



## 电弧炉采用直接还原铁炼钢工艺技术分析

贺美乐<sup>1</sup>, 张豫川<sup>1</sup>, 王庆<sup>1</sup>, 杨宁川<sup>1</sup>, 游香米<sup>2</sup>, 吴学涛<sup>1</sup>

(1 中冶赛迪工程技术股份有限公司中国中冶低碳技术研究院(重庆), 重庆 401122; 2 中冶赛迪技术研究中心有限公司基础技术及材料研究分院, 重庆 401122)

**摘要:** 分析了直接还原铁作为废钢替代品进行电弧炉炼钢的工艺技术特征, 并阐明了影响冶炼电耗的主要因素。结果表明, 熔池较大留钢量( $\geq 40\%$ )和诸如强化供氧、底吹和电磁搅拌的强化搅拌始终是促进熔化和缩短冶炼周期(可缩短8%~10%)的重要手段。直接还原铁比例超过30%宜采用连续加料, 冶炼前期和中期加料速度一般等于熔化速度28~33 kg/min(供电功率1 MW), 需匹配石灰和白云石以防渣线侵蚀, 冶炼全程应喷碳使泡沫渣埋弧操作以保证供电效率。为降低冶炼电耗, 应控制 $w[\text{C}]1\% \sim 4.5\%$ 、金属化率 $\geq 90\%$ 、 $w[\text{SiO}_2] \leq 6\%$ 、 $w[\text{P}] \leq 0.1\%$ 、 $w[\text{S}] \leq 0.04\%$ , 使用高C、高金属化率、低 $\text{SiO}_2$ 、低P、低S和较高温度的热直接还原铁。采用直接还原铁竖炉和电弧炉相结合的紧凑短流程工艺是低碳节能和洁净化生产的重要方向。

**关键词:** 电弧炉; 直接还原铁; 电耗; 低碳节能; 洁净化

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2023-00127 **中图分类号:**TF741

## Process and Technology Analysis of Direct Reduction Iron Steelmaking by Electric Arc furnace

He Meile<sup>1</sup>, Zhang Yuchuan<sup>1</sup>, Wang Qing<sup>1</sup>, Yang Ningchuan<sup>1</sup>, You Xiangmi<sup>2</sup>, Wu Xuetao<sup>1</sup>

(1 MCC Low-Carbon Technology Research Institute Chongqing, CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 2 Basic Technology and Materials Research Institute, CISDI Technology Center Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

**Abstract:** The technical characteristics of electric arc furnace steelmaking with direct reduced iron as a substitute for scrap steel are analyzed, and the main factors affecting the smelting power consumption are expounded. The results indicate that a large amount of steel left in melting pool ( $\geq 40\%$ ) and intensive mixing such as enhanced oxygen supply, bottom blowing, and electromagnetic stirring are important ways to promote melting and shorten the tap-to-tap cycle (which can be shortened by 8%-10%). The proportion of direct reducing iron exceeds 30%, continuous feeding should be used. The feeding speed in the early and middle stages of smelting is generally equal to the melting speed of 28-33 kg/min (power supply power is 1 MW). It is necessary to match lime and dolomite to prevent the erosion of slag line, and the whole smelting process should be sprayed with carbon foam slag to ensure the power supply efficiency. To reduce power consumption of smelting, direct reduction iron with high C content, high metallization rate, low  $\text{SiO}_2$  content, low P content, low S content, and higher temperature should be used as much as possible within a certain suitable range (that is,  $w[\text{C}]1\% \sim 4.5\%$ , metallization rate  $\geq 90\%$ ,  $w[\text{SiO}_2] \leq 6\%$ ,  $w[\text{P}] \leq 0.1\%$ ,  $w[\text{S}] \leq 0.04\%$ ). The compact short process combining direct reduction iron vertical furnace and electric arc furnace is an important direction for low-carbon, energy-saving, and clean production.

