钛精矿预还原制备金属化球团及其抗压性能研究①

刘宝宝[1], 彭忠辉[2], 何东升[1], 张博[2], 刘长淼[2], 杨丘[1], 唐远[1]
(1.武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430073; 2.龙佰四川矿冶有限公司, 四川 攀枝花 617100)

摘 要: 开展钛精矿造块及预还原制备金属化球团试验研究,考察配碳粒度、配碳量、焙烧温度及焙烧时间对球团抗压强度和金属化率的影响。结果表明,钛精矿主要由钛铁矿和少量磁铁矿组成,且-69 μm 粒级约占 91.39%,属细粒物料,具备良好成球条件。在配碳粒度-1 mm(未分级)、配碳量 10%条件下,生球和熟球抗压强度均符合工艺要求。生球在 1 200 ℃真空还原焙烧 30 min,可获得抗压强度 1 224.60 N/P、金属化率 50.48%的球团,满足电炉熔分工艺的原料要求。在试验范围内,适当提高焙烧温度、延长焙烧时间及增加配碳量均有利于提升球团金属化率。

关键词: 钛精矿; 金属化球团; 预还原; 抗压强度; 金属化率
中图分类号: TF046 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.034
文章编号: 0253-6099(2026)03-0226-06

Preparation of Metallized Pellets by Pre-reduction of Titanium Concentrate and Their Compressive Strength Properties

LIU Baobao[1], PENG Zhonghui[2], HE Dongsheng[1], ZHANG Bo[2], LIU Changmiao[2], YANG Qiu[1], TANG Yuan[1]
(1.*School of Resources and Safety Engineering*, *Wuhan Institute of Technology*, *Wuhan* 430073, *Hubei*, *China*; 2.*Longbai Sichuan Mining & Metallurgy Co.*, *Ltd.*, *Panzhihua* 617100, *Sichuan*, *China*)

Abstract: An experimental study was conducted on preparation of metallized pellets by agglomeration and pre-reduction of titanium concentrate, for investigating the effects of carbon particle size, carbon dosage, roasting temperature and roasting time on the compressive strength and metallization rate of the pellets. The results show that the raw material is mainly composed of ilmenite with a small amount of magnetite, in which the size fraction of -69 μm accounts for approximately 91.39%, indicating that the material is fine-grained, and has favorable pelletizing performance. It is found that with carbon particle size of -1 mm (unclassified) and addition of carbon at 10%, both the green and fired pellets meet the process requirements in terms of compressive strength. On this basis, after roasting and reduction at 1 200 ℃ in a vacuum furnace for 30 min, qualified pellets with compressive strength of 1 224.60 N/P and a metallization rate of 50.48% can be obtained, which can meet the raw material requirements of electric furnace smelting and separation process. Within the experimental range, appropriately increasing the roasting temperature, prolonging the roasting time, and increasing the carbon addition are all beneficial to improving the metallization rate of pellets.

Key words: titanium concentrate; metallized pellets; pre-reduction; compressive strength; metallization rate

四川攀西地区钛资源储量丰富,是我国重要的钛原料供应基地,其钛矿探明储量占全国钛矿总量的 90%以上,约占全球已探明钛矿可采储量的 32%[1]。攀枝花地区已形成全球最大的钒钛资源综合利用产业集群[2],该地区钛产业主要利用钛精矿冶炼生产钛渣等富钛原料。当前工业上多采用钛精矿直接电炉熔炼制备高钛渣,但该工艺普遍存在单位电耗高、熔炼周期长及设备负荷大等问题,制约了资源高效利用与行业绿色发展[3]。随着节能降碳要求的持续提升,开发低能耗、高效率的钛精矿强化冶炼新路线具有重要现实意义。

预还原-熔分工艺通过在入炉前将钛精矿中铁氧化物部分还原为金属铁[4-5],可有效降低后续熔炼阶段的还原负荷和电能消耗[6],同时有利于提高电炉处理能力,因此受到了广泛关注。钛精矿预还原过程受原

① **收稿日期**: 2025-12-25
基金项目: 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划资助项目(T2021006);湖北省技术创新计划重点研发专项(2023BCB079)
作者简介: 刘宝宝(1996—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事矿产资源开发和综合利用。E-mail:13295558009@163.com
通信作者: 唐远(1990—),男,湖北仙桃人,博士,副教授,主要从事资源加工理论与技术研究。E-mail:yuan.tang@wit.edu.cn

