部;

(2)煤堆内部的氧完全来源于空气的自然对流,且自然对流是因为煤堆与大气之间的温度差产生自然风压而引起;

(3)大气风流静止,风速为零;

(4)风流在碎煤孔隙中流动为层流;

(5)碎煤空隙率 0.40~0.53。

则可由热力原理近似计算出火风压  $\Delta h(\text{Pa})$  之值:

$$\Delta h = \gamma \cdot Z \cdot \frac{T_{\text{煤}} - T_{\text{大气}}}{T_{\text{大气}}}$$

式中  $\gamma$ —空气比重,  $\text{N}/\text{m}^3$ ;  $Z$ —煤堆垂直高度,  $\text{m}$ ;  $T_{\text{煤}}$ 、 $T_{\text{大气}}$ —煤堆和空气的绝对温度,  $\text{K}$ 。由多孔介质理论近似计算出渗透风速  $U(\text{m}/\text{h})$  和渗透风量  $Q$ :

$$U = -A \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{公式(3-12)}$$

$$Q = -\frac{A}{60} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{公式(3-13)}$$

式中  $A$ —系数,  $\text{m}^2/\text{h} \cdot \text{Pa}$ , 取决于煤堆空隙率, 据试验测定, 其值列于表 3-15;  $\frac{\partial h}{\partial z}$ —火风压梯度,  $\text{Pa}/\text{m}$ ;  $Q$ —每平方米煤堆的渗透空气流量,  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 。

根据西安矿业学院大型煤自燃发火台试验测定结果, 得知氧化带范围(或深度) $Y$  可由下式计算:

$$Y = U \frac{C_0 - C_{\min}}{v} \quad \text{公式(3-14)}$$

式中  $C_0$ —空气的氧浓度,  $\text{mol}/\text{cm}^3$ ;  $C_{\min}$ —能引起自燃的最低氧浓度,  $\text{mol}/\text{cm}^3$ ;  $v$ —氧化反应速度,  $\text{mol}/\text{s} \cdot \text{cm}^3$ 。

经计算, 火风压  $\Delta h$ 、渗透风速  $U$ 、每平方米煤堆渗透空气流量  $Q$  及氧化带范围  $Y$  随空隙率  $\varepsilon$  和煤温  $t$  的变化关系如表 3.15 所示。其中的极限风量  $Q_{\min}$  和  $Q_{\max}$  来自于自燃发火台试验测定报告。

由表 3.15 可知, 空隙率对煤堆的漏风速度和漏风量影响极大, 随着空隙率增大, 漏风速度与漏风量增长很快。空隙率在 0.50~0.53 之间的漏风量均在极限风量之内; 空隙率为 0.4, 煤温超过  $140^\circ\text{C}$  时, 漏风量小于下限风量, 空隙率小于 0.4 的地方因缺氧煤温不可能超过  $140^\circ\text{C}$ 。因而, 氧化带深度  $Y(t \geq 140^\circ\text{C}, \varepsilon = 0.4)$  大于 0.135m。

火风压随煤温的升高而增大, 漏风速度和漏风量随煤温升高而升高, 且随空隙率的增大而增大, 即同时受两个参数的影响。由此可知, 在一定的空隙率下, 随煤温的升高, 氧化带范围变小, 高温点逐渐向表面移动。因此, 在确定储煤场煤堆空隙率后, 可根据表 3-15 在煤堆内设定好最佳煤温监测点, 确保煤温测定的准确性, 从而有效

地防止煤堆自燃。

表 3.15 火风压、风速、风量及氧化带范围随空隙率和煤温变化表

| $t_{煤}$               |  | 40℃    | 60℃    | 80℃    | 100℃   | 120℃   | 140℃   | 160℃   | $A/(m^2 \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1})$ |
|-----------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------------|
| $\Delta h/z$          | $Pa \cdot m^{-1}$                                | 1.5019 | 2.2465 | 3.0166 | 3.8750 | 4.7461 | 5.6045 | 6.4628 |                                      |
| $U(\varepsilon=0.40)$ |  | 0.169  | 0.284  | 0.396  | 0.509  | 0.623  | 0.736  | 0.849  | 0.1314                               |
| $U(\varepsilon=0.50)$ |  | 0.284  | 0.475  | 0.665  | 0.854  | 1.045  | 1.234  | 1.424  | 0.2203                               |
| $U(\varepsilon=0.51)$ | $/m \cdot h^{-1}$                                | 1.518  | 2.545  | 3.557  | 4.569  | 5.596  | 6.608  | 7.620  | 1.1791                               |
| $U(\varepsilon=0.53)$ |  | 6.493  | 10.883 | 15.212 | 19.540 | 23.931 | 28.259 | 32.588 | 5.0427                               |
| $Q(\varepsilon=0.40)$ |  | 2.82   | 4.73   | 6.61   | 8.49   | 10.39  | 12.27  | 14.15  |                                      |
| $Q(\varepsilon=0.50)$ | $\times 10^{-3} m^3 \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$ | 4.73   | 7.92   | 11.08  | 14.23  | 17.42  | 20.57  | 23.73  |                                      |
| $Q(\varepsilon=0.51)$ |  | 25.30  | 42.41  | 59.28  | 76.15  | 93.26  | 110.13 | 127.00 |                                      |
| $Q(\varepsilon=0.53)$ |  | 108.21 | 181.39 | 253.53 | 325.67 | 398.84 | 470.99 | 543.13 |                                      |
| $Y(\varepsilon=0.40)$ |  | 1.291  | 0.771  | 0.397  | 0.183  | 0.140  | 0.135  | 0.109  |                                      |
| $Y(\varepsilon=0.50)$ |  | 2.170  | 1.289  | 0.667  | 0.306  | 0.235  | 0.227  | 0.184  |                                      |
| $Y(\varepsilon=0.51)$ | m  | 11.600 | 6.907  | 3.567  | 1.638  | 1.259  | 1.214  | 0.982  |                                      |
| $Y(\varepsilon=0.53)$ |  | 49.616 | 29.537 | 15.253 | 7.007  | 5.382  | 5.159  | 4.201  |                                      |
| $Q_{min}$             | $\times 10^{-3} m^3 \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$ | 0.329  | 0.922  | 2.48   | 6.89   | 7.94   | 15.6   | 19.4   |                                      |
| $Q_{max}$             | $/m^3 \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$               | 0.106  | 0.247  | 0.495  | 0.592  | 1.589  | 5.194  | 7.774  |                                      |

### 3.3.3 原煤储运系统安全监控参数

(1) 防止煤堆自燃及火灾需监控以下参数：贮煤温度，为了防止自燃起火，贮煤温度应控制在 60℃ 以下，煤堆监测点深度根据 3.3.2 中表 3-15 相应空隙率的氧化带深度值确定；甲烷浓度，排气中甲烷的百分含量应在 1.5% 以下；一氧化碳的浓度，排气中一氧化碳的百分含量应在 1% 以下；煤尘浓度，煤场内空气中煤尘浓度应低于 50mg/m<sup>3</sup>。

(2) 原煤储运设备安全监控参数包括：料位计高度，为保证原煤输送的不间断性，料位计高度必须达到原煤仓内部高度 60% 以上；胶带机负荷电流，为防止胶带机负荷过大，必须对胶带输送机马达负荷电流进行监控，当负载电流过大或电流值出现较大波动时，必须停机检查；输送机轴瓦温度，由于轴瓦损坏或轴与轴瓦不配套会使轴瓦温度升高，从而导致输送机停机甚至皮带火灾，因此必须对输送机轴瓦温度进行实时监控。

## 3.4 干燥气系统安全监控模型

### 3.4.1 燃烧炉系统危险性评价

#### (1) 单元危险有害因素

##### 1) 火灾爆炸事故

燃烧炉系统使用高炉煤气和焦炉煤气作为燃料。煤气是易燃易爆气体，与空气混合能形成爆炸性混合物，遇明火、高热能引起燃烧爆炸。燃烧炉及煤气管路系统存在

着由于煤气引起的爆炸和火灾的危险。

煤气如果泄漏在作业环境中达到爆炸极限范围时，遇明火会发生爆炸；煤气系统检修时，若煤气置换不彻底就动火、燃烧炉燃烧室煤气在爆炸极限范围内点火，都可能造成爆炸事故。

煤气爆炸事故通常发生在停送煤气、带煤气作业、煤气设备管道检修动火作业，煤气大量泄漏等情况。加强上述作业时的安全管理是防止煤气爆炸事故的一项重要的工作。

## 2) 煤气中毒

煤气中含有大量的 CO，CO 属于有毒气体。进入现场作业时，因设备泄漏会造成人员中毒；抽堵盲板或更换阀门时，未戴防毒面具也会发生煤气中毒。

## 3) 高处坠落和物体打击伤害

燃烧炉本体设备高 40 米，设有多层平台，易发生物体打击危险及高空坠落事故。

## (2) 预先危险性分析

对本单元的危害性因素分析，采用预先危险性分析法，其评价见表 3.16。

表 3.16 燃烧炉系统单元预先危险性分析

| 事故     | 形成事故原因  | 事故后果 | 危险指数 | 措施  |
|--------|---|------|------|---|
| 煤气燃烧爆炸 | 1. 燃烧炉煤气及其煤气管路、阀门泄漏，煤气在空气中积蓄，遇火源引起燃烧爆炸。<br>2. 燃烧炉及煤气管路检修，煤气未吹扫干净就动火操作。<br>3. 燃烧炉及煤气管路系统不严密，有空气渗入并形成爆炸性混合物。<br>4. 燃烧炉点火过程违反规定。 | 人员伤亡 | 6    | 1. 燃烧炉选用符合安全要求的合格产品。应设防止煤气爆炸的装置，设连锁保护装置。<br>2. 煤气设备、管路保持严密，防止空气渗入。新建成或大修后的煤气设备与管路要用蒸汽、氮气吹净其中的空气。<br>3. 加强对煤气系统的检查和维护保养，防止设备带故障运行，防止煤气的泄漏。<br>4. 在煤气管道和设备上动火，必须检验煤气含量合格后才可动火。<br>5. 凡停产的设备必须及时处理净残余煤气。<br>6. 对有煤气泄漏可能的场所，禁止明火，并设有安全警示。 |

|           |   |      |    |   |
|-----------|---|------|----|---|
| 煤气中毒      | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 燃烧炉煤气及煤气管路、阀门泄漏。</li> <li>2. 通风不良。</li> <li>3. 有煤气泄漏可能的区域无安全警示标志，人员在此处滞留而无任何防护意识。</li> </ol>                        | 人员伤亡 | 6  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 燃烧炉、煤气管道选型及其安装要符合安全要求，防止煤气泄漏，新建、大修后的煤气设施必须经检查验收，证明符合安全要求并有安全规程后，才能投入运行。</li> <li>2. 在煤气区域经常工作的地点，一氧化碳的含量不大于 <math>30\text{mg}/\text{m}^3</math>，配备煤气检测报警仪器。</li> <li>3. 对煤气设备，应经常定期检查，对于局部通风不良而可能泄漏煤气积存场所，应设置警示标志。</li> </ol> |
| 高处坠落和物体打击 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 高处作业检修区域未设防护栏杆或防护栏杆损坏。</li> <li>2. 高处作业处工作时，工具、零部件从高处落下。</li> <li>3. 操作人员未按要求使用安全带、安全帽，没有按要求穿防滑性能好的软底鞋等。</li> </ol> | 人员伤亡 | 14 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 检修中制定完备的安全措施，检修平台、预留孔等处设置安全防护设施，合理使用安全带等安全防护用品。</li> <li>2. 安装、检修高处作业时禁止高空抛物，防止使用的工具掉落，高处作业人员应佩戴工具袋，并在作业区域设标志、设监护人员，禁止无关人员进入危险区域。</li> <li>3. 在危险场所工作时应严格执行安全施工作业票制。</li> </ol>   |

### (3) 燃烧炉爆炸事故树分析

#### 1) 画出事故树图 3.2。

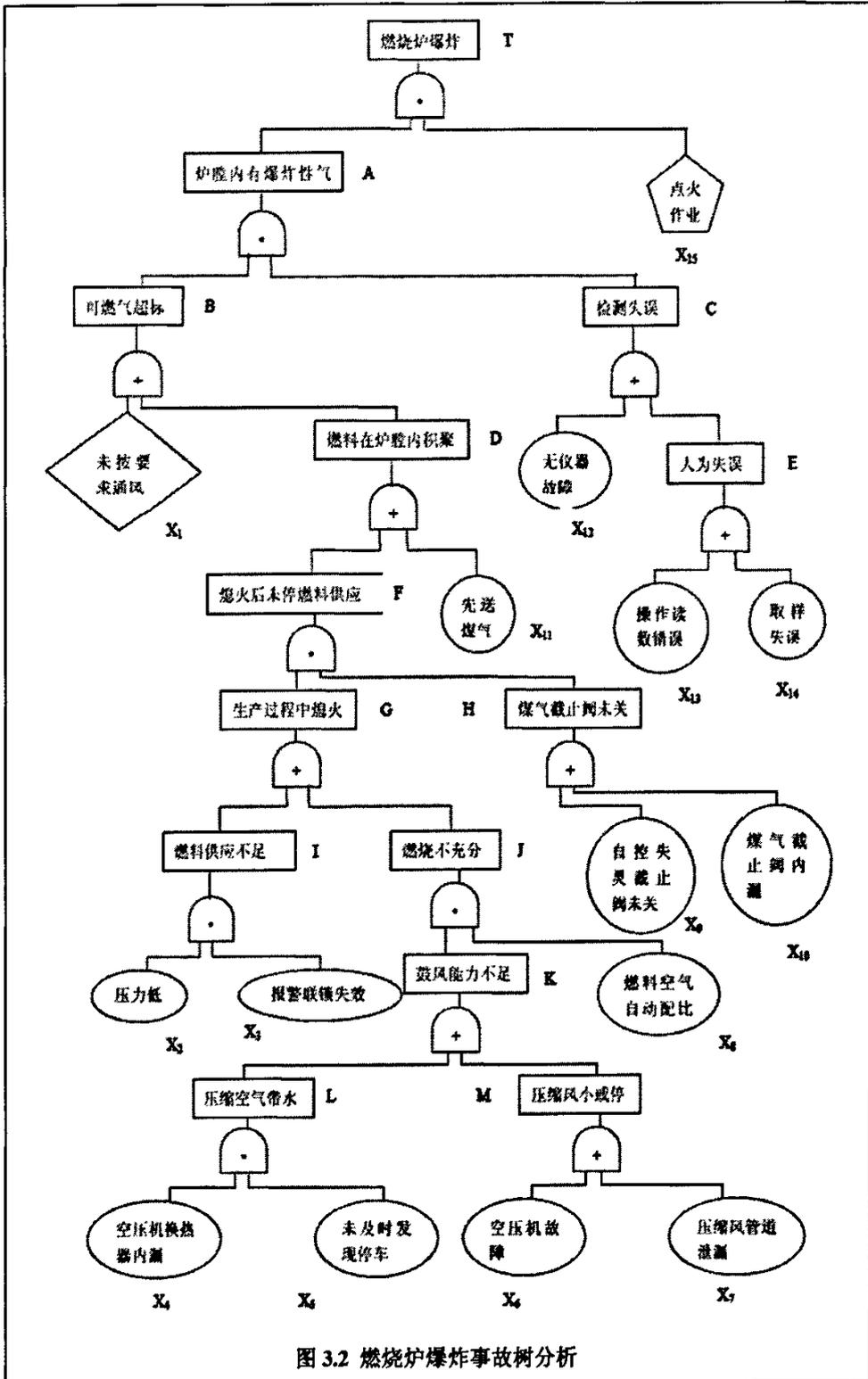


图 3.2 燃烧炉爆炸事故树分析

## 2) 事故树分析:

分析 FT 图及最小割集, 可以发现引起加热炉爆炸的主要原因有:

- ①点火顺序错误, 先送煤气后点火, 发生爆炸。
- ②熄火后未及时停燃料供应, 且未彻底置换, 再次点火, 发生爆炸。

## 3) 防止事故的措施:

- ①确保装置内所有自动控制装置及安全连锁装置灵敏可靠。
- ②配备火灾报警装置, 定期检查, 确保完好。
- ③保持抽风系统可靠及空气量满足要求。
- ④熄火后, 及时关闭阀门, 打开风机抽风, 确保炉膛内可燃性气体符合要求后方可再次点火。

## (4) 小结

经过上述分析, 本单元可能发生的事故有: 煤气燃烧爆炸、煤气中毒、物体打击、高处坠落, 危险指数为 6 和 14。危险指数为 6 的, 会造成严重的人员伤亡或财产损失, 是不希望有的危险, 应立即采取措施。危险指数为 14 的, 处于事故状态边缘, 暂时不会造成人员伤亡或财产损失, 是有控制接受的危险, 应予排除或采取措施。

### 应注意的问题

- 1) 燃烧炉燃烧器的煤气管道, 应设煤气流量调节器和煤气自动切断阀, 当燃烧器风机停止运转时, 能自动切断煤气并报警。
- 2) 燃烧炉燃烧器与煤气供应设施间设吹扫装置, 防止残留在燃烧器内未燃气体发生爆炸。
- 3) 燃烧炉区域应设一氧化碳浓度监测报警装置。
- 4) 煤气、空气管道应安装低压警报装置。

## 3.4.2 热风炉系统危险性评价

### (1) 单元危险有害因素

#### 1) 火灾爆炸事故

煤气管道及除尘器中充满了未燃尽的高炉煤气, 若有氧气或空气进入使煤气在爆炸极限内, 遇激发能可造成煤气爆炸事故; 煤气设施中煤气泄漏在空气中, 一定条件下遇到明火也可造成爆炸事故。

