



## 我国熔融还原炼铁技术发展现状及展望

兰臣臣<sup>1</sup>, 高艳甲<sup>1</sup>, 吕庆<sup>1</sup>, 张振锋<sup>2,3</sup>, 高峰<sup>2,3</sup>, 张淑会<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北远通矿业有限公司, 河北 承德 067000; 3. 承德信通首承矿业有限责任公司, 河北 承德 067000)

**摘要:** 这是一篇冶金工程领域的论文。随着钢铁企业对污染物排放问题的日益重视, 非高炉炼铁工艺逐渐成为了人们关注的热点问题。目前我国已经实现工业化的非高炉炼铁技术以宝钢的 Corex 工艺和山东墨龙的 HIs melt 工艺两种典型的熔融还原炼铁技术为主, 也是目前国内非高炉炼铁技术的热点工艺。本文对 Corex 工艺和 HIs melt 工艺的流程进行阐述, 并对比两种工艺的技术指标与优缺点, 探讨了国内两种工艺的研究现状, 并结合各工艺的特点对其发展方向进行展望。

**关键词:** 冶金工程; 熔融还原; Corex 工艺; HIs melt 工艺; 资源利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.016

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 03-0096-06

**引用格式:** 兰臣臣, 高艳甲, 吕庆, 等. 我国熔融还原炼铁技术发展现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3): 96-101.

LAN Chenchen, GAO Yanjia, LYU Qing, et al. Development status and prospect of smelting reduction ironmaking technology in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(3): 96-101.

近年来, 随着环境问题的日益突出, 钢铁企业对高炉炼铁工序的污染物排放越来越重视。高炉炼铁工序的污染物排放主要来源于铁矿粉造块、焦化等辅助工序, 其能耗占钢铁流程总能耗的 60% 以上, 其污染物排放占钢铁流程总排放的 85%<sup>[1]</sup>。非高炉炼铁技术可以取消铁矿粉造块和焦化工艺, 环保优势明显, 基本遏制二噁英、呋喃、焦油和酚的污染排放, CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的排放量相对于高炉也得到了大幅度的减少<sup>[2]</sup>。因此, 非高炉炼铁技术近年来在我国的炼铁行业逐渐得到关注<sup>[3]</sup>。国家发展改革委会公布的《产业结构调整指导目录(2019 年本, 征求意见稿)》中也将非高炉炼铁技术列入钢铁鼓励类第 3 条。在 2021 年 6 月 1 日实行的《钢铁行业产能置换实施办法》中也对 Corex、HIs melt 等非高炉炼铁项目给予政策鼓励<sup>[4]</sup>。这均表明了我国对非高炉炼铁技术的重视与支持。

我国的非高炉炼铁技术目前以熔融还原炼铁技术为主, 宝钢的 Corex 工艺与山东墨龙的 HIs melt 工艺均是典型的熔融还原炼铁技术, 也是目前国内非高炉炼铁技术的热点工艺。基于此, 本文对我国熔融还原炼铁技术的工艺流程和研究现状进行阐述, 对 Corex 工艺和 HIs melt 工艺进行对比, 并对其发展方向进行展望。

### 1 熔融还原炼铁流程

熔融还原炼铁法不同于高炉炼铁法和直接还原炼铁工艺, 它是以煤粉为燃料, 用精矿粉或球团矿或块矿直接生产铁水的一种方法。目前我国实现工业化的熔融还原炼铁技术主要有 Corex 和 HIs melt 工艺。

#### (1) Corex 工艺

Corex 工艺是以块矿或球团矿为原料, 在竖炉内经过高温煤气预还原, 得到具有较高金属化率

收稿日期: 2022-01-17

基金项目: 河北省自然科学基金(E2021209046, E2019209424, E2020209208); 唐山市科技计划项目(21130209C)

作者简介: 兰臣臣(1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为钢铁冶金。

的炉料后，由螺旋给料机输送至熔融气化炉。熔融气化炉的主要能量来源是块煤与氧气的燃烧，金属化炉料在熔融气化炉内被终还原并实现渣铁分离，产生的大量高温煤气经过除尘、调温等措施后被通入竖炉还原炉料和外供使用<sup>[5]</sup>。

