

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220272

钢铁比变化对吨钢综合能耗影响分析方法

韩 晶¹, 杜 滨²

(1. 中国宝武钢铁集团有限公司能源环保部, 上海 200126; 2. 上海宝钢节能环保技术有限公司, 上海 201999)

摘 要: 在碳达峰、碳中和背景下,增加废钢消耗比例、降低铁钢比可直接影响钢铁企业吨钢综合能耗下降,是中国长流程钢铁企业能效提升、节能降碳的有效路径,已成为钢铁行业研究热点。首先结合长流程钢铁生产实际从热量平衡角度简要分析了降低铁水热量损失、提高废钢入炉温度、降低转炉出钢温度等降低铁钢比的主要途径和相应技术措施。为了完整量化分析铁钢比变化对钢铁企业吨钢综合能耗的影响,以钢铁企业系统节能原理为基础,在传统的铁前工序钢比系数、转炉炼钢工序能耗变化影响分析的基础上,增加了由于铁钢比变化导致吨钢余能回收对吨钢综合能耗的影响,并提出了铁钢比变化对长流程钢铁企业能耗影响定量分析方法。最后以若干钢铁企业实际数据为例进行了定量分析,在该案例条件下,铁钢比从基准期 0.950 降低至统计期 0.790,铁前工序钢比系数、转炉炼钢工序能耗、吨钢余能回收三者变化分别影响吨钢综合能耗下降 71.282 kgce/t、下降 1.000 kgce/t、增加 9.687 kgce/t,合计影响吨钢综合能耗下降 62.595 kgce/t。该案例定量分析显示铁钢比平均每降低 0.01,吨钢综合能耗下降 3.912 kgce/t,铁钢比下降能够有效提升长流程钢铁企业吨钢综合能耗水平。

关键词: 铁钢比; 长流程钢铁生产; 能效; 吨钢综合能耗; 定量分析方法

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2022)10-0188-07

Analysis method of influence of iron steel ratio change on comprehensive energy consumption per ton of steel

HAN Jing¹, DU Bin²

(1. Department of Energy and Environmental Protection, China Baowu Steel Group Co., Ltd., Shanghai 200126, China; 2. Shanghai Baosteel Energy and Environment Technology Co., Ltd., Shanghai 201999, China)

Abstract: In the context of carbon peak and neutralization, increasing the proportion of scrap consumption and reducing the iron/steel ratio can directly affect the decline of comprehensive energy consumption per ton of steel in iron and steel enterprises. Reducing the iron/steel ratio is an effective way to improve energy efficiency, save energy and reduce carbon in China's iron and steel enterprises based on integrated iron and steel route production, which has become a research hotspot in the iron and steel industry. The main ways and corresponding technical measures to reduce the iron/steel ratio, such as reducing the heat loss of molten iron, increasing the temperature of scrap entering the furnace and reducing the tapping temperature of converter, are briefly analyzed from the point of view of heat balance. In order to completely and quantitatively analyze the impact of the change of iron/steel ratio on the comprehensive energy consumption per ton of steel in iron and steel enterprises, based on the system energy saving in iron and steel enterprises, this paper adds the impact of the recovery of residual energy per ton of steel caused by the change of iron/steel ratio on the comprehensive energy consumption per ton of steel on the basis of the change of iron/steel ratio, and puts forward the quantitative analysis method of the impact of the change of iron/steel ratio on the energy consumption of integrated iron and steel route enterprises. Finally, taking the actual data of several iron and steel enterprises as an example, the quantitative analysis is carried out. Under the condition of this case, the iron/steel ratio is reduced from 0.950 in the benchmark period to 0.790 in the statistical period. The changes of the steel ratio coefficient in the pre iron process, the energy consumption in the steelmaking process and the recovery of residual energy per ton of steel affect the comprehensive energy consumption per ton of steel by -71.282 kgce/t, -1.000 kgce/t and 9.687 kgce/t respectively, and the total comprehensive energy consumption per ton of steel is reduced by 62.595 kgce/t. The quantitative analysis of the case shows that the comprehensive energy consumption per ton of steel decreases by 3.912 kgce/t for every 0.01 reduction of iron/steel ratio. The decline of iron/steel ratio can significantly

improve the performance of comprehensive energy consumption per ton of steel in integrated iron and steel route enterprises.

