带式焙烧机工艺高硅镁质熔剂性球团制备特性

曹鹏飞[1]，张 倩[2a]，潘 建[2]，杨聪聪[2]，徐梦杰[1]
（1. 中钢设备有限公司，北京 10080；2. 中南大学 a. 资源加工与生物工程学院；b. 低碳与氢冶金研究中心，湖南 长沙 410083）

摘要：本文以高品位磁铁精矿（O 矿）、高镁磁铁精矿（K 矿）和高硅赤铁矿粉（Y 矿）为原料，根据某钢厂现场原料配比 40% O 矿 +20% K 矿 +40% Y 矿，在实验室开展模拟带式焙烧机工艺的高硅镁质熔剂性球团制备特性研究，揭示了二元碱度（CaO/SiO_2 为 0.5 ~ 0.9）对球团焙烧特性、成品球团冶金性能（还原度 *RI*、还原膨胀指数 *RSI* 和动态法低温还原粉化指数 $LTD_{+3.15\ mm}$）和矿相学特征的影响规律。结果表明：提高球团碱度有利于改善球团焙烧和冶金性能，在 0.5 ~ 0.9 的碱度范围内，球团的还原度≥65.38%、还原膨胀指数 15%、动态低温还原粉化性能优良（≥98.88%）。矿相分析结果表明，所制备高硅镁质熔剂性球团的固结形式主要为 Fe_2O_3 再结晶，提高碱度利于形成更多液相从而促进固结，降低球团孔隙率，从而生产出性能良好的成品球团。本研究将为工业生产实践提供有力支撑和重要借鉴。

关键词：带式焙烧机工艺；碱度；高硅镁质熔剂性球团；冶金性能；矿相
中图分类号：TF046.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000 - 8764(2024)02 - 0038 - 09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.022

Preparation characteristics of high silica magnesium-bearing fluxed pellets based on straight grate process

CAO Pengfei[1], ZHANG Qian[2a], PAN Jian[2], YANG Congcong[2], XU Mengjie[1]
(1. Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 10080, China; 2. Central South University a. School of Minerals Processing and Bioengineering; b. Research Center for Low Carbon and Hydrogen Metallurgy, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The present work adopts high grade magnetite concentrate (O ore), high magnesium magnetite concentrate (K ore) and high silicon hematite fines (Y ore) as raw materials to investigate the preparation characteristics of high silica Mg-bearing fluxed pellets at laboratory scale based on straight grate process in terms of a typical industrial pellet blend consisting of 40% Ore O, 20% Ore K and 40% Ore Y. The effects of binary basicity [$w(CaO)/w(SiO_2)$ is 0.5 ~ 0.9] on pellet roasting characteristics, metallurgical properties (reduction index *RI*, reduction swelling index *RSI* and dynamic low temperature reduction disintegration index ($LTD_{+3.15\ mm}$) and mineralogy characteristics of the resultant fired pellets were researched. The results show, increasing pellet basicity is capable of improving the reducibility of fired pellets with high *RI* of more than 65.38%, low *RSI* of lower than 15%, and excellent $LTD_{+3.15\ mm}$ of more than 98.88%. The mineralogical analysis of the fired pellets revealed that the consolidation form of pellets mainly relies on Fe_2O_3 recrystallization while an increase in pellet basicity is conducive to the formation of more liquid phase to promote consolidation and a decrease in the porosity of pellets. Hence, the finished pellets with good performance can be obtained. The experimental results will provide

收稿日期： 2023 - 12 - 11；**修回日期：** 2024 - 01 - 22
基金项目： 国家自然科学基金资助项目（52004339）；中国宝武低碳冶金创新基金资助项目（BWLCF202216）
作者简介： 曹鹏飞（1979—），男，高级工程师，从事球团工艺与设备方面的开发与应用。
通信作者： 潘 建（1977—），男，教授，从事烧结球团、低碳与氢冶金、固废资源化等基础理论与工艺研究。

strong support and important reference for industrial production practice.

Key words: straight grate process; basicity; high silica magnesium-bearing fluxed pellet; metallurgical properties; mineralogy

球团矿因具有诸多优势，包括高铁品位、低有害元素含量、规则的形状、均匀的粒度、出色的冷态强度，以及球团生产工艺的低环保投入和运行成本[1-2]，使之成为现代高炉炼铁和气基竖炉直接还原工艺不可或缺的炉料之一。积极推动球团工艺的发展，是促进高炉—转炉长流程降碳、促进钢铁工业实现“双碳”目标的重要举措之一[3-4]。但是长期以来，球团矿在我国高炉炉料结构中的占比一直在 20% 以下，若要继续提高球团入炉比例，则需要提高球团矿碱度，生产熔剂性球团矿以相应降低烧结矿的入炉比例[5-6]。

