

1932007

分类号_____

密级_____

UDC_____

学 位 论 文

首钢 2008 减产方案能耗分析

作 者 姓 名：葛 红

指 导 教 师：杜 涛 副教授

东北大学热能与环境工程研究所

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：2008. 2. 10

论文答辩日期：2008. 3. 6

学位授予日期：

答辩委员会主席：蔡元菊

评 阅 人：蔡元菊 文博

东 北 大 学

2008 年 2 月

A Dissertation in Thermal Engineering



Analysis on Energy Intensity of Shougang Output-cut Project in 2008

by Ge Hong

Supervisor: Associate Professor Du Tao

Northeastern University

February 2008

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：葛红

日 期：

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。

（如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

首钢 2008 减产方案能耗分析

摘 要

钢铁生产过程是一个消耗资源、能源,并向外界环境排放污染物和废弃物的过程。随着钢铁产量的逐步增大,生产过程中所消耗的资源 and 能源也在大幅增加,排放的污染物和废弃物也相应增加,这样就给资源和能源的长期使用带来压力,并对外界环境造成严重污染。因此,从长远角度考虑,人们在钢铁企业兴起的过程中不断地摸索能源节约的方法,以期用较少的资源和能源生产出较多的钢铁产品,并排放较少的污染物和废弃物。在上世纪 80 年代,陆钟武院士提出了系统节能的概念,就是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。近年来,随着系统节能在生产实践中的逐步应用和各项节能成果的实现,系统节能的思想得到了推广,系统节能理论也逐步完善,并在工程上得到了更多地应用。

本文以首钢(北京地区)整个生产系统为研究对象,将系统节能的方法和理论应用在首钢减产方案的能耗分析上。2008 年,面临北京奥运会的召开,按照国家中央和北京市对首钢节能减排的要求,首钢必须将钢产量由年产 800 万吨降低到 400 万吨,并逐步迁出首都北京。一个年产 800 万吨粗钢的联合企业,产能在非常短的时间内压缩一半,在国内外绝无仅有,更无先例借鉴。因此,经过多方研究和讨论,为保证生产的安全和顺利过渡,首钢将实施阶段性的减产方案,分三步实现钢产量的锐减,保证不影响奥运行的环境质量。本文选用系统节能方法中的投入产出法和 $e-p$ 分析法,以首钢 2006 年的能源平衡表和其他生产数据为基础数据库,分别建立了首钢生产系统的能源投入产出模型和吨钢能耗的 $e-p$ 模型,并应用 MATLAB 软件编制了计算程序,使得计算过程更加便捷,计算结果更加直观。

本文首先是对首钢基础数据库的验算,在验证了 MATLAB 计算程序准确性的基础上,分别对首钢三个阶段的减产方案进行投入产出表的程序编制,并以工序产品产量、吨钢综合能耗、吨钢可比能耗、工序能耗、钢比系数等指标为主要目标函数进行相应计算,预测各阶段实施减产后,各指标的变化情况,尤其是吨钢综合能耗和吨钢可比能耗的变化,并分析影响吨钢综合能耗和吨钢可比能耗的因素。此外,由于产量的降低必然带来设备的删减,各生产工序所需的能源和动力,以及副产的煤气情况都将发生变化,

针对这些问题,本文也编制了计算程序来预测各阶段减产后能源和动力的供需平衡,以及煤气的供需平衡问题,为首钢减产方案的可行性提供理论支持,为首钢节能降耗提出可行建议。

关键词: 系统节能; 投入产出法; $e-p$ 分析法; 吨钢能耗

Analysis on Energy Intensity of Shougang Output-cut Project in 2008

ABSTRACT

Steel manufacturing is a process with consuming resource and energy, and releasing pollutant and waste to surrounding environment. If the steel output becomes more and more, more resource and energy will be consumed and more pollutant and waste will be released. Thus, it will tense the station of our resource and energy, besides, it also will cause severe pollution to outside. So, for the long term development, people have been exploring the method of saving energy from the start of iron and steel industry. They hope to gain more steel products with less resource and energy and less pollutant and waste. In the 80s' of last century, academician Lu Zhongwu put forward the concept of system energy conservation, which means using system engineering thought and method to realize the optimized combination of technology measures and production factors, and reach a goal of improving the whole energy saving effect for steel corporation. In recent years, with the application of system energy conservation and its achievements in manufacturing practice, the concept of system energy conservation spreads, and the theory of system energy conservation has become perfect gradually, and it also has been more used in steelmaking engineering.

This thesis takes the whole production system of Shougang (Beijing district) as subject, uses the theory and method of system energy conservation to analyze the energy intensity of Shougang output-cut project. In 2008, facing the holding of Beijing Olympic Games, Shougang has to cut its yield from 8 million ton to 4 million ton and move out from Beijing, as the command of country center and Beijing municipal. It is very important and hard for a steel corporation with an annual output of 8 million ton steel to cut its output to half in a short period. Therefore, through mangy researches and discussion, for the safe production and favorably transition, Shougang will take a phase-out project to stop equipments with three steps, and finally, reach the goal and guarantee the environment quality in Olympic Games time. The thesis takes Shougang's energy balance sheet in 2006 and other production data as

database, chooses input-output method and *e-p* method of system energy conservation method to set up the input-output model and *e-p* model of Shougang production system respectively, meanwhile, uses Matlab soft to compile calculating program making the calculation faster and the result more intuitionistic.

It is necessary to check the veracity of Matlab calculating program, so the thesis calculates the basic database at first, on the correct condition, compiles the input-output program of the three phase output-cut projects respectively, and calculates the main indicators such as process product yield, comprehensive energy intensity per ton of steel, comparable energy intensity per ton of steel, process energy intensity and steel ratio, forecasting their changes, especially estimating the change of comprehensive energy intensity per ton of steel and comparable energy intensity per ton of steel. What's more, the thesis also analyzes the influencing factors of comprehensive energy intensity per ton of steel and comparable energy intensity per ton of steel. Moreover, due to the output reduction of steel, there must be some equipments stopped, so, the needed energy and power and the gas byproduct in each manufacturing process will change. For this problem, this thesis also compiles calculating program to forecast the balance problems of energy (power) and gas after cutting output. And at last, this thesis will provide theory support and feasible suggestion for Shougang output-cut project.

Key words: system energy conservation; input-output method; *e-p* method; energy intensity per ton of steel

目 录

独创性声明I

摘要II

ABSTRACTIV

第 1 章 文献综述 1

 1.1 钢铁工业的现状 1

 1.1.1 钢铁工业是中国能源消耗和污染物排放“大户” 1

 1.1.2 节能减排是钢铁工业实现可持续发展的战略措施 2

 1.2 系统节能的发展 3

 1.2.1 我国节能工作的发展阶段 3

 1.2.2 系统节能的方法 4

 1.3 课题研究的提出 4

 1.3.1 本文研究的背景 4

 1.3.2 本文研究的主要思路 5

第 2 章 首钢现状 6

 2.1 系统结构及组成 6

 2.2 基础数据库 6

 2.2.1 主系统 7

 2.2.2 子系统 11

第 3 章 计算模型的建立 22

 3.1 投入产出模型的建立 22

 3.1.1 单级投入产出模型 22

 3.1.2 多级投入产出模型 26

 3.1.3 首钢多级投入产出系统 35

 3.2 吨钢能耗模型的建立 37

3.2.1 吨钢综合能耗模型 37

3.2.2 吨钢可比能耗模型 40

3.3 软件应用 41

3.3.1 MATLAB 软件介绍 41

3.3.2 MATLAB 软件应用的环境 43

3.3.3 MATLAB 软件的矩阵运算功能 43

3.3.4 MATLAB 与 Excel 数据传递 44

3.3.5 程序功能 45

第 4 章 首钢减产方案能耗分析 46

4.1 压产方案阶段一 46

4.1.1 压产方案阶段一内容 46

4.1.2 压产方案阶段一分析 47

4.1.3 小结与建议 53

4.2 压产方案阶段二 54

4.2.1 压产方案阶段二内容 54

4.2.2 压产方案阶段二的对比和分析 55

4.2.3 小结与建议 59

4.3 压产方案阶段三 60

4.3.1 压产方案阶段三内容 60

4.3.2 压产方案阶段三的对比分析 61

4.3.3 小结与建议 67

第 5 章 结论 68

参考文献 69

致谢 71

第 1 章 文献综述

1.1 钢铁工业的现状

1.1.1 钢铁工业是中国能源消耗和污染物排放“大户”

钢铁工业是我国国民经济重要的基础产业，是全面实现小康社会必不可少的物质基础。近二十多年来，我国钢铁工业取得突飞猛进的发展，钢产量自 1996 年以来连续位居世界首位，为国民经济持续高速发展发挥了重要作用。但是，钢铁工业又是高消耗、高排放行业，它在促进经济快速发展，满足不断增长的物质需要的同时，也造成了资源、能源的大量消耗，并对大气环境造成严重污染^[1,2]。

从总量上看，2004 年统计钢铁行业能耗占全国总能耗的 14.71%，工业废水排放量占工业排放总量的 8.53%，工业粉尘排放量占 15.18%。2006 年单位能耗和污染物排放下降，但总能耗有所上升，2006 年纳入钢协统计的大中型钢铁企业吨钢综合能耗为 645.12 千克标煤/吨，同比下降 7.06%；吨钢可比能耗 623.04 千克标煤/吨，同比下降 6.19%；吨钢消耗新水 6.56 吨/吨，同比下降 14.9%；2006 年大中型钢铁企业总能耗达到 19779 万吨标煤，同比上升 8.45%。在减排方面，2006 年大中型钢铁企业吨钢 SO₂ 排放量下降 1.76%，吨钢烟尘排放量下降 2.99%，吨钢粉尘排放量下降 1.76%^[3]，依据统计数据可见，单位能耗和污染物排放具有对立统一的联系。

此外，从 2000 年到 2006 年，我国大中型钢铁企业的吨钢可比能耗的波动现象依然存在^[4,5]，见图 1.1 所示，2006 年以前，国内平均吨钢可比能耗一直高于国际平均水平 642 千克标煤/吨^[6]（2000 年国外主要产钢国家平均水平），这说明我国钢铁企业的能耗情况不稳定，并与国际水平存在较大差距^[3]。面对竞争激烈的国际市场、全球能源的紧缺以及温室效应、全球变暖等世界问题的恶化，国内钢铁企业不能一再追求钢铁生产规模的扩大，而是不得不加大节能降耗的步伐，积极采取各种节能技术或者节能措施降低能耗，减小成本，缩小污染，以求可持续发展，并逐步向国际先进水平迈进^[7-9]。

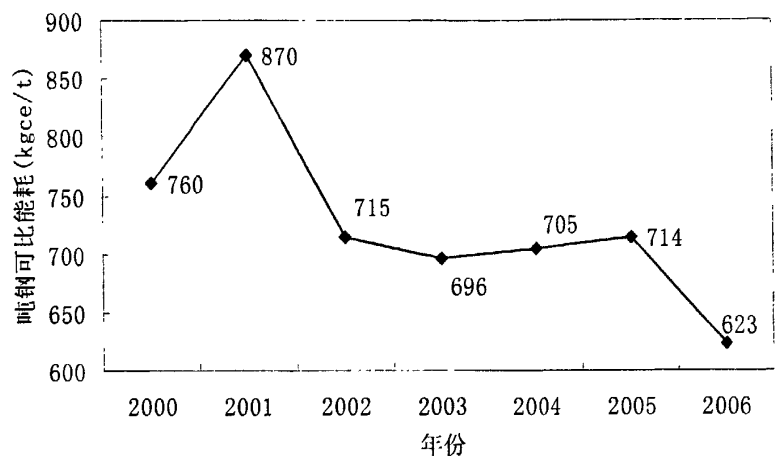


图 1.1 2000~2006 年国内大中型钢铁企业吨钢可比能耗

Fig. 1.1 Comparable energy intensity per ton of steel of important steel corporations in 2000~2006

1.1.2 节能减排是钢铁工业实现可持续发展的战略措施

党的十六大确定我国可持续发展战略，走新型工业化之路。“十一五”规划也明确提出“十一五”期间单位国内生产总值能源消耗要降低 20%^[10]。因此从根本上解决资源、能源和环境的可持续发展问题，已成为我国钢铁工业发展面临的突出问题。

2006 年我国粗钢产量为 4.188 亿吨，占全球总量的 33.79%；国内市场消费粗钢 3.84 亿吨，占全球消费总量的 30.98%，是全球最大的钢铁生产国和最大的粗钢消费市场，为我国国民经济发展做出了巨大的贡献，当然也付出了消耗资源，污染环境的巨大代价。从增长方式看，总的来说钢铁工业发展仍然是传统的线性发展模式，具有粗放型增长的特点，以大量的资源消耗、环境负荷增加来支撑钢铁工业发展，随着能源、环境的制约不断加大，这种发展是不可持续的。按照贯彻落实科学发展观的要求，转变钢铁工业的增长方式，就是要求钢铁工业发展在资源投入、生产、消费及废弃物处理的全过程中，不断提高资源的利用效率，把资源消耗、环境负荷的线性增加，转变为依靠科技进步，实现生态资源的循环利用来推进钢铁工业的发展。这种发展是可持续的，也是符合科学发展观的本质要求的^[3,11-14]。

通过节能减排，使钢铁工业发展从依赖资源消耗增加、环境污染严重转移到降低资源消耗、改善环境上来，从根本上提高钢铁企业和产品的竞争能力。因此，节能减排是我国钢铁工业实现可持续发展的必经之路。国内钢铁企业不能步国际钢铁工业的后尘，继续攀爬“环境高山”，而应提前采取战略措施，不再为温室效应、全球变暖等世界问

题增加负担,应当以可持续发展观为战略,以节能减排为手段尽早实现低耗、优质、高产的目标,为生态工业的发展做贡献^[15-19]。

1.2 系统节能的发展

1.2.1 我国节能工作的发展阶段

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^[20]。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很好地规划能源利用和节能技术的开发。

我国钢铁工业节能工作的发展经历了三个阶段:1978~1982年为起步阶段,当时的节能工作还只是停留在宣传节能意义的工作上,但是已经开始组建节能工作队伍,并对重点企业和地方骨干企业进行消耗排放的检查,重点进行能源管理,减少能源的损失和浪费。由于当时的能耗高,即使是在这样的节能工作下,吨钢能耗还是大幅降低,从2.524吨标煤降低至1.906吨标煤,下降24.5%,年节能率平均达到6.78%;1982~1986年为节能工作的扩展阶段,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、耐火材料等方面,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,重点推广余热利用、转炉煤气回收等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1.906降到1.705吨标煤,又下降了10.55%,年节能率平均为2.75%;1987年开始,钢铁工业的节能工作进入系统节能阶段,这个时期,节能工作出现了新情况,节能率急剧衰减,前两个阶段的成果已经停滞不前,钢铁工业的节能潜力发挥不出来,主要是因为工序之间生产能力不匹配,生产节奏不均衡,设备运行效率不高。改变这种状况,靠孤立的单项节能改造行不通,需要的是综合治理,即运用系统工程的思想方法,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,这就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^[21-22]。

系统节能是国内钢铁专家经过多年实践总结出来的一种科学可行的节能理论,经过二十多年的发展,系统节能理论逐渐成熟,系统节能的方法也多种多样。目前系统节能

理论已成为钢铁工业节能减排中采用的重要理论。

1.2.2 系统节能的方法

系统节能有定性和定量两种研究方法,像确定节能方向和途径的方法就属于定性研究方法,定量研究方法就是运用运筹学和计量经济学等方面的知识,以及系统工程的思想建立生产系统的数学模型^[21]。研究节能问题可以采用的定量方法很多,国内外企业系统节能研究的定量方法大致可以归纳为两类:一是分析方法,二是模型化方法^[23]。

系统节能研究的分析方法是用来对节能(或能耗)进行比较、分析和评价的方法,具有代表性的方法有:比较分析法、因素分析法、层次分析法、 $e-p$ 分析法和 e_0-p_0 分析法^[23]等。目前国内采用的系统节能分析法主要为 $e-p$ 分析法,这种方法是由东北大学陆钟武院士于80年代提出的一种较为简单科学的计算吨钢能耗的方法,此法一经实践就受到了广泛认可,并已经在各钢铁企业推广^[23-25]。

模型化方法就是用数学模型的方法来描述所要研究的问题,国内外采用模型化方法对企业系统进行节能研究的模型主要有投入产出模型、优化模型、平衡模型和神经网络模型等^[23]。其中,投入产出模型的使用较为广泛,也可以称为投入产出法。所谓投入产出法,就是把一系列内部部门在一定时期内投入(购买)来源与产出(销售)去向排成一张纵横交叉的投入产出表格,根据此表建立数学模型,计算消耗系数,并据以进行经济分析和预测的方法。这是由美国的 Wassily W. Leontief 教授创立的,并在1973年因发展了投入产出法获得诺贝尔奖。严格地讲,投入产出法是一种特殊的经济计量模型,它广泛应用于研究国民经济两大部类间、积累与消费间的比例关系,预测各部门的投入量和产出量^[26]。从应用范围上看,可分为全国性、地方性、专业性、大型企业、一般企业等形式。国内外钢铁专家已经将投入产出法应用到钢铁行业,并得到了突出效果,为钢铁企业的节能做出了很大贡献。

1.3 课题研究的提出

1.3.1 本文研究的背景

北京作为我国首都担任着国际中心的任务,市内环境质量受到国际和国内的关注。首钢位于北京市石景山区,成立于1919年,曾经是北京经济发展,甚至是国家经济发展的一个支撑企业,在北京市全面发展中有着举足轻重的地位,但是随着首钢生产规模

不断扩大,钢产量不断升高,它带来的环境污染也愈来愈严重,虽然首钢意识到可持续发展的重要途径是节能减排,但是一个年产 800 万吨的钢厂是无法不污染空气的,在现代化的北京市,首钢已经不再是支撑企业,却成了市区环境污染的“肇事者”,尤其是面临 2008 北京奥运会的召开,环境质量的严格要求使得首钢的存在更加格格不入,按照国家中央和北京市对首钢的节能减排要求,首钢在 2008 年必须将产量降低到 400 万吨,并逐步搬出首都北京。面临首都环境质量问题的解决,首钢是责无旁贷的,并选择了坚决执行国家和北京市政府的要求,争取从 2007 年底开始实行压产方案,并努力在规定的期限内顺利实现压产目标——400 万吨的钢产量。一个年产 800 万吨钢的联合企业,产能在非常短的时间内压缩一半,在国内外绝无仅有,更无先例借鉴。那么首钢将采取怎样的压产方案以保证安全稳定地实现压产计划,压产后的能耗达到了一个怎样的水平,以及压产后会带来怎样的流程变化,是本文研究的主要内容。

1.3.2 本文研究的主要思路

本文依据首钢 2006 年生产现状和数据库,利用系统节能方法中的 $e-p$ 分析法和投入产出模型建立首钢的吨钢能耗模型和投入产出模型,用 MATLAB 软件实现模型的程序化,并预算出首钢 2008 减产方案的能源消耗指标,为首钢减产的顺利进行提供理论依据和可行建议。

第 2 章 首钢现状

本文以首钢整体为系统进行研究，并分主系统和子系统逐级进行分析，首先需要明确的是整个系统的现状，在掌握现状及其数据库的基础上设计程序，并对首钢 2008 年压产方案的铁流和能耗进行预测计算，分析其合理性及可行性。

2.1 系统结构及组成

首钢生产系统结构如图 2.1 所示，该系统以主生产流程为主系统，下设四个子系统，分别由炼铁系统、炼钢系统、轧钢系统和辅助系统组成，以各系统的单体设备为研究对象分析子系统的能流、物流等问题。

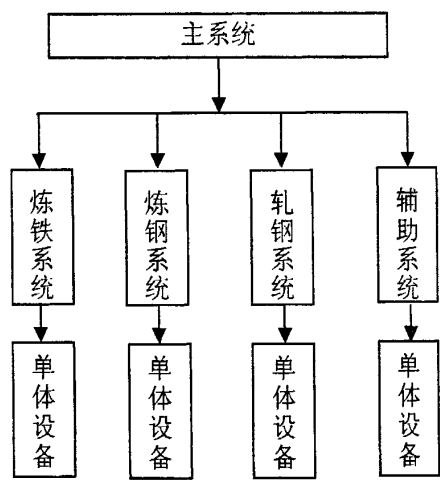


图 2.1 首钢生产系统结构
Fig. 2.1 Structure chart of Shougang system

2.2 基础数据库

本项目所采用的数据均为首钢 2006 年生产数据，这些数据包括单体设备的单耗、各工序燃料与动力的消耗以及各生产车间的产品产量等数据，它们是填入投入产出表的原始数据，本文以原始数据填写的投入产出表为基础数据库，以现状数据来分析压产方案的物流及能流。