Key words: iron/steel ratio; integrated iron and steel route production; energy efficiency; comprehensive energy consumption per ton of steel; quantitative analysis method

碳达峰、碳中和是中国钢铁行业高质量发展的内在要求^[1-3],增加废钢消耗比例、降低铁钢比可直接影响钢铁企业吨钢综合能耗下降^[4-5],是中国长流程钢铁企业能效提升^[6]、节能降碳的有效路径^[7],已成为钢铁行业研究热点^[8]。2019 年,中国铁钢比为 0.812,如果铁钢比降低到世界(包括中国)平均水平 0.685,则吨钢综合能耗可降低 86.7 kgce/t,按国内钢铁工业碳排放系数 1.7 计算,吨钢可降低二氧化碳排放量 147.4 kg/t^[9];若铁钢比进一步降低到除中国外的世界平均水平 0.535,则吨钢综合能耗可降低 188.3 kgce/t,吨钢减少二氧化碳排放量 320.2 kg/t^[9]。铁钢比成为吨钢综合能耗水平提升的关键结构因素,降低铁钢比是有效降低吨钢能耗的有效手段^[10],对中国钢铁工业绿色发展发挥关键作用^[11]。

预计未来 5~10 年甚至更长时间内,中国钢铁生产仍以长流程钢铁企业为主,开展降低铁钢比节能降耗效果研究,建立铁钢比变化对长流程钢铁企业吨钢能源消耗影响量化分析,通过科学、客观的评价降低铁钢比对单位钢铁产品能耗影响,对长流程钢铁企业能效提升节能降碳具有重要意义^[12]。

1 铁钢比变化的主要途径分析

钢铁企业可以通过改变废钢料消耗来调整铁钢比。在钢铁料消耗一定的前提下,增加废钢消耗比例可以相应减少铁水消耗,从而使铁钢比降低;反之,则会使铁钢比提高。降低铁钢比可以降低钢铁企业吨钢综合能耗,在同等粗钢产量下,可以减少企业综合能耗,因此,降低铁钢比是钢铁企业降低吨钢综合能耗的重要手段^[13]。

本文以长流程钢铁企业为研究对象,兼顾考虑了企业自有炼焦工序的情况,同时为便于简化模型,本文分析未考虑钢铁企业外销铁水、铸锭自用或外销等情况对企业吨钢综合能耗的影响。

1.1 钢铁企业铁钢比定义

结合现场实际需要,铁钢比 n 定义按式(1)考虑。

$$n = \frac{\omega}{\omega_1 + \omega_2} \quad (1)$$

式中: ω 为铁水入炉量,为炼钢受铁称重质量 $\times$ (1-铁水包扒渣系数)-受铁称重前废钢加入量,t;

ω_1 、 ω_2 分别为钢坯量、钢锭交库量,分别为连铸工序和铸锭工段钢坯和钢锭量,t。

1.2 长流程钢铁企业降低铁钢比主要途径

转炉加废钢量增加会降低铁钢比。转炉加废钢量受到转炉热量平衡约束,为此需减少铁水热量损失、提高废钢入炉温度、降低转炉出钢温度。具体技术措施有:(1)减少铁水热量损失,即减少铁水等待时间、总图优化减少铁水运距、铁水一罐到底、铁水包加盖、鱼雷罐车加盖;(2)提高废钢入炉温度,采用废钢预热烘烤;(3)降低转炉出钢温度,可通过钢包加盖、钢包采用高温节能衬体、提高钢包周转率,减少钢包散热损失,适当降低转炉出钢温度,可以适当多加废钢。

钢铁企业立足现有炼铁装备配置,增加废钢使用量有利于降低铁钢比、增加钢产量,可以明显减少吨钢综合能耗^[14]。

对于长流程钢铁企业,在炼铁和炼钢装备不变的前提下,以往普遍采用的降低铁钢比的措施是通过增加废钢使用量来提升粗钢产量,进而降低铁钢比,即使在生铁产量增加的情况下,当粗钢产量的增速高于生铁产量的增速时,铁钢比依然能够得到降低,这就要求炼钢要有较大的提产潜力。虽然这种方式可以降低钢铁企业的吨钢综合能耗,但是却会使钢铁企业的能源消耗总量增加,相比之下,其提升粗钢产量的作用更受重视^[15-16]。

