

钢铁企业系统节能实践和探索

李军汉

陕钢集团汉中钢铁有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v2i3.3865

[摘要] 应用一系统分析法,剖析了钢铁企业中工序能耗和钢比系数对吨钢能耗的影响,从物质流运行优化和能量流运行优化两方面进行了实践,提出了未来钢铁企业系统节能的方向和途径。

[关键词] 钢铁企业; 系统节能; 方向和途径

中图分类号: TL62+8 **文献标识码:** A

Practice and exploration of systematic energy saving in iron and steel enterprises

Junhan Li

Shaanxi Steel Group Hanzhong iron and Steel Co., Ltd

[Abstract] The influence of process energy consumption and steel ratio coefficient on energy consumption per ton of steel in iron and steel enterprises is analyzed by using e-p system analysis method. The practice is carried out from two aspects of material flow operation optimization and energy flow operation optimization, and the direction and way of system energy saving in iron and steel enterprises in the future are put forward.

[Key words] Iron and steel enterprises; System energy saving; Direction and approach

引言

钢铁工业是能源资源高消耗行业,长流程钢铁企业中,能源成本一般占钢铁生产总成本的30%左右,节能潜力巨大,能源成本差异对企业整体效益和企业竞争力构成重要影响。深入剖析钢铁企业能耗指标及其影响因素,实施系统节能,对促进钢铁企业实现高质量发展有重要意义。

多年来,专家学者们对钢铁行业节能进行了深入研究。上世纪80年代初,陆钟武等提出“载能体”、“直接能耗”、“间接能耗”等概念,创立了“系统节能理论和技术”,研究冶金工业较高层次的节能问题,为钢铁企业系统节能提供了重要的理论依据。蔡九菊、丁毅等认为实现系统节能开展系统节能要实现三个转变,指出未来钢铁工业仍面临极具挑战性的命题,仍将面对高能耗、高排放、资源依赖和能源成本、环境负荷以及碳排放等方面的压力。殷瑞钰等认为应建设智能化能源管控中心,实现控制和管理能源及能量流动态运行行为的优化,

以及预报、分析可能出现的前景等功能,促进钢厂能效水平的再次提升。

1 钢铁企业系统节能概述

目前钢铁行业普遍采用吨钢综合能耗、工序能耗的方法对能源消费状况进行评价。吨钢综合能耗是指企业在报告期内平均每生产1t钢所消耗的能源折合成标准煤量,这个指标是钢铁企业评价能源消费的综合性指标,是目前政府评价钢铁企业的用能及节能水平的主要依据。

系统节能要研究本系统与其外部环境之间及其内部各组成部分之间的相互关系,实现整体的、全面的节能。在研究系统节能时,既要注意外部条件,也要注意生产流程各工序之间的联系。

钢铁工业,每道工序的产品都是下一道工序的原料。节能既要节约能源,又要节约非能源。系统节能从以下方面实现:(1)降低原料、溶剂料、零部件和耐火材料等非能源物质消耗及燃料及电力、氧气、蒸汽和工业水等消耗;(2)提高能源系统能源转换效率;(3)回收生

产过程中各种余热、余能和废弃物等。

2 吨钢能耗的 e-p 分析法

2.1 吨钢能耗表达式 $\sum_i e_i \times p_i$

按吨钢能耗的定义,吨钢能耗的计算式如式(1)所示。

$$E = \sum_i e_i \times p_i \quad (1)$$

式(1)中: e_i 为统计期内各道工序的工序能耗,tce/t产品; p_i 为统计期内各生产工序产品产量与钢产量之比,称为某工序的钢比系数,t/t,它是对企业生产结构的定量描述。

吨钢能耗表达式 $\sum_i e_i \times p_i$ 是关联

物质流和能量流的耦合公式,从中可以看出物质流和能量流变化对吨钢能耗的影响。运用吨钢综合能耗e-p分析法,可剖析钢铁企业中物质流的变化过程及其各组成环节对能源的消耗和钢铁企业中能量流的变化过程,分析其中的主要影响因素,并可按工序不同实施管理。

2. 2 节能量表达式

分析某统计期的节能效果, 可将吨钢能耗指标的改变量 ΔE 分解, 如式 (2) 所示。

$$\Delta E = \sum_i e_i'' (p_i'' - p_i') + \sum_i p_i' (e_i'' - e_i') \quad (2)$$