## (2) HIs melt 工艺

HIs melt 工艺是一种直接使用粉矿、粉煤的铁浴熔融还原炼铁工艺。HIs melt 工艺的核心部分是熔融还原炉 (SRV 炉)。铁矿粉在回转窑中被预热和预还原，由喷枪将预热后的铁矿粉与煤粉一同喷入 SRV 炉熔池，为了调节合适的炉渣成分，白云石和石灰石也经常一同喷入 SRV 炉熔池。在 SRV 炉熔池内，煤粉在高温的作用下迅速高温裂解，形成 C 颗粒，一部分 C 熔入金属熔池，使铁水的  $w(C)$  增加；另一部分与矿粉共同卷入炉渣，在熔渣内完成铁氧化物的还原过程，生产液态金属铁和 CO 气体<sup>[6]</sup>。在喷枪进入载气和反应生产的 CO 的共同作用下，渣铁液滴在熔池内不断喷溅涌动，这就是 HIs melt 工艺特有的“涌泉”现象。还原过程生成的高温煤气在 SRV 炉的氧化区与上部喷枪喷入的富氧热风进行二次燃烧，释放大量的热量，“涌泉”现象喷溅的渣铁被加热，并将大量的热带回熔池，对熔池内矿石的还原以及造渣过程提供热量。铁水通过炉内压力调节从前置炉流出，煤气供发电厂发电及热风炉使用，炉渣经粒化后生产水泥等工业品<sup>[7]</sup>。

## 2 Corex 和 HIs melt 工艺对比

### (1) 原料方面

Corex 工艺的生产过程中，为提高炉料金属化率和改善竖炉内黏结、堵塞等问题，使得其矿粉的理化性能要求严格<sup>[8]</sup>。同时 Corex 工艺也未能完全摆脱焦炭资源的束缚，仍需要使用部分焦炭作为原料<sup>[9]</sup>。而 HIs melt 技术对原料的要求相对较低，不仅可使用非炼焦煤，还可直接使用矿粉和煤粉进行冶炼，并能够处理高磷矿、钒钛磁铁矿等低价铁矿粉，从而大幅度削减生产成本，减轻生产对环境的污染<sup>[10]</sup>。

### (2) 铁水质量

Corex 工艺的铁水更接近于高炉铁水的成分，适用于炼钢使用<sup>[11]</sup>。而 HIs melt 工艺生产过程中，由于其渣中的氧势较高，使得渣中的硅、锰、钛等氧化物不能被还原进入铁水，洁净度大幅提升，生铁具有低 Si，低 P，低五害 (Pb 铅，Sn 锡，As 砷，Sb 锑，Bi 铋) 的优势<sup>[12]</sup>，因此可进行少渣炼钢，降低炼钢成本，也可以为高端器件的铸造提供高纯生铁。但是其脱硫能力较弱，需要增加炉外脱硫装置。

### (3) CO<sub>2</sub> 排放

HIs melt 与 Corex 排放的 CO<sub>2</sub> 量不同，HIs melt 排放的 CO<sub>2</sub> 量为 1200 kg/t，Corex 排放的 CO<sub>2</sub> 量为 905 kg/t<sup>[13]</sup>。

### (4) 金属化率

为避免黏结，Corex 工艺预还原炉料的金属化率为 90%~95% 的海绵铁<sup>[13]</sup>。而 HIs melt 工艺由于其 SRV 炉具有较强的还原功能，且其需要在熔炉内还原产生可二次燃烧供热的 CO，因此其预还原率远低于 Corex 工艺。山东墨龙采用回转窑对矿粉进行预热预还原，由于其设备和工艺的限制，目前生产过程中矿粉仅得到了预热，未能实现有效预还原。

### (5) 煤气量及其热值

Corex 炼铁工艺输出 1750 Nm<sup>3</sup>/t 低 SO<sub>2</sub> 洁净煤气 (CO+H<sub>2</sub>>65%)，热值为 7900 kJ/Nm<sup>3</sup>；HIs melt 工艺的煤气量高于 Corex 工艺，但是由于其存在二次燃烧，使得其热值较低，仅为 3200 kJ/Nm<sup>3</sup><sup>[13]</sup>。

