添加钙盐对钒钛铁精矿氧化球团物相、强度及孔隙率的影响

吴恩辉，李 军，徐 众，侯 静，张士举，李 宏，张 远
（攀枝花学院 a. 钒钛学院；b. 钒钛资源综合利用四川省重点实验室，四川 攀枝花 617000）

摘要：为了响应国家“双碳”目标，解决钒钛铁精矿酸性氧化球团不能满足高炉渣系对钙、镁成分要求的问题，本文以钒钛铁精矿为原料，研究氧化温度、氧化时间、钙盐添加量和膨润土添加量对氧化球团物相组成、抗压强度和孔隙率的影响。试验结果表明：随着氧化温度的升高，钒钛铁精矿主要发生磁铁矿转变为赤铁矿和钛铁矿转为铁板钛矿两个氧化过程；随着氧化温度的升高和氧化时间的延长，氧化球团抗压强度提高，孔隙率降低；随着钙盐添加量的增加，氧化球团抗压强度显著下降，孔隙率明显增大；在膨润土添加量为 0.75%，氧化时间为 120 min 和氧化温度为 1 200 ℃的条件下，添加 1.5% 氢氧化钙的氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为 3 449.9 N/P 和 22.70%；添加 1.5% 碳酸钙的氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为 3 168.6 N/P 和 25.25%。本文研究结果可为提高钒钛铁精矿高炉入炉比奠定原料基础，进一步降低高炉冶炼工艺的能耗水平。

关键词：钒钛铁精矿；氧化球团；抗压强度；孔隙率
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0039－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.073

Effect of calcium salt on phase, strength and porosity of oxidized pellets of vanadium-ilmenite concentrate

WU Enhui, LI Jun, XU Zhong, HOU Jing, ZHANG Shiju, LI Hong, ZHANG Yuan
(Panzhihua University a. College of Vanadium and Titanium; b. Sichuan Provincial Key-Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In order to respond to the national “double carbon” goal and solve the problem that the acid oxidation pellets of vanadium-ilmenite concentrate cannot meet the requirements of the blast furnace slag system for the ingredient requirements of calcium and magnesium, the effects of oxidation temperature, oxidation time, calcium salt addition and bentonite addition on the phase composition, compressive strength and porosity of the oxidized pellet are studied. The results show that with the increase of oxidation temperature, there are two oxidation processes in which magnetite is converted into hematite and ilmenite is converted into iron plate perovskite; with the increase of oxidation temperature and the extension of oxidation time, the compressive strength of oxidation pellets increases and the porosity decreases; with the increase of calcium salt addition, the compressive strength of oxidized pellets is decreased significantly, and the porosity is increased significantly; the compressive strength and porosity of the oxidized pellets with 1.5% calcium hydroxide are 3 449.9 N/P and 22.70%, respectively, under the conditions of 0.75% bentonite addition, 120 min oxidation time and

收稿日期：2023－07－23；**修回日期**：2023－10－01
基金项目：2022 年攀西战略资源创新开发专项资金资助项目(LB-SK-HT23－0432)；绿色催化四川省高校重点实验室开放基金资助项目(LYJ2102)；材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金资助项目(2022CL31)；太阳能技术集成及应用推广四川省高等学校重点实验室开放基金资助项目(TYNSYS－2020－Z－01)；“工业固态废弃物土木工程综合开发利用”四川省高等学校重点实验室开放基金资助项目(FQWLY－2021－Z－08)
作者简介：吴恩辉(1984—)，男，博士，副教授，从事钒钛磁铁矿综合利用方面的研究工作。

1 200 ℃;the compressive strength and porosity of the oxidized pellets with 1.5% calcium carbonate are 3 168.6 N/P and 25.25%, respectively. The results can lay a raw material foundation for improving the blast furnace inlet ratio of vanadium-ilmenite concentrate and further reduce the energy consumption level of blast furnace smelting process.

