



## 直接还原铁尺寸对电弧炉冶炼的影响

康旭<sup>1</sup>, 曹震巍<sup>2</sup>, 王强<sup>1</sup>, 刘崇<sup>1</sup>, 李双江<sup>1</sup>, 张俊粉<sup>1</sup>

(1 河钢材料技术研究院, 石家庄 052135; 2 河钢集团张宣科技, 宣化 075100)

**摘要:**以张宣科技 Consteel 电弧炉冶炼的 40Cr 钢为研究对象, 通过开展电弧炉配加 30 t 不同尺寸直接还原铁 (DRI) 试验, 研究了 Consteel 电弧炉配加不同尺寸 DRI 对电弧炉冶炼过程、钢铁料消耗、电耗和电弧炉终渣成分的影响。结果表明, 电弧炉冶炼 40Cr 钢过程配加小尺寸 DRI 易导致冶炼过程溢渣量增大, 且溢渣中 FeO 含量较高, 钢铁料消耗和电耗升高, 终渣碱度降低, 终渣 FeO 含量升高。同时, 电弧炉配加小尺寸 DRI 时排出的炉渣易在渣罐底形成“铁钝”。电弧炉冶炼 40Cr 钢配加 DRI 尺寸  $\leq 6.3$  mm 占比低于 8.5% 时冶炼效果较好。可对 DRI 进行筛分后使用, 筛掉尺寸较小的 DRI, 同时, 避免空料仓上料, 尽量在半仓或高于半仓上料, 避免落差较大 DRI 破碎使小尺寸占比升高。

**关键词:** 电弧炉; DRI 尺寸; 碱度; 渣中 FeO 含量; 钢铁料消耗; 电耗

**DOI:** 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00184 **中图分类号:** TF 741

## The Influence of Direct Reduced Iron Size on EAF Smelting

Kang Xu<sup>1</sup>, Cao Zhenwei<sup>2</sup>, Wang Qiang<sup>1</sup>, Liu Chong<sup>1</sup>, Li Shuangjiang<sup>1</sup>, Zhang Junfen<sup>1</sup>

(1 HBIS Material Technology Research Institute, Shijiazhuang 052135, China; 2 HBIS Group Zhangxuan Technology, Xuanhua 075100, China)

**Abstract:** Taking the 40Cr steel smelted by Consteel EAF of Zhang Xuan Technology as the research object, the effects of adding different particle size direct reduced iron (DRI) to the Consteel EAF on the EAF smelting process, steel material consumption, electricity consumption, and final slag ingredient of the EAF were studied by conducting experiments on adding 30 tons of different particle size DRI to the EAF. The results indicate that adding small-sized DRI during the smelting of 40Cr steel in an EAF can easily lead to an increase in slag overflow during the smelting process, and the FeO content in the overflow slag is higher, resulting in an increase in steel and electricity consumption, a decrease in the alkalinity of the final slag, and an increase in the FeO content of the final slag. At the same time, the slag discharged from the EAF with small-sized DRI is prone to forming iron thallium at the bottom of the slag tank. The proportion of EAF smelting 40Cr steel with DRI size  $\leq 6.3$  mm is less than 8.5%, and the smelting effect is better, DRI can be screened and used to remove those with smaller particle sizes. At the same time, avoid loading materials from empty silos, try to load materials in half or above half silos, and avoid large drop DRI crushing that increases the proportion of small particles.

**Key Words:** EAF; DRI Size; Alkalinity; FeO Content in Slag; Steel Material Consumption; Electricity Consumption

电弧炉炼钢具有工序短、投资少、建设快、节能减排效果突出等优势, 电弧炉短流程炼钢的 CO<sub>2</sub> 排放约为长流程炼钢的 1/3<sup>[1-4]</sup>。但电弧炉使用的废钢经过多次循环利用残余元素及有害元素等急剧增加, 不利于提高产品质量, 难以生产出优质的洁净钢<sup>[5-7]</sup>。随着科技进步及工业发展, 社会需求对钢铁材料的性能要求日益多样化, 电弧炉仅以废钢为原料生产的钢材难以满足高端产品品质要求<sup>[8-10]</sup>。直接还原铁 (DRI, direct reduced iron) 中残余元素和有害元素质量分数较低, 并且适合大规模生产, 在电弧炉冶炼中配加一定比例的直接还原铁作为原料, 可以有效稀释钢中残余元素及有害元素含量, 是电

