电弧炉能量损失结构分析与能量供需平衡模型

蔺学浩[1,2,3]，马建超[1,2,3]，王　耀[1,2,3]，薛海蒙[1,2,3]
（1 江苏省(沙钢)钢铁研究院，张家港 215625；2 江苏省新能源用钢及绿色制造重点实验室，
张家港 215625；3 江苏沙钢钢铁有限公司，张家港 215625）

摘　要：针对100 t电弧炉冶炼过程，依托工业实际生产数据，对冶炼过程中各项能量损失进行精确拆分与定量分析，系统揭示了冶炼周期内能量损失的演化规律，构建了电弧炉冶炼过程电能供需平衡数学模型。结果表明：每增加一次废钢加料，过程能量损失增量约454.3 kWh；水冷构件热交换是电弧炉能量损失的主要途径，损失能量达8 000~10 000 kWh，占总能量的13%~18%；烟气烟尘能量损失与铁水比呈显著正相关，铁水比越高，能量损失越大，该部分占总能量的5%~10%。熔池、电极、电弧等产生的高温热辐射主要被水冷炉壁和炉盖吸收，炉外热辐射损失相对较低，仅为1.1%左右。不同废钢料型的化学热为50.0 kWh/t左右，受带渣量、挥发分和杂质含量的差异影响，废钢综合能量需求为351.5~424.8 kWh/t。基于分阶段能量损失特征和能量供需平衡构建电能供需平衡模型，计算偏差在±10 kWh/t范围内的数据占比达95.05%，模型整体误差小于3%。研究成果可为电弧炉供电曲线智能优化、节能降耗提供可靠的理论依据与数据支撑。

关键词：电弧炉；能量损失；水冷；供需平衡
DOI:10.20057/j.1003-8620.N260130　　**中图分类号：**TF741.5

Energy-loss Structure and Energy Supply-demand Balance Model for Electric Arc Furnace

Lin Xuehao[1,2,3], Ma Jianchao[1,2,3], Wang Yao[1,2,3], Xue Haimeng[1,2,3]
(1 Institute of Research of Iron and Steel, Jiangsu Shagang Steel Co., Ltd., Zhangjiagang 215625, China;
2 Jiangsu Key Laboratory of New Energy Steel and Green Manufacturing, Zhangjiagang 215625, China;
3 Jiangsu Shagang Steel Co., Ltd., Zhangjiagang 215625, China)

Abstract: The energy loss structure and energy supply-demand balance during the smelting process of a 100 t electric arc furnace (EAF) were quantitatively analyzed. Based on actual industrial production data, individual energy losses during the smelting process were quantitatively decomposed and analyzed, the evolution patterns of energy loss throughout the smelting cycle were systematically revealed, and a mathematical model for the electrical energy supply-demand balance of the EAF smelting process was established. The results show that each additional scrap charge increases the process energy loss by approximately 454.3 kWh. Heat dissipation through water-cooled components is the most significant energy loss pathway of the EAF, with the lost energy reaching 8 000 kWh-10 000 kWh, accounting for 13%-18% of the total energy. The sensible heat loss of flue gas and dust is significantly and positively correlated with the hot metal ratio: the higher the hot metal ratio, the greater the flue gas energy loss, which accounts for 5%-10% of the total energy. The high-temperature thermal radiation generated from the bath, electrodes, and arcs is primarily absorbed by the water-cooled furnace walls and roof, while the external thermal radiation loss is relatively low, accounting for approximately 1.1%. The chemical heat of different scrap types is approximately 50.0 kWh/t; due to variations in slag carryover, volatile matter, and impurity content, the overall energy demand of scrap ranges from 351.5 to 424.8 kWh/t. Based on the staged energy loss characteristics and the energy supply-demand balance, the established model yields a proportion of 95.05% for data with calculation deviations within ±10 kWh/t, with an overall model error of less than 3%. The research findings provide a reliable theoretical basis and data support for intelligent optimization of the EAF power supply curve and for energy saving and consumption reduction.

Key Words: EAF; Energy loss; Water Cooling; Supply-demand Balance

电弧炉短流程是钢铁行业实现节能降碳、推动绿色低碳转型的重要工艺路径[1-3]。电弧炉炼钢是电能和化学能的综合应用，不仅需要电极供应电能，还需要适当增加化学能输入，例如：配加焦粒、

基金项目：新材料重点研发及应用国家科技重大专项(2025ZD0611200)
作者简介：蔺学浩(1989—)，男，硕士，工程师；　**E-mail:**xiyanglxh@163.com；　**收稿日期：**2026-08-18
通信作者：马建超(1978—)，男，博士，正高级工程师；　**E-mail:**majianchao@126.com
Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

