

钒钛球团矿气基竖炉生产过程的影响因素及改善措施

王海涛¹, 李晓兵^{1, 2}, 吕志敏¹, 曹建学¹, 秦 愉¹

(1. 河钢集团张宣高科科技有限公司, 河北 张家口 075100; 2. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 我国钒钛磁铁矿资源储量丰富, 但传统的高炉—转炉工艺在处理该矿时存在工艺流程长、资源综合利用效果差、能耗高、环境污染大等问题。气基竖炉直接还原—电炉熔分工艺为钒钛磁铁矿的清洁高效利用提供了新途径。本文通过进行钒钛球团矿气基竖炉直接还原投笼试验, 研究实际生产过程中钒钛球团矿的直接还原情况及球团品质, 并提出相应改善措施。结果表明: 钒钛球团矿的抗压强度是影响气基竖炉生产的因素之一, 其较高的低温还原粉化率和还原膨胀率, 也是导致直接还原铁 (DRI) 粉化严重、外观形貌差的重要因素, 这成为气基竖炉生产的限制性环节; 由于钒钛球团矿的特殊矿物组成, 其还原性较差, 生产 DRI 的金属化率偏低; 通过提高气基竖炉进口温度和改善还原气氛等措施调整气基竖炉的操作制度, 可使得 DRI 的金属化率有所提升。投笼试验为改善钒钛球团矿的冶金性能提供了方向, 未来应着重优化竖炉操作制度, 进一步提高还原效率。

关键词: 钒钛球团矿; 气基竖炉; 低温还原粉化; 还原膨胀; 金属化率

中图分类号: TF046. 6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0087-07

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.045

Influencing factors and improvement measures of vanadium-titanium pellet gas-based shaft furnace production process

WANG Haitao¹, LI Xiaobing^{1, 2}, LÜ Zhimin¹, CAO Jianxue¹, QIN Yu¹

(1. HBIS Group Zhangxuan Technology Co., Ltd. Zhangjiakou 075100, Hebei, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: China has abundant vanadium titanomagnetite resources, but the traditional blast furnace-converter process has such problems as long process flow, poor comprehensive utilization effect of resources, high energy consumption and large environmental pollution. The gas-based shaft furnace direct reduction-electric furnace melting process provides a new way for the clean and efficient utilization of vanadium titanomagnetite. Direct reduction cage test for vanadium titanium pellet ore gas-based shaft furnace is conducted, the direct reduction status and pellet quality of vanadium titanium pellet ore in actual production are researched, and the corresponding improvement measures are proposed. The results show that the compressive strength of vanadium-titanium pellets is one of the factors affecting the production of gas-based shaft furnaces, and its high low-temperature reduction pulverization rate and reduction expansion rate are also important factors leading to serious pulverization and poor appearance and morphology of direct reduced iron (DRI), which has become a limiting link in the production of gas-based shaft furnaces. Due to the special mineral composition of vanadium-titanium pellets, its reducibility is poor, and the metallization rate of DRI production is low. By adjusting the operating system of the gas-based shaft furnace by increasing the inlet temperature of the gas-based shaft furnace and improving the reducing atmosphere, the metallization rate of the DRI can be improved. The cage test provides a direction for improving the metallurgical properties

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2024-07-01

基金项目: 河北省战略性技术专项(23314601L)

作者简介: 王海涛(1982—), 男, 高级工程师, 从事气基竖炉生产与技术方面的研究工作。

通信作者: 李晓兵(1985—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 从事气基直接还原、烧结球团技术管理工作。

of vanadium-titanium pellets, and the operation system of the shaft furnace should be optimized in the future to further improve the reduction efficiency.

