

分类号_____

密级_____

UDC_____

学 位 论 文

首钢京唐钢铁公司能源消耗及影响因素分析

作 者 姓 名：刘勇

指 导 教 师：杜涛 副教授

东北大学 热能与环境工程研究所

国家环境保护生态工业重点实验室

申请学位级别：硕士

学 科 类 别：工学

学科专业名称：热能工程

论文提交日期：2011年6月 日 论文答辩日期：2011年6月27日

学位授予日期：2011年7月 日 答辩委员会主席：李庆波

评阅人：李国胜 董辉

东 北 大 学

2011年6月

A Thesis in Thermal Engineering

**Analysis on Energy Consumption and
Its Influencing Factors of Shougang Jingtang
Iron and Steel Enterprise**

By Liu Yong

Supervisor: Associate Professor Du Tao

**Northeastern University
June 2011**

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。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作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：刘勇

日期：2011.6.29

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☐

学位论文作者签名：刘勇

签字日期：2011.6.29

导师签名：

签字日期：

刘勇

2011.6.29

首钢京唐钢铁公司能源消耗及影响因素分析

摘 要

钢铁企业是能源与资源消耗大户，也是环境污染大户，在新的历史使命和新的环境下，应改变过去以“高投入、高消耗、高污染”为特征的生产运营模式，利用先进的生产技术节能降耗，提高资源利用率，降低生产成本，生产出品种多样化、质量高、环境友好的钢铁产品。

京唐钢铁公司（以下简称“京唐钢铁”）以“减量化、再利用、资源化”为原则，以低消耗、低排放、高效率为特征，提高废弃物循环利用率，实现企业废物零排放。使其成为我国钢铁行业循环经济的示范基地。

本文叙述了我国的钢铁工业能耗的现状，回顾了钢铁企业系统节能的发展阶段和发展趋势，并将我国的节能水平与国外先进企业进行了比较分析，系统的说明了钢铁企业能源模型的研究情况。

本文以京唐钢铁为研究对象，把实际生产情况与能源消耗的实物量相结合，分析先进生产技术对能源消耗的影响情况。利用投入产出方法建立京唐钢铁的能耗消耗数学模型，并以该模型为基础，对各工序的产品能值、工序能源消耗和吨钢能源消耗，进行了实例计算。从厂区布局、钢比系数、产品结构、先进生产技术和外部因素等几个方面对企业的能源消耗的影响进行了计算分析。实例计算表明：

（1）合理的厂区布局有利于企业降低运输能耗，减小运输过程的散热损失，提高产品率，减少环境污染。

（2）矿钢比和铁钢比降低相同的程度，后者对吨钢综合能耗的影响大于前者。

（3）主工序产品结构的变化对企业的吨钢综合能耗产生一定影响。

（4）在先进生产技术中，海水淡化技术的使用会导致京唐钢铁的能耗上升。其余四种节能技术中，干熄焦发电技术对企业吨钢能耗的影响最大。

（5）国家政策的改变和产品价格的浮动都会对企业的能耗产生的影响。

关键词：系统节能；投入产出；能耗分析； $e-p$ 分析法

Analysis on Energy Consumption and Its Influencing Factors of Shougang Jingtang Iron and Steel Enterprise

Abstract

The iron and steel enterprises are the big butts of resources consumption and also the large family of environment pollution, and their old operation mode, which means "high input, high consumption, high pollution", should be changed. They should save energy, reduce product costs and enhance resource utilization efficiency, and produce not only various diversification but also environmentally friendly high quality steel and iron products by advanced production technology.

The principle of Shougang Jingtang iron and steel enterprises is "reduce, reuse and recycling", and its characteristic is "low consumption, low emissions and high efficiency". It will improve waste utilization cycle to generate zero emissions. And it will become demonstrative base of circular economy in China's steel industry.

This paper describes the current situation of energy consumption for iron and steel enterprise in China and the developing stage and trend of systems energy conservation, and the energy-saving level was compared and analyzed between China and foreign advanced enterprises. The energy consumption model of iron and steel enterprise are reviewed.

Shougang Jingtang iron and steel enterprise is the object of this disseration. The reality production status is connected with energy consumption, and analyzing on the influence of energy consumption with advanced production technology. The input-output model of energy consumption analysis of iron and steel enterprise is erected. And a example are calculated using this model to analyze the product energy value, the unit process energy and current situation of energy consumption of Shougang Jingtang iron and steel enterprises. The influence of factory layout, material to steel ratio, product structure, advanced production technology, external factor on energy consumption are calculated and analyzed. The calculation example indicates:

- (1) Reasonable factory layout is helpful to reduce its transportation energy consumption, decrease loss of heat, improve product rate and reduce environmental contamination.
- (2) Ore to steel ratio and iron to steel ratio decrease the same degree. The influence of

ore to steel ratio on energy intensity per ton is less than iron to steel ratio.

(3) The lord process product structure has a certain effect on energy intensity per ton.

(4) In these advanced production technologies, using the sea water desalination technology will lead to increase energy intensity per ton. And using CDQ technology greatest reduce energy intensity per ton in other four energy saving technologies.

(5) National policy and product prices have a significant influence on energy consumption.

Key words: system energy conservation; input-output; energy analysis; *e-p* method

目 录

独创性声明 I

摘 要 III

Abstract..... V

目 录 VII

第 1 章 文献综述 1

1.1 我国钢铁工业系统节能的现状 1

1.1.1 我国钢铁工业能源消耗现状 1

1.1.2 我国钢铁工业系统节能的发展阶段及发展趋势 2

1.1.3 我国钢铁工业系统节能水平与国外先进水平的比较 5

1.2 钢铁工业系统节能的研究方法 6

1.2.1 系统节能方法的发展 6

1.2.2 钢铁企业能源模型的研究 7

1.3 本文的主要研究工作 7

第 2 章 京唐钢铁现状 9

2.1 京唐钢铁基本概况 9

2.2 企业生产主流程 10

2.2.1 主体生产系统 12

2.2.2 子生产系统 15

2.3 企业辅助工序 25

2.3.1 电系统 25

2.3.2 煤气系统 26

2.3.3 蒸汽系统 26

2.3.4 换热站 27

2.3.5 制氧厂 28

2.3.6 海水淡化车间 29

2.3.7 辅助工序能耗.....29

第 3 章 计算模型的建立.....31

3.1 投入产出模型的建立.....31

3.1.1 单级投入产出模型.....31

3.1.2 多级投入产出模型.....35

3.2 企业能耗模型的建立.....42

3.2.1 企业综合能耗模型.....42

3.2.2 企业工序能耗模型.....43

第 4 章 企业能耗及其影响因素分析.....47

4.1 计算结果.....47

4.2 厂区布局对企业能耗的影响.....48

4.2.1 “一线型”总平面布置研究.....48

4.2.2 “一线型”总图布置对能耗的影响.....49

4.3.钢比系数对企业能耗的影响.....50

4.3.1 矿钢比对能耗的影响.....50

4.3.2 铁钢比对能耗的影响.....55

4.4 产品结构对企业能耗的影响.....57

4.4.1 热轧产品量对能耗的影响.....58

4.4.2 冷轧产品量对能耗的影响.....59

4.5 先进生产技术对企业能耗的影响.....61

4.5.1 海水淡化对能耗的影响.....61

4.5.2 烧结余热回收技术对能耗的影响.....65

4.5.3 干法熄焦发电技术对能耗的影响.....67

4.5.4 干法除尘 TRT 对能耗的影响.....69

4.5.5 转炉煤气干法除尘对能耗的影响.....72

4.6 外部因素对企业能耗的影响.....74

4.6.1 国家政策.....74

4.6.2 产品价格.....76

第 5 章 结论77

参考文献79

致 谢83

攻读学位期间参与的科研项目和发表论文情况85

第 1 章 文献综述

1.1 我国钢铁工业系统节能的现状

1.1.1 我国钢铁工业能源消耗现状

钢铁工业是工业化进程中的基础产业，还是基础产业中的重要支柱产业。我国的钢铁工业在 20 世纪 90 年代以来的 20 年中得到了快速发展，九十年代是我国钢铁工业在全球崛起的时代^[1,2]。1990 年我国粗钢产量为 6535 万吨，占世界粗钢产量的 8.48%；2000 年达到 12850 万吨，占世界粗钢产量的 15.51%；2005 年达到 35323.98 万吨，占世界的 31.28%。而到了 2010 年，中国的粗钢产量更是达到 62695.9 万吨，占全世界粗钢产量的 44.3%，远远超过日本和美国，成为世界最大的钢材生产、消费国^[3,4]。图 1.1 是 2010 年世界各国粗钢生产量所占比例示意图。

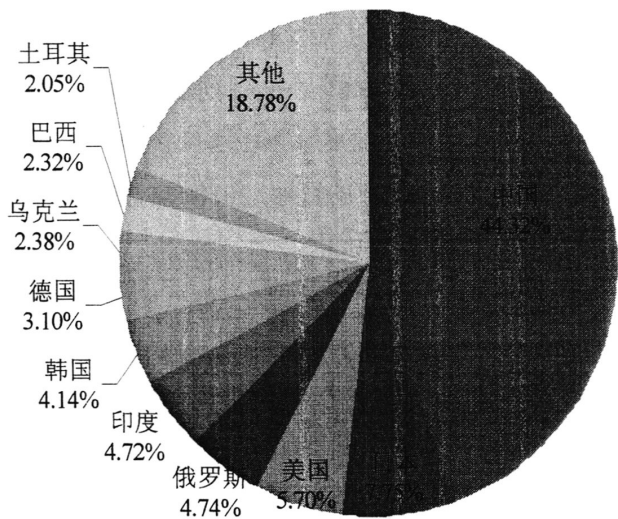


图 1.1 2010 年世界各国粗钢生产量所占比例
Fig. 1.1 Share of world crude steel production 2010

近 20 年来，我国的钢铁工业的能源消耗总量也逐年增长^[5,6]（如图 1.2 所示），占全国能源消耗总量的比例一直在 10% 以上，仅次于电力工业，钢铁工业单位增加值能耗比我国工业平均水平值的 3 倍还要多。

我国钢铁工业高速发展的态势，给资源、能源和环境带来巨大的冲击，钢铁工业的资源消耗、能源消耗及废弃物排放已经严重超出了我国资源、能源的供应能力与环境的承载能力^[3]。

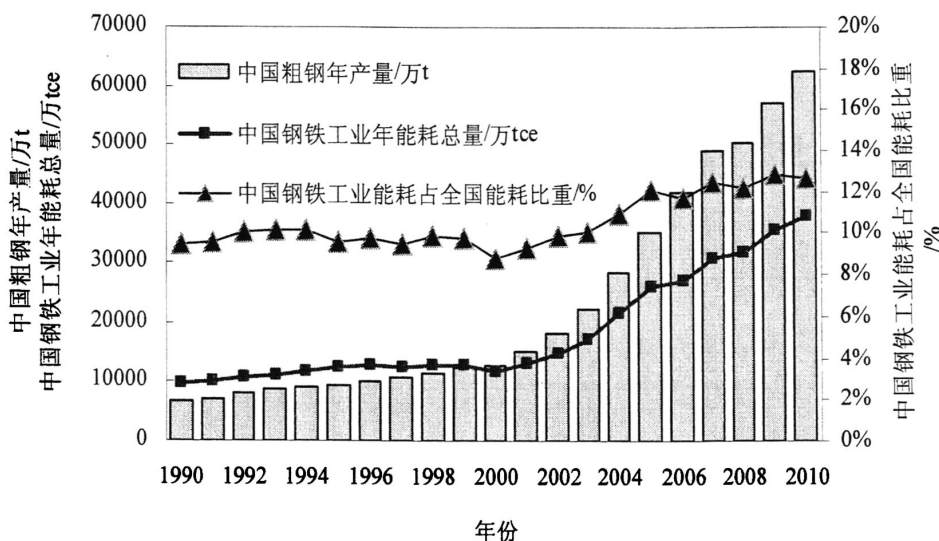


图 1.2 1990-2010 年中国钢铁工业粗钢产量和能源消耗量
Fig. 1.2 Output of crude steel and total energy consumption of China steel industry from 1990 to 2010

统计结果表明，20 年间粗钢产量增长了 9.45 倍，年均增长率为 12.55%。能源消耗从 1990 年的 9871.84 万 tce，2000 年 12869.81 万 tce，到 2010 年 37905.94 万 tce。20 年来，我国的钢铁工业能源消耗量增加了 3.84 倍，年均增长率为 7.34%，低于粗钢的年均增长率，我国钢铁工业实现了以节能求生产的目标。2010 年钢铁行业能耗占全国总能耗的 12.68%^[7]，所占能耗比例有所下降，详见图 1.2。

从 1980 年到 2005 年，我国的钢铁工业吨钢能耗大幅度降低；吨钢综合能耗从 1980 年的 2.040tce 降到 2000 年的 1.180tce，下降率为 42.16%。从 2000 年以后的钢铁工业吨钢能耗统计对象改为大中型钢铁企业，并取消了钢铁行业能耗的数据统计。1980 年的大中型钢铁企业吨钢综合能耗为 1646kgce/t，2005 年为 714 kgce/t，下降率为 54.98%，具体数据详见图 1.3。在 2005 年后，我国的钢铁企业消耗的外购电折算标准煤系数（简称折标系数），从“供电煤耗等价值”（1kW·h=0.404kgce）改为“电热学量值”（1kW·h=0.1229kgce）。经核算，如采用电热学量值，钢铁吨钢能耗将减少 100kgce/t^[8,9]，详见图 1.4。

1.1.2 我国钢铁工业系统节能的发展阶段及发展趋势

日本、韩国的钢铁节能成效显著，是世界上能源单耗最低的国家，其节能水平的提高有赖于节能技术的研究和节能政策措施的开展^[10]。日本、韩国在钢铁企业起步之初就建立了有关能源节约的法律法规，使得钢铁行业的发展必须以节能降耗为前提，它们在上世纪 80 年代的时候就很有远见地注重起能源的节约。而我国在钢铁行业发展的同时并没有重视能源的有效利用和节能技术的开发。

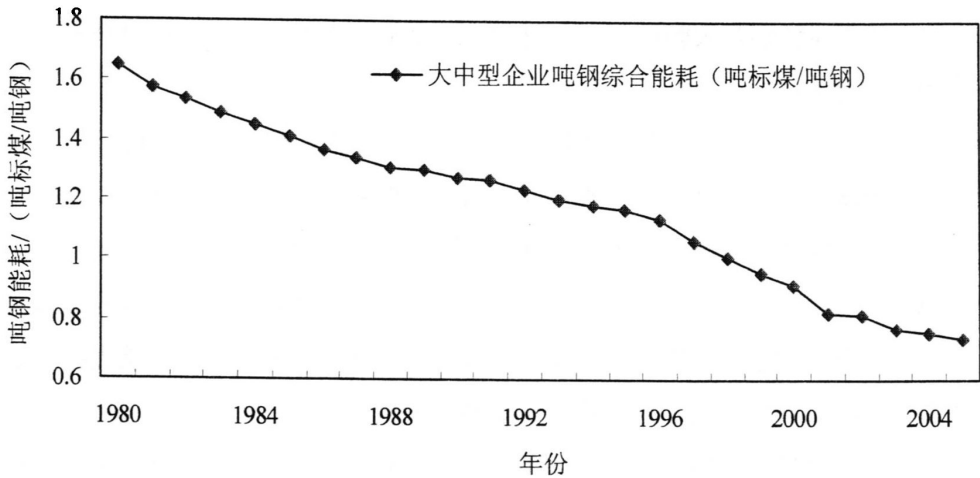


图 1.3 1980-2005 年国内大中型钢铁企业吨钢综合能耗
Fig. 1.3 Comprehensive e energy consumption per ton crude steel of important steel corporations in China from 1980 to 2005

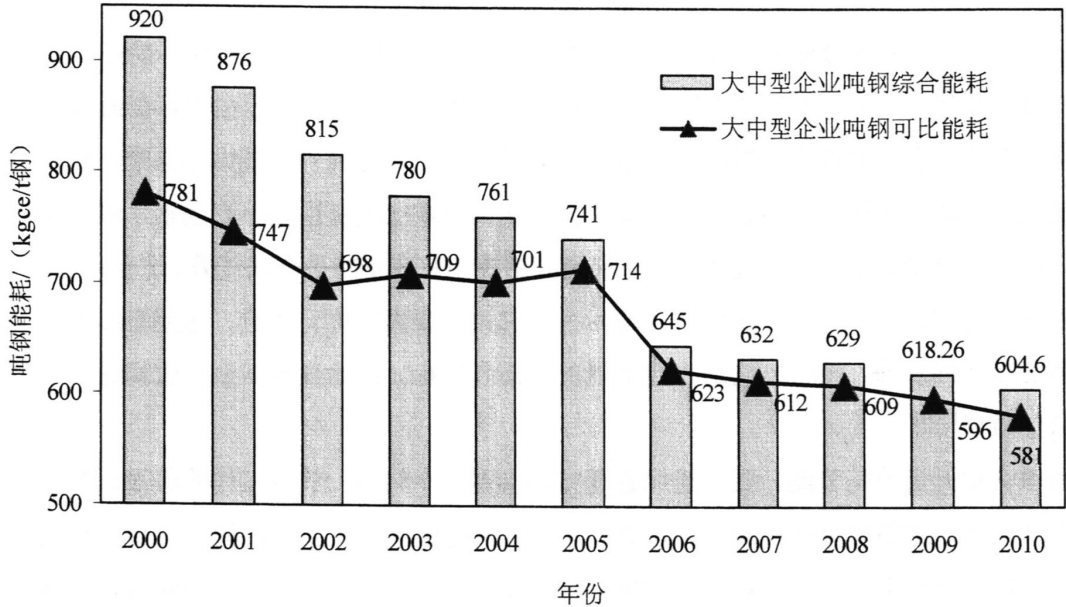


图 1.4 2000-2010 年我国大中型钢铁企业吨钢能耗的变化
Fig. 1.4 Downtrend of energy consumption per ton crude steel in China steel industry from 2000 to 2010
(2000-2005 年, 电力折标系数为 0.404kgce/(kW·h);
2006-2010 年, 电力折标系数为 0.1229kgce/(kW·h))

我国钢铁工业节能工作是从 1978 年开始, 其发展经历了三个阶段: 1978-1980 年为起步阶段, 节能工作重点是宣传节能的意义, 组建全国范围内的节能工作队伍, 能源消耗的主要调查对象包括重点企业和地方骨干企业。重点进行能源管理, 减少能源的损失和浪费, 抓节能管理, 堵塞跑冒滴漏, 扭转了当时钢铁企业不考核能源消耗, 无统计能源数据的历史, 减少了能源的损失和浪费。由于当时钢铁企业的能耗高, 即使是在这样

的节能工作下,吨钢能耗还是大幅降低,从 2.524tce 降低至 2.040tce,下降 19.18%,年节能率平均达到 11.23%;

1980-1990 年为单体设备、工序节能阶段。是节能工作的扩展期,这期间节能工作由钢铁企业扩展到铁矿山、铁合金、炭素产品、耐火材料和丝绳企业,使冶金部直接考核的能耗量达到系统内耗电量的 80%左右,制定了 15 种冶金炉窑的“热平衡测试、计算方法”和 19 种“工序(产品)节能规定”,广泛开展工序和企业的节能晋等升级以及对比剖析、节能咨询、节能培训等活动,推动企业节能工作的深入开展,并重点推广低碳厚料层烧结、高炉热风炉烟气余热利用、转炉煤气回收、平炉多枪吹氧、连铸、钢锭液芯轧制、铁合金摇包热兑和重油乳化燃烧等 30 项节能技术,加快了钢铁企业的节能步伐,这一期间吨钢综合能耗从 2.040 降到 1.274tce,又下降了 37.55%,年节能率平均为 5.37%。

1990 年至今,钢铁工业的节能工作进入系统节能阶段。进入“七五”以来,节能工作出现了新情况,钢铁企业的节能率急剧衰减,采取前两个阶段的措施已经不能降低企业的能耗。虽然“七五”以来节能减排的投资大于“六五”时期,但是由于存在诸多因素阻碍了钢铁工业节能潜力的发挥。其主要因素是因为工序之间生产能力不匹配,钢铁企业的生产节奏不均衡,设备运行效率不高。而要从根本上改变这些不利因素,单单依靠孤立的单项节能改造是行不通的。这个阶段的钢铁企业需要的是全局统筹、综合治理,运用系统工程的思想和方法,实现各项技术措施和生产要素的优化组合,达到增加企业整体节能效果的目的,而这也正是系统节能的思想和目标。到此我国钢铁工业就进入了系统节能阶段^[8,11]。

钢铁企业开展系统节能,要在组织管理方面实现三个转变:节能工作的着眼点要从注重单体设备、工序的节能转向企业总体的节能;节能管理方式要从经验管理转向现代化管理、提高管理工作水平和效率;节能管理工作体系要从单一的能源部门纵向管理体系,转向计划、生产、技术、设备、原燃料供应和能源管理部门分工协作的综合管理体系。只有实现了上述三个转变,系统节能工作才能顺利有效地开展起来。

为了实现钢铁企业的系统节能,因此必然要将钢铁企业整体的能源规划、计量和调度统一起来,钢铁企业的能源管理系统也就应运而生。宝钢、南钢、济钢、鞍钢等一些大中型钢铁企业开始建立自己的大型在线生产管理中心。它利用现代计算机技术、网络通信技术和分布控制技术实现宝钢能源系统的实时监视、控制、调整,故障分析诊断、能源平衡预测、系统运行优化、专家系统、高速数据采集处理及归档^[12,13]。而工业和信息化部与财政部在 09 年 12 月联合下发的《工业企业能源管理中心建设示范项目财政补

助资金管理的暂行办法》文件，更是推动了钢铁、有色、化工、建材等重点用能行业逐步开展能源管理中心的建设，提高工业企业能源管理水平和能源利用效率，从而实现能源的优化利用，为系统节能减排奠定了基础^[14]。

1.1.3 我国钢铁工业系统节能水平与国外先进水平的比较

目前，我国钢铁工业处于不同层次、多种结构、各种生产技术经济指标共同发展阶段。中国有 800 多家钢铁企业，其中 105 家重点钢铁企业钢产量占全国的 82.06%。近年来，非重点铁企业的发展速度高于重点钢铁企业，使我国钢铁产业集中度不断下降。

重点钢铁企业的能耗水平基本上可以代表我国钢铁企业的能源利用基本情况，其中有 1/3 的企业技术装备水平达到国际水平，例如宝钢、首钢、鞍钢、武钢、天管等，其相关工序能耗也已达到或接近国际先进水平^[15,16]，详见表 1.1。

表 1.1 我国钢铁企业与国外先进企业的能耗对比
Table 1.1 Comparison of energy consumption of China and foreign advanced enterprises

年份	吨钢综合能耗	吨钢可比能耗	烧结	焦化	炼铁	转炉	电炉	轧钢
2000	920	781	68.9	160.2	466.07	28.88	265.59	117.95
2005	876	714	64.83	142.21	456.29	36.34	201.02	88.52
2010	604.6	581	52.65	105.89	407.76	-0.16	73.98	61.69
2005 年								冷轧
国际			51.89	128.1	437.93	-8.88	198.6	47.82
先进								热轧
								80.28

近年重点钢铁企业节能工作取得显著成绩。重点钢铁企业的吨钢能耗和各工序能耗历年均在不断下降，创出历史最好水平，一批企业的相关工序能耗达到或接近国际先进水平。高炉技术经济指标保持了较好的水平。如炼铁燃料比为 518kg/t，为炼铁工序能耗的降低创造出有利条件。重点钢铁企业二次能源回收利用也取得新进展。高炉煤气压差发电装置已得到普及，TRT 吨铁发电量达 48.8 千瓦时，达到国际领先水平。投产和在建的干法熄焦装置（CDQ）有近 100 套，处理焦炭能力约 1 亿吨/年，现已开发出高压高温的 CDQ。重点钢铁企业高炉煤气放散率为 5.02%，焦炉煤气放散率为 1.43%，创出历史最好水平，促进了企业二次能源回收利用水平的提高。我国开发成功高炉和转炉煤气干法除尘技术，并得到大力推广^[16]。

我国钢铁工业节能虽然取得举世瞩目的成绩，但是总体来说，我国钢铁企业能耗水平与国际先进水平相比，依然落后 10%~15%。存在差距的原因主要是中国铁钢比高（2009 年中国铁钢比为 0.94，比国外高约 0.51），是我国吨钢综合能耗高的主要原因；

其次,冶金装备平均容量偏小(使吨钢综合能耗高出约 50~80kgce/t);再者,炼铁原燃料质量较差(特别是焦炭质量),造成高炉燃料比高(包括热风温度比国外低 100℃~150℃)^[17]。而且在 2006 年起我国将电力折标系数从 0.404kgce/(kW·h)调为 0.1229kgce/(kW·h),这使我国有关工序能耗值均有较大幅度下降,与国外对比有较大的不可比性。日本电力折标系数为 0.3502kgce/(kW·h),韩国为 0.350kgce/(kW·h),欧洲在 0.320kgce/(kW·h)左右;还有产品结构不合理、企业现代化管理水平低等原因,都使我国钢铁企业的能耗水平高于国外先进企业。

1.2 钢铁工业系统节能的研究方法

1.2.1 系统节能方法的发展

企业系统节能理论的发展可追溯到 60 年代中期。格林果夫提出了“炉子泛函理论”,这是关于企业系统节能理论的最早论述。上世纪 70 年代中期, Kellogg 提出了计算产品燃料当量的累加法,给出了工序的燃料当量的定义式,详述如下。

工序燃料当量的定义式为:

$$PFE = F + E + S - B \quad (1-1)$$

式中,为工序的燃料当量; F 、 E 和 S 分别为工序消耗的辅助原材料、燃料、动力的载能量; B 为外供能源的载能量。

格林果夫和 Kellogg 提出的理论和定义为系统节能理论的形成奠定了良好的思想基础。上世纪 80 年代以来,陆钟武院士及其同事以钢铁冶金系统为研究对象,做了大量实践和理论研究工作,提出了一系列概念和方法,逐步地建立了工业系统节能理论,为我国钢铁工业的系统节能奠定了坚实的理论基础。在 1981 年,他就提出“载能体”的概念,并把钢铁工业中的载能体分为第一类载能体和第二类载能体;指出了钢铁工业节能的三个方向:降低各生产环节中第一类载能体的单耗;降低各生产环节中第二类载能体的单耗;回收各生产环节散失的载能体和各种能量^[18]。1984 年他发表文章^[19,20],阐述了冶金节能五个层次(冶金工业、冶金企业、生产车间、单体设备、设备部件)和采用“系统”的观点研究节能问题的思想。大力提倡研究节能问题要不断引入现代科学的新方法,将它们与热能学科结合,形成交叉学科和跨学科。应用系统工程方法和经济学投入产出法对节能问题进行了深入的研究,提出了节能工作中典型优化问题的解决方法。这些工作初步形成了系统节能的理论和技術。1991 年,陆钟武院士将影响钢铁工业能耗的各种因素总结为各生产工序的钢比系数和工序能耗两大类,提出了吨钢能耗的分析法,并于 1996 年发表文章^[21],详细阐述了从钢比系数和工序能耗这两个方面节能的途径,强调指出结构优化与工序节能必须同等重视,才能达到好的效果^[22]。陆钟武、蔡

九菊著书《系统节能基础》，以“载能体”和“系统”两个概念为基础，从节能方向和途径、系统节能的模型化方法、工艺流程的能耗评价等方面全面介绍了钢铁工业系统节能的理论和方法^[23]。之后，陆钟武院士针对钢铁生产流程物质流错综复杂的特点，创造性地提出了“基准物流图”及“基准吨材能耗”、“基准吨钢能耗”等概念，建立了分析钢铁生产流程各股物质流变化对能耗影响的基本方法^[24]。系统节能理论又一次取得飞跃发展，并逐步趋于完善。

在国外，国外不少学者应用热力学第二定律的火用分析方法分析钢铁工业的能源消耗、吨钢火用耗和火用效率问题^[25,26]。但因这一方法中对各种火用的计算及各项指标的分析还存在争议，目前应用还很少。

1.2.2 钢铁企业能源模型的研究

为了研究钢铁企业的能源合理利用、优化分配问题，分析企业的节能途径，往往需要建立能源模型，而且针对不同层面、不同类别的节能问题选择建立不同形式的能源模型。比较典型的模型主要有优化模型、投入产出模型、平衡模型、灰色模型和神经网络模型^[27]。

近年来，东北大学先后与鞍山热能研究所、宝钢、鞍钢和杭州钢铁合作，开展了不少能源优化模型的研究工作^[27-30]，陆续建立的能源模型有：鞍钢炼铁系统用能优化模型、杭州钢铁厂炼铁系统用能优化模型、鞍钢能源投入产出模型。

以上模型的特点是以一个工序、一个生产系统或一个企业为研究对象，以系统净节能量最大为目标，从能源和非能源两个方面，应用投入产出法，建立物料平衡模型、能源供需平衡模型及能量平衡模型，全面研究了工序、生产系统或企业的能源节约问题，给出了对象的最优工作状态。