生铁、DRI、HBI、铁水等进行配碳，利用集束氧枪喷吹煤气和氧气进行脱碳升温，冶炼后期喷吹炭粉造泡沫渣埋弧[4-7]。电弧炉输入的能量不仅用于废钢和炉渣的熔化，而且还有大量能量以热辐射、冷却水对流、烟气显热等形式损失，能量利用率是制约短流程生产成本的核心要素。国内外学者开展电弧炉电能供需平衡的研究，Kirschen 等[8]建立电弧炉物料-能量平衡的数学模型，分析 DRI、废钢、泡沫渣对电能消耗的影响。Arzpeyma 等[9-10]进一步完善耦合模型，解析供氧量、HBI、造渣剂、炉渣成分、能量损失等对电能需求。李龙飞等[11]研究了电弧炉冶炼能量平衡与能效分析，以刨花废钢为原料，系统解析了电弧炉冶炼过程中能量输入、能量损失以及能源效率。电弧炉冶炼是一个能量和质量的动态平衡过程，合理的化学能输入配合强化供氧技术，不仅能够降低电弧炉能耗，也可提高电弧炉钢水质量[12-14]。目前，针对不同冶炼阶段能量损失的演变规律、废钢料型对能量平衡的影响等缺乏系统性定量分析。通过分析 100 t 电弧炉冶炼过程的能量损失结构，探寻铁水、废钢、烟气烟尘、冷却水及辐射等对能量消耗的影响规律，建立能量供需平衡模型，为电弧炉不同阶段供电和供氧工艺优化提供数据支撑。

1　电弧炉的工艺技术参数

电弧炉作为再生废钢冶炼生产的核心设备和高耗能设备，其能量供需平衡对成本和冶炼节奏的影响尤为重要[11]。某厂 100 t 电弧炉设备和工艺技术参数见表 1，采用炉壁与熔池分体式设计，主体设备结构主要由供电系统、炉底、熔池、水冷炉壁、水冷炉盖、小炉盖等组成，100 t 电弧炉示意图如图 1 所示。供电系统由水冷电缆、横臂、石墨电极组成；大炉盖由水冷管道组成，并设有渣料加入孔和除尘第四孔；小炉盖采用耐材一体成型，防止电弧击穿，减少起弧时的热辐射；炉壁由 14 块竖式水冷板、1 块横式冷区水冷板、炉门水冷板和 4 支水冷炉壁氧枪组成；铁水通过炉后的铁水溜槽加入熔池。

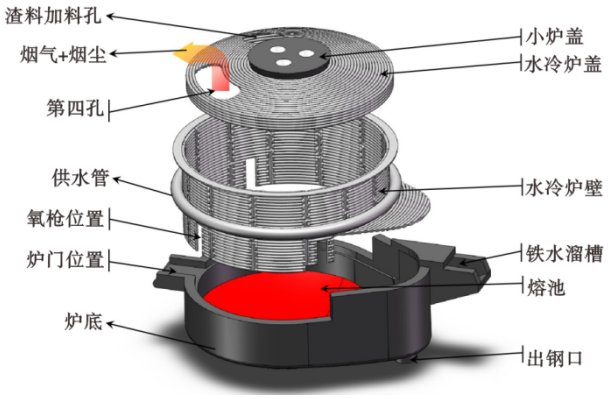


图 1　100 t 电弧炉示意图

Fig. 1　Schematic diagram of a 100 t electric arc furnace

2　电弧炉能量损失结构分析

电弧炉冶炼过程存在不同时间阶段、位置、散热形式等多维度的能量损耗，能量损失构成复杂，多重能量损耗显著降低电弧炉的能量利用效率。电弧炉能量损失主要包括：1）水冷构件热交换损失，水冷电缆、水冷炉盖、水冷炉壁、水冷氧枪等部件持续与高温环境接触，通过冷却水热交换带走大量热量，2）热辐射损失，高温熔池、炉底等高温部件以热辐射形式散失能量，3）烟气烟尘显热：冶炼过程中化学反应产生的高温烟气裹挟烟尘排出炉膛，并携带大量能量向外流失。

2.1　水冷构件的热交换损失

2.1.1　水冷炉壁能量损失

100 t 电弧炉的水冷系统主要包含两个部分，一部分是炉壁冷却水，另一部分是 4 支水冷炉壁氧枪。炉壁的冷却水流量为 700~1 000 m^3/h，冷却水进出口

表 1　电弧炉主要工艺技术参数

Table 1　Process technical parameters of electric arc furnace

项目	设备参数	项目	技术参数
公称容量/t	100	铁水比/%	0~70
留钢量/t	10~20	冶炼周期/min	45~70
变压器容量/MVA	70	电耗/(kWh·t^{-1})	50~380
炉壳直径/mm	6 500	氧气消耗/(m^3·t^{-1})	30~50
熔池钢液深度/mm	800~850	石灰消耗/(kg·t^{-1})	25~40
电极直径/mm	550	轻烧白云石消耗/(kg·t^{-1})	5~10
极心圆直径/mm	1 250	出钢温度/℃	1 600~1 650
出钢方式	EBT	废钢收得率/%	88~92