Key words: vanadium titanium pellet ore; gas-based shaft furnace; low-temperature reduction pulverization; reduction expansion; metallization rate

钒被称为“现代工业味精”，能有效抵抗高温和低温、防强酸和强碱腐蚀，被誉为“太空金属”。钛是一种化学性质稳定的金属元素，具有较高的热强性和持久强度、良好的耐腐蚀性，被称为“21世纪的金属”。钒钛具有很高的战略价值，广泛应用于高科技领域。我国钒钛矿储量丰富，其中钒、钛和铁分离的主要冶炼工艺有高炉—转炉和非高炉冶炼^[1]。高炉—转炉工艺的产业规模大、生产效率高，是国内冶炼钒钛磁铁矿的主要工艺^[2]，但其存在工艺流程长、系统庞大、工艺复杂、工序能耗高、污染大等缺点；此外，渣铁黏度大，流动性变差，冶炼难度高，含钛炉渣难以回收和综合利用。针对当前我国钒钛磁铁矿资源的开发状况，合理开发和运用新技术，对实现资源的可持续利用具有重要意义。高炉—转炉工艺无法实现钒钛资源的大规模回收利用，因此非高炉法尤其是气基竖炉直接还原成为钒钛磁铁矿有效分离的研究热点。直接还原—电炉工艺创造性地将还原和加热环节分离，大大降低了冶炼过程的难度。与传统钒钛矿处理工艺相比，该工艺流程短、工序能耗低、环境污染小，资源的综合利用效率得到提升。

按照设备的不同，直接还原工艺可分为流化床法、回转窑法、转底炉法和竖炉法^[3-4]；按照还原剂类型的不同，其可分为煤基和气基直接还原两大类。南非、澳大利亚等对于含钒较高的钒钛磁铁矿采取“先钒后铁”的提炼工艺，在制备球团矿的过程中加入钠盐，将水浸提钒后的球团矿送入回转窑直接还原，但由于含钠球团矿的还原膨胀和粉化问题，还原效果受到影响，钛和铁没有得到有效回收，这种工艺在我国暂未大规模应用。钒钛磁铁矿“先铁后钒”提取工艺有直接还原—电炉和直接还原—磨选两种，这两种工艺的第一步均为钒钛磁铁矿的直接还原。芬兰、南非等以煤为还原剂，在回转窑直接还原钒钛球团矿并进行了工业化应用，但存在直接还原铁(DRI)

强度低、易产生粉末、回转窑运行不稳定等缺点。20世纪80年代，西昌410厂进行了回转窑直接还原钒钛球团矿的工业试验，试验存在造球、结圈、再氧化等技术难题，工业化操作难度大。现阶段，我国气基竖炉直接还原钒钛磁铁矿尚处于实验室研究阶段。气基竖炉工艺不能还原钒、钛，只能还原铁氧化物，得到金属化率较高的DRI，便于后续工序高效提取钒、钛和铁。在实际生产中，气基竖炉钒钛球团矿直接还原工业试验未见报道。

为此，本文开展气基竖炉直接还原钒钛球团矿的投笼试验，以高品质球团矿及其DRI为基准，分析投笼试验结果，探讨气基竖炉直接还原钒钛球团矿的可行性，为后续改善钒钛球团矿的冶金性能，提高DRI的金属化率、品质及调整气基竖炉操作制度提供参考与借鉴。

1 气基竖炉直接还原工艺流程

河钢集团张宣科技气基竖炉以高品质球团矿为原料，将球团涂覆后，用富含 H_2 的焦炉煤气作为还原剂，生产冷态DRI，工艺流程如图1所示。图1中，还原气体经加热后，进入竖炉。还原反应以 H_2 还原为主、 CO 还原为辅。还原气体中 H_2O 和 CO_2 含量可控，在竖炉内发生焦炉煤气重整反应。炉内 H_2 含量及 $n(H_2)/n(CO)$ （物质的

