新疆哈密某钒钛磁铁矿球团氧化焙烧行为

鱼灵通[1]，项心如[2]，巨建涛[2]，郭文科[2]，赵贵清[1]，邢相栋[2]
(1. 酒泉钢铁(集团)有限责任公司，甘肃 嘉峪关 735100；2. 西安建筑科技大学 冶金工程学院，陕西 西安 710055)

摘要： 新疆哈密地区钒钛磁铁矿资源丰富，该铁矿用于球团生产对推动钢铁行业绿色转型具有重要的理论意义和实践价值。本文以该钒钛磁铁矿为对象，研究预热、焙烧条件对钒钛磁铁矿球团性能的影响，并利用 XRD 与 SEM-EDS 分析其物相和微观形貌，从而揭示氧化焙烧过程中钒钛磁铁矿球团的固结机理。结果表明：该钒钛磁铁矿球团在 900 ℃预热 18 min、1 250 ℃焙烧 12 min 的最佳工艺条件下，焙烧球的抗压强度为 2 579.61 N/P。球团的氧化固结过程可分为氧化前、中、后期三个阶段：前期主要发生磁铁矿与钛磁铁矿的氧化反应，球团内部孔隙较大，颗粒分布松散，抗压强度较低；中期磁铁矿与钛磁铁矿进一步氧化生成赤铁矿和钛酸铁，钛铁矿与赤铁矿反应生成钛赤铁矿，孔隙数量减少，球团结构趋于致密；后期赤铁矿再结晶良好，并聚集长大，颗粒间形成高度致密结构，氧化固结过程基本完成，球团的抗压强度显著提升。本文研究成果可为球团生产工艺应用钒钛磁铁矿提供依据。

关键词： 钒钛磁铁矿；氧化球团；预热焙烧；固结机理
中图分类号： TF046.6 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764(2025)06－0047－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.095

Study on oxidizing roasting behavior of pellets produced with a certain vanadium-titanium magnetite, Hami, Xinjiang

YU Lingtong[1], XIANG Xinru[2], JU Jiantao[2], GUO Wenke[2], ZHAO Guiqing[1], XING Xiangdong[2]
(1. Jiuquan Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Jiayuguan 735100, Gansu, China; 2. College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: The vanadium-titanium magnetite resources in Hami area of Xinjiang are abundant; utilizing this kind of magnetite for pellet production holds significant theoretical and practical value for promoting green transformation of the iron and steel industry. In this study, the vanadium-titanium magnetite from Hami area of Xinjiang was studied on the effects of preheating and roasting conditions to the properties of pellets of vanadium-titanium magnetite and XRD and SEM-EDS was used to detect and analyze its phase composition and microstructure, thereby revealing the consolidation mechanism of the pellets of vanadium-titanium magnetite during oxidizing roasting. The results indicate that the optimal process conditions for the pellets of such vanadium-titanium magnetite are preheating at 900 ℃ for 18 min followed by roasting at 1 250 ℃ for 12 min, under which the roasted pellets achieve a compressive strength of 2 579.61 N/P. The oxidation consolidation process can be divided into three stages: In the initial stage of oxidation, magnetite and titanium magnetite undergo oxidation, resulting in large pores and loosely distributed particles with low compressive strength. In the intermediate stage of oxidation, magnetite and titanium magnetite further undergo oxidation to generate hematite and ferrous titanate, while ilmenite reacts with hematite to generate haplotypite, reducing the porosity and densifying the pellet structure. In the final stage, hematite recrystallizes well and aggregates into larger particles, forming a highly compact

收稿日期： 2025－04－09；**修回日期：** 2025－06－11
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(52174325)；陕西省创新能力支撑计划资助项目(2023-CX-TD-53)
作者简介： 鱼灵通(1970—)，男，工程师，从事冶金新技术等方面研究工作。
通信作者： 巨建涛(1973—)，男，正高级工程师，从事冶金原料处理及固废利用等方面的研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

structure among particles, essentially completing the oxidation consolidation and significantly enhancing compressive strength of pellets. The findings of this study provide a basis for the application of vanadium-titanium magnetite in pellet production process.

Key words: vanadium-titanium magnetite; oxidized pellet; preheating-roasting; consolidation mechanism

在全球工业化加速的背景下，钢铁工业的高能耗和环境污染问题日益突出，尤其在“碳中和、碳达峰”目标下，节能减排已成为高炉炼铁领域关注的焦点[1-3]。因铁品位高、粒度均匀、渣含量低以及优良的冶金性能，球团矿在高炉原料结构中的占比越来越大[4-6]。随着高品位铁矿资源的逐渐枯竭，拓展磁铁矿的原料范围已成为提升球团生产效能的关键。以铁、钛、钒等多金属元素共生的钒钛磁铁矿具有极高的综合利用价值，已成为重要的战略性矿产资源[7]。我国钒钛磁铁矿资源在全球钒钛磁铁矿储量上占据核心地位，这些资源主要集中分布在四川攀枝花－西昌、河北承德和新疆哈密等地，合计储量达156.11亿吨[8]。四川攀枝花－西昌是我国最大的钒钛磁铁矿产区，该地区地质构造特殊，拥有典型的双层地壳结构，其矿床分布在攀枝花市、盐边县红格镇、内江市白马镇、西昌市太和镇等地，形成南北向成矿带，是我国特种钢铁矿石重要供应基地；而河北承德地区也拥有大量的钒钛磁铁矿，探明储量居全国第二，富含钒、钛、硫等有价元素，该地区的钒钛磁铁矿主要分布在隆化县、兴隆县、宽城县以及双滦县，其矿石结构松散、硬度低，利于开采与选矿[9]；新疆哈密地区的钒钛磁铁矿储量超过10亿吨，其超低品位钒钛磁铁矿呈透镜状或脉状，主要分布在大南湖岛弧带内，已形成从精矿到钛材的完整产业链[10]，为我国钒钛资源多元化开发提供了重要支撑。