### (6) 耐材损耗

与高炉类似，Corex 熔化气化炉下部的焦炭死料柱深入到了炉缸底部，持续向铁水渗碳，确保渣中 (FeO) 低于 1%，使 Corex 反应器的一代炉役寿命可达 15 年，可与高炉媲美<sup>[14]</sup>。HIs melt 工艺中由于其上部的氧化气氛以及 SRV 内还原压力较大，使得终渣中的 (FeO) 高于 5%，甚至接近 10%，炉内熔渣的 (FeO) 更高，使得耐材侵蚀严重<sup>[15]</sup>，虽然已经采取了改进措施<sup>[16]</sup>，但其炉役寿命仍较短，约 5 年左右。

## 3 国内熔融还原炼铁技术现状与趋势

### 3.1 Corex 工艺

目前世界上共有 6 套 C-2000 型 (年产 65 万 t/a) 和 2 套 C-3000 型 (年产 150 万 t/a) 熔融还原炼铁生产装置，其中印度 4 套、南非 1 套、韩国 1 套 C-2000 型生产装置，中国宝钢于 2007 年引进了 2 套大型 C-3000 生产装置。目前，韩国的 C-2000 型已经转成 Finex 工艺，宝钢 C-3000 装置 1 座迁至八钢，1 座停产<sup>[17]</sup>。我国近几年经过对 Corex 的多项重大改造，铁水成本基本接近 2500 m<sup>3</sup> 高炉成本区间，无论在产量和成本上均处于世界领先<sup>[18]</sup>。

Corex 工艺在我国不断发展过程中，在不断地寻求设备大型化的过程中同时对入炉原料品质、设备以及操作水平的要求也随之增加，科研工作者也对其进行了大量的优化研究。

熔融还原炼铁技术的与高炉相比，降低对焦炭的依赖性是其重要的优势之一，但是目前 Corex 工艺并没有完全实现非焦冶炼，在 Corex 工艺运行过程中仍需要在气化竖炉和熔融气化炉内

添加少量的小块焦炭,改善炉料的透气性以及提高熔融气化炉内半焦床层的强度和稳定性<sup>[19]</sup>。焦炭的加入量一般占总燃料的 10%~20% 左右,其余为块煤。在冶炼过程中煤焦的粉化性能影响着炉内的透气与骨架作用,而其反应性能的差异也将对熔融气化炉内生铁的渗碳能力以及炉缸活性产生较大的影响,这些都直接影响着 Corex 工艺的生产效率以及炉缸碳砖的侵蚀过程。Corex C3000 风口取样发现,熔融气化炉内煤焦的平均粉化率超过 60%,死料柱中心的粉化率甚至超过 80%,块煤在受热分解过程中促进了溶损反应的发生,得到的半焦强度较低,进而劣化了炉内的透气透液性<sup>[20]</sup>。刘起航<sup>[21]</sup>指出通过预热提高入炉煤焦转化率达到 30% 以上,这可以有效减少块煤粉化,也降低了炉内热量消耗。于春梅<sup>[22]</sup>研究了不同种类的 Corex 用焦对铁水渗碳过程的影响,指出顶装焦、捣固焦和气煤焦 3 种焦炭样品与铁水接触的过程中主要发生渗碳反应,其中气煤焦的渗碳速率最快,渗碳活化能最小,这有利于降低渣中 (FeO) 的含量,减少其对碳砖的侵蚀;其次是顶装焦;捣固焦的最慢,同时其渗碳活化能最高,不利于 Corex 工艺的高效生产和长寿。

Corex 工艺竖炉内煤气还原铁矿石的过程中,煤气的利用率以及矿石的金属化率也是影响 Corex 工艺的能耗以及生产效率的重要因素。煤气分布合理,利用率高,矿石的金属化率高,这有利于降低燃料消耗并提高生产效率。科研工作者对竖炉内的布料方式以及煤气流的分布做了一些模拟研究。研究指出<sup>[23]</sup>,竖炉内炉料还原率、气体还原势和温度场的分布相似,上部区域中心高,下部区域边缘高;在预还原竖炉下部,煤气利用率较低且径向梯度较大,炉壁处的利用率低于中心处;在预还原竖炉上部,煤气利用率较高,在径向上梯度不大,中心处略高于炉壁处。杜斌斌<sup>[24]</sup>模拟研究了竖炉结瘤对物料运动行为的影响。为了得到 Corex 熔化气化炉内气流分布的情况,科研工作者也对其进行了模拟研究。同时,通过模拟软件研究了各种操作制度对熔融气化炉布料及炉内料堆和气流分布的影响,这对生产工艺参数的优化具有重要意义<sup>[25-26]</sup>。

