

GANGTIE QIYE

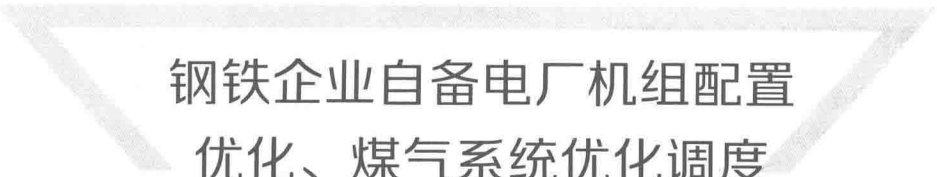
ZIBEI DIANCHANG JIZU PEIZHI YOUHUA
MEIQI XITONG YOUHUA DIAODU

钢铁企业 自备电厂机组配置优化、 煤气系统优化调度

孟华 著

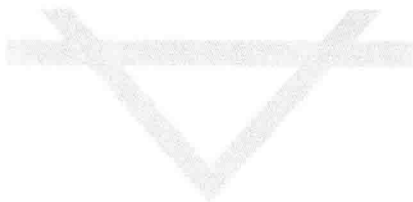


西南交通大学出版社



钢铁企业自备电厂机组配置 优化、煤气系统优化调度

孟 华 © 著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

钢铁企业自备电厂机组配置优化、煤气系统优化调度 /
孟华著. —成都: 西南交通大学出版社, 2019.1
ISBN 978-7-5643-6554-7

I. ①钢… II. ①孟… III. ①钢铁企业-发电厂-发电
机组-优化配置②钢铁企业-发电厂-煤气-调度-系
统优化 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 245791 号

钢铁企业自备电厂机组配置优化、
煤气系统优化调度

孟 华 著

责任编辑 李芳芳
特邀编辑 李 娟
封面设计 何东琳设计工作室

印张 8 字数 175千

成品尺寸 170 mm × 230 mm

版次 2019年1月第1版

印次 2019年1月第1次

印刷 四川森林印务有限责任公司

书号 ISBN 978-7-5643-6554-7

出版发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

定价 45.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

PREFACE

煤气是钢铁企业重要的二次能源，煤气发生量与消耗量之间的平衡程度对钢铁企业的生产成本和能源消耗影响极大。煤气系统不平衡源于两个方面：一方面是煤气系统的结构性不平衡，即静态不平衡；另一方面是煤气系统运行过程中的不平衡，即动态不平衡。实现煤气平衡的关键在于自备电厂的机组配置与动态调度。

我国钢铁企业一般是以高炉-转炉长流程为主，在任何时刻都要求煤气的发生量总是要大于需求量才能满足生产，所以煤气产耗是不平衡的，是动态富余的。由于煤气产生和消耗的连续性和不规律性，如果煤气系统缓冲用户没有充分发挥其作用，就会造成煤气的放散或不足。目前，我国钢铁企业煤气的平均放散率达到 5.76%，而世界先进国家煤气平均放散率只有 1%，差距十分明显，仅这一项差距就使得我国钢铁吨钢能耗增加 5%。由此看来，富余煤气系统如何在自备电厂合理发挥其缓冲作用对整个钢铁企业节能降耗至关重要。由于钢铁企业煤气系统产生、消耗工艺复杂，造成煤气富余量变化频繁，使得对自备电厂煤气系统的预测和动态优化调度研究比较困难。毋庸置疑，运用数学模型结合富余煤气的自身特性对自备电厂煤气系统进行预测及调度，对发展钢铁生产、降低能源消耗和产品成本是一种强有力的手段和途径，具有重大的理论意义和现实意义。

作者长期从事钢铁企业、自备电厂煤气系统预测、优化调度等课题的研究，并跟踪国内外的研究动态。本书是作者多年研究的总结，同时也吸收了国内外的最新研究成果。本书综合考虑煤气放散和机组运行效率下降对整个煤气系统价值的影响，建立自备电厂机组配置优化模型；考虑到依靠人工经验无法对其煤气供入量进行准确预测，针对煤气供入量特性，建立自备电厂煤气供入量预测模型；在预测模型的基础上，从煤气系统全局出发，以总运行成本最小为目标，考虑锅炉负荷波动频繁的特点，建立优化调度模型。为此，本书将所建模型应用于实际钢铁企业自备电厂，从系统和全局视角出发研讨钢铁企业自备电厂机组配置优化、煤气优化调度问题，丰富钢铁企业自备电厂煤气系统预测、优化、调度问题的研究方法，

