

钒钛矿冶炼过程中高炉流程与直接还原流程对比

Comparative of Blast Furnace and Direct Reduction Process in Vanadium-titane Magnetite Smelting

供稿|佐祥均, 吴文凯, 孙皓月 / ZUO Xiangjun, WU Wenkai, SUN Haoyue

内容导读

结合给定的原燃料条件, 分析了现代高炉流程、煤基回转窑直接还原和气基竖炉直接还原等3种工艺流程在钒钛矿冶炼过程中的特点。从资源利用、技术可行性、产品经济性、生产风险等多个方面比较各工艺流程的优缺点。对比研究发现: 基于现阶段钒钛矿冶炼生产、实践水平, 相较于煤基回转窑直接还原和气基竖炉直接还原流程, 高炉流程在生产能力、原料利用率、技术可靠度、投资和工序成本等方面均表现出较大优势。未来钒钛矿冶炼应在高炉低碳化研究领域投入更多的关注, 既可以解决高炉流程排碳的问题, 又可以充分发挥高炉经济性高、竞争力强的优势。而直接还原流程在环保方面的优势值得更多关注。应该根据原燃料条件因地制宜的选择合适的冶炼工艺流程。

现代钒钛矿冶炼工艺主要依赖于高炉流程, 是一种极其成熟且被广泛应用的技术。然而, 随着环境保护意识的提升和资源节约型社会的构建, 直接还原流程作为一种潜在的替代技术逐渐受到更多的关注。直接还原流程以其理论计算出的相对较低的能耗和排放水平, 为炼铁行业提供了新的发展方向 and 选择, 但真正的工业实践与理论计算却差强人意^[1-2]。受国家产业政策和低碳政策的影响, 越来越多钢铁企业计划在直接还原流程冶炼领域进行更多的投入, 但国内资源结构和资源条件对直接还原流程的支撑存在一定缺陷。本研究旨在通过科学的研究方

法对比高炉流程与直接还原流程在钒钛矿冶炼技术可行性、经济可行性和环境影响等方面的差异, 揭示2种流程在实际生产中的适用性和潜在优势, 深入分析和研究, 为钢企选择合适的钒钛矿冶炼工艺提供理论依据和决策支撑。此外, 研究成果将有助于推动炼铁行业的技术进步, 促进环境友好型生产方式的发展, 并对相关产业的可持续发展产生积极影响。

技术性对比分析

随着全球对碳排放的日趋重视, 作为排碳大户的钢铁行业日渐受到更多的挑战和掣肘。高炉流程

作者单位: 中冶赛迪重庆环境咨询有限公司, 重庆 400014

的低碳化和直接还原冶炼流程在全球范围内得到了更多的关注,尤其在寻求降低碳排放和提高冶炼效率的国家和地区,正不断加大对低碳高炉和直接还原冶炼技术的研究及实践投入。然而,这2种生产流程的经济性和技术成熟度仍然是其推广应用的主要障碍。随着技术的不断进步和成本的不断降低,预计低碳高炉和直接还原技术未来必将在全球范围内得到更为广泛的应用^[1-3]。

本文选取的直接还原流程为煤基回转窑直接还原和气基竖炉直接还原流程,高炉流程为现代钒钛矿冶炼流程,对比产品均为合格钢水。煤基回转窑和气基竖炉对球团矿直接还原得到直接还原海绵铁(DRI),经电炉熔分产生铁水,铁水进入转炉工序制得合格钢水。工业实践经验表明,直接采用电炉对DRI进行熔分生产钢水的技术还不成熟^[3-5]。3种工艺流程路径如图1所示。