Key words: vanadium-ilmenite concentrate; oxidized pellets; compressive strength; porosity

随着我国“双碳”目标的提出和深入实施，钢铁行业绿色低碳生产工艺和装备升级受到广泛关注。已有研究表明[1]，球团矿的生产能耗和有害气体排放约为烧结矿的一半。在氢冶金等革命性技术尚未成熟应用之前，提高球团矿的入炉比例是钢铁行业节能降耗的重要手段之一。钒钛磁铁矿作为我国的重要战略资源之一，是钒、钛、铬、镓和钪等战略金属元素的重要来源矿物，其综合利用的主流工艺仍为高炉—转炉工艺。

林文康等[2]对高炉冶炼钒钛矿炉料结构进行了分析和应用实践，结果表明：提高氧化球团的入炉比例后，高炉的利用系数提高、技术经济指标大幅度改善。国内外研究人员对钒钛磁铁矿氧化球团的制备工艺已有较多研究，例如，对于钒钛磁铁矿的氧化过程，陈双印等[3]研究认为，提高预氧化温度有利于钛磁铁矿物相氧化为钛赤铁矿和铁板钛矿，且颗粒之间结构致密，氧化球团强度提高；陈许玲等[4]的研究表明，钒钛磁铁矿较普通磁铁矿难氧化，达到氧化球团质量标准需要更高的氧化温度或更长的氧化时间；李尉等[5]和汤卫东等[6]对钒钛磁铁矿的氧化动力学进行了详细探讨，结果表明，随着氧化温度的升高和氧化时间的延长，低熔点液相和赤铁矿晶粒之间能够形成连续的黏结相，氧化球团的强度提高，但是硅酸盐相和钙钛矿类物相的生成恶化了球团结构，使得氧化球团的最终物相为赤铁矿和钛赤铁矿；蒙飞宇等[7]研究发现，钒钛磁铁矿氧化球团的生产过程需要中低温长时间氧化和中高温焙烧；张志刚[8]和刘庆华[9]的研究表明，辊磨处理可以显著改善钒钛磁铁矿的成球性指数，降低预热温度和焙烧温度，氧化球团质量较好；张元波等[10]以MHA黏结剂替代膨润土制备钒钛磁铁矿氧化球团，在预热和焙烧条件一致的条件下，对比MHA和膨润土用量分别为0.25%、2.00%所制备的氧化球团，得到MHA球团的抗压强度略低，但TFe品位提高了1.11%；韩通等[11]的研究表明，辽西钒钛磁铁精矿不难氧化，预热球团在1 100 ℃下焙烧15 min，氧化球团的强度超过3 000 N/P；唐珏等[12]研究了进口高铬型钒钛磁铁矿配加量对氧化球团质量的影响，结果表明，当高铬型钒钛磁铁矿配比小于40%时，成品氧化球团质量可以满足高炉生产要求；罗全坤等[13]研究了钒钛矿添加量对氧化球团质量的影响，结果表明，当钒钛矿配比小于45%时，生产出的球团矿可以满足质量要求；SAMANTA等[14]对一种高钛型钛磁铁矿的氧化行为进行了研究，结果表明，在低温下不充分氧化时试验主要产物是赤铁矿和二氧化钛，较高温度下氧化时产物是铁板钛矿；此外，周祥等[15]研究了不同钛含量下氧化球团的矿相与冶金性能，结果表明，高钛球团的抗压强度和还原度均低于低钛球团。

上述研究对钒钛磁铁矿氧化球团生产工艺的优化具有重要指导意义，但均是针对钒钛磁铁矿酸性氧化球团开展的研究和探讨，而酸性氧化球团不能满足高炉渣系对钙、镁的成分要求，限制了其入炉比例的进一步提高[16]。因此，本文着重探讨碳酸钙和氢氧化钙的加入对钒钛铁精矿氧化过程的物相转变、氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响，得出适宜的氧化球团制备工艺参数，以期对钒钛磁铁矿氧化球团生产工艺参数进一步优化提供技术参考。

1 试验原料及方法

试验用钒钛铁精矿来自四川攀枝花某大型矿业公司，氢氧化钙(分析纯)、碳酸钙(分析纯)和膨润土(分析纯)来自天津某化学试剂厂。钒钛铁精矿的化学成分和粒度分布分别如表1、2所示，物相组成如图1所示。由表1可知，该钒钛铁精矿是一种高铬型钒钛铁精矿，其钒和铬的含量相当，且其氧化钙质量分数较低，仅为0.69%。由图1可知，该钒钛铁精矿主要由磁铁矿和钛铁矿两种物相组成。

表 1　钒钛铁精矿的主要化学成分(质量分数)

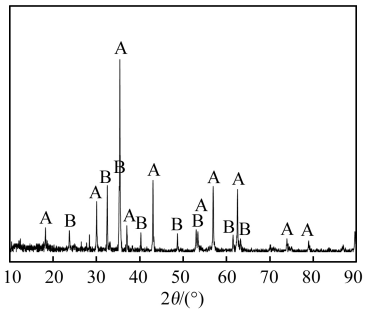
Table 1　Main chemical composition of the vanadium-ilmenite concentrate　%