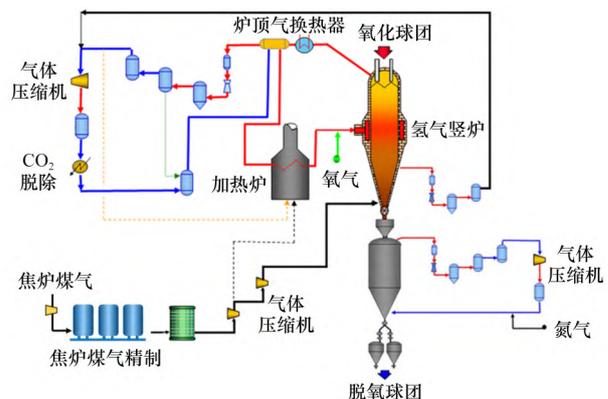


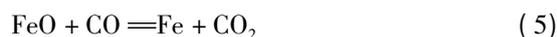
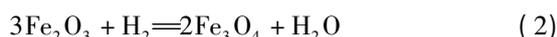
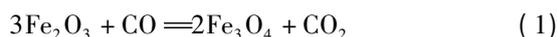
图1 气基竖炉直接还原工艺流程

Fig. 1 Direct reduction process flow of gas-based vertical furnace

量之比) 值可动态调整。焦炉煤气和成品 DRI 主要化学成分如表 1 所示。金属化率是指在 DRI 中金属铁占全铁的质量百分比, 是衡量 DRI 的质量指标, 用于评价球团矿在气基竖炉内直接还原的效果。由表 1 可见, 成品 DRI 具有金属化率高、脉石及有害杂质含量低的优点, 含有一定量的碳, 是电炉炼钢的优质原料。

气基竖炉工艺条件下进口温度低, 不具备钒钛还原的热力学条件, 钒钛不能被还原, 主要是 H_2 、 CO 与铁氧化物发生还原反应生成金属铁, 获得 DRI。后续处理工序要求含钒钛的 DRI 具有较高的金属化率, 以实现高效综合提炼钒、钛、铁。

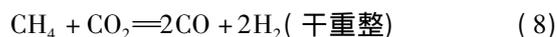
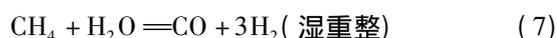
在气基竖炉内, 铁氧化物的还原遵循逐级还原规律。由于竖炉炉顶温度为 $450 \sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$, 球团矿装入竖炉不久后, 就开始还原, 并经过 FeO 还原阶段, 即 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ 。铁氧化物还原反应^[5]:



焦炉煤气富含 H_2 , 作为还原剂有许多优点, 其黏度低、密度小、导热性好, 能加速气体和固体之间的传质和传热, 有利于提高球团矿还原过程中的热能利用率; 更重要的是, 当温度超过 $810 \text{ }^\circ\text{C}$ 后, H_2 是一种高效还原剂, 其还原潜力为 CO 的 14 倍^[6], 扩散速度为 CO 的 3.74 倍, 其还原产物水的扩散速度为 CO_2 的 1.562 倍, 有利于提高生产效率。此外, H_2 不但本身具有还原作用, 而且对 CO 还原还具有催化作用。

还原气体中含有可控的 H_2O 、 CO_2 , 且 H_2O 含量高于 CO , 其进入竖炉后与 CH_4 发生零重整反应, 生成 H_2 和 CO , 改变还原气氛, 提高 H_2 含量。

重整反应:



正常生产期间, 竖炉进口温度为 $1030 \text{ }^\circ\text{C}$, 炉顶压力为 680 kPa , 炉顶温度为 $(470 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$, 还原气体流量为 $1.2 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^5 \text{ Nm}^3/\text{h}$, H_2O 体积分数为 4.5% , CO_2 体积分数低于 2.5% , DRI 产量为 $1350 \sim 1400 \text{ t/d}$ 。