以期对钢铁企业自备电厂煤气系统提供理论与方法上的指导。

全书共 5 章内容。第 1 章介绍了钢铁企业自备电厂煤气系统预测、优化、调度问题理论与方法兴起的背景和基本研究内容；第 2 章在剖析钢铁企业富余煤气特性的基础上，综合应用数学建模、系统分析和统计学的相关理论知识，分析解决了钢铁企业自备电厂机组优化配置的问题；第 3 章科学地对自备电厂煤气供入量进行预测，使调度人员实时把握煤气资源的波动情况，并提前制定调度方案进行事前调度，对实现钢铁企业煤气系统静态平衡和动态平衡具有重要的意义；第 4 章建立了钢铁企业自备电厂煤气系统优化调度模型；第 5 章将本书的主要研究工作与取得的研究结论运用到钢铁企业自备电厂的实际案例。

本书的撰写得到了重庆市基础与前沿计划项目（cstc2016jcyjA0341）、重庆市教委高校人文社会科学研究项目（规划项目）（16SKGH266）的资助。同时，本书还得到了大理大学王华校长和冶金节能减排教育部工程研究中心各位同仁的帮助和大力支持。也非常感谢重庆化工职业学院领导为本书做出的贡献。西南交通大学出版社对本书的出版给予了大力支持，在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，本书难免有疏漏之处，恳请专家和读者对本书从内容到形式提出宝贵的意见和建议，以便修改完善。

孟 华

2018 年 5 月

目 录

CONTENTS

1 绪 论	001
1.1 我国钢铁企业煤气资源及回收利用	001
1.2 钢铁企业富余煤气资源利用现状	006
1.3 钢铁企业自备电厂现状及存在的问题	010
1.4 研究内容与创新点	021
2 钢铁企业自备电厂机组优化配置研究	025
2.1 钢铁企业自备电厂煤气系统静态平衡分析	025
2.2 自备电厂富余煤气量的统计学特性	027
2.3 自备电厂机组配置优化模型	034
2.4 本章小结	047
3 钢铁企业自备电厂煤气供入量预测研究	048
3.1 自备电厂煤气供入量影响因素及模型选择	048
3.2 ARMA 时间序列预测建模	051
3.3 模型验证	058
3.4 本章小结	066
4 钢铁企业自备电厂煤气系统优化调度研究	068
4.1 自备电厂锅炉及燃料调节特点	068
4.2 自备电厂煤气系统优化调度模型	070
4.3 本章小结	082
5 模型应用	083
5.1 自备电厂机组配置优化模型在钢铁企业的应用	083
5.2 自备电厂煤气系统化优化调度模型在钢铁企业的应用	095
5.3 本章小结	116
参考文献	118



1 绪 论

1.1 我国钢铁企业煤气资源及回收利用

钢铁企业煤气资源是在生产钢铁产品时副产的气体燃料，占整个钢铁企业总能耗的 30% 左右，是钢铁企业中重要的二次能源。煤气系统是钢铁企业能源系统的主要组成部分，是一个不仅涉及煤气产生、储存、放散、使用和缓冲等诸多环节，而且还关系到多种工序产品产量和质量提高、原材料成本的降低、环境污染的改善等一系列问题的复杂庞大系统，如图 1.1 所示。通常，煤气柜能够削减由于煤气供需不平衡引起的瞬时波动，自备电厂锅炉作为主要缓冲用户调节吸收本厂的富余煤气，以提高钢铁企业供电的可靠性，降低用电成本，对节能、环保、提高全厂经济效益起到了良好的作用，所以自备电厂往往是钢铁企业的重要组成部分，也是钢铁企业重要的利润增长点^[1]。

1.1.1 煤气资源

钢铁企业副产煤气是在钢铁冶炼过程中产生的具有物理能量和化学能量的气体能源副产品，钢铁企业生产过程如图 1.2 所示。从图中可以看出，在整个生产过程中共产生焦炉煤气（COG）、高炉煤气（BFG）和转炉煤气（LDG）。三种煤气的组成如表 1.1 所示。

（1）焦炉煤气是由洗精煤在焦炉绝氧的状态下炭化或干馏产生的，是焦化过程中的副产品。其主要成分是 H_2 和 CH_4 ，发热值一般为 $17 \sim 19 \text{ MJ/Nm}^3$ ，在三种煤气中热值最高，吨焦平均产气 $400 \sim 450 \text{ m}^3$ 。其特点是生产相对稳定，各种参数波动小，毒性较小。因此，焦炉煤气回收利用最早，技术发展较完善，主要用户为转炉和其他工业炉窑，如轧钢加热炉、焦炉等，还可以作为民用煤气^[2]。