Fe_3O_4	FeO	TiO_2	$V2O_5$	Cr_2O_3	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	SO_3	MnO
58.61	9.93	11.03	0.69	0.67	7.57	3.79	5.46	0.69	1.02	0.25

表 2　钒钛铁精矿的粒度组成

Table 2　Particle size composition of the vanadium-ilmenite concentrate　%

<45 μm	[45,75) μm	[75,125) μm	≥125 μm
14.9	53.8	23.2	8.1



A—Fe_3O_4；B—$FeTiO_3$。

图 1　钒钛铁精矿的物相组成

Fig. 1　Phase composition of the vanadium-ilmenite concentrate

试验过程中，首先将钒钛铁精矿、氢氧化钙(或碳酸钙)和膨润土按照设定比例混合均匀，并采用滚动成型方式对混合料进行造球，得到生球；使用电热鼓风干燥箱在 120 ℃的温度条件下烘干生球 2 h；烘干后，将球团置入刚玉坩埚，待高温箱式电阻炉炉温升至 300 ℃时将生球入炉；在球团焙烧过程中，由 300 ℃升至指定氧化温度的时间固定为 90 min；在设定氧化温度下焙烧设定时间后，立即取出球团并冷却至室温，得到氧化球团。使用压缩强度测定仪测试氧化球团样品的抗压强度，使用电子密度计测试氧化球团孔隙率，使用 X 射线衍射仪表征氧化球团的物相组成。

2　结果与讨论

2.1　氧化球团的物相转变

2.1.1　氢氧化钙

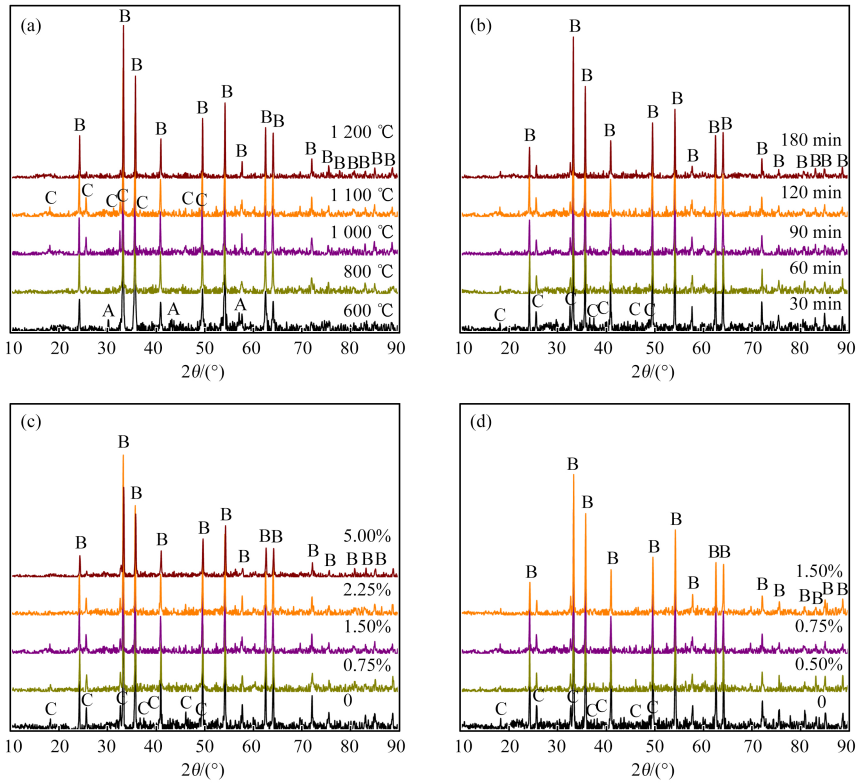
试验研究氧化温度、氧化时间、氢氧化钙添加量和膨润土添加量四个工艺参数对氧化球团物相组成的影响规律，结果如图 2 所示。

