

配加含钛原料对球团性能的影响

周仙霖, 陈仡煌, 罗艳红, 郑子康, 胡 钺, 蒋佳颖, 张 露

(武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院; b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室,
湖北 武汉 430081)

摘要: HIs melt 还原熔炼工艺以其短流程、原料兼容性好及产品质量高而受到关注。由于其较高的二次燃烧率, 炉渣中的 FeO 含量提高, 这可能导致炉膛内侵蚀加剧。因此, HIs melt 还原熔炼可借鉴高炉使用含钛原料进行护炉操作。生产含钛球团的主要原料来源包括钒钛磁铁矿、钛铁矿和海砂矿, 这些原料大多颗粒粗大, 比表面积小, 亲水性差。为了生产高质量的含钛球团, 本研究采用钒钛磁铁矿和海砂矿作为含钛材料进行了球团化试验, 并观察了不同含钛原料及其不同添加比例对生球、预热球和成品球质量的影响。结果显示, 常规球团所需的预热温度为 1 000 °C, 含钛球团所需的预热温度较低, 为 950 °C, 而焙烧温度与常规球团相同。添加 20% 的钒钛磁铁矿或 20% 的海砂矿, 可以生产出低钛球团, 两种含钛球团矿的还原度相对较低, 还原膨胀指数均低于 15%, 其物理、冶金性能与化学成分均符合工业生产的要求。

关键词: 含钛球团; HIs melt 工艺; 护炉操作; 钒钛磁铁矿; 海砂矿

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0069-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.009

Effect of adding titanium-bearing raw materials on pellet properties

ZHOU Xianlin, CHEN Yihuang, LUO Yanhong, ZHENG Zikang, HU Yue,
JIANG Jiaying, ZHANG Lu

(Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering;
b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic
Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: The HIs melt reductive melting process has attracted attention because of its short process, good raw material compatibility and high product quality. Due to its high secondary combustion rate, the increase of FeO content in the slag can lead to increased more erosion in the furnace. Therefore, HIs melt reduction melting can be used referring to blast furnace to use titanium-bearing raw materials for furnace protection operation. The main sources of raw materials for the production of titanium-containing pellets include vanadium titanomagnetite, ilmenite and marine placer, most of which are coarse, small in specific surface area and poor in hydrophilicity. In order to produce high-quality titanium-bearing pellets, vanadium titanomagnetite and marine placer are used as titanium-bearing materials for pelletization experiments, and the effects of different titanium-bearing raw materials and their different addition ratios on the quality of fresh pellets, preheated pellets and finished pellets are observed. The results show that the preheating temperature required for conventional pellets is 1 000 °C, and the preheating temperature required for titanium-bearing pellets is lower at 950 °C, while the roasting temperature is the same as that for conventional pellets. Adding 20% vanadium titanomagnetite or 20% marine placer can produce low titanium pellets, the reduction degree of the two titanium-bearing pellets is relatively low, the reduction expansion index is less than 15% and its physical properties, metallurgical properties and chemical composition reach the

收稿日期: 2024-02-25; 修回日期: 2024-04-01

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划指导项目(B2022014)

作者简介: 周仙霖(1986—), 男, 副教授, 从事铁矿低碳造块新技术和冶金固废高效资源化利用等研究。

requirements of industrial production.

Key words: titanium-bearing pellets; HIs melt process; furnace protection operation; vanadium titanomagnetite; marine placer

目前,钢铁工业的碳排放约占全国总碳排放的 15%,而钢铁行业的碳排放中,以高炉为主的长流程占据了 80%。为响应国家提出的“碳达峰”和“碳中和”的目标^[1],节能减排的非高炉炼铁技术得到了迅速发展。其中,熔融还原作为一种典型的非高炉炼铁工艺,是发展的重要方向之一^[2]。

HIs melt 工艺是已取得初步成功的非高炉熔融还原技术之一,其原料来源广泛,可使用粒度较细的粉矿、粉煤,为了实现较高的热利用效率,HIs melt 工艺采用了相对较高的二次燃烧率(约 50%~60%)来促进热量向下传递^[3-4]。这一过程的特点导致炉渣中 FeO 含量较高,引起高炉内衬的严重侵蚀^[5],内衬遭到严重侵蚀的情况下,很可能产生剥落甚至垮塌,产生严重的安全隐患^[6]。因此,有必要添加含钛原料以进行炉腔保护。高炉的使用寿命在很大程度上取决于耐火材料的侵蚀状况^[7-9],添加含钛原料后,由于高炉内的高温环境和还原气氛,能够形成一层保护层,这层保护层对耐火材料有很强的附着力,从而附着在炉腔内耐火材料的表面并延长高炉的使用寿命^[10]。无论是国内还是国际上的高炉生产实践都证明了使用含钛原料进行护炉操作在延长高炉寿命和提高生产效率方面的重要作用。