氧化球团在提高冶金性能、改善炉料结构及降低污染等方面具有显著优势。为了推动钢铁行业向更加环保、高效和可持续的方向发展，球团矿在高炉原料中的使用占比越来越高[11-13]。近年来，相关领域研究人员对钒钛磁铁矿球团的氧化固结机理进行了深入研究。黄柱成等[14]研究了焙烧温度对球团性能的影响，结果表明：高温焙烧有助于提高球团的致密性；随着温度的升高，Fe_3O_4含量和孔隙率降低。陈许玲等[15]发现，钒钛磁铁矿球团的氧化较为困难，需要更长的预热时间和较高的焙烧温度。蒙飞宇等[16]研究了钒钛磁铁矿的氧化固结行为，结果表明：通过生球制备参数和预热、焙烧制度的改善，并加强氧化气氛，可显著改善球团的氧化能力和焙烧固结强度，制备的氧化球团抗压强度达到2 028 N/P。CHEN等[17]通过焙烧试验，确定了钒钛磁铁矿球团的最佳焙烧条件为1 526 ℃下焙烧20 min。杨锐[18]研究表明，在925 ℃预热12 min和1 225 ℃焙烧14 min的条件下，预热球和焙烧球的抗压强度分别为437 N/P和2 538 N/P。

目前，关于新疆哈密地区钒钛磁铁矿球团的研究还较少，其氧化行为和固结机理还不明确。本文以该钒钛磁铁矿为研究对象，在不同热工参数下，开展球团预热、焙烧试验，确定钒钛磁铁矿球团生产的最优热工参数；以XRD、SEM-EDS等手段研究钒钛磁铁矿球团物相和微观形貌的演变规律，深入探讨球团的氧化行为和焙烧固结机理，以期为该钒钛磁铁矿在球团生产工艺上的应用提供依据。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验选用新疆哈密地区的一种钒钛磁铁矿为原料，表1为其化学成分，表2为其粒度组成和比表面积，其物相组成如图1所示。由表1、表2和图1可知，该钒钛磁铁矿的全铁质量分数为60.22%，FeO和TiO_2质量分数分别为25.30%和5.20%，其铁物相主要由Fe_3O_4、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$、$FeTiO_3$和少量Fe_2VO_4组成。该矿粒度小于0.074 mm的颗粒占比超过80%，符合球团矿生产的粒度要求。膨润土的化学成分在表1中列出，基本性能指标如表3所示。由表1及表3可知，该膨润土SiO_2质量分数为58.61%，Al_2O_3质量分数为18.21%，其性能较优适用于生球的制备。

1.2 试验方法

试验过程主要包括球团的制备和预热焙烧试

中国知网 https://www.cnki.net

表 1　试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　The chemical composition and loss on ignition of the test raw materials　%

原料名称	TFe	FeO	TiO_2	V_2O_5	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Na_2O	烧损
钒钛磁铁矿	60.22	25.30	5.20	0.75	3.73	0.84	3.25	1.46	0.12	-2.01
膨润土	2.40	0.15	—	—	58.61	3.05	18.21	—	4.56	10.50

表 2　钒钛磁铁矿的粒度组成和比表面积

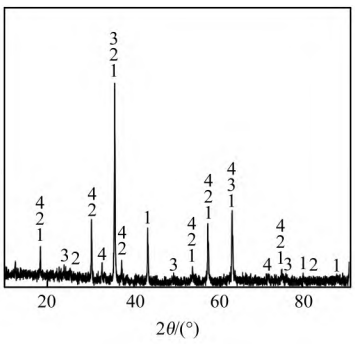
Table 2　Particle size distribution and specific surface area of vanadium-titanium magnetite

粒度组成(质量分数)/%			比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
≥0.074 mm	[0.045,0.074) mm	<0.0045 mm	
11.06	31.03	57.91	1 216

表 3　膨润土的基本性能指标

Table 3　Basic performance indicators of bentonite

膨胀指数/($mL \cdot g^{-1}$)	吸水率/%	吸蓝量/[$g \cdot (100\ g)^{-1}$]	蒙脱石质量分数/%	<0.074 mm 粒级占比(200 目过筛率)/%
41	316	33.20	72.95	98.80



1—Fe_3O_4；2—$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$；3—$FeTiO_3$；4—Fe_2VO_4。