（2）高炉煤气是由铁矿石和焦炭在高炉中发生还原反应而产生的，属于高炉炼铁的副产品。其主要成分是 CO 、 N_2 ，毒性大，热值低，一般为

3.5 MJ/Nm³左右，吨铁平均产气 1 400 ~ 1 800 m³。其特点是产出波动大，燃烧温度较低且气源压力不稳定，在企业中有不同程度的放散。随着炼铁技术的不断提高，高炉燃料比逐步降低，随之热值也降低，这是限制高炉煤气使用的最主要原因^[3]，主要用户是高炉热风炉、焦炉、蒸汽锅炉，其与焦炉煤气混合后可用于轧钢加热炉。

(3) 转炉煤气是在纯氧顶吹转炉炼钢过程中 1 600 °C 以上高温排出的气体，属于转炉炼钢的副产品。其主要成分是 CO，热值一般为 8.4 ~ 9.2 MJ/Nm³，处于焦炉煤气和高炉煤气热值之间，吨钢回收 60 ~ 80 m³ 的转炉煤气。其特点是毒性大，气源具有间断性、周期性，回收技术要求较高，导致转炉煤气的回收和利用效果相对较差。转炉煤气由于成分和发热值波动较大，主要用户为石灰窑和电厂锅炉^[4]。

