

# 电熔炉冶炼低品位 DRI 扩大试验研究及工艺计算

李冲<sup>1</sup>, 高永亮<sup>1</sup>, 徐小锋<sup>1</sup>, 杨聪聪<sup>2</sup>, 徐郭莉<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

2. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083)

**[摘要]** 本文采用电熔炉冶炼低品位 DRI, 开展百公斤级扩大化试验, 探索低品位 DRI 电熔炉冶炼特性, 包括渣铁分离效果、铁水渗碳效果、铁收得率等, 并利用设计软件计算吨铁电耗、煤耗等指标。试验结果表明, DRI 球由于具有团疏松多孔的结构, 在熔炼过程中始终漂浮在熔池上方; 在二次电压 120 V 下, 电极始终为浸没式操作, 不能实现刷弧或明弧操作。通过从顶部加入无烟煤和 DRI 的混合物料可以实现良好的铁还原和铁水渗碳效果, 铁水含碳量平均值为 3.09%。在低碱度渣型和高渣率下, 所得渣 FeO 含量平均值为 1.47%, 铁收得率平均值高达 98.84%。低品位 DRI 热态入炉生产液体热金属所需的理论吨铁电耗为 511 kW·h/t, 而冷态入炉的理论吨铁电耗为 770 kW·h/t, 热态 DRI 直接入炉冶炼可以节能约 50%。

**[关键词]** 电熔炉; 低品位 DRI; 直接还原铁; 碳排放; 吨铁电耗

**[中图分类号]** TF55 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)06-0028-07

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.06.005

## 0 引言

钢铁是全球基础设施的重要组成部分, 并且作为一种重要商品持续增长, 但其生产过程中的排放问题也日益显著。全球钢铁行业 CO<sub>2</sub> 直接排放量约为 26 亿 t/a, 占全球总碳排放量的 7%, 是全球第二大碳排放产业<sup>[1-3]</sup>。为了控制全球气温上升, 钢铁行业需要以降碳为目标, 将 CO<sub>2</sub> 平均排放强度从 1.4 t/t 降低到 0.6 t/t, 减少约 60%<sup>[4-5]</sup>。

目前, 传统的高炉 (BF) - 转炉 (BOF) 综合路线仍是全球主要的炼钢方法, 其产量占全球钢铁产量的 70% 以上<sup>[6-7]</sup>, 同时也是碳排放和能源消耗最密

集的路线, 因此, 钢铁冶炼从传统的综合炼钢工艺 (高炉-转炉工艺流程) 转向具有较低温室气体排放的替代工艺流程, 是钢铁行业未来的趋势。直接还原铁 (DRI) - 电弧炉 (EAF) 路线是其中一种替代工艺, 其流程短、投资少、节能减排效果突出, 其 CO<sub>2</sub> 排放量约为长流程的 1/3<sup>[8-11]</sup>。但电弧炉只适用于处理高品位铁精矿, 处理中低品位、高脉石铁矿石时效率低下, 主要表现为高渣量、高能耗和低产量, 而这类铁矿石占全球铁矿石供应的大部分<sup>[12-19]</sup>。因此, 采用低排放工艺有效处理中低品位铁矿石对于全球钢铁行业的降碳至关重要。

电熔炉 (ESF) 可与上游竖炉操作良好配合, 所产铁水用于转炉吹炼, 形成的 DRI-ESF-BOF 工艺路线可以显著减少 CO<sub>2</sub> 排放, 高效处理高脉石 DRI, 提高产量并允许使用非 DR 级球团/块矿。电熔炉作为一种绿色冶炼技术, 广泛应用于有色金属、铁合金和铁矿石 (钛铁矿/钒钛磁铁矿) 冶炼<sup>[20-26]</sup>, 其中新西兰钢厂应用电熔炉冶炼钒钛磁铁矿, 其铁回收率可达 90% ~ 95%, 钒回收率 > 80%, 有效减少焦炭依赖及碳排放, 但其电耗较高, 只适用于电能充足的地区。本文以高品位 DRI 和不同比例高炉渣搭配模拟低品位高脉石 DRI, 采用 200 kVA 电熔炉进行百公斤级 DRI 冶炼扩大实验, 探索低品位 DRI 电熔炉冶炼特性, 考察不同渣率及低碱度下金属收得率的变化。由于冶炼低品位 DRI 渣量大, 吨铁电耗