料性质、配碳制度及热工参数等多因素影响,其中球团强度与金属化率是评价工艺可行性的关键指标。然而,现有研究多侧重金属化率提升,对球团机械性能与工艺参数协同优化关注不足,特别是针对细粒级钛精矿压球条件下的系统研究仍较少。

本文以四川攀枝花地区某钛精矿为研究对象,在系统分析钛精矿原料特征的基础上,开展压球造块及预还原试验,重点考察配碳粒度、配碳量、焙烧温度及焙烧时间对球团抗压强度和金属化率的影响,确定适宜工艺参数,并结合物相及微观结构分析阐明球团强化机理,为钛精矿预还原工艺应用提供理论依据和试验参考。

1　试验原料与研究方法

1.1　钛精矿性质分析

1.1.1　元素及物相分析

试验用钛精矿样品来自四川攀枝花地区,钛精矿试样多元素分析和 XRD 图谱分别见表 1 和图 1。由表 1 可知,钛精矿试样中 TiO_2 和铁氧化物的含量分别为 47.30%和 43.35%,主要杂质组分 MgO 和 SiO_2 的含量分别为 3.36%和 2.52%。由图 1 可知,钛精矿试样主要由钛铁矿和磁铁矿构成,其中主要物相为钛铁矿。

表 1　钛精矿试样多元素分析(质量分数)

Table 1　Multi-elemental analysis of titanium concentrate　%

TiO_2	Fe_xO[1)]	MgO	SiO_2	Al_2O_3	MnO	V_2O_5	CaO	SO_3
47.30	43.35	3.36	2.52	0.96	0.85	0.47	0.46	0.37
Cr_2O_3	Na_2O	P_2O_5	NiO	ZnO	ZrO_2	CuO	K_2O	其他
0.14	0.06	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04

1) Fe_xO 为铁氧化物。

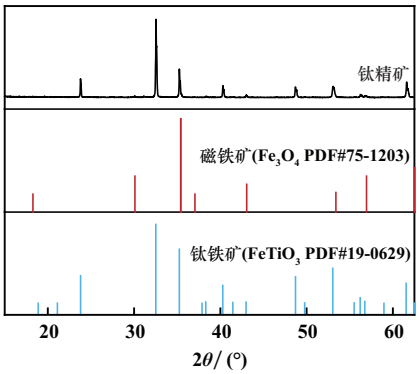


图 1　钛精矿试样 XRD 图谱

Fig. 1　XRD spectrum of titanium concentrate

1.1.2　形貌分析

钛精矿试样 SEM 图像见图 2。由图 2 可知,钛精矿颗粒表面粗糙,棱角分明,整体分布较为均匀,无明显团聚现象,颗粒粒径主要集中在 5~65 μm,属于细颗粒范围。

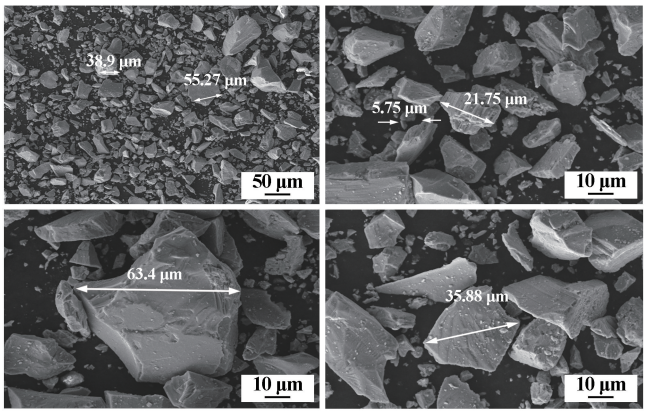


图 2　钛精矿试样 SEM 图像

Fig. 2　SEM images of titanium concentrate

1.1.3　粒度和比表面积分析

钛精矿试样粒径分布见图 3。由图 3 可知,钛精矿粒径范围为 5~100 μm,粒径峰值约 35 μm,其中,-69 μm细粒级累计含量约为 91.39%,其平均比表面积(BET 法)约为 5.08 m^2/g,说明样品整体粒径较细,为细粒级物料。