式 (2) 中: $p_i'' - p_i'$ 代表统计期始末某工序的钢比系数改变量; $e_i'' - e_i'$ 代表统计期始末某工序工序能耗的改变量。表示企业钢比系数变化获得的节能量, $\sum_i e_i'' (p_i'' - p_i')$ 称为间接节能量; $\sum_i p_i' (e_i'' - e_i')$ 表示企业各工序能耗变化获得的节能量, 称为直接节能量。

上式除了分析研究对象某时期的节能效果外, 还可以对不同研究对象进行能耗指标对比, 找出能耗差距。既可用于不同钢企之间对标找差, 也可用于钢企内部不同统计周期之间进行对比分析。

3 系统节能实践

3. 1 运用 e-p 分析法分析节能潜力

以下以 A 钢企为例, 解析吨钢能耗一分析过程, 如表 1、表 2 所示。

表 1 分析可知, A 钢企 2019 年: 因钢比系数影响, 吨钢综合能耗较 2018 年降低 20.52 kgce/t; 因工序工序能耗影响, 吨钢综合能耗较 2018 年降低 12.81 kgce/t。

钢铁行业通常按季度进行对标, 表 2 以 A、B 两钢企 2019 年一季度数据为例进行 e-p 分析。

由表 2 分析可知: 因钢比系数影响, A 钢企吨钢综合能耗较 B 钢企低 9.19 kgce/t; 因工序能耗和辅助工序能耗差异, A 钢企吨钢综合能耗较 B 钢企低 7.88 kgce/t 钢。表 2 可清晰看出 A、B 两钢企各工序之间的能耗差异。

通过表 1、表 2 可知, 影响吨钢能耗的直接因素有两个方面, 一方面是对应每吨钢产量的各工序的实物产量, 即各工序的“钢比系数”; 另一方面是各工序生产每吨实物量的能耗, 即各工序的“工序能耗”。

3. 2 系统节能的主要措施

为了降低吨钢能耗, 一要改善企业

表 1 2019 年 A 钢企吨钢综合能耗 e-p 分析

工序名称	钢比系数 p_i (t. t ⁻¹)			工序能耗 e_i (kgce. t ⁻¹ 产品)			间接节能 (kgce. t ⁻¹) ④*(②-①)	直接节能 (kgce. t ⁻¹) ①*(④-③)	合计影响 吨钢综合 能耗 (kgce. t ⁻¹)
	2018 年①	2019 年②	差距 ②-①	2018 年③	2019 年④	差距 ④-③			
烧结 工序	1.60	1.44	-0.16	41.00	41.43	0.43	-6.83	0.69	-6.14
炼铁 工序	0.90	0.86	-0.04	404.07	394.28	-9.79	-14.81	-8.78	-23.59
炼钢 工序	1.00	1.00	0.00	-16.07	-23.77	-7.69	0.00	-7.69	-7.69
轧钢 工序	0.98	1.02	0.04	28.42	29.54	1.12	1.12	1.09	2.21
辅助 工序	1.00	1.00	0.00	23.00	24.87	1.87	0.00	1.87	1.87
合计							-20.52	-12.81	-33.33

表 2 2019 年一季度 A 钢企与 B 钢企吨钢综合能耗对标 e-p 分析

工序名称	钢比系数 p_i (t. t ⁻¹)			工序能耗 e_i (kgce. t ⁻¹ 产品)			钢比系数 影响 (kgce. t ⁻¹) ④*(②-①)	工序能耗 影响 (kgce. t ⁻¹) ①*(④-③)	合计影响吨 钢综合能耗 (kgce. t ⁻¹)
	B 钢 ①	A 钢 ②	差距 ②-①	B 钢 ③	A 钢 ④	差距 ④-③			
烧结 工序	1.55	1.46	-0.09	39.49	41.89	2.40	-3.80	3.73	-0.07
炼铁 工序	0.89	0.86	-0.03	387.45	395.90	8.45	-10.70	7.53	-3.16
炼钢 工序	1.00	1.00	0.00	-16.12	-23.67	-7.55	0.00	-7.55	-7.55
轧钢 工序	0.84	1.02	0.18	35.88	29.21	-6.67	5.30	-5.60	-0.30
辅助	1.00	1	0.00	29.77	23.78	-5.99	0.00	-5.99	-5.99