国内外学者对熔剂性球团的制备特性及产品冶金性能进行了大量研究[7-8]。通常认为，在一定范围内调整和优化碱度可以有效改善球团的焙烧和冶金性能[9-12]。范建军等[13]以细粒级铁矿粉为铁矿原料，通过配加石灰石，研究了球团抗压强度、还原度和还原膨胀率在 0.2 ~ 1.4 碱度范围的变化规律，发现在 0.2 ~ 1.2 范围内随碱度的提高焙烧球团的抗压强度明显改善，但当碱度提高到 1.4 时该强度下降，而随碱度的升高还原度逐渐增大，还原膨胀率先升高后快速下降，生产碱性熔剂性球团适宜的碱度为 1.0 左右。田筠清等[14]研究了配加石灰石对低硅熔剂性球团制备特性的影响发现：当球团碱度小于 1.0 时，在焙烧温度较低时(1 265 ℃)即可得到抗压强度合格的焙烧球团，但还原膨胀率较高；而当碱度提高到 1.0 以上时反而需提高焙烧温度到 1 280 ℃才能使球团强度满足要求，且还原膨胀率可控制在 20% 以下。倪杰等[10]研究了不同碱度、SiO_2 和 MgO 质量分数条件下低硅熔剂性球团抗压强度和微观结构的变化规律，当焙烧温度为 1 250 ℃时，液相生成量随碱度的增加而减少，随 SiO_2 质量分数的增加而增加，随 MgO 质量分数的增加而减少；在碱度为 1.2、$w(SiO_2)$为 3.0%、$w(MgO)$为 2.0% 时液相生成量和球团性能最佳。一般来说，当 SiO_2 质量分数较低时，球团矿的固结形式主要为赤铁矿连晶，而当 SiO_2 质量分数升高至 3.5% 以后，在液相的作用下，赤铁矿连晶逐渐变得粗大而紧密，球团抗压强度显著提高；提高 MgO 质量分数则会形成镁铁尖晶石等高熔点物质，从而导致液相量生成温度提高，球团强度降低[15-16]。因此，高硅镁质熔剂性球团生产需严格调控碱度，优化球团矿相结构，以得到抗压强度及冶金性能合格的焙烧球团[17-18]。

本文基于某钢厂带式焙烧机工艺球团生产现场原料及配矿结构，考察在 0.5 ~ 0.9 碱度范围内带式焙烧机工艺熔剂性球团的焙烧特性及成品球团冶金性能，研究结果不仅有助于制定适宜的原料预处理和球团制备参数，还能为生产线的设计、建设以及稳定运行提供重要依据。

1　试验原料及方法

1.1　试验原料

试验用铁矿包括 O 矿、K 矿和 Y 矿三种，其化学成分、粒度组成以及物理性质分别如表 1 ~ 3 所示。试验用原料还包括膨润土和石灰石，其化学成分如表 1 所示，膨润土物理性能如表 4 所示。

由表 1 可知，O 矿和 K 矿铁品位较高，而 Y 矿铁品位较低，应控制其配比；O 矿和 K 矿的 Al_2O_3 质量分数较低，而 Y 矿的 Al_2O_3 质量分数达 2.18%，SiO_2 质量分数高达 12.05%，属于典型的高硅高铝铁矿。相比之下，O 矿和 K 矿的 SiO_2 质量分数较低，尤其 K 矿仅为 0.77%，但 K 矿的 MgO 质量分数较高为 5.40%，为典型的高镁磁铁矿。Mg^{2+} 进入到磁铁矿晶格中与 Fe^{2+} 发生交换后填充于八面体空位中，从而降低了磁铁矿的晶格缺陷程度，可起到稳定磁铁矿的作用，这表明添加适量 MgO 有利于改善球团的低温还原粉化性能。按“40% O 矿 + 20% K 矿 + 40% Y 矿”配矿得到的混合精矿化学成分也列于表 1 中，其 TFe、SiO_2、MgO 质量分数分别为 62.45%、6.75%、1.46%。

由表 2 可知，O 矿和 K 矿的原始粒度较细，<0.074 mm粒级质量分数分别为 74.72%、72.95%。Y矿的原始粒度较粗，<0.074 mm粒级质量分数仅

表 1 试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and burning loss of test material %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	烧损
O 矿	68.04	30.13	4.44	0.23	0.23	0.46	0.010	0.160	-2.17
K 矿	64.01	24.72	0.77	1.52	0.48	5.16	0.050	0.210	-0.75
Y 矿	56.08	8.36	12.05	2.18	1.39	0.62	0.020	0.050	4.11
混合矿	62.45	20.34	6.75	1.27	0.74	1.46	0.020	0.130	0.63
膨润土	2.80	—	53.70	14.90	2.59	2.36	0.050	0.099	13.84
石灰石	1.93	—	0.83	0.19	53.02	1.15	0.005	0.022	42.72

表 2 铁矿原料的粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size distributions of iron ores %