将含钛原料引入高炉的方法有:①直接添加高钛块矿;②添加少量钛矿石,通过烧结生产含钛烧结矿^[11-12];③在球团生产过程中添加含钛原料,生产含钛球团^[13-15]。一般含钛球团矿中 TiO₂ 的质量分数不超过 13%,含钛球团铁品位高,熔炼时产生的炉渣少,与使用高钛块矿相比,它们能实现更好的护炉效果。因此,在各种含钛

原料中,含钛球团是最广泛用于高炉护炉操作的^[16-18],如宝钢、安钢和太原钢铁等公司都将添加含钛球团作为护炉的手段。

生产含钛球团的钛主要来源包括钒钛磁铁矿^[19]、钛铁矿^[20-21]、海砂矿^[15]等。其中攀钢利用钒钛球团制备出质量稳定的钒钛球团矿^[22],但其目的不是为了护炉,而是用于综合利用钒钛磁铁矿中的有价元素。利用钛铁矿制备氧化球团也是为了回收钛铁矿中的钛资源,而添加海砂矿生产球团则更多的是为了降低球团的生产成本。

因此,为了能够制备出供 HIs melt 工艺长期使用并护炉的含钛球团,本文开展了以钒钛磁铁矿和海砂矿作为含钛原料进行球团制备试验,研究了两种含钛原料及其配比对球团质量的影响,并确定了相应的制备参数,以实现高质量含钛焙烧球的生产并扩大球团产品的种类。

1 原料性能与试验方法

1.1 原料性能

试验使用的主要原料分别为某球团厂提供的混合铁精矿、钒钛磁铁矿、海砂矿和两种膨润土,其中钒钛磁铁矿和海砂矿为本次钒钛球团试验的主要含钛原料,两种膨润土分别为印度膨润土和国内膨润土。含钛原料及铁精矿的主要化学成分与物理性能分别如表 1、2 所示。

由表 1、2 可知:钒钛磁铁矿铁品位为 55.69%,TiO₂ 质量分数为 6.96%,粒度较细,比表面积为 2 261 cm²/g,成球性指数为 0.22,属弱成球性;海砂矿铁品位较高,为 57.52%,TiO₂ 质量分数为 7.13%,粒度较粗,比表面积为

表 1 含钛原料和铁精矿主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and losses on ignition of titanium-containing materials and iron concentrate %

原料	TFe	FeO	TiO ₂	V	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	P	S	烧损
钒钛磁铁矿	55.69	26.52	6.960	0.190	5.65	4.29	0.57	0.88	0.096	0.025	-2.29
海砂矿	57.52	28.32	7.130	—	3.71	1.28	3.44	3.12	0.134	0.050	-2.27
铁精矿	64.47	14.05	0.900	0.025	3.96	0.66	0.66	0.27	0.042	0.270	0

表 2 含钛原料和铁精矿物理性能

Table 2 Physical properties of titanium-containing materials and iron concentrate ore

原料	粒度组成(质量分数) / %				比表面积 / ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	成球性指数
	>0.125 mm	[0.125 0.074) mm	[0.074 0.043] mm	<0.043 mm		
钒钛磁铁矿	10.05	14.79	18.18	56.98	2 261	0.27
海砂矿	82.43	17.53	0.04	0	234	0.35
铁精矿	19.86	12.54	15.90	51.70	1 223	0.47

234 cm^2/g , 成球性指数为 0.35, 属中等成球性; 铁精矿铁品位较高, 为 64.47%, 粒度较细, 比表面积为 1 223 cm^2/g , 成球性指数为 0.47, 属中等成球性。

国内膨润土和印度膨润土的化学成分和相关物理性能分别如表 3、4 所示, 试样使用两种膨润土样品按 1:1 混合后的混合膨润土。

印度膨润土的硅质量分数为 47.01%, 而国内膨润土的硅质量分数为 60.77%, 此外印度膨润土铁品位达到了 11.98%。从物理性能来看, 国内膨润土 <0.074 mm 粒度占比仅为 90.25%, 吸水率为 250%, 膨胀容为 14.0 mL/g , 吸蓝量为 31.09 $\text{g}/(100 \text{ g})$; 印度膨润土 <0.074 mm 粒度达 100%, 吸水率为 320%, 膨胀容为 63.0 mL/g , 吸蓝量为 36.09 $\text{g}/(100 \text{ g})$ 。

1.2 试验方法

本文所用原料先经过高压辊磨增加原料的比表面积, 提高原料成球性。然后, 对造球所用原料进行人工配料, 每次配料以 5 kg 含铁原料为基准, 膨润土和含钛原料均为外配, 膨润土取 1.5% 作为球团黏结剂, 含钛原料添加质量分数为 5%~20%, 混匀后, 再进行造球。

生球的制备在圆盘造球机上进行, 圆盘参数: 直径为 800 mm, 转速为 20 r/min , 倾角为 47° 。造球过程分为 3 个阶段: 母球形成阶段时间为 4 min, 生球长大阶段时间为 12 min, 生球密实阶段时间为 2 min, 总计造球时间为 18 min。然后将生球取样并测定其抗压强度、落下强度、爆裂温度和生球水分, 其余生球进行干燥以供后续的预热、焙烧试验用。

