TiO_2 含量对熔剂性球团冶金性能及矿相结构的影响

李振铠，高 冰，单庆林，贾 彬，董 齐，李 欢
（唐山钢铁集团有限责任公司，河北 唐山 064300）

摘要：为促进低硅含钛铁精粉在球团焙烧—高炉炼铁流程中的高效利用，本文以带式焙烧机球团生产线生产的熔剂性球团为试验对象，基于不同 TiO_2 含量球团特性条件，探索熔剂性球团的适宜钛含量，重点研究不同 TiO_2 含量条件下的熔剂性球团冶金性能和微观结构的变化。结果表明：当 TiO_2 质量分数超过 1.0% 时，熔剂性球团抗压强度出现降低趋势，从 2 772 N/P 降低至 2 530 N/P；1 h 还原度从 62.9% 提高至 66.9%；还原膨胀指数稳定在 9% 以内；低温还原粉化率出现明显降低，>6.3 mm 值从 89.3% 降低为 78.9%，>3.15 mm 值从 94.9% 降低为 88.7%，<0.05 mm 值从 4.2% 提高至 6.4%。在矿相结构方面，固相比例保持稳定，气孔率从 30.29% 提高至 36.4%，且大气孔的数量显著增大，球体表面的致密度降低，液相比从 22.72% 降低至 15.66%。因此，为保证熔剂性球团具备良好的冶金性能和矿相结构，其 TiO_2 质量分数不宜超过 1.0%。

关键词：带式焙烧机；熔剂性球团；TiO_2；冶金性能；矿相结构
中图分类号：TF046.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)05－0056－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.075

Effect of TiO_2 content on metallurgical properties and mineral structure of fluxed pellets

LI Zhenkai, GAO Bing, SHAN Qinglin, JIA Bin, DONG Qi, LI Huan
(Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Tangshan 064300, Hebei, China)

Abstract: In order to promote the efficient utilization of low-silica ferrotitanium concentrate powder in the pellet roasting and blast furnace ironmaking process, the fluxed pellets produced by the belt roaster pellets production line are taken as the test object, and the suitable titanium content of fluxed pellets is explored based on the characteristics of pellets with different TiO_2 contents, and the changes of metallurgical properties and microstructure of fluxed pellets under different TiO_2 content conditions are studied. The results show that when the mass fraction of fluxed pellets TiO_2 exceeds 1.0%, the compressive strength decreases from 2 772 N/P to 2 530 N/P. The reduction degree is increased from 62.9% to 66.9% at 1 h. The reductive expansion index is stable below 9%; the pulverization rate of low-temperature reduction is decreased significantly, from 89.3% to 78.9% for >6.3 mm, from 94.9% to 88.7% for >3.15 mm, and from 4.2% to 6.4% for <0.05 mm. In terms of mineral phase structure, the solid-phase ratio remains stable, the porosity is increased from 30.29% to 36.4%, and the number of large pores is increased significantly, the density of the sphere surface is decreased, and the liquid-phase ratio is decreased from 22.72% to 15.66%. Therefore, in order to ensure that the fluxed pellets have good metallurgical properties and mineral phase structure, the mass fraction of TiO_2 should not exceed 1.0%.

Key words: belt roaster; fluxed pellets; TiO_2; metallurgical properties; mineral phase structure

近年来，随着高炉冶炼对优质炉料的要求越来越高以及钢铁冶炼短流程的发展和兴起，球团

收稿日期：2023－12－04；**修回日期：**2024－02－18
基金项目：唐山市重点研发计划资助项目(22150233J)
作者简介：李振铠(1996—)，男，工程师，从事烧结球团质量优化等方面的技术工作。
通信作者：高 冰(1987—)，男，高级工程师，从事炼铁工艺及原料质量优化技术与管理方面的工作。