这里，物流是指钢铁生产过程中的铁素流，它从固体氧化物转变为液态生铁，再经

适度氧化转变为液态钢，经凝固、加热及压力加工成为一定组织形态的钢材，同时产生各种废弃物；能流是指钢铁生产过程中的碳素流，它从洗精煤或燃料煤开始：洗精煤经合适配比进入焦炉，转化为焦炭、焦炉煤气和焦油，燃料煤与铁矿粉等混合，经烧结机转换为烧结矿并排放出 CO_2 等气体，焦炭、煤粉与烧结矿等进入高炉，经还原反应生产液态含碳生铁和含有 CO 、 CO_2 等高炉煤气，高温含碳铁水，经吹氧转变为液态钢并产生转炉煤气，焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气又是加热炉和锅炉的燃料，经燃烧释放热能，最后以废气形式排向环境^[27-32]。以下介绍的是首钢主系统及子系统的生产现状，包括物流和能流的来龙去脉。

2.2.1 主系统

(1) 生产流程结构

本文所谓主系统是指主生产流程，首钢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工序和产品，基本上代表了我国钢铁工艺的历史进程。图 2.2 所示为首钢生产主流程简易图。

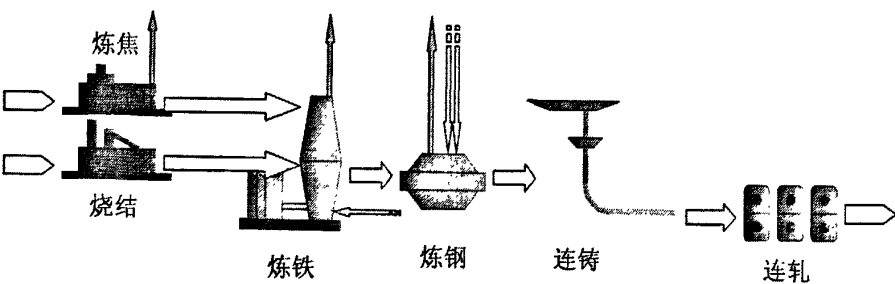


图 2.2 首钢生产主流程

Fig 2.2 The main manufacturing process of Shougang

2006 年钢产量为 814.07 万 t，材产量为 847.04 万 t，生产流程中铁素流呈现多元复杂的分布，首钢 2006 年生产流程铁流见图 2.3，逐步压产后工序将变得简单而紧凑，整个生产流程的连续化程度会有所提高，物流的脉络也将更加清晰简明。钢铁冶金流程的优化对节能降耗也有着重大意义^[33,34]。

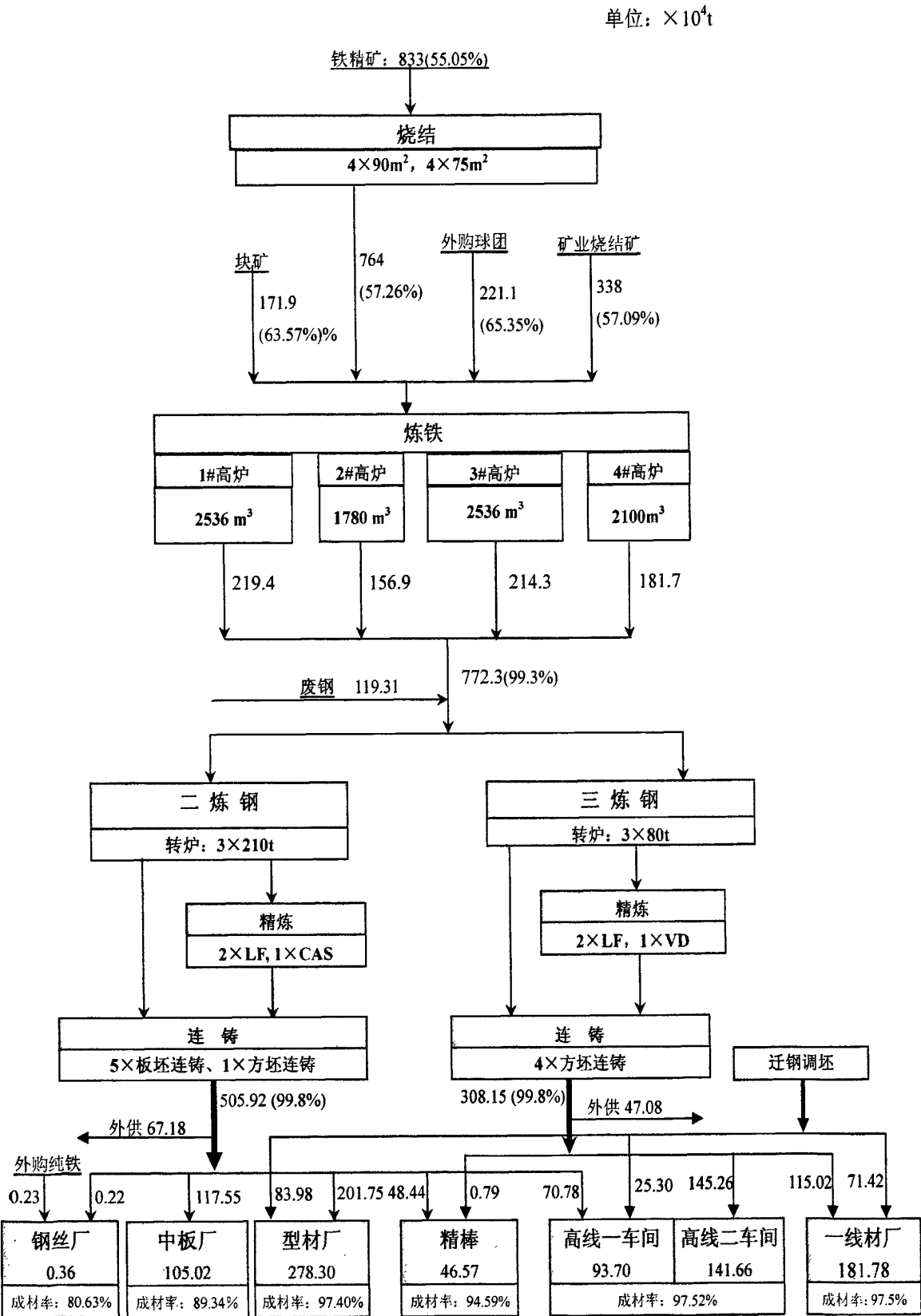


图 2.3 首钢 2006 年生产流程铁流图

Fig. 2.3 Fe-flow chart of Shougang manufacturing process in 2006

(2) 产品结构

2006 年首钢钢材总产量为 847.39 万吨，其中包括中厚板 105.02 万吨、型材 278.30 万吨、精棒 46.57 万吨、高线材 235.36 万吨、一线材 181.78 万吨，各轧钢车间产品产量比例如图 2.4 所示。

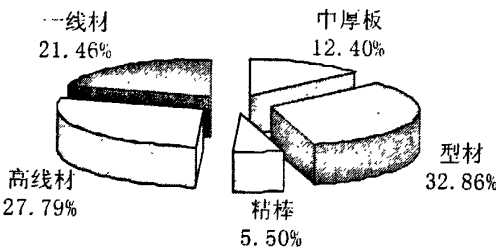


图 2.4 钢材产量比例
Fig. 2.4 Final product ratio

(3) 能源结构和能耗现状

①能源结构

2006 年首钢消耗能源总量 589.49 万 tce，外购一次能源量 786.80 万 tce，外调能源 314.25 万 tce，库存增加 57.72 万 tce。外购能源有洗精煤 332.59 万 tce、无烟煤 99.33 万 tce、动力煤 36.66 万 tce、劣质煤 4.08 万 tce、汽柴油 1.23 万 tce、冶金焦（包括焦丁焦粉）227.88 万 tce、电 85.13 万 tce。所占比例如图 2.5 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

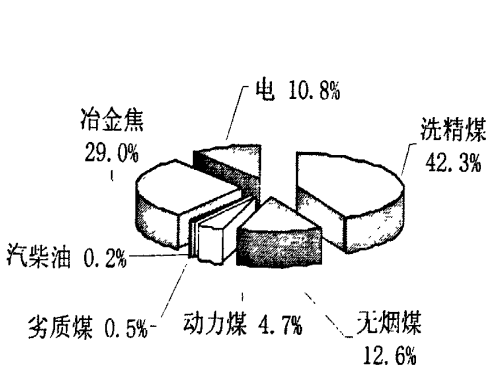


图 2.5 首钢 2006 年外购能源结构
Fig. 2.5 Purchased energy structure in 2006

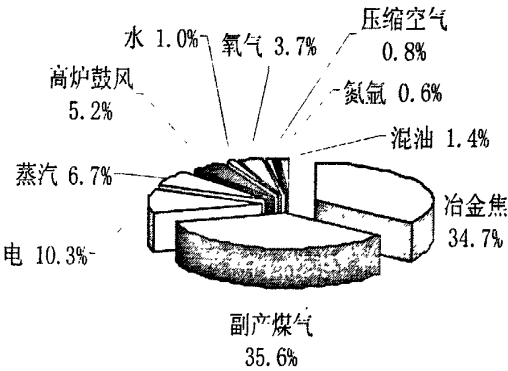


图 2.6 首钢 2006 年二次能源结构
Fig. 2.6 Secondary energy structure in 2006

厂内产生的中高温余热，一般不包括冷却水等低温余热^[35]。2006 年，首钢二次能源生成量为 508.19 万 tce，其中，冶金焦 176.43 万 tce、副产煤气 181.12 万 tce、电 52.41 万 tce、蒸汽 34.09 万 tce、高炉鼓风 26.56 万 tce、水 4.99 万 tce、氧气 18.81 万 tce、压缩空气 3.84 万 tce、氮氩 3.03 万 tce、混油 6.91 万 tce，所占比例如图 2.6 所示。

②工序能耗

表 2.1 所示为首钢 2006 年各工序能耗情况，与 2005 年宝钢工序能耗相比，首钢烧结工序能耗低于宝钢，转炉炼钢也实现了“负能”炼钢，但是焦化工序能耗与炼铁工序能耗与宝钢差距较大，分别相差 71.6kgce/t 焦炭、47.2kgce/t 铁，轧钢工序能耗也高于宝钢 6.4kgce/t 材，并且首钢目前尚没有冷轧产品。

表 2.1 首钢、宝钢各工序能耗对比表 （单位: kgce/t 产品）

Table 2.1 Process energy comparison between Shougang and Baosteel (unit: kgce/t product)

项目	焦化	烧结	炼铁	转炉炼钢	连铸	热轧
首钢(2006 年)	160.6	57.3	443.9	-0.75	16.5	85.1
宝钢(2005 年)	89.0	60.5	396.7	-3.54	15.2	78.7
差距	71.6	-3.2	47.2	2.79	1.3	6.4

③吨钢能耗

2006 年首钢吨钢综合能耗为 724kgce/t 钢，比 2005 年降低 23kgce/t 钢；2006 年首钢吨钢可比能耗为 687kgce/t 钢，比 2005 年降低了 78kgce/t 钢，从首钢自身比较上看，首钢吨钢综合能耗及吨钢可比能耗都有较大幅度降低。但与 2005 年宝钢数据相比，首钢吨钢能耗仍有 37kgce/t 钢的差距，可比能耗仍有距离，相差 12kgce/t 钢，与 2006 年国内钢铁企业平均吨钢可比能耗 645kgce/t 钢相比，首钢尚有很大差距。图 2.7 所示为首钢与宝钢的吨钢可比能耗对比情况。

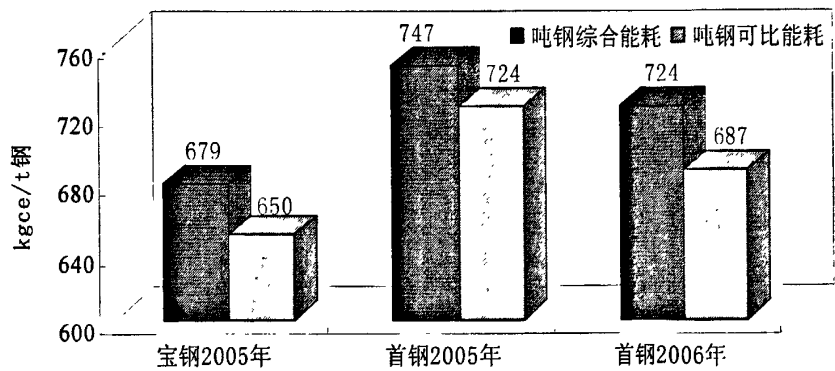


图 2.7 吨钢能耗比较

Fig. 2.7 Comparison of energy intensity per ton of steel

2.2.2 子系统

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

首钢炼铁系统包括烧结、焦化、炼铁三个主工序，这三个生产工序在整个生产流程中耗能最多，是能耗分析的关键部分。

(1) 烧结工序

①主要经济技术指标

表 2.2 所示为 2006 年首钢烧结工序各车间主要经济技术指标，由数据对比可知，一烧车间 4 台烧结机的生产总能力远大于二烧车间四台烧结机的生产总能力，比较其他指标，前者也优于后者。一烧车间的设备结构符合设备大型化原则，有利于提高设备利用率，降低能耗，并且四台烧结机规格一致，这也有利于设备的管理和维护，未来实施压产措施中，应当优先考虑停产二烧车间。

表 2.2 2006 年首钢烧结工序主要经济技术指标
Table 2.2 Main indexes of Shougang sintering circuit in 2006

项目	单位	一烧车间	二烧车间	平均水平
设备规格	台×m ²	4×90	4×75	—
产量	万 t	405.8	358.2	—
作业率	%	95.54	96.50	96.02
利用系数	T/m ² ·h	1.3475	1.346	1.348
烧结矿品位	%	57.26	57.27	57.26
吨烧结矿耗铁精矿	kg/t	915.53	918.51	916.93
返矿率	%	7.81	8.66	8.21

②能源消耗及回收指标

表 2.3 所示为 2006 年首钢烧结工序各车间能源消耗指标，首钢烧结平均工序能耗为 57.30kgce/t 烧结矿，与国内外同行企业相比，已经接近先进水平（国内最先进企业杭钢为 52.06kgce/t 烧结矿，日本为 53kgce/t 烧结矿），并超过了 1999 年国际先进水平 58.89kgce/t 烧结矿。其中，一烧车间的工序能耗比二烧车间低 4.93kgce/t 烧结矿，这也体现了设备大型化的优势，从理论计算上可以论证，在钢铁生产中设备越大，能耗相对越低^[7]。在能源消耗结构上与二烧车间相对比，一烧车间不消耗无烟煤，加大了电力与压缩空气等清洁能源的消耗，倾向于二次能源与余热资源的使用，不仅降低了消耗，更

减少了环境污染，这也是压产措施实施中应当优先考虑停产二烧车间的原因之一。

表 2.3 2006 年首钢烧结工序能源消耗指标
Table 2.3 Energy intensity indexes of Shougang sintering circuit in 2006

项目	单 位	一烧车间	二烧车间	全厂平均
焦粉	kg/t	39.79	26.53	33.57
无烟煤	kg/t	0	21.12	9.9
电耗	kWh/t	46.84	40.51	43.87
焦炉煤气	Nm ³ /t	6.89	7.39	7.12
蒸汽	GJ/t	0.024	0.024	0.024
压缩空气	Nm ³ /t	4.83	3.01	3.98
水	kg/t	0.2	0.21	0.2
工序能耗	kgce/t	54.99	59.92	57.30

(2) 焦化工序

①主要经济技术指标

2006 年首钢焦化厂四座焦炉的年产量分别为 50.29、4.72、38.35、88.34 万 t，共计 181.7 万 t，其中炭化室高度仅有 1#焦炉为 6m，其余 3 座炭化室高度均为 4.3m，尚未到达设备大型化的要求，对于降耗而言，应当逐步将 4.3m 的焦炉淘汰，以 6m 焦炉替代，不仅可以减少多台设备运行带来的操作不便与人力消耗，更有利的是减少了能源的消耗，降低了成本。

②能源消耗及回收指标

首钢焦化厂消耗的能源介质包括：洗精煤、高炉煤气、焦炉煤气、电力、蒸气、水和氮气，其中洗精煤为外购产品，其余能源介质由动力厂统一调配。这些能源介质的能值计算由动力厂统一确定。

表 2.4 2006 年首钢焦化工序能源消耗指标
Table 2.4 Energy intensity indexes of Shougang coking process in 2006

	项目	单位	1#焦炉	2#焦炉	3#焦炉	4#焦炉
燃料消耗	洗精煤	万 t	64.9272	6.0893	49.5187	114.0575
	焦炉煤气	万 m ³	1269.7897	119.0891	968.4436	2230.6355
	转炉煤气	万 m ³	1420.8871	133.2600	1083.6826	2496.0679
	高炉煤气	亿 m ³	5.4167	0.5080	4.1312	9.5156
动力消耗	电	万 MWh	1.6278	0.1527	1.2415	2.8596
	蒸汽	万 t	5.1792	0.4857	3.9501	9.0983
	压缩空气	万 m ³	226.2992	21.2238	172.5939	397.5390
	净水	万 t	0.0070	0.0007	0.0054	0.0124
	淡水	万 t	0.1584	0.0149	0.1208	0.2783

表 2.4 所示为 2006 年首钢焦化工序各焦炉能源消耗情况，表中所给数据均为各设备全年所消耗的燃料与动力总量，对比可见，4#焦炉的能源消耗占整个焦化工序能耗的比重较大，2#焦炉由于面临停产生能力很小，故而能源消耗也相对很小。

首钢焦化厂回收的能源种类较多，表 2.5 所示为 2006 年首钢焦化工序各焦炉能源回收指标，从总量上比较，4#焦炉在燃料回收方面优于其他 3 座焦炉，经计算，4#焦炉单位产品的燃料回收能力也优于其他 3 座焦炉。但是由于只有 1#焦炉采用了干法熄焦技术，因此只有 1#焦炉回收了电力及蒸汽，而其他焦炉目前采用的依然是湿法熄焦技术，没有回收红焦显然，也没有动力的回收，浪费了大量余热余能，降低了二次能源利用率。

表 2.5 2006 年首钢焦化工序能源回收指标
Table 2.5 Recovered energy indexes of Shougang coking process in 2006

项目		单位	1#焦炉	2#焦炉	3#焦炉	4#焦炉
燃料回收	冶金焦	万 t	48.5994	4.568	37.1475	84.4662
	焦丁	万 t	0.4997	0.0476	0.3873	1.189
	焦末	万 t	1.1896	0.1001	0.8137	2.6868
	粗苯	万 t	0.4556	0.0427	0.3475	0.8004
	焦炉煤气	亿 m ³	2.0892	0.1959	1.5934	3.6701
	焦油	万 t	0.2104	0.0197	0.1604	0.3695
动力回收	电	万 MWh	4.4717	—	—	—
	蒸汽	万 t	18.7134	—	—	—

③工序能耗

在统计了 2006 年首钢焦化工序各焦炉能源消耗与回收量后，依据首钢能源折算系数就可以计算出各焦炉焦化过程的产品总能耗，进而计算出全厂的工序能耗，由能源平衡表中的数据可知，首钢 2006 年焦化生产总能耗为 29.18 万 tce，焦化工序能耗为 160.60kgce/t 焦炭，比 2005 年宝钢炼焦工序能耗 89.0kgce/t 焦炭高出 71.6kgce/t 焦炭，仍有很大节能潜力。

(3) 炼铁工序

①主要经济技术指标

2006 年首钢炼铁厂生铁产量为 772.3 万吨，炼铁工序能耗为 443.88kgce/t 铁，其中焦比 335.10kg/t 铁，煤比为 142.20kg/t 铁，高炉风温平均为 1146℃。

表 2.6 为 2006 年首钢炼铁工序各高炉主要经济技术指标，对比可见，2#高炉生产技术水平较高，主要因为 2#高炉没有使用焦炉煤气，引进了霍戈文高风温，其高炉煤

气、风、水等介质消耗也较小，但是由于 2#高炉有效容积仅为 1780m³，因此处于相对较小型的设备水平上；4#高炉综合技术水平较差，与其他高炉相比，属于消耗高的设备。未来实施压产措施中，应当优先考虑淘汰消耗高、规格小的设备。根据压产计划，首钢将把产量减少到一半左右，即年产 400 万 t 钢的产量，由现有生铁生产能力及金属收得率可以判断未来将淘汰两座高炉，保留两座运行生产，从低耗高产原则看，应当优先考虑保留 1#、3#高炉。

表 2.6 2006 年首钢炼铁工序主要经济技术指标
Table 2.6 Main indexes of Shougang ironmaking process in 2006