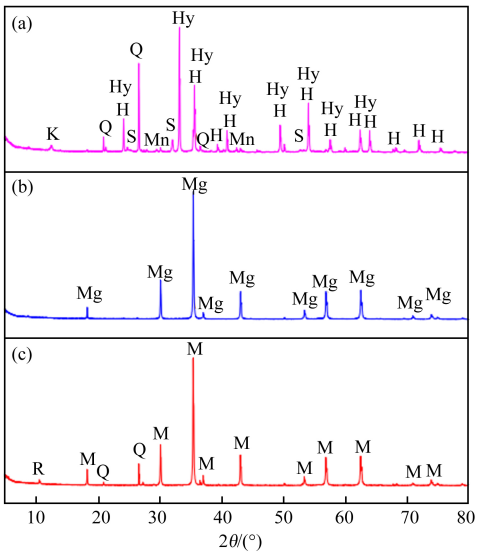
原料名称	>10 mm	[10,5) mm	[5,3) mm	[3,1) mm	[1,0.5) mm	[0.5,0.15) mm	[0.15,0.074) mm	[0.074,0.045) mm	≤0.045 mm
O 矿	0	0	0	0.04	0.16	6.60	18.48	32.52	42.20
K 矿	0	0.60	0.20	0.34	1.88	5.69	18.34	26.57	46.38
Y 矿(原矿)	24.25	16.55	11.00	15.97	7.32	3.77	5.34	4.13	11.67
Y 矿(干磨)	0	0	0	0	0	0.42	6.24	21.16	72.18

注:Y 矿(干磨)为 Y 矿的干式磨矿产品。

为 15.80%, >3 mm 粒级质量分数较高为 51.80%,因而在造球前必须经过细磨预处理。结合表 3 可知:Y 矿经过干法磨矿至 <0.074 mm 粒级质量分数为 93.34%后,其比表面积高达 2 096 cm^2/g,达到了球团工艺要求;另外,O 矿和 K 矿的比表面积约为 1 000 cm^2/g,其成球性较差,可能与其颗粒表面光滑的性质有关。

对三种铁矿进行 X 射线衍射图谱(XRD)物相分析,结果如图 1 所示。由图 1 可知:O 矿和 K 矿是典型磁铁精矿,其中 O 矿是一种 TFe 质量分数≥68%的高品位磁铁矿;K 矿中则主要为含镁磁铁矿[$(Fe,Mg)Fe_2O_4$],是一种低硅高镁型铁矿;Y 矿的物相组成较复杂,主要包括赤铁矿、水赤铁矿、菱铁矿、石英、高岭石等,是一种低铁高硅高铝型赤铁矿。

O 矿、K 矿和 Y 矿在空气气氛下的 TG-DSC 分析结果如图 2 所示。由图 2 可知,O 矿因磁铁矿氧化放热在 330 ℃和 433 ℃分别出现 2 个明显的放热峰,而实际质量增重则从 250 ℃开始,且到 1 000 ℃时累计增重了约 2.8%;而 K 矿中的含镁磁铁矿氧化从 250 ~ 300 ℃开始,但并未出现明显的放热峰,表明氧化放热的效应较弱,且到 1 000 ℃时仅累计增重了约 1.7%,这可能是因为 K 矿中



(a) Y 矿;(b) K 矿;(c) O 矿

H—赤铁矿;Hy—水赤铁矿;S—菱铁矿;Mn—黑锰矿;K—高岭石;Q—石英;Mg—镁磁铁矿;M—磁铁矿;R—闪石。

图 1 三种铁矿的 XRD 物相分析

Fig. 1 XRD phase analysis of three iron ore

含镁磁铁矿的活性较差,从而导致氧化速率较慢。Y 矿在 314 ℃和 678 ℃出现了两个吸热峰,分别对应于水赤铁矿脱除结晶水、菱铁矿分解和高岭石脱除结构水,因而整个温度范围内均发生了失重,到 1 000 ℃时累计质量损失超过 6%。

表 3　铁矿原料的物理性能分析结果

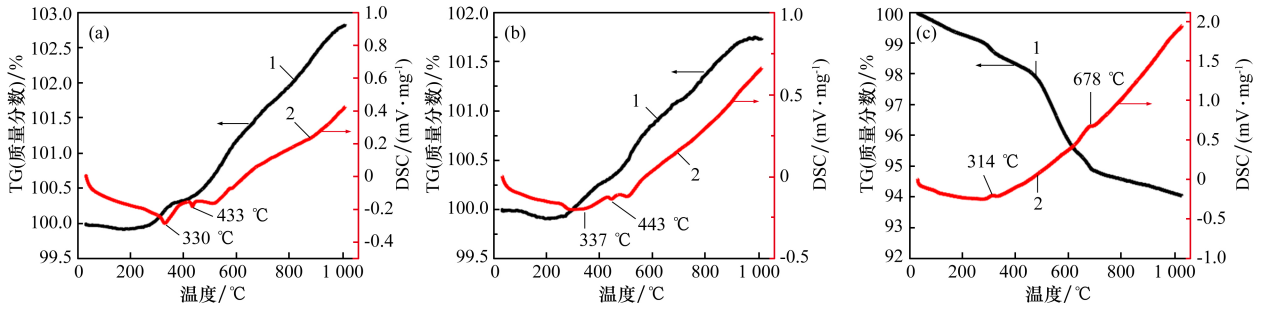
Table 3　Analysis of the physical properties of magnetite material