#### 2) 煤气中毒及窒息事故。

检修煤气管路时通风不好易造成中毒、窒息事故; 煤气设施泄漏可造成煤气积聚, 引起中毒事故; 除尘器排灰时, 高炉煤气会随灰尘一起排出除尘器, 也可造成煤气中毒。

## (2) 预先危险性分析

对本单元的危害性因素分析，采用预先危险性分析法，其评价见表 3.17。

表 3.17 煤气系统预先危险性分析

| 事故        | 形成事故原因  | 事故后果 | 危险指数 | 措施  |
|-----------|---|------|------|---|
| 人员中毒      | 1.煤气管道腐蚀或被破坏，人员在泄漏区作业。<br>2.抽堵盲板作业未戴防毒面具。                               | 人员伤亡 | 6    | 1.定期对煤气管道及阀门进行检修，管道外表应定期刷防腐涂料。<br>2.有煤气泄漏可能的区域设安全警报标志。<br>3.抽堵盲板作业佩戴氧气呼吸器，并有人监护。  |
| 煤气管道爆炸    | 1.存在明火或静电。<br>2.检修动火前未可靠切断煤气源，或未用蒸汽、氮气驱赶煤气。                             | 人员伤亡 | 6    | 1.煤气管道采取防火防静电措施。<br>2.煤气危险场所严禁明火。<br>3.检修可靠切断煤气气源，并用空气置换，检测 CO 浓度不高于安全规定浓度以上方可作业。 |
| 检修除尘器造成窒息 | 1.进入除尘器内部检修前未彻底通风，因氧气含量过低导致窒息。<br>2.进入除尘器内部检修时，因切割、焊接作业产生烟气，浓度过高时，使人窒息。 | 人员伤亡 | 6    | 1.检修前确保通风时间，检测含氧量符合要求后方可作业。<br>2.限定单次作业时间，佩戴防护用具。                                 |

## (3) 小结

本单元可能发生的事故有：人员中毒、煤气管道爆炸和窒息事故，事故危险指数为 6，属于危险的，会造成人员伤亡或财产损失，是不希望有的危险，要立即采取措施。

应注意的问题有：

- 1) 煤气危险区域的一氧化碳浓度要定期测定，工作人员在煤气区域工作时间不宜过长。
- 2) 煤气管道必须维持正压，煤气闸板不得泄漏煤气。
- 3) 除尘器的上部和下部应设置与两个出入口相对的清灰平台。

### 3.4.3 干燥气系统安全监控量化模型

进入制粉系统的原煤含水分较高，通常在 6%以上，在制成煤粉过程中必须降至 2%以下，干燥气就是给制粉系统提供热量，用来干燥煤粉的介质，是制粉系统的干燥剂。获得稳定的干燥气温度及气量，对煤粉的磨制是至关重要的。干燥气温度和气量的波动直接影响煤粉的质量和磨煤机的出力。而干燥气又是由热风炉烟气和燃烧炉烟气组成，因此对干燥气的控制实际上是对热风炉烟气和干燥炉烟气的控制<sup>[37]</sup>。

干燥气系统监控参数量化模型的建立思路如图 3.3 所示。由制粉系统所需煤量确定干燥气量，通过量化监控模型分别对热风炉系统和燃烧炉系统各运行参数进行实时在线调控与监测，从而确保制粉系统运行的稳定性。

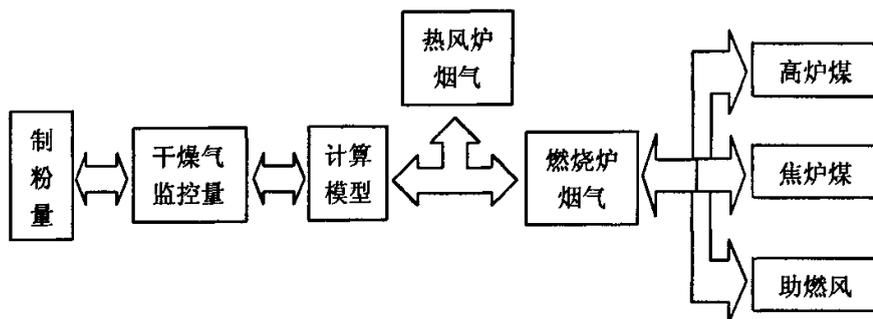


图 3.3 干燥气监控量计算过程示意图

#### (1) 制粉用干燥气量计算模型：

下面的计算以干燥 1kg 原煤为计算单位<sup>[63]</sup>。

热量收入：以干燥气带入的热量为主(磨煤机的摩擦生热不计)。

热量支出：以蒸发原煤水分耗热、干燥气出口带走和加热原煤耗热为主。

根据热量收入与支出相等，列出干燥气量计算公式：

$$q = \frac{\Delta M (595 + 0.45 t_2 - t_r) + C_3 (t_2 - t_r)}{C_1 t_1 - (1 + k) \cdot C_2 \cdot t_2} \quad \text{公式(3-15)}$$

式中  $q$ ——1kg 原煤所需干燥气量，kg/kg；

$t_1$ ——入口界面干燥气温度，℃；

$t_2$ ——出口界面干燥气温度，℃；

- $t_n$ ——入口界面原煤温度, °C;  
 $C_1$ ——入口界面干燥气热容, J/kg·°C;  
 $C_2$ ——出口界面干燥气热容, J/kg·°C;  
 $C_3$ ——原煤收到基热容, J/kg·°C;  
 $\Delta M$ ——1kg 原煤蒸发掉的水分;  
 $\Delta M=M_1-M_2$   
 $M_1$ ——入口界面原煤水分, %;  
 $M_2$ ——干燥后煤粉水分, %。

煤的收到基热容可按式算出:

$$C_3 = \frac{100 - M_1}{100} C_4 + \frac{M_1}{100}$$

$C_4$ ——煤的干燥基热容, 无烟煤为 0.22, 烟煤为 0.26。

### (2) 干燥气温度计算模型

由公式 3-15, 可导出磨煤机入口干燥气温度计算公式

$$t_1 = \frac{\Delta M (595 + 0.45 t_2 - t_n) + C_3 (t_2 - t_n) + 1.34 q \cdot C_2 \cdot t_2}{q \cdot C_1} \quad \text{公式(3-16)}$$

### (3) 干燥气组分计算模型

热风炉烟气、燃烧炉烟气在干燥气中所占比例联立求解:  $q_1$  和  $q_2$

$$\begin{cases} q = q_1 + q_2 \\ q \cdot C_1 \cdot t_1 = q_1 \cdot C_{\text{热}} \cdot t_{\text{热}} + q_2 \cdot C_{\text{燃}} \cdot t_{\text{燃}} \end{cases} \quad \text{公式(3-17)}$$

$$\text{热风炉烟气占: } \frac{q_1}{q} \cdot 100\%$$

$$\text{燃烧炉烟气占: } \frac{q_2}{q} \cdot 100\%$$

式中  $q$ ——1kg 原煤所需干燥气量, kg/kg;

$q_1$ ——1kg 原煤所需热风炉烟气量, kg/kg;

$q_2$ ——1kg 原煤所需燃烧炉烟气量, kg/kg;

$C_1$ ——干燥气热容, J/kg·°C;

$t_1$ ——干燥气温度, °C;

$C_{\text{燃}}$ ——燃烧炉烟气热容, J/kg·°C;

$t_{\text{燃}}$ ——燃烧炉烟气温度, °C;

$C_{\text{热}}$ ——热风炉烟气热容, J/kg·°C;

$t_{\text{热}}$ ——热风炉烟气温度, °C;

(4) 热风炉烟气计算模型

实际兑入热风炉烟气:

$$V_{\text{R}} = (1 + k) \cdot \frac{q_1}{\gamma_1} \quad \text{公式(3-18)}$$

式中  $V_{\text{R}}$ ——1kg 原煤所需热风炉烟气量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$\gamma_1$ ——热风炉烟气体积质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$k$ ——为系统漏风率。

(5) 燃烧炉烟气计算模型

制粉干燥气燃烧炉用的燃料一般是高炉煤气、焦炉煤气, 国内多数厂家用高炉煤气与焦炉煤气混合气作为燃料。

高炉煤气是高炉生产的副产品。它的热值较低, 但数量较大(每吨生铁发生约  $1500\sim 2000\text{m}^3$ )有相当可观的能量, 是钢铁厂主要气体燃料之一。它无色、无味、有剧毒、易燃易爆。它的成分、热值、密度等性能列于表 3.18。

焦炉煤气是炼焦生产的副产品。它的热值较高, 但数量比高炉煤气少(每吨焦炭发生约  $300\sim 350\text{m}^3$ ), 也是钢铁厂主要气体燃料之一。焦炉煤气无色、有臭味、有毒性、易燃易爆, 其主要可燃成分是甲烷、氢气、一氧化碳等。它的具体特性见表 3.19。

表 3.18 高炉煤气理化性能

| 项目<br>名称 | 化学成分/体积百分数%   |             |              |              | 发热值<br>$Q_{\text{R}}^{\text{r}} \text{ kJ}/\text{m}^3$ | 密度<br>$\text{kg}/\text{m}^3$ | 爆炸<br>范围/% | 着火<br>温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|----------|---------------|-------------|--------------|--------------|--|------------------------------|------------|------------------------------|
|          | $\text{CO}_2$ | $\text{CO}$ | $\text{H}_2$ | $\text{N}_2$ |  |                              |            |                              |
| 高炉煤气     | 10~20         | 21~30       | 1.2~3.0      | 55~57        | 2900~3770  | 1.295                        |            | 700                          |

表 3.19 焦炉煤气理化性能

| 项目<br>名称 | 化学成分/体积百分数% |               |              |               |                        |              |              | 发热值<br>$Q_{\text{R}}^{\text{r}} \text{ kJ}/\text{m}^3$ | 密度<br>$\text{kg}/\text{m}^3$ | 爆炸范<br>围/% | 着火温<br>度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|----------|-------------|---------------|--------------|---------------|------------------------|--------------|--------------|--|------------------------------|------------|------------------------------|
|          | $\text{CO}$ | $\text{CO}_2$ | $\text{H}_2$ | $\text{CH}_4$ | $\text{C}_n\text{H}_m$ | $\text{O}_2$ | $\text{N}_2$ |  |                              |            |                              |
| 焦炉煤气     | 5~8         | 2~4           | 50~60        | 20~30         | 2~4                    | 0.5~0.8      | 3~8          | 16700~18800  | 0.45~0.55                    | 40~70      | 650                          |

1) 燃烧炉烟气组分计算模型

$$q_2 \cdot C_{\text{R}} \cdot t_{\text{R}} = Q_{\text{高}} \cdot \frac{q_{\text{高}}}{\gamma_{\text{高}}} + Q_{\text{焦}} \cdot \frac{q_{\text{焦}}}{\gamma_{\text{焦}}} \quad \text{公式(3-19)}$$

式中  $q_2$ ——1kg 原煤所需燃烧炉烟气量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;

- $t_{\text{高}}$ ——燃烧炉烟气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $C_{\text{高}}$ ——燃烧炉烟气热容,  $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;
- $Q_{\text{高}}$ ——高炉煤气的低发热值,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;
- $Q_{\text{焦}}$ ——焦炉煤气的低发热值,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;
- $q_{\text{高}}$ ——1kg 原煤所需高炉煤气量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;
- $q_{\text{焦}}$ ——1kg 原煤所需焦炉煤气量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;
- $\gamma_{\text{高}}$ ——高炉煤气体积质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- $\gamma_{\text{焦}}$ ——焦炉煤气体积质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

其中高炉煤气发热值:

$$Q_{\text{高}}=126.36\text{CO}+107.85\text{H}_2, \text{kJ}/\text{m}^3; \quad \text{公式(3-20)}$$

焦炉煤气发热值:

$$Q_{\text{焦}}=126.36\text{CO}+107.85\text{H}_2+358.81\text{CH}_4+594.4\text{C}_2\text{H}_4, \text{kJ}/\text{m}^3; \quad \text{公式(3-21)}$$

## 2) 高炉煤气计算模型

兑入燃烧炉高炉煤气:

$$V_{\text{高}} = \frac{q_{\text{高}}}{\gamma_{\text{高}}} \quad \text{公式(3-22)}$$

式中  $V_{\text{高}}$ ——1kg 原煤所需高炉煤气量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

## 3) 焦炉煤气计算模型

兑入燃烧炉焦炉煤气:

$$V_{\text{焦}} = \frac{q_{\text{焦}}}{\gamma_{\text{焦}}} \quad \text{公式(3-23)}$$

式中  $V_{\text{焦}}$ ——1kg 原煤所需焦炉煤气量,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

## (6) 助燃风计算模型

燃烧炉用空气量的计算:

### 1) 每立方米煤气完全燃烧, 所需要的理论空气量按下式计算:

$$V_{\text{理}}=4.762\left(\frac{1}{2}\text{CO}+\frac{1}{2}\text{H}_2+2\text{CH}_4+3\text{C}_2\text{H}_4\cdots\right)\cdot\frac{q_{\text{高}}+q_{\text{焦}}}{\gamma_{\text{煤}}}\cdot\frac{1}{100} \quad \text{公式(3-24)}$$

式中  $V_{\text{理}}$ ——1kg 原煤理论空气需要量,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;

$\gamma_{\text{煤}}$ ——燃烧炉煤气体积质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

CO、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ ——分别为煤气中的体积百分含量, %。

### 2) 实际空气需要量:

$$V_{\text{实}}=n\cdot V_{\text{理}} \quad \text{公式(3-25)}$$

式中  $V_{*}$ ——1kg 原煤实际空气需要量,  $m^3/m^3$ ;  
 $n$ ——空气过剩系数。

$$\text{其中 } n = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2}{1000(QO_2 + O_2)}} \quad \text{公式(3-26)}$$

式中  $O_2$ ——烟气中的氧含量, %;  
 $QO_2$ —— $CO_2+SO_2$ , %。

3) 燃烧炉烟气量的计算:

$$\frac{q_2}{\gamma_2} = 1 + (n - 0.21) V_{*} \quad \text{公式(3-27)}$$

$\gamma_2$ ——燃烧炉烟气体积质量,  $kg/m^3$ 。

(7) 模型特点

1) 开放性

开放性是指该模型相关参数可以随着监测数据的变化而变化。首先,干燥气的特性随不同喷煤工艺的干燥气系统而不同,为准确监控不同的干燥气系统,应确保输入参数符合相关系统的特性。本模型中对于大多数干燥气系统运行的通用参数均设置为计算机自动监测并调控状态,而对于干燥气系统的特有参数均设置为人工手动设置,从而确保该模型的广泛实用性。

2) 动态性

动态性是指干燥气各组分的用量和控制应根据在线制粉量的多少而发生相应的变化。只要对计算模型需要的特性参数进行实时更新,将相关指标输入到计算公式,该模型就会对干燥气系统中各组分进行优化调控,从而确保制粉系统生产的顺行。

3) 快捷性、及时性

使用该计算模型,计算机根据该模型可自行对干燥气系统中出现的各种因素的波动进行调控,且反应迅速,使系统发生事故的概率降到最低,保证了干燥气系统的稳定运行。除重大事故造成系统的停工、停产,无需人工操作。

3.4.4 干燥气系统安全监控参数

(1) 根据量化模型,在热风炉系统中应直接监控的参数包括气体流量( $m^3/h$ )、温度( $^{\circ}C$ )和气体密度( $kg/m^3$ )三大部分参数。

流量参数包括:磨煤机入口处干燥气流量,热风炉烟气流量,高炉煤气流量,焦炉煤气流量和助燃风量。

温度参数包括:磨煤机入口温度(应低于喷吹煤粉最低着火温度),磨煤机出口温度(正常工作条件下应低于  $80^{\circ}C$ ),燃烧炉烟气温度,热风炉烟气温度和环境温度。

气体密度参数包括：干燥气体积密度，热风炉烟气密度，燃烧炉烟气密度，高炉煤气密度和焦炉煤气密度。

(2) 上述量化模型在高炉喷吹煤粉过程中需间接测量或设置的参数包括：磨煤机入口界面干燥气热容(J/kg·℃)，磨煤机出口界面干燥气热容(J/kg·℃)，热风炉烟气热容(J/kg·℃)，燃烧炉烟气热容(J/kg·℃)，燃烧炉烟气气氛百分含量(%)，高炉煤气气氛百分含量(%)，焦炉煤气气氛百分含量(%)和系统漏风率。

(3) 系统安全监测相关参数包括：环境 CO 浓度(mg/m<sup>3</sup>)，未避免煤气中毒事故，工作场所含 CO<30mg/m<sup>3</sup>；氧含量(%)，为保证制粉生产的安全，磨煤机入口处干燥气氧含量必须控制在 6%以内；系统压力(Pa)，体现系统内气流顺行的重要指标，为避免管道漏风、燃烧炉回火等异常情况出现，必须对系统关键节点处的压力进行实时监测；燃烧炉炉膛温度(℃)，通常控制在 700~1100℃，为保证干燥气温度在正常范围，常控制在 900℃上下。