弧炉冶炼高品质洁净钢的有效手段之一, 同时, 也可有效缓解国内废钢短缺的问题, 有利于降低生产成本<sup>[11-14]</sup>。电弧炉通常配加一定比例的 DRI 来生产低氮、极低磷和低氢质量分数的高品质优质钢<sup>[15-17]</sup>, 但电弧炉配加 DRI 冶炼时, DRI 质量对电弧炉冶炼过程和冶炼技术经济指标影响显著, 许多专家和学者研究了 DRI 质量 (DRI 中脉石质量分数、碳质量分数、金属化率等) 对冶炼技术经济指标 (如渣量、电耗、电极消耗等) 的影响, 但 DRI 尺寸对电弧炉冶炼过程和冶炼技术经济指标影响鲜有研究<sup>[18-22]</sup>。

本文以张宣科技 Consteel 电弧炉冶炼的 40Cr 钢为研究对象, 通过开展电弧炉配加 30 t 不同尺寸

DRI 试验,研究了 Consteel 电弧炉配加不同尺寸 DRI 对电弧炉冶炼过程、钢铁料消耗、电耗和电弧炉终渣成分的影响,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 化学成分指标 1, 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( $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ )含量平均为 3%~4%。

电弧炉试验用 DRI 尺寸占比见表 2, 试验用 DRI 尺寸为入炉前电弧炉炉顶皮带上 DRI 尺寸, DRI 试样 A~C 大于 10 mm 尺寸占比逐渐降低,  $\leq 10$  mm 尺寸占比逐渐增加, 试样 A 较大尺寸 DRI 占比较高, 试样 C 较小尺寸 DRI 占比较高。

电弧炉配加不同尺寸 DRI 生产 40Cr 钢试验, 工艺流程为 150 t Consteel 电弧炉冶炼-LF 精炼-方坯连铸, Consteel 电弧炉总容量 230 t, 出钢量 150 t, 留钢量 80 t。40Cr 钢终点成分控制见表 3, 试验过程不同尺寸 DRI 从炉顶加料孔连续加入, 加入速度 2.5 t/min, 每炉 DRI 加入量为 30 t, 不同尺寸 DRI 各试验 15 炉。试验过程电弧炉配加不同尺寸 DRI 造渣辅料石灰和轻烧白云石加入量相同。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 电弧炉配加不同尺寸 DRI 对电弧炉冶炼过程的影响

电弧炉配加 DRI 冶炼过程中存在溢渣现象, 小尺寸 DRI 占比较高时溢渣较多。电弧炉配加 DRI 试样 A 在配加 DRI 过程无溢渣, 炉内钢渣总重超过 200 t 后有炉渣从炉门溢出; 电弧炉配加 DRI 试样 B 在加入量超过 20 t 后开始溢渣, DRI 试样 B 加入完成后停止溢渣; 电弧炉配加 DRI 试样 C 在加入量超过 8 t 后开始溢渣, DRI 试样 C 加入完成后停止溢渣。对溢渣成分进行检测, 见表 4, 可以看出, 电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时溢渣中 FeO 含量较高。DRI 从炉顶进入电弧炉时, 大尺寸 DRI 下落过程冲击力较大能够穿过渣层进入钢液中; 小尺寸 DRI 因从炉顶下落时冲击力较小, 受炉渣阻力影响无法穿过渣层滞留在渣层中。DRI 中含有少量的 FeO, 小尺寸 DRI

在渣层中熔化使渣中 FeO 含量升高, 渣中 FeO 含量升高使炉渣变稀, 流动性增强, 同时, 渣中 DRI 中含有少量的碳, 与渣中 FeO 反应快速生成 CO 促进炉渣发泡, 炉渣发泡较好, 炉渣厚度升高, 当炉渣厚度超过炉门位置后从渣门溢出, 部分炉渣中滞留的小尺寸 DRI 和小尺寸 DRI 熔化后形成的小钢液滴随炉门溢渣流出, DRI 试样 B 和 C 小尺寸占比较高, 因而, 电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时, 溢渣中 FeO 含量较高。

电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时, 排出的炉渣在渣罐底部形成“铁钝”, “铁钝”粘结在渣罐底部, 如图 1 所示。因为电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 溢渣量大, DRI 试样 B 和 C 小尺寸占比较高, 随炉门溢渣流出的小尺寸 DRI 和小尺寸 DRI 熔化后形成的小钢液滴较多。钢液滴密度高于炉渣, 不断下沉穿过渣层到渣罐底部, 并粘结在渣罐底部, 当渣罐装满炉渣倾倒入炉渣时, 其粘结在底部不随炉渣倾倒入出, 随着冶炼炉数增加, 炉渣中不断有小钢液滴下沉穿过渣层到渣罐底部, “铁钝”尺寸不断增大形成图 1 中尺寸较大的“铁钝”。

