

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180156

钢铁流程煤基能量高效转换与钢-电联产模式

李洪福¹, 温燕明²

(1. 北京国金衡信认证有限公司, 北京 100081; 2. 济钢集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘 要: 针对钢铁制造流程能源结构特点,在解析流程中能量转换过程的基础上,提出了钢铁制造流程煤基能量系统的概念,并对煤基能量及煤基能量系统进行了界定。通过定量与定性分析,研究了煤基能量在钢铁制造流程中的转化与耗散规律。在系统效率分析的基础上,指出钢铁制造流程能量流的核心是煤的转换与二次能源的回收利用问题,当前实现煤气资源与余热资源的高效回收利用是提升钢铁制造流程系统能源效率的关键。在“冶金流程工程学”等理论的指引下,提出了实现钢铁制造流程煤基能量系统集成优化及高效运行的主要原则,并通过开展建模与实践研究,探索了以系统优化方法优化能量流网络、构建高效钢-电联产运行模式的可行性。

关键词: 钢铁制造流程; 煤基能量系统; 系统节能; 能量流网络; 钢-电联产

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)10-0095-08

Efficient conversion of coal-based energy in iron and steel process and steel-electric cogeneration mode

LI Hong-fu¹, WEN Yan-ming²

(1. Beijing Grand Honour Certification Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2. Jinan Iron and Steel Group Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: Based on the energy composition structure characteristics of the steel manufacturing process and the analysis of the energy conversion process, the concept of coal-based energy system for the steel manufacturing process was proposed, and the coal-based energy and coal-based energy system were defined in the current work. Through quantitative and qualitative analysis, the law of transformation and dissipation of coal-based energy in the steel manufacturing process was studied. Based on the analysis of the system energy flow efficiency, it was pointed out that the cores of energy flow in the steel manufacturing process were the conversion of coal and the recycling of the secondary energy, and the efficient utilization of gas resources and waste heat resources was the key to improve the energy system efficiency of the steel manufacturing process. Under the guidance of "metallurgical process engineering theory", the main principles for achieving the integrated optimization and the efficient operation of coal-based energy system in the steel manufacturing process were proposed. Through the modeling research and the practice study, the feasibility of the energy flow network optimization and the efficient steel-electric CO production mode construction was explored based on system optimization methods.

Key words: iron and steel manufacturing process; coal-based energy system; systematic energy saving; energy flow network; steel-electric cogeneration

新形势下,绿色化是中国钢铁工业转型发展的重要趋势,实现绿色化发展离不开节能减排^[1]。近年来,国内外不少学者通过开展碳素流、能量流及能量流网络的研究,拓展了钢铁制造流程节能减排的新思路和新方法^[2]。煤炭作为钢铁制造流程中消耗的最主要能源,使用、转换过程复杂,其过程效率直接决定了企业的能耗水平甚至成本效益水平,因此有必要对此进行专项的系统性研究。本文聚焦于钢铁制造流程煤基能量系统,初步研究了煤炭在钢铁制造流程中的转化与

耗散规律,并提出了以系统优化方法构建高效“钢-电联产”模式,以实现节能、减排、增效的综合目标。

1 钢铁制造流程煤基能量系统研究

1.1 钢铁企业能源结构

在中国典型长流程钢铁企业的能源结构中,煤炭占有绝对高的比例,一般占95%左右,是推动流程运行的主要动力;外购电力一般占5%左右,另有少量的燃油或天然气,见表1。

表 1 钢铁企业能源消耗结构

企业	煤/焦					汽柴油	天然气	电	合计
	洗精煤	喷吹煤	无烟煤	烟煤	外购焦				
A 企业(年产粗钢 1 600 万 t)	76.73	4.35	9.93	4.17	0	0.07	0	4.75	100
B 企业(年产粗钢 800 万 t)	75.16	0	7.89	6.58	4.98	0.09	0	5.30	100
C 企业(年产粗钢 300 万 t)	68.94	0	13.42	9.96	2.34	0.26	0.09	4.99	100

1.2 钢铁制造流程能量转换过程解析

煤炭在钢铁制造流程中的使用及转换过程比较复杂。煤炭主要以焦化工序炼焦煤、炼铁工序喷吹煤、烧结工序燃料煤的方式输入到钢铁制造流程中,在推动钢铁制造流程运行的同时,伴随着复杂的物理化学变化,煤炭中的有效成分转化为煤气、化工产品、物料含碳、烟气和热量等多种形式的产物,如图 1 所示,其使用、转化及二次能源回收再利用过程比较复杂,并且在相互之间、工序之间存在交叉复杂的关系,构成一个复杂的大型能量系统。

依据行业数据,作者经模型测算:每生产 1 t 钢,约需要输入炼焦洗精煤约 482 kg、烧结燃料煤约 25 kg、高炉喷吹煤约 138 kg。这些煤炭在“三传一反”装备组合的钢铁制造流程中,推动铁素流进行转换并完成钢铁产品制造功能的同时,也实现自身的转化,