### 3.5 制粉及输送系统安全监控模型

#### 3.5.1 制粉及输送系统危险性评价

##### (1) 单元危险有害因素

1) 煤粉在制备、输送、转运过程中发生泄漏，当空气中的煤粉尘浓度达到爆炸极限时，遇到火源后就会发生爆炸事故，造成设备损坏和人员伤亡。

2) 煤粉在制备、储存及固气分离时，如含氧量过高，遇明火会引起爆炸。

3) 煤粉积存一段时间会产生自燃，积粉自燃后将会烧损制粉系统设备及引起其它可燃物燃烧，如引起电缆着火。

4) 输煤管路有漏煤点，发生煤粉泄漏，造成煤尘危害。

##### (2) 预先危险性分析

对本单元的危害性因素分析，采用预先危险性分析法，其评价见表 3.20。

表 3.20 制粉、收粉系统预先危险性分析

| 事故       | 形成事故的原因  | 事故后果       | 危险指数 | 措施  |
|----------|--|------------|------|---|
| 给煤系统煤尘爆炸 | 1.系统漏煤粉，致使周围粉尘浓度达到爆炸极限。<br>2.原煤仓空仓或悬料。<br>3.原煤仓煤粉堆积，积粉逐渐氧化，温度升高，致使积存煤粉氧化引起自燃着火。<br>4.给煤机堵塞或发生故 | 设备损坏，人员伤亡。 | 6    | 1.及时消除给粉系统的泄漏点和清扫积粉。<br>2.清扫给粉系统或大量送煤时，要采取措施，降低粉尘浓度。<br>3.加强火源管理，杜绝焊接等明火作业。<br>4.原煤仓和给系统附近要 |

|            |   |            |   |  |
|------------|---|------------|---|--|
|            | 障。<br>5.遇到其它明火。   |            |   | 有消防设施,备有专用灭火器材,消防水应充足,水压符合要求。消防灭火设施应保持完好,按期进行试验。<br>5.煤粉仓投运前应作严密性试验,发现有漏粉、漏风应及时消除。   |
| 制粉系统煤粉燃烧爆炸 | <p>1.粉仓存煤粉时间过长,煤粉表面积大,与空气接触氧化、放热,使煤粉加热至着火温度而自燃。</p> <p>2.系统设计、制造及安装不合理,流通断面有死角,造成煤粉沉积自燃。</p> <p>3.没有根据煤种控制磨机出口温度,温度高发生爆炸。</p> <p>4.风粉混合浓度在爆炸范围内时,遇明火爆炸。</p> <p>5.系统漏风。</p> <p>6.磨煤机非正常停机,内部积粉达到爆炸浓度。</p> <p>7.磨煤机断煤,机械摩擦碰撞出现火花。</p> <p>8.磨煤机负荷过重,磨煤机入口处煤尘溢出。</p> <p>9.原煤中的易燃易爆物随给煤进入磨煤机。</p> <p>10.除铁器工作不良,铁清除不彻底,在磨压过程中产生火花可能导致燃爆事故。</p> | 设备损坏,人员伤亡。 | 6 | <p>1.煤粉仓在设计上要尽量减少制粉系统的水平管段,做到严密、内壁光滑,无积粉死角,抗爆能力应付和规程要求。管道设计中要走向合理,弯头尽量采用大角度的慢弯,防止涡流区积粉。</p> <p>2.煤粉仓应按计算设有足够的防暴门,防爆薄膜应有足够的防爆面积和规定的强度,防爆门动作后喷出的火焰和高温气体要引向安全方向或采取安全隔离。</p> <p>3.根据煤粉仓结构情况,尤其积粉处,应设置足够的粉仓温度测点和报警装置,并定期校验。</p> <p>4.制粉系统应有足够的消防设施,并配有专门的消防器材,消防水源应充足,水压符合要求。消防设施应保持完好、可用,按期进行试验。</p> <p>5.要坚持执行定期降粉制度和停吹前煤粉仓空气制度。</p> <p>6.根据煤种控制磨煤机出口温度,制粉系统停运后,对制粉管道要进行充分抽粉;停运时可对粉仓进行充氮保护。</p> <p>7.当发现粉仓温度异常升高或确认粉仓内自燃,应及时投入灭火系统,防止引起</p> |

|             |   |                |   |  |
|-------------|---|----------------|---|--|
|             |   |                |   | <p>粉仓爆炸,亦可采取降粉或压粉措施。</p> <p>8.磨煤机内无煤时磨煤机立即停车。</p> <p>9.每次大修均要清理粉仓,检查粉仓严密性及有无死角。</p> <p>10.防止制粉系统漏风。</p> <p>11.清除给煤中的易燃易爆物。保持除铁器工作可靠。</p> <p>12.煤粉仓设温度及 CO 浓度测量及报警装置。</p> |
| 烟气炉爆炸       | <p>1.先送煤气,后点火,致使煤气聚集达爆炸极限。</p> <p>2.未净炉点火,炉膛内残存煤气达到爆炸极限引起爆炸。</p> <p>3.高炉煤气压力低检测控制失灵,熄火后煤气流量突然再次增大,在炉膛内聚集达到爆炸极限。</p> | 设备损坏,人员伤亡。     | 6 | <p>1.先点火后送煤气。点火前应用氮气将炉膛内残存煤气清除干净。</p> <p>2.煤气压力低应报警并切断煤气来源。</p> <p>3.煤气流量应与助燃空气量连锁控制。</p> <p>4.设焦炉煤气点火装置。</p>  |
| 布袋收粉器燃爆事故   | <p>1.系统静电接地失效、法兰等跨接导线未恢复或布袋防静电性能差,煤粉高速运动产生静电火花导致燃烧爆炸事故。</p> <p>2.磨煤机出口温度过高未及时采取措施处理,致使布袋自燃导致煤粉爆炸。</p>               | 设备损坏,人员伤亡。     | 6 | <p>1.所有设备、容器、管道应设防静电接地,法兰间用导线跨接。</p> <p>2.采用抗静电滤袋。</p> <p>3.严格控制磨煤机出口温度。</p> <p>4.布袋收粉器设置氮气防爆吹扫管。</p>  |
| 输煤管道燃爆及粉尘事故 | <p>1.输煤管路堵塞,煤尘积粉自燃。</p> <p>2.系统静电接地失效、法兰等跨接导线未恢复,煤粉高速运动产生静电火花导致燃烧爆炸事故。</p> <p>3.输煤管路有漏煤点,造成煤粉泄漏。</p>                | 设备损坏,人员伤亡,职业病。 | 6 | <p>1.注意输送气体的压力波动和流量变化,防止管道堵塞故障。</p> <p>2.发生堵塞后及时打开扫线阀清扫堵塞煤尘。</p> <p>3.定期监测输煤系统各部有无漏煤或爆破现象。</p> <p>4.仓式泵、输煤管道应设防静电接地,法兰间用导线跨接。</p> <p>5.喷吹管路上应设置爆破膜等泄爆装置,并定期检查更换。</p>     |

(3) 煤粉爆炸事故树分析

1) 画出事故树图 3.4。

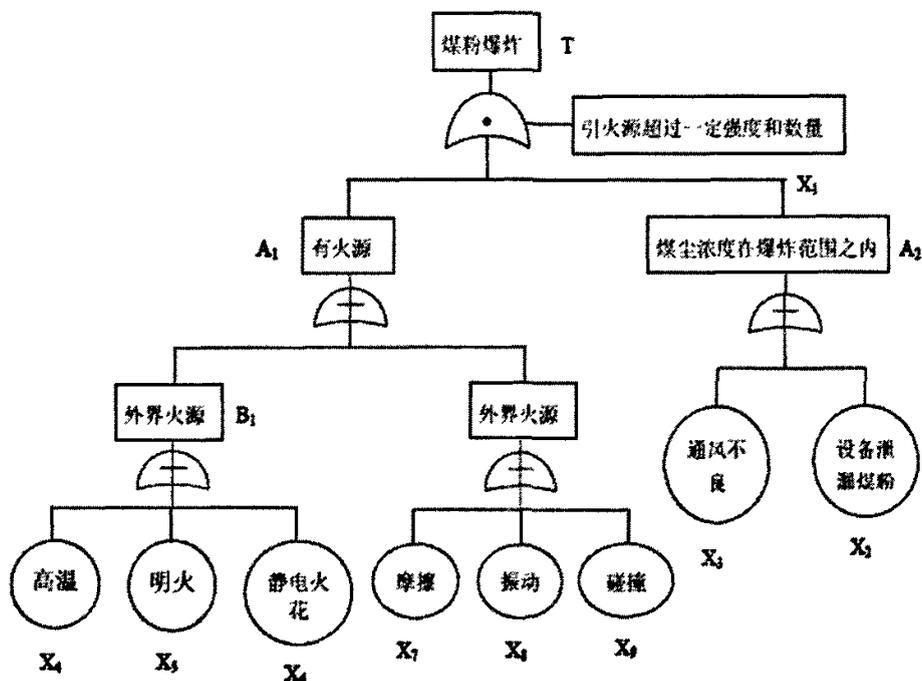


图 3.4 制粉系统煤粉爆炸事故树分析

2) 求最小径(割)集

首先从煤尘爆炸事故树推演出成功树，然后根据成功树分析得出结构函数式。根据成功树逻辑关系推算，结构函数式如下：

$$\begin{aligned}
 T' &= X_1' + A_1' + A_2' \\
 &= X_1' + A_3' A_4' + X_2' X_3' \\
 &= X_1' + X_4' X_5' X_6' X_7' X_8' X_9' + X_2' X_3'
 \end{aligned}$$

分析该事故树的九个基本事件，得出 3 个最小径集：

$$P_1 = \{X_1'\}; P_2 = \{X_4', X_5', X_6', X_7', X_8', X_9'\}; P_3 = \{X_2', X_3'\}$$

3) 结构重要度分析

根据以上结果，运用结构重要度近似方法，得出结构重要度顺序：

$$I(1) > I(2) = I(3) > I(4) = I(5) = I(6) = I(7) = I(8) = I(9)$$

从上述分析得知，引发煤尘爆炸的重要原因是火源达到点火能量、通风量不足、设备泄漏煤尘，因此，控制着三个因素是减少和避免煤尘爆炸事故发生的根本所在。

(4) 高炉喷煤道化学火灾、爆炸指数评价法评价

高炉喷煤道化学火灾、爆炸危险指数评价情况见表 3.21，计算结果火灾、爆炸指

数( $F_3 \times MF = F \& EI$ )为 156, 危险指数属于“很大”, 应重点进行防范。

表 3.21 高炉喷煤道化学火灾、爆炸危险指数计算表

| 工艺单元                                 | 高炉喷煤装置    |      |         |
|--------------------------------------|-----------|------|---------|
| 主要设备                                 | 煤粉仓、喷吹罐   | 操作状态 | 设计      |
| 确定 MF 的物质                            | 煤粉        |      |         |
| 物质系数(单元温度超过 60℃时应注明)                 |           |      | 24      |
| 1.一般工艺危险                             | 危险系数范围    |      | 采用危险系数  |
| 基本系数                                 | 1.00      |      | 1.0     |
| A.放热化学反应                             | 0.30~1.25 |      |         |
| B.吸热反应                               | 0.20~0.40 |      |         |
| C.物料处理与输送                            | 0.25~1.05 |      | 0.50    |
| D.密闭式或室内工艺单元                         | 0.25~0.90 |      | 0.50    |
| E.通道                                 | 0.20~0.35 |      |         |
| F.排放和泄漏控制                            | 0.25~0.50 |      |         |
| 一般工艺危险系数( $F_1$ )                    |           |      | 2.0     |
| 2.特殊工艺危险                             |           |      |         |
| 基本系数                                 | 1.00      |      | 1.00    |
| A.毒性物质                               | 0.20~0.80 |      | 0.20    |
| B.负压(<500mmHg)                       |           |      |         |
| C.易燃范围内及接近易燃范围的操作                    | 0.3       |      | 0.3     |
| 惰性化——未惰性化——                          |           |      |         |
| 1.罐装易燃液体                             | 0.50      |      |         |
| 2.过程失常或吹扫故障                          | 0.30      |      |         |
| 3.一直在燃烧范围内                           | 0.80      |      |         |
| D.粉尘爆炸                               | 0.25~2.00 |      | 0.25    |
| E.压力释放                               |           |      |         |
| F.低温                                 | 0.20~0.30 |      |         |
| G.易燃及不稳定物质的质量物质质量/kg; 物质燃烧热/J/kg     |           |      | 0.2     |
| 1.工艺中的液体及气体                          |           |      |         |
| 2.贮存中的液体及气体                          |           |      |         |
| 3.贮存中的可燃固体及工艺中的粉尘                    |           |      |         |
| H.腐蚀与磨蚀                              |           |      |         |
| I.泄漏——接头和填料                          | 0.10~1.50 |      | 0.30    |
| J.使用明火设备                             |           |      | 1       |
| K.热油热交换系统                            |           |      |         |
| L.转动设备                               |           |      |         |
| 特殊工艺危险系数( $F_2$ )                    |           |      | 3.25    |
| 工艺单元危险系数( $F_1 \times F_2 = F_3$ )   |           |      | 6.50    |
| 火灾、爆炸指数( $F_3 \times MF = F \& EI$ ) |           |      | 156     |
| 影响范围(R)                              |           |      | 39.312m |

### (5) 小结

本单元可能发生的事故有：给煤系统煤粉燃烧爆炸事故、制粉系统煤粉燃烧爆炸事故、烟气炉爆炸、布袋收粉器燃烧爆炸事故和输煤管道煤粉燃爆事故。危险指数为6，属于危险性事故，会造成严重的人员伤亡或财产损失。

对煤粉爆炸进行事故树分析得知，引发煤尘爆炸的重要原因有：是火源到达点火能量、通风量不足及设备泄漏煤尘。因此，控制这三个因素是减少和避免煤尘爆炸事故发生的关键。对高炉喷煤单元进行火灾、爆炸指数法评价，其火灾、爆炸指数( $F_3 \times MF = F \& E I$ )为156，危险指数属于“很大”，应重点进行防范。

### 3.5.2 制粉及输送系统安全监控模型

立式中速磨制粉系统目前广泛应用于国内外炼铁厂中，它是高炉炼铁系统的重要辅机，也是耗能较大的设备之一，它的运行情况直接影响到整个喷煤系统的安全性和经济性。制粉系统经济而稳定地运行是高炉炼铁实现节能降耗并减少事故的重要途径。多变量强耦合、大时滞和模型时变特性是中速磨煤机制粉系统实现自动控制的主要困难。目前国内大多数炼铁厂喷煤系统的中速磨制粉系统都无法实现自动控制，在人工操作情况下，为了防止堵煤、超温，运行人员常常将磨煤机调整在远离最佳工作点的位置上运行，造成了大量的电能浪费。因此实现对中速磨的自动监控，既可以保证制粉系统获得较低的单位制粉电耗，同时在确保获得煤粉经济细度的前提下保证制粉系统的安全运行<sup>[64]</sup>。

另外，如何合理地将煤粉输送至喷吹系统，将直接影响高炉喷吹煤粉的经济性、安全性及是否污染环境。目前国内钢铁厂通常采用气力输送方式输送煤粉，该方法虽有输粉能力大、能耗低、作业连续性好等优点<sup>[65]</sup>，但由于工艺设备的复杂性和事故的突发性，因此必须对煤粉的输送进行连续的监测与控制，从而保证煤粉输送过程的安全与连续。

#### (1) 制粉系统安全监控计算模型

从自动控制角度而言，中速磨的数学模型是三输入三输出的数学模型。分析其工作机理，得到如图3.5所示的中速磨运行系统。中速磨的三个输入量一般是给煤量、干燥气流量以及循环风流量；三个输出量是磨煤机的出口温度、磨煤机的入口负压和磨煤机的进出口差压<sup>[66]</sup>。



图 3.5 中速磨运行系统

为保证制粉系统获得较低的制粉单位电耗，同时获得煤粉经济细度和保证制粉系统的安全运行，需要控制中速磨的出口温度、入口压力和出入口压差三个被控变量。但由图 3.5 中速磨运行系统看出，中速磨煤机的三个被控参数的动态差别较大，主要表现为三被控参数相互耦合严重，但不解耦的系统是不可能实现良好的控制的。因此，为实现制粉系统的自动控制和运行，必须对中速磨系统模型进行解耦。

目前对磨煤机的解耦控制主要有以下一些方案<sup>[67]</sup>：多变量频域法解耦控制、广义预测解耦控制、动态自动寻优控制及神经网络解耦控制的研究为解决这类问题提供了有效的方法。但由于预测控制对于克服大时滞、时变性有独到之处，且对于多变量系统的解耦设计，只是简单地套用单变量系统的形式。因此，仅通过求解控制增量的矩阵方程组，便可以实现多步预测的解耦控制，从而避免了求解复杂的  $n \times (M-1)$  个线性方程组问题，然后将其应用于磨煤机系统的控制设计<sup>[68]</sup>。

### 1) 单变量系统的 MAC 算法

模型算法控制是一种利用被控对象的单位脉冲响应采样数据作为预测模型的预测控制算法，设被控对象的单位脉冲采样数据为

$$\{g_1, g_2, \dots\}$$

对于渐近稳定的系统，其脉冲响应在若干个采样周期后就趋于稳态值，即  $g_N \approx 0$ ，因此可以用单位脉冲响应采样数据的前有限项描述系统的动态特性

$$\{g_1, g_2, \dots, g_N\}$$

由线性系统的叠加原理，可以得到系统输出的预测模型为

$$Y_m(k+1) = Y_m(k) + G\Delta U(k) + F_0 U(k-1) \quad \text{公式(3-28)}$$

公式(3-28)中

$$Y_m(k+1) = [y_m(k+1/k), y_m(k+2/k), \dots, y_m(k+P/k)]^T,$$

$$\Delta U(k) = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M-1)]^T,$$

$$U(k-1) = [u(k-N+1), u(k-N+2), \dots, u(k-1)]^T,$$

$$G = \begin{bmatrix} \hat{g}_1 & 0 & \dots & 0 \\ \hat{g}_1 + \hat{g}_2 & \hat{g}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^P \hat{g}_i & \sum_{i=1}^{P-1} \hat{g}_i & \dots & \sum_{i=1}^{P-M+1} \hat{g}_i \end{bmatrix}_{P \times M}$$

$$F_0 = \begin{bmatrix} \hat{g}_N & \hat{g}_{N-1} & \hat{g}_{N-2} & \dots & \hat{g}_3 & \hat{g}_1 + \hat{g}_2 \\ 0 & \hat{g}_N & \hat{g}_{N-1} & \dots & \hat{g}_4 & \sum_{i=1}^3 \hat{g}_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \hat{g}_{P+2} & \sum_{i=1}^{P+1} \hat{g}_i \end{bmatrix}_{P \times (N-1)}$$

上式表明，预测模型输出由两部分组成：待求的未知控制增量和过去控制量产生的系统已知输出初值。

### 2) 三输入三输出球磨机系统的 MAC 解耦算法

对三输入三输出系统，输入为  $u_1, u_2, u_3$ ，输出为  $y_1, y_2, y_3$ 。此时我们先将三输入三输出系统看作 3 个多输入单输出系统处理，相应的  $u_j$  对  $y_i$  的单位脉冲响应数据组成的如公式(3-28)中的矩阵  $G$  和  $F_0$  分别记为  $G_{ij}F_{0ij}(i,j=1,2,3)$ ，则由前面单变量系统的 MAC 算法可知，系统  $y_1$  的预测输出可写为：

$$Y_{1P}(k+1) = G_{11}\Delta U_1(k) + F_{011}U_1(k-1) + G_{12}\Delta U_2(k) + F_{012}U_2(k-1) + G_{13}\Delta U_3(k) + F_{013}U_3(k-1) + h_1 e_1(k)$$

其中  $e_1(k) = y_1(k) - [y_{11m}(k) + y_{12m}(k) + y_{13m}(k)]$ ，

如果将  $u_2, u_3$  对  $y_1$  的影响暂视为一种干扰，则可优化下列性能指标

$$J_{1P} = [Y_{1P}(k+1) - Y_{1r}(k+1)]^T Q_1 [Y_{1P}(k+1) - Y_{1r}(k+1)] + \Delta U_1^T(k) \bar{\lambda}_1 \Delta U_1(k)$$

