

辽宁朝阳低铁高钛高钒铁精矿成球 及球团固结机制研究

郭宇峰^{1,3}, 解焱钦¹, 陈 茅^{2,3}, 王 帅^{1,3*}, 张艺曦¹, 夏鑫垚¹, 陈 凤^{1,3}

(1. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000; 3. 钒钛资源高质化利用四川省重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 辽宁朝阳地区钒钛磁铁矿资源储量超过 200 亿 t, 分选铁精矿具有高硅、高钛、高钒特征, 矿物组成复杂, 且尚无成熟球团制备工艺。开展该精矿成球及球团固结机制研究, 对该地区特色钒钛资源高效综合利用具有重要意义。通过采用正交试验与单因素试验, 研究混合料水分、造球时间、润磨和高压辊磨对生球性能的影响。结果表明, 影响生球抗压强度的因素依次为高压辊磨、润磨、造球时间和混合料水分; 影响落下强度的因素依次为高压辊磨、造球时间、混合料水分和润磨。适宜工艺参数为膨润土含量 1.2%、混合料水分 8%、造球时间 12 min; 生球经 900 °C 预热 8 min、1 100 °C 焙烧 10 min 后, 可获得抗压强度 2 641 N/球且冶金性能良好的氧化球团。

关键词: 低铁高钛高钒铁精矿; 球团矿; 生球性能; 抗压强度

中图分类号: TF046.6; TF533

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)03-0141-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.03.016

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the pelletization and agglomeration mechanisms of low-iron, high-titanium, high-vanadium iron concentrate in Chaoyang, Liaoning

GUO Yufeng^{1,3}, XIE Yanqin¹, CHEN Mao^{2,3}, WANG Shuai^{1,3*},
ZHANG Yixi¹, XIA Xinyao¹, CHEN Feng^{1,3}

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Sichuan Provincial Key Laboratory for High-Value Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The vanadium–titanium magnetite resources in the Chaoyang area of Liaoning Province (also known as Liaoxi) exceed 20 billion tonnes. The iron concentrate obtained from beneficiation is characterized by high Si, Ti, and V contents, complex mineral composition, and the absence of a mature pelletizing process. Therefore, investigating the balling behavior and pellet consolidation mechanism of this concentrate is of great significance for the efficient and comprehensive utilization of these distinctive vanadium–titanium resources. In this study, orthogonal and single-factor experiments were conducted to

收稿日期: 2025-10-30; 修回日期: 2025-12-23; 接受日期: 2026-02-09

基金项目: 钒钛联盟 2023 年度协同研发项目“低铁高钛高钒型铁精矿冶金应用基础研究”(PGWX2023028); 2025 年度中南大学研究生自主探索创新项目(2025ZZTS0473)。

作者简介: 郭宇峰, 1970 年出生, 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 教授; 研究方向: 复杂矿综合利用, E-mail: yfguo@csu.edu.cn;

*通信作者: 王帅, 1988 年出生, 男, 山西祁县人, 博士, 副教授; 研究方向: 复杂矿综合利用, E-mail: s.wang@csu.edu.cn。

examine the effects of mixture moisture, balling time, wet grinding, and high-pressure grinding rolls on green pellet properties. The results show that the factors affecting green pellet compressive strength followed the order of high-pressure grinding rolls, wet grinding, balling time, and mixture moisture, whereas those affecting drop strength followed the order of high-pressure grinding rolls, balling time, mixture moisture, and wet grinding. The suitable process parameters were determined as 1.2% bentonite, 8% mixture moisture, and 12 min balling time. After preheating at 900 °C for 8 min and roasting at 1100 °C for 10 min, oxide pellets with a compressive strength of 2641 N per pellet and favorable metallurgical properties were obtained.

Key words: low-Fe high-Ti high-V iron concentrate; pellets; green pellet properties; compressive strength

0 引言

钒钛磁铁矿是铁、钛、钒等多金属共生的战略矿产资源,我国主要分布于攀西、承德、新疆、陕西及辽宁朝阳等地^[1-2]。辽西朝阳地区新探明超大型钒钛磁铁矿储量超 200 亿 t,但其“铁低钒钛高”的独特禀赋给高效利用带来一定挑战^[3-5]。

高炉—转炉长流程仍是钒钛磁铁矿冶炼的主流工艺^[6],球团矿冶炼较烧结矿更利于高炉顺行与降碳^[7-8]。国内外已针对不同钛含量钒钛磁铁矿的成球与固结特性开展研究:低钛型($\text{TiO}_2 < 6\%$)以印尼海砂矿、俄罗斯矿为代表,固结以钛赤铁矿再结晶为主,少量液相辅助^[9-12];中钛型($\text{TiO}_2 \approx 10\%$)以储量世界第一的攀西矿为核心研究对象^[13]。钒钛磁铁矿球团的物相转变与结构演化主要发生于预热阶段,钛磁铁矿、钛铁矿氧化生成 Fe_2O_3 、 Fe_2TiO_5 及少量 $\text{Fe}_9\text{TiO}_{15}$ ^[14-16];因钛、镁与磁铁矿形成固溶体,其预热温度显著高于普通磁铁矿^[17]。焙烧阶段以赤铁矿再结晶生长为强度主要来源^[18-20],中钛矿固结时 Fe 与 Ti 反向迁移,钒以+5 价占据赤铁矿四面体位点,1 273 K 以上氧化过程由扩散控制(活化能 20.85 kJ/mol)^[20-21]。