发生一系列复杂的物理化学变化并释放出热量,其中碳素物质流的转化过程如图 2 所示。一方面,大

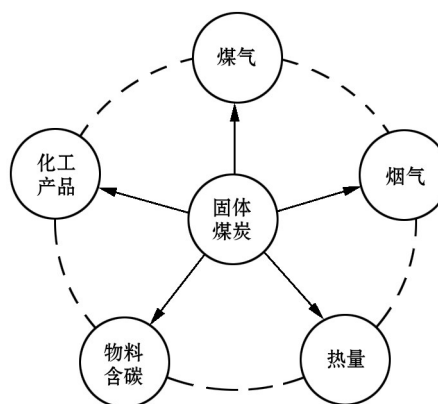


图 1 钢铁制造流程中煤炭及其多种形态的转化物

Fig. 1 Coal and its various forms of conversion in steel manufacturing process

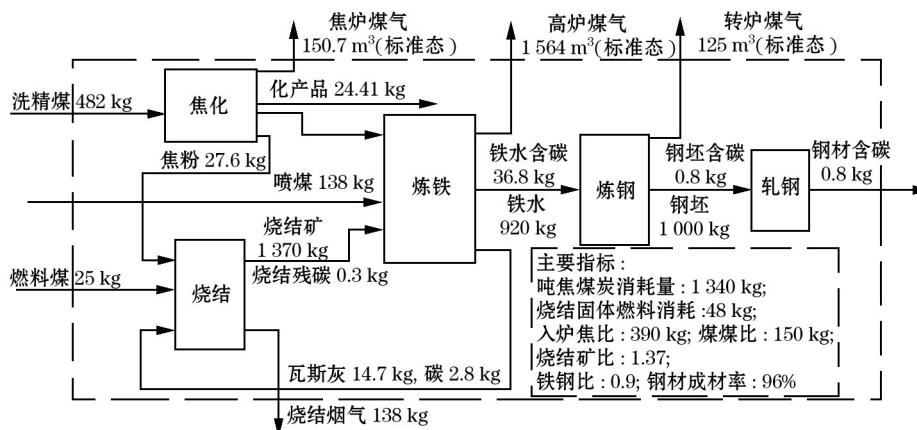


图 2 钢铁制造流程中碳素物质流的转化过程

Fig. 2 Carbon material flow in steel manufacturing process

量转化为焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气,这些伴生煤气的化学能约 8.71 GJ,约占输入煤炭总化学能的 46.9%;另一方面,释放出的热量主要以产品显热、渣的热量、废气显热、煤气显热、冷却水显热等为表现形式,产生的余热资源量约 9.75 GJ,约占输入煤炭总化学能的 52.5%^[3]。因部分余热是由煤气燃烧释放的化学能转化而来,因此吨钢产生的余热余能不应该是煤气化学能与余热余能的简单叠加,但至少可

以判断,钢铁制造流程中输入煤炭的化学能有超过一半的数量转化为由煤气和余热组成的余热余能。

1.3 煤基能量系统的界定

钢铁制造流程能量系统的核心是煤基能量系统。从行业发展趋势来看,传统的“高炉→转炉”长流程工艺模式在较长时期内将依然是中国钢铁生产工艺的主流,新能源、可再生能源也难以有效、大规模使用。因此,煤炭将依然是中国钢铁生产的主

要能源消耗,有必要对钢铁制造流程煤基能量系统进一步开展专项深入的系统性研究。

作者将钢铁制造流程中的煤基能量界定为:在钢铁制造流程中,煤基能量指输入到流程中的洗精煤、喷吹煤、燃料煤等以一次能源为表现形式的煤

炭资源,及由这些煤炭在流程中经过复杂的物理化学变化转化成的焦炭、煤气、蒸汽、余热等二次能源。在钢铁制造流程中,煤基能量流主要表现为碳素流和热量流。钢铁制造流程主要生产工序的煤基物质转换产物和热量转换产物见表2。

表2 钢铁制造流程主要生产工序煤基转换产物

Table 2 Coal-based conversion products in main production processes of steel manufacturing process

工序	煤基物质转换产物	煤基热量转换产物
焦化	焦炭、焦粉、化工产品、焦炉煤气、焦炉烟气	焦炭物理热、荒煤气物理热、化工产品物理热、焦炉烟气物理热、耗散热等
烧结	烧结矿残炭、烧结烟气	烧结矿物理热、烧结烟气物理热、耗散热等
炼铁	铁水含碳、瓦斯灰含碳、高炉煤气、热风炉烟气	铁水物理热、铁渣物理热、煤气物理热、热风炉烟气物理热、冷却水吸收热、耗散热等
炼钢	钢水含碳、转炉煤气、转炉烟气、烘烤烟气	钢水物理热、钢渣物理热、烟气物理热、冷却水吸收热、耗散热等
轧钢	钢材含碳、加热炉烟气	钢材物理热、汽化蒸汽热、加热炉烟气热、耗散热等