**[收稿日期]** 2025-07-14

**[基金项目]** 中国宝武低碳冶金技术创新基金 (BWLCF202216)

**[作者简介]** 李冲 (1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事工业废弃物开发利用工作。

**[引用格式]** 李冲, 高永亮, 徐小锋, 等. 电熔炉冶炼低品位 DRI 扩大试验研究及工艺计算 [J]. 绿色矿冶, 2025, 41 (6): 28-34.

LI Chong, GAO Yongliang, XU Xiaofeng, et al. Experimental research and process calculation of expanding low-grade DRI smelting in electric furnace [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41 (6): 28-34.

高,为明确电炉熔炼低品位DRI吨铁电耗等技术经济指标,本文利用Metcal冶金工艺模拟软件计算冶炼吨铁能耗、辅料消耗等指标,为后续半工业化试验及工程设计提供数据支撑。

## 1 试验方案

### 1.1 试验原料

目前国内量产DRI大部分为高品位DR级球团,低品位DRI在市场上不容易获得,因此,本文所

用直接还原铁为国内某钢厂竖炉所产高品位DRI,将其与高炉渣混合模拟低品位DRI。试验所用高品位DRI直径为10~15mm,化学成分见表1。由表1可知,DRI球团的TFe含量高达85.36%,MFe质量分数为78.99%,金属化率为92.54%,其余含铁组分主要以FeO形式存在。脉石含量为9.80%,酸性组分偏多,二元碱度( $R = w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ )为0.67。原料含有一定量的残碳,质量分数高达1.19%,另外还有少量有害元素P和S。

表1 DRI球团化学成分

成分	TFe	FeO	MFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	S	P	其他	Mr
含量	85.36	8.19	78.99	4.80	3.19	1.81	1.19	0.029	0.063	1.738	92.54

注:TFe表示全铁;MFe表示金属铁;Mr表示金属化率。

图1为DRI球团微观形貌及物相组成。由图1可知,DRI球团微观上呈现疏松多孔的特点;物相组成以金属铁(MFe)为主,在金属铁周围均匀分布一

定量的氧化亚铁(FeO)和由CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>等脉石组成的钙黄长石(Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)。

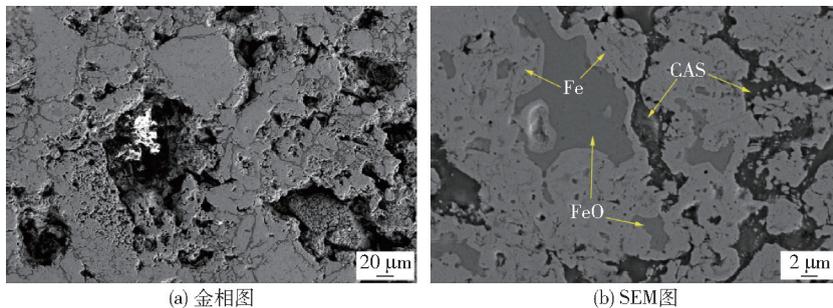


图1 DRI球团微观形貌及物相组成

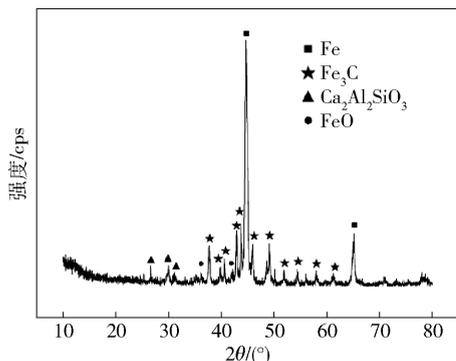


图2 DRI球团物相组成

电熔炉冶炼DRI渣型类似高炉渣型,因此,本文通过添加不同比例高炉渣模拟冶炼低品位DRI。高炉渣成分见表2,二元碱度为1.20。采用生石灰作为熔剂调整渣碱度;采用无烟煤作为渗碳剂和还原剂,其粒度 $\leq 15$ mm,固定碳含量为82.46%,硫含量为0.38%,无烟煤工业分析见表3,其灰分化学成分见表4。