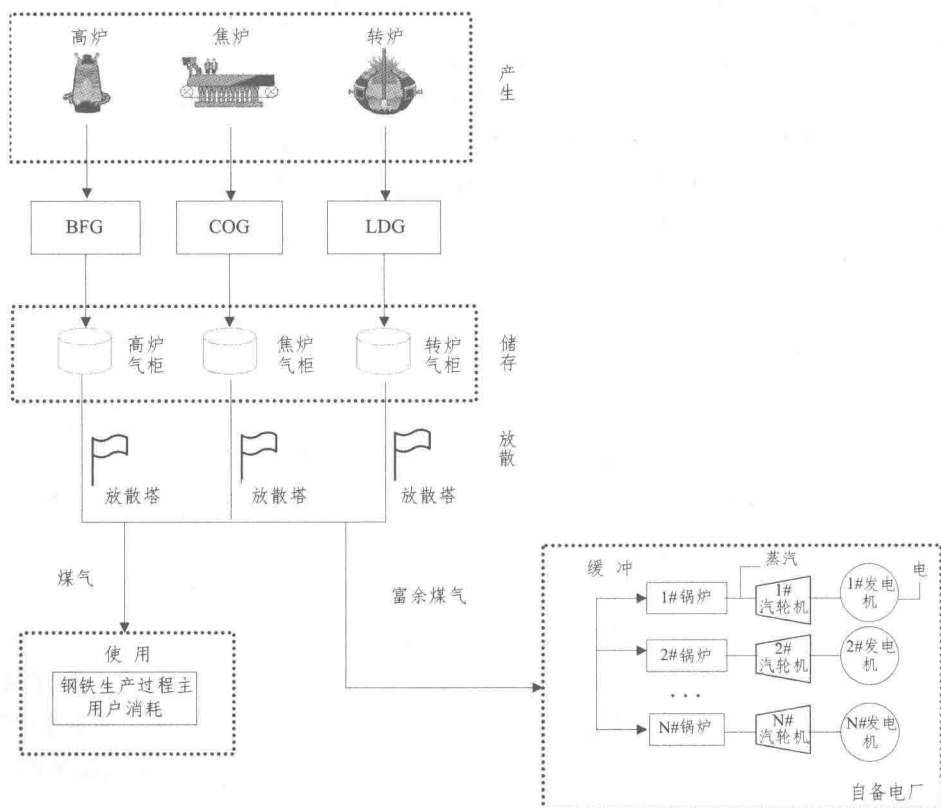


图 1.1 钢铁企业煤气系统示意图

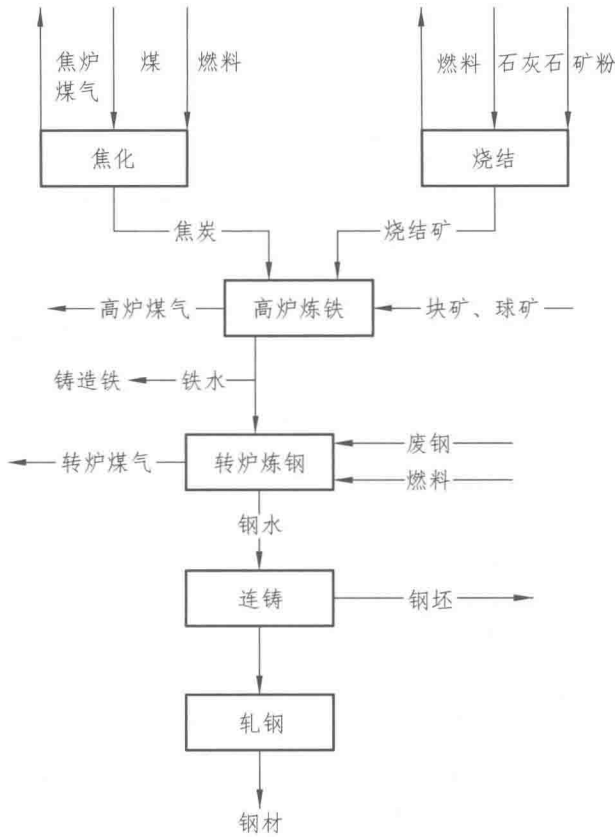


图 1.2 钢铁企业生产过程示意图

表 1.1 三种煤气的组成

煤气组成	焦炉煤气/%	高炉煤气/%	转炉煤气/%
H ₂	55 ~ 60	1.5 ~ 3.0	5 ~ 6
CO	5 ~ 8	25 ~ 30	80 ~ 86
CH ₄	23 ~ 27	0.2 ~ 0.5	0.7 ~ 1.6
C _n H _m	2-4	1	0.3
CO ₂	1.5 ~ 3	9 ~ 12	10
N ₂	3 ~ 7	55 ~ 60	3.5
O ₂	0.3 ~ 0.8	0.2 ~ 0.4	0.5

此外，钢铁企业为了提高煤气的使用效率，通常将三种热值不同的煤

气进行相互混合,从而得到混合煤气,主要用作轧钢等工艺的加热炉燃料。

1.1.2 煤气资源的回收利用

煤气的产生和有效利用程度是反映钢铁企业能源管理水平的“晴雨表”,其煤气产量的高低及煤气供需之间的平衡程度对钢铁企业能源系统的平衡和调节起着重要的作用,对企业的生产成本和能源消耗影响极大。2010 年有 21 家重点钢铁企业的高炉煤气利用率、14 家转炉煤气利用率、9 家焦炉煤气利用率均在下降。总体来讲,高炉煤气利用率为 96.24%,比上年有所提高;焦炉煤气利用率为 97.94%,比上年下降 0.17%;转炉煤气利用率为 88.84%,比上年提高 2.06%。由此看到,重点钢铁企业转炉煤气得到了充分的回收与利用,目前国内平均回收量为 $81 \text{ m}^3/\text{t}$,先进水平的转炉煤气回收大于 $100 \text{ m}^3/\text{t}$,尚有一些中小转炉煤气没有进行回收。2011 年 1 月,重点钢铁企业高炉煤气放散率为 3.90%,比 2010 年下降 0.41%;转炉煤气利用率为 88.84%,比上年提高 2.32%,吨钢回收煤气 $84 \text{ m}^3/\text{t}$;焦炉煤气放散率为 2.16%,比上年升高 0.68%。据统计,2012 年首季重点钢铁企业中,有 23 家高炉煤气回收率在下降,16 家转炉煤气回收率在下降,12 家焦炉煤气回收率在下降。总体而言,高炉煤气放散率为 3.86%,比上年下降 0.75%;转炉煤气回收量为 $89 \text{ m}^3/\text{t}$,比上年同期提高 $8.04 \text{ m}^3/\text{t}$;焦炉煤气放散率为 1.28%,比上年同期升高 0.75%^[5]。

从以上数据可看出,钢铁企业煤气系统的放散问题依然较为严重,这正是企业应该重视和迫切需要解决的问题,而造成问题出现的主要原因是煤气系统不平衡,富余煤气没有得到合理的用户消耗导致放散。因此,提倡取消钢铁企业中一切烧煤和烧油的炉窑,在企业内部以最大限度充分、合理地利用好煤气,使煤气得到高质量、高效利用;建立自备电厂,将富余煤气供给大机组发电,使热电效率和能源效率得到提高,实现钢铁企业和自备电厂的双赢^[6]。随着我国节能技术的进步,归纳其回收与利用历程,主要经历了以下三个漫长曲折的阶段:

第一阶段:1957—1978 年。这一阶段初,我国钢铁企业煤气的回收、利用还未得到重视,直到 1978 年,我国钢铁工业才具备了一定的发展基础,开始逐步进入了有序的状态。在此期间,钢铁企业主要回收的是焦炉煤气,大部分作为高炉、焦炉等内部用户的燃料,其余部分放散,放散率高达 20% 以上;高炉煤气除了在高炉热风炉上使用以外,绝大部分放散;转炉煤气

基本不回收，钢铁企业所用燃料除了煤气以外以购重油为主。

第二阶段：1978—2000年。这一阶段，煤气资源的回收与利用工作逐渐完善起来。从1978年开始，我国开始重视节能工作，采用各种节能新技术，开展一系列相关系统的节能工作。焦炉煤气除了供给企业内部用户使用，还用于附近的生活区作为民用煤气和工业燃料。因此，在低热值煤气燃烧技术未开发之前，高炉煤气由于其自身特点，钢铁企业中均有不同程度的放散，其利用一直处于“食之无味，弃之可惜”的尴尬境地。进入20世纪80年代后，针对高炉煤气热值逐渐降低的问题，各企业按照生产工艺和热工设备对煤气热值的不同要求，开始使用高、焦或高、焦、转混合煤气，大大减少了高炉煤气的放散，使煤气的产、消平衡得到了调节。直到20世纪90年代，高温蓄热燃烧技术、高炉煤气发电技术的兴起，才使高炉煤气得到了普遍应用，大大减少了高炉煤气的放散，同时也将高热值的焦炉煤气置换出来，使焦炉煤气逐步开始富余，并用于钢铁企业附近的生活区民用煤气和工业燃料。随着炼钢平炉的淘汰，转炉逐渐成为炼钢的主要设备，转炉煤气的回收利用也逐步受到重视。我国回收转炉煤气虽有多年的历史，但回收量一直较低，与技术先进国家相比，差距甚大。1996年，我国钢铁企业平均转炉煤气的回收量只有 $47 \text{ m}^3/\text{t}^{[7]}$ ，而日本1995年吨钢转炉煤气回收量已经达到 $108 \text{ m}^3/\text{t}^{[8]}$ 。

第三阶段：2000年至今。2000年以来，钢产量的增加、现有技术的成熟和新技术的应用使钢铁企业煤气富余量逐渐增多，许多钢铁企业存在着大量的煤气放散问题，不仅严重污染了周边的环境，同时也造成了能源的巨大浪费。在日本、德国等发达国家，钢铁企业所产生的煤气基本上被全部回收并再利用，而我国钢铁工业吨钢能耗和各重点工序的工序能耗均高于这些国家^[9]。近年来，统计我国不同规模钢铁联合企业高炉-转炉流程煤气回收、利用及放散情况分别如表1.2、1.3所示^[10]（煤气消耗计算到热轧工序）。

表 1.2 我国不同规模钢铁企业煤气回收与利用情况

规模 (万吨/年)	代表性 产品	煤气产率 /(GJ/t 钢)	煤气燃烧 /(GJ/t 钢)	煤气 富余量/ (GJ/t 钢)	富余率/%
900~1 000	以板、卷材为主， 兼有棒线型材	9.08	5.22	3.86	42.5
600~800	棒线、型、管材 及板卷材	8.85	5.56	3.29	37.2

续表

规模 (万吨/年)	代表性 产品	煤气产率 /(GJ/t 钢)	煤气燃耗 /(GJ/t 钢)	煤气 富余量/ (GJ/t 钢)	富余率/%
300~500	棒线、型、管材 及板卷材	8.77	5.85	2.92	33.3
100~200	棒材、线材等	8.21	6.17	2.04	24.9

由表 1.2 可知,吨钢煤气富余量与钢铁联合企业的规模有关,规模越大,煤气的回收量越多,富余量也越多,例如年产 1 000 万吨的大型钢铁企业煤气富余率可达 42.5%,而年产 100 万~200 万吨的小型钢铁企业转炉煤气一般不回收或者回收很少,煤气富余率仅为 24.9%。

表 1.3 我国重点钢铁企业产煤气放散和利用情况

年度	2003	2004	2005	2006	2009	2010	2011	2012
高炉煤气 利用率/%	90.49	95.6	89.54	90.22	94.05	94.72	—	—
焦炉煤气 利用率/%	97.61	98.59	94.24	95.82	98.41	98.34	—	—
转炉煤气 回收率/ $m^3 \cdot t^{-1}$	41	42	54	56	75	81	84	89
高炉煤气 放散率/%	9.51	4.4	10.06	9.78	—	—	3.9	3.86
转炉煤气 放散率/%	2.39	3.41	5.76	4.18	—	—	—	—