作者将钢铁制造流程煤基能量系统界定为:钢铁制造流程中以输入煤炭及其转换产物为源头的能量释放、传输、使用、回收、转换过程及与之相对应的各种能源载体(能源介质)、设备、工艺、技术等所组成的系统。

1.4 煤基能量在钢铁制造流程中的转换与耗散

热力学第二定律指出,能量转换过程总是朝着能量贬值的方向进行,能量传递过程总是自发地朝着能量品质下降的方向进行。煤基能量在钢铁制造流程中的转换过程反映了这一规律。

(1) 焓值衰减过程。输入钢铁制造流程的煤炭

主要为洗精煤,焓值约 26.344 MJ/kg,通过复杂的物理化学变化,洗精煤的能量主要转换为煤气和各种余热。高炉煤气、转炉煤、焦炉煤气等 3 种煤气的焓值衰减至原来的约 12.1%~63.3%,各种余热资源的焓值衰减至煤炭焓值的 5.6%以下^[3],如图 3 所示。

(2) 能级降低过程。输入钢铁制造流程的洗精煤的能级为 1.0,在各种能量转换产物中,3 种煤气的能级约为 0.95,其他余热资源的能级均降至 0.85 以下,其中大量余热水的能级降低至 0.05~0.06^[3],如图 4 所示。