### 1.2 试验设备

试验所用设备为额定功率200kVA交流电熔炉,二次电压最大为120V,设有双石墨电极(直径

表2 高炉渣化学成分

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	S	P	其他	碱度
含量	38.44	32.1	13.3	7.38	1.22	0.88	0.01	6.67	1.20

表3 无烟煤工业分析

成分	M <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	V <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>
含量	6.90	9.76	5.64	82.46

注:M<sub>ad</sub>代表水分;A<sub>ad</sub>代表灰分;V<sub>ad</sub>代表挥发分;FC<sub>ad</sub>代表固定碳。

表4 煤灰分化学成分分析

成分	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	S
含量	0.8	5.1	2.06	0.82	0.3	0.1	0.2	0.38

70 mm),最高冶炼温度可达1 700 ℃。炉膛内径为0.28 m<sup>2</sup>,采用定量给料机上料,每炉次可投料量为300~1 000 kg,配有烟气收尘、碱吸收、机器人自动测温取样系统等。

### 1.3 试验过程

本文共进行3组炉次试验,每组DRI消耗量为300 kg,试验配加不同比例高炉渣以模拟不同低品位DRI,每组试验高炉渣添加量分别为30 kg、70 kg、110 kg,添加后换算成铁精矿品位分别为60.18%、

55.01%、50.66%。渗碳剂和还原剂为固定碳含量82.46%无烟煤(粒度≤15 mm),配煤量为将矿石中Fe<sup>2+</sup>理论还原为金属Fe所需煤量以及铁水渗碳所需煤之和的1.2倍,铁水目标渗碳量为3%,计算得每炉试验需配入无烟煤23.27 kg。由于原DRI中酸性组分偏多,试验采用分析纯氧化钙作为熔剂调节渣碱度,每炉配加不同比例生石灰以对比不同碱度下的冶炼效果。每炉试验冶炼温度控制在1 550 ℃,保温时间均为1 h,具体试验配料方案见表5。

表5 DRI冶炼试验方案

炉次	DRI/kg	高炉渣/kg	模拟DRI品位/%	换算成铁精矿品位/%	无烟煤/kg	生石灰/kg	碱度
1	300	30	77.60	60.18	23.27	0	0.88
2	300	70	69.21	55.01	23.27	0	0.99
3	300	110	62.46	50.66	23.27	8	1.20

按照试验方案将300 kg直接还原铁、高炉渣、无烟煤和生石灰进行人工混料;向电熔炉内加入50 kg混合料作为底料,底料上方加入2 kg焦炭进行起弧操作,熔池形成后使用连续加料机连续加入混合物料,加料速度根据炉内化料情况在56~128 kg/h范围调节,直至混合物料全部熔化后开始保温。试验采用快速一次性热电偶进行渣铁温度测量,通过调节二次电压及电流进行温度控制,二次电压控制区间为85~120 V,电流控制在1.0~1.5 kA。在一定温度下保温指定时间后,通过人工烧氧管方式将渣铁熔液放入渣盆中进行渣铁分离,冷却后称量渣、铁及烟尘重量,取渣、铁和烟尘样品进行成分分析,计算渣率、烟尘率及铁收得率,计算公式见式(1)~(3)。

$$\text{渣率}(\%) = \frac{\text{实际产渣量}(\text{kg})}{\text{物料总投入}(\text{kg})} \times 100\% \quad (1)$$

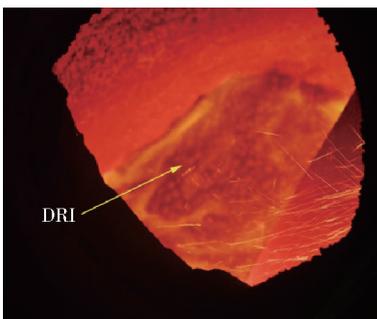
$$\text{烟尘率}(\%) = \frac{\text{实际产烟尘量}(\text{kg})}{\text{物料总投入}(\text{kg})} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{铁收得率}(\%) = \frac{\text{实际产铁量}(\text{kg})}{\text{理论产铁量}(\text{kg})} \times 100\% \quad (3)$$