当钢铁企业炼铁能力较大、炼钢能力提升空间有限时,降低铁钢比需要在增加废钢使用量的同时减少铁水产量,此时不存在粗钢提产贡献,以往钢铁企业一般会选择维持炼铁能力不变,将铁钢比维持在较高水平,但是在当前国家严控钢铁产能、压减粗钢产量的政策背景下,降低铁钢比只能通过减少生铁产量来实现。

2 铁钢比变化对企业能耗影响定量分析模型

为便于后续分析,本文将用于建立计算基准的特定时间段称为“基准期”,将用于计算铁钢比变化对企业能耗影响的特定时间段称为“统计期”。本文仅考虑铁水、烧结矿自产、自用的情况;同时,考虑轧钢工序生产结构相对稳定,且其变化对吨钢综合能

耗的影响较小,因此假设轧钢工序钢比系数和工序能耗不变,轧钢工序变化对吨钢综合能耗的影响不纳入分析。

2.1 铁钢比变化对企业能耗主要影响

改变吨钢废钢消耗会使铁钢比发生改变,提高炼钢钢铁料消耗中废钢比例,可以使铁钢比降低,吨钢铁水消耗量会减少。由于高炉工序和烧结工序占企业总能耗的 60%~70%,在不考虑铁水、烧结矿外销和外购情况下,根据系统节能原理^[17],吨钢铁水消耗量减少能够使企业吨钢综合能耗明显下降^[18-19]。通常情况下,长流程钢铁企业自产焦炭和球团不外销或少量外销,铁钢比下降时,吨钢综合能耗会相应减少。但如果企业自产焦炭和球团外销量大幅增加,即使铁钢比下降,可能也会导致吨钢综合能耗上升。

铁钢比降低会导致企业吨钢余热余能发电量减少。根据 e-p 分析法,本文仅考虑铁钢比变化产生的影响,则炼钢前各工序能提供的用于发电的煤气、蒸汽的吨钢折标准煤量必然减少,而一般入转炉废钢比例增加后,在同等工艺控制条件下,由于进入转炉碳素减少,会导致炼钢回收能源量降低,在转炉炼钢工序煤气消耗基本不变前提下,转炉炼钢工序供发电的煤气、蒸汽折标准煤总量也减少,总体上铁钢比下降时,吨钢余热余能发电量也下降^[20-22],但用于发电的余热余能总量可能有增有减。

除了余热余能发电以外,钢铁企业公辅系统其他部分耗能影响较小,在分析铁钢比对吨钢综合能耗的影响时可以忽略不计。

2.2 铁钢比变化对吨钢综合能耗影响定量计算方法

2.2.1 铁钢比变化对吨钢综合能耗影响

铁钢比变化对吨钢综合能耗影响计算式为

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 \quad (2)$$

式中: ΔE 为铁钢比变化对吨钢综合能耗影响, kgce/t(粗钢); ΔE_1 为吨钢铁水消耗变化导致的企业吨钢综合能耗变化, kgce/t(粗钢); ΔE_2 为转炉炼钢工序能耗变化导致企业吨钢综合能耗变化, kgce/t(粗钢); ΔE_3 为回收煤气、蒸汽发电变化导致企业吨钢综合能耗变化, kgce/t(粗钢)。

为了更好地衡量和比较不同案例情况下的铁钢比变化对吨钢综合能耗的影响大小,增设单位铁钢比变化对吨钢综合能耗影响分析,即铁钢比每变化 0.01 时吨钢综合能耗的变化量,计算式为

$$\Delta E' = |\Delta E \div [(p_{II} - p_I) \div 0.01]| \quad (3)$$

式中: $\Delta E'$ 为单位铁钢比变化对吨钢综合能耗影响(铁钢比每变化 0.01 时吨钢综合能耗变化量), kgce/t(粗钢); p_I 为基准期铁钢比, t/t; p_{II} 为统计期铁钢比, t/t。

2.2.2 吨钢铁水消耗变化对吨钢综合能耗影响

吨钢铁水消耗变化导致的企业吨钢综合能耗变化计算式为

$$\Delta E_1 = (e_{LJI} \times a_{LJI} + e_{SJI} \times a_{SJI} + e_{QTI} \times a_{QTI} + e_{GLI}) \times (p_{II} - p_I) \quad (4)$$

