

· 冶炼与凝固 ·



电弧炉配加直接还原铁对炼钢的影响

徐鹏¹, 康旭², 曹震巍¹, 王强², 刘崇², 年保国²

(1 河钢集团张宣科技, 宣化 075100; 2 河钢材料技术研究院, 石家庄 050000)

摘要:通过开展全废钢及配加 10%、20%、30% 比例直接还原铁(DRI, direct reduced iron)试验研究了 Consteel 电弧炉配加不同比例 DRI 对冶炼技术经济指标、钢水洁净度和电弧炉终渣成分的影响, 并根据试验情况对金属料加入、吹氧喷碳、造渣辅料加入、排渣等冶炼控制要点进行分析。结果表明, 随着 DRI 加入比例增加, 电耗、钢铁料消耗、造渣辅料消耗和渣量等逐渐增加。且 DRI 加入比例在 30% 时, 因炉渣量较大, 在冶炼过程中后期有炉渣从炉门溢出。同时, 电弧炉配加 DRI 后钢水洁净度明显升高, 电弧炉冶炼终点氮、磷、硫和残余元素质量分数降低, 且随着 DRI 加入比例增加, 电弧炉终点钢水氮质量分数下降速率变小。此外, 随着 DRI 加入比例增加, 电弧炉终渣 FeO 质量分数呈降低趋势。DRI 加入比例 20% 时效果较好, 冶炼周期较短, 与全废钢炉次相比电耗增加不高, 且氮和残余元素含量较低, 满足大部分钢种要求。

关键词: Consteel 电弧炉; 直接还原铁; 技经指标; 洁净度; 电弧炉终渣

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00095 **中图分类号:** TF 741

Effect of Adding Direct Reduced Iron to EAF on Steelmaking

Xu Peng¹, Kang Xu², Cao Zhenwei¹, Wang Qiang², Liu Chong², Nian Baoguo²

(1 HBIS Group Zhangxuan Technology, Xuanhua 075100, China;

2 HBIS Material Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The effects of adding different ratios of DRI (direct reduced iron) to Consteel EAF on smelting technical and economic indicators, molten steel cleanliness, and the ingredients of acf furnace final slag were studied by conducting experiments on all scrap steel and adding 10%, 20%, and 30% ratios of DRI. And based on the experimental results, the key points of smelting control such as adding metal materials, blowing oxygen and carbon, adding slag making auxiliary materials, and slag discharge were analyzed. The results show that as the proportion of DRI added increases, the consumption of electricity, steel material, slag making auxiliary material, and slag amount gradually increase. When the proportion of DRI addition is 30%, due to the large amount of slag, slag overflows from the furnace door in the middle and late smelting process; At the same time, the cleanliness of the molten steel significantly increases after adding DRI to the EAF, and the mass fraction of nitrogen, phosphorus, sulfur and residual elements at the end of EAF smelting is reduced. And as the proportion of DRI added increases, the rate of decrease in nitrogen mass fraction at the endpoint of the electric furnace decreases. In addition, with the increase of DRI addition ratio, the FeO mass fraction of final slag showed a decreasing trend. When DRI is added at a proportion of 20%, the effect is better, the smelting cycle is lower, the increase in electricity consumption is not high compared to the total scrap steel furnace, and the nitrogen and residual element content is lower, meeting the requirements of most steel grades.

Key Words: Consteel EAF; DRI; Technical and Economic Indicators; Cleanliness; Final Slag of EAF

电弧炉炼钢在环保、投资以及效率上占据诸多优势, 以电弧炉炼钢为核心的短流程炼钢已经成为整个钢铁生产的重要流程之一^[1-3]。电弧炉短流程炼钢流程能够显著减少 CO₂ 排放, 约为长流程炼钢流程的 1/3^[4-6]。但因国内废钢中有害和残余元素较高, 优质废钢资源短缺, 电弧炉短流程冶炼难以实现高洁净度品种钢生产, 而国际市场废钢价格较高, 许多国家和地区对优质废钢的出口进行了限制, 制约了我国高质量和多品种电弧炉钢的发