图 1　钒钛铁精矿的物相组成

Fig. 1　Phase composition of the vanadium-titanium magnetite

验。① 球团的制备。将钒钛磁铁矿粉和膨润土分别烘干后，球磨 15 min 至粒度小于 0.074 mm。将 2% 膨润土加入钒钛磁铁矿粉中混合，静置 20 min。使用∅1 000 mm 的圆盘造球机进行生球制备，设定转速为 18 r/min、倾斜角度为 45°，控制水分在 8% 左右、造球 18 min，筛选出直径为 10～15 mm 合格生球供后续试验使用。② 球团的预热焙烧。将合格生球置于刚玉坩埚中，在 105 ℃下干燥 4 h。随后，在管式电阻炉中进行球团的预热、焙烧试验。预热及焙烧后球团的抗压强度依据《用于高炉和直接还原原料的铁矿球团确定压碎强度》(ISO 4700:2007 EN) 标准测定，孔隙率依据《铁矿石表观密度、真密度和孔隙率的测定》(GB/T 24586—2009) 标准测量。

球团试样的物相结构和显微结构分别采用 D8 Advance X 射线衍射仪和 Tescan 扫描电镜(SEM-EDS)进行检测和分析，相关参数参照文献[19]。

2　结果与讨论

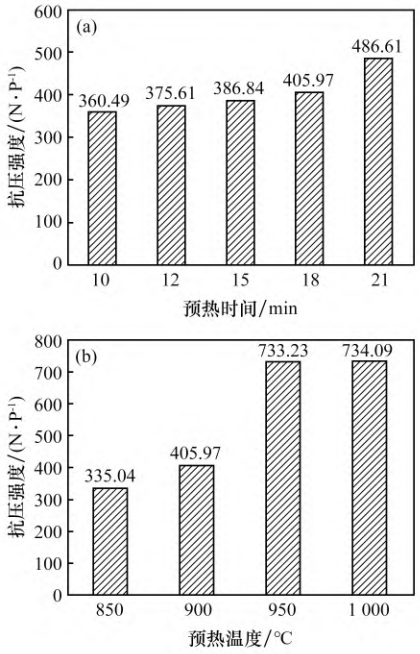
2.1　钒钛磁铁矿球团的预热焙烧特性

2.1.1　预热条件对预热和焙烧球团性能的影响

在焙烧温度为 1 200℃、焙烧时间为 20 min 的条件下，研究不同预热时间和温度对预热球和焙烧球抗压强度的影响。结果分别如图 2～4 所示。

由图 2 可以看出，预热球的抗压强度随着预热时间的增加和预热温度的提高而逐步提高。在预热时间处于 9～21 min 时，预热球的抗压强度由 360.49 N/P 缓慢增加至 486.61 N/P；而当预热温度从 900 ℃提高到 950 ℃时，预热球的抗压强度大幅提高，由 405.97 N/P 迅速增至 733.23 N/P。由图 3 可知，在预热时间为 9～15 min 时，焙烧球的抗压强度变化不明显，但在 18 ～21 min 时球团抗压强度显著增大，此时均超过 2 400 N/P，符合企业对球团入炉强度的要求。当预热温度从850 ℃上升到 900 ℃时，焙烧球强度明显增加，但超过 900 ℃后，在 950～1 000 ℃时，焙烧球强度出现不同程度的下降。可知，当预热温度超过 900 ℃时球团的抗压强度不能进一步提升，这可能是过高的预热温度致使球团外层结壳，致密的外壳阻

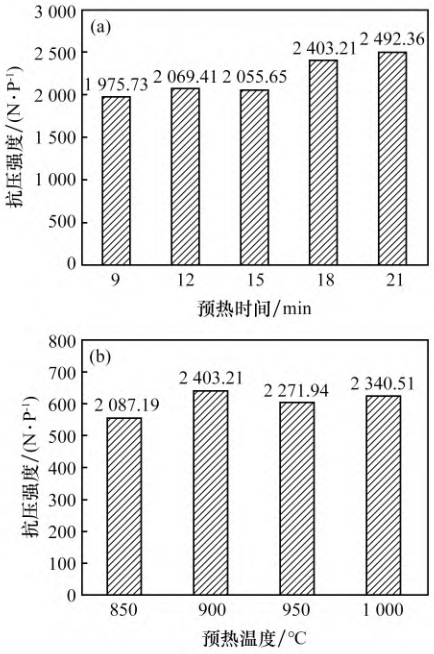
中国知网　https://www.cnki.net



(a) 预热时间; (b) 预热温度

图 2 不同预热条件下预热球的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of preheated pellets under different preheating conditions

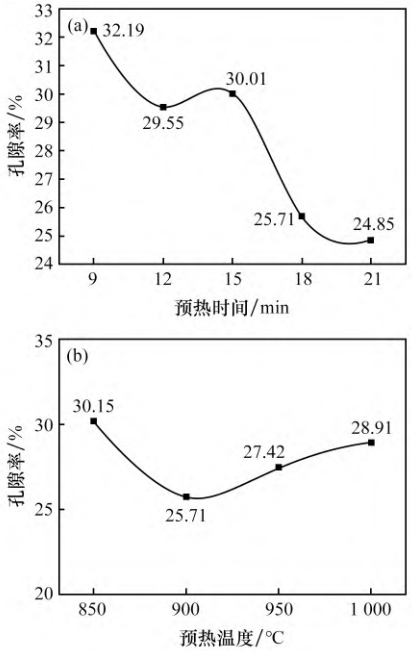


(a) 预热时间; (b) 预热温度

图 3 不同预热条件下焙烧球的抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of roasted pellets under different preheating conditions