辽西钒钛磁铁矿为高钛型典型代表($\text{TiO}_2 > 18\%$)^[22],具有“低铁($\text{TFe}=43\% \sim 46\%$)、高钛($\text{TiO}_2=18\% \sim 22\%$)、高钒($\text{V}_2\text{O}_5 > 1.5\%$)”的独特矿相特征,与攀西、承德矿差异显著。受开发时间较晚限制,其成球行为与固结机制研究较少,规模化应用尚属空白。系统阐明该类低铁高钒钛矿的球团固结规律,对其高效资源化利用具有重要理论与工程价值。

基于上述背景,笔者以辽宁朝阳地区钒钛磁铁矿精矿为原料,膨润土为粘结剂,采用正交试验与单因素试验方法,研究了原料水分、造球时间及原料预处理方式对球团性能的影响,确定了最佳造球参数。在最佳参数下制备的球团,其抗压强度与冶金性能均满足相关国家标准要求,可为辽西钒钛磁铁矿的开发利用提供指导与借鉴。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

所用钒钛磁铁矿精矿取自辽宁朝阳某矿区,以膨润土为造球粘结剂。两种原料的主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可见,该铁精矿 TFe 品位仅为 45.68%, TiO_2 和 V_2O_5 含量分别达 18.55% 和 1.61%, SiO_2 含量为 6.48%,属典型的低铁、高钛、高钒型铁精矿。铁精矿的粒度分布见表 2。从表中可知,辽西钒钛磁铁矿粒度较细,-0.075 mm(-200 目)粒级占比超过 80%,-0.045 mm(-325 目)粒级占比达 66.81%。该铁精矿的毛细水、分子水及静态成球性能指标列于表 3,其成球性指数 K 为 0.348,表明该物料属于弱成球性物料。采用 X 射线衍射(XRD)分析了铁精矿的主要物相组成,结果如图 1 所示。辽西钒钛磁铁矿的主要含铁物相为磁铁矿和钛铁矿,并含少量赤铁矿;脉石矿物以楣石类硅酸盐矿物为主。利用扫描电子显微镜(SEM)观察其微观形貌,结果如图 2 所示。精矿中钛铁矿与钛磁铁矿部分未完全解离,但与脉石矿物之间多呈清晰边界,少量呈浸染状分布;绝大部分矿物颗粒呈不规则多面体形态,断面较为光滑。

表 1 试验用铁精矿与膨润土化学成分
Table 1 Chemical compositions of iron ore concentrate and bentonite

Samples	TFe	TiO_2	V_2O_5	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	S	LOI
Iron concentrate	45.68	18.55	1.61	15.35	6.48	4.06	0.68	2.17	0.08	1.26	0.05	1.2
Bentonite	3.23				57.81	3.92	2.81	13.78	1.301	6.78		15.4

表 2 辽西钒钛磁铁矿粒度组成

Table 2 Particle size distribution of Liaoxi vanadium-titanium magnetite

Particle size/mm	w/%
+0.85	0.17
0.85 ~ 0.425	0.30
0.425 ~ 0.180	1.01
0.180 ~ 0.125	7.00
0.125 ~ 0.087	2.43
0.087 ~ 0.075	6.18
0.075 ~ 0.045	16.10
-0.045	66.81

表 3 辽西钒钛磁铁矿静态成球性指数及比表面积

Table 3 Static pelletizability index and specific surface area of Liaoxi vanadium-titanium magnetite

Maximum molecular water/%	Maximum capillary water/%	Sphericity Index (K)	Bulk density/(g·cm ⁻³)	True density/(g·cm ⁻³)	Specific surface area/(g·cm ⁻³)
4.80	18.60	0.348	1.76	4.25	558

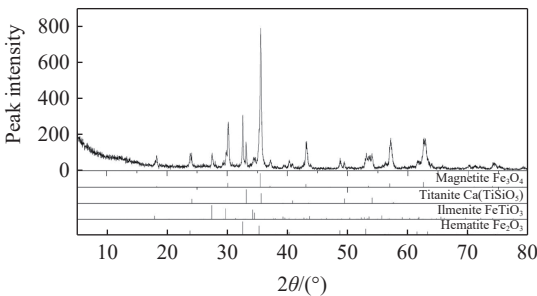
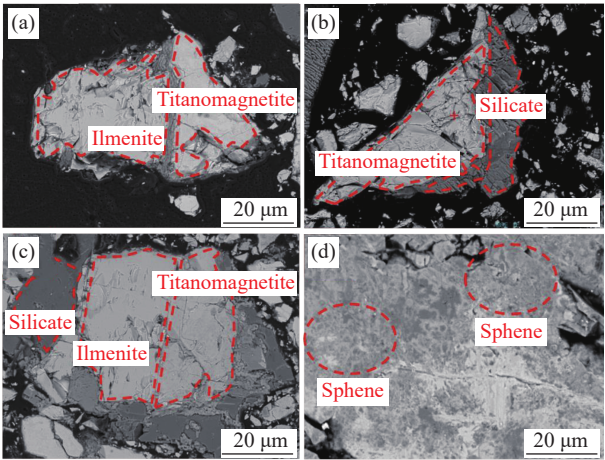