原料名称	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	最大毛细水质量分数/%	最大分子水质量分数/%	静态成球性	堆密度/($g \cdot cm^{-3}$)	真密度/($g \cdot cm^{-3}$)
O 矿	1 040	13.79	1.41	0.11	2.29	4.94
K 矿	989	13.04	1.58	0.14	2.26	4.84
Y 矿	2 096	17.61	5.85	0.50	1.38	4.28

表 4　膨润土物理性能

Table 4　Physical properties of the bentonite

水分质量分数/%	胶质价/[mL·(15 g)$^{-1}$]	膨胀倍数/($mL \cdot g^{-1}$)	2 h 吸水率/%	吸兰量/[g·(100 g)$^{-1}$]	蒙脱石质量分数/%	pH 值
15.44	15	36	592	23.99	54.28	10.34



（a）O 矿；（b）Y 矿；（c）K 矿

1—TG；2—DSC。

图 2　三种铁矿的 TG-DSC 分析曲线

Fig. 2　TG-DSC analysis of three iron ore types

1.2　试验方法

1.2.1　球团焙烧工艺流程

球团焙烧工艺流程如图 3 所示。该工艺主要包括原料预处理、造球、管炉预氧化焙烧、模拟带式机焙烧、氧化球团性能表征等流程。

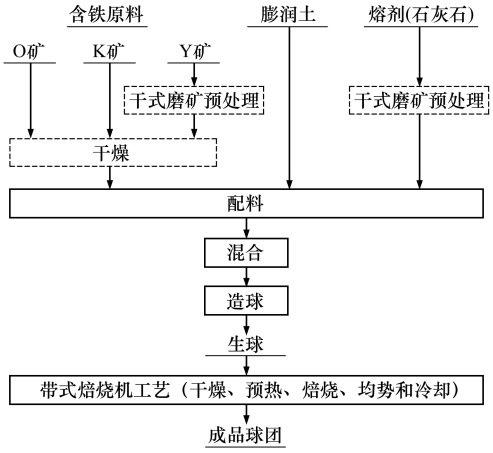


图 3　球团焙烧工艺流程

Fig. 3　Experimental flowsheet of the pellet roasting process

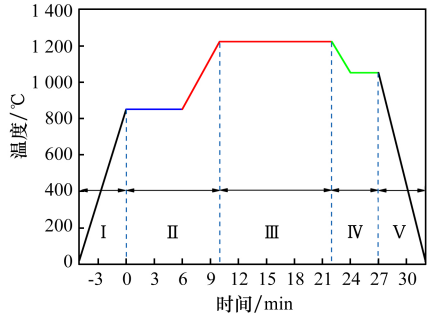
球团试验中，Y 矿的粒度较粗，难以满足球团工艺要求。需对其进行磨矿预处理：① 将块状的 Y 矿用颚式破碎机和对辊破碎机依次破碎至 3 mm 以下；② 通过干式磨矿预处理将原料球磨至 <0.074 mm 粒级质量分数超过 90%。与此同时，为改善 O 矿、K 矿的成球性能，对其进行干式球磨预处理，使其 <0.074 mm 粒级质量分数超过 90%。

根据 40% O 矿 + 20% K 矿 + 40% Y 矿的配矿方案，将细磨的球团原料按比例混合，使混合精矿的比表面积约为 1 800 cm^2/g；然后，控制膨润土用量为 0.9% ~ 1.5%、造球水分为 8.1% ~ 8.5%、造球时间为 10 ~ 12 min 的条件下，对混合精矿进行造球，制备得到碱度为 0.5 ~ 0.9、粒度 10.0 ~ 12.5 mm，落下强度大于等于5 次/(0.5 m)、抗压强度大于等于 15 N/P、爆裂温度为 380 ~ 400 ℃的合格生球。

1.2.2　球团焙烧小型优化试验

将合格生球放入 105 ℃烘箱中静置干燥 4 h 以

上，然后将一定数量的干球装在刚玉瓷舟中，并将其置于卧式管炉中进行模拟带式焙烧工艺的球团焙烧小型试验。试验的升温曲线如图 4 所示。球团焙烧试验系统研究预热温度、预热时间、焙烧温度、焙烧时间、均热温度、原料粒度、二元碱度对熔剂性球团抗压强度的影响，为球团带式焙烧扩大试验提供基础参数。