式中: e_{LJI} 为基准期炼焦工序能耗, kgce/t; a_{LJI} 为基准期铁前工序消耗自产干全焦量与高炉工序生铁产量比值, t/t; e_{SJI} 为基准期烧结工序能耗, kgce/t; a_{SJI} 为基准期高炉工序消耗自产烧结矿量与高炉工序生铁产量比值, t/t; e_{QTI} 为基准期球团工序能耗, kgce/t; a_{QTI} 为基准期高炉工序消耗自产球团矿量与高炉工序生铁产量比值, t/t; e_{GLI} 为基准期高炉工序能耗, kgce/t。

2.2.3 转炉炼钢工序能耗变化对吨钢综合能耗影响

转炉炼钢工序能耗变化导致企业吨钢综合能耗变化计算式为

$$\Delta E_2 = e_{ZLII} - e_{ZLI} \quad (5)$$

式中: e_{ZLII} 为统计期转炉炼钢工序能耗, kgce/t; e_{ZLI} 为基准期转炉炼钢工序能耗, kgce/t。

2.2.4 回收煤气、蒸汽发电变化对吨钢综合能耗影响

回收煤气、蒸汽发电变化对吨钢综合能耗影响计算式为

$$\Delta E_3 = \Delta E_{MQ} + \Delta E_{ZQ} \quad (6)$$

式中: ΔE_{MQ} 为回收煤气发电量变化导致企业吨钢综合能耗变化, kgce/t; ΔE_{ZQ} 为相关工序回收蒸汽发电量变化导致企业吨钢综合能耗变化, kgce/t。

铁钢比变化引起的吨钢可用于发电的回收煤气折标准煤量变化为

$$\Delta Q_{MQ} = [(q_{LJmhI} - q_{LJmxI}) \times a_{LJI} + q_{SjmxI} \times a_{SJI} + q_{QTxmI} \times a_{QTI} + (q_{GLmhI} - q_{GLmxI})] \times (p_{II} - p_I) + [(q_{ZLmhII} - q_{ZLmxII}) - (q_{ZLmhI} - q_{ZLmxI})] \quad (7)$$

式中: ΔQ_{MQ} 为相关工序吨钢可用于发电的回收煤气折标准煤量变化, kgce/t; q_{LJmhI} 为基准期炼焦工序吨焦回收煤气折标准煤量, kgce/t; q_{LJmxI} 为基准期炼焦工序吨焦消耗煤气折标准煤量, kgce/t; q_{SjmxI} 为基准期烧结工序吨矿消耗煤气折标准煤量, kgce/t; q_{QTxmI} 为基准期球团工序吨矿消耗煤气

折标准煤量, kgce/t; $q_{\text{GLmh I}}$ 为基准期高炉工序吨铁回收煤气折标准煤量, kgce/t; $q_{\text{GLmx I}}$ 为基准期高炉工序吨铁消耗煤气折标准煤量, kgce/t; $q_{\text{ZLmh I}}$ 为基准期转炉炼钢工序吨钢回收煤气折标准煤量, kgce/t; $q_{\text{ZLmx I}}$ 为基准期转炉炼钢工序吨钢消耗煤气折标准煤量, kgce/t; $q_{\text{ZLmh II}}$ 为统计期转炉炼钢工序吨钢回收煤气折标准煤量, kgce/t; $q_{\text{ZLmx II}}$ 为统计期转炉炼钢工序吨钢消耗煤气折标准煤量, kgce/t。

铁钢比变化导致相关工序吨钢回收煤气发电量变化和炼焦、烧结、球团、高炉、转炉等相关工序耗电量之和与粗钢产量比值的变化, 进而引起企业吨钢综合能耗变化为

$$\Delta E_{\text{MQ}} = \Delta e - \Delta Q_{\text{MQ}} \times \eta_{\text{MQ}} \quad (8)$$

式中: ΔE_{MQ} 为回收煤气发电量变化导致企业吨钢综合能耗变化, kgce/t; Δe 为铁钢比变化后炼焦、烧结、球团、高炉、转炉等相关工序耗电量之和与粗钢产量比值的变化; η_{MQ} 为基准期回收煤气发电机组平均供电热效率(按纯凝机组计算)。

由于铁钢比变化引起的铁前工序以及炼钢工序电耗变化对企业吨钢综合能耗的影响已包含在 ΔE_1 和 ΔE_2 中, 为避免重复计算, 略去 Δe , 则回收煤气发电量变化对企业吨钢综合能耗的影响计算式(8)简化为

$$\Delta E_{\text{MQ}} = -\Delta Q_{\text{MQ}} \times \eta_{\text{MQ}} \quad (9)$$