国外对于钢铁企业能源模型的研究也很多，大部分是能耗分析模型，用来分析企业能源消耗的来龙去脉，从而指出节能方向。

1.3 本文的主要研究工作

本文应用投入产出方法，采用矩形投入产出表的形式，建立了京唐钢铁的能源消耗的投入产出模型，其中包括企业能源投入产出表的构造、产品分配平衡模型、工序能耗的计算、企业总能耗和吨钢综合能耗的计算。

本文京唐钢铁为研究对象，计算了京唐钢铁 2010 年 8 月各工序的产品能源消耗现状及工序能耗，并从厂区布局、钢比系数、产品结构、先进生产技术、外部因素几个方面对企业的能耗进行比较分析。本文是从能源消耗的角度对企业节能工作成果进行计算

和分析，希望能够对以后的钢铁企业节能降耗起到一定的参考价值。

第 2 章 京唐钢铁现状

2.1 京唐钢铁基本概况

京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂项目是纳入国家“十一五”规划纲要的重点工程。2005 年 2 月 18 日, 国家发改委下发“发改工业〔2005〕273 号《关于首钢实施搬迁、结构调整和环境治理方案的批复》”, 批准首钢“按照循环经济的理念, 结合首钢搬迁和唐山地区钢铁工业调整, 在曹妃甸建设一个具有国际先进水平的钢铁联合企业”。2005 年 10 月 9 日, “京唐钢铁联合有限责任公司”在唐山市注册成立。

京唐钢铁计划总投资 677 亿元, 一期工程计划于 2010 年底建成投产, 形成建设规模为生铁 898.15 万吨/年、钢坯 970 万吨/年、钢材 912.82 万吨/年的现代化钢铁联合企业。项目的主要建设内容为: 主流程: 四座 70 孔 7.63m 大型焦炉 (每座焦炉年产焦炭 105 万吨), 两台 500m² 烧结机、一条 504m² 带式焙烧机球团生产线、两座 5500m³ 高炉, 两座 300 吨脱磷转炉、三座 300 吨脱碳转炉、一座双工位 LF 精炼炉、两套 RH 钢水真空精炼炉、一套 CAS 精炼炉、两台 2150mm 和一台 1650mm 双流板坯连铸机, 2250mm、1580mm 热连轧机组各一套, 2230mm、1700mm、1550mm 冷连轧机组各一套; 辅助设施有: 两个 30 万吨级矿石专用泊位、一个 10 万吨级和 15 万吨级散货泊位、11 个 1-5 万吨级成品码头泊位及相关铁路及汽运设施。

配套能源设施有: 供电设施: 两个 220KV 变电站及 13 个 110KV 变电站, 供水设施: 一个 15 万吨/天淡水处理设施、四套 1.25 万吨/天 MED 海水淡化设施、两座 2.4 万吨/天污水处理设施, 供气设施: 两套 7.5 万 Nm³/h 制氧机组、三套 1.1 万 Nm³/min 高炉鼓风机组、三座集中空压机站、两座 30 万 m³ 高炉煤气柜、一座 15 万 m³ 焦炉煤气柜、三座 8 万 m³ 转炉煤气柜, 热电设施: 两套 300MW 燃煤与燃气混烧供热发电机组、两套 150MWCCPP 发电机组 (未投入使用)、两套 35MWCDQ 发电机组、两套 36.5MWTRT 发电机组, 一座能源运行中心。

京唐钢铁总图布置, 在吸收国际、国内先进钢铁厂经验的基础上, 通过深入研究和不断优化, 从原料场、焦化、烧结、炼铁、炼钢、热轧、冷轧到成品码头, 实现了紧密衔接, 一气呵成, 最大限度地缩短物流运距, 做到布局合理、流程紧凑顺畅。钢铁厂整个工艺链衔接非常紧凑, 工序间距压缩到了最小。原料场选择了离码头最近的区域, 而成品库则直接设在了成品码头的后方陆域, 最大限度地减少了原料进厂和成品发送的运输距离, 减少了设施, 降低了运营的成本。首次在大型高炉—转炉界面采用自主集成的“一包到底”技术, 高炉到炼钢的运输最大距离只有 1260 米。转炉到热轧实现了工艺零距

离衔接, 1580 毫米热轧成品库到 1700 毫米冷轧原料库只隔一条马路, 这样不仅大大减少了工艺连接设备, 缩短了物料运输距离, 而且为降低生产成本创造了条件。此外在原料进出厂的皮带运输方面也做到了简捷、高效、距离最短。使京唐钢铁的吨钢占地面积 0.9 平方米, 达到国际先进水平。整个钢铁厂从功能序、空间序、时间序等方面都处于国际先进行列^[31]。

2.2 企业生产主流程

本文所提到的主系统是指主生产流程。京唐钢铁生产主流程包括炼铁（包括烧结、焦化）、炼钢、轧钢，具有国内特大型联合钢铁企业典型的生产工序流程，基本上代表了我国钢铁工艺的最先进的生产流程。图 2.1 所示为京唐钢铁生产主流程简易图^[32]。

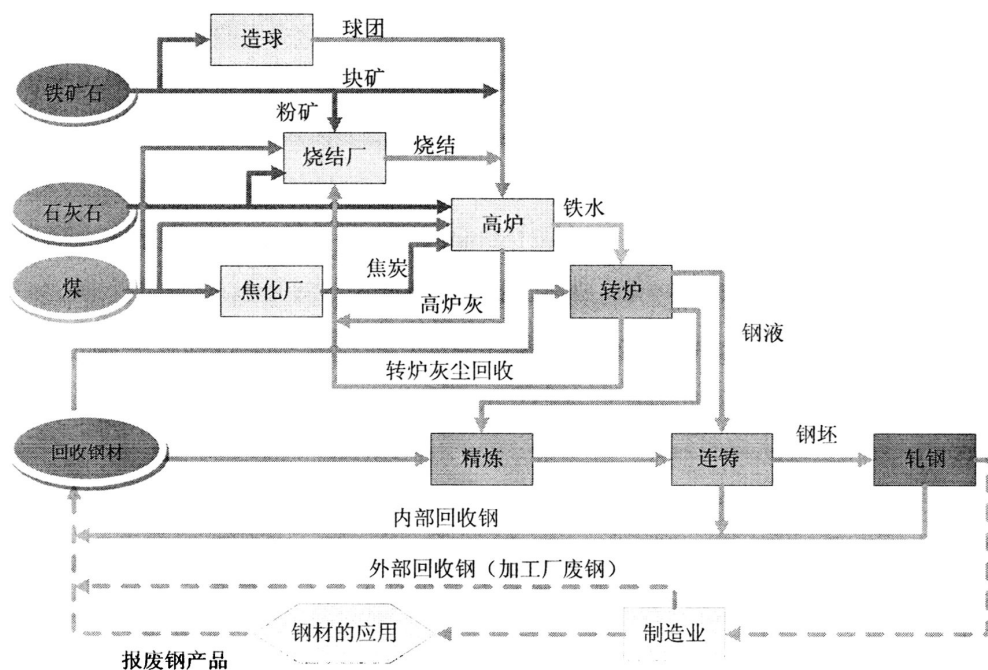


图 2.1 京唐钢铁生产主工艺流程示意图

Fig. 2.1 Sketch map of main manufacturing process in Jingtang steel factory

2010 年 8 月粗钢产量为 66.3488 万 t, 生产流程中铁素流呈现多元复杂的分布, 图 2.2 所示为京唐 2010 年 8 月年生产流程流示意图。

钢铁企业的生产过程实质上是物质、能量的流动过程。钢铁生产流程是包括原料和能源的储运、原料处理（包括烧结、球团等）、焦化、炼铁、铁水预处理、炼钢、钢水二次冶金、凝固成形、铸坯再加热、轧钢及深加工等诸多工序的准连续或间歇生产过程[33]。

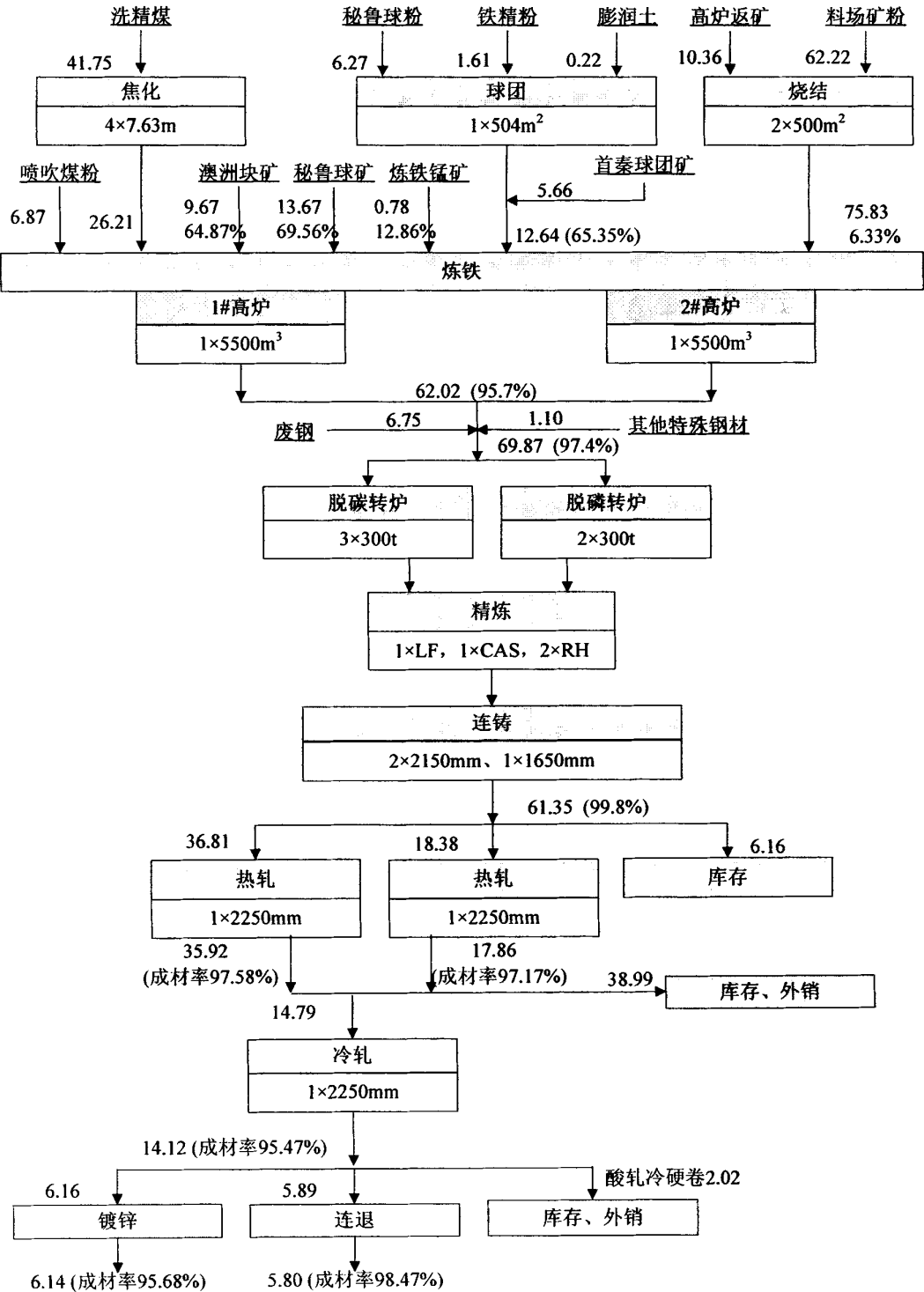


图2.2 京唐钢铁2010年8月生产流程示意图

Fig. 2.2 Sketch map of steel manufacturing flow sheet of Jingtang steel in August, 2010

现代钢铁企业是复杂的铁—煤化工生产系统：含铁等原料经过一系列物理、化学变化从天然资源到钢铁产品或废弃品，组成物质转变系统；含碳等能源经过一系列加工、

转换、改质环节到能源产品或排放物，组成能量转变系统。各种物料沿着产品生命周期的轨迹流动，形成物质流；各种能源沿着转换、使用、排放的路径流动，形成能量流。铁素流是物质流的主要形式，它从铁矿原料开始，掺混一些回收的含铁尘泥、氧化铁皮，经过烧结/球团工序，转变为具有一定品位的熟矿；熟矿和块矿一起进入高炉，经过冶炼，转变为高温铁水；铁水保温进入转炉或电炉，并回收利用连铸和热轧的切头、切尾及废钢，经适度氧化转变为液态钢，再经凝固、加热及压力加工成为一定组织形态的钢材。图 2.3 所示为京唐钢铁的吨钢铁流图。

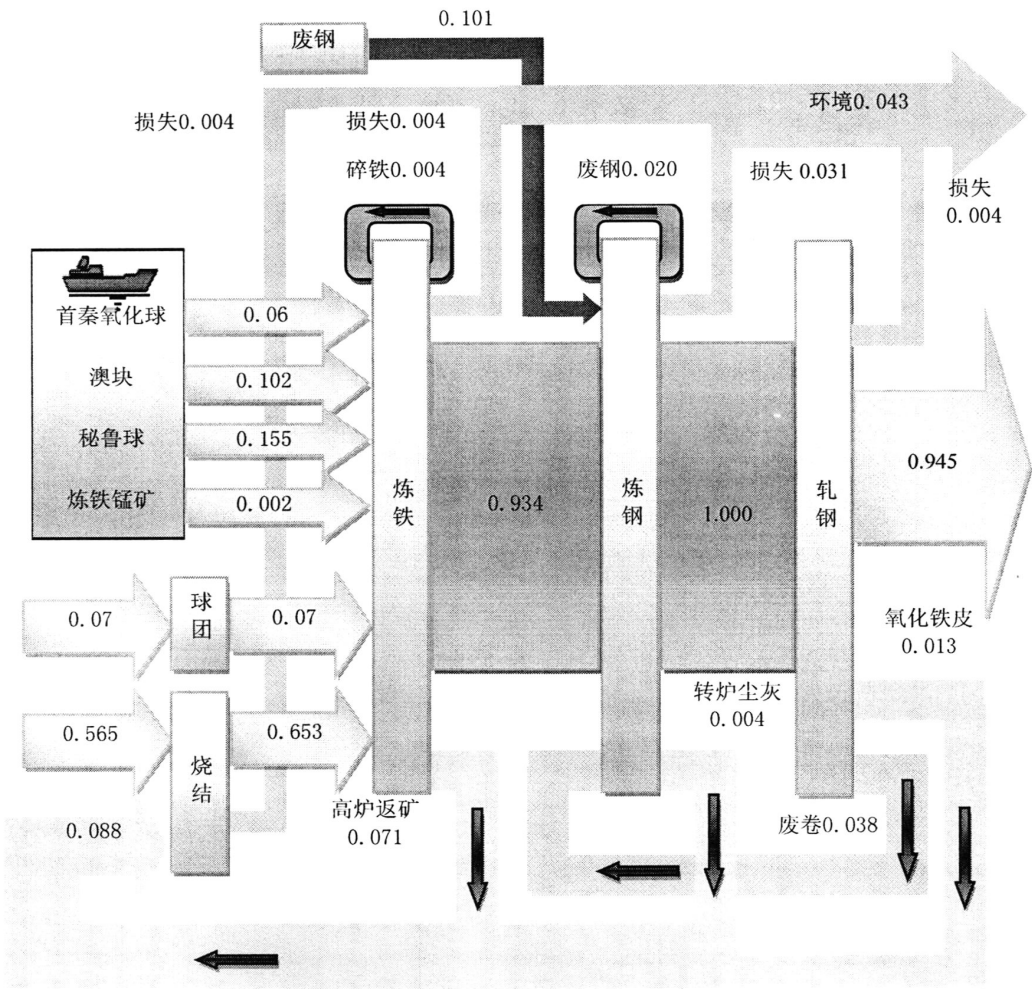


图 2.3 京唐钢铁的铁素流示意图
Fig. 2.3 Sketch map of Fe flows in Jingtang steel factory

2.2.1 主体生产系统

2.2.1.1 产品结构

2010 年 8 年京唐钢铁的粗钢总产量为 66.3488 万 t，连铸坯产量为 61.352 万 t，热轧板为 38.992 万 t，酸轧板的产量为 2.185 万 t，镀锌板为 6.135 万 t，连退板 5.803 万 t。

各车间最终产品产量比例如图 2.4 所示。

京唐钢铁的副产品主要为成品液氧、成品液氮、成品液氮、煤焦油、轻苯、除尘灰、电站粉煤灰、油泥、电和浓盐水。其中浓盐水没有进行外销，其他产品都进行外销。详细数值参见图 2.5 所示。

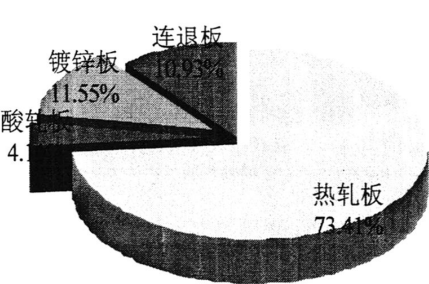


图 2.4 京唐钢铁主产品比例
Fig. 2.4 Main product ratio of Jingtang steel

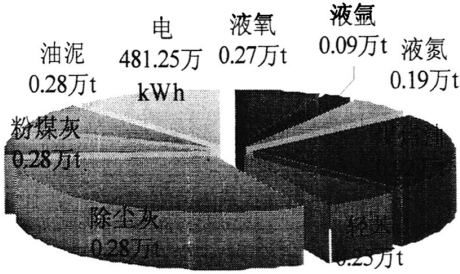


图 2.5 京唐钢铁公司副产品外销量
Fig. 2.5 Byproduct sales amount of Jingtang steel

2.2.1.2 能源结构

(1) 能源结构

2010 年 8 月京唐钢外购的能源主要是是以煤为主，辅以一定量的电和天然气和汽油柴油。所占比例如图 2.6 所示。在购入能源中，有少部分是直接使用的能源，如高炉喷吹用的烟煤、烧结用的无烟煤、外购电等；大部分要经过转换设备加工成二次能源才能使用，如焦炭、电力、蒸汽等。二次能源是一次能源经加工转换生成的能源产品，它包括的范围很广，如电力、蒸汽、煤气等。在钢铁企业，二次能源主要指生产过程中产生的副产煤气和各种余热、余能。其中，余热资源主要指钢厂内产生的中高温余热，一般不包括冷却水等低温余热。2010 年 8 月份，京唐二次能源所占比例如图 2.7 所示。

(2) 工序能耗

表 2.1 所示为京唐钢铁 2010 年 8 月份各工序能耗情况。京唐钢铁的各个工序能耗高于大中型钢铁企业平均工序能耗。烧结工序的实际能耗 61.51kgce/t 烧结矿，高于设计值的 45.7kgce/t 烧结矿，而且与国内先进值也有 22.06kgce/t 烧结矿的差距。焦化工序能耗与大中型钢铁企业平均值差距较大，相 92.24kgce/t 焦炭，而与国内先进企业相比更是高了 134.53kgce/t 焦炭。炼铁工序的实际能耗要高于设计值的 28.14kgce/t 铁，与国内先进企业也有 59.28kgce/t 铁的差距。转炉炼钢的工序能耗是 12.66kgce/t 钢，与国内其他钢铁的负能炼钢有一定差距。轧钢工序能耗低于大中型钢铁企业平均值，但是与国内先进还有一段差距。

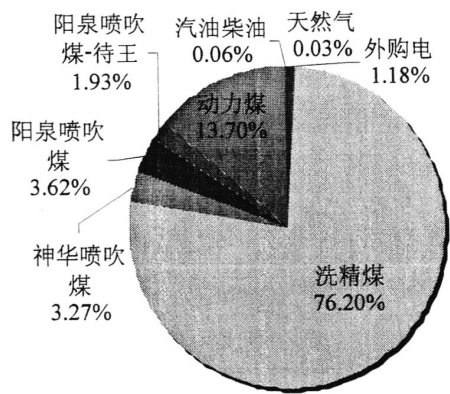


图 2.6 外购能源结构图
Fig. 2.6 Purchased energy structure

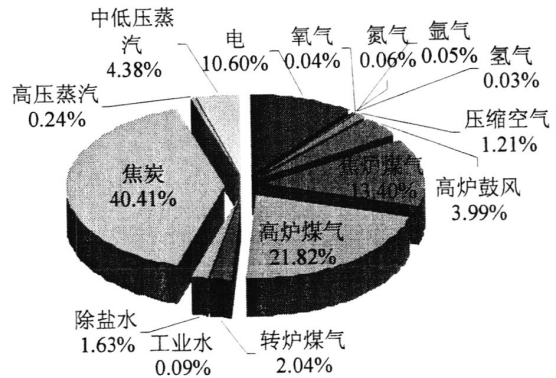


图 2.7 二次能源结构
Fig. 2.7 Secondary energy structure

表 2.1 工序能耗比对表 (单位: kgce/t 产品)
Table 2.1 Process energy comparison table (unit: kgce/t product)

企业	烧结	焦化	炼铁	转炉
京唐实际	61.51	198.13	402.44	12.66
京唐设计	45.7	156.4	374.3	-
大中型企业	52.65	105.89	407.76	-0.16
国内先进企业	39.45 八一	63.60 三明	343.16 涟钢	-13.31 太钢

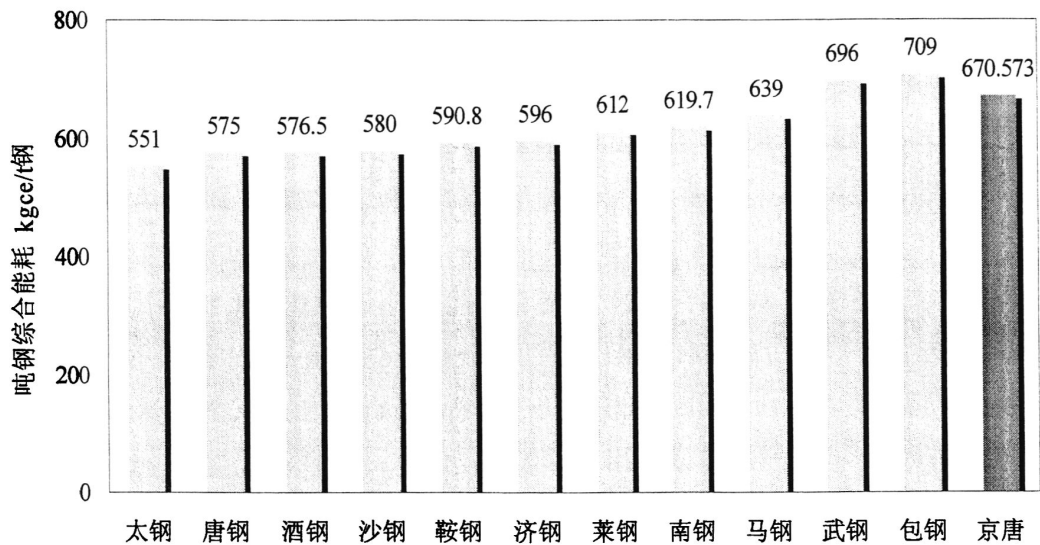


图 2.7 吨钢综合能耗对比情况
Fig. 2.7 Comparison of energy intensity per ton of steel

(3) 吨钢能耗

2010 年太钢吨钢综合能耗为 551kgce/t 钢, 低于全国重点企业平均值的 604.6 kgce/t 钢。京唐钢铁的吨钢综合能耗为 670.573kgce/t 钢, 远远高于全国重点企业平均值, 高出

65.97kgce/t 钢；与太钢的 551kgce/t 钢相比，更是高出 119.57kgce/t 钢。从京唐钢铁自身比较上看，京唐钢铁的吨钢综合能耗与设计时的预计能耗值 581kgce/t 有较大差距，具体差距原因将在第四章进行具体分析。图 2.8 所示为京唐钢铁与其他企业的吨钢综合能耗对比情况。

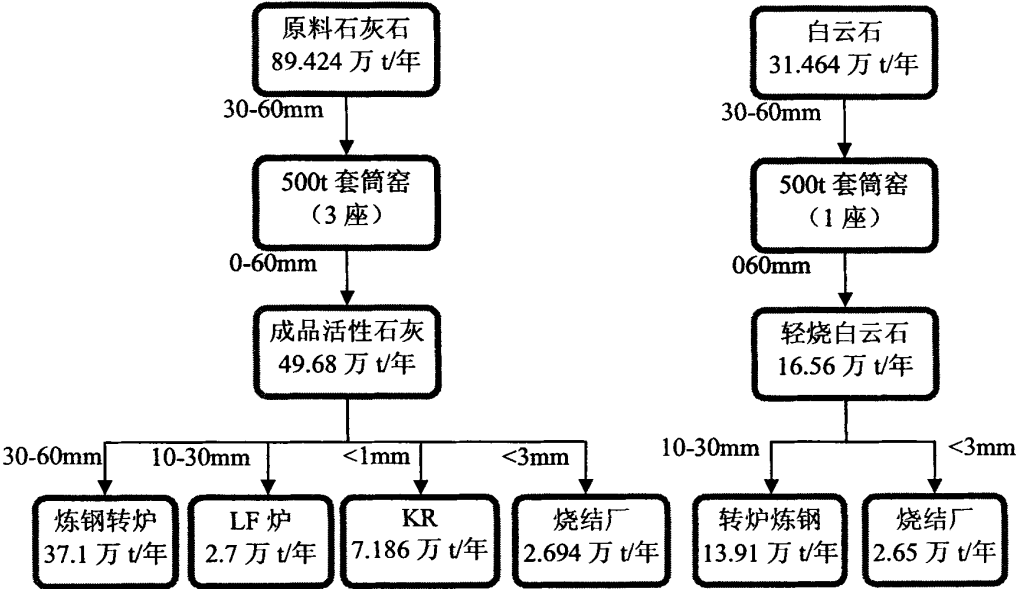


图 2.8 京唐钢铁套筒窑物料平衡图
Fig. 2.8 Sleeve kiln material balance figure of Jingtang steel

2.2.2 子生产系统

主系统包括四个子系统即炼铁系统、炼钢系统、轧钢系统及辅助系统，各系统又包括了不同的生产工序，各工序的生产经济技术指标及能源消耗与回收情况间接或直接影响着工序能耗。

2.2.2.1 炼铁系统

京唐钢铁的炼铁系统包括套筒窑、球团、烧结、焦化、炼铁五个主工序，这三个生产工序在整个生产流程中耗能最多，也是能耗分析的关键部分。

(1) 套筒窑工序

①主要技术指标

京唐钢铁共有 4 座 500m³ 套筒窑，是首钢国际工程公司在消化吸收原贝肯巴赫套筒窑技术的基础上，对现有套筒窑技术进行了改进，创造出具有首钢特色的套筒窑新技术。通过对其热工系统的改进优化，采用全自动化控制系统，可使京唐钢铁套筒窑可适应 60mm 以下较小粒度的石灰石原料，一方面解决原料供应问题，另一方面可使产品粒度适当减少，更适合京唐钢铁公司炼钢工程双联法冶炼的需要。同时，为满足套筒窑产品

用户对产品粒度、成品质量的多样性要求，在京唐钢铁公司石灰窑项目设计中，采取了全新的石灰成品处理系统，套筒窑的成品石灰和轻烧白云石通过这套深加工系统可以高效地完成筛分、破碎、制粉、贮存、外运等繁琐的深加工过程^[31]。

京唐钢铁套筒窑年产活性石灰 49.68 万 t，轻烧白云石 16.56 万 t。其产品供应转炉炼钢、LF 炉精炼、KR 法铁水脱硫工艺等，物料平衡及粒度分配见图 2.8。表 2.2 所示为 2010 年京唐钢铁套筒窑工序的主要经济技术指标。

表 2.2 套筒窑工序主要技术指标
Table 2.2 Main technical indexes of sleeve kiln process

项目	单位	1-3#套筒窑	4#套筒窑	平均水平
设备规格	台	3	1	-
产品种类		活性石灰石	轻烧白云石	-
产量	万 t	3.936	1.312	1.312
原料粒度	mm	30-60	30-60	30-60
利用系数	t/m ³ ·d	0.91	0.90	0.90
燃料		混合煤气	混合煤气	
煤气热值	kJ/m ³	1500-1800	1500-1800	1500-1800
产品热耗	kJ/kg	4300	4300	4300
产品活性度	mL	340-370	340-370	
烟气粉尘浓度	mg/m ³	-	-	<20
废水利用率	%	-	-	93.3

京唐钢铁 4 座套筒窑，其中 3 座用于生产活性石灰石，另外 1 座用于生产轻烧白云石。产品颗粒度 60-1mm，根据不同的颗粒度分配给不同工序进行生产。对原料、成品系统和石灰窑的生产过程进行烟气除尘，烟气中粉尘浓度<20mg/m³，满足《大气污染物综合排放标准》中二级标准的要求；除尘器捕集下来的粉尘，采用密闭灰罐车运至烧结配料室除尘灰仓回收再利用；对生产废水进行治理，重复利用率 93.3%；污水满足《污水综合排放标准》中一级标准要求，排入总厂生活污水管道，再送至总厂污水处理厂处理后循环使用。