生产结构, 即降低各工序的钢比系数; 二要降低各工序生产单位产品所直接消耗的燃料量及各种动力, 即各工序的工序能耗。这就为我们在生产实践中对标找差提供了有用的工具, 同时, 企业也能够清晰地分析出影响能耗的主要因素是生产结构的影响, 或者是各工序能耗控制的问题, 方便采取针对性的措施加以改进。开展系统节能要实现从单体设备节能到企业整体节能的转变。通过优化生

产工艺结构, 加强各工序用能优化, 降低原燃料和动力的单耗及其载能量, 降低原料、溶剂料、零部件和耐火材料等非能源物质消耗, 降低燃料及电力、氧气、蒸汽和工业水等动力消耗, 实现节能减排。

3. 2. 1 物质流运行优化

优化生产工艺流程, 实现钢铁连续化、紧凑化和高效化生产, 降低资源、能源消耗。降低钢比系数是降低综合能耗

的重要途径, 钢比系数中, 铁钢比影响非常关键, 铁钢比高的企业, 吨钢能耗一定高。增大外加物质流, 减小循环物质流, 减小排放物质流, 会降低吨材能耗; 而且, 越是靠后的工序所发生的以上3种物质流对吨材能耗的影响越大。降低钢比系数是降低综合能耗的重要途径, 重点控制各生产工序的原料消耗, 尤其是主要原料—铁水、烧结矿的消耗, 这是节能工作的基础。钢比系数中, 铁钢比影响非常关键, 是重点控制对象。同样以A企业为例, 按照吨钢能耗一分析法统计了钢比系数对能耗的影响, 如表3所示。

表3 A企业近3年钢比系数影响能耗情况统计

统计期	烧钢比	铁钢比	材钢比	钢比系数对吨钢综合能耗降低的贡献 (kgce·t ⁻¹)
2018年 (基准年)	1.60	0.90	0.98	-
2019年	1.43	0.85	1.00	-20.52
2020年	1.47	0.84	0.97	-3.76

由表3可知, 提高废钢加入量, 增加最终产品产量, 可有效降低能耗。推而广之, 生产结构优化, 能够实现增产节能。研究表明, 增大外加物质流 (如转炉冶炼过程配加废钢), 减小循环物质流 (如降低烧结返矿率), 减小排放物质流, 会降低吨钢 (材) 能耗; 而且, 越是靠后的工序所发生的以上3种物质流对吨钢 (材) 能耗的影响越大。

3.2.2 能量流运行优化

在钢厂生产过程中, 能量流既伴随物质流在“物质流网络”中运行, 又在“能量流网络”中相对“独立”运行。钢铁制造流程的碳素能量流在钢铁制造流程中表现为多种能源介质形式, 长流程钢铁企业中煤炭能耗占比最高, 煤气及各种余热几乎全部来自于煤炭, 其次是电力。以A企业为例, 主要有: 焦炭、煤、煤气、蒸汽、热物料、热烟气、液态冶金渣、余热水等。在流程中, 以上各能源介质在烧结、炼铁、炼钢、轧钢等各工序环节上不断发生消耗、转换、耗散、回收、再利用等动态过程, 由此形成比较

表5 降低高炉燃料比措施

序号	改进和提升措施
1	以精料为基础, 以顺行为前提, 维持适当的冶炼强度; 高炉操作应通过相互配套的上下部调剂, 运用好冷却制度, 形成上稳下活的炉况, 实现高炉稳定顺行。
2	依据生产运行及原燃料条件, 选择适宜的装料制度, 稳定料速。
3	选择合适的送风制度, 根据原燃料条件、喷吹煤粉量、风口长度、炉缸尺寸选择合适的风速、鼓风动能, 保持适宜的回旋区, 保证炉缸圆周上和径向上煤气流和温度分布、控制合理。标准风速 $\geq 250\text{m/s}$; 保持炉缸热量充沛, 进行富氧鼓风, 提高风温加快煤的挥发速度的燃烧速度。
4	严格控制生铁含[Si]和铁水物理热, 要求正常炉况下, 生铁硅含量范围为0.30%-0.40%。
5	持续优化热风炉操作参数, 为高炉提供稳定的高风温。
6	稳定焦炭质量, 减少因焦炭频繁调整配比影响炉况波动。

