

60 t 直流电弧炉炼钢过程的焓分析

陈煜¹ 钱刚² 高金涛¹ 韩建军¹ 李士琦¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 湖北新冶钢有限公司,黄石 435001)

摘要 基于现代电弧炉炼钢的工艺理论,建立了描述电弧炉炼钢过程的热化学计量模型和焓模型,应用该模型对大冶特钢的60 t 直流电弧炉冶炼过程进行了模拟,对100%废钢、30%铁水+70%废钢,64.4%铁水+35.6%废钢的炉料结构条件下的电弧炉冶炼过程进行了能分析和焓分析。结果表明,兑加铁水可明显降低冶炼电耗,但降低总能量利用率,如考虑回收利用炉气和冷却水物理焓,则电弧炉冶炼过程焓的利用率略有增加。

关键词 电弧炉冶炼 能分析 焓分析

Exergy Analysis on a 60 t DC Electric Arc Furnace Steelmaking Process

Chen Yu¹, Qian Gang², Gao Jintao¹, Han Jianjun¹ and Li Shiqi¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Hubei Xinyegang Steel Co Ltd, Huangshi 435001)

Abstract Based on fundamental process theory for modern electric arc furnace steelmaking (EAF), the thermochemistry calculating model and exergitic model to describe EAF steelmaking process have been established, by which the simulation of steelmaking process for a 60 t DC EAF at Daye Special Steel was carried out to carry out the energy and exergy analysis on EAF steelmaking process with charge of 100% scrap, 30% hot metal + 70% scrap, and 64.4% hot metal + 35.6% scrap. Results show that the melting electric energy consumption decreases obviously by charging part hot metal, but total energy utilization ratio decreases, and as considering to recover and utilize waste gas and cooling water physical exergy, the exergy of EAF steelmaking process increases slightly.

Material Index EAF Steelmaking, Energy Analysis, Exergy Analysis

电弧炉作为能量反应器将电能、化学能及物理热转换成钢水的物理热,现代电弧炉炼钢高效化的核心在于强化供能;或者更准确的说是从提高输入功率来换取高的物质转化速率^[1]。其中有两个主要的工艺理论问题:一是如何在技术上实现这种转化;二是该转化的效率如何,即是高效化的能耗研究,现今电弧炉炼钢过程的能量转化速率得到了飞速提高,国内多数电弧炉炼钢的冶炼周期可以达到60 min 以下,冶炼电耗在400 kWh/t以下^[2]。

为了确定能量损失的性质、大小与分布,以及提高能量利用率的方向,对系统或反应器所进行的分析,称为“能量分析”^[3]。能量分析的方法一般可分为以下两种:(1)依据能量的数量守恒关系,即热力学第一定律。通过分析,揭示出能量在数量上转换、传递、利用和损失的情况,确定出某个系统或装置的能量利用或转换效率。由于这种分析方法和由此得出的效率是基于热力学第一定律基础之上的,故称为“能分析”;(2)依据能量中的平衡关系,即热力学第一和第二定律。能分析方法无法揭示系统内部存在的能量“质”的贬值和损耗,不能深刻地揭示能量

损耗的本质,而且由于能效率的分子分母常常是不同质的能量的对比,不能科学地表征能量利用程度,与能分析相比,焓分析更能本质地反应器或系统用能的好坏^[4]。

1 工程依据

1997年,大冶特钢四炼钢厂8号DC电弧炉(表1)投入炼钢生产,该台电弧炉特点是采用导电碳砖为底电极,寿命可达至1 000~2 000炉次。

2 焓模型

2.1 冶炼过程的焓收入项

表1 大冶特钢四炼钢厂的60 t 直流电弧炉主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of a 60 t DC EAF at No4 steelmaking shop, Daye Special Steel

名称	参数	名称	参数
制造厂	ABB公司	变压器额定功率/MVA	56
公称容量/t	60	一次电压/kV	35
出钢量/t	65~70	二次电压/V	380~610
炉壳内径/mm	5 200	调压方式	4级自动
熔池直径/mm	4 200	二次额定电流/kA	57
熔池深度/mm	800	电极直径/mm	610
熔池容积/m ³	11.5	冷却水耗量/(m ³ ·h ⁻¹)	800
炉内容积/m ³	60		

