

首都经济贸易大学

硕士学位论文

工业场所煤气泄漏扩散的数值模拟

姓名：贾世国

申请学位级别：硕士

专业：劳动卫生与环境卫生

指导教师：柴建设

20070301

内容提要

入世以来我国经济迅猛发展,促使我国工业化进程不断加快,化工、冶金、机械制造等行业对工业煤气及其相关产品需求量日益激增,加之工业煤气价格低廉,导致其在工业企业被广泛应用。煤气在生产、运输、使用过程中都存在着较大的风险,容易发生事故性泄漏事故,造成人员伤亡和财产损失。2005至2006年间,全国多次发生煤气泄漏事故,尤其首钢动力厂在短短八个多月内两次重大煤气泄漏事故,造成总共11人死亡多人重伤的严重后果,其惨痛的后果和血的教训给人们敲响了警钟。因此,对煤气泄漏事故的进行模拟就有着十分重要的意义。

本论文首先分析了煤气在工业场所泄漏后造成的危险区域和火灾爆炸危险区域,并确定了毒性危险区域的划分。然后选择适合的事故扩散模型,对工业场所煤气泄漏失控后可能发生的气云扩散后果进行量化分析,掌握煤气泄漏、扩散的规律:工业场所煤气泄漏后的浓度分布情况,扩散随时间变化的关系,影响煤气扩散分布的相关因素,泄漏煤气对人体健康的影响等。最后,采用建滔化工甲醇项目煤气泄漏的现场数据进行了数值模拟分析。

本论文的研究将有助于指导企业在发生煤气泄漏事故时,了解煤气泄漏的扩散范围和浓度分布,划定合理的安全距离,并指导遇险人员如何躲避逃生,避免因吸入煤气而中毒或窒息,减少工业场所煤气泄漏时对周围工作人员或居民造成的伤亡。

另外,本文还探讨建立了工业场所煤气泄漏事故应急救援预案,将为企业或政府相关部门制定煤气泄漏事故应急救援预案提供指导和参考。一旦工业场所煤气发生泄漏事故,本课题成果也将是安全环保部门掌握此类事故后果及其影响、及导致的环境污染状况的必要参考,也是解决事故处理和污染危害的重要依据,从环境保护和城市安全建设的角度来说有着现实的意义。

关键词: 煤气 泄漏 数值模拟 毒害

ABSTRACT

China's economy has been developing rapidly ever since its entering into the WTO, which in return spurs industrialization in our country. Trades in such areas as chemical industry, metallurgy, machine-building, etc. increase sharply and demands for industrial coal gas and relevant products increases correspondingly. Due to its cheap price, Coal gas has extensive applications in industrial areas. The coal gas has a bigger risk to have a leakage accident in the process of producing, transporting, using which will lead to personnel and property injuries and deaths. There were many accidents of the coal gas leakage happened Between 2005 and 2006 in our country ,Capital Iron and Steel Co. had two great accidents to leak the coal gas in dynamics factory in 8 months especially, which lead to serious consequence that 11 people death and many people severely injury, alarm was sounded. So it has a significance to simulate the leakage accident of coal gas.

Firstly, this paper has analyzed both the toxic area that the coal gas causes and the dangerous area of the fire explosion after the leakage in industrial places, and also confirmed the division of the dangerous area of toxicity. Then chooses a suitable gas dispersion model to quantitatively analyzed the possible consequences of coal gas dispersion when the leakage gets out of control, so as to grasp the law that The distribution situation of density after the coal gas leakage ,the changing of dispersion over time, the relevant factors affects dispersion of coal gas and the influence that the coal gas exerts to people, etc. Finally, the dissertation carries on the analysis of numerical simulation based on the data on-site coal gas leakage in methanol project of Jiantao Chemical Industry Co. Ltd.

This dissertation gives enterprises some guidelines on the accident of coal gas leakage happens, so they can grasp diffusion range and density that coal gas distributes, ensure safety distance, guide the person in danger how to escape for one's life, avoid being poisoned or suffocated by sucking such gas, reduce injuries and deaths of staff members or residents around caused by the leakage of coal gas in the industrial places .

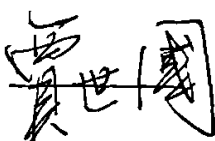
Additionally, the dissertation has also probed into and set up the in the industrial place, which will offer guidance and consultation for enterprises or relevant departments of the government to make emergency rescue plan for the coal gas

leakage. Once the accident of coal gas leakage happens, the achievement of this dissertation will be a reference for the security and environmental protection department to consider the consequences, influence, pollution caused by the accident. It also can be an important basis for dealing with the accident and handling the pollution. So there is a realistic meaning from the viewpoint of environmental protection and for the construction of urban security.

Keywords: Coal gas Leak Numerical simulation poison

独 创 性 声 明

本人郑重声明:今所呈交的《工业场所煤气泄漏扩散的数值模拟》论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。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,也不包含为获得首都经济贸易大学或其它教学机构的学位或证书而使用过的材料。

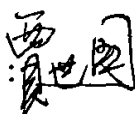
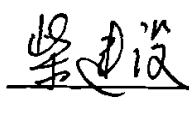
作者签名: 

日期: 2007 年 6 月 10 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解首都经济贸易大学有关保留、使用学位论文的规定,即:学校有权保留交送论文的复印件,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、缩印或其它的复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

作者签名:  导师签名:  日期: 2007 年 6 月 10 日

工业场所煤气泄漏扩散的数值模拟

第 1 章 概述

1.1 引言

我国当代工业以煤炭为主要能源的结构特点，决定了我国大多数工业企业的生产性气源以焦炉煤气和高炉煤气等为主，而煤气具有易燃易爆性、易散发性、剧毒性的特点，随着煤气在石油、化工、冶金等行业的广泛应用，也随之增加了煤气在工业场所发生泄漏、扩散并且导致人员中毒、火灾甚至爆炸发生的危险性和可能性。例如，2002 年 12 月 4 日，天津西青开发区某厂房发生一起一氧化碳泄漏事故，造成 3 人中毒死亡；2005 年 2 月 22 日，湖北大冶市一公司发生煤气中毒事故，当班的 4 名工人因中毒相继坠入料仓死亡；2005 年 4 月 21 日，内蒙古自治区乌海市同力冶炼有限责任公司发生高炉煤气泄漏事故，造成 2 人中毒死亡；2005 年 11 月 5 日，包头市大安钢铁公司发生煤气泄漏事故，当场造成 5 人中毒死亡，1 人受伤；2005 年的 10 月 26 日，首钢动力厂发生一起煤气中毒事故，共有 9 人丧生；而时隔 8 个月，即 2006 年 6 月 10 日首钢动力厂再次煤气泄漏事故，至少有 7 人中毒，其中 2 人经抢救无效死亡。此类事故举不胜举。

近几年来市场对煤气及其相关产品的需求增大，企业不断扩大生产能力，同时煤气事故的次数也居高不下，鉴于以上事实，我们发现：工业场所煤气一旦发生事故性泄漏，往往会酿成人员中毒伤亡的严重后果，另外，若遇火源还可能导致火灾或爆炸等事故造成重大损失。因此，为减少因煤气事故泄漏事故带来的人员及财产损失，对工业场所煤气的泄漏、扩散进行数值模拟分析，加强对其微观规律的研究，为制定相应的煤气中毒预防及事故减灾策略有重要的理论意义。

1.2 目的和意义

1.2.1 研究背景

近年来我国工业煤气事故性泄漏屡有发生，尤其严重的是 2005 年和 2006 年首钢动力厂连续两次发生煤气泄漏事故，并造成重大人员伤亡，此事件发人深省。其重要原因之一就是人们对工业场所煤气泄漏扩散的规律不甚了解，尤其是煤气泄漏扩散后中毒伤害范围的变化，安全警戒撤离距离的确定等信息不能及时获得，从而延误了中毒区域内人员的救援时机，造成重大人员和财产损

失。工业场所煤气泄漏扩散是一个综合而又复杂的过程，泄漏物质，泄源高度及面积、泄漏速度、泄漏时间、大气稳定度、地形等参数对扩散都有着重要的影响。因此，如何对工业场所煤气泄漏扩散的过程进行有效的模拟，以及时、准确、有效地获得各种参数，为煤气泄漏事故的应急救援提供科学依据就显得十分迫切。

1.2.2 研究的目的和意义

煤炭在我国储量极为丰富，并且成为我国现代工业短时期内不能替代的能源血液。煤气做为煤炭的直接或间接产物也在现代工业企业的得到了广泛地应用。煤气在给企业带来经济效益的同时，频发的事故性泄漏也对人们的生命和财产造成了严重的危害。

煤气事故性泄漏，往往会使得高浓度的一氧化碳在工业场所扩散蔓延，在一定的时间内令扩散范围内的人员遭受不同程度的伤害。由于煤气中的一氧化碳是无色无味且剧毒的气体，临近作业的人员凭直觉根本无法判断煤气泄漏后扩散的范围及浓度变化，从而无法及时获知撤离事故现场的安全距离，并且导致不能正确地采取应急救援措施，酿成严重后果。

本论文的研究，将有助于指导企业在发生煤气泄漏事故后，及时了解煤气泄漏的扩散范围和浓度分布，合理划定安全距离，并指导遇险人员如何躲避逃生，避免因吸入煤气而中毒或窒息。由于工业煤气的种类的多样性、理化性质的差异，导致国内外至今还没有一套完整的、可普遍适用的应急救援系统来控制事故的发展态势。本文探索性地建立了工业场所煤气泄漏事故应急救援预案，从而为企业或政府相关部门制定或采取煤气泄漏应急救援措施提供指导和参考。

一旦工业场所煤气发生泄漏事故，本课题成果也将是安全环保部门掌握此类事故后果及其影响、及导致的环境污染状况的必要参考，也是解决事故处理和污染危害的重要依据，从环境保护和城市安全建设的角度来说有着现实的意义。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外研究现状

国外学者对于事故性泄漏后物质在大气中的扩散研究始于二十世纪七、八十年代，并且一开始主要是针对核尘埃和大气污染的研究，后来才慢慢转向了化学工业。国外在这方面的研究相对成熟，直到现在该领域的研究还比较活跃。国外学者提出了不少扩散的计算模型，同时也进行了许多大规模试验。主要的

数值扩散模型有高斯模型 (Gaussian plume/puff model), BM (Britter and McQuaid) 模型、Sutton 模型、FEM (3-D Finite Element Model) 等等。高斯模型适用于点源的扩散, 早在五、六十年代就已经被应用。它从统计方法入手, 考察扩散介质的浓度分布, 适用于中等密度气团 (非重气) 扩散的模拟。烟羽模型 (Plume model) 适用于连续源的扩散, 烟团模型 (Puff model) 适用于短时间泄漏的扩散 (即泄放时间相对于扩散时间比较短的情形, 如突发性泄漏等)。高斯模型具有简单, 易于理解, 运算量小的特点, 且由于提出的时间比较早, 实验数据多, 因而较为成熟。例如, 美国环境保护协会 (EPA) 所采用的许多标准都是以高斯模型为基础而制定的^[1]。

20 世纪 70 年代以来, 复杂地形下的大气扩散问题逐渐的被广泛研究。如美国能源部主持的复杂地形的大气扩散研究计划 (ASCOT), 研究了复杂地形上大气输送和扩散的基本物理过程及评价空气质量的技术和方法 (Dickerson, 1983); 美国环保局主持的复杂模式发展计划 (CTMO) 研究了高架源排出污染物在复杂地形上的输送、扩散和形成的空气污染问题 (Leveryatal, 1983), 以及美国电力研究所主持的烟流模式验证与发展计划 (PMV&D), 通过大量现场观测试验检验和改进现有的烟流扩散模式 (Bowne, 1983)。另外, 国外学者在单相单组分泄漏领域取得了众多成果^[2,3,4]。Daniel 根据泄漏物质的存储状态 (气体、液体)、存储容器 (储罐、管道输送) 以及泄漏形式 (气相泄漏、液相泄漏、两相泄漏) 的不同分别进行了总结, 给出了相应的泄漏源模型^[4]。根据有毒有害气体或蒸气等物质泄漏后所形成的气云的物理性质的不同, 可以将描述气云扩散的模型分为中性气云模型 (非重气云模型) 和重气云模型两种。

高斯 (Gauss) 模型属于非重气扩散模型, 只适用于与空气密度相差不多的气体扩散。但是, 大多数危险性物质一旦泄漏到大气环境中就会由于较重的分子质量 (如 Cl_2)、低温 (如 LNG) 和化学变化 (如 HF) 等原因形成比周围环境气体重的重气云^[5], 重气云的扩散机理与非重气云完全不同。因此, 重气云扩散机理的研究是国外众多学者竞相研究的热点课题。国际上曾多次召开有关重气云扩散研究及其预防控制方面的系列学术会议, 如 “Symposium on Heavy Gas Dispersion”、“Proceedings of the Symposium on Heavy Gas Dispersion Trails at Thorney Island”、“Proceedings of the International Symposium on Preventing Major Chemical Accidents” 以及 “International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries”, 促进了重气云扩散的研究。到目前为止, 已提出大约 200 个重气云扩散模型^[6]。重气云扩散模型可分为经验模型、箱模型、浅层模型以及三维流体力学模等等。

随着计算机的普及和计算能力的不断提高, 加上近似计算方法, 例如, 有

限差分法、有限元法、有限体积法等的发展,基于数值计算的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法形成并得到了迅速的发展。正是 England 等(1978 年)触发了采用 CFD 方法模拟重气扩散的三维非定常态湍流流动过程。这种数值方法是通过建立各种条件下的基本守恒方程(包括质量、动量、能量及组分等),结合一些初始和边界条件,加上数值计算理论和方法,从而实现预报真实过程各种场的分布,例如,流场、温度场、浓度场等,以达到对扩散过程的详细描述。用这种方法就克服了箱及相似模型中辨识和模拟重气的下沉、空气的卷吸、气云的受热等各种物理效应时所遇到的许多问题。另外,该法具有模拟除平坦均匀地形以外更复杂情形的能力。这种基于 Navier-Stokes 方程(简称 N-S 方程)的完全三维的流体力学模型的预测方法,至少在原理上,具有内在的能力可以模拟所有重要的物理过程^[26]。

另外,国外一些著名的研究机构在理论和实验研究的基础上,相继开发了很多基于计算流体力学的泄漏扩散模拟软件系统,如美国海岸警备队和气体研究所开发的 DEGADIS,美国壳体研究有限公司在 20 家化工和石油化工公司的支持下开发的 HGSYSTEM,丹麦 Aalborg 大学开发的 EXSIM,挪威 Christian Michelsen 研究院开发的 FLACS 以及荷兰 TNO 和 Century Dynamics 合作开发的 AutoReaGas 等。

1.3.2 国内研究现状

我国关于有毒有害气体或蒸气泄漏、扩散的研究起步较晚,始于九十年代初期,且投入力量尚不多。“八五”期间,中国石油化工集团公司安全工程研究院(原化工部劳动保护研究所)对有毒物质的泄漏扩散进行了研究,在总结和建立有毒物质泄漏模式及泄漏源模型的基础上提出了泄漏扩散的 HLY 模型,该模型与国外一些著名的泄漏扩散模型相比与试验数据的吻合程度更好^[7]。另外,北京市危险源控制技术研究中心自 1997 年成立以来,一直将泄漏计算机仿真技术研究作为其主攻方向之一,不断进行泄漏扩散模型和风洞模拟实验研究,先后完成了“中药有毒物质泄漏扩散模型及监控技术研究”、“有毒重气泄漏模拟实验与扩散模型研究”、“毒物泄漏扩散模型研究”等科研课题,并将部分成果应用于一些环境卫生和安全与评价项目^[8];大连理工大学在国家自然科学基金的资助下,通过对现有的扩散模型进行了研究分析,从气体动力学入手,通过对气体微元进行质量平衡、动量平衡、能量平衡的分析,采用平板模型并在风洞实验的基础上对可燃及毒性气体的扩散过程进行了研究^[9];北京化工大学对重气扩散的过程进行了分析,采用涡粘性模型中的 $k-\varepsilon$ 双方程模型对模型中的扩散系数进行了修正,并对整个重气扩散过程进行了模拟,模拟结果与试验结果符合程度较好;南京工业大学在国家自然科学基金重点项目的资

助下对泄漏物质在大气环境中的扩散过程也进行了较系统、深入的研究^[10-12]。此外,北京市劳动保护科学研究所、东北大学、北京理工大学等单位也都开展了这方面的研究,也取得了一定的成果。

但是,近些年我国工业场所煤气泄漏屡屡发生,而国内还鲜见专门针对工业煤气泄漏扩散及其应急救援进行深入研究的资料。

1.4 主要研究内容和工作

1.4.1 主要内容

本文介绍了我国工业企业煤气使用的发展状况、工业煤气在使用过程中的泄漏事故概况,分析工业场所煤气泄漏事故的特点,说明煤气泄漏扩散研究的意义。并在文章的主要部分介绍了工业场所煤气泄漏扩散的危害及中毒危险范围的划分及确定。针对工业场所不同的情况和外界影响条件,建立相应的煤气泄漏扩散数值模型。通过工业场所煤气泄漏扩散模型的计算与分析,并通过实例模拟计算,掌握煤气泄漏后的浓度分布情况及确定人员撤离的安全警戒距离,煤气泄漏扩散与孔口面积、风向、大气稳定度等因素的变化关系,人员中毒及伤害范围的确定,计算人员撤离的安全距离等等,使得对煤气泄漏扩散的研究定量化。因此,企业可以根据煤气泄漏扩散的规律,合理、迅速的划定中毒危害范围,及时制定并采取相应的事故应急救援措施。另外,本文还从总体上设计建立了工业场所煤气泄漏模拟及事故响应系统,以期对以后处理类似事故起到借鉴和参考的作用。