在氢氧化钙添加量为 1.5%、膨润土添加量为 0.75%、氧化时间为 120 min 的条件下，得到氧化温度对氧化产物的物相组成的影响规律如图 2(a)所示。由图 2(a)可以看出，在氧化温度为 600 ℃时，氧化球团的主要物相为赤铁矿和少量的磁铁矿，说明在此温度条件下，氧化过程进行尚不充分；当氧化温度升高至 800 ℃以上时，磁铁矿物相消失，铁板钛矿新相出现；当继续升高氧化温度时，铁板钛矿物相峰的强度提高；当氧化温度提高至 1 200 ℃时，赤铁矿峰强明显提升，峰宽变窄，说明其结晶程度较高。由此可知，随氧化温度的变化钒钛铁精矿主要发生磁铁矿转变为赤铁矿和钛铁矿转为铁板钛矿两个主要氧化过程，这与文献[3]和[5]的研究结果一致。在氢氧化钙添加量为 1.5%、膨润土添加量为 0.75%、氧化温度为 1 100 ℃的条件下，得到氧化时间对氧化产物的物相组成的影响规律见图 2(b)所示。由图 2(b)可以看出，在氧化时间为 30 min 时，钒钛铁精矿原料中的磁铁矿和钛铁矿物相消失，氧化球团的主要物相为赤铁矿和铁板钛矿，主要原因是在升温 90 min 时间内，钒钛铁精矿的氧化过程已经基本完成，继续延长氧化时间时，氧化球团的物相组成变化不大。

在氧化温度为 1 100 ℃、氧化时间为 90 min、膨润土添加量为 0.75% 的条件下，氢氧化钙添加量对氧化产物的物相组成的影响规律见图 2(c)所示。由图 2(c)可以看出，在氢氧化钙添加量为 0~5% 范围内，氧化球团的物相组成中未出现明显的含钙物相，其主要物相仍为赤铁矿和铁板钛矿。在氧化温度为 1 100 ℃、氧化时间为 90 min、氢氧化钙添加量为 1.5% 的条件下，得到膨润土添加量对氧化产物的物相组成的影响规律见图 2(d)所示。由图 2(d)可以看出，与氢氧化钙添加量的影响规律类似，在膨润土添加量为 0~1.5% 范围内，氧化球团的物相组成未发生明显变化，其主要物相仍为赤铁矿和铁板钛矿。

2.1.2　碳酸钙

试验研究氧化温度、氧化时间、碳酸钙添加



（a）氧化温度；（b）氧化时间；（c）氢氧化钙添加量；（d）膨润土添加量

A—Fe_3O_4；B—Fe_2O_3；C—$FeTi_2O_5$。

图 2 不同氧化工艺参数条件下氧化球团的物相组成

Fig. 2 Phase composition of oxidized pellets under different oxidation process parameters

量和膨润土添加量四个工艺参数对氧化球团物相组成的影响规律，结果如图 3 所示。

在碳酸钙添加量为 1.5%、膨润土添加量为 0.75%、氧化时间为 120 min 的条件下，得到氧化温度对氧化产物的物相组成的影响规律如图 3(a)所示。由图 3(a)可以看出：与添加氢氧化钙类似，在氧化温度为 600 ℃时，氧化球团中存在少量的磁铁矿组成，说明氧化过程进行尚不充分；当氧化温度升为 800～1 200 ℃时，氧化球团主要由铁板钛矿和赤铁矿两种物相组成；且随着氧化温度的提高，赤铁矿峰的强度明显提高，峰宽变窄，结晶程度不断提升。在碳酸钙添加量为 3%、膨润土添加量为 0.75%、氧化温度为 1 100 ℃的条件下，得到氧化时间对氧化产物的物相组成的影响规律如图 3(b)所示。由图 3(b)可以看出：在氧化时间为 30 min 时，氧化球团的主要物相组成为赤铁矿和铁板钛矿，说明在此条件下，钒钛铁精矿的氧化过程已经基本完成；继续延长氧化时间，氧化球团的物相组成变化不大。