(1) 冶炼过程的化学焓及物理焓

(a) 1 000 kg 废钢中元素氧化化学焓

$$B_A = \sum_{i=1}^n B_{MiOA} = \sum_{i=1}^n B_{MiA} \times (\Delta H_{MiO} - \Delta S_{MiO} \times T_a) / 3\ 600$$

式中: B_i - 某一种原料中元素氧化产生焓量/kWh; B_{MiO} - 某一种原料中氧化生成第 i 种氧化物(MiO)的焓量/kWh; B_{Mi} - 某一种原料中用于氧化第 i 元素(Mi)所需的氧量/kg; ΔS_{MiO} - 某一种氧化物(MiO)的生成焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]; T_a - 环境温度/°C。

(b) 1 000 kg 铁水中元素氧化化学焓

$$B_B = \sum_{i=1}^n B_{MiOB} = \sum_{i=1}^n B_{MiB} \times (\Delta H_{MiO} - \Delta S_{MiO} \times T_a) / 3\ 600$$

(c) 1 000 kg 碳粉氧化化学焓

$$B_{COF} = GO_{COF} \times (\Delta H_{CO} - \Delta S_{CO} \times T_a) / 3\ 600$$

$$B_{CO_2F} = GO_{CO_2F} \times (\Delta H_{CO_2} - \Delta S_{CO_2} \times T_a) / 3\ 600$$

式中: B_{COF} - 生成 CO 的反应焓/kWh; B_{CO_2F} - 生成 CO₂ 的反应焓/kWh;

碳粉氧化总化学焓为 $B_F = B_{COF} + B_{CO_2F}$ 。

(d) 1 000 kg 电极氧化化学焓

$$B_{COE} = GO_{COE} \times (\Delta H_{CO} - \Delta S_{CO} \times T_a) / 3\ 600$$

$$B_{CO_2E} = GO_{CO_2E} \times (\Delta H_{CO_2} - \Delta S_{CO_2} \times T_a) / 3\ 600$$

电极氧化总化学焓为 $B_E = B_{COE} + B_{CO_2E}$ 。

(e) 1 000 kg 铁水带入的物理焓

$$T_{meltB} = 1\ 536 - (a_{CB} \times 100 + a_{SiB} \times 8 + a_{MnB} \times 5 + a_{PB} \times 30 + a_{SB} \times 25) - 6$$

式中: T_{meltB} - 铁水熔化温度/°C。

铁水带入的物理焓为:

$$B_{PHB} = 1\ 000 \times [C_{SB} \times (T_{meltB} - 25) + H_{mB} + C_{LB} \times (T_{IR} - T_{meltB})] - T_a \times \sum_{i=1}^n 1\ 000 \times a_{MiB} \times (S_{Mi(T1)} - S_{Mi(T0)})$$

式中: B_{PHB} - 铁水的物理焓/kWh; $S_{Mi(T1)}$ - 某一元素在 T1 温度下的焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]; $S_{Mi(T0)}$ - 某一元素在 T0 温度下的焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]。

生成 1 t 钢水物料放出的物理热及化学热:

$$B_{In1} = 1\ 000 \times [Rat_A \times B_A + Rat_B \times (B_B + B_{PHB}) + G_{RF} \times B_F + G_{RE} \times B_E] / G_{ST}$$

(2) 物料成渣的化学焓计算

$$B_{In21} = G_{STSLSiO_2} \times (\Delta H_{2CaO \cdot SiO_2} - \Delta S_{2CaO \cdot SiO_2} \times T_a) / 3\ 600$$

$$B_{In22} = G_{STSLP_2O_5} \times (\Delta H_{4CaO \cdot P_2O_5} - \Delta S_{4CaO \cdot P_2O_5} \times T_a) / 3\ 600$$

(3) 输入的电能焓 $B_{el} = E_{el}$

2.2 物料的焓支出项

(1) 吸热反应化学焓。金属脱硫化学焓为:

$$B_{Out11} = [(\sum_{i=1}^n 1\ 000 \times Rat_i \times a_{Si}/100) 1\ 000 / G_{ST} - 1\ 000 [S]_{ST}/100] \times (\Delta H_{CaS} - \Delta S_{CaS}) \times T_a / 3\ 600$$