1.4.2 主要工作

论文研究的主要工作有:

- (1) 工业场所煤气泄漏扩散研究的必要性。
- (2) 工业场所煤气泄漏扩散危险区域预测的基本理论。
- (3) 建立工业场所煤气泄漏、扩散的数值模型。
- (4) 建滔化工集团甲醇项目煤气泄漏实例计算分析。
- (5) 从总体上设计了工业场所煤气泄漏模拟及事故响应系统。

第 2 章 煤气扩散危险区域模拟的基本理论

2.1 煤气泄漏事故的危害性

煤气是一种燃烧热值很高的气体，其主要成分是一氧化碳，它在工业中应用广泛，接触一氧化碳的生产作业有冶金工业的氧化铝生产、炼钢、炼焦；机械工业的锻造、渗碳和铸造；化学工业用一氧化碳作原料生产碳酸氢铵化肥、合成氨、合成甲醇、合成光气等。另外，煤气发生炉、耐火、建筑材料和陶瓷业使用的窑炉、煤矿井下火药爆破等，均可产生一氧化碳，所以煤气是人们接触最广泛的一种毒气。因为煤气是一种易燃易爆剧毒的气体，在工业的生产、传输、使用、接触过程中均存在很高的风险，由于生产、传输、存储设备的不安全因素，人的不安全行为及自然因素等不稳定条件极有可能导致煤气泄漏，造成重大的人身伤亡事故和经济损失。

2.1.1 火灾和爆炸危害

煤气是由几种可燃气体及某些惰性气体混合而成的，由于生产工艺和条件的不同主要分为焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、水煤气、发生炉煤气等几种^[13]。它们的成分及主要性质见表 2-1。

表 2-1 煤气的成分及主要性质

成 分(%)	种 类				
	高炉煤气	焦炉煤气	发生炉煤气	转炉煤气	水煤气
甲烷		20~30	3~6		~1.2
炭氢化合物		2~	≤0.5		
一氧化碳	27~30	5~8	26~31	60~70	34~38
氢气	1.5~1.8	55~60	9~10		52
氮气	55~57	7~8	55		4
二氧化碳	8~12	3~3.5	1.5~3.0		~8.2
发热量 (kcal/Nm ³)	850~950	3900~4400	1400~1700	1800~2200	2737
燃点 (℃)	700	600~650	700	650~700	600
主要性质	无色无味	无色有臭味	有色有臭味	无色无味	无色
	有剧毒	有毒	有剧毒	有剧毒	有剧毒
	易燃易爆	易燃易爆	易燃易爆	易燃易爆	易燃易爆

由上表可以看出,煤气的主要成分是一氧化碳、甲烷和氢气等,而一氧化碳、甲烷和氢气均是易燃易爆气体,因而就决定了煤气的易燃易爆性。易燃易爆气体与固、液体状态的物质相比更易燃烧,只要达到其氧化分解所需的热量,便能着火燃烧。根据可燃气体的燃烧过程^[14],易燃气体的燃烧形式可分为两类:第一类是易燃气体与空气预先混合成混合可燃气体的燃烧,称为混合燃烧。混合燃烧由于燃料分子已与氧分子进行充分混合,所以燃烧速度快,温度也高,火焰的传播速度也快,易发生爆炸反应。另一类就是将易燃气体直接由管道中放出点燃,在空气中燃烧,这时煤气与空气中的氧分子通过相互扩散,边混合边燃烧,这种燃烧称为扩散燃烧。煤气泄漏后如遇到明火或静电火花可能发生扩散燃烧,也可能扩散相当一段距离与空气充分混合后,遇明火发生混合燃烧,即爆炸。当然,不是说只要煤气泄漏与空气混合遇到火源就会发生爆炸,这要求煤气在混合气体当中有一个合适的比例,也就是说只有达到煤气的爆炸极限才能爆炸。

煤气爆炸的破坏形式通常有直接的爆炸作用、冲击波的破坏作用和火灾等三种,后果往往都比较严重。

(1) 直接的爆炸作用。这是爆炸对周围设备、建筑和人的直接作用,它直接造成机械设备、装置、容器和建筑的毁坏和人员伤亡。机械设备和建筑物的碎片飞出,会在相当范围内造成危险,碎片击中人体则造成伤亡。

(2) 冲击波的破坏作用。爆炸时产生高温高压气体产物以极高的速度膨胀,象活塞一样挤压周围空气,把爆炸反应释放出的部分能量传给这压缩的空气层。空气受冲击而发生扰动,这种扰动在空气中传播就成为冲击波。冲击波可以在周围环境中的固体、液体、气体介质(如金属、岩石、建筑材料、水、空气等)中传播。在传播过程中,可以对这些介质产生破坏作用,造成周围环境中的机械设备、建筑物的毁坏和人员伤亡。冲击波还可以在它的作用区域产生震荡作用,使物体因震荡而松散,甚至破坏。

(3) 造成火灾。煤气泄漏后与空气的混合物爆炸一般都引起燃烧起火,会形成火灾。

2.1.2 毒性危害

工业企业生产或使用的煤气的主要成分是一氧化碳、甲烷、氢气等,其中甲烷和氢气虽然不具有毒性,但是一氧化碳是剧毒气体且其在煤气中的含量很高,因此,煤气具有很强的毒性。煤气中毒基本上是由其所含的一氧化碳造成,下面主要介绍下一氧化碳的毒性危害。

1. 一氧化碳

(1) 理化性质

一氧化碳(CO)为无色、无臭、有毒的气体,比空气略轻,相对密度0.967,熔点-205.1℃,沸点-191.5℃,自燃点608.89℃,与空气混合物爆炸限12%~75%,微溶于水,但易被稀氨溶液(氨水)吸收。在空气中燃烧呈蓝色火焰,遇热、明火易燃烧爆炸,在400~700℃间分解为碳和二氧化碳。

(2) 中毒机理

一氧化碳是一种窒息性毒气,属于Ⅱ级毒物,其毒理过程是:一氧化碳(CO)主要是由呼吸道进入肺泡(皮肤不能吸收),在肺泡中通过气体交换进入血液循环系统。一氧化碳与血红蛋白的亲合力很强,较氧与血红蛋白的亲合力大300倍,一氧化碳与血红蛋白形成碳氧血红蛋白(HbCO),而碳氧血红蛋白的解离速度较氧合血红蛋白(HbO₂)慢3600倍,致使血液的携氧功能下降,导致机体组织缺氧,吸入高浓度一氧化碳时,短时间内便可引起窒息而死亡。

(3) 中毒表现

一氧化碳很容易经肺吸收进入血液,与血红蛋白结合导致缺氧、窒息。急性中毒较为常见,可分为轻度、中度、重度三级。中毒症状取决于空气中一氧化碳浓度和接触时间,与劳动强度和个体的敏感性也有一定关系。

① 轻度中毒:吸入一氧化碳后出现头痛、头沉重感、恶心、呕吐、全身疲乏无力、耳鸣、心悸、神志恍惚。稍后,症状便加剧,但不昏迷,离开中毒环境,吸入新鲜空气能很快自行恢复。病人体内的碳氧血红蛋白一般在20%以下。

② 中度中毒:除上述症状加重外,面颊步出现樱桃红,呼吸困难、心律加快、大小便失禁,昏迷。大多数病人经抢救后能好转,不留后遗症。病人体内的碳氧血红蛋白在20%~50%之间。

③ 重度中毒:多发生于一氧化碳浓度极高时,患者很快进入昏迷,并出现各种并发症,如脑积水、心肌损害、心力衰竭、休克。如果能得救也会留下后遗症,如偏袒、植物神经功能紊乱、神经衰弱等。病人体内碳氧血红蛋白在50%以上。

2. 甲烷和氢气

(1) 基本性质

甲烷(CH₄)在常温下是一种无色、无味、无毒的气体。分子量为16,相对密度0.55,比空气约轻一半,不易溶于水。熔点-182.6℃,沸点-161.5℃。与空气混合物爆炸限4.6%~14.2%。在空气中燃烧时呈蓝色火焰,最高温度可达1400℃左右。

氢气(H₂)是无色、无味、无毒气体,分子量为2,相对密度0.07,不溶于水,熔点-259.2℃,沸点-252.8℃极易扩散。与空气混合物爆炸限4%~76%。在空气中燃烧时呈淡蓝色火焰,最高温度可达1430℃左右。

(2) 伤害机理

甲烷和氢气不会对人体健康产生影响,任何机构都没有对其作出暴露浓度的限制。但是对于高浓度的甲烷和氢气,由于它们会取代空气中的氧,而造成缺氧环境,有使人窒息的危险,从而危害人身健康。

2.2 危险范围的确定

煤气泄漏扩散模型要对事故威胁进行正确的预警预报,首先必须确定具体模拟参量,掌握该模拟参量的变化规律,设置合理的参量阈值。本文选取煤气中一氧化碳的扩散浓度作为危险特性参量,依此为依据来确定煤气泄漏后的危险区域。

2.2.1 火灾爆炸危险区域

GESAMAP 制定的《化学品污染处理手册》中第 2.4 节中表 1 “对于各种危害等级作出对应措施的行动”指出,对于可能爆炸的气体使用爆炸浓度仪进行检测,测值的等级以爆炸下限的 10%为界,低于爆炸下限的 10%时可以进行现场检查,并继续检测;当读数高于爆炸下限的 10%时说明具有爆炸危险,应立即撤离^[15]。

工业上生产或使用的煤气是由几种可燃气体和某些惰性气体混合而成的,煤气的爆炸极限 L 可以按照下式计算

$$L = L_0 \times \frac{(1 + B/1 - B) \times 100}{100 + L_0(B/1 + B)} \quad (2-1)$$

$$\text{其中} \quad L_0 = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_1/N_1 + P_2/N_2 + \dots + P_n/N_n} \quad (2-2)$$

式中 L_0 ——煤气中不含惰性气体时的爆炸极限, %;

$P_1, P_2 \dots$ ——煤气中的可燃气体的体积百分数, %;

$N_1, N_2 \dots$ ——煤气中可燃组分的爆炸极限, %;

B ——煤气中惰性气体的体积含量。

工业企业中常见的几种煤气的爆炸极限参见表 2-2^[13,16]。

表 2-2 几种煤气的爆炸极限

煤气的名称		焦炉煤气	水煤气	发生炉煤气	高炉煤气	转炉煤气
爆炸极限	上限	31	72	73.7	74	15
(V%)	下限	5.6	6.2	20.7	35	5

爆炸浓度极限可以用易燃气体在混合物中的体积百分数来表示,也可以用易燃气体在每立方米或每升混合气体中含有的克数来表示^[13]。在 20℃时,两者有如下关系

$$y = \frac{x}{100} \cdot \frac{1000m}{22.4} \cdot \frac{273}{273+20} = \frac{xm}{2.4} \quad (2-3)$$

式中 y ——以体积重量浓度 (g/m^3) 表示的易燃气体与空气混合物的爆炸下限 (上限);

x ——以体积百分比表示的易燃气体与空气混合物的爆炸下限 (上限);

m ——易燃气体的分子量;

22.4——标准状态下,1mol 物质气化时的体积。

通过表 2-1 可知,焦炉煤气中一氧化碳的含量最低为 5%~8%,以一氧化碳含量最少的焦炉煤气为例,假设其含甲烷 (CH_4) 25%,一氧化碳 (CO) 5%,氢气 (H_2) 60%,氮气 (N_2) 7%,二氧化碳 (CO_2) 3% 计算其平均分子量 $\bar{m}$ 为

$$\bar{m} = 25\% \times 16 + 5\% \times 28 + 60\% \times 2 + 7\% \times 28 + 3\% \times 44 = 9.88$$

由式(2-3)可计算焦炉煤气爆炸下限浓度: $y = 23.053 \text{ g/m}^3 = 23053 \text{ mg/m}^3$ 其中一氧化碳的浓度为: $C_{\text{CO}} = \frac{23053}{9.88 \times 1000} \times 5\% \times 28 \times 1000 = 3267 \text{ mg/m}^3$, 远远高于我国《工业企业设计卫生标准》GBZ1-2002 和《工作场所有害因素职业接触限值》GBZ2-2002 中规定的工作场所空气中一氧化碳最高容许浓度 (MAC) 30 mg/m^3 的浓度。因为煤气的毒害范围要比其爆炸范围大的多,并且本文侧重于从职业卫生健康角度探讨煤气泄漏,故对煤气泄漏后造成的火灾爆炸不做深入的探讨。本文重点将讨论工业场所煤气泄漏后扩散的范围和一氧化碳毒害影响的区域。

2.2.2 毒性浓度危险区域的确定

通过查阅大量相关资料发现,不同国家、不同行业,对有毒有害物质在大气中的毒害浓度范围有着不尽相同的划分标准。

1. 我国标准

我国《工业企业设计卫生标准》GBZ1-2002 和《工作场所有害因素职业接触限值》GBZ2-2002¹中规定工作场所空气中有毒物质的最高容许浓度 (Maximum Allowable Concentration, MAC), 表明人员进行长期工作不会产生病理变化的

¹ 《工业企业设计卫生标准》(TJ36—79) 修订后分为两个标准:《工业企业设计卫生标准》GBZ1-2002 和《工作场所有害因素职业接触限值》GBZ2-2002。

有毒物质在空气中的最高浓度值。标准中规定工作场所(指工人为观察和管理生产过程而经常或定时停留的地点)一氧化碳最高容许浓度为 $30 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。

一氧化碳的最高容许浓度在作业时间短暂时可予放宽: 作业时间 1 小时以内, 一氧化碳浓度容许达到 $50 \text{ mg} / \text{m}^3$; 半小时以内允许达 $100 \text{ mg} / \text{m}^3$; 15~20 分钟允许达 $200 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。在上述条件下反复作业时, 两次作业之间需间隔 2 小时以上。

2. 国外标准

(1) 美国标准

国际上, 最具影响力和被普遍采用的毒害物质的浓度标准是由美国国家工业卫生工作者协会(ACGIH)提出的有关工作环境中污染物的浓度标准—阈限值 TLV (threshold limit value), 它将阈限值浓度划分为三个等级^[10]:

① TLV-TWA (Threshold Limit Value-Time Weighted Aerge)

TLV-TWA 译为时间加权平均阈限值, 即每标准 8 小时工作日或 40 小时工作周中的时间加权平均浓度限值, 在该浓度下绝大多数工人每天反复接触而不致受到有害影响。该标准规定的一氧化碳的时间加权平均浓度限值为 $29 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。

② TLV-STEL (threshold limit value-short time exposure limit)

TLV-STEL 译为短时间接触阈限值, 即在工作时接触该浓度毒物不得超过 15 分钟, 每工作日接触不得超过 4 次, 两次间隔至少 60 分钟的时间加权平均浓度限值, 并且在连续接触毒物的过程中不会对人体产生刺激作用, 不会造成慢性或不可逆的组织损伤, 不至于产生麻醉作用达到足以增加可能的意外伤害, 降低自救能力和实际降低工作效率的程度。

③ TLV-C (threshold limit value-ceiling)

译为阈限值—上限值, 即接触毒物的最高浓度限值, 工人在该浓度下接触毒物片刻都无法忍受。

另外, 美国职业安全与卫生条例管理局(OSHA)规定的 TWA 为 $57 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。

(2) 日本标准

日本产业卫生学会于 1998 年提出的《日本关于容许浓度的建议》中将有毒害物质的浓度划分为容许浓度和最高容许浓度两种。

① 容许浓度

指劳动者一日劳动 8 小时, 一周 40 小时, 从事非激烈劳动, 暴露于有害物质的平均浓度下, 未对工人造成可见的有害影响, 则判断该平均浓度为该有害物质的容许浓度。其中, 一氧化碳的容许浓度值为 $57 \text{ mg} / \text{m}^3$ 。

② 最高容许浓度

指长期暴露在该浓度下, 也不至于对工人的健康造成不良影响的浓度。暴露

浓度的最大值(包括最大浓度在内), 规定: 15 分钟的平均暴露浓度不能超过容许浓度值的 1.5 倍。据此规定, 则一氧化碳的最大容许浓度应不超过 85.5 mg/m^3 。

(3) 其它标准

其它一些浓度划分标准有: 中毒极限浓度(Toxic Limit)——指在这个毒性浓度的环境中呼吸时间超过 30 分钟就会导致持久的和致命的伤害; 气味临界浓度——指能被大多数人闻到气味的最低气体浓度; 半数致死浓度 (LC_{50}) ——指使半数实验动物死亡的最小浓度; 致死浓度 (LC) ——指笼统地表示可引起受试验动物死亡的浓度。

可见, 不同国家、不同行业因其法律要求、工业生产经验、人与动物的实验研究数据、依据资料等的不同而导致其在毒物浓度划分方法上也不尽相同。如工作环境中一氧化碳的最高容许浓度在我国为 30 mg/m^3 , 日本为 57 mg/m^3 , 而美国 TLV-TWA 则有 ACGIH- 29 mg/m^3 和 OSHA- 57 mg/m^3 两种。当然, 很多有毒害物质(包括一氧化碳)的浓度阈值是会随着有关知识的增加、情报资料的积累、新物质的使用等而会做出相应的修改和更新的。

2.3 本文毒性浓度范围的划分

工业场所煤气泄漏扩散后毒性浓度范围的划分, 对估计伤害范围、统计受影响的人数、做好煤气泄漏事故应急救援预案, 乃至事故后索赔、评估、工伤仲裁等等, 都有重要意义和应用价值。