展^[7-9]。DRI 中残余元素和有害元素含量较低, 并且适合大规模生产, 常用于低氮、极低磷和低氢质量分数的经济优质钢生产, 对于一些高级钢种, 要求杂质元素含量较低, 就只能使用 DRI 作为原料^[10-11]。在世界范围内, 电弧炉炼钢通常使用一定比例的 DRI, 电弧炉使用 DRI 也是我国钢铁工业可持续发展的必然选择。但 DRI 加入速度过快可能导致冷态 DRI 局部富集, 漂浮在钢液熔池表面形成“冰山现象”。同时, DRI 中脉石含量较高, 会导致冶炼渣量

作者简介: 徐鹏(1986—), 男, 本科, 高级工程师; **E-mail:** xupeng02@hbisco.com; **收稿日期:** 2024-04-16

通信作者: 康旭(1994—), 男, 硕士; **E-mail:** 1309804330@qq.com;

增加,热量损失增多,电耗增加^[12-14]。许多学者研究了顶装料电弧炉配加 DRI 对冶炼过程的影响,但对于连续水平加料 Consteel 电弧炉配加 DRI 冶炼过程鲜有研究。

通过开展电弧炉配加不同比例 DRI 试验,研究了 Consteel 电弧炉配加不同比例 DRI 对冶炼技经指标、钢水洁净度和电弧炉终渣成分的影响,并提出电弧炉配加 DRI 冶炼过程控制要点,以期为国内外钢厂电弧炉配加 DRI 冶炼过程控制提供参考。

1 试验材料及方法

电弧炉试验用 DRI 粒度指标见表 1, DRI 尺寸主要为 10 ~ 16 mm, 尺寸超过 16 mm 和低于 3.15 mm 含量较低。

表 1 电弧炉试验用 DRI 粒度指标
Table 1 DRI particle size index for EAF testing

DRI 粒度/mm	粒度占比/%
>16	2 ~ 6
10 ~ 16	50 ~ 70
6.3 ~ 10	10 ~ 20
3.15 ~ 6.3	10 ~ 20
<3.15	1 ~ 3

电弧炉试验用 DRI 化学成分见表 2, DRI 金属化率为 93% ~ 96%; 金属铁 83% ~ 86%; TFe 为 88% ~ 90%。DRI 中 P、S 含量较低, 酸性脉石 ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) 含量较高, 平均在 3% ~ 4%。

表 2 电弧炉试验用 DRI 化学成分(质量分数)
Table 2 DRI chemical composition indicators for EAF testing

C	P	S	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	TiO_2	Mn
2.5 ~ 3.5	≤ 0.01	≤ 0.01	2.5 ~ 3.5	0.5 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0	0.3 ~ 0.6	0.4 ~ 0.8	0.08 ~ 0.12

试验过程 DRI 加入比例分别为 10%、20% 和 30%, 各试验 50 炉, 试验过程 DRI 从炉顶加料孔连续加入, 加入速度 2 ~ 2.5 t/min。

2 电弧炉配加 DRI 对炼钢影响

2.1 电弧炉配加 DRI 对冶炼技经指标的影响

2.1.1 电弧炉配加 DRI 对供电时间和冶炼周期的影响

电弧炉配加不同比例 DRI 对供电时间和冶炼周期的影响, 如图 1(a) 所示, 可以看出, 电弧炉配加不同比例 DRI 供电时间和冶炼周期呈相同变化趋势,

DRI 加入比例低于 20% 时随着 DRI 加入比例增加供电时间和冶炼周期降低, 继续增加 DRI 加入比例供电时间和冶炼周期变化不大。因为 Consteel 加入废钢速度过快易导致 Consteel 侧废钢堆积, 通过炉顶加入 DRI 能够增加钢铁料(废钢+DRI)加入速度, 使供电时间和冶炼周期降低, 但炉顶 DRI 加入速度过快容易导致 DRI 局部富集出现冰山现象。

2.1.2 电弧炉配加 DRI 对造渣辅料消耗和渣量的影响

电弧炉配加 DRI 对造渣辅料消耗和吨钢渣量的影响, 如图 1(b)、图 1(c) 所示, 随着 DRI 加入比例增加, 吨钢石灰和白云石消耗增加, 吨钢渣量明显增加, DRI 加入比例低于 20% 时, 冶炼过程无溢渣, DRI 加入比例达到 30% 时, 在冶炼过程中后期有炉渣从炉门溢出。因为 DRI 中酸性脉石含量 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 较高, 接近 4%, 随着 DRI 加入比例增加, 带入酸性脉石含量增加, 使炉渣碱度降低, 为了提高炉渣碱度, 保证电弧炉冶炼过程脱磷效果并提高炉衬寿命, 增加了石灰和轻烧白云石加入量。DRI 带入脉石, 同时增加石灰、白云石等造渣辅料加入量使渣量明显增加。因为电弧炉配加 DRI 后炉渣量较大, 当 DRI 加入比例为 30% 时, 吨钢渣量接近 130 kg/t。同时, 因为电弧炉冶炼过程吹氧喷碳造泡沫渣, 炉渣厚度较高, 当炉渣量较大时, 炉渣高度超过炉门并从炉门缝隙中溢出。