图 1 辽西钒钛磁铁矿 XRD 物相分析

Fig. 1 XRD phase analysis of Liaoxi vanadium-titanium magnetite



(a) 钛磁铁矿与钛铁矿嵌布; (b) 钛磁铁矿与硅酸盐嵌布; (c) 钛铁矿与硅酸盐嵌布; (d) 榍石嵌布状态

图 2 辽西钒钛磁铁矿颗粒形貌

Fig. 2 Particle morphology micrographs of Liaoxi vanadium-titanium magnetite

1.2 试验方法

试验以膨润土为粘结剂, 每次称取 5 kg 铁精矿, 按照试验设定的膨润土配比和混合料水分进行配料、混匀和造球。造球在圆盘造球机上进行, 其倾角为 47°, 转速为 24 r/min, 圆盘直径为 1 000 mm, 边高为 150 mm。选取粒径为 10 ~ 16 mm 的生球, 测定其抗压强度、落下强度(落下高度 0.5 m)及爆裂温度。其余合格生球置于恒温电热鼓风干燥箱中, 于 105 ℃ 下干燥 120 min。球团焙烧在直径为 5 cm 的管式电阻炉中进行, 焙烧球团的抗压强度依据 GB/T 14201-2018, 采用全自动抗压强度测定机测定。球团的还原膨胀率、还原度及低温还原粉化率分别按照 GB/T 13240-2018、GB/T 13241-2017 和 GB/T 13242-2017 的规定进行测定。

2 试验结果与讨论

2.1 膨润土比对生球性能的影响

在固定混合料水分为 8%、造球时间为 12 min 的条件下, 研究膨润土添加量对生球性能的影响, 结果如图 3 所示。辽西钒钛磁铁矿生球抗压强度和爆裂温度均较高, 但落下强度难以满足生产要求。提高膨润土用量可有效改善生球强度, 随着膨润土含量由 0.9% 增至 1.35%, 生球落下强度逐渐提高, 而抗压强度呈先升高后降低的变化趋势。当膨润土含量为 1.2% 时, 球团的落下强度提高至 3.35 次, 满足生产中对生球落下强度的一般要求(>3 次)^[23]。因此, 后续造球试验中膨润土适宜配比确定为 1.2%。

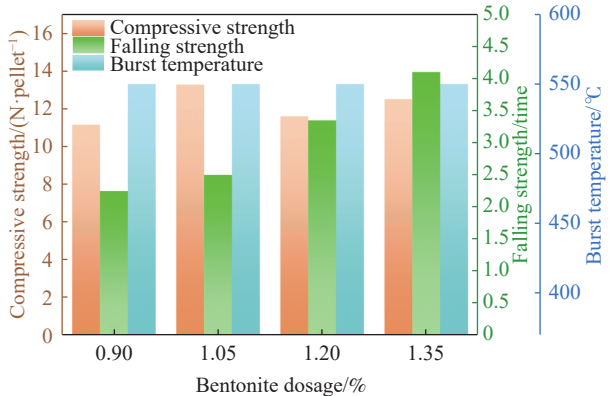


图 3 膨润土用量对生球性能的影响

Fig. 3 Influence of bentonite dosage on green pellet properties

2.2 造球正交试验及结果分析

为确定膨润土适宜添加量, 首先在混合料水分含量为 7%、造球时间为 10 min 的条件下开展单因素试验。随后固定膨润土添加量不变, 以混合料水分(因素 A)、造球时间(因素 B)、润磨时间(因素 C)

和高压辊磨次数(因素 D)为考察因素,设计 4 因素 3 水平正交试验,以优化辽西钒钛磁铁矿球团制备工艺参数。各因素及水平设置见表 4。

表 4 正交试验的因素与水平

Table 4 Factors and levels of the orthogonal experiment

Factor	A/%	B/min	C/min	D/times
Level 1	7	8	0	0
Level 2	8	10	1	1
Level 3	9	12	2	2

采用正交试验系统考察了混合料水分、造球时间、润磨时间和高压辊磨次数对辽宁朝阳钒钛磁铁精矿生球强度的影响,试验结果见表 5。由表 5 可知,兼顾生球抗压强度和落下强度的较优工艺组合为 $A_1B_3C_3D_3$ 。即在混合料水分为 7%、造球时间为 12 min、润磨时间为 2 min、高压辊磨 2 次的条件下,制备所得生球的抗压强度为 18.3 N/球,落下强度为 9.8 次。