2 钒钛球团矿直接还原的影响因素及投笼试验

2.1 钒钛球团矿直接还原的影响因素

(1) 原料因素。钒钛磁铁矿精粉的全铁品位低、粒度较粗, 其成球性较差。由于生球粒度较大, 成品球内部氧化固结不充分, 物相分布不均匀 (出现内外分层现象), 孔洞和裂缝明显, 强度低。钒钛磁铁矿的矿物组成复杂, 含有钛磁铁矿、钛铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿及钛铁晶石等^[7], 其还原性较差, 比磁铁矿难还原^[8-9], 造成直接还原后 DRI 的金属化率较低。钒钛球团矿的抗压强度低于 2000 N/P , 不能满足气基竖炉的生产要求。

(2) 温度和还原气体因素。研究表明^[10], H_2 浓度对钒钛球团矿的低温还原粉化性、还原膨胀性具有显著影响。在气基竖炉上部 $450 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温区, 钒钛球团矿的还原粉化指数随温度的升高和气相成分 $P(H_2) / [P(H_2) + P(CO)]$ 的增大, 均呈现先增加后降低的趋势; 在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $P(H_2) / [P(H_2) + P(CO)]$ 为 0.5 时, 还原粉化指数达到最大值; 在 $850 \sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 的竖炉高温区, 钒钛磁铁矿球团的还原膨胀指数随温度的升高而增大, 随气相成分 $P(H_2) / [P(H_2) + P(CO)]$ 的升高而减小。为降低钒钛磁铁矿球团气基还原的还原粉化和还原膨胀指数, 应提高还原气体中 H_2 的含量, 即采用富氢还原气体还原, 降低球团在低温区的停留时间, 控制竖炉还原温度低于 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[11-12]。还

表 1 焦炉煤气和成品 DRI 主要化学成分 (质量分数)

Table 1 Main chemical components of coke oven gas and finished DRI

%

焦炉煤气						DRI						
H_2	CH_4	CO	CO_2	N_2	H_2O	金属化率	TFe	碳	SiO_2	CaO	MgO	TiO_2
55~62	18~22	<8.0	<2.0	<7.0	<1.0	94.0~94.5	89.0~89.5	2.5~3.0	2.5~3.5	<0.7	<0.6	<0.7

原气体中($H_2 + CO$)含量及流速对钒钛磁铁矿球团还原速率的影响较大,这两个参数适当提高均能促进还原效率提升;并且 H_2 对钛磁铁矿的还原效率的提升作用要高于 CO ,当采用($H_2 + CO$)混合气体作还原剂时, H_2 体积分数提升可以提高还原效率^[13],从而提高DRI产量。

在实验室模拟钒钛球团矿的制备过程,并检测球团的理化性能;模拟气基竖炉还原工艺条件,采用不同比例的 H_2 和 CO 作为还原剂,对球团矿进行直接还原试验,考察不同还原温度和气氛下球团矿的还原行为、还原膨胀性能以及DRI品质,探索钒钛球团矿用于竖炉还原的可行性。试验结果^[14-16]表明,随着还原温度和还原气组分中 H_2 含量的增加,球团矿还原速率逐渐增大,还原膨胀率降低;随还原温度和还原气组分中 CO 含量的增加,球团矿还原膨胀率增大;钒钛球团矿的冶金性能良好,DRI的金属化率超过90%。

2.2 投笼试验

为推进氢冶金工序结构优化,进一步提升项目的经济性,推动DRI产品的多元化、拓宽DRI产品的用途、挖掘DRI产品的绿色价值,设置DRI的金属化率预期目标为85%,开展钒钛磁铁矿球团气基竖炉直接还原投笼试验。试验用钒钛球团矿由某钢铁厂提供,以张宣科技气基竖炉高