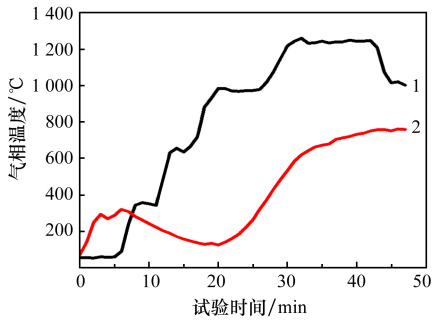
Ⅰ—升温；Ⅱ—预热；Ⅲ—焙烧；Ⅳ—均热；Ⅴ—冷却。

图 4 模拟带式焙烧工艺球团焙烧小型试验温度曲线

Fig. 4 Temperature profile of the pelletizing roasting tests under simulated straight grate process

1.2.3 球团带式焙烧扩大试验

采用自主研制的模拟带式焙烧机扩大试验系统进行球团带式焙烧扩大试验。该试验系统有一个焙烧杯，规格为∅300 mm×500 mm。该带式焙烧机模拟装置可模拟干燥、预热、焙烧、均热和冷却的全流程，各温度段经优化后获得的典型上下真空升温曲线如图 5 所示。试验中，固定铺底料厚度为 50 mm，生球料层厚度为 350 mm，对不同碱度下的焙烧球团进行强度、化学成分、矿相分析及冶金性能评价，包括还原度(*RI*)、还原膨胀指数(*RSI*)和动态低温还原粉化指数(*LTD*)。



1—上真空室；2—下真空室。

图 5 球团带式焙烧扩大试验焙烧杯上下真空室气相温度曲线

Fig. 5 Gas temperature profile of the upper wind box of the pot grade during pilot-scale pellet roasting tests

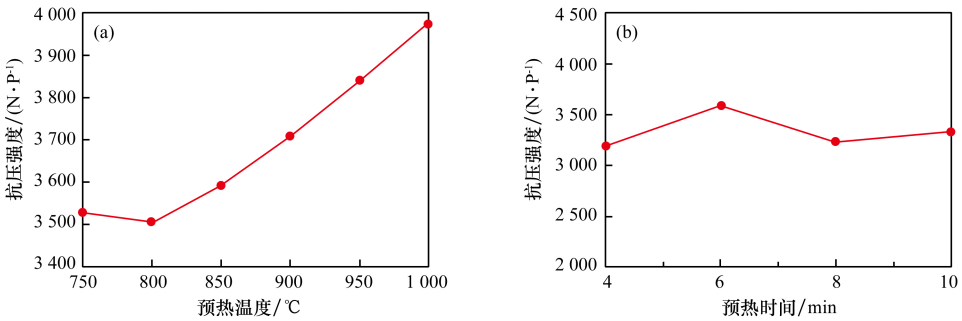
2 结果与讨论

2.1 高硅镁质熔剂性球团焙烧小型优化试验

2.1.1 预热温度和时间的影响

在球团碱度为 0.7、焙烧温度为 1 220 ℃、焙烧时间为 15 min、均热温度为 1 050 ℃、均热时间为 3 min 的条件下，分别考察预热温度和焙烧时间对焙烧球团抗压强度的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，在试验参数范围内，所有焙烧球团的抗压强度均大于 3 000 N/P。在固定预热时间为 6 min 条件下，将预热温度由 850 ℃增加到 1 000 ℃时，焙烧球团的抗压强度虽然由 3 589 N/P 轻微提高到 3 972 N/P，但为确保球团在预热阶段有较高的氧化度，因而将试验预热温度固定为 850 ℃。

相比而言，延长预热时间对焙烧球团抗压强度并没有显著的影响，抗压强度在 3 200～3 600 N/P 波动。为确保球团预热段的氧化度，适宜的预热



(a) 预热温度；(b) 预热时间

图 6 0.7 碱度条件下预热温度和预热时间对焙烧球团抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of preheating temperature and preheating time on cold compressive strength of fired pellets with 0.7 basicity

时间为 6 min。

2.1.2　焙烧温度和时间的影响

在球团碱度为 0.7、预热温度为 850 ℃、预热时间为 6 min、均热温度为 1 050 ℃、均热时间为 3 min 的条件下，研究焙烧温度和焙烧时间对焙烧球团抗压强度的影响，结果如图 7 所示。由图 7 可知，在固定焙烧时间为 15 min、焙烧温度为 1 160～1 250 ℃范围内，球团抗压强度由 1 646 N/P 显著提升到 4 579 N/P，当焙烧温度达到 1 280 ℃时，球团强度减小到 2 289 N/P，这是因为 MgO 的存在降低了赤铁矿相的稳定性和分解温度，从而对球团固结产生了不利影响。因此，适宜的焙烧温度为 1 220 ℃。在固定焙烧温度为 1 220 ℃条件下，将焙烧时间由 6 min 延长至 12 min，焙烧球团抗压强度由 2 433 N/P 显著增加到 3 500 N/P 以上。然而，当焙烧时间进一步增加时，球团强度几乎未变。因此，适宜的焙烧时间为 12 min。