2.1.3 电弧炉配加 DRI 对电耗的影响

电弧炉配加 DRI 对吨钢电耗的影响, 如图 2(a) 所示, DRI 中金属铁含量较低, DRI 金属收得率低于废钢, 出钢量相同的情况下, 随着 DRI 加入比例增加钢铁料加入量升高; 同时, 随着 DRI 加入量比例增加, 石灰和白云石等造渣辅料加入量增加, 渣量增大, 热力学计算结果表明, 每增加 1 t 炉渣能量损失增加 1.9723×10^6 kJ, 折合电耗 548 kWh, 因而随着 DRI 加入比例增加吨钢电耗升高。DRI 配加比例从 0 增加到 20% 电耗增长速率较低, DRI 加入量从 20% 增加到 30% 吨钢电耗增长速率较高, 因为 DRI 加入比例从 0 增加到 20% 时供电时间和冶炼周期降低, 热量损失较少, 热力学计算结果表明, 每增加 1 min 冷却水吸热约导致热量损失增加 0.89×10^6 kJ, 折合电耗 247 kWh, 因而, DRI 配加比例从 0 增加到 20% 电耗增加速率较低; DRI 加入量从 20% 增加到 30% 供电时间和冶炼周期变化不大, 冷却水吸热量变化不大, 同时, 冶炼过程有炉渣从炉门溢出, 带走

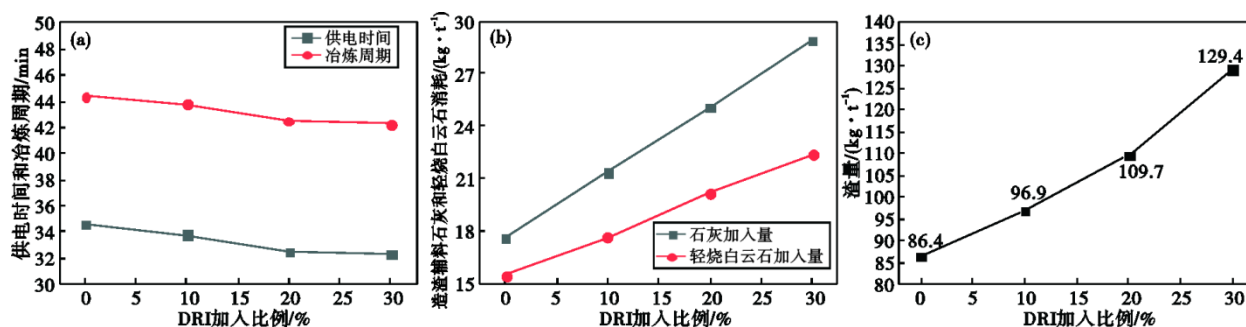


图1 电弧炉配加DRI对冶炼周期、造渣辅料消耗和吨钢渣量的影响:(a)冶炼周期,(b)造渣辅料消耗,(c)吨钢渣量

Fig. 1 The effect of adding DRI to EAF on smelting cycle, consumption of slag making auxiliary materials, and the amount of slag per ton of steel: (a) smelting cycle, (b) consumption of slag making auxiliary materials, (c) tons of steel slag

较多热量,因而,DRI加入量从20%增加到30%吨钢电耗增长速率较高。

2.1.4 电弧炉配加DRI对碳粉喷吹量的影响

电弧炉配加不同比例DRI对吨钢碳粉喷吹量的影响,如图2(b)所示,随着DRI加入比例增加吨钢碳粉喷吹量降低,电弧炉配加30%比例DRI与全废钢相比吨钢碳粉喷吹量约降低5.5 kg/t, DRI中碳含量在2.5%~3.5%,加入DRI带入一定量的碳,因此,降低了碳粉喷吹量。