炼焦工序吨钢可用于发电的回收蒸汽折标准煤量变化计算式为

$$\Delta Q_{\text{LJZQ}} = q_{\text{LJzq I}} \times a_{\text{LJ I}} \times (p_{\text{II}} - p_{\text{I}}) \quad (10)$$

式中: ΔQ_{LJZQ} 为炼焦工序吨钢可用于发电的回收蒸汽折标准煤量变化, kgce/t; $q_{\text{LJzq I}}$ 为基准期炼焦工序吨焦输出用于发电蒸汽折标准煤量, kgce/t。

相关工序吨钢可用于发电的回收蒸汽折标准煤量变化计算式为

$$\Delta Q_{\text{SJZQ}} = q_{\text{SJzq I}} \times a_{\text{SJ I}} \times (p_{\text{II}} - p_{\text{I}}) \quad (11)$$

式中: ΔQ_{SJZQ} 为相关工序吨钢可用于发电的回收蒸汽折标准煤量变化, kgce/t; $q_{\text{SJzq I}}$ 为基准期烧结工序吨矿输出用于发电蒸汽折标准煤量, kgce/t。

相关工序吨钢可用于发电的回收蒸汽折标准煤量变化计算式为

$$\Delta Q_{\text{LGZQ}} = q_{\text{ZLzq II}} - q_{\text{ZLzq I}} \quad (12)$$

式中: ΔQ_{LGZQ} 为相关工序吨钢可用于发电的回收蒸汽折标准煤量变化, kgce/t; $q_{\text{ZLzq I}}$ 为基准期转炉炼钢工序吨钢输出用于发电蒸汽折标准煤量, kgce/t; $q_{\text{ZLzq II}}$ 为统计期转炉炼钢工序吨钢输出用于发电蒸

汽折标准煤量, kgce/t。

铁钢比变化导致相关工序吨钢回收蒸汽发电量变化和炼焦、烧结、球团、高炉、转炉等相关工序耗电量之和与粗钢产量比值的变化, 进而引起企业吨钢综合能耗变化为

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{ZQ}} = & \Delta e - \Delta Q_{\text{LJZQ}} \times \eta_{\text{LJZQ}} - \\ & \Delta Q_{\text{SJZQ}} \times \eta_{\text{SJZQ}} - \Delta Q_{\text{LGZQ}} \times \eta_{\text{LGZQ}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ΔE_{ZQ} 为相关工序回收蒸汽发电量变化导致企业吨钢综合能耗变化, kgce/t; η_{LJZQ} 为基准期炼焦工序输出蒸汽发电机组平均供电热效率(按纯凝机组计算); η_{SJZQ} 为基准期烧结工序输出蒸汽发电机组平均供电热效率(按纯凝机组计算); η_{LGZQ} 为基准期炼钢工序输出蒸汽发电机组平均供电热效率(按纯凝机组计算)。

同前, 由于铁钢比变化引起的铁前工序以及炼钢工序电耗变化对企业吨钢综合能耗的影响已包含在 ΔE_1 和 ΔE_2 中, 为避免重复计算, 略去 Δe , 则回收蒸汽发电量变化对企业吨钢综合能耗的影响计算式(13)简化为

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{ZQ}} = & -\Delta Q_{\text{LJZQ}} \times \eta_{\text{LJZQ}} - \Delta Q_{\text{SJZQ}} \times \\ & \eta_{\text{SJZQ}} - \Delta Q_{\text{LGZQ}} \times \eta_{\text{LGZQ}} \end{aligned} \quad (14)$$

3 铁钢比变化影响吨钢综合能耗定量分析

以对某几个长流程钢铁企业数据综合分析为例, 铁钢比从基准期 0.950 降低至统计期 0.790, 从 3 个方面分析其对企业吨钢综合能耗影响, 在此基础上给出了单位铁钢比(0.01)对吨钢综合能耗的影响。

(1) 吨钢铁水消耗变化导致的企业吨钢综合能耗变化 ΔE_1 。本案例中吨钢铁水比变化从基准期 0.950 降低至统计期 0.790, 下降达到 0.160, 综合考虑焦比、烧结矿比等铁前工序影响, 影响吨钢综合能耗下降 71.282 kgce/t(粗钢), 见表 1。