石灰烧碱吸收化学焓:

$$B_{Out12} = G_{lime} \times a_{CO_2D} \times 1\ 000 / G_{ST} \times (\Delta H_{CaCO_3} - \Delta S_{CaCO_3} \times T_a) / 3\ 600$$

水分挥发吸收的热量为:

$$B_{Out13} = G_{STgH_2O} \times [\Delta H_{H_2O} \times T_a (S_{H_2O(1200)} - S_{H_2O(Ta)})] / 3\ 600$$

(2) 钢水物理焓。设钢水的熔点为 1 450 °C, 则钢水的物理焓为:

$$B_{PHST} = \{ G_{ST} \times [C_{SST} \times (T_{meltST} - 25) + H_{mST} + C_{LST} \times (T_{ST} - T_{meltST})] - T_a \times \sum_{i=1}^n G_{ST} \times a_{MiST} \times (S_{Mi(ST)} - S_{Mi(T0)}) \} / 3\ 600$$

式中: B_{PHST} - 钢水的物理焓/kWh; T_{meltST} - 钢水熔化温度/°C; H_{mST} - 钢的相变焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]; $S_{Mi(ST)}$ - 某元素在钢液温度下的焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]。

(3) 炉渣物理焓

$$B_{SL} = [G_{STSL} \times C_{SL} \times (T_{SL} - 25) + H_{mSL} - T_a \times \sum_{i=1}^n G_{STSL} \times a_{MOiSL} \times (S_{MOi(TSL)} - S_{MOi(T0)})] / 3\ 600$$

式中: $S_{MOi(TSL)}$ - 某一氧化物在炉渣温度下的焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]; $S_{MOi(T0)}$ - 某一氧化物在室温下的焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]。

(4) 炉气物理焓

$$B_g = [G_{STg} \times C_g \times (T_g - 25) - T_a \times \sum_{i=1}^n G_{STg} \times a_{Ni_g} \times (S_{Ni(Tg)} - S_{Ni(T0)})] / 3\ 600$$

式中: $S_{Ni(Tg)}$ - 某一炉气组份在炉气温度下的焓/[kJ · (kg · K)⁻¹]。

(5) 冷却水带走物理焓。炉壁冷却水带走物理焓:

$$B_{W1} = [V_{W1} \times t / 60 \times 1\ 000 \times C_{wat} \times (T_{outW} - T_{inW}) - T_a \times V_{W1} \times t / 60 \times 1\ 000 / 18 \times C_{wat} \times \ln(T_{outW} / T_{inW})] / 3\ 600 / G_{ST}$$

炉盖冷却水带走物理焓:

$$B_{W2} = [V_{W2} \times t/60 \times 1\,000 \times C_{wat} \times (T_{outW} - T_{inW}) - T_a \times V_{W2} \times t/60 \times 1\,000/18 \times C_{wat} \times \ln(T_{outW}/T_{inW})] / 3\,600/G_{ST}$$

(6) 焓损失

$$B_{losses} = T_a \times (\Delta S_{PHST} + \Delta S_{SL} + \Delta S_g + \Delta S_{w1} + \Delta S_w)$$

3 电弧炉炼钢过程的能量模拟计算

3.1 模拟工况条件

在现今国内的实际生产中炉料结构的变化对电弧炉炼钢过程的影响最大,典型的炉料结构有全废钢、全废钢配加铁水、全废钢配加铁水及直接还原铁,在大冶特钢 60 t 直流电弧炉的实际生产中,典型的炉料结构为全废钢和废钢配加铁水两种,故选取两种炉料结构下的 3 种配料方案进行模拟,分别是:100% 废钢;30% 铁水 + 70% 废钢;64.4% 铁水 + 35.6% 废钢。