1.2 钢铁企业富余煤气资源利用现状

富余煤气是指单位时间内(1h)钢铁企业煤气的产生量扣除主工序(包括焦化、烧结/球团、炼铁、炼钢、热轧、冷轧等)消耗量后的剩余部分。在实际生产中,由于煤气不易管理、储存,产生量和消耗量波动大,煤气系统富余量大且存在严重的放散现象,造成能源浪费和环境污染。因此,合理地利用富余煤气显得尤为重要。

1.2.1 富余煤气增加的原因

为了保证钢铁企业生产物质流的连续、快速运行,钢铁企业的能量流

总是过剩的。因此,钢铁企业煤气系统的回收量总是大于主生产工序的煤气需求量,从而造成煤气富余。同时,在钢铁企业生产过程中存在的非计划性停产、检修、事件等工况,以及季节性变化等非可控因素的出现也会引起煤气富余^[11]。

从企业自身内部来看,近几年我国钢产量逐年增加,从而使生产过程中使用的焦炭、生铁等产品增加,因此,焦化过程以及炼铁过程中能量流也不断变大,致使焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气的产量越来越多,即钢铁企业煤气产生量大幅增加。同时,钢铁企业为了提高自身的竞争力,越来越重视装备的提升改造以及生产工艺的优化改进,与传统的钢铁联合企业不同,生产设备逐步向大型化迈进,连铸技术等关键共性技术也已经普及应用,冗余生产工序大大减少,提高了能源利用率^[12-13]。尽管企业产品深加工比例的提高、热处理工序的增加,使煤气消耗量增加,但是企业采用各种先进燃烧节能技术来提高燃烧的热效率,降低系统本身消耗的煤气量,总体来讲,煤气的总消耗量是下降的,富余量又将增加。

从外部环境看,随着人们环保意识的不断加强、环境保护法律法规的不断健全,迫使钢铁企业必须采取相应的措施以减少企业煤气的放散。并且作为耗能大户,钢铁企业在节能减排方面的压力也越来越大,因此,钢铁企业采取了各种措施对三种煤气进行回收利用。

综上所述,近年来我国钢铁企业富余煤气在内外两种环境的影响下呈明显上升趋势。

1.2.2 富余煤气的利用现状

近年来,我国钢铁企业煤气富余量大,如果不合理利用,煤气就会放散,造成资源严重浪费,对企业而言也是严重的损失。如何利用这些富余的煤气资源,并通过有效的措施使其发挥最大的作用,降低企业能耗并创造最大的经济效益、环境效益和社会效益,成为我们亟待解决的问题。目前,对于富余煤气的利用,主要有以下几个途径:①发电;②焦炉煤气直接还原铁;③作为城市燃气;④作为工业燃料;⑤焦炉煤气变压吸附制氢;⑥煤气合成甲醇以及生产其他化学产品等。其中,煤气用于发电是煤气回收利用最常用的方法。我国大、中型钢铁企业一般都建有自备电厂,作为钢铁企业煤气系统的主要缓冲用户调节吸收富余煤气,为企业提供蒸汽和电力,降低了用电成本,在节能、环保、提高经济效益上都起到了良

好的作用。目前，钢铁联合企业煤气发电的主要方式有：纯烧煤气锅炉-蒸汽轮机发电方式、掺烧煤气燃煤锅炉-蒸汽轮机发电方式和燃气轮机-蒸汽联合循环发电方式（CCPP）^[14]。有的企业单独采用其中的一种，有的由多种组成，不同的发电方式缓冲的煤气量不同，产生的效益也不同。

1. 纯烧煤气锅炉-蒸汽轮机发电方式

这种发电技术是将钢铁企业中产生的大量低发热值煤气全部用于发电的一项技术，此技术已在鞍钢、马钢、武钢、沙钢、梅钢、安钢等企业广泛使用。

其特点为：燃料均为煤气，投资维修成本低，操作与维护简单。生产过程中当煤气消耗量减小时，锅炉的出力会低于额定的蒸发量，从而使锅炉内传热发生变化，只有当锅炉负荷在额定蒸发量的 85%~100%，燃气锅炉热效率最佳；锅炉在低于 80% 的负荷下或短时超出 100% 的负荷下运行，锅炉效率都会急剧下降。在实际生产过程中，面对燃气锅炉作为煤气缓冲用户的缓冲能力有限、煤气富余量波动又非常大的现实情况，必然要求有相当负荷的燃气锅炉做缓冲用户。而对于锅炉操作而言，负荷频繁变化对燃气锅炉发电的效率影响极大，机组发电能力极低，所以这种利用方式必然是低效的，其热效率只有 25%~30%。其次，由于燃气锅炉容量有限，国内最大的燃气锅炉仅为 220 t/h，负荷调节有限，所以煤气消耗量调节范围不大，当煤气波动较大时，必然导致煤气的大量放散^[15-17]。