品质球团矿及其DRI为基准进行对比,研究钒钛球团矿的还原情况及DRI品质。

钒钛球团矿的化学成分和抗压强度如表2所示。由表2可见,先后进行3次试验,通过增配适量高品位矿粉,使得球团矿品位增加约0.5%;通过增配适量膨润土及少量石灰石,使得球团矿强度提高至2 763 N/P,最终摸索出适宜的钒钛球团矿强度,以适应气基竖炉工业生产。投笼试验期间,气基竖炉生产稳定,各部位温度分布在正常范围内波动,基准高品质球团矿和DRI品质受控。DRI完整性是指经过直接还原后仍保持完整外观形态的球团矿质量分数。试样投笼后得到的DRI成分、完整性对比如表3所示,其与基准DRI的外观形貌对比如图2所示。对比表2、3可见:通过提高钒钛球团矿强度至2 060 N/P,DRI的完整性由试样1的8.2%提升至试样2的30.8%,当钒钛球团矿强度提高至2 763 N/P时,试样3的DRI完整性为41.2%;此外,随着合格粒级质量分数的增加,<3.15 mm的含粉率由8.3%降低至4.1%,钒钛DRI的储存效果改善,运输过程中的破损率降低,可满足电炉冶炼对粒度的要求。此外,由表3可见,对比试样1,在试样2、3投笼期间,试验通过调整气基竖炉的还原制度,如提高炉顶温度30℃、降低排料速率6 t/h、延长还

表 2 试样的主要化学成分和抗压强度

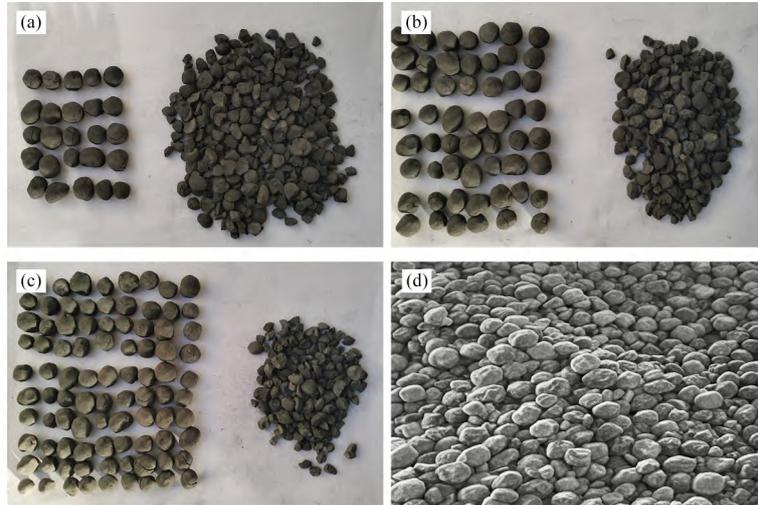
Table 2 Main chemical composition and compressive strength of the samples

项目	化学成分(质量分数)/%								抗压强度/ ($N \cdot P^{-1}$)
	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	TiO ₂	Cr	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	
试样 1	54.97	4.24	0.59	1.42	9.34	0.216 5	1.014	3.55	6 68
	54.99	4.29	0.59	1.42	9.27	0.215 6	1.000	3.51	
试样 2	55.63	2.52	0.43	1.53	10.79	—	—	3.39	2 060
试样 3	55.39	2.71	0.41	1.48	9.95	—	—	3.12	2 763
张宣科技	67.03	2.16	0.43	0.51	0.34	—	—	0.54	2 654

表 3 试样生产 DRI 的主要化学成分及相关指标(质量分数)

Table 3 Main chemical composition and related indexes of DRI produced from the samples

项目	%										
	金属化率	金属铁	TFe	C	SiO ₂	CaO	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	完整性	<3.15 mm 粒级占比(含粉率)
试样 1	61.02	41.57	68.13	2.63	4.54	0.64	1.65	11.15	4.35	8.2	8.3
试样 2	82.08	57.90	70.54	3.02	3.51	0.63	1.89	12.02	4.05	30.8	5.4
试样 3	73.01	51.56	70.62	3.13	2.79	0.52	1.80	12.27	3.98	41.2	4.1
张宣科技	94.52	84.72	89.63	3.10	2.85	0.51	0.61	0.48	0.66	63.3	2.8