项目	单位	1#高炉	2#高炉	3#高炉	4#高炉	平均
高炉容积	m ³	2536	1780	2536	2100	1997.6
生铁年产量	万 t	219.4	156.9	214.3	181.7	—
利用系数	t/m ³ ·d	2.37	2.492	2.37	2.37	2.394
热风温度	℃	1147	1184	1125	1122	1146
入炉矿品位	(扣 CaO)%	63.81	63.88	63.75	63.84	63.81
入炉焦比	kg/t	329.4	321.7	340.2	347.4	335
富氧率	%	0.52	0.28	0.46	0.29	0.40
高炉渣量	kg/t	293	296	309	286	296
吨铁耗矿量	kg/t	1653.6	1646.1	1664.8	1672.9	1659.7

②能源消耗及回收指标

首钢炼铁厂能源消耗构成中焦炭、煤粉所占炼铁能耗比例最高，占炼铁能耗的 77%，焦炉、高炉煤气所占炼铁能耗比例次之，为 10%，电耗占炼铁能耗较少为 2%，蒸汽和水耗较小，几乎可以不计，降低炼铁焦比、提高煤比及回收能源是降低炼铁工序的重点和关键所在。

表 2.7 所示为 2006 年首钢炼铁工序各焦炉能源实物量单耗指标，对比四座高炉的能耗指标，1#高炉、3#高炉二次能源及清洁能源（如工业水、氧气等）的利用率相对较高。

首钢炼铁工序回收的能源以高炉煤气和电力为主，表 2.8 所示为 2006 年首钢炼铁工序各高炉能源回收指标，1#高炉、3#高炉回收电力能力远大于 2#高炉、4#高炉。能源回收的多少直接影响炼铁工序能耗的大小。首钢炼铁厂在余热余能回收方面尚有很大潜力，其热风炉风温较高，由于高炉焦比、煤比指标较好，故煤气热值较低为 680kcal/m³，同时热风炉排烟温度为 280℃，1#炉换热器只预热空气 45℃，基本不换热，3#炉只预热空气 85℃，4#炉还没有换热器。因此，热风炉系统的余热利用存在较大余地；首钢高炉渣的温度为 1500℃左右，产量约为 300t/h，采用水冲渣方式，大量熔渣余热损失。每

吨炉渣显热相当于 50kgce，若回收效率按 60%计算，吨铁能耗可降低 10kgce 左右。

表 2.7 2006 年首钢炼铁工序能源消耗指标
Table 2.7 Energy intensity indexes of Shougang ironmaking process in 2006

消耗能源种类	单 位	1#高炉	2#高炉	3#高炉	4#高炉	全厂平均
焦炭	kg/t	329.42	321.99	340.24	347.25	335.11
煤粉	kg/t	140.87	134.38	125.17	136.27	134.14
小焦块	kg/t	18.88	13.46	19.42	16.56	17.38
焦炭盘亏	kg/t	25.82	21.32	26.76	23.23	24.38
焦煤煤气	m ³ /t	8.32	0	9.34	9.83	12.15
高炉煤气	m ³ /t	424.20	536.44	464.92	523	485.15
蒸汽	GJ/t	0.074	0.081	0.069	0.072	0.112
电力	kWh/t	21.17	54.24	33.44	40.25	40.68
工业水	t/t	42.51	0.69	48.05	9.88	27.96
鼓风	m ³ /t	1196.7	1116.94	1108.29	1286.26	1177.02
氧气	m ³ /t	10.18	0	11.13	0.98	6.21
压缩空气	m ³ /t	64.38	72.46	67.49	55.59	68.59
氮气	m ³ /t	40.66	51.94	40.48	51.99	45.57

表 2.8 2006 年首钢炼铁工序能源回收指标
Table 2.8 Recovered energy indexes of Shougang ironmaking process in 2006

能源回收	单 位	1#高炉	2#高炉	3#高炉	4#高炉	全厂平均
煤气回收	m ³ /t	1191.40	1408.87	1367.81	1479.89	1352.40
压差发电	kWh/t	30.06	19.93	35.27	9.05	24.51

③工序能耗

在统计了 2006 年首钢炼铁工序各焦炉能源消耗与回收量后，依据首钢能源折算系数就可以计算出各高炉炼铁过程的单位产品能耗分别为 442.78、423.51、441.60kgce/t 铁，全厂的工序能耗平均水平为 443.88kgce/t 铁。首钢炼铁工序能耗占整个钢铁生产工序能耗的 58%以上，虽然近年来炼铁工序能耗呈下降趋势，但是与国内外先进水平差距较大，国内先进企业宝钢 2005 年炼铁工序能耗为 395.41kgce/t 铁，1999 年国际先进水平为 437.93kgce/t 铁。因此，炼铁工序是首钢节能降耗的重点开发工序。

2.2.2.2 炼钢系统

①主要经济技术指标

表 2.9 所示为 2006 年首钢炼钢工序二炼钢与三炼钢车间转炉炼钢主要技术经济指标，二炼钢 2006 年产量为 505.92 万吨，超过了设计能力 450 万吨/年，并能够满足压产

要求 400 万吨/年的产量，且二炼钢 3 座转炉均为 210 吨，比三炼钢 3 座转炉规模大，按照设备大型化的要求，应当优先考虑停产三炼钢。

表 2.9 2006 年首钢炼钢工序主要经济技术指标
Table 2.9 Main indexes of Shougang steelmaking process in 2006

项目	单位	二炼钢	三炼钢
钢产量	10 ⁴ t	505.92	308.15
转炉组成	t×座	210×3	80×3
吹损率	%	—	10
废钢比	%	14.55	14.83
钢渣产量	10 ⁴ t	50.6	30.8

②能源消耗、回收指标及工序能耗

首钢炼钢系统消耗的能源种类较多，分为焦炉煤气、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。2006 年首钢炼钢系统工序能耗为 15.75kgce/t 钢，而宝钢 2005 年炼钢系统工序能耗为 9.3kgce/t 钢，与之相比，首钢尚有较大差距；转炉煤气与蒸汽的回收量已经接近先进水平。

表 2.10 2006 年首钢二炼钢能源消耗表
Table 2.10 Energy intensity indexes of 2nd steelmaking plant in 2006

能源种类	蒸气 /t·t ⁻¹	转炉气 /m ³ ·t ⁻¹	焦炉气 /m ³ ·t ⁻¹	氮气 /m ³ ·t ⁻¹	氩气 /m ³ ·t ⁻¹	电力 /kWh·t ⁻¹	新水 /t·t ⁻¹	软化水 /t·t ⁻¹	氧气 /m ³ ·t ⁻¹	压缩气 /m ³ ·t ⁻¹	工序能耗 /kgce·t ⁻¹
转炉工序	-64.83	-99.16	3.64	33.8	0.27	26.27	1.53	0.07	58.46	7.82	-0.22
连铸工序	—	—	6.8	0.6	0.12	11.65	13.73	0.29	2.3	10.1	10.67
精炼工序	—	—	—	0.6	0.34	11.85	--	-	—	—	4.2
合计	-64.83	-99.16	10.44	35	0.73	49.77	15.25	0.36	60.76	17.92	14.65

表 2.11 2006 年首钢三炼钢能源消耗表
Table 2.11 Energy intensity indexes of 3rd steelmaking plant in 2006

能源种类	蒸气 /t·t ⁻¹	转炉气 /m ³ ·t ⁻¹	焦炉气 /m ³ ·t ⁻¹	氮气 /m ³ ·t ⁻¹	氩气 /m ³ ·t ⁻¹	电力 /kWh·t ⁻¹	新水 /t·t ⁻¹	软化水 /t·t ⁻¹	氧气 /m ³ ·t ⁻¹	压缩气 /m ³ ·t ⁻¹	工序能耗 /kgce·t ⁻¹
转炉工序	-84.67	-91.41	2.38	22.71	0.51	28.48	0.24	—	57.57	2.26	-1.6
连铸工序	—	—	8.75	—	—	13.33	0.16	0.18	2.8	13.56	11.87
精炼工序	4.94	—	—	—	—	20.72	—	—	—	—	7.27
合计	-79.73	-91.41	14.4	22.71	0.51	62.53	0.4	0.18	60.37	15.82	17.54

表 2.10 所示为 2006 年首钢二炼钢能源消耗与回收（即表中“负消耗”）情况，2006 年二炼钢全厂综合能耗为 14.65kgce/t 钢，比 2005 年低 13.28kgce/t 钢；表 2.11 所示为 2006 年首钢三炼钢能源消耗与回收表，2006 年三炼钢全厂综合能耗为 17.54kgce/t 钢比 2005 年低 14.53kgce/t 钢，首钢炼钢厂的工序能耗有了大幅降低。

对比两表可见，三炼钢的电力消耗比二炼钢多 12.76kWh/t 钢，连铸工序与精炼工序能耗均比二炼钢高，因此三炼钢厂的工序能耗比二炼钢厂的工序能耗高出 2.89kgce/t 钢。但是由于二炼钢精炼处理量占全厂钢产量的 36.47%，三炼钢精炼处理量占全厂钢产量的 47.53%，如果停产三炼钢，二炼钢的精炼处理能力就须加强。

2.2.2.3 轧钢系统

①主要经济技术指标

首钢总公司轧钢系统主要包括中厚板厂、型材厂、高速线材厂以及棒材厂，各厂钢坯来源于第二炼钢厂和第三炼钢厂。表 2.12 所示为 2006 年首钢轧钢工序基本情况。2006 年首钢轧钢系统总产量达到 847.04 万吨材，其中，中厚板材占 12.40%，型材占 32.86%，高线材占 27.78%，一线材占 21.46%，棒材占 5.50%，全厂成材率平均达到 96.35%，居国内先进水平行列。

表 2.12 2006 年首钢轧钢工序基本情况
Table 2.12 General situation of Shougang steelrolling process in 2006

项目	产量 /万 t	成材率 /%	加热炉 燃料种类	煤气热值 /(×4.18kJ/m³)
中厚板厂	105.02	89.34	高、焦、转混合煤气	1500-2500
型 一车间	81.85		混油、转炉煤气混烧	—
材 二车间	88.19	97.40	混油、转、焦煤气混烧	—
厂 三车间	108.27		转炉、焦炉煤气混烧	—
高 一车间	93.70		混油、焦炉煤气	≤4100
线 二车间	141.66	97.52	高、焦、转煤气	≥3000
材 第一线材厂	181.78	98.12	煤、混油	≥8500
厂 精棒	46.57	94.59	高、焦混烧	2000
轧钢系统	847.04	96.35	—	—

②能源消耗及回收指标

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。轧钢系统的能耗在首钢炼钢生产流程中占有较大比重，2006 年轧钢系统工序能耗平均

为 85.09kgce/t 材，工序总能耗为 72.1 万 tce，占整个生产系统总能耗的 12.23%。

表 2.13 2006 年首钢轧钢工序各厂燃料实物量单耗情况
Table 2.13 Unit fuel consumption of Shougang steelrolling system in 2006

项目	动力煤 /kg·t ⁻¹	混油 /kg·t ⁻¹	焦炉煤气 /m ³ ·t ⁻¹	高炉煤气 /m ³ ·t ⁻¹	转炉煤气 /m ³ ·t ⁻¹	燃料合计 /kgce·t ⁻¹
中厚板厂	/	/	91.28	3.97	52.53	67.23
型 材	一车间	/	6.01	40.52	0	26.21
	二、三车间	/	2.17	8.989	0	21.48
高 线	一车间	/	15.95	64.19	0	109.71
	二车间	/	0	55.82	0.69	41.19
第一线材厂	2.65	31.43	/	/	/	31.43
精棒	/	0	71.73	33.00	71.96	63.94
轧钢系统	70.8	7.81	41.92	2.42	60.59	50.27

表 2.14 2006 年首钢轧钢工序各厂动力实物量单耗情况
Table 2.14 Unit power consumption of Shougang steelrolling system in 2006

项目		电力 /kWh·t ⁻¹	蒸汽 /kg·t ⁻¹	压缩空气 /m ³ ·t ⁻¹	新水 /t·t ⁻¹	氧气 /m ³ ·t ⁻¹	氮气 /m ³ ·t ⁻¹	动力合计 /kgce·t ⁻¹
型 材	中厚板厂	68.05	1.25	/	0.83	0.23	0	24.21
	一车间	0.72	0.11	0.47	0.12	0	27.65	46.53
	二、三车间	4.39	0.31	0.97	0.16	0	27.32	58.34
高 线	一车间	0.84	9.45	0.28	0.14	0	39.08	39.55
	二车间	23.00	7.32	0.19	0.65	0.006	42.70	43.21
第一线材厂		118.21	/	/	/	/	/	41.49
精棒		94.92	-30.53	0.25	0.25	0.098	0	29.89
轧钢系统		93.73		4.34	/	0.3	0	34.86

表 2.13 所示为 2006 年首钢轧钢系统各工序燃料实物量单耗情况，高线材生产车间消耗的燃料也占轧钢系统较大比重，中厚板厂燃料消耗也相对较高，尤其是焦炉煤气的消耗较大，表中最后一栏，轧钢系统各燃料消耗量取各轧材车间燃料平均消耗量。表 2.14 所示为 2006 年首钢轧钢系统各厂工序动力实物量单耗情况，各厂动力消耗以电力为主，尤其是高线生产车间的电力消耗占有很大比重，由统计结果可见，轧钢系统电力消耗平均水平为 93.73kWh/t 材。

③工序能耗

2006 年首钢轧钢中厚板厂和精棒厂工序能耗较高，都超过了 90kgce/t 材。根据各厂工序能耗可得，2006 年首钢轧钢系统工序能耗平均为 85.09kgce/t 材，比 2005 年轧钢系统工序能耗 89.95kgce/t 材降低了 4.86kgce/t 材，比率达到 5.40%；2005 年宝钢轧钢系统工序能耗为 150.1kgce/t 材，国际先进企业轧钢系统工序能耗为 152.2kgce/t 材，这主要是因为产品结构的不同而带来的差异，首钢深加工产品尚没有形成规模，故而轧钢工序能耗较低。

2.2.2.4 辅助系统

(1) 主要经济技术指标

a 煤气系统

首钢动力厂高炉煤气的主要用户有炼铁厂、电力厂、中板厂、动力厂等；焦炉煤气的用户主要有焦化厂、动力厂、炼钢厂、轧钢厂、炼铁厂、电厂等；转炉煤气的主要用户有二耐、型材等。

①煤气热值

首钢煤气系统中高炉煤气、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，分别为 800、4100、1800kcal/m³，这三种煤气是首钢主要的副产二次能源，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。

②煤气发生量

表 2.15 给出了 2006 年首钢三种煤气发生量及放散率，高炉煤气放散率较高为 12.98%，2006 年国内高炉煤气放散率平均水平为 9%左右，差距存在的主要原因是首钢没有高炉煤气柜，又受季节影响，冬季因供暖需要放散量小，夏季放散量大。首钢动力厂因建有 3 座焦炉煤气柜，故而焦炉煤气放散率较小，2006 年为 2.5%低于国内平均水平 4.18%。

表 2.15 2006 年首钢三种煤气发生量
Table 2.15 Generating volume of the three kinds of gas in 2006

	煤气小时发生量/万 m ³ ·h ⁻¹					放损率/%
	一高炉	二高炉	三高炉	四高炉	合计	
高炉煤气	37	29	37	36	139	12.98
焦炉煤气	一焦炉	二焦炉	三焦炉	四焦炉		2.5
	2.1	2	2	2	8.1	
转炉煤气	二炼钢	三炼钢				0
	6.5	3.5			10	

③煤气消耗量

2006 年首钢煤气系统三种煤气的消耗总量为 131 万 m^3 ，从供需平衡看，高炉煤气小时发生总量为 139 万 m^3 ，消耗量为 120 万 m^3 ，每小时有 19 万 m^3 高炉煤气富余；焦炉煤气小时发生总量为 8.1 万 m^3 ，消耗量为 8 万 m^3 ，每小时有 1000 m^3 焦炉煤气富余；转炉煤气小时发生总量为 10 万 m^3 ，消耗量为 3.1 万 m^3 ，每小时有 6.9 万 m^3 转炉煤气富余。未来实施压产计划，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压产生产的要求是关键。

b 蒸汽系统

①蒸汽品质

首钢低压蒸汽的发生源为二、三炼钢厂回收、电力厂抽汽、动力厂等，低压蒸汽进入公司蒸汽管网，供用户使用。动力厂的三台低压蒸汽锅炉基本处于停炉状态，动力厂生产的基本为中压蒸汽供生产用，压力为 3.2~3.5Mpa，温度为 $440\pm 10^\circ\text{C}$ 。

②蒸汽发生量

首钢蒸汽回收单位只有二炼、三炼、干熄焦、精品棒材，生产单位为电力厂抽汽和动力厂。2006 年首钢动力厂中压蒸汽生产总量为 1494229t，全厂生产需要中压蒸汽总量为 1494228t，消耗用户主要为化产、烧结及炼铁工序，蒸汽产量基本能够满足生产需要。

③生产蒸汽能源消耗

首钢动力厂生产蒸汽消耗的能源主要有高炉煤气、焦炉煤气、电、水、蒸汽、压缩空气等，单耗达到 136.65kgce/吨蒸汽，蒸汽放散率达到 13.5%以上，这是造成能耗高的主要原因。另外，首钢动力厂全年约有 44%的中压蒸汽串入低压管网使用，这种降级使用，也造成了能量的严重损失。

c 氧气系统

①制氧设备设计能力

目前首钢主要有两座小型机组、两座大型机组共四座制氧机投入生产，分别为 5#、6#、7#、10#，各制氧机的氧气生产设计能力分别为 6500、6500、30000、35000 m^3/h ，这四台设备均是从国外引进的，总产气量刚好满足全厂使用。

②氧气发生量及消耗量

首钢制氧厂以氧气、氮气、压缩空气、氩气为主要产品，以消耗电力为主。2006 年制氧厂氧气产量为 57527 万 m^3 ，氮气产量为 75066 万 m^3 ，压缩空气产量为 9609.5 万

m³, 氩气产量为 5930 万 m³; 空压机 5#、6#电耗均为 3850kWh/m³, 7#为 14200kWh/m³, 增压机 10#电耗为 15500kWh/m³。首钢氧气消耗用户主要是炼钢厂, 2006 年首钢二炼钢、三炼钢消耗氧气量分别占总氧气消耗量的 51.42%和 30.84%。

d 电力系统

2006 年首钢发电厂共发电量 14.93 亿 kWh, 发电总量约占首钢总公司用电总量的 38.10%左右。另外, 电力厂还有抽汽并入公司低压蒸汽管网。表 2.16 所示为 2006 年首钢发电厂发电量情况。

表 2.16 2006 年首钢发电厂发电量
Table 2.16 Electricity generated in Shougang power plant in 2006

发电机组	1#机组	2#机组	3#机组	1#TRT	2#TRT	3#TRT	4#TRT	1#干熄焦	合计
年发电量 /万 kWh	36788.7	43301.7	44926.5	6595.6	3128.4	7559.6	1644.0	5372.4	149316.9
比例/%	24.64	29.00	30.09	4.42	2.10	5.06	1.10	3.60	100.00

(2) 能源消耗

2006 年首钢动力系统燃料总能耗为 81.22 万 tce, 动力总消耗量为 70.53 万 tce, 扣除回收动力 131.37 万 tce, 净能耗为 20.37 万 tce, 吨钢能耗为 25.03kgce, 各系统未扣除回收之前的能耗情况列于表 2.17, 热力发电能源消耗占动力系统总能耗的 38.47%, 其次能耗较高的是鼓风、动力产汽、制氧以及热电抽汽。

表 2.17 2006 年首钢动力系统能源消耗情况
Table 2.17 Energy consumption state of Shougang power system in 2006

项目	动力产汽	热电抽汽	热力发电	制氧厂	压缩空气	鼓风	工业水	合计
能源消耗总量 /万 tce	21.4487	14.2230	58.3835	19.2449	4.1518	26.5927	4.5780	151.75
比例/%	14.13	9.37	38.47	12.68	2.74	17.52	3.02	100.00

(3) 其他辅助工序

首钢其他辅助工序包括机车运输、能源亏损、耐火材料等。2006 年首钢运输能耗为 2.69kgce/t 钢, 与宝钢尚有较大差距 (2005 年宝钢运输能耗仅为 0.1kgce/t 钢), 能源亏损为 50.14kgce/t 钢, 亏损总量为 40.82 万 tce, 占整个钢铁生产总能耗的 6.29%。由此可见, 首钢应当注重提高各种能源的利用率, 降低亏损, 减小能耗。