Corex 工艺经过宝钢的多年探索与实践,在生产技术上已经成熟。并且为了提高 Corex 工艺在我国成本竞争力与生存能力,在炉料结构的普适性上做了一些尝试。例如,在保证炉况顺行的情况下,尝试使用低价燃料和尝试处理各种厂内固废、社会危废等<sup>[27]</sup>。但是,目前 Corex 工艺仍需要在实现非焦冶炼及大量固废处理上增强工艺与设备的创新能力,深入探索其涉及到的理论问题,进一步实现节能减排。同时,为保证设备的

长期稳定顺行,探索竖炉炉料还原与粘连机制,优化给料设备,提高生产效率;以及全氧生产条件下,实现高温煤气与化工产品的高效转化等也是 Corex 工艺需要努力的方向。

### 3.2 HIs melt 工艺

HIs melt 工艺在澳大利亚的工业示范装置已被搬迁到我国山东,并于 2016 年投产,成为近几年熔融还原工艺发展的新动向<sup>[28]</sup>。HIs melt 工艺在中国的工业实践中取得了较为明显的效果,山东墨龙 HIs melt 最长连续运行时间已达 110 d,超过力拓 HIs melt 工艺报道的最长连续运行时间 65 d。山东墨龙 HIs melt 最大日均产量为 1930 t,超过力拓 HIs melt 的最大日均产量 1834 t,山东墨龙 HIs melt 工厂所生产的特种铸造生铁能够满足高端制造业对高纯生铁的需求<sup>[14]</sup>。近几年,HIs melt 工艺在我国稳定运行,已经成为了我国熔融还原炼铁工艺的研究热点。

HIs melt 与高炉工艺相比,其熔渣具有较高的氧势。根据 HIs melt 工艺的冶炼特点,对高炉冶炼的劣势进行补充,扩大炼铁矿种与煤种的选择范围,这将对 HIs melt 工艺的推广具有促进作用。近年来,科研工作者也提出了利用 HIs melt 熔融还原炼铁工艺冶炼钒钛磁铁矿、高磷矿以及处理含锌粉尘等<sup>[29]</sup>,这均有利于资源的充分利用。目前,多家企业也已经开始了 HIs melt 熔融还原炼铁工艺冶炼特殊矿的工业化实验,取得了一定的成果。

#### (1) 冶炼钒钛磁铁矿

HIs melt 工艺冶炼钒钛磁铁矿与高炉工艺相比具有如下优势<sup>[30-31]</sup>:

① 原料适应性强。HIs melt 工艺可直接向 SRV 炉内喷吹钒钛矿粉进行冶炼,无需对其进行造块。这既可以节约大量造块成本,也可以减少造块过程中 Ti、V 等元素对炉料性能的劣化影响<sup>[32]</sup>。

② 炉渣黏度低、钛资源回收率高。HIs melt 工艺 SRV 炉上部存在一个弱氧化性气氛空间,使得熔渣中 (FeO) 含量较高,这可以有效地抑制渣中 TiO<sub>2</sub> 过还原现象,减少渣中高熔点物相的生成<sup>[33]</sup>,因此炉渣黏度较低,有助于实现全钒钛磁铁矿冶炼,进而提高渣中 TiO<sub>2</sub> 质量分数,推动炉渣中钛资源的回收利用。

#### (2) 冶炼高磷矿

高磷铁矿的冶炼始终是高炉炼铁工艺的难题。在高炉内的强还原气氛下,熔渣几乎没有脱磷能力,P 几乎全部进入生铁中,这给后续的工艺带来了较大的困难,也使得能耗增加。HIs melt 工艺的熔渣中含有大量的 (FeO),可以有效地抑制 P 元素的还原,提高生铁质量,实测 HIs melt 工艺得到生铁中的 P 含量低于 0.04%。研究指出<sup>[34]</sup>,