表 5 正交试验结果

Table 5 Results of orthogonal experiment

Test serial number	Horizontal combination	A/%	B/min	C/min	D/time	Compressive strength/(N·pellet ⁻¹)	Falling strength/times
1	$A_1B_1C_1D_1$	7	8	0	0	11.3	3.0
2	$A_1B_2C_2D_2$	7	10	1	1	11.9	4.1
3	$A_1B_3C_3D_3$	7	12	2	2	18.3	9.8
4	$A_2B_1C_2D_3$	8	8	1	2	14.4	4.95
5	$A_2B_2C_3D_1$	8	10	2	0	13.3	3.45
6	$A_2B_3C_1D_2$	8	12	0	1	11.1	4.0
7	$A_3B_1C_3D_2$	9	8	2	1	14	3.8
8	$A_3B_2C_1D_3$	9	10	0	2	10.8	2.65
9	$A_3B_3C_2D_1$	9	12	1	0	13.5	4.45

采用极差分析法评价各因素对球团抗压强度的影响程度,结果见表 6。其中, $K_i(i=1, 2, 3)$ 表示某因素在第 i 个水平下对应的试验指标值之和, R 表示同一因素不同水平下 K_i 最大值与最小值之差, R 值越大,表明该因素对试验指标的影响越显著。由表 6 中 A、B、C、D 四因素的极差值 R 可以看出,球团抗压强度的影响因素由强到弱依次为: 高压辊磨次数(D)>润磨时间(C)>造球时间(B)≈混合料水分(A)。

表 6 各因素对抗压强度的影响分析

Table 6 Analysis of the influence of various factors on pellet compressive strength

Project	K_1	K_2	K_3	R
A	41.5	38.8	38.3	3.2
B	39.7	36	42.9	3.2
C	38.1	37	43.5	6.5
D	33.2	39.8	45.6	12.4

球团落下强度的极差分析结果见表 7。由表 7 四因素的极差值对比可知,辽西钒钛磁铁矿生球落下强度的影响因素由强到弱依次为: 高压辊磨次数(D)>造球时间(B)>混合料水分(A)>润磨时间(C)。

表 7 各因素对落下强度的影响分析

Table 7 Analysis of the influence of various factors on pellet drop strength

Project	K_1	K_2	K_3	R
A	16.9	12.4	10.9	6
B	11.75	10.2	18.25	6.5
C	10.9	11.9	17.4	5.5
D	9.65	13.5	17.05	7.4

2.3 造球单因素优化试验

2.3.1 造球时间对生球性能的影响

在膨润土添加量为 1.2%、混合料水分为 8% 的条件下,研究造球时间对辽西钒钛磁铁精矿生球性能的影响,结果见图 4。随着造球时间的延长,生球抗压强度总体呈升高趋势;当造球时间为 14 min 时,抗压强度达到最大值,为 13.5 N/球。生球落下强度在造球时间为 12 min 时达到最大值,为 4.2 次;继续延长造球时间后,落下强度基本在 3.5 次左右波动。

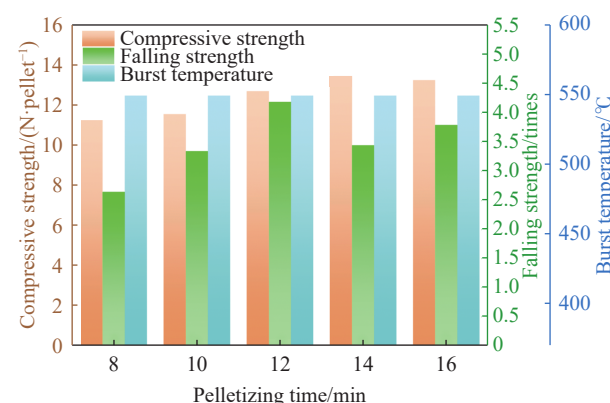


图 4 造球时间对生球性能的影响

Fig. 4 Influence of pelletizing time on green pellet properties

2.3.2 混合料水分对生球性能的影响

在膨润土添加量为 1.2%、造球时间 12 min 的条件下,研究了混合料水分对辽西钒钛磁铁精矿生球性能的影响,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,随着混合料水分的增加,生球抗压强度和落下强度均呈先升高后降低的变化趋势。当混合料水分为 8% 时,二者均达到最大值,分别为 11.6 N/球和 3.35 次;继续提高混合料水分后,生球抗压强度和落下强度均有所下降。当混合料水分超过 9% 时,造球过程中易出现“粘盘”现象。因此,