### 2.2 电弧炉配加不同尺寸 DRI 对钢铁料消耗和冶炼电耗的影响

电弧炉配加不同尺寸 DRI 对钢铁料消耗影响如图 2(a) 所示, 可以看出, 电弧炉配加 DRI 试样 A 时钢铁料消耗最低, 电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时钢铁料消耗较高。因为电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 溢渣量大, 随炉门溢渣流出的小尺寸 DRI 较多, 使电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 钢铁料消耗较高; 同时, 冶炼过程除尘风机和抽烟气风机会抽走部分小尺寸 DRI, 试样 B 和 C 小尺寸占比较高, 因而电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时钢铁料消耗较高。

电弧炉配加不同尺寸 DRI 对冶炼电耗的影响如图 2(b) 所示, 电弧炉配加 DRI 试样 A 时电耗最低, 电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时电耗较高。因为, 电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时钢铁料消耗较高, 出钢量相同时, 电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时需要加入的钢铁料增加, 使电耗升高。同时, 电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 时溢渣量较大, 炉渣从炉门溢出会带走较多热量, 因而电耗较高。

小尺寸 DRI 占比较高的 DRI 在电弧炉冶炼过程

表 1 电弧炉试验用 DRI 化学成分(质量分数)

Table 1 DRI chemical composition indicators for EAF testing

										%
金属铁	TFe	C	P	S	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MgO	CaO	$\text{TiO}_2$	Mn
83~86	88~90	2.5~3.5	$\leq 0.01$	$\leq 0.01$	2.5~3.5	0.5~1.0	0.5~1.0	0.3~0.6	0.7~1.0	0.08~0.12

表 2 电弧炉试验用 DRI 尺寸比例  
Table 2 DRI size ratio for EAF testing %

DRI 试样	DRI 尺寸/mm				
	>16	>10~16	>6.3~10.0	≥3.15~6.3	<3.15
A	2.9	45.4	43.2	4.2	4.3
B	1.6	30.5	56.6	7.4	3.9
C	0.7	14.1	65.5	13.2	6.5

表 3 40Cr 试验钢电弧炉终点成分(质量分数)  
Table 3 EAF final composition of 40Cr test steel %

C	P	S	N	Cr	Ni, Cu
0.06~0.15	≤0.020	≤0.055	≤0.006	≤0.10	≤0.10

使用效果较差,电弧炉冶炼过程应尽量避免使用小尺寸占比较高的 DRI,在使用过程中可对 DRI 进行筛

分,筛掉小尺寸 DRI;同时,在加料时应避免空料仓上 DRI,尽量在半仓或高于半仓加料,DRI 料仓高度约为 9 m,避免加料时落差较大 DRI 破碎使小尺寸 DRI 占比升高。

### 2.3 电弧炉配加不同尺寸 DRI 对电弧炉终渣成分的影响

电弧炉配加不同尺寸 DRI 对电弧炉终渣成分的影响见表 5,可以看出,电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 冶炼终渣碱度较低,因为 DRI 试样 B 和 C 小尺寸占比较高,冶炼过程溢渣量较多,配加 DRI 过程加入石灰和轻烧白云石的量较大,部分石灰和轻烧白云石未完全熔化进入渣中随溢渣流出,从表 4 可以看出,电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 冶炼过程溢

表 4 冶炼过程溢渣成分(质量分数)  
Table 4 Ingredients of slag overflow during smelting process %

DRI 试样	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	R
A	36.83	7.02	18.97	0.47	0.12	5.45	3.52	1.88	25.74	1.94
B	35.01	7.08	16.94	0.41	0.09	5.53	2.37	1.71	30.86	2.07
C	31.43	6.87	14.92	0.39	0.10	4.65	2.07	1.45	38.12	2.11



图 1 渣罐底部形成的“铁钝”  
Fig. 1 Iron thallium formed at the bottom of the slag tank

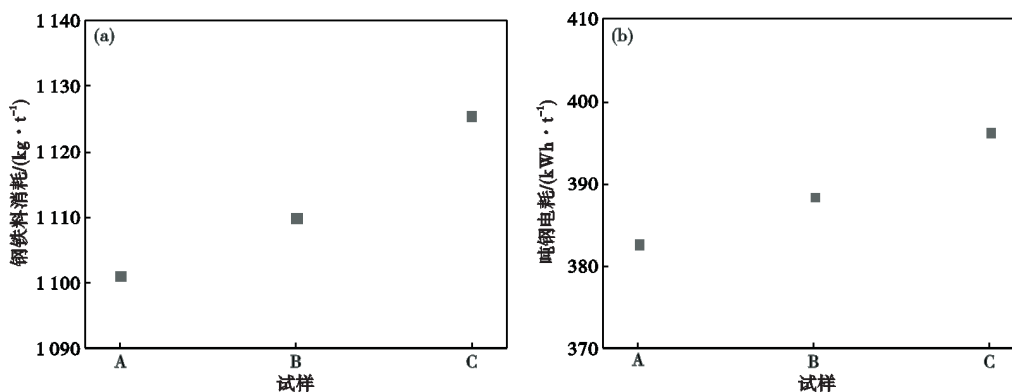


图 2 电弧炉配加不同尺寸 DRI 对(a)钢铁料消耗和(b)电耗的影响  
Fig. 2 The impact of adding different sizes of DRI to (a)EAF on steel material consumption and (b)electricity consumption