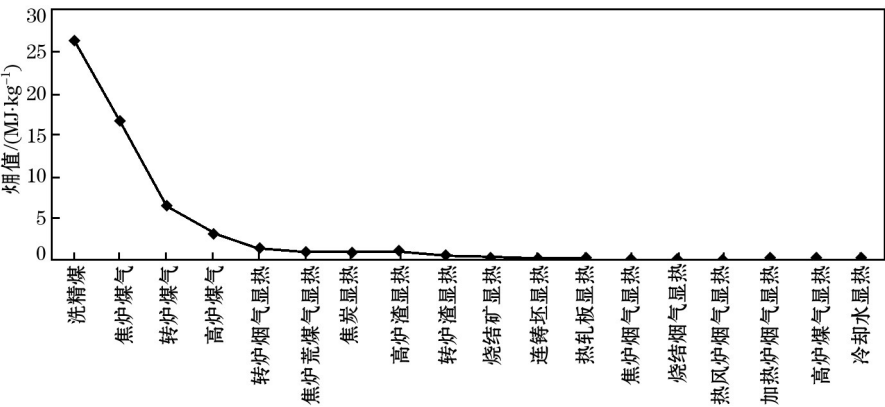


图3 钢铁制造流程中能量的焓值变化趋势

Fig. 3 Trend of exergy value of energy in steel manufacturing process

(3) 能量耗散过程。钢铁制造流程是一个典型的高温流程,输入的煤炭在钢铁制造流程中发生复杂的物理化学变化并放出煤气与热量,如图 5 所

示。释放出的大量煤气与热量若不进行回收,将向环境中扩散,最终达到与环境的平衡,并失去做功能力,完成耗散过程。

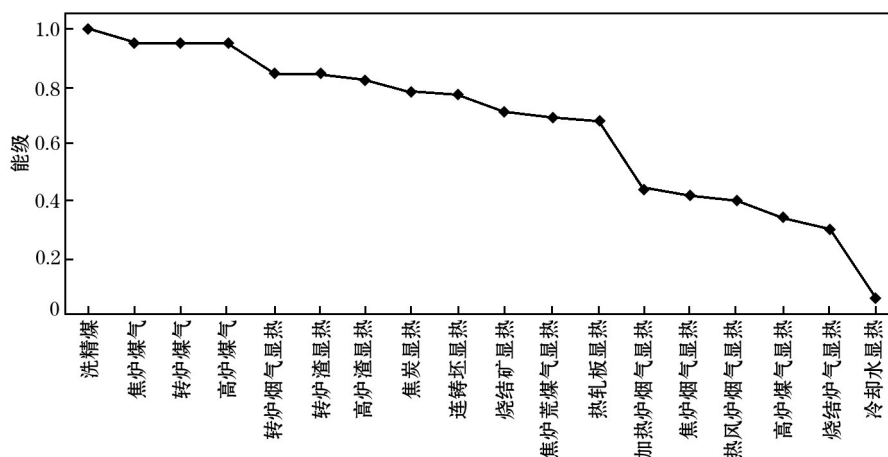


图 4 钢铁制造流程中能量的能级变化趋势

Fig. 4 Energy level trend in steel manufacturing process

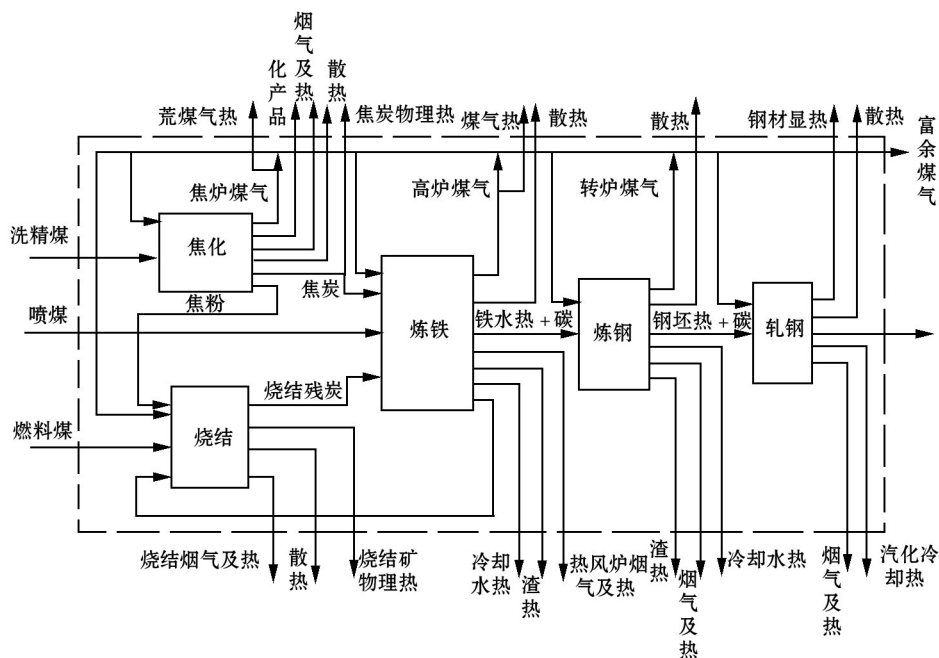


图 5 钢铁制造流程煤基能量转换及耗散过程

Fig. 5 Coal-based energy conversion and dissipation process in steel manufacturing process

因此,煤基能量在钢铁制造流程中不断地贬值,被耗散,利用的价值越来越低。

2 能源系统效率分析

2.1 影响钢铁制造流程能源系统效率的主要因素

在一个能源系统中,能源效率贯穿在能源的加工、转换、储运与输送、使用及二次能源的回收再利用等各个环节,系统的总效率为每个环节相对效率的乘积,见式(1)。因此系统总效率受各个环节相对效率的共同影响,即使大多数环节效率高而个别环节效率低,仍会导致系统总效率低。

$$\eta_{\text{total}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \cdots \times \eta_n \quad (1)$$

式中: η_{total} 为系统总效率; η_n 为第 n 环节的相对效率。

钢铁制造流程的能源系统效率主要由电力利用效率和煤炭利用效率构成,简要分析如下:

(1) 电力主要用于电机驱动、冶炼加热等终端用户,随着近年来技术的不断进步与设备的升级改造,电力终端用能设备的能效大幅度提高,一般能够达到90%以上,因此,电力使用的系统效率总体上是比较高的。

(2) 煤炭约占总能耗的95%,其主要在焦炉、高炉、转炉中发生物理化学变化,若把过程中释放出的热量及焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气作为伴生

品,则焦炉、高炉、转炉是高效的反应器。因此煤炭在钢铁主流程中的转换效率是高的。

如前文所述,钢铁制造流程中输入的煤炭有超

过一半的化学能转换为由煤气和余热组成的余热余能,而余热余能有效回收及利用效率往往偏低,如图6所示。

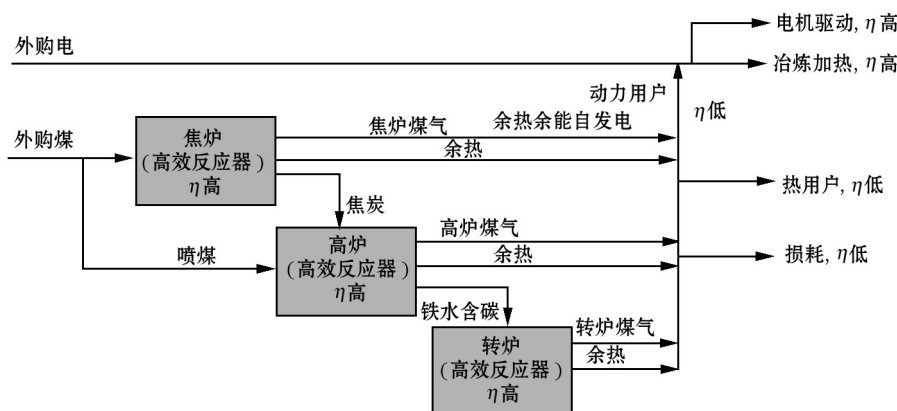


图6 钢铁制造流程能源系统效率分析

Fig. 6 Energy system efficiency analysis in steel manufacturing process

因此,基本可以判断:决定钢铁制造流程系统能源效率的是煤基能量系统的效率,煤气、余热等二次能源的回收利用效率低是导致钢铁制造流程能源系统效率低的重要原因。

2.2 存在的典型问题

当前钢铁企业煤气、余热系统存在的典型问题有:

(1) 转炉煤气回收往往注重数量而忽视质量(热值),导致烧损严重,有效回收量低。

(2) 煤气资源的使用过程粗放、转换效率低,存在大量显性和隐性损失。

(3) 富余煤气发电环节的转换效率低,不同工艺、参数发电系统的效率差异大。依然大量采用低效的中温中压煤气锅炉及发电系统,效率一般低于25%,与效率更高的高温超高压发电系统、CCPP发电系统相比较,能效损失巨大。

(4) 余热资源有效回收利用水平低。往往注重余热回收的数量和过程,而忽视余热回收的质量和效率,缺乏对余热回收利用过程中的时空、质量、价值、用户匹配性的系统优化设计,致使大量中、低温余热资源没有得到有效的回收利用,普遍存在“高质低用”、“低质无用”的问题。

(5) 过多以蒸汽为能源介质,且蒸汽系统管理粗放。普遍存在蒸汽用户多、杂、乱的现象,管网庞大损耗高,蒸汽使用粗放、消耗量大,且大量减温减压供汽与用汽、供需不匹配,造成蒸汽系统低效转换,能效损失巨大。

(6) 对煤气、余热系统缺乏以能量流及能量流

网络集成优化为基础的顶层设计和系统优化。企业往往注重单体设备、单工序、单能源介质系统的节能,以实施单体节能项目为主要节能形式,而忽视跨工序、跨介质系统、跨流程、跨行业的系统节能优化思路,缺乏系统性顶层整体解决方案设计,导致钢铁流程能源系统转换能效及价值低下。

3 高效钢-电联产模式研究

3.1 提高余热余能发电水平的重要性

进入21世纪,国际钢铁工业共同的时代命题是市场竞争力和可持续发展问题^[4]。面对这些严峻的挑战,要求钢铁行业必须要综合地解决包括成本、物耗、能耗、质量、生产效率等市场综合竞争力和包括资源-能源可供性、环境-生态和谐性在内的可持续发展等集成性命题^[5-6]。节约能源、减少排放、保护环境已经成为全行业拓展生存发展空间战略需要,也是企业降低成本、提高市场竞争能力的迫切要求^[7-10]。

通过调研分析发现,国内长流程钢铁企业能源成本约占总生产成本的30%左右,钢铁企业的污染物排放,特别是废烟气的排放主要来源于燃料的燃烧过程,钢铁企业的温室气体排放中有90%以上也来自于能源消耗。因此,能源成本的高低、能源利用效率的高低已经成为影响中国大部分钢铁企业盈利水平和可持续发展能力的关键因素。

对比分析国内多家钢铁企业煤基能量系统的运行状况发现:影响煤炭、焦炭消耗的焦炉炼焦煤单耗、高炉燃料比和烧结固体燃料消耗等指标均为

工序重点控制的技术经济指标,通过长期的工艺攻关、装备升级、技术进步和工序节能工作的开展,以上指标均得到了比较严格的管控,在企业工艺装备、产量规模已定的正常生产工况下,一般没有明显的改进潜力;而对比企业间煤气,余热的回收利用水平则差异较大,将富余的煤气和余热转换为电是国内钢铁企业普遍采用的模式,大量钢铁企业余热余能自发电比例仅达到40%~50%,而部分先进企业已经达到了80%以上,吨钢外购电量差距约200 kW·h,影响吨钢能源成本约100元以上。在当前形势下,如此大的能源消耗及成本差异对企业整体效益的优劣和企业间竞争力的高低构成重要影响。

因此,现阶段通过提高余热余能发电水平来提高煤气、余热的回收利用效率,进而提升整个煤基能量系统的效率,是提升钢铁企业系统能效和竞争力的一条重要途径。

3.2 以系统优化方法构建高效钢-电联产模式

殷瑞钰院士在开展钢铁制造流程能量流及能量网络研究的基础上,超前性提出了钢厂“只买煤、不买电”的设想^[11-12],为研究钢-电联产模式提供了重要指引。东北大学蔡九菊团队开展的钢铁企业系统节能研究及煤气系统、余热系统的研究开拓

了系统优化方法应用的新思路^[13-15]。

作者应用冶金流程工程学、工业生态学、系统节能等理论,在开展钢铁制造流程煤基能量系统能量流及能量流网络系统集成优化的基础上,进行了高效“钢-电联产模式”研究,并将系统优化的原则归纳为:供需匹配、等效替代、能尽其用、高效转换和协同有序^[3]。