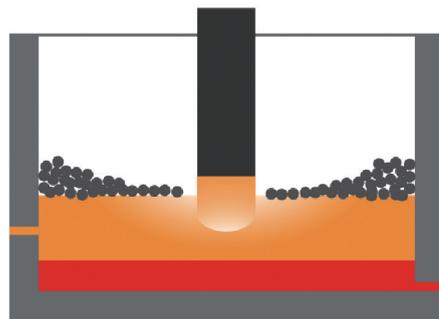
## 2 试验结果与讨论

### 2.1 DRI炉内表现特性及电极操作模式

由于加入炉内的DRI具有相对较高的电导率,为避免DRI与电极直接接触导致电熔炉工况不稳,试验将DRI落料点设置在炉墙周围。如图2所示,DRI疏松多孔的特性导致其密度较低,未熔化的DRI首先会漂浮在熔池上方,随着物料不断加入,边墙堆积的DRI开始漂向中间电极高温区,在高渣温



(a) DRI炉内真实状态



(b) DRI炉内状态及电极操作方式示意图

图3 DRI炉内状态及电极操作方式示意

作用下物料熔化。试验过程中电极始终浸没在炉渣内,通过电阻热进行化料,未能实现刷弧操作模式,主要原因是由于电炉变压器的限制,最大二次电压仅有 120 V,不足以击穿气体形成电弧。



(a) 上渣层



(b) 下铁层

图4 渣铁分离宏观效果

现分离脱模,同时渣层和铁层也实现分离。

## 2.2 铁水渗碳及渣铁分离效果

试验所得生铁主要成分及重量见表6。其中,生铁碳含量是重要参数,直接影响后续转炉操作。由表6可知,生铁中碳含量最高为3.19%,最低为2.89%,平均值为3.09%,三个炉次试验与设定铁水含碳目标值3%几乎一致,说明通过简单地从顶部加入无烟煤和DRI的混合物料就可以实现良好的铁还原和铁水渗碳。生铁中Si含量平均值为0.67%,说明有部分 $\text{SiO}_2$ 在高温下被还原进入铁水;

渣铁宏观分离效果如图3所示。渣铁通过放出口一起放入渣包中,热态熔液在渣包中静置后实现很好的分离,上层密度较低为渣层,下层密度较高为铁层。在冷却过程中,由于热胀冷缩渣铁与渣包实

生铁中S、P有害元素平均含量较低,分别为0.03%和0.02%,说明大量有害元素被保留在冶炼渣中。试验所得冶炼渣主要成分及重量见表7。由于冶炼渣中部分 $\text{SiO}_2$ 被还原,渣碱度相较原始渣型略有变化,但冶炼渣型仍在低碱度下波动,试验所得冶炼渣在低碱度下FeO含量均较低,平均值为1.47%,最高仅为1.69%,最低为1.11%。由于试验所用电熔炉炉衬材料为镁铬砖,冶炼过程中会造成一定的炉衬腐蚀,导致冶炼渣中MgO含量较原始高炉渣有一定的升高。

表6 生铁金属成分及重量

%

炉次	Fe	Si	S	P	C	其他	金属重/kg
1	93.39	0.71	0.03	0.03	2.89	2.89	286.30
2	94.39	0.78	0.04	0.03	3.19	1.57	282.50
3	94.98	0.52	0.03	0.01	3.19	1.27	280.00
平均值	94.25	0.67	0.03	0.02	3.09	1.91	282.93

表7 冶炼渣成分及重量

%

炉次	CaO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MgO	FeO	S	P	其他	碱度	渣重/kg
1	34.04	31.86	16.77	14.53	1.11	0.42	0.03	1.23	1.07	58.30
2	36.11	31.83	15.48	13.25	1.62	0.37	0.01	1.34	1.13	97.55
3	39.75	30.86	13.85	11.85	1.69	0.43	0.01	1.56	1.29	147.42