碍了氧离子的扩散，进而降低了氧化反应的速度。由图 4 可知，当预热时间为 9 ~ 15 min 时，焙烧球的孔隙率由 30.01% 降至 24.85%。当预热温度从 850 ℃升高至 900 ℃时，球团中颗粒之间连接更加紧密，因此孔隙率呈现下降趋势。然而，当继续升高温度至 950 ℃时，球团表面形成致密外壳，氧化速率降低，孔隙率升高。随着预热条件的变化，孔隙率与抗压强度之间呈负相关关系。综上所述，焙烧球的最佳预热制度: 预热时间为 18 min，预热温度为 900 ℃。



(a) 预热时间; (b) 预热温度

图 4 不同预热条件下焙烧球的孔隙率

Fig. 4 Porosity of roasted pellets under different preheating conditions

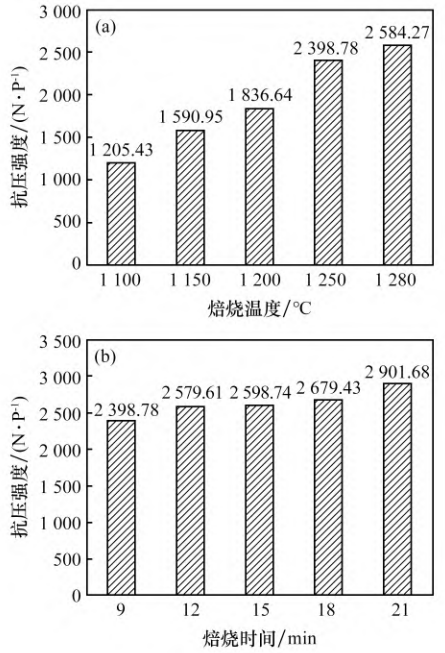
2.1.2 焙烧条件对焙烧球团抗压强度的影响

在预热温度为 900 ℃、预热时间为 18 min 时，焙烧温度和时间对球团抗压强度和孔隙率的影响分别如图 5、6 所示。

由图 5 可以看出，随着焙烧温度的增加，焙烧球的抗压强度持续增大。当焙烧温度达到 1 250 ℃时，焙烧球的抗压强度达到了 2 398.78 N/P，主要由于赤铁矿的再结晶、晶格缺陷的消除以及晶粒间接触面积的增大，强化了晶粒间的连接。而随着时间的增加，球团的抗压强度也持续增大，但增加幅度较小。当焙烧 12 min 时，抗压强度达到 2 579.61 N/P，符合生产要求。由图 6 可以看出，随着焙烧温度和时间的增加，球团的孔隙率均出现下降的趋势。在 1 250 ℃下焙烧时，孔隙率降至 29.51%; 在焙烧

中国知网 https://www.cnki.net

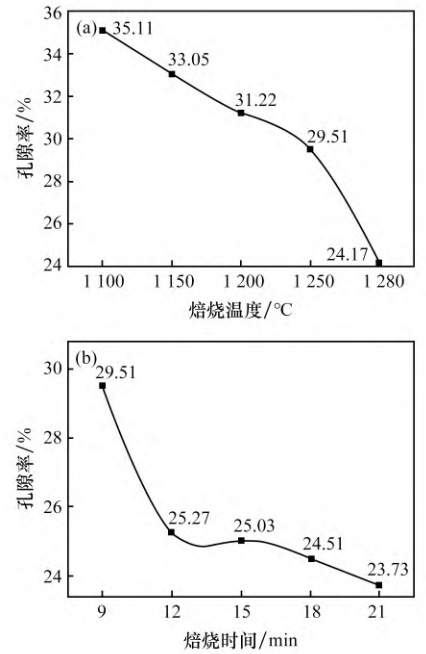
时间为 12 min 时，孔隙率降至 25.27%。综合分析，最佳焙烧制度：焙烧温度为 1 250 ℃，焙烧时间为 12 min。



(a) 焙烧温度；(b) 焙烧时间

图 5　不同焙烧条件下焙烧球的抗压强度

Fig. 5　Compressive strength of roasted pellets under different roasting conditions



(a) 焙烧温度；(b) 焙烧时间

图 6　不同焙烧条件下焙烧球的孔隙率

Fig. 6　Porosity of roasted pellet under different roasting conditions

2.2　钒钛磁铁矿球团的氧化焙烧行为

2.2.1　焙烧温度对球团氧化及性能的影响

为揭示钒钛磁铁矿的氧化焙烧行为，在焙烧时间为 20 min 的条件下，对干燥球团分别在 300、500、600、800、1 000、1 200 ℃以及 1 280 ℃下进行焙烧试验，并测定焙烧后球团的 FeO 质量分数。根据式(1)计算氧化度，结果如图 7 所示。不同焙烧温度下球团的抗压强度如图 8 所示。