**Key Words:** Electric Arc Furnace (EAF); Direct Reduction Iron; Power Consumption; Low Carbon and Energy-saving; Purification

电弧炉短流程炼钢由于流程短、能耗低、碳排放少已成为“双碳”目标背景下炼钢工艺的趋势<sup>[1-4]</sup>。相比于铁水的生产, 直接还原铁的生产不经过焦炉、烧结等工序, 流程短、污染小、消耗低, 且碳排放少, 不会受到焦煤资源短缺的影响。此外, 直接还原铁中所含P、S、Si等有害杂质较低, 特别适合于电

弧炉冶炼优质的洁净钢<sup>[5]</sup>。随着低碳与洁净化生产的需要, 电弧炉采用直接还原铁替代废钢炼钢受到越来越多的重视, 对其工艺技术研究意义重大。当前直接还原铁在全球产量已超过1亿t, 而国内产量远远低于世界平均水平<sup>[6]</sup>。电弧炉采用直接还原铁炼钢工艺技术在国外发展相对成熟, 而国内虽进行

**基金项目:** 重庆市自然科学基金项目资助(CSTB2023NSCQ-BSX0025); 五矿集团科技专项资助(2021ZXD01); 中国中冶“181计划”重点研发项目资助

**作者简介:** 贺美乐(1991—), 男, 博士, 工程师; **E-mail:**meile.he@cisdi.com.cn; **收稿日期:** 2023-06-21

过一定研究和实践,但对其工艺技术特征和能耗的分析较少。因此,以电弧炉采用直接还原铁炼钢为研究对象,重点考察了直接还原铁作为废钢替代品进行电弧炉冶炼的工艺技术特征,并进一步分析影响冶炼电耗的主要因素。

## 1 冶炼工艺技术特征

### 1.1 熔池大留钢量设计

电弧炉炼钢是通过电弧能量的释放来熔化原料,同时借助炉壁和炉门的氧枪对炉料进行切割、熔化和脱碳。当电弧炉采用高比例直接还原铁进行冶炼时,主要采用顶部连续添加的方式。虽然电弧炉顶部的进料口设计得尽可能靠近极心圆,但是直接还原铁的加料区域仍在极心圆之外。此外,直接还原铁的密度相对较低,容易浮在钢液的上部。因此,电弧炉采用直接还原铁炼钢不仅要通过电弧和氧枪使熔池升温,还要通过熔池多元的搅拌作用实现熔炼。

为实现熔池良好的搅拌效果,在直接还原铁加入电弧炉之前,炉内应留有一定量的钢液,以保证炉料在加入熔池后能尽早熔化。电弧炉采用大比例的直接还原铁时,电弧炉留钢量一般按照不低于钢产量的40%设计。

### 1.2 熔池强化搅拌技术

传统电弧炉炼钢熔池搅拌强度不足,导致炉内物质和能量的传递较慢。为了加快冶炼节奏,先后开发了强化供氧和底吹搅拌等相结合的复合吹炼技术<sup>[7-9]</sup>,以及电磁搅拌技术<sup>[10]</sup>等。

电弧炉炼钢的复合吹炼技术已经在天津钢管、西宁特钢、新余特钢等公司应用,其应用前后效果对比见表1<sup>[8-9]</sup>。复合吹炼的应用效果良好,冶炼周期可缩短6%~8%。中冶赛迪工程技术股份有限公司研发的超级电弧炉炼钢技术,是集强化供氧、熔池复合吹炼和电磁搅拌于一体的新一代电弧炉技术,研发的IGBT柔性直流电源采用IGBT斩波调压,可以快速有效的控制电流大小和抑制电流波动,供电更加平稳高效,同时直流电的电磁搅拌大幅优化了熔池的动力学条件,进一步增强了熔池的搅拌效果,冶炼周期可缩短约8%~10%,能满足多元复杂炉料条件下的冶炼要求<sup>[10-11]</sup>。