②能耗指标

表 2.3 所示为 2010 年 8 月份京唐钢铁套筒窑工序的能源消耗情况。套筒窑工序平均工序能耗为 164.60kgce/t 烧结矿，与国内同行企业相比，已经接近先进水平。其中，在原始设计中套筒窑工序是不消耗焦炉煤气和高炉煤气，但是在实际生产过程中为了提高燃料的热值和降低煤气的放散率，因此在套筒窑工序中增加了焦炉煤气和高炉煤气。而在最初的设计中也没有氮气的使用，此处氮气的主要作用是吹扫和休风调整使用。

表 2.3 套筒窑工序能源消耗
Table 2.3 Energy intensity of sleeve kiln process

项目	单位	1-3#套筒窑	4#套筒窑	总计
电	×10 ⁴ kW·h	194.34	64.78	259.12
工业水	×10 ⁴ m ³	0.0070	0.0023	0.0093
氮气	×10 ⁴ m ³	2.34	0.79	3.13
压缩空气	×10 ⁴ m ³	682.24	227.41	909.65
焦炉煤气	×10 ⁴ m ³	12.75	4.25	17
高炉煤气	×10 ⁴ m ³	11.25	3.75	15
转炉煤气	×10 ⁴ m ³	2055.15	685.05	2740.20

(2) 烧结工序

①主要技术指标

京唐钢铁烧结分厂共有两台 550m² 烧结机，设计年产烧结矿 1132.56 万 t，其烧结机有效利用系数 1.35t/(m·h)，台时产量 750t。烧结主抽风机为引进的 2 台 howden 风机，负压 19kPa。为最大限度地发挥烧结机生产能力，采用了挡板加宽技术和厚料层烧结梯形布料技术，使烧结机台车宽度由原来的 5m 加宽至 5.5m，烧结面积由 500m² 增加到 550m²。布料厚度设计为 750mm，之后改造将布料厚度提高到 780mm。

表 2.4 和表 2.5 所示为 2010 年京唐钢铁烧结工序的主要经济技术指标。由表 2.4 中可以看出烧结机的料层厚度为 780mm，大于设计时的 750mm。而且当料层厚度增大时，烧结机的利用系数、+3mm 粒级、转鼓指数和作业率都有所提高，而固体燃耗则要减少了 0.7kg/t。表 2.5 显示了烧结矿配矿比例情况，京唐钢铁的烧结矿石原料主要是地方粉、澳粉、巴西卡拉粉、巴西烧结粉和扬地粉，还有部分其他部门回收来的钢渣和氧化铁皮。

表 2.4 烧结工序主要生产指标
Table 2.4 Main production indexes of sintering plant process

料层厚度 /mm	利用系数 /(t·m ⁻² ·h ⁻¹)	+3mm 粒级 /%	转鼓指数 /%	固体燃耗 /(kg·t ⁻¹)	w(TFe) /%	w(FeO) /%	筛分指数 /%	作业 率 /%
750	0.90	71.22	75.92	49.00	57.08	6.89	6.70	98.7
780	1.04	75.68	77.65	48.30	57.09	7.70	6.50	99.8

表 2.5 烧结矿配矿比例
Table 2.5 Main production indexes of sinter plant process

指标	地方粉	澳粉	巴西卡拉粉	巴西烧结粉	扬地粉	除尘灰	加拿大粉	钢渣	氧化铁皮
比例/%	5	21	16	14	31	0	0	2	1

② 能耗指标

表 2.6 所示为 2010 年 8 月份京唐钢铁烧结工序各车间能源消耗和回收情况。该月烧结矿的产量为 75.91 万 t，供给炼铁厂 75.83 万 t，其余部分供给炼钢工序进行炼钢作业。京唐钢铁烧结工序能耗为 61.51kgce/t 烧结矿，与国内同行企业相比，还有一定差距（国内最先进企业八一钢厂为 39.45kgce/t 烧结矿，国内烧结工序平均能耗为 52.65kgce/t 烧结矿），并且这个能耗数值与设计值的 45.7kgce/t 烧结矿有更大差距。单位产品的蒸汽回收量为 54.01kg/t 烧结矿，其中中压蒸汽为 40.45kg/t 烧结矿，低压蒸汽为 13.56kg/t 烧结矿。

表 2.6 烧结工序能源种类
Table 2.6 Energy kinds of sintering plant process

	项目	单位	烧结厂
消耗产品	电	$\times 10^4 \text{kW}\cdot\text{h}$	3204.90
	工业水	$\times 10^4 \text{m}^3$	0.72
	除盐水	$\times 10^4 \text{m}^3$	3.89
	氮气	$\times 10^4 \text{m}^3$	0.0173
	压缩空气	$\times 10^4 \text{m}^3$	732.34
	中压蒸汽	$\times 10^4 \text{t}$	1.77
	焦炉煤气	$\times 10^4 \text{m}^3$	127.70
	高炉返矿	$\times 10^4 \text{t}$	10.36
	自产筛下焦末(高炉)	$\times 10^4 \text{t}$	2.15
	自产筛下焦末(焦化)	$\times 10^4 \text{t}$	1.12
	自产焦粉(干基)	$\times 10^4 \text{t}$	0.26
回收产品	中压蒸汽	$\times 10^4 \text{t}$	3.07
	低压蒸汽	$\times 10^4 \text{t}$	1.03

(3) 球团工序

① 主要技术指标

京唐钢铁为了满足 5500m³ 特大型高炉的精料要求，建立了一条年产 400 万 t 球团矿的生产线，采用有效面积为 504m² 的带式球团焙烧机。该球团矿生产线由首钢国际工程公司设计，采用世界先进的带式球团焙烧机技术，这种球团机具有单机生产能力大、对原料适应性强、燃料消耗低、设备运行可靠、环保指标好的特点和优势。主体设备为一台 504m² 的带式焙烧机，分鼓风干燥段、抽风干燥段、预热段、焙烧段、均热段和一冷段、二冷段 7 个工艺段。原料采用 70% 巴西进口赤铁矿粉和 30% 磁铁矿粉，球团矿具体的参数见表 2.7。带式焙烧机将干燥、预热、焙烧、冷却全部工艺过程集中在一台设备上进行，特别适宜适用赤铁矿粉原料生产球团矿。焙烧燃料采用焦炉煤气，每个烧嘴配自动调节装置，可方便温度调节。它采用了国内制造的直径为 7.5 米造球盘，是目前

国内最大的造球设备，具有单体产量大、自动化水平先进、生产效率高等特点。一冷段 900℃冷却废气直接会焙烧段和预热段，350℃的风箱热风回抽干燥段，350℃的二冷段回热风回鼓风干燥。

表 2.7 球团矿产品参数
Table 2.7 Main product parameters of pellet

指标	TFe /%	FeO /%	SiO ₂ /%	抗压强度 /N	<5mm /%	8-16mm /%
球团矿产品	65.86	0.2	3.6	2983.36	0.28	79.12

②能耗指标

表 2.8 所示为 2010 年京唐钢铁球团矿工序能源消耗情况，2010 年 8 月球团矿的产量为 7.098 万 t，供给炼铁厂 6.982 万 t，供给炼钢工序 131.8t，其余部分送入供应工厂。京唐钢铁球团工序能耗为 32.06kgce/t,这个能耗数值与设计值的 39.49kgce/t 有一段差距。

表 2.8 球团工序能源种类
Table 2.8 Energy kinds of pelletizing process

	项目	单位	烧结厂
消耗产品	电	×10 ⁴ kW·h	53.28
	工业水	×10 ⁴ m ³	0.63
	除盐水	×10 ⁴ m ³	0.00038
	生活水	×10 ⁴ m ³	0.030
	氮气	×10 ⁴ m ³	0.050
	压缩空气	×10 ⁴ m ³	0.277
	焦炉煤气	×10 ⁴ m ³	336.88

(4) 焦化工序

①主要技术指标

在 2010 年 8 月份，京唐钢铁焦化厂 4 座焦炉的产量为 27.41 万 t。4 座焦炉的炭化室高度均为 7.63m，达设备大型化的要求。这种 7.63m 焦炉是既有废气循环又含燃烧空气分段供给的“组合火焰型”焦炉，年产焦炭 210 万吨。熄焦系统采用干法熄焦装置。表 2.9 为自产焦炭的技术指标。

表 2.9 自产焦炭的技术指标
Table 2.9 Main technical indexes of coke

指标	水分 /%	挥发分 /%	灰分 /%	固定碳 /%	S /%	M40 /%	M10 /%
焦炭	0.2	1.24	12.18	86.38	0.86	91.03	5.5
指标	CRI /%	CSR /%	>80mm /%	60-80mm /%	40-60mm /%	25-40mm /%	<25mm /%
焦炭	22.3	68.7	10.01	32.69	41.69	12.56	3.04

②能耗指标

京唐钢铁的焦化厂消耗的能源介质包括：电、工业水、除盐水、生活水、氮气、压缩空气、中压蒸汽、焦炉煤气、高炉煤气、洗精煤，其中洗精煤为外购产品，其余能源介质由京唐钢铁能源中心统一调配。表 2.10 所示为 2010 年 8 月首钢焦化工序各焦炉能源消耗情况。焦化厂的焦炉均采用了干法熄焦技术，回收了电力及蒸汽，共有 2 套 CDQ 发电机组。2010 年 8 月份焦化厂的焦炭生产为 27.41 万 t，总能耗 47.24 万 tce，焦化工序能耗为 198.13kgce/t 焦炭，比设计的炼焦工序能耗 105.89kgce/t 焦炭高出 92.24kgce/t 焦炭，仍有很大节能潜力。

表 2.10 焦化工序能源种类
Table 2.10 Energy kinds of coking process

	项目	单位	焦化厂
消耗产品	电	×10 ⁴ kW·h	2040.07
	工业水	×10 ⁴ m ³	44.67
	除盐水	×10 ⁴ m ³	10.74
	生活水	×10 ⁴ m ³	1.2128
	氮气	×10 ⁴ m ³	415.86
	压缩空气	×10 ⁴ m ³	302.85
	中压蒸汽	×10 ⁴ t	4.59
	焦炉煤气	×10 ⁴ m ³	3399.5
	高炉煤气	×10 ⁴ m ³	9645.0
	洗精煤	×10 ⁴ t	41.7539
回收产品	电	×10 ⁴ kW·h	1600.79
	焦炉煤气	×10 ⁴ m ³	13745.00
	中压蒸汽	×10 ⁴ t	6.040
	轻苯、精重苯	×10 ⁴ t	0.339
	焦油	×10 ⁴ t	1.122
	自产筛下焦末（焦炉）	×10 ⁴ t	2.805
	自产湿熄焦粉	×10 ⁴ t	0.549
	自产焦粉(干)	×10 ⁴ t	0.413

(5) 炼铁工序
①主要技术指标

2010 年 8 月份京唐钢铁炼铁厂生铁产量为 62.02 万 t，高炉工序能耗为 402.44kgce/t 铁，其中焦比 429.5kg/t 铁，煤比为 109.78kg/t 铁，高炉风温平均为 1298.5℃。表 2.11 为 2010 年 8 月份首钢炼铁工序各高炉主要经济技术指标，对比可见，2#高炉生产技术水平比 1#高炉要高出一些，主要因为 1#高炉没有正常运行。

②能耗指标

京唐钢铁炼铁厂能源消耗构成中焦炭、煤粉所占炼铁工序能耗比例最高，占炼铁能耗的 63.14%；焦炉煤气和高炉煤气所占炼铁工序能耗比例为 13.36%；电耗占炼铁能耗较少为 1.03%；蒸汽和水耗较小，几乎可以不计。由此可见，降低炼铁焦比和提高煤比是降低炼铁工序的重点和关键所在。而能源回收的多少也会直接影响炼铁工序能耗的大小，因此提高能源回收率也可以降低炼铁工序能耗。

表 2.11 炼铁工序主要技术指标
Table 2.11 Main technical indexes of iron-making process

项目	单位	1#高炉	2#高炉
高炉容积	m ³	5500	5500
生铁产量	万 t	24.80	37.22
利用系数	t/m ³ ·d	1.82	2.23
热风温度	℃	1292	1305
入炉矿石品位	%	63.88	63.84
入炉焦比	kg/t	466	393
富氧率	%	3.5	3.8
高炉渣量	kg/t	251	255
吨铁耗矿量	kg/t	1200	1507
铁水一级品率	%	90	92
铁包装准率	%	83	81

表 2.12 所示为 2010 年 8 月份的炼铁工序各高炉能源实物量单耗指标。对比京唐钢铁现运行的 2 座高炉的能耗指标，可见 2#高炉的二次能源及清洁能源（如工业水、氧气等）的利用率相对而言比较高。另外，炼铁工序回收的能源以高炉煤气和电力为主，而 2#高炉的回收电力能力远大于 1#高炉，这主要是因为京唐钢铁的 1#高炉的运行存在一定问题，需要进行技术改造，提高其生产能力。在统计了 2010 年 8 月份炼铁工序各高炉能源消耗与回收量后，依据能源折算系数就可以计算出各高炉炼铁过程单位产品能耗为 481.27kgce/t 铁，高炉工序能耗为 402.44kgce/t 铁，比设计的高炉工序能耗 374.3kgce/t 铁高出 28.14kgce/t 铁，仍有很大节能潜力。因此，炼铁工序是京唐钢铁节能降耗的重点开发工序。

高炉炼铁过程的总能耗为 71.67 万 tce，其中上流工序产品的能耗为 30.36 万 tce，辅助产品的能耗为 3.58 万 tce，自产产品的能耗为 32.52 万 tce，外购产品的能耗为 5.21 万 tce。回收产品的能耗为 16.55 万 tce。炼铁工序消耗的新水量为 47.08 万 m³，补水率为 1.23%；电的消耗量为 2975.24 万 kW·h，回收量为 1842.85 万 kW·h，单位产品回收电量为 29.72kW·h/t 铁；高炉煤气的回收量为 106914.8 万 m³，单位产品回收高炉煤气量为

796.96m³/t 铁。

表 2.12 炼铁工序能源种类
Table 2.12 Energy kinds of iron-making process

项目		单位	1#高炉	2#高炉
消耗 产品	自产烧结矿	×10 ⁴ t	0	75.83
	自产球团矿	×10 ⁴ t	6.59	0.40
	自产焦炭	×10 ⁴ t	11.56	14.65
	电	×10 ⁴ kW·h	2795.88	2662.61
	工业水	×10 ⁴ m ³	21.26	24.6
	除盐水	×10 ⁴ m ³	0.61	0.61
	生活水	×10 ⁴ m ³	0.068	0.068
	氧气	×10 ⁴ m ³	94.32	865.45
	氮气	×10 ⁴ m ³	1412.90	1412.48
	压缩空气	×10 ⁴ m ³	859.87	701.82
	高炉鼓风	×10 ⁴ m ³	34130.8	37096.5
	中压蒸汽	×10 ⁴ t	0.64	0.65
	焦炉煤气	×10 ⁴ m ³	197.60	700.30
	高炉煤气	×10 ⁴ m ³	24998.2	24426.40
	自产焦粉(干基)	×10 ⁴ t	0	0.15
	神华喷吹煤	×10 ⁴ t	1.02	1.53
	阳泉喷吹煤	×10 ⁴ t	1.13	1.69
	阳泉喷吹煤-特王	×10 ⁴ t	0.60	0.90
回收 产品	电	×10 ⁴ kW·h	1842.85	
	高炉煤气	×10 ⁴ m ³	51559.3	55355.50

2.2.2.2 炼钢系统

京唐钢铁的炼钢工序主要包括两座 300 吨脱磷转炉、三座 300 吨脱碳转炉、一座双工位 LF 精炼炉（300 吨）、两套 RH 钢水真空精炼装（300 吨）、一套 CAS 精炼炉、两台 2150mm 和一台 1650mm 双流板坯连铸机。

表 2.13 所示为 2010 年 8 月份京唐钢铁炼钢工序转炉炼钢主要技术经济指标。其钢产量为 66.3488 万 t；转炉的平均吹损率为 10.79%；产生的钢渣总量为 0.86 万 t；钢铁料消耗量为 68.77 万 t，其中铁消耗了 62.02 万 t，废钢消耗 6.75 万 t（其中有外购废钢 1.54 万 t），废钢比是 10.89%。

京唐炼钢系统消耗的能源种类较多，主要是焦炉煤气、氧气、氮气、氩气、压缩空气、水、电等，同时炼钢过程中产生二次能源转炉煤气和蒸汽。表 2.14 所示为 2010 年 8 月京唐钢铁的转炉炼钢工序的能源消耗与回收，2010 年 8 月京唐钢铁的炼钢全厂综合能耗为 49.08kgce/t 钢。

经过计算，得出转炉工序的工序能耗为 12.66kgce/t；精炼工序的能耗为 15.91kgce/t；连铸工序的能耗为 19.05kgce/t。炼钢过程的总能耗为 35.20 万 tce，其中上流工序产品的

能耗为 30.09 万 tce，辅助产品的能耗为 4.70 万 tce，自产产品的能耗为 0.41 万 tce。回收产品的能耗为 2.09 万 tce。

表 2.13 炼钢工序主要技术指标
Table 2.13 Main technical indexes of steel-making process

项目	单位	转炉
钢产量	10 ⁴ t	66.3488
转炉数量	t×座	300×5
吹损率	%	10.79
钢渣产量	10 ⁴ t	0.86
钢铁料消耗	10 ⁴ t	68.77
铁消耗	10 ⁴	62.02
废钢消耗	10 ⁴ t	6.75
废钢比	%	10.89

表 2.14 炼钢工序能源种类
Table 2.14 Energy kinds of steel-making process

	项目	单位	炼钢工序
消耗产品	自产石灰	×10 ⁴ t	5.07
	自产烧结矿	×10 ⁴ t	0.77
	自产球团矿	×10 ⁴ t	0.01
	自产焦炭	×10 ⁴ t	0.01
	高炉铁水	×10 ⁴ t	62.02
	电	×10 ⁴ kW·h	4601.31
	工业水	×10 ⁴ m ³	42.81
	除盐水	×10 ⁴ m ³	31.39
	生活水	×10 ⁴ m ³	0.25
	氧气	×10 ⁴ m ³	3401.43
	氮气	×10 ⁴ m ³	2687.32
	氩气	×10 ⁴ m ³	151.84
	压缩空气	×10 ⁴ m ³	6195.95
	高压蒸汽	×10 ⁴ t	1.18
	中压蒸汽	×10 ⁴ t	3.26
	焦炉煤气	×10 ⁴ m ³	665.7
回收产品	转炉煤气	×10 ⁴ m ³	5129.1
	蒸汽	×10 ⁴ t	5.30

炼铁工序消耗的新水量为 74.45 万 m³，补水率为 2.01%；电的消耗量为 4601.31 万 kW·h，单位产品耗电量为 75.00(kW·h)/t 钢；蒸汽的总回收量为 5.30 万 t，其中中压蒸汽回收量为 2.14 万 t，低压蒸汽回收量为 3.16 万 t，单位产品回收蒸汽量为 0.080t/t 钢；转炉煤气的回收量为 5129.10 万 m³，单位产品回收转炉煤气量为 77.31m³/t 钢。

2.2.2.3 轧钢系统

①主要技术指标

京唐钢铁在现有 2250mm、1580mm 热连轧机组和 2230mm、1700mm 冷连轧机组，其中 2250mm、1580mm 热连轧机组都已正式投入生产，1700mm 冷连轧机的酸轧、镀锌和连退已正式生产，罩退板正在试生产。2230mm 冷连轧机组，机组已基本建设完成，正在进行生产测试。图 2.9 为轧钢工序的具体组成和板材流向。

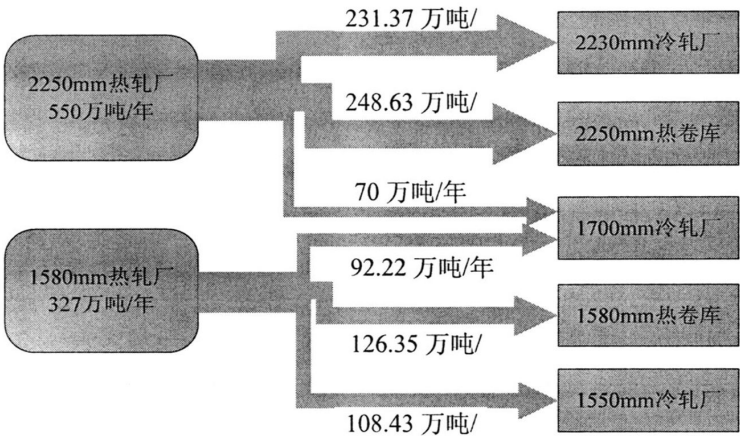


图 2.9 京唐轧钢工序组成和板材流向
Fig. 2.9 Main equipments and metal plate flow direction of steel rolling

表 2.15 所示为 2010 年 8 月份京唐钢铁轧钢工序基本情况。热轧厂的产量是 53.78 万 t，其中 2250mm 的产量是 35.92 万 t，1500mm 的产量是 17.86 万 t。冷轧的消耗的热轧卷为 14.79 万 t，产量是 14.12 万 t，其中酸轧卷是 2.19 万 t，占 15.47%，镀锌卷产量是 6.13 万 t，占 43.44%，连退卷产量是 5.80 万 t，占 41.09%。全厂成材率平均达到 98.19%，居国内先进水平行列。

表 2.15 炼钢工序主要技术指标
Table 2.15 Main technical indexes of steel rolling process

	项目	成材率/%	合格率/%	产量/×10 ⁴ t
热轧	2250mm	97.9	99	35.92
	1500mm	97.48	98.95	17.86
	1700mm 酸轧	96.3	99.66	14.24
冷轧	1700mm 连退	99.26	99.5	5.80
	1700mm 镀锌	100.01	99.67	6.14

②能耗指标

表 2.16 所示为 2010 年 8 月份京唐钢铁轧钢系统各工序燃料实物量单耗情况，轧钢系统能源消耗主要分为两大部分：一是加热炉燃料消耗，二是轧机电力消耗。轧钢系统的能耗在炼钢生产流程中占有一定的比重，2010 年 8 月份轧钢系统工序总能耗为 5.93 万 tce，加热炉燃料消耗是 2.74 万 tce，占轧钢生产系统总能耗的 46.23%；电力能耗总量是 2.65 万 tce，占轧钢生产系统总能耗的 44.68%；回收产品能耗为 0.60 万 tce。

表 2.16 轧钢工序能源种类
Table 2.16 Energy kinds of steel rolling process

	项目	单位	轧钢工序
消耗产品	电	$\times 10^4 \text{kW}\cdot\text{h}$	7223.80
	工业水	$\times 10^4 \text{m}^3$	53.31
	除盐水	$\times 10^4 \text{m}^3$	8.37
	生活水	$\times 10^4 \text{m}^3$	0.11
	氧气	$\times 10^4 \text{m}^3$	5.39
	氮气	$\times 10^4 \text{m}^3$	394.55
	氢气	$\times 10^4 \text{m}^3$	12.69
	压缩空气	$\times 10^4 \text{m}^3$	1782.14
	中压蒸汽	$\times 10^4 \text{t}$	1.70
	焦炉煤气	$\times 10^4 \text{m}^3$	3501.5
	高炉煤气	$\times 10^4 \text{m}^3$	3183.4
	转炉煤气	$\times 10^4 \text{m}^3$	662.1
	天然气	$\times 10^4 \text{m}^3$	12.69
	天然气	$\times 10^4 \text{m}^3$	12.69
回收产品	蒸汽	$\times 10^4 \text{t}$	4.0302

经过计算，得出 2250mm 热轧的工序能耗为 73.42kgce/t；1580mm 热轧的能耗为 87.75kgce/t；1700mm 冷轧的能耗 87.76kgce/t。炼铁工序消耗的新水量为 61.79 万 m³，补水率为 2.43%；电的消耗量为 7223.80 万 kW·h；蒸汽的总回收量为 4.03 万 t，其中中压蒸汽回收量为 3.27 万 t，低压蒸汽回收量为 0.76 万 t。

2.3 企业辅助工序

京唐钢铁的配套能源设施有：供电设施：两个 220KV 变电站及 13 个 110KV 变电站，供水设施：一个 15 万吨/天淡水处理设施、四套 1.25 万吨/天 MED 海水淡化设施、两座 2.4 万吨/天污水处理设施，供气设施：两套 7.5 万 Nm³/h 制氧机组、三套 1.1 万 Nm³/min 高炉鼓风机组、三座集中空压机站、两座 30 万 m³ 高炉煤气柜、一座 15 万 m³ 焦炉煤气柜、三座 8 万 m³ 转炉煤气柜，热电设施：两套 300MW 燃煤与燃气混烧供热发电机组、两套 35MWCDQ 发电机组、两套 36.5MWTRT 发电机组，一座能源运行中心。

2.3.1 电系统

2010 年 8 月份京唐钢铁总电量为 4.15 亿 kW·h，其中受电量为 0.53 亿 kW·h；自备电站发电总量是 3.28 亿 kW·h，约占京唐钢铁总电总量的 78.88%左右；TRT 发电量是 0.18 亿 kW·h；CDQ 发电量是 0.16 亿 kW·h；外送电量是 0.048 亿 kW·h。表 2.17 所示为 2010 年 8 月京唐钢铁电量情况。

表 2.17 2010 年 8 月京唐钢铁电量情况
Table 2.17 Electricity of Jingtang steel in 2010, August

	单位	电量/ $\times 10^4 \text{kW}\cdot\text{h}$	所占比例/%
受电量	曹铁	2483.25	5.98
	曹轧	2843.50	6.84
发电量	热电 1#机组发电	16609.90	40.00
	热电 2#机组发电	16143.40	38.88
	TRT 发电	1842.85	4.44
	CDQ 发电	1600.79	3.86
合计		41523.69	100

2.3.2 煤气系统

焦炉煤气的主要用户有焦化部、燃气分厂、热电分厂、热轧作业部、炼铁作业部、炼钢作业部、冷轧作业部、盾石建材和办公室等，其中炼钢分厂需要经过加压的焦炉煤气；高炉煤气的用户主要有焦化部、热电分厂、热轧作业部、炼铁作业部、炼钢作业部和盾石建材等；转炉煤气的主要用户有热轧作业部、炼钢作业部等。高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气三种煤气的热值基本处于国内煤气热值的平均水平。这三种煤气是副产二次能源，有着较高的二次利用价值，提高其回收率有利于降低工序能耗，节约能源成本。

表 2.18 给出了 2010 年 8 月份京唐钢铁三种煤气发生量及放散率。2010 年 8 月份京唐钢铁煤气系统三种煤气的消耗总量为 125788.9 万 m^3 ，焦炉煤气放散率为 4.33%，高炉煤气放散率较高为 11.50%，转炉煤气放散率为 2.12%。未来实施二期工程，煤气的供需平衡应是重点考虑的问题，如何调整和重新分布煤气的供应以适应生产的要求是关键。

表 2.18 2010 年 8 月京唐钢铁电消耗情况
Table 2.18 Electricity of Jingtang steel in 2010, August

单位	产生量/ $\times 10^4 \text{m}^3$	消耗量/ $\times 10^4 \text{m}^3$	放散率/%
焦炉煤气	13745.00	13120.40	4.33
高炉煤气	106914.80	103028.47	11.50
转炉煤气	5129.10	5009.10	2.12

2.3.3 蒸汽系统

京唐钢铁的启动锅炉产生高压蒸汽供应炼钢分厂使用，高压蒸汽的压力是 2.0-3.82MPa，温度是 450℃。京唐钢铁中压蒸汽的发生源为焦化部、启动锅炉、自备电站、2250mm 热轧、1580mm 热轧、烧结分厂、炼钢分厂等，产生的中压蒸汽进入公司蒸汽管网，供用户使用，中压蒸汽压力为 0.78—1.27MPa，温度为 170—280℃。2250mm 热轧、1580mm 热轧、烧结分厂和炼钢分厂产生的低压蒸汽只是供应本部门使用，不向

外供应。低压蒸汽的压力为 0.39—0.78Mpa，温度为 142—170℃。

表 2.19 是 2010 年 8 月京唐钢铁蒸汽情况，高压蒸汽的发生量是 1.21 万 t，主要供给炼钢分厂精炼使用，消耗量是 1.18 万 t，生产使用的损失率是 2.91%。中压蒸汽生产总量为 19.66 万 t，全厂生产需要中压蒸汽总量为 16.80 万 t，消耗用户主要为焦化、海水淡化及炼铁工序，蒸汽产量和蒸汽压力基本能够满足生产需要。但是中压蒸汽的损失率比较大，达到是 14.57%。低压蒸汽的产生量是 4.94 万 t，主要供给本部门使用。

表 2.19 2010 年 8 月京唐钢铁蒸汽情况
Table 2.19 Vapourof Jingtang steel in 2010, August

	单位	高压蒸汽/t	中压蒸汽/t	低压蒸汽/t
生产	焦化部		60398	
	启动锅炉	12136	36541	
	30w 电站		28555	
	2250mm 热轧		22782	6036
	1580mm 热轧		9966	1518
	烧结分厂		20450	10251
	炼钢分厂		17957	31551
	焦化部		45904	
消耗	海水淡化		76718	
	制氧厂		5383	
	柜区		130	
	煤气制氢		387	
	启动锅炉		3720	
	热交换站		2250	
	2250mm 热轧		894	6036
	1580mm 热轧		894	1518
	炼铁分厂		12878	
	烧结分厂		7467	10251
	供应部冷固球团		744	
	炼钢分厂	11783	1098	31551
	1550mm 冷轧		1488	
	1700mm 冷轧		7633	
	办公室		406	