2.1.5 电弧炉配加DRI对吹氧量的影响

电弧炉配加不同比例DRI对吨钢吹氧量的影响如图2(c)所示,随着DRI加入比例增加吨钢吹氧量相差不大,吨钢吹氧量在30~31.5 m³/t(标准态)。

2.1.6 电弧炉配加DRI对钢铁料消耗的影响

电弧炉配加DRI对钢铁料消耗的影响,如图2(d)所示,与全废钢相比,DRI加入30%时钢铁料消耗约增加79 kg/t。DRI中金属铁含量远低于废钢中铁含量,同时DRI经多次倒运后破碎较多,含粉率提高,冶炼过程除尘系统和抽烟气风机会抽走部分粉末DRI,且小尺寸DRI无法穿过渣层进入钢液,部分小尺寸DRI随冶炼过程溢渣流出,导致DRI收得率较低,因而,随着DRI加入比例增加钢铁料消耗

升高。

2.2 电弧炉配加DRI对钢水洁净度的影响

2.2.1 电弧炉配加DRI对电弧炉终点P、S质量分数的影响

电弧炉配加DRI对电弧炉终点P、S质量分数的影响,如图3(a)所示,随着DRI加入比例增加电弧炉终点P、S质量分数逐渐降低,且随着DRI加入比例增加P、S质量分数下降速率逐渐降低,因为DRI中P、S质量分数较低,加入DRI后能够稀释钢水中P、S质量分数,但钢水中P、S质量分数降低后,炉渣脱磷和脱硫速率降低。

2.2.2 电弧炉配加DRI对电弧炉终点残余元素质量分数的影响

电弧炉配加DRI对电弧炉终点残余元素的影响,如图3(b)(c)所示,随着DRI加入比例增加,电弧炉终点残余元素Ni、Cr、Cu、Mo、As、Sn、Pb质量分数呈降低趋势,DRI中残余元素含量较低,加入DRI能够稀释钢水中残余元素含量使电弧炉终点残余元素质量分数降低。在DRI加入比例从10%增加到20%时残余元素Ni、Cr质量分数有所升高,不同炉次使用废钢成分有所不同,可能因为配加20%比例DRI炉次部分废钢中Ni、Cr元素含量较高使配加

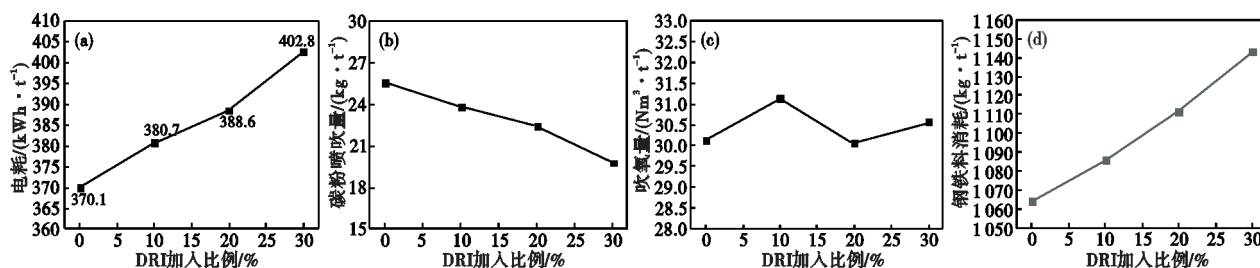


图2 电弧炉配加DRI对物料消耗的影响:(a)吨钢电耗,(b)吨钢碳粉喷吹量,(c)吨钢吹氧量,(d)钢铁料消耗

Fig. 2 The influence of adding DRI to EAF on material consumption: (a) electricity consumption per ton of steel, (b) carbon powder injection rate per ton of steel, (c) oxygen blowing rate per ton of steel, (d) steel material consumption