将混合料水分控制在 8% 左右有利于获得较优的生球性能。

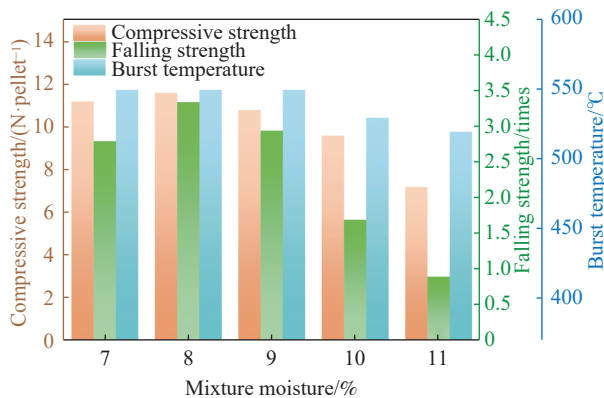


图 5 混合料水分对生球性能的影响

Fig. 5 Influence of mixture moisture content on green pellet properties

2.3.3 润磨对生球性能的影响

在膨润土添加量为 1.2%、混合料水分为 8%、造球时间为 12 min 的条件下,将膨润土、水和铁精矿充分混匀后,送入介质填充率为 12%、规格为 Ø500 mm×500 mm 的润磨机中进行润磨处理,研究润磨时间对生球性能的影响,结果如图 6 所示。随着润磨时间的延长,生球抗压强度和落下强度均逐渐提高,但爆裂温度呈下降趋势。当润磨时间为 5 min 时,生球抗压强度和落下强度分别提高至 20.1 N/球和 6.1 次,爆裂温度降至 500 °C。

2.3.4 高压辊磨对生球性能的影响

在膨润土添加量为 1.2%、混合料水分为 8%、造球时间为 12 min 的条件下,将膨润土、水和铁精矿充分混匀后,送入辊面宽度为 100 mm、辊径为 250 mm、辊压为 30 MPa 的高压辊磨机中进行辊磨处理,研究高压辊磨次数对生球性能的影响,结果如图 7 所示。与润磨处理相比,高压辊磨对生球性能的改善作用更为显著。高压辊磨 5 次后,比表面积从未处理前的 558 cm²/g 上升到 2 223 cm²/g,生球抗压强度和落下强度分别提高至 34.6 N/球和 25 次,但爆裂温度降至 400 °C。

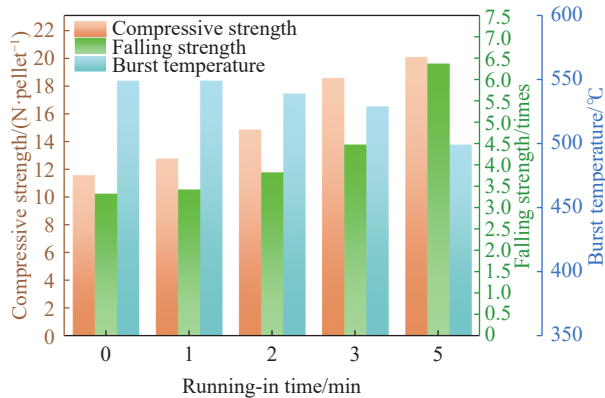


图 6 润磨时间对生球性能的影响

Fig. 6 Influence of conditioning-grinding time on green pellet properties

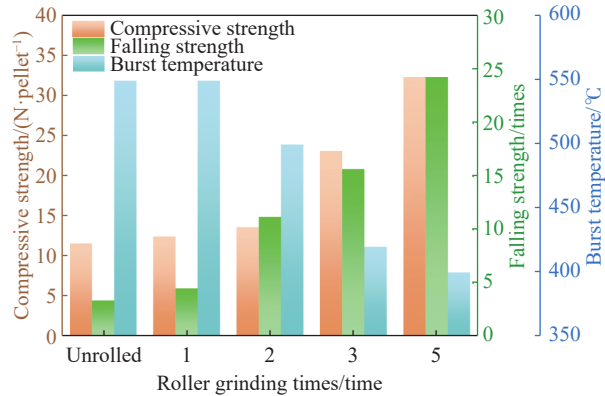


图 7 高压辊磨对生球性能的影响

Fig. 7 Influence of high-pressure roller grinding on green pellet properties

2.4 辽西钒钛磁铁精矿球团预热焙烧与冶金性能

在膨润土添加量为 1.2% 的条件下,通过优化混合料水分与造球时间,未采用高压辊磨或润磨工艺预处理,制备出满足生产要求的生球(抗压强度>10 N/球,落下强度>3 次)。选取上述最优工艺条件(膨润土添加量 1.2%、混合料水分 8%、造球时间 12 min)制备的合格生球,采用预热温度 900 °C、预热时间 8 min,焙烧温度 1 100 °C、焙烧时间 10 min 的制度进行氧化焙烧,所得预热球与焙烧球的强度指标见表 8。

表 8 辽西钒钛磁铁精矿球团氧化球强度及冶金性能
Table 8 Oxidized pellet strength and metallurgical properties of Liaoxi vanadium-titanium magnetite pellets