2.3.4 换热站

京唐钢铁共有 5 个换热站，其中 2#和 3#换热站含制冷站，产生的冷冻水供全厂空调使用。1#换热站的主要用户是原料厂区及附近区域；2#换热站的主要用户是烧结、焦化、球团及附近区域；3#换热站的主要用户是炼钢、炼铁及附近区域；4#换热站的主要用户是 1580mm 热轧、1550mm 冷轧 1700mm 冷轧、及附近区域轧钢区磨棍间及冷轧车

间成品库等；5#换热站的主要用户是 2230mm 冷轧、2250 热轧及附近区域轧钢区磨棍间及冷轧车间成品库等。表 2.20 是换热站设备的技术参数。

表 2.20 换热站设备技术参数表
Table 2.20 Main equipment parameters of heat exchanger

名称	1#换热站	2#换热站	3#换热站	4#换热站	5#换热站
采暖用热负荷/kW	16000	15300	10000	12000	8000
空调用冷负荷/kW		1160	9300		
采暖热交换形式	汽-水	汽-水	汽-水	汽-水	汽-水
采暖供回水温度/℃	95-70	95-70	95-70	95-70	95-70
采暖循环水量/t/h	551	551	551	413	276
制冷机形式		溴化锂	溴化锂		
夏季空调冷却水 循环水量/t/h		33-38	33-38		
耗蒸汽量/t/h		1.34	12.06		

2.3.5 制氧厂

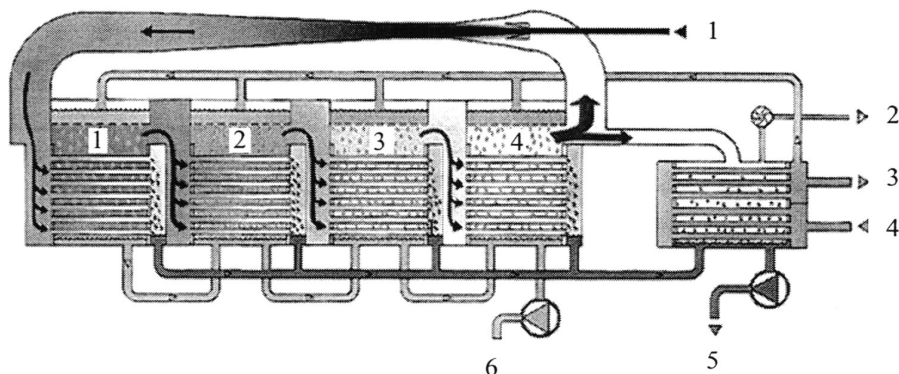
京唐钢铁现阶段的制氧设备主要是两套 7.5 万 Nm³/h 制氧机组，表 2.21 是一台制氧站的设备技术参数表。2010 年 8 月京唐钢铁氧气发生量是 4390.78 万 m³，主要供应用户是炼铁部、炼钢部、热轧部、供应部，消耗量是 4381.59 万 m³，损失率是 0.2%。氮气总的发生量是 6821.48 万 m³，其中 3.0Mpa 的氮气产生量是 2425.98 万 m³，主要供应用户是炼铁部和炼钢部，消耗量是 2374.82 万 m³，损失率是 2.1%。1.0Mpa 的氮气产生量是 4395.50 万 m³，主要供应用户是煤气柜区、焦化部、炼铁部、炼钢部、热轧部和冷轧部，消耗量是 4138.91 万 m³，损失率是 5.8%。氩气发生量是 151.84 万 m³，主要供应用户是炼铁部、炼钢部、热轧部、供应部，消耗量是 151.84 万 m³。

表 2.21 制氧站的设备技术参数表
Table 2.21 Main equipment parameters of oxygen generation station

产品名称	产量/m ³ /h	纯度/%	压力/MPa
氧气	75000	≥99.6 O ₂	3.1
氮气	25500	含氧≤5×10 ⁻⁶	3.1
氮气	74500	含氧≤5×10 ⁻⁶	1.1
液氧	2000	≥99.6 O ₂	
液氮	2000	含氧≤5×10 ⁻⁶	
氩气	1000	≥99.999 Ar	3.1
液氩	1400	含氧≤1×10 ⁻⁶ ，含氮≤2×10 ⁻⁶	
氦气		氦≥99.999	
氖气		氖≥99.999	
氟气		氟≥99.999	
氙气		氙≥99.999	

2.3.6 海水淡化车间

京唐钢铁对钢铁厂需水量和水质的合理计算,并结合钢铁厂的运行体制,确定了一期海水淡化主体设施分 4 套基于低温多效 (LT-MED) 原理的海水淡化装置,单套设施制水能力 $12500\text{m}^3/\text{d}$,并确定了其主要参数。低温多效蒸馏工艺的具体原理是海水在冷凝器中预热、脱气之后分成两股,一股排回大海,另外一股为进料液。料液加入阻垢剂,引入到蒸发器温度最低的效组中。喷淋系统把料液分布到顶排管上,自上向下的降膜过程中,一部分海水吸收了管束内冷凝蒸汽的潜热而汽化;冷凝液以淡化水导出,蒸汽进下一效组,剩余料液也泵入下一效组中,该效组的操作温度高于上一效组。在新的效组中又重复了蒸发和喷淋过程,直到料液在温度最高的效组中以浓缩液的形式排出。其工艺流程简图如图 2.10。



1 进蒸汽管, 2 NCG 排放管, 3 冷却水排放管,
4 总进水管, 5 成品水管, 6 浓盐水管

图 2.10 海水淡化工艺流程图

Fig. 2.10 Sketch map of sea water desalinization

在京唐钢铁所使用的低温多效海水淡化工艺将低温多效装置与汽轮机及其它低低压汽源组合,可直接利用汽轮机末端或其它低低压汽源的低温、低压蒸汽进行海水淡化,同时该工艺可利用其它压力较高的富余蒸汽进行海水淡化,并实现系统的多工况运行。其中富余蒸汽设计采用的压力还同比降低了 1-2ata,使吨水运行成本同比下降 2-3 元,而其它工况设计利用基本“零”价值的蒸汽(如发电汽轮机排汽等),使吨水运行成本同比下降更多。另外,还将浓盐水送社会盐场晒盐,实现资源的综合利用,进一步降耗减排^[31]。

2.3.7 辅助工序能耗

2010 年 8 月份京唐钢铁辅助工序基本情况:自备电站发电总量是 3.28 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$;高压蒸汽是 1.21 万 t;换热站产生的空调冷冻水是 95.58 万 m^3 ;氧气发生量是 4390.78 万

m³, 氮气总的发生量是 6821.48 万 m³, 氩气发生量是 151.84 万 m³; 高炉鼓风量是 71227.30 万 m³; 压缩空气量是 14694.40 万 m³; 煤气制氢的产量是 12.69 万 m³; 海水淡化产生的除盐水是 67.66 万 m³; 原水作业区产生的工业水是 293.35 万 m³; 污水处理厂产生的回用水是 2.14 万 m³。

表 2.22 所示为 2010 年 8 月份京唐钢铁辅助系统各工序燃料实物量单耗情况, 2010 年 8 月份辅助系统工序总能耗为 20.65 万 tce, 动力煤燃料消耗是 7.61 万 tce, 占总能耗的 36.87%; 电力能耗总量是 6.10 万 tce, 占辅助系统总能耗的 29.54%。回收产品能耗为 0.85 万 tce。

表 2.22 辅助工序能源种类
Table 2.22 Energy kinds of assist process

	项目	单位	辅助工序
消耗产品	电	×10 ⁴ kW·h	17505.11
	工业水	×10 ⁴ m ³	36.75
	除盐水	×10 ⁴ m ³	14.26
	生活水	×10 ⁴ m ³	0.36
	压缩空气	×10 ⁴ m ³	75.89
	中压蒸汽	×10 ⁴ t	8.85
	焦炉煤气	×10 ⁴ m ³	3328.60
	高炉煤气	×10 ⁴ m ³	27397.9
	冷凝水	×10 ⁴ m ³	5.11
	生产-回用水	×10 ⁴ m ³	2.04
	空调水-回水	×10 ⁴ m ³	97.11
	动力煤	×10 ⁴ t	10.66
	天然气	×10 ⁴ m ³	0.53
	原水	×10 ⁴ m ³	290.79
回收产品	蒸汽	×10 ⁴ t	6.51
	冷凝水	×10 ⁴ m ³	5.11
	浓盐水	×10 ⁴ m ³	156.98

第3章 计算模型的建立

3.1 投入产出模型的建立

投入产出分析又称为部门联系平衡分析^[34],或产业关联分析,能够研究一个产业的发展与国民经济以及其它产业的关系,它反映了经济的综合平衡和产业部门间的相互联系。综合平衡是经济良性运转的基础,投入产出分析刻画了部门间的联系,它是用系统的而不是孤立的观点分析各部门的生产经营,较好地反映了经济部门间的依赖关系,用数据准确反映产业间的定量关系。

钢铁企业的投入产出模型,是运用现代数学方法和电子计算机手段,来研究企业内部部门之间或产品之间的投入与产出数量依存关系的经济数学的模型,是一种科学的定量分析方法。这种模型分两个部分,一部分是统计企业的消耗,如生产过程中所消耗的原料、燃料、动力、机器设备和劳动力等;另一部分是企业产出的统计,是指产品生产出来后所分配的去向、流向,即使用方向和数量,例如,用于生产消耗、生活消费和投资。

3.1.1 单级投入产出模型

3.1.1.1 企业能源投入产出表的基本模式

本系统把企业的全部产品分为三大类:自产产品、回收产品和外购产品。企业自产产品指企业自己生产的产品;回收产品指各工序回收的产品;外购产品指钢铁厂从企业范围外所购买的产品。这三大类产品中又分为:能源产品和非能源产品两类。具体模式如表 2.1 所示。

表的纵向分为若干行,各代表投向各道工序消耗物的种类、数量和去向。其中填入前 n 行的能源和非能源是本企业生产的产品;填入后 m 行的是企业外购的或企业回收的各种能源和非能源产品。

表的横向分为若干列,代表企业自产的且作为原料消耗掉的那部分产品(统称中间产品),剩下的三列分别为:产品能值、最终产品产量、产品总量或外购资源需求总量(统称总产品)。

表中 A 、 D 为投入产出系数矩阵。 $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ 为产品能值向量, $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ 为标准煤折算系数向量, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 为最终产品产量向量, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为总产品产量向量, $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$ 为企业回收、外购能源和非能源总量向量。

投入产出表中的每一行都可以根据：

中间产品+最终产品=总产品 (2-1)

这个平衡关系，列出产品分配平衡方程，用矩阵形式表示：

$AX + Y = X$ (2-2)

对式(2-2)进行变换和整理，可以得到：

$X = (I - A)^{-1}Y$ (2-3)

式(2-3)是已知直接消耗系数矩阵 A 和最终产品产量向量 Y ，求总产品向量 X 的矩阵方程。

表 2.1 钢铁企业能源投入产出表
Table.2.1 The energy input-output table of steel enterprise

投入 \ 产出			中间产品	产品 能值	最终 产品	总产品
			1 2 ... n			
自产产品	能源	1 2 ...	A	f_1	y_1	x_1
	非能源	n		f_2 ...	y_2 ...	x_2 ...
回收产品	能源	1 2 ...	D	q_1	0	u_1
	非能源	l		q_2 ...		u_2 ...
外购产品	能源	$l+1$ $l+2$...		q_l q_{l+1} q_{l+2} ...		u_l u_{l+1} u_{l+2} ...
	非能源	n		q_n		u_n

3.1.1.2 直接消耗系数

产品的直接消耗反映了各种产品在生产过程中的直接联系，直接消耗系数就是单位产品对其他产品的消耗数量，它可以从数值上确定产品之间的生产联系的强度。某工序生产的单位产品 i 对物质 j 的直接消耗，称作产品 j 对物质 i 的直接消耗系数。记为 a_{ij} 或 d_{ij} 。将企业内部所有产品的直接消耗系数组合起来，则构成直接消耗系数矩阵，用 A

表示:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

企业自产产品对其回收产品和外购产品的直接消耗系数矩阵用 D 表示:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{l1} & d_{l2} & \cdots & d_{ln} \\ d_{l+1,1} & d_{l+1,2} & \cdots & d_{l+1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}$$

实际上,直接消耗系数 a_{ij} 、 d_{ij} 就是统计期内企业各工序以实物量表示的单位产品的能耗和物质消耗。一般情况下,把某工序生产的能源或非能源产品的回收量用“负消耗”表示。各工序对回收副产品的消耗量,仍用正值表示。

3.1.1.3 完全消耗系数

在任何一种产品的生产过程中,对某种资源(例如第 i 种)除了直接消耗以外,还要通过消耗其他能源和非能源而对这种资源发生一次间接消耗、二次间接消耗,……,直至无穷。产品的直接消耗与各次间接消耗的总和,等于完全消耗。

图 3.1 给出生产单位自产产品 j 对自产产品 i 的完全消耗概念图。图中 a_{ij} 为自产产品 j 对自产产品 i 的直接消耗系数, b_{ij} 为产品 j 对产品 i 的完全消耗。

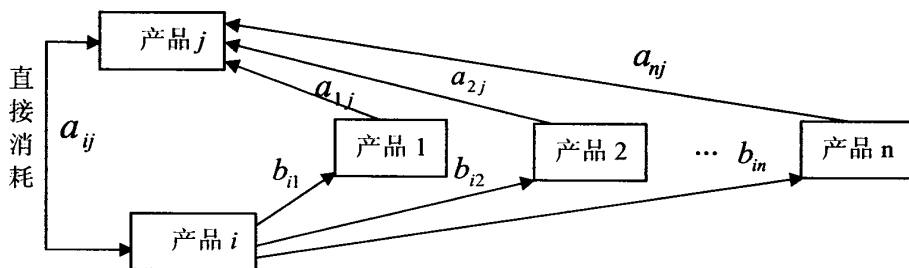


图 3.1 产品 j 对产品 i 的完全消耗概念图

Fig. 3.1 Complete consumption concept chart of product j to product i

依据产品完全消耗系数的定义,建立自产产品 j 对自产产品 i 的完全消耗方程,共有 $n \times n$ 个方程,用矩阵表示如下:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

或写成: $B=A+BA$, 令 $B=B_A$

经整理后得:

$$B_A = (I - A)^{-1} - I \quad (3-4)$$

式(3-4)是已知直接消耗系数矩阵 A , 求自产产品 j 对自产产品 i 的完全消耗系数矩阵的计算公式。式(3-4)中的 $(I-A)^{-1}$ 被称为 Leontief 逆矩阵。为便于区分将自产产品对自产产品的完全消耗系数矩阵用 B_{ij} 表示。

用同样的办法, 还可以建立自产产品对外购产品或回收产品的完全消耗方程。令 D 为自产产品对外购产品的完全消耗系数矩阵, 则自产产品对外购产品的完全消耗系数公式为:

$$B_D = D(I - A)^{-1} \quad (3-5)$$

3.1.1.4 产品能值

产品能值就是单位产品在生产过程中全社会所花费的能源总量。但考虑到按这种定义计算冶金企业的产品能值是不可能实现的。所以, 这里提出的关于冶金企业产品能值的概念限定在钢铁企业这个范畴。企业产品能值, 是这种产品在生产过程中该企业所花费的能源总量。这里假定:

- 1) 企业外购的非能源物资的能值为零;
- 2) 企业外购的一次能源的能值等于其发热值;
- 3) 企业生产的二次能源的能值等于它们在制备过程中所花费的能量再加上它们本身具有的发热值(或能源当量值);
- 4) 某工序生产或回收的副产能源产品作为该工序主产品的负消耗处理;
- 5) 企业回收的各种金属料的能值只计入它们在加工过程中的能值消耗。

结合上述假定分析, 得到能源投入产出表中产品能值, 用矩阵形式表示:

$$F = A^T F + D^T Q \quad (3-6)$$

整理后得:

$$F = [D(I - A)^{-1}]^T Q = B_D^T Q \quad (3-7)$$

在单级投入产出模型的建立过程中,可以实现直接消耗系数、完全消耗系数、总产品产量、产品能值等的计算,根据标准煤折算系数和吨钢能耗的 $e-p$ 分析模型,钢铁企业的能源投入产出模型还可以计算出各工序单位产品的能源消耗量^[35-37]。

3.1.2 多级投入产出模型

3.1.2.1 多级投入产出模型的建立

企业多级投入产出模型,是将企业投入产出表设计为多级结构。多级投入产出模型将为投入产出模型的大型化、产品的细分和微机的实现创造条件。它不仅缩短了编表的周期,而且提高了投入产出表的准确性和实用性。图 3.2 所示为冶金企业多级投入产出模型基本模式,实质为钢铁企业主流程 I/O 表,全面细致地显示了炼铁系统、炼钢系统和轧钢系统三个主要生产系统之间的关系以及各系统自身的能源投入产出情况。

对表 3.2 中的各符号意义进行说明: $A_{j(j=3,2,1)}$ 为直接消耗系数矩阵(即生产不同产品所消耗的其他的本系统产品的实物量单耗); $X_{j(j=3,2,1)}$ 为总产品的产量向量; $Y_{j(j=3,2,1)}$ 为最终产品产量向量; $W_{j(j=3,2,1)}$ 为中间产品产量向量,它是第 i 子系统提供给第 $i+1$ 子系统的原料量; $L_{j(j=3,2,1)}$ 为第 j 子系统消耗前一生产系统产品的消耗系数矩阵(即消耗前一系统产品的实物量单耗); $C_{j(j=3,2,1)}$ 为生产本系统的自产产品所消耗的企业的自产产品的实物量单耗; $H_{j(j=3,2,1)}$ 为生产本系统的自产产品所消耗的企业的回收产品的实物量单耗; $D_{j(j=3,2,1)}$ 为生产本系统的自产产品所消耗的外购产品的实物量单耗; $Z_{j(j=3,2,1)}$ 为自产产品的产量向量; $K_{j(j=3,2,1)}$ 为回收产品的产量向量; $U_{j(j=3,2,1)}$ 为外购产品的产量向量。

多级投入产出模型主要分为两大部分:主流程生产系统投入产出表和辅助生产系统投入产出表。表 3.2 为主流程生产系统投入产出表。它由炼铁生产系统($j=1$)、炼钢生产系统($j=2$)、轧钢生产系统($j=3$)三个投入产出表组成。每相邻生产系统的投入产出表用关联矩阵 L_{ij} 衔接。 L_j 是第 j 生产系统消耗前一级生产系统的产品的消耗系数组成的矩阵。一般情况下,矩阵 L 的行数很少,例如,炼钢系统消耗炼铁系统的原料只有铁水,那么 L 矩阵仅仅是一维行向量。所以,在模型总规模相同的情况下,多级投入产出模型的计算要比普通投入产出模型简单得多。

辅助生产系统由能源转换和原材料生产子系统组成,表 3.3 是企业的辅助生产系统投入产出表,该表将为主流程生产系统提供企业自产能源产品(二次能源)、外购能源产品及辅助材料的能值、消耗量、产品产量等信息。

表 3.2 主流程生产系统投入产出表 ($j=1,2,3$)
Table 3.2 Energy input-output sheet of primary manufacturing process ($j=1,2,3$)

投入 \ 产出		第 j 生产系统		发 热 量 能 值		总产 品	最终 产品	中间 产品
		非能源产品	能源产品					
		1 2 ... a_j	a_{j+1} a_{j+2} ... β_j					
关联产品		1 2 ... w_j	$L_{j-1,j}$	E_L	Q_L			
本系统产品	能源	1 2 ... a_j	A_j	0	Q_a	X_j	Y_j	W_j
	非能源	a_{j+1} a_{j+2} ... β_j		E_{aj}	0			
辅助工序产品	能源	1 2 ... k_j	C_j	E_C	Q_c	Z_j		
	非能源	k_{j+1} k_{j+2} ... n_j			0			
回收产品		1 2 ... r_j			Q_c			
外购产品	能源	1 2 ... l_j	D_j		Q_d	U_j		
	非能源	l_{j+1} l_{j+2} ... m_j		0	0			

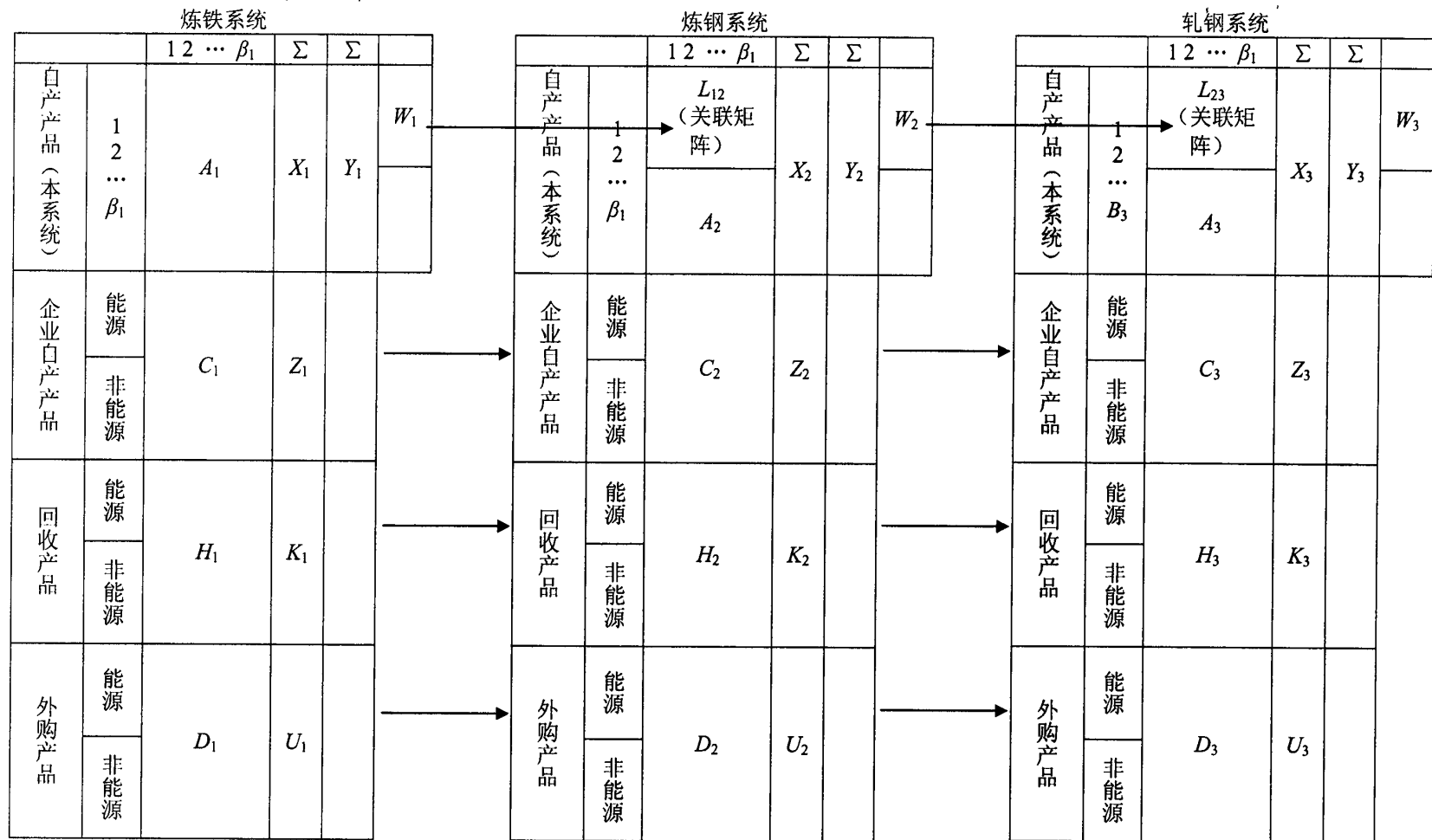


图 3.2 钢铁企业多级投入产出模型基本模式

Fig. 3.2 Basic multilevel input-output sheet mode for steelmaking enterprise

表 3.3 辅助生产系统投入产出表
Table 3.3 Energy input-output sheet of assistant production system

投入 \ 产出			辅助生产系统		发热量	能值	最终产品	总产品	中间产品
			非能源产品	能源产品					
			1 2 ... a_j	a_{j+1} a_{j+2} ... β_j					
自产产品	能源	1 2 ... k_j	C_0		E_{c0}	Q_{a0}	Y_0	X_0	Z_0
	非能源	k_{j+1} k_{j+2} ... n_j				0			
回收产品		1 2 ... r_0			E_{r0}	Q_{r0}	R_0^*	R_0	
外购产品	能源	1 2 ... l_0	D_0			Q_{d0}	V_0	U_0	
	非能源	l_{0+1} l_{0+2} ... m_0			0	0			

3.1.2.2 多级投入产出模型的产品分配方程

类似于单级投入产出法的计算原理，根据多级投入产出模型各个投入产出表的平衡关系及其相互联系，可得出主流程生产系统产品和辅助生产系统产品分配方程组。

(1) 主流程生产系统

式(3-8)中， A_i 为直接消耗系数矩阵， Y_i 为最终产品产量向量， W_i 为中间产品产量向量，它是第*i*子系统提供给第(*i*+1)子系统的原料量。 L_{ij} 是第*j*子系统消耗第*i*子系统（一般指前一个生产系统）产品的消耗系数矩阵。在图 3.2 中，形象地将 L_{ij} 矩阵覆盖在消耗系数矩阵 A 的上面，实际上，在表 3.2 中可见它们虽然同为消耗系数，但意义却不同，在矩阵运算中所处的位置也不同。 L_{ij} 矩阵是连接两个相邻生产系统的关联矩阵。

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 X_1 + X_1 + \begin{pmatrix} W_1 \\ 0 \end{pmatrix} = X_1 \\ A_2 X_2 + X_2 + \begin{pmatrix} W_2 \\ 0 \end{pmatrix} = X_2 \\ A_3 X_3 + X_3 = X_3 \\ W_1 = L_{12} X_2 \\ W_2 = L_{23} X_3 \end{array} \right. \quad (3-8)$$

根据式(3-3)，将式(3-8)中的五个方程联立并求解，得到主流程生产系统产品分配方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = (I - A_1)^{-1} \left\{ Y_1 + \begin{pmatrix} L_{12} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} [Y_2 + \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} Y_3] \right\} \\ X_2 = (I - A_2)^{-1} [Y_2 + \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} Y_3] \\ X_3 = (I - A_2)^{-1} Y_3 \end{array} \right. \quad (3-9)$$

如果炼铁系统和炼钢系统均不生产最终产品，即 $Y_1=0$ ， $Y_2=0$ ，则式(3-9)简化为：

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = (I - A_1)^{-1} \begin{pmatrix} L_{12} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} Y_3 \\ X_2 = (I - A_2)^{-1} \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} Y_3 \\ X_3 = (I - A_2)^{-1} Y_3 \end{array} \right. \quad (3-10)$$

式(3-9)、(3-10)均说明，当各子系统的 Leontief 逆矩阵求出后，利用各子系统投入产出表构造企业投入产出模型十分方便。

(2) 辅助生产系统

辅助生产系统将为主流程生产系统提供各种能源产品和非能源产品。根据辅助生产系统投入产出表（见表 3.3）的平衡关系，以及主流程各生产系统对这些产品的消耗结构（见图 3.2），可推导如下方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 X_0 + Y_0 + Z_0 = X_0 \\ Z_0 = Z_1 + Z_2 + Z_3 \\ Z_1 = C_1 X_1 \\ Z_1 = C_1 X_1 \\ Z_1 = C_1 X_1 \end{array} \right. \quad (3-11)$$

将式(3-11)中的五个方程联立求解，可得：

$$X_0 = (I - C_0)^{-1} (Y_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3) \quad (3-12)$$

将式(3-9)代入上面的方程中, 得:

$$\begin{aligned} X_0 = & (I - C_0)^{-1} Y_0 + (I - C_0)^{-1} C_1 (I - A_1)^{-1} \left\{ Y_1 + \begin{pmatrix} L_{12} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} \left[Y_2 + \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_3)^{-1} Y_3 \right] \right\} + \\ & (I - C_0)^{-1} C_2 (I - A_2)^{-1} \left[Y_2 + \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_3)^{-1} Y_3 \right] + (I - C_0)^{-1} C_3 (I - A_3)^{-1} Y_3 \end{aligned} \quad (3-13)$$

(3) 企业外购能源和非能源物资总量方程组

令 $\bar{U}_0$ 、 $\tilde{U}_0$ 分别为企业外购的能源和非能源物资列向量; $\bar{V}_0$ 、 $\tilde{V}_0$ 为企业向系统外部转供的能源和非能源物资列向量。根据各投入产出表的横向平衡关系, 则有:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_0 \\ \tilde{U}_0 \end{pmatrix} = D_0 X_0 + \begin{pmatrix} \bar{V}_0 \\ \tilde{V}_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{U}_1 \\ \tilde{U}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{U}_2 \\ \tilde{U}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{U}_3 \\ \tilde{U}_3 \end{pmatrix} \quad (3-13)$$