第3章 计算模型的建立

首钢作为集高炉、转炉、炉外精炼、连铸、热轧等生产工序于一体的大型钢铁联合企业,全公司所有能源(风、电、水、燃气、氧气、氮气、氩气以及液体产品等)的生产、储存、输送及其与使用之间的调度平衡相对复杂,如要了解全公司的能源利用情况,要求管理人员不仅要掌握全公司的生产流程及其能源消耗水平,还要掌握该环节与上下游生产工序(工艺流程)的协调匹配关系,如何对2008年压产方案进行合理分析、评价,保证能源的稳定供应与有效利用,确保安全生产是一项比较复杂而又困难的工作。

为此,本文将建立首钢的能源投入产出模型,分析首钢整个生产过程中,各生产系统的投入与产出的平衡关系,并建立吨钢能耗的 $e-p$ 分析模型,用以计算首钢的吨钢能耗,然后将两个计算模型分别应用到各个减产阶段,对各阶段减产方案的投入、产出以及能耗进行计算和分析。模型的计算依赖于MATLAB软件强大的计算功能,并以Excel表的形式生成投入产出表,结果非常直观。

3.1 投入产出模型的建立

最初的投入产出法都是以一个部门或者一个地区的为应用对象而建立模型,称为单级投入产出模型,随着投入产出的发展,它被越来越多的应用到各种系统中而变得灵活,就出现了多级投入产出。所谓多级投入产出就是各个单级投入产出的集合,关键是找出上下两级间的关联产品。本文采用的就是多级投入产出模型,为了方便理解,下文对单级投入产出模型和多级投入产出模型分别进行了阐述。

3.1.1 单级投入产出模型

投入产出模型有许多种,其基本原理都相同,但针对不同的用途和企业,它的形式稍有差别。对于钢铁企业采用能源投入产出模型,能源投入产出模型是实物型投入产出模型的一种,能源投入产出法是把投入产出技术的一般原理,用在能源结构的分析、能量的转换和需求预测等方面^[21]。在能源投入产出法中,无论是表式设计还是计算分析,都把能源产品放在中心的位置上考虑。模型中对能源产品的分类更细致,而对非能源产品的分类更集中、更简化。

(1) 企业能源投入产出表的基本模式

本文把钢铁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 3.1 所示。

表 3.1 企业能源投入产出表
Table 3.1 Energy input-output sheet for corporation

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	A	f_1	y_1	x_1
		2		f_2	y_2	x_2
	非能源	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
		n		f_n	y_n	x_n
回收产品	能源	1	D	q_1	0	u_1
		2		q_2		u_2
	非能源	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
		l		q_l		u_l
外购产品	能源	l+1		q_{l+1}		u_{l+1}
		l+2		q_{l+2}		u_{l+2}
	非能源	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
		m		q_m		u_m

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。 $F=(f_1,f_2,\cdots,f_n)^T$ 为产品能值向量， $Q=(q_1,q_2,\cdots,q_n)^T$ 为标准煤折算系数向量， $Y=(y_1,y_2,\cdots,y_n)^T$ 为最终产品产量向量， $X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^T$ 为总产品产量向量， $U=(u_1,u_2,\cdots,u_n)^T$ 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：

$$\text{中间产品} + \text{最终产品} = \text{总产品} \quad (3-1)$$

根据这个平衡关系，可以列出产品分配平衡方程，用矩阵形式表示：

$$AX + Y = X \quad (3-2)$$

对式(3-2)进行变换和整理，可以得到：

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

式(3-3)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。

(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，直接消耗系数就是生产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 j 对物质 i 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) 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。

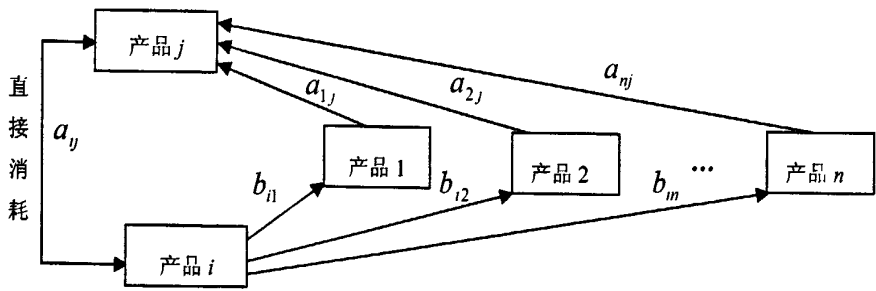


图 3.1 产品 *j* 对产品 *i* 的完全消耗概念图
Fig. 3.1 Complete consumption concept chart of product *j* to product *i*

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：

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

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_A 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 B_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：

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

(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。本文假定：

- 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量消耗。

结合上诉假定分析，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^[36-38]。

3.1.2 多级投入产出模型

(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。

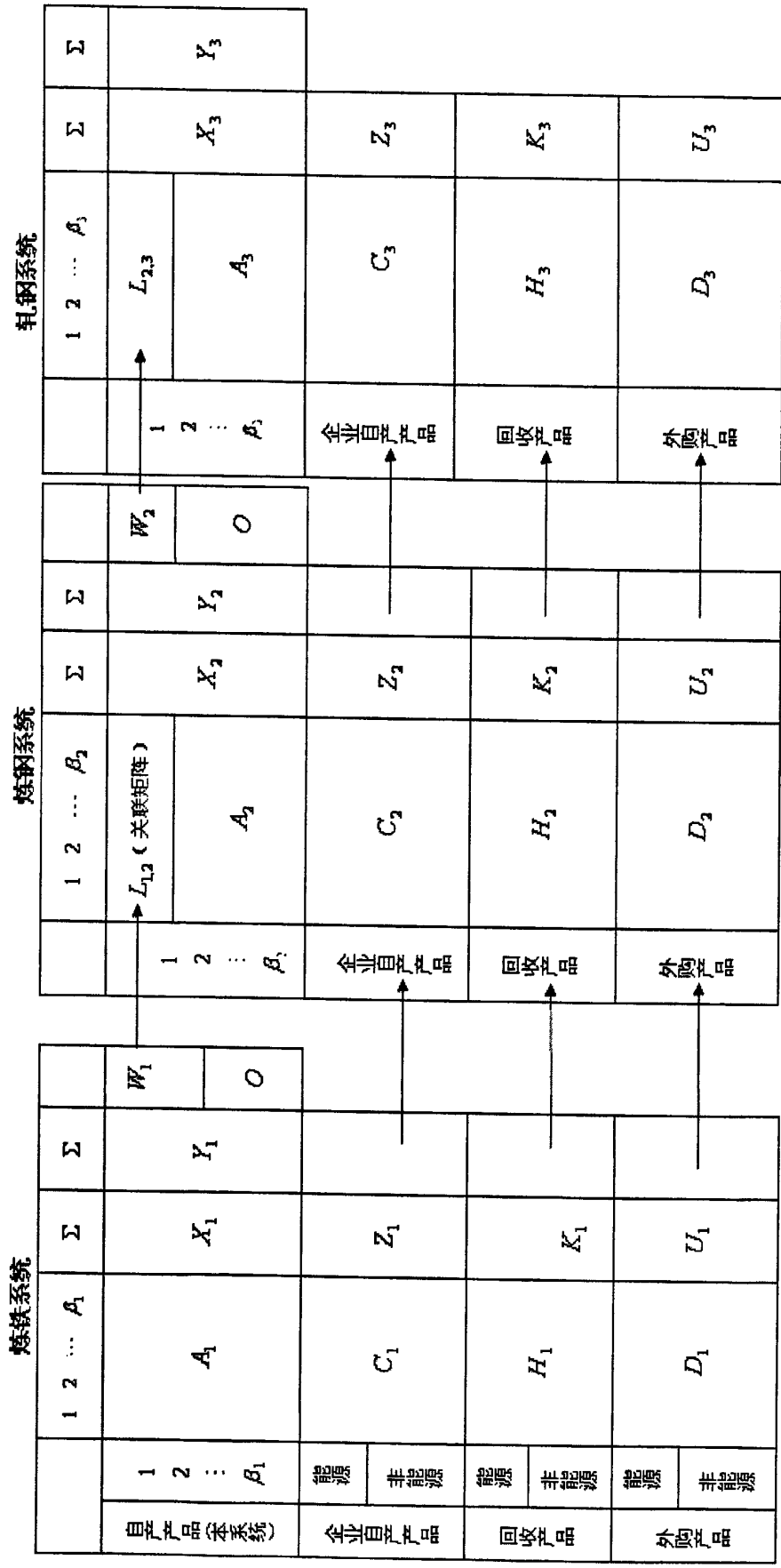


图 3.2 冶金企业多级投入产出模型基本模式
Fig. 3.2 Basic multilevel input-output sheet mode for steelmaking enterprise

对图 3.2 中的各符号意义进行说明： $A_{j(j=1,2,3)}$ 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）； $X_{j(j=1,2,3)}$ 为总产品的产量向量； $Y_{j(j=1,2,3)}$ 为最终产品产量向量； $W_{i(i=1,2)}$ 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； $L_{i,j}$ 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）； $C_{j(j=1,2,3)}$ 为生产本系统的自产产品所消耗的企业自产产品的实物量单耗； $H_{j(j=1,2,3)}$ 为生产本系统的自产产品所消耗的企业回收产品的实物量单耗； $D_{j(j=1,2,3)}$ 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； $Z_{j(j=1,2,3)}$ 为自产产品的产量向量； $K_{j(j=1,2,3)}$ 为回收产品的产量向量； $U_{j(j=1,2,3)}$ 为外购产品的产量向量。

企业多级投入产出模型同以往编制的企业单级投入产出模型的主要不同点在于：

第一，在编表方法上多级投入产出模型采用分级编表法。它首先将消耗结构较为稳定的辅助生产系统和消耗结构经常变化的生产主流程分开，然后再将主流程细分为炼铁、炼钢和轧钢三个生产系统（见图 3.2）。这种编表方法为投入产出模型的大型化、产品细分和模型在微机上的实现创造了条件。

第二，在产品分类方面。多级投入产出模型根据产品在生产过程中的工艺不同、设备不同和产品载能量不同来区分各种产品：主产品、关联产品和副产品。冶金生产过程中的副产品多数为能源产品，如高炉煤气、焦炉煤气、粗焦油、余热蒸汽等。这些副产品的直接消耗系数只是它们在精致过程中对各种载能体的单位消耗。某工序生产的副产品作为该工序主产品的负消耗处理。冶金生产过程中的关联产品指前一工序提供给下一工序的产品。

第三，在模型的功能方面。企业多级投入产出模型与企业的一般投入产出模型相比，使用灵活，用途广泛。主要表现在：产品能值计算简单，运算量小；模型结构简单，便于同其它模型相联。

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_j 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。

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		能 值 发 热 值		总 产 品	最 终 产 品	中 间 产 品
			非能源产品	能源产品					
			$1, 2, \cdots, \alpha_j$	$\alpha_j + 1, \alpha_j + 2, \cdots, \beta_j$					
关联产品		$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ w_j \end{matrix}$	$L_{j-1,j}$		E_L	Q_L			
本系统产品	非能源	$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ \alpha_j \end{matrix}$	A_j		E_a^{ne}	0	X_j	Y_j	W_j
	能源	$\begin{matrix} \alpha_j + 1 \\ \vdots \\ \beta_j \end{matrix}$			E_a^e	Q_a			
辅助工序产品	非能源	$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ k_j \end{matrix}$	C_j		E_C	Q_c	Z_j		
	能源	$\begin{matrix} k_j + 1 \\ \vdots \\ n_j \end{matrix}$				0			
回收产品		$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ r_j \end{matrix}$				Q_c			
外购产品	非能源	$\begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ l_j \end{matrix}$	D_j			Q_d	U_j		
	能源	$\begin{matrix} l_j + 1 \\ \vdots \\ m_j \end{matrix}$			0	0			

第 $j+1$ 生产系统 →

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 3.3 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		能 值	发 热 值	最终 产品	总 产品	中间 产品		
			能源							非能源	
			1	2 ... k_0						$k_0 + 1$	... n_0
自 产 产 品	能源	1 2 ⋮ k_0	C_0		E_{c0}	Q_{c0}	Y_0	X_0	Z_0		
	非能源	$k_0 + 1$ ⋮ n_0				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	$l_0 + 1$ ⋮ m_0			0	0					

(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

$$\begin{cases} A_1X_1 + Y_1 + \begin{pmatrix} W_1 \\ 0 \end{pmatrix} = X_1 \\ A_2X_2 + Y_2 + \begin{pmatrix} W_2 \\ 0 \end{pmatrix} = X_2 \\ A_3X_3 + Y_2 = X_3 \\ W_1 = L_{12}X_2 \\ W_2 = L_{23}X_3 \end{cases}$$

(3-8)

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。

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:

$$\begin{cases} X_1 = (I - A_1)^{-1} \left\{ Y_1 + \begin{pmatrix} L_{12} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} \left[Y_2 + \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_3)^{-1} Y_3 \right] \right\} \\ X_2 = (I - A_2)^{-1} \left[Y_2 + \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_3)^{-1} Y_3 \right] \\ X_3 = (I - A_3)^{-1} Y_3 \end{cases} \quad (3-9)$$

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:

$$\begin{cases} X_1 = (I - A_1)^{-1} \begin{pmatrix} L_{12} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_2)^{-1} \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_3)^{-1} Y_3 \\ X_2 = (I - A_2)^{-1} \begin{pmatrix} L_{23} \\ 0 \end{pmatrix} (I - A_3)^{-1} Y_3 \\ X_3 = (I - A_3)^{-1} Y_3 \end{cases} \quad (3-10)$$

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:

$$\begin{cases} C_0 X_0 + Y_0 + Z_0 = X_0 \\ Z_0 = Z_1 + Z_2 + Z_3 \\ Z_1 = C_1 X_1 \\ Z_2 = C_2 X_2 \\ Z_3 = C_3 X_3 \end{cases} \quad (3-11)$$

将式(3-11)中的五个方程联立求解,可得:

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

将式(3-9)代入上面的方程中, 得:

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

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:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \bar{U}_0 \\ \tilde{U}_0 \end{pmatrix} = & D_0 X_0 + \begin{pmatrix} \bar{V}_0 \\ \tilde{V}_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{U}_1 \\ \tilde{U}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{U}_2 \\ \tilde{U}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{U}_3 \\ \tilde{U}_3 \end{pmatrix} \\ = & D_0 X_0 + D_1 X_1 + D_2 X_2 + D_3 X_3 + \begin{pmatrix} \bar{V}_0 \\ \tilde{V}_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-13)$$

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。

(3) 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:

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

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^[21]，用 PFE 代表，则

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

式中，F 为工序所耗燃料的载能量，kgce/单位产品；E 为工序所耗动力的载能量，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：

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{\beta_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{\beta_1 1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{\beta_1 2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{1\beta_1} & a_{2\beta_1} & \cdots & a_{\beta_1 \beta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{\beta_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & \cdots & g_{\alpha_1 1} \\ g_{12} & g_{22} & \cdots & g_{\alpha_1 2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{1\alpha_1} & g_{2\alpha_1} & \cdots & g_{\alpha_1 \alpha_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{\alpha_1} \end{bmatrix}$$

上式可写成

$$P_1 = A_1^T P_1 + G_1^T Q_1 \quad (3-16)$$

式中 $G_1 = \begin{pmatrix} C_1 \\ 0 \\ D_1 \end{pmatrix}$ ， 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(3-16)经整理可得：

$$P_1 = (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 \quad (3-17)$$

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：

$$P_2 = (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 \quad (3-18)$$

$$P_3 = (I - A_3^T)^{-1} G_3^T Q_3 \quad (3-19)$$

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

$$E_1 = P_1 = (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 \quad (3-20)$$

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

	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

根据能量平衡关系有：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} &= \left[I - \begin{pmatrix} A_1 & L_{12} & 0 \\ 0 & A_2 & L_{23} \\ 0 & 0 & A_3 \end{pmatrix}^T \right]^{-1} \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} I - A_1^T & 0 & 0 \\ -L_{12}^T & I - A_2^T & 0 \\ 0 & -L_{23}^T & I - A_3^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} G_1^T & 0 & 0 \\ 0 & G_2^T & 0 \\ 0 & 0 & G_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (I - A_1^T)^{-1} & 0 & 0 \\ (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} & (I - A_2^T)^{-1} & 0 \\ (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} & (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} & (I - A_3^T)^{-1} \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} G_1^T & 0 & 0 \\ 0 & G_2^T & 0 \\ 0 & 0 & G_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \\ &= \\ &\begin{bmatrix} (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 \\ (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 + (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 \\ (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 + (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 + (I - A_3^T)^{-1} G_3^T Q_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

即：

$$\begin{aligned} E_1 &= (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 \\ E_2 &= (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 + (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 \end{aligned}$$

$$E_3 = (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T (I - A_1^T)^{-1} G_1^T Q_1 + (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T (I - A_2^T)^{-1} G_2^T Q_2 + (I - A_3^T)^{-1} G_3^T Q_3 \quad (3-21)$$

式(3-21)就是计算冶金企业产品能值的矩阵累加法计算公式,从三个系统产品能值计算公式的结构中可以发现它们存在以下关系: $E_1 = P_1$; $E_2 = (I - A_2^T)^{-1} L_{12}^T E_1 + P_2$; $E_3 = (I - A_3^T)^{-1} L_{23}^T E_2 + P_3$, 这种关系正体现了实际的物理意义,也证实了矩阵累加法的实用性。

(4) 多级投入产出模型的主要应用

- ① 预测自产产品的数量以及能源和非能源的购入量,用于编制企业的生产经营计划;
- ② 预测企业的能耗总量,确定计划年度企业的能耗水平;
- ③ 在统计生产数据的基础上,计算产品的直接消耗系数和完全消耗系数,用来评价企业的技术水平;
- ④ 计算产品能值并与同类企业比较产品能耗的大小,确定进一步节能的方向和途径;
- ⑤ 计算系统节能量,评价节能技术。

3.1.3 首钢多级投入产出系统

对于首钢这种大型钢铁联合企业,是个有机的整体,各个部门之间,各种产品之间有着复杂而密切的联系,并且企业的产品种类繁多,即使是同一类产品,由于生产工艺、设备、操作不同,其消耗指标也大不一样。因此,根据首钢的生产工艺流程和产品结构的特点,再考虑到现有数据的基础,决定采用“企业多级投入产出模型”的形式(见图3.2)。本文将首钢投入产出模型分为两大部分:主流程生产系统(同表3.2)和辅助流程生产系统(同表3.3),其中主流程生产系统又分为:炼铁、炼钢和轧钢三个子系统(具体的理论同上)。针对不同的生产子系统,投入产出表的形式稍有差别(例如炼铁系统没有关联产品但有中间产品,而炼钢系统两者都有),但其基本原理都相同。

在明确了首钢投入产出模型中的各模块后,需要解决的问题就是各模块的编写,其中最为主要的问题是表中企业各中间产品的分类,在确定表中间产品的目录时,可以采取以下原则:

- ① 中心产品原则。钢铁企业在生产过程中涉及到的中间产品和原料、燃料及辅助材料的种类很多,由于受到统计资料和表格规模的限制,不可能将它们一一列入投入产

出表中。为此，把烧结矿、生铁、粗钢、钢材等作为中间产品。

② 大类产品原则。由于受到表格规模的限制，不可能将各种规格的产品、各种品位、产地不同的原料都一一列入表中，这就需要将它们适当地归类。

③ 收集统计资料的难易程度原则。在产品分类时，必须考虑统计资料收集的难易程度，如果设计的产品分类与实际的统计资料口径不同，那么将在填表时遇到难以解决的问题。

④ 与企业计划工作中现有的产品分类相协调的原则。为了使所编制的投入产出表在计划工作中得以应用，应以计划工作中使用的产品分类为依据，来确定表中的产品目录。在编表过程中，应考虑企业有关人员的意见，并根据实际情况反复进行修改。

根据以上原则，经过反复推敲和修改，最后将首钢生产流程中炼铁、炼钢、轧钢及辅助生产系统的产品目录确定如下：

a 炼铁系统

本系统产品：一烧、二烧，1#焦炉、2#焦炉、3#焦炉、4#焦炉，1#高炉、2#高炉、3#高炉、4#高炉；

辅助工序产品：电力、鼓风、中压蒸汽、低压蒸汽、压缩空气、工业水、氧气、氮气、氩气；

自产产品：焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气；

外购产品：洗精煤、无烟煤、动力煤、电力、焦炭、焦丁、块矿、球团、矿业烧结；

回收产品：焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、电力、蒸汽；

b 炼钢系统

关联产品：1#高炉、2#高炉、3#高炉、4#高炉；

本系统产品：2.1 转炉、2.2 转炉、2.3 转炉、3.1 转炉、3.2 转炉、3.3 转炉、二精炼、三精炼、二连铸、三连铸；(其中，2.1 转炉表示二炼钢一车间的 210 吨转炉；2.2 转炉表示二炼钢二车间的 210 吨转炉；2.3 转炉表示二炼钢三车间 210 吨转炉；3.1 转炉表示三炼钢一车间的 80 吨转炉；3.2 转炉表示三炼钢二车间 80 吨转炉；3.3 转炉表示三炼钢二车间 80 吨转炉)；