20% 比例 DRI 炉次电弧炉终点残余元素 Ni、Cr 质量分数平均值升高。

2. 2. 3 电弧炉配加 DRI 对电弧炉终点氮质量分数的影响

电弧炉配加 DRI 电弧炉终点钢水氮质量分数如图 3(d) 所示,随着 DRI 加入比例增加,电弧炉终点钢水氮质量分数降低。因为 DRI 中氮质量分数较低,能够稀释钢水中氮质量分数,同时, DRI 中含有 2.5 %~ 3.5% 的碳,与氧反应生成大量的 CO 和 CO₂ 气泡,气泡中氮分压很低,钢液中的 N 原子就能自发地进入气泡内形成 N₂ 分子,随 CO 和 CO₂ 气泡从钢液中排出,使钢水中氮质量分数降低^[15-18]。且随着 DRI 加入比例增加,电弧炉终点钢水氮质量分数下降速率变小,钢水中的氮质量分数由炉料中的氮质量分数以及熔炼过程中脱除和吸收的氮决定,随着 DRI 加入比例增加,钢水中氮质量分数降低使冶炼过程氮的脱除速率降低,氮的吸收速率升高,因而,电弧炉终点钢水氮质量分数下降速率变小。

2. 3 电弧炉配加 DRI 对电弧炉终渣成分的影响

2. 3. 1 电弧炉配加 DRI 对电弧炉终渣 FeO 质量分

数的影响

电弧炉配加 DRI 对电弧炉终渣 FeO 质量分数的影响,如图 4(a) 所示,随着 DRI 加入比例增加,终渣 FeO 质量分数降低,与全废钢炉次相比, DRI 加入比例为 30% 时终渣 FeO 质量分数降低 6.8%。因为配加不同比例 DRI 冶炼过程吹氧量变化不大,冶炼过程氧化进入渣中 FeO 含量变化不大,但随着 DRI 加入比例增加,炉渣总量增加,渣中 FeO 被稀释。

2. 3. 2 电弧炉配加 DRI 对电弧炉终渣碱度的影响

电弧炉配加 DRI 对电弧炉终渣碱度的影响如图 4(b) 所示,终渣碱度相差不大。随着 DRI 加入比例增加,会使渣中 SiO₂ 含量增加,导致炉渣碱度降低,但冶炼过程中随着 DRI 加入比例增加了石灰和轻烧白云石加入量,使渣中 CaO 含量同样增加,因而炉渣碱度变化不大。

2. 4 电弧炉配加 DRI 冶炼过程控制要点

2. 4. 1 冶炼过程 DRI 加入时机控制

冶炼过程应控制 DRI 在冶炼前期加入,因为随着冶炼过程金属料(废钢+DRI)增加,钢液面上升,同时配加 DRI 会使炉渣量增加,泡沫渣厚度较高,炉渣高度超过炉门会出现溢渣,若此时有 DRI 加入,部分

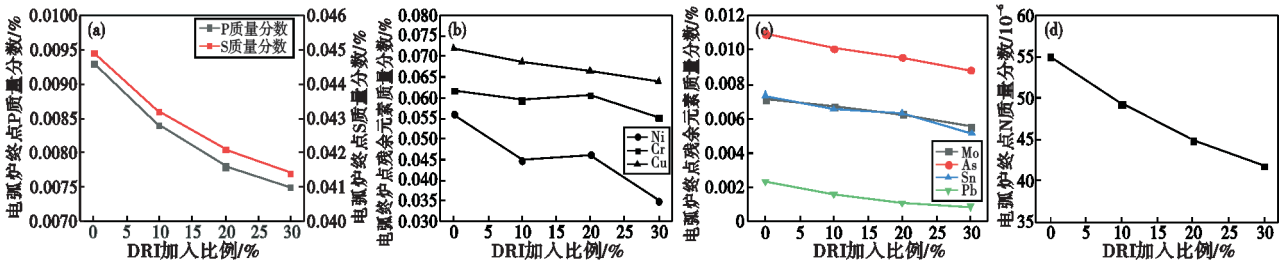


图 3 电弧炉配加 DRI 对钢水洁净度的影响:(a)P、S 质量分数;(b)残余元素 Ni、Cr、Cu 质量分数;(c)残余元素 Mo、As、Sn、Pb 质量分数;(d)氮质量分数

Fig. 3 The effect of adding DRI to electric arc furnace on the cleanliness of molten steel: (a) mass fraction of P and S; (b) mass fraction of residual elements Ni, Cr, Cu; (c) mass fraction of residual elements Mo, As, Sn, Pb; (d) mass fraction of nitrogen