(2) 转炉炼钢工序能耗变化导致企业吨钢综合能耗变化 ΔE_2 。统计期与基准期转炉炼钢工序能耗变化不大, 影响企业吨钢综合能耗下降 1 kgce/t, 见表 2。

(3) 回收煤气、蒸汽发电变化导致企业吨钢综合能耗变化 ΔE_3 。由于铁钢比影响煤气、蒸汽回收, 导致自发电变化, 间接影响吨钢综合能耗分别增加 7.887、1.800 kgce/t, 合计影响增加吨钢综合能耗 9.687 kgce/t, 见表 3。

表 1 吨钢铁水变化影响能耗分析

Table 1 Analysis of energy consumption affected by hot metal per ton of steel			
序号	符号	单位	数值
1	ΔE_1	kgce/t	-71.282
1-1	$e_{LJ\text{ I}}$	kgce/t	105.000
1-2	$a_{LJ\text{ I}}$	t/t	0.340
1-3	$e_{SJ\text{ I}}$	kgce/t	44.470
1-4	$a_{SJ\text{ I}}$	t/t	1.300
1-5	$e_{QT\text{ I}}$	kgce/t	15.000
1-6	$a_{QT\text{ I}}$	t/t	0.000
1-7	$e_{GL\text{ I}}$	kgce/t	352.000
1-8	$p_{\text{ I}}$	t/t	0.950
1-9	$p_{\text{ II}}$	t/t	0.790

表 2 转炉炼钢工序能耗变化影响分析

Table 2 Analysis on influence of energy consumption in converter steel-making process			
序号	符号	单位	数值
2	ΔE_2	kgce/t	-1.000
2-1	$e_{ZL\text{ I}}$	kgce/t	-30.000
2-2	$e_{ZL\text{ II}}$	kgce/t	-31.000

综上分析,本案例中铁钢比影响吨钢综合能耗合计下降 62.595 kgce/t,其中钢比系数影响最大,吨钢余能回收影响次之,炼钢工序能耗下降空间有限,影响最小。因此,依次考虑降低高炉的钢比系数是实现铁钢比结构节能优先考虑的途径。本案例中铁钢比平均每下降 0.01,即单位铁钢比影响吨钢综合能耗下降 3.912 kgce/t(表 4),节能效果显著。

4 结论

(1)在碳达峰、碳中和背景下,降低铁钢比是推进现有高比例长流程钢铁企业能效提升、节能降碳的有效路径,本文结合钢铁企业实际提出了降低铁钢比的主要途径。

(2)在传统的铁前工序钢比系数、炼钢工序能耗变化影响的基础上,增加了由于铁钢比变化导致吨钢余热余能回收对吨钢综合能耗的影响,并提出了铁钢比变化对长流程钢铁企业吨钢综合能耗影响定量分析方法。

(3)通过钢铁企业实际数据进行案例定量分析,对 3 个方面的影响大小进行了排序,给出了高炉钢比系数是铁钢比结构节能的重点参数;在该案例条件下,单位铁钢比(平均每降低0.01)影响吨钢综

表 3 回收余能变化影响能耗分析

Table 3 Analysis of energy consumption affected by the recovered residual energy			
序号	符号	单位	数值
3	ΔE_3	kgce/t	9.687
3-1	ΔE_{MQ}	kgce/t	7.887
1)	$q_{LJmh\text{ I}}$	kgce/t	246.000
2)	$q_{LJmx\text{ I}}$	kgce/t	128.000
3)	$q_{SJmx\text{ I}}$	kgce/t	2.200
4)	$q_{QTMx\text{ I}}$	kgce/t	23.000
5)	$q_{GLmh\text{ I}}$	kgce/t	170.000
6)	$q_{GLmx\text{ I}}$	kgce/t	58.000
7)	$q_{ZLmh\text{ I}}$	kgce/t	27.500
8)	$q_{ZLmx\text{ I}}$	kgce/t	0.900
9)	$q_{ZLmh\text{ II}}$	kgce/t	25.000
10)	$q_{ZLmx\text{ II}}$	kgce/t	0.800
11)	ΔQ_{MQ}	kgce/t	-27.197
12)	η_{MQ}	%	29.000
3-2	ΔE_{ZQ}	kgce/t	1.800
3-2-1			
1)	$q_{LJzq\text{ I}}$	kgce/t	59.000
2)	ΔQ_{LJZQ}	kgce/t	-3.210
3)	η_{LJZQ}	%	31.00
3-2-2			
1)	$q_{SJzq\text{ I}}$	kgce/t	9.000
2)	ΔQ_{SJZQ}	kgce/t	-1.872
3)	η_{SJZQ}	%	18.00
3-2-3			
1)	$q_{ZLzq\text{ I}}$	kgce/t	8.000
2)	$q_{ZLzq\text{ II}}$	kgce/t	4.400
3)	ΔQ_{LGZQ}	kgce/t	-3.600
4)	η_{LGZQ}	%	13.00