将式(3-9)和式(3-12)代入式(3-13)可通过企业最终产品的需要总量 (Y 、 V), 计算企业外购的能源和非能源物资总量。

总之, 式(3-9)、(3-12)、(3-13)是实现由最终产品计算企业内部产品产量 (X_0 、 X_1 、 X_2 、 X_3), 外购能源物资需求总量 ($\bar{U}_0$)、非能源需求总量 ($\tilde{U}_0$) 的重要公式。它们的计算结果, 将为主流程能源模型和燃料、动力系统能源转换及分配模型提供输入。

(4) 多级投入产出模型产品能值的计算

①辅助生产系统的产品能值

按照上一小节介绍的能值定义和假设, 以及单级投入产出模型中能值计算公式(3-6)多级投入产出模型中辅助系统的产品能值可以用以下导出方程进行计算:

$$E_0 = (I - C_0^T)^{-1} \cdot D_0 \cdot Q \quad (3-14)$$

其中, C_0 为辅助生产系统对自产产品的直接消耗系数矩阵, D_0 为辅助生产系统对外购能源物资的直接消耗系数矩阵, Q 为能源物资的发热值列向量。

②主流程生产系统的产品能值

本文主流程生产系统的产品能值计算采用矩阵累加法, 它是根据产品载能逐次累加原理, 通过矩阵计算产品能值的新方法。它是针对钢铁企业多级投入产出模型的一种快捷准确的能值计算方法, 可以在计算机上实现。掌握这种方法首先需要掌握工序燃料当量的概念。工序燃料当量是指某道工序单位产品所耗辅助原材料、燃料和动力的总载能量, 用 PFE 代表,

$$PFE = F + E + S + B \quad (3-15)$$

则式中, F 为工序所耗燃料的载能量, kgce/单位产品 ; E 为工序所耗电力的载能量, kgce/单位产品 ; S 为工序所耗各种辅助原材料的载能量, kgce/单位产品 ; B 为工序向外

提供副产能源产品的载能量, kgce/单位产品。

如果以第一道主工序炼铁子系统为例, 式(3-15)可以用一下矩阵形式表述:

$$P_0 = A_1^T P_1 + G_1^T Q_1 \tag{3-15}$$

式中 Q_1 为辅助生产系统的产品和外购能源物资的能值向量, 可由式(3-14)求出。式(3-15)经整理可得:

$$P_0 = (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 \tag{3-16}$$

同理可得到炼钢系统和轧钢系统的工序燃料当量计算方程:

$$P_2 = (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 \tag{3-17}$$

$$P_3 = (I - A_3^T)^{-1} G_3^T Q_3 \tag{3-18}$$

由于炼铁系统的主要原料是天然资源, 其载能量为零, 所以炼铁系统的产品能值就等于单位产品所消耗的辅助原材料、燃料和动力的载能量之和。即

$$E_1 = P_1 = (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 \tag{3-18}$$

因为炼铁系统是炼钢系统的前一道生产工序, 所以炼钢系统的产品能值除了该工序的燃料当量外, 还要加上主要原料铁水的载能量; 同理, 轧钢系统的产品能值除了该工序的燃料当量外, 还要加上连铸坯的载能量。表 3.4 是将炼铁系统、炼钢系统和轧钢系统三个主生产系统的消耗系数矩阵放在同一个投入产出表中的情况。

表 3.4 主生产系统的投入产出消耗系数矩阵
Table 3.4 Input-output intensity coefficient matrix of primary production system

产品名称	炼铁系统	炼钢系统	轧钢系统	产品能值
炼铁系统主产品	A_1	L_{12}	0	E_1
炼钢系统主产品	0	A_2	L_{23}	E_2
轧钢系统主产品	0	0	A_3	E_3
辅助产品及外购的 能源和非能源	G_1	0	0	Q_1
	0	G_2	0	Q_2
	0	0	G_3	Q_3

根据能量平衡关系, 可得三个系统产品能值计算公式:

$$\begin{aligned} E_1 &= (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 \\ E_2 &= (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 + (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 \\ E_3 &= (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 + (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 \\ &\quad + (I - A_3^T)^{-1} G_3^T Q_3 \end{aligned} \tag{3-19}$$

3.2 企业能耗模型的建立

钢铁企业能耗取决于主生产系统、能源转换系统的能耗特点以及两者之间的作用关系。研究和确定它们之间的作用机理和定量关系,建立能源优化模型,为合理组织生产、优化能源使用、分析节能潜力提供了理论依据^[38,39]。

吨钢能耗是反映钢铁企业(工业)能源消耗和能源利用状况的重要技术经济指标,它可反映出钢铁联合企业生产的技术水平、原燃料条件和管理水平等。我国吨钢能耗评价指标有反映企业能源消耗的吨钢综合能耗和用于钢铁联合企业间能耗对比的吨钢可比能耗^[40-41]。本文对能耗的分析采用的是 $e-p$ 分析法,主要分析吨钢能耗的计算因子和影响因素。

3.2.1 企业综合能耗模型

本系统对能耗的分析采用的是 $e-p$ 分析法,主要分析吨钢能耗的影响因素,其中最为重要的吨钢能耗为钢铁企业吨钢综合能耗,它是指统计期内钢铁企业消耗的能源总量除以同期合格钢产量,即

$$[\text{吨钢综合能耗}] = \frac{\text{统计期内钢铁企业能耗总量}}{\text{合格钢产量}} \quad (3-20)$$

表达式可写为

$$E = \sum_{i=1}^n e_i p_i \quad (3-21)$$

式中, E 为吨钢综合能耗, kgce/t 钢; e_i 为第 i 道工序的工序能耗, kgce/t 产品; p_i 为第 i 道工序的钢比系数, t/t。

由吨钢综合能耗表达式可知,影响吨钢综合能耗的直接因素有两大类:一是各工序的工序能耗,二是各工序的钢比系数。所以,为了降低吨钢能耗,一要降低各工序的工序能耗,二要降低各工序的钢比系数,两者缺一不可。

在分析钢铁工业能耗时,同时分析钢比系数和工序能耗这两类因素的方法,称作 $e-p$ 分析法。用 $e-p$ 分析方法,可求出统计期内因 e_i 变化引起的吨钢能耗改变量(即直接节能量),因 p_i 变化引起的吨钢能耗改变量(即间接节能量)。计算公式为:

$$\Delta E = \sum_i p_i''(e_i'' - e_i') + \sum_i e_i'(p_i'' - p_i') \quad (3-22)$$

式中, e_i' 、 e_i'' 分别为统计期始、末第 i 道工序的工序能耗, p_i' 、 p_i'' 分别为统计期始、末第 i 道工序的钢比系数。式(3-22)右端第一项称作直接节能量,第二项称作间接节能量。

3.2.2 企业工序能耗模型

3.2.2.1 工序能耗及其能流

工序能耗 e_i ,是指某工序生产一吨合格产品直接消耗的能源量再减去回收并外供的能量,表达式为

$$\text{工序能耗} = \frac{\text{工艺过程及辅助生产消耗的能量} - \text{回收并外供的能量}}{\text{合格产品的产量}} \quad (3-23)$$

或写成

$$\text{工序能耗} = \frac{\sum \text{燃料及动力介质实物消耗量} \times \alpha - \text{回收并外供的能量}}{\text{合格产品的产量}} \quad (3-23)$$

式(3-23)中, α — 燃料及动力介质 i 的折标煤系数, kgce/单位产品; 能源消耗量等于每种能源的实物消耗量与其折标煤系数乘积之和, 受实物消耗量的多少及其折算系数大小两方面的影响。

影响能源实物消耗量多少的因素是多方面的, 主要有装备水平、原燃料条件、操作方法等因素; 某种能源的折算系数与其能源转换工序的转换效率有关, 转换效率越高, 能源转换工序的能耗越低, 折标煤系数就越小; 影响余热余能回收量的主要因素是回收装置水平和利用程度, 余热余能回收的越多, 该工序的净能耗就越少, 工序能耗就越低。因此, 为了降低某工序的能耗, 应最大程度地减少该工序直接消耗的能量, 并尽可能多地回收该工序产出的各种能量。

图 3.3 是钢铁企业能源转换工序或生产工序的能量流图。按照能量流的来源、去向和作用的不同, 在工序的能量流图中可能存在以下 6 股能量流:

① 输入能量流: 来自上一道工序伴随原料带入本工序的能量 G_{i-1} , 包括化学能、热能和动能等, kgce/单位产品;

② 输出能量流: 由本工序产品带走的热能和化学能等 G_i , kgce/单位产品;

③ 外加能量流: 从外部供给本工序的燃料、电力、蒸汽等能量 g_{a-i} , kgce/单位产品;

④ 损失能量流: 本工序散失的以及物料在工序间输送过程中损失的能量 g_{y-i} , kgce/单位产品;

⑤ 回收自用能量流: 本工序回收自用的燃料、蒸汽、热能、动力等能量 g_{b-i} , kgce/

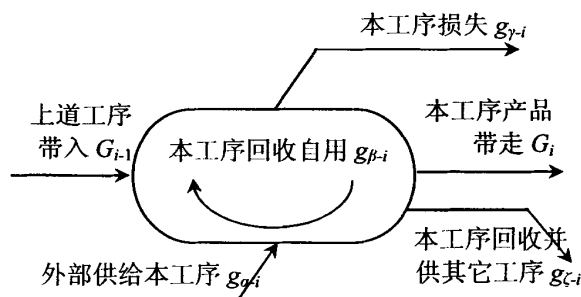


图 3.3 生产工序的能量流图
Fig. 3.3 Energy flow of unit process

单位产品；

⑥ 回收外供能量流：本工序回收并供给其它工序的燃料、蒸汽、热能、电力等能量 $g_{\zeta-i}$, kgce/单位产品。

为了降低各工序的工序能耗，首当其冲的是依靠技术进步减少各道工序的能源投入量，其次是及时、有效地回收生产过程中已经产生的各种余热和余能。由于用转换方式回收的能量都将使被转换的余热余能贬值，所以凡是回收的余热余能，最好直接用于本工序或下一道工序，就地或就近使用。

3.2.2.2 钢比系数及其物流

钢比系数，是某工序在统计期内的实物产量与钢产量之比^[43]，它是对企业生产结构的定量描述，各工序的钢比系数的大小与钢铁生产过程的物质流密切相关，对吨钢综合能耗有直接影响，降低钢比系数就是调整、优化企业的生产结构和产品结构。图 3.4 是某生产工序的物流图，图中标注的 5 股物流分别是^[44,45]：

① 输入物流：第 $i-1$ 道工序的产品作为原料输入给第 i 道工序，其铁素流量为 F_{i-1} , t/t 材（或 t/t 钢）；

② 外加物流（简称 α 物流）：作为原料从流程外加入第 i 道工序的原料（如废钢）其铁素流量为 α_i , t/t 材（或 t/t 钢）；

③ 排放物流（简称 γ 物流）：第 i 道工序向环境排放的各种废弃物，其铁素流量为 γ_i , t/t 材（或 t/t 钢）；

④ 循环物流（简称 β 物流）：第 i 道及其下游各工序生产的不合格产品或废品，作为原料重新返回到本道工序或其它上游工序循环使用，其铁素流量为 β_i , t/t 材（或 t/t 钢）。

⑤ 输出物流：第 i 道工序输出给第 $i+1$ 道工序的合格产品，其铁素流量为 F_i , t/t 材（或 t/t 钢）。

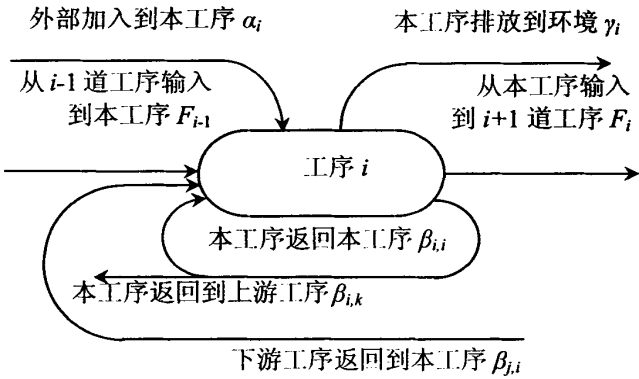


图 3.4 生产工序的物质流图
Fig. 3.4 Material flow of unit

降低各工序的钢比系数，关系到首钢的结构调整。通常情况下，决定钢比系数大小的是上述五股物流中的 α 物流、 β 物流和 γ 物流。就含铁物流而言，凡是从外界向流程中的某一工序输入含铁物料时（即 α 物流），必有利于企业节能，且越是后部工序其节

能效果越明显；凡是从某工序向外界输出（即 γ 物流）或返回上游工序重新处理使用的含铁物料（即 β 物流），必增大企业的能源消耗（准确地说是吨材能耗），且越是后部工序，耗能越多；凡在工序内部循环使用的含铁物料（如烧结工序的返矿），必使该工序的工序能耗增加。

此页不缺内容

第 4 章 企业能耗及其影响因素分析

4.1 计算结果

根据京唐钢铁 2010 年 8 月份的能源平衡表，京唐钢铁的产品能值分析的投入产出模型中的产品种类确定如下：主工艺产品有 11 种（见表 4.1）；辅助工艺产品有 11 种；回收的产品有 6 种，它们分别是蒸汽、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、焦油和苯；外购产品有主要有外购电、洗精煤、神华喷吹煤、阳泉喷吹煤、待王喷吹煤、动力煤、天然气。由京唐钢铁 2010 年 8 月份的投入产出表，计算得京唐钢铁吨钢综合能耗为 670.573kgce/t 钢。

由京唐钢铁 2010 年 8 月份的能源的投入产出模型，计算得到 2010 年 8 月份京唐钢铁主工序的生产单位（厂）的产品能值和工序能耗见表 4.1。

表 4.1 京唐钢铁的主产品能值和工序能耗
Table 4.1 Main product energy value and process energy consumption of Jingtang steel

项目	产品能值 kgce/t	工序能耗 kgce/t
自产石灰石	164.604	164.604
自产烧结矿	61.516	61.516
自产球团矿	32.058	32.058
焦炭	971.400	198.131
铁水	481.266	402.441
粗钢	475.468	12.664
精炼钢水	516.918	15.905
连铸板坯	550.117	19.048
2250mm 热轧板	637.199	73.423
1580mm 热轧板	653.705	87.753
1700mm 冷轧板	755.135	87.762

从表 4.1 可以看出，自产石灰石、自产烧结矿、自产球团矿的产品能值与工序能耗数值相等，其原因是自产石灰石、自产烧结矿和自产球团矿主要是以天然矿石为原料，即由物料带入的产品能值为零，所以其产品能值与工序能耗相等；而能源产品的生产中，原料和产品都是能源，所以产品能值与工序能耗相等。自产焦炭的产品能值高于焦化工序单位能耗。主要是在计算焦化工序能耗的时候将产品焦炭当成能源产品，而且自产的焦炭本身具热值，可以直接计算出其煤折标系数。因此，在计算自产焦炭的产品能值和焦化工序单位时，其计算出的结果不相等。而对于其他主工序产品，由于上工序和本工序的产出的产品都不是能源产品，在计算工序能值时，不计算产品的产品能值。因

此，除了焦炭以外的主产品的产品能值都大于生产该产品的工序能耗。

一般地，与产品能值有关的因素，可大致归纳为以下 11 个方面：生产布局，外部条件，原燃料条件，工艺流程，工艺设备，辅助设备，工艺操作，产品结构，副产品、废弃品和废能的处理。本文以上面的计算结果为基础，分别讨论厂区布局、钢比系数、先进生产技术和外部因素对产品能值和工序能耗的影响。

4.2 厂区布局对企业能耗的影响

生产布局对于一个企业至关重要，生产布局的合理与否，往往决定着企业的生产流程是否紧凑、连续，同时决定着企业的厂内运输距离、方式及能源消耗。现代钢铁企业的生产布局呈现出新的特点，高炉与转炉间布局的总体趋势是要求高炉—转炉间距离尽可能短。炼钢厂与热轧厂间布局的总体趋势是：以辊道连结，缩短距离。

京唐钢铁结合曹妃甸岛域的航道分布和码头的建设规划，以及已建矿石码头和海岸线的现状，按照物料流向，在钢铁厂规划用地范围内进行总平面布置。通过对世界大型先进钢铁厂的研究分析，京唐钢铁总平面布置形式采取“一线型”。详见图 4.1。

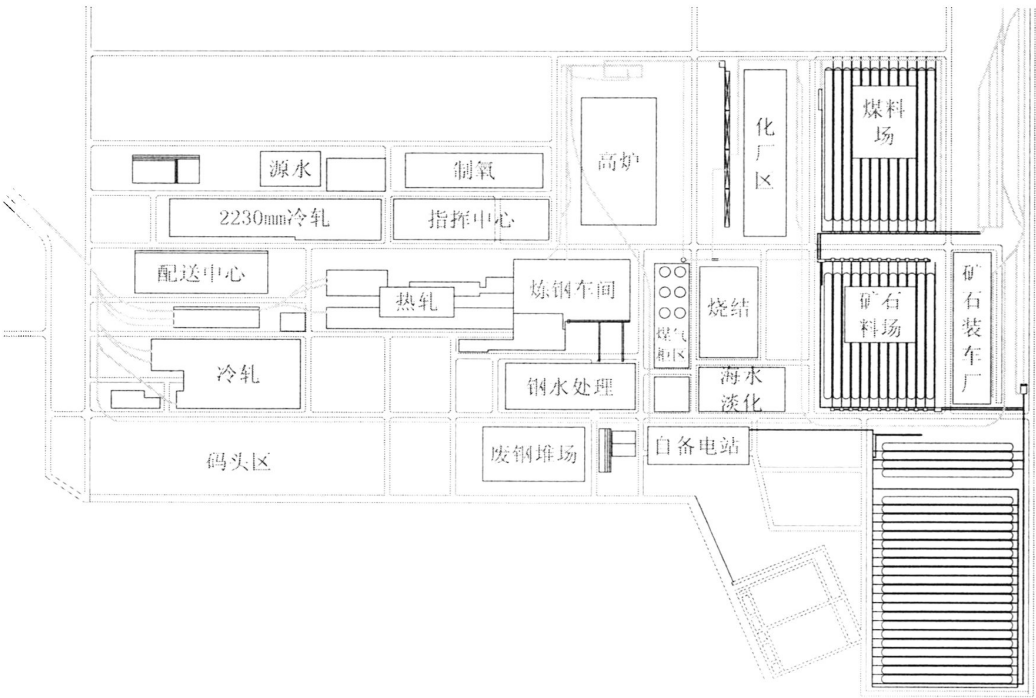


图 4.1 京唐钢铁总平面布置图
Fig. 4.1 General layout of Jingtang steel

4.2.1 “一线型”总平面布置研究

“一线型”的总体布局是以“流”为核心，最简化的生产物流和最少的物料搬运费用，优化流程路径，降低运输功耗，流程路由短，做功小，耗能少。充分体现钢铁制造

流程“连续运行、在线运输、在线生产”可获得长期的经济运行效果的总体理念。这种总平面布置具有占地少、物料和能源介质输送距离短、工程建设投资省、生产运营成本低等特点。具体体现如下:

①2座 5500m^3 高炉中心距仅为320m,2座大型高炉料仓联合布置,从而打破了一炉一仓布置形式,极大地提高了场地的利用率。烧结成品仓与高炉料仓合并共用,减少转运次数,提高烧结矿成品率。并且节约工程投资,减少占地。

②炼铁、炼钢串联布置,炼铁至炼钢之间仅有一次450°转角,炼铁—炼钢的最大距离为1290米,铁水即可直线进入炼钢,铁水运输距离短捷,运输成本低。

③创造性的将公辅设施煤气柜(高炉、焦炉、转炉煤气柜)集中设置在一个独立的区域内,充分体现出“集中、高效、节能、环保”的设计理念。

④为了充分节约用地,厂区综合管网采用多层立体布置形式(如架空管架与地下电缆隧道同路由敷设),同时将工业管道的走向布置与绿化相结合,从而达到美化环境的效果。综上所述,采用“紧凑型”的总平面布置形式,使钢铁厂总体布局规整、功能分区明确,充分体现了当今世界先进的工艺流程,实现了物料运输的短捷、顺畅、连续、贯通。与同等规模的钢铁厂相比,达到了吨钢占地 0.9m^2 的先进指标。

4.2.2 “一线型”总图布置对能耗的影响

采用了短界面紧凑型、串垂联合的总平面布置形式钢铁厂总平面布置按照料场—焦化—烧结—球团—炼铁—炼钢—热轧—冷轧的冶金工艺流程依次顺序布置的“独特的短界面紧凑型、串垂联合”的总平面布置形式,使物料流、能源流、信息流协调一致。

由图4.1可知,京唐钢铁的主体设备较少,只有2个烧结车间、2座高炉、5座转炉、2条热轧制线,烧结车间、炼钢车间和热轧车间大体成一条直线,从南到北为烧结车间、烧结—炼铁原料仓;炼钢车间的正东方向是为两座高炉及其附属设施。

先进的生产布局,使得京唐钢铁生产系统的各工序之间物料的输送距离很短,进而基本上实现了物料运输的不落地。而且,烧结成品仓与高炉料仓合并共用,减少烧结矿的转运次数,使烧结矿石到高炉料场的运输能耗近乎接近于0;炼铁与炼钢采用串联布置,铁水运输采用独创的“一包到底”技术,在标准轨距上运输异型大容量铁水包车,铁水一包到底直线进厂,炼钢与轧钢采用垂直联合布置,工序衔接短捷、顺畅、合理,高炉至转炉的最大运输距离只有1260m,采用火车载铁水包运输铁水,运输能耗为 0.54kgce/t 钢;炼钢连铸与轧钢加热炉之间的距离也仅有140m,采用辊道运输钢坯,连铸坯运输能耗为 0.77kgce/t 钢,详见表4.2。热轧卷供应冷轧车间运输过程采用鞍座托辊运输技术;成品卷运输至成品码头过程采用了大型化托盘式运输设备;实现了炼铁—炼

钢之间、热轧—冷轧之间、成品至码头之间的短界面衔接。

表 4.2 京唐钢铁物料运输参数
Table 4.2 The parameters of materials transportation in Jingtang

区间	距离/m	运输方式	运输时间/min	运输能耗/kgce·t ⁻¹
烧结矿至高炉	0	-	0	0
1# 高炉—炼钢车间	970	铁水运输包车	15.3	0.54
2# 高炉—炼钢车间	1260	铁水运输包车	17.3	
炼钢车间至热轧车间	140	辊道	24.0	0.77

统计表明，2010 年，京唐钢铁的主要工序间物料的运输能耗为 1.31kgce/t 钢。同时，炼铁、炼钢工序间的紧密衔接也使得铁水入转炉的温度相对较高，达到 1430±20℃，同比迁钢鱼雷罐运输铁水，经倒罐站注入铁水包的铁水温度约 1360±10℃，提高铁水温度 70℃。按照 898 万 t/年铁水量计算，每年可节约 16.85 万 tce，同时也使转炉吃废钢能力达到 109kg/t；炼钢连铸与轧钢加热炉之间的距离缩短，也提高了加热炉热装率和热装温度。

采用“一包到底”铁水运输技术，可避免混铁车在倒罐站里向铁水包注铁的倒运过程产生的烟尘污染，按照其它钢铁厂倒罐站除尘量计算，可减少烟尘量 960000m³/h，每年可减少烟尘排放约 4700t，基本解决炼钢厂内的石墨飞尘污染，环保效益好，有利于钢铁厂清洁生产；由于取消了从倒罐坑内吊运铁水包，炼钢厂房加料跨 450t 铸造天车主钩吊运铁水的起升高度可减少 10m 左右，缩短了调运时间，加快了生产节奏。

2010 年 8 月份，京唐钢铁的主要工序间物料的运输能耗为 1.31kgce/t 钢，这个运输能耗要低于鞍钢的运输能耗（7.6kgce/t 钢），而与首秦的厂内物料运输能耗的 1.9kgce/t 钢相比更是节省了 0.69kgce/t 钢。

4.3.钢比系数对企业能耗的影响

钢比系数是统计期内各工序的实物产量与钢产量之比。计算式如下：

$$\text{钢比系数} = \frac{\text{统计期内工序实物产量}}{\text{同期内钢产量}}$$

(4-1)

钢比系数是评价钢铁企业生产结构合理程度的重要指标，对吨钢综合能耗有直接的影响。一般来说，在其他条件一定的情况下，钢比系数愈小，吨钢综合能耗愈低。

4.3.1 矿钢比对能耗的影响

京唐钢铁 2010 年 8 月生产烧结矿 77.7247 万吨，其中 75.8275 万吨用于炼铁，另外 0.7671 万吨用于转炉生产炼钢；生产球团矿 7.0980 万吨，其中 6.9816 万吨用于炼铁，另外 0.0132 万吨用于转炉生产炼钢。生产合格生铁 62.0163 万吨，生产合格钢为 66.3488 万吨。所以，2010 年 8 月京唐钢铁的矿钢比为

$$P_{\text{矿-钢}} = \frac{P'_{\text{矿}} + P''_{\text{矿}}}{P_{\text{钢}}} = \frac{P'_{\text{矿}}}{P_{\text{铁}}} \times \frac{P_{\text{铁}}}{P_{\text{钢}}} + \frac{P''_{\text{矿}}}{P_{\text{钢}}} = \frac{P'_{\text{烧结}} + P'_{\text{球团}}}{P_{\text{铁}}} \times \frac{P_{\text{铁}}}{P_{\text{钢}}} + \frac{P''_{\text{烧结}} + P''_{\text{球团}}}{P_{\text{钢}}} \quad (4-2)$$

式中, $P_{\text{矿-钢}}$ 为矿钢比; $P'_{\text{矿}}$ 为统计期内用于炼铁的烧结矿和球团矿之和; $P''_{\text{矿}}$ 为统计期内用于炼钢的烧结矿和球团矿之和; $P'_{\text{烧结}}$ 、 $P'_{\text{球团}}$ 分别为统计期内用于炼铁的烧结矿、球团矿的消耗量; $P''_{\text{烧结}}$ 、 $P''_{\text{球团}}$ 分别为统计期内用于炼钢的烧结矿、球团矿的消耗量; $P_{\text{铁}}$ 、 $P_{\text{钢}}$ 分别为统计期内生铁、钢的产量;

将烧结矿和球团矿产量分成生产消耗和最终产品两部分, 并带入数据得:

$$1.2784 = \left(\frac{75.8275 + 1.1301}{62.0163} + \frac{7.0980 + 0.1032}{62.0163} \right) \times \frac{62.0163}{62.3488} + \frac{7.0980 + 0.1032}{66.3488}$$

$$1.2784 = (1.2227 + 0.1126 + 0.0199) \times 0.9347 + \alpha_{S-G} + \alpha_{Q-G}$$

$$P_{\text{矿-钢}} = (\alpha_{S-T} + \alpha_{Q-T} + 0.0199) \times 0.9347 + \alpha_{S-G} + \alpha_{Q-G}$$

式中, α_{S-T} 为生铁对烧结矿的直接消耗系数; α_{Q-T} 为生铁对球团矿的直接消耗系数; α_{S-G} 为钢对烧结矿的直接消耗系数; α_{Q-G} 为钢对球团矿的直接消耗系数; 下同。

本文讨论矿钢比降低 0.005 时, 产品能值的变化情况。当铁钢比不变时, 通过以下途径可以使矿钢比降低 0.005:

(1) 生铁对烧结矿的直接消耗系数降低 0.0053;

(2) 生铁对球团矿的直接消耗系数降低 0.0053;

(3) 生铁对烧结矿的直接消耗系数降低 0.0106 时, 生铁对球团矿的直接消耗系数提高 0.0053;

(4) 钢对烧结矿的直接消耗系数降低 0.005。

4.3.1.1 降低生铁对烧结矿或球团矿的直接消耗系数

京唐钢铁 2010 年 8 月份生铁对烧结矿的直接消耗系数为 1.2227t/t 铁, 对球团矿的直接消耗系数为 0.1126t/t 铁, 它们分别降低 0.0053 而对产品能值和能耗的影响见表 4.3 和表 4.4。

从计算结果可知, 降低生铁对烧结矿、球团矿的直接消耗系数而使矿钢比降低 0.005, 对所有的自产能源产品的能耗没有影响对铁前各工序的产品能耗也没有影响, 而只对铁后各工序的产品能耗有影响。

由表 4.3 可以看出, 只是降低 α_{S-T} 使矿钢比降低 0.005, 铁后各工序的产品中, 高炉工序的产品能值降低 0.405kgce/t 产品, 高炉工序的产品能值降幅率最大的, 是 0.0842%; 转炉、精炼、连铸、2250mm 热轧和 1580mm 热轧工序的产品能值分别下降了 0.379 kgce/t 产品、0.399kgce/t 产品、0.410kgce/t 产品、0.420kgce/t 产品和 0.422kgce/t 产品; 产品能值数值下降最大的是 1700mm 冷轧工序, 产品能值降低了 0.440kgce/t 产品, 但是该工序