急性一氧化碳中毒的发病与接触一氧化碳的浓度及时间有关。有资料证明, 吸入空气中一氧化碳浓度为 58.5 mg/m^3 达到 2.5 小时, 碳氧血红蛋白可超过 7%; 一氧化碳浓度达 292.5 mg/m^3 时, 可使人产生严重的头痛、眩晕等症状, 碳氧血红蛋白可增高至 25%; 一氧化碳浓度达到 1170 mg/m^3 时, 吸入超过 60 分钟可使人发生昏迷, 碳氧血红蛋白约高至 60%。一氧化碳浓度达到 11700 mg/m^3 时, 数分钟内可使人致死, 碳氧血红蛋白可增高至 90%。一氧化碳对人体的危害见表 2-3^[17]。

表 2-3 一氧化碳对人体的危害

接触时间/h	浓度/ (mg/m^3)	碳氧血红蛋白 / (%)	人体反应
2.5	58.5	7	轻度头痛
2	117	12	中度头痛、晕眩
2	292.5	25	严重头痛
1.5	582.5	45	恶心呕吐
1	1170	60	昏 迷
5min	11700	90	死 亡

本文是根据一氧化碳气体对人体的危害程度来划分煤气泄漏扩散后的毒性浓度范围的。一氧化碳对人的危害，主要取决于空气中它的浓度和接触时间共同作用的结果，二者乘积的大小，可粗略估计其危害程度，由表 2-3 可知， $117\text{mg}/\text{m}^3$ 被人吸入 120min（半量吸收时间），即出现中度头痛和眩晕症状，而 $1170\text{mg}/\text{m}^3$ 吸入 60min（半量吸收时间），可致昏迷甚至死亡。一氧化碳对人体的毒害性作用呈剂量——效应关系。所谓的剂量——效应关系是指接触定量毒物所致特定效应（死亡、伤残等）在接触群体中所占的百分数^[19]。在考虑煤气毒性浓度范围分区时排除以下两点：首先，不考虑人的个体之间的体质差异，不使用中毒个案，而采用群体数据；其次，不考虑煤气泄漏后造成的间接危害。

本文煤气（一氧化碳）毒性浓度范围具体的划分如下：

- （1）致死区（I 区）：此区内人员如果未能及时逃离或者缺少防护装备，则将全部遭受严重中毒，其中半数人员可能中毒死亡。
- （2）重伤区（II 区）：此区内绝大多数人员将遭受重度或中度中毒，需住院医疗救治治疗，极个别人员中毒至深导致死亡。
- （3）轻伤区（III 区）：此区内绝大多数人员有轻度中毒或吸入反应症状，短暂医疗救护即可恢复正常。
- （4）吸入反应区（IV 区）：此区内部分人员有吸入反应症状，但症状反应极其轻微，一般在脱离接触后 24 小时内就能完全恢复正常。

以上划分毒性浓度区域用图形表示如图 2-1。

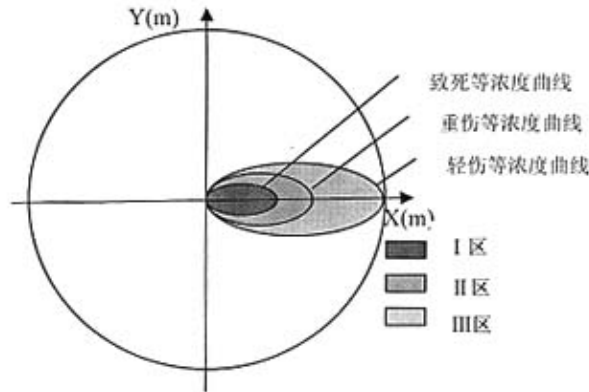


图 2-1 不同浓度毒性危害区示意图

一般情况下，上面四个分区是沿着煤气泄漏扩散的下风向由内向外分布的，中间的半致死区外边界线，也即外侧重伤害区的内边界，依此类推。其中，吸入反应区的边界不一定要确定下来，因为该区域内的一氧化碳浓度已经属于容许浓度了，通过人自身能够抵御该浓度范围内的一氧化碳的伤害，不会对健康造成不利影响。煤气泄漏后，致死区和重伤区是应急抢救并立即疏散的重点区域；轻伤

区则属于紧急疏散区域,可吸入区由于毒害甚微,不属于应急救助重点。这样只要确定三种边界浓度的具体数值,就可以划分出以上四个不同浓度的毒性危害区域。

在确定三种边界浓度具体数值时,结合国内外标准的规定和一氧化碳中毒危害的医学临床数据(表 2-3),按照人体一氧化碳急性中毒后,以人体中毒的反应症状为依据来划定一氧化碳毒害浓度范围,本文将致死区外边界浓度值、重伤区外边界浓度值和轻伤区外边界浓度值分别设定为 $C_s=1170\text{mg/m}^3$, $C_z=292.5\text{mg/m}^3$, $C_q=58.5\text{mg/m}^3$ 。本文将通过一氧化碳的伤害浓度边界值推导出相应煤气的浓度值,以计算煤气泄漏扩散后的有毒伤害范围。

本论文中选取的一氧化碳气体临界浓度与作业场所我国《工业企业设计卫生标准》GBZ1-2002 和《工作场所有害因素职业接触限值》GBZ2-2002 中规定的一氧化碳最高允许浓度(MAC) 30mg/m^3 相差很远。由于本文主要研究煤气突发性泄漏事故对人体的急性中度伤害,与作业场所中 8 小时工作时的要求不同,因此,所取临界浓度必然要比作业场所最高允许浓度大很多。

2.4 大气扩散模拟的基本理论

煤气泄漏扩散模拟在工业场所煤气危险性分析和评价、制定应急计划和反应措施中有着极其重要的作用。对煤气泄漏突发性事故,可快速地做出判断,为执行应急计划和应急反应措施提供可靠的数据和行动依据。

煤气扩散是一个随时间、空间变化的动态过程,它符合大气扩散的基本规律。在广阔的空间内气体浓度随着时间和距离,从最初释放的高浓度区向周围环境迁移扩散,最终达到背景浓度。

大气污染物的散布过程是大气输送与扩散的结果。因此,大气污染物扩散的理论处理,就是从大气湍流扩散的基本理论出发,对扩散过程作正确的数学物理模拟。大气湍流扩散的基本理论主要有两种:统计理论和梯度输送理论。此外,还有箱模式等从其他经验或理论途径导出的模式。统计理论的研究方法是追踪个别空气微团的运动,属于拉格朗日方法;梯度扩散理论的研究方法则是欧拉的,它讨论在空间固定点上由于大气湍流运动而引起的质量(污染物浓度)通量^[20]。

2.4.1 湍流统计理论

近地层大气总是处于湍流运动状态。在充分发展的湍流中,速度和其他特征量都是时间和空间的随机量。尽管个别粒子的运动极不规则,但对大量的微团运动却具有一定的统计规律。湍流统计理论就是从研究湍流脉动场的统计性质出发描述流场中扩散物质的散布规律。

通过对大量粒子运动规律的研究,当行走的步数充分大后,所走距离的概率分布接近正态分布;其位移的均方根(标准差)与行走时间的平方根成正比。

泰勒(Taylor, 1921)用拉格朗日方法将扩散参数和湍流脉动场的统计特征量联系起来,导出连续运动扩散过程的泰勒公式^[20]:

$$\sigma_y^2 = \bar{y}^2(T) = 2\bar{v}^2 \int_0^T \int_0^t R_L(\tau) d\tau dt \quad (2-4)$$

式中 $\bar{y}^2(T)$ 表示从原点出发的许多粒子经过 T 时段,在 x 方向移动 $x = \bar{u}t$ 距离后,它们在 y 方向位移的方差 σ_y^2 。由该式可见,在定常均匀湍流场中,粒子的湍流扩散范围取决于湍流脉动速度方差 $\bar{v}^2$ 和拉式相关性系数 $R_L(\tau)$ 。

然后,再借助正态概率分布函数确定浓度分布,这是通过统计途径计算大气扩散的基本方法。

当然,大气的湍流扩散问题十分复杂,浓度的正态分布仅是在下垫面开阔平坦、气流稳定的小尺度扩散中的一种假设。但它对处理扩散问题十分有用,许多理论的推导也是在此假设下进行的。例如应用最为广泛和有效的高斯扩散模式,按照统计理论的处理途径,假定概率分布函数的形式为高斯分布,便可得到连续点源烟羽高斯扩散公式。

2.4.2 梯度输送理论

根据流体中扩散物质质量守恒定律,取湍流扩散烟羽中微小体积元 $dx dy dz$ 研究其中由于平均流动和湍流扩散而发生的物质交换,可以得到无界条件(不考虑地面反射)湍流扩散的微风方程^[20]:

$$\frac{d\bar{C}}{dt} + \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) \quad (2-5)$$

等号左边第一项为局地变化,括号内为平流输送项;等号右边为湍流扩散项。式中 $\bar{C}$ 为浓度, $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$ 为瞬时风速在 x, y, z 三个方向上的分量, K_x , K_y , K_z 为三个方向上的湍流扩散系数,表征湍流输送能力。

梯度输送理论即由此得来,由于它将湍流运动引起的局地质量通量等于该处扩散物质的平均浓度梯度与湍流扩散系数 K 的乘积,因此这种理论也称 K 理论。

求解扩散方程。目前大体上有两种途径:其一是简化扩散方程;其二是进行数值计算。

(1) 简化扩散方程的方法

由于湍流扩散系数 K_x , K_y , K_z 并非常数,而是与流场形式和气象条件相关的时空函数,具体函数形式非常复杂,在一些实际情形中尚不清楚,致使方程求解困难。为得到解析解,需要做一些假定和简化。通常假设三个方向上的扩散系

数 K_x, K_y, K_z 为常数(即菲克扩散), 取 x 轴与平均风向一致的坐标系, z 轴垂直向上, 则有 $\bar{w} = \bar{v} = 0$, 于是式 2-5 可化为:

$$\frac{d\bar{C}}{dt} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \quad (2-6)$$

而后, 根据释放源和环境等特定类型, 如无风瞬时点源、微风连续点源等, 进一步设定简化条件求解扩散方程, 得到这些典型情况下的解。

在简化条件下, 对湍流扩散方程进行推导整理, 就可得到符合正态分布的高斯烟羽或烟团模式。这说明虽然梯度输送理论和统计理论从不同的角度出发研究空气污染物的扩散, 但并非毫无联系。

(2) 数值求解方法

由于上面的方法设定了与实际情况不符的简化条件, 只能在平稳、均匀湍流的下使用, 影响了结果的可靠性。

对一些非均匀、非稳定流场条件和下垫面粗糙或不连续的复杂地形的情形, 可以考虑用数值求解方法求解完全的扩散方程(实际运用也需要作各种近似与简化处理)。

数值计算模式是通过建立各种条件下的基本守恒方程(包括质量、动量、能量及组分等), 结合一些初始和边界条件, 运用数值计算理论和方法, 实现预报真实过程各种场的分布, 如流场、温度场、污染物初始浓度场等, 以达到对扩散过程的详细描述^[21]。

建立三维复杂地形上气流的流场和大气污染物浓度场模拟的程序主要包括两部分^[22]: ①求解三维大气准静态动力——热力学方程组数值解: ②求解复杂地形上平流扩散方程。第一部分用于模拟不同层大气中, 不同垂直分布的来流在流经复杂地形上空时, 因地形动力作用形成的流场。可模拟过山波动、地形的阻塞、分支和绕流等。第二部分用作上述模拟流场中的扩散过程的运算。

迄今为止, 多数模式取固定网格型并采用差分方法求解, 即以差分方程近似扩散方程。用于求解扩散方程的数值方法很多, 主要是有限差分法、有限元法、谱方法、伪谱法和多项式插值法等等^[20]。

2.5 模拟方法的比较和本文的选择

综上所述, 污染物的大气扩散模拟方法可归纳为两类, 即扩散模式和数值计算。现对两者的优缺点简要分析如下:

(一) 扩散模式

高斯烟羽和烟团等扩散模式提出较早, 试验数据多, 较为成熟, 而且如前所述, 具有概念清晰、计算量较小等特点, 在事故应急反应中, 能够尽量快速准确

对中性气体扩散的威胁作出判断, 特别适合于危险评价^[23], 已成为事故应急反应和环境影响评价领域的重要组成部分。但存在自身固有的局限性, 必须假定速度和浓度的相似分布, 并假设扩散气体在平稳、均匀湍流的理想状态下扩散, 而实际中通常涉及不连续界面, 因此具有一定的不确定性。

为此, 需要根据各种气象条件和下垫面情况进行不断修正和完善, 以使其能经验地满足各种扩展推广和急迫的应用需要。此外, 还需针对不同泄漏源, 如点源、面源以及瞬时源、连续源分别考虑。

(二)数值计算

应用数值计算方法的流体力学模型能够更加精确地描述污染物在大气湍流运动中的物理现象, 具有广泛的通用性, 模拟非均匀稳定的流场, 以及有障碍物或明显地形变化的复杂过程更为可靠。但不足之处为技术要求较高, 限制了其实际应用, 其缺点具体分析如下^[24]:

(1) 模拟所依赖的湍流模型尚未臻完善, 这将导致模拟结果不能正确地预测各种场的分布;

(2) 数值计算过程较为复杂, 且计算量巨大, 需要高性能的硬件设备, 在实际应用中受到很大限制。而不得不采用大网格处理又会降低精度;

(3) 由于事故现场条件的复杂性和动态变化以及事故的突发性, 难以精确获知数值仿真过程中的某些参数, 同时对使用人员的专业知识水平要求很高。

所以, 该方法目前尚处于研究探索和完善阶段, 尚不能普遍实用。

本文研究的工业场所煤气泄漏扩散模拟具有自身的特色, 强调快速、简便实用而又不乏准确性。这首先是由于工业场所煤气泄漏事故具有突发性的特点, 事故情况无法预知, 条件也较为复杂多变, 为精确计算带来不便; 再者, 在事故应急反应中, 为控制煤气事故规模和减少事故损害, 必须进行快速的应急反应行动。为此首先要求人们迅速地对事故后果作出评估, 作为确定应急反应措施的依据, 以便尽快采取行动。这时, 计算简便快速的煤气扩散模式方法将会显示出良好的优越性。

因此, 综上所述, 根据本文研究目的需要, 应用扩散模式进行煤气泄漏扩散模拟是可行的。根据以上分析, 煤气泄漏扩散危险区域模拟的步骤为:

(1) 根据煤气泄漏事故的具体情况计算泄漏源强;

(2) 模拟煤气在一定的地貌、气象条件下的扩散, 得到煤气中一氧化碳的时空浓度分布;

(3) 依据煤气中一氧化碳特定的毒性浓度值换算出煤气的浓度值, 确定毒性危险区域。

第 3 章 煤气扩散的数学模型研究

所谓数学模型,从广义上讲,是我们所考虑的某个过程中某些变量间关系的总称。这种关系,不管是动态还是静态的,通常都可以用公式、表格或图形来表述。我们把这些公式、表格或图形统称为数学模型。由于电子计算机的广泛应用,表格或图形均可以回归成数学解析表达式(初等函数、非初等函数、矩阵等),因此从狭义上讲,数学模型专指那些数学表达式^[26]。

本文研究的煤气泄漏扩散的数值模拟主要目的是通过对工业场所煤气(一氧化碳)泄漏后的动态扩散情况的量化计算,为救援部门及其他相关部门应急反应决策服务。而要实现准确的计算首先就是要选择相对准确的泄漏扩散数学模型。泄漏扩散数学模型是有毒化学品泄漏大气扩散物理过程的数学解析式。泄漏扩散数学模型的选择直接关系到预测和计算结果的精确性和时效性。

泄漏扩散数学模型研究,始于对尘埃和大气污染的研究。自 80 年代以来美日欧几次大规模现场泄露扩散实验的完成,促进了有毒有害气体泄露扩散模型研究的发展,20 年间报道了百余种模型^[4]。但因为有毒有害气体泄漏和扩散行为极为复杂、影响因素太多,故各类模型均在不断发展完善之中,很难找到一组完全精确的扩散模型。本文将在分析众多气体扩散模型优缺点的基础上,结合煤气泄漏的特点,选择合适的模型作为研究煤气泄漏扩散的应用模型。

3.1 煤气的泄漏扩散分析

3.1.1 工业场所使用煤气引发事故的因素

在企业使用煤气过程中能引发事故的因素很多,根据对历年来 200 起各种工业煤气管道容器泄漏事故原因的分析,事故的原因主要有设计原因、制造原因、安装原因、管理不善、腐蚀等(各种事故原因所占比例见表 3-1^[38]。

表 3-1 事故原因统计表

事故原因	事故起数	百分比(%)
设计原因	23	11.5
制造原因	51	25.5
安装原因	36	18.0
管理不善	65	32.5
腐 蚀	21	10.5
其 他	4	2.0
总 计	200	100

(1) 设计原因主要包括：选用材料不当；阀门、管件选型不合理；应力分析失误；系统设施布置不合理等。

(2) 制造原因主要是指：管子、管件(三通、变径管等)、阀门制造缺陷引起的事故。包括：制造质量低劣；管材本身存在的原始缺陷；焊接结构中有夹渣、气孔、裂纹等焊接缺陷；材料和表面加工粗糙，密封性能差，引起泄漏。

(3) 安装原因主要是指：施工安装质量低劣和违章施工引发的事故。表现为：施工安装焊接质量低劣，存在未焊透、夹渣、气孔、未熔合等质量缺陷；不按设计图纸要求施工，错用材料；无损探伤的比例、部位和评判标准不符合有关标准。