2.1.3　二元碱度的影响

进一步在预热温度为 850 ℃、预热时间为 6 min、焙烧温度为 1 220 ℃、焙烧时间为 12 min、均热温度为 1 050 ℃、均热时间为 3 min 的条件下研究球团二元碱度对焙烧球团抗压强度的影响，结果如图 8 所示。由图 8 可知：对于碱度为 0.5 的焙烧球团，在较低焙烧温度条件下(1 190 ℃)即可获得较高强度，而碱度增加到 0.7 和 0.9 时，球团焙烧温度需适当提高至 1 220 ℃以得到更高的球团强度；同时也可以看到，当焙烧温度超过1 220 ℃后，0.7 碱度的球团焙烧性能优于碱度 0.5 的球团。分析原因认为，CaO-Fe_2O_3-SiO_2-Al_2O_3-MgO 系液相生成温度通常在 1 200 ℃以上，其在低温下则主要发生固相反应，此时 CaO 的存在反而阻碍了颗粒间连接桥的形成，但随着温度进一步升高，生成的液相开始增多，进而促进了球团固结。

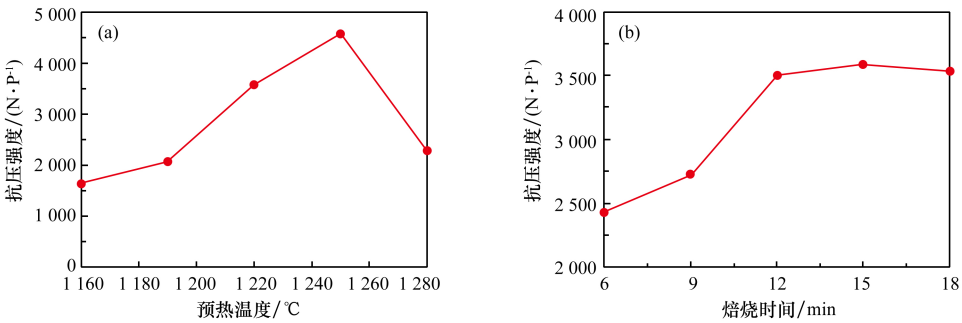
2.2　带式焙烧机球团扩大试验

2.2.1　扩大型球团焙烧参数优化

在小型试验基础上，进一步开展模拟带式焙烧机工艺球团焙烧扩大试验，对干燥、预热、焙烧和均热等热工参数进行优化。在固定膨润土用量为 1.5%、总料层厚度为 400 mm、铺底料厚度为 50 mm，且鼓风干燥段流速为 1.4 m/s、时间为 3 mm、温度为 230 ℃，抽风干燥段流速为1.4 m/s、时间为 5 mm，过渡预热段流速为 2.6 m/s、时间为 3 mm，预热段流速为 2.6 m/s、时间为 6 mm、温度为 850 ℃，焙烧段流速为 2.6 m/s、时间为 9 mm，均热段流速为 1.8 m/s、时间为 5 mm、温度为 1 000 ℃时，得到不同碱度下的球团焙烧最佳工艺参数和成品球团物理性能如表 5 所示。由表 5 可知，在 0.5～0.9 碱度范围内，试验均可制备出抗压强度大于 2 500 N/P、转鼓强度大于 94%、耐磨指数低于 5% 的优质球团矿。但相比而言，当碱度为 0.5～0.7 时，球团焙烧性能较好，而当碱度为 0.9 时，通常需要更高的焙烧温度，这与小试结果相吻合。

2.2.2　焙烧球团的化学成分

对不同碱度条件下扩大试验得到的焙烧球团进行化学成分分析，结果如表 6 所示。由表 6 可知：在 0.5～0.9 碱度条件下，成品球团矿的 Fe、FeO、SiO_2、MgO 和 Al_2O_3 质量分数分别为 57%～60%、0.8%～1.2%、7.5%～7.9%、1.4%～1.5% 和1.4%～1.5%，为典型高硅镁质熔剂性球团。球



(a) 焙烧温度；(b) 焙烧时间

图 7　0.7 碱度条件下焙烧温度和焙烧时间对焙烧球团抗压强度的影响

Fig. 7　Effect of roasting temperature and roasting time on cold compressive strength of fired pellets with 0.7 basicity

表 5 不同碱度条件下球团带式焙烧最佳工艺参数及球团物理性能对比

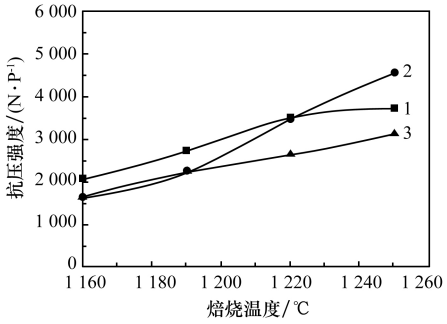
Table 5 Comparison of the optimal operational parameters and outcomes of fired pellets with different basicity