辅助工序产品：电力、低压蒸汽、压缩空气、工业水、氧气、氮气、氩气；

自产产品：焦炉煤气；

外购产品：电力、废钢、铁合金、石灰、白云石；

回收产品：蒸汽、转炉煤气；

c 轧钢系统

关联产品：二连铸、三连铸；

本系统产品：中板、一型材、二型材、精棒、一线材、二线材、三线材、钢丝；

辅助工序产品：电力、低压蒸汽、压缩空气、工业水、氧气、氮气；

自产产品：焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气；

外购产品：电力、动力煤、柴油、混油、迁钢钢坯；

回收产品：蒸汽；

d 辅助系统

本系统产品：热力发电、鼓风、动力中压汽、热电低压汽、压缩空气、工业用水、氧气、氮气、氩气；

企业自产产品：高炉煤气、焦炉煤气、转炉煤气；

外购产品：天然气、电力、动力煤、无烟煤、劣质煤；

3.2 吨钢能耗模型的建立

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^[39,40]。

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^[41-43]。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 吨钢综合能耗模型

吨钢综合能耗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^[36]，即

$$[\text{吨钢综合能耗}] = \frac{\text{统计期内钢铁企业能耗总量}}{\text{合格钢产量}} \text{ kgce/t 钢} \tag{3-22}$$

数学表达式可写为

$$E = \sum_{i=1}^n e_i p_i \tag{3-23}$$

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, 其中包括辅助工序。

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:

$$\Delta E = \sum_i p_i'' (e_i'' - e_i') + \sum_i e_i' (p_i'' - p_i') \quad (3-24)$$

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(3-24)右端第一项称作直接节能量, 第二项称作间接节能量。

(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

$$\text{工序能耗} = \frac{\text{工艺过程及辅助生产消耗的能量} - \text{回收并外供的能量}}{\text{合格产品的产量}} \quad (3-25)$$

或写成

$$\text{工序能耗} = \frac{\sum \text{燃料及动力介质实物消耗量} \times \alpha - \text{回收并外供的能量}}{\text{合格产品的产量}} \quad (3-26)$$

式(3-26)中, α 为某燃料及动力介质的折标煤系数, 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^[27]：

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 $g_{\gamma-i}$ ，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 $g_{\beta-i}$ ，kgce/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、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。

(2) 钢比系数及其物流

钢比系数，是指某工序在统计期内的实物产量与钢产量之比^[44]，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^[27,45,46]：

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

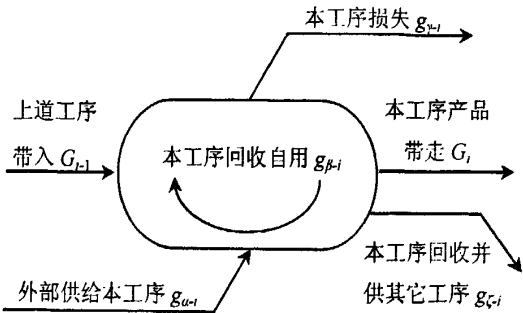


图 3.3 生产工序的能量流图
Fig.3.3 Energy flow of unit process

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)。

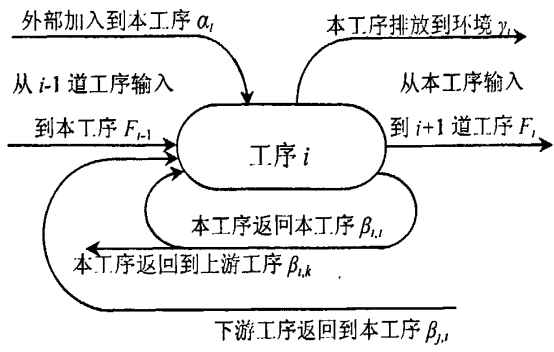


图 3.4 生产工序的物质流图
Fig.3.4 Material flow of unit process

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。

3.2.2 吨钢可比能耗模型

吨钢可比能耗是指钢铁联合企业每生产一吨钢, 从焦化、烧结/球团、炼铁、炼钢、连铸直到成品轧材配套生产所必须的耗能量及企业煤气、燃料油等加工输送、内部运输能耗及企业能源亏损等三部分所分摊在每一吨钢上的能量之和。不包括联合企业的矿山、选矿、铁合金、耐火材料、碳素制品、焦化回收产品精制及其它产品生产的能耗^[42,47]。

吨钢可比能耗与吨钢综合能耗包含的工序不同, 适用的范围也不同, 一般吨钢综合能耗用于本企业历年能耗水平的比较, 合企业本企业历年能耗水平的变化, 也可作为钢铁联合企业之间对比参考用, 它反映了企业的总体能源消耗和利用水平; 吨钢可比能耗用于生产结构不同企业间的能耗对比, 但不能作为企业能耗总量计算的依据。吨钢可比能耗的计算方法也可以用 $e-p$ 模型, 如果按工序分别计算, 可以用以下公式^[42]:

$$E_0=(A\cdot a+B\cdot b+C\cdot c+D\cdot d)\cdot e+F+G\cdot g\cdot n+H\cdot h+I+J+K \quad (3-27)$$

式中, E_0 为吨钢可比能耗, kgce/t 钢;

$A、B、C、D、F、G、H$ 分别为焦化、烧结、球团、炼铁、炼钢、初轧、轧材等

工序的工序单位能耗, kgce/t 产品;

$a = (\text{烧结、球团、炼铁耗焦量}) / \text{全铁折合产量}, \text{t 焦/t 铁};$

$b = \text{烧结矿消耗量} / \text{全铁折合产量}, \text{t 矿/t 铁}; c = \text{球团矿消耗量} / \text{全铁折合产量}, \text{t 矿/t 铁};$

$e = \text{吨钢耗生铁量}, \text{t 铁/t 钢}; g = \text{初轧成坯率}, \%;$

$n = 1 - \frac{(\text{连铸坯量} + \text{直接成材耗锭量})}{(\text{初轧耗锭量} + \text{连铸坯量} + \text{直接成材量耗锭量})}, \%;$

$h = \text{企业由钢到材的综合成材率}, \%;$

$I = \text{运输能耗量} / \text{企业钢产量}, \text{tce/t 钢};$

$J = \text{燃气加工与输送能耗量} / \text{企业钢产量}, \text{tce/t 钢};$

$K = \text{企业能源亏损量} / \text{企业钢产量}, \text{tce/t 钢}.$

由式(3-27)可见, 吨钢可比能耗也同样受工序能耗和钢比系数的直接影响, 各工序能耗和钢比系数越高, 吨钢可比能耗越高, 而成材率与吨钢可比能耗却成正比关系, 成材率提高, 吨钢可比能耗相对降低。

根据首钢能源统计情况, 可以发现, 首钢吨钢综合能耗和吨钢可比能耗的计算差别主要为: 吨钢综合能耗包括辅助系统, 吨钢可比能耗不计入辅助系统的能耗, 这样, 在吨钢综合能耗的分析中不仅要考虑各生产主工序的工序能耗和钢比系数, 还要考虑辅助工序的能耗变化对其带来的影响。用公式表达为

$$E = E_0 + E_f \quad (3-28)$$

式中, E 为首钢吨钢综合能耗, E_0 为首钢吨钢可比能耗, E_f 为首钢辅助系统吨钢工序能耗。

3.3 软件应用

3.3.1 MATLAB 软件介绍

MATLAB 是一种计算机编程语言, 取名来源于 Matrix Laboratory (矩阵实验室), 名字是由 MATrix 和 LABoratory 两个词的前三个字母组合而成的, 最初是在 1980 年由美国的 Cleve Moler 博士研制的。其目的是为线性代数等课程提供一种方便可行的实验手段。

自 1984 年由美国 MathWorks 公司将 MATLAB 推向市场以来, 历经十几年的发展,

该软件现已成为国际公认的最优秀的科技应用软件，被誉为“巨人肩上的工具”。MATLAB 是一种适合多学科、多工作平台的大型软件，涉及领域包括数字信号处理、控制系统、数据统计、模糊控制等，它包含各种工具箱，是一种高级的科学分析与计算软件，被广泛地使用于从个人计算机到超级计算机范围内的各种计算机上。MATLAB 软件可以和其它应用软件及工程应用软件进行无缝的接口，如：Excel、VB、C++、Labview、Active-HDL、VEE 等都嵌入了 MATLAB，以增强该软件的数学计算能力^[48]。

近年来，MATLAB在国内的知名度越来越大，并已广泛地应用于教学和科研领域。该软件的特点可以归纳为以下几点：

（1）简单易学

MATLAB是一门编程语言，其语法规则与一般的结构化高级编程语言如C语言等大同小异，而且使用更方便，具有一般编程语言基础的用户很快就可以掌握。

（2）代码短小高效

由于MATLAB已经将数学问题的具体算法编成了现成的函数，用户只要熟悉算法的特点、使用场合、函数的调用格式和参数意义等，通过调用函数就可以很快解决问题，而不必花大量的时间纠缠于具体的算法。

（3）计算功能非常强大

该软件具有强大的矩阵计算功能，利用一般的符号和函数就可以对矩阵进行加、减、乘、除运算以及转置和求逆运算，而且可以处理稀疏矩阵等特殊的矩阵，非常适合于有限元等大型数值算法的编程。此外，该软件现有的数十个工具箱，可以解决应用中的大多数数学问题。

（4）强大的图形表达功能

该软件不仅可以绘制一般的二维/三维图形，如线图、条形图、饼图、散点图、直方图、误差条图等，还可以绘制工程特性较强的特殊图形，如玫瑰花图、极坐标图等。科学计算要涉及到大量的数据处理，利用图形展示数据场的特征，能显著提高数据处理的效率，提高对数据反馈信息的处理速度和能力。MATLAB提供了丰富的科学计算可视化功能，利用它，可以绘制二维/三维矢量图、等值线图、三维表面图、假彩色图、曲面图、云图、二维/三维流程图、流沙图、流带图、流管图、卷曲图、切片图等，此外还可以生成快照图和进行动画制作。

（5）可扩展性能

可扩展性能是该软件的一大优点，用户可以自己编写M文件，组成自己的工具箱，

方便地解决本领域内常见的计算问题。此外,利用MATLAB编译器和运行服务器,可以生成独立的可执行程序,从而可以隐藏算法并避免依赖MATLAB。MATLAB支持DDE和ActiveX自动化等机制,可以与同样支持该技术的应用程序接口。利用最近推出的COM生成器和Excel生成器,可以利用给定的M文件和/或MEX文件创建COM组件和Excel插件,从而能够实现与VB、VC等程序的进程内无缝集成。利用Web服务器,可以实现MATLAB与网络程序的接口。在目前情况下,采用互操作技术,可以实现MATLAB与.NET程序的接口。利用端口API函数,可以实现MATLAB与硬件的接口。

3.3.2 MATLAB 软件应用的环境

MATLAB软件可在下列各种类型的机器上运行:PC及兼容机,Macintosh,Sun工作站,VAX机,Apollo工作站,HP工作站,DECstation工作站,SGI工作站,RS/6000工作站,Convex工作站及Gray计算机等。

用MATLAB语言编写程序(不采用其他外部语言),则编写出来的程序可以不做任何修改,均可在上面介绍的各种机型上通用,即MATLAB语言和其他语言不同,它与机器类型无关,即使设计像图形绘制或图形界面编辑这些通常依赖于机器类型的程序,在MATLAB环境下可以简单地将程序“拷贝”到其他类型的机器上,而不必担心它是否能在新的类型的机器环境下正确运行。

MATLAB本身提供了较完善的联机(online)帮助软件环境,用户可以通过它查询命令的功能与调用格式,还提供了程序演示的功能。

3.3.3 MATLAB 软件的矩阵运算功能

熟悉FORTRAN语言和C语言的用户都知道,FORTRAN语言和C语言以及其他高级计算机语言,虽然在很多程序设计上有独特的优点,但涉及矩阵运算时,编程会很麻烦,而MATLAB软件一出现就能引起各界研究人员注意的原因之一,就是它具有简单方便的矩阵操作功能^[49]。

MATLAB实际上可认为是一种解释性语言,用户可以在MATLAB工作环境下键入一个命令,也可以用MATLAB语言编写应用程序,然后MATLAB软件对此命令或程序中各条命令进行翻译,在MATLAB环境下进行处理,最后返回运算结果。因此,既可以对其的某个或某些元素进行单独处理,也可以对其整体地进行处理,操作非常方便。

MATLAB软件提供了矩阵的各种运算和操作,除了常用的矩阵运算,如加法、减法、

乘法、乘方、Kronecker乘法、除法、转置等运算外，还提供了一些特殊的矩阵运算，如矩阵的翻转运算、点运算以及单个矩阵的元素赋值与运算。

除了这些基本矩阵运算之外，MATLAB软件还提供了在数值线性代数中一些基本的算法函数，首先是一些特殊矩阵的定义，MATLAB软件定义了常用的一些特殊矩阵，如零矩阵、单位矩阵、随机元素矩阵、对角矩阵、Hilbert及逆Hilbert矩阵、伴随矩阵、Hankel矩阵和Vandermonde矩阵等，这些矩阵可以简单地用一个函数来求取。除此之外，MATLAB软件还提供了大量的矩阵特征参数求取函数，如：求取矩阵的行列式、矩阵的迹、矩阵的秩、矩阵的范数、矩阵的特征多项式、特征方程与特征根等函数，以及矩阵的各种变换和分解函数、矩阵的特征值与特征向量求取函数和矩阵的求逆运算函数等，而且除了这些数值线性代数的基本算法外，MATLAB还可以实现其他的数值分析方法，包括数据处理、数值微积分、非线性方程求解和最优化，以及常微分方程的数值解法等内容。

3.3.4 MATLAB 与 Excel 数据传递

在应用MATLAB过程中，用户会发现这样一个问题：MATLAB是以矩阵作为数据处理的基本单元，输入/输出数据均为矩阵格式，多采用M文件、ASCII文本文件、MAT文件等形式存储，这些文件格式的数据显示不够直观，并且在管理、使用时都需要编写相应程序，使普通用户难于应用。而Office中Excel的电子表格功能正好弥补这一不足，为充分结合并发挥MATLAB和Excel两种软件各自的优点，在MATLAB下可以同Excel的软件接口，完成与Excel的数据传输^[50]。为实现MATLAB与Excel数据传递，经常采用的7个数据管理函数来实现二者之间的数据传递，见表3.5。

表 3.5 数据管理函数及其作用
Table 3.5 Data manage function and effect

函数名	作用
MLdeleteMatrix	删除 MATLAB 矩阵
MLEvalString	执行 MATLAB 命令
MLGetMatrix	向 Excel 数据表写 MATLAB 矩阵的数据内容
MLGetVar	向 Excel 数据表 VBA 写 MATLAB 矩阵的数据内容
MLAppendMatrix	向 MATLAB 空间添加 Excel 数据表的数据内容
MLPutMatrix	用 Excel 数据表创建或覆盖 MATLAB 矩阵
MLPutVar	用 Excel 数据表 VBA 创建或覆盖 MATLAB 矩阵

3.3.5 程序功能

根据首钢生产实际，把首钢生产主系统划分为辅助系统、炼铁系统、炼钢系统、及轧钢系统四个子系统。结合多级能源投入产出模型和吨钢能耗的计算模型，利用 MATLAB 软件进行编程，对首钢生产主系统进行能耗的计算与分析，并可将结果显示在 Excel 表中。程序可以实现以下计算功能：

- 1) 各个工序中单耗变化，可自动实现能耗计算、赋值；
- 2) 产量变化时，首钢整个生产系统的变化可实现自动计算、赋值；
- 3) 炼铁-炼钢、炼钢-轧钢界面物流变化时，可以实现自动计算、赋值；
- 4) 炼铁系统中可实现高炉的取舍分析，使管理者可清楚的看出，每个高炉的取舍对炼铁系统及整个生产系统产量的影响；
- 5) 炼钢系统中可实现转炉的取舍分析。使观察者可清楚的看出，每个转炉的取舍对炼钢系统及整个生产系统产量的影响；
- 6) 辅助工序对应以上不同分析可实现自动计算和赋值。

第4章 首钢减产方案能耗分析

为迎接 2008 年奥运会, 根据北京市政府决定, 首钢需要进行生产调整, 逐步降低产量。为此, 首钢在保证安全生产、顺利过渡的前提下制定了压产方案, 该方案分为三个阶段实施, 压产必将引起相关车间生产设备的删减, 甚至是某个车间的停产。本文针对 2008 年首钢压产方案的能耗与动力平衡进行了详细分析。

首钢的阶段压产方案以设备停产时间为顺序, 以各系统的平衡为条件, 以确保人身、设备、环保及安全为前提, 以节能减排为重点, 以经济效益为目标。原则上从两方面考虑: 一方面, 设备的停产是在满足产量的前提下, 优先考虑停产小型、陈旧设备, 并保证能源的供需平衡, 最大限度地合理利用现有设备及自产的二次能源; 另一方面, 考虑到生产流程的顺畅、简化, 需保留一条能够满足钢产量要求的生产线, 停产其余的生产线。三个阶段的压产方案是循序渐进的, 压产方案阶段一基本是过渡性的压产, 仅停产一座高炉, 两座转炉, 季度钢产量降低至 148 万吨; 压产方案阶段二减产力度加大, 停产两座高炉, 三座转炉, 季度钢产量降低至 112 万吨, 逐步实现压产目标; 压产方案阶段三是奥运期, 为减少污染物的排放, 保证首都空气质量, 首钢将实行历史性的单炉生产, 季度钢产量降低至 59 万吨。在辅助系统上, 三方案都是针对主生产设备的删减对相应的辅助设备进行了停运, 此外辅助系统的停运还受产品分配的影响。不同的压产方案导致各工序的产品产量和能耗都会有不同的变化, 并影响整个生产系统的能源和动力供需平衡。

基于 2006 年首钢数据库, 本文以投入产出法为理论基础, 建立了相应的数学计算模型, 利用 MATLAB 应用软件分别对压产方案的三阶段经济技术生产指标及能耗指标进行程序编制和计算, 得出了一系列有参考价值的重要指标, 通过对这些指标的对比、分析, 为方案的实施提出可行的建议。

4.1 压产方案阶段一

4.1.1 压产方案阶段一内容

首钢第一阶段压产调整将于 2007 年底实施, 调整内容如下:

(1) 炼铁系统：停产 4#高炉，同时停产烧结厂二车间 2 台烧结机。焦化厂维持现有焦炉和相关设备。

(2) 炼钢系统：停产三炼钢两座转炉及其相应的铸机。

(3) 动力系统：根据主系统压产方案，结合生产实际，首钢制定了与主系统相应的动力系统停产配套方案，内容如下：

①高炉鼓风系统：2#汽动风机退出运行，保留 1#、3#、4#三台电动风机，两用一备，且 2#高炉由 4#风机供风。

②水系统：停与四高炉相关的十泵站、二泵站的四炉水泵，其他系统保留。

③锅炉：停与 4#高炉和 2#风机相关的热力设备，在保冬季供暖的前提下，停中低压锅炉 4-5 台。

④制氧设备：根据综合北京地区制氧机的状况，制氧运行三万和三万五两大机组，5#、6#机组补充不足。

⑤电力系统：暂停六总降 1 台 2 万千伏安变压器，停四炉压差发电机组。

4.1.2 压产方案阶段一分析

本节从铁流、能耗、动力平衡及煤气平衡等几方面对压产方案阶段一进行分析。以首钢 2006 年统计的生产数据为依据，本文得出了压产方案阶段一的铁流、能耗等计算数据，通过压产方案阶段一的计算结果与首钢 2006 年同期（一季度）水平的对比，分析各项指标变化的原因。

4.1.2.1 压产方案阶段一铁流分析

根据压产方案阶段一的压产调整，在 2007 年底，首钢生产流程依然保留现有的两条主生产线，但是炼钢系统将停产三炼钢两座 80t 转炉，以及对应的方坯连铸生产线，其他生产系统也将删减设备，比如炼铁系统将停产 4#高炉，同时停产两台烧结机等。因此，第一阶段压产实施后，钢产量将由 2006 年同期的 203.64 万吨降为 148 万吨，产量减少了 55.64 万吨，降低幅度达到 27.2%。相对于原产量，第一阶段压产较为明显。随着粗钢产量的降低，烧结、炼铁等工序产品产量也发生了变化。

