

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190550

## 熔融还原炼铁最新技术及工艺路线选择探讨

王 敏, 任荣霞, 董洪旺, 张广杰, 刘思远

(唐钢国际工程技术股份有限公司炼铁事业部, 河北 唐山 063000)

**摘 要:** 熔融还原炼铁工艺是非高炉炼铁的重要工艺,也是未来炼铁工艺的重要研发方向,目前投入商业化生产的熔融还原炼铁工艺主要有 COREX、FINEX、HIsmelt 工艺。为了更及时地了解熔融还原炼铁工艺的最新技术动态,有针对性地选择熔融还原炼铁工艺路线,根据近年来对上述 3 种主要熔融还原炼铁工艺的技术追踪和研究,阐述了中国在引进、消化 COREX 工艺过程中,在原燃料优化、解决预还原竖炉黏结问题以及工艺控制系统优化取得的技术进步。介绍了韩国浦项公司 FINEX 工艺在预还原流化床大型化、降低流化床系统高度、能源高效利用等方面的最新技术成果。并对中国引进 HIsmelt 熔融还原炼铁工艺后,对 HIsmelt 工艺未来的技术发展方向提出建议和展望。最后,从原燃料条件、炼铁-炼钢工艺路线、产品质量等方面,对如何选择熔融还原炼铁工艺路线提出建议。

**关键词:** 熔融还原炼铁; 非高炉炼铁; 流化床; COREX; FINEX; HIsmelt

**文献标志码:** A **文章编号:** 0449-749X(2020)08-0145-06

## Latest technology of melting reduction ironmaking process and discussion of process route choice

WANG Min, REN Rong-xia, DONG Hong-wang, ZHANG Guang-jie, LIU Si-yuan

(Ironmaking Department, Tangshan Steel International Engineering Technology Co., Ltd.,

Tangshan 063000, Hebei, China)

**Abstract:** The melting reduction ironmaking process is the most important process route of Non-BF-ironmaking process, also is the most important research direction of the iron-making process in the future. At present, the main melting reduction ironmaking process put into commercial practice is COREX, FINEX, HIsmelt. In order to give an insight into the latest technical trends of melting reduction ironmaking in time, and targeted choose the melting reduction ironmaking process route, according to track and research the main three melting reduction ironmaking process mentioned above, the newest technical advancement of COREX process on raw and fuel optimization was introduced, on solving the sticking of the pre-reduction shaft and process controlling system optimization, and during introduction and digestion of COREX process. The newest technical achievement of FINEX process on the pre-reduction fluidized bed large-scale, the height reduce of fluidized bed system and the efficient utilization rate of energy are introduced. Suggestions and expectations for technology advancement of HIsmelt process in the future after importing HIsmelt process are made. At last, the advice in respect of raw material and fuel material condition, iron-making to steel-making process route, production equality, and other sides are proposed to choose the melting reduction ironmaking process.

**Key words:** melting reduction ironmaking; non-BF-ironmaking; fluidized bed; COREX; FINEX; HIsmelt

高炉炼铁流程在中国炼铁生产中占据着垄断地位,需要配备烧结、焦化等原燃料工序为高炉提供适宜的原燃料,烧结、焦化、炼铁 3 大工序占吨钢能耗的 85% 以上<sup>[1]</sup>。但是由于高炉长流程中的烧结工序的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、粉尘、二噁英和焦化工序的水污染物、粉尘排放占钢铁生产排放总量的 50% 以上<sup>[2]</sup>,烧结厂、焦化厂已经成为各地区环境治理行动中的众矢之的,长流程炼铁工艺的高能耗、高污染、高排

放迫切需要淘汰落后及过剩产能、转型升级、实现绿色低碳生产<sup>[3-5]</sup>。留给钢铁产业的选择,除了压缩产能、逐渐提高工艺生产中的废钢比例,降低铁水比例以外,有限的选择方向之一是改变钢铁工艺的原燃料结构,逐渐由传统流程转向钢铁生产短流程方向发展。熔融还原炼铁工艺是非高炉炼铁的重要工艺路线,也是未来炼铁工艺的重要研发方向,是典型的炼铁生产短流程工艺,具有低成本、低能耗、低碳、低