温度差3.0~40.0 ℃。铁水比在45%~55%时水冷炉壁冷却水的温度变化趋势,如图2所示,根据冷却水温度变化曲线和式(1)计算不同阶段能量损失速率。废钢铁加入后吸收炉内残余热量,炉膛内温度逐步下降,炉壁冷却水温度呈下降趋势,能量损失速率在4 500~5 300 kW;送电穿井期间炉膛产生热量大多被废钢吸收,炉壁冷却水温度进一步降低,穿井结束后熔池基本形成,炉壁冷却水能量损失达到最低,在3 000~3 500 kW。废钢熔化阶段,碳氧反应速率逐步提高,炉膛内温度和热辐射显著增加,炉壁冷却水温度和能量损失持续升高。在送电冶炼20~25 min时废钢完全熔清,脱碳速率和烟气生成量达到最大值,同时水冷炉壁吸热的热通量达到最大值,10 000~12 000 kW。随着电弧炉持续送电,虽然熔池温度不断升高,但是冶炼后期为全程泡沫渣控制,高温电弧完全埋入渣中,炉膛内热辐射量得到有效控制,随碳含量减少碳氧反应速率降低,高温烟气烟尘生成量减少,炉壁冷却水能量损失速率逐渐降低至8 500~9 000 kW。出钢结束后炉壁冷却水温度持续降低,此时炉壁冷却水吸热主要来自熔池残余热量和耐材蓄热。整个冶炼周期内,水冷炉壁冷却水带走能量约4 500~5 000 kWh。

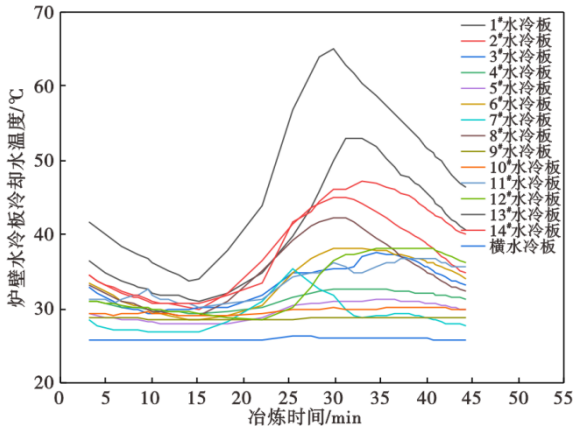


图2 水冷炉壁冷却水的温度变化

Fig. 2 The temperature-variation trend of furnace wall cooling water

$$P_i = 4.63 \times 10^{-3} \times \frac{1}{\Delta t_i} \times \sum_{j=1}^{14} C\rho Q \int_{t_0}^{t_n} f_j(t)\,dt \quad (1)$$

式中,P_i为不同阶段炉壁能量损失速率,kW;Δt_i为冶炼阶段时间间隔,min;C为冷却水的比热容,kJ/(kg·℃);Q为冷却水流量,m³/h;ρ为冷却水密度,kg/m³;t_0为i阶段的初始时间,min;t_n为i阶段的结束时间,min;$f_j(t)$为i阶段j号水冷板的温度变化曲线。

4支炉壁氧枪的冷却水流量为30~50 m³/h,冷却水进出口温度差5.0~15.0 ℃,炉壁氧枪冷却水的温度变化趋势如图3所示,炉壁氧枪冷却水温度主要与熔池温度和供氧强度有关,随着供氧强度增加,炉壁氧枪能量损失速率由120 kW提高到450 kW,炉壁氧枪冷却水每炉钢带走能量共150~200 kWh。