### 1.3 原料结构的生产组织

以伊朗阿尔法钢铁公司的电弧炉为例<sup>[12]</sup>,电弧炉最初主要是按照每炉金属料结构10%废钢+90%直接还原铁的比例生产,但10%的废钢比例比较

表1 复合吹炼应用效果对比

Table 1 Comparison of application effects of combined flowing

工况	冶炼炉数	冶炼周期/min
50 t无复吹	736	59
50 t复吹	688	55
70 t无复吹	650	58
70 t复吹	350	53

小,造成每炉的料篮调度繁忙,配料与冶炼在节奏上不匹配。

此外,加料时炉盖频繁打开,造成热量散失严重,所以热利用率降低,非必要通电时间延长。经过工艺研究和系统的组织协调,确定首炉配比50%废钢和50%直接还原铁,而后再配四炉的全直接还原铁炉料的方案。经过现场实践,优化原料结构后,废钢的配料节奏更加适应冶炼,炉内的热量利用率有所提高,平均电耗降低8~10 kWh/t。因此,不同原料结构的生产组织对冶炼能耗影响显著,实际生产时应结合现场料篮容量、生产调度和炉内能效利用水平综合考虑。

### 1.4 加料制度

#### 1.4.1 热压块铁的加料

热压块铁是把高温直接还原铁加压成型,在使用时分装于料篮中与废钢一起加入炉中。就天津钢管公司150 t电弧炉实践经历看,单批料的热压块铁(100 mm×50 mm×30 mm)使用以不超过20%的比例为宜,比例过大会使得炉内结块且难于熔化,造成冶炼困难<sup>[13]</sup>。可见,为加快生产节奏同时保证较低的电耗,应控制热压块铁大小和配比不能过大。

#### 1.4.2 直接还原铁的加料

##### 1.4.2.1 成批装料

直接还原铁加入电弧炉的占比不等,若直接还原铁配比低于30%,则可采用料罐装料<sup>[14]</sup>。料篮底部填充轻废钢,其次是重废钢和直接还原铁,避免直接还原铁过多结块。然而,当电弧加热较厚的直接还原铁料层时,熔融金属填充了直接还原铁之间的空间并凝结,导致炉料烧结成一体,使得炉料整体不易加入熔池,熔化周期延长。当分批加入30%以上的炉料时,由于直接还原铁传热缓慢,相关技术指标较差,应通过连续加料的方式入炉。

##### 1.4.2.2 连续加料

当直接还原铁用量较大时,采用连续加料,通常通过炉顶加料孔实现加料。一是在炉顶中心开一个孔,使直接还原铁在垂直方向落入;另一种是

在炉顶半径的中间开一个孔,通过轨道进入炉内。连续进料系统需要较高的高度,以确保直接还原铁快速通过渣层。一般情况下,初始喂料速率为正常喂料速率的1/2~1/3,中期为满负荷喂料。但在后期,为了迅速提高钢液温度,尽快达到出钢温度,应减慢加料速度。

天津钢管公司150 t超高功率电弧炉在采用直接还原铁(配比100%)冶炼时采用留钢留渣操作,加料采用炉顶连续加料方式,先将废钢熔化,再将直接还原铁加入熔池。加料制度如下:

(1)最后一个料篮的废钢能耗水平是100 kWh/t,直接还原铁加料采用500 kg/min;

(2)冶炼能耗在200 kWh/t时,加料速度1 000 kg/min;熔清后,加料速度2 500 kg/min;

(3)测温超过1 560 ℃,加料速度2 900 kg/min左右;

(4)剩余10~15 t、5~10 t直接还原铁时,直接还原铁的加入速度分别为1 500 kg/min、500~600 kg/min。

### 1.5 温度制度

当直接还原铁用量较高时,通过留钢操作可达到快速冶炼的效果。为保持良好的熔化速度和炉渣流动性,直接还原铁的熔点在1 540~1 580 ℃。加料速度要控制适中,在冶炼较快节奏的基础上应控制炉料不会低温“冻结”。为维持该熔池温度,加料速度一般等于其熔化速度,为28~33 kg/min(供电功率为1 MW)。直接还原铁的熔化速度取决于电源、炉膛热效率和工艺电能要求。