$$\alpha = \frac{C_0 - C_T}{C_0} \tag{1}$$

式中：α 为球团的氧化度，%；C_T 为温度 T 下氧化后球团中 FeO 的质量分数，%；C_0 为氧化前球团中 FeO 的质量分数，%。

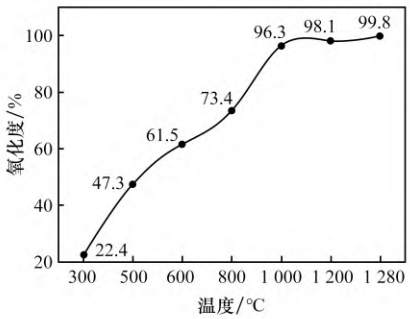


图 7　不同焙烧温度下球团的氧化度

Fig. 7　Degree of oxidation of pellets at different roasting temperatures

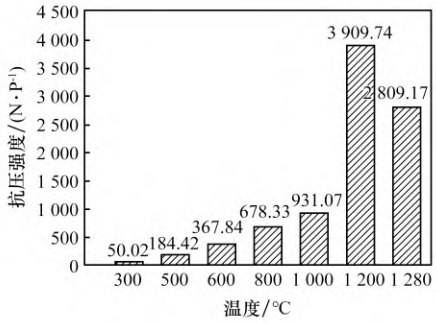


图 8　不同焙烧温度下球团的抗压强度

Fig. 8　Compressive strength of pellets at different roasting temperatures

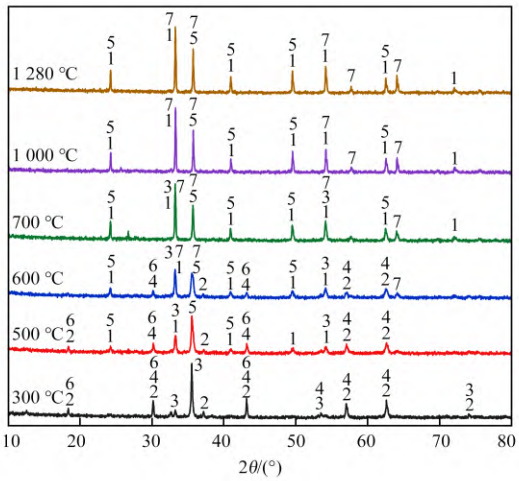
由图 7 可见，球团的氧化度随温度升高而显著增加。在 300～500 ℃的温度范围内，球团的氧化度较低；随着温度升高至 800 ℃，氧化度增至 73.4%；当温度达到 1 000 ℃时，氧化度进一步提升至 96.3%；在 1 280 ℃时，球团几乎完全氧化。图 8 表明，球团抗压强度在 300～1 100 ℃时呈近乎线性增加的趋势。当温度升至 1 200 ℃时，抗压

中国知网　https://www.cnki.net

强度急剧升至 3 909.74 N/P。这一变化归因于低温下磁铁矿氧化不完全，晶体结构不完善，限制了抗压强度的提升，而高温下磁铁矿氧化彻底，赤铁矿再结晶并生成黏结液相，增强了晶粒之间的连接，导致抗压强度显著增加。

2.2.2 焙烧温度对球团物相组成的影响

在 300～1 280 ℃焙烧温度下，球团的物相结构分析结果如图 9 和表 4 所示。在 300 ℃时，球团的主要物相包括 Fe_3O_4、$FeTiO_3$、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$ 和 Fe_2VO_4，该温度下球团的物相组成与干燥球团几乎一致。



1—Fe_2O_3；2—Fe_3O_4；3—$FeTiO_3$；4—$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$；5—Fe_2VO_5；6—Fe_2VO_4；7—Fe_9VO_{15}。

图 9 不同焙烧温度下球团的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD patterns of pellets at different roasting temperatures

表 4 不同焙烧温度下球团的物相分析结果

Table 4 Phase composition of pellets at different roasting temperatures

焙烧温度/℃	物相组成
300	Fe_3O_4、$FeTiO_3$、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$、Fe_2VO_4
500	Fe_3O_4、$FeTiO_3$、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$、Fe_2VO_4、Fe_2O_3、Fe_2TiO_5
600	Fe_3O_4、$FeTiO_3$、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$、Fe_2VO_4、Fe_2O_3、Fe_2TiO_5、Fe_9TiO_{15}
800	$FeTiO_3$、Fe_2O_3、Fe_2TiO_5、Fe_9TiO_{15}
1 000	Fe_2O_3、Fe_2TiO_5、Fe_9TiO_{15}
1 200	Fe_2O_3、Fe_2TiO_5、Fe_9TiO_{15}
1 280	Fe_2O_3、Fe_2TiO_5、Fe_9TiO_{15}

当焙烧温度升至 500 ℃时，Fe_3O_4、$FeTiO_3$、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$ 和 Fe_2VO_4 的衍射峰仍存在，但 Fe_3O_4 的衍射峰强度有所减弱。同时，Fe_2O_3 和 Fe_2TiO_5 的衍射峰开始出现，这表明在此温度阶段，如式(2)、(3)所示的氧化反应将发生。

$$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4 + 0.25O_2 = 0.25FeTiO_3 + 1.25Fe_2O_3 \quad (2)$$

$$Fe_2O_3 + FeTiO_3 = Fe_2TiO_5 + FeO \quad (3)$$

当焙烧温度升至 600 ℃时，$FeTiO_3$ 和 Fe_2TiO_5 的衍射峰强度增强，Fe_9TiO_{15}(钛赤铁矿)衍射峰出现，发生了如式(4)所示的反应。

$$4Fe_2O_3 + FeTiO_3 = 4Fe_2O_3 \cdot FeTiO_3 \quad (4)$$

当焙烧温度达到 800 ℃时，Fe_3O_4、Fe_2VO_4 和 $Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$ 的衍射峰完全消失，Fe_3O_4 已完全氧化，发生了如式(5)、(6)所示的反应。