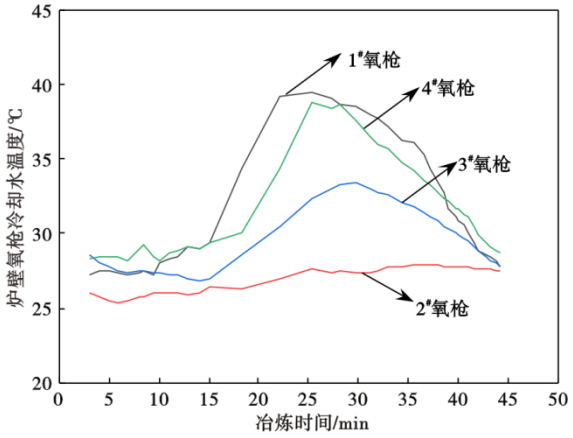


图3 炉壁氧枪冷却水的温度变化

Fig. 3 The temperature-variation trend of oxygen lance cooling water

以电极为中心将炉膛分为三个区域,分别为一区、二区、三区,以每块水冷板的吸热量评价各区的能量损失。3#水冷板下的1#氧枪和13#水冷板下的4#氧枪以吹氧脱碳为主,6#水冷板下的2#氧枪以烧嘴模式为主,10#水冷板下的3#氧枪根据冶炼情况灵活调整供氧流量。炉壁氧枪在水平方向的夹角为逆时针10°~30°,吹炼过程中依靠集束氧枪的高速射流带动钢水运动,实现熔池搅拌,加速渣金界面的化学反应。电弧炉能量损失分布如图4所示,一区14#、1#、2#、3#水冷板所在区域的供氧强度弱,其上方对应辅料加料孔,冷料加入后局部温度降低,进一步抑制炉渣发泡,因此,一区泡沫渣效果最差,电弧辐射最为严重,这些区域热辐射与炉壁冷却水换热的能量损失最为严重,根据式(1)计算,14#、1#、2#、3#水冷板的能量损失速率为2 700 kW左右,占炉壁总能量损失的40.6%。二区的2#氧枪供氧强度较弱,但整体泡沫渣向炉门流动,且炉门碳粉枪喷粉造泡沫渣效果较好,因此,二区的泡沫渣效果最优,其能量损失最小,根据式(1)计算,5#~9#水冷板总能量损失速率为1 750 kW左右,占炉壁总能量损失的26.2%。三区4#氧枪以强化供氧为主,碳氧反应强度最高,且13#水冷板上方对应第四孔除尘通道,是

烟气与炉壁对流热负荷最为严重的区域，因此，13#区域致使二区能量损失速率升高，根据式(1)计算，10#~13#水冷板总能量损失速率为2 000 kW左右，占炉壁总能量损失的30.2%。

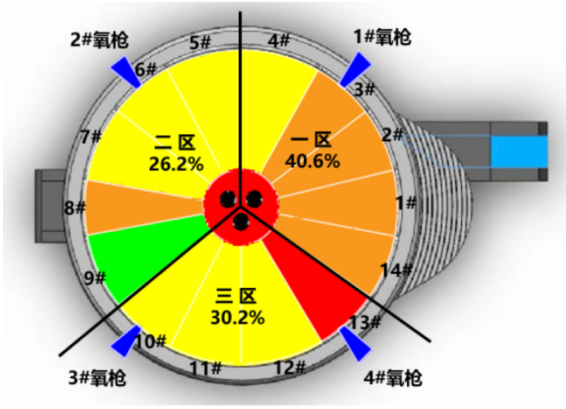


图4　电弧炉能量损失分布

Fig. 4　Distribution of energy losses in electric arc furnace

2.1.2　水冷炉盖能量损失

炉盖的冷却水流量为550~800 m³/h，冷却水进出口温度差3.0~9.2 ℃，炉盖水冷板的吸热如图5所示。随着电弧炉开始送电，炉盖受电弧辐射影响，穿井期间炉盖冷却水温度持续升高。穿井结束后，电弧热辐射基本被废钢吸收，炉盖冷却水温度基本不变。废钢熔化阶段，随着熔池温度升高炉盖冷却水温度迅速升高。废钢熔清后，高温熔池、电弧辐射以及烟气烟尘显热使得炉盖冷却水温度达到最高，呈稳定波动趋势，能量损失速率达到7 500~8 500 kW；开始出钢后炉盖冷却水温度迅速下降。冶炼过程中炉盖冷却水带走能量共4 000~4 500 kWh。

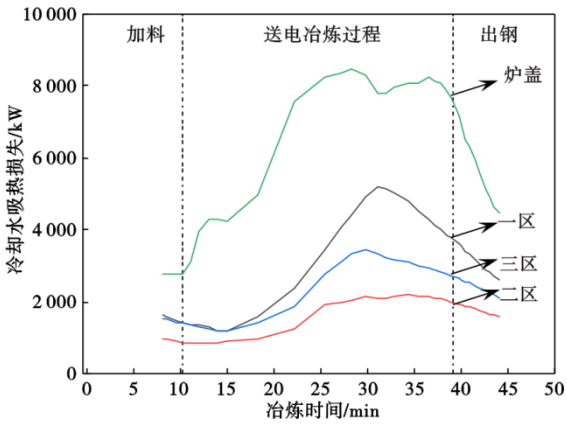


图5　冶炼过程中水冷炉盖和炉壁的能量损失

Fig. 5　Energy loss from water-cooled roof and furnace wall during smelting process

2.1.3　水冷电缆能量损失

水冷电缆的温度变化趋势如图6所示，随送电时间延长，电缆的冷却水温度以0.55~0.82 ℃/min的速率持续升高，停止送电后冷却水温降速率为0.30~0.42 ℃/min。单支电缆冷却流量为15~20 m³/h，总流量为95~110 m³/h，能量损失速率在322~770 kW，整个冶炼过程中，水冷电缆的能量损失在410 kWh左右。