按照以上原则,开展了高效钢-电联产模式模型研究:设计了一个年产650万t粗钢规模的长流程大型钢铁企业模型,其基本装备和物料平衡情况见表3。该模型企业煤基能量系统按照系统优化的原则进行了优化设计,煤气、余热等系统全面匹配应用当前行业先进成熟技术,主要耗能指标参照行业先进企业指标值。研究发现:该企业余热余能自发电系统装机容量可达到约530 MW,年发电量可达到约37.3亿kW·h,见表4。若扣除发电系统约8%的自用电量,则净发电量约为34.3亿kW·h,折合吨钢净发电量约527.9 kW·h。而当前大型钢铁联合企业吨钢电耗的一般水平约为500 kW·h。因此,通过实施能源系统优化设计及构建高效钢-电联产模式,长流程钢铁企业能够实现用电基本自给并有可能实现富余电力外供。

表3 年产650万t粗钢规模企业主体装备与物料平衡情况
Table 3 Main equipment and material balance of an enterprise with an annual output of 6.5×10⁶ t of crude steel

工序	主要设备		设备设计产量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	正常产量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)
	公称参数	数量/(台·套 ⁻¹)		
焦化	7 m×52 孔	4	255	255
烧结	405 m ² 烧结机	2	930	900
球团	100×10 ⁴ t/a链篦机回转窑	2	200	150
石灰	25×10 ⁴ t/a回转窑	4	100	90
炼铁	4 038 m ³ 高炉	2	650	640
炼钢	260 t转炉	3	650	650
轧钢	热连轧	1	390	390
轧钢	中厚板 热轧	1	230	230
轧钢	中厚板 热处理	6	90	80

表4 模型企业余热余能发电情况
Table 4 Electricity generation of waste heat and residual energy in model enterprises

序号	发电机组	装机容量/ MW	年发电量/ (10 ⁴ kW·h)
1	CCPP发电机组	50×4	160 000
2	超高压蒸汽发电机组	65×3	126 500
3	干熄焦发电	25×2	31 487
4	烧结余热发电	25×1	16 200
5	TRT发电	25×2	32 000
6	饱和蒸汽发电	10×1	7 200
合计		530	373 387

通过构建高效钢-电联产模式,若全国8亿t钢产量中有70%实现用电自给,按目前吨钢耗电500 kW·h、自发电比例45%测算,则可节省外购电量约1 540亿kW·h,约占2015年全国第二产业用电量40 046亿kW·h^[16]的4.2%,价值约847亿元(电价按0.55元/kW·h),将大幅度提升全行业的盈利水平和综合竞争力。同时,由于钢铁企业实现用电自给利用的全部是余热余能发电,不需要额外增加能源消耗,因此可相应减少社会电厂发电煤耗约4 851万t

标准煤(发电煤耗按 $315 \text{ g/kW} \cdot \text{h}^{[13]}$),具有巨大的经济效益、环境效益和综合社会效益。

3.3 以系统优化方法提高现有钢铁企业余热余能发电水平

单一技术或项目不能解决大幅度提升钢铁企业余热余能自发电水平的问题。需要应用系统节能理论、能量流及能量流网络研究的新思路、新方法和新成果,通过开展能源系统诊断、优化与顶层设计,重点实施煤气系统、蒸汽系统、余热系统集成优化,对各种余热余能的发生、储存、输送、缓冲、使用、转换、输出等全过程进行诊断、优化与规划,如图7所示,将低品质余热余能的回收利用、富余煤气高效发电放在重要位置,提升余热余能利用与转换效率,才可大幅度提高余热余能发电水平。

近年来,作者先后组织完成了针对国内近30家钢铁企业的能量系统诊断与优化工作,通过规划措施的实施,企业余热余能自发电比例可显著提高,最高可提高至95%,如图8所示。

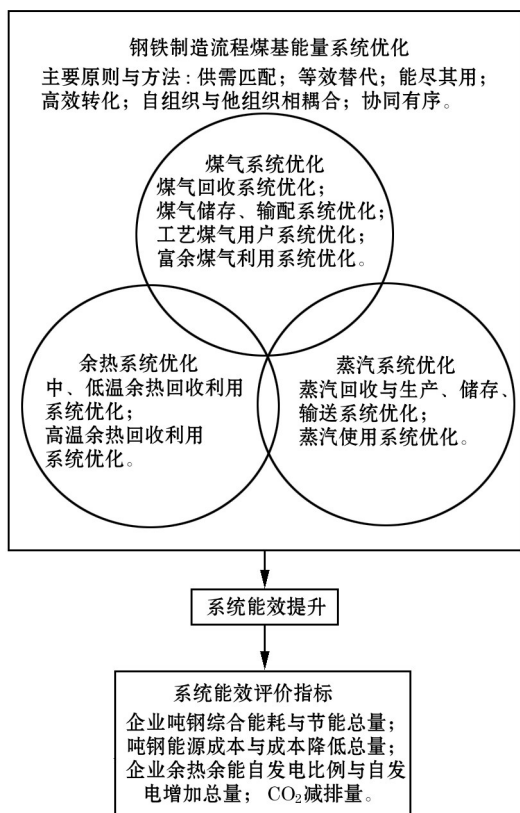


图7 钢铁制造流程煤基能量系统优化框图

Fig. 7 Optimization framework of coal-based energy system in steel manufacturing process