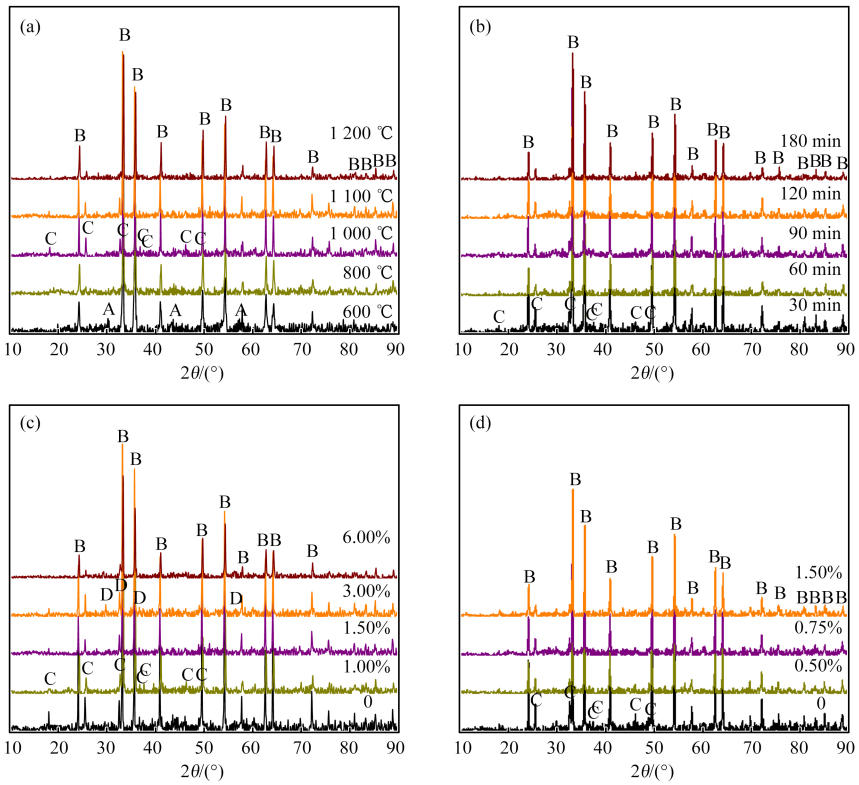
在氧化温度为 1 100 ℃、氧化时间为 90 min、膨润土添加量为 0.75% 的条件下，得到碳酸钙添加量对氧化产物的物相组成的影响规律如图 3(c)所示。由图 3(c)可以看出：在碳酸钙添加量小于 1.5%时，氧化球团的物相组成中未出现明显的含钙物相，其主要物相仍为赤铁矿和铁板钛矿；当碳酸钙添加量大于 3% 时，出现含钙物相钙铁榴石。在氧化温度为 1 100 ℃、氧化时间为 90 min、碳酸钙添加量为 3% 的条件下，得到膨润土添加量对氧化产物的物相组成的影响规律如图 3(d)所示。由图 3(d)可以看出，在膨润土添加量为 0～1.5%范围内，氧化球团的物相组成未发生明显变化，主要物相仍为赤铁矿和铁板钛矿。

2.2 抗压强度与孔隙率

2.2.1 氢氧化钙

试验研究氧化温度、氧化时间、氢氧化钙添加量和膨润土添加量四个工艺参数对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响，结果如图 4 所示。

在氢氧化钙添加量为1.5%、膨润土添加量为



（a）氧化温度；（b）氧化时间；（c）碳酸钙的添加量；（d）膨润土添加量

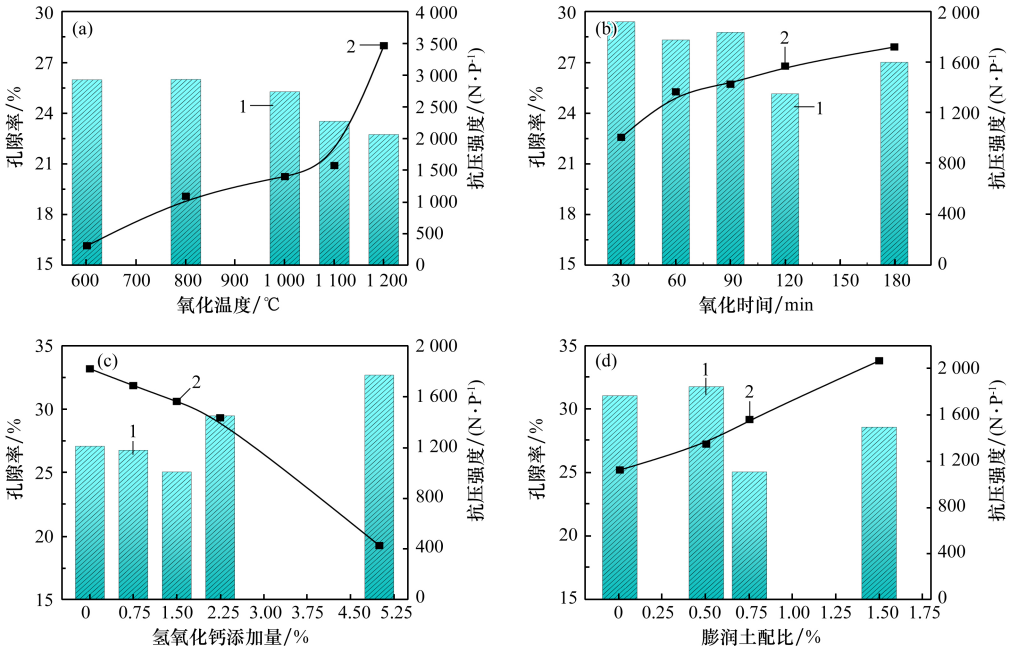
A—Fe_3O_4；B—Fe_2O_3；C—$FeTi_2O_5$；D—$Ca_3Fe_2Si_{1.58}Ti_{1.42}O_{12}$。