二元碱度	生球水分/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	生球装料量/kg	抽风干燥温度/℃	过渡预热段温度/℃	焙烧段温度/℃	焙烧球团抗压强度/(N·P^{-1})				转鼓强度(>6.3 mm)/%	耐磨指数(<0.5 mm)/%	球团 8~16 mm 粒级质量分数%
							上层	中层	底层	平均值			
0.5	8.2	8.6	37.65	280	650	1 220	3 251	2 971	2 515	2 912	94.12	4.39	99.85
0.7	7.9	8.0	38.12	270	600	1 230	3 691	3 340	2 380	3 137	94.14	4.22	98.48
0.9	8.0	8.5	38.21	270	650	1 240	3 514	2 379	2 198	2 697	94.23	4.57	97.39

表 6 不同碱度焙烧球团主要化学成分

Table 6 Main chemical compositions of fired pellets made from different basicity

二元碱度	化学成分(质量分数)/%												
	Fe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P	S	Zn	Pb	Cu
0.5	59.11	1.01	7.81	1.46	3.77	1.40	0.103	0.102	0.022	0.026	0.013	<0.01	<0.01
0.7	58.12	1.16	7.81	1.44	5.48	1.46	0.102	0.100	0.020	0.010	0.015	<0.01	<0.01
0.9	57.42	1.31	7.56	1.42	6.51	1.50	0.102	0.098	0.021	0.013	0.014	<0.01	<0.01



碱度：1—0.5；2—0.7；3—0.9。

图 8 不同碱度条件下焙烧温度对焙烧球团抗压强度的影响

Fig. 8 Effect of firing temperature on cold compressive strength of fired pellets at different basicity

团 FeO 质量分数相对较高，这是因为由 K 矿带入的含镁磁铁矿$(Fe,Mg)Fe_2O_4$难以被完全氧化；此外，在原料 SiO_2 含量和碱度较高的情况下，球团内部生成了更多的硅酸盐渣相，而该物相不仅自身的氧化性较差，也进一步阻碍了磁铁矿的氧化。

2.2.3 焙烧球团的冶金性能

不同碱度条件下焙烧球团的还原度指数、还原膨胀指数和动态低温还原粉化性如表 7 所示。由表 7 可知，碱度为 0.5 ~ 0.9 的碱性球团均具有良好还原性，其还原度指数达到 65% ~ 69%，还原膨胀指数低于 15%，同时低温还原粉化性能(>6.30 mm)维持在 98% 以上。

2.3 球团矿矿相分析

不同碱度条件下的焙烧球团微观结构和主

表 7 不同碱度焙烧球团的 *RI*、*RSI*、*LTD*

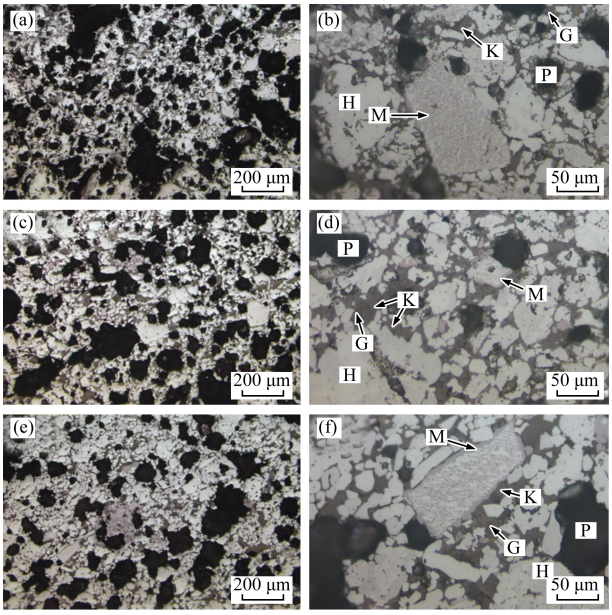
Table 7 *RI*, *RSI* and *LTD* of roasted pellets made from different basicity

二元碱度	*RI*/%	*RSI*/%	*LTD*/%		
			>6.30 mm	<3.15 mm	<0.50 mm
0.5	68.95	13.20	98.97	0.84	0.70
0.7	65.38	12.50	99.36	0.50	0.34
0.9	66.52	10.08	98.65	1.12	1.01

要物相如图 9 所示。通过光学显微镜观察，结合化学成分分析和图像面积统计法对 4 组焙烧球团的矿物组成进行测定，结果如表 8 所示。由表 8 可知，不同碱度条件下焙烧球团中物相类型相近，其主要为赤铁矿，其次包括渣相、钙铁橄榄石等黏结相，以及未氧化完全的残留磁铁矿，但未发现明显铁酸钙物相的生成。焙烧球团孔隙随着碱度的增加逐渐减少，愈加致密，赤铁矿的含量逐渐减少，钙铁橄榄石的含量增多。0.5 ~ 0.9 碱度焙烧球团的固结主要是依靠 Fe_2O_3 再结晶的形式实现，此外，以渣相和钙铁橄榄石等液相固结也起到了促进作用。