2 试验结果与分析

2.1 不同含钛原料及其配比对生球性能的影响

不同含钛原料及其配比对生球落下强度、抗压强度及爆裂温度的影响分别如图 1~3 所示。

由图 1 可知, 基准球团的落下强度为 4.7 次/(0.5 m)。添加了钒钛磁铁矿的生球落下强度整体高于添加了海砂矿的生球落下强度。随着钒钛磁铁矿的添加量由 5%~20%, 生球的落下强度从 4.7 次/(0.5 m) 增加到 7.1 次/(0.5 m); 而添加了海砂矿的生球落下强度则为先下降后增加, 在其配加质量分数达到 20% 时生球落下强度才达到 4.0 次/(0.5 m) 以上。

由图 2 可知, 总体上三种生球的抗压强度均

表 3 膨润土主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 3 Main chemical compositions and losses on ignition of bentonite

%

物料种类	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	P	S	烧损
国内膨润土	2.62	60.77	2.18	15.01	3.52	0.59	2.53	0.031	0.032	11.48
印度膨润土	11.98	47.01	1.52	15.00	2.02	0.12	2.31	0.082	0.051	13.76

表 4 膨润土的物理性能

Table 4 Physical properties of bentonite

物料种类	<0.074 mm (质量分数) / %	含水量 (质量分数) / %	吸水率 / %	膨胀容 / ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	吸蓝量 / [$\text{g} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$]
国内膨润土	90.25	10.87	250	14.0	31.09
印度膨润土	100.00	13.80	320	63.0	36.09

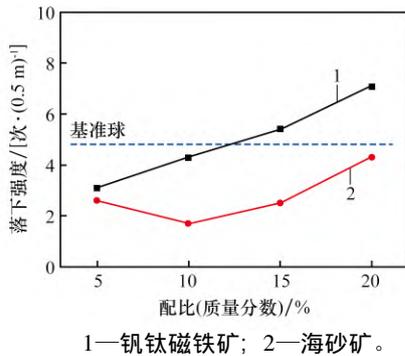


图 1 不同含钛原料及其对比对生球落下强度的影响

Fig. 1 Influence of different types of titanium-containing materials and ratios on the drop strength of green pellets

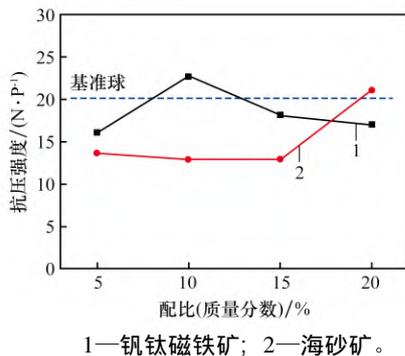


图 2 不同含钛原料及其对比对生球抗压强度的影响

Fig. 2 Influence of different types of titanium-containing materials and ratios on the compressive strength of green pellets

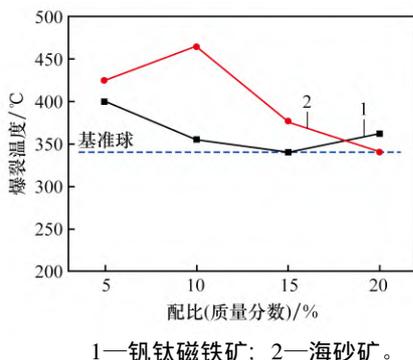


图 3 不同含钛原料及其对比对生球爆裂温度的影响

Fig. 3 Influence of different types of titanium-containing materials and ratios on the burst temperature of green pellets

高于 10 N/P, 满足生产要求。添加钒钛磁铁矿的生球抗压强度呈现先增大后减小的趋势, 而添加钒钛磁铁矿的生球抗压强度则呈现先减小后增大的趋势。钒钛磁铁矿和铁精矿的粒度较细, 而海

砂矿的粒度较粗, 比表面积也最低, 在生球制备过程中, 原料的粒度并非越细越好, 根据生球内颗粒最紧密堆积规律, 即大颗粒中嵌入中颗粒、细颗粒, 这种情况下的原料颗粒排列更加紧密, 生球强度增大; 另一方面, 粗粒级的海砂矿可起到球核和骨架的作用, 促进母球的生成和强度的提高^[15]。

由图 3 可知, 生球的爆裂温度呈现出与落下强度相反的规律, 整体上落下强度越高, 生球爆裂温度越低。配加含钛原料后生球爆裂温度略高于基准球, 但总体上所有生球的爆裂温度略低, 生产过程应控制干燥段的温度, 以防止生球爆裂。