4 结论

(1) 在中国典型长流程钢铁企业的能源结构中,煤炭占比约为95%,输入煤炭的化学能有超过

一半的数量转化为煤气和余热,分别约占输入煤炭总化学能的46.9%和52.5%。

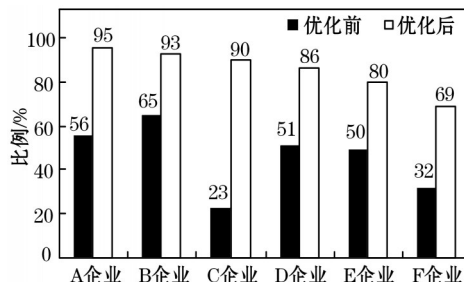


图8 部分钢铁企业能源系统优化前后余热余能自发电比例变化情况

Fig. 8 Variation of waste heat and residual energy generation ratio before and after optimization of energy system in some iron and steel enterprises

(2) 煤基能量在钢铁制造流程中表现为不断地转换贬值与耗损散失,其系统能效的提高需要依托于能量流及能量流网络的集成优化。

(3) 钢铁制造流程能量流的核心是煤的转化与二次能源的回收利用问题,实现煤气资源与余热资源的高效回收利用是提升钢铁制造流程系统能源效率和价值的关键。

(4) 实现钢铁制造流程煤基能量系统集成优化及高效运行的主要原则归纳为:供需匹配、等效替代、能尽其用、高效转换和协同有序。

(5) 以能量流及能量流网络系统集成优化的方法构建高效钢-电联产模式,通过实施煤气、蒸汽、余热等二次能源的高效回收发电,长流程钢铁企业可以实现用电基本自给;以系统优化方法开展能源系统诊断、优化与整体解决方案顶层设计,可以实现现有钢铁企业余热余能发电水平的大幅度提升。

(6) 以“冶金流程工程学”理论做为与钢铁行业发展相适应的认识论,强化钢铁制造流程煤基能量系统的研究,深度开发钢铁制造流程能源转换功能的价值,构建高效钢-电联产模式,是现阶段钢铁企业实现节能减排、降本增效、绿色转型发展的重要途径。

参考文献:

- [1] 彭岩,曹先常,张玉柱. 钢铁典型工序流程节能技术新进展[J]. 中国冶金, 2017, 27(5): 8. (PENG Yan, CAO Xian-chang, ZHANG Yu-zhu. New progresses of energy saving solutions in typical iron and steel making process flow[J]. China Metallurgy, 2017, 27(5): 8.)
- [2] 吉立鹏. 钢铁厂磷素流的路径分析及探讨[J]. 中国冶金, 2018, 28(6): 19. (JI Li-peng. Analysis and discussion on path