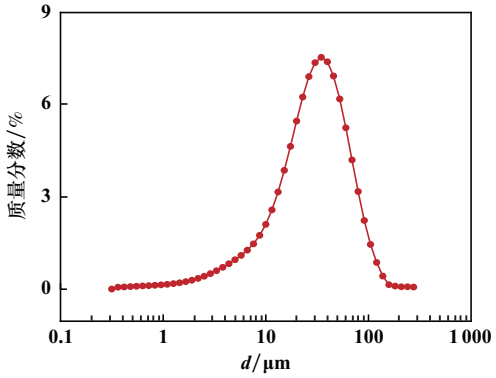


图 3　钛精矿试样粒径分布

Fig. 3　Particle size distribution of ilmenite concentrate

1.1.4　热重分析

钛精矿试样热重分析结果见图 4。由图 4 可知,1 397.69 ℃时钛精矿试样烧失量为 8.20%,主要是水分和有机质的挥发。随着温度升高,钛精矿试样的 DSC 曲线呈现先放热再吸热的趋势,吸放热交替处温度为 1 256 ℃。因此,本文焙烧温度选用 1 000~1 300 ℃。

1.2　煤样性质分析

试验配碳选用陕西某地的优质无烟煤,经破碎筛分后选取-2.0 mm 粒级煤样。表 2 为煤样工业性质分析结果,表 3 为煤热值分析结果。由表 3 可知,煤炭弹

桶平均发热量为 29 998.60 J/g,空气干燥基高位发热量为 29 890.50 J/g,空气干燥基低位发热量为 29 358.46 J/g。结合表 2 可知,该煤样具有典型的低水分、低挥发分、高固定碳特征(>80%)和高热值特性(低位发热量大于29 MJ/kg),符合优质还原剂要求。

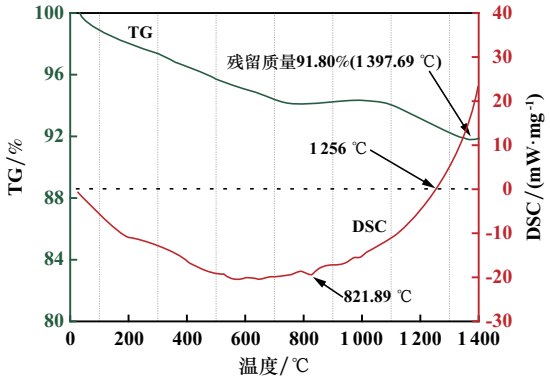


图 4 钛精矿试样热重分析图谱

Fig. 4 Thermogravimetric analysis of titanium concentrate

表 2 煤样工业性质分析结果(质量分数)

Table 2 Industrial properties of coal samples %

水分	灰分		挥发分			固定碳
	A_{ad}	A_d	V_{ad}	V_d	V_{daf}	
2.57	9.17	10.44	4.95	7.71	10.05	82.04

表 3 煤热值分析结果

Table 3 Calorific value of coal sample

弹桶平均发热量/(J·g⁻¹)	空气干燥基高位发热量/(J·g⁻¹)	空气干燥基低位发热量/(J·g⁻¹)
29 998.60	29 890.50	29 358.46

1.3 球团制备及预还原试验方法

主要试验仪器包括 JJ5 型搅拌机、290 型压球机、DHG-9030A 型干燥箱、YHKC-2A 型颗粒强度测定仪、SJF 型真空气氛升降炉和 HXQT-10C 型球团压力试验机。

球团制备及预还原试验流程如下:将钛精矿、煤炭(还原剂)、CY 型黏结剂和自来水按照一定质量比加入搅拌机中,混合均匀后,采用压球机制得直径 25~30 mm 的生球。生球在 140 ℃干燥箱中干燥 60 min,冷却至室温后,使用颗粒强度测定仪测定其抗压强度。将干燥后的生球置于真空气氛升降炉内进行预还原,200 ℃下预热 20 min,继续升温并完成焙烧得到熟球。熟球冷却至室温后,采用球团压力试验机测定其抗压强度,并检测球团金属化率。

1.4 金属化率计算方法

依据 GB/T 6730.5—2022 标准化学分析法,测定焙烧还原后球团(DRI)中磁性铁(MFe)和全铁(TFe)含量,球团金属化率计算式如下:

$$M_t = \frac{W_{(MFe)}}{W_{(TFe)}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:M_t 为还原 t 时间的球团金属化率,%;$W_{(MFe)}$ 为还原 t 时间后球团磁性铁含量,%;$W_{(TFe)}$ 为还原 t 时间后球团全铁含量,%。