(a) 试样1; (b) 试样2; (c) 试样3; (d) 基准DRI

图2 试样的DRI外观形貌

Fig. 2 Appearance of DRI from the samples

原时间约30 min、增加还原气体流量5 000 Nm³/h等措施,还原效果得到改善,金属化率分别达到了82.08%、73.81%,但与预期仍有差距。

通过试样投笼试验,得出以下结论:①虽调整了竖炉还原制度的部分工艺参数,DRI的金属化率有所提高,但未能达到预期,主要原因是钒钛球团矿的还原性较差;②DRI外观形貌差、粉化严重、完整性较低,主要原因是低温还原粉化性和还原膨胀性差,球团在还原过程中会产生粉末,不能满足气基竖炉生产要求;③根据钒钛球团矿冶金性能及竖炉还原制度的调整效果,在实际生产中气基竖炉的还原制度应做出调整。

3 气基竖炉直接还原钒钛球团矿改善措施

3.1 改善钒钛球团矿的低温还原粉化和还原膨胀性能

气基竖炉要求球团矿抗压强度不低于2 000 N/P。在钒钛球团矿工业化制备过程中,强化润磨,提高膨润土质量,控制合理的生球粒级,适当延长预热和焙烧等工艺环节的控制,能提高球团抗压强度^[17]。投笼试验结果表明,球团矿的低温还原粉化、还原膨胀现象非常严重,如进行工业化生产,将会造成气基竖炉崩料、塌料等异常情况,使得排料困难,甚至堵塞旋转排料阀,导致竖炉无法正常生产。因此,应改善球团的低温还原粉化、还原膨胀性能,最大限度降低其对

气基竖炉生产的影响。钒钛球团矿的还原性差,金属化率低于高品质球团矿生产的DRI;此外,应改善球团的还原性,确定合理的金属化率控制范围,降低工序能耗。

3.1.1 调整原料结构

通过优化原料结构,提升含铁量高且杂质少的优质铁精矿配比,增强球团矿的整体品质。高钛球团矿原料配比调整情况如表4所示。由表4可见,试样1为外购产品,无具体生产配比参考;相比试样2,试样3减少了1.5%的高钛矿粉与0.68%的除尘灰,同时增加了1%的高品位铁粉、0.35%的膨润土及0.42%的石灰石,有效促进了球团矿在焙烧过程中的固结反应,不仅提升了其机械强度,还改善了还原性能,从而全面提高了球团矿的质量。

3.1.2 调整链算机一回转窑生产工艺参数

焙烧作为决定球团矿最终性能的核心工序,其温度优化至关重要。通过精准调控焙烧温度,可有效促进球团矿内部的固相反应,从而显著提升其机械强度与还原性能。通过将预热段温度适度下调约35℃,并延长预热时间约3 min,同时将回转窑的窑内温度降低约17℃,确保球团矿在焙烧过程中受热更为均匀,为其优质性能提供有力保障。

此外,控制冷却速度,避免因快速冷却引发球团内部应力产生。通过将环冷机1[#]风机功率从30 Hz降低至27 Hz,并调节3[#]风机风门开度从

表 4 高钛球团矿原料配比调整情况(质量分数)

Fig. 4 Adjustment of raw material ratio of high titanium pellets

%

项目	高钛矿粉	高品铁矿粉	除尘灰	膨润土	石灰石	水	<0.074 mm 粒级占比
试样 1	—	—	—	—	—	—	—
试样 2	96.70	0	2.18	1.12	0	7.8	52
试样 3	95.20	1.00	1.50	1.47	0.42	7.8	56
张宣科技	69.42	0.28	0.28	0.51	0	7.5	90

100% 降至 70%，减缓球团矿的冷却速率，实现均匀且缓慢的冷却效果。这一优化措施不仅有效避免了球团内部应力的产生，还进一步保障了球团矿的微观结构稳定与宏观性能优良，为高品质球团矿的生产提供了坚实的技术支撑。