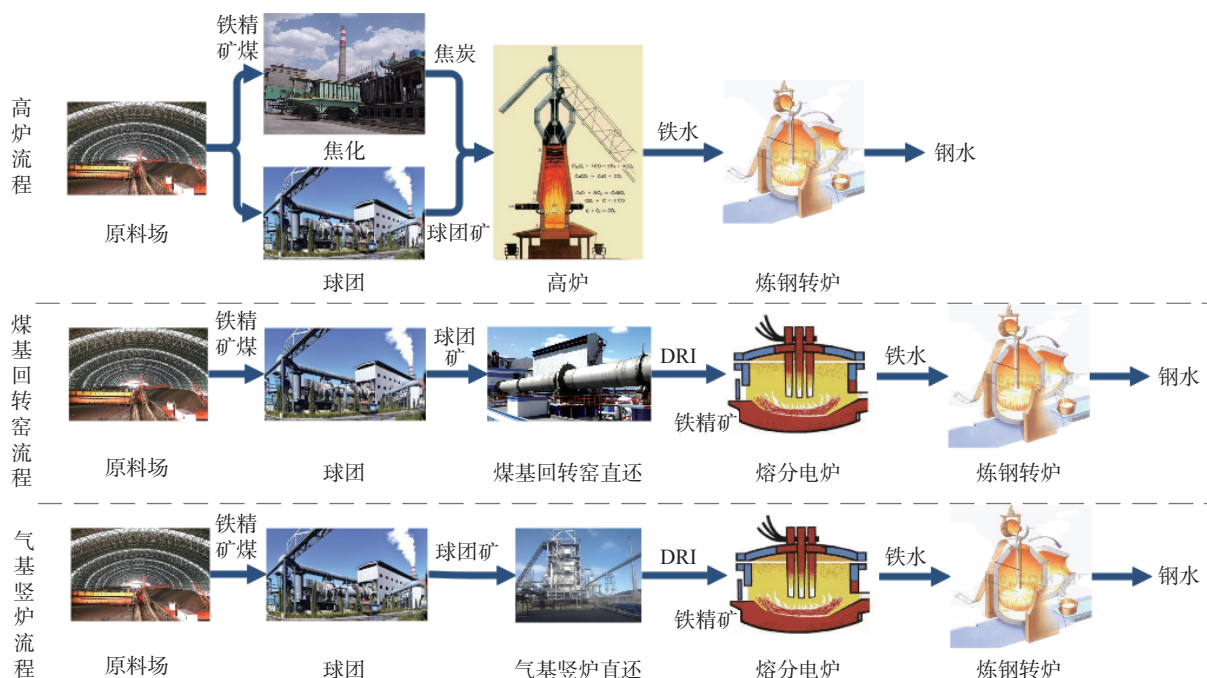


图1 高炉流程、煤基回转窑直还流程和气基竖炉流程示意图

为了便于进行同口径对比研究,本次研究过程中对原料条件做如下限制:

(1) 原钒钛磁铁矿中,有用元素 TFe 质量分数为 49.33%~51.83%,伴生有用组分 TiO_2 质量分数为 12.55%~13.10%, V_2O_5 质量分数为 0.447%~0.481%。

(2) 矿区各煤层的原煤发热量平均值为 20.27~31.02 MJ/kg,浮煤发热量平均值为 33.65~35.89 MJ/kg。若采用高炉工艺流程,炼焦工艺采用热回收炼焦技术,全部使用当地的煤生产的焦炭的抗碎强度和耐磨强度均稍低。

(3) 产品规模为 100 万 t 线棒材。

3 种工艺流程的技术可行性对比如表 1 所示^[6-8],高炉、煤基回转窑直接还原和气基竖炉直接还原 3 种工艺流程对钒钛磁铁矿的冶炼在技术上都是可行

的。由于目前国内外对直接还原流程的研究和工业实践应用相比高炉流程较少,科研和工业实践的技术积累比较欠缺,特别是针对钒钛磁铁矿的冶炼技术,高炉流程仍然具有较大的生产实践和技术积累优势。国内钒钛矿冶炼基本采用高炉流程,技术积累和操作经验非常丰富,且上下游工艺链成熟可靠,生产所需备品备件和周转件通用性强,且易获得。最重要的是,生产操作人员和技术管理人员非常容易招聘。因此,从技术可行性和适用性的角度来看,高炉流程工艺技术流程成熟、可靠、安全。

资源利用的对比分析

3 种工艺流程对资源的利用和主要能源介质消耗对比情况见表 2。

表 1 3 种工艺流程技术可行性对比

煤基回转窑（方案一）	高炉流程（方案二）	气基竖炉（方案三）
1) 工业性生产实际业绩少，仅新西兰和南非有，但原料条件有较大差别，国内尚无大规模工业性生产案例； 2) 技术积累和操作经验都需进一步加强； 3) 上下游工艺链不成熟，生产安全性差； 4) 备品备件和周转件可能需要专门定制； 5) 熟练人员较少，不易招聘。	1) 国内工业生产案例较多； 2) 技术积累和操作经验都非常丰富； 3) 上下游工艺链成熟，安全稳定； 4) 备品备件和周转件通用性强，较易获得； 5) 熟练人员容易招聘。	1) 国内煤制气技术成熟、上下游工艺链成熟； 2) 竖炉采用混合煤气（CO，H ₂ ）符合直接还原理论要求，是未来低碳冶炼技术的发展方向； 3) 国内熔分电炉技术需进一步加强； 4) 备品备件和周转件通用性强，较易获得； 5) 精通人员较少，不易招聘。