2 结果与讨论

2.1 配碳制度对球团性能的影响

2.1.1 配碳粒度的影响

根据钛精矿颗粒粒度较细的特性,要求还原剂粒度匹配以确保充分接触。在配碳量为 10%的条件下,配碳粒度对球团平均抗压强度的影响见表 4。由表 4 可知,随着配碳粒度减小,生球平均抗压强度逐步提高,而熟球平均抗压强度明显下降。其原因在于细粒煤有利于生球阶段颗粒紧密堆积[7],但焙烧后过细煤粒反应过快并形成较多孔隙,不利于熟球结构稳定。配碳粒度-0.074 mm 时,熟球平均抗压强度仅为 736 N/P,低于 GB 50427—2015《高炉炼铁工程设计规范》中典型高炉对入炉炉料的强度指标要求。综合生球与熟球抗压强度要求,适宜的配碳粒度为-1 mm(未分级)。

表 4 配碳粒度对球团平均抗压强度的影响

Table 4 Effect of carbon particle size on average compressive strength of pellets

配碳粒度/mm	平均抗压强度/(N·P⁻¹)	
	生球	熟球
-1(未分级)	216.17	1 215
-1+0.4	225.45	1 105
-0.4+0.074	235.18	879
-0.074	362.14	736

2.1.2 配碳量的影响

配碳粒度-1 mm(未分级),配碳量对球团平均抗压强度的影响见表5。由表5可知,随着配碳量增加,

表 5 配碳量对球团平均抗压强度的影响

Table 5 Effect of carbon content on average compressive strength of pellets

配碳量/%	平均抗压强度/(N·P⁻¹)	
	生球	熟球
5	183.70	2 174.75
10	216.17	1 224.60
15	230.33	674.60
20	343.33	344.60

生球平均抗压强度增大，熟球平均抗压强度呈下降趋势。熟球平均抗压强度的下降归因于还原过程中分压促使煤炭以 CO 形式扩散逸出[8]，在球团内部形成多孔结构，削弱机械强度。配碳量 10%时，生球平均抗压强度超过 200 N/P，熟球平均抗压强度仍保持在 1 200 N/P 以上，可同时满足成球和后续运输要求；进一步增加配碳量，熟球平均抗压强度降低。因此，配碳量不宜过高，后续焙烧制度优化试验均采用 10%配碳量。

2.2　焙烧制度对球团性能的影响

2.2.1　焙烧温度的影响

配碳粒度-1 mm（未分级）、配碳量 10%、焙烧时间 45 min，探究焙烧温度（1 000～1 300 ℃）对熟球平均抗压强度的影响，结果如图 5 所示。由图 5 可知，在 1 000～1 200 ℃范围内，熟球平均抗压强度显著提升，焙烧温度升高增加了钛铁矿颗粒表面活化能，增强了固相扩散和液相烧结作用，使颗粒间形成稳定的固相桥接或局部液相黏结。焙烧温度升至 1 300 ℃时，熟球平均抗压强度增幅较小，这可能是因为 $FeTiO_3$、TiO_2 等组分发生过度烧结或相变（如生成 $FeTi_2O_5$、Ti_3O_5 等），引发热应力裂纹或脆性相富集，从而削弱了球团的机械性能。

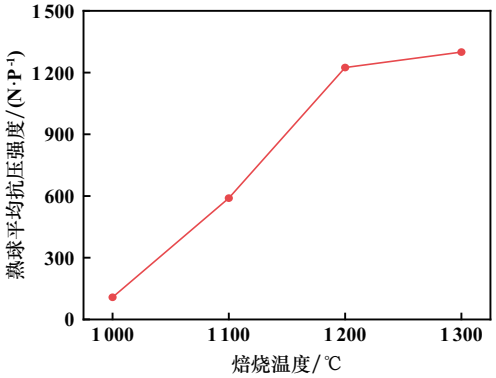


图 5　焙烧温度对熟球平均抗压强度的影响

Fig. 5　Effect of roasting temperature on average compressive strength of fired pellets