矿在炼铁工业中的重要性越来越突出。与铁矿粉烧结相比，球团工艺更环保，能源消耗更低，温室气体排放更少[1-2]。高炉使用球团矿能够达到降低高炉炼铁成本的目的[3]。熔剂性球团是指在混合料中添加 CaO 熔剂(如石灰石、生石灰等)生产的球团矿，其较酸性球团矿具有还原度高、软化起始温度高、软熔区间窄、还原膨胀指数低等优点[4]。在高炉内高温还原气氛下添加含钛炉料是一项工艺简单、操作方便、见效快且灵活的护炉手段，该工艺手段可以通过钛积物保护层附着在炉缸、炉底的耐火材料之间，从而保护炉缸、炉底，延长高炉寿命[5]。同时，如果高钛球团矿带入炉内的钛元素过多，会使炉渣流动性降低，影响高炉顺行，严重时还会造成高炉结瘤。目前，使用含钛球团护炉逐渐成为钢铁企业防止高炉特别是大高炉炉缸侵蚀的常规操作之一[6-7]。

含钛球团矿是含钛铁精粉与普通铁精粉混合后造球，其本身含铁品位高，球团的综合性能得到改善[8]。适宜的 TiO_2 含量可以在一定程度上提高球团矿的透气性，对还原膨胀性能和软熔滴落性能的影响较小[9]。PMC 精粉的 SiO_2 含量较低，并含有 CaO、MgO 等有益碱性氧化物，并且价格较低，从生产碱性球团矿的角度来说是非常好的矿粉，但其 TiO_2 等成分的质量分数高达 2.8%。因此，研究 TiO_2 对球团矿冶金性能的影响，有利于后续低硅含钛铁精粉在球团焙烧—高炉炼铁流程中的高效利用。陈许玲等[10]研究了高钛球团的焙烧特征和固结行为，结果表明：随着 TiO_2 含量的增加，球团焙烧所需预热温度提高，焙烧球强度降低；高钛球团由于 $FeTiO_3$ 含量高导致氧化速度慢、预热球氧化程度低，不利于焙烧固结时钛赤铁矿固溶体晶粒的长大，使得球团固结强度差。李从德等[11]研究了高钛型护炉球团矿焙烧工艺，发现高钛型护炉球团的固结机理为固相扩散固结，主要以铁氧化物的再结晶为主；同时，由于钛铁氧化物熔点高，球团矿软熔温度较高，软熔区间减少，有利于高炉冶炼。

河钢唐钢新区现有自主设计和制造的 480 万吨带式焙烧机球团生产线。相较于回转窑球团焙烧技术，带式焙烧机将干燥、预热、焙烧、冷却过程集成于一台设备上系统操作，具备单机生产能力大、生产热效率高、原料适应性强、成品率高、工序能耗低、废气和粉尘少等优点[12-14]。本文以带式焙烧机球团生产线生产的熔剂性球团为试验对象，基于不同 TiO_2 含量球团特性条件，通过精准科学的试验数据，对熔剂性球团适宜的钛含量进行摸索，重点研究不同 TiO_2 含量条件下的熔剂性球团冶金性能和微观结构的变化，以期为熔剂性球团生产优化提供理论依据，为含钛矿粉的高效使用提供参考和借鉴。

1　试验原料及方法

1.1　试验原料

制备试验球团的原料取自唐钢某仓库，投笼造球过程中用来调节试验球团 TiO_2 含量的钛粉为 TiO_2 质量分数≥98% 的纯试剂。试验原料为 A、B、C、D 矿粉以及消石灰和膨润土，其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可见：4 种矿粉均为磁铁矿，包含两种低硅精粉和两种高硅精粉，4 种铁精粉的含铁量均在 65% 以上。其中，A 矿粉的 TFe 质量分数最高，达到了 67.94%；B 矿粉的 SiO_2 质量分数最高，为4.94%；C矿粉铁品位为66.13%，

表 1　试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and burning loss of raw materials　　%