表 2 3 种工艺流程对资源利用对比

工艺	铁矿耗量/万t		煤矿耗量/万t		吨钢矿耗/万t	吨钢煤耗/t		吨钢新水耗/m ³		吨钢耗电/(MW·h)	
	本地铁矿	外购普铁矿	本地煤矿	外购煤		不含发电	含发电	不含发电	含发电	不含矿山	含矿山
煤基回转窑	192.3	0	174.5	0	1.87	1.10	1.69	9.5	16.0	1.91	2.06
高炉流程	121.3	65.2	69.3	16.82	1.81	0.84	0.84	3.8	6.7	0.57	0.71
气基竖炉	178.0	0	128.0	0	1.73	0.65	1.28	4.9	11.6	1.76	1.90

由表 2 所示，通过对比 3 种工艺流程对资源的综合利用，可以发现：

（1）矿：煤基回转窑和气基竖炉均可以 100% 利用本地钒钛磁铁矿产出铁精粉，高炉流程根据高炉冶炼钒钛磁铁矿的特点需加入一定比例的普铁矿。从铁矿的消耗来看，气基竖炉吨钢矿耗最低。

（2）煤：煤基回转窑和气基竖炉均可以 100% 利用本地煤矿产出的煤粉，高炉流程根据高炉冶炼对焦炭的需求特点，预计需要配 10%~30% 的主焦煤（外购煤矿）。从综合煤的消耗来看，高炉流程吨钢煤耗最低。

（3）水：煤基回转窑和气基竖炉的吨钢新水耗量较大，高炉流程吨钢新水耗量最低，高炉流程含发电的吨钢新水耗量分别是煤基回转窑的 41.9%、气基竖炉的 57.8%。

（4）电：煤基回转窑和气基竖炉的吨钢电耗（含矿山）较大，高炉流程吨钢电耗量最低，分别是煤基回转窑的 34.6%、气基竖炉的 37.5%。

从以上对比可以看出，高炉流程高炉流程在吨钢的煤耗、水耗、电耗方面较其它 2 个方案有较大优势，但无法实现 100% 利用自有矿山资源。

项目经济性对比分析

投资比较

从投资的角度，按照国内价格水平进行工程费

用投资估算，高炉流程的投资估算最低，吨钢投资约 5029 元/t，吨钢投资估算分别为煤基回转窑的 71.0%，气基竖炉的 67.2%，如图 2 所示。

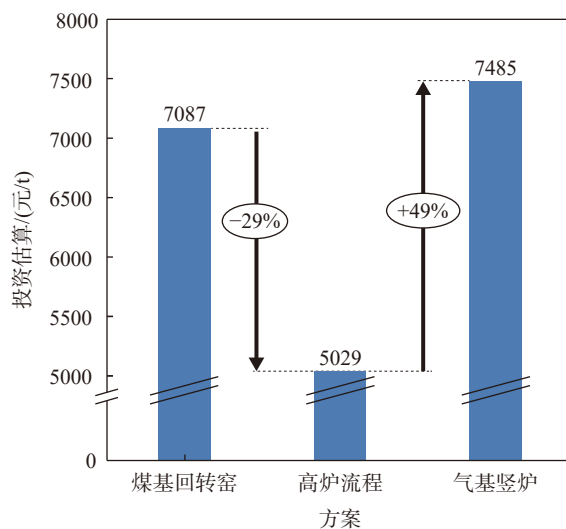


图 2 3 种工艺流程生产工程费用投资估算对比

生产成本比较

从主要工序生产成本估算来看，高炉流程的各主要工序生产成本最低。高炉流程的钢材生产成本 2990 元/t，分别较煤基回转窑和气基竖炉低 330 和 141 元/t，3 种工艺流程工序成本估算对比见表 3。可以看出，铁水成本不同是各工艺流程方案之间产生成本差异的主要原因，高炉流程铁水成本约

表 3 3 种工艺流程各工序产品成本估算对比

元/t

项目	球团矿	DRI	焦炭	铁水	半钢	钢水	连铸坯	钢材
煤基回转窑	522	1229		2362	2449	2905	3041	3320
高炉流程	646		1301	2058	2149	2592	2721	2990
气基竖炉	532	1250		2204	2279	2726	2858	3131

2058 元/t, 煤基回转窑和气基竖炉铁水成本分别约 2362 和 2204 元/t。这主要是因为高炉流程是直接从球团矿到铁水, 只有一个相变过程, 而直接还原流程是从球团矿到固态 DRI, 再由熔分电炉将固态 DRI 熔分制成铁水, 存在两个相变过程, 损失了大量的能量。