表 4 铁钢比变化综合影响能耗分析

Table 4 Analysis of comprehensive influence of iron/steel ratio impact on energy consumption			
序号	符号	单位	数值
1	ΔE_1	kgce/t	-71.282
2	ΔE_2	kgce/t	-1.000
3	ΔE_3	kgce/t	9.687
4	ΔE	kgce/t	-62.595
5	$p_{\text{ II}} - p_{\text{ I}}$	%	-16.0
6	$\Delta E'$	kgce/t	3.912

合能耗下降 3.912 kgce/t,吨钢综合能耗下降效果明显。

参考文献:

[1] 中国宝武钢铁集团有限公司. 一份镌刻在钢铁发展史册上的时代答卷——记中国宝武发布碳中和行动方案的“心路历程”[J]. 企业文明,2022(1):20. (China Baowu Steel Group Co.,Ltd. An era answer inscribed in the history of iron and steel development—On the "mental journey" of China Baowu's carbon neutralization action plan[J]. Enterprise Civilization, 2022(1):20.)

[2] 贾林海. 陈德荣:为中国钢铁高质量发展鼓与呼[N]. 中国冶金报,2021-08-03(001). (JIA Lin-hai. CHEN De-rong: Call for the high-quality development of China's iron and steel industry[N]. China Metallurgical News,2021-08-03(001).)

[3] 张琦,沈佳林,许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. 钢铁,2021,56(10):152. (ZHANG Qi, SHEN Jia-lin, XU Li-song. Carbon peak and low-carbon transition path of China's iron and steel industry[J]. Iron and Steel,2021,56(10):152.)

[4] 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,1996,15(1):11. (XIE An-guo, LU Zhong-wu. The way of reducing the ratio of iron to steel and the analysis of energy-saving result[J]. Energy for Metallurgical Industry, 1996,15(1):11.)

[5] 张福明,颜建新,殷瑞钰. 钢铁制造流程炼铁区段耗散结构的解析[J]. 钢铁,2022,57(3):1. (ZHANG Fu-ming, XIE Jian-xin, YIN Rui-yu. Analysis on dissipative structure of iron making procedure for iron and steel manufacturing process[J]. Iron and Steel,2022,57(3):1.)

[6] 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.)

[7] 上官方钦,刘正东,殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金,2021,31(9):15. (SHANGGUAN Fang-qin, LIU Zheng-dong, YIN Rui-yu. Study on implementation path of "carbon peak" and "carbon neutrality" in steel industry in China[J]. China Metallurgy,2021,31(9):15.)

[8] 朱晓波. 杨晓东:中国钢铁工业低碳低耗发展之路怎么走? [N]. 中国冶金报,2017-05-17(002). (ZHU Xiao-bo. YANG Xiao-dong: How to develop China's iron and steel industry with low carbon and low consumption? [N]. China Metallurgical News,2017-05-17(002).)

[9] 编辑部. 降低铁钢比是钢铁工业绿色发展的必由之路[J]. 柳钢科技,2020(6):2. (Editorial Office. Reducing iron/steel ratio is the only way for the green development of iron and steel industry[J]. Liugang Keji,2020(6):2.)

[10] HU Rui, ZHANG Chao. Discussion on energy conservation strategies for steel industry:Based a Chinese firm[J]. Journal

of Cleaner Production,2017,166:66.

[11] 张荣华,唐运平,张志扬. 钢铁工业绿色生产与绿色管理[M]. 北京:中国环境科学出版社,2011. (ZHANG Rong-hua, TANG Yun-ping, ZHANG Zhi-yang. Green Production and Green Management in Iron and Steel Industry[M]. Beijing:China Environmental Science Press,2011.)

[12] 张战波. 钢铁企业能源规划与节能技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2014. (ZHANG Zhan-bo. Energy Planning and Energy Saving Technology of Iron and Steel Enterprises[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2014.)