根据铁流平衡及能量流平衡，本文计算出各工序相应的产品产量，表 4.1 所示为本文计算出的压产方案阶段一产品产量和 2006 年同期各工序产品产量的对比情况。

表 4.1 压产方案阶段一产品产量及 2006 年同期各工序产品产量对比表（单位：万 t）
Table 4.1 Process product yield comparison between phase 1 and the state in 2006 (unit: 10⁴ ton)

项目	焦化	烧结	炼铁	炼钢	外调坯	热轧
2006 年同期现状	45.31	190.20	193.29	203.64	45.27	211.85
压产方案阶段一	45.31	139.34	140.68	148	32.91	153.99

由表 4.1 可见，除了焦化工序产品产量没有变化外(压产方案中焦化工序不做调整)，随着钢产量的降低，其余含铁工序的产品产量均出现了较大幅度的降低，下降率均在 27%左右。在生产流程中，铁素由铁精矿流经烧结、高炉、转炉、精炼、连铸，最后流入轧材，遵循物质流守恒定律，各含铁工序的铁素流入量与流出量理论上应当相等，但由于各工序均存在一定程度上的铁素亏损，因此铁素流入量与流出量存在差值，本文在计算铁素平衡时，既依靠理论又考虑生产实际，因而计算结果具有较强的完整性和可靠性。

根据铁素平衡，压产之后的钢产量不能满足钢材量的生产需求，自产铸坯不够需外调铸坯满足轧钢生产需要，因此本文也将外调坯量考虑到了铁素平衡的计算中。图 4.1 所示为首钢压产方案阶段一生产流程铁流示意图。

图 4.1 中的数据是本文在 2006 年数据库的基础上，以铁素平衡（即流入工序铁素量等于流出工序铁素量与工序铁损之和）为依据，经 MATLAB 软件编制投入产出表，并通过投入产出计算理论得出的结果，具有较高的精确度，能够反应实际生产指标。需要强调的是，这些指标均建立在首钢生产系统各工序车间每个生产设备现有生产能力的基础上，压产后的单体设备产量有可能超过 2006 年的生产能力，但本文计算结果中并没有出现超负荷生产的情况，各单体设备的产量均维持在最大生产许可能力范围内。

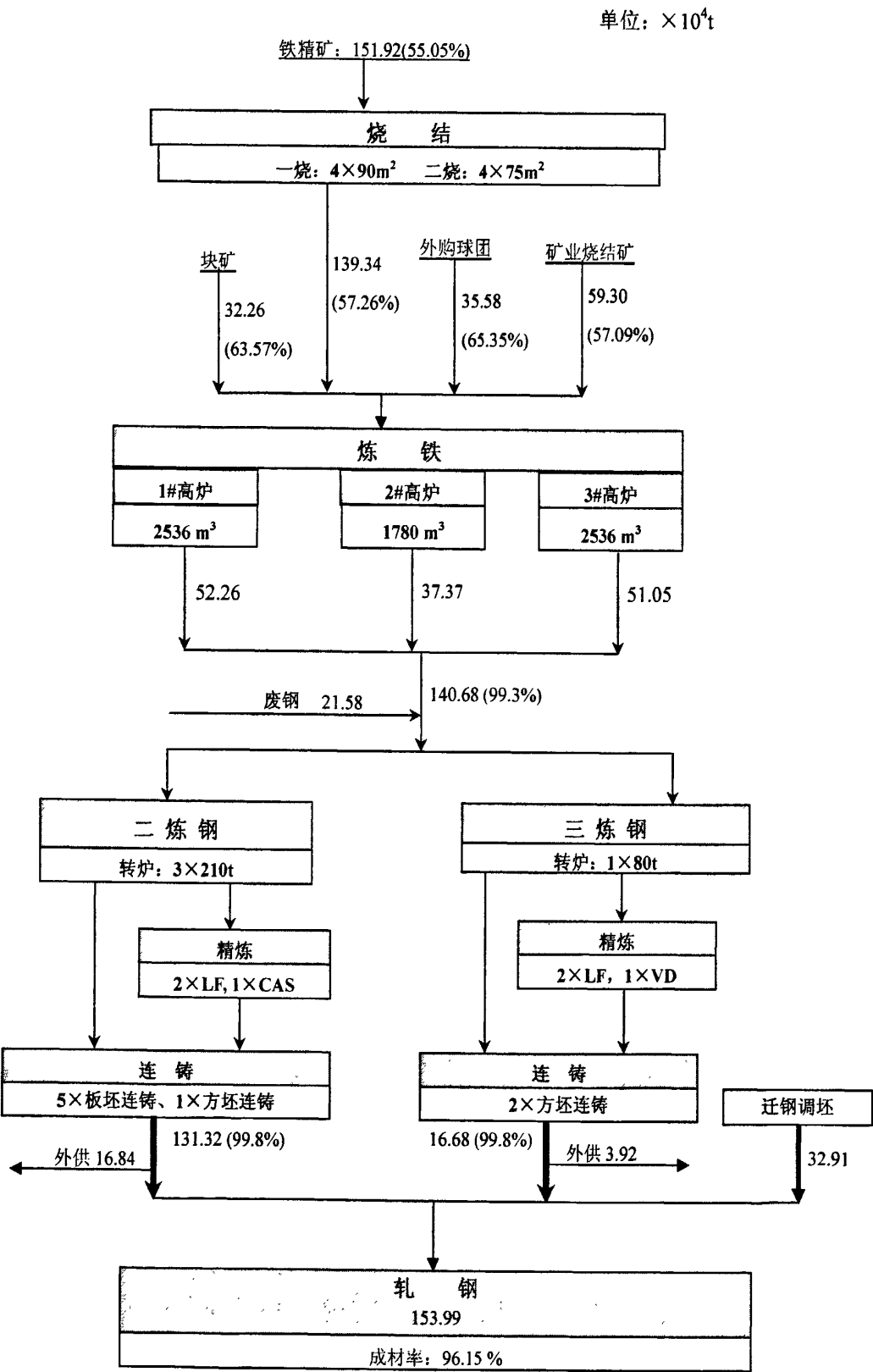


图 4.1 首钢压产方案阶段一生产流程铁流图
Fig.4.1 Fe-flow chart of output reduction draft in phase one

4.1.2.2 压产方案阶段一能耗分析

(1) 压产方案阶段一吨钢能耗的对比分析

由上一章阐述的吨钢能耗理论和计算公式，本文设定程序用以计算吨钢能耗，同时计算出钢比系数，以分析影响吨钢能耗的因素。表 4.2 为本文计算的吨钢能耗情况与 2006 年同期吨钢能耗的对比表。

表 4.2 首钢 2006 年和压产方案阶段一的吨钢能耗对比表
Table 4.2 Comparison of energy intensity per ton of steel between phase 1 and the state in 2006

项目	首钢 2006 年同期	压产方案阶段一	变化量
吨钢综合能耗/kgce·t ⁻¹ 钢	724.23	742.26	-18.03
吨钢可比能耗/kgce·t ⁻¹ 钢	686.11	695.70	-9.59

由对比结果可知，首钢 2008 压产方案阶段一的吨钢综合能耗和吨钢可比能耗比首钢 2006 年同期分别高出 18.03kgce/t 钢和 9.59kgce/t 钢，吨钢综合能耗比吨钢可比能耗高是因为附加了辅助工序吨钢能耗的增加量（8.44kgce/t 钢），而压产方案的吨钢能耗均高于 2006 年同期值，主要由设备删减带来的工序能耗和钢比系数的变化引起的，其中工序能耗是直接影响因素，而钢比系数是间接影响因素。由于本文以首钢 2006 年数据为基础，认为单体设备的能耗不变，个别工序能耗的变化主要是因为设备删减带来的能耗平均值变化引起的，见表 4.3，其中烧结、炼铁、炼钢三工序的能耗都有所降低，实际上本文在计算中是以单体设备的能耗为准，因此主工序能耗并不影响吨钢可比能耗的变化。

表 4.3 压产方案阶段一及 2006 年同期各工序能耗对比表（单位：kgce/t 产品）
Table 4.3 Comparison of process energy intensity between phase 1 and the state in 2006

项目	焦化	烧结	炼铁	转炉炼钢	连铸	轧钢
2006 年同期	161.4	57.5	445.2	-0.85	11.6	85.1
压产方案阶段一	161.4	56.6	440.9	-0.20	11.6	85.1

由工序能耗对比可见，吨钢可比能耗之所以发生变化完全是因为钢比系数发生了变化，第一阶段压产后，各工序钢比系数随着钢产量和工序设备的调整发生了改变，表 4.4 为本文计算出的首钢 2008 压产方案阶段一及 2006 年同期的各工序钢比系数对比表。由表中结果可见，焦化、烧结、炼铁工序的钢比系数均增大，尤其是焦化工序因产量不变导致钢比系数增大了 22.5%，而焦化工序能耗在整个生产流程中仅次于炼铁工序，达

到 161.4kgce/t 钢，根据吨钢能耗的计算公式，两者耦合的结果相对于初始值就变大，再加上其他工序钢比系数的综合影响，整个生产流程的吨钢可比能耗就比 2006 年同期多出 9.59kgce/t 钢；而吨钢综合能耗因动力合计能耗的增大（2006 年同期为 25.82kgce/t 钢，压产方案阶段一为 34.26kgce/t 钢）比 2006 年同期又多出 8.44kgce/t 钢，即辅助工序能耗带来的影响。值得强调的是，压产方案阶段一的铁钢比并没有明显的提高，但是由于炼铁工序的能耗最高，首钢方面在生产实际中应当努力降低铁钢比，提高废钢比，降低吨钢能耗。

表 4.4 压产方案阶段一及 2006 年同期各工序钢比系数对比表（单位：t 产品/t 钢）
Table 4.4 Comparison of process steel ratio between phase 1 and the state in 2006 (unit: t/t)

项目	焦钢比	矿钢比	铁钢比	转炉钢比	连铸比	轧钢比
2006 年同期	0.3510	0.9340	0.9492	1.000	1.000	0.9615
压产方案阶段一	0.4300	0.9415	0.9505	1.000	1.000	0.9615
变化量	0.079	0.0075	0.0013	0	0	0

(2) 压产方案阶段一的能源与动力消耗对比分析

本文所计算的能源消耗量包括企业自产能源及外购能源。自产能源包括动力厂生产的能源如电力、蒸汽、鼓风、压缩空气、氧气等，还包括生产过程中回收的二次能源如蒸汽、转炉煤气、高炉煤气以及焦炉煤气等；外购能源包括电力、焦炭、洗精煤等。能源的供需平衡是生产结构调整中考虑的关键问题之一，表 4.5 为本文计算得出的首钢 2008 压产方案阶段一的自产能源需要量和首钢 2006 年同期自产能源产生量统计表，反应了自产能源与动力的供需平衡情况，表 4.6 为本文计算的首钢 2006 年同期和首钢 2008 压产方案阶段一的外购能源需要量统计表。

表 4.5 压产方案阶段一及 2006 年同期自产能源（动力）统计表
Table 4.5 Home energy (power) statistic for phase 1 and the state in 2006

项目	电力	鼓风	蒸汽	压缩 空气	工业水	氧气	氮气	氩气	焦炭
	/万 kWh	/万 m ³	/GJ	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 t
2006 年 产生量	37719.8	255620.9	1697480.8	23687.3	12234.5	14391.0	18500.8	134.7	45.3
压产方案 阶段一需 要量	30225.2	188968.8	1526848.7	18891.7	10532.5	10915.6	14494.6	100.5	45.3
变化量	7494.6	66652.1	170632.1	4795.6	1702	3475.4	4006.2	34.2	0

表 4.6 首钢 2008 压产方案阶段一及 2006 年同期外购能源统计表

Table 4.6 Puchased energy statistic for output-cut phase I and the state in 2006

项目	电力	洗精煤	无烟煤	动力煤	劣质煤	柴油	汽油	混油	焦丁	焦炭
	/万 kWh	/万 t	/万 t	/万 t	t	t	t	t	t	/万 t
2006 年需要量	66382.1	58.6	27.4	14.7	19613.6	84.7	7.22	16553.8	97426.2	25.4
压产方案阶段一需要量	52948.2	58.6	19.4	12.7	17108.1	61.6	5.25	12032.9	74579.2	5.5
变化量	13433.9	0	8.0	2.0	2505.5	13.1	1.97	4520.9	22847	19.9

根据表 4.5 中数据对比可见，随着生产结构的调整，产量的压缩，自产能源的需求量也相对减小，根据首钢 2006 年和压产方案阶段一在动力上的差额可以计算出动力是否平衡，例如鼓风系统停产 2#汽动鼓风机，其 2006 年同期鼓风量为 45743.8 万 m³，剩余三座电动鼓风机两备一用，这三座鼓风机 2006 年同期鼓风总量为 209883.2 万 m³，可以满足压产方案阶段一的需求量 188968.8 万 m³。以此类推，其他辅助工序的能源生产量都能够满足压产方案阶段一的生产需要。因此，动力系统除煤气外，各动力包括电力、鼓风、蒸汽等在调节生产设备的情况下均可维持供需平衡。

随着产量的减小，自产能源和外购能源的生产需要量都应当是相对减少的，从表 4.5 中可见自产能源除焦炭外其余动力能源均是减小的，但是考虑到压产方案阶段一的煤气平衡，外购能源量有适当调整。由表 4.6 可见，外购能源中除洗精煤外，其余能源种类的外购量或者保持不变，或者相对减少，其中焦炭仍需外购 5.5 万 t。为了保证煤气平衡，考虑用动力煤替代供给热力发电所需的高炉煤气的措施，但是，在本文计算的投入产出结果发现，压产方案阶段一热力发电耗动力煤水平依然保持在 2006 年同期值的 0.32kg/t 钢，也就是说煤气的供给是平衡的。

4.1.2.3 压产方案阶段一煤气平衡的对比和分析

煤气平衡也是生产流程结构调整所须考虑的关键问题之一，也是本文重点讨论的内容之一，煤气的不合理分配必然会引起能耗的上升，甚至会引起生产的不顺畅，造成经济损失。首钢 2006 年副产煤气主要为高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气三种，按照 2006 年折标煤系数计算，三种煤气的热值分别为 3315kJ/m³、7489kJ/m³、17346kJ/m³，经第一阶段压产调整后，在热值保持不变的情况下，发生量与使用量都发生了变化，计算结果如表 4.7 所示。

表 4.7 压产方案阶段一及 2006 年同期煤气指标对比表
Table 4.7 Comparison of gas index between phase 1 and the state in 2006

项目	分类	高炉煤气	焦炉煤气	转炉煤气
发生量/万 m ³	2006 年同期	261404.6	18824.7	19595.1
	压产方案阶段一	184735.9	18824.7	14546.4
使用量/万 m ³	2006 年同期	225812.9	18410.6	19096.1
	压产方案阶段一	184015.4	13997.2	15590.0
富余率/%	2006 年同期	13.62	2.20	2.55
	压产方案阶段一	0.39	25.64	-7.17

由首钢 2006 年和压产方案阶段一的煤气发生量、使用量及富余率可见，除焦炉煤气外，其余两种煤气的发生量均随着生产结构的调整而减小，主要是由于煤气发生设备减少造成的；在使用量上，根据首钢压产方案阶段一的压产调整，停产 4#高炉后，高炉煤气产量减少，但同时随着钢产量的降低，高炉煤气的需求量也相应减少，基本上满足供需平衡；在炼焦设备全部保留的情况下，焦炉煤气的产量将保持不变，而钢产量却降低了 27%，所以必定有大量焦炉煤气富余；转炉煤气的产生量因停产两座转炉而大幅减少，轧钢厂为保证产量对转炉煤气的需求依然很大，因此转炉煤气出现不足。焦炉煤气的热值高于转炉煤气，同时焦炉煤气富余量又大于转炉煤气缺少量，根据热量平衡，富余焦炉煤气发热量为 837360GJ，而所缺转炉煤气的发热量仅为 78152GJ，即富余煤气远远可以满足热量需求，因此无需外购天然气。

4.1.3 小结与建议

根据首钢 2008 压产方案阶段一的生产结构调整，并按照首钢 2006 年的基础数据库进行计算，本文分析了压产方案阶段一的铁流，计算出压产调整后的能耗指标，得出影响能耗的主要因素，并分析了阶段一的动力平衡和煤气平衡问题，得出以下结论和建议：

- (1) 结论
- ①压产调整后，钢产量降低了 27%，铁钢比稍有升高，达到 0.9505；

②吨钢综合能耗和吨钢可比能耗均高于 2006 年同期水平，主要影响因素是钢比系数，尤其是焦钢比的影响较大，此外，吨钢综合能耗还因辅助工序能耗的增大升高了 8.44kgce/t 钢；

③随着钢产量的降低，自产与外购能源量均相对减少，并且自产能源与动力均能够满足供需平衡；

④高炉煤气基本满足供需平衡,焦炉煤气大量富余,转炉煤气不足,但是富余煤气发热量远大于需要的发热量,因此无需外购天然气。

(2) 建议

①首钢方面在生产实际中应当注重铁钢比的影响,由于炼铁工序能耗在整个生产流程中占最大比例,因此应尽可能地降低铁钢比,在设备停运期间归整废钢,努力提高废钢比,降低吨钢能耗。

②根据热量平衡计算,可以将富余高炉煤气和焦炉煤气以 2.3:1 的比例混合来满足生产所需的燃气,即使这样,焦炉煤气依然明显过剩,按照节能降耗的原则,可以将这部分焦炉煤气外销;或者,依据压产后煤气平衡可知,高炉煤气富余量较小,可将富余焦炉煤气在焦化厂等工序替代部分高炉煤气,最大限度的保证首钢煤气资源供需平衡和合理使用。

③由于此阶段首钢二炼钢、三炼钢同时生产,建议有关单位结合转炉的实际生产能力,确定出二炼钢、三炼钢的产量。二、三炼钢厂产量的变化对能耗有较大的影响。

4.2 压产方案阶段二

为保证安全顺利地压产,首钢采取的是逐步压产方案,总方案分为三个阶段,根据上节分析第一阶段实现了 27%的减产幅度,第二阶段将实现进一步减产,运行两个季度,即 2008 年第二季度和第四季度,奥运期(2008 年第三季度)后,生产结构将由第三阶段的特殊生产状态调整至第二阶段生产方案。因此,第二阶段压产调整至为重要,不仅是第三阶段压产的前提准备,更是第四季度稳定生产的基础。

4.2.1 压产方案阶段二内容

首钢第二阶段压产调整将于 2008 年一季度末实施,调整内容如下:

- (1) 炼铁系统: 停产 2#高炉,同时,停产烧结厂二车间。焦化厂维持现有焦炉生产。
- (2) 炼钢系统: 停产三炼钢全部。
- (3) 动力系统: 根据主系统压产方案,结合生产实际,首钢制定了与主系统相应的动力系统停产配套方案,内容如下:

①高炉鼓风系统: 4#风机停机备用。

②水系统: 停与二高炉和 4#风机相关的水泵。

③热力系统: 停与 2#高炉和 4#风机相关的热力设备。

- ④制氧设备：综合北京地区制氧机的状况，运行三万五和两台小机组，三万机组备用，根据高炉富氧情况运行两个大型制氧机组。
- ⑤电力系统：暂停三总降一台 7500 千伏安变压器，二炉压差发电机组暂封存。

4.2.2 压产方案阶段二的对比和分析

根据压产方案阶段二的内容，第二阶段压产实施后，首钢生产流程将变为一条以二炼钢为中心的主生产线，分析起来较压产方案阶段一相对简单，但是方法与压产方案阶段一相同，压产方案阶段二的分析也主要从铁流、能耗、动力平衡及煤气平衡等几方面展开，本文对压产方案阶段二进行了有关工序能耗、产品产量等指标的计算与分析，与压产方案阶段一相同，压产方案阶段二在设备单耗方面采用的是 2006 年同期的生产指标，但是因钢产量不同，生产结构也不同，产品产量、吨钢能耗等方面均有变化。

4.2.2.1 压产方案阶段二铁流的对比和分析

与阶段一的计算方法相同，根据压产方案阶段二的压产调整，以 2006 年同期生产设备的生产能力和单耗为基础，本文计算出阶段二的各工序产品产量，并与 2006 年同期水平及压产方案阶段一的结果进行对比，见表 4.8。

表 4.8 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二的工序产品产量对比表（单位：万 t）
Table 4.8 Process product yield comparison among phase 1 and phase2 and the state in 2006

项目	焦化	烧结	炼铁	炼钢	外调坯	热轧
2006 年同期	45.31	190.20	193.29	203.64	45.27	211.85
压产方案阶段一	45.31	139.34	140.68	148.00	32.91	153.99
压产方案阶段二	45.31	106.21	106.53	112.00	24.61	115.16