### 1.6 造渣制度

电弧炉采用直接还原铁时,典型的熔渣成分(质量分数)见表2。熔渣碱度( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ )通常为1.8~2.2。直接还原铁中酸性脉石( $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ )较多,因此,冶炼时及早造渣非常重要,以免侵蚀炉衬,尤其是渣线部位。石家庄钢铁厂<sup>[15]</sup>基于一定假设:①直接还原铁脉石四元碱度为0.8;②熔化期石灰消耗量与直接还原铁用量之比为3%;③渣中FeO含量为15%,提出直接还原铁配比量和脉石含量对渣量影响的经验公式(1),并作图,如图1所示。

$$\Delta\Sigma W_z = 1\ 176N(1.84N_m - 0.06) \quad (1)$$

式中: $\Delta\Sigma W_z$ 为使用直接还原铁带来的渣量增加量,kg/t; $N$ 为原料中直接还原铁比例,%; $N_m$ 为直接还原铁中脉石含量,%。

图1中正常渣量为全废钢冶炼时的渣量,一般

表2 典型电弧炉熔渣成分(质量分数)

Table 2 Typical EAF steel slag composition %						
CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	FeO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
30~45	10~25	8~15	10~25	5~10	2~4	0.4~0.6

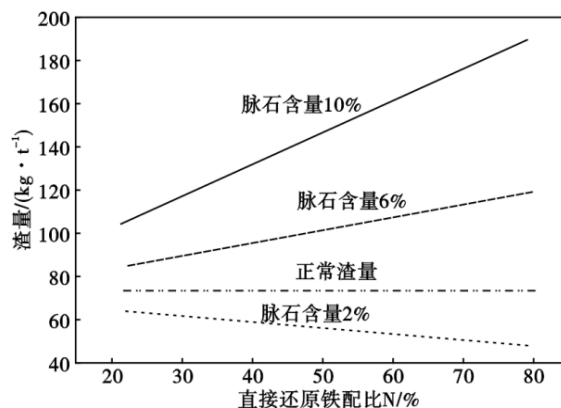


图1 直接还原铁配比和脉石含量对渣量的影响

Fig. 1 Effect of direct reduction iron ratio and gangue content on slag content

在70~80 kg/t。当脉石含量 $N_m \leq 2\%$ 时,渣量明显低于全废钢冶炼时的渣量。直接还原铁通常不含MgO,因为炉渣趋向于MgO饱和,所以可以通过添加足够的白云石来防止渣线的侵蚀。为保证稳定的炉渣碱度和熔池温度,应避免一次性投入渣料,石灰和白云石要以一定匹配速度与直接还原铁一起连续加入。

渣中FeO的含量一般由熔池中的碳含量决定,直接还原铁中的FeO可以在熔化并与适量的碳反应后,在渣钢界面上产生碳沸腾。在合适的炉渣条件下,大量气体从炉渣界面逸出,使钢渣产生泡沫,从而实现电弧炉埋弧熔炼。部分钢铁公司的冶炼参数及效果见表3。通过国内外钢铁公司生产实践表明<sup>[16-21]</sup>,电弧炉冶炼采用炉壁氧枪吹氧进行脱P和脱C,增加超音速氧气射流可强化熔池搅拌,并通过炉壁碳枪喷碳使冶炼全程泡沫渣埋弧,电弧的辐射热被泡沫渣包裹吸收,从而可以保证供电的大功率作业和较高的电效率。

## 2 冶炼电耗影响因素分析

在连续加料的直接还原铁熔化时,电弧在泡沫渣中燃烧使得高谐波消失,电能波动小,输入功率有所增加。此外,考虑在直接还原铁金属化率较低时,还原反应消耗能量增加,大渣量也会增加额外的能耗。而金属化率超过95%时,熔池中氧元素减少,活跃度降低,在无额外配碳和吹氧时,会增加电

表 3 部分钢铁公司冶炼参数及效果<sup>[16-18,21]</sup>  
Table 3 Smelting parameters and effects of some steel companies<sup>[16-18,21]</sup>