3.2 典型炉料结构下的能量分析

3.2.1 典型炉料结构下的能量分析结果

根据能量模型及上述模拟条件进行模拟,各种炉料结构条件下的模拟结果如表 2 ~ 表 4。

3.2.2 模拟过程的能分析

通过表 2 ~ 表 4 的模拟计算可以看出:随着铁水配入量的增加,在收入项中冶炼电耗显著降低,由 449.68 kWh/t 降低到 215.45 kWh/t,这是由于铁水带入的物理热和化学热显著增加而造成的,但总的能量利用率是降低的,说明在电弧炉冶炼中配入大量铁水对提高能量利用率是不利的;随着铁水配入量的增加,在支出项中炉渣物理热和用于脱硫等反应的吸热稍有增加,这是由于铁水与废钢相比有大量的硅元素和硫元素,从而增加了渣量和脱硫反应的吸热量,此外炉气物理热的增加非常大,几乎是成倍增加,原因是铁水带入了大量的碳元素,而要完成冶金反应需要吹入大量的氧气,这就造成了烟气流量的大量增加。

3.2.3 模拟过程的焓分析

通过表 2 ~ 表 4 的模拟计算可以看出:随着铁水配入量的增加,在收入项中电能焓显著降低,由 449.68 kWh/t 降低到 215.45 kWh/t,这是由于铁水带入的物理焓和化学焓显著增加而造成的,而总的焓增加的很少,说明在电弧炉冶炼中铁水配入比例对过程的有用能的影响不是很大;随着铁水配入量

表 2 60 t 直流电弧炉 100% 废钢工况能量分析
Table 2 Analysis of energy on a 60 t DC EAF process with 100% scrap charging

类别	收入项:能量/(kWh·t _钢 ⁻¹)				类别	支出项:能量/(kWh·t _钢 ⁻¹)			
	热量	%	焓量	%		热量	%	焓量	%
废钢化学能	68.63	12.25	67.2	12.4	钢水物理能	395.11	70.53	297.7	56.3
铁水化学能	0	0	0	0	炉渣物理能	32.70	5.84	22.9	4.3
炭粉化学能	33.35	5.95	20.9	3.8	吸热反应耗能	0.09	0.02	0.3	0.1
电极化学能	4.80	0.86	1.3	0.2	冷却水吸能	68.90	12.30	40.9	7.7
铁水物理能	0	0	0	0	其他能损失	44.82	8.00		
成渣能	3.73	0.67	3.9	0.7	炉气物理能	13.66	2.44	12.8	2.4
电能	449.68	80.27	449.7	82.9	炉尘物理能	4.92	0.88		
					电极物理能			1.6	0.3
					焓损失			152.8	28.9
合计	560.19	100.00	543.0	100.0	合计	560.20	100.00	529.0	100.0

表 3 60 t 直流电弧炉 30% 铁水 + 70% 废钢工况能量分析
Table 3 Analysis of energy on a 60 t DC EAF process with 30% hot metal and 70% scrap charging

类别	收入项:能量/(kWh·t _钢 ⁻¹)				类别	支出项:能量/(kWh·t _钢 ⁻¹)			
	热量	%	焓量	%		热量	%	焓量	%
废钢化学能	48.69	7.89	47.7	8.7	钢水物理能	395.11	64.04	297.7	51.6
铁水化学能	82.58	13.39	64.0	11.6	炉渣物理能	41.29	6.69	29.2	5.1
炭粉化学能	33.80	5.48	21.1	3.8	吸热反应耗能	23.48	3.81	18.4	3.2
电极化学能	4.86	0.79	1.3	0.2	冷却水吸能	68.90	11.17	40.9	7.1
铁水物理能	98.80	16.01	66.8	12.2	其他能损失	49.35	8.00		
成渣能	5.91	0.96	6.3	1.1	炉气物理能	33.95	5.50	31.8	5.5
电能	342.29	55.48	342.3	62.4	炉尘物理能	4.85	0.79		
					电极物理能			1.6	0.3
					焓损失			157.2	27.2
合计	616.93	100.00	549.5	100.0	合计	616.93	100.00	576.8	100.0

表4 60 t 直流电弧炉 64.4% 铁水 + 35.6% 废钢工况能量分析
Table 4 Analysis of energy on a 60 t DC EAF process with 64.4% hot metal and 35.6% scrap charging