排放等特点,是国家鼓励发展的非高炉炼铁工艺<sup>[6-7]</sup>。目前世界上实现工业化生产的熔融还原炼铁工艺主要有 3 种,分别是 COREX 工艺、FINEX 工艺和 HIsmelt 工艺,中国宝武钢铁公司对 COREX 工艺经历了从引进、消化、吸收到创新的过程,FINEX 工艺近年来也有国内钢铁企业与韩国浦项公司进行了深入的技术交流和技术引进谈判,HIsmelt 工艺国内引进时间相对较短,目前正处于消化、吸收的阶段,国内炼铁工作者对 HIsmelt 工艺也在进行深入研究。对这 3 种主要的熔融还原炼铁工艺进行深入和持续的技术跟踪、技术研究,有助于中国非高炉炼铁工艺的技术进步,对企业因地制宜选择适宜的熔融还原炼铁工艺具有重要意义。

## 1 熔融还原炼铁主要工艺形式及最新技术进步

### 1.1 COREX 工艺

COREX 工艺是由奥钢联公司研发的熔融还原炼铁工艺,1989 年在南非开始工业化运行,目前南非、印度、韩国拥有建成的 COREX 装置,中国宝钢引进了两套大型 COREX-C3000 熔融还原炼铁生产装置,每套设计年产能 150 万 t。2007 年 11 月在上海罗泾建成投产,实现了连续 4 年顺行生产,对中国非高炉炼铁技术的发展及人才培养,掌握熔融还原炼铁工艺的生产组织和操作、相关工艺设备制造和维护都做出了重大贡献。COREX 工艺流程如图 1 所示。

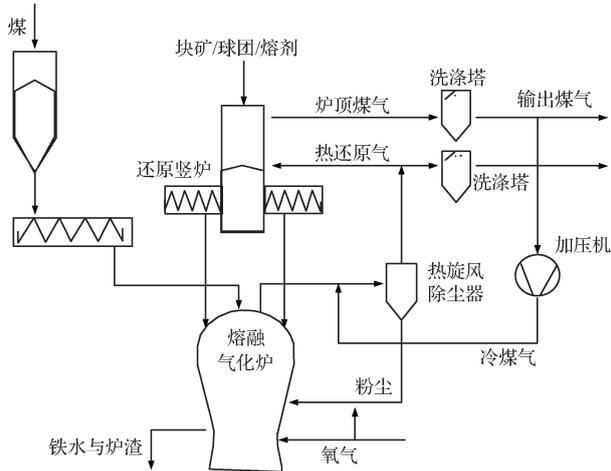


图 1 COREX 熔融还原炼铁工艺流程

Fig. 1 COREX melting reduction ironmaking process

2012 年宝钢公司将 COREX 工艺装置搬迁至新疆八一钢铁公司,经过改进设计后,将之命名为欧

冶炉,2015 年短暂开炉生产后,经过 1 年半的优化改造,技术提升,于 2017 年 3 月 25 日点火复产,复产后生产情况稳定顺行,生产成本日益降低。欧冶炉是中国炼铁工作者在 COREX-C3000 基础上,对 COREX 工艺的一次有效提升和再创新,结合新疆地区的资源禀赋,发展了具有八钢特色的熔融还原炼铁技术<sup>[8]</sup>。

(1)欧冶炉优化了还原竖炉煤气管道布置,促使还原煤气流合理分布,有效解决了 COREX 还原竖炉的黏结问题,提升了竖炉金属化率。

(2)将炉顶煤气湿法除尘改造为干法除尘,增加了 TRT 的发电量,达到 55 kW/t(铁)<sup>[9]</sup>,同时极大节约了水资源,提高了煤气利用率。