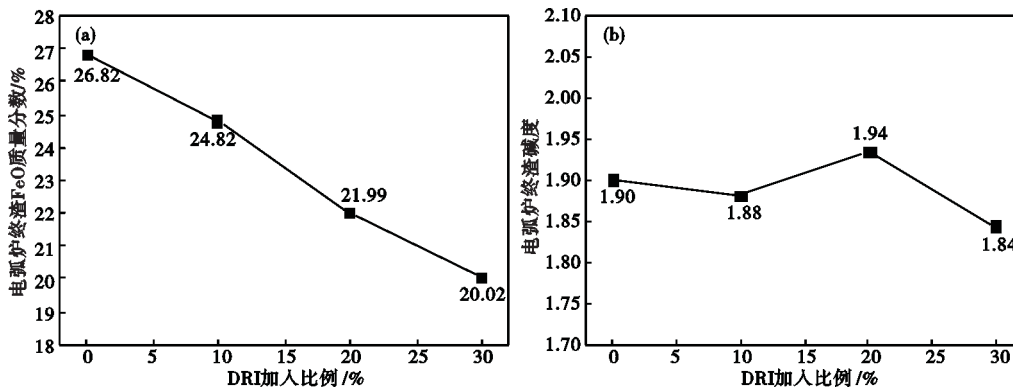


图 4 电弧炉配加 DRI 对电弧炉终渣成分的影响:(a)炉渣中 FeO 质量分数,(b)炉渣碱度

Fig. 4 The effect of adding DRI to EAF on the final slag ingredients of EAF: (a) FeO mass fraction in slag, (b) slag alkalinity

小尺寸DRI因下落时冲击力不够在渣层中可能会随溢渣流出,导致钢铁料消耗较高,可以看出,在图2(d)中DRI加入量在20%~30%时钢铁料消耗增长速率高于DRI加入量在10%~20%时钢铁料消耗增长速率,因为,DRI加入比例为30%时,加入量较大,按照DRI加入速度2~2.5 t/min,在冶炼中后期仍加入DRI,此时存在溢渣现象,部分小尺寸DRI随溢渣流出。

2.4.2 冶炼过程废钢加入速度控制

冶炼过程在加入DRI时,废钢加入速度由6~8 t/min降低至4~6 t/min,保证金属料(废钢+DRI)加入速度与单独加入废钢速度接近,Consteel中废钢前进速度由5 m/min降低至4 m/min,增加废钢在Consteel预热段停留时间,增加废钢预热温度,减少冶炼电耗。当废钢加入完毕时,废钢加入速度恢复到6~8 t/min。

2.4.3 冶炼过程吹氧喷碳控制

冶炼过程可通过控制吹氧和喷碳量减少冶炼过程溢渣,加DRI冶炼初始阶段,氧枪和碳枪喷吹速率分别为120 m³/min和100 kg/min,迅速造泡沫渣。冶炼中后期炉渣量较大,厚度足够进行埋弧,氧枪和碳枪喷吹速率分别为80 m³/min和60 kg/min,降低炉渣泡沫化程度,同时降低炉门处炉渣流动性,减少冶炼过程溢渣。

2.4.4 冶炼过程造渣辅料加入控制

冶炼过程控制造渣辅料与DRI一同进入电弧炉,DRI能够带着造渣辅料进入渣层内部,有利于造渣辅料与DRI中脉石、炉渣快速混合均匀。冶炼过程造渣辅料应多批次加入,每批次造渣辅料加入量不超过1 500 kg,使冶炼过程炉渣成分保持稳定,避

免造渣辅料加入量过大,使炉渣成分变化较大,影响炉渣泡沫化和埋弧效果。

2.4.5 冶炼过程排渣控制

配加DRI会导致渣量增加较大,应根据不同DRI加入比例控制每炉排渣量,保证每炉留渣量15~20 t,排渣时间应控制在加热升温阶段之前,若加热升温时炉渣量较大,较多电弧热能用于加热炉渣,而加热钢水热能减少,使冶炼电耗升高。

3 结论

(1)电弧炉配加DRI后,供电时间和冶炼周期有所降低,DRI加入比例超过20%后变化不大;配加DRI后冶炼电耗升高,DRI配加比例从0增加到20%电耗增长速率较低,DRI加入量从20%增加到30%吨钢电耗增长速率较高。

(2)电弧炉配加DRI后,碳粉喷吹量降低,吹氧量变化不大,钢铁料消耗增加,石灰和轻烧白云石消耗增加,炉渣量明显升高,且DRI加入比例在30%时,因炉渣量较大,在冶炼过程中后期有炉渣从炉门溢出。