[13] 陆钟武,谢安国,周大刚. 再论中国钢铁工业节能方向和途径[J]. 钢铁,1996,31(2):54. (LU Zhong-wu, XIE An-guo, ZHOU Da-gang. More on the directions and measures of energy conservation of Chinese steel industry[J]. Iron and Steel,1996,31(2):54.)

[14] 李烈军. 钢铁行业节能减排的现状与途径[J]. 材料研究与应用,2008,2(4):328. (LI Lie-jun. The status and approach of energy-saving and emission reduction in iron and steel industry[J]. Materials Research and Application, 2008,2(4):328.)

[15] 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,2006,27(9):979. (CAI Jiu-ju, WANG Jian-jun, LU Zhong-wu, et al. Material flow and energy flow in iron and steel industry and correlation between them[J]. Journal of Northeastern University, 2006,27(9):979.)

[16] 郑忠,连小圆,沈新月,等. 钢铁生产流程物质转化与能量转换评价指标[J]. 钢铁,2021,56(6):120. (ZHENG Zhong, LIAN Xiao-yuan, SHEN Xin-yue, et al. Evaluation indexes of material transformation and energy conversion in iron and steel production[J]. Iron and Steel,2021,56(6):120.)

[17] 陆钟武,蔡九菊. 系统节能基础[M]. 沈阳:东北大学出版社,2010. (LU Zhong-wu, CAI Jiu-ju. Fundamentals of Systematic Energy Conservation[M]. Shenyang:Northeast University Press,2010.)

[18] 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(5):1. (CAI Jiu-ju, SUN Weng-qiang. Systems energy conservation and scientific energy utilization of iron and steel industry in China[J]. Iron and Steel,2012,47(5):1.)

[19] 张琦,蔡九菊. 钢铁制造流程系统节能与能效提升[J]. 钢铁,2021,56(8):32. (ZHANG Qi, CAI Jiu-ju. Systemic energy saving and energy efficiency improving of iron and steel making process[J]. Iron and Steel,2021,56(8):32.)

[20] 王绍文. 冶金工业节能与余热利用技术指南[M]. 北京:冶金工业出版社,2010. (WANG Shao-wen. Technical Guide for Energy Saving and Waste Heat Utilization in Metallurgical Industry[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2010.)

[21] 王维兴. 我国钢铁工业能耗现状与节能潜力分析[J]. 冶金管理,2017(8):50. (WANG Wei-xing. Analysis of energy consumption status and energy saving potential in Chinese steel industry[J]. China Steel Focus,2017(8):50.)

[22] 方文,杨宁川,游香米,等. 高效低耗转炉大废钢比技术路径

研究[J]. 炼钢, 2020, 36(6): 8. (FANG Wen, YANG Ning-chuan, YOU Xiang-mi, et al. Research on high efficiency low

consumption high scrap ratio converter[J]. Steelmaking, 2020, 36(6): 8.)

作者简介



韩 晶 同济大学供热、通风与空调工程学士, 上海理工大学动力工程硕士。中国宝武集团能源环保部环保处处长, 高级工程师, 硕士。长期主要从事钢铁行业环境管理政策及治理技术研究, 上海市生态经济学会副会长, 上海市环境科学学会理事, 上海市循环经济协会理事。大学毕业后, 在钢铁企业从事能源管理工作长达 21 年, 对长流程钢铁企业能源介质系统的生产运行、平衡调配有比较全面的了解, 在企业节能管理与能源利用评价方面具有丰富的实践经验。较早参与世界银行、德意志银行等与宝钢的清洁发展机制合作项目, 作为宝武(宝钢)集团碳减排办公室主任(兼)组织集团下属单位参与全国碳交易试点工作, 在碳减排领域积累了长达十几年的工作经验。后期在集团公司能源环保部环保处担任处长, 负责企业环境保护管理管理与战略、钢铁企业循环经济相关技术、碳减排与碳交易等工作。2007、2008 年度均荣获上海市节能先进个人荣誉称号, 2015 年度荣获“上海市环境保护先进个人”荣誉。作为主要人员参与的《特大型钢铁企业环保效能监察体系构建》获 2017 年上海市企业管理现代化创新三等奖, 作为主要人员参与《创新构建新型评价指标体系, 引领绿色城市钢厂建设》获 2020 年冶金企业管理现代化创新成果二等奖。