- of phosphorus flow in iron and steel plant[J]. China Metallurgy, 2018, 28(6): 19.)
- [3] 李洪福. 钢铁制造流程煤基能量系统优化与多联产研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2014. (LI Hong-fu. Study on the Coal-Based Energy System Optimization and Polygeneration of Steel Manufacturing Process[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2014.)
- [4] 殷瑞钰. 世界钢铁工业的时代命题[J]. 冶金经济和管理, 2000(4): 4. (YIN Rui-yu. The epoch proposition of the world steel industry[J]. Metallurgical Economy and Management, 2000(4): 4.)
- [5] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004. (YIN Rui-yu. Metallurgical Process Engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.)
- [6] 罗冰生. 钢铁行业发展面临的机遇和挑战[N]. 现代物流报, 2010-12-20(B02). (LUO Bing-sheng. Opportunities and Challenges Facing the Development of the Iron and Steel Industry [N]. Modern Logistics Newspaper, 2010-12-20(B02).)
- [7] 李仁华, 贾鸿屹. 钢铁厂煤气利用项目的系统应用与优化[J]. 中国冶金, 2017, 27(3): 54. (LI Ren-hua, JIA Hong-yi. Systematic application and optimization on gas using project of iron and steel plant[J]. China Metallurgy, 2017, 27(3): 54.)
- [8] 孙敏敏, 宁晓钧, 张建良, 等. 炼铁系统节能减排技术的现状和发展[J]. 中国冶金, 2018, 28(3): 1. (SUN Min-min, NING Xiao-jun, ZHANG Jian-liang, et al. Research status and progress of energy saving and emission reduction technology for ironmaking[J]. China Metallurgy, 2018, 28(3): 1.)
- [9] 王天义. 多发电, 节能减排, 提升企业盈利能力——天津天丰钢铁提高自发电率调研[J]. 中国冶金, 2016, 26(11): 1. (WANG Tian-yi. Multi power generation, energy saving and emission reduction, improve profitability of enterprises- Research of improving self generating rate of Tianjin Tianfengsteel [J]. China Metallurgy, 2016, 26(11): 1.)
- [10] 周婷婷, 孙恕坚, 赵臣, 等. 烧结不稳定对余热发电的影响及其解决方案[J]. 中国冶金, 2016, 26(3): 53. (ZHOU Ting-ting, SUN Shu-jian, ZHAO Chen, et al. Influence of instable sintering process on waste heat power generation and its solution[J]. China Metallurgy, 2016, 26(3): 53.)
- [11] 殷瑞钰. 钢铁制造流程的能量流行为和能量流网络问题[J]. 工程研究, 2010, 2(1): 1. (YIN Rui-yu. The question of energy flow behavior and energy flow network in iron and steel manufacturing process[J]. Journal of Engineering Studies, 2010, 2(1): 1.)
- [12] 殷瑞钰. 论钢厂制造过程中能量流行为和能量流网络的构建[J]. 钢铁, 2010, 45(4): 1. (YIN Rui-yu. Comment on behavior of energy flow and construction of energy flow network for steel manufacturing process[J]. Iron and Steel, 2010, 45(4): 1.)
- [13] 张琦, 蔡九菊, 沈峰满. 钢铁企业系统节能减排过程集成研究进展[J]. 中国冶金, 2011, 21(1): 3. (ZHANG Qi, CAI Jiu-ju, SHEN Feng-man. Application of process integration on systemic energy saving and emission reduction in iron and steel works [J]. China Metallurgy, 2011, 21(1): 3.)
- [14] 宋军, 蔡九菊, 刘文超, 等. 钢铁联合企业煤气系统运行模式研究[J]. 中国冶金, 2010, 20(12): 39. (SONG Jun, CAI Jiu-ju, LIU Wen-chao, et al. Operation mode of gas system in iron and steel company[J]. China Metallurgy, 2010, 20(12): 39.)
- [15] 蔡九菊, 王建军, 陈春霞, 等. 钢铁企业余热资源的回收与利用[J]. 钢铁, 2007, 42(6): 1. (CAI Jiu-ju, WANG Jian-jun, CHEN Chun-xia, et al. Recovery of residual-heat integrated steelworks[J]. Iron and Steel, 2007, 42(6): 1.)
- [16] 国家能源局. 国家能源局发布 2015 年全社会用电量[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2016-01/15/c_135013789.htm. (National Energy Bureau. Total Social Electricity Consumption in 2015 Issued by National Energy Bureau[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2016-01/15/c_135013789.htm.)

~~~~~

### (上接第 94 页)

- [ 11 ] 李新宇, 张建良, 苏步新, 等. 基于主成分分析的高炉用天然块矿性能评价[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(9): 2943. (LI Xin-yu, ZHANG Jian-liang, SU Bu-xin, et al. Performance evaluation of lump ores for blast furnace based on principle component analysis[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2016, 47(9): 2943.)
- [ 12 ] 王晓哲, 张建良, 刘征建, 等. 块矿对高炉炉料冶金性能的影响[J]. 钢铁研究, 2017, 45(5): 1. (WANG Xiao-zhe, ZHANG Jian-liang, LIU Zheng-jian, et al. Influence of lump ore on metallurgical properties of blast furnace burden[J]. Research on Iron and Steel, 2017, 45(5): 1.)
- [ 13 ] WU S, HAN H, XU H, et al. Increasing lump ores proportion in blast furnace based on the high-temperature interactivity of iron bearing materials[J]. ISIJ International, 2010, 50(5): 686.
- [ 14 ] Kashiwara Y, Iwai Y, Sato T, et al. Effect of unconsumed mixed small coke on permeability in lower part of blast furnace[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 2015, 55(6): 1237.
- [ 15 ] 左海滨, 于文涛, 张建良. 温度对天然块矿爆裂的影响[J]. 钢铁, 2015, 50(5): 7. (ZUO Hai-bin, YU Wen-tao, ZHANG Jian-liang. Effects of temperature on the decrepitation performance of natural lump ores[J]. Iron and Steel, 2015, 50(5): 7.)
- [ 16 ] 王海涛, 李光辉, 范晓慧, 等. 几种高炉炉料冶金性能的对比研究[J]. 钢铁, 2006, 41(1): 23. (WANG Hai-tao, LI Guanghui, FAN Xiao-hui, et al. Comparative study on metallurgical properties of blast furnace burdens[J]. Iron and Steel, 2006, 41(1): 23.)
- [ 17 ] 吴胜利, 王来信, 王玉珏, 等. 含铁炉料间高温交互作用对初渣生成行为的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(11): 1546. (WU Sheng-li, WANG Lai-xin, WANG Yu-jue, et al. Influence of high temperature interaction between iron ores on the formation behavior of primary slags[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(11): 1546.)