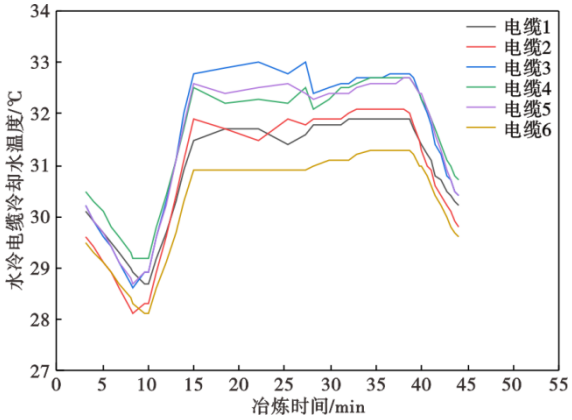


图6　水冷电缆的温度变化趋势

Fig. 6　Temperature-variation trend of the water-cooled cable

2.2　热辐射能量损失

2.2.1　顶装料能量损失

电弧炉装料过程能量损失主要包括：1)炉盖打开后高温钢水与环境的热辐射损失，2)水冷炉盖热交换的损失。顶装料过程能量变化趋势如图7所示，随着炉盖打开高温钢水与环境的热辐射损失迅速增加，水冷炉盖热交换能量不断减少；炉盖完全打开后热辐射损失速率达到15 000 kW左右；废钢加入后，熔池的残余热量被废钢吸收，热辐射损失迅速降低；随着冶炼开始，焦炉煤气、氧气、电能等能量输入持续增加，水冷炉盖的热交换损失不断增加。电弧炉加料时间在2~3 min，单次加料的能量损失为454.3 kWh，其中高温热辐射损失为387.6 kWh、水冷炉盖热交换能量损失为66.7 kWh。废钢装料时间延长主要受行车运行速度和压料影响，随着加料时间的延长，能量损失不断增加。

2.2.2　炉底热辐射损失

由图8中炉底测温数据可见：出钢结束后将炉体前倾，炉内留钢集中在炉门侧，炉底1#、5#测温点的温度呈现缓慢上升，废钢加入后留钢和耐材热量大多被废钢吸收，炉底温度持续降低，后期随着熔

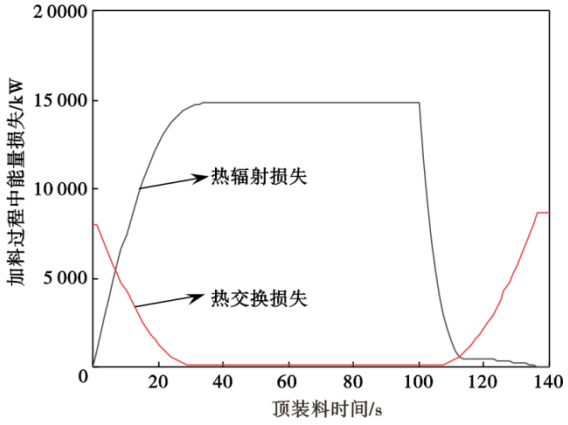


图7 顶装料过程能量变化趋势

Fig. 7 Energy-variation trend during the top-charging process

池温度升高炉底温度逐渐升高。靠近出钢口侧的2#、8#测温点位于冷区,炉底温度在冶炼过程中持续降低,后期随着熔池温度升高而升高,出钢阶段达到最大值,整体温度偏低;炉底中心附近的2#、3#、6#、7#温度基本变化不大,靠近炉门口侧的温度较高,平均245.2 ℃,靠近出钢口侧的温度较低,平均203.5 ℃。电弧炉炉底各个测温点的温度变化趋势各不相同,从炉门口侧至出钢口,炉底热辐射的能量损失逐渐减弱,整体来看热辐射损失随炉底平均温度呈"升-降-升"的特征。依据Stefan-Boltzmann常数,炉底热辐射损失与温度的四次方成正比,炉底能量损失速率如式(2),能量损失速率在132.1~142.4 kW,炉体热辐射能量损失在136 kWh左右。

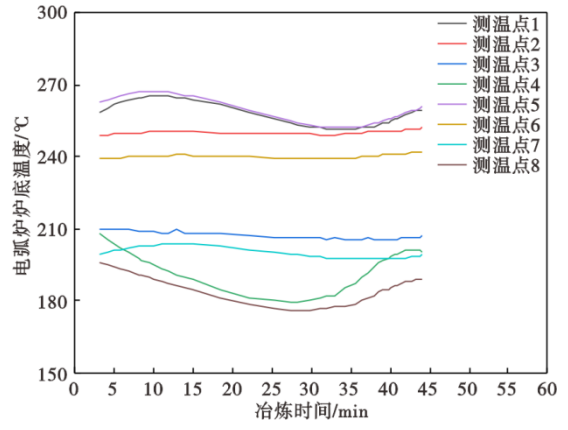


图8 炉底温度变化趋势

Fig. 8 Temperature-variation trend at the bottom of EAF

$$P_{fb} = \epsilon\sigma A\int\left(T(t)^4 - T_0^4\right)dt \qquad (2)$$

式中,P_{fb}为炉底能量损失速率,W;ϵ为电弧炉炉底黑度,0.65;σ为Stefan-Boltzmann常数,通常取5.67×10^{-8},W/(m²·K⁴);A为炉底面积,m²;$T(t)$为随冶炼时间变化的炉底温度,K;T_0为环境温度,K;t为冶炼时间,min。