(3)优化了炉体冷却结构和冷却水系统设计,合理分布炉体冷却强度,改善炉体寿命,保证炉况顺行。

(4)优化入炉原料结构,用烧结矿替代价格较高的球团矿,烧结矿比例最终达到 40%,炉况稳定顺行,欧冶炉能够处理含锌粉尘及城市废弃物,并对欧冶炉原燃料供应系统和出铁出渣系统进行了进一步改造升级。

(5)优化了生产工艺控制系统<sup>[10]</sup>。建立了欧冶炉物料平衡和热平衡模型,提升了还原煤气温度及成分控制,优化了气化炉炉顶煤气操作控制。

相比于目前世界上存在的 COREX 工艺(印度 4 套,南非 1 套),中国炼铁技术人员在工程设计、生产组织、设备制造、持续研发上具备不可比拟的优势,完全驾驭了 COREX 工艺的设计以及生产操作,并对该技术进行了很好的消化、吸收,发展成为具有中国特色的欧冶炉熔融还原炼铁工艺,展现了中国熔融还原炼铁技术的巨大进步。

### 1.2 FINEX 熔融还原炼铁工艺

FINEX 工艺是韩国浦项制铁开发的创新型熔融还原炼铁工艺,它可直接采用 0~8mm 铁矿粉(最多可使用 30% 的磁铁矿)和非焦煤作为原燃料,因此原燃料成本低,拓宽了原燃料使用范围,并因省掉烧结和焦化工序,能够大幅减少污染而实现清洁生产。FINEX 工艺流程如图 2 所示。

浦项公司第 1 套商业化 FINEX 生产线,年生产能力为 150 万 t 铁水的 FINEX 工厂于 2004 年开工建设,2007 年投产,年生产能力为 200 万 t 铁水的 FINEX 工厂于 2014 年投产,实现了 FINEX 工艺生产规模大型化,技术装备日益成熟。浦项公司在 FINEX 工艺的研发上值得学习,成立了专门的



(1)将 SRV 炉煤气湿法除尘改造为干法除尘。中国的煤气干法除尘技术在世界上具有领先优势,而国外的煤气清洗方式多采用湿法除尘,COREX 工艺和 FINEX 工艺均存在此类问题,欧冶炉干法除尘的成功应用,有效提高了能源利用率,SRV 炉煤气初始温度为 1 600 ℃,是这几种熔融还原炼铁工艺中煤气温度最高的,完全可以设计多级热量回收,在充分回收能源后,采用干法除尘工艺进行煤气清洗。

(2)研发采用吹氧冶炼。HIsmelt 工艺的 SRV 炉采用富氧热风(氧气体积分数为 39%)助燃,热风温度为 1 100~1 200 ℃,需要配套建设热风炉,增加了不必要的投资和二次能源消耗,同时,由于采用空气助燃,空气中的氮气降低了 SRV 炉煤气的热值。借鉴 COREX 和 FINEX 采用氧气冶炼的技术,研发氧气冶炼技术,是 HIsmelt 工艺技术进步的方向。

(3)研发一步法碳-氢熔融还原炼铁工艺。山东墨龙的预还原回转窑工艺铁矿石的还原度比较低,鉴于还原度不佳,同时在国内环保要求趋严,限煤日益严格的条件下,不具备进一步发展煤基预还原回转窑的政策条件,建议取消预还原回转窑,只设计矿石烘干窑,燃料采用 SRV 炉煤气,降低 SO<sub>2</sub> 污染物排放。同时,SRV 炉采用底吹氢气的工艺,研发碳-氢熔融还原炼铁工艺,提高矿粉还原效率,降低工序能耗,降低燃煤消耗,实现低碳、低排放炼铁,成为真正的一步法熔融还原炼铁工艺。