2.2 不同含钛原料及其对比对预热球性能的影响

试验选取直径为 10 ~ 12.5 mm 的生球, 在 120 °C 的干燥箱中干燥 2 h。随后, 干燥球被送入高温管式炉中进行预热和焙烧, 并针对每种含钛球团的预热条件进行优化。钒钛磁铁矿球团的预热温度为 950 °C, 时间为 15 min; 海砂矿球团的预热温度为 950 °C, 时间为 10 min。预热球强度如图 4 所示。由图 4 分析可知, 随着钒钛磁铁矿添加质量分数从 10% 增加到 20%, 预热球强度显示先下降然后上升。随着海砂矿配加质量分数的增加, 预热球强度显示出上升趋势。

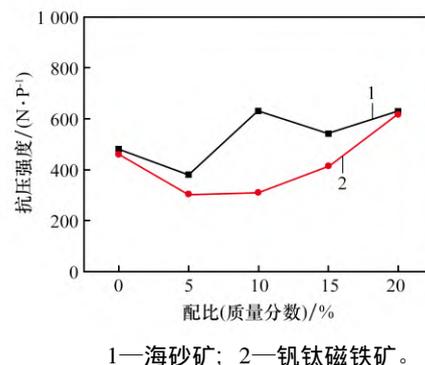


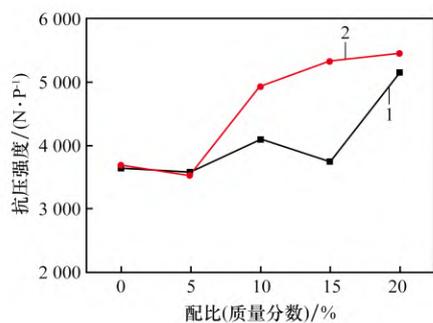
图 4 不同含钛原料及其对比对预热球强度的影响

Fig. 4 Variations in preheated pellet strength with different titanium-containing materials and ratios

2.3 不同含钛原料及其对比对焙烧球性能的影响

对于添加了 20% 海砂矿或 20% 钒钛磁铁矿的球团, 经试验测试其各自的最佳焙烧条件: 焙烧温度为 1 250 °C、焙烧时间为 15 min。在最佳焙烧条件下对比不同含钛原料对比对焙烧球强度的影响, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 随着含钛原

料配比的增加, 焙烧球团的抗压强度呈提高趋势; 对比两种含钛原料, 添加钒钛磁铁矿的焙烧球抗压强度略低于添加海砂矿的焙烧球抗压强度。



1—钒钛磁铁矿; 2—海砂矿。

图 5 不同含钛原料及其对比对焙烧球强度的影响

Fig. 5 Variations in roasted pellet strength with different titanium-containing materials and ratios

两种不同钛源焙烧球的主要化学成分如表 5 所示。由表 5 可知, 两种成品球团的 TiO_2 质量分数均在 1.50% 左右。研究表明, 高炉渣中 TiO_2 质量分数控制在 1.5%~3.0% 范围内, 能够有效护炉, 减轻含钛炉料带来的不利影响^[10]。因此, 从成分上看, 这两种含钛球团均可用于护炉。

经试验, 基准球团与含钛球团的预热焙烧制度如表 6 所示。由表 6 可知, 含钛球团预热温度较基准球团低 50 °C, 而焙烧温度保持与常规球团相同, 均为 1 250 °C。

含钛原料焙烧球团的冶金性能如表 7 所示。由表 7 可知, 常规球团具有良好的还原性, 还原度达到 80.04%。添加 20% 的钒钛磁铁矿或 20% 的海砂矿导致还原度分别降低到 60.84% 和 55.56%。这主要是因为两种类型的焙烧球团具有较为致密的结构, 具有高抗压强度和低孔隙率。两种含钛球团的还原膨胀指数均低于 15%, 满足生产要求。

2.4 焙烧球的微观结构分析

在球团焙烧过程中, 球团抗压强度主要受到

其内部微观结构的影响。观察球团内部微观结构是用来明确球团内部结构变化及其抗压强度变化的方法之一^[23-24]。为了进一步研究两种含钛球团抗压强度变化的机理, 通过使用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 分析了其各自的微观结构, 结果如图 6、7 所示。

由图 6 可知, 钛元素主要分布在大颗粒晶体结构中, 铁元素则均匀分布在颗粒外的晶粒中, 少量分布在颗粒中。能谱点扫描位置检测到了 Fe、Ti、Mg、C 和 O 元素, 其原子比分别为 24.85%、19.46%、0.93%、11.75% 和 43.01%。这些 TiO_2 晶体与 Fe_2O_3 晶体相互交织, 晶体之间的间隙部分填充了一些脉石矿物, 导致小孔隙的减少, 只留下有限数量的较大直径的孔隙。这种结构使添加了 20% 海砂矿的焙烧球团具有更高的抗压强度。然而, 较少的孔隙可能限制气体进入球团内部, 导致还原反应活性降低。