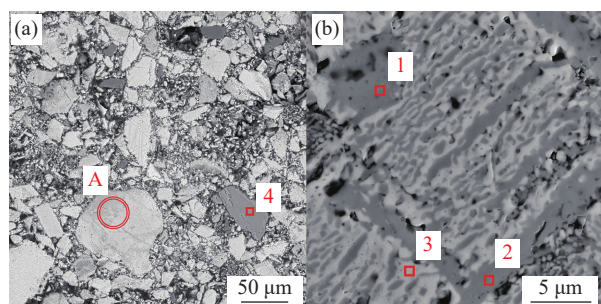
Oxidation sphere performance				Metallurgical properties		
Compressive strength /(N·pellet ⁻¹)		Drum strength (+6.3 mm)/%	Abrasion index (-0.5 mm)/%	Reduction degradation index (RDL _{3.15})/%	Degree of reduction (RI) /%	Reduction swelling index (RSI) /%
Preheated pellet	Roasted pellet					
552	2 641	93.25	2.18	98.60	62.35	6.33

结果表明,该焙烧制度可制备出固结强度合格的氧化球团,预热球抗压强度达 552 N/球,焙烧球抗

压强度达 2641 N/球。以该氧化球团为试样,依据国家标准 GB/T 13240-2018 和 GB/T 13242-2017 分别

测定其还原膨胀率与还原粉化指数,测定结果见表 8。该工艺条件下制备的辽西钒钛磁铁矿氧化球团的还原粉化指数 $RDI_{+3.15}$ 为 98.60%,还原膨胀率为 6.33%,均满足高炉冶炼要求。

研究选取焙烧后氧化球团试样,采用扫描电子显微镜-能谱仪 (SEM-EDS) 进行表征,所得显微形貌及各特征点元素组成分别见图 8 和表 9。结果表明,研究采用的 1 100 °C 焙烧温度相对较低,在此温度下大块石英或铁橄榄石颗粒(点 4)未发生熔融,赤铁矿晶粒再结晶程度较低,颗粒间仍保持清晰晶界。采用无机粘结剂制备的氧化球团中,大尺寸铁颗粒氧化不完全,其中心区域仍存在未充分氧化的钛铁矿(点 1、点 2),呈块状或条状嵌布于铁板钛矿基体中(点 3)。



(a) 氧化球团显微结构; (b) 区域 A 局部放大

图 8 辽西钒钛磁铁矿氧化球团 SEM 分析

Fig. 8 SEM analysis of Liaoxi vanadium-titanium magnetite oxidized pellets

表 9 辽西钒钛磁铁矿氧化球各点位元素原子含量

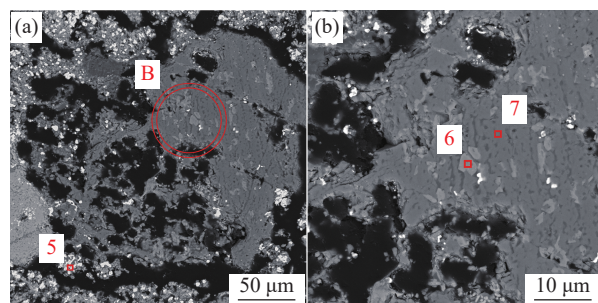
Table 9 Elemental content at various points in Liaoxi vanadium-titanium magnetite oxidized pellets %

Point	Fe	Ti	V	Si	Ca	Mg	Al	O
1	23.2	20.8	0.4	0.4	0.3	0.3	0.8	53.8
2	24.2	20.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	54.8
3	29.0	16.0	0.5	0.4	0.1	0.1	1.0	52.9
4	9.7	0.5	0.1	22.3	4.9	6.7	3.0	52.8

研究对高炉气氛下 900 °C 还原 60 min 后的还原球团进行显微结构表征,其显微形貌及 EDS 元素分析结果分别见图 9 和表 10。

结果表明,在 900 °C 高炉还原气氛下,辽西钒钛磁铁矿球团内部还原不充分,还原动力学过程较为缓慢。尽管还原产物中已出现金属铁相(点 5),但其晶粒尺寸细小,呈斑点状弥散分布于球团基体中。大面积连续分布的高硅脉石相(点 7)中,夹杂有富铁铁橄榄石物相(点 6)及斑点状金属铁颗粒。由于该还原条件下氧化铁还原程度较低,且还原产

物呈分散分布,还原过程中因晶格膨胀产生的内应力较小,这是辽西钒钛磁铁矿球团具有良好还原膨胀性与还原粉化性能的重要原因。



(a) 还原球团显微结构; (b) 区域 B 局部放大

图 9 辽西钒钛磁铁矿高炉气氛还原球 SEM 分析

Fig. 9 SEM analysis of Liaoxi vanadium-titanium magnetite pellets reduced under blast furnace Atmosphere

表 10 辽西钒钛磁铁矿氧化球各点位元素原子含量

Table 10 Elemental content at various points in Liaoxi vanadium-titanium magnetite oxidized pellets %

Point	Fe	Ti	V	Si	Ca	Mg	Al	O
5	81.8	3.5	0.3	2.8	1.8	0	0.8	9.0
6	17.8	0.2	0	16.5	2.2	9.6	0.4	53.3
7	5.3	0.3	0.1	22.9	10.0	6.2	1.1	54.2