原料名称	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	S	P	FeO	烧损
A 矿粉	67.94	4.20	0.33	0.31	0.34	0.182	0.011	0.008	28.1	-2.77
B 矿粉	65.36	4.94	0.69	0.54	1.21	0.170	0.046	0.015	25.5	-2.28
C 矿粉	66.13	0.82	0.57	2.87	0.47	2.850	0.027	0.067	27.6	-2.35
D 矿粉	66.43	2.52	0.36	2.72	0.27	0.200	0.032	0.005	28.3	-2.53
消石灰	—	1.23	65.74	—	—	—	—	—	—	—
膨润土	—	55.53	3.56	2.16	12.45	—	—	—	—	—

SiO_2 质量分数为0.82%，FeO 质量分数为27.6%，属于优质低硅铁精粉；D 矿粉的 MgO 质量分数较高，为2.72%。4 种铁精粉粒度组成如表 2 所示。由表 2 可见，A 矿粉的粒度较大，其余矿粉的粒度(<0.075 mm)较低。将 4 种矿粉按一定比例混合后可满足造球对原料的要求。

表 2 铁精粉的粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size composition of iron concentrate powder %

原料名称	≥0.15 mm	[0.075,0.150) mm	<0.075 mm
A 矿粉	4.8	30.1	65.1
B 矿粉	3.3	20.1	76.6
C 矿粉	1.6	11.3	87.1
D 矿粉	0.6	10.3	89.1

1.2 试验方法

试验以熔剂性球团生产现场带式焙烧机的热工制度为基础。试验具体配矿方案如表 3 所示。球团试验热工参数：鼓风干燥段温度为 290 ℃，抽风干燥段温度为315 ℃，干燥时间约为7.9 min；预热温度和焙烧温度分别为 1 020 ℃和 1 245 ℃，预热时间约为 6.3 min，焙烧时间约为 10.3 min；均热温度为 1 086℃，均热时间约为 2.4 min；冷却二段温度为 183 ℃，冷却时间约为 14.2 min。试验采用圆盘造球机进行造球，造球盘直径为 1 000 mm，造球时间为20 min，倾角为43°，转速为20 r/min。将造好的生球(10~14 mm)放入投笼篮中，放入同批生产的带式焙烧机上。将用于盛放球团的投笼篮置于带式焙烧机的最上层，与料层表面持平。固定每次球团投笼的位置和数量，保证试验准确性和科学性。

表 3 熔剂性球团试验配矿方案(质量分数)

Table 3 Blending plan of fluxed pellets test %

方案编号	矿粉A	矿粉B	矿粉C	矿粉D	消石灰	膨润土
1#	17	18	28	37	4.6	0.8
2#	17	18	28	37	4.6	0.8
3#	17	18	28	37	4.6	0.8
4#	17	18	28	37	4.6	0.8
5#	17	18	28	37	4.6	0.8

试验通过添加钛粉逐步控制熔剂性球团中的 TiO_2 含量，每个方案 TiO_2 质量分数提高 0.2%，碱度维持在 1.2。熔剂性球团的化学成分如表 4 所示。球团生产线投笼试验得到成品球的 TFe、SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3 质量分数分别约为 62.65%、3.05%、3.66%、1.75%、0.63%。

表 4 熔剂性球团主要化学成分和碱度

Table 4 Main chemical composition and basicity of fluxed pellets %

方案编号	化学成分(质量分数)/%						R_2
	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	
1#	62.93	3.05	3.66	1.75	0.63	0.60	1.20
2#	62.93	3.05	3.66	1.75	0.63	0.80	1.20
3#	62.63	3.05	3.66	1.74	0.63	1.00	1.20
4#	62.51	3.05	3.66	1.74	0.63	1.20	1.20
5#	62.37	3.05	3.66	1.74	0.63	1.40	1.20