图 3　不同氧化工艺参数条件下氧化球团的物相组成

Fig. 3　Phase composition of oxidized pellets under different oxidation process parameters

0.75%、氧化时间为 120 min 的条件下，得到氧化温度对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响如图 4(a)所示。由图 4(a)可以看出：随着氧化温度的升高，氧化球团的抗压强度逐渐增大，而氧化球团的孔隙率呈现下降的趋势；当氧化温度升高至 1 100 ℃以上时，氧化球团的抗压强度急剧提高；在氧化温度为 1 200 ℃时，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为 3 449.9 N/P 和 22.70%。分析原因认为，氧化温度的提高有助于赤铁矿晶粒的生成、长大和再结晶，且氧化球团中硅酸盐相增多，赤铁矿晶粒与铁板钛矿之间形成溶蚀结构，导致氧化球团空隙数量减少，抗压强度提高[6]。在氢氧化钙添加量为 1.5%、膨润土添加量为 0.75%、氧化温度为 1 100 ℃的条件下，得到氧化时间对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响如图 4(b)所示。由图 4(b)可以看出：在氧化时间由 30 min 延长至 90 min 时，氧化球团的抗压强度逐渐提高，而氧化球团的孔隙率变化不大；当氧化时间由 90 min 延长至 180 min 时，氧化球团的抗压强度持续提高，但是提高幅度有所减小，而氧化球团的孔隙率有所降低；在氧化时间为 180 min 时，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为 1 715.7 N/P 和 26.97%。氧化时间的延长有助于氧化球团内部赤铁矿相的生成、长大和再结晶，也利于氧化球团内低熔点液相量的积累，因而氧化球团孔隙率降低、抗压强度提高。

在氧化温度为 1 100 ℃、氧化时间为 90 min、膨润土添加量为 0.75% 的条件下，试验研究氢氧化钙添加量对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响，结果如图 4(c)所示。由图 4(c)可以看出，随着氢氧化钙添加量的提高，氧化球团的抗压强度显著下降，而氧化球团的孔隙率先减小后增加。随着氢氧化钙添加量的增加，氧化球团抗压强度下降的可能原因有两个方面：① 氢氧化钙分解产生的气体破坏了赤铁矿之间结晶链接；② 产生的硅酸盐相恶化了晶粒结构。在氧化温度为 1 100 ℃、氧化时间为 90 min、氢氧化钙添加量为 1.5% 的条件下，得到膨润土添加量对氧化球团的抗压



（a）氧化温度；（b）氧化时间；（c）氢氧化钙添加量；（d）膨润土添加量

1—孔隙率；2—抗压强度。

图 4 工艺参数对氧化球团抗压强度和孔隙率的影响

Fig. 4 Effect of process parameters on crushing strength and porosity of oxidized pellets

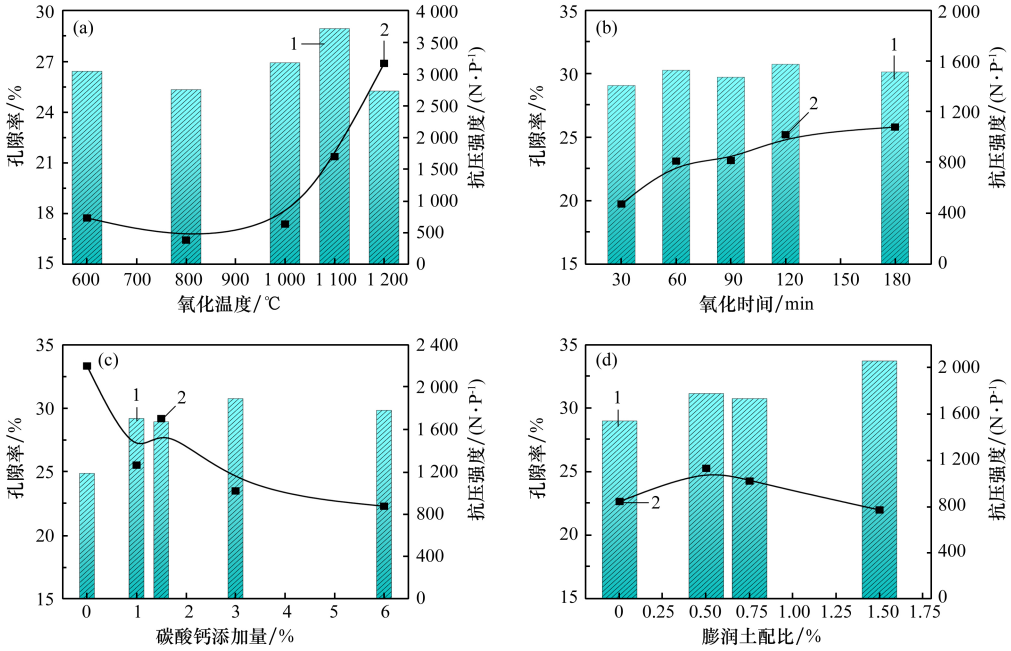
强度和孔隙率的影响规律，结果如图4(d)所示。由图4(d)可以看出：随着膨润土添加量的增加，氧化球团的抗压强度逐渐提高，而孔隙率整体上呈降低趋势；在膨润土添加量为1.5%时，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为2 073 N/P和28.63%。