3 结论

1)以辽西钒钛磁铁精矿为原料的造球正交试验表明:高压辊磨对生球抗压强度影响最显著,润磨时间次之,造球时间与混合料水分影响相近;生球落下强度影响因素显著性排序为:高压辊磨>造球时间>混合料水分>润磨时间。经单因素优化,确定最优生球制备工艺为:不进行高压辊磨与润磨预处理,膨润土添加量 1.2%、混合料水分 8%、造球时间 12 min。

2)采用 900 °C 预热 8 min、1 100 °C 焙烧 10 min 的氧化制度,所得氧化球团抗压强度达 2 641 N/球。该精矿 SiO_2 及碱金属含量较高,可在较低焙烧温度下生成液相,保障了球团的高固结强度。辽西钒钛磁铁精矿氧化球团具有还原度低、还原膨胀率小、还原粉化性能优良的冶金特性,其机理为:精矿铁品位低、脉石含量高导致还原动力学缓慢;900 °C 高炉气氛下金属铁生成量少且弥散分布,球团内大量未还原铁橄榄石与脉石嵌布,还原晶格膨胀内应力小,故还原稳定性良好。

参考文献

- [1] YU H D, WANG L N, QU J K, *et al.* Process mineralogical characteristics and ore value of typical vanadium-titanium magnetite in China[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 275-281.
(于宏东, 王丽娜, 曲景奎, 等. 中国典型钒钛磁铁矿的工艺矿物学特征与矿石价值[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2020, 41(2): 275-281.)
- [2] CHEN W X, LIANG H J, GAO Z X, *et al.* Study on process mineralogy of vanadium-titanium magnetite concentrate in Chaoyang, Liaoning province[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2681-2688.
(陈汪兴, 梁海军, 高子先, 等. 辽宁朝阳地区某钒钛磁铁矿中铁精矿的工艺矿物学研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51(10): 2681-2688.)
- [3] ZHANG Y N. Simple analysis and its meaning on the weathering crust vanadium titanium magnetite deposit of western Liaoning province[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2014, 30(1):5-7.
(张亚楠. 辽西风化壳型钒钛磁铁矿矿床浅析及其意义[J]. 有色矿冶, 2014, 30(1): 5-7.)
- [4] DONG Z H, LI W B, LI Y J. Experiment study on preconcentration of weathering crust vanadium titanium magnetite in western Liaoning province[J]. Metal Mine, 2019(2): 150-155.
(董振海, 李文博, 李艳军. 辽西风化壳型钒钛磁铁矿预富集试验研究[J]. 金属矿山, 2019(2): 150-155.)
- [5] TANG Z D, LI W B, GAO P, *et al.* Mineralogical study of vanadium titanium magnetite ore in Chaoyang[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2017, 38(12): 1769-1774.
(唐志东, 李文博, 高鹏, 等. 朝阳钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2017, 38(12): 1769-1774.)
- [6] HAN T, XIAO S X, CHENG G J, *et al.* Preparation experiment of oxidized pellets from western Liaoning vanadium-titanium magnetite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023, (3): 7-13.
(韩通, 肖顺鑫, 程功金, 等. 辽西钒钛磁铁矿氧化球团制备实验[J]. 矿产综合利用, 2023, (3): 7-13.)
- [7] Ministry of Ecology and Environment. Technical policy on pollution prevention and control for iron and steel industry[EB/OL]. (2013-05-24). https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/wrfzjszc/201306/t20130603_253123.shtml.
(生态环境部. 钢铁工业污染防治技术政策[EB/OL]. (2013-05-24). https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/wrfzjszc/201306/t20130603_253123.shtml.)
- [8] People's Government of Panzhihua City. Pangang's high-titanium vanadium-titanium magnetite smelting technology selected into Sichuan green low-carbon technology and equipment catalogue[EB/OL]. (2025-04-23) [2025-10-14]. <http://www.panzhihua.gov.cn/zwgk/gzdt/bdyw/10207461.shtml>.
(攀枝花市人民政府. 攀钢高钛型钒钛磁铁矿冶炼技术入选四川绿色低碳技术装备目录 [EB/OL]. (2025-04-23) [2025-10-14]. <http://www.panzhihua.gov.cn/zwgk/gzdt/bdyw/10207461.shtml>.)
- [9] YANG Y H, HUI B, YAN S Q, *et al.* Research progress of global vanadium titanium magnetite resources and comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4): 1-11.
(杨耀辉, 惠博, 颜世强, 等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(4): 1-11.)
- [10] XING Z X. Basic experimental study on preparation of oxidized pellets from sea sand ore[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
(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.)
- [11] YIN G Y. Coupling effect and consolidation mechanism of valuable components in oxidation roasting process of high-chromium vanadium-titanium magnetite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
(尹庚羊. 高铬型钒钛磁铁矿氧化焙烧过程有价值组元耦合作用及固结机理[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.)
- [12] XING Z X, CHENG G J, GAO Z X, *et al.* Optimization of experimental conditions on preparation of oxidized pellets with New Zealand sea sand ore[J]. Metallurgical Research & Technology, 2020, 117(4).
- [13] YUAN Z, PAN J, ZHU D Q, *et al.* Study on properties of magnesium fluxed pellets prepared from vanadium-titanium magnetite[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(3): 47-52, 85.
(袁壮, 潘建, 朱德庆, 等. 钒钛磁铁矿制备镁质熔剂性球团性能研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(3): 47-52, 85.)
- [14] CHEN S Y, CHU M S, TANG J, *et al.* Effect of pre-oxidation on mineral phase and internal structure of vanadium-titanium magnetite pellets[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2013, 34(4): 536-541.
(陈双印, 储满生, 唐珏, 等. 预氧化对钒钛磁铁矿球团矿相及内部结构的影响[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 536-541.)