的降幅率最小，是 0.0583%。高炉工序的产品能值下降率最大，是因为由烧结矿带入的能值占生铁产品能值的比例最大。而产品能值下降最大是 1700mm 冷轧板，这主要是因为产品能值累计引起，由于烧结矿消耗系数的下降，导致产品能值不断下降，最后，1700mm 冷轧板产品能值下降数值最大，但是在 1700mm 冷轧板产品能值中由烧结矿的带入能值所占比率最小，所以 1700mm 冷轧板产品能值下降率最小。而高炉工序的产品能值下降的数值高于转炉工序，主要是有转炉工序中添加了大量废钢，降低了 α_{S-T} 变化对转炉工序的产品能值的影响。

表 4.3 分别改变 α_{S-T} 、 α_{Q-T} 对产品能值的影响
Table 4.3 The influence of altering α_{S-T} or α_{Q-T} respectively on product energy value

产品名称	产品能值 (kgce/t 产品)		
	$\alpha_{S-T}=1.2227$	$\alpha_{S-T}=1.2174$	$\alpha_{S-T}=1.2227$
	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1073$
石灰石	164.604	164.604	164.604
烧结矿	61.516	61.516	61.516
球团矿	32.058	32.058	32.058
焦炭	971.400	971.400	971.400
铁水	481.266	480.861	481.035
粗钢	475.468	475.089	475.253
精炼钢水	516.918	516.519	516.691
连铸板坯	550.117	549.707	549.884
2250mm 热轧板	637.199	636.779	636.96
1580mm 热轧板	653.705	653.283	653.465
1700mm 冷轧板	755.135	754.695	754.885

降低 α_{Q-T} 而使矿钢比降低 0.005，铁后各工序的产品中，高炉工序的产品能值降低 0.231kgce/t 产品，高炉工序的产品能值降幅率最大的是 0.0488%；转炉、精炼、连铸、2250mm 热轧和 1580mm 热轧工序的产品能值分别下降了 0.215kgce/t 产品、0.227kgce/t 产品、0.233kgce/t 产品、0.239kgce/t 产品和 0.240kgce/t 产品；产品能值数值下降最大的还是 1700mm 冷轧工序，产品能值降低了 0.250kgce/t 产品，但是该工序的降幅率最小，是 0.0331%。理由同上。

表 4.4 分别改变 α_{S-T} 、 α_{Q-T} 对吨钢综合能耗的影响
Table 4.4 The influence of altering α_{S-T} or α_{Q-T} respectively on energy intensity per ton

名称	$\alpha_{S-T}=1.2227$	$\alpha_{S-T}=1.2174$	$\alpha_{S-T}=1.2227$
	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1073$
吨钢综合能耗	670.573	670.194	670.356

表 4.4 反映了将分别降低 α_{S-T} 和 α_{Q-T} 的数值对吨钢综合能耗的影响程度。降低 α_{S-T} ，可以使吨钢综合能耗 0.379 kgce/t 钢，下降率是 0.057%。降低 α_{Q-T} ，可以使吨钢综合能耗 0.217 kgce/t 钢，下降率是 0.032%。可见，烧结矿的对吨钢综合能耗要大于球团矿，

但是影响程度都小。主要是由于烧结矿和球团矿的能值比较小，而且在企业内部消耗的量不多，再加上 α_{S-T} 和 α_{Q-T} 的数值只是减少了 0.0053，不足对企业的吨钢能耗产生较大影响。

上述两种情况相比较，前者对铁后各工序的产品能值的影响略大于后者，其原因是烧结矿的能值大于球团矿的能值，而且高炉工序消耗的烧结矿多于球团矿。而对于吨钢综合能耗影响是 α_{S-T} 大于 α_{Q-T} 啊，主要是烧结矿的消耗量大于球团矿的消耗量，而且烧结矿的能值也大于球团矿的能值，这两个方面同时导致 α_{S-T} 的影响大于 α_{Q-T} 。

4.3.1.2 同时改变生铁对烧结矿和球矿的直接消耗系数

降低生铁对烧结矿的直接消耗系数的同时提高生铁对球团矿的直接消耗系数，而使矿钢比降低 0.005，即生铁对烧结矿的直接消耗系数降低 0.0106，生铁对球团矿的直接消耗系数提高 0.0053。此时的产品能值和吨钢综合能耗的变化情况见表 4.5 和表 4.6。

表 4.5 同时改变 α_{S-T} 、 α_{Q-T} 对产品能值的影响
Table 4.5 The influence of altering α_{S-T} and α_{Q-T} respectively on product energy value

产品名称	产品能值 (kgce/t 产品)	
	$\alpha_{S-T}=1.2227$	$\alpha_{S-T}=1.2121$
	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1179$
石灰石	164.604	164.604
烧结矿	61.516	61.516
球团矿	32.058	32.058
焦炭	971.400	971.400
铁水	481.266	480.644
粗钢	475.468	474.886
精炼钢水	516.918	516.305
连铸板坯	550.117	549.487
2250mm 热轧板	637.199	636.554
1580mm 热轧板	653.705	653.057
1700mm 冷轧板	755.135	754.459

从计算结果可知，同时改变生铁对烧结矿、球团矿的直接消耗系数而使矿钢比降低 0.005，对自产能源产品的产品能值没有影响；对铁前工序的产品能值没有影响，而只对铁后工序的产品能值有影响。

由表 4.5 可知， α_{S-T} 降低 0.0106 的同时 α_{Q-T} 提高 0.0053 而使矿钢比降低了 0.005。铁后各工序的产品中，高炉工序的产品能值降低 0.622kgce/t 铁，高炉工序的产品能值降幅率最大的是 0.1292%；转炉、精炼、连铸、2250mm 热轧和 1580mm 热轧工序的产品能值分别下降了 0.582kgce/t、0.613kgce/t、0.630kgce/t、0.645kgce/t 和 0.648kgce/t；产品能值数值下降最大的还是 1700mm 冷轧工序，产品能值降低了 0.676kgce/t 冷轧板，但是该工序的降幅率最小，是 0.0895%。出现上述情况的原因是烧结矿的产品能值高于球团

矿的产品能值，所以降低 α_{S-T} 的同时提高 α_{Q-T} 对与只降低 α_{S-T} 或 α_{Q-T} 的情况相比，前者对产品能值影响小一些。

表 4.6 同时改变 α_{S-T} 、 α_{Q-T} 对吨钢综合能耗的影响
Table 4.6 The influence of altering α_{S-T} and α_{Q-T} on energy intensity per ton

名称	$\alpha_{S-T}=1.2227$	$\alpha_{S-T}=1.2174$
	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1232$
吨钢综合能耗(kgce/t 钢)	670.573	669.991

表 4.6 反映了将同时改变 α_{S-T} 和 α_{Q-T} ，使矿钢比降低 0.005 对吨钢综合能耗的影响程度。可以看出，同时改变 α_{S-T} 和 α_{Q-T} 对吨钢综合能耗的影响很小，只是下降了 0.582 kgce/t 钢，下降率也只有 0.087%。但是这个下降率要比在 4.3.1.1 节中得到的下降率大。这主要是由于烧结矿的能值比球团矿的能值高，在炼铁工序消耗的烧结矿数量远远大于球团矿。

4.3.1.3 降低钢对烧结矿的直接消耗系数

降低钢对烧结矿的直接消耗系数，而使矿钢比降低 0.005。即钢对烧结矿的直接消耗系数降低 0.005 时，对产品能值的影响见表 4.7。在本文中，由于钢对球团矿的直接消耗系数过小，所以不考虑改变钢对球团矿的直接消耗系数的影响情况。

表 4.7 分别改变 α_{S-T} 、 α_{S-G} 对产品能值的影响
Table 4.7 The influence of altering α_{S-T} or α_{S-G} respectively on product energy value

产品名称	产品能值 (kgce/t 产品)		
	$\alpha_{S-T}=1.2227$	$\alpha_{S-T}=1.2174$	$\alpha_{S-T}=1.2227$
	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1126$
	$\alpha_{S-G}=0.0116$	$\alpha_{S-G}=0.0116$	$\alpha_{S-G}=0.0066$
石灰石	164.604	164.604	164.604
烧结矿	61.516	61.516	61.516
球团矿	32.058	32.058	32.058
焦炭	971.400	971.400	971.400
铁水	481.266	480.861	481.266
粗钢	475.468	475.089	475.163
精炼钢水	516.918	516.519	516.597
连铸板坯	550.117	549.707	549.787
2250mm 热轧板	637.199	636.779	636.861
1580mm 热轧板	653.705	653.283	653.366
1700mm 冷轧板	755.135	754.695	754.781

从计算结果可知，降低钢对烧结矿的直接消耗系数而使矿钢比降低 0.005，对自产能源产品的产品能值没有影响；对转炉前工序的产品能值没有影响，而只对转炉后工序的产品能值有影响。转炉、精炼、连铸、2250mm 热轧、1580mm 热轧和 1700mm 冷轧工序工序的产品能值下降数值逐次升高，而下降率逐次降低。这说明 α_{S-G} 对产品能值的

影响随着工序不断进行而变小。

由表 4.7 可以看出，只是降低 α_{S-G} 使矿钢比降低 0.005，转炉后各工序的产品中，各个工序的产品能值降低程度愈小与降低 α_{S-T} 使矿钢比降低 0.005。这主要是由于在炼铁工序中消耗的烧结矿石远远大于转炉工序中消耗的烧结矿石。而且在转炉工序中添加了废钢和其他钢材，降低了烧结矿对转炉工序产品能值的影响。

通过表 4.8，可以看出将 α_{S-G} 降低 0.005 对吨钢综合能耗的影响非常小，吨钢综合能耗只是下降了 0.305kgce/t 钢，下降率也只有 0.045%，小于 α_{S-G} 降低 0.0053 得到的吨钢综合能耗下降率。这主要是由于烧结矿的能值小于炼钢工序的能耗，而在炼钢工序所消耗的烧结矿数量又比较小，不注意对企业整体的吨钢综合能耗产生较大影响。因此降低 α_{S-G} ，吨钢综合能耗下降率比较小。

表 4.8 分别改变 α_{S-T} 、 α_{S-G} 对吨钢综合能耗的影响

Table 4.8 The influence of altering α_{S-T} or α_{S-G} respectively on energy intensity per ton			
名称	$\alpha_{S-T}=1.2227$	$\alpha_{S-T}=1.2174$	$\alpha_{S-T}=1.2227$
	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1126$	$\alpha_{Q-T}=0.1126$
	$\alpha_{S-G}=0.0116$	$\alpha_G=0.0116$	$\alpha_{S-G}=0.0066$
吨钢综合能耗(kgce/t 钢)	670.573	670.194	670.268

上面说明的四种途径使矿钢比降低 0.005，对都会主工序的产品能值产生一定影响，但是影响程度比较小，最大也只有为 2.053 kgce/t 产品，最小的为 0.231 kgce/t 产品。通过图 4.3 可见，上述四种途径对吨钢综合能耗也有一定的影响，都会使吨钢综合能耗下降，但是下降率都不大，最大的也只有 0.087%。

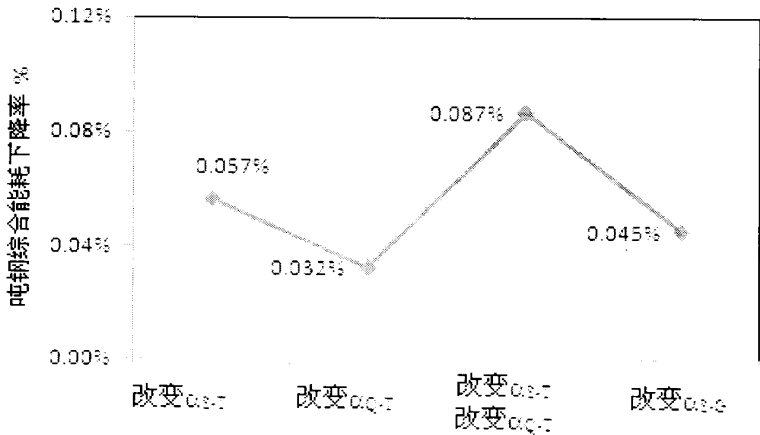


图 4.3 矿钢比对吨钢综合能耗的影响

Fig. 4.3 The influence of altering ore to steel ratio on energy intensity per ton

4.3.2 铁钢比对能耗的影响

京唐钢铁 2010 年 8 月份生产合格生铁 62.0163 万吨。生产合格钢为 66.3488 万吨。2010 年 8 月份京唐钢铁的铁钢比为：

$$P_{\text{铁-钢}} = \frac{P_{\text{铁}}}{P_{\text{钢}}} = \frac{62.0163}{66.3488} = 0.9347$$

式中， $P_{\text{铁-钢}}$ 为铁钢比； $P_{\text{铁}}$ 、 $P_{\text{钢}}$ 分别为统计期内合格铁产量、钢产量。

京唐钢铁的转炉工序以生铁和废钢为主要原料。转炉多加入废钢可以降低铁钢比。本文讨论铁钢比降低 0.005 时，产品能值及吨钢综合能耗的变化情况。

通过转炉多“吃”废钢降低铁钢比，转炉多消耗的废钢量等于少消耗的铁水的铁元素重量。要使铁钢比降低 0.005，则转炉炼钢工序消耗的生铁就要减少 $0.005 \times 66.3488=0.3317$ 万 t，假设生铁的铁元素含量为 95%，则转炉多消耗的废钢为： $0.3317 \times 0.95=0.3152$ 万 t，钢对废钢的直接消耗系数增加了 $0.3152 \div 66.3488=0.0048$ 万 t。因此，转炉多“吃”废钢而使铁钢比降低 0.005 时，转炉对生铁、废钢的直接消耗系数分别为 0.9297、0.1065。转炉多“吃”废钢而使铁钢比降低 0.005 对产品能值和吨钢能耗的影响见表 4.9。钢对铁水、废钢的直接消耗系数分别是 α_{T-G} 、 α_{FG-G} 。

表 4.9 同时改变 α_{T-G} 、 α_{FG-G} 对产品能值的影响
Table 4.9 The influence of altering α_{T-G} and α_{FG-G} respectively on product energy value

产品名称	产品能值（kgce/t 产品）	
	$\alpha_{T-G}=0.9347$ $\alpha_{FG-G}=0.1018$	$\alpha_{T-G}=0.9297$ $\alpha_{FG-G}=0.1065$
石灰石	164.604	164.604
烧结矿	61.516	61.516
球团矿	32.058	32.058
焦炭	971.400	971.400
铁水	481.266	481.266
粗钢	475.468	472.841
精炼钢水	516.918	514.153
连铸板坯	550.117	547.276
2250mm 热轧板	637.199	634.288
1580mm 热轧板	653.705	650.782
1700mm 冷轧板	755.135	752.086

由表 4.9 和表 4.10 可知，减少铁水量、同时增加废钢使铁钢比降低 0.005，对转炉前各工序的产品能值没有影响，而只对转炉以后的工序的产品能值有影响。铁钢比降低 0.005 时，转炉钢及以它为原料的工序的产品能值降低，但降低的幅度不同，1700mm 冷轧板降低的幅度最大，为 3.049kgce/t 产品。但是下降率最大的是转炉工序的产品，是 0.5525%，这个主要原因是由铁水带入的能值占转炉工序产品能值比例最高，因此 α_{T-G} 下降对转炉工序的产品能值影响最大。吨钢综合能耗下降了 2.233kgce/t 钢，下降率是 0.3330%，由此可见降低铁钢比可以降低吨钢综合能耗，但是下降率比较小。

表 4.10 同时改变 α_{T-G} 、 α_{FG-G} 对吨钢综合能耗的影响

产品名称	$\alpha_{T-G}=0.9347$	$\alpha_{T-G}=0.9297$
	$\alpha_{FG-G}=0.1018$	$\alpha_{FG-G}=0.1065$
吨钢综合能耗 (kgce/t 钢)	670.573	668.340

由 4.3.1 和 4.3.2 节比较可知，改变矿钢比和铁钢比都对产品能值和吨钢综合能耗的产生一定影响，但是影响程度都比较小。图 4.4 是钢比系数对产品能值和吨钢综合能耗的影响比较图。由图 4.4 可知，在矿钢比和铁钢比都降低 0.005 时，后者对产品能值和吨钢综合能耗的影响要大于前者。而且随着工序不断进行，产品能值的下降量不断增加，但是下降率不断减少。

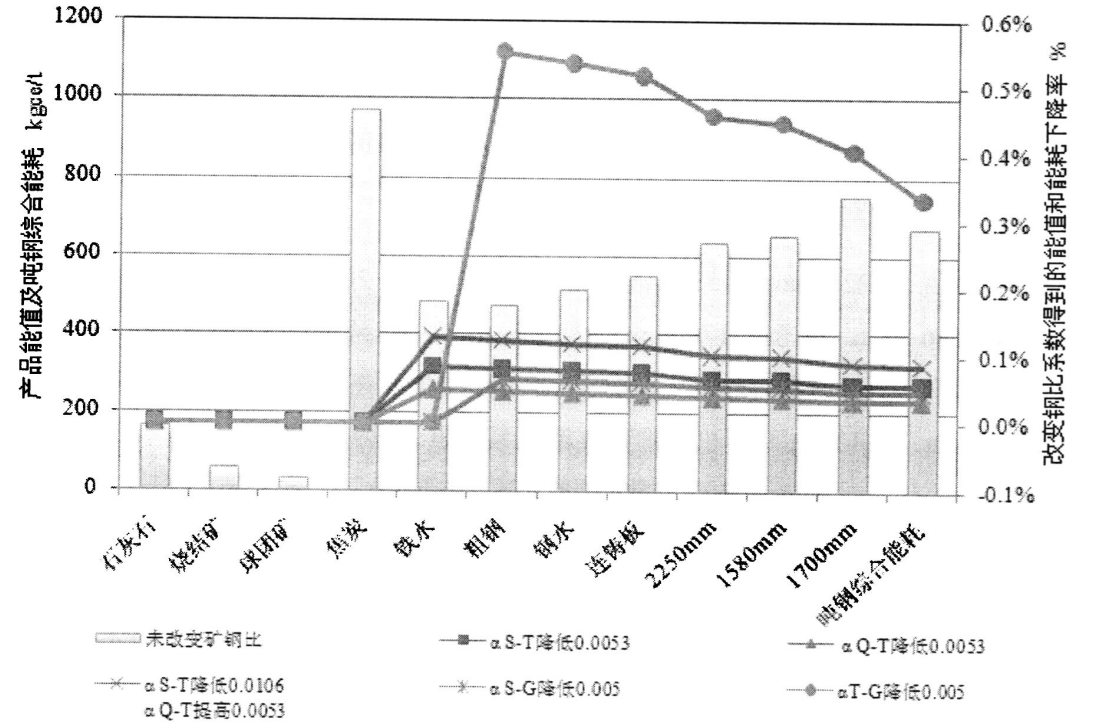


图 4.4 钢比系数对产品能值和吨钢综合能耗的影响

Fig. 4.4 The influence of altering steel ratio on product energy value and energy intensity per ton

4.4 产品结构对企业能耗的影响

钢铁企业的产品结构就是钢铁产品之间的比例关系。钢铁企业的产品可分为两类：一类是成品，主要是各种钢材；一类是原料和半成品，包括焦炭、生铁、钢坯等。各种产品之间有着内在的联系，必须按比例发展。比例合理与否，对钢铁企业的能源消耗影响很大。在市场需求变化而且企业生产能力允许的情况下，钢铁企业的产品结构将发生变化，从而企业的工序能耗和吨钢综合能耗也将发生变化。本文讨论当其它条件不变，只有产品结构发生变化时工序能耗和吨钢综合能耗的变化情况。表 4.11 是京唐钢铁 2010

年 8 月份的产品结构表。

表 4.11 京唐钢铁 2010 年 8 月份产品产量
Table 4.11 Production volume of Jingtang steel on 2010, August

产品种类	产量 (万 t)
连铸坯	6.1604
2250mm 热轧板	32.1260
1580mm 热轧板	6.8666
1700mm 冷轧板	14.1239

目前, 京唐钢铁在建设初期预计建设 2250mm、1580mm 热连轧机组各一套, 2230mm、1700mm、1550mm 冷连轧机组各一套, 其中在 2010 年年末建成了 2250mm、1580mm 热连轧机组和 2230mm、1700mm 冷连轧机组, 其中 2250mm、1580mm 热连轧机组都已正式投入生产, 1700mm 冷连轧机的酸轧、镀锌和连退已正式生产, 罩退板正在试生产。所以, 目前只是考虑 2250mm、1580mm 热连轧机组和 1700mm 冷连轧机组的产量变化, 对工序能耗和吨钢综合能耗的影响。产量变化的基本数量以 5 万 t 为基准。

4.4.1 热轧产品量对能耗的影响

京唐钢铁现有 2250mm、1580mm 组两套热连轧机。2010 年 8 月份产量分别是 32.1260、6.8666 万 t。在考虑 1700mm 冷轧产量不变的情况下, 当 2250mm、1580mm 热连轧分别增产 5 万 t 产量时, 产品结构变化对工序能耗和吨钢能耗的影响情况。表 4.12 是热轧 2250mm、1580mm 两套机组的直接消耗系数表。

表 4.12 热轧车间的直接消耗系数表
Table 4.12 The table of direct consumption factor of hot rolling process

	项目	单位	2250mm 热轧	1580mm 热轧
消耗产品	电	kW·h/t	87.2851	134.5061
	工业水	m ³ /t	0.5361	1.4944
	除盐水	m ³ /t	0.1078	0.0709
	生活水	m ³ /t	0.0009	0
	氧气	m ³ /t	0.1499	0
	氮气	m ³ /t	0.1006	0.2239
	压缩空气	m ³ /t	13.6170	34.6409
	中压蒸汽	kg/t	19.2921	13.5021
	焦炉煤气	m ³ /t	60.5182	44.2570
	高炉煤气	m ³ /t	69.0841	39.2860
回收产品	转炉煤气	m ³ /t	12.0374	12.8584
	蒸汽	kg/t	80.2251	31.9698

热轧工序主要消耗电和煤气, 其他产品的消耗都比较小; 主要的回收产品是蒸汽。由表 4.12 可见, 2250mm 热轧每吨钢板的耗电量要低于 1580mm 热轧, 但是煤气的吨钢板消耗量要小于 1580mm 热轧。热轧的回收蒸汽是加热炉汽化冷却回收的蒸汽, 这些回

收来的蒸汽主要是外供，一小部分低压蒸汽供自己车间内部消耗使用。

表 4.13 分别改变 $Q_{2250\text{mm}}$ 、 $Q_{1580\text{mm}}$ 对吨钢综合能耗的影响

Table 4.13 The influence of altering $Q_{2250\text{mm}}$ or $Q_{1580\text{mm}}$ on energy intensity per ton			
名称	$Q_{2250\text{mm}}=32.1260$ $Q_{1580\text{mm}}=6.8666$	$Q_{2250\text{mm}}=37.1260$ $Q_{1580\text{mm}}=6.8666$	$Q_{2250\text{mm}}=32.1260$ $Q_{1580\text{mm}}=11.8666$
吨钢综合能耗 (kgce/t 钢)	670.573	676.106	676.853

当 2250mm、1580mm 热连轧分别增产 5 万 t 时，冷轧车间的产量不变，主要变化的是连铸坯库存的产量。由于热轧时有损耗，所以当 2250mm 热连轧增产 5 万 t 时，连铸坯的库存产量减少 5.1242 万 t；当 1580mm 热连轧增产 5 万 t 时，连铸坯的库存产量减少 5.1439 万 t。表 4.13 是分别改变 $Q_{2250\text{mm}}$ 、 $Q_{1580\text{mm}}$ 对吨钢综合能耗的影响，其中 $Q_{2250\text{mm}}$ 、 $Q_{1580\text{mm}}$ 分别表示 2250mm、1580mm 热轧产量。

由表 4.13 可以看出当 $Q_{2250\text{mm}}=37.1260$ 万 t、 $Q_{1580\text{mm}}=6.8666$ 万 t 时，2250mm 热轧的产量增产率是 13.919%，而吨钢综合能耗是 676.106 kgce/t 钢，比原来不增产时的吨钢综合能耗增加了 5.533 kgce/t 钢，吨钢综合能耗增长率是 0.825%。而当 $Q_{2250\text{mm}}=32.1260$ 万 t、 $Q_{1580\text{mm}}=11.8666$ 万 t 时，1580mm 热轧的产量增产率是 27.989%，吨钢综合能耗是 676.853kgce/t 钢，比原来不增产时的吨钢综合能耗增加了 6.280kgce/t 钢，吨钢综合能耗增长率是 0.937%。由此可见，虽然热轧的产量都有较大幅度增加，当时吨钢综合能耗的增加幅度并不大，这主要是由于热轧属于轧制工序，只是对产品的外形进行加工处理，对产品品质改变并不大，消耗的能源并不是大。

4.4.2 冷轧产品量对能耗的影响

京唐钢铁原计划建设 2230mm、1700mm、1550mm 冷连轧机组各一套，但是到 2010 年为止，建成的冷轧生产线有 1700mm 和 2230mm，而且只有 1700mm 冷轧生产线正式投产使用。1700mm 冷连轧机的酸轧、镀锌和连退已正式生产，罩退板正在试生产。2230mm 冷连轧机组，机组已基本建设完成，正在进行生产测试，但未正式进行生产，因此在本文并未没有考虑 2230mm 冷连轧机组的能耗。1700mm 冷轧在 2010 年 8 月份产量是 14.1239 万 t。表 4.14 是 1700mm 冷轧的直接消耗系数表。

1700mm 冷轧工序主要消耗的能源介质是电、压缩空气、蒸汽和焦炉煤气。由表 4.14 可见每生产一吨 1700mm 冷轧板的耗电量是 119.3433kW·h/t。每生产一吨的冷轧板需要消耗的压缩空气量是 47.7334 m³，冷轧生产所需消耗的压缩空气主要作为动力使用。而蒸汽是用于设备加热升温使用，蒸汽的消耗量是 54.0430kg/t。燃料主要是以焦炉煤气和天然气为主，焦炉煤气的消耗是 38.0206m³/t，天然气消耗量比较小，只有 0.8984m³/t。

表 4.14 冷轧车间的直接消耗系数表

Table 4.14 The table of direct consumption factor of cool rolling process

	项目	单位	1700mm 冷轧
消耗产品	电	kW·h/t	119.3433
	工业水	m ³ /t	0.5211
	除盐水	m ³ /t	0.2285
	生活水	m ³ /t	0.0055
	氮气	m ³ /t	27.3962
	氢气	m ³ /t	0.8984
	压缩空气	m ³ /t	47.7334
	中压蒸汽	kg/t	54.0430
	焦炉煤气	m ³ /t	38.0206
	天然气	m ³ /t	0.8984

在考虑 1700mm 冷轧产量增产 5 万 t 时，产品结构变化对工序能耗和吨钢能耗的影响情况。1700mm 冷轧产量增产 5 万 t 时，主要可以通过连铸坯减少库存量和减少 2250mm、1580mm 热轧库存量来实现。当连铸坯减少库存量时，热轧 2250mm、1580mm 热轧库存量没有变化，多生产的热轧产品全部进入冷轧车间进行冷轧处理，这时连铸坯的库存量减少量是 5.3822 万 t，2250mm、1580mm 热轧的产量分别是 37.2651 万 t、21.7570 万 t，进入冷轧的产量分别是 5.1391 万 t、14.8904 万 t。当通过减少 2250mm、1580mm 热轧库存量来实现冷轧产量增加时，连铸坯减少库存量没有变化，热轧库存产品按照原有比例进入冷轧进行加工处理，2250mm、1580mm 热轧的库存量分别减少是 1.3436 万 t、3.8931 万 t，以满足冷轧产量增加 5 万 t 的目标。表 4.15 是冷轧产量变化对吨钢综合能耗的影响，其中 Q_{LZ} 、 Q_{2250mm} 、 Q_{1580mm} 、 Q_{1700mm} 分别表示连铸坯、2250mm、1580mm 热轧、1700mm 冷轧的产量。

表 4.15 冷轧产量变化对吨钢综合能耗的影响

Table 4.15 The influence of altering volume of cool rolling production on energy intensity per ton

名称	$Q_{1700mm}=14.1239$	$Q_{1700mm}=19.1239$	$Q_{1700mm}=19.1239$
	$Q_{LZ}=6.1604$	$Q_{LZ}=0.7782$	$Q_{LZ}=6.1604$
	$Q_{2250mm}=32.1260$	$Q_{2250mm}=32.1260$	$Q_{2250mm}=30.7823$
	$Q_{1580mm}=6.8666$	$Q_{1580mm}=6.8666$	$Q_{1580mm}=2.9734$
吨钢综合能耗 (kgce/t 钢)	670.573	683.381	677.004

由表 4.15 可以看出当连铸坯的库存量是 0.7782 万 t，热轧库存量不变化时，1700mm 冷轧的产量提高 5 万 t，此时吨钢综合能耗是 683.381 kgce/t 钢，比原来不增产时的吨钢综合能耗增加了 12.808 kgce/t 钢，吨钢综合能耗增长率是 1.910%。而当连铸坯的库存量不变化，减少热轧库存量时，吨钢综合能耗是 677.004kgce/t 钢，比原来不增产时的吨钢综合能耗增加了 6.431 kgce/t 钢，吨钢综合能耗增长率是 0.959%。