环境影响和风险识别

高炉流程会排放大量的 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等有害气体, 其中 CO_2 排放量尤其巨大, 是钢铁生产领域主要的温室气体排放源。直接还原流程的气体排放相对较少, 尤其是在使用现代技术如电弧炉 (EAF) 和直接还原海绵铁 (DRI) 工艺时, 这些工艺通常采用电力或天然气等清洁能源, 可以显著减少温室气体和其他污染物的排放。高炉流程中产生的固体废物包括炉渣、粉尘、矿灰等, 这些废物需要妥善处理, 以防止对环境造成污染。直接还原流程的固体废物产生量较少, 且通常具有较高的附加值, 可以作为原料或建材进行利用。

煤基回转窑的风险点主要集中在煤基回转窑和熔分电炉, 首先要解决这 2 个单元工艺技术和设备的成熟性和可靠性问题, 其次还需解决技术操作人员和技术管理人员的招聘问题, 最后需尽可能降低投资、提升生产效率、降低工序成本。另外, 煤基回转窑需要大量外部供电, 如在电力欠缺的地区需自建燃煤电厂, 但受中国煤炭发电技术出口政策以及全球煤炭发电供货质量水平和价格的影响, 建设燃煤电厂存在不可预知的风险。高炉流程的风险点主要是焦炭的质量和高温炉料结构, 需要通过进一步实验, 找到最佳的配煤比例和最具经济性的高温入炉炉料结构, 以减少生产成本可能增加的风险。气基竖炉的风险点主要集中在气基竖炉和熔分电炉, 需要解决的问题同煤基回转窑。通过对比研究可以看出, 高炉流程在技术积累、生产组织、

投资决策、招聘培训、备品备件等方面的风险均为最低。

结束语

综合“技术可靠、经济可行、风险可控、效益可保”等多方面的研究分析, 对基于假设原燃料条件的生产工艺流程对比研究分析, 得到如下结论:

(1) 从工艺技术路线的可靠性、成熟度、技术人员招聘等关键因素来看, 高炉工艺流程具有明显优势, 采用高炉工艺流程可将项目技术风险程度降至最低。

(2) 从投资的角度来看, 根据既有资料进行投资估算, 高炉工艺流程投资最低, 得益于高炉流程在技术成熟度、可靠性上的优势以及规模化优势, 采用高炉工艺流程投资风险为最低。

(3) 从生产成本对比分析来看, 高炉工艺流程在矿耗、煤耗、电耗、水耗、氧耗等多项关键经济技术指标中均为最优, 主要工序生产成本测算也是最低的, 采用高炉工艺流程具有较好的可控成本。

基于假设的资源 and 外部能源条件, 从技术可行性、稳定性、安全性、投资、经济性、环保等多重角度论证来看, 一个绿地新建钢厂应该选择高炉流程作为起步项目。远期待矿山规模扩大及直接还原工艺成熟后, 可以适当考虑气基竖炉直还原流程。其次, 通过对比研究, 未来在钒钛矿冶炼首先还是在高炉低碳化研究领域投入更多的关注, 这样既可以解决高炉流程排碳的问题, 也可以充分发挥高炉经济性高、竞争力强的优势。最后, 直接还原流程在环保方面的优势值得更多关注, 除此之外, 更应根据原燃料条件因地制宜的选择合适的冶炼工艺流程。

参考文献

[1] 王新东, 郝良元. 现代炼铁工艺及低碳发展方向分析. 中国冶

- 金, 2021, 31(5): 1
- [2] 杨富廷. 基于“双碳”背景的钢铁企业节能低碳发展技术路径探析. 山东冶金, 2023, 45(4): 51
- [3] 朱苗勇. 现代冶金工艺学—钢铁冶金卷. 北京: 冶金工业出版社, 2011
- [4] 朱丽. 钢铁行业低碳冶金技术的发展与应用. 山西冶金, 2023, 46(12): 73
- [5] 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. 河北冶金, 2019(6): 1
- [6] 周翔, 白永强. 我国高炉炼铁碳生产率提升路径研究. 金属世界, 2024(1): 15
- [7] 王新宇, 赵海泉, 齐渊洪, 等. 钒钛磁铁矿直接还原的研究与发展. 中国冶金, 2024, 34(2): 1
- [8] 张建良, 刘征健, 李克江, 等. “双碳”战略下我国炼铁工业的绿色低碳发展. 炼铁, 2022, 41(5): 1

作者简介: 佐祥均 (1980—), 男, 贵州省遵义市人。2010年毕业于美国密苏里科技大学材料科学与工程专业, 主要研究方向: 钢铁企业总体规划、炼钢、连铸等。通信地址: 重庆市渝北区金渝大道赛迪路1号; E-mail: xiangjun.zuo@cisdi.com.cn。