- [15] TAKATOSHI A, HAJIMU K, TOSHIO F. Electron probe microanalysis study on processes of low-temperature oxidation of titanomagnetite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 76: 177-192. .
- [16] TANG J, CHU M S, FENG C, *et al.* Phases transition and consolidation mechanism of high chromium vanadium-titanium magnetite pellet by oxidation process[J]. High Temperature Materials and Processes, 2016, 35(7): 699-710.
- [17] CHEN X L, HUANG Y S, FAN X H, *et al.* Oxidation roasting behavior and consolidation characteristics of vanadium-titanium magnetite pellets[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(2): 359-366.
(陈许玲, 黄云松, 范晓慧, 等. 钒钛磁铁矿球团氧化焙烧行为和固结特性[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(2): 359-366.)
- [18] LIU J S, XING Z X, CHENG G J, *et al.* Oxidation behavior of low-grade vanadiferous titanomagnetite concentrate with high titanium[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2023, 30: 1945-1958.
- [19] CHEN B, WEN J, JIANG T, *et al.* Phase evolution behavior and oxidation induration mechanism of high-chromium vanadium-titanium magnetite flux pellets[J]. Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2022, 53: 178-189.
- [20] HAN G H, JIANG T, ZHANG Y B, *et al.* High-temperature oxidation behavior of vanadium,titanium-bearing magnetite pellet[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(8): 14-19.
- [21] PAN F, ZHU Q S, DU Z, *et al.* Oxidation kinetics, structural changes and element migration during oxidation process of vanadium-titanium magnetite ore[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2016, 23(11): 1160-1167.
- [22] XU C B, ZHANG Y M, LIU T, *et al.* Process mineralogy of a vanadium-titanium magnetite in western Liaoning[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018, (3): 1-5, 45.
(许承宝, 张一敏, 刘涛, 等. 辽西某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2018, (3): 1-5, 41.)
- [23] WEN B L, ZHANG X P, LI J X, *et al.* Preparation of fluxed pellets from fine-grained iron concentrate[J]. Iron and Steel, 2023, 58(10): 23-33.
(温宝良, 张晓萍, 李家新, 等. 细粒级铁精矿制备熔剂性球团[J]. 钢铁, 2023, 58(10): 23-33.)

编辑 邓淑惠

(上接第 140 页)

- [20] YAO J, LIU S G, LIN W S, *et al.* Study on performance of Ce-Cr-Ni/TiO₂ catalysts in CO-SCR[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(5): 123-127.
(姚佳, 刘少光, 林文松, 等. Ce-Cr-Ni/TiO₂ 催化剂的 CO-SCR 性能研究[J]. 现代化工, 2019, 39(5): 123-127.)
- [21] STANMORE B R. The formation of dioxins in combustion systems[J]. Combustion and Flame, 2004, 136(3): 398-427.
- [22] PENG Y, SI W Z, LI X, *et al.* Comparison of MoO₃ and WO₃ on arsenic poisoning V₂O₅/TiO₂ catalyst: DRIFTS and DFT study[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2016, 181: 692-698.
- [23] CHNEG J, LU H L, SONG L Y, *et al.* Study on catalytic performance of NH₃-SCR on Sm-doped V-Mo-TiO₂ catalyst[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths : 1-20.
(程杰, 卢辉丽, 宋丽云, 等. 钐掺杂 V-Mo-TiO₂ 催化剂 NH₃-SCR 催化性能研究[J]. 中国稀土学报: 1-20.)
- [24] CHENG J, XU R N, SONG L Y, *et al.* Unveiling the role of microwave induction on V₂O₅@AC catalysts with enhanced activity for low temperature NH₃-SCR reaction: an experimental and DFT study[J]. Environmental Science: Nano, 2023, 10(5): 1313-1328.
- [25] LI Y Y, ZHANG Z P, ZHAO X Y, *et al.* Effects of Nb-modified CeVO₄ to form surface Ce-O-Nb bonds on improving low-temperature NH₃-SCR deNO_x activity and resistance to SO₂ & H₂O[J]. Fuel, 2023, 331: 125799.
- [26] SHI Z W, PENG Q G, E J Q, *et al.* Mechanism, performance and modification methods for NH₃-SCR catalysts: A review[J]. Fuel, 2023, 331: 125885.

编辑 唐肖