HISMelt 工艺的铁水与熔渣平衡时，渣中的 CaO 含量和各类铁氧化物的增加均可以增加 P 的分配比，渣中的 P 元素主要以  $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  的形式存在，酸性氧化物的增加使得 P 的分配比降低。范国锋等<sup>[35]</sup>对 HISMelt 工艺冶炼高磷矿过程中不同工艺条件对铁水中 Fe、C、P 等成分的影响。赵丽树<sup>[36]</sup>研究了含 FeO 渣系中各组分含量的变化对渣系 P 容量的影响，为合适渣系的选择提供了指导。

### (3) 冶炼含锌粉尘

高炉炼铁过程中，不可避免地产生大量粉尘，这些粉尘中不仅含有铁、碳等能重新用于炼铁的物质，还含有锌、铅等有价金属。在该粉尘含有的各类资源中，锌作为国民经济建设不可或缺的重要有色金属，具有较大的回收价值。科研工作者提出了使用 HISMelt 工艺对含锌粉尘中的 Fe、C 进行充分利用，并回收 Zn 元素<sup>[37]</sup>。

将含锌粉尘、铁矿粉、煤粉、熔剂等原燃料喷吹至 SRV 炉中进行冶炼，SRV 炉内的含锌粉尘经过充分还原后，生成的单质锌以气态形式随炉气排出。对含锌煤气进行氧化、冷却后检测其锌含量，若锌含量小于 10% 时，将其继续循环回 SRV 炉，直至含锌煤气中锌含量大于 10% 时，停止循环喷吹，收集除尘器中的富锌粉尘；对得到的富锌粉尘进行酸浸，得到浸出液，经沉锌、煅烧处理后，得到氧化锌产品。该工艺不仅能够回收含锌粉尘中的铁，实现资源的循环利用，还能使铁矿粉和含锌粉尘中的锌被煤粉还原成锌单质，在高温下以气态形式随炉气逸出，提高锌的回收率。但是目前该工艺还在理论实验阶段，需要进一步工业化实验，优化其各环节的工艺参数及设备。

HISMelt 工艺为我国的熔融还原炼铁技术带来了新的思路，并经过多年的创新改进，生产指标不断得到优化，目前已经可以稳定连续生产。但是，目前 HISMelt 工艺的生产过程中，仍存在一些问题，例如，回转窑未能达到设计的预热、预还原效果；渣中的 FeO 含量偏高，耐材寿命仍需进一步提高；高温煤气的化学热与物理热的充分利用等。再对这些问题探索与解决的同时，应加强 SRV 炉内冶炼过程的数值模拟与实验研究，探索碳素消耗的分配与元素迁移规律，获得高 FeO 渣系的热力学性质，实现 HISMelt 工艺能耗的进一步降低。同时，也应充分利用其 SRV 炉的冶炼条件，加强对特殊矿种冶炼（钒钛磁铁矿、高磷铁矿、红土镍矿、含砷铁矿等）和固废冶炼的基础理论研究，优化冶炼工艺与参数，加快工业化步伐。

## 4 结论与展望

熔融还原炼铁工艺的竞争力应当体现在对资源、能源的适应性和有效利用以及环保优越性等方面，但目前这些方面尚有大量的问题需要攻关。客观来讲，熔融还原主要工艺，如 Corex 和 HISMelt 工艺，在原燃料的普适性、工艺与设备的稳定性、生产操作的难易程度以及铁水成本竞争力和生产规模方面，与传统大高炉相比还有一定差距。对我国熔融还原炼铁技术的发展提出以下几点建议：