图5为试验所得各炉次不同渣率对应的铁收得率。由图5可知,随着高炉渣配比增加,渣率从17.67%增加到35.96%;铁收得率随渣率增加而减小,从最高99.25%降低到98.44%,但整体仍保持较高值,平均值为98.84%,表明在高渣率下电熔炉冶炼低品位DRI具有很好的金属收得率,同时也证

明了使用电熔炉冶炼低品位铁矿石相较电弧炉更具有优势。

3个炉次试验所得烟尘总量及成分组成见表8。由表8可知,由于试验用电炉密封性差,漏风率高,试验所得烟尘率略高,为2.09%,烟尘主要由CaO、 $\text{SiO}_2$ 、MgO、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 组成,其中 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量最高,为26.21%。

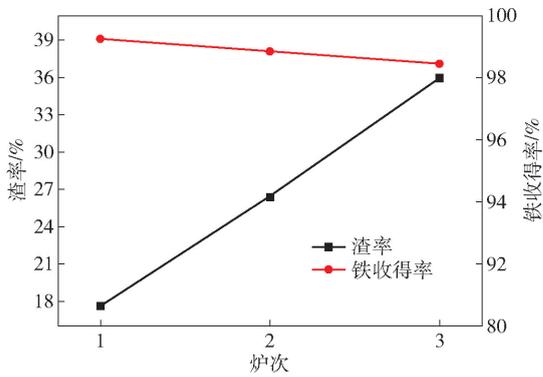


图5 不同渣率对铁收得率影响

由于炉子存在尺寸较小、密封性差且非连续生产等问题,漏风量、烟气量、电极消耗和能量损失均较大,无法从本次试验中得出每吨 DRI 的可靠能耗等相关数据,需完善设备设施,在后续试验中进一步考察相关指标。

### 3 冶金工艺计算

由于冶炼低品位 DRI 渣量大,吨铁电耗高,本文以低品位 DRI(原矿铁品位 62.31%)为原料,根据冶炼经验取吨铁电极消耗 4 kg/t,采用石灰石作

表8 烟尘成分及烟尘率

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P	其他	烟尘量/kg	烟尘率/%
含量	23.12	22.04	1.47	21.96	26.21	1.17	0.17	3.86	24.78	2.09

熔剂,以固定碳含量 83% 的无烟煤为还原剂和渗碳剂,根据上述相关试验结果,利用 Metcal 冶金设计软件进行工艺模拟,计算单线年产 100 万 t 铁水的各种消耗,所得物料平衡见表 9。由表 9 可知,石灰

石和无烟煤消耗分别为 120.42 kg/t 和 102.77 kg/t,渣率为 19.55%,烟尘率约为 1%。表 10、表 11 分别为电熔炉冶炼热态和冷态 DRI 的热量平衡。根据表 10、表 11,在不考虑热损失的情况下,用热态 DRI

表9 电熔炉冶炼低品位 DRI 投入和产出物料平衡

序号	投入			产出		
	名称	温度/°C	用量/t·h <sup>-1</sup>	名称	温度/°C	产生量/t·h <sup>-1</sup>
1	DRI	950	171.32	铁水	1400	134.41
2	电极	25	0.54	电炉渣	1500	39.63
3	石灰石	25	16.19	烟尘	1400	1.70
4	石灰石含水量	25	0.85	烟气	1400	27.01
5	无烟煤	25	13.81			
6	无烟煤含水量	25	0.04			
7	合计		202.75	合计		202.75

表10 电熔炉冶炼热态 DRI 的投入和产出的热量平衡

热收入					热支出				
热类型	物料	温度/°C	能量/MJ·h <sup>-1</sup>	占比/%	热类型	物料	温度/°C	能量/MJ·h <sup>-1</sup>	占比/%
物理热	DRI	950	125 141.56	33.61	铁水	1400	133 644.13	35.89	
	电极	25	0.00	0.00	电炉渣	1500	62 720.94	16.84	
	石灰石	25	0.00	0.00	烟尘	1200	2 029.23	0.54	
	石灰石含水量	25	0.00	0.00	物理热	烟气	1200	38 355.31	10.30
	无烟煤	25	0.00	0.00					
	无烟煤含水量	25	0.00	0.00					
	小计		125 141.56	33.61	小计		236 749.61	63.58	
化学热					化学热		135 612.51	36.42	
补热			247 220.55	66.39	热损失		0.00	0.00	
合计			372 362.12	100.00	合计		372 362.12	100.00	