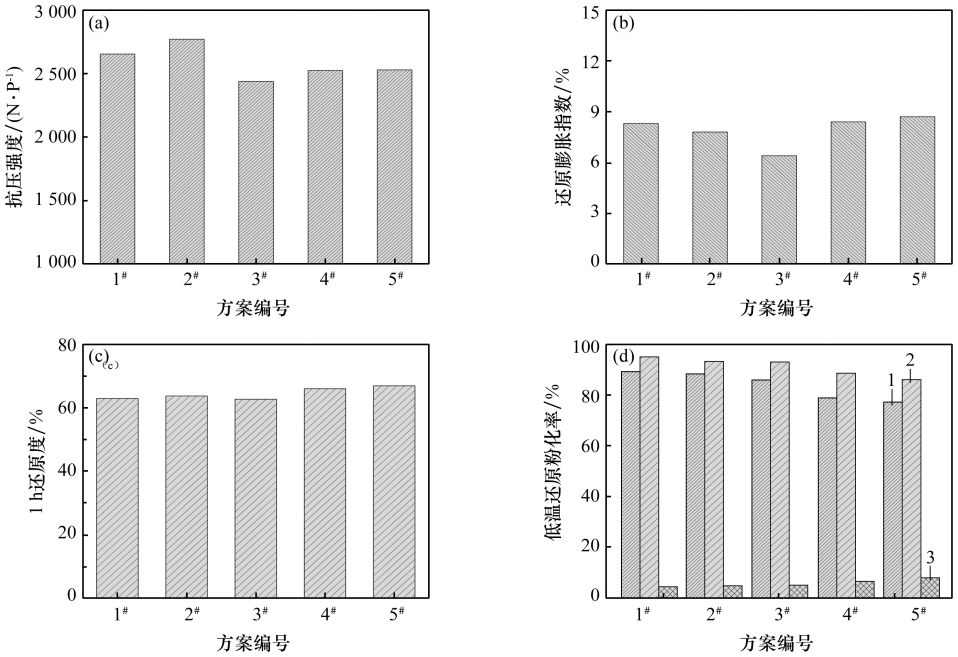
通过筛分得到投笼试验成品球团，使用相关检测设备进行性能检测。依据《铁矿石 低温粉化试验 静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)、《高炉用铁球团矿 自由膨胀指数的测定》(GB/T 13240—2018)、《铁矿石 高温荷重还原软熔滴落性能测定方法》(GB/T 34211—2017)等标准，采用相同的试验设备，依次进行抗压强度、低温还原粉化率、还原膨胀指数、软熔滴落等性能检测。

同时，为进一步探究不同 TiO_2 含量熔剂性球团微观结构的变化规律，采用矿相显微镜进行微观结构分析。以球团环部一圈为基准分批观察，固定倍数，得到可用于试验的矿相结果。选取 8 个球团环部一圈的基准值与 1 个中心值，取平均值后作为矿相结构的统计数据。

2 试验结果与讨论

2.1 TiO_2 含量对熔剂性球团冶金性能的影响

TiO_2 含量对熔剂性球团冶金性能的影响如图 1 所示。由图 1 可知，随着 TiO_2 质量分数的提高，球团抗压强度呈降低趋势，3#方案球团的抗压强度明显较前两个方案低，从 2 772 N/P 降低至 2 530 N/P，不过整体抗压强度大于 2 400 N/P，处于较为优秀的水平，符合球团生产需求。球团的还原性在初期保持稳定，而当 TiO_2 质量分数为 1.0%(3#方案)时，球团在900℃温度下的 1 h 还



（a）抗压强度；（b）还原膨胀指数；（c）1 h 还原度；（d）低温还原粉化率

低温还原粉化率：1—>6.3 mm；2—>3.15 mm；3—>0.5 mm。

图 1　TiO_2 含量对熔剂性球团冶金性能的影响

Fig. 1　The influence of TiO_2 content on the metallurgical properties of fluxed pellets