2.3 高温烟气与烟尘的能量损失

烟气烟尘携带能量主要受铁水比影响,随铁水比增加,吹炼过程的烟尘温度越高,废钢熔化时间和总吹炼时间越短,烟气显热越高。随着铁水比增加,供电时间逐渐降低,供氧时间逐渐升高,铁水比在45%~55%时供电时间和供氧时间达到平衡。铁水比≤50%时,烟气显热主要受炉壁氧枪HOT模式下焦炉煤气/天然气燃烧预热废钢后的残余热量影响和碳氧反应影响,能量损失缓慢增加;当铁水比>50%时,以强供氧为主,焦炉煤气/天然气燃烧的热量远小于碳氧反应带走的烟气显热,因此,铁水比>50%后烟气带走热量迅速升高。烟气烟尘显热携带能量损失达3 000~6 500 kWh,占总能量的5%~10%,具体如图9所示。

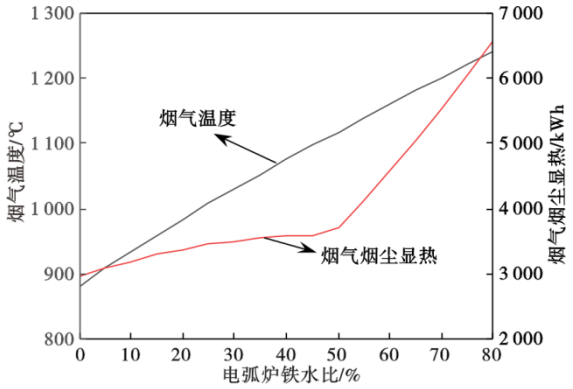


图9 铁水比对烟气显热的影响

Fig. 9 Effect of hot metal ratio on sensible heat loss of flue gas

常规冶炼时铁水比在45%~55%,烟气烟尘带走能量损失为3 500~4 500 kWh。准备阶段为出钢结束后至废钢加料前,加料阶段为炉盖开始打开至电极起弧送电;废钢熔化阶段为送电开始至废钢基本熔清;吹炼阶段为废钢熔清后至吹炼结束。准备阶段:出钢结束后需要进行罐砂、点检耐材等操作,时间在4~8 min,烟气温度在600~1 000 ℃,烟气温度和能量损失速率随时间呈指数迅速降低,准备阶段的能量损失为100~150 kWh。加料阶段:4支炉壁氧枪采用HOLD模式,废钢加入后,熔池中大量残余热量被废钢吸收,烟气温度持续降低,能量损失在40~60 kWh。废钢熔化阶段:送电量、供氧量和焦炉煤气流量逐步增加,碳氧反应速率和熔池温度持续升

高，烟气烟尘显热携带热量持续增加，能量损失速率由3 000 kW提高至9 000 kW左右。吹炼阶段：烟气量和烟气温度基本稳定，烟气烟尘显热携带能量损失速率达9 000~13 000 kW。终点碳含量达到临界碳含量以下后，碳氧反应速率迅速降低，烟气烟尘能量损失速率迅速降低至4 000 kW以下，冶炼过程中烟气温度变化趋势如图10所示。

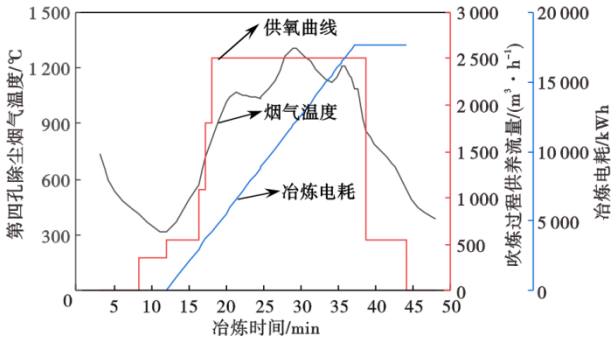


图10　冶炼过程中烟气温度变化趋势

Fig. 10　Temperature-variation trend of flue gas during smelting

3　电弧炉能量平衡的综合分析

3.1　钢铁料对能量需求平衡的影响

不同料型废钢根据钢铁料结构和装料要求，首先在废钢料场分层装入料篮，通过料篮将废钢加入炉内。废钢料型主要包括：生铁、清洁废钢（铸坯切头尾、钢板切头尾、判废铸坯及钢材等内部回收）、重型废钢、中型废钢、小型废钢、破碎料及渣钢等。不同料型废钢的成分、带渣量、挥发分、杂质等含量各不相同，对能量的输入和需求不同。因此，基于中频感应炉熔化试验，试验测定钢铁料的元素含量、带渣量等特征，见表2。渣钢为转炉渣经破碎、磁选后粒度≥100 mm的钢渣混合物，带渣量20%~25%；各类废钢中的挥发分主要为油污、油漆、镀层等，杂质主要为水泥、尘土等富含SiO_2、CaO、Al_2O_3的非金属杂物。