(1) 提高设备的稳定运行能力，充分发挥辅助设备的功能，例如：Corex 竖炉的稳定运行的能力，HISMelt 回转窑对矿粉的预热、预还原能力。

(2) 加强设备大型化的研究，提高熔融还原炼铁的生产能力，同时降低对优质原料的依赖性，实现非焦冶炼。

(3) 加强熔融还原炼铁技术对特殊矿种和固废冶炼的基础理论研究，优化冶炼工艺与参数，加快工业化步伐。

(4) 实现副产品的高效利用，与化工产业实现紧密结合，减少能源消耗。

## 参考文献：

- [1] 张志霞. 熔融还原炼铁与高炉炼铁能耗分析[J]. 现代冶金, 2019, 47(1):31-33.  
ZHANG Z X. Energy consumption analysis of smelting reduction ironmaking and blast furnace ironmaking[J]. Modern Metallurgy, 2019, 47(1):31-33.
- [2] 储满生, 赵庆杰. 中国发展非高炉炼铁的现状与展望[J]. 中国冶金, 2008, 18(9):1-9.  
CHU M S, ZHAO Q J. Present status and development perspective of direct reduction and smelting reduction in China[J]. China Metallurgy, 2008, 18(9):1-9.
- [3] 张晓华, 师学峰, 赵凯, 等. 非高炉炼铁工艺流程发展现状及前景展望[J]. 矿产综合利用, 2020(2):8-15.  
ZHANG X H, SHI X F, ZHAO K, et al. Development status and prospect of smelting reduction ironmaking process[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2):8-15.
- [4] 《柳钢科技》编辑部. 2021 年中国非高炉炼铁行业现状[J]. 柳钢科技, 2021(4):4.  
Editorial Department of Liugang Science and Technology. Current situation of China's non blast furnace ironmaking industry in 2021[J]. Liugang Technology, 2021(4):4.
- [5] 田津. 非高炉炼铁新工艺的探索[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
TIAN J. Exploration of new process for non-blast furnace ironmaking[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [6] 贾利军, 汤彦玲. HISMelt 熔融还原炼铁技术的工艺煤耗及生产实践[J]. 山东冶金, 2021, 43(4):3-6.