(4)关键设备国产化。HIsmelt 工艺是真正接近于一步法的熔融还原炼铁工艺,没有燃料和矿粉的造块工艺,主要工艺系统包括:矿粉预热及烘干、热矿喷吹、粒煤制备及喷吹、熔剂喷吹、SRV 炉本体、热风炉、出铁场、鼓风、煤气清洗等系统。由此可见,除了 SRV 炉本体和热矿喷吹外,其他均为高炉长流程工艺的常规系统,国内均有成熟的设计和运行经验。SRV 炉本体和热矿喷吹主要工艺设备有热风喷枪、矿煤喷枪、热矿螺旋输送机、热矿链板输送机,关键设备少,设备结构相对简单,随着生产实践的积累,如何使上述设备延长服役寿命,提高使用效果,更加简洁的操作和更换,是引进 HIsmelt 工艺后需要消化和创新的必经之路,依靠中国强大的工业体系,上述设备完全可以实现自主研发,更好地为 SRV 炉体服务。

## 2 因地制宜选择熔融还原炼铁工艺

### 2.1 熔融还原炼铁工艺参数整理

通过对上面 3 种主要熔融还原炼铁工艺的介

绍,对 3 种工艺的主要工艺参数和工艺设备进行简要整理,结果见表 1。

完整的对熔融还原炼铁技术的经济性对比分析包括 5 个方面:工艺成熟性、生产成本、投资费用、环境友好性和原燃料要求<sup>[18]</sup>。国内很多专家均对熔融还原炼铁工艺从上述 5 个方面进行了很好的总结和分析,本文不再赘述。下面阐述近年来对熔融还原炼铁工艺技术进行追踪的一些个人观点。

### 2.2 对于如何选择熔融还原炼铁工艺的一些观点

随着欧冶炉的技术进步以及 HIsmelt 工艺在山东墨龙的建成投产,中国已经成为熔融还原炼铁工艺发展的主要市场,中国炼铁科技工作者已经成为熔融还原炼铁技术发展的主力军,根据最近几年对熔融还原炼铁技术的追踪,建议有意向选择熔融还原炼铁技术的企业遵循如下几个原则:

(1)熔融还原炼铁短流程工艺在煤炭资源丰富而且廉价的地区有良好的发展前景。中国的新疆和内蒙地区煤炭资源丰富而且具有价格优势,欧冶炉在新疆八一钢铁公司的良好运行充分证明了燃料资源优势的重要性。

(2)解决部分劣质炼铁矿石的冶炼难题。例如,中国以及世界上存在大量高磷铁矿石,如何盘活利用高磷铁矿资源,使其转变为市场效益,一直是冶金界的难题,HIsmelt 工艺为高磷铁矿石的冶炼提供了一种可供选择的工艺路线,由于 SRV 炉内存在氧化性气氛,适宜磷的脱除,铁水中的磷含量很低,脱磷效果很好,钒钛磁铁矿的冶炼难题也可以由 HIsmelt 工艺解决,用 HIsmelt 熔融还原技术冶炼高磷铁矿和钛铁矿都分别取得良好的效果<sup>[19]</sup>。HIsmelt 工艺铁水洁净度高,适合高质量产品需要。

(3)独立电炉企业宜选择 HIsmelt 工艺进行协同生产,HIsmelt 工艺能够脱除铁水中的有害元素,相比于长流程的高炉铁水,熔融还原工艺的 COREX 铁水、FINEX 铁水以及目前电炉的主原料废钢,HIsmelt 工艺铁水更洁净,适宜电炉冶炼工艺,能够提高电炉钢水质量,解决电炉采用 100% 废钢冶炼,影响钢水洁净度的难题,满足高质量产品的需求。国外独立电炉厂生产高质量钢水的工艺路线通常选择直接还原铁工艺,用 DRI(直接还原)代替废钢,但 DRI 相对铁水来说依旧属于冷料,限于中国的电力资源,电炉热装铁水是比较经济的工艺路线。鉴于目前 HIsmelt 工艺还不具备大型化生产的实践,60~80 万 t 的年产铁水量,产能规模不大,配加一定比例废钢后,恰好是大型电炉厂比较适宜的铁原