除了机械强度，球团的金属化率是另一个关键评价指标。焙烧温度对熟球金属化率的影响如图 6 所示。由图 6 可知，当焙烧温度从 1 100 ℃升至 1 200 ℃时，熟球金属化率提升尤为明显（增幅 36.24%）；焙烧温度继续升至 1 300 ℃时，熟球金属化率增速有所减缓（增幅 32.55%）。这一变化规律与钛精矿碳热还原的热力学过程及物相演变密切相关。从热力学角度看，主还原反应 $FeTiO_3 + C \rightleftharpoons TiO_2 + Fe + CO(g)$ 的标准吉布斯自由能变与温度的关系为：$\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta \approx 198.1 - 0.157T$，计算表明[5]，该反应的转折温度（$\Delta G^\theta = 0$ 时）约为 987.8 ℃，高于此温度时，反应可自发进行（$\Delta G^\theta < 0$），且 $\Delta H^\theta > 0$，反应为吸热反应，升温在热力学上有利于还原反应进行。然而，温度超过 1 200 ℃后，初还原产物 TiO_2 会进一步被还原生成 $FeTi_3O_5$、Ti_3O_5 等低价钛氧化物[9]。这些低价钛氧化物与未反应的 $FeTiO_3$ 易形成稳定的固溶体[10]，包裹在未还原的铁氧化物表面，阻碍了铁氧化物的深度还原，这是在 1 200～1 300 ℃范围内球团金属化率增速放缓的主要原因。综合考虑球团的平均抗压强度和金属化率，确定适宜的焙烧温度为 1 200 ℃。

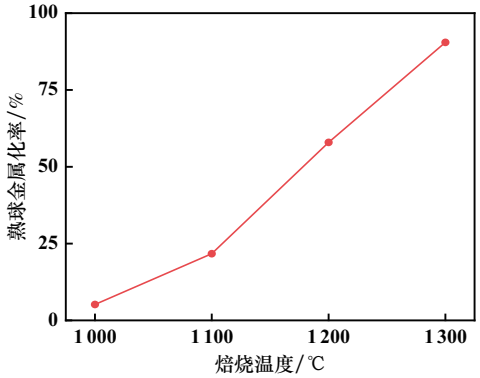


图 6　焙烧温度对熟球金属化率的影响

Fig. 6　Effect of roasting temperature on metallization rate of fired pellets

2.2.2　焙烧时间的影响

焙烧温度 1 200 ℃，焙烧时间对熟球平均抗压强度的影响见图 7。由图 7 可知，焙烧时间由 15 min 延长至 30 min 时，熟球平均抗压强度增幅较大；焙烧时间继续延长至 60 min，熟球平均抗压强度增幅较小。在反应前期（15～30 min），由于还原与烧结过程的完善，球团结构致密性提高，矿物颗粒间通过固相扩散形成稳定晶界结合，球团抗压强度显著提升；随着焙烧时间进一步延长，球团内部可能发生过度烧结或局

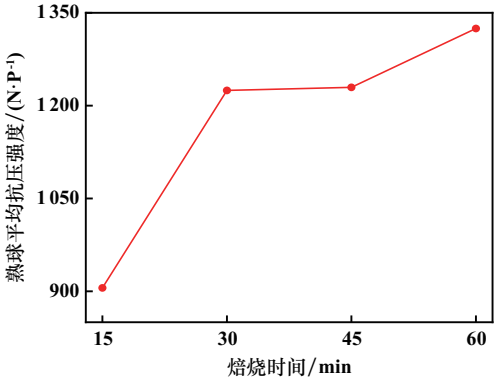


图 7　焙烧时间对熟球平均抗压强度的影响

Fig. 7　Effect of roasting time on average compressive strength of fired pellets

部熔融[11],反而会削弱其机械性能,导致抗压强度增速放缓。

焙烧时间对熟球金属化率的影响见 8。由图 8 可知,熟球金属化率随着焙烧时间延长而增大。焙烧时间 15~30 min 时,由于球团内碳含量充足,还原性气氛良好,金属化率快速上升,此阶段钛铁矿与碳充分反应,CO 快速逸出推动还原进程;焙烧时间 30~60 min 时,碳含量减少,生成 Ti_3O_5/Ti_2O_3 低价钛氧化物与未反应的 $FeTiO_3$ 形成固溶体,抑制铁氧化物进一步还原,还原反应减速,导致金属化率增速减缓。