实际生产过程中炉渣碱度控制在3.0~3.5，渣中w[FeO]为20%~25%，出钢温度1 600 ℃左右，终点w[C]在0.06%~0.10%。根据钢铁料化学成分、带渣量、挥发分及杂质的组成，建立物料与能量的平衡，分析钢铁料带入的物理化学能，以及炉渣、烟气、烟尘对能量的需求，具体见表3。铁水的物理热与化学热相对充分，富余热量达181.4 kWh/t。废钢的化学热带入量较少，在0~53.0 kWh/t。废钢熔化为钢水的能量需求最多，在311.0~381.3 kWh/t。根据废钢带渣量、挥发分和杂质的不同，产生烟气、烟尘和炉渣时能量损失各不同，在20.8~113.8 kWh/t。不同类型钢铁料对能量需求各不相同，在-181.4~424.8 kWh/t。根据钢铁料成分组成、加入量和能量需求，建立钢铁料能量供需平衡的计算模型，如式(3)。

$$E_{ba}=(-2.15W_{sci}+0.78W_{scp}+3.15W_{schm}+3.63W_{sche}+3.73W_{scm}+3.80W_{scl}+4.25W_{scs}+3.74W_{scsh})/\sum W_i\eta_i \quad (3)$$

式中，E_{ba}为钢铁料能量需求，kWh/t；W_{sci}为铁水装入量，kg/t；W_{scp}为生铁装入量，kg/t；W_{schm}为清洁废钢加入量，kg/t；W_{sche}为重型废钢加入量，kg/t；W_{scm}为中型废钢加入量，kg/t；W_{scl}为小型废钢加入量，kg/t；W_{scs}为渣钢加入量，kg/t；W_{scsh}为破碎料废钢加入量，kg/t，η_i为废钢钢水收得率，%。

3.2　供需平衡数学模型

通过分析电炉冶炼过程铁水、废钢结构、辅料消耗、焦炉煤气、水冷炉壁和辐射能量损失、冶炼周期、终点温度等因素对电弧炉能量损失结构、供需平衡的影响，构建电能供需平衡数学模型，如式

表2　不同类型钢铁料的成分组成

Table 2　Chemical composition of different steel materials　%

钢铁料	质量分数/%					占比/%		
	C	Si	Mn	P	S	带渣量	挥发分	杂质
铁水	4.20	0.370 0	0.31	0.104 0	0.060	0.4	–	–
生铁	4.00	0.600 0	0.32	0.150 0	0.060	–	–	–
清洁废钢	0.18	0.220 0	1.00	0.025 0	0.018	–	–	–
重型废钢	0.20	0.270 0	1.10	0.021 0	0.025	–	–	1.5~3.5
中型废钢	0.25	0.510 0	0.45	0.027 0	0.034	–	0.5~2.0	3.0~8.0
小型废钢	0.30	0.320 0	0.33	0.035 0	0.057	–	1.3~4.5	5.0~10.0
渣钢	0.08	0.002 4	0.08	0.008 8	0.032	20~25	–	–
破碎料	0.16	0.500 0	0.33	0.031 0	0.062	–	2.0~5.0	5.0~10.0

表3 钢铁料能量供需平衡

Table 3 Energy supply-demand balance of steel materials

钢铁料	能量带入/(kWh·t^{-1})		能量支出/(kWh·t^{-1})				能量需求/(kWh·t^{-1})
	物理热	化学热	钢水	烟气	烟尘	钢渣	
铁水	317.9	300.1	363.7	33.9	5.3	33.7	−181.4
生铁	–	337.8	359.9	35.7	7.5	47.9	113.1
清洁废钢	–	50.7	381.3	0.7	2.7	17.4	351.5
重型废钢	–	51.1	367.5	0.9	6.5	40.3	364.2
中型废钢	–	50.3	360.4	1.4	8.7	54.4	374.5
小型废钢	–	53.0	347.3	1.8	11.9	73.1	381.1
渣钢	–	0.0	311.0	0.0	15.4	98.4	424.8
破碎料	–	45.5	361.0	0.9	8.3	50.2	374.9

(4),为供电供氧曲线、钢铁料结构设计等工艺优化提供依据。

$$E_{ele} = 4.32N + 1.09t_p + 1.27t_m + 3.54t_b + 0.347W_{li} + 0.385W_{om} + 0.97(T_S - 1\,600) + E_{ba} \quad (4)$$

式中,E_{ele}为电能需求量,kWh/t;N为废钢加料次数;t_p为准备时间,min;t_m为废钢熔化时间,min;t_b为熔清后吹炼时间,min;W_{li}为石灰加入量,kg/t;W_{om}为轻烧白云石、球团等其他造渣料,kg/t;T_S为出钢温度,℃。