由表 4.8 中数据对比可见，除炼焦工序外，压产方案阶段二各工序产品产量均低于压产方案阶段一并远小于 2006 年同期水平，如果按第二阶段的钢产量进行全年生产，年产粗钢量将为 448 万吨，基本达到了北京对首钢的压产要求。相对于 2006 年同期水平，第二阶段压产实施后，粗钢产量降低了 45%，降低幅度是阶段一的近两倍。

根据铁素平衡原理及阶段二压产后的含铁产品产量可得出，铁流在该阶段方案生产流程中具有合理性，并符合首钢现有的设备生产能力。根据压产方案阶段二的生产流程可绘出铁流图，如图 4.2 所示。由下图可见，为了满足轧钢生产需求，在第二阶段的生产运行中，首钢仍需外调铸坯。

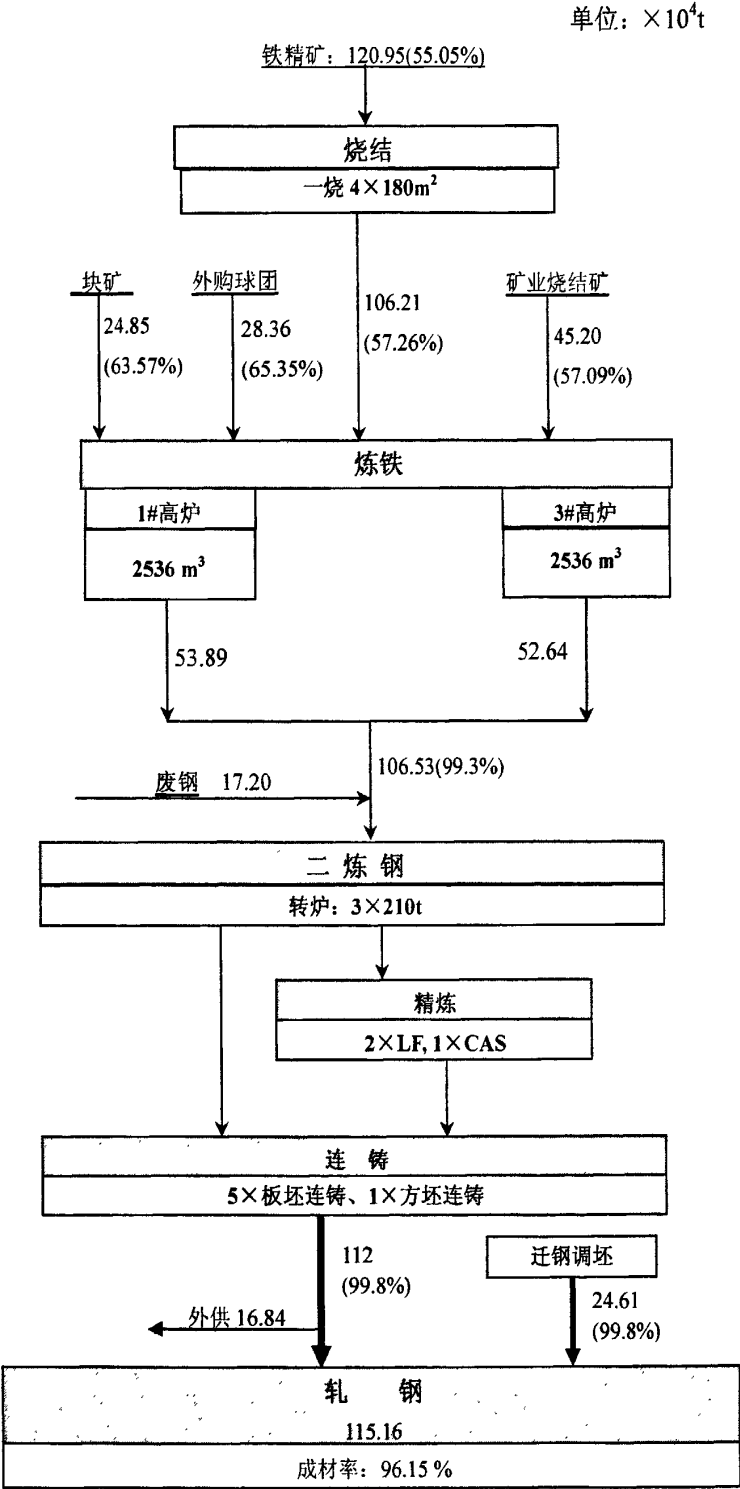


图 4.2 首钢压产方案阶段二生产流程铁流图
Fig.4.2 Fe-flow chart of output reduction draft in phase 2

4.2.2.2 压产方案阶段二能耗的对比和分析

(1) 压产方案阶段二吨钢能耗的对比分析

本文对压产方案阶段二进行的吨钢能耗计算也是以 *e-p* 分析法为理论依据，分别计算了该阶段方案的吨钢综合能耗和吨钢可比能耗，并与首钢 2006 年同期水平及压产方案阶段一的结果进行了对比，对比数据见表 4.9。

表 4.9 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二的吨钢能耗对比表
Table 4.9 Comparison of energy intensity per ton of steel among phase 1 and 2 and the state in 2006

项目	首钢 2006 年同期	压产方案阶段一	压产方案阶段二
吨钢综合能耗/kgce·t ⁻¹ 钢	724.23	742.26	750.67
吨钢可比能耗/kgce·t ⁻¹ 钢	686.11	695.70	694.55

由表 4.9 中数据对比结果可知，压产方案阶段二的吨钢综合能耗比首钢 2006 年同期水平高出 26.44kgce/t 钢，比压产方案阶段一高 8.41kgce/t 钢，这主要有两方面原因造成：一方面是由于钢产量的进一步减小导致钢比系数进一步增大；另一方面是由于辅助工序能耗的增大，压产方案阶段二辅助工序能耗为 43.82kgce/t 钢，比前两者分别高出 18.0kgce/t 钢、9.56kgce/t 钢。但是压产方案阶段二的吨钢可比能耗却与压产方案阶段一相当，这主要是因为压产方案阶段二实施后焦炭已经不需外购，焦钢比相对减小。表 4.10、4.11 为本文计算出的首钢 2006 年同期水平与压产方案阶段一、阶段二的各工序能耗和钢比系数对比表。

表 4.10 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二的各工序能耗（单位：kgce/t 产品）
Table 4.10 Comparison of process energy intensity among phase 1 and 2 and the state in 2006

项目	焦化	烧结	炼铁	转炉炼钢	连铸	轧钢
2006 年同期	161.4	57.5	445.2	-0.85	11.6	85.1
压产方案阶段一	161.4	56.6	440.9	-0.20	11.6	85.1
压产方案阶段二	161.4	55.0	448.2	-0.87	11.6	85.1

表 4.11 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二的各工序钢比系数（单位：t 产品/t 钢）
Table 4.11 Comparison of process steel ratio among phase 1 and 2 and the state in 2006 (unit: t/t)

项目	焦钢比	矿钢比	铁钢比	转炉钢比	连铸比	轧钢比
2006 年同期	0.3510	0.9340	0.9492	1.000	1.000	0.9615
压产方案阶段一	0.4300	0.9415	0.9505	1.000	1.000	0.9615
压产方案阶段二	0.4046	0.9483	0.9511	1.000	1.000	0.9615

(2) 压产方案阶段二的能源消耗的对比、分析

由于压产方案阶段二比压产方案阶段一生产规模减小，因此压产方案阶段二生产需要的自产能源及外购能源量进一步降低，与 2006 年同期水平相比降低量更大，且供需平衡。表 4.12 为本文计算的首钢 2006 年同期自产能源产生量和首钢压产方案阶段一、阶段二的首钢自产能源需要量对比表，表 4.13 为本文计算的首钢 2006 年同期外购能源需要量和压产方案阶段一、阶段二的外购能源需要量对比表。

表 4.12 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二的自产能源（动力）供需对比表
Table 4.12 Home energy (power) statistic for output-cut draft phase 1 and 2 and the state in 2006

项目	电力	鼓风	蒸汽	压缩空气	工业水	氧气	氮气	氩气	焦炭
	/万 kWh	/万 m ³	/GJ	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 t
2006 年 产生量	37719.8	255620.9	1697480.8	23687.3	12234.5	14391.0	18500.8	134.7	45.3
压产方案 阶段一需要量	30225.2	188968.8	1526848.7	18891.7	10532.5	10915.6	14494.6	100.5	45.3
压产方案 阶段二需要量	25248.6	150936.3	1418956.2	15228.4	9682.3	8757.0	11553.7	79.6	45.3

表 4.13 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二的外购能源统计表
Table 4.6 Puchased energy statistic for output-cut draft in phase 1 and 2 and the state in 2006

项目	电力	洗精煤	无烟煤	动力煤	劣质煤	柴油	汽油	混油	焦丁	焦炭
	/万 kWh	/万 t	/万 t	/万 t	/t	/t	/t	/t	/t	/万 t
2006 年 需要量	66382.1	58.6	27.4	14.7	19613.6	84.7	7.22	16553.8	97426.2	25.4
压产方案 阶段一需要量	52948.2	58.6	19.4	12.7	17108.1	61.6	5.25	12032.9	74579.2	5.5
压产方案 阶段二需要量	44150.5	58.6	13.9	11.4	15480.9	46.1	3.92	8998.9	62656.1	-6.2

随着钢产量的进一步降低，压产方案阶段二的自产能源消耗也相应降低，由表 4.12 知，除了焦炭消耗保持不变外，其余自产能源及动力消耗都低于压产方案阶段一，更低于 2006 年同期水平；同样，外购能源量也相对降低，其中外购焦炭为-6.2 万 t，意味着自产焦炭已有富余，无需外购，这也是压产方案阶段二吨钢可比能耗下降的主要原因。

4.2.2.3 压产方案阶段二煤气平衡的对比和分析

在压产方案阶段二的调整中，焦化厂依然保留全部设备，因此焦炉煤气的发生量为 18824.7 万 m³，与 2006 年同期水平一样。但是，由于炼铁系统再停产一座高炉（2#高炉），使得高炉煤气出现 14.68%的缺口，同时因三炼钢停产全部，致使转炉煤气缺口增

大。在这种情况下,只能通过焦炉煤气来替代高炉煤气和转炉煤气实现燃料的供需平衡,根据热量平衡计算(煤气热值见 4.1.2.3),只需用焦炉煤气富余量的 39%就能够满足生产需求,在此基础上焦炉煤气还富余 4740.4 万 m³, 占总富余量的 60%, 这部分焦炉煤气可以作为回收能源备用,也可以外销增加经济效益。

表 4.14 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二的煤气指标对比表
Table 4.14 Comparison of gas index among phase 1 and 2 and the state in 2006

项目	分类	高炉煤气	焦炉煤气	转炉煤气
发生量/万 m ³	2006 年同期	261404.6	18824.7	19595.1
	压产方案阶段一	184735.9	18824.7	14546.4
	压产方案阶段二	136197.2	18824.7	11105.9
使用量/万 m ³	2006 年同期	225812.9	18410.6	19096.1
	压产方案阶段一	184015.4	13997.2	15590.0
	压产方案阶段二	156185.5	11100.1	13237.1
富余率/%	2006 年同期	13.62	2.20	2.55
	压产方案阶段一	0.39	25.64	-7.17
	压产方案阶段二	-14.68	41.03	-19.19

4.2.3 小结与建议

根据首钢 2008 压产方案阶段二的生产结构调整,在首钢 2006 年的生产数据库的基础上,本文计算出压产方案阶段二的一系列生产技术指标和能耗指标,依据以上计算指标分析了该方案的动力平衡和煤气平衡等问题,分别与压产方案阶段一、2006 年同期水平进行了对比,找出主要指标变化的原因,进而得出以下结论和建议:

(1) 结论

- ①压产调整后,相对于 2006 年同期水平,钢产量降低了 45%,产量进一步降低至 112 万吨,铁钢比较第一阶段压产方案稍有升高达到 0.9511;
- ②吨钢综合能耗和吨钢可比能耗均高于 2006 年同期水平,除了受到钢比系数的影响外,吨钢综合能耗的大幅上升还与辅助工序能耗的增大直接相关,阶段二的辅助工序能耗比阶段一增加了约 10kgce/t 钢,吨钢可比能耗因只受到钢比系数的影响而与压产方案阶段一的结果相当;
- ③随着钢产量的进一步降低,相对于压产方案阶段一,焦钢比稍有下降(首钢计算焦钢比时,计入了外购焦炭量),这是吨钢可比能耗有减无增的主要原因;
- ④随着钢产量的降低,自产与外购能源量均相对减少,并且自产能源与动力能够满足供需平衡,其中焦炭无需外购并有回收,这是焦钢比下降的主要原因;

⑤相对于压产方案阶段一，高炉煤气出现不足，转炉煤气缺口加大，焦炉煤气富余量增加了 60%，焦炉煤气替代高炉煤气、转炉煤气后，仍有 4740.4 万 m^3 富余，无需外购天然气。

(2) 建议

①首钢目前的废钢比停留在 13.9%的水平，尚有提高余地，废钢比增大必然引起铁钢比的降低，吨钢能耗也随之降低。

②焦炉煤气富余量很大，而高炉煤气和转炉煤气出现亏欠，可以考虑重新分配煤气实现煤气的合理利用，以充分利用高热值煤气为原则，达到节能降耗的目的，同时获得较高的生产效率。实际生产中可考虑在焦化厂、炼铁厂及轧钢厂加大焦炉煤气的使用量，进而实现全公司的煤气平衡。

4.3 压产方案阶段三

为最大限度减少奥运会期间污染物排放，届时首钢将采取非常措施，奥运期正是首钢压产方案阶段三的落实期，压产方案阶段三将是首钢在奥运时期实施的非常方案——炼铁单炉生产方案，运行一个季度，这是首钢历史上首次长时间实施单炉生产，也是非常艰难的生产阶段。

4.3.1 压产方案阶段三内容

首钢第三阶段压产调整将于 2008 年二季度末实施，运行一个季度，即 2008 年第三季度，也是奥运会举行时期，具体调整内容如下：

(1) 炼铁系统：在 4#高炉、2#高炉已停的基础上，二季度末停 3#高炉，1#高炉单炉生产，在二烧停产的基础上停一烧车间 1#、2#烧结机，8 台烧结机保留 2 台生产。

(2) 动力系统：根据主系统压产方案，结合生产实际，首钢制定了与主系统相应的动力系统停产配套方案，内容如下：

①高炉鼓风系统：3#风机给 1#高炉供风，1#风机停机备用，4#风机动态备用。

②水系统：停与 3#高炉相关的水泵、热力设备。

③热力系统：停与 3#高炉相关的热力设备。

④制氧设备：综合北京地区制氧机的状况，制氧运行三万五机组，液氧、液氮高位保持在 10 米以上。

⑤电力系统：停运十四总降一台 4 万千伏安变压器，暂停三炉压差发电机组。

经过生产结构调整，在第三阶段首钢主流程仅有 2 座 90m² 烧结机、4 座焦炉、1 座 2536m³ 高炉、2 座 210t 转炉和轧钢系统投产运行，其中突出特点是炼铁单炉运行，产量由几百万吨降低到几十万吨，对首钢来说无疑是一次严峻考验。

4.3.2 压产方案阶段三的对比较分析

4.3.2.1 压产方案阶段三铁流的对比较分析

根据压产方案阶段三的压产调整，按 2006 年同期生产设备的生产能力和单耗，本文计算出压产方案阶段三生产流程中各工序产品产量，并与 2006 年同期水平、压产方案阶段一、阶段二的结果进行对比，结果见表 4.15。

表 4.15 2006 年、压产方案阶段一、阶段二、阶段三各工序产品产量对比表（单位：万 t）
Table 4.15 Process product yield comparison among phase 1, 2, 3 and the state in 2006 (unit: 10⁴ ton)

项目	焦化	烧结	炼铁	炼钢	外调坯	热轧
2006 年同期	45.31	190.20	193.29	203.64	45.27	211.85
压产方案阶段一	45.31	139.34	140.68	148.00	32.91	153.99
压产方案阶段二	45.31	106.21	106.53	112.00	24.61	115.16
压产方案阶段三	45.31	54.43	56.11	59.00	12.36	57.82

为保证北京奥运期间的环境质量，尽可能地降低污染物排放，首钢在奥运期仅保留 1#高炉运行，奥运期铁水产量仅为 56.11 万 t，不足 2006 年同期铁水产量的 30%，粗钢产量只有 59 万 t，也不到 2006 年同期粗钢产量的 30%。如果说第一阶段压产具有过渡性，第二阶段压产具有目的性，那么第三阶段压产就具有特殊性。

按照铁素平衡原理，根据压产方案阶段三的生产结构调整及压产后的含铁产品产量，计算并绘出压产方案阶段三的铁流图，见图 4.3。

单位: $\times 10^4\text{t}$

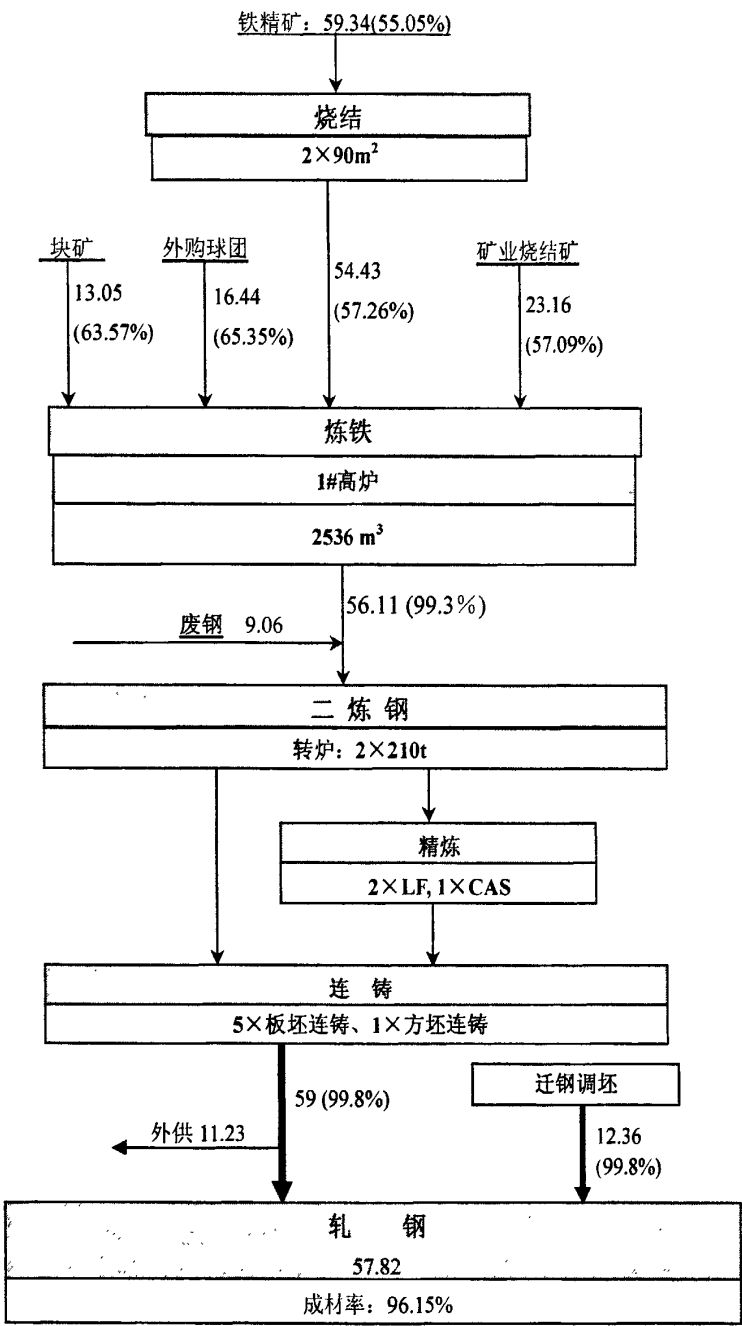


图 4.3 首钢压产方案阶段三生产流程铁流图

Fig. 4.3 Fe-flow chart of output reduction draft in phase 3

4.3.2.2 压产方案阶段三能耗的对比和分析

(1) 压产方案阶段三的吨钢能耗的对比和分析

本文根据吨钢能耗理论计算出压产方案阶段三的吨钢综合能耗及吨钢可比能耗，并与 2006 年同期水平、压产方案阶段一、阶段二的结果进行对比，结果见表 4.16，其中吨钢综合能耗的大幅升高是由辅助工序能耗和钢比系数两方面原因造成的，吨钢可比能耗的上升仅是钢比系数，即间接能耗的变化带来的。

表 4.16 四种生产模式下的吨钢能耗对比表

Table 4.16 Comparison of energy intensity per ton of steel among phase 1, 2, 3 and the state in 2006