原度从 62.9% 提高至 66.9%。

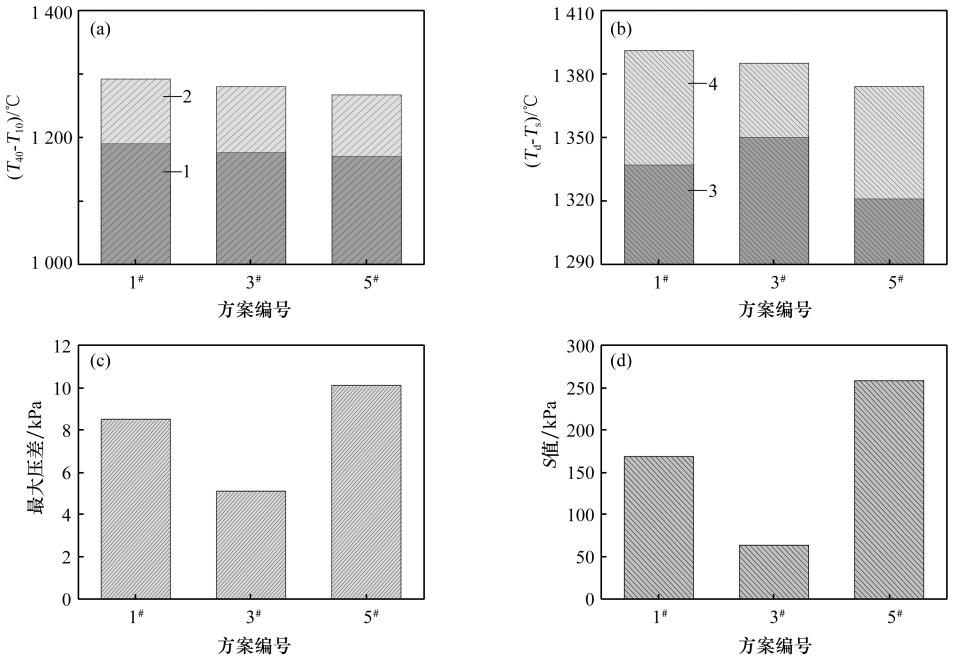
球团的还原膨胀指数略有降低，整体维持在 9% 以下，均处于较为优秀的水平，满足生产所需。随着 TiO_2 含量的提高，低温还原粉化率呈下降趋势，前 3 个方案球团的 >6.3 mm 值均在 86% 以上，>3.15 mm 值均在 93% 以上，<0.05 mm 值均低于 5%；而当 TiO_2 质量分数超过 1.0%（4# 方案）时，低温还原粉化率出现了明显的降低，低温还原粉化率（>6.3 mm）从 89.3% 降低为 78.9%，>3.15 mm 值从 94.9% 降低为 88.7%，<0.05 mm 值均从 4.2% 提高至 6.4%。TiO_2 含量提高后，钙钛矿的生成可能是导致球团低温还原粉化性能降低的主要原因。

2.2　TiO_2 含量对熔剂性球团熔滴性能的影响

不同 TiO_2 含量熔剂性球团的熔滴性能结果如图 2 所示。由图 2 可知，随着 TiO_2 含量的提高，球团的熔滴性能呈先提高后降低的趋势。以 1# 方案为基准，3# 方案球团的 T_{10} 与 T_{40} 略有降低，温差约为 10 ℃，软化区间（$T_{40}-T_{10}$）从 102 ℃ 提高至 104 ℃；T_s 略有升高，T_d 降低，熔化区间（T_d-T_s）减小，这使得高炉软熔带中熔化区间的宽度减小，使得高炉软熔带透气性变好，有利于高炉顺行。而随着 TiO_2 含量的进一步提高，5# 方案球团在整体熔化温度区间与 1# 方案相差不大的同时，各项温度指标下降幅度约为 15～20 ℃，导致高炉软熔带中熔化区间上移，且此成分条件下球团的最大压差超过10 kPa，不利于高炉软熔带透气顺行。S 值为软熔带综合透气性指数，可以很好地衡量炉料的熔滴性能。3# 方案球团的 S 值为 63.6 kPa·℃，炉料的综合熔滴性能较为优秀，而随着 TiO_2 含量的提高，5# 方案的 S 值增长为 258.2 kPa·℃，综合熔滴性能降低。