表 1 熔融还原炼铁工艺主要参数整理

Table 1 Main parameters collection of melting reduction ironmaking process

序号	项目	COREX(欧冶炉)	FINEX	HIsmelt
1	原料	6~16 mm 球团矿、块矿 不能直接使用矿粉	<8 mm 矿粉 矿粉需要热压块入炉 使用磁铁矿质量分数小于 30%	<6 mm 铁矿粉 直接喷吹热矿粉 使用高磷矿 100% (质量分数) 可使用钒钛矿 100% (质量分数)
2	燃料	焦炭、煤块	焦炭、煤粉、型煤 型煤代替焦炭	<3 mm 非焦粒煤 直接喷吹粒煤
3	预还原器	竖炉 (还原率 50%)	流化床 (还原率 60%~65%)	回转窑 (还原率 15%)
4	终还原器	熔融气化炉	熔融气化炉	SRV 炉
5	燃料消耗	820 kg/t 其中:焦炭 200 kg/t 小块焦 120 kg/t 煤块 500 kg/t	780 kg/t 其中:焦炭 160 kg/t 型煤 470 kg/t 喷煤粉 150 kg/t	850 kg/t 全部喷吹粒煤
6	氧气消耗	550 m <sup>3</sup> /t(标准态)	530 m <sup>3</sup> /t(标准态)	吨铁耗风 2 600 m <sup>3</sup> (标准态) 氧气体积分数为 39%
7	煤气发生量	1 600 m <sup>3</sup> /t(标准态)	1 600 m <sup>3</sup> /t(标准态)	2 830 m <sup>3</sup> /t(标准态)
8	煤气热值	6 688 kJ/m <sup>3</sup> (标准态)	6 270 kJ/m <sup>3</sup> (标准态)	2 842 kJ/m <sup>3</sup> (标准态)
9	铁水主要成分 (质量分数)	C 3.5%~4.0% Si 0.8%~1.5% S 0.025% P 0.12%	C 3.5%~4.0% Si 0.6%~1.2% S 0.03% P 0.12%	C 3.5%~4.0% Si 痕量 S 0.156% P 0.035% 铁水洁净度高
10	工序配备	工序环节多,设备多	工序环节多,设备多	工序环节相对少,设备少
11	关键设备	国产化率低	国产化率低	国产化率高
12	作业率	93%	95%	约为 90.4%
13	年产铁水规模	150 万 t	150~200 万 t	80 万 t

注:HIsmelt 工艺铁水硫高,目前国内铁水预处理脱硫工艺成熟,容易实现硫的去除

料结构,同时 SRV 炉还能为电炉钢厂提供 SRV 炉煤气,满足轧钢工序的需求,解决独立电炉企业的廉价燃气资源问题。此外,在中国,独立电炉企业如果建设直接还原铁装置,还需要外部环境创造条件,一方面受制于资源情况,DRI 需要高品位铁精粉,但目前中国生产的直接还原铁因原料含铁较低,产品质量难以满足电炉生产洁净钢、优质钢的要求<sup>[20]</sup>,因此铁精粉需要进一步精选,高品位铁精粉属于稀缺资源。另一方面,中国天然气资源匮乏,需要发展煤制气工艺来生产直接还原铁工艺需要的高品质还原气,而这需要国家政策引导和地方政府的支持。目前国内 DRI 资源匮乏,独立电炉企业为冶炼高品质钢水,需要进口 DRI,价格高昂。

(4)COREX 工艺和 FINEX 工艺宜与传统高炉炼铁工艺协同生产,协同效果显著。COREX 和 FINEX 工艺已经实现年产 150 万和 200 万 t 规模