项目	2006 年同期	压产方案阶段一	压产方案阶段二	压产方案阶段三
吨钢综合能耗/kgce·t ⁻¹ 钢	724.23	742.26	750.67	845.44
吨钢可比能耗/kgce·t ⁻¹ 钢	686.11	695.70	694.55	750.76

根据表 4.16 中数据，作出四个生产流程的吨钢能耗对比图，见图 4.4，同时，为体现钢产量的变化与吨钢能耗变化的关系，对四个生产模式的钢产量也作了对比，见图 4.5。

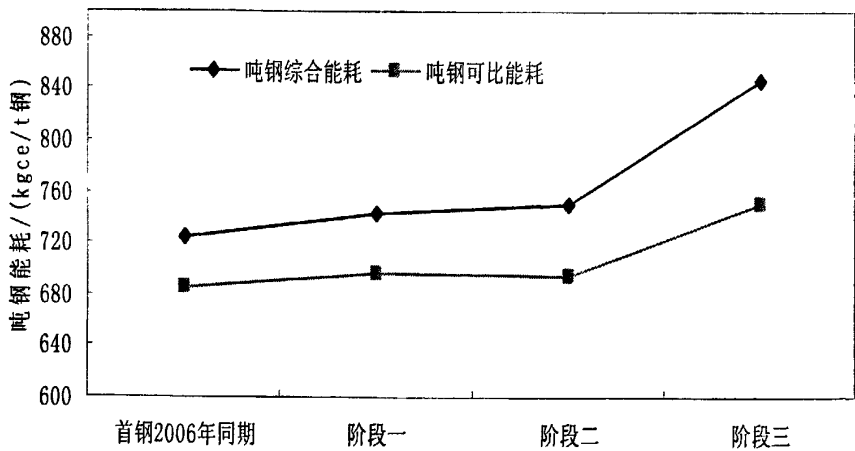


图 4.4 四种生产模式下的吨钢能耗对比图

Fig. 4.4 Energy intensity per ton of steel in four producing models

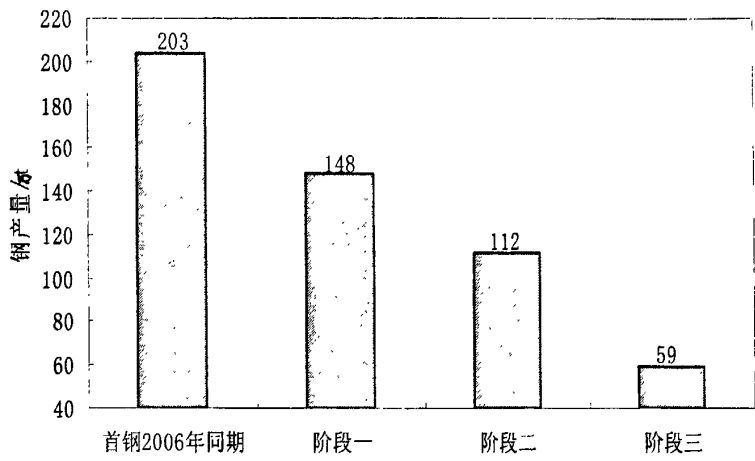


图 4.5 四种生产模式下的钢产量对比图
Fig. 4.5 Steel output in four producing models

通过对比可见，压产方案阶段三的钢产量最低，而吨钢综合能耗和吨钢可比能耗都达到了最大，并且从第二阶段到第三阶段出现了吨钢能耗的大幅升高，因此任何生产结构的调整都应考虑到能耗的变化，钢铁生产流程中，铁流与能流密切相关。

压产方案阶段三的吨钢能耗升高主要原因是奥运期钢产量不得不大幅降低引起的，其中由于钢产量的降低幅度远大于动力合计的能源消耗降低程度，导致动力合计能耗上升至 82.38kgce/t 钢，这是造成吨钢综合能耗升高的主要原因之一，而钢产量降低引起的钢比系数的升高是导致吨钢能耗上升的另一主要原因。表 4.17 为压产方案阶段三各工序钢比系数与阶段一、阶段二及 2006 年同期水平的对比表。

表 4.17 四种生产模式下的各工序钢比系数对比表（单位：t 产品/t 钢）

Table 4.17 Comparison of process steel ratio among phase 1, 2, 3 and the state in 2006 (unit: t/t)						
项目	焦钢比	矿钢比	铁钢比	转炉钢比	连铸比	轧钢比
2006 年同期	0.3510	0.9340	0.9492	1.000	1.000	0.9615
压产方案阶段一	0.4300	0.9415	0.9505	1.000	1.000	0.9615
压产方案阶段二	0.4046	0.9483	0.9511	1.000	1.000	0.9615
压产方案阶段三	0.7680	0.9225	0.9511	1.000	1.000	0.9615

由于焦化厂保留全部的生产设备，焦炭产量不变，而钢产量又大幅降低，不足原先的 30%，根据钢比系数的定义得出焦钢比为 0.7680，远远大于前三种生产流程的焦钢比，这样就造成了吨钢可比能耗的大幅上升。

(2) 压产方案阶段三的能源消耗

与压产方案阶段一和阶段二的结论相同，随着钢产量的继续降低，生产流程中所需求的自产能源与外购能源量也进一步降低，并且能源供需保持平衡。需要强调指出，自产焦炭量并没有随着钢产量的降低而减小，这样就使焦炭更多地富余，无需外购焦炭，虽然回收的焦炭可以降低一部分能耗，但是焦钢比对吨钢可比能耗的影响超过了前者，最终结果使吨钢可比能耗上升。

表 4.18 为本文计算的首钢 2006 年同期自产能源产生量和首钢 2008 压产压产方案阶段一、阶段二、阶段三的首钢自产能源需要量统计表，表 4.19 所示为本文计算的首钢 2006 年同期外购能源需要量和压产方案阶段一、阶段二、阶段三的外购能源需要量统计表。

表 4.18 四种生产模式下的自产能源（动力）统计表

Table 4.18 Home energy (power) statistic for the four producing models

项目	电力	鼓风	蒸汽	压缩 空气	工业水	氧气	氮气	氩气	焦炭
	/万 kWh	/万 m ³	/GJ	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 m ³	/万 t
2006 年 产生量	37719.8	255620.9	1697480.8	23687.3	12234.5	14391.0	18500.8	134.7	45.3
压产方案阶段 一需要量	30225.2	188968.8	1526848.7	18891.7	10532.5	10915.6	14494.6	100.5	45.3
压产方案阶段 二需要量	25248.6	150936.3	1418956.2	15228.4	9682.3	8757.0	11553.7	79.6	45.3
压产方案阶段 三需要量	17792.8	95266.2	1258967	9780.5	5417.9	4955.8	7567.6	50.1	45.3

表 4.19 四种生产模式下的外购能源统计表

Table 4.19 Purchased energy statistic for the four producing models

项目	电力	洗精 煤	无烟 煤	动力 煤	劣质煤	柴 油	汽 油	混油	焦丁	焦炭
	/万 kWh	/万 t	/万 t	/万 t	/t	/t	/t	/t	/t	/万 t
2006 年 需要量	66382.1	58.6	27.4	14.7	19613.6	84.7	7.22	16553.8	97426.2	25.4
压产方案阶段 一需要量	52948.2	58.6	19.4	12.7	17108.1	61.6	5.25	12032.9	74579.2	5.5
压产方案阶段 二需要量	44150.5	58.6	13.9	11.4	15480.9	46.1	3.92	8998.9	62656.1	-6.2
压产方案阶段 三需要量	31121.8	58.6	7.6	9.6	13439.5	23.1	1.96	4517.7	32252.3	-25.1

4.3.2.3 压产方案阶段三煤气平衡的对比分析

同前两阶段的压产调整一样，在压产方案阶段三的调整中，焦化厂依然保留全部设备，因此焦炉煤气的发生量也依旧为 18824.7 万 m³，与压产方案阶段一、阶段二及 2006 年同期水平一样。但是，由于炼铁系统在停产 2#高炉的基础上又停产 4#高炉，使得高炉煤气发生量大幅降低，出现 79.43%的缺口，不足量远远多于压产方案阶段二，同时因三炼钢全部停产后，二炼钢也停运一座转炉，致使转炉煤气缺口加大，达到了 66.85%，在这种情况下，只能通过焦炉煤气来替代高炉煤气和转炉煤气实现燃料的供需平衡，因焦炉煤气的使用量进一步减小，富余煤气量相对压产方案阶段二更多，达到 63.56%，根据热量平衡计算（煤气热值见 4.1.2.3），焦炉煤气富余量能够满足生产对热量的需求，并且焦炉煤气还能富余 126.7 万 m³，这部分焦炉煤气可以作为回收能源备用，也可以外销增加经济效益。表 4.20 所示为本文计算的压产方案阶段三的煤气指标，并与压产方案阶段一、阶段二及 2006 年同期同期水平进行了对比。

表 4.20 首钢 2006 年同期、压产方案阶段一、阶段二、阶段三的煤气指标对比表

Table 4.20 Comparison of gas index among phase 1, 2, 3 and the state in 2006				
项目	分类	高炉煤气	焦炉煤气	转炉煤气
发生量/万 m ³	2006 年同期	261404.6	18824.7	19595.1
	压产方案阶段一	184735.9	18824.7	14546.4
	压产方案阶段二	136197.2	18824.7	11105.9
	压产方案阶段三	66855.3	18824.7	5850.4
使用量/万 m ³	2006 年同期	225812.9	18410.6	19096.1
	压产方案阶段一	184015.4	13997.2	15590.0
	压产方案阶段二	156185.5	11100.1	13237.1
	压产方案阶段三	119960.2	6859.5	9761.7
富余率/%	2006 年同期	13.62	2.20	2.55
	压产方案阶段一	0.39	25.64	-7.17
	压产方案阶段二	-14.68	41.03	-19.19
	压产方案阶段三	-79.43	63.56	-66.85

4.3.3 小结与建议

根据首钢 2008 压产方案阶段三的生产结构调整, 根据首钢 2006 年的基础数据库, 本文计算得出压产方案阶段三的一系列生产技术指标和能耗指标, 并分析了其动力平衡和煤气平衡问题, 分别与压产方案阶段一、阶段二、2006 年同期水平进行了对比, 分析了主要指标变化的原因, 并得出以下结论和建议:

(1) 结论

①第三阶段压产调整后, 相对于 2006 年同期水平, 钢产量降低了 71%, 并达到历史最低, 铁钢比较第一阶段方案稍有升高, 与第二阶段相同为 0.9511;

②吨钢综合能耗和吨钢可比能耗均高于压产方案阶段一、阶段二及 2006 年同期水平, 吨钢可比能耗的上升与钢比系数直接相关, 吨钢综合能耗的大幅上升除与钢比系数相关外, 还与辅助工序吨钢能耗的增大直接相关;

③随着钢产量的进一步降低, 相对于压产方案阶段一、阶段二, 焦钢比大幅上升达到 0.7680, 这是吨钢可比能耗增高的主要原因;

④随着钢产量的降低, 自产与外购能源量均相对减少, 并且自产能源与动力能够满足供需平衡, 其中焦炭无需外购并且相对于压产方案阶段二, 焦炭富余量增大;

⑤相对于压产方案阶段二, 高炉煤气严重不足, 转炉煤气缺口加大, 焦炉煤气富余量增加, 焦炉煤气替代高炉煤气、转炉煤气后, 仍有 126.7 万 m^3 富余, 可以满足生产对燃气的需求, 无需外购天然气。

(2) 建议

①首钢目前的废钢比停留在 13.9% 的水平, 尚有提高余地, 废钢比增大必然引起铁钢比的降低, 吨钢能耗也随之降低。

②根据生产实际, 可考虑转炉是否能提高生产效率, 如可能则此阶段可实现转炉单炉生产。

③焦炉煤气富余量很大, 而高炉煤气和转炉煤气出现亏欠, 可以考虑在焦化厂、炼铁厂、轧钢厂、发电厂加大利用焦炉煤气, 以充分利用高热值煤气为原则, 达到节能降耗的目的, 同时获得较高的生产效率。

第5章 结论

1. 系统节能理论是分析钢铁生产过程中能源消耗的重要手段，不仅可以预测能耗，也可以针对具体的问题提出相应的节能对策，为钢铁行业节能降耗提供了有力的理论依据。系统节能方法包括分析法和模型法，本文综合利用了这两种方法的特点，采用了 $e-p$ 分析法和投入产出模型建立了首钢的吨钢能耗模型和投入产出模型，其中，多级投入产出模型的建立为钢铁企业研究和分析能流、物流提供了一个便捷、直观、实用的平台。
2. 由于多级投入产出模型规模较大，并涉及到大量的矩阵运算，本文采用 MATLAB 软件实现了模型的程序化和矩阵的快速运算，并建立 MATLAB 软件与 Excel 之间的接口，实现了数据输出，使得用户可以在常用软件 Excel 表中观察计算结果，并可以在某一数据更改时，快速计算出新的结果。
3. 首钢减产刻不容缓，但是由当前 800 万吨的产能锐减一半，对首钢而言史无前例、任务艰巨，为保证生产的顺利过渡，首钢制定了一套阶段性减产方案，针对此减产方案，本文运用系统节能中的 $e-p$ 分析法和投入产出模型理论先对首钢现状进行了一系列的建模和程序化运算，得出与实际相符的结果后，对各阶段减产方案进行调试和计算。
4. 根据调试结果，总体上来看，随着钢产量的逐步降低，首钢各阶段减产方案的吨钢能耗也相对逐步增大，尤其是吨钢综合能耗的增加较为明显，主要原因是辅助工序吨钢能耗的逐步上升，而吨钢综合能耗和吨钢可比能耗均受到了钢比系数的影响；各阶段减产方案中，动力供需基本保持平衡，自产与外购的能源物资在总量上也随着钢产量的逐步降低而减小；高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气的富余量随着停产设备的增加而出现了不同程度的变化，随着部分高炉和转炉的相继关停，高炉煤气和转炉煤气均出现较大缺口尤其在第三阶段，分别达到了 79.43% 和 66.85%，但同时，焦炉煤气富余量也相对大幅上涨，第三阶段达到 63.56%，由于焦炉煤气在三种煤气中热值最高，因此根据热量换算，富余焦炉煤气的发热量可以补足因缺少其他两种煤气导致的热量不足。但是，这样就要求在生产过程中调整煤气的配比，保证生产安全顺利。

参考文献

1. 陆钟武. 冶金工业的能源利用[M], 北京: 冶金工业出版社, 1986.
2. 刘浏, 张柏汀等. 钢铁工业环境状况与对策[J], 中国冶金, 2002, (2): 26-30.
3. 罗冰生. 强化节能减排推进钢铁工业增长方式转变[J], 中国钢铁业, 2007, (6): 8-11.
4. 王泰昌, 迟京东. 我国钢铁工业节能降耗现状分析与措施建议[J], 冶金管理, 2007, (3): 37-43.
5. 王泰昌, 张媛媛等. 我国钢铁工业节能降耗现状分析下[J], 中国钢铁业, 2007, (4): 16-19.
6. 娄湖山. 国内外钢铁工业能耗现状和发展趋势及节能对策[J], 冶金能源, 2007, 26(2): 7-11.
7. 张宁虎, 焦叔斌. 我国钢铁企业的节能与竞争力分析[J], 市场分析预测, 2004, (4): 34-36.
8. 刘志平, 蒋汉华. 钢铁工业提高能效对环境的影响, 节能与环保[J], 2001, (3): 10-12.
9. 张夏, 郭占成. 我国钢铁工业能耗与大气污染物排放量[J], 钢铁, 2000, 35(1): 63-68.
10. “十一五”规划提出发展新战略[N], 参考消息, 17188 期, 2006 年 3 月 7 日.
11. 黄导. 中国钢铁工业节能分析[J], 中国能源, 2004, 26(5): 13-15.
12. 王维兴. 钢铁工业的节能潜力分析[J], 冶金能源, 2002, 21 (3): 5-23.
13. C.N.Grimaldi, P. Lunghi and F.M ariani. Energy saving strategies in an actual confectionery plant [J], INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH, 2000, (24):769-777.
14. Sakamoto Y, Tonooka Y, Yanagisawa Y. Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry[J], International Journal of Energy Conversion and Management, 1999, 40(11):1129-1140.
15. 陆钟武, 毛建素. 穿越“环境高山”——论经济增长过程中环境负荷的上升与下降[J], 中国工程科学, 2003, 5(12): 36-42.
16. 陆钟武. 工业生态学——特邀报告提纲[J], 工业炉, 2000, 22 (4): 1-4.
17. 陆钟武. 钢铁产品生命周期的铁流分析[J], 金属学报, 2002, 38(1): 58-68.
18. 吴建常. 贯彻落实国务院关于加强节能工作的决定, <http://www.chinaisa.org.cn/show>.
19. 李新创. 影响我国钢铁工业发展的十大因素[J], 发展战略与规划, 2003: 12-17.
20. 窦彬. 日韩钢铁行业节能政策及启示[J], 当代经济, 2007(8): 80-82.
21. 陆钟武, 蔡九菊. 系统节能基础[M], 科学出版社, 1993.
22. 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.
23. 张琦, 蔡九菊等. 钢铁工业系统节能方法与技术浅析[J], 节能, 2006, (1): 35-37.
24. 陆钟武, 谢安国, 周大刚. 我国钢铁工业节能方向的研究[J], 冶金能源, 1994, 13(6): 3-9.
25. 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.

26. <http://baike.baidu.com/view/150070.htm>
27. 蔡九菊 王建军等. 钢铁企业物流能流分析及对能耗的影响[J], 中国废钢铁, 2005, (5): 1-9.
28. Michaelis Peter, Jackson Tim. Material and Energy Flow through the UK Iron and Steel Sector. Part 2: 1994-2019 [J], Conservation and Recycling, 2000, 29(3): 210-227.
29. Marko Starbek et al. The optimization of material flow in production [J], International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1299-1310.
30. Jan Peter Andersen Barry Hyman. Energy and material flow models for the US steel industry [J], Energy, 2001, 26: 137-159.
31. 陆钟武, 蔡九菊等. 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.
32. 戴铁军, 陆钟武. 钢铁生产流程的铁流对铁资源效率的影响[J], 金属学报, 2004, 40(11): 1127-1132.
33. 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M], 北京: 冶金工业出版社, 2004.
34. 殷瑞钰. 关于钢铁制造流程优化与产品优化问题的讨论[J], 轧钢, 2004, 21(5): 1-4.
35. 殷瑞钰. 关于钢铁工业的节能问题—钢厂制造过程中的能源消耗和余能利用[J], 冶金能源, 1997, 16(3): 3-17.
36. 蔡九菊, 杜涛. 钢铁企业投入产出模型及吨钢能耗和环境负荷分析[J], 黄金学报, 2001, 3(4): 306-312.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 魏建心. 钢铁企业能源指标浅析[J], 冶金能源, 2001, (5).
43. 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.
44. 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).
45. 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.
46. Karen R. Polenske et al. A Chinese cokemaking process-flow model for energy and environmental analyses [J], Energy Policy, 2002, 30: 865-883.
47. 师婕. 影响吨钢可比能耗的因素浅析[J], 内蒙古科技与经济, 2003, (1).
48. Edward B. Magrab 等著, 高会生等译. MATLAB 原理与工程应用[M], 电子工业出版社, 2002.
49. 王沫然. MATLAB 6.0 与科学计算[M], 电子工业出版社, 2001.
50. 王家文, 王皓, 刘海. MATLAB 7.0 编程基础[M], 机械工业出版社, 2005.

致谢

本文是在导师杜涛副教授的悉心指导下完成的。在这两年半的时间里，导师给予了极大的关心和指导，无论是选题，还是在课题的研究中，导师都很认真地提出意见和建议，给了我克服困难的动力。导师的敬业、负责和热情使我在生活和学习中都有了更多的体会，让我受益终身，师恩难忘，在此向恩师表达深深的谢意。

在本文的研究中，蔡九菊教授给予了很多指导，蔡老师不仅在课题上提出高要求，更对我们的人生提出了期望，特此感谢。

本文以首钢减产项目为背景，受到了项目组所有成员的帮助，尤其要感谢组长谢国威师兄的指导与建议。在课题的研究和日常学习中，本文还受到了吴复忠博士、张琦博士、王建军博士等几位师兄的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

在东北大学国家环境保护生态工业重点实验室度过的这两年半，是我人生中难忘的一段岁月，我在这里学到了更多知识，掌握了更多技能，获得了更多关爱，也体会到了更多人生的道理。在未来的道路上，一定会铭记这段时光，铭记所有曾给予我关心和帮助的人们！

最后，特别感谢我的爱人张建师同志对我的关心、帮助和支持，在我的论文工作中，他一直给予极大地鼓励，并在生活中给予无微不至的关怀，同时，还要感谢我的家人，正是他们一如既往的支持给了我莫大的动力和信心！