2.3　不同 TiO_2 含量球团的矿相结构分析

图 3 左侧图像为 200 倍矿相显微镜条件下采集到的球团环部微观结构，右侧为 Image-Pro Plus 软件对球团矿相显微结构处理后得到的结果。其中，红色代表气孔，黄色代表液相，蓝色代表固相，该图可以较为直观地显示球团内各种微观结构的分布规律。由图 3 可见，1# 方案球团的气孔分布在球团表面，呈多而散的状态，气孔尺寸不大，固相结构较为稳固，致密度较好，液相主要分散于气孔和固相的相邻部位，起到一定的连接



（a）$T_{40}-T_{10}$；（b）T_s-T_d；（c）最大压差；（d）S 值

1—T_{10}；2—T_{40}；3—T_s；4—T_d。

图 2 不同 TiO_2 含量熔剂性球团的熔滴性能结果

Fig. 2 Droplet performance results of fluxed pellets with different TiO_2 contents

（注：T_{10}为软化开始温度，℃；T_{40}为软化结束温度，℃；T_s 为熔化开始温度，℃；T_d 为滴落温度，℃；S 值为综合透气性指数，kPa·℃）

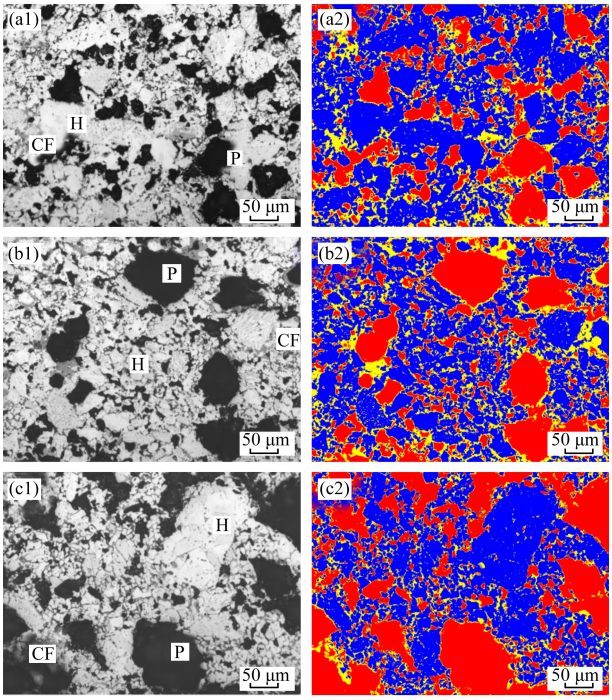
桥架作用。而随着 TiO_2 含量的逐渐提高，气孔比例明显增大，且大气孔的比例提高，加上液相比例的明显减少，球团内部的连晶结构变差，导致球团对抗外部压力的阻碍能力减弱，这是球团抗压强度降低的原因之一。

不同 TiO_2 含量熔剂性球团中气孔、液相、固相三种矿相元素面积占比如图 4 所示。由图 3、4 可知，随着 TiO_2 含量的提高，气孔比例呈增大趋势，尤其是 3# ~5#方案，球团的气孔比例出现了梯度增长，从 30.29% 提高至 36.4%，且大气孔的数量显著增大，球体表面的致密度降低，球团内部的连晶结构因为气孔比例的提高而变得松散。附着在固相结构旁的大气孔直接影响球团整体的稳定架构，使得球体致密度降低，这也是高 TiO_2 含量球团低温还原粉化率较低的原因之一。