(4) 管理不善主要包括：使用管理混乱，无操作规程，违章操作；不按规定进行定期检验等。

(5) 管道腐蚀主要原因是：年久失修，也有是属于管理疏忽、防腐措施不善等原因，有的甚至因错用材料致使腐蚀速度加快。

(6) 其他原因包括自然灾害，人为破坏等。

3.1.2 煤气泄漏源的分类

一般情况下，可以根据泄漏面积的大小和泄漏持续时间的长短，将泄漏源进行分类：

(1) 小孔泄漏，也称为连续源。此种情况通常为煤气经较小的孔洞长时间持续泄漏，如反应器、储罐、管道上出现小孔，或者是阀门、法兰、机泵、转动设备等处密封失效。

(2) 大面积泄漏，也称为瞬时源。此种情况通常是指煤气经较大孔洞在很短时间内大量泄出，如大管径管线断裂、储罐爆裂、反应器因超压爆炸等瞬间泄漏出大量煤气。

3.1.3 煤气泄漏的速度

煤气管道出现的泄漏一般为孔口或裂缝泄漏，煤气从裂口泄漏的速度与其流动状态有关。因此，计算泄漏量时首先要判断泄漏时气体的流动属于声速(超声速)还是亚音速流动，前者称为临界流，后者称为次临界流^[26]。

当下式成立时，气体流动属声速流动：

$$\frac{P_0}{P_1} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}} \quad (3-1)$$

当下式成立时, 气体流动属亚音速流动:

$$\frac{P_0}{P_1} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}} \quad (3-2)$$

式中: P_1 ——泄漏部位内部气体的压力, Pa;

P_0 ——为标准大气压, Pa;

k ——气体的绝热指数, 即定压比热容 c_p 与定容比热容 c_v 之比。

判断完气体的泄漏速度是否属于音速后, 便可以计算煤气泄漏质量流量, 相应计算公式为^[27]:

当气体呈声速流动时, 其泄漏速度为:

$$Q_0 = C_d A p \sqrt{\frac{Mk}{RT} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (3-3)$$

当气体呈亚声速流动时, 其泄漏速度为:

$$Q_0 = C_d A p \sqrt{\frac{Mk}{RT} \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{(k+1)}{k}} \right]} \quad (3-4)$$

式中: Q_0 ——气体泄漏速度, kg/s;

C_d ——气体泄漏系数, 当裂口形状为圆形时取 1.00, 三角形时取 0.95, 长方形时取 0.90;

k ——气体绝热指数 (也称比热比), 双原子气体取 1.4, 多原子气体取 1.29, 单原子气体取 1.66;

A ——裂口面积, m²;

M ——相对分子质量, kg/mol;

P ——容器压力, Pa;;

T ——气体温度, K;

R ——理想气体的普氏比例常数, 8.314 J/(mol · K)。

随着气体泄漏设备内物质的减少而气体泄漏的流速变化时, 泄漏速度的计算比较复杂, 可以计算其等效泄漏速度。

3.1.4 煤气扩散过程中的主要影响因素

在煤气泄漏扩散数学模型建立前有必要认真分析一下易燃气体扩散过程的主要影响因素。易燃气体泄漏大气扩散过程是一个相当复杂的过程, 受到诸多因素的影响。影响泄漏扩散基本形式的主要因素有:

(1) 泄漏源的情况, 包括: 泄漏位置, 裂孔的形状、尺寸; 气体压力和温度

等；事故发生地点及周围的地理环境；泄漏形式是连续泄漏或是瞬时泄漏。

(2) 泄漏物质的理化性质，如分子量、沸点、闪点、比重、密度。

(3) 环境条件，包括大气稳定度，风速、风向、气温以及泄漏源周围的地形地貌。

大气稳定度表征湍流活动的强弱，支配大气对污染物的稀释扩散能力，大气越稳定，气云越不易向高空消散，而贴近地表扩散，大气越不稳定，空气垂直对流运动越强，气云消散得越快；风向决定泄漏气体的扩散方向，风速决定泄漏气体的扩散速度。大气湿度对泄漏气体的扩散也有影响，通常情况下，湿度大则使气体不易扩散；气温或太阳辐射强弱主要是通过影响大气垂直对流运动而对气体的扩散产生影响。

逆温层的存在对气体的扩散也有一定影响，逆温就是在一般情况下，低层大气中，通常气温是随高度的增加而降低的，但有时在某些层次可能出现相反的情况，气温随高度的增加而升高，这种现象称为逆温，出现逆温现象的大气层称为逆温层，多出现在冬春时节的早晨或傍晚。在逆温层中，较暖而轻的空气位于较冷而重的空气上面，形成一种极其稳定的空气层，笼罩在近地层的上空，严重地阻碍着空气的对流运动，使空气中的污染物不能及时扩散开去，加重大气污染。

另外，事故发生地的地形、地物对气云的扩散也有较大的影响，它们不但能影响泄漏气云的扩散速度，还影响扩散方向。如地面低洼处气云易于滞留；建筑物、树木等会加强地表大气的湍流速度，从而增加空气的稀释作用；而开阔平坦的地形、湖泊等则正好相反；低矮的建筑群、居民密集处或绿化地带泄漏气云不易扩散，对气体的传播速度、方向产生影响，气体浓度较高；高层建筑物则有阻挡作用，气云多会从风速较大的两侧迅速通过。

一般来说，风速小，空气密度大，大气稳定度高时，泄漏气体不易扩散，在建筑物密集和丘陵地区等地面粗糙度较大的地区，泄漏气体的扩散也会受到抑制。

3.2 煤气泄漏扩散数学模型

3.2.1 泄漏扩散数学模型的分析与选取

通过扩散模型可估算泄漏物质的影响范围及危险性质、程度。如在多大范围为急性中毒致死区，多大范围以外是无明显毒性影响的区域。可为危险程度判别、事故发生后的火源控制、明确人员疏散区域等等提供科学参考。

国内关于危险性气体在大气中扩散的研究报导较少。国外在这方面的研究工作始于七、八十年代，直到现在该领域的研究还比较活跃。在此期间，提出了不少扩散的计算模型，同时也进行了许多大规模试验。表 3-1 列出了几种主要的扩

散模型，包括高斯烟羽模型，高斯烟团模型，BM 模型，Sutton 模型及 FEM3 模型等。BM 模型是由一系列重气体连续泄放和瞬时泄放的实验数据绘制成的计算图表组成，属于经验模型，外延性较差；Sutton 模型是用湍流扩散统计理论来处理湍流扩散问题，但在模拟可燃气体泄放扩散时误差较大；FEM3 模型适用于处理连续源泄放及有限时间的泄放，但其计算量很大，用计算机模拟较为困难，且只适用于重气体的扩散。高斯模型只适用于中性气体，模拟精度较差，但它可模拟连续性泄漏和瞬时泄漏两种泄漏方式，由于提出的时间比较早，实验数据多，因而较为成熟。模型简单，易于理解，运算量小，计算结果与实验值能较好吻合等特点，致使该模型得到了广泛的应用。如美国环境保护协会 EPA 所采用的许多标准都是以高斯模型为基础而制定的^[28]。

表 3-1 各模型特性比较表^[28]

模型名称	适用对象	适用范围	难易程度	计算量	计算精度
高斯烟羽模型	中性气体	大规模、长时间	较易	少	较差
高斯烟团模型	中性气体	大规模、短时间	较易	少	较差
BM 模型	中性或重气体	大规模、长时间	较易	少	一般
Sutton 模型	中性气体	大规模、长时间	较易	少	较差
FEM3 模型	重气体	不受限制	较难	大	较好

高斯模型(Gaussian plume/puff model)适用于点源的扩散，早在五、六十年代就已被应用。它是从统计方法入手，考察污染物的浓度分布。烟羽模型(Plume model)适用于连续源的扩散，烟团模型(Puff model)适用于短时间泄漏的扩散(即泄放时间相对于扩散时间比较短的情形，如突发性泄放等)。

高斯扩散模式是在污染物符合正态分布的前提下导出的。在梯度输送理论中，假设 K 等于常数，可以得到正态分布形式的解；从统计理论出发，在定常、均匀湍流假定下，扩散粒子位移的概率分布也是正态分布。实际大气不满足上述前提条件，但大量小尺度扩散试验表明，至少正态分布可以作为描述污染物分布的一种粗略近似。高斯扩散模式已成为目前应用最广泛的模式^[29]。

煤气泄漏事故具有突发性的特点，在泄漏事故发生后，为了控制事故的规模和最大限度的减少事故损害，必须以最快的速度做出应急决策，采取应急行动。这就要求数学模型要计算简便但不乏准确性，能快速、有效地模拟出煤气泄漏后的大气扩散行为。

考虑到煤气泄漏事故特殊性和为了保证模拟迅速性、准确性，我们选用国内外应用最为广泛和成熟的高斯气体扩散模型，进行下风向 $P(x, y, z, t)$ 点地面浓

度的计算。其原因有三：

一是由于煤气相对密度小于或接近空气，属于中性气体，气体释放后会完全随周围空气进行运动，适合用非重气高斯模型处理；

二是有毒有害气体泄漏事故的其他类型的扩散模型研究不是很完善，而此模型具有针对点源和面源的瞬时、连续扩散的有风及静风方程，对泄漏扩散的描述较为全面；

三是经文献查阅发现，国内外相关问题的研究采用此模型的情况较多且运用较成熟，可见该模型具有一定的普遍性和通用性。

3.2.2 高斯模型建立的条件

高斯扩散模式是在污染物浓度符合正态分布的前提下导出的。在扩散方程中，假设扩散系数 K 等于常数，可得到正态分布形式的解：从统计理论出发，在平稳和均匀湍流条件下也可证明扩散粒子位移的概率分布是正态分布。实际大气不满足这前提条件，但是大量小尺污染物扩散试验表明，正态分布假设至少可以作为一种较为接近真实情况的假设。

高斯扩散模型包括烟羽模式和烟团模式，两者有各自的应用领域。但由于在推导高斯公式时对源强、流场等都作了假设、简化，因此两种模式共同适用的条件为^[30]：

①下垫面开阔平坦、性质均匀；

②扩散物质完全随周围空气一起运动；从源地到接收地之间没有损耗，也不发生化学转化；地面对扩散物质起全反射作用；

③平均流场平直、稳定，平均风速和风向没有显著的时间变化；

④扩散物质处于同一类温度层结的气层中；

⑤连续点源的公式仅适用于风速大于 1.5m/s 的情形。在小风和静风条件下，必须考虑 x 方向的扩散作用，应采用“烟团”模式或其他准静风模式。

⑥用高斯模式计算的污染物质的扩散范围以不超过 10km 为宜。

另外，高斯模型对建立坐标系也作了相应的规定：排放点(无界点源和地面源)或高架源排放点在地面的投影点为原点，平均风向为 x 轴， y 轴在水平面内垂直于 x 轴， y 轴的正方向在 x 轴的左侧， z 轴垂直于水平面，向上为正向，即为右手坐标系。在这种坐标系中，烟羽中心或与 x 轴重合(无界点源)，或在 xoy 面的投影为 x 轴(高架点源)。高架源坐标系的示意图如图 3-1。

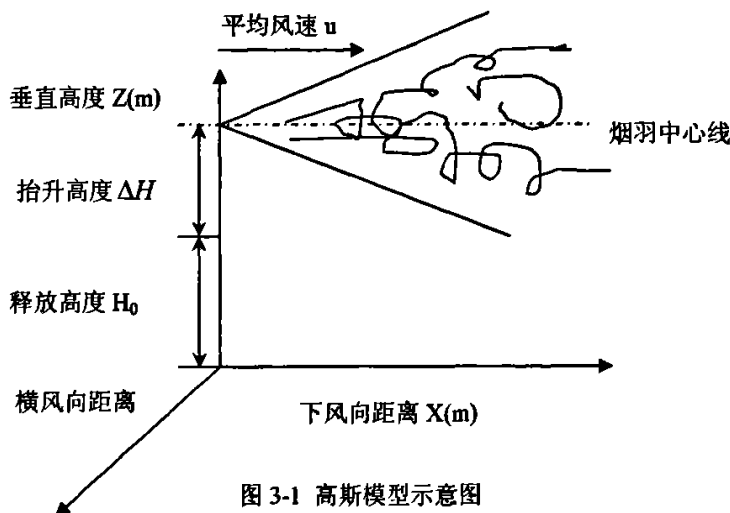


图 3-1 高斯模型示意图

3.2.3 高斯烟羽扩散模型

1. 无界连续点源烟羽模型

高斯烟羽模型式即湍流扩散方程在有风连续点源条件下的解。对于连续源，由于排放源持续排放，可以认为浓度处于定常状态（即 $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ ），即不随时间变化，仅仅是空间坐标的函数。这种情况下的浓度分布可通过直接求解有风时的扩散方程而得到，如式 3-5 和式 3-6^[31]。

有风($u > 1\text{m/s}$)时，在无限空间连续点源的条件下，下风向任意一点浓度为：

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (3-5)$$

2. 有界连续点源烟羽模型

在考虑地面对扩散的影响时，通常按照全反射的原理，采用“像源法”处理。即地面如同一面“镜子”，对泄漏物质既不吸收也不吸附，起着全反射的作用。因此认为地面上任意一点的浓度是两部分作用之和。一部分是不存在地面时此点应具有的浓度；另一部分是由于地面全反射而增加的浓度。因此，有界情形(地面反射)高斯高架点源条件下扩散模式的方程如下：

$$C(x, y, z, t, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (3-6)$$

式中: $C(x, y, z)$ ——下风向空间任一点 (x, y, z) 处的浓度 (mg/m^3);

Q ——源强 (kg/s);

u ——10m 高度平均风速 (m/s);

H ——有效源高, $H = H_0 + \Delta H$, ΔH 为烟气抬升高度 (m);

σ_y 、 σ_z ——分别为 y (横向)、 z (铅直) 方向的扩散参数 (m)。

令 $z=0$, 可得到地面浓度公式:

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (3-7)$$

对于地面源, 任意一点浓度 $C(x, y, z)$ 为无界条件下的 2 倍, 即

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (3-8)$$

其浓度分布为, 在释放源附近地面浓度接近于零, 然后逐渐增高, 在某个距离达到最大值, 再缓缓减小。在 y 轴方向上, 浓度按正态分布的规律向两边减小。

该模式适宜应用于连续源扩散, 经过一定方法的处理也可用于线源和面源, 因此在目前通常的大气环境影响评价中广为采用^[32]。

3.2.3 高斯烟团扩散模型^[33]

1. 瞬时地面点源烟团模式

以风速方向为 x 轴, 坐标原点取在泄漏点处, 风速恒为 u , 则源强为 Q 的浓度分布为 $C(x, y, z, t)$:

$$C(x, y, z, t) = \frac{2Q^*}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right\} \right] \quad (3-9)$$

式中: Q^* ——瞬时泄漏的物料质量, kg ;

t ——瞬时泄漏时, 污染物的运行时间, s 。

令: $z=0$, 得到地面浓度分布:

$$C(x, y, 0, t) = \frac{2Q^*}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right\} \right] \quad (3-10)$$

2. 瞬时高架源烟团模式

$$C(x, y, z, H) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{x - (x - ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right] \times \left\{ \exp \left[-\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (3-11)$$

式中：C——气云中危险物质浓度(kg/m³)；

H——为泄漏源有效高度(m)；

Q——泄漏源瞬间泄漏量(kg)；

u——风速(m/s)；

t——泄漏后的时间(s)；

σ_x 、 σ_y 、 σ_z ——分别为 x, y, z 方向的扩散系数(m)。

3.3 扩散参数的确定

3.3.1 泄漏源有效高度的确定

泄漏源有效高度是指泄漏气体形成的气云基本上变成水平状时气云中心的离地高度。在大多数问题中，泄漏源有效高度难以与泄漏源实际高度相一致。它应该等于泄漏源实际高度加泄漏源抬升高度。

影响泄漏源抬升高度的因素很多，主要包括：扩散气体的初始速度和方向、初始温度、泄漏口直径、环境风速及风速随高度的变化率、环境温度以及大气温度。目前大多采用半经验公式计算抬升高度。此处采用 20 世纪 80 年代初 Wilson 根据管道破裂泄漏实验所得到的经验公式^[34]。

$$\Delta H = 2.4u_s \frac{d}{u} \quad (3-12)$$

式中： ΔH ——泄漏源抬升高度(m)；

u_s ——气云出口速度(m/s)；

d ——出口直径(m)；

u ——环境风速(m/s)。

此公式适合于出口喷射方向竖直向上，喷射路径上无障碍物的情况。计算出泄漏源的抬升高度后，将泄漏源抬升高度与泄漏源实际高度相加就得到了泄漏源有效高度。

3.3.2 扩散系数的计算^[11,35]

一个完全的扩散模式除了应给出计算污染物浓度的公式外，还应当包括确定公式中的待定系数。高斯模式的应用效果依赖于如何给定公式中的参数，主要是扩散参数 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 的确定。 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 的大小与大气湍流结构、离地面高度、地面粗糙度、泄漏持续时间、抽样时间间隔、风速以及离开泄漏源的距离等因素有关。扩散参数的求取有两种方法：一是根据统计理论，利用泰勒公式求扩散参数，另一种是通过大量的扩散试验得到经验公式。目前应用最多的是后者。根据下垫面的地形地貌来划分地面粗糙度 Z_0 。大气湍流结构和风速则在大气稳定度中考虑。大气稳定度由10m高度上的风速、白天的太阳辐射或夜间的云量等参数决定。

帕斯奎尔(Pasquill)根据云量、云状、太阳辐射状况和地面风速等常规气象资料将大气扩散能力分为A—F 6个稳定度级别，之后帕斯奎尔和吉福德(Gifford)根据扩散理论和大气扩散试验，给出了每种稳定度级别对应的 σ_y 和 σ_z 随距离变化的经验曲线，解决了扩散参数 σ_y 和 σ_z 的取值问题。一般将该经验曲线称为帕斯奎尔—吉福德扩散曲线，简称P-G曲线。

各种扩散参数系统都是在各自的研究对象和试验条件下得出的，其适用条件受到限制。布里格斯(G. A. Briggs)试图用公式渐近线的概念，用内插公式将帕斯奎尔、美国布鲁克海汉国立实验室(BNL)和其他几种扩散曲线统一起来，提出了扩散参数表达式。布里格斯内插公式主要参照帕斯奎尔扩散参数，但在A级和B级的 σ_z 曲线上， $\sigma_z > 100\text{m}$ 的部分，主要参照了BNL的结果。布里格斯内插公式适用于几何高度低于100m的高架源，适用的范围在10km之内。