公司名称	原料条件	炉容(炉型)/t	加料方式	冶炼操作	电耗/(kWh·t <sup>-1</sup> )	冶炼效果
美国 Georgetown 钢厂	50% 直接还原铁+50% 废钢	75(直流炉)	连续加料	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	579	钢水含 N 量明显降低, 钢水质量提高, 优于 100% 全废钢
加拿大 Sidbec 钢厂	100% 直接还原铁(金属化率 92%, w[C] 1.7% ~ 2.2%)	160	连续加料	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	-	钢水中 P、S、N 及夹杂物明显降低
阿根廷 Siderca- SAIC 钢厂	60% 直接还原铁+40% 废钢	90	连续加料	超氧脱 P 脱 C, 留钢操作	575	钢水夹杂物减少
天津钢管公司	50% 直接还原铁+50% 废钢(金属化率 92%, w[C] 0.8% ~ 1.5%)	150	连续加料	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	495	钢水中 P、S 及其余有害元素明显降低
墨西哥 Hylsa 钢铁公司	68% 直接还原铁+32% 废钢(金属化率 93%, w[C] 2.8%, 脉石含量 5.8%)	135(直流炉)	连续加料	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	485	钢水洁净度明显提高
墨西哥 Hylsa 钢铁公司	100% 直接还原铁(金属化率 92% ~ 95%, w[C] 4%)	135(双电极直流炉)	连续加料	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	550	钢水金属收得率和洁净度提高
马来西亚 Peiwaja 钢厂	100% 直接还原铁	75(直流炉)	连续加料, 气动输送	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	节电 ≥ 10%	电效率明显提升
埃及 Suez 公司	100% 直接还原铁, 入炉温度 650 °C	-	连续加料, 气动输送	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	-	钢水金属收得率提高
埃及 Ain SukhnaEzz 带钢厂	70% 直接还原铁+30% 废钢	185(交流炉)	连续加料	炉壁氧枪脱 C, 碳枪使全程泡沫渣埋弧, 留钢	410	熔池温度和成分均匀性较好
阿联酋 GHC 钢厂	100% 直接还原铁	150	连续加料	超氧强化熔池搅拌, 碳枪使全程泡沫渣埋弧	-	钢水氧、氮含量显著降低
伊朗阿尔法钢铁公司	第一炉直接还原铁 50%+废钢 50%; 后四炉 100% 直接还原铁	140(交流炉)	顶装料	复合吹炼熔池搅拌, 碳枪使全程泡沫渣埋弧, 大留钢	节电 8 ~ 10	钢水中 P、S 及其余有害元素明显降低, 钢水质量提高
阿曼电炉厂	100% 直接还原铁, 入炉温度 ≥ 600 °C	150(交流炉)	连续加料, Hotlink 输送	超氧强化熔池搅拌, 碳枪使全程泡沫渣埋弧, 留钢	节电 124 ~ 125	钢水质量明显提高

弧对外的热辐射损失, 从而导致热利用率降低, 总能耗增加, 冶炼周期延长。电弧炉采用直接还原铁炼钢的电耗受多种因素影响。

### 2.1 金属化率和 $w(\text{FeO})$

国际上电弧炉采用直接还原铁的金属化率一般 > 90%。Antara Steel Mills 公司生产的热压块年平均金属化率高达 93.49%, 卡塔尔钢铁公司生产的冷态直接还原铁年平均金属化率高达 94.7%, Tenaris Siderca 公司生产的直接还原铁年平均金属化率高达 95.4%<sup>[22]</sup>。直接还原铁的熔化使得能量消耗增加, 同时就直接还原铁看, 金属化率越低, 则  $w(\text{FeO})$  越高, 而 FeO 的还原反应是吸热反应, 在炼钢温度时, 还原 1 t FeO 需消耗电约 800 kWh。不同金属化率对直接还原铁熔化电耗的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出, 随着金属化率的增加, 冶炼电耗逐渐降低。当原料全部采用直接还原铁时, 冶炼电耗近似线性变化, 金属化率每降 1%, 冶炼电耗增

加约 9 kWh/t。当原料采用 65% 直接还原铁, 金属化率 > 90% 时, 金属化率每降 1%, 电耗增加约 8 kWh/t, 而金属化率继续降低时, 则电耗显著增加。

### 2.2 脉石含量和碱度

直接还原铁的脉石含量( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) ≤ 10%<sup>[17]</sup>。