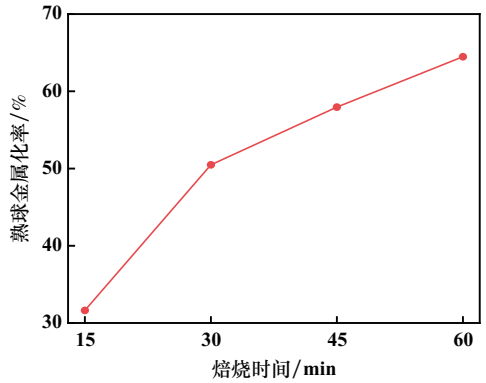


图 8 焙烧时间对熟球金属化率的影响

Fig. 8 Effect of roasting duration on metallization rate of fired pellets

综合考虑能耗和工艺指标,确定优化工艺参数为:配碳量 10%、焙烧温度 1 200 ℃、焙烧时间 30 min。在此条件下,可稳定制得金属化率 50.48%、抗压强度 1 224.60 N/P的熟球,该球团金属化率满足攀钢集团 50%~70%的工业生产要求[7];球团抗压强度亦符合 GB 50427—2015《高炉炼铁工程设计规范》中金属化球团的强度指标[12]。

2.3 预还原球团性能分析

基于预还原工艺所得的球团,进一步分析球团的表观形貌和物相组成。图 9 为熟球 SEM-EDS 图。经高温焙烧后,钛铁矿颗粒边界模糊化且颈部连接显著,形成致密化烧结结构,但开放孔隙仍可见,此类孔隙有利于熔分过程传质渗透。由 EDS 图谱可知,Ti 均匀分布,存在局部富集区,其对应未完全还原的钛氧化物(如 Ti_3O_5、Ti_2O_3)或 Fe-Ti 固溶体($FeTi_2O_5$);Fe 局部聚集与 Ti 部分重叠,Fe 聚集区对应金属铁的生成,验证金属化率高于 50%,重叠区域为 Fe-Ti 氧化物固溶体;O 分布均匀且与 Ti/Fe 重合,但在 Fe 富集区,O 信号减弱(单质铁),O 富集区可能为残留钛氧化物或未反应的钛铁矿;C 呈现点状离散分布,为未分解碳质还原剂残留,点状特征表明配碳量(10%)适中,未导致孔隙富碳,验证工艺合理性。

图 10 为熟球 XRD 图谱。图中可清晰识别出金属铁(Fe)与铁板钛矿($FeTi_2O_5$)的特征衍射峰。其中,金属铁衍射峰的出现,是钛铁矿在还原气氛下被还原生成金属铁的直接证据,这与图 9 观察到的铁元素局部富集区结果相互印证。同时,$FeTi_2O_5$ 作为主相存在,表明发生了深度还原反应(如 $3TiO_2 + C = Ti_3O_5 + CO$),形成了 $FeO \cdot TiO_2$ 与 Ti_3O_5 的固溶体。

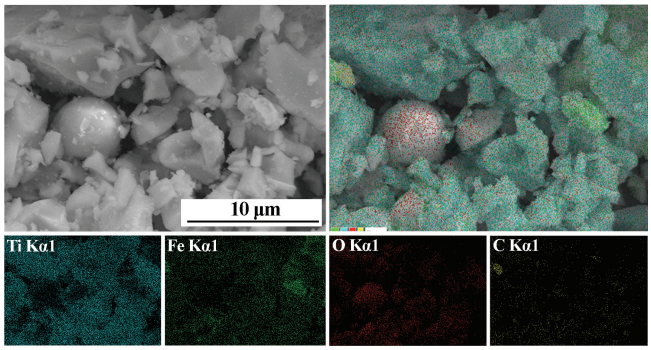


图 9 熟球 SEM-EDS 图

Fig. 9 SEM and EDS analyses of fired pellets

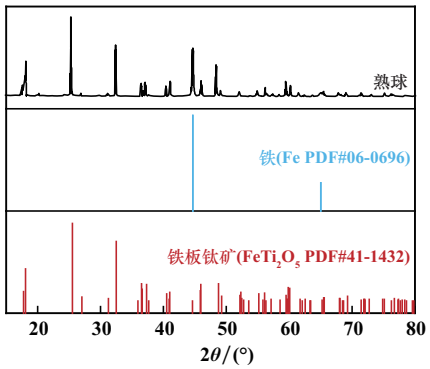


图 10 熟球 XRD 图谱

Fig. 10 XRD pattern of fired pellets

3 结论

1) 攀枝花钛精矿主要由钛铁矿和少量磁铁矿组成,TiO_2 和铁氧化物含量分别为 47.30% 和 43.35%,-69 μm 粒级约占 91.39%,属细粒级物料,具备压球造块及预还原处理的原料基础。

2) 以粒度-1 mm(不分级)的煤粉作为内配还原剂,配碳量 10%时,可兼顾干球成形性能与熟球抗压强度。配碳量 10%、焙烧温度 1 200 ℃、焙烧时间 30 min 条件下,可获得抗压强度 1 224.60 N/P、金属化率 50.48%的球团,满足电炉熔分工艺对入炉原料强度及金属化率的要求。

参考文献(References):

[1] QIU G Z, GUO Y F. Current situation and development trend of titanium metal industry in China[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022,29(4):599-610.