由图 7 可知, 钛元素主要集中在颗粒晶体结构中, 在其他位置偶有分布, 铁元素则均匀分布在颗粒外的晶粒中。能谱点扫描位置检测到了 Fe、Ti、C 和 O 元素, 其原子比分别为 18.29%、15.71%、9.72% 和 56.28%。较小的 TiO_2 晶体零星分布在 Fe_2O_3 晶体内, 填充了晶体之间的间隙, 导致焙烧球团的抗压强度有一定程度的提高。但由于引入钒钛磁铁矿导致了较大空隙的出现, 且分布不均匀。在还原过程中, 虽然存在较大的孔隙, 但缺少较小的孔隙可能导致反应活性降低, 从而导致还原度下降。

2.5 还原球团微观结构分析

两种还原球团微观结构分别如图 8、9 所示。由图 8 分析可知, 经过还原之后, 球团的孔隙变大, 钛元素仍然集中在部分颗粒中, 由于海砂矿的颗粒较粗, 钛晶体的分布更加集中, 导致含钛

表 5 不同含钛原料的焙烧球主要化学成分与烧损 (质量分数)

Table 5 Main chemical compositions and losses on ignition of roasted pellets with different titanium-containing materials and ratios %

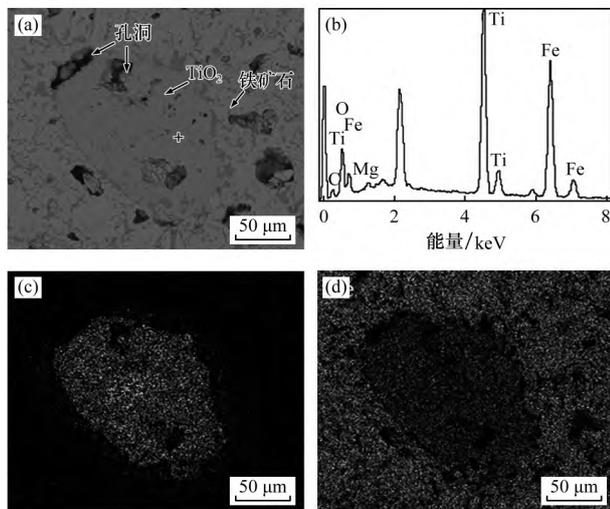
球团种类	TFe	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₅	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P	S	烧损
基准球团	63.55	0.675	0.55	0.040	4.73	1.13	1.59	1.11	0.182	0.327	0.058	0.007 9	0.120
20% 钒钛磁铁矿	62.73	0.675	1.45	0.083	4.41	1.54	1.30	1.03	0.159	0.197	0.053	0.007 4	0.030
20% 海砂矿	62.79	1.160	1.53	0.118	4.95	1.03	1.73	1.38	0.159	0.230	0.099	0.008 3	0.029

表 6 标准球团与含钛球团的预热焙烧制度
Table 6 Preheating and roasting system of standard and titanium-containing pellets

球团种类	预热温度/°C	预热时间/min	焙烧温度/°C	焙烧时间/min
基准球	1 000	10	1 250	15
20% 钒钛磁铁矿	950	15	1 250	15
20% 海砂矿	950	10	1 250	15

表 7 含钛焙烧球冶金性能
Table 7 Metallurgical performance of titanium-containing roasted pellets %

配矿方案	还原度	还原膨胀指数
基准球	80.04	11.05
20% 钒钛磁铁矿	60.84	9.09
20% 海砂矿	55.56	11.51



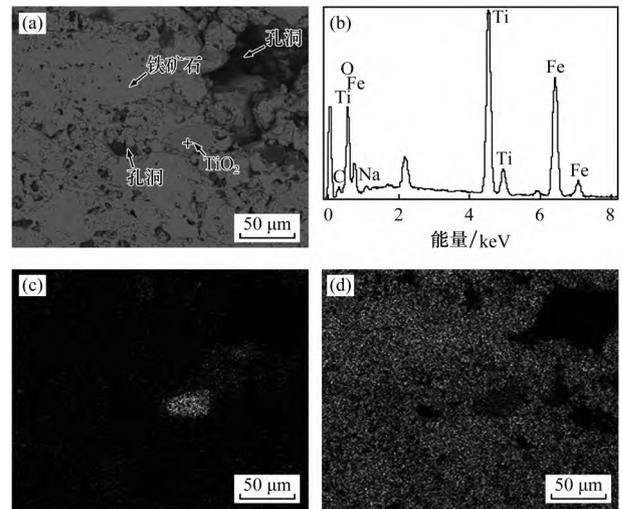
(a) 微观结构; (b) 化学成分;
(c) 钛元素分布; (d) 铁元素分布
图 6 20% 海砂矿球团的 SEM 图像