1) 对连续源平均取10min

地面粗糙度的划分选取见表3-2。

表3-2 地面粗糙度表

地面类型	Z_0/m	地面类型	Z_0/m
草原、平坦开阔地	≤ 0.1	分散的高矮建筑物(城市)	1~4
农作物地区	0.1~0.3	密集的高矮建筑物(大城市)	4
村落、分散的树林	0.3~1		

有效粗糙度 $Z_0 \leq 0.1\text{m}$ 地区的扩散参数按表3-3选取。

表 3-3 $Z_0 \leq 0.1\text{m}$ 地区的扩散系数

大气稳定度	σ_y/m	σ_z/m
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1/2}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1/2}$

有效粗糙度 $Z_0 > 0.1\text{m}$ 的粗糙地形扩散系数为:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} f_y \quad (3-13)$$

$$\sigma_z = \sigma_{z0} f_z \quad (3-14)$$

$$f_y(Z_0) = 1 + a_0 Z_0 \quad (3-15)$$

$$f_z(x, Z_0) = (b_0 - c_0 \ln x)(d_0 + e_0 \ln x)^{-1} Z_0^{f_0 - g_0 \ln x} \quad (3-16)$$

式中, σ_{y0} 、 σ_{z0} 按表 3-3 中的数值取值。其他系数按表 3-4 取值。

表 3-4 不同大气稳定度下的修正系数表

大气稳定度	A	B	C	D	E	F
a_0	0.042	0.115	0.15	0.38	0.3	0.57
b_0	1.10	1.5	1.49	2.53	2.4	2.913
c_0	0.0364	0.045	0.0182	0.13	0.11	0.0944
d_0	0.4364	0.853	0.87	0.55	0.86	0.753
e_0	0.05	0.0128	0.01046	0.042	0.01682	0.0228
f_0	0.273	0.156	0.089	0.35	0.27	0.29
g_0	0.024	0.0136	0.0071	0.03	0.022	0.023

2) 瞬时源取平均取 10(s)

瞬时源扩散系数采用烟羽模式的扩散系数并通过下列公式进行修正:

$$\sigma_x = \sigma_y = 0.441 \sigma_{y(10\text{min})}, \quad \sigma_{y(10\text{min})} \text{ 即为表 3-3 中的 } \sigma_y;$$

$$\sigma_z = \sigma_{z(10\text{min})}, \quad \sigma_{z(10\text{min})} \text{ 即为表 3-3 中的 } \sigma_z。$$

3.3.3 大气稳定度的计算^[36]

一直以来,围绕大气稳定度描述出现了许多有关的定义和分类方法。如理查逊数、莫宁—奥布霍夫长度等,都从理论上把大气的热力和动力条件对湍流的产生,发展或抑制能力客观地描述出来。但是这些参数对测量要求严格,实际上应用很不方便。1961年帕斯奎尔(Pasquill)提出的稳定度分类法确定大气稳定度时,辐射的强弱欠缺客观标准,在同一天气状况下,不同的人可能定出不同的稳定度级别。特纳尔(Turner)提出了一套根据太阳高度角和云高、云量确定太阳辐射等级,再由辐射等级和10 m高处风速确定稳定度级别的方法,这种方法称为帕斯奎尔—特纳尔法,简称P-T法。本文大气扩散稳定度的分类方法采用经过修正的帕斯奎尔—特纳尔(P-T)方法。

按照帕斯奎尔(Pasquill)的分类方法,随着气象条件稳定性的增加,大气稳定度分为A、B、C、D、E和F六类。其中A、B和C三类表示气象条件不稳定,E和F两类表示气象条件稳定,D类表示中性气象条件,也就是说气象条件的稳定性在稳定和不稳定之间。A、B和C三种类型的稳定度中,A类表示气象条件极不稳定性,B类表示气象条件中等程度不稳定,C类表示气象条件弱不稳定。E和F两种类型的稳定度中,E类表示气象条件弱稳定,F类表示气象条件中等程度稳定。

确定稳定度等级时先由云量和太阳高度角按表3-5查出太阳辐射等级,再由太阳辐射等级和地面风速按表3-6查出大气稳定度等级。

表 3-5 日照强度的确定

天空云层情况	日照角 >60°	日照角 >35°且≤60°	日照角 >15°且≤35°
天空云量为 4/8, 或高空有薄云	强	中等	弱
天空云量为 5/8~7/8, 云层高度为 2134~4877m	中等	弱	弱
天空云量为 5/8~7/8, 云层高度低于 2134m	弱	弱	弱

表 3-6 Pasquill 大气稳定度的等级

地面风速 (m/s)	白 天 日 照			夜 间 条 件	
	强	中等	弱	阴天且云层薄, 或低 空云量为 4/8	天空云量为 3/8
<2	A	A-B	B	/	/
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

表 3-5 和表 3-6 中的云量是指当地天空的云层覆盖。例如, 云量为 3/8 是指当地 3/8 的天空有云层覆盖。日照角是指当地太阳光线与地平线之间的夹角。例如, 阳光垂直照射地面时的日照角为 90°。

第 4 章 建滔化工甲醇项目煤气泄漏模拟

4.1 建滔化工 10 万吨甲醇项目概况^[37]

4.1.1 甲醇项目简介

建滔化工集团于 2003 年 9 月在河北省邢台市动工建设 10 万吨/年甲醇工程项目，至 2005 年 11 月建成投入试生产，该项目主要产品是甲醇。

该项目采用丰富廉价的焦炉煤气资源制取甲醇，本生产线工艺路线如下：焦炉煤气进入界区后，首先进入气柜，经沉降、缓冲、稳压后进入焦炉煤气压缩机压缩至 2.5MPa，然后入脱硫装置，进行有机硫水解及无机硫脱除，将焦炉煤气中总硫脱至 0.1ppm 以下，以满足转化和甲醇合成催化剂对原料气中硫含量的要求。脱硫后的焦炉煤气进入转化工段，在这里进行加压催化部分氧化，使焦炉煤气中的甲烷和高碳烃转化为甲醇合成的有效成分氢气和一氧化碳。转化气经二合一机组压缩至 6.0MPa，进行甲醇合成，生成的粗甲醇进入甲醇精馏制得符合国标 GB338-92 优等品级精甲醇。

甲醇弛放气一部分作转化装置预热炉的燃料气，一部分去锅炉房作燃料。甲醇合成的有效成分为 H_2 、 CO 和少量 CO_2 、 N_2 为惰性气体，因此转化采用纯氧部分氧化，所需氧气由空分提供。甲醇生产工艺流程见图 4-1。

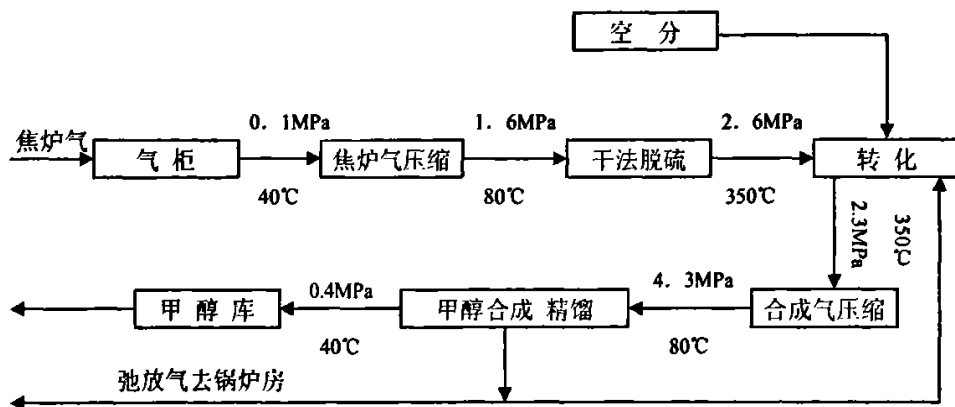


图 4-1 甲醇生产工艺流程图

4.1.2 地形及人口地理分布

建滔（河北）化工有限公司 10 万吨/年甲醇项目建在河北省中南部的邢台市邱县境内，厂址位于大孟村镇梁原店村西，南临邢台市 15 公里，北距石家庄市 100 公里，东面与京广铁路及 107 国道毗邻，所在地地表为土层，地势平坦开阔，西南略高，东北略低，周围为农田和村落。厂区东侧约 500 米为梁原店村，人口大约 1550 人，北侧约 2 千米的位置为南宋村，人口约 2350 人。厂区和办公区大约共有 250 人。相关地理信息见图 4-2（村子人口及厂区内的职工人数）。

4.1.3 气象资料

根据河北省邢台市气象局提供的资料，本厂址所在区域属季风型，半干旱，典型的大陆性气候，四季分明，昼夜温差大，气候干燥，冬季风大，春季风多雨少，夏季雨多炎热，秋季温暖湿润，主要气象条件如下：

年平均气温	12.7℃
历年最高气温	42.6℃
历年最低气温	-23.5℃
年平均降水量	508.7mm
年平均风速	2.5m/s
历年最大风速	20.0m/s
年主导风向	北 南风
年平均大气压力	1007.9 hPa
极端最低大气压	981.1 hPa
最大冻土深度	600mm

4.2 建滔甲醇项目焦炉煤气泄漏扩散基础参数选择

建滔（河北）化工有限公司 10 万吨/年甲醇项目在 2006 年投产试运行过程当中，曾发生甲醇生产管道因高压破裂而导致焦炉煤气泄漏的事故，并造成附近工作 2 人轻度中毒的事故，时值 9 月 23 号。

依据建滔化工甲醇项目的可行性报告和现场调研数据，来获得工厂的地形及气象条件的基础参数：

1. 地面有效粗糙度 $Z_0=0.1$ 地势平坦开阔，周围为农田（农作物已收割）。
2. 平均风速取 $u=2.5\text{m/s}$ ，西风；
3. 大气稳定度系数选取 D，地面有效粗糙度 $Z_0\leq 0.1\text{m}$ 地区的扩散系数计

算公式为：

$$\sigma_y = 0.08 x (1 + 0.0001 x)^{-1/2}$$

$$\sigma_z = 0.06 x (1 + 0.0015 x)^{-1/2}$$

4. 煤气的泄漏速度

由于甲醇生产系统中各阶段的生产工艺要求不同，因此，煤气的成分和压力及温度在整个生产过程中是不一致的，具体分析如下：

(1) 转化炉前

转化炉前焦炉煤气的成分相同，煤气中一氧化碳的含量均为 8.58%，转化炉前各管道及容器的半径从 0.15m-1.6m 不等，管道的压力也有差异，分别为：

① 净化气柜至焦炉气压缩机管道：0.106 Mpa (40℃)。

② 焦炉气压缩机管道及附属容器：1.6 Mpa (80℃)。

③ 精脱硫—转化炉前管道：2.6 Mpa (350℃,)。

转化炉前各管道中焦炉煤气的成分：

H₂ : 54.53% CnHm : 3.24% CO:8.58% N₂:4.23% CH₄:25.86% CO₂:4.32%

(2) 转化炉—合成塔

转化炉—合成塔之间的管道压力均为 2.3 Mpa, 温度为 623K, 一氧化碳含量 18.54%。转化炉-合成塔各管道的半径从 0.17m-1.1m 不等。

转化炉—合成塔焦炉煤气成分：

H₂ : 68.99% CO:18.54% N₂:2.55% CH₄:0.38% CO₂:9.60%

(3) 甲醇合成工段

甲醇合成工段的管道压力 4.3MPa , 温度 80℃(353K), 管径 d=200mm 。甲醇合成工段的各管道及容器的半径从 0.0075m-1.7m 不等。

由于投产试运行过程当中，发生的焦炉煤气泄漏事故就发生在甲醇合成工段, 因此，本文就以甲醇合成工段的泄漏情况为例进行计算分析。

此次焦炉煤气泄漏事的泄漏点故位于管径 d=200mm 的管道上，管道的破裂口为圆形，直径为 30mm，则泄漏面积为： $A = \pi R^2 = 3.14 \times 0.015^2 = 0.0007065m^2$ 。

甲醇合成工段气体成分：

H₂ : 72.42% CO:9.74% N₂:5.97% CH₄:1.84% CO₂:10.20%

气体的平均分子量：

$$\begin{aligned} M_{\text{avg}} &= 2 \times 72.42\% + 28 \times 9.74\% + 28 \times 5.97\% + 16 \times 1.84\% + 44 \times 10.20\% \\ &= 1.4484 + 2.7272 + 1.6716 + 0.2944 + 4.488 \\ &= 10.6296g/mol \end{aligned}$$

气体的标况密度：

$$\rho_0 = M_{\text{avg}} / 22.4 = 10.6296 / 22.4 = 0.47453kg/m^3$$

管道中的气体密度为：

$$\rho_1 = \rho v/v_1 = 4125.3 \times 0.47453 / 124.05 = 15.88 \text{ kg/m}^3$$

要计算煤气泄漏量，首先，判断泄漏时气体的流动属于声速（临界流

$\frac{p_0}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}}$ ）还是亚音速流动（次临界流 $\frac{p_0}{p} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}}$ ），其中 k 为气体的绝

热指数，即定压比热容 c_p 与定容比热容 c_v 之比。 k 的取值：单原子气体 1.67，双

原子气体 1.40，多原子气体 1.29。焦炉煤气为多种气体的混合体，令其归类为多

原子气体， k 取 1.29。转化炉各段管道中焦炉煤气的压力不一致，我们选择最大

压力为 4.3 Mpa 来计算焦炉煤气的泄漏量，从最保守的角度得到焦炉煤气泄漏影

响的最大范围。将 $p=4.3\text{Mpa}$, $k=1.29$ 带入 $\frac{p_0}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}}$ ，得

$$\frac{0.101325 \times 10^6}{4.3 \times 10^6} = 0.023 < \frac{2}{1.29+1}^{\frac{1}{1.29+1}} = 0.946, \text{ 从而判断出泄漏气体呈超声速流动。}$$

将气体泄漏系数 $C_d=1.00$ （裂口形状为圆形）， $k=1.29$ ， $A=0.0007065\text{m}^2$ ，

$M_g=0.0106296\text{g/mol}$ ， $P=4.3\text{MPa}$ ， $T=273+80=353\text{K}$ ， $R=8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 带入

式 (3-3)，计算得其泄漏速度为：

$$Q_0 = C_d A p \sqrt{\frac{Mk}{RT} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = 1.00 \times 0.0007065 \times 4.3 \times 10^6 \sqrt{\frac{0.0106296 \times 1.29}{8.314 \times 353} \left(\frac{2}{1.29+1}\right)^{\frac{1.29+1}{1.29-1}}} \\ = 3.85 \text{ kg/s}$$

由于未考虑煤气泄漏速率随时间的变化，利用上式计算出的泄漏速率是保守的最大可能泄漏速率。

4.3 煤气泄漏后有毒害范围的计算

由于煤气是一种多气体组分的混合气体，不同煤气的一氧化碳的含量各有不同，在确定三种边界浓度具体数值时，按照一氧化碳急性中毒后对人体的危害程度来为依据来划定一氧化碳毒害浓度范围，本文将致死区外边界浓度值、重伤区外边界浓度值和轻伤区外边界浓度值分别设定为 $C_s=1170\text{mg/m}^3$ ，

$C_z=292.5\text{mg/m}^3$ ， $C_q=58.5\text{mg/m}^3$ 。按照一氧化碳在不同煤气中的比例不同，故将一氧化碳毒害范围的边界浓度值转化为煤气的毒害范围的边界浓度值。

$$C_{\text{煤气}} = \frac{C/1000}{28\varphi} \times \bar{M} \quad (4-1)$$

式中 $C_{\text{煤气}}$ ——煤气的浓度；

C ——一氧化碳的浓度

φ ——一氧化碳在煤气中的体积分数；

$\bar{M}$ ——煤气的平均分子量。

将甲醇合成工段的 $\bar{M}=10.6296\text{g/mol}$ ， $\varphi=9.74\%$ 以及 $C_s=1170\text{mg/m}^3$ ， $C_z=292.5\text{mg/m}^3$ ， $C_q=58.5\text{mg/m}^3$ 分别带入上式，则分别得到焦炉煤气的致死、重伤及轻伤的浓度值：

$$C_{\text{煤气}_s}=4677.15\text{mg/m}^3$$

$$C_{\text{煤气}_z}=1169.29\text{mg/m}^3$$

$$C_{\text{煤气}_q}=233.86\text{mg/m}^3$$

此次焦炉煤气泄漏时间超过 10min，属于地面点源，所以采用有界连续点源烟羽模型对焦炉煤气泄漏扩散进行模拟计算。

当焦炉煤气发生连续泄漏后，在有风 ($u>1\text{m/s}$) 的条件下扩散是从泄漏点开始逐渐扩展，呈近椭圆形分布，致死、重伤、轻伤浓度曲线与原点（源点）下风向 x 轴分别有交点，即是致死、重伤、轻伤浓度临界值在下风向能达到的最远距离 x ，我们依此 x 值作为有风条件下煤气泄漏扩散后一氧化碳能波及的最大伤害半径。考虑到风向可能随气象变化而发生变化，危险警戒区域则必须扩大到以煤气能达到的下风向最远距离为半径，以泄漏源为圆心的圆形（或环形）区域。

将 $C_{\text{煤气}_s}=4677.15\text{mg/m}^3$ ， $Q=3.85\text{kg/s}$ ， $u=2.5\text{m/s}$ ， $y=0$ ， $z=0$ ， $\sigma_y=0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$ ， $\sigma_z=0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$ 代入式 (3-8)，

$$4.67715 = \frac{3.85 \times 10^3}{3.14 \times 2.5 \times 0.08x(1+0.0001x)^{-1/2} \cdot 0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}}$$