- JIA L J, TANG Y L. Coal consumption and production practice of the Hismelt smelting reduction ironmaking technology[J]. *Shandong Metallurgy*, 2021, 43(4):3-6.
- [7] 贾利军. Hismelt 熔融还原技术的优化设计[A]//第十五届全国大高炉炼铁学术年会论文集[C]. 新疆: 中国金属学会炼铁分会, 2014, 949-953.
- JIA L J. Optimal design of Hismelt smelting reduction technology[A]//Proceedings of the 15th National Symposium on Blast Furnace Ironmaking[C]. Xinjiang: Ironmaking Branch of China Metal Society, 2014, 949-953.
- [8] 林金嘉, 宋文刚, 夏文尧. 宝钢 COREX-3000 的生产技术进步和改进方向[A]//第五届宝钢学术年会论文集[C]. 上海: 宝钢集团, 2013, 1-8.
- LIN J J, SONG W G, XIA W Y. Production technology progress and improvement direction of Corex-3000 in Baosteel[A]// Proceedings of the 5th Baosteel Annual Academic Conference[C]. Shanghai: Baosteel Group, 2013, 1-8.
- [9] 张曦. FINEX 与 COREX 及高炉流程能源消耗对比解析[J]. *资源节约与环保*, 2019(4):2.
- ZHANG X. Comparison and analysis of energy consumption between Finex, Corex and blast furnace process[J]. *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2019(4):2.
- [10] 王敏, 任荣霞, 董洪旺, 等. 熔融还原炼铁最新技术及工艺路线选择探讨[J]. *钢铁*, 2020, 55(8):145-150.
- WANG M, REN R X, DONG H W, et al. Latest technology of melting reduction ironmaking process and discussion of process route choice[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(8):145-150.
- [11] 张志霞. Corex 熔融还原技术研究进展[J]. *河北冶金*, 2019(3):14-16.
- ZHANG Z X. Research on Corex smelting reduction technology[J]. *Hebei Metallurgy*, 2019(3):14-16.
- [12] 张建良, 刘征建, 焦克新, 等. 炼铁新技术及基础理论研究进展[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(12):1630-1646.
- ZHANG J L, LIU Z J, JIAO K X, et al. Progress of new technologies and fundamental theory about ironmaking[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(12):1630-1646.
- [13] 胡俊鸽, 高战敏. Corex、Finex 和 Hismelt 技术的发展近况[J]. *钢铁研究*, 2007, 35(4):55-58.
- HU J G, GAO Z M. Development of Corex, Finex and Hismelt technologies[J]. *Research on Iron & Steel*, 2007, 35(4):55-58.
- [14] 张建良, 李克江, 张冠琪, 等. 山东墨龙 Hismelt 工艺的技术创新及最新生产指标[J]. *炼铁*, 2018, 37(2):56-59.
- ZHANG J L, LI K J, ZHANG G Q, et al. Technological innovation and latest production index of Shandong Molong Hismelt process[J]. *Ironmaking*, 2018, 37(2):56-59.
- [15] 孟玉杰, 曹朝真, 梅丛华, 等. Hismelt 工艺的内衬寿命与煤气利用问题探析[J]. *炼铁*, 2018, 37(3):59-62.
- MENG Y J, CAO C Z, MEI C H, et al. Analysis on inner lining service life and gas utilization of Hismelt process[J]. *Ironmaking*, 2018, 37(3):59-62.
- [16] 曹朝真, 张福明, 毛庆武, 等. 我国首座 Hismelt 工业装置的设计优化与技术进展[J]. *炼铁*, 2016, 35(5):59-62.
- CAO C Z, ZHANG F M, MAO Q W, et al. Design optimization and technical progress of the first Hismelt industrial plant in China[J]. *Ironmaking*, 2016, 35(5):59-62.
- [17] 应自伟, 储满生, 唐珏, 等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析[J]. *河北冶金*, 2019(6):1-7.
- YING Z W, CHU M S, TANG J, et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process[J]. *Hebei Metallurgy*, 2019(6):1-7.
- [18] 王磊. 从欧冶炉的“前世今生”看中国宝武低碳发展[N]. *中国冶金报*, 2021-6-8, (2).
- WANG L. On the low carbon development of Baowu in China from the "past and present life" of Ouye furnace[N]. *China Metallurgical News*, 2021-6-8 (2).
- [19] 徐大安, 吴铿, 王宁, 等. COREX 用煤高温成焦质量分析及预测模型[J]. *过程工程学报*, 2016, 16(2):252-258.
- XU D A, WU K, WANG N, et al. Analysis on coking quality of coal for COREX and prediction model[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2016, 16(2):252-258.
- [20] 湛文龙, 吴铿, 徐万仁, 等. COREX 熔融气化炉中块煤裂化现象[J]. *钢铁*, 2013, 48(1):20-23.
- ZHAN W L, WU K, XU W R, et al. Lump coals cracking in COREX melter gasifier[J]. *Iron and Steel*, 2013, 48(1):20-23.
- [21] 刘起航, 吴铿, 杜瑞岭, 等. COREX 流程中块煤/半焦性质与粉化关系探讨[J]. *钢铁*, 2016, 51(8):11-16.
- LIU Q H, WU K, DU R L, et al. Discussion of lump coal/char properties with its disintegration in COREX process[J]. *Iron and Steel*, 2016, 51(8):11-16.
- [22] 于春梅, 滕海鹏, 林豪, 等. Corex 用焦在铁水中的渗碳特性[J]. *钢铁*, 2021, 56(11):39-46.
- YU C M, TENG H P, LIN H, et al. Coke dissolution characteristics in molten iron of Corex[J]. *Iron and Steel*, 2021, 56(11):39-46.
- [23] 应伟峰. Corex 预还原竖炉的数学物理模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- YING W F. Mathematical and physical simulation of COREX pre-reduction shaft furnace[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [24] 杜斌斌, 吴胜利, 周恒, 等. COREX 竖炉结瘤对物料运动行为影响的 DEM 模拟[J]. *钢铁*, 2020, 55(1):12-19.
- DU B B, WU S L, ZHOU H, et al. Effect of scaffolding on solid flow in COREX shaft furnace by discrete element simulation method[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(1):12-19.
- [25] Yang You, Zhiguo Luo, Runyu Yang, et al. Experimental study of the effects of operation conditions on burden distribution in the COREX melter gasifier[J]. *ISIJ International*, 2018, 58(2):267-273.
- [26] Yang You, Yaoyu Li, Zhiguo Luo, et al. Investigating the effect of particle shape on the charging process in melter gasifiers in COREX[J]. *Powder Technology*, 2019, 351:305-313.
- [27] 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):33-39.

XU S B, XU H F. Development of melting reduction iron making technology and future thinking[J]. China Metallurgy, 2016, 26(10):33-39.

[28] 曹朝真, 孟玉杰, 梅丛华, 等. HIs melt 熔融还原工艺工业化最新进展[A]//第十一届中国钢铁年会论文集[C]. 北京: 中国金属学会, 2017, 238-244.