其中  $Y_{1r}(k+1) = [y_{1r}(k+1), y_{1r}(k+2), \dots, y_{1r}(k+P_1)]^T$

$Q_1 = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_{P_1})$ ， $P_1$  是对于  $y_1$  的预测时域，

$\bar{\lambda}_1 = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ ， $M_1$  是对于  $u_1$  的控制时域，

得到

$$\Delta U_1(k) = (A_{11}^T Q_1 A_{11} + \bar{\lambda}_1)^{-1} A_{11}^T [Y_{1r} - F_{011}U_1 - F_{012}U_2 - F_{013}U_3 - A_{12}\Delta U_2 - A_{13}\Delta U_3 - h_1 e_1] \quad \text{公式(3-29)}$$

同理可得：

$$\Delta U_2(k) = (A_{22}^T Q_2 A_{22} + \bar{\lambda}_2)^{-1} A_{22}^T [Y_{2r} - F_{021}U_1 - F_{022}U_2 - F_{023}U_3 - A_{21}\Delta U_1 - A_{23}\Delta U_3 -$$

$$h_2 e_2] \quad \text{公式(3-30)}$$

$$\Delta U_3(k) = (A_{33}^T Q_3 A_{33} + \bar{\lambda}_3)^{-1} A_{33}^T [Y_{3r} - F_{031} U_1 - F_{032} U_2 - F_{033} U_3 - A_{31} \Delta U_1 - A_{32} \Delta U_2 - h_3 e_3] \quad \text{公式(3-31)}$$

从公式(3-29)、(3-30)、(3-31)可见,  $\Delta U_1(k)$ 和 $\Delta U_2(k)$ 、 $\Delta U_3(k)$ 是互相包含的待求未知量, 而 $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ 是过去时刻的已知输入量。考虑到现有计算机软件(如MATLAB等)处理矩阵求逆运算的方便, 此问题便可很容易解得, 首先记

$$A_1 = (A_{11}^T Q_1 A_{11} + \bar{\lambda}_1)^{-1} A_{11}^T$$

$$B_1 = Y_{1r} - F_{011} U_1 - F_{012} U_2 - F_{013} U_3 - h_1 e_1$$

$$A_2 = (A_{22}^T Q_2 A_{22} + \bar{\lambda}_2)^{-1} A_{22}^T$$

$$B_2 = Y_{2r} - F_{021} U_1 - F_{022} U_2 - F_{023} U_3 - h_2 e_2$$

$$A_3 = (A_{33}^T Q_3 A_{33} + \bar{\lambda}_3)^{-1} A_{33}^T$$

$$B_3 = Y_{3r} - F_{031} U_1 - F_{032} U_2 - F_{033} U_3 - h_3 e_3$$

则公式(3-29)、(3-30)、(3-31)可写成为

$$\begin{cases} \Delta U_1 = A_1 [B_1 - A_{12} \Delta U_2 - A_{13} \Delta U_3] \\ \Delta U_2 = A_2 [B_2 - A_{21} \Delta U_1 - A_{23} \Delta U_3] \\ \Delta U_3 = A_3 [B_3 - A_{31} \Delta U_1 - A_{32} \Delta U_2] \end{cases} \quad \text{公式(3-32)}$$

公式(3-32)亦可写成如下形式

$$\begin{bmatrix} I_1 & A_1 A_{12} & A_1 A_{13} \\ A_2 A_{21} & I_2 & A_2 A_{23} \\ A_3 A_{31} & A_3 A_{32} & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \\ A_2 B_2 \\ A_3 B_3 \end{bmatrix} \quad \text{公式(3-33)}$$

则有

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & A_1 A_{12} & A_1 A_{13} \\ A_2 A_{21} & I_2 & A_2 A_{23} \\ A_3 A_{31} & A_3 A_{32} & I_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 B_1 \\ A_2 B_2 \\ A_3 B_3 \end{bmatrix}$$

其中公式(3-33)中的矩阵求逆采用递推算法。

由公式(3-33)可得典型中速磨制粉系统在稳态工作时的数学模型如下:

$$\begin{bmatrix} T(s) \\ P(s) \\ \Delta P(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.77}{(80s+1)^3} & \frac{-0.1}{(60s+1)^3} & \frac{-0.13}{(110s+1)(80s+1)^2} \\ \frac{1.6}{8s+1} & \frac{0.54}{11s+1} & \frac{0.12}{(60s+1)^3} \\ \frac{0.18}{20s+1} & \frac{0.256}{30s+1} & \frac{0.3}{(110s+1)^3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_h(s) \\ F_r(s) \\ F_c(s) \end{bmatrix} \quad \text{公式(3-34)}$$

式中： $T$ —磨煤机出口温度； $P$ —磨煤机入口负压； $\Delta P$ —磨煤机进出口差压； $F_h$ —干燥气流量； $F_r$ —循环风流量， $F_c$ —给煤量。

因此，对于稳态工作的典型中速磨制粉系统，根据公式(3-34)可通过对给煤量、干燥气流量以及循环风流量的控制，实现制粉系统的自动控制和安全运行。

## (2) 输粉系统安全监控计算模型

由输煤管路堵塞而造成输煤罐内的煤尘积粉，是产生煤尘燃爆事故的根本原因。根据颗粒的沉降与悬浮理论可知，只有当输送管道中气流速度大于颗粒的沉降速度 $u_t$ 时，颗粒才会为气流所带动而不发生沉降。

但在煤粉输送过程中，理想的气流速度应该是在保证煤粉稳定输送的同时，既不能因过低而导致煤粉在管底沉积而造成管道堵塞，又不能因过高而过分增加能量消耗和管道磨损的流速。因此，最佳的煤粉输送气流速是高炉喷煤的一个重要工艺参数。从理论上讲，当气粉混合比一定时，使输料管阻力损失最小的输送气流速度即可满足上述对最佳气流速度的要求，这一气流速度称为临界气流速度 $u_{ak}$ 。

但是，实际上在选取输送系统的最佳气流速度时不能仅考虑 $u_{ak}$ 或 $u_t$ ，而应根据实验结果，结合理论研究以及在生产实际中所获得的经验数据等综合考虑来选取。一般来说，实际所需的输送气流速度要比颗粒的悬浮速度或临界气流速度高的多。因而，工程设计中往往采用下述计算方法确定气力输送的最佳流速，即

$$u_{aop} = c'' u_{ak} \quad \text{公式(3-35)}$$

公式(3-35)中， $c''$ 为经验系数，该系数 $c''$ 主要考虑混合比及管道布置形式，如对于煤粉的气力输送可参考表 3.22 来适当选取。

表 3.22 管道内气流速度修正系数参照表

| 管道布置形式 | 推荐最佳气流速度<br>( $u_{aop}=c''u_{ak}$ ) |
|--------|-------------------------------------|
| 垂直管道   | $c''=1.5 \sim 1.7$                  |
| 水平管道   | $c''=1.8 \sim 2.0$                  |

其中  $u_{ak}=1.75u_t$  公式(3-36)

而  $u_t=5.33\sqrt{\frac{d\cdot\gamma_s}{d\cdot\gamma_a}}=5.33\sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_a}}$  公式(3-37)

式中  $\gamma_s$ —煤粉视密度,  $t/m^3$ ,

$\gamma_a$ —空气密度,  $kg/m^3$ ,

根据上述计算公式, 输入喷吹煤粉视密度值, 即可计算出煤粉输送管道内的最佳气流速度。

### 3.5.3 制粉及输送系统安全监控参数

(1) 中速磨参数:

- 1) 温度: 入口温度<煤粉最低着火温度; 出口温度70~80℃; 轴瓦温度<90℃;
- 2) 负压: 入口负压300~1000Pa; 出入口负压差5000~7000Pa;
- 3) 气量及煤量: 干燥风量 $m^3/min$ ; 循环风量 $m^3/min$ ; 给煤量 $t/h$ ;
- 4) 安全参数: 氧含量<12%; 电机电流波动值<0.5A; CO含量<2%;

(2) 煤粉收集器:

- 1) 温度: 入口温度<80℃; 出口温度<80℃; 灰斗温度<80℃;
- 2) 负压: 入口负压; 出入口负压差; 氮气喷吹压力;
- 3) 气量: 出口风量 $m^3/h$ ;

(3) 输煤管线:

- 1) 负压: 入口负压; 出入口负压差; 管内测点压力;
- 2) 气流速: 气体流速 $m/s$ 。

## 3.6 喷吹系统安全监控模型

### 3.6.1 喷吹系统危险性评价

(1) 单元危险有害因素

1) 煤粉喷吹系统中使用压力容器, 如氮气储气罐、喷吹罐, 管理使用不当会发生压力容器爆炸事故。

2) 喷吹系统中的漏煤、摩擦静电火花、喷煤管线堵塞等原因, 会造成煤尘燃烧爆炸事故。

3) 氮气管道及贮罐泄漏, 浓度高时会引起窒息。

(2) 预先危险性分析

对本单元的危害性因素分析, 采用预先危险性分析法, 其评价见表 3.23。

表 3.23 喷吹系统预先危险性分析

| 事故       | 形成事故的原因   | 事故后果         | 危险指数 | 措施  |
|----------|---|--------------|------|---|
| 氮气窒息     | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.氮气喷吹系统星型阀及开关密闭性不严,造成氮气泄漏。</li> <li>2.氮气区未安装氧分测定装置,致使氮气喷吹过量。</li> <li>3.工作人员在氮气区工作时间过长,造成窒息。</li> </ol>   | 人员伤亡         | 6    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.经常检查氮气输气系统中的星型阀及开关的密闭性,及时堵塞漏氮点。</li> <li>2.氮气喷吹区保持通风良好。</li> <li>3.人员停留氮气区要站在上风处。</li> <li>4.工作人员检修系统时随身携带测氧仪。</li> </ol>  |
| 压力容器爆炸   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.喷吹系统压力低且喷出系统与高炉间压差连锁装置及逆止阀失效,致使高炉内部气体或明火倒窜,遇系统内氧含量超标爆炸。</li> <li>2.喷吹罐老化、安全阀及泄漏装置失效,充压后因压力上升造成物理爆炸。</li> </ol>   | 设备损坏<br>人员伤亡 | 6    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.保持差压连锁切断装置有效。</li> <li>2.保持逆止阀可靠。</li> <li>3.定期对喷吹罐、安全阀及泄爆装置定期检测、校验、确保其安全可靠。</li> <li>4.喷吹罐设温度检测、报警。</li> <li>5.喷煤罐及喷吹管路设紧急自动切断装置,在喷吹控制室和高炉。</li> <li>6.值班室设置紧急停喷按钮。</li> </ol>                        |
| 喷吹系统燃烧爆炸 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.因系统爆炸,喷吹系统煤粉外泄,遇激发能源爆炸。</li> <li>2.系统静电接地失效、法兰等跨接导线未恢复,煤粉高速运动产生静电火花导致燃烧爆炸事故。</li> <li>3.喷枪内部堵塞造成喷吹压力低于高炉内压力,且与高炉间的压差连锁装置及逆止阀失效,致使高炉内部气体或明火倒窜,使喷枪内富氧煤粉燃烧爆炸。</li> <li>4.煤粉仓、中间罐、喷吹罐及喷吹管线温度过高未及时采取措施处理,致使煤粉自燃爆炸。</li> </ol> | 设备损坏<br>人员伤亡 | 6    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.定期检查保持设备完好无泄漏。</li> <li>2.泄漏煤粉立即清理,严格控制火源,做好现场监护。</li> <li>3.所有设备、容器、管道应设防静电接地,法兰间用导线跨接。</li> <li>4.严格控制温度,不超标。</li> <li>5.喷吹系统的阀门采用自动操作,并设有连锁保护装置,以防止误操作。</li> <li>6.喷枪堵塞时,打开喷枪到吹清扫或更换新喷枪。</li> </ol> |

### (3) 小结

本单元可能发生的事故有:氮气窒息事故、喷吹罐爆炸事故、喷吹系统爆炸事故。危险指数为6,属于危险性事故,会造成严重的人员伤亡或财产损失。应注意的问题有:

- 1) 要定期测定氮气区域的氮气浓度，工作人员在氮气区工作时间不宜过长。
- 2) 实时监测压力容器内的压力变化，并设置防爆膜等泄爆装置。
- 3) 实时监测喷吹系统内气体的压力及流量变化，防止堵塞或漏煤事故。

### 3.6.2 喷吹系统安全监控模型

高炉喷吹系统包括储煤罐、喷吹罐、流化器和喷枪等装置，通过向高炉内喷吹煤粉达到降低焦比，调节炉况的目的。如何控制喷煤量，从而保证炼铁生产达到最佳效果，对降低焦比及提高生铁质量至关重要。喷吹系统中的气体压力和补偿气量的波动导致喷煤量的变化，而容器压力及相关控制点的温度又关乎喷吹系统的安全性<sup>[69]</sup>。因此对喷吹系统的安全监控实际上是为保证喷煤操作的顺行而对系统各环节上温度、压力等安全参数的监测，以及对气体流量和气体组分等可调控参数的控制。

喷吹系统监控参数量化模型的建立思路如图 3.6 所示。根据需要喷吹煤粉量的多少，通过量化监控模型计算出各参数的安全运行值，并进行在线实时监测，再通过补偿气量和喷吹压力等可控参数的实时在线调控，确保喷吹系统运行的安全与稳定<sup>[70]</sup>。

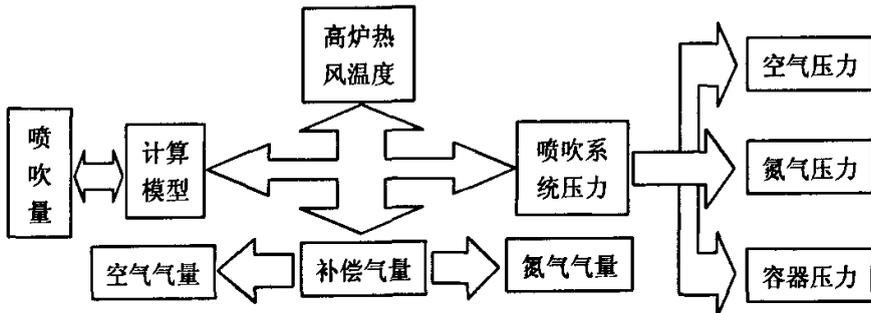


图 3.6 喷吹系统监控量计算过程示意

由于喷煤量的控制主要是通过调节喷吹罐的罐压和补气量来实现的，喷煤量实际上就是罐压和补气量的二元函数。在进行大量工业试验的基础上，通过建立二元回归方程对试验数据进行处理，求出喷煤量、喷吹罐压和补气量三者之间的变化规律，从而确立了喷煤量和喷吹罐压、补气量在三维条件下的数学模型<sup>[71]</sup>：

$$Q = 77.9291P^{0.8696}V^{-0.4537} \quad \text{公式(3-38)}$$

式中  $Q$ ——高炉喷吹煤粉量(t/h)  
 $P$ ——喷吹罐罐压(MPa)  
 $V$ ——喷吹系统补气量(m<sup>3</sup>/min)

如表 3.24 所示(见 78 页)，用该模型计算出的 50 个结果与实际测量结果进行比较

可以看出, 相对误差最大值为 10.32%, 相对误差最小值为 0.3%, 平均相对误差为 2.96%, 小于 5%。证明所建三维数学模型是比较精确的, 此模型在高炉喷煤生产中可以作为喷煤量的自动控制模型。本文采用该模型作为高炉喷煤量自动控制计算模型的理论依据。

### (1) 补气量计算模型:

#### 1) 喷煤风量的计算

高炉喷吹煤粉用的自燃风量与高炉的喷煤量、喷吹的起点压力以及喷煤管道的直径都有密切的关系<sup>[72]</sup>。喷吹风量可按式计算:

$$V = 0.2136 d_m^{0.155} \cdot \mu^{0.294} d^2 \cdot p \quad \text{公式(3-39)}$$

式中  $V$ ——风量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;

$d_m$ ——煤粉粒度, 一般取 1~1.2mm;

$\mu$ ——煤粉浓度,  $\text{kg 粉}/\text{kg 气}$ ;

$d$ ——输送管道直径,  $\text{cm}$ ;

$p$ ——输煤起点绝对压力,  $\text{MPa}$ 。

公式计算出的喷吹风量是最少的风量。为此, 按公式 3-39 计算出的  $V$  值应按工程设计条件和经验乘以系数 1.2~1.5 加以修正。

#### 2) 耗氮量的计算

当惰性气体中不含氧气, 混合气体中要求不同的含氧百分数时, 每  $\text{m}^3$  空气需要掺入的惰性气体量, 可用公式(3-40)计算:

$$Q_{\text{惰}} = \frac{0.21}{Q_{2\text{混}}} - 1 \quad \text{公式(3-40)}$$

式中  $Q_{\text{惰}}$ ——惰性气体的体积,  $\text{m}^3$ ;

$Q_{2\text{混}}$ ——混合气体的含氧量的百分数;

0.21——空气中含氧量的百分数。

### (2) 喷吹压力计算模型

#### 1) 压缩空气压力的计算

实际工程中, 压缩空气压力大于高炉热风压力 0.15MPa; 氮气压力大于压缩空气压力 0.05MPa<sup>[63]</sup>。压缩空气压力可用下式计算:

$$P_{\text{空}} = P_0 + 0.15 + P_{\text{氮}} \quad \text{公式(3-41)}$$

式中  $P_{\text{空}}$ ——压缩空气压力,  $\text{MPa}$ ;

$P_0$ ——高炉热风压力,  $\text{MPa}$ ;

0.15——压缩空气与高炉热风压差,  $\text{MPa}$ ;

$P_{\text{损}}$ ——喷吹管路压损, MPa;

其中,  $P_{\text{损}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$

$\Delta P_1$ ——水平直管段的压力损失, MPa;

$\Delta P_2$ ——垂直直管段压力损失, MPa;

$$\Delta P_1 = \frac{0.6\lambda \cdot L_p \cdot W^2}{D \cdot 10^6} (1 + K_L \cdot \mu) \quad \text{公式(3-42)}$$

$$\Delta P_2 = \frac{0.6\lambda HW^2}{D \cdot 10^6} (1 + K_H \cdot \mu) \quad \text{公式(3-43)}$$