化简整理得：

$$x^4 - 21887.44^2 \times 0.00000015x^2 - 21887.44^2 \times 0.0016x - 21887.44^2 = 0$$

解得：致死半径 $R_s=x=156\text{m}$ ；

将 $C_{\text{煤气}_z}=1169.29\text{mg/m}^3, Q=3.85\text{kg/m}^3, y=0, z=0, \sigma_y=0.08 \ x \ (1+0.0001 \ x)^{-1/2}$,
 $\sigma_z=0.06 \ x(1+0.0015 \ x)^{-1/2}$ 代入式 (3-8)，化简整理得：

$$x^4 - 87301.59^2 \times 0.00000015x^2 - 87301.59^2 \times 0.0016x - 87301.59^2 = 0$$

解得：重伤半径 $R_z=x=329\text{m}$ ；

将 $C_{\text{煤气}_g}=233.86 \ \text{mg/m}^3, Q=3.85\text{kg/m}^3, y=0, z=0, \sigma_y=0.08 \ x \ (1+0.0001 \ x)^{-1/2}$,
 $\sigma_z=0.06 \ x(1+0.0015 \ x)^{-1/2}$ 代入式 (3-8)

$$x^4 - 436904.22^2 \times 0.00000015x^2 - 436904.22^2 \times 0.0016x - 436904.22^2 = 0$$

解得：轻伤半径 $R_q=x=825\text{m}$ 。

4.4 比较计算

4.4.1 风速对煤气扩散的影响

假定甲醇合成工段发生煤气泄漏时，风速大于 2.5m/s ，取风速为 $u_1=3.5\text{m/s}$ 和 $u_2=5\text{m/s}$ 时分别计算煤气泄漏扩散下风向的最远距离。

(1) $u_1=3.5\text{m/s}$ 时，将 $C_{\text{煤气}_s}=4677.15\text{mg/m}^3, Q=3.85\text{kg/s}, y=0, z=0$,
 $\sigma_y=0.08 \ x(1+0.0001 \ x)^{-1/2}, \sigma_z=0.06 \ x(1+0.0015 \ x)^{-1/2}$ 代入式 (3-8)，

$$4.67715 = \frac{3.85 \times 10^3}{3.14 \times 3.5 \times 0.08x \ (1+0.0001x)^{-1/2} \cdot 0.06x \ (1+0.0015 \ x)^{-1/2}}$$

化简整理得：

$$x^4 - 15604.1^2 \times 0.00000015x^2 - 15604.1^2 \times 0.0016x - 15604.1^2 = 0$$

解得：致死半径 $R_s=x=131\text{m}$ ；

同理解得：重伤半径 $R_z=x=274\text{m}$ ；

轻伤半径 $R_q = x = 669\text{m}$

(2) $u_2 = 5\text{m/s}$ 时, 将 $C_{\text{煤气}} = 4677.15\text{mg/m}^3$, $Q = 3.85\text{kg/s}$, $y = 0$, $z = 0$, $\sigma_y = 0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$, $\sigma_z = 0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$ 代入式 (3-8) 得:

$$4.67715 = \frac{3.85 \times 10^3}{3.14 \times 5 \times 0.08x(1+0.0001x)^{-1/2} \times 0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}}$$

化简整理得:

$$x^4 - 10921.99^2 \times 0.00000015x^2 - 10921.99^2 \times 0.0016x - 10921.99^2 = 0$$

解得: 致死半径 $R_s = x = 109\text{m}$;

同理解得: 重伤半径 $R_z = x = 227\text{m}$;

轻伤半径 $R_q = x = 551\text{m}$

表 4-1 煤气泄漏后不同风速下的伤害半径

风速 (m/s)	伤害半径 (m)		
	致死半径 R_s	重伤半径 R_z	轻伤半径 R_q
2.5	156	329	825
3.5	131	274	669
5	109	227	551

从上表数据可以看出, 在 D 类大气稳定度和地面粗糙度为 0.1 的情况下, 风速越大越利于煤气的扩散, 煤气扩散的毒害半径就越小, 风速每增加 1 米则伤害半径就相应的减少约 20% 左右。因此可以看出风速越小, 大气的输送扩散作用不明显, 泄漏煤气不容易扩散。当风速 $< 1\text{m/s}$ 时, 出现准静风情况, 在泄漏源附近易形成高浓度的有害气体云, 造成人员伤亡的机率会加大。

4.4.2 泄孔面积对煤气扩散的影响

假设此次焦炉煤气泄漏事时, 管道的破裂口为圆形, 直径为管径的 20%, 则

$d=40\text{mm}$ 则泄漏面积为: $A=\pi R^2=3.14\times 0.02^2=0.001256\text{m}^2$ 。

当 $A=0.001256\text{m}^2$, 计算破裂口煤气的泄漏速度为:

$$Q_1 = C_d A p \sqrt{\frac{Mk \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}{RT \left(\frac{2}{k+1} \right)}} = 1.00 \times 0.001256 \times 4.3 \times 10^6 \sqrt{\frac{0.0106296 \times 1.29 \left(\frac{2}{1.29+1} \right)^{\frac{1.29+1}{1.29-1}}}{8.314 \times 353}} \\ = 6.84\text{kg/s}$$

假定泄漏事故发生时, 其它条件未变, 风速依旧取 $u=2.5\text{m/s}$, 计算煤气泄漏扩散下风向的最远距离。

将 $C_{\text{煤气}}=4677.15\text{mg/m}^3$, $Q=6.84\text{kg/s}$, $y=0$, $z=0$, $\sigma_y=0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$, $\sigma_z=0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$ 代入式 (3-8),

$$4.67715 = \frac{6.84 \times 10^3}{3.14 \times 2.5 \times 0.08x(1+0.0001x)^{-1/2} \times 0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}}$$

化简整理得:

$$x^4 - 38811.81^2 \times 0.00000015x^2 - 38811.81^2 \times 0.0016x - 38811.81^2 = 0$$

解得: 致死半径 $R_s=x=213\text{m}$;

同理可得: 重伤半径 $R_z=x=453\text{m}$;

轻伤半径 $R_q=x=1166\text{m}$ 。

表 4-2 不同泄漏面积下的伤害半径

伤害半径(m)	泄漏面积 (m) ²	
	A=0.0007065 (d=30mm)	A=0.001256 (d=40mm)
致死半径 R_s	156	213
重伤半径 R_z	329	453
轻伤半径 R_q	825	1166

泄漏面积增大, 煤气泄漏质量流量也随之增大, 从上表数据可以看出, 随着泄漏面积相应的下风向中毒伤害半径也会增大, 发生煤气中毒的范围随之增大,

人员受伤害的机率也将增大。

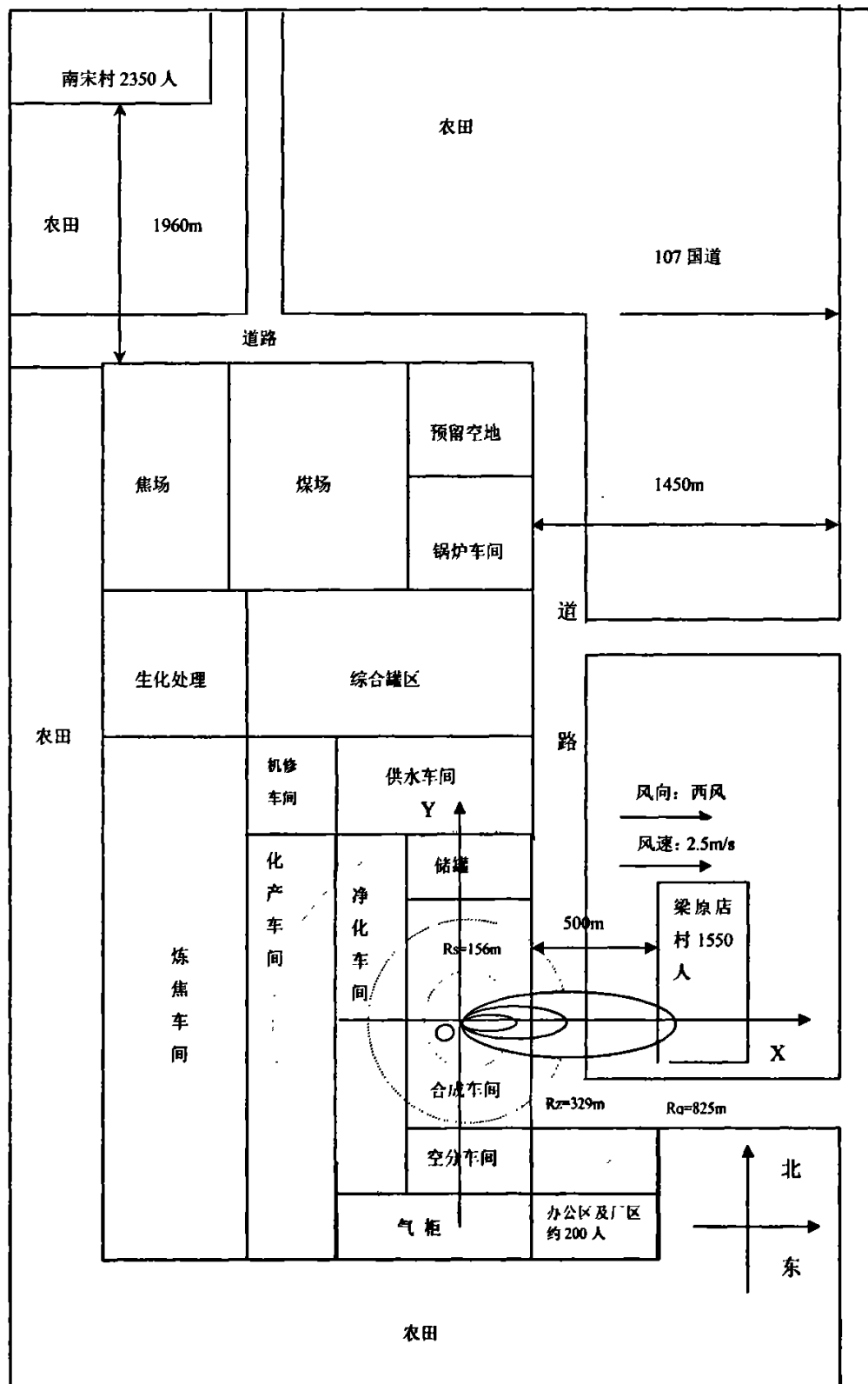
4.5 计算结果与分析

通过 4.3 节的实际泄漏参数的计算可以得出, 甲醇合成工段在发生煤气连续泄漏, 在现场风速为 2.5m/s 的情况下, 焦炉煤气可影响的下风向最大距离为 825m, 考虑到全风向, 影响的再大范围是以泄露点为圆心, 以最大轻伤半径即 825m 为半径的圆形区域。

从煤气泄漏点至 156m 范围内为致死区域, 煤气浓度高于 4677.15mg/m³, 即一氧化碳浓度高于 $C_s=1170\text{mg/m}^3$, 在此范围内的约 10 人若未及时离开, 则大部分的人员会死亡; 距离煤气泄漏点 156m-329m 的范围内为重伤区域, 煤气浓度高于 1169.29mg/m³, 即一氧化碳浓度高于 $C_z=292.5\text{mg/m}^3$, 在此范围内约 30 人若未及时离开, 则大部分的人员会遭受重度伤害; 距离煤气泄漏点 329m-825m 的范围内为重伤区域, 煤气浓度高于 233.86mg/m³, 即一氧化碳浓度高于 $C_q=58.5\text{mg/m}^3$, 在此范围内厂区和梁原店村的约 300 人若未及时离开, 则大部分的人员会遭受轻度伤害; 大于距离泄漏点 825m 的区域为可吸入反应, 短间接接触对人员不会造成健康影响, 详见图 4-2。

如果甲醇合成工段焦炉煤气泄露时, 恰值西风, 泄漏的煤气将对厂区东侧约 500 米的梁原店村构成严重的一氧化碳中毒危害, 因此, 考虑到本文对焦炉煤气泄漏扩散的中毒影响区域的分析及国家对重大危险源距离人群聚集区的安全距离的规定, 建议在地方政府、建滔化工集团和梁原店村三方协同下将梁原店村迁移至远离厂区的安全地点。

当然, 如果在事故发生后能及时地采取措施进行工程抢救, 煤气泄漏源得到有效控制, 其实际危害程度将比模拟结果要低。



第5章 煤气泄漏模拟及应急响应系统总体设计

工业场所煤气泄漏后在大气中的扩散过程是一个复杂过程,受许多因素影响,因此对其所造成的影响的估算也就有很大的困难。我们采用当代应用广泛的计算模拟系统手段,选用能描述大气污染扩散过程的数学模型,建立快捷、实用的工业场所煤气泄漏扩散的计算机模拟系统,模拟大气污染物不同时间的扩散范围,将其结果在计算机屏幕上动态显示出来,并统计出不同的毒性污染范围实际覆盖面积大小、中心点、轴向距离以及影响到的人员等,使复杂的煤气泄漏扩散过程可视化和定量化,为企业及其他的主管部门应急救援措施和决策服务。

5.1 用户的需求分析

本系统的应用目的是在工业场所煤气泄漏事故发生后,在输入必要的环境参数(风速、风向、大气稳定度等)、理化性质(分子量、沸点、中毒浓度等)、发生泄漏的地理位置、泄漏时间、泄漏量等有关参数后,系统能准确、快速计算出泄漏煤气在大气中的浓度值,模拟煤气泄漏扩散动态过程,在计算机屏幕上动态显示出泄漏物的三种不同程度危害范围分布图,统计出不同危害范围覆盖面积大小以及受影响的单位及人员,评价事故造成的损失及环境污染严重程度,并能在接到事故报警后及时采取应急措施,将事故损失降到最低。

系统在事故发生后启动,用来在发生事故之后模拟煤气泄漏的动态扩散过程、显示受影响的范围,所以应具备较快的响应速度,以便安全主管部门迅速指挥疏散和紧急救援,最大限度的减少经济损失、人员伤亡和环境污染。用户的需求如图 5-1 所示。

5.2 系统的总体设计

煤气泄漏扩散及事故应急救援系统是一个多功能、多模块集成的信息系统,它是由人机交互层、系统功能层、数据管理层、系统支持层、系统驱动层和硬件驱动层 6 个层面及信息采集和更新、信息检索与查询、煤气扩散过程动态模拟显示、信息统计和数据输出五个功能模块组成。其总体设计如图 5-2 所示。

(1) 人机交互层(用户层)系统与终端用户的接口,由鼠标和键盘支持的全汉字视窗界面,可以用人机对话的方式进行操作,使用方便,简单易学。

(2) 系统功能层该层为整个信息系统的核心部分,共 5 大模块,具体内容见系统功能介绍。

(3) 数据管理层该层用于管理数据库中各不同种类、不同属性的数据,保持数据的安全性和正确性,便于系统各模块调用数据。

(4) 系统支持层该层用于支持系统功能层，主要包括：①数据处理，用于支持数据的统计、检索处理，以表格或统计图的形式表现出来；②地图处理，用于图形的分层、空间数据的处理与分析；③数学模型，用于大气扩散模拟计算。