Fig. 6 SEM image of roasted pellets with 20% beach sand ore

物相周围的孔隙较大。铁元素则均匀分布在除了孔隙以外的区域，并且其他区域表现出均匀的孔隙分布。能谱点扫描位置检测到了 Fe、Ti、Al、Mg 和 O 元素，其原子比分别为 49.38%、8.77%、5.87%、5.15% 和 30.83%。靠近矿物颗粒中心的一些铁相仍然未完全还原。此外，海砂矿与铁的混合形成了一种类似交织熔蚀结构，使得该区域的铁矿物难以还原，从而显著降低了整体还原性。

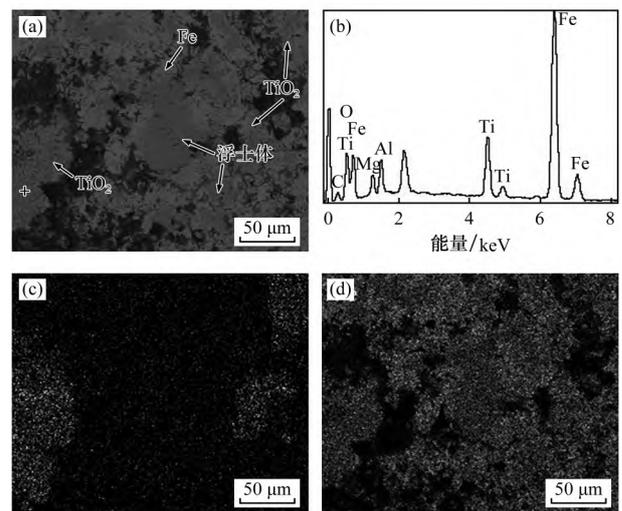
由图 9 可知，由于钒钛磁铁矿颗粒较细，球

团中钛元素分布在更小的颗粒中，铁元素仍为均匀分布在除孔隙以外的位置。能谱点扫描位置检测到了 Fe、Ti、C 和 O 元素，其原子比分别为 74.38%、0.72%、18.76%、和 6.14%。由于这些较细的钒钛磁铁矿颗粒的存在，导致了孔隙率下降，使球团内部靠近中心附近的区域无法充分接触还原气体，从而降低了球团的整体还原性。



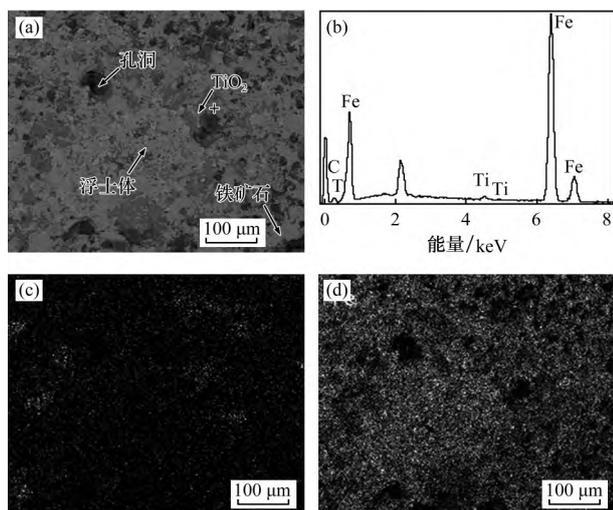
(a) 微观结构; (b) 化学成分;
(c) 钛元素分布; (d) 铁元素分布

图 7 20% 钒钛磁铁矿球团的 SEM 图像
Fig. 7 SEM image of roasted pellets with 20% vanadium-titanium magnetite



(a) 微观结构; (b) 化学成分;
(c) 钛元素分布; (d) 铁元素分布

图 8 20% 海砂矿还原球团的 SEM 图像
Fig. 8 SEM image of reduced pellets with 20% beach sand ore



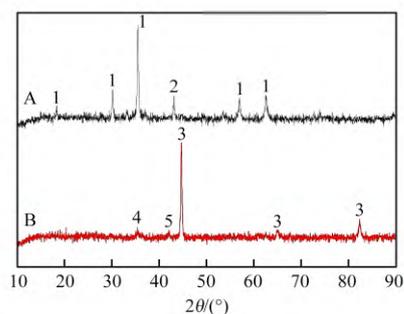
(a) 微观结构; (b) 化学成分;
(c) 钛元素分布; (d) 铁元素分布

图 9 20% 钒钛磁铁矿球团的 SEM 图像

Fig. 9 SEM image of reduced pellets with 20% vanadium-titanium magnetite

2.6 焙烧球和还原球的 XRD 分析

图 10 和图 11 分别为添加 20% 海砂矿和 20% 钒钛磁铁矿的球团焙烧和还原后的 XRD 图谱。由图 10 和图 11 可以明显看出, 焙烧球团的主要成分为磁铁矿和钛铁氧化物的混合物。经过还原过程后, 大部分的铁氧化物已被还原为金属铁。然而, 两种类型的含钛球团仍然含有一些未还原的 FeO, 这与两种球团类型还原不完全的结论一致。此外, 球团中的钛氧化物还原形成了少量的钛氧化物。