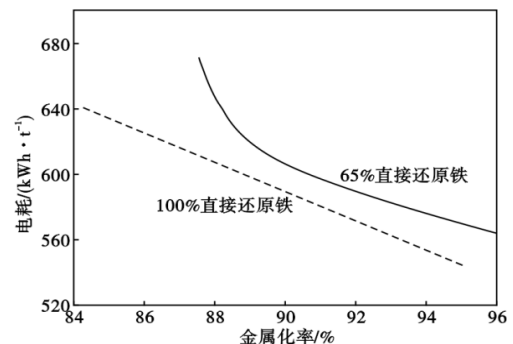


图 2 金属化率对直接还原铁熔化电耗的影响  
Fig. 2 Effect of metallization rate on the power consumption of direct reduction iron melting

一般电弧炉采用直接还原铁的 $\text{SiO}_2$ 含量应控制不高于6%。脉石的含量和碱度不仅决定冶炼过程渣料的加入量,也影响着最终渣量,进而影响冶炼能耗。脉石含量和碱度对冶炼1 t钢液所需能耗的影响如图3所示。其中,冶炼终渣取碱度为2,渣中 $w(\text{FeO})$ 为20%,直接还原铁 $w(\text{C})$ 为1.2%。可见,直接还原铁中脉石含量和碱度对能量消耗影响显著。 $w(\text{SiO}_2)$ 越高,则电耗越高,而为了保持熔渣碱度,加入炉内的生石灰等熔剂也相应增加,这样就导致渣量的增加,而熔化1 t钢渣至1 600 °C耗电约530 kWh,且 $\text{SiO}_2$ 和锻烧后的生石灰熔化都需耗能。研究表明<sup>[23]</sup>,每增加1%直接还原铁的量要增加熔剂量1 kg/t。而在将熔渣碱度由2.0降低至1.4~1.7时,渣量可以实现一定程度的减少,铁损降低,电耗降低8~17 kWh/t<sup>[24]</sup>。有实验表明,当连续加料10%~30%直接还原铁时,与全废钢相比能耗降低,原因在于直接还原铁必须是优质且脉石含量较低(金属化率 $\geq 94\%$ ,脉石含量 $\leq 3\%$ ),而直接还原铁超过30%,能耗会增加。

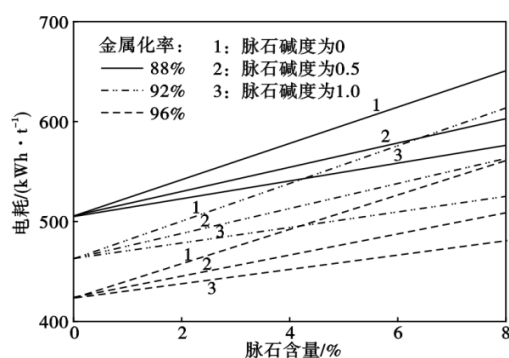


图3 脉石含量和碱度对冶炼1 t钢液所需能耗的影响<sup>[14]</sup>  
Fig. 3 Effect of the content and alkalinity of gangue on the energy consumption required for smelting 1 t steel liquid<sup>[14]</sup>

### 2.3 直接还原铁中P和S含量(质量分数)

直接还原铁的P和S不超过0.1%和0.04%<sup>[22]</sup>。钢的等级不同,出钢时P和S的要求也不同。钢中的P、S一般低于0.03%,一些优质钢要求低于0.015%,甚至更低<sup>[25]</sup>。脱P需造氧化渣,如果过程中渣的 $\text{FeO}$ 含量一定,要降低P含量,则必须加入更多生石灰,这也导致了电耗的增加和收得率的降低。而脱S需造还原渣,而电弧炉炼钢是典型的碱性氧化渣,当加入的生石灰在去除部分S时,不但不会再产生效果,还会增加电耗。因此,为了降低能耗,脱磷在电弧炉中,而脱硫应在钢包炉中进行。