由此可见,通过不同方法使冷轧的产量提高 5 万 t,吨钢综合能耗并不相同。使用减少连铸坯库存量的方法,会使吨钢综合能耗大幅度提高,主要是由增加了热轧工序的能源消耗;而使用减少热轧存量的方法,吨钢综合能耗相对的增长较少,但是会受到钢坯种类的限制,往往不容易实现。

4.5 先进生产技术对企业能耗的影响

京唐钢铁采取新世纪科技发展方向的精品制造、高效连续化、节能环保和生产洁净钢的先进技术,可循环的钢铁制造流程。京唐钢铁集中采用了当今国际、国内先进技术 220 项,集成当今国内外重大关键性先进工艺和技术,体现了 21 世纪钢铁工业科技发展水平。如:高效能源转换的大型焦炉炼焦技术,精料、高风温、富氧大喷煤、高炉长寿等大型高炉强化冶炼综合技术,高效率、低成本的洁净钢生产技术,“一包到底”的炼铁—炼钢界面技术,高效率、无缺陷连铸坯生产技术,高效精准轧制技术,高炉煤气和转炉煤气的干法除尘,烧结、转炉、热风炉、加热炉的余热回收设施,大型干熄焦及发电,煤气—蒸汽联合循环发电,高炉压差发电、海水淡化等综合节能降耗和清洁化生产技术等。采用先进、成熟、节能、高效的工艺设备。如 7.63m 焦炉、500m² 烧结机、5500m³ 高炉、2250mm 热轧机等都是目前我国最大、世界上为数不多的大型化、现代化装备。

图 4.2 是京唐钢铁的主要先进技术图。采用“2+3”300t 大型转炉配置模式,打造了低成本、高效率“全三脱”洁净钢生产平台,铁水预处理率 100%、钢水精炼率 100%,精炼后钢水五大杂质元素总含量控制目标为 45ppm 以下,为生产高质量的精品板材创造了条件。2250mm 和 1580mm 热轧利用率 100%、铁素利用率 100%、吨钢新水消耗量 3.84t、水循环利用率 97.5%以上,固体废弃物和污水基本零排放。钢铁厂每年可提供 1800 万 t 浓盐水用于制盐,330 万 t 高炉水渣、转炉钢渣、粉煤灰等用于建筑原料,可以回收处理消化大量废钢铁、废塑料、废轮胎等社会废弃物,最终实现了钢铁厂和社会的废弃资源循环再利用。

4.5.1 海水淡化对能耗的影响

京唐钢铁在国内钢铁企业中率先使用海水淡化工艺生产高质量的除盐水。低温多效海水淡化工艺的优势比较明显:首先,对于企业而言,低温多效海水淡化设备的检修和维护费用相当低;低温多效装置施工安装简单,且运行控制系统较为简单,因为低温多效装置适合无人看管下的自动连续运行,并对操作人员的失误不敏感。低温多效装置对操作人员的要求较低;而且低温多效装置主要能源为蒸汽,该工艺结合京唐钢铁联合有限责任公司的 2×300MW 电站和钢厂内除冬季外排放的乏汽(100-150t/h),利用蒸汽能

源更方便；低温多效装置可以一步到位生产相当纯度的除盐水（小于 $10\mu\text{S}/\text{cm}$ ），而且可以为进一步的精除盐（要求的锅炉补充水水质小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ ）提供较好的原水；对于环境的影响也比较低，据有关资料显示，曹妃甸地区的海水已受到相当程度的污染，而低温多效装置对入料海水水质和污染的变化不太敏感，完全可以使用曹妃甸地区的海水；另外，海水淡化的副产品浓盐水送也可以外送盐场晒盐，实现资源的综合利用，进一步降耗减排。

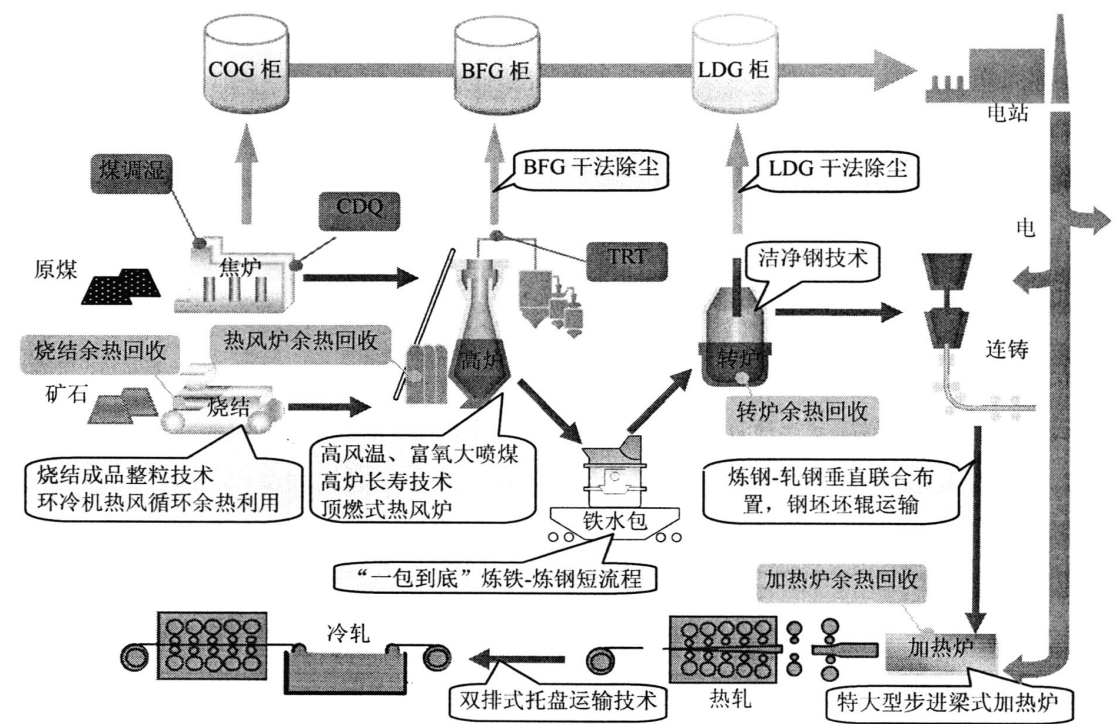


图 4.2 京唐钢铁的主要先进技术
Fig. 4.2 The main advanced technology of Jingtang steel

但是采取低温多效海水淡化工艺产生的除盐水对于京唐钢铁的能耗影响比较大。表 4.16 是 2010 年海水淡化车间的直接消耗系数表。从表 4.16 可以看出海水淡化工序主要消耗中压蒸汽和电。所使用 的中压蒸汽是要来自于自备电站的汽轮机抽汽和 130t 锅炉产出蒸汽。海水淡化消耗的电主要包括 2 部分，一部分是海水淡化工序生产设备的电力消耗， $1.458\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ；另一部分是提取海水消耗的电 量，直接消耗系数是 $0.574\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。

2010 年 8 月，京唐钢铁的除盐水产量是 676618m^3 ，经过计算可得出海水淡化产出的除盐水能值是 $15.180\text{kgce}/\text{m}^3$ ，这个能值数远远高于通过离子交换法制备方法产生的除盐水的能值（ $0.200\text{kgce}/\text{m}^3$ ）、自来水反渗透系统产生除盐水（ $0.350\text{kgce}/\text{m}^3$ ）和利用循环水排污水制造产生除盐水能值（ $0.485\text{kgce}/\text{m}^3$ ）。如果京唐钢铁不采取低温多效海水淡化的生产除盐水，而是采取从离子交换法、利用循环水排污水回收法和自来水反渗透系

统产生除盐水，对京唐钢铁的能耗有不同的影响。海水淡化工序主要涉及中压蒸汽和电的消耗。其所使用的中压蒸汽是要来自于自备电站的汽轮机抽汽和 130t 锅炉产出蒸汽，若取消海水淡化设备的，则减少自备电站的汽轮机抽汽和 130t 锅炉蒸汽产量，对企业整体的能耗影响较小。离子交换法、循环水排污水制造和自来水反渗透系统生产除盐水主要消耗的是电力，具体消耗数据见表 4.17。而京唐钢铁自备电站生产的电，有一部分外送，将这部分外送电用于除盐水的生产，能够量完全满足生产需要的电量。具体能耗数据的变化，见表 4.18 和表 4.19。

表 4.16 海水淡化车间的直接消耗系数表

Table 4.16 The table of direct consumption factor of LT-MED process			
	项目	单位	海水淡化
消耗产品	电	kW·h/m ³	2.032
	工业水	m ³ /m ³	0.015
	生活水	m ³ /m ³	0.001
	压缩空气	m ³ /m ³	0.396
	中压蒸汽	kg/m ³	113.385
	海水	m ³ /m ³	3.570
回收产品	冷凝水	m ³ /m ³	0.075
	浓盐水	m ³ /m ³	2.32

表 4.17 不同原理产生的除盐水的电耗比较

Table 4.17 Comparison of electricity consumption of demineralized water			
项目	方法		
	离子交换法	自来水反渗透法	循环水排污水法
除盐水的能值 kgce/m ³	0.200	0.350	0.485
电耗 kW·h/m ³	0.886	1.996	3.947

由表 4.18 和表 4.19 可见，随着除盐水能值的变化，绝大部分的主工艺产品的能值也随着变化。其中，当采取离子交换法制备方法生产除盐水时，除盐水的能值为 0.20kgce/m³，产品的能值变化最大。而在这些主工序产品能值中变化最大是 1700mm 冷轧板的产品能值。当除盐水的能值分别为 0.20kgce/m³、0.350kgce/m³、0.485kgce/m³ 时，1700mm 冷轧板的产品能值下降率分别是 2.42%、2.39%、2.37%。这主要是因为，在计算产品能值的过程中有累加过程，所以 1700mm 冷轧板的能值变化比例最大。石灰石、烧结矿、球团矿、焦炭的产品能值变化最小，而且焦炭的能值没有变化，主要因为焦炭的能值是由其计算固有热值得出。除盐水能值的变化对于辅助工序的产品能值影响比较小，从表 4.18 中可以看出，只有电、工业水、压缩空气和高炉鼓风的产品能值会因除盐水能值的变化而变化，其中工业水能值的变化率最大值是 26.01%，当除盐水能值是 0.20kgce/m³ 时，工业水的能值会下降 26.01%；而电和压缩空气的能值下降量和变化率都很小。

表 4.18 除盐水对产品能值的影响

Table 4.18 The influence of demineralized water energy value on product energy value

产品名称	产品能值 (kgce/t 产品)			
	15.18kgce/m ³	0.20kgce/m ³	0.350kgce/m ³	0.485kgce/m ³
石灰石	164.604	164.348	164.365	164.365
烧结矿	61.516	60.599	60.608	60.615
球团矿	32.058	32.028	32.028	32.028
焦炭	971.400	971.400	971.400	971.400
铁水	481.266	479.409	479.432	479.443
粗钢	475.468	466.316	466.421	466.496
精炼钢水	516.918	505.830	505.955	506.047
连铸板坯	550.117	538.598	538.733	538.828
2250mm 热轧板	637.199	623.493	623.649	623.761
1580mm 热轧板	653.705	640.243	640.397	640.504
1700mm 冷轧板	755.135	736.849	737.054	737.202
电	0.3839	0.3805	0.3805	0.3805
工业水	0.1907	0.1411	0.1416	0.1420
除盐水	15.180	0.200	0.350	0.485
生活水	0.0857	0.0857	0.0857	0.0857
氧气	0.2099	0.2080	0.2081	0.2081
氮气	0.2099	0.2080	0.2081	0.2081
氩气	0.7100	0.7037	0.7037	0.7038
氢气	0.3667	0.3667	0.3667	0.3667
压缩空气	0.0518	0.0513	0.0514	0.0514
高炉鼓风	0.0353	0.0350	0.0350	0.0350
高压蒸汽	0.2698	0.2698	0.2698	0.2698
中压蒸汽	0.1286	0.1286	0.1286	0.1286

表 4.19 除盐水对工序能耗的影响

Table 4.19 The influence of demineralized water energy value on operational energy consumption

工序名称	工序能耗 (kgce/t 产品)			
	15.18kgce/m ³	0.20kgce/m ³	0.350kgce/m ³	0.485kgce/m ³
套筒窑	164.604	164.348	164.365	164.365
烧结	61.516	60.599	60.608	60.615
球团	32.058	32.028	32.028	32.028
焦化	198.131	192.091	192.153	192.207
高炉	402.441	401.709	401.721	401.724
转炉	12.664	5.277	5.359	5.424
精炼	15.905	14.451	14.466	14.479
连铸	19.048	18.921	18.928	18.928
2250mm 热轧	73.423	71.521	71.539	71.553
1580mm 热轧	87.753	86.141	86.156	86.166
1700mm 冷轧	87.762	83.831	83.874	83.905
吨钢综合能耗	670.573	655.135	655.308	655.435

除盐水的能值变化对工序能耗的影响很明显,尤其是对转炉工序的能耗影响尤为显著。当除盐水的能值是 15.180kgce/m^3 时,转炉工序能耗是 12.664kgce/t 钢。而当除盐水的能值降为 0.20kgce/m^3 时,转炉工序能耗是 5.277kgce/t 钢,工序能耗下降率为 58.33% 。这主要是因为转炉工序的炼钢烟道和铸面需要除盐水用于冷却,所消耗的除盐水总量占海水淡化所生产的除盐水总量的 46.385% 。另外,转炉工序相对其他工序而言,其工序能耗比较低。因此,除盐水的能值降低对转炉工序的影响非常明显。除盐水能值的降低对吨钢综合能耗的降低也有比较明显的作用,在除盐水的能值是 15.180kgce/m^3 时,京唐钢铁的吨钢综合能耗是 670.573kgce/t 钢;当除盐水降低到 0.20kgce/m^3 时,吨钢综合能耗是 655.135kgce/t 钢,降低了 15.438kgce/t 钢,大约降低了 2.30% 。

虽然采取离子交换法、自来水反渗透系统和利用循环水排污水回收法产生除盐水对于企业的能耗降低起到了一定的作用。但是,采取上述的三种方法需要消耗大量的原材料。离子交换法需要消耗阳树脂、阴树脂、盐酸、碱和自来水。自来水反渗透系统则需要消耗杀菌剂、混凝剂、还原剂、阻垢剂、酸碱液、自来水、超滤膜和反渗透膜。而利用循环水排污水回收法,虽然减少了循环水排污水量,但是需要消耗大量的电和化学试剂。这些材料的使用会增加除盐水车间的生产费用,而且对于周围环境产生污染,不利于曹妃甸的环境保护。

4.5.2 烧结余热回收技术对能耗的影响

京唐钢铁为了充分利用烧结矿的余热,在 550m^2 烧结机与环冷机旁配置了一套环冷余热锅炉,这种设计既有利用烧结矿的冷却,减少了热空气及粉尘的外排,又可以降低烧结工序和企业整体能耗。京唐钢铁的 550m^2 烧结工序余热回收系统包含高温段余热回收装置和低温段余热回收装置。高温段余热回收系统主要流程是环冷机一冷段的高温废气通过烟罩上的热风管道经过耐热多管除尘器降尘后依次进入高温段高压过热器、高温段高压蒸发器和高温段高压水预热器,之后通过废气管道依次进入高温段低蒸发器和高温段低压水预热器,经过循环风机回到环冷机的冷却风管道作为冷却风使用。而低温段余热回收装置主要是由低温段水预热器及其流体进出接口组成。

京唐公司的烧结余热回收装置为烧结工序取得非常大的效益。京唐钢铁烧结机充分利用循环风机送回到环冷机一段烧结料层的 130°C 的热风,进行热风冷却,来达到改善烧结矿质量的目的。并且在二混加入低压蒸汽预热混合料,低压蒸汽将混合料预热至 70°C 以上,可以大大减少烧结过程中的水汽冷凝,减少过湿带厚度,进而增加烧结透气性,最终改善烧结矿的品质,提高生产效率。表 4.20 是余热系统投入运行前后烧结工序的指标对比表。

表 4.20 余热系统投入运行前后的指标对比

Table 4.20 Comparison of index of heat recovery system on agglomeration process						
	料温 ℃	利用系数 t/m ² ·h	综合合格率 %	一级品率 %	转鼓指数 %	筛分指数 %
投入后	59	1.169	97.06	65.47	76.73	5.21
未投入	71	1.218	99.17	69.50	77.15	5.01

由表 4.20 可以看出,余热系统投入使用烧结工序的产品和生产指标都有大幅度的提高。而烧结矿的粒度也有 10mm 以下的烧结矿粒度减少了 8.57%, 16mm 以上的粒级提高 9.11%, 余热回收系统对烧结粒级也有非常明显的作用。

2010 年 8 月,京唐钢铁的烧结的总产量是 75.9042 万 t, 蒸汽回收量是 30701t, 蒸汽压力是 0.78—1.27MPa, 蒸汽温度是 200—230℃。经过计算可得出烧结工序的能耗是 61.516kgce/t。这个工序能耗远远低于未使用余热回收系统的烧结工序能耗。具体的能耗变化数据, 见表 4.21。

表 4.21 余热回收系统对能耗的影响

Table 4.21 The influence of waste heat recuperation system on energy consumption				
项目	产品能耗 (kgce/t 产品)		工序能耗 (kgce/t 产品)	
	未投入	投入后	未投入	投入后
套筒窑	164.604	164.604	164.604	164.604
烧结	68.168	61.516	68.168	61.516
球团	32.058	32.058	32.058	32.058
焦化	971.400	971.400	198.131	198.131
高炉	489.399	481.266	402.441	402.441
转炉	483.147	475.468	12.664	12.664
精炼	525.001	516.918	15.905	15.905
连铸	558.421	550.117	19.048	19.048
2250mm 热轧	645.710	637.199	73.423	73.423
1580mm 热轧	662.248	653.705	87.753	87.753
1700mm 冷轧	764.049	755.135	87.762	87.762
吨钢综合能耗			676.523	670.573

由表 4.21 可见,随着余热回收系统对烧结矿石的产品能值影响非常大。首先未使用余热回收系统生产出的烧结矿能值是 68.168kgce/t, 这与采取余热回收系统生产出来的烧结矿能值有 6.652kgce/t 差距, 烧结矿的能值提高了 10.81%。余热回收系统对烧结工序能耗的影响很明显, 当企业采取余热回收系统时烧结工序的能耗是 61.516kgce/t。不使用余热回收系统的烧结工序的能耗是 68.168kgce/t, 烧结工序能耗大约提高了 10.81%。

余热回收系统的使用对吨钢综合能耗的降低也有比较明显的作用, 在使用余热回收系统时的京唐钢铁的吨钢综合能耗是 670.573kgce/t 钢, 要比不使用余热回收系统降低了 5.95kgce/t 钢, 大约降低了 0.887%。

4.5.3 干法熄焦发电技术对能耗的影响

干法熄焦又称干熄焦，是相对于湿熄焦而言采用惰性气体熄灭赤热焦炭的一种熄焦方法，是一项被较广泛应用的节能技术，其英文名称为 Coke Dry Quenching，简称 CDQ。干熄焦发电技术技术是利用冷的惰性气体，在干熄炉中与赤热红焦换热从而冷却红焦吸收了红焦热量的惰性气体将热量传给干熄焦锅炉产生蒸汽，被冷却的惰性气体再由循环风机鼓入干熄炉冷却红焦干熄焦。锅炉产生的蒸汽或并入厂内蒸汽管网或送去发电。

京唐钢铁采用最先进的环保型 7.63m 大型焦炉。这种焦炉一组的年产量为 200—230 万 t，相应的需要 2 套 125—140t/h 的 CDQ 才能满足需要。为了大幅度消减建设成本和取得节能效益，京唐钢铁采取了一套就可以处理一组焦炉焦炭的、最大处理能力达到 280t/h 的大型 CDQ。这种大型 CDQ 可以大幅度降低建设费用。从整体上看，由 2 套变成 1 套可以使设备紧凑化，故可消减建设成本大约 20%—25%；另外，还可以降低运行成本，CDQ 技术本身使用的电量可以降低，所以节能效益得以提高；节约了设备占地面积，最多可以节省 25%的土地。表 4.22 是京唐钢铁 CDQ 的技术参数。

表 4.22 京唐钢铁 CDQ 的技术参数
Table 4.22 Technical parameters of CDQ of Jingtang steel

项目	指标
焦炉配置	2×70 孔
每孔炭化室焦炭产量	44t
小时焦炭产量	260t/h
干熄焦装置的最大处理量	280t/h
入干熄炉焦炭温度	1000-1100℃
干熄后焦炭温度	≤200℃
焦炭烧损率	≤1%
蒸汽发生量	151t/h
蒸汽压力	9.5MPa
蒸汽温度	540℃

表 4.23 是 2010 年 8 月 CDQ 技术的消耗和回收情况。从表 4.23 可以看出 CDQ 技术主要回收红焦的显热用于发电，并且在发电过程中抽取一定量得蒸汽。电的回收量是 58.407kW·h/t 焦炭，蒸汽的回收量是 220.371kg/t 焦炭。与此同时 CDQ 还能够提高焦粉回收率，大约每吨焦炭可以多回收 15.085kg 焦粉。CDQ 主要消耗电用于 CDQ 内部换热气体的循环动力；另一部分电作为发电机组的动力源，大约每干熄一吨焦炭需要消耗 11.811kW·h。氮气的主要作用是吸收红焦热量并将热量传给干熄焦锅炉产生蒸汽，被冷却的氮气再由循环风机鼓入干熄炉冷却红焦。每吨焦炭需要 0.991m³氮气和 5.494m³压缩空气。

表 4.23 CDQ 的消耗与回收情况

Table 4.23 Consumption and recuperation of CDQ

	项目	单位	CDQ
消耗产品	电	kW·h/t 焦炭	11.811
	工业水	m ³ /t 焦炭	0.813
	除盐水	m ³ /t 焦炭	0.114
	氮气	m ³ /t 焦炭	0.991
	压缩空气	m ³ /t 焦炭	5.494
	中压蒸汽	kg/t 焦炭	27.931
回收产品	电	kW·h /t 焦炭	58.407
	蒸汽	kg/t 焦炭	220.371
	焦粉	kg/t 焦炭	15.085
	焦化除尘灰	kg/t 焦炭	0.065

2010 年 8 月，京唐钢铁的 CDQ 的总发电量 1600.79 万 kW·h，蒸汽回收量是 6.0398 万 t，蒸汽压力是 0.78-1.27MPa，蒸汽温度是 290℃。经过计算可得出焦化工序的能耗是 198.131kgce/t 焦炭。这个工序能耗远远低于不采取干熄焦而采取湿熄焦工艺的焦化工序能耗。具体的能耗变化数据，见表 4.24。CDQ 工艺主要涉及电和蒸汽的消耗。而湿法熄焦工艺主要消耗大量的水进行熄焦，据统计湿法熄焦的耗水量是 0.45m³/t 焦炭，而通常干熄焦的耗水量是 0.114m³/t 焦炭。

表 4.24 CDQ 对能耗的影响

Table 4.24 The influence of CDQ on energy consumption

项目	产品能耗 (kgce/t 产品)		工序能耗 (kgce/t 产品)	
	未使用 CDQ	使用 CDQ	未使用 CDQ	使用 CDQ
套筒窑	164.604	164.604	164.604	164.604
烧结	61.672	61.516	61.672	61.516
球团	32.058	32.058	32.058	32.058
焦化	971.400	902.149	253.134	198.131
高炉	494.615	481.266	414.801	402.441
转炉	487.948	475.468	12.664	12.664
精炼	530.055	516.918	15.905	15.905
连铸	563.613	550.117	19.048	19.048
2250mm 热轧	651.031	637.199	73.423	73.423
1580mm 热轧	667.589	653.705	87.753	87.753
1700mm 冷轧	769.621	755.135	87.762	87.762
吨钢综合能耗			701.148	670.573

由表 4.24 可见，随着 CDQ 对产品能值影响非常大。首先湿法熄焦生产出的焦炭能值是 902.149kgce/t，这与采取干法熄焦生产出来的焦炭能值有 39.551kgce/t 差距。这是因为采取了干法熄焦可以使焦炭 M₄₀ 提高大约 4.2%，M₁₀ 下降了 1.1%，从而提高了焦炭能值。采取干熄焦工艺可以回收一定量的干焦粉和焦化除尘灰，而京唐钢铁将干焦粉

和焦化除尘灰掺入烧结原矿中,代替一部分无烟煤,以节约燃料,降低工艺能耗。而采取湿熄焦就不能在烧结矿中掺混干焦粉和焦化除尘灰,从而提高了烧结矿石的能值,大约提高了 0.27%,达到 61.678kgce/t 烧结矿。湿熄焦对高炉产出的铁水能值也有一定的影响,大型高炉采取干熄焦可以使其焦比降低 20%,使高炉的生产能力提高 1%,这主要是因为干熄焦可以降低焦炭的 CRI,提高 CSR,而焦炭的 CRI 和 CSR 高低对焦炭的品质有非常重要影响。因此,使用湿法熄焦生产出来的焦炭,会使高炉铁水的产量降低,提高了高炉产品能值,从而影响了后续工序产品的能值。

CDQ 对工序能耗的影响很明显,尤其是对焦化工序的能耗影响尤为显著,当企业采取 CDQ 时焦化工序的能耗是 198.131kgce/t 焦炭。采取是湿熄焦时的焦化工序的能耗是 253.134kgce/t 焦炭,焦化工序能耗大约提高了 27.77%。主要是因为 CDQ 可以回收大量的蒸汽和电,虽然在回收电和蒸汽的过程也需要耗电作为动力源,消耗氮气作为换热循环气体和消耗其他的自产产品作为生产必须消耗品,但是这些消耗产品总能值远远小于回收产品总能值,从而降低了焦化工序能耗。而湿法熄焦除了需要消耗大量的水以外,基本不回收任何产品,而且还降低了焦炭的品质,影响后续工序产量和能耗。CDQ 的使用对吨钢综合能耗的降低也有比较明显的作用,在使用湿熄焦时的京唐钢铁的吨钢综合能耗是 701.148kgce/t 钢;当焦化工序使用 CDQ 时的吨钢综合能耗是 670.573kgce/t 钢,降低了 30.575kgce/t 钢,大约降低了 4.36%。

采用干法熄焦可以避免湿法熄焦对环境的污染。采用湿法熄焦,会产生大量含有酚、氰、硫化物及粉尘的蒸汽,严重污染了环境。干熄焦利用惰性气体,在密闭系统中将红焦熄灭,不污染环境;所产生的蒸汽可以用于发电,避免了相同规模的燃煤锅炉对大气的污染。因此,使用干法熄焦对京唐钢铁的能耗和环境保护有重要的影响。

4.5.4 干法除尘 TRT 对能耗的影响

高炉炉顶煤气余压发电 (TRT) 技术是利用高炉炉顶煤气压力能和热能,通过膨胀透平做功,驱动发电机发电,回收能量的技术。其英文全称为:“Top gas pressure Recovery Turbine”,缩写为 TRT。

京唐钢铁的高炉是国内首座 5500m³,采取了 68 项国内外先进技术,其中高炉煤气净化应用了布袋除尘工艺,并且不再设置湿式除尘作为辅助设施,为纯干式高炉煤气除尘装置,为了从充分回收炉顶余压余能,TRT 装置根据其上游的工艺条件,同样为全干式 TRT 工序系统,实现高炉工序的余压余能回收最大化的节能目标。表 4.25 是干法除尘 TRT 工艺的技术参数。

表 4.25 干法除尘 TRT 工艺的技术参数
Table 4.25 Technical parameters of dry dust TRT

性能参数	单位	TRT 运行点	
		干气 120℃	干气 150℃
透平轴端出力	kW	28800	30750
透平出口温度	℃	35.7	47.4
发电机效率	%	97.5	97.6
发电机出力	kW	28090	30010
发电机功率因数	%	85	85

干法除尘 TRT 工艺对钢铁企业的能耗有非常大的影响。表 4.26 是干法除尘 TRT 和湿法除尘 TRT 的消耗和回收情况表。从表 4.26 可以看出湿法除尘 TRT 主要是消耗水和电,其余可以忽略不计。电的消耗量是 12.50kW·h/万 m³ 高炉煤气,水的消耗量是 25.20m³/万 m³ 高炉煤气,其中循环水量是 25.00m³/万 m³ 高炉煤气,其余水补水消耗量。干法除尘 TRT 工艺采取的高炉煤气首先经过重力除尘器和干法袋式除尘器,之后再经透平机发电。因此,干法除尘 TRT 工艺主要消耗的是电、氮气、压缩空气和少量水,其中电的消耗量是 3.36kW·h/万 m³ 高炉煤气、氮气消耗量是 79.38m³/万 m³ 高炉煤气(氮气主要是用于脉冲反吹、气力输灰、喷水降温辅助起源)、压缩空气消耗量是 7.34m³/万 m³ 高炉煤气(压缩空气主要是箱体及管道置换填充用气),水的消耗量是 0.17m³/万 m³ 高炉煤气(用于换热器使用喷水降温使用及地面冲洗用水)。在电的回收方面,湿法除尘 TRT 回收电量是 197.10kW·h/万 m³ 高炉煤气(35.20kW·h/t 铁),干法除尘 TRT 回收电量是 287.59kW·h/万 m³ 高炉煤气(51.36kW·h/t 铁)。使用干法除尘回收的电量是湿法除尘的 1.46 倍,主要是在进入透平机前,采取干法除尘处理过的煤气温度和煤气压力要高于湿法除尘处理过的煤气。