CAO C Z, MENG Y J, MEI C H, et al. Latest progress in industrialization of HIs melt process[A]// Proceedings of the 11th China Iron and steel annual conference[C]. Beijing: China Metal Society, 2017, 238-244.

[29] 邱亚丽, 王华, 卿山. 钛铁矿和高磷铁矿混合矿氧气顶吹熔融还原炼铁的工艺条件[J]. 过程工程学报, 2011, 11(6):1024-1029.

HOU Y L, WANG H, QING S. Smelting conditions of reduction ironmaking from ilmenite mixed with high phosphorus iron ore by top-blown oxygen[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(6):1024-1029.

[30] 高洋, 贵永亮, 宋春燕, 等. 高钛高炉渣综合利用现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2019(1):6-10.

GAO Y, GUI Y L, SONG C Y, et al. Present situation and prospect of comprehensive utilization of high titanium blast furnace slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1):6-10.

[31] 印万忠, 徐东, 杨耀辉, 等. 承德某钒钛磁铁矿尾矿资源化利用技术研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6):37-42.

YIN W Z, XU D, YANG Y H, et al. Research on the recycling technology for a vanadium-titanium magnetite tailings in Chengde[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):37-42.

[32] 张立恒, 高子先, 汤卫东, 等.  $w(\text{TiO}_2)$  对高铬型钒钛磁铁矿烧结矿冶金性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),

2020, 41(11):1667-1672.

ZHANG L H, GAO Z X, TANG W D, et al. Effect of  $\text{TiO}_2$  content on metallurgy performance of high-chromium vanadium-titanium magnetite sinter[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2020, 41(11):1667-1672.

[33] 严照照, 张淑会, 董晓旭, 等. 高炉渣的化学成分对其微观结构影响的研究现状[J]. 矿产综合利用, 2019(1):22-27.

YAN Z Z, ZHANG S H, DONG X X, et al. Research status of the influence of blast furnace slag chemical composition on its microstructure[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1):22-27.

[34] 李林. HIs melt 炼铁工艺的基础研究[J]. 北京: 北京科技大学, 2019.

LI L. Basic research on HIs melt ironmaking process[J]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2019.

[35] 范国锋, 卿山, 王华, 等. 高磷铁矿直接熔融还原动力学研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012, 37(5):17-23.

FAN G F, QING S, WANG H, et al. Kinetic research for direct smelting reduction of high-phosphorus iron ore[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology ( Natural Science Edition), 2012, 37(5):17-23.

[36] 赵丽树.  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-Fe}_2\text{O}_3$  渣系热力学性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.

ZHAO L S. Study on thermodynamic properties of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-Fe}_2\text{O}_3$  slag[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.

[37] 张建良, 徐润生, 刘征建, 等. 一种基于 HIs melt 熔融还原炉的锌回收方法[P]. 中国: CN111647704, 2020.

ZHANG J L, XU R S, LIU Z J, et al. A zinc recovery method based on HIs melt smelting reduction furnace[P]. China: CN111647704, 2020.

## Development Status and Prospect of Smelting Reduction Ironmaking Technology in China

LAN Chenchen<sup>1</sup>, GAO Yanjia<sup>1</sup>, LYU Qing<sup>1</sup>, ZHANG Zhenfeng<sup>2,3</sup>, GAO Feng<sup>2,3</sup>, ZHANG Shuhui<sup>1</sup>  
(1.College of Metallurgy & Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2.Hebei Yuantong Mining Co., Ltd., Chengde 067000, Hebei, China; 3.Chengde Xintong Shoucheng Mining Co., Ltd., Chengde 067000, Hebei, China)

**Abstract:** This is an article in the field of metallurgical engineering. With the increasing attention of iron and steel enterprises to pollutant emission, non blast furnace ironmaking process has gradually become a hot issue. At present, the industrialized non blast furnace ironmaking technology in China is mainly Corex process of Baogang and HIs melt process of Shandong Molong. It is also a hot process of non blast furnace ironmaking technology in China. This article expounds the processes of Corex process and HIs melt process, compares the technical indexes, advantages and disadvantages of the two processes, discusses the research status of the two processes in China, and looks forward to their development direction in combination with the characteristics of each process.

**Keywords:** Metallurgical engineering; Smelting reduction; Corex process; HIs melt process; Resource utilization