的商业化生产,与传统高炉炼铁工艺协同生产,可满足大型钢铁企业的生产规模要求,又能实现很好的经济效益和社会效益。韩国浦项公司的生产实践,宝武集团八一钢铁公司的生产实践均已经证明了协同生产具有很好的生产效益。COREX 和 FINEX 工艺具有占地少,劳动定员少,原燃料质量要求低,生产成本低、工艺流程少、低排放、低污染等特点,这与长流程高炉工艺的现状正好形成互补。另外,从产品角度分析,因为 COREX 和 FINEX 工艺铁水硅含量高,在铁水罐内容易出现粘罐现象,给生产组织造成很大困难,同时铁水硅高增加炼钢工序的生产成本。熔融还原高硅铁水与高炉低硅铁水混兑后,避免了铁水粘罐现象,同时铁水可以直接供给炼钢工序,由此可见,与高炉长流程工艺的协同生产,解决了目前 COREX 工艺和 FINEX 工艺铁水硅高带来的生产难题,形成了很好的互补。

### 3 结语

总结中国引进 COREX 工艺和 HIs melt 工艺的经验和技术创新,说明中国在熔融还原炼铁工艺的技术积累上已经取得了长足进步,在此基础上,结合 FINEX 工艺的生产实践和技术创新,从中国国情出发,因地制宜、合理的选择熔融还原炼铁工艺路线,是实现低碳炼铁的一条重要途径,随着中国炼铁技术的不断进步,中国炼铁工作者在消化、吸收引进的熔融还原炼铁技术的基础上,必然会推动熔融还原炼铁技术向更深层次发展。