### 2.4 直接还原铁中C含量(质量分数)

根据工艺的不同,直接还原铁C约为1%~4.5%<sup>[26]</sup>。直接还原铁中含有较高的C,能与其中剩余的氧化物发生化学反应,产生的气体使炉渣泡沫化,采用大电压长弧操作有利于降低电耗。此外,熔池中碳氧反应是放热反应,若在适宜的吹氧量的范围,每增加1 m<sup>3</sup>的氧气(标准态),电耗将降低2~4 kWh。

### 2.5 直接还原铁的热装

为降低电弧炉炼钢的能耗,直接还原铁热装热送技术备受关注,但需要注意氧化的问题,可以将热直接还原铁通过密封系统直接送入电弧炉内。通常直接还原铁热装热送温度在500~700 °C,在气基竖炉-电弧炉的热装热送方式上主要有Hytemp气动输送系统<sup>[27]</sup>、Hotlink热连接方式<sup>[28]</sup>等。气基竖炉生产的直接还原铁可以实现热出料,并通过热装加入电弧炉冶炼。基于相关统计数据<sup>[29]</sup>,不同热态直接还原铁比例和温度对节电的影响如图4所示。墨西哥Hylsa公司采用直接还原铁650 °C热装,同冷态炉料相比,电耗大大降低。当加入70%时,可实现节电112 kWh/t钢,缩短冶炼时间20 min。当将100%直接还原铁加入电弧炉中后,每吨钢可节电140 kWh。普遍来看,热装直接还原铁每提升100 °C,可节省20~30 kWh<sup>[30]</sup>。

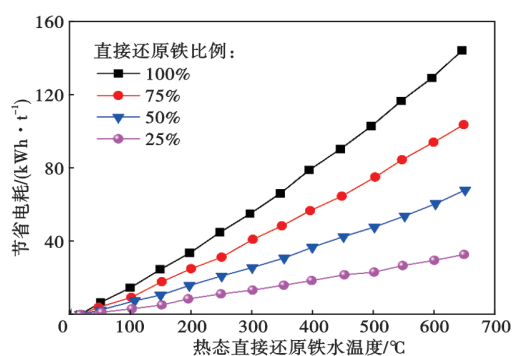


图4 热态直接还原铁比例和温度对节能的影响  
Fig. 4 Effect of the hot direct reduction iron ratio and temperature on energy saving

综上,为降低电耗,控制 $w[\text{C}]$ 1%~4.5%、金属化率 $\geq 90\%$ 、 $w[\text{SiO}_2] \leq 6\%$ 、 $w[\text{P}] \leq 0.1\%$ 、 $w[\text{S}] \leq 0.04\%$ ,使用高C、高金属化率、低 $\text{SiO}_2$ 、低P、低S和较高温度的热直接还原铁。

## 3 结论与展望

(1) 一定配比量的直接还原铁,熔池较大的留

钢量( $\geq 40\%$ )和强化供氧、底吹和电磁搅拌的强化搅拌,均是促进熔化和缩短冶炼周期(可缩短 $8\% \sim 10\%$ )的重要手段。

(2) 为保证生产节奏和能耗指标,热压块铁的大小和配比不宜过大( $\leq 20\%$ ),直接还原铁比例 $> 30\%$ 时,宜采用连续加料的方式,冶炼前期和中期加料速度一般等于熔化速度 $28 \sim 33 \text{ kg/min}$ (供电功率 $1 \text{ MW}$ ),需匹配石灰和白云石以防止渣线侵蚀,冶炼全程应喷碳使全程泡沫渣埋弧操作以保证供电效率。

(3) 为降低冶炼电耗,应控制 $w[\text{C}]1\% \sim 4.5\%$ 、

金属化率 $\geq 90\%$ 、 $w[\text{SiO}_2] \leq 6\%$ 、 $w[\text{P}] \leq 0.1\%$ 、 $w[\text{S}] \leq 0.04\%$ ,使用高C、高金属化率、低 $\text{SiO}_2$ 、低P、低S和较高温度的热直接还原铁。