表 4.26 湿法除尘 TRT 和干法除尘 TRT 的消耗与回收情况
Table 4.26 Consumption and recuperation of wet cooling condition TRT and dry dust TRT

项目		单位	湿法除尘 TRT	干法除尘 TRT
消耗产品	电	kW·h/万 m ³ 煤气	12.50	3.36
	工业水	m ³ /万 m ³ 煤气	0.20	0.17
	循环水	m ³ /万 m ³ 煤气	25.00	-
	氮气	m ³ /万 m ³ 煤气	-	79.38
	压缩空气	m ³ /万 m ³ 煤气	-	7.34
回收产品	电	kW·h/万 m ³ 煤气	197.10	287.59

2010 年 8 月,京唐钢铁的干法除尘 TRT 的总发电量 1263.01 万 kW·h。经过计算可得出高炉工序的能耗是 402.441kgce/t 铁。这个工序能耗远远低于采取湿法除尘的高炉工序能耗。具体的能耗变化数据,见表 4.27。

由表 4.27 可见,采取不同方式除尘的 TRT 对产品能值影响非常大。首先采取湿法

除尘工艺生产出的铁水能值是 487.749kgce/t，这与采取干法除尘生产出来的铁水能值有 6.483kgce/t 铁差距。这是因为采取了干法除尘可以减少循环水和电的消耗，并且在处理高炉煤气的过程中降低了煤气温降和压降，提高了 TRT 透平机的效率，从而提高了单位高炉煤气的发电量，从整体上降低了生产单位铁水的能耗。并且采取干法除尘生产出来的高炉煤气，经过 TRT 膨胀做功后的温度为 90℃，要比湿法除尘煤气温度高出 50℃，提高可煤气显热。同时由于采取了干法除尘煤气中的机械水含量减少，可以进一步增加煤气热值，提高了煤气的理论燃烧温度。干法除尘后的高炉煤气用于热风炉及其他炉窑，可以使热效率提高 5—6%，如果煤气直接供热风炉使用，风温可提高 25℃左右，可降低焦比 5kg/t，而且风温提高了之后可增加喷煤量，以及增加生铁量，因此降低了高炉工序的能耗。

表 4.27 湿法除尘 TRT 和干法除尘对能耗的影响
Table 4.27 The influence of TRT on energy consumption

项目	产品能耗 (kgce/t 产品)		工序能耗 (kgce/t 产品)	
	湿法除尘	干法除尘	湿法除尘	干法除尘
套筒窑	164.604	164.604	164.604	164.604
烧结	61.516	61.516	61.516	61.516
球团	32.058	32.058	32.058	32.058
焦化	971.400	971.400	198.131	198.131
高炉	487.749	481.266	408.924	402.441
转炉	481.528	475.468	12.664	12.664
精炼	523.297	516.918	15.905	15.905
连铸	556.670	550.117	19.048	19.048
2250mm 热轧	643.915	637.199	73.423	73.423
1580mm 热轧	660.447	653.705	87.753	87.753
1700mm 冷轧	762.169	755.135	87.762	87.762
吨钢综合能耗			676.633	670.573

干法除尘的 TRT 对工序能耗的影响很明显。虽然采取干法除尘需要消耗一定数量的氮气和压缩空气，但是这部分氮气和压缩空气的能值要低于湿法除尘消耗的循环水能值，而且采取干法除尘的 TRT 的单位高炉煤气发电量高于湿法除尘的单位发电量，因此采取干法除尘的高炉工序能耗低于采取湿法除尘的高炉工序能耗。干法除尘的使用对吨钢综合能耗的降低也有比较明显的作用，在使用干法除尘 TRT 时的京唐钢铁的吨钢综合能耗是 670.573kgce/t 钢；使用湿法除尘 TRT 时的吨钢综合能耗是 676.633kgce/t 钢，降低了 6.060kgce/t 钢，大约降低了 0.896%。

采取高炉煤气干法除尘技术后，净煤气冷凝水中氯离子含量升高，会去煤气管道系统产生异常腐蚀。但是，高炉煤气采取干法除尘工艺可以杜绝湿法除尘中产生的大量有毒污水、污泥的产生。干法除尘灰仍可进行二次利用，其环境效益、社会效益显著。干

法除尘由于减少建设浊环水工程项目，比湿法除尘工艺可节约建设面积。因此，使用干法除尘的 TRT 对京唐钢铁的能耗和环境保护有重要的影响。

4.5.5 转炉煤气干法除尘对能耗的影响

转炉煤气是钢铁企业重要的二次能源。在以前的炼钢车间都是采用湿式除尘法对转炉煤气进行处理。湿式除尘法，又叫氧气转炉煤气回收法(Oxygen Converter Gas Recovery)，简称 OG 法。转炉烟气净化系统采用湿式未燃法"比肖夫"系统，其系统主要由转炉汽化冷却烟道、一级文氏管、脱水器、二级文氏管、脱水器、脱水塔、煤气回收和污水处理等部分组成。后期为降低能耗，对 OG 法进行不断改造，将用喷淋冷却塔替代一级文氏管、环缝洗涤塔替代二级文氏管。但经过一段时间使用后，OG 法存在一些问题，最主要的问题是除尘后的煤气含尘量高，需在转炉煤气柜后面设置湿法电除尘器进行精除尘；需要大量的洗涤用水，其产生的污水和污泥需要进一步处理。系统阻损大、耗能高、不利于节能；占地面积大。

德国鲁奇公司（Lurgi）和蒂森钢厂（Thyssen）联合开发了转炉煤气干法除尘回收技术，又叫 LT 法。这种转炉煤气干法除尘主要由汽化冷却烟道、蒸发冷却塔、电除尘器、轴流风机、煤气切换站、煤气冷却塔、转炉煤气柜、转炉煤气加压站等组成。转炉煤气含尘量降至 10mg/m³ 转炉煤气可以直接使用。干法除尘的除尘效率高、耗水量少、系统阻损小、风机寿命长、节约能源、占地面积小等优点。京唐钢铁公司的炼钢工序就是采取这种干法除尘对转炉煤气进行除尘处理。表 4.28 是转炉煤气湿法除尘和干法除尘的技术指标比较。

表 4.28 OG 法和 LT 法的主要技术指标
Table 4.28 Main technical indexes of OG method and LT method

项目	单位	OG 法	LF 法
系统阻力	kPa	16.5	3.0
煤气风机电机功率	kW	2240×2	420×2
净煤气含尘浓度	mg/m ³	100	10
粉尘回收方式		污泥、泥饼	干粉加湿
二次污染程度		水污染	无
电消耗量	kW·h/t 钢	6.778	3.054
水消耗量	m ³ /t 钢	0.284	0.05
转炉煤气回收量	m ³ /t 钢	70	91.4
蒸汽回收量	kg/t 钢	43.33	79.81

2010 年 8 月，京唐钢铁的粗钢产量是 66.3488 万 t，干法除尘回收的煤气量是 51291000m³。经过计算可得出转炉工序的能耗是 12.664 kgce/t 铁。这个工序能耗远远低于采取 OG 法除尘的转炉工序能耗。具体的能耗变化数据，见表 4.29。

表 4.29 转炉煤气 OG 法和 LT 法对能耗的影响
Table 4.29 The influence of OG method and LT method on energy consumption

项目	产品能耗 (kgce/t 产品)		工序能耗 (kgce/t 产品)	
	OG 法	LF 法	OG 法	LF 法
套筒窑	164.604	164.604	164.604	164.604
烧结	61.516	61.516	61.516	61.516
球团	32.058	32.058	32.058	32.058
焦化	971.400	971.400	198.131	198.131
高炉	481.266	481.266	402.441	402.441
转炉	487.134	475.468	24.330	12.664
精炼	529.198	516.918	15.905	15.905
连铸	562.733	550.117	19.048	19.048
2250mm 热轧	650.128	637.199	73.423	73.423
1580mm 热轧	666.684	653.705	87.753	87.753
1700mm 冷轧	768.676	755.135	87.762	87.762
吨钢综合能耗			682.239	670.573

由表 4.29 可见，采取不同方式除尘对粗钢的能值影响非常大。首先采取湿法除尘工艺生产出的粗钢能耗是 487.749kgce/t 钢，这与采取干法除尘生产出来的粗钢能值有 11.666kgce/t 钢差距。这是因为采取了 LT 法除尘可以减少水和电的消耗，在处理转炉煤气的过程中降低了煤气含尘量，在供用户前不再需要电除尘器，而且因为 LT 法除尘的系统阻力小于 OG 法，所以系统电耗量也大幅度下降。LT 法控制程度高，煤气回收时切换速度快，有效保证了烟气中 CO 体积分数，使其煤气回收量高于 OG 法。干法的余热回收系统的锅炉回收蒸汽能力高于湿法的回收能力，所以吨钢蒸汽回收量也是 LT 法大于 OG 法。

LT 法除尘的使用对吨钢综合能耗的降低也有比较明显的作用。在使用 LT 法时的京唐钢铁的吨钢综合能耗是 670.573kgce/t 钢；使用 OG 法时的吨钢综合能耗是 682.239kgce/t 钢，降低 11.666kgce/t 钢，大约降低了 1.71%。

采取转炉煤气 LT 法除尘技术后，工艺能耗更低、余热回收效率更高，节能效果要优于湿法。但是 LT 法余热回收运行的稳定性要比 OG 法除尘系统差，有待改进，而且在设备投资方面 LT 法要大于 OG 法。而从环境角度来说，LT 法的要远远优于 OG 法。因此，使用 LT 法对京唐钢铁的能耗和环境保护有重要的影响。

通过 4.5 节的分析，我们可以看出先进的生产技术对企业的产品能值、工序能耗和吨钢综合能耗有着非常重要的影响。但是采取先进的生产技术不一定会使企业的能耗下降，反而还会提高企业的能耗，海水淡化技术的使用会使除盐水的能值上升，导致工序能耗增加，企业的吨钢综合能耗上升。节能技术的使用可以降低企业的工序能耗和吨钢综合能耗，其中 CDQ 的使用对能耗影响尤为明显，可以是吨钢综合能耗减少 30.575kgce/t

钢。影响程度较小的是烧结余热回收技术和干法除尘 TRT 技术，分别使吨钢综合能耗减少 5.95kgce/t 钢和 6.060kgce/t 钢。

4.6 外部因素对企业能耗的影响

就一个钢铁企业而言，其工作重点并不一定就是以“降低能耗”为核心，一些外部因素也会导致企业采取一些与“降低能耗”相反的生产方式和生产工艺。这种外部因素主要有国家政策、产品价格、环境要求、地方政府调控、国际环境影响等因素，本章节主要以国家政策和产品价格为主要研究对象，对其进行分析，以了解国家政策和产品价格对钢铁企业的能耗影响。

4.6.1 国家政策

国家政策对钢铁企业的运营有非常重要的影响，对钢铁企业的能耗也有着一定的影响力。例如在节能减排的初期阶段，我国就通过政策，调查重点企业和地方骨干企业的能源消耗情况，抓节能管理，堵塞跑冒滴漏，通过“扫浮财”、抓能源管理，扭转了以往钢铁企业不考核能源消耗、无统计能源数据的历史。之后在 1991 年我国又制定了《产品单位产量能源消耗定额编制通则》（GB/T12723-1991），在 2008 年又重新修订^[46]。2005 年中华人民共和国国家发展和改革委员会发布施行了，经国务院常务会议讨论通过，经国务院同意的《钢铁产业发展政策》，该政策中明确规定了要严格可持续发展和循环经济理念，提高环境保护和资源综合利用水平，节能降耗。最大限度地提高废气、废水、废物的综合利用水平，力争实现“零排放”，建立循环型钢铁工厂。并对要求钢铁企业的必须发展余热、余能回收发电技术，对吨钢综合能耗降、吨钢可比能耗和吨钢耗新水降低标作出了明确的规定，并且对一些先进技术做出了一定要求，要求钢铁企业，建设污水和废渣综合处理系统，采用干熄焦，焦炉、高炉、转炉煤气回收和利用，煤气—蒸汽联合循环发电，高炉余压发电、汽化冷却，烟气、粉尘、废渣等能源、资源回收再利用技术，提高能源利用效率、资源回收利用率 and 改善环境。在 2010 年 6 月 4 日国务院办公厅又出台了《国务院办公厅关于进一步加大节能减排力度加快钢铁工业结构调整的若干意见》，更是进一步明确钢铁企业的节能减排任务^[47]。

这些法规都体现我国对钢铁行业的节能降耗降低排放的要求，同时也对钢铁企业的能源消耗提出了非常严格的要求，也直接促进了钢铁企业对节能减排中的重视。例如在《粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额》中对非常明确的能耗限额限定值^[48]，表 4.30 是国家对现有粗钢生产主要工序单位产品能耗限额限定值的规定。

表 4.30 现有粗钢生产主要工序单位产品能耗限额限定值
Table 4.30 Limited value of energy consumption per unit product of main process

工序名称		单位产品能耗限额限定值 (kgce/t)
烧结工序		≤65
高炉工序		≤460
转炉工序		≤10
电炉工序	普钢电炉	≤215
	特钢电炉	≤325

从表 4.30 可以看出,一些钢铁企业的生产工序能耗并不满足国家所要求的能耗限定值,而不能达到国家要求的工序设备应进行整改或停产,这就要求钢铁企业必须重视节能减排,降低企业自身的能耗,已达到国家所规定的标准。由此可见,国家政策对钢铁企业的能耗高低有非常重要的影响。

京唐钢铁联合有限责任公司钢铁厂项目是纳入国家“十一五”规划纲要的重点工程。在企业建设初期,就确定要以循环经济理念进行企业规划设计,以“减量化、再利用、资源化”为原则,以低消耗、低排放、高效率为特征,对生产过程中的余热、余压、余气、废水、含铁物质和固体废弃物充分循环利用,基本实现零排放,使新钢厂具有钢铁生产、能源转换、城市固废消纳和为相关行业提供资源等功能,成为我国钢铁行业循环经济的示范基地。例如用先进的技术回收利用低温热源用于海水淡化,使钢铁厂生产过程中所产生的能源得到充分利用。采用海水淡化技术,每年可生产 1800 万吨淡水,占钢铁厂用水总量的 50%左右,剩下的浓盐水用于制盐,还可以减少有毒有害的物质排放。但是采取海水淡化要比使用正常除盐水生产设备的能耗高,本文已在 4.5.2 节中对采取海水淡化的能耗做了比较分析。由此可见,国家的一些循环经济的生产理念也会对钢铁企业的能耗有影响。

国家对一些能耗的规定也会导致钢铁企业的能耗浮动。例如,在 2006 年起我国将电力折标系数从等价值系数的 0.404kgce/(kW·h)调为当量系数的 0.1229kgce/(kW·h),这使我国有关工序能耗值均有较大幅度下降。而在国外的日本电力折标系数为 0.3502kgce/(kW·h),韩国为 0.350kgce/(kW·h),欧洲在 0.320kgce/(kW·h)左右。从这点来说,我国的钢铁企业能耗就与国外企业有较大的不可比性。

综上所述,我国钢铁企业的能耗会受到我国政策的影响,国家的政策法令起到导向作用,促进钢铁企业工业工艺技术的不断发展,促使钢铁企业加快使用节能技术,鼓励企业按照国内外或国际上领先水平进行技术改造,强化企业的节能减排意识,降低企业自身能耗。

4.6.2 产品价格

京唐钢铁作为一个以营利为目的的钢铁企业，必定要企业利益作为生产的核心。而企业利益往往与企业能耗存在着一定的矛盾。

京唐钢铁钢将主要产品定位于高档次精品板材，冷热轧转换比 54.7%，涂镀层比 51.5%。采用了“全三脱”工艺的洁净钢平台可生产出稳定的高品质钢水，具有国内外最高轧制水平的 2250 毫米、1580 毫米热轧生产线和 1700 毫米、2230 毫米冷轧生产线等，保证了生产的高效率和产品的高质量，为生产高端产品奠定了坚实的基础。采取“全三脱”工艺的洁净钢技术和生产高精板材产品必将需要京唐钢铁消耗更多的能源，从吨钢综合能耗和工序能耗的角度来讲，这也就往往导致企业能耗上升，工序能耗过多。而从京唐钢铁的自身利益来说，走“洁净钢”和“高精板材产品”的路线，会使企业得到最大的经济效益的方法，会让企业的利益得到了最大化，同时使京唐钢铁在钢铁行业内部的地位等到了加强和巩固，也会为中国建立自先进钢铁行业做出自己贡献。

京唐钢铁对生产过程中的含铁物质和固体废弃物充分循环利用。例如，京唐钢铁的自备电站回收电站锅炉烟气除尘灰，这些粉煤灰具有一定的使用价值，可以外销水泥厂或建材厂等企业。但是除尘灰这种固体废弃物并没有进入企业内部进行再循环，因此，将其回收必将会导致企业能源消耗增加。而回收这些固体废弃物对企业而言，会使企业增加了自身的生产利润，提高了企业的效益；对于环境而言，则减少了固体废弃物的排放和污染，有利用保护曹妃甸的沿海环境。由此可见，企业利益与企业能耗之间是存在矛盾的。

这也说明了一个企业的先进性，不仅从效益、能耗上看，更要从安全、环保、综合利用水平等方面综合考核。

第5章 结论

通过调研,分析了京唐钢铁的能源消耗及其影响因素。建立了京唐钢铁的投入产出模型并对其进行的静态分析,剖析了京唐钢铁先进的关键技术与吨钢能耗的关系,利用投入产出法模型探讨了影响能耗的若干热点问题。通过这些研究工作,主要得到以下结论:

(1) 通过对京唐钢铁的能耗现状的调研表明:生产布局先天不足,技术装备落后、能源转换水平低、余热余能回收差不再是制约京唐钢铁的能耗下降的原因。京唐钢铁能耗偏高主要原因是在计算各种能源介质的能值是以企业的真实转换水平进行折算。另外,京唐钢铁所使用的一些先进设备也是导致能耗偏高的主要原因。

(2) 京唐钢铁的采取了先进的生产布局,降低了产品的运输消耗,将主产品的运输能耗降到 1.31kgce/t 钢。并且采取“一包到底”的技术,避免了铁水损耗和铁水温度的下降,使钢水在脱硫前的温度保持在 $1430\pm 20^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 钢比系数是影响产品能值和吨钢综合能耗的重要因素。矿钢比和铁钢比分别降低 0.005 时,铁钢比对产品能值和吨钢综合能耗要大于矿钢比,可以使吨钢综合能耗下降 0.3330%。采取不同的生产方案对吨钢综合能耗有着不同的影响。2250mm 热轧板和 1580mm 热轧板都增产 5 万 t 时,前者的吨钢综合能耗的增加率为 0.825%,后者的增加率为 0.937%。冷轧产品产量增加 5 万 t 时,最多可以使吨钢综合能耗增加 0.959%。

(5) 各种先进生产技术和节能措施对产品能值、工序能耗和企业的吨钢综合能耗的影响不尽相同。海水淡化技术的使用会造成企业产品能值、工序能耗和吨钢综合能耗的上升,最多可使吨钢综合能耗增加 15.438kgce/t 钢。在四种节能技术中,干熄焦发电技术对企业的工序能耗和吨钢综合能耗的影响最大,可以使京唐钢铁的吨钢综合能耗下降 4.36%。转炉煤气干法除尘回收技术的使用可以使企业的吨钢综合能耗降低 1.71%,烧结余热分段回收技术和干法除尘 TRT 技术对京唐钢铁的吨钢综合能耗影响最小,在 0.89%左右。

(6) 外部因素对企业能耗有着非常重要的影响,国家政策的调整往往会促进企业降低能源消耗。

此页不缺内容

参考文献

1. 高洪深. 工业企业投入产出分析[M]. 北京: 中国计划出版社, 1992
2. 钱伯章. 节能减排——可持续发展的必由之路[M]. 北京: 科学出版社, 2008
3. 殷瑞钰. 中国钢铁业发展与评估[J]. 金属学报, 2002, 38 (6): 561-567
4. World steel Association. World crude steel output increases by 15% in 2010. [EB/OL]. <http://www.worldsteel.org/index.php?action=newsdetail&id=319>
5. 王绍文, 杨景玲, 贾勃. 冶金工业节能与余热利用技术指南[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010, 3
6. 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2010年国民经济和社会发展统计公报. [EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjgb/ndtjgb/qgndtjgb/t20110228_402705692.htm
7. 蔡九菊, 王建军. 钢铁工业的能源节约与环境保护[J]. 2006中国科协年会论文集(下册), 2006, 9-17
8. 陆钟武, 蔡九菊. 系统节能基础[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2010
9. 王维兴. 2010年重点钢铁企业技术经济指标评述. [EB/OL]. <http://www.csm.org.cn/news/shownews.aspx?newsId=5036>
10. 窦彬. 日韩钢铁行业节能政策及启示[J]. 当代经济, 2007(8): 80-82
11. 蔡九菊, 赫冀成, 陆钟武等. 过去20年及今后5年中我国钢铁工业节能与能耗剖析[J]. 钢铁, 2002, 37(11): 68-73.
12. 吕玉红. 钢铁企业能源管理系统的开发与应用[J]. 山东冶金, 2010, 3: 64-66
13. 王鼎, 冯玉民, 薄宏伟. 宝钢能源集散控制与管理系统[J]. 上海节能, 2002, 2: 7-10
14. 胡宇. 浅析大型钢厂能源管理中心的建立[J]. 科技传播, 2010, 4: 20-21
15. 王维兴. 科学评价中国钢铁工业能耗现状与国内外对标[J]. 四川冶金, 2009, 8(4): 1-6
16. 王维兴. 2010年重点钢铁企业能耗述评. [EB/OL]. <http://www.chinasie.org.cn/newsinfo.aspx?lei=36&id=67179>
17. 王维兴. 百分之十能耗差距如何弥补. [EB/OL]. <http://www.china5e.com/show.php?contentid=131051>
18. 陆钟武, 周大刚. 钢铁工业的节能方向和途径[J]. 钢铁, 1981, 16 (10): 63-66
19. 陆钟武. 工业节能的若干问题[J]. 东北工学院学报, 1984, 3: 105-117
20. 陆钟武. 对我国冶金热能工程学科的任务和研究对象等问题的探讨[J]. 冶金能源,

1984, 3 (3) : 1-5

21. 陆钟武, 谢安国, 周大刚. 再论我国钢铁工业节能方向和途径[J]. 钢铁, 1996, 31 (2) : 54-58
22. 谢安国, 陆钟武. 钢铁工业结构调整对能源消耗的影响[J]. 钢铁, 1996, 31(11): 53-57
23. 陆钟武, 蔡九菊. 系统节能基础[M]. 北京: 科学出版社, 1993
24. 陆钟武, 蔡九菊, 于庆波, 谢安国. 钢铁生产流程的物流对能耗的影响[J]. 金属学报, 2000, 36 (4) : 370-378
25. H Taniguchi, K Mouri, T Nakahara. Exergy Analysis on Combustion and Energy Conversion processes[J]. Energy, 2005, (30): 111-117.
26. Ma'rcio Macedo Costa, Roberto Schaeffer, Ernst Worrell. Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems[J]. Energy, 2001, 26: 363 - 384
27. 陈光. 钢铁企业能源模型及其氧气系统动态仿真[D]. 沈阳东北大学, 2002
28. 蔡九菊. 鞍钢炼铁系统用能优化模型的研究及应用[R]. 东北工学院科研报告, 1984
29. 关宗山. 鞍钢能源投入产出模型及能源预测[J]. 鞍钢技术, 1984, 1: 36-40
30. 马弘毅. 杭州钢铁厂炼铁系统用能优化模型的研究[D]. 沈阳东北工学院, 1984
31. 北京首钢国际工程技术有限公司. 冶金工程设计理念的创新与实践——北京首钢国际工程技术有限公司总体设计京唐钢铁厂创新技术应用集成[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010
32. 王绍文, 钱雷, 邹元龙. 钢铁工业废水资源回用技术与应用, 北京: 冶金工业出版社, 2008
33. 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005
34. 李秉全. 投入产出技术与企业管理现代化[M]. 北京: 科学出版社, 1988
35. 东北大学, 首钢总公司. 首钢2008压产预案能耗分析及对策研究[Z]. 2007.
36. 杜涛, 蔡九菊. 钢铁工业能源节约对环境负荷的影响[J]. 材料与冶金学报, 2003, 2(3) : 232-236
37. 蔡九菊, 杜涛等. 钢铁生产流程环境负荷评价体系的研究方法[J]. 钢铁, 2002, 37(8) : 66-70
38. 仇晓磊, 孟庆玉等. 钢铁生产长流程工序能耗数学模型研究[J]. 冶金能源, 2007, (26):3-6
39. 陈光, 陆钟武. 宝钢能源优化模型的研究[J]. 冶金能源, 2003, 22(1) : 5-9
40. 谢安国. 钢铁工业和企业能源消耗系统分析方法的研究(D), 沈阳东北大学, 1997

41. 魏建心. 钢铁企业能源消费指标浅析[J]. 冶金能源, 2001, (5): 9-10
42. Jacco C.M. Farla, Kornelis Blok. The Quality of Energy Intensity Indicators for International Comparison in the Iron and Steel Industry [J], Energy Policy. 2001, 29: 523-543
43. 谢安国, 陆钟武. 降低铁钢比的途径和节能效果分析[J]. 冶金能源, 1996, (1): 11-13
44. 于庆波, 陆钟武, 蔡九菊. 钢铁生产流程的物流对能耗影响的计算方法[J]. 金属学报, 2000, 36(4):379-382
45. Karen R. Polenske et al. A Chinese cokemaking process-flow model for energy and environmental analyses [J], Energy Policy, 2002, 30: 865-883
46. GB/T12723-1991, 产品单位产量能源消耗定额编制通则[S]
47. 国务院办公厅. 国务院办公厅关于进一步加大节能减排力度加快钢铁工业结构调整的若干意见[Z]. 2010
48. GB21256-2007, 粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额[S]

此页不缺内容

致 谢

本论文是在杜涛副教授的悉心指导下完成的，在论文的选题、研究方案确定以及论文的撰写过程中，导师都给予了深入、细致的指导。导师渊博的学识、严谨的治学风范和废寝忘食的工作作风将使我一生受益。在整个研究生学习阶段，不论在学习和生活各方面都得到了导师无微不至的关怀和照顾。我不仅学会怎样做学问，更为重要的是学会了怎样做人，授业之恩终生难忘！在此，谨向导师表示衷心的感谢和深深的敬意！

论文的完成也离不开实验室其他老师的指导与帮助，感谢蔡老师给予我的指导，实验室每次汇报蔡老师都在百忙中抽空参加，他认真地指出论文中存在的问题和需要修改地方，为我的学习指点迷津，感谢王连勇老师、张琦老师在学习和生活上给予我的帮助，他们给我的精神鼓励和物质帮助是我在迷茫和彷徨中前进的动力，在他们身上我体会到真诚的味道和团体的力量，在论文完成之际，我收获的不仅是学业，还有友谊。

感谢实验室的师兄孙文强和宋军，硕士毛虎军、田永华、于海、张浩浩、张大伟、力杰、尹玉婷、郭宁，在两年的研究生学习生活中，他们给予了我诸多帮助。特别感谢师兄孙文强，在平时的学习中，我得到了他细心的指导和热心的帮助，在论文完成的过程中，他多次帮我修改论文，提出了许多宝贵意见。

感谢我的父母，感谢他们对我的默默支持和关心。

在京唐钢铁的调研过程中，我们得到了各级领导的支持与现场工作人员的积极配合和悉心的讲解，使我学到了很多课本上没有的东西，在此一并表示感谢！

在论文完成之际，再次对上面提到的各位表示衷心的感谢！

此页不缺内容

攻读学位期间参与的科研项目和发表论文情况

一、参与的科研项目：

1. 大型联合企业先进能源管理系统开发及应用，2010-2011
2. 东北三省“十二五”期间大气污染物减排潜力分析的研究，，2009-2010
3. 生物质热工测试—煤与生物质颗粒掺烧实验测试，2009-2010

二、发表论文：

1. Yong Liu, Lianyong Wang, Tao Du. Co-combustion of Coal and Biomass Pellet Effect on the Performance of Chain Boiler[A]. 2011 International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering[C].（已录用）
- 2.. 刘勇，王连勇，杜涛. 我国生物质的回收与利用[A]. 2010 全国能源与热工学术年会论文集[C]. 厦门，2010：293-301
4. 冷营盈，刘忠发，刘勇. 燃煤锅炉改造为高-转炉煤气掺混燃烧锅炉[A]. 2010 全国能源与热工学术年会论文集[C]. 厦门，2010：1-2
3. Wenqiang Sun, Jiuju Cai, Yong Liu. Construction of Energy Management and Control nformation System in Iron and Steel Enterprise[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011, 134(1): 161-166.