3.2 调整气基竖炉还原制度

鉴于钒钛球团矿的特殊性，应调整气基竖炉的还原制度：① 提高竖炉进口温度至 1 050 ~ 1 100 °C，重整后还原气体温度提高至 1 000 ~ 1 050 °C，改善还原反应的热力学条件，充分发挥高温下 H₂ 还原效率高、传热传质效果好的优点，提高产量、金属化率。② 调整还原气氛，提高 H₂ 含量，降低 CO 含量。将还原气体中 H₂O 体积分数由 4.5% 提高至 6.5%~8.0%，利用 H₂O 和 CH₄ 生成更多的 H₂，将 H₂ 体积分数提高至 70% 以上，发挥高温快速还原的作用。控制还原气体中 CO₂ 含量不变，通过提高 H₂O 含量，使得重整后还原气体中 CO 含量相对降低，有利于缓解球团的还原粉化和膨胀，改善 DRI 外观形貌，提高完整性。③ 提高排料速率。因钒钛球团矿的低温还原粉化性能差，通过提高排料速率，缩短球团在低温区的停留时间，减缓低温还原粉化的影响。④ 降低还原气体流量。钒钛球团矿的全铁品位低，还原气体的消耗量较少。实际生产中应降低还原气体流量，降低工序能耗。

通过改善钒钛球团矿的冶金性能，使其作为气基竖炉直接还原工艺的原料，生产含钒钛的 DRI。还原制度调整后，DRI 的金属化率可超过 90%。将 DRI 作为电炉的原料，采取电炉熔分提钛—转炉提钒工艺，有利于渣铁分离，提高铁、钛、钒的回收率。

4 结语

(1) 通过配加高品位磁铁矿，增加石灰石、

膨润土的配比，优化回转窑的热工参数，提高了钒钛球团矿的强度，改善了还原性能，使生产的钒钛球团矿满足气基竖炉生产要求。

(2) 提高气基竖炉进口温度，改善了还原过程的热力学条件；提高还原气体中的 H₂O 体积分数，改善了还原气氛，提高了 H₂ 含量，提高了 DRI 金属化率，增加了 DRI 完整性，使粉末减少。

(3) 通过实验室研究和投笼试验，采用优化球团矿的冶金性能和调整竖炉的工艺参数相结合的方式，实现了钒钛球团矿气基竖炉冶炼，为气基竖炉多元合金工业化生产奠定了基础。

参考文献:

- [1] 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[J].中国冶金,2024,34(2):1-8;51.
WANG Xinyu,ZHAO Haiquan,QI Yuanhong, et al. Research and development for direct reduction of vanadium-bearing titanomagnetite [J]. China Metallurgy, 2024, 34(2): 1-8; 51.
- [2] 吴世超,孙体昌,李小辉,等.钒钛磁铁矿直接还原技术研究进展[J].中国有色冶金,2018,47(4):26-30.
WU Shichao,SUN Tichang,LI Xiaohui, et al. Progress in research of direct reduction of vanadium-titanium magnetite [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(4): 26-30.
- [3] 杨绍利.钒钛磁铁矿综合利用技术手册[M].北京:冶金工业出版社,2021.
YANG Shaoli. Technical manual of comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2021.
- [4] 储满生,唐珏,柳政根,等.高铬型钒钛磁铁矿综合利用现状及进展[J].钢铁研究学报,2017,29(5):335-344.
CHU Mansheng,TANG Jue,LIU Zhenggen, et al. Present situation and progress of comprehensive utilization for high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite [J].