[2] 梅燕,单永奎,何科瀚. 攀西钒钛磁铁矿分布特征及采矿选矿技术[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2023,37(1):58-65.
MEI Yan, SHAN Yongkui, HE Kehan. Distribution features of vanadium-titanomagnetite in Panxi regions and its mining and beneficiating techniques[J]. Journal of Xichang University (Natural Science Edition), 2023,37(1):58-65.

[3] 肖军,李凯茂,王海波. 钛渣酸解率降低原因及对策分析[J]. 轻金属, 2023(3):40-43.
XIAO Jun, LI Kaimao, WANG Haibo. Analysis on reasons and countermeasures for the reduced acidolysis rate of titanium slag[J]. Light Metals, 2023(3):40-43.

[4] ZHU K S, CHENG X K, LIN Y H, et al. Pre-reduction of carbon-containing pellets of high chromium vanadium-titanium magnetite at different temperatures[J]. High Temperature Materials and Processes, 2022,41(1):296-305.

[5] 魏光亮. 攀枝花钛精矿预还原制备金属化球团技术研究[J]. 钢铁钒钛, 2018,39(3):7-11.
WEI Guangliang. Preparation of metallized pellets from Panzhihua titanium concentrate by pre-reduction[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018,39(3):7-11.

[6] 廖鑫,杨绍利,马兰,等. 以钛精矿和钛渣为原料制备硫酸法钛白粉的对比分析[J]. 无机盐工业, 2019,51(10):7-11.
LIAO Xin, YANG Shaoli, MA Lan, et al. Comparison and analysis of sulfuric acid process titanium dioxide prepared with titanium concentrate and titanium slag as raw materials respectively[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019,51(10):7-11.

[7] 魏世发,马彪,任国兴. 磷矿配炭球团高温固结工艺研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):92-95.
WEI Shifa, MA Biao, REN Guoxing. Preliminary study on high-temperature consolidation conditions for carbon-bearing phosphate ore pellets[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):92-95.

[8] 黄润,吕学伟,张凯,等. 攀枝花钛精矿碳热还原-真空冶炼工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014,45(3):684-689.
HUANG Run, LYU Xuewei, ZHANG Kai, et al. Carbothermic reduction and vacuum smelting of Panzhihua ilmenite concentrate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014,45(3):684-689.

[9] 王祥丁,刘军,黄翔,等. 含钒钛精矿冶炼过程中钒还原行为分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):121-124.
WANG Xiangding, LIU Jun, HUANG Xiang, et al. Analysis of vanadium reduction behavior in smelting process of vanadium-bearing titanium concentrate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):121-124.

[10] 刘利,黄润,刘鹏胜,等. 钛精矿固相还原研究现状概述[J]. 四川冶金, 2016,38(5):1-8.
LIU Li, HUANG Run, LIU Pengsheng, et al. Solid state reduction of ilmenite concentrate overview[J]. Sichuan Metallurgy, 2016,38(5):1-8.

[11] 陈许玲,刘树,甘敏,等. 高钛球团焙烧行为及其强化技术[J]. 工程科学学报, 2016,38(7):920-929.
CHEN Xuling, LIU Shu, GAN Min, et al. Roasting behavior and enhancing technology of high-titanium pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016,38(7):920-929.

[12] 郭秀键,罗宝龙,赵忠宇,等. 金属化球团抗压强度的影响因素分析及资源化利用[J]. 烧结球团, 2023,48(4):59-64.
GUO Xiujian, LUO Baolong, ZHAO Zhongyu, et al. Analysis on influencing factors of compressive strength of metallized pellets and resource utilization[J]. Sintering and Pelletizing, 2023,48(4):59-64.

引用本文:刘宝宝,彭忠辉,何东升,等. 钛精矿预还原制备金属化球团及其抗压性能研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):226-231.

LIU Baobao, PENG Zhonghui, HE Dongsheng, et al. Preparation of metallized pellets by pre-reduction of titanium concentrate and their compressive strength properties[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):226-231.