类别	收入项:能量/(kWh·t _钢 ⁻¹)				类别	支出项:能量/(kWh·t _钢 ⁻¹)			
	热量	%	烟量	%		热量	%	烟量	%
废钢化学能	25.15	3.68	24.6	4.4	钢水物理能	395.11	57.77	297.7	46.8
铁水化学能	180.06	26.33	139.5	25.0	炉渣物理能	51.43	7.52	36.7	5.8
炭粉化学能	34.33	5.02	21.5	3.9	吸热反应耗能	51.08	7.47	39.8	6.3
电极化学能	4.94	0.72	1.4	0.2	冷却水吸能	68.90	10.07	40.9	6.6
铁水物理能	215.41	31.50	145.8	26.2	其他能损失	54.71	8.00		
成渣能	8.56	1.25	9.1	1.6	炉气物理能	57.91	8.47	54.3	8.6
电能	215.45	31.50	215.5	38.7	炉尘物理能	4.78	0.70		
					电极物理能			1.6	0.3
					烟损失			162.2	25.6
合计	683.90	100.00	557.4	100.0	合计	683.92	100.00	633.2	100.0

的增加,在支出项中炉渣物理焓和用于脱硫等反应的反应焓稍有增加,这是由于铁水与废钢相比有大量的 Si 元素和 S 元素,从而增加了渣量和脱硫反应的吸能量,此外炉气物理焓的增加非常大,几乎是成倍增加,原因是铁水带入了大量的 C 元素,而要完成冶金反应需要吹入大量的氧气,这就造成了烟气流量的大量增加。随着铁水配入比例的增加,如仅考虑钢水的物理焓为有效能,在电弧炉冶炼过程中焓的利用效率略有降低,如果考虑将炉气和冷却水的物理焓回收利用,则在电弧炉冶炼过程中焓的利用效率略有增加。

4 结论

(1) 在电弧炉冶炼过程中兑加铁水对提高能量的转化速率起到了明显的作用,但从能量利用角度看是不合理的。

(2) 为提高电弧炉冶炼过程中兑加铁水后的能量利用效率,应对加入的铁水进行脱 Si 和脱 S 处理。

(3) 为提高电弧炉冶炼过程中兑加铁水后的能

量利用效率,应考虑对冶炼过程中的烟气和冷却水带走的能量加以回收利用。

(4) 为提高电弧炉冶炼过程中兑加铁水后的能量利用效率,应考虑提高吹入炉内氧气纯度和减少炉门的空气卷吸量,例如可通过优化炉壁氧枪的位置和支数,取消炉门氧枪,在冶炼过程中尽可能的关闭炉门。

参考文献

- 1 李士琦,张汉东,陈煜,等. 电弧炉炼钢流程的能量状况. 钢铁, 2006,41(8):24
- 2 刘润藻,郁建,高金涛,等. 电弧炉炼钢节能技术的发展. 工业加热, 2007,36(6):5
- 3 Bissog. Exergy Method for Efficient Energy Resource Use in the Steel Industry. Energy, 1993,18(9):971
- 4 Beer J, Worrel F, Bolk K. Future Technologies for Energy-efficient Iron and Steel-Making. Ann Rev Energy Environ, 1998, 22: 123

陈煜(1973-), 博士生, 冶炼工艺研究。

收稿日期:2008-11-18

下期要目

六流中间包场协同分析及流场优化	张美杰等
圆坯连铸凝固传热数学模型及应用	唐海燕等
高级别管线钢超低磷控制研究	李太全等
镁对 GCr15 轴承钢中氧化铝夹杂的变质行为	陈向阳等
低合金钢残余元素 Cu-As-Sn 的晶界偏析对晶间脆性断裂的影响	耿明山等
非调质易切削钢 38MnVS 连铸坯的高温延塑性	赵艳宇等
304 不锈钢扁钢丝轧制过程中的宽展研究	刘世锋等
水平连铸中间包内钢水流动的水模型研究	杨树峰等
0.07~0.10C 亚包晶钢板坯连铸保护渣凝固结晶行为的研究	赵紫锋等
弹簧钢 55CrSi 连铸坯变形抗力数学模型	吕鹏等