式中  $\lambda$ ——摩擦阻力系数,  $\lambda = 0.0125 + \frac{0.0011}{D}$ ; 公式(3-44)

$D$ ——输送管道的管径, m;

$L_p$ ——水平输送管道的当量长度, m;

$H$ ——垂直提升高度, m;

$W$ ——管道流速, 其中  $W = \frac{29.88}{D^2 \cdot P}$ , m/s; 公式(3-45)

$P$ ——输煤管道内压力, kPa;

$K_L$ ——附加阻力系数,  $K_L$ 与管道内平均风速  $W$ 之间的关系如图 3.7 所示;

$K_H$ ——设计附加阻力系数,  $K_H = 1.1K_L$ 。

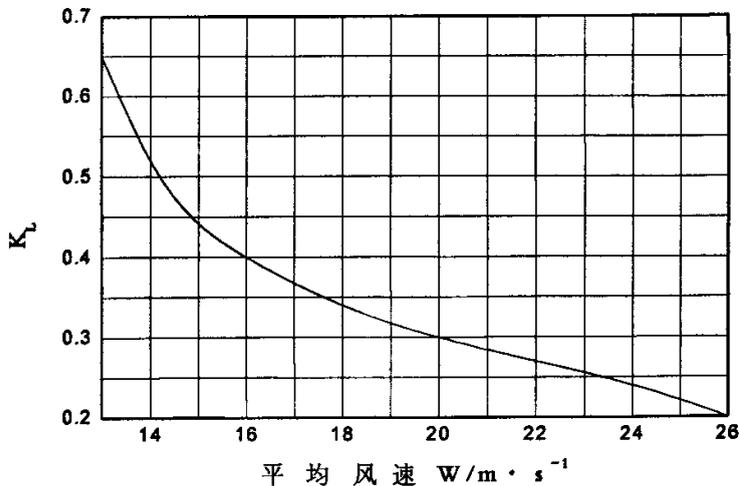


图 3.7  $K_L - W$  函数关系图

2) 压缩氮气压力的计算

$$P_{\text{氮}} = P_{\text{空}} + 0.05. \quad \text{公式(3-46)}$$

3) 压力容器防爆膜的计算

喷吹罐组中喷煤罐和储煤罐均属于压力容器，在运行中罐内具有相当高的初压，而最大爆炸压力是与初压成正比的，有时甚至会超过常压下最大爆炸压力的十几倍到几十倍。为了达到放散后爆炸压力在容器强度允许的范围内，必须采用定压爆破膜，即当容器内压力超过最高工作压力一定值(但该值小于罐体的设计压力)时，爆破膜就行爆破，释放容器内的压力，以保证容器的生产安全。可按如下的公式计算爆破膜。

① 爆破膜面积的确定。

根据美国石油工程和机械工程协会规范，爆破面积按下式计算：

$$A = 228 \frac{V}{t} \sqrt{\frac{M}{T}} \quad \text{公式(3-47)}$$

- 式中  $A$ ——爆破面积， $\text{cm}^2$ ；  
 $V$ ——容器体积， $\text{m}^3$ ；  
 $t$ ——爆破时容器操作温度， $\text{K}$ ；  
 $T$ ——爆破泄压时间， $\text{s}$ ；  
 $M$ ——混合气体平均分子量， $29$ ；

② 爆破压力的确定。

爆破膜的爆破压力应力应大于容器操作压力并留有一定富裕量，但必须略小于容器的设计压力。爆破压力选取过低，膜片经常爆破，不仅影响正常操作，而且造成煤粉排放损失和污染环境；如果爆破压力选取过高，势必加大容器的设计压力，增加设备费用。原则上爆破压力可按下列关系选取：

$$P_b = P_g + 0.7P_m \approx 0.85P_s, \quad \text{公式(3-48)}$$

- 式中  $P_b$ ——膜片的额定爆破压力， $\text{MPa}$ ；  
 $P_g$ ——系统或容器的工作压力， $\text{MPa}$ ；  
 $P_m$ ——容器内煤尘最大爆炸压力， $\text{MPa}$ ；  
 $P_s$ ——系统或容器的设计压力， $\text{MPa}$ ；

③ 爆破膜材质的选择。常用爆破膜为刻有沟纹的金属片，其材质有：不锈钢或铝片、铝合金片、铜片，根据生产需要还要选用镍、钽质等。

爆破膜厚度的计算：

$$\text{对铜片 } t = (0.12 \sim 0.15) \times 10^{-2} P_b d$$

$$\text{对铝板 } t = (0.316 \sim 0.40) \times 10^{-2} P_b d$$

- 式中  $t$ ——未变形时膜片厚度， $\text{cm}$ ；  
 $d$ ——爆破口直径， $\text{cm}$ 。

### (3) 喷吹温度计算模型

由于喷吹系统流化器内煤粉需高炉热风预热，因此流化器内热风口处温度应满足下式要求：

$$T_{\text{实}} < T_{\text{m}}$$

式中  $T_{\text{实}}$ ——高炉热风温度，℃；

$T_{\text{m}}$ ——流化器内煤粉最低着火温度，℃。

若  $T_{\text{实}} \geq T_{\text{m}}$ ，则流化器内煤粉存在燃爆危险，因此需向流化器内喷吹氮气降低  $T_{\text{实}}$  及含氧量，从而保证系统的安全顺行。

#### 3.6.3 喷吹系统安全监控参数

(1) 根据上述量化模型，在喷吹系统中应直接监控的参数包括补气量( $\text{m}^3/\text{h}$ )、压力(MPa)和煤粉浓度( $\text{kg}/\text{kg}$ )三大部分参数。

补气量参数包括：压缩空气的补气量和压缩氮气的补气量。

压力参数包括：压缩空气压力，压缩氮气压力，炉火热风压力、流化器内压力、输煤起点压力、输煤管内压力。

煤粉浓度参数包括：输煤管道内煤粉浓度和流化器内煤粉浓度。

(2) 上述量化模型在高炉喷吹煤粉过程中需间接测量的参数是煤粉的喷吹量( $\text{t/h}$ )，输煤管径( $\text{cm}$ )，输煤管水平长度及垂直高度( $\text{m}$ )，储煤罐、喷煤罐容器体积( $\text{m}^3$ )、设计承受压力(MPa)及设计爆炸温度(K)。

(3) 系统安全监测相关参数包括： $\text{CO}$  含量%，为避免爆炸及自燃事故，储煤罐和喷吹罐内  $\text{CO} < 1\%$ ； $\text{O}_2$  含量%，为避免罐体内沉积煤粉自燃，储煤罐及喷吹罐内  $\text{O}_2 < 8\%$ ；罐体压力，为防止储煤罐体发生物理爆炸，必须对罐内压力进行实时监控，且必须设置防爆膜；温度℃，为避免罐体煤粉燃烧，储煤罐温度应低于  $80^\circ\text{C}$ ，喷煤罐温度低于  $80^\circ\text{C}$ ，流化器内温度低于  $90^\circ\text{C}$ ，流化器内炉火热风口处温度低于粉尘最低着火温度。



### 3.7 本章小结

本章通过对贫瘦煤爆炸性的试验数据的研究,以及对高炉喷吹系统各子系统的危险性评价,分别建立了以下相关的数学量化模型:

(1) 对于潞安常村、漳村贫瘦煤,分别求出了喷吹浓度以及喷吹压力对最低着火温度影响的多元线性回归方程和煤粉浓度对最大爆炸压力影响的一元多项式回归方程。

(2) 给出了储煤场煤堆热燃层的计算模型,为快捷而准确地监测煤堆自热温度提供了更为有效的计算依据,从而有效地降低了煤堆自燃的危险性。

(3) 分别给出了热风炉、干燥炉烟气的气量、温度及组分的量化计算模型,从而通过对热风炉烟气和干燥炉烟气的有效控制确保干燥气系统运行稳定,提高干燥气系统的安全性。

(4) 给出了稳态工作条件下中速磨制粉系统的数学量化计算模型,通过对给煤量、干燥气流量以及循环风流量的控制,实现制粉系统的自动控制和安全运行。

(5) 给出了喷吹系统的安全量化计算模型,根据最佳煤粉量的多少,计算出补偿气量、喷吹压力安全运行值,以此作为喷吹系统防爆装置的设计依据,并根据喷吹浓度以及喷吹压力对最低着火温度影响的多元线性回归方程调控喷煤的安全喷吹温度。

本章所建立的五方面量化模型是高炉喷煤安全监控系统的数学基础。其中模型(1)是求解高炉喷吹煤粉最低着火温度及最大爆炸压力的依据,对制定相关安全参数具有重要作用;模型(2)至模型(5)是对高炉喷煤系统安全运行的控制模型,为编制高炉喷煤安全监控软件提供理论支持。

## 4 高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统的开发

根据本文建立的高炉喷吹贫瘦煤安全监控量化模型,并对首钢、武钢炼铁厂实际调研所收集的大量高炉喷煤运行参数进行分析,结合大型高炉的实际喷吹工作流程,应用 Visual Basic 6.0 编写了一套适用于炼铁厂喷煤车间喷吹贫瘦煤的安全监控计算机软件系统——高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统。该软件的完成及应用是本文研究成果进一步推广和应用的基础,为丰富我国高炉喷煤的煤种及煤源,从而有效地降低喷吹成本,提供了一个良好的技术支持。

### 4.1 喷吹贫瘦煤安全监控系统结构

“高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统”是连续工业生产中的实时监控信息监控系统。它是在关系型数据库管理系统基础上,结合本文所建立的储煤场安全监测计算、干煤气系统安全监控计算、制粉及输送系统安全监控计算和喷吹系统安全监控计算等数学模型,把喷吹流程中各类运行参数、优化矫正参数、控制参数、危险预警信息和事故记录等多方面数据和信息进行统筹管理,并最终形成一整套由数据采集、数据传输、数据处理和数据反馈等多环节组成的循环运行、实时优化调控的软件平台。

该软件平台从结构上可以分为前端操作界面、后台关系型数据库、各类数学模型三部分,三者的关系如图 4.1 所示。这三部分在系统中是互相依存、彼此关联的关系,不论是用户手工对喷煤系统进行安全控制或数据调用,还是计算机根据相关程序对喷煤系统进行自动监控,其运行过程都需要通过操作界面反应出来。工长或技术人员根据操作界面反应的信息,通过鼠标、键盘等输入设备同系统的操作界面进行交互,进而调用不同的系统功能,而不同的系统功能又把数据库同计算模型联系在一起,计算模型需要调用数据库中存储的各类数据进行处理,而处理结果又会重新写入相应的数据库表中,最后通过用户界面显示给系统用户。

#### 4.1.1 前端操作界面

前端操作界面是本软件平台同用户(人)进行信息交互的接口,用户首先在各子系统参数设定界面中完成相应的控制参数设定操作,而后计算机通过设置参数所限定的条件对高炉喷吹过程进行实时监测,并可以实现运行数据和安全事故的自动存储,存储数据再通过计算模型的计算和优化将操作信息反馈到控制系统,从而通过预警操作提前消除事故隐患,确保高炉喷煤过程的安全。鉴于操作界面所扮演的人机交互“桥梁”的重要性,本软件平台的操作界面是在充分考虑到现有各级安监机构

日常工作流程和惯例的基础上设计完成的,力求能够使最终的用户在“享受方便和快捷”的同时快速掌握这套软件平台的用法,并且各个功能界面力求模式的统一并

与一般 WINDOWS 界面的一致。

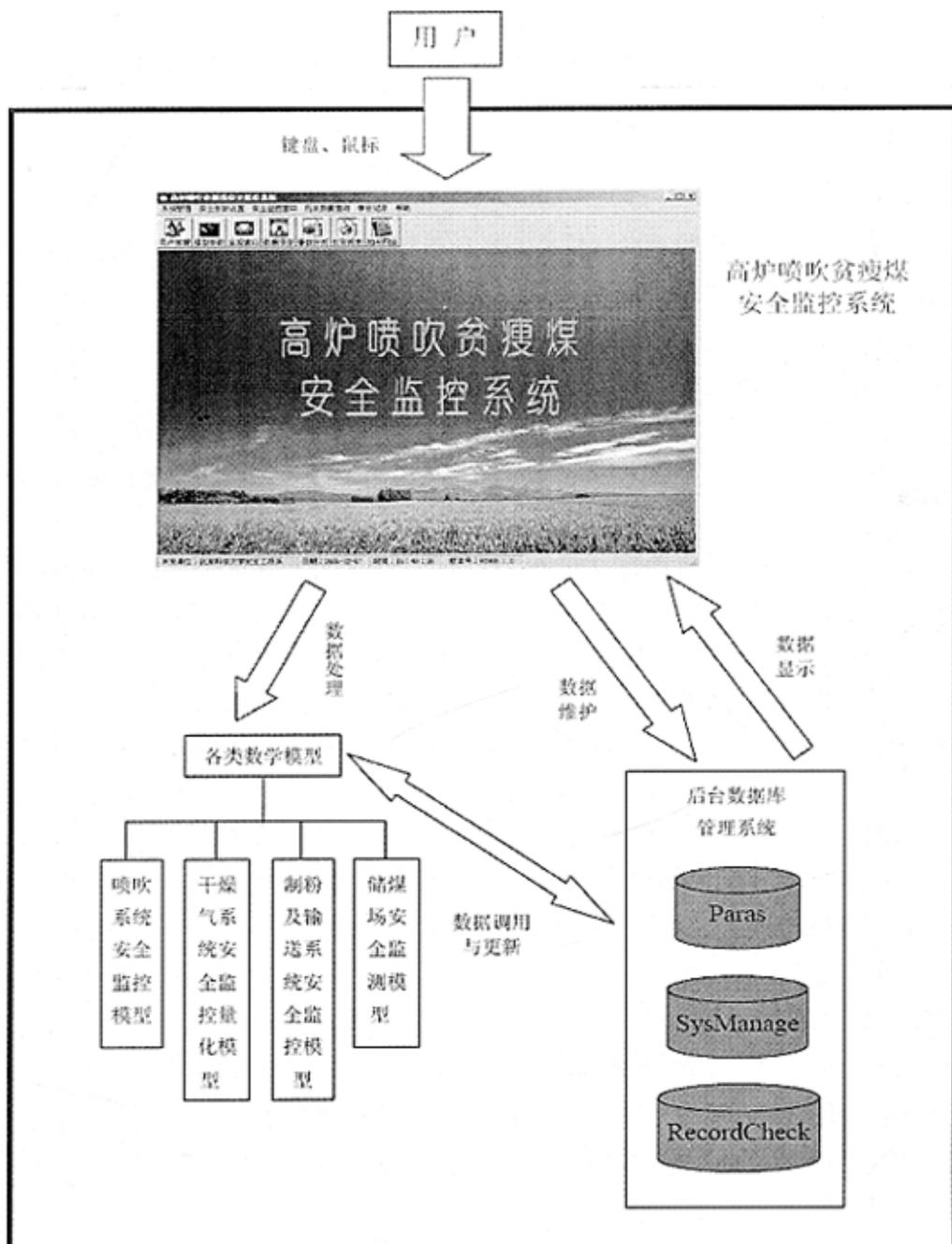


图 4.1 系统关系示意图

#### 4.1.2 后台关系型数据库

本软件系统的后台数据库管理系统选用的较为普遍实用的 Access 数据库系统。数据库表是根据高炉喷煤过程中对各类数据不同的实际处理要求和调用流程进行整体设计，共有三个数据库分别为：SysManage.mdb, Paras.mdb, Record.mdb。

##### (1) 系统管理数据库 (SysManage.mdb):

该数据库主要包括 UserManage (用户管理) 表: 其主要内容为所有用户的用户名、密码及其权限分配等。

Modelparas (喷吹煤粉数学计算模型参数设置) 表: 其主要内容为喷吹煤粉最低着火温度计算模型和最大爆炸压力计算的参数设置, 只有拥有管理员权限的用户有权进行设定。

##### (2) 监控模型参数库 (Paras.mdb)

该数据库主要包括 ChmchParas (储煤场模型计算参数及安全监控参数设置) 表: 其主要内容为煤堆自热层计算模型参数、储煤场安全监控参数等, 用来保证模型的动态调整。

GzqParas (干燥气计算参数及安全监控参数设置) 表: 其主要内容为热风炉及燃烧炉计算参数、干燥气系统安全监控参数、影响干燥气计算模型的相关中速磨参数等。

ZhfParas (制粉及输送系统安全监控参数设置) 表: 其主要内容为中速磨系统计算模型参数、收粉器安全监控参数、输送系统计算模型及安全监控参数等。

PchParas (喷吹系统安全监控参数设置) 表: 其主要内容为输煤管道计算模型及安全监控参数、喷吹系统计算模型及安全监控参数等。

OperParas (安全监控子系统操作参数设置) 表: 其主要内容为储煤、干燥气、制粉、输送及喷吹各子系统自动监测频度及数据自动保存频度的设置。

##### (3) 记录查询数据库 (RecordCheck.mdb)

该数据库主要包括 ChmchRecord (储煤场运行数据记录) 表: 其主要内容为某时段内储煤场各安全监控数据的记录。

GzqRecord (干燥气系统运行数据记录) 表: 其主要内容为某时段内干燥气系统各安全监控数据的记录。

ZhfRecord (制粉及输送系统运行数据记录) 表: 其主要内容为某时段内制粉、收粉及输送系统各安全监控数据的记录。

PchRecord (喷吹系统运行数据记录) 表: 其主要内容为某时段内喷吹系统各安全监控数据的记录。

AccidentRecord (事故统计记录) 表: 其主要内容为某时段内高炉喷吹煤系统的事故记录, 包括事故类别、事故发生时间等信息, 为本软件中事故分析器提供数据基础。

### 4.1.3 各类数学模型

在良好的操作界面并配有强大的数据库管理系统支持下,通过引入论文在储煤场自热层计算、干燥气组分及流量计算、制粉系统解耦运算等方面建立的各个数学模型对相关的运行参数和过程控制信息进行计算和处理,最终为高炉喷煤车间的安全运行工作提供技术支持。本软件系统中引入的数学模型包括:

- (1) 储煤场安全监测模型;
- (2) 干燥气系统安全监控量化模型;
- (3) 制粉及输送系统安全监控模型;
- (4) 喷吹系统安全监控模型。

这些数学模型在第3章中已经作了详细论述,在此不再重复,它们是该系统的基础,也是高炉喷煤安全监控操作最根本的技术依据。

## 4.2 高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统功能

“高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统”在开发过程中充分吸取了在调研过程中一线技术生产人员的相关建议,并遵循模块化的思想,保障其可扩展性。下面对其主要功能模块进行简要介绍。

### 4.2.1 系统管理模块

系统管理模块主要为系统用户管理和系统模型参数设置等。

#### (1) 系统用户管理

如图4-2所示,通过该模块可以完成系统用户的添加、修改、查询、删除操作,可以为用户分配权限;对于系统用户的控制,只有具备系统管理员权限的用户名登录才可以操作该界面。

#### (2) 系统模型参数设置

如图4.3所示,通过该模块可以完成本软件中所涉及到的相关数学模型参数的动态调整,从而保证模型不断的更新与完善。由于模型参数的修改会导致整个计算结果和分级结果的变化,因此,设置在模型的参数被修改后,系统会自动要求重新启动,以保证修改结果能够被应用。在该模块中,可以设置数据模型参数包括:贫瘦煤最低着火温度计算模型,贫瘦煤最大爆炸压力计算模型,以及喷吹系统安全监控计算模型等。该模块的参数设置是整个软件系统运行的基础。

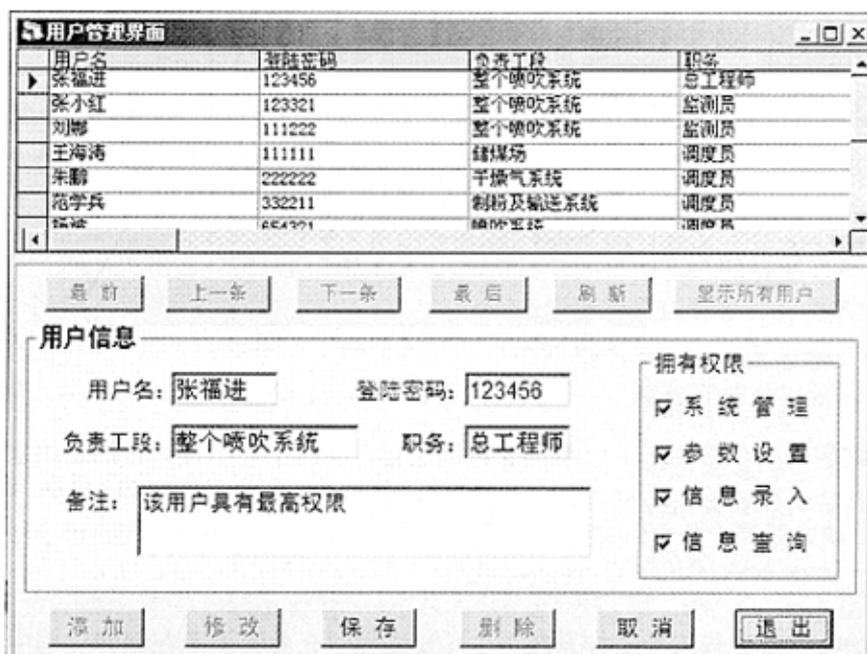


图 4.2 系统用户管理界面

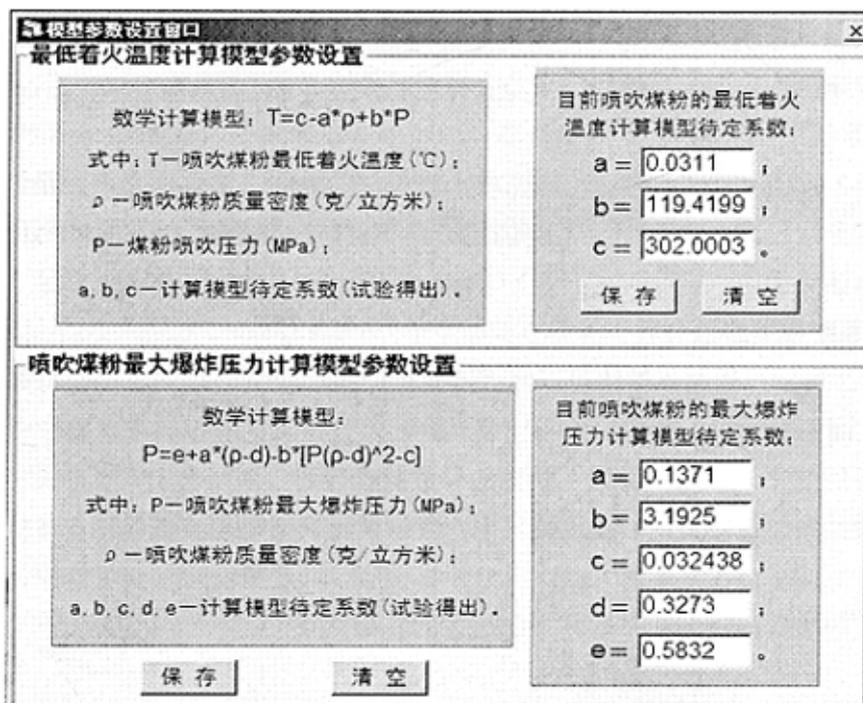


图 4.3 系统参数模型设置界面

## 4.2.2 安全参数设置模块

安全参数设置模块主要为储煤场、干燥气系统、制粉系统、煤粉输送系统及喷吹系统相关安全运行参数的设置，这些参数是进行实时安全监控，确保系统稳定运行所必须预先设置的。同时，本系统可根据不同煤质的特征参数、不同工艺特性，动态调整监控参数。各个界面的风格基本一致，实现的功能有所不同，下面对主要界面作简要介绍。

### (1) 储煤场安全监控参数设置窗口

如图 4.4 所示，在“安全设置参数”设置框中，只需确定好“煤堆空隙率”并设定好“煤堆安全温度”，则系统会根据设定好的数学模型自动计算出“监测点深度”。另外还应设定好料位计的安全高度，以及对储煤场、输煤皮带机相关的安全监控参数。对所有参数设定好后，只需点击【保存】按钮即可将设置好的参数保存至后台关系型数据库中，从而确保相关计算模型可以调用设置好的参数，保证监控的顺利进行。

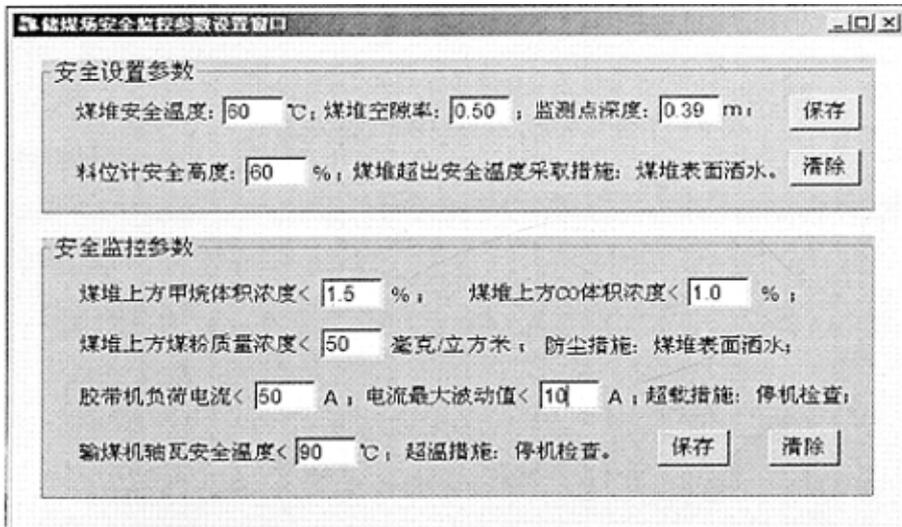


图 4.4 储煤场安全监控参数设置窗口

### (2) 燥气系统安全监控参数设置窗口

如图 4.5 所示，操作方式与储煤场参数设置窗口相同，分别在中速磨、热风炉及燃烧炉的安全参数设置框中设定好相应的参数后，点击【保存】按钮将设置好的参数保存至后台关系型数据库中，确保相关计算模型可以调用设置好的参数，保证监控的顺利进行。

### (3) 制粉及输送系统安全监控参数设置窗口

如图 4.6 所示，操作方式与以上窗口相同，分别在中速磨、收粉器及输送系统的安全参数设置框中设定好相应的参数后，点击【保存】按钮将设置好的参数保存至后台

台关系型数据库中，确保相关计算模型可以调用设置好的参数，保证监控的顺行。

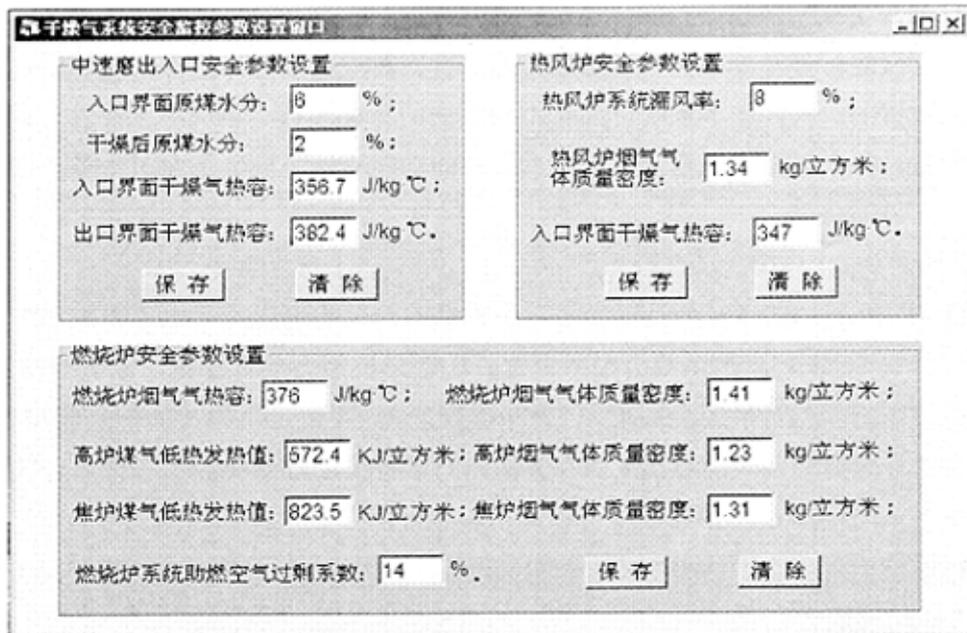


图 4.5 干燥气系统安全监控参数设置窗口

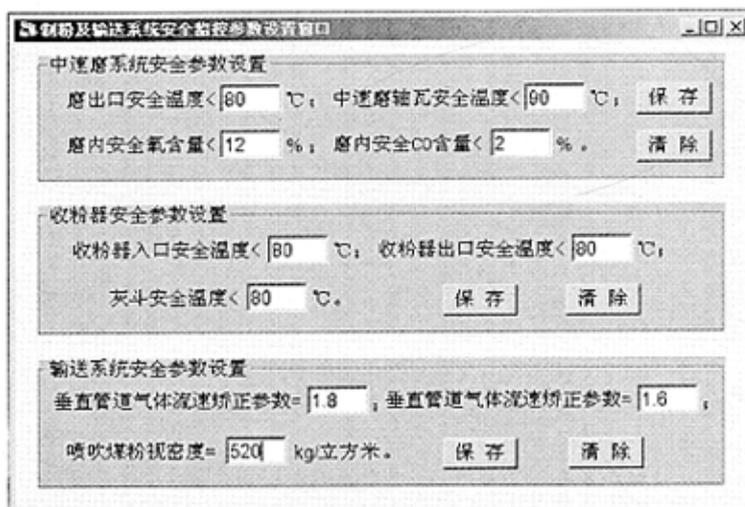


图 4.6 制粉及输送系统安全监控参数设置窗口

#### (4) 喷吹系统安全监控参数设置窗口

如图 4.7 所示，操作方式与以上窗口相同，分别在喷吹输煤管路及喷吹罐的安全参数设置框中设定好相应的参数后，点击【保存】按钮即可。其中在“喷吹罐安全参数设置”框中，只需确定好“喷吹罐容器体积”、“爆破泄压时间”以及“喷吹罐设计

极限压力值”等参数，系统会根据已设定好的数学模型自动计算出“泄压爆破口直径”数值。

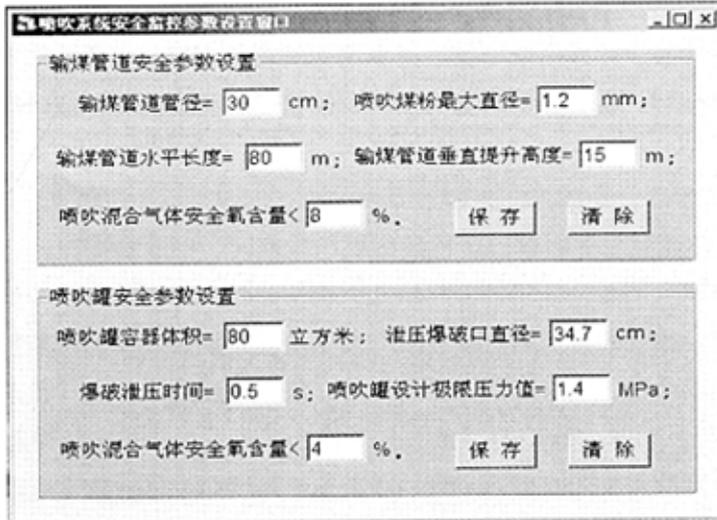


图 4.7 喷吹系统安全监控参数设置窗口

#### (5) 系统操作参数设定窗口

如图 4.8 所示，通过该窗口对各子系统的监测频度和数据自动保存频度进行设定，从而确保计算机系统可根据设定值对各监测点进行自动监控操作。



图 4.8 系统操作参数设定窗口

### 4.2.3 实时监控窗口模块

实时监控窗口模块主要功能是监测各子系统的实时在线数据，并根据安全参数设置模块设置的监控参数和事故处理措施，由计算机对高炉喷吹贫瘦煤工艺流程实施自动安全控制，相关的数学计算模型可以参见本论文的相关内容。主要操作界面包括喷吹系统安全监控总窗口，以及各子系统的安全监控窗口。下面就对各窗口的主要功能进行简要介绍。

#### (1) 高炉喷吹贫瘦煤安全监控主界面

如图 4.9 所示，监控主界面窗口中包括储煤场监控区、中速磨监控区、干燥气监控区、喷吹系统监控区控制区域和报警区域几大模块。以中速磨监控区为例，当监控参数为正常状态时，相应的监控框内颜色没有发生变化，见磨入口温度监控框；当监控参数超过设定的安全值时，监控框内颜色变为红色，监控区底部运行状态监控框内值变为“异常”。与此同时，监控主界面底部报警区域内的报警指示灯亮起，报警铃声响起，从而提醒监控人员采取相应措施。点击各子系统监控区内的【点击进入子窗口】按钮，即可进入相应的子系统安全监控窗口。对于控制区域，点击【系统启动】按钮，即可启动高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统；点击【数据保存】按钮，即可手工保存系统某时点的运行参数值；点击【退出界面】按钮，即退出监控界面。

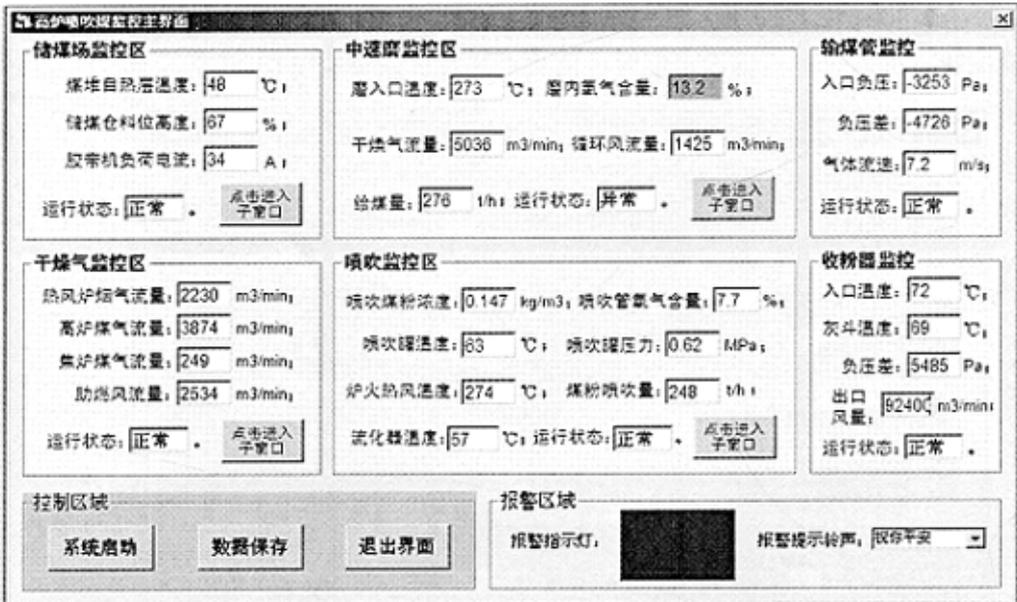


图 4.9 高炉喷吹贫瘦煤安全监控主窗口

#### (2) 高炉喷吹贫瘦煤子系统安全监控界面

由于各子系统监控界面的风格基本一致，实现的功能也基本相似，下面以储煤场安全监控窗口为例，简要说明其主要的操作功能。如图 4.10 所示，点击【事故模拟】

按钮，计算机将根据设定好的模拟程序对储煤场的安全监控参数进行随机的事故模拟；点击【系统停机】按钮，储煤场监控系统即自动停止监测；点击【退出界面】按钮，储煤场监控窗口关闭，程序自动跳转至主界面。

由于其它各子系统的监控界面功能基本一致，下面不作详细说明。干燥气系统监控窗口、制粉及输送系统监控窗口、喷吹系统监控窗口的操作界面如图 4.11 至图 4.13 所示。