复杂的能量流网络, 其核心是煤焦的转换与二次能源的回收利用问题, 系统节能的目标主要是降低焦、煤消耗和外购电力。

(1) 降低焦、煤消耗。炼铁系统的能耗占联合企业用能的83.3%, 是长流程钢铁联合企业节能的重点。高炉燃料比占炼铁工序能耗的84%左右。通过对标B钢企进行一分析, A钢企炼铁工序能耗差距为7.53kgce/t, 如表2所示。A钢企与B钢企燃料比差距如表4所示。

表4 A钢企与B钢企高炉燃料比情况

指标	A钢企	B钢企	对比
燃料比 (kg·t ⁻¹)	526.50	483.10	43.4

制定了降低燃料比的措施如表5所示。

措施实施后, 2020年高炉燃料比526.54kg/t, 较2016年降低26.49kg/t, 如表6所示。

表6 A钢企与B钢企高炉燃料对比情况

指标	A钢企	B钢企	对比
燃料比 (kg·t ⁻¹)	511.49	485.00	26.49

(2) 降低外购电力。实施发电侧和用电侧管理, 以降低外购电为主要目标, 降低吨钢综合电耗, 增加余热余能发电量, 提高自发电率。A企业吨钢综合能耗318.5kWh/t钢, 自发电率51%左右, 同类钢企中处于中下水平。因此, 节约用电, 实现煤气、余热等二次能源的高效回收利用, 提高自发电率是A企业节能工作的主要方向之一。降低吨钢综合电耗的措施如表7所示, 提高自发电量的措施如表

8所示。

表7 降低吨钢综合电耗的措施

序号	改进和提升措施
1	严格执行停机制度, 合理调节设备运行负荷, 采用变频调速等手段实行经济运行。
2	优化电网运行方式, 最大限度地降低变压器的电能损耗和提高电源侧的功率因数。
3	通过无功补偿改善电能质量, 减少损耗。

表8 提高自发电量的措施

序号	改进和提升措施
1	实行定检定修, 降低发电机组停机率。
2	以效益最优为原则, 煤气零放散为目标, 做好煤气平衡, 合理保障发电厂煤气供给, 提高烧结、炼钢、轧钢余热余能回收量。
3	加快推进煤气综合利用发电项目, 提高能源转换效率。

以上措施的实施, 特别是新建80MW超高温亚临界煤气发电机组投产后, 自发电率有可达到65%左右, 减少15%左右的外购电力。

4 系统节能方向和途径

4.1 EMS系统的调控作用

能源网络化, 是以信息化改造传统产业的需要, 是研究钢铁联合企业能源高效转换、储存、分配、使用、回收、缓冲和优化调控的重要方法。钢铁企业能源管控中心—EMS系统, 是落实系统节能科学理念、以信息技术为支撑、以提高系统能效为目标的管控一体化平台, 对企业能源设备的运行和能源介质的生产—输配—使用全流程进行动态监控和管理。挖掘节能潜力需要从科学配置能源、使用能源和管理能源等方面入手。

4.1.1 科学分配能源

利用EMS系统,依据能源的数量、品质以及用户需求,综合考虑能源的生产、分配、使用、回收、再利用问题及其相互关系,解决“界面”运行过程及其参数的协同优化,做到能介的“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”,能源介质的使用方式,由“供给制”转变为“配给制”,调度管理由单一的“保障生产供应”转变为“以成本效益为中心合理调度”,充分发挥能源的价值。

4.1.2 优化能源运行

(1) 煤气系统优化。利用EMS系统,根据煤气资源的数量、品质(热值)和用户需求,科学设定煤气使用序,结合企业生产计划、检修计划,评价各种事件对煤气系统的影响,准确地预测煤气的发生量、消耗量和剩余量,应用能级分析法,编制能源网络模型,优化分配使用各种煤气资源,建立剩余煤气量分解(协同)模型,科学确定煤气柜的容量和锅炉等缓冲设备的缓冲煤气量,降低煤气放散率,充分发掘和利用煤气的价值。转炉煤气回收系统优化要考虑转炉煤气极限回收。

(2) 余热余能回收利用系统优化。回收方面,综合考虑回收的数量、品质、价值;利用方面,实行“温度对口、梯级利用”,做到“高质高用、低质低用、热尽其用”。烧结厂重点通过对标和技术改进,提高吨矿余热发电量;炼铁厂控制好煤气质量,充分利用高炉炉顶余压余能,提高TRT发电量;炼钢厂、轧钢厂加强汽化冷却系统的维护和操作,优化回收参数,提高转炉饱和蒸汽回收量。