$$Fe_3O_4 + 0.25O_2 = 1.5Fe_2O_3 \quad (5)$$

$$2Fe_2VO_4 = 2FeO + Fe_2O_3 + V_2O_3 \quad (6)$$

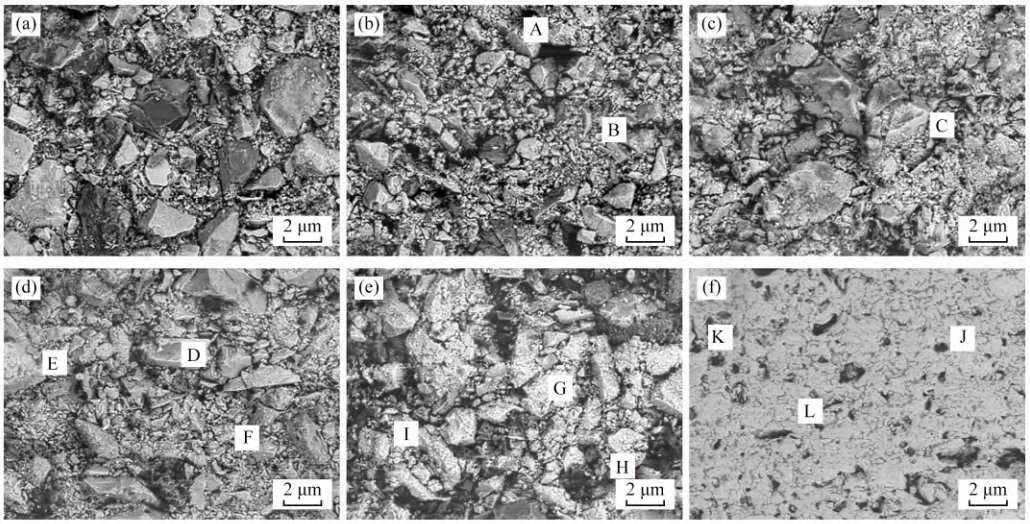
当焙烧温度进一步增至 1 000 ℃，$FeTiO_3$ 衍射峰逐渐消失，而 Fe_9TiO_{15} 衍射峰逐渐增强。当温度为 1 280 ℃时，物相组成基本没有变化，只是部分物相的衍射峰强度发生了增强或减弱的现象。1 000～1 280 ℃阶段的主要物相组成为 Fe_2O_3、Fe_2TiO_5、Fe_9TiO_{15}。

氧化初期钒钛磁铁矿球团的主要物相为 Fe_3O_4、$FeTiO_3$、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$、Fe_2VO_4 及 $MgCO_3$。在焙烧过程中，磁铁矿逐渐被氧化成赤铁矿，而 $Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$ 氧化生成 $FeTiO_3$ 和 Fe_2TiO_5，其中 $FeTiO_3$ 进一步转化生成 Fe_9TiO_{15}，Fe_2VO_4 生成相应的固溶体。

2.2.3 焙烧温度对球团微观形貌的影响

在 300～1 280 ℃焙烧温度下，球团的显微结构及能谱分析结果分别如图 10 和表 5 所示。在 300 ℃时，铁矿物颗粒基本保持原有的状态，比较松散。这主要是因为在此温度下，氧化反应进行比较慢。当焙烧温度提高到 500 ℃时，磁铁矿开始逐渐氧化成赤铁矿，同时生成了钛酸铁。此时颗粒间的孔隙变小，整体结构变得更加紧密，抗压强度有所提升。升温至 600 ℃时，赤铁矿和钛铁矿氧化生成钛赤铁矿，放出的热量促进颗粒之间运动，孔隙进一步减小，抗压强度继续增大。

中国知网 https://www.cnki.net



焙烧温度/℃：(a) 300；(b) 500；(c) 600；(d) 800；(e) 1 000；(f) 1 280

A～L—不同扫描点。

图 10　不同焙烧温度下球团的 SEM 分析

Fig. 10　SEM analysis of pellets at different roasting temperatures

表 5　不同焙烧温度下球团的 EDS 分析结果(质量分数)

Table 5　EDS analysis results of pellets at different roasting temperatures　%

扫描点	O	Fe	Ti	V	Si	Al	Ca
A	17.90	80.18	0.40	0.45	0.34	0.27	0.01
B	15.44	73.55	2.02	0.77	3.76	2.00	0.99
C	25.35	60.84	2.53	4.01	1.96	3.05	2.26
D	18.57	75.21	3.62	1.20	0.31	1.08	0.01
E	14.51	77.22	3.15	1.10	2.52	1.05	0.45
F	28.80	56.05	3.48	3.76	2.89	2.15	2.87
G	18.46	74.20	4.51	1.24	0.41	0.93	0.25
H	7.73	86.13	4.32	0.86	0.26	1.22	0.08
I	22.59	68.10	3.47	2.14	0.64	1.89	1.17
J	18.89	74.42	8.11	0.42	0.98	1.51	0.28
K	13.30	75.80.	4.21	0.97	3.10	2.48	0.14
L	19.89	67.80	3.25	1.45	2.94	2.04	1.43

在 800 ℃时，球团的微观结构变化不大。当焙烧温度升至 1 000 ℃时，孔隙减少，晶粒接触面积增大，晶体桥发育良好，低熔点液相生成并填充晶粒间隙，形成致密结构。当温度为 1 280 ℃时，晶体桥进一步增大，液相均匀分布，结构紧凑，抗压强度较大。