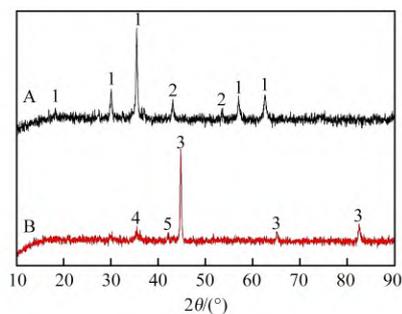


A—还原前; B—还原后

1—磁铁矿; 2—钛铁矿; 3—单质铁; 4—氧化亚铁;
5—氧化钛。

图 10 20% 海砂矿焙烧球和还原球的 XRD 图谱

Fig. 10 XRD patterns of roasted pellets and reduced pellets with 20% beach sand ore



A—还原前; B—还原后

1—磁铁矿; 2—钛铁矿; 3—单质铁; 4—氧化亚铁;
5—氧化钛。

图 11 20% 钒钛磁铁矿焙烧球和还原球的 XRD 图谱

Fig. 11 XRD patterns of roasted pellets and reduced pellets with 20% vanadium-titanium magnetite

3 结论

(1) 加入两种含钛原料后生球的性能有所提升, 预热温度降低 50 °C, 焙烧温度与常规球团一致; 比表面积较大的钒钛磁铁矿颗粒填充了铁精矿间的孔隙, 较大粒度的海砂矿颗粒起到了骨架作用, 经焙烧后与铁精矿紧密结合, 添加两种含钛原料都能够提高焙烧球的强度。

(2) 含钛球团的还原度低于常规球团, 钒钛磁铁矿填充了部分孔隙导致还原气体更难渗透进入球团内部, 降低了其还原反应速率; 而海砂矿球团内部形成了交织熔蚀结构, 影响了其还原性。

(3) 添加 20% 的钒钛磁铁矿和 20% 的海砂矿时, 球团中的 TiO₂ 质量分数约为 1.50%, 可以用于护炉; 其中添加 20% 钒钛磁铁矿的球团展现出相对高的还原性, 建议使用钒钛磁铁矿作为生产 Hismelt 工艺中含钛护炉球团的原料。

参考文献:

- [1] 刘然 张智峰 刘小杰 等. 低碳绿色炼铁技术发展动态及展望[J]. 钢铁 2022 57(5): 1-10.
LIU Ran, ZHANG Zhifeng, LIU Xiaojie, et al. Development trend and prospect of low-carbon green ironmaking technology [J]. Iron & Steel, 2022, 57(5): 1-10.
- [2] 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 Shaobing, XU Haifa. Development of smelting