(3) 电力系统优化。通过EMS管理平台优化电力资源,实现集中监控,实时监控总用电负荷变化和重大耗电设备的运转状况,实现用电负荷预测,充分考虑各用户的需求,建立优化模型,制定成本最优的错峰发电和用电计划,科学电力调度,降低用电成本,实现对能源的最优利用。实施发电侧和用电侧管理,提高自发电率,降低用电成本,以降低外购电为

主要目标,增加余热余能发电量,减少用电量,提高自发电率。

4.2 应用“界面”技术

“界面技术”是指相邻工序之间的衔接一匹配、协调一缓冲技术、物质流的物理和化学性质调控技术及其相关装置。钢铁生产流程的重要界面有:原燃料一烧结界面、烧结一高炉界面、高炉一转炉界面、连铸一加热炉界面等。发展界面技术可实现生产过程中物流、能量流、温度、时间等基本参数的衔接(尤其是热衔接)、匹配、协调、稳定,极大地促进生产流程整体运行的稳定、协调,实现紧凑化、连续化和高效化。在强调单体设备节能、工序节能的同时,重视钢铁界面铁水罐、钢包优化调度,材钢界面钢坯热装热送等。

4.3 产城融合发展

拓展制造链和经营链,实现钢厂的生态化转型,融入特定区域的循环经济生态链,建设以钢厂为核心的循环经济生态链,比如:可以利用钢铁企业丰富的余热资源为城市和工业园区供热,钢厂可消纳利用市政中水,节约水资源等。产城融合发展,可以对钢厂能量流网络的进一步优化起到促进作用,同时改善循环经济区域内的资源、能源利用效率,改善环境生态,降低区域CO₂排放强度。

5 结束语

(1) 运用吨钢综合能耗一分析法,是钢铁企业系统节能的重要分析工具,可剖析钢铁企业中物流的变化过程及其各组成环节对能源的消耗和钢铁企业中能量流的变化过程,分析其中的主要影响因素。

(2) 钢铁行业碳排放量占全国碳排放总量的15%左右,目前我国高-转长流程工艺结构占据主导地位,能源结构明显高碳化。能源结构的优化调整,受制于关键低碳冶金技术的发展,短期内难有突破。现阶段,通过系统节能持续提高能效、降低碳排放量,是实现碳达峰、碳中

和目标的一个重要途径。

(3) 应构建能量流网络,发挥能源管理中心的重要作用,通过转换、改制、优化、缓冲、调控等手段,提高能源系统转换效率,使能量耗散最少。

[参考文献]

- [1] 陆钟武,蔡九菊.系统节能基础[M].科学出版社,1993.
- [2] 蔡九菊,孙文强.中国钢铁工业的系统节能和科学用能[J].钢铁,2012,47(05):1-8.
- [3] 丁毅,王卫东,史德明,等.试论系统节能在钢铁企业经济运行中的地位作用与实施途径[J].中国冶金,2010,20(8):48-52.
- [4] 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(04):1-9.
- [5] 殷瑞钰.从开放系统、耗散结构到钢厂的能量流网络化集成[J].中国冶金,2010,20(08):1-14.
- [6] 殷瑞钰.从开放系统、耗散结构到钢厂的能量流网络化集成[C].中国金属学会.2010年全国能源环保生产学术会议文集.中国金属学会:中国金属学会,2010:11-25.
- [7] 刘文超,蔡九菊,张琦,等.钢铁企业能耗分析及节能对策研究[J].工业炉,2011,33(03):8-10+19.
- [8] 蔡九菊,王建军,陆钟武,等.钢铁企业物质流与能量流及其相互关系[J].东北大学学报,2006,(09):979-982.
- [9] 王维兴.炼铁系统节能技术[N].中国钢铁之家,2017.08.
- [10] 王维兴.2020年中钢协会会员单位能源消耗评述[N].世界金属导报,2021.03.
- [11] 蔡九菊.钢铁企业能耗分析及未来节能对策研究[J].鞍钢技术,2009,(02):1-6.
- [12] 吴仲华.从能源科学技术看能源危机的出路[M].东北大学出版社,2010.