2.2.2 *碳酸钙*

试验研究氧化温度、氧化时间、碳酸钙添加量和膨润土添加量四个工艺参数对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响，结果如图5所示。

在碳酸钙添加量为1.5%、膨润土添加量为0.75%、氧化时间为120 min的条件下，得到氧化温度对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响如图5(a)所示。由图5(a)可以看出：随着氧化温度的提高，氧化球团的抗压强度显著提高，氧化球团的孔隙率先略有上升后略有下降；在氧化温度为1 200 ℃时，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为3 168.6 N/P和25.25%。与添加氢氧化钙类似，氧化温度的提高有助于氧化球团内赤铁矿晶粒的生成、长大和再结晶，且有利于氧化球团的硅酸盐相的增多，使得氧化球团的抗压强度提高。在碳酸钙添加量为3%、膨润土添加量为0.75%、氧化温度为1 100 ℃的条件下，得到氧化时间对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响如图5(b)所示。由图5(b)可以看出：随着氧化时间的延长，氧化球团的孔隙率变化不大，氧化球团的抗压强度逐渐升高；在氧化时间为180 min时，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为1 080.1 N/P和30.15%。

在氧化温度为1 100 ℃、氧化时间为90 min、膨润土添加量为0.75%的条件下，得到碳酸钙添加量对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响如图5(c)所示。由图5(c)可以看出：随着碳酸钙添加量的增加，氧化球团的孔隙率整体上呈升高趋势，氧化球团抗压强度显著下降；在碳酸钙添加量为1.5%时，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为1 702 N/P和28.94%。与添加氢氧化钙类似，随着碳酸钙添加量的增加，碳酸钙分解产生的气体量和硅酸盐相增多，破坏了氧化球团的晶粒连接结构，氧化球团孔隙率增大，抗压强度显著下降。在氧化温度为1 100 ℃、氧化时间为90 min、碳酸钙添加量为3%的条件下，得到膨润土添加量对氧化球团的抗压强度和孔隙率的影响如图5(d)所示。由图5(d)可以看出：随着膨润土添加量的提高，氧化球团孔隙率整体呈上升趋势，而氧化球团抗压强度先升后降；在膨润土添加量为1.5%



（a）氧化温度；（b）氧化时间；（c）碳酸钙添加量；（d）膨润土添加量

1—孔隙率；2—抗压强度。

图 5　工艺参数对氧化球团抗压强度和孔隙率的影响

Fig. 5　Effect of process parameters on crushing strength and porosity of oxidized pellets

时，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为 769.1 N/P 和 33.72%。

3　结　论

（1）在钒钛铁精矿氧化过程中，氧化温度对氧化球团物相的影响最大，氧化时间、钙盐添加量和膨润土添加量对氧化球团物相影响较小；随氧化温度的升高，钒钛铁精矿主要发生磁铁矿转变为赤铁矿和钛铁矿转为铁板钛矿两个氧化过程。

（2）添加氢氧化钙时，随着氧化温度的升高、氧化时间的延长和膨润土添加量的提高，氧化球团抗压强度逐渐提高，而氧化球团孔隙率降低；随着氢氧化钙添加量的增加，氧化球团抗压强度显著下降，孔隙率逐渐增大；在氢氧化钙添加量为 1.5%、膨润土添加量为 0.75%、氧化时间为 120 min和氧化温度为 1 200 ℃的条件下，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为 3 449.9 N/P 和 22.70%。

（3）添加碳酸钙时，随着氧化温度的升高和氧化时间的延长，氧化球团抗压强度逐渐提高，而氧化球团孔隙率降低；随着氢氧化钙添加量的增加，氧化球团抗压强度显著下降，孔隙率逐渐增大；随着膨润土添加量的增加，氧化球团抗压强度先升后降，孔隙率逐渐提高。在碳酸钙添加量为 1.5%、膨润土添加量为 0.75%、氧化时间为120 min和氧化温度为 1 200 ℃的条件下，氧化球团的抗压强度和孔隙率分别为 3 168.6 N/P 和 25.25%。

参考文献：

[1]　王维兴. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[J]. 冶金管理,2018(9):53－58.
WANG Weixing. Improve the proportion of pellets in blast furnace burden and promote energy saving and emission reduction[J]. China Steel Focus, 2018(9): 53－58.