2. 掺烧煤气燃煤锅炉-蒸汽轮机发电方式

这种发电方式燃料以煤为主、煤气为辅，运行可靠，不受供热内部资源的影响，方式灵活，可适应能源的相互替代。其发电机组装机容量都比较大，煤气消耗量的调节范围为 0%~30%（有的设计值达 65%，如宝钢的 1#、2# 锅炉，但实际运行中基本在 30% 以下），发电效率为 35%~40%，是钢铁企业可靠的煤气缓冲用户，且掺烧煤气后对发电效率影响不大。以宝钢 3# 发电机组为例，当掺烧高炉煤气比例为 0%、20% 和 40% 时，发电效率为 39.3%、38.5%、37.4%。但是发电煤耗相对较高，成本较高^[18-20]。

3. 燃气轮机-蒸汽联合循环发电方式

燃气轮机-蒸汽联合循环发电（Combined Cycle Power Plant, CCPP）技术在西方已有 50 多年的历史，目前已成为一种成熟的动力系统并被全世界所接受。

CCPP不但有效利用了本厂的富余煤气,而且将钢铁企业自备电厂技术推进到一个崭新的阶段。虽然其投资成本及维修成本较高,但与常规锅炉发电相比,CCPP在不向外供热时热电转换效率达40%~45%,从而使发电成本大大降低,节能效果显著,作为热电转化效率高而用于钢铁企业的煤气发电方式。当采用热电联产,外供生产用蒸汽后热电转换效率可达58%左右,即在发电的同时外供蒸汽,实现了减排、发电、提供生产用蒸汽一举三得,为纯粹意义上的热电联产,其余机组均仅用于发电,这大大降低了能源的热电转换效率。1997年,宝钢引进一套150 MW的CCPP发电机组,采用高炉煤气作为燃料,开始了我国钢铁企业建设CCPP的先河,热电转换效率提高到45.52%。之后,通钢、济钢、马钢、鞍钢均建设了CCPP,其中鞍钢的CCPP机组装机容量达到了300 MW,以高炉煤气和焦炉煤气为燃料,年发电量20亿千瓦时,是目前世界上功率最大、最先进的CCPP发电机组。因此,随着燃气轮机技术的进一步提高,燃用低热值煤气的燃气-蒸汽联合循环发电技术已被公认为是充分利用钢铁联合企业煤气、提高二次能源利用效率的先进技术。根据煤气的不同发电方式,各类发电机组的发电效率如表1.4所示。可以看出,CCPP发电机组的效率最高,其他煤气发电方式随着发电机组装机容量的增大,煤气利用率显著提高^[21]。

表 1.4 不同煤气发电机组的发电煤耗与发电效率 (不考虑热电联产)

发电机容量 /MW	纯烧煤气方式		掺烧煤气燃煤方式		CCPP	
	发电 煤耗/ (kgce/kW·h)	发电 效率 /%	发电 煤耗/ (kgce/kW·h)	发电 效率 /%	发电 煤耗/ (kgce/kW·h)	发电 效率 /%
3	0.54	22.8	—	—	—	—
6	0.52	23.6	—	—	—	—
12	0.5	24.6	0.48	25.6	—	—
25	0.45	27.3	0.44	27.9	—	—
50	0.425	28.9	0.42	29.3	0.293	42
100	—	—	0.4	30.7	0.273	45
110	0.410	30	—	—	—	—
125	—	—	0.375	32.7	—	—
150	—	—	0.35	35.1	0.267	46
300	—	—	0.33	37.2	0.256	48
350	—	—	0.32	38.4	—	—

综上所述，在富余煤气发电方式的选择上，根据企业实际富余情况，优先使用煤气-电力转化效率高的装置，剩余部分再用热效率低的锅炉，最终实现煤气零放散。

1.3 钢铁企业自备电厂现状及存在的问题

钢铁企业作为用电大户，也受到了电力供应紧张的制约，企业在成本上竞争也越发激烈，如何节约用电、避峰填谷、降低成本、增加效益是企业必须面对的问题。因此，为了节约能源、降低能耗，减少对环境的污染，将富余煤气合理利用到自备电厂实现企业供电自给自足是一种必然趋势。