如图11所示,电弧炉实际冶炼数据与模型计算值相比,模型计算电耗和实际电能消耗的一致性和稳定性均处于较高水平,偏差在±10 kWh/t的占比为95.05%,整体误差小于3%。

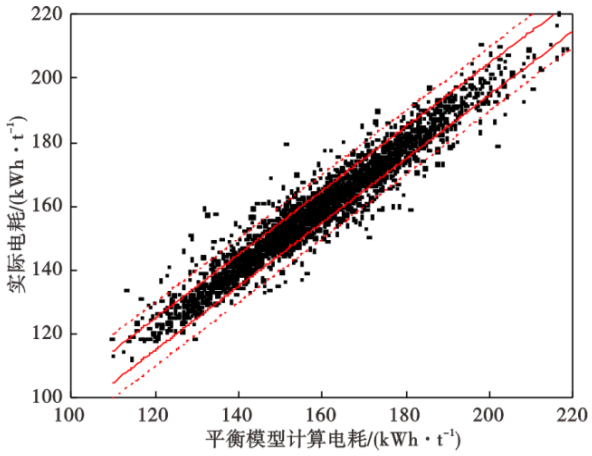


图11 实际电耗与计算电耗对比

Fig. 11 Comparison between actual and calculated electrical energy consumption

4 结论

1)水冷构件热交换是电弧炉能量损失最多的途径,水冷炉盖、水冷炉壁、水冷氧枪、水冷电缆等部件通过冷却水热交换造成能量损失达8 000~10 000 kWh,占总能量的13%~18%;烟气烟尘显热携带能量损失与铁水比呈显著正相关,铁水比越高能量损失越大,达3 000~6 500 kWh,占总能量的5%~10%。高温熔池、电极、电弧等热辐射主要被水冷炉壁和炉盖吸收,炉外热辐射损失相对较少,主要为炉体和加料过程的能量损失,在600 kWh左右,占总能量的1.1%。

2)常用废钢的化学热带入量较少,在0~53.0 kWh/t,带渣量、挥发分和杂质含量差异较大,需要20.8~113.8 kWh/t的能量处理杂质,综合能量需求在351.5~424.8 kWh/t。

3)基于分阶段能量损失特征和能量供需平衡,构建电能供需平衡模型,计算偏差在±10 kWh/t范围内的数据占比达95.05%,整体模型误差小于3%,可为电弧炉生产运行模式的决策,铁水比、渣料及废钢等工艺的优化提供依据。

参考文献

[1] 姜周华,姚聪林,朱红春,等. 电弧炉炼钢技术的发展趋势[J]. 钢铁,2020,55(7):1-12.

[2] 陈军召,张彦辉,谈岸童,等. 喷吹微粒脱磷法在130 t电弧炉炼钢中的应用[J]. 特殊钢,2023, 44(1):34-38.

[3] 李新创,李 冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. 钢铁,2019,54(8):224-231.

[4] Saboohi Y, Fathi A, Škrjanc I, et al. Optimization of the electric arc furnace process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8030-8039.

[5] 陈 煜,赵瑞敏,魏光升. 电弧炉炼钢过程的系统工程思考[J]. 特殊钢,2023,44(4):74-79.

[6] 李士琦,钱 刚,孙开明,等. 电弧炉炼钢高效化的能耗状况分析[J]. 钢铁,2008,43(7):86-90.

[7] Czapla M, Karbowniczek M, Michaliszyn A. The optimization of

electric energy consumption in the electric arc furnace [J]. Arch Metall Mater,2008,53(2):559-565.

[8] Kirschen M, Badr K, Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry [J]. Energy, 2011, 36(10): 6146-6155.

[9] Arzpeyma N, Gyllenram R, Jönsson P G. Development of a mass and energy balance model and its application for HBI charged EAFs [J]. Metals, 2020, 10(3): 311.

[10] Logar V, Dovžan D, Škrjanc I. Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 2, thermo-chemistry [J]. ISIJ International, 2012, 52(3): 413-423.

[11] 李龙飞,胡砚斌,张曦东,等. 100 t全废钢Consteel电弧炉冶炼能量平衡与能效分析[C]//第十四届中国钢铁年会论文集—5. 电冶金与废钢铁,2023:15-24.

[12] 马国宏, 朱 荣, 刘润藻, 等. 电弧炉炼钢复合吹炼技术的研究及应用[J]. 中国冶金, 2013, 23(12): 12-15.

[13] Bisio G, Rubatto G, Martini R. Heat transfer, energy saving and pollution control in UHP electric-arc furnaces[J]. Energy, 2000, 25(11): 1047-1066.

[14] 李士琦,张汉东,陈 煜,等. 废钢-电弧炉炼钢流程和循环经济[J]. 特殊钢,2006,27(3):1-4.