表 5 电弧炉配加不同尺寸 DRI 对电弧炉终渣成分(质量分数)影响

Table 5 The influence of adding different sizes of DRI to EAF on the final slag ingredient (mass fraction) of EAF %

DRI 试样	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	R
A	36.98	7.74	20.06	0.43	0.15	4.87	5.59	1.54	22.64	1.84
B	33.16	6.68	19.53	0.48	0.11	6.22	4.68	1.95	27.19	1.70
C	30.94	6.37	19.66	0.44	0.11	6.12	4.49	1.75	30.12	1.57

渣碱度较高,导致电弧炉终渣碱度降低。同时,从表 5 可以看出,电弧炉配加 DRI 试样 B 和 C 电弧炉终渣 FeO 含量较高,但低于冶炼过程溢渣 FeO 含量,一方面在冶炼后期喷碳量较高,吹氧量较低,部分渣中 FeO 被还原;另一方面在电弧炉冶炼终点时刻,渣中较多 DRI 熔化后形成的小钢液滴已随溢渣流出,或穿过渣层进入钢液中,但仍有尺寸较小的 DRI 熔化后形成的小钢液滴留在炉渣中。

### 3 结论

(1) 电弧炉冶炼 40Cr 钢过程配加小尺寸 DRI 时

易导致冶炼过程溢渣量增大,且溢渣中 FeO 含量较高,排出的炉渣易在渣罐底形成“铁锭”。

(2) 电弧炉配加小尺寸 DRI 时钢铁料消耗和电耗较高。

(3) 电弧炉配加小尺寸 DRI 时电弧炉终渣 FeO 含量较高,但低于冶炼过程溢渣 FeO 含量。

(4) 电弧炉冶炼 40Cr 钢配加 DRI 尺寸 ≤6.3 mm 占比低于 8.5%、≥10 mm 高于 48% 使用效果较好,可对 DRI 进行筛分后使用,同时,避免空料仓加 DRI,尽量在半仓或高于半仓加料,避免落差较大 DRI 破碎使小尺寸占比升高。

### 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.
- [3] 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.
- [4] Harada T, Tanaka H. Future steelmaking model by direct reduction technologies[J]. ISIJ International, 2011, 51(8): 1301-1307.
- [5] Erwee M W, Pistorius P C. Nitrogen in SL/RN direct reduced iron: Origin and effect on nitrogen control in EAF steelmaking[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2012, 39(5): 336-341.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李彬. 基于氢气直接还原铁冶炼高纯铁和高纯轴承钢的基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [11] 田乃媛,余华松,刘青,等. 热压块铁(HBI)在电炉炼钢中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(6): 508-510.
- [12] 谷力功. 150 t UHP—EAF 运行几年来的技术创新及前景展望[J]. 钢铁, 2000, 35(9): 17-19.
- [13] Felix Schuler, Nicole Voigt, Torben Schmidt, et al. Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050[J]. Stahl und Eisen, 2014, 133(9): 61-63.
- [14] Sujit Sanjal, 陶江善. DRI 在冶炼优质钢中的应用[J]. 中国废钢铁, 2015(5): 27-31.
- [15] 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.
- [16] Mohamed Abd Elkader, Ayman Fathy, Mamdouh Eissa, et al. Effect of direct reduced iron proportion in metallic charge on technological parameters of EAF steelmaking process[J]. International Journal of Science and Research (IJSR), 2016, 5(2): 2016-2024.
- [17] 贺美乐,张豫川,王庆,等. 电弧炉采用直接还原铁炼钢工艺技术分析[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 33-38.
- [18] 牛士珍,牛四通. 海绵铁在电炉炼钢中使用效果的分析[J]. 特殊钢, 1997, 18(4): 37-39.
- [19] 王海兵. 直接还原铁作为废钢替代品在电弧炉中的应用[J]. 钢铁研究, 2004, 32(5): 53-57+61.
- [20] 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.
- [21] Francesco Memoli. Behavior and benefits of high-Fe3C DRI in the EAF[J]. Iron and Steel Technology, 2015, 2(4): 1928-1945.
- [22] Pablo, Duarte, Angelo, et al. High-carbon DRI and its use and advantages in EAF operations[J]. Iron & Steel Technology, 2017, 14(3): 64-70.