通常，球团的固结方式有两种，一种是固相固结，另一种是液相固结。由微观结构可知，熔剂性球团一般以固相固结为主，液相固结为辅[15]。由图 3、4 可：随着 TiO_2 含量的提高，固相比例相对稳定，整体保持在 47%~49%；液相比例呈降低趋势，尤其是 3# ~5#方案出现了梯度下降，从 22.72% 降低至 15.66%，部分局部液相与固相混杂的结构得到了改善，但液相的减少可能使固、液相之间存在的链接状态消失，侧面削弱了球团连晶结构的稳定。

分析熔剂性球团冶金性能和矿相结构发现：高钛熔剂性球团微观结构中，固相比例维持在一定水平，但液相比例随着 TiO_2 含量的增加而逐渐降低。适宜的液相具备黏结固相结构、稳定结晶骨架的作用，液相比例的降低可能影响球团矿相的稳定，且气孔比例随着 TiO_2 含量的增加而逐渐提高，使得固相之间的间隙变大，球团矿相的整体结构变得松散，导致熔剂性球团抗压强度降低、还原性升高，同时也可能导致低温还原粉化性能降低。

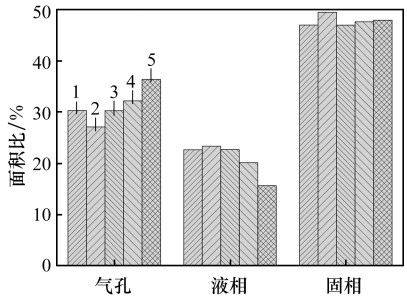
因此，在熔剂性球团生产过程中应控制适宜的 TiO_2 含量，其一般不宜超过 1.0%，以保证球团具备良好的冶金性能和矿相结构。在适宜条件下，球团的抗压强度较好，还原性、低温还原粉化性较为优秀，矿相结构中气孔、液相、固相可以保持良好的稳定状态。



（a1）1#方案（环部）；（a2）1#方案处理结果；
（b1）3#方案（环部）；（b2）3#方案处理结果；
（c1）5#方案（环部）；（c2）5#方案处理结果
H—赤铁矿；CF—铁酸钙；P—气孔。

图 3　不同 TiO_2 含量熔剂性球团微观结构

Fig. 3　Microstructure of fluxed pellets with different TiO_2 content



方案编号：1～5—1#～5#。

图 4　不同 TiO_2 含量熔剂性球团中三种矿相的面积比

Fig. 4　The proportion of the area of three mineral phases in fluxed pellets with different TiO_2 contents

3　结　论

本文依托唐钢新区带式焙烧机分别对不同 TiO_2 含量条件下熔剂性球团的性能和微观结构进行研究，得到以下结论：

（1）当熔剂性球团 TiO_2 质量分数超过 1.0% 后，球团抗压强度呈下降趋势，还原性升高，还原膨胀指数整体保持在 9% 以下，低温还原粉化率明显降低，>6.3 mm 值从 89.3% 降低为 78.9%，>3.15 mm 值从 94.9% 降低为 88.7%，<0.5 mm 值从 4.2% 提高至 6.4%。

（2）当熔剂性球团 TiO_2 质量分数为 1.0% 时，球团熔滴性能较为优秀，软化区间保持平稳，熔化区间降低，最大压差小，高炉软熔带透气性提高，*S* 值较为优秀。

（3）当熔剂性球团 TiO_2 质量分数超过 1.0% 后，气孔比例提高，球团矿相结构的稳定性受到影响，液相比例明显降低，球团矿相结构的致密度降低，熔剂性球团性能受到削弱。

熔剂性球团生产过程中应控制 TiO_2 质量分数不超过 1.0%，以保证熔剂性球团具备良好的冶金性能和矿相结构，为高炉的高质量生产提供保障。

参考文献：

[1]　王新东，李建新，胡启晨．基于高炉炉料结构优化的源头减排技术及应用[J]．钢铁，2019，54(12)：104－110；131.
WANG Xindong，LI Jianxin，HU Qichen. Application practice of source and process sulfur-nitrate reduction technology based on optimization of blast furnace charge structure[J]. Iron & Steel，2019，54(12)：104－110；131.