表 11 电熔炉冶炼冷态 DRI 的投入和产出的热量平衡

		热收入			热支出				
热类型	物料	温度/℃	能量/MJ·h <sup>-1</sup>	占比/%	热类型	物料	温度/℃	能量/MJ·h <sup>-1</sup>	占比/%
	DRI	25	0.00	0.00		铁水	1 400	133 644.13	35.89
	电极	25	0.00	0.00		电炉渣	1 500	62 720.94	16.84
	石灰石	25	0.00	0.00		烟尘	1 200	2 029.23	0.54
物理热	石灰石含水量	25	0.00	0.00	物理热	烟气	1 200	38 355.31	10.30
	无烟煤	25	0.00	0.00					
	无烟煤含水量	25	0.00	0.00					
	小计		0.00	0.00		小计		236 749.61	63.58
化学热					化学热			135 612.51	36.42
补热			372 362.12	100.00	热损失			0.00	0.00
合计			372 362.12	100.00	合计			372 362.12	100.00

(950 ℃) 生产液体热金属所需的理论电耗为 511 kW·h/t, 而采用冷态 DRI(25 ℃) 生产液体热金属所需的理论电耗为 770 kW·h/t, 说明热态 DRI 直接加入电炉冶炼可以节省约 50% 能耗。电熔炉冶炼热态 DRI 中, 加热原料到熔体温度需要的电能占比 45.15%, 而化学反应吸热所需电能占比 54.85%。

## 4 结论

1) DRI 球团微观上呈现疏松多孔结构, 金属铁周围均匀分布着 FeO 和脉石相, 由于密度相对较小, 在熔炼过程中未熔化的 DRI 漂浮在熔池上方; 在最大二次电压 120 V 下, 电极始终浸没在冶炼渣内, 不能实现刷弧操作。

2) 通过从顶部加入无烟煤和 DRI 的混合物料, 可以实现良好的铁还原和铁水渗碳, 铁水含碳平均值为 3.09%。在低碱度渣型和高渣率下, 所得渣中 FeO 含量平均值为 1.47%, 铁收得率平均值高达 98.84%, 证明了电炉冶炼低品位 DRI 具有很好的金属收得率及优势。

3) 冶金工艺计算结果可知, 低品位 DRI 热态入炉生产液体热金属所需的理论电耗为 511 kW·h/t, 而冷态入炉的理论电耗为 770 kW·h/t, 热态 DRI 直接入炉冶炼能耗可以节省约 50%。

### [参考文献]

[1] FAN Z, FRIEDMANN S J. Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy[J]. *Joule*, 2021, 5(4): 829–862.

[2] WOLFINGER T, SPREITZER D, ZHENG H, et al. Influence of a prior oxidation on the reduction behavior of magnetite iron ore ultra-fines using hydrogen[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(1): 14–28.

[3] JORGE PERPIÁN, PEA B, BAILERA M, et al. Integration of carbon capture technologies in blast furnace based steel making: A comprehensive and systematic review [J]. *Fuel*, 2023, 12(336): 127–137.

[4] ZHANG S, YI B, GUO F, et al. Exploring selected pathways to low and zero CO<sub>2</sub> emissions in China's iron and steel industry and their impacts on resources and energy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 13(15): 340–348.

[5] Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient societies[J]. *Steel Scenario*, 2019, 12(6): 7–11.

[6] PFEIFFER A, WIMMER G, SCHENK J. Investigations on the interaction behavior between direct reduced iron and various melts[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5691–5699.

[7] ZHAO J, ZUO H, WANG Y, et al. Review of green and low-carbon ironmaking technology [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2020, 47(3): 1–11.

[8] 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.