[2]　林文康,饶家庭,李志霖. 高炉冶炼钒钛矿炉料结构模型分析及生产实践[J]. 四川冶金,2022,44(4):12－16.
LIN Wenkang, RAO Jiating, LI Zhilin. Burden structure model analysis and production practice of smelting V-Ti ore in blast furnace[J]. Sichuan Metallurgy, 2022, 44(4):12－16.

[3]　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.
CHEN Shuangyin, CHU Mansheng, TANG Jue, et al.

Effects of pre-oxidation on phase composition and microstructure of vanadium titano-magnetite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(4):536 – 541.

[4] 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.

[5] 李尉,付贵勤,储满生,等. 红格钒钛磁铁矿氧化物相转变及非等温氧化动力学[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(4):517 – 521.
LI Wei, FU Guiqin, CHU Mansheng, et al. Phase transformation and non-isothermal oxidation kinetics of hongge vanadium-bearing titanomagnetite[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2017,38(4):517 – 521.

[6] 汤卫东,薛向欣,杨松陶,等. 红格含铬钒钛磁铁矿球团矿物学和等温氧化动力学[J]. 工程科学学报,2018,40(5):548 – 556.
TANG Weidong, XUE Xiangxin, YANG Songtao, et al. Mineralogical characteristics and isothermal oxidation kinetics of Hongge chromium containing vanadium and titanium magnetite pellets[J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(5):548 – 556.

[7] 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.

[8] 张志刚. 基于链算机—回转窑的高钛型钒钛磁铁矿球团制备研究[J]. 矿业工程,2023,21(1):51 – 55.
ZHANG Zhigang. Study on preparation of high-titanium vanadium-titanium magnetite pellets based on grate machine-rotary kiln [J]. Mining Engineering, 2023, 21(1):51 – 55.

[9] 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.

[10] 张元波,周友连,姜涛,等. MHA 黏结剂在钒钛磁铁矿氧化球团制备中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2459 – 2466.
ZHANG Yuanbo, ZHOU Youlian, JIANG Tao, et al. Applications of MHA binder in oxidized pellets preparation from vanadium, titanium-bearing magnetite concentrates [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2012,43(7):2459 – 2466.

[11] 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.
HAN Tong, XIAO Shunxin, CHENG Gongjin, et al. Preparation of vanadium titano-magnetite oxide pellets from western Liaoning province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(3):7 – 13.

[12] 唐珏,张勇,储满生,等. 高铬型钒钛磁铁矿配量增加对氧化球团质量的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(7):956 – 960.
TANG Jue, ZHANG Yong, CHU Mansheng, et al. Effect of the increasing percent of high chromium vanadium-titanium magnetite on quality of oxidized pellets[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013,34(7):956 – 960.

[13] 罗全坤,鲁德昌,林福生,等. 重钢球团配加钒钛精矿试验研究[J]. 烧结球团,2012,37(6):38 – 42.
LUO Quankun, LU Dechang, LIN Fusheng, et al. Experimental study on Chonggang pelletizing with proportion of vanadium and titanium concentrate[J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(6):38 – 42.

[14] SAMANTA S, MUKHERJEE S, DEY R. Oxidation behaviour and phase characterization of titaniferous magnetite ore of eastern India[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (9): 2976 – 2985.

[15] 周祥,韩秀丽,刘磊,等. 不同类型钒钛球团矿矿相结构和冶金性能分析[J]. 烧结球团,2019,44(4):31 – 35.
ZHOU Xiang, HAN Xiuli, LIU Lei, et al. Analysis of mineralogical structure and metallurgical properties of different types of vanadium titanium pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):31 – 35.

[16] 游高,刘庆华. 碱度对熔剂性球团矿性能的影响规律[J]. 矿业工程,2022,20(6):46 – 51.
YOU Gao,LIU Qinghua. Influence rule of pellet alkalinity on properties of pellet [J]. Mining Engineering, 2022, 20(6):46 – 51.