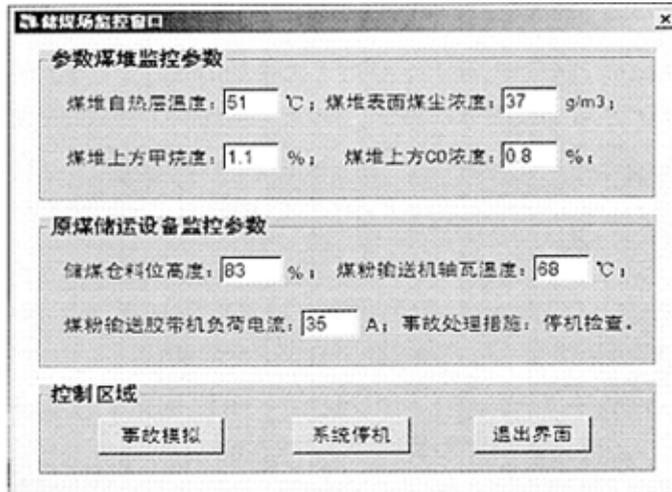


图 4.10 储煤场安全监控窗口

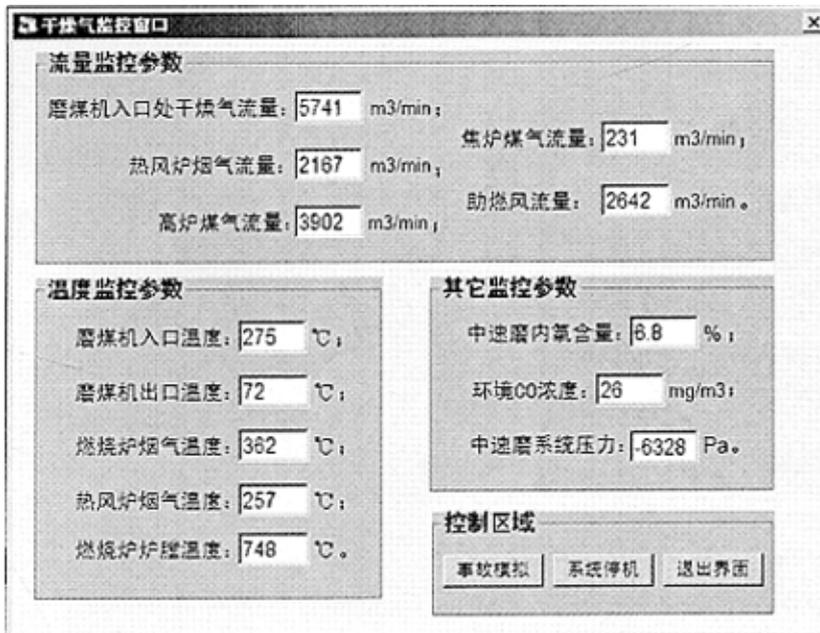


图 4.11 干燥气系统监控窗口

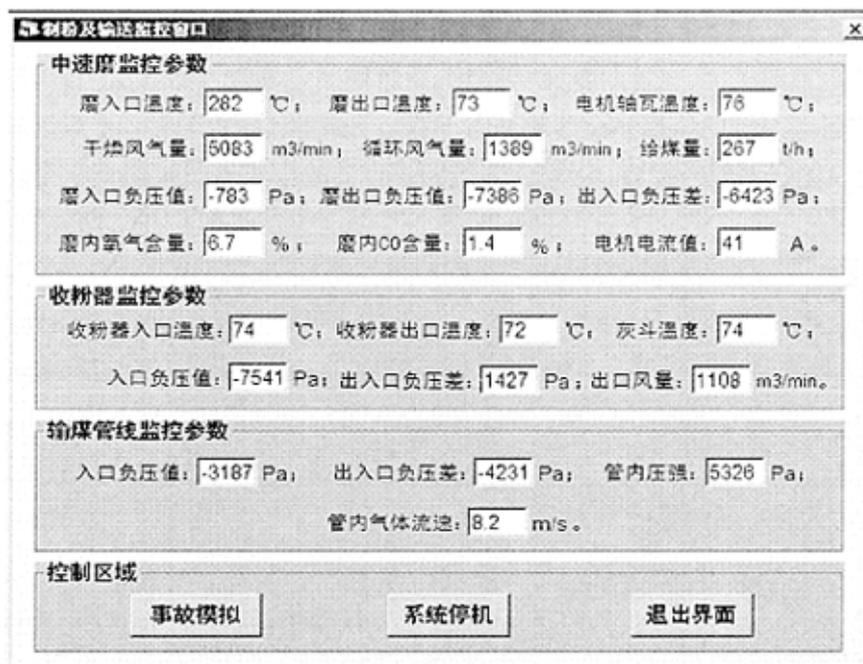


图 4.12 制粉及输送系统监控窗口

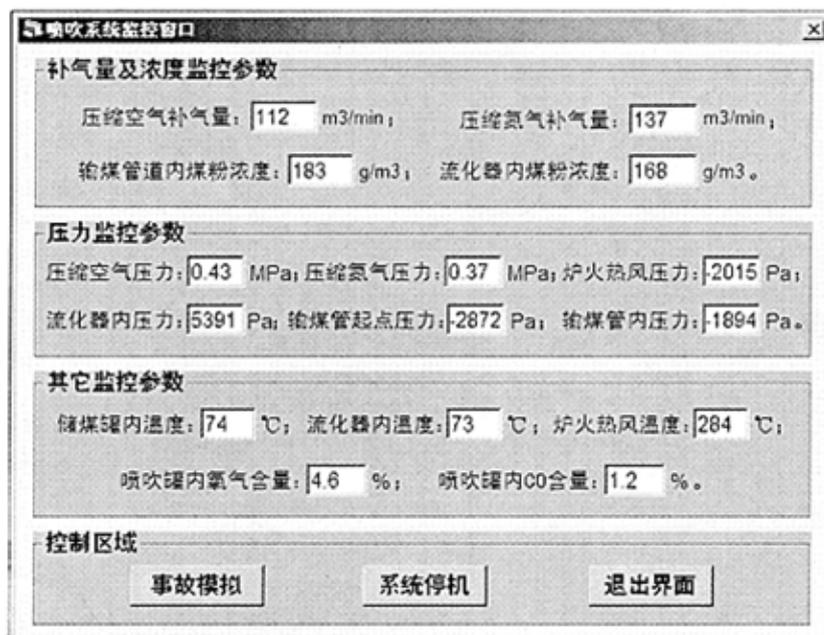


图 4.13 喷吹系统监控窗口

#### 4.2.4 数据查询模块

数据查询模块主要功能是查询各子系统运行的历史数据，主要操作界面包括储煤场数据查询窗口、干燥气系统数据查询窗口、制粉及输送系统数据查询窗口，以及喷吹系统数据查询窗口。下面就对各窗口的主要功能进行简要介绍。

由于各子系统查询窗口界面的风格基本一致，实现的功能也基本相似，下面以储煤场数据查询窗口为例，简要说明其主要的操作功能。

如图 4.14 所示，首先在查询条件框内设置好索要查询数据的起始和中止日期，并设定好所要查询的参数，点击【查询】按钮，计算机会根据设定好的查询条件显示出该时段内的所有储煤场内相应的监控参数；分别点击【最前】、【上一条】、【下一条】和【最后】按钮，可数据窗口中的数据记录移动进行移动操作；点击【删除】和【打印】按钮，可手工删除某时点的记录数据以及打印该时段内的监控数据报表；点击【退出】按钮，即退出本查询窗口。

由于其它各子系统的数据查询窗口的功能基本一致，下面不作详细说明。干燥气系统数据查询窗口、制粉及输送系统数据查询窗口、喷吹系统数据查询窗口的操作界面如图 4.15 至图 4.17 所示。



图 4.14 储煤场历史数据查询窗口



图 4.15 干燥气系统历史数据查询窗口



图 4.16 制粉及输送系统历史数据查询窗口



图 4.17 喷吹系统历史数据查询窗口

#### 4.2.5 事故统计模块

事故统计模块的主要功能是查询、统计和分析过去发生过事故信息，为今后高炉喷吹贫瘦煤系统的安全管理工作提供数据支持。主要包括事故记录查询窗口和事故分析器窗口，下面就对各窗口的主要功能进行简要介绍。

##### (1) 安全事故记录查询

如图 4.18 所示，进入该窗口后，输入查询的起始日期和结束日期，单击【查询】按钮，即可显示出后台数据库内事故记录的详细信息。具有信息录入权限的人员单击内容操作框内的【添加】按钮，即可在事故记录信息框内录入某次安全事故详细信息，而后单击【保存】即可将该事故的详细信息保存至后台数据库内。另外还可以打印事故记录，作为工艺现场安全管理和安全检查的指导材料。

##### (2) 安全事故统计窗口

如图 4.19 所示，进入该窗口后，输入统计事故的起始日期和结束日期，并选择好事故类型和事故统计方式，单击【统计绘图】按钮，即可窗口右侧即可按操作要求显示出事故统计图形。该窗口可以按事故工段和事故类型进行对事故比例和事故数量进行统计分析。点击【图形打印】按钮，可以输出窗口中已经显示的事故统计图，为安全技术人员的管理工作提供支持。

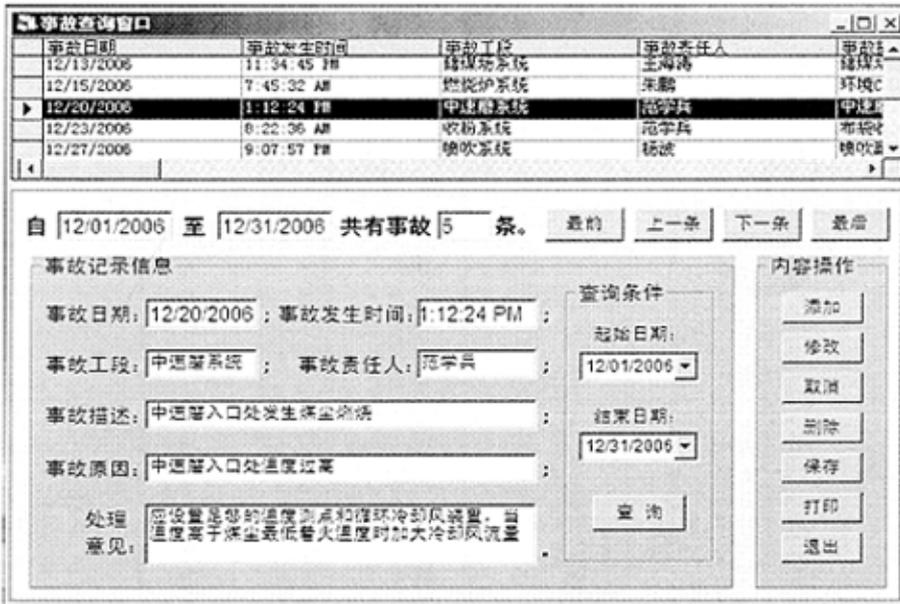


图 4.18 安全事故查询窗口

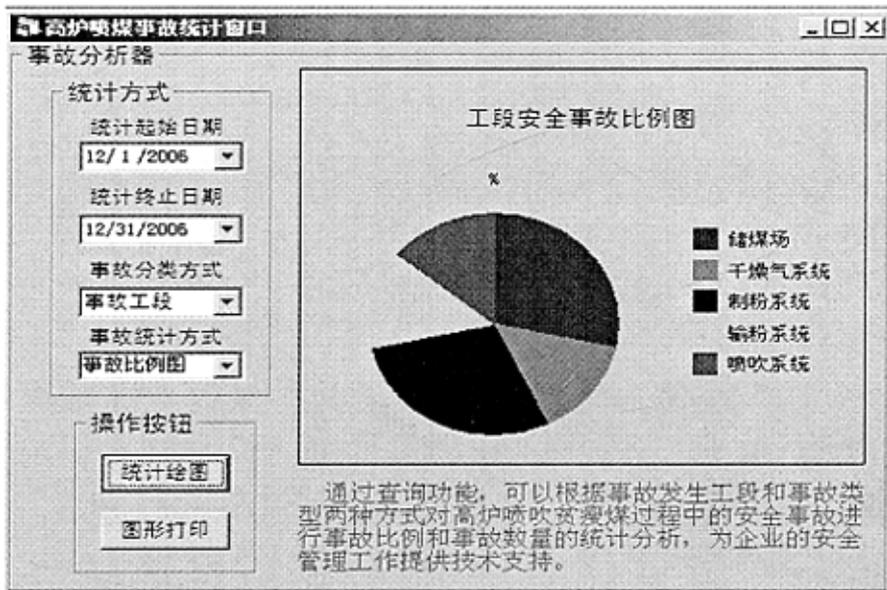


图 4.19 安全事故查询窗口

#### 4.2.6 辅助功能模块

辅助功能模块主要是提供监控软件的版本信息及技术特点, 并为高炉喷吹煤系统的安全运行提供相关技术网站和信息资源的查询功能(如图 4.20 所示)。系统发布时提供了部分技术网站的网络地址, 作者会根据软件版本的升级情况更新网络资源地址,

为高炉喷吹煤安全监控及管理工作的查询提供方便。同时，为了方便使用该系统的用户获得更多的技术支持，作者在帮助菜单中添加了自己的联系方式，便于用户及时反馈该软件在使用过程中的漏洞和技术缺陷，从而提高该软件系统的使用性。

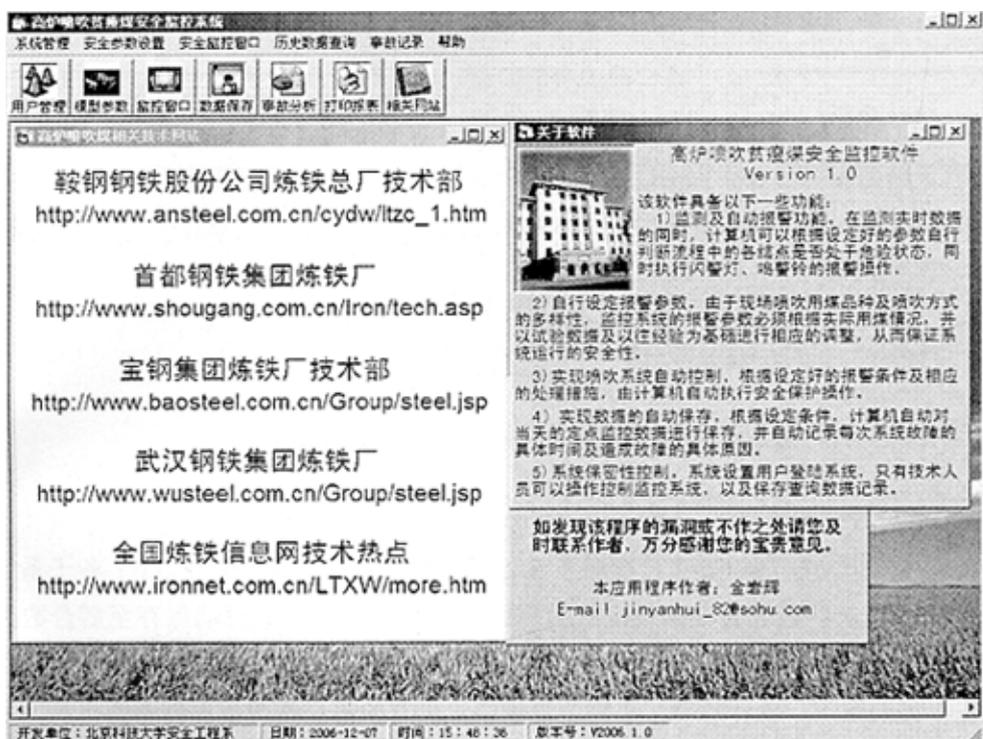


图 4.20 安全事故查询窗口

### 4.3 高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统辅助支持过程简述

高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统的辅助支持过程，主要是根据喷煤系统事故信息、监控过程中超标预警参数、工艺流程中子系统的重要度，确定对各生产区域内安全生产监控而需投放的人、财、物力。技术人员可根据系统的监控和统计信息，并结合现有的技术力量，按照重点突出、风险优先的原则给出安全监控及应急计划建议，并在监控过程中保持系统信息的及时更新，其过程如图 4.21 所示。

主要包括以下几部分内容：

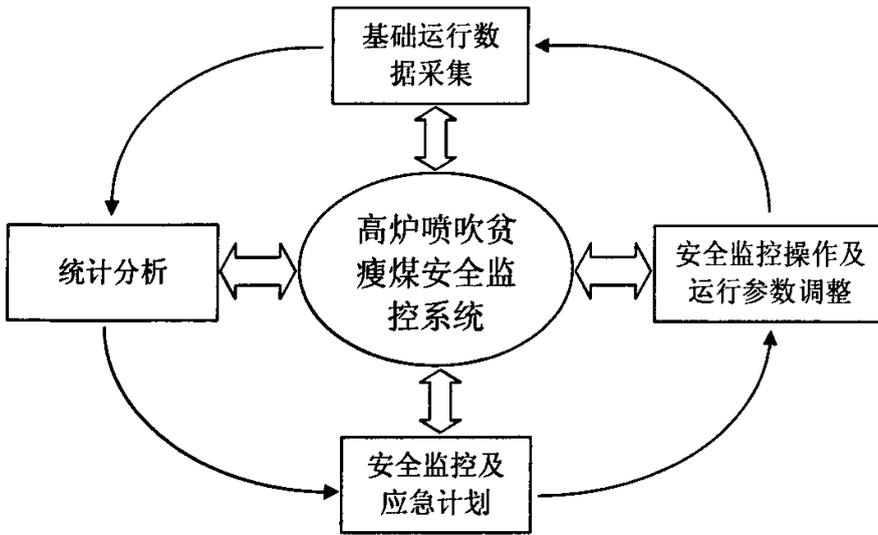


图 4.21 高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统支持过程

#### (1) 基础运行数据的采集

如图 4.21 所示，高炉喷吹贫瘦煤系统运行参数的采集主要有两种方式：各子系统运行参数的记录，系统会根据设定的数据采样周期将监控参数自动保存至后台数据库，并自动更新；同时，本监控系统也可以为相关的运行参数历史信息 and 事故历史信息提供丰富的查询、统计功能。在整个过程中，所有的信息都应该保持不断更新，为监控过程提供及时有效的支持。