(5) 系统驱动层该层包括数据库驱动(为数据库系统提供支持)、图形驱动(为地图显示、图层分析等提供支持)和中文驱动(为中文菜单显示及地图汉字标准等提供支持)等。

(6) 硬件驱动层用于驱动各类硬件，包括显示卡、声卡、网卡、打印机、绘图仪、数字化仪(或扫描仪)等。

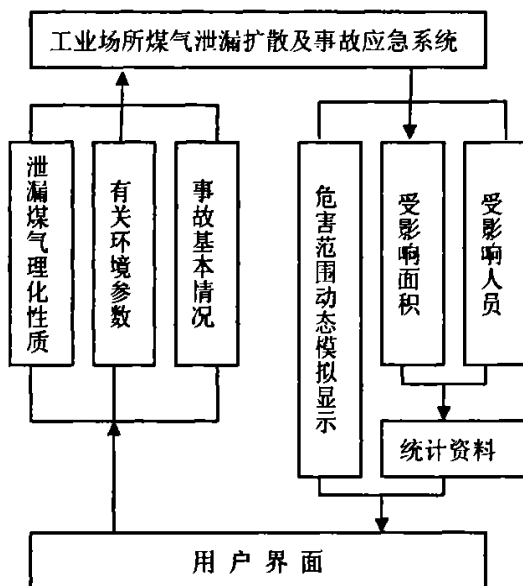


图 5-1 用户需求分析框图

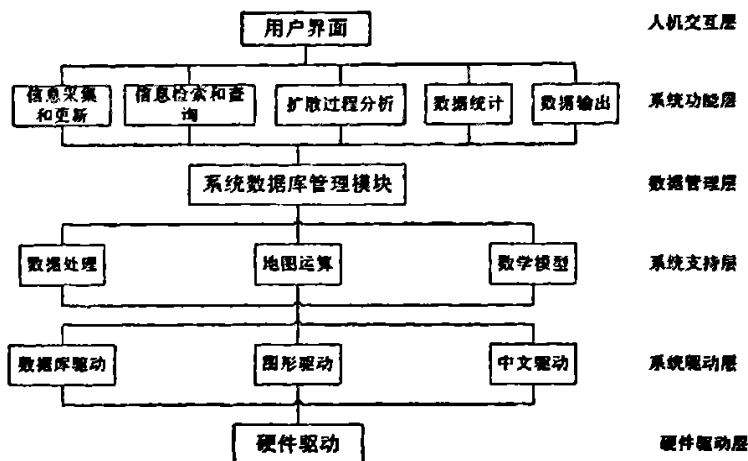


图 5-2 工业场所煤气泄漏扩散及事故应急系

5.3 系统结构设计及实现功能

5.3.1 系统结构

为了使用户对软件运行结构有详细的了解,下面用图形来表示煤气泄漏扩散及应急救援系统的运行结构,见图 5-3。

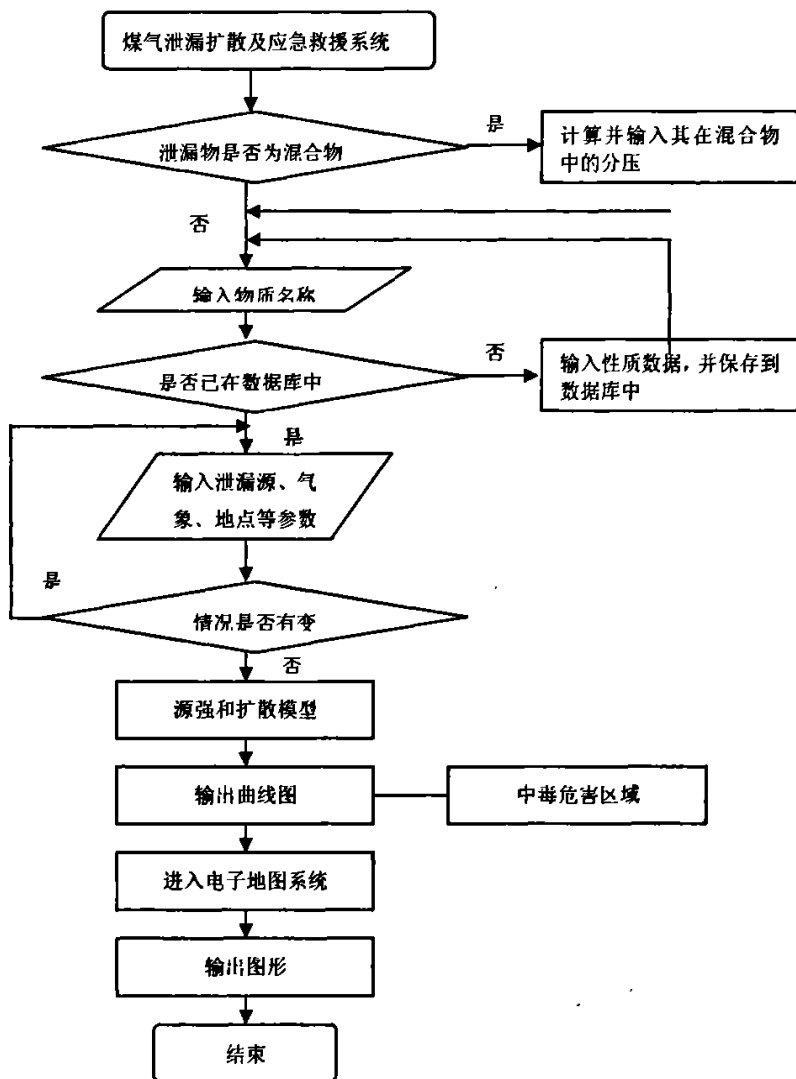


图 5-3 煤气泄漏扩散模拟系统结构框图

5.3.2 系统实现功能

1. 数据采集和更新功能

包括空间数据录入功能和属性数据录入功能。通过数据化仪、扫描仪录入或转化其它格式的图形文件把系统的基础地图(厂区及周边地形图、交通图等)、敏

感区域图、应急设备分布图、主管部门和应急人员部署图录入系统；通过键盘输入和文件导入把各种煤气属性数据、敏感单位信息数据、模拟参数数据、主管部门信息、应急设备信息数据、应急救援信息数据录入系统。

2. 信息查询功能

包括敏感区、应急设备、主管部门、应急人员的图形查询功能和敏感区、应急设备、主管部门、煤气等的属性查询功能。图形查询功能指通过在查询对话框输入或在下拉列表框中选择要查询的专题项目，按确定后即地图上显示其分布位置、简单信息。而通过属性查询功能，用户可以了解到：(1)泄漏煤气的理化性质、发生泄漏后的急救措施、健康危害与毒性；(2)应急设备数量、种类、性能以及应急队伍的编制、主要负责人和相关联系方式；(3)周围敏感单位的基本情况。

3. 煤气泄漏扩散过程的动态模拟显示功能

启动动态模拟功能模块后，输入必要的环境参数(风速、风向、气温、大气稳定度)、预测时间、泄漏时间、发生泄漏的地理位置、危害浓度划分标准、煤气泄漏的源强和理化性质等参数后，系统就会调动数学模型库中相应的数学模型进行计算，在计算机屏幕上动态模拟泄漏煤气大气中扩散的过程，并且以不同的填充图案表示不同的污染范围(致死污染范围、重度污染范围和轻度污染范围)。它有助于主管部门和应急人员及时、迅速做出科学决策。

4. 受影响区域和面积统计功能

在计算机上模拟显示出污染物扩散范围后，即可利用系统的统计功能来统计出将受影响敏感区域、敏感单位以及影响面积的大小、中心点以及轴向跨度。为提前通知可能遭受危害的单位和个人、及时疏散人群赢得宝贵的时间。

5. 数据输出功能

用户可根据需要输出图形信息和属性信息，包括模拟出来的污染物危害范围地图、敏感区域和敏感单位的属性信息、受影响范围的面积等。

5.4 系统开发的硬软件环境

5.4.1 硬件环境

系统开发研究的硬件配置清单如下：

(1) 主机性能：CPU-Pentium II 系列，主频 266MHz 以上，内存 32 MB 以上；硬盘 1.2GB 以上，彩色显示器、声卡、真彩显示卡、音箱等。

(2) 外围设备：鼠标器、彩色喷墨或激光打印机、扫描仪和数据化仪(用于制作电子地图)等。

5.4.2 软件环境

在开发地理信息系统的过程中,首先要考虑的就是选择适宜的开发工具。近年来, Visual Basic (6.0 版) 已迅速成为最流行的计算机应用软件之一, 由于其简单易学, 常用的功能随着版本的升高, 也越来越强大, 特别是 20 世纪 80-90 年代间, Basic 语一言的普及, 使得目前非计算机专业出身的广大的工程技术人员和电脑爱好者, 能利用 VB 的事件驱动的编程机制和新颖、易用的可视化工具, 做出自己专业中所需要的各种各样功能强大的 Windows 应用软件。Visual Basic 语言是在原有 Basic 语言基础上的进一步发展, 其简单易学。可视化的用户界面设计功能, 把程序设计人员从繁琐复杂的界面设计中解脱出来。可视化编程环境的“所见即所得”功能, 使界面设计和编程变得易操作化, 强大的多媒体功能可轻而易举地开发出集声音、动画、影像和图片于一体的多媒体应用程序。

Visual Basic 编程系统用一种十分巧妙的方法将 windows 编程的复杂性“封装”起来。它综合运用了 Basic 语言和新的可视设计工具, 既没有牺牲 Windows 所特有的优良性能和图形工作环境, 同时又提供了编程的简易性。Visual Basic 通过图形对象(包括窗体、控件、菜单等)来设计应用程序。图形对象的建立十分简单, 而只需要为数不多的几行程序就可以控制这些图形对象。

Visual Basic 是首批采用事件驱动编程机制的计算机语言之一。事件驱动是一种适用于图形用户界面(GUI)的编程方式。传统的编程是面向过程、按规定顺序进行的, 程序设计人员总是要关心什么时候发生什么事情。对于现代的计算机应用来说, 必须能让用户操纵程序的执行, 而这实际上就是事件驱动程序所要解决的问题。

用事件驱动方式设计程序时, 程序员不必给出按精确次序执行的每个步骤, 只是编写响应用户动作的程序, 例如选择命令、移动鼠标、用鼠标单击某个图标等。与传统的面向过程的语言不同, 在用 Visual Basic 设计应用程序时, 要编写的不是大量的程序代码, 而是由若干个微小程序组成的应用程序, 这些微小程序都由用户启动的事件来激发, 从而大大降低编程的难度和工作量, 提高程序开发效率。

Visual Basic 语言以其能迅速有效的编制优良的交互界面设计性能, 被越来越广泛地运用于 Windows 环境下系统地可视化界面设计。鉴于 Visual Basic 语言以上的优点, 本文建议以 Visual Basic 语言作为开发平台。

由于作者的计算机软件编程能力十分有限, 不能亲自编译出工业场所煤气泄漏扩散及应急救援系统软件, 只能完成软件系统的整体设计, 有待于专业编程人员在以后的日子里以上述扩散原理及模型为理论基础, 以本文对模拟软件的整体设计为指导编制出扩散范围模拟软件, 为事故发生后的疏散与救援提供依据。

5.5 工业场所煤气泄漏事故的应急响应系统

工业煤气在我国总多企业中的广泛的应用于生产,但由于生产及管理人员的不安全行为和生产当中一些设备、物品的不安全因素,加之难以预料的自然灾害等条件的作用和影响,往往导致煤气泄漏事故发生。每年我国都有几十起工业煤气泄漏事故发生,造成数十甚至上百人的伤亡。实际上,企业往往没有或没能制定有效的煤气泄漏应急响应系统,在煤气泄漏事故发生后,没有及时启动应急救援预案来控制事态发生和减少事故损失。首钢在 2005 年 10 月 26 日和 2006 年 6 月 10 日两次发生煤气泄漏事故,造成 11 人中毒死亡多人重伤的恶性后果,其原因之一就是首钢在事故发生前没能制定有效的煤气泄漏事故应急响应系统。因此,为避免因企业没有完善的煤气泄漏事故应急响应系统而造成人员重大伤亡的悲剧再次发生,我们有必要根据前人及本文在处理泄漏事故方面取得的研究成果,制定工业场所煤气泄漏事故应急响应系统,从而提高风险意识,强化预防措施,及时救援,力争减轻或消除其危害,做到事前预防,事中应急。

5.5.1 应急响应程序

工业场所煤气泄漏事故处理与处置的特点,要求一旦发生事故,必须尽快进行有效处理,最大限度地减小或消除事故造成的损失。建立工业场所煤气泄漏事故应急预案,是为了防患于未然,一旦发生泄漏事故时,能迅速调取泄漏事故的预案材料,指导应急工作人员迅速采取有效的应急措施。应急预案包括:①建立生产系统工段煤气档案;②建立本地区应急监测技术方案;③建立本地区的地理信息系统;④建立突发性煤气泄漏事故的场内、场外应急预案。

在发生每起泄漏事故后,为了能够让整个事故的应急处理做到有条不紊、井然有序,就应该有一套行之有效的工业场所煤气泄漏事故应急程序,内容详见图 5-4。

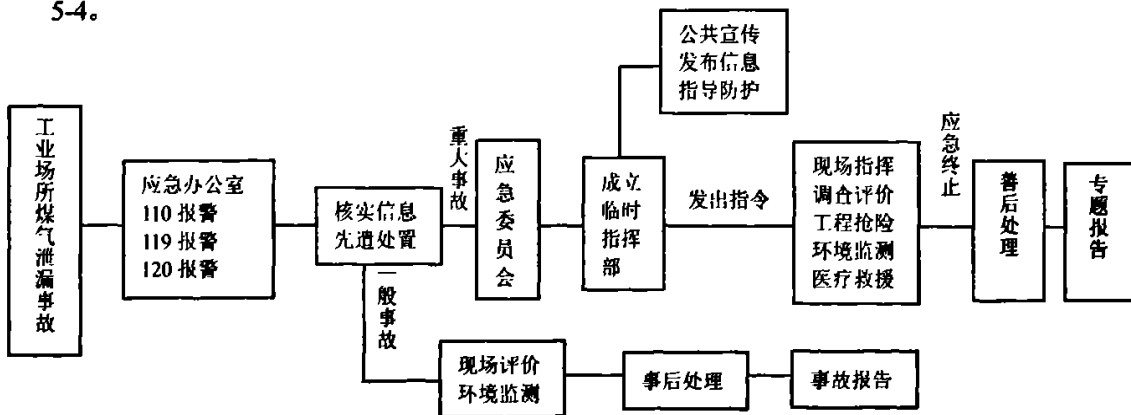


图 5-4 工业场所煤气泄漏事故应急响应程序

5.5.2 应急响应子系统

1. 应急组织系统

为了应付工业场所煤气泄漏事故,县以上行政区域以工业场所煤气泄漏事故应急响应程序为框架,依据我国部门间行政职能的划分,可设立以下相应的应急组织。

应急委员会:由当地政府和环保、公安、消防、卫生、路政、气象等部门的负责人组成,主要职责是审定工业场所煤气泄漏事故防范和应急计划,并协调落实部门关系,在处理重大工业场所煤气泄漏事故时,可增设临时应急指挥部,统一协调应急行动。

应急办公室:是应急组织中的常设机构。为便于日常工作,可由安监部门各科室和监测站的负责人组成,主要职责是制定和落实应急计划,建立技术储备,接收工业场所煤气泄漏事故的报警;处置一般泄漏事故,重大泄漏事故在报告应急委员会的同时作先遣处理。

应急专业组:包括公安消防、监测评价、医学救援、水文气象和工程抢险等方面,在应急响应时提供各种专业支持。应急组织系统关系见图 5-5。

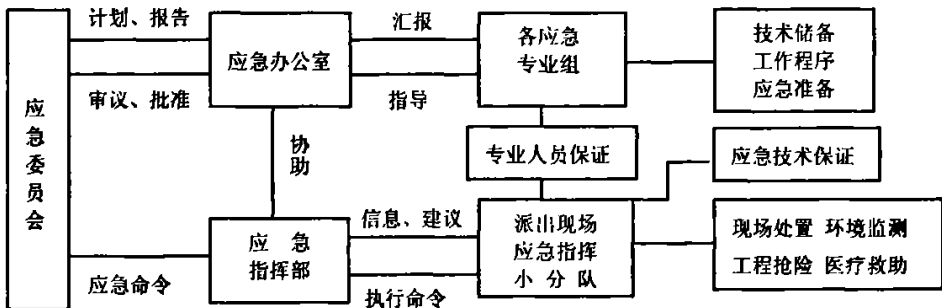


图 5-5 应急组织系统关系

2. 应急通讯系统

工业场所煤气泄漏事故应急通讯系统包括事故报警、应急指挥、应急信息发布三部分。其要求是:

(1) 报警系统平时应设立专用电话,并充分利用社会现有的救援报警系统 110, 119, 120, 做到 24 小时畅通;

(2) 指挥系统应由对外界相对保密的办公室电话、手机(可充分利用现在个人手机普及的有利条件)和对讲机组成,以避免应急期间受外界干扰;

(3) 信息发布系统可由广播、电视及通讯车辆组成,在场外应急响应中需要应急区域内群众配合时,向群众公告污染事故的状况和正在采取的应急措施。

3. 应急监测系统

工业场所煤气泄漏事故的处理很大程度上依赖于事故环境监测人员提供及时、准确的煤气监测数据，因此应急监测系统的正常有序运行就显得非常重要。应急监测系统包括质量管理、组织保障、技术支持。

(1) 应急监测质量管理

对工业场所煤气泄漏事故应急监测质量管理应注重前期质量管理和运行中的质量管理。前期质量管理(即质量保障支持部分)是应急监测质量管理的基础性工作，其主要内容：① 建立应急监测工作手册、应急监测数据库和应急监测地理信息系统；② 组织应急监测人员技术培训；③ 做好监测方法和监测仪器的筛选，做好监测仪器、设备的计量检定，做好个体防护装备、车辆等后勤保障。

运行中的质量管理，其主要内容：① 注重煤气泄漏事故现场勘查和监测方案制定中的质量管理；② 煤气泄漏事故现场监测和采样中的质量管理；③ 监测数据处理的质量管理，以及编制监测报告的质量管理。

(2) 应急监测组织保障

应急监测组织保障系统，应建立并完善从省市到地方再到企业的自上而下的体系，从省级着眼，既考虑纵向的管理和支持，又兼顾横向的联系与协作，实现监测资源的合理配置，建立全省监测机构网络，形成一套切实可行的应急监测管理办法和实施方案，各地市及有条件的企业有重点地开展监测能力建设，配备相应仪器设备，培养和锻炼一支常备不懈、素质优良的应急监测队伍。

(3) 应急监测技术支持

切实掌握泄漏煤气的特性以及环境卫生标准，建立快速监测方法、安全防护措施和处置技术，制定应急监测预案，汇编应急监测实际案例，为应急监测的实施和事故处理提供技术支持。应急监测技术支持系统见图 5-6。

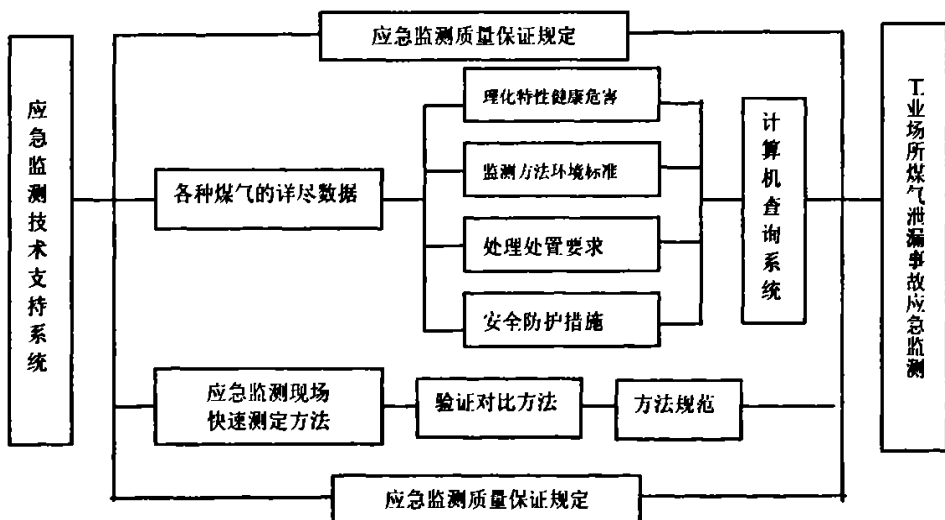


图 5-6 应急监测支持系统

5.5.3 应急防护和救援抢险

在发生较大的工业场所煤气泄漏事故时,应急行动首要的工作是控制事故污染源和防止污染造成对人群等重要保护对象的伤害。按防护和救援的不同要求,根据有毒有害气体预测模式将煤气可能波及的范围划分为救援区域、防护区域和安全区域,设置相应的监控点位,及时监测,实时调整。应急防护和救援程序见图 5-7。