#### 参考文献:

- [1] 陈守明. 对我国非高炉炼铁工艺路线的思考[N]. 中国冶金报, 2015-04-09(003). (CHEN Shou-ming. Process route consideration for non-BF-ironmaking in China[N]. China Metallurgical News, 2015-04-09(003).)
- [2] 应自伟, 储满生, 唐钰, 等. 非高炉炼铁现状及未来适应性分析[J]. 河北冶金, 2019(6): 1. (YING Zi-wei, CHU Man-sheng, TANG Jue, et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process[J]. Hebei Metallurgical, 2019(6): 1.)
- [3] 张福明. 我国高炉炼铁技术装备发展成就与展望[J]. 钢铁, 2019, 54(11): 1. (ZHANG Fu-Ming. Prospect and development achievements of blast furnace ironmaking technologies and equipments in China[J]. Iron and Steel, 2019, 54(11): 1.)
- [4] 孙敏敏, 宁晓钧, 张建良, 等. 炼铁系统节能减排技术的现状和发展[J]. 中国冶金, 2018, 28(3): 1. (SUN Min-min, NING Xiao-jun, ZHANG Jian-liang, et al. Research status and progress of energy saving and emission reduction technology for ironmaking[J]. China Metallurgy, 2018, 28(3): 1.)
- [5] 王新东, 郝良元, 胡启晨, 等. 河钢集团高炉炼铁技术进步[J]. 中国冶金, 2020, 30(1): 73. (WANG Xin-dong, HAO Liang-yuan, HU Qi-chen, et al. Progress in blast furnace ironmaking technology of HBIS Group[J]. China Metallurgy, 2020, 30(1): 73.)
- [6] 陆亚男, 吴胜利, 王来信, 等. 炉渣成分对 COREX 铁水脱硫效果的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(9): 33. (LU Ya-nan, WU Sheng-li, WANG Lai-xin, et al. Analysis of chemical compositions of slag affecting desulphurization in hot metal of COREX process[J]. Iron and Steel, 2019, 54(9): 33.)
- [7] 刘颖, 李正一, 狄瞻霞, 等. 还原条件对 COREX 球团显气孔率和金属化率的影响[J]. 钢铁, 2018, 53(2): 10. (LIU Ying, LI Zheng-yi, DI Zhan-xia, et al. Effects of reducing condition on apparent porosity and metallization degree of COREX pellets[J]. Iron and Steel, 2018, 53(2): 10.)
- [8] 徐少兵, 许海法. 熔融还原炼铁技术发展情况和未来的思考[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 33. (XU Shao-bing, XU Hai-fa. Development of melting reduction iron making technology and future thinking [J]. China Metallurgy, 2016, 26(10): 33.)
- [9] 张向国, 贾利军. 我国熔融还原炼铁技术发展现状及生产实践[J]. 冶金与材料, 2019, 39(4): 90. (ZHANG Xiang-guo, JIA Li-jun. Melting reduction iron making technology development situation and production practices[J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(4): 90.)
- [10] 邹达峰, 陈若平. 八钢欧冶炉生产工艺控制的优化[J]. 炼铁, 2017, 36(2): 61. (ZOU Qing-feng, CHEN Ruo-ping. Optimization of OY furnace production process in Bayi Iron and Steel Co., Baosteel Group[J]. Ironmaking, 2017, 36(2): 61.)
- [11] 张寿荣, 张绍贤. 韩国浦项钢铁公司 FINEX 工艺[J]. 钢铁, 2009, 44(5): 2. (ZHANG Shou-rong, ZHANG Shao-xian. FINEX process at POSCO Steel Corporation in Korea[J]. Iron and Steel, 2009, 44(5): 2.)
- [12] 王定武. 关注发展非高炉炼铁工艺[J]. 冶金管理, 2009(8): 56. (WANG Ding-wu. Attention and development of non-BF-ironmaking process[J]. China Steel Focus, 2009(8): 56.)
- [13] 顾玲. 浦项钢铁公司 FINEX 技术特点研究[N]. 世界金属导报, 2019-02-19(B02). (GU Ling. POSCO FINEX technical characteristics research[N]. World Metals, 2019-02-19(B02).)
- [14] 唐恩, 周强, 翟兴华, 等. 适合我国发展的非高炉炼铁技术[J]. 炼铁, 2007, 26(4): 61. (TANG En, ZHOU Qiang, ZHAI Xing-hua, et al. The non-BF-ironmaking technology is suitable to develop for our country[J]. Ironmaking, 2007, 26(4): 61.)
- [15] 张建良, 张冠琪, 刘征建, 等. 山东墨龙 HIs melt 工艺生产运行概况及主要特点[J]. 中国冶金, 2018, 28(5): 37. (ZHANG Jian-liang, ZHANG Guan-qi, LIU Zheng-jian, et al. Production overview and main characteristics of HIs melt process in Shandong Molong[J]. China Metallurgy, 2018, 28(5): 37.)
- [16] 唐恩, 臧中海, 喻道明, 等. HIs melt 熔融还原炼铁技术的新进展[J]. 炼铁, 2010, 29(2): 60. (TANG En, ZANG Zhong-hai, YU Dao-ming, et al. The newest development of HIs melt melting reduction iron making technology[J]. Ironmaking, 2010, 29(2): 60.)
- [17] 徐书钢, 李子木, 吕庆. HIs melt 熔融还原炼铁技术考察与分析[J]. 炼铁, 2007, 26(5): 61. (XU Shu-gang, LI Zi-mu, LÜ Qing. Investigation and analysis of HIs melt melting reduction iron making technology[J]. Ironmaking, 2007, 26(5): 61.)
- [18] 胡俊鸽, 周文涛. 先进非高炉炼铁工艺技术经济性分析[N]. 中国冶金报, 2012-09-01(B03). (HU Jun-ge, ZHOU Wen-tao. Economic analysis of advanced non-BF-ironmaking technology[N]. China Metallurgical News, 2012-09-01(B03).)
- [19] 李慧斌, 王华, 邱亚丽, 等. 富氧顶吹熔融还原冶炼高磷铁矿与钛铁矿配矿的试验研究[J]. 钢铁, 2012, 47(1): 19. (LI Hui-bin, WANG Hua, HOU Ya-li, et al. Investigation of iron smelting with high-phosphorus iron ore and ilmenite by oxygen enriched top-blown smelting reduction [J]. Iron and Steel, 2012, 47(1): 19.)
- [20] 沈峰满, 姜鑫, 高强健, 等. 直接还原铁生产技术的现状及展望[J]. 钢铁, 2017, 52(1): 12. (SHEN Feng-man, JIANG Xin, GAO Qiang-jian, et al. Situation and prospect on production technology of direct reduction iron[J]. Iron and Steel, 2017, 52(1): 12.)