#### (2) 事故数据的统计分析

在监控过程中获得的相关信息要及时的更新进入监控系统；同时，在监控过程中可以通过监控系统获取所需要的事故描述信息、事故原因及处理措施等信息，使监控任务更加具体明确。

#### (3) 安全监控及应急计划的制定

技术人员根据已有的事故信息及系统给出的事故统计分析，确定整个系统的主要危险因素区域并制定相应的安全监控及应急计划。整个计划的制定过程中是人与系统的交互过程，既要考虑系统给出的建议，又要充分考虑实际的生产安全情况，达到有机的结合

#### (4) 安全监控操作及运行参数的调整

在制定完成监控计划后，要按照计划逐步实施，在监控过程中相关计算模型参数的调整要及时的更新进入监控系统，从而确保各子系统运行的稳定性、安全性以及高

炉生产的连续性。

#### 4.4 本章小结

高炉喷吹贫瘦煤的整个安全监控过程会涉及到大量的信息收集分析和计算模型的使用，因此根据实际需要开发了高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统。本章对其结构和功能进行了论述，并通过示意图简要介绍了其辅助支持过程。

高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统是本文各种计算模型和安全评价思想的集成系统，该系统将本文的研究内容通过软件平台进行展示，使理论研究成果能够积极发挥实用效能，辅助指导高炉喷煤安全管理人员实施安全生产过程的监控，确保生产的顺行。

## 结 论

本文针对我国焦煤资源短缺、炼焦生产污染严重和炼铁生产成本较高的现状，对高炉喷吹用贫瘦煤的安全性及在我国推广高炉喷吹贫瘦煤技术的必要性及其意义进行论述。通过对高炉喷吹工艺流程的研究与分析，建立了高炉喷吹贫瘦煤安全监控计算模型，并进行了模拟应用。

本文的主要研究成果概括如下：

1) 在对高炉喷吹工艺流程进行研究与分析的基础上，应用预先危险性分析、事故树分析和道化学火灾爆炸指数评价等安全评价方法，对储煤场系统、干燥气系统、制粉系统、煤粉输送系统以及喷吹系统的危险源进行辨识，对引发安全事故的原因进行分析，并给出了预防与应急措施；同时在研究了大量高炉喷煤理论的基础上结合本领域内近年来的一些研究成果，为高炉喷煤工艺的各子系统建立了相应的安全监控计算模型。

2) 应用多元线性回归的数学方法对潞安贫瘦煤煤粉的最低着火温度和最大爆炸压力的试验数据进行处理，并建立了该煤种煤粉爆炸性参数的计算模型，为高炉喷吹贫瘦煤安全监控计算模型中相关安全参数的设置提供了理论依据。

3) 将所建立的各种模型进行集成，应用 Visual Basic 6.0 开发了“高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统”，该系统具有模型参数设定、喷吹系统实时安全监控、历史运行数据的查询、相关事故信息的统计分析和数据导出打印等主要功能，同时提供高炉喷吹技术的网络查询等功能，为高炉安全喷吹贫瘦煤种工艺的实施提供了软件平台。

4) 在首钢及武钢炼铁厂喷煤车间进行了现场调研，结合所获得的工艺信息及现场运行数据，运用所建立的高炉喷吹贫瘦煤安全监控程序，对高炉喷吹贫瘦煤的生产过程进行仿真安全监控模拟，并取得了理想的运行效果。

本文的创新点主要有：

1) 解决了喷吹压力、煤粉浓度、最低着火温度和最大爆炸压力的数学关联

本文根据多元线性回归的数学方法，分别对潞安漳村和潞安常村贫瘦煤煤粉的最低着火温度和最大爆炸压力的试验数据进行分析与处理，通过计算求得的最低着火温度计算模型为： $T_1=413.0634-0.3544\rho+206.5108P$ （常村贫瘦煤）， $T_2=302.0003-0.0311\rho+119.4199P$ （漳村贫瘦煤）；最大爆炸压力计算模型为： $P_1=0.5805+0.2555(\rho-0.3273)-2.9262[(\rho-0.3273)^2-0.032438]$ （常村贫瘦煤）， $P=0.5832+0.1371(\rho-0.3273)-3.1925[(\rho-0.3273)^2-0.032438]$ （漳村贫瘦煤）；且以上模型的回归性高度显著，可以很好地反映变量间的变化关系。

2) 通过嵌入数学计算模型实现安全监控系统的智能化控制

由于目前我国的高炉喷煤监控系统均采用被动式的数据监测,以及安全事故发生后的人工处理,因此对无法从根本上解决喷吹过程中的安全隐患。而本文所设计的高炉喷煤安全监控系统可通过计算机执行系统内嵌计算模型,从而对喷煤过程实行动态和主动式的安全控制。另外,本系统还设计增加了运行数据的定时存储、历史查询以及事故统计分析等功能,为高炉喷吹贫瘦煤的安全管理工作提供了有效的技术支持。

本文研究存在的问题和尚需进行的工作有:

1) 在高炉喷煤安全监控计算模型的建立过程中,由于缺少大量的基础数据,因此,只能根据部分专家和工程技术人员理论和经验进行计算。在本文所开发的监控系统运行一段时间,收集到较多的基础数据后应该进一步进行完善。

2) 针对我国高炉喷吹贫瘦煤生产并未推广实行的现状,同时由于相关基础数据有限,所建立的高炉喷吹贫瘦煤安全监控模型很难考虑到现实生产中的很多问题,今后应该在这一方面进行深入研究。

3) 由于目前我国高炉喷煤生产工艺流程的多样化与复杂化,该监控系统只能适应很小一部分喷吹工艺流程,今后应在全国范围内加强对喷煤工艺的调研,力图提高该系统的适用性。

4) 目前,由于可观条件的限制,高炉喷吹贫瘦煤安全监控系统只对喷吹贫瘦煤的生产过程进行过仿真模拟,没有实际的现场应用性试验。因此,应该在条件允许的情况下进行现场应用试验,对其可行性和实用性进行更为客观的技术评价。

由于本人知识的局限和现实条件的限制,只对高炉喷吹贫瘦煤安全监控计算模型进行了初步研究,尚有诸多问题需要更进一步的研究。我将在以后的学习和工作中努力地提高自己的专业理论水平,同时,在实践中进行更深入的研究,为我国高炉喷煤生产的安全性的不断提高提供技术支持。

## 参考文献

- [1] 许冠衷.高炉喷煤的新发展.鞍钢技术[J], 1995, (5): 1~6
- [2] 吴建华.浅谈高炉喷出煤粉.山东冶金[J], 1994, 11(4): 43~45
- [3] 费.巴尔特克纳西特.爆炸过程和防护措施[M].北京: 化学工业出版社, 1985
- [4] W.Bartknecht 著, 何宏达译.爆炸过程和防护措施[M].北京: 化学工业出版社, 1985
- [5] 宴伟.论安全喷吹煤粉[R].炼铁适用技术汇编, 1998, 6
- [6] 宋阳升, 刘述临.高炉大量喷煤的若干思考[J].炼铁, 2004, (1): 21~24
- [7] 许冠忠.国外高炉喷煤的实践[J].鞍钢技术, 1999, (9): 1~5
- [8] 朱秉辰.日本高炉富氧喷煤实践[J].钢铁研究, 1996, (5): 58~63
- [9] 王炜, 毕学工, 傅世敏.国内外高炉喷煤现状及主要技术措施[J].武汉科技大学学报, 2000, 5(11): 11~14
- [10] 宋阳升.我国高炉喷煤技术的发展和展望[J].钢铁, 2001, 31(12): 5~12
- [11] 宋阳升.我国高炉富氧喷煤技术的新进展[C].中国金属学会炼铁学术年会论文集, 1995, 1~5
- [12] 施素琴.高炉监控计算机信息系统[J].武钢技术, 1995, (9): 57~60
- [13] 吴小峰, 王瑞华, 陈玉明等.计算机网络技术在高炉自控系统中的应用[J].冶金自动化, 2003, (4): 60~62
- [14] 刘浩, 陈清.高炉制粉系统计算机控制[J].冶金动力, 2003, (3): 52~53
- [15] 李东强.高炉喷吹煤粉的经济效益[J].炼铁, 1994, 14(3): 21~22
- [16] Y. de Lassat de Pressigny.高炉控制中计算机模型的使用[J].武钢技术, 1997, (10): 12~13
- [17] 刘祥官, 刘芳著.高炉炼铁过程优化与智能控制系统[M].北京: 冶金工业出版社, 2003
- [18] 张培仁, 朱东杰, 马云等著.自动控制技术和应用[M].合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- [19] 刘舒著.自动化控制原理[M].北京: 中国人民公安大学出版社, 2001
- [20] 罗怀永著.安全检测技术与仪表[M].北京: 冶金工业出版社, 1994
- [21] 陆庆武著.安全技术[M].北京: 中国科学技术出版社, 1988
- [22] 戴绪愚著.自动化技术[M].上海: 上海科学技术出版社, 1994
- [23] 沈斐敏著.安全系统工程基础与实践[M].北京: 煤炭工业出版社, 1991

- [24] 杜海凤. 计算机在高炉实时监控中的应用[J]. 科研与实践, 2000, 3(52): 35~37
- [25] 顾立新, 李玉才. 国内高炉喷吹煤粉的开发前景[J]. 煤炭加工与综合利用, 2003, (2): 10~15
- [26] Oshnock TW&Colinear JA. Blast furnace iron-making existing capital and continued improvements are for a bright future[R]. Ironmaking conference proceedings, 1995
- [27] 张琢, 张志冰. 贫瘦煤作高炉喷吹用煤的研究[J]. 冶金能源, 1999, 18(1): 15~17
- [28] 白浚仁, 刘凤岐, 姚星一等著. 煤质分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990
- [29] 王国雄著. 现代高炉粉煤喷吹[M]. 冶金工业出版社, 1997
- [30] 李英华著. 煤质分析应用技术指南[M]. 中国标准出版社, 1991
- [31] 汤清华, 马树涵. 高炉喷吹煤粉知识问答[M]. 北京冶金工业出版社, 1997
- [32] Yasuo. High Coal Injection Rate Operation in Kobe[R]. BF Ironmaking Proceedings, 1991
- [33] Drechsler B. Bestimmung der mindestzuendenergie von staub/Luft-gemischen in abhaengigkeit vom klimaparametern[D]. Mannheim: Fachhochschule fuer Technik, 1991
- [34] 刘凤仪著. 高炉喷吹煤粉技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993
- [35] 刘仁达著. 冶金炉热工基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980
- [36] 基谢里果夫著. 煤粉制造及收集设备的计算和设计标准[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987
- [37] 徐矩良. 炼铁工艺的新发展和炼铁工序的结构优化[J]. 炼铁, 1994, 4(8): 23~26
- [38] 陈树法. 高炉喷吹煤粉的气力输送[D]. 北京钢铁学院科学研究部, 1987
- [39] 杨天均, 苍大强著. 高炉富氧煤粉喷吹[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- [40] 叶才彦. 高炉喷吹煤相输送技术的探讨[J]. 钢铁研究, 1999, 5(3): 7~11
- [41] 田均平, 续丽红. 高炉喷煤安全检测装置的改进[J]. 炼铁, 2001, 4(7): 43~46
- [42] 刘应书, 金龙哲. 潞安煤用于高炉喷吹技术开发与应用鉴定技术文件[R]. 潞安能源环保集团, 2002, 12
- [43] 北京钢铁学院炼铁专业译. 粉尘爆炸性的研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1977
- [44] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[D]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996

- [45] Michael J.Sapko, Eric S.Weiss. Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000(13): 229~242
- [46] 粉尘爆炸引燃温度测试方法和装置的研究报告[R].公安部天津消防科学研究所, 1990
- [47] P.Holbrow, S.Andrews and G.A.Lunn.Dust explosions in interconnected vented vessels[J].Loss Prev.Process Ind, 9(1), 1996: 91~103
- [48] 北京理工大学火工爆炸系.爆炸参数测试仪器使用说明[R].内部资料, 1992
- [49] 吴贵生, 于治福, 于淑政等著.试验设计与数据处理[M].北京: 冶金工业出版社, 1997
- [50] R.Siwiek.Reliable determination of the safety characteristics on 20-L apparatus[R].Ciba-Geigy Ltd.Basel, Switzerland, 1997
- [51] 浦以康, 胡俊.高炉喷吹用煤煤粉爆炸特性的实验研究[J].爆炸与冲击, 2000, 10 (4): 303~312
- [52] Xufan Deng.The proceedings of Shenyang international symposium on dust explosions[R].Shenyang Industrial University, 1987
- [53] Nagesh Chawla, Paul R.A comparison of experimental methods to determine the minimum explosible concentration of dusts[J].Fuel 1996, 75(6): 54~58
- [54] 尹燕鸣, 曾象志.含能材料粉尘爆炸下限浓度的试验研究[J].北京理工大学学报, 1996, 2(161): 106~110
- [55] 黄金印, 张树旗.两种标准实验方法测定的气体爆炸极限的比较[J].消防技术与产品信息, 2001(4): 201~205
- [56] IEC SC3H sheet 2-5.Methods for determining the minimum explosible concentration of dust/air mixture [S].1990
- [57] 隋鹏程, 陈宝智著.安全原理与事故预测[M].北京: 冶金工业出版社, 1988
- [58] 国家安全生产监督管理局.安全评价[M].北京: 煤炭工业出版社, 2005
- [59] 刘铁民, 张兴凯, 刘功智.安全评价方法应用指南[M].北京: 化学工业出版社, 2005
- [60] 陈丽霞.电厂燃煤的安全贮存管理[J].工业安全与环保, 2006, 32(2): 61~65
- [61] 郭凤英.煤矿贮煤火灾的危害及防御[J].河北煤炭, 2006, (2): 26~28
- [62] 李树刚, 徐精彩.地面储煤堆自燃规律的试验研究[J].辽宁工程技术大学学报, 2000, 19(3): 228~231
- [63] 成伯兰著.高炉炼铁工艺及计算[M].北京: 冶金工业出版社, 1991

- [64] 陶文华, 岳恒, 李平等. 中储式磨煤机制粉系统的建模与控制[J]. 控制工程, 2003, 10(3): 244~248
- [65] Rouhani R, Mehra R.K. Model Algorithmic Control(MAC) of Basic Theoretical Properties[J]. Automatica, 1982, 18(4): 401~414
- [66] 王东风. 制粉系统磨煤机的模型算法与解耦控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2002, (1): 23~25
- [67] 王斌, 朱金荣. MPS 型中速磨运行特性的模拟[J]. 江苏电机工程, 2000, 19(1): 21~25
- [68] 陶文华, 岳恒, 柴天佑. 中速磨煤机的动态参数模型与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 778~781
- [69] 马爱琴, 王爱国. 高炉喷煤工艺及自动控制系统[J]. 山西冶金, 2004, (3): 60~63
- [70] 马政峰, 杨天均, 左兵等. 安阳高炉喷吹贫瘦煤的安全控制[J]. 钢铁, 2003, 38(11): 5~8
- [71] 谢建民. 高炉喷煤系统控制模型研究[J]. 冶金设备, 2004, (147): 16~20
- [72] 郭术义, 陈举华, 李忠芹等. 高炉喷煤的数值模拟与应用[J]. 济南大学学报, 2003, 17(4): 337~339
- [73] 鲁昭. 数字监控系统设计[J]. 计算机科学学报, 2006, (8): 7~9
- [74] 马力编著. Visual Basic 6.0 程序设计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005
- [75] 敬铮编著. Visual Basic 6.0 数据库开发与专业应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [76] 张迎新. 数据库及其应用系统开发[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [77] 启明工作室编著. Visual Basic+Access 数据库应用系统开发与实例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004

## 在学研究成果

### 一、 在学期间取得的科研成果

(1) 完成高炉喷吹贫瘦煤爆炸性试验研究, 主要完成人, 北京理工大学, 东北大学, 华北科技学院, 2005.3~2005.9

(2) 完成高炉喷吹贫瘦煤安全监控程序的编写, 主要完成人, 北京科技大学, 2005.9~2006.1

### 二、 在学期间所获的奖励

(1) 北京科技大学优秀研究生干部, 北京科技大学, 2005.12

(2) 北京科技大学优秀研究生干部, 北京科技大学, 2006.12

### 三、 在学期间发表的论文

[1] 金龙哲, 金岩辉, 张俊燕等. 高炉喷吹用贫瘦煤爆炸下限与返回火焰长度的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(11)

[2] 金龙哲, 王丽颖, 金岩辉等. 高炉喷吹用贫瘦煤爆炸强度的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1)

[3] 张俊燕, 宋存义, 金岩辉等. 高炉喷吹贫瘦煤最低着火温度[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(8)

[4] 张俊燕、金龙哲、金岩辉等. 贫瘦煤用于高炉喷吹煤的可行性研究[J]. 煤炭科学学报, 2006, 34(10)

[5] 张俊燕、金龙哲、金岩辉等. 利用 VB 开发高炉喷煤安全监控系统应用软件[J]. 辽宁工程技术大学学报, 录用

## 致 谢

本人的硕士毕业论文在我的导师金龙哲教授的指导下顺利完成。

从论文的选题、相关文献的查阅、实验室试验、现场调研和数据收集到论文的写作，无不凝聚了金老师的心血，谨向恩师表示衷心的感谢。在攻读硕士研究生期间，金老师的治学精神和人格魅力始终影响着我的学习、工作和生活。他的教导——老实做人，踏实做事，我将始终铭刻于心。

论文的完成还得到了北京理工大学汪佩兰教授、东北大学钟圣俊教授、华北科技学院漆旺生副教授、北京科技大学赖忠孝师兄以及其他同志的帮助，论文中相关数据的获取得到了首钢炼铁厂张福进工程师和武钢邹明金工程师的协助，在此对他们深表谢意。

从本科到硕士研究生毕业这将近七年的时间里，母校的各级领导，特别是土木与环境工程学院的各位老师，是他们让我获得了更多的知识财富，懂得了更多的为人处事的道理，在此对他们表示由衷的感谢。

在七年的求学经历中，父母也给予了我极大的关怀和支持，在毕业论文完成之际，我对家人和朋友给予的关心和帮助表示感谢。

最后我要感谢评阅、评议学位论文和出席学位论文答辩会的各位专家、教授、同学，感谢他们在百忙之中给予的认真指导。