(4) 采用直接还原铁竖炉和电弧炉相结合的紧凑短流程工艺是钢铁生产节能和碳减排的重要发展方向,同时作为残留元素的稀释剂,直接还原铁是冶炼洁净钢的重要原料。钢铁行业正面临新燃料、碳减排、新技术和新原料等多重变革,研究近零碳排放背景下氢基直接还原铁及相应电弧炉冶炼工艺技术是未来重要的研究方向之一。

### 参考文献

- [1] 姚同路, 吴伟, 杨勇, 等. “双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(6): 505-513.
- [2] 崔志峰, 徐安军, 上官方钦. 国内外钢铁行业低碳发展策略分析[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1496-1506.
- [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] Pfeiffer A, Wimmer G, Schenk J. Investigations on the interaction behavior between direct reduced iron and various melts [J]. Materials, 2022, 15(16): 5691.
- [5] 张建国. 直接还原铁工艺技术的对比分析论述[J]. 资源再生, 2018, 187(2): 57-61.
- [6] 朱德庆, 薛钰霄, 潘建, 等. 气基直接还原工艺研究进展和发展思考[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 1-9+86.
- [7] 朱荣, 魏光升, 唐天平. 电弧炉炼钢流程净化冶炼技术[J]. 炼钢, 2018, 34(1): 10-19.
- [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] 刘永刚, 魏光升, 吴涛涛, 等. 65 t电弧炉复合吹炼的水模拟研究[J]. 工业加热, 2018, 47(6): 51-54.
- [10] 张豫川, 谈存真, 杨宁川, 等. 浅谈超级电弧炉技术[C]. 第十三届中国钢铁年会论文集——3. 炼钢与连铸. 重庆, 2022: 102-109.
- [11] 杨宁川, 田杭亮. 赛迪绿色智能电炉 CISDI-GreenEAF[J]. 特殊钢, 2019, 40(2): 74-74.
- [12] 王佳, 戴年建. 电炉采用大比例直接还原铁冶炼技术分析[J]. 炼钢, 2014, 30(1): 38-40+45.
- [13] 周国平, 谭俊敏, 于平, 等. 150 t超高功率电弧炉使用直接还原铁的实践[J]. 特殊钢, 1999, 20(4): 45-47.
- [14] 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.
- [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] Fior A A, Fabbro M. 埃及 Ain Sukhna Ezz 带钢厂电弧炉[J]. 钢铁, 2007, 42(10): 83-86.
- [17] Omar A M, Appasamy T A, Memoli F. DC EAF with high DRI feeding rates through multipoint injection [J]. Metallurgical Plant and Technology International, 2004, 27(2): 58-67.
- [18] 武国平, 宋宇. 150 t电炉热装直接还原铁工艺设计[A]. 2012年全国炼钢-连铸生产技术会论文集[C]. 重庆: 中国金属学会, 2012: 242-248.
- [19] 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]. International Journal of Science and Research (IJSR), 2016, 5(2): 2016-2024.
- [20] 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.
- [21] 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: 31-32.
- [22] 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.
- [23] 朱荣, 魏光升, 董凯. 炼钢过程节能减排先进技术. 上部, 转炉炼钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
- [24] 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.
- [25] 唐恩, 李森蓉, 李建涛, 等. 直接还原铁与电弧炉炼钢的关联性综述[A]. 2018年(第二十届)全国炼钢学术会议大会报告及论文摘要集[C]. 成都: 中国金属学会, 2018: 1-5.
- [26] 罗晔. Midrex 氢气炼铁技术的进展[N]. 世界金属导报, 2018-06-19(B01).
- [27] 邱梓洋, 王淇, 王义松, 等. 典型的气基竖炉直接还原工艺[A]. 第十一届全国能源与热工学术年会论文集[C]. 马鞍山: 中国金属学会, 2021: 604-610.
- [28] 孙贯永. 外热式气基直接还原炼铁工艺的基础与应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021: 5.
- [29] 花皓, 崔于飞, 吴培珍, 等. 直接还原铁的制造工艺及设备[J]. 工业加热, 2011, 40(1): 1-4.
- [30] 刘成, 胡晓光, 张建. 氢基DRI+EAF炼钢的经济可行性分析[N]. 世界金属导报, 2022-03-01(B14, B15).