结合能谱分析得出，500 ℃时生成浅灰色颗粒状赤铁矿相(A 处)和钛酸铁相(B 处)，600 ℃时生成深灰色钛赤铁矿相(C 处)。在 1 000～1 280 ℃时，观察到浅灰色片状赤铁矿相(G、J 处)、钛酸铁相(H、K 处)和深灰色钛赤铁矿相(I、L 处)。而且到 1 280 ℃时，赤铁矿再结晶效果显著，其聚集长大、连接成片，形成一个致密的整体。

3　球团的氧化固结机理

图 11 为钒钛磁铁矿球团固结机理示意。由图 11 可见，钒钛磁铁矿球团的固结过程可分为三个阶段：

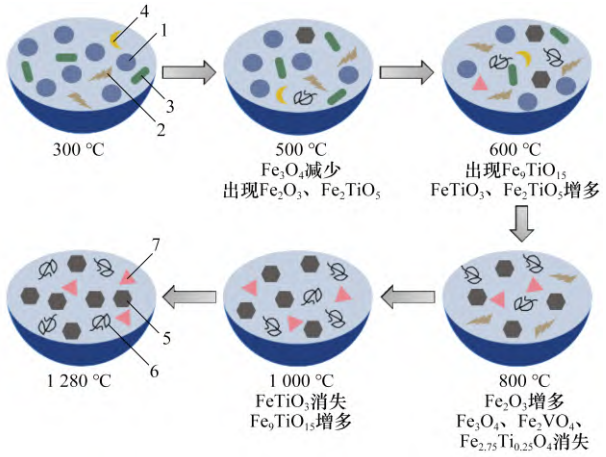
(1) 在氧化前期(300～500 ℃)，钒钛磁铁矿球团的主要矿物组成包括磁铁矿、钛铁矿、钛磁铁矿以及钒磁铁矿，发生磁铁矿和钛磁铁矿的氧化反应。由于焙烧温度较低，氧化反应缓慢，导致球团孔隙较大，颗粒分布松散，抗压强度较低。

(2) 随着焙烧温度升高(600～1 000 ℃)，磁铁矿和钛磁铁矿进一步氧化，生成赤铁矿和钛酸铁；同时，钛铁矿与赤铁矿发生反应，生成钛赤铁矿，钒磁铁矿转化为固溶体。此阶段小颗粒逐渐聚集，孔隙减少，球团结构致密，抗压强度提升。主要物相为赤铁矿、钛铁矿、钛酸铁和钛赤铁矿。

(3) 在氧化后期(1 000～1 280 ℃)，赤铁矿晶粒再结晶并聚集，液相逐渐生成。晶粒间孔隙减少，形成高度致密结构，液相填充并黏结晶粒，

中国知网　https://www.cnki.net

显著提高抗压强度。主要物相为赤铁矿、钛酸铁和钛赤铁矿，物相组成稳定，氧化固结过程完成，抗压强度达到较高水平。



1—Fe_3O_4；2—$FeTiO_3$；3—$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4$；4—Fe_2VO_4；5—Fe_2O_3；6—Fe_2TiO_5；7—Fe_9TiO_{15}。

图 11 钒钛磁铁矿球团固结机理示意

Fig. 11 Schematic diagram of consolidation mechanism of vanadium-titanium magnetite pellets

由以上分析可知，该钒钛磁铁矿球团的固结主要依赖于颗粒间的紧密连接与孔隙率的降低。四川攀西地区钒钛磁铁矿因矿石中钛、镁固溶，氧化速率慢，固结强度受限；河北承德地区矿石结构松散，颗粒连接弱，液相生成少，孔隙率高，固结强度较低[15]。相比之下，该钒钛磁铁矿球团在固结过程中需要更长的预热时间以促进氧化反应充分进行，从而获得较高的抗压强度。

4 结 论

(1) 利用某钒钛磁铁矿制备球团，最佳的预热和焙烧工艺条件：在预热温度 900 ℃下保温 18 min，在焙烧温度 1 250 ℃下保温 12 min，此时焙烧球的抗压强度达到 2 579.61 N/P。

(2) 该钒钛磁铁矿球团在固结过程中铁、钛氧化物依次发生以下转变：$Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3$、$Fe_{2.75}Ti_{0.25}O_4 \rightarrow FeTiO_3/Fe_2TiO_5$、$FeTiO_3 \rightarrow Fe_9TiO_{15}$。氧化焙烧过程促进了球团内赤铁矿再结晶，增强了晶粒间结合，孔隙率降低，内部结构趋于致密。

(3) 球团的氧化固结主要分为三个阶段：初期低温氧化缓慢，结构松散；中期温度升高促使晶粒聚集与相变，结构趋于致密；后期高温下赤铁矿再结晶及液相生成填充期间，球团形成一个紧密的整体，使得抗压强度显著提升。

参考文献:

[1] 徐文杰. 浅谈钢铁企业的节能和环保管理工作[J]. 冶金与材料,2023,15(6):163-165.
XU Wenjie. Energy saving and environmental protection management in iron and steel enterprises[J]. Metallurgy and Materials,2023,15(6):163-165.

[2] 杜学强,郦秀萍,周继程,等. 铁前系统能耗分析与评价[J]. 钢铁,2023,58(10):163-171;182.
DU Xueqiang,LI Xiuping,ZHOU Jicheng,et al. Energy consumption analysis and energy efficiency evaluation of iron-making system[J]. Iron and Steel,2023,58(10):163-171;182.