[9] 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.

[10] TOKTAROVA A, KARLSSON I, JOHAN ROOTZÉN, et al. Pathways for low-carbon transition of the steel industry—a swedish case study [J]. *Energies*, 2020, 13(15): 3840–3849.

[11] HARADA T, TANAKA H. Future steelmaking model by direct reduction technologies [J]. *ISIJ International*, 2011, 51(8): 1301–1307.

[12] DERDA W, SIWKA J, NOWOSIELSKI C. Controlling of the nitrogen content during EAF-Technology and continuous casting of steel [J]. *Archives of Metallurgy & Materials*, 2008, 53(2): 523–529.

[13] ELKADER M A, FATHY A, EISSA M, et al. Effect of direct reduced iron proportion in metallic charge on technological parameters of eaf steelmaking process [J]. *In-*

- ternational Journal of Science and Research ( IJSR ), 2016,5(2):2016-2024.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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):402-412.
- [18] MEMOLI F. Behavior and benefits of high-Fe<sub>3</sub>C DRI in the EAF[J]. Iron and Steel Technology, 2015, 2(4):1928-1945.
- [19] 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.
- [20] STEINBERG W S, GEYSER W, NELL J. The history and development of the pyrometallurgical processes at Evraz Highveld Steel & Vanadium[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011,111(10):705-710.
- [21] WALKER C, SUTHERLAND K, MARSHALL B. Conversion to partially open bath smelting on highveld Iron-making Furnaces[C]// European Metallurgical Conference, 2007.
- [22] ZHU D, ZHOU X, LUO Y, et al. Reduction smelting low ferronickel from pre-concentrated nickel-iron ore of nickel laterite [J]. High Temperature Materials and Processes, 2016, 35(10):1031-1036.
- [23] SINGHA P, DAS S, KUNDU S, et al. Ferrochrome production in a submerged electric arc furnace: fundamental analysis based upon the factsage-macro program approach [J]. Steel Research International, 2024, 95(7):840-845.
- [24] STEINBERG W S, PISTORIUS P C. Control of open slag bath furnaces at Highveld Steel and Vanadium Ltd: development of operator guidance tables[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2009, 36(7):500-504.
- [25] 李志强,张洋. 新西兰钒钛海砂磁铁矿冶炼工艺分析[J]. 现代冶金, 2017, 45(4):31-33.
- [26] 温大成. 新西兰钢铁公司的直接还原生产线[J]. 烧结球团, 1991, 16(1):26-27.

## Experimental Research and Process Calculation of Expanding Low-Grade DRI Smelting in Electric Furnace

LI Chong<sup>1</sup>, GAO Yongliang<sup>1</sup>, XU Xiaofeng<sup>1</sup>, YANG Congcong<sup>2</sup>, XU Guoli<sup>1</sup>

(1. China ENFI Engineering Corporation Ltd., Beijing 100038, China;

2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In this paper, the electric melting furnace was used to smelt low-grade DRI, and the expansion test of 100 kg was carried out to explore the smelting characteristics of low-grade DRI electric melting furnace, including slag-iron separation effect, molten iron carburizing effect, iron yield, etc., and the design software was used to calculate the power consumption and coal consumption per ton of iron. The experimental results show that the DRI ball always floats above the molten pool during the smelting process due to its loose and porous structure. Under the secondary voltage of 120 V, the electrode is always immersed operation, and the brush arc or open arc operation cannot be realized. By adding a mixture of anthracite and DRI from the top, good iron reduction and carburizing of molten iron can be achieved, and the average carbon content of molten iron is 3.09%. Under the low basicity slag type and high slag rate, the average FeO content of the obtained slag is 1.47%, and the average iron yield is as high as 98.84%. The theoretical power consumption per ton of iron required for the production of liquid hot metals by low-grade DRI hot charging is 511 kW·h/t, while the theoretical power consumption per ton of iron for cold charging is 770 kW·h/t. The direct charging of hot DRI can save energy by about 50%.

**Key words:** electric furnace; low-grade DRI; Direct Reduced Iron (DRI); carbon emissions; electricity consumption per ton of iron