- reduction iron making technology and future thinking [J]. *China Metallurgy* 2016 26(10):33-39.
- [3] 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 Ziwei, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process [J]. *Hebei Metallurgy*, 2019 (6):1-7.
- [4] 武龙飞, 杨广庆, 马保良. Hismelt 熔融还原工艺的发展历程及改进方向[J]. *河北冶金* 2021(9):8-10.
WU Longfei, YANG Guangqing, MA Baoliang. Development history and improvement direction of Hismelt smelting reduction process [J]. *Hebei Metallurgy*, 2021 (9):8-10.
- [5] 李林. Hismelt 炼铁工艺的基础研究[D]. 北京科技大学 2020.
LI Lin. Basic research on Hismelt ironmaking process [D]. University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [6] 闫光石, 刘然, 兰臣臣, 等. Hismelt 熔融还原工艺的发展及展望[J]. *河北冶金* 2023(8):7-12.
YAN Guangshi, LIU Ran, LAN Chenchen, et al. Development and prospect of Hismelt melt reduction process [J]. *Hebei Metallurgy* 2023(8):7-12.
- [7] 杨军昌, 刘海峰, 王继萍. 高钛球团在首钢长钢 8 号高炉的应用[J]. *山西冶金* 2021 44(2):144-147.
YANG Junchang, LIU Haifeng, WANG Jiping. Application of high titanium pellet in No. 8 blast furnace of Shougang Changgang Group [J]. *Shanxi Metallurgy* 2021 44(2):144-147.
- [8] 田筠清, 青格勒, 季斌, 等. 应用钛砂生产含钛球团矿的试验研究[J]. *烧结球团* 2014 39(6):31-35.
TIAN Yunqing, QING Gele, JI Bin, et al. Experimental research on production of Ti-bearing pellets with titanium sand [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2014, 39(6):31-35.
- [9] 牛群. 长寿高炉炉缸炉底影响因素研究[D]. 北京: 北京科技大学 2020.
NIU Qun. Study on the influencing factors of blast furnace hearth bottom longevity [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing 2020.
- [10] 牛群, 邹忠平, 赵运建, 等. 高炉钛矿护炉存在问题及讨论[J]. *钢铁研究学报* 2023 35(7):851-860.
NIU Qun, ZOU Zhongping, ZHAO Yunjian, et al. Problems and discussion on blast furnace protection with titanium-bearing material [J]. *Journal of Iron and Steel Research* 2023 35(7):851-860.
- [11] 饶家庭, 林文康, 刘文彬, 等. 钒钛磁铁精矿复合烧结技术试验研究[J]. *烧结球团* 2018 43(5):24-29.
RAO Jiating, LIN Wenkang, LIU Wenbin, et al. Experimental study on composite sintering technology of vanadium titanium magnetite concentrate [J]. *Sintering and Pelletizing* 2018 43(5):24-29.
- [12] 胡鹏, 崔庆爽, 唐文博, 等. 白马钒钛精矿厚料层烧结技术研究[J]. *烧结球团* 2019 44(1):9-13.
HU Peng, CUI Qingshuang, TANG Wenbo, et al. Study on the thick layer sintering technology of Baima V-Ti concentrate [J]. *Sintering and Pelletizing* 2019 44(1):9-13.
- [13] 钱立新, 陶家杰, 范春龙, 等. 废钛基催化剂与钒钛磁铁矿制备含钛球团性能对比[J]. *工程科学学报*, 2023 45(10):1740-1749.
QIAN Lixin, TAO Jiajie, FAN Chunlong, et al. Analysis of the titanium-bearing pellets prepared by a waste titanium-based catalyst and vanadium titanomagnetite [J]. *Chinese Journal of Engineering* 2023 45(10):1740-1749.
- [14] 代梦博, 孙彩虹, 孟庆民, 等. 冷固结钛精矿高炉护炉球团制备研究[J]. *烧结球团* 2020 45(4):41-46.
DAI Mengbo, SUN Caihong, MENG Qingmin, et al. Study on preparation of the pellets for blast furnace lining protection made from cold-bonded titanium concentrate [J]. *Sintering and Pelletizing* 2020 45(4):41-46.
- [15] 邢振兴. 海砂矿制备氧化球团的基础试验研究[D]. 沈阳: 东北大学 2019.
XING Zhenxing. Basic experimental research on preparation of oxidized pellets with sea sand mine [D]. Shenyang: Northeastern University 2019.
- [16] 孙健, 柳政根, 储满生, 等. 高炉加钛护炉用含钛炉料优选[J]. *材料与冶金学报* 2018 17(2):81-86.
SUN Jian, LIU Zhenggen, CHU Mansheng, et al. Optimization of titanium-bearing burdens for the protection of blast furnace [J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2018 17(2):81-86.
- [17] 李胜杰, 龙防, 程广田. 含钛球团矿护炉在安钢 7 号高炉的应用与研究[J]. *中国冶金* 2015 25(5):43-46.
LI Shengjie, LONG Fang, CHENG Guangtian. Practice and study of the furnace maintenance of titanium-bearing

- pellets in No.7 BF of Anyang Steel[J]. China Metallurgy 2015 25(5):43-46.
- [18] 刘东辉, 王晓哲, 张建良, 等. 高炉护炉用含钛物料应用现状及调研分析[J]. 中国冶金, 2018, 28(2): 1-5.
- LIU Donghui, WANG Xiaozhe, ZHANG Jianliang, et al. Application status and investigation of titanium-containing materials in blast furnace protection process [J]. China Metallurgy 2018 28(2): 1-5.
- [19] 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.
- [20] 吴建, 周峰. 钛铁矿制备含钛球团试验研究[J]. 矿业工程, 2024, 22(2): 41-44.
- WU Jian, ZHOU Feng. Experimental study of preparation of titanium-containing pellets from ilmenite [J]. Mining Engineering 2024 22(2): 41-44.
- [21] 廖鑫. 钛铁矿氧化球团制备及其冶炼钛渣工艺研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- LIAO Xin. Preparation of ilmenite oxide pellets and research of titanium slags melting technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology 2019.
- [22] 罗杰, 郑魁, 黄云, 等. 氧气体积分数对钒钛磁铁矿球团氧化过程的影响[J]. 烧结球团, 2024, 49(4): 49-56.
- LUO Jie, ZHENG Kui, HUANG Yun, et al. Effect of oxygen volume fraction on the oxidation process of vanadium-titanium magnetite pellets [J]. Sinter and Pelletizing 2024 49(4): 49-56.
- [23] YANG A M, ZHUAN SUN Y X. Prediction of compressive strength based on visualization of pellet microstructure data [J]. Journal of Iron and Steel Research International 2021 28(6): 651-660.
- [24] HAN Y, WANG L J, WANG W, et al. Improved SVM model for predicting pellet metallurgical properties based on textural characteristics [J]. Metals 2022 12: 1662.

(上接第 53 页)

- [20] 范晓慧, 甘敏, 李文琦, 等. 烧结混合料适宜制粒水分的预测[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(4): 373-377.
- FAN Xiaohui, GAN Min, LI Wenqi, et al. Prediction of suitable water content on the granulation of a sintering mixture [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2012 34(4): 373-377.
- [21] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- JIANG Tao. Technical manual for sintering and pelletizing production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.