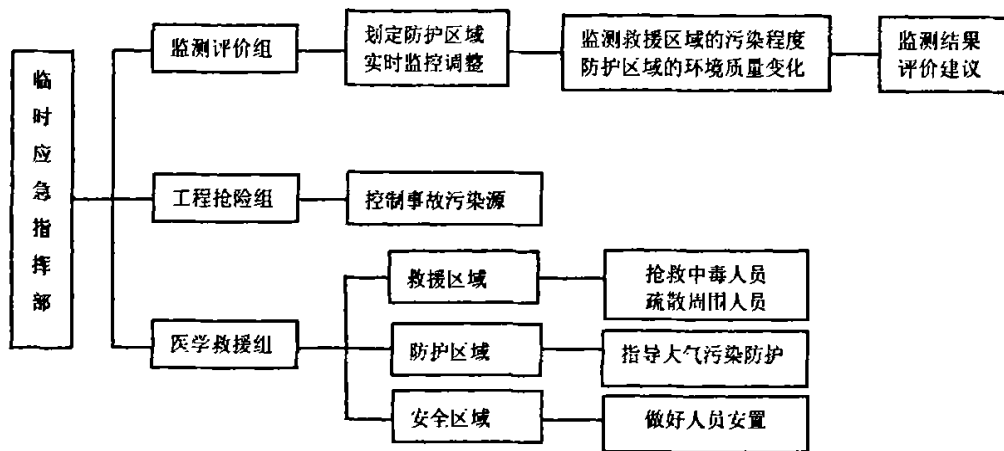


图 5-7 应急防护和救援程序

具体应急救护措施内容:

1. 控制危险源。及时控制造成事故的危险源是应急救援工作的首要任务,只有及时控制住危险源,防止事故的继续展,才能及时、有效地进行救援。
2. 估算泄漏量及影响的范围。结合事故发生时的各种条件参数,计算可能发生的泄漏量,扩散范围,依据科学计算划定合理的安全警戒及撤离距离。
3. 抢救受害人员。抢救受害人员是应急救援的重要任务。在应急救援行动中,及时、有序、有效地实施现场急救与安全转送伤员是降低伤亡率,减少事故损失的关键。
4. 指导群众防护。组织群众撤离由于泄漏事故发生突然、扩散迅速、涉及范围广、危害大,应及时指导和组织群众采取各种措施进行自身防护,并向上风方向迅速撤离出危险区或可能受到危害的区域,在撤离过程中应积极组织群众开展自救和互救工作。
5. 做好现场清消。消除危害后果对事故外逸的有毒有害物质和可能对人和环境继续造成危害的物质,应及时组织人员予以清除,消除危害后果,防止对人的继续危害和对环境的污染。

6. 查清事故原因，估算损失程度。事故发生后应及时初步调查事故的发生原因和事故性质，查明人员伤亡情况，供安全生产监督管理与公安等部门开展事故详细调查处理提供可靠有效依据。

5.5.4 应急状态终止

工业场所煤气泄漏事故处理包括应急处置和善后处理 2 个过程。当经过应急处置已达到下列 3 个条件时应急委员会可以宣布应急状态终止，进入善后处理阶段：

1. 根据应急指挥部的建议，确信煤气泄漏事故已经得到控制，事故装置已处于安全状态；
2. 有关部门已采取并继续采取保护公众免受煤气毒害的有效措施；
3. 已责成或通过了有关部门制定和实施环境恢复计划。事故控制区域环境质量正处于恢复之中。

善后处理事项主要应包括：

1. 组织实施生产环境恢复计划；
2. 继续监测和评价环境煤气污染状况，直至基本恢复；
3. 必要时，对已影响人群做长期跟踪监测；
4. 评估泄漏事故损失，协调处理煤气中毒赔偿和其他事项。

在工业场所一旦发生煤气泄漏事故，如果能在事故发生初期控制住事态发展，快速计算模拟出煤气泄漏扩散所能影响的危险范围，并及时启动事故应急响应系统，就能在很大程度上减少事故损失。因此，结合对煤气泄漏扩散的数值模拟，指导企业及相关管理部门制定工业场所煤气泄漏事故的应急响应系统，从加强安全生产管理、减少事故灾害损失及保护人民生命财产等角度都有着重要的实际意义。

第6章 结论与展望

6.1 结论

在现代工业企业, 煤气作为生产中不可或缺的一种重要原料和能源, 得到极为广泛的应用。但是, 工业场所使用的煤气一般是处于高压 (0.1Mpa-5Mpa)、高温的状态下运行, 由于设备、管理及自然灾害等因素极易引发煤气泄漏事故, 造成人员伤亡和财产损失的严重后果。本文主要围绕工业场所煤气泄漏扩散带来的危害进行研究, 主要的研究工作和结论如下:

(1) 在查阅了大量的国内外文献的基础上, 对现有的泄漏扩散资料进行了系统深入的分析和研究, 并结合相关领域的学科知识, 科学地分析了有煤气泄漏后气体扩散的规律及相关参数条件、影响因素等, 同时建立了工业场所煤气泄漏扩散的数学模型。

(2) 借鉴和比较国内外相关职业卫生标准对工业场所一氧化碳毒害浓度的规定, 最终合理确定本论文一氧化碳中毒范围的浓度阈值, 进而换算出各种煤气的中毒范围浓度阈值。

(3) 根据建滔化工甲醇项目的实际煤气泄漏数据, 对事故性泄漏的各种参数进行了选取, 并对煤气泄漏质量流量进行了求解, 代入高斯扩散模型模拟了煤气泄漏扩散后的浓度分布规律, 计算出事故下风向煤气有害浓度的最大半径, 确定了煤气泄漏的伤害范围, 并给出事故泄漏后的安全警戒距离。

(4) 通过比较计算, 得出了不同风速和不同泄露面积在相同大气条件和地面地形条件下的对煤气泄漏扩散的影响规律。

(5) 运用本文的理论研究和管理信息系统知识, 从总体上设计了工业场所煤气泄漏模拟及事故应急响应系统, 为相关管理部门和企业提供参考, 也为后来具体软件开发提供了参考和依据。

6.2 展望

随着国民经济的繁荣和工业企业的蓬勃发展, 市场加大了对煤气及其相关产品的需求, 使得生产、储存、运输过程中发生煤气泄漏性事故的可能性增大。本论文虽然对工业场所煤气泄漏扩散的规律进行了探讨和实例计算, 得出了一些结论, 但由于泄漏过程的复杂性, 相关资料的缺少, 加之本人水平所限, 研究工作还很不充分, 难免存在不足之处, 恳请各位批评指正。

本论文仍需要进一步探讨的问题有：

(1) 由于煤气事故过程的复杂性、随机性和不确定性以及影响因素多，验证试验没有进行，使得相关数据精准性有所欠缺，影响了参数精度，使模拟得到的结果与实际有一定的差异。再者，高斯模型因做了不少简化和假设，使所得结果不能十分精确模拟真实情况。

(2) 在模拟煤气泄漏扩散范围的过程当中，没有考虑空气湿度对扩散的影响，为了使模拟更符合实际，空气湿度对扩散的影响有待研究。

(3) 在评价煤气扩散影响范围时，除了着重考虑浓度的影响外，还应考虑人员在危害范围内的接触时间。接触时间越短，实际毒害程度越小。泄漏发生后，如果能够采取有效措施对泄漏加以及时控制，则其实际危害程度将比模拟结果要低。

(4) 限于本人计算机水平，无力将本文的煤气泄漏扩散模型用计算机语言编制成相应煤气泄漏可视仿真系统。希望有识流体力学、计算机软件的人士及其他感兴趣的学者同仁在以后完成此项工作，以解决事故处置之实际需要。

致 谢

本论文是在导师柴建设教授的悉心指导下完成的。三年来，柴老师不仅在学习上以他深厚的理论功底、丰富的实践经验对我进行了谆谆教诲，而且在思想上给我以人生的启迪。三年中，我系统地学习了安全工程和环境卫生学的理论知识，并通过从事科研项目的锻炼，对学科有了更深入的了解。柴老师严谨、踏实的治学作风以及他热情、平易近人的处事风范使我终生难忘，并永远激励我踏实做人 and 刻苦为学。在此，谨向我的导师柴建设教授表示深深的谢意和崇高的敬意！

在首都经济贸易大学学习的三年时光中，安全工程与环境工程学院的全体教师，为我创造了一个良好的学习和研究环境，在教授给我专业理论知识之外，还经常给予我生活和实习工作上的指导和教育，使我学到了很多在书本上学不到的知识，使我受益匪浅。在此我深深地向你们表示衷心感谢！

在论文研究期间，要栋梁和周俊山同学给予我很多帮助，提出了宝贵的意见和建议，在此我特别向他们表示感谢！

感谢关心和帮助我的家人，是你们无微不至的关怀、支持和鼓励使得我顺利完成了学业。

感谢各位专家学者对本文的评阅与赐教。

本文尚有不足之处，请广大读者提出宝贵意见。

参考文献

- [1] 丁信伟, 王淑兰, 徐国庆. 可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述. 化学工业与工程, 1999, 16(2):118-122.
- [2] A. C. Daniel, F. L. Joseph. Chemical Process Safety—Fundamentals with Application. New Jersey: Prentice-Hall, 1990: 121-151.
- [3] T. Ф. 康德拉契娃(苏)著, 黄光禹译. 安全阀. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [4] 彭殿春, 何艺强. 安全阀排放量的安全性. 中国锅炉压力容器安全, 1994, 10(4): 34-36.
- [5] H. W. M. Witlox. The HEGADAS Model for Ground Level Heavy Gas Dispersion—I. Steady-state Model. Atmospheric Environment, 1994, 28(18): 2917-2932.
- [6] 宇德明. 易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评价. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [7] 化工部化工劳动保护研究所. 重要有毒物质泄漏扩散模型研究. 化工劳动保护(安全技术与管理分册), 1996, 3: 1-19.
- [8] http://www.xmsafety.com/csw040602/WZ/Article_Show.asp?ArticleID=1734.
- [9] 丁信伟, 王淑兰, 徐国庆. 可燃及毒性气体扩散研究. 化学工程, 2000, 28(1):33-36.
- [10] Pan Xuhai, Jiang Juncheng. Numerical Analysis of Diffusion Process of Flammable and Toxic Gases Discharging Accident. Li Shengcai, Jing Guoxun. Progress in Safety Science and Technology. Beijing: Chemical Industry Press, 2000, 297-301.
- [11] 潘旭海, 蒋军成. 化学危险性气体泄漏扩散模拟及其影响因素. 南京化工大学学报, 2001, 23(1):19-22.
- [12] 潘旭海, 蒋军成. 模拟评价方法及其在安全与环境评价中的应用. 工业安全与环保. 2001, 27(9): 27-31.
- [13] 张国顺. 燃烧爆炸危险与安全技术. 北京, 中国电力出版社, 2003, 11.
- [14] 冀和平, 崔慧峰. 防火防爆技术, 北京, 化学工业出版社, 2004, 3.
- [15] Emergency Response Guidebook. Department of Transportation Research and Special Programs Administration, 1990, U.S.357-358.
- [16] 燃气安全技术. 彭世尼. 重庆大学出版社, 重庆, 重庆大学出版社, 2005.
- [17] 耿丽艳. 转炉煤气存储系统的火灾爆炸危险性评价, 有色矿冶, 第22卷第5期, 2006.
- [18] 王樟龄, 付贵生. 有毒气体泄漏扩散上海分区的研究, 职业卫生与应急救援, 1996, 14(3), 3-6.
- [19] 董希琳, 汪国华等. 液化危险品储罐泄漏——扩散监测及仿真预警系统, 中国安全科学学报, 1996, 6(5), 45-48.
- [20] 蒋维媚等. 《空气污染气象学教程》, 第一版, 1993年, 气象出版社, 24-243, 402-403
- [21] 桑建国, 温市耕. 《大气扩散的数值模拟》, 第一版, 1992年4月, 1-2.
- [22] 段卓平, 吕武轩. 易燃、易爆(有毒)重大危险源(罐区)泄漏物扩散模型及数值模拟, 《中国安全科学学报》, 1999年8月, 第9卷第4期, 660.
- [23] 连超, 旭伟. 《大气环境影响分析》, 第一版, 1985年2月, 原子能出版社, 101-102.
- [24] 钱新明, 冯长根. 易燃易爆危险物质泄漏扩散仿真及其应用的研究, 《中国安全科学学报》, 1997年6月, 第7卷第3期, 300.
- [25] 白其峰. 数学建模案例分析, 海洋出版社, 第1版, 2000, 3-5.
- [26] 杜建科. 毒气泄漏过程及其危险区域分析[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(6), 55-59.

- [27] 田贵三. 管道燃气泄漏过程动态模拟的研究. 山东建筑工程学院学报, 1999, 第 14 卷, 第 4 期.
- [28] 潘旭海, 蒋军成. 危险性物质泄漏事故扩散过程模拟分析[J]. 化学工业安全技术, 2001, 3, 44-46.
- [29] 李爱贞等. 大气环境影响评价导论[M]. 北京: 海洋出版社, 1997, 7, 第一版, 197-205.
- [30] 李宗恺、潘云仙、孙润桥, 《空气污染气象学原理及应用》, 1985 年, 第一气象出版社, 173-294.
- [31] 郝吉明、马广大等, 《大气污染控制工程》, 第一版, 1985 年 5 月, 高等教育出版社, 105-110.
- [32] 谷清, 我国大气模式计算的若干问题, 《环境科学研究》, 2000 年, 第 13 卷, 第 1 期 40-43.
- [33] 蔡风英, 谈宗山, 孟赫等. 化工安全工程. 北京: 科学出版社, 2001, 195-200.
- [34] Taylor J R. Risk Analysis for Process Plant, Pipelines and Transport [M]. UK :E\$ FN: Spon, 1994.
- [35] Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar. Chemical Process Safety-Fundamentals with Application[M]. New Jersry: Prentice-Hall, 1990:121-151.
- [36] 国家环境保护局. 环境影响评价技术导则(HT/J2. 3-93). 北京: 环保局, 1993, 13-48.
- [37] 建滔(河北)化工有限公司 10 万吨/年甲醇项目安全验收评价报告, 云南巨星安全技术有限公司, 2006 年, 5 月.
- [38] <http://www.esafety.cn/jishu/ShowArticle.asp?ArticleID=2812>
- [39] 《突发公共卫生事件应急条例》公布(全文). <http://www.people.com.cn/GB/shizheng/19/20030512/990224.html>. 2003.05.
- [40] [美]W. Kent Muhlbauer 著, 杨嘉瑜等译. 管道风险管理手册(第二版). 北京: 中国石化出版社, 2005.
- [41] 同济大学等. 燃气燃烧与应用, 北京: 中国工业出版社, 2000.
- [42] 胡二邦. 环境评价实用技术和方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [43] 郑瑞文. 生产工业防火. 北京: 石油化工出版社. 1998.
- [44] K. 纳伯尔特, G. 雄恩. 可燃气体和蒸汽的安全技术参数手册. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [45] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. Guideline for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud, Explosion, Flash Fires, and BLEVE [M]. New York: RICHE, 1994.157-242, 285-335.
- [46] Taylor J R. Risk Analysis for Process Plant, Pipelines and Transport [M]. UK :E\$ FN Spon, 1994.
- [47] Bjerketvedt, D, Bakke J R and Winger den K van. Gas explosion Handbook[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 52, 1-150.
- [48] TNO. Methods for the calculation of physical effects of escape of dangerous materials [M]. Yellow Book Committee for the Prevention of Disasters, Voorburg, Netherlands, 1992.
- [49] CCPS/SAICHE. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Anaylsis [M]. RICHE, New York, 1989.
- [50] A.M.Birk, R.J.Anderson, A.J.Copents. A Computer Simulation of a D-erailment Accident: Part I-Modal Basis. Journal of Hazardous Mater-ials, 25(1990)143 — 147.
- [51] I.Leonelli, S.Bonvicini, G. Spadoni. Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71: 283-300.
- [52] Michael K.Lindell. Assessing emergency preparedness in support of hazardous

- facility risk analyses:Application to siting a US hazardous waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials* ,1995,71:283-300.
- [53] Thomas O.Spicer,Jerry Havens.Application of dispersion models to flammable cloud analyses. *Journal of Hazardous Materials*, 1996,71: 283-300.
- [55] 吴宗之, 刘茂等. 重大事故应急救援系统及预案导论.北京: 冶金工业出版社,2003.
- [56] 国家安全生产监督管理局.安全评价. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.

在学期间发表的学术论文与研究成果

1. 2005 年 6 月, 参与编写了国家安监总局关于安全教育培训教材辅导练习册。
2. 2005 年 8 月, 参加北京市生产经营单位安全生产投入现状的调查项目, 主要完成了调查问卷的编写和调查数据的统计分析等工作。
3. 2005 年 12 月, 完成建滔(河北)化工有限公司 10 万吨甲醇项目的安全验收评价报告。
4. 2006 年 9 月, 在《安防科技》发表《我国风险管理现状浅析》。
5. 2006 年 6 月, 在北京天地大方公司独立编写了《企业安全生产管理指导书》已由中国工人出版社出版发行。