- Journal of Iron and Steel Research 2017 29(5):335-344.
- [5] 梁之凯,黄柱成,易凌云. 焦炉煤气竖炉法生产 DRI 的煤气用量及利用率[J]. 中国冶金, 2017, 27(11): 18-23.
LIANG Zhikai, HUANG Zhucheng, YI Lingyun. Coke oven gas consumption and its utilization ratio for DRI production in shaft furnace[J]. China Metallurgy 2017, 27(11):18-23.
- [6] 赵钰琼. 焦炉煤气制氢及甲烷系统中 CO 变换催化剂性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学 2010.
ZHAO Yuqiong. The properties of CO shift catalyst in hydrogen and methane generation system from coke oven gas[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [7] 欧杨,孙永升,余建文,等. 钒钛磁铁矿加工利用研究现状及发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(4): 267-278.
OU Yang, SUN Yongsheng, YU Jianwen, et al. Research status and development prospect of utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. Journal of Iron and Steel Research 2021 33(4):267-278.
- [8] 蒙飞宇,黄帮福. 钒钛磁铁矿氧化球团固结性能强化研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(5): 49-53.
MENG Feiyu, HUANG Bangfu. Research on strengthening consolidation performance of oxidized pellets of vanadium titanium magnetite[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5):49-53.
- [9] 胡鹏,蒋胜,谭阳杰,等. 提高全钒钛球团矿抗压强度技术研究与应用[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(4): 107-113.
HU Peng, JIANG Sheng, TAN Yangjie, et al. Research and application of improving the compressive strength of full V-Ti pellets[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022 43(4):107-113.
- [10] 郭学益,陈远林,田庆华,等. 氢冶金理论与方法研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1891-1906.
GUO Xueyi, CHEN Yuanlin, TIAN Qinghua, et al. Research progress on hydrogen metallurgy theory and method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021 31(7):1891-1906.
- [11] 杨柳,隋裕雷. 钒钛磁铁矿球团气基还原粉化和膨胀实验研究[J]. 广东化工, 2020, 47(6): 17-19.
YANG Liu, SUI Yulei. Experimental study on gas-based reduction pulverization and swelling of vanadium titanium-magnetite pellets[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020 47(6):17-19.
- [12] 潘建,朱德庆,韩基祥,等. 磁铁矿氧化球团富氢气基直接还原的特性研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 48-57.
PAN Jian, ZHU Deqing, HAN Jixiang, et al. Study on hydrogen-rich gas-based direct reduction of oxide pellets made by magnetite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing 2022 47(1):48-57.
- [13] 师学峰,徐红军,张颖异,等. 钒钛磁铁矿气基竖炉直接还原试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(1): 52-56.
SHI Xuefeng, XU Hongjun, ZHANG Yingyi, et al. The experimental study on direct reduction of shaft furnace based gas of vanadium titanium magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2015 36(1):52-56.
- [14] 王兆才,陈双印,储满生,等. 含钒钛铁精矿氧化球团气基竖炉直接还原模拟试验[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(2): 34-39.
WANG Zhaocai, CHEN Shuangyin, CHU Mansheng, et al. Simulation experiment on direct reduction of oxidized pellets of vanadium and titanium-bearing iron concentrates by gas-based shaft furnace[J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2012 33(2):34-39.
- [15] 闫方兴,章启夫,曹朝真,等. 气基竖炉用含钒钛海滨砂矿球团直接还原试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4): 7-11.
YAN Fangxing, ZHANG Qifu, CAO Chaozhen, et al. Experimental study on direct reduction of vanadium and titanium-bearing sea sand ore pellets in gas-based shaft furnace[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(4):7-11.
- [16] 白明华,符远翔. 球团矿恒温 and 升温直接还原膨胀行为试验[J]. 钢铁, 2015, 50(6): 35-39; 50.
BAI Minghua, FU Yuanxiang. Swelling behavior of iron ore pellets for direct reduction in isothermal and temperature-rising conditions [J]. Iron & Steel, 2015, 50(6):35-39;50.
- [17] 韩涛. 提升宣钢球团矿还原性的研究与实践[J]. 烧结球团, 2019, 44(4): 45-50; 78.
HAN Tao. Research and practice of improving Xuansteel pellet reducibility [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4):45-50;78.