1.3.1 自备电厂的分类

从建设的情况看，自备电厂可以分为以下三种类型：

(1) 为满足本企业生产用电而建设的大型常规燃煤电厂，电厂发电基本上满足本企业生产所需，不足部分由电网供给，多余部分按照协议规定可输至电网，即“缺电网供，余电上网”。这种电厂的容量大小取决于企业所需要的电力，一般机组均大于 200 MW，当所需负荷在 300 MW 以上、年用电量在 15 亿千瓦时以上的企业才值得建设；如果机组容量小，能效较低，不符合国家能源政策则不允许建设。

(2) 利用本企业排放的废料或未能利用的副产品来发电，如选煤厂利用煤矸石发电、钢铁企业利用富余煤气发电、水泥厂利用窑炉余热发电、矿井利用瓦斯发电等。这些机组的容量是根据排放的废料及未能利用的副产品的多少来定，从目前情况来看，这些机组发出的电力主要供给本企业。有的可以完全被本企业用完，有的则用不完，所余电力通过上网外供电力系统，本书研究电厂属于此类。

与石油、电力和液化天然气等能源来源不同，煤气是在钢铁生产过程中连续产生的，没有附加费用，但不能被长时间保存。煤气产生之后，作为生产燃料或者锅炉燃料被消耗掉。由于煤气的产生和消耗机理复杂，加之工况变化、设备检修、时间等原因，煤气的产生和消耗就出现短暂的不平衡。当煤气供大于求的时候，为了保证管网压力不能过大，就要对一部分富余煤气进行放散；反之当煤气供小于求的时候，就要外购石油、煤粉等燃料，显然这两种情况都会造成能源系统生产成本的增加。为了平衡煤

气的波动,目前,很多钢铁企业通过煤气柜来缓解煤气供需不平衡问题,虽然煤气柜可以短时储存适量气体,但是由于其成本昂贵、容量有限,只能瞬时缓冲煤气波动,所以不能从根本上解决问题。而自备电厂作为钢铁企业煤气系统的主要缓冲用户,作用显得尤为重要,它可以将富余煤气作为锅炉燃料为企业提供热量,使水变为水蒸气进入涡轮机发电。

(3) 企业生产需要用热,基于所需的热量相应建设能供给足够热量的热电机组,这类机组容量一般为 50 MW 及以下,也有超过 50 MW 的,如 100 MW、125 MW、135 MW,这些机组在生产足够的热力后将会生产超过本企业所需的电力,为此必须将余电上网,向电力系统送出电力,这些机组如果是燃煤的,要求达到国家规定的热电比才行^[22]。

我国自进入 20 世纪 90 年代以来,电力供应一直处于紧张状态,近年来我国的电荒进一步加重。钢铁工业的耗电在其能源消耗中占很大比重,电价对生产成本影响很大,而企业建自备电厂成本较低,一般仅为市场价的 60%。钢铁企业自备电厂的规模不是以缺电量来确定,而往往以富余煤气量来确定。自备电厂的建立首先应根据钢铁企业富余煤气的性质来做机型选择,然后是确定合适的机组能力。钢铁企业不够的电力还要靠国家电网供应,这是自备电厂不同于国家独立电厂的建厂原则。从全国电力系统的结构调整看,国家并不鼓励建设独立的小电厂,但对节能与环保都有益的自备电厂还是积极支持的。针对电力价格上涨、钢铁企业自备电厂成本相对较低的情况,自备电厂利用钢铁企业生产过程的富余煤气,使之尽量不分散,这是一种合理利用资源,利于环境保护的思考,认为利用钢铁企业富余煤气发电是经济上较好、技术上可行的发电方式,并且煤气是钢铁企业的副产资源,属于废气,利用废气发电又受国家的保护和扶持,是针对目前国内电力资源紧缺有效可行的措施,也是钢铁企业煤气再资源化有效的途径之一,符合可持续发展的要求^[23]。

钢铁企业在生产冶炼过程中需消耗大量的蒸汽和电力,钢铁企业自备电厂是利用企业煤气系统中的富余煤气,自己发电自己用,对于自发有余的发电量还可以进入国家电网提供居民用电,一方面可以提高资源利用效率,节约能源,减少煤气放散;另一方面也为企业带来了很好的经济效益。钢铁企业早期由于规模较小,企业自备电厂很少,多数企业是由锅炉直接供热。近年来,随着钢铁企业生产规模的逐渐扩大,企业内部用电量大大增加,同时生产过程产生的富余煤气量增多,因此,大多数钢铁企业均已建设了自备电厂,既充分利用了二次能源,也为企业的电力生产提供了可