[3] 杜颖,罗芝宝. 炼铁行业能源介质消耗现状及节能减排措施研究[J]. 冶金与材料,2025,17(2):25-27.
DU Ying,LUO Zhibao. Research on the status quo of energy medium consumption and energy saving and emission reduction measures in ironmaking industry[J]. Metallurgical and Materials,2025,17(2):25-27.

[4] 王新东,金永龙. "双碳"背景下高炉使用高比例球团的展望[J]. 过程工程学报,2022,22(10):1379-1389.
WANG Xindong,JIN Yonglong. Prospect on high ratio pellet utilized in blast furnace under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2022,22(10):1379-1389.

[5] MERAJ M,PRAMANIK S,PAL J. Role of MgO and its different minerals on properties of iron ore pellet[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2016,69(6):1141-1153.

[6] DE MORAIS OLIVEIRA V,DOMINGUES A L A,BAGATINI M C,et al. Granulation behavior of an iron ore sintering mixture containing high grade pellet feed with different specific surface[J]. ISIJ International,2020,60(11):2376-2384.

[7] 马家源,孙希文,盛世雄. 钒钛磁铁矿高炉冶炼的强化[J]. 钢铁,2000,35(1):4-8;12.
MA Jiayuan,SUN Xiwen,SHENG Shixiong. Intensified smelting of vanadium and titanium magnetite in blast furnace[J]. Iron and Steel,2000,35(1):4-8;12.

[8] 张建廷,陈碧. 攀西钒钛磁铁矿主要元素赋存状态及

中国知网 https://www.cnki.net

回收利用[J]. 矿产保护与利用,2008,28(5):38 – 41.
ZHANG Jianting,CHEN Bi. Occurrence and recycling of main elements in Panxi vanadium-titanium magnetite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2008,28(5):38 – 41.

[9] 江少卿,郝梓国,孙静,等. 河北承德大庙黑山钒钛磁铁矿床岩石地球化学特征[J]. 地质与勘探,2013,49(3):458 – 468.
JIANG Shaoqing, HAO Ziguo, SUN Jing, et al. Geochemistry of the Heishan V-Ti-bearing magnetite deposit in the damiao rocks of Chengde,Hebei Province [J]. Geology and Exploration,2013,49(3):458 – 468.

[10] 李庆禄. 哈密低品位钒钛磁铁矿选矿研究[J]. 中国资源综合利用,2017,35(10):10 – 13.
LI Qinglu. Study on mineralization of low grade vanadium titanium magnetite in Hami [J]. China Resources Comprehensive Utilization,2017,35(10):10 – 13.

[11] 刘庆华. 钒钛磁铁矿生产氧化球团试验研究[J]. 矿业工程,2020,18(3):50 – 53.
LIU Qinghua. Experimental study on oxidized pellet production of vanadium titano-magnetite [J]. Mining Engineering,2020,18(3):50 – 53.

[12] 范建军,王永章,史永林,等. 链箅机—回转窑工艺生产碱性球团矿工业试验[J]. 钢铁研究学报,2021,33(5):394 – 399.
FAN Jianjun, WANG Yongzhang, SHI Yonglin, et al. Industry trials on production of fluxed pellets by grate-rotary process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021,33(5):394 – 399.

[13] ZHANG S,ZONG Y B,HUANG Y,et al. Investigation of basicity on compressive strength and oxidation induration mechanism of vanadium-titanium magnetite pellets [J]. Steel Research International,2024,95(10):2400461.

[14] 黄柱成,易凌云,彭虎,等. 焙烧温度对氧化球团性质及其气基直接还原过程的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(8):2889 – 2895.
HUANG Zhucheng,YI Lingyun,PENG Hu,et al. Effects of roast temperature on properties of oxide pellets and its gas-based direct reduction [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2012,43(8):2889 – 2895.

[15] 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.
CHEN Xuling,HUANG Yunsong,FAN Xiaohui,et al. Oxidation roasting behavior and concretion properties of vanadium-titanium magnetite pellet [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016,47(2):359 – 366.

[16] 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.

[17] CHEN W B,DONG Z Q,JIAO Y,et al. Preparation, sintering behavior and consolidation mechanism of vanadium-titanium magnetite pellets [J]. Crystals,2021, 11(2):188.

[18] 杨锐. 钒钛磁铁矿氧化球团制备研究[J]. 四川冶金,2025,47(1):42 – 46.
YANG Rui. Preparation of oxidized pellet from vanadium-titanium magnetite [J]. Sichuan Metallurgy, 2025, 47(1):42 – 46.

[19] 项心如. 钒钛磁铁矿球团氧化固结机理研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2025.
XIANG Xinru. Study on oxidation consolidation mechanism of vanadium titanomagnetite pellets [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2025.

(上接第 37 页)

YAN Zhiwu,ZHANG Jianliang,ZHANG Yapeng,et al. Effects of SiO_2 on the metallurgical properties and microstructure of sinter [J]. Chinese Journal of Engineering,2016,38(7):913 – 919.

[25] 郭永春,郑海燕,胡心光,等. $CaO-SiO_2-MgO-Al_2O_3$ 四元渣系 Al_2O_3 活度预测模型[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(5):652 – 657.
GUO Yongchun,ZHENG Haiyan,HU Xinguang,et al. Prediction model of Al_2O_3 activity in $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO$ quaternary slag system [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2021,42(5):652 – 657.

中国知网　https://www.cnki.net