[2]　余正伟，向爱平，刘山平，等．低铁高硅赤铁精矿对氧化球团性能的影响[J]．中国冶金，2020，30(6)：8－13；23.
YU Zhengwei，XIANG Aiping，LIU Shanping，et al. Effect of low iron and high silicon hematite concentrate ratio on properties of oxidized pellets[J]. China Metallurgy，2020，30(6)：8－13；23.

[3]　卢建光，刘小杰，吕庆．PMC 矿粒度及球团预热、焙烧工艺参数的选择[J]．钢铁，2020，55(10)：21－28.
LU Jianguang，LIU Xiaojie，LÜ Qing. Selection of PMC ore size，preheating and roasting process parameters for pelletizing[J]. Iron & Steel，2020，55(10)：21－28.

[4]　朱德庆，黄伟群，杨聪聪，等．铁矿球团技术进展[J]．烧结球团，2017，42(3)：42－49.
ZHU Deqing，HUANG Weiqun，YANG Congcong，et al. Technical progress in iron ore pelletization[J]. Sintering

and Pelletizing,2017,42(3):42 – 49.

[5] 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.

[6] 任伟,李金莲,刘沛江,等. 含钛精矿用于鞍钢球团的试验研究[J]. 重庆大学学报,2019,42(10):57 – 64.
REN Wei, LI Jinlian, LIU Peijiang, et al. Experimental study on applying titanium-containing concentrate to Angang steel pelletization[J]. Journal of Chongqing University,2019,42(10):57 – 64.

[7] 金永明,程军,李成峰,等. 含钛球团矿在高炉上的应用及分析[C]//中国金属学会. 第七届(2009)中国钢铁年会论文集(上). 北京:冶金工业出版社,2009:707 – 710.
JIN Yongming, CHENG Jun, LI Chenfeng, et al. Application and analysis of titanium-bearing pellets in blast furnace//The Chinese Society for Metals. 2009 CSM Annual Meeting proceedings. Beijing: Metallurgical Industry Press,2009:707 – 710.

[8] 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;22.
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;22.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 李从德,陈有垒. 高钛型护炉球团矿焙烧工艺研究[J]. 烧结球团,2010,35(6):12 – 16.
LI Congde,CHEN Youlei. Study on high titania type blast furnace lining protection pellet induration process[J]. Sintering and Pelletizing,2010,35(6):12 – 16.

[12] 王新东. 以高质量发展理念实施河钢产业升级产能转移项目[J]. 河北冶金,2019(1):1 – 9.
WANG Xindong. Implementing the industrial upgrading and capacity transfer project of HBIS with the concept of high quality development[J]. Hebei Metallurgy, 2019 (1):1 – 9.

[13] 智谦,张福明,韩志国,等. 配加细磨烧结粉矿对带式焙烧机球团质量的影响[J]. 中国冶金,2024,34(2):35 – 41;95.
ZHI Qian,ZHANG Fuming,HAN Zhiguo,et al. Effect of adding grinded sintering powder ore on pellet quality of belt roasting machine[J]. China Metallurgy, 2024, 34(2):35 – 41;95.

[14] 胡长松,田兰忱,张道远,等. 钒钛磁铁矿带式焙烧机工艺研究及工程设计[J]. 中国冶金,2023,33(11):88 – 97.
HU Changsong,TIAN Lanxian,ZHANG Daoyuan,et al. Process research and engineering design of straight-grate for V-Ti magnetite ore [J]. China Metallurgy, 2023, 33(11):88 – 97.

[15] 高冰,张文强,单庆林,等. 焙烧温度对熔剂性球团性能及微观结构的影响[J]. 烧结球团,2022,47(5):53 – 58;94.
GAO Bing, ZHANG Wenqiang, SHAN Qinglin, et al. Effect of firing temperature on properties and microstructure of fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(5):53 – 58;94.