(3)电弧炉配加DRI后,钢水洁净度明显升高,电弧炉冶炼终点氮、磷、硫和残余元素质量分数降低。且随着DRI加入比例增加,电弧炉终点钢水氮和残余元素质量分数下降速率变小。

(4)电弧炉配加DRI后,电弧炉终渣碱度变化不大,因配加DRI后增加石灰和轻烧白云石加入量,终渣FeO质量分数呈降低趋势。

(5)DRI加入比例20%时效果较好,供电时间和冶炼周期最低,与全废钢炉次相比电耗增加不高,且氮和残余元素含量较低,满足大部分钢种要求。

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] Oda J, Akimoto K, Tomoda T. Long-term global availability of steel scrap[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 81: 81-91.
- [3] 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.
- [4] Toktarova A, Karlsson I, Rootzén J, et al. Pathways for low-carbon transition of the steel industry — a Swedish case study[J]. Energies, 2020, 13(15): 3840.
- [5] Schuler F, Voigt N, Schmidt T, et al. Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050[J]. Stahl und Eisen, 2014, 133(9): 61-63.
- [6] 倪冰,崔志峰,上官方钦,等. 三类钢铁制造流程降碳路线综述[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 2-8.
- [7] 吴耀光,肖步庆,朱立光,等. 电炉炼钢钢铁原料的现状分析与展望[J]. 钢铁, 2021, 56(11): 55-62.
- [8] 赵庆杰,储满生. 电炉炼钢原料及直接还原铁生产技术[J]. 中国冶金, 2010, 20(4): 23-28.
- [9] 朱荣,魏光升,唐天平. 电弧炉炼钢流程洁净化冶炼技术[J]. 炼钢, 2018, 34(1): 10-19.
- [10] Lee M, Trotter D, Mazzei O. The production of low phosphorus and nitrogen steels in an EAF using HBI[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2001, 30(5): 286-291.
- [11] 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.
- [12] 黄慧琴. 全装DRI电弧炉产量提高试验研究[J]. 世界金属导报, 2019-12-17: B03.

[13] 卢中强, 杨永青. 用直接还原铁炼钢的工艺和能耗分析[J]. 中国金属通报, 2016(11): 60-61.

[14] Kirschen M, Hay T, Echterhof T. Process improvements for direct reduced iron melting in the electric arc furnace with emphasis on slag operation[J]. Processes, 2021, 9(2): 402.

[15] Wei G S, Zhu R, Dong K, et al. Influence of bottom-blowing gas species on the nitrogen content in molten steel during the EAF steelmaking process [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45 (9): 839-846.

[16] Derda W, Siwka J, Nowosielski C. Controlling of the nitrogen content during eaf - technology and continuous casting of steel [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2008, 53 (2) : 523-529.

[17] Shalimov A G. Production of electrosteel with reduced nitrogen content [J]. Steel in Translation, 2011, 41 (11) : 938-946.

[18] 李 层, 李 欣, 魏光升, 等. 115 t量子电弧炉 CO₂喷吹工艺的影响研究[J]. 炼钢, 2023, 39(6): 1-7+22.



下 期 要 目

固溶工艺对 3Al-310S 耐热钢组织和力学性能的影响	张艳梅等
无缝钢管 Gr.6 轧制及正火后的组织和性能分析	赵 波等
高级别管线用焊丝 EF3 超低磷冶炼工艺实践	张行利等
基于 ABAQUS 的 X70 管线钢连铸板坯空冷的热力耦合分析	付成哲等
淬火工艺对 A514CrQ 齿条钢显微组织演变及硬度的影响	赵广迪等
熔速对高填充比 06Cr18Ni11Ti 电渣重熔铸锭凝固过程的影响	杨文彬等
双时效工艺对复合析出强化型超高强度钢的组织与性能的影响	赵佳伟等
H13 模具钢电渣锭中夹杂物的类型以及分布规律分析	倪卓文等
紧固件用 10.9 级 32CrB4 调质圆钢的开发	彭 峰等
变形量和加热温度对 2205 双相不锈钢冲击韧性的影响	刘军凯等
热处理工艺对锻造 430F 铁素体不锈钢组织和性能的影响	徐临超等
高铬耐候钢 Q350EW 高温热塑性分析	孟庆勇等
稀土 Ce 对 441 铁素体不锈钢碳氮化物析出的影响与控制	谢 康等