3 结 论

(1) 配比为 40% O 矿 + 20% K 矿 + 40% Y 矿的混合矿在二元碱度为 0.5 ~ 0.9、预热温度为 850 ℃、预热时间为 6 min、焙烧温度为 1 220 ℃、焙烧时间为12 min、均热温度为1 050 ℃、均热时



二元碱度：（a）0.5；（b）0.7；（c）0.9

H—赤铁矿；M—磁铁矿；G—玻璃相；K—钙铁橄榄石；P—孔洞。

图 9　不同碱度焙烧球团的微观结构

Fig. 9　Microstructure of fired pellets made from different basicity

表 8　焙烧球团的矿物组成

Table 8　Phase compositions of roasting pellets

二元碱度	矿物组成(面积比)/%					
	赤铁矿(H)	磁铁矿(M)	玻璃相(G)	钙铁橄榄石(K)	其他	孔隙率
0.5	86	5	4	3	1	45
0.7	83	6	4	6	1	36
0.9	80	6	5	8	1	33

间为 3 min 条件下均可制备得到焙烧球团抗压强度大于 2 500 N/P，球团还原性良好（还原度指数≥65%）、还原膨胀指数低（≤15%）、低温还原粉化性能优良（≥98.88%）的高硅镁质熔剂性球团。

（2）碱度为 0.5～0.9 的条件下，焙烧球团的强度主要通过 Fe_2O_3 再结晶的固相固结形式维持。此外，渣相和钙铁橄榄石等液相固结也在促进过程中发挥了作用。提高碱度有助于生成更多的液相，进一步加强焙烧球团的固结效果。

参考文献：

[1] 朱德庆，黄铮静，杨聪聪，等．GF88 赤铁精矿制备氧化球团的试验研究[J]．烧结球团，2020，45(6)：61－68.
ZHU Deqing，HUANG Zhengjing，YANG Congcong，et al. Research on production of oxidized pellets from GF88 hematite concentrate[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(6)：61－68.

[2] 李胜，何志军，李云飞，等．不同球团矿和块矿配加条件下炉料冶金性能[J]．钢铁，2020，55(1)：6－11.
LI Sheng，HE Zhijun，LI Yunfei，et al. Metallurgical properties of furnace charge under different conditions of pellet ore and block ore addition[J]. Iron and Steel，2020，55(1)：6－11.

[3] ZHU Deqing，WANG Dingzheng，PAN Jian，et al. Utilization of hydrated lime as binder and fluxing agent for the production of high basicity magnesium fluxed pellets[J]. ISIJ International，2022，62(4)：632－641.

[4] 任伟，韩基祥．带式焙烧机球团技术开发与应用[N]．世界金属导报，2017－06－20(B07).
REN Wei，HAN Jixiang. Development and application of straight grate pelletizing process[N]. World Metal Herald，2017－06－20(B07).

[5] 蔡大为，范晓慧．钢铁工业低碳炉料及绿色冶炼技术进展[J]．烧结球团，2023，48(4)：1－7.
CAI Dawei，FAN Xiaohui. Progress of low-carbon charge and green smelting technology in iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing，2023，48(4)：1－7.

[6] 邓睿．带式焙烧机制备镁质熔剂性球团研究[J]．中国冶金，2021，31(2)：55－59.
DENG rui. Study on magnesia-bearing fluxed pellets production by travelling grate[J]. China Metallurgy，2023，48(4)：1－7.

[7] 乔红梅，张建良，王耀祖，等．国内外钙质碱性球团生产实践及发展趋势[J]．钢铁研究学报，2021，33(10)：1031－1039.
QIAO Hongmei，ZHANG Jianliang，WANG Yaozu，et al. Production practice and development trend of calcareous alkaline pellets around the world[J]. China Metallurgy，2021，33(10)：1031－1039.

[8] 朱德庆，杨聪聪，潘建，等．福建三钢带式焙烧机球团工艺研究[J]．烧结球团，2020，45(4)：27－34.
ZHU Deqing，YANG Congcong，PAN Jian，et al. Research on pellets process of belt type roasting machine in Fujian Sangang[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(4)：27－34.

[9] 巨建涛，李坚毅，邢相栋．碱度对含钡磁铁矿粉球团固结机理影响[J/OL]．矿产综综利，2023：1－8

[2023 - 11 - 21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231101.0829.002.html.

JU Jiantao, LI Jianyi, XING Xiangdong. Research on pellets process of belt type roasting machine in Fujian Sangang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023: 1 - 8 [2023 - 11 - 21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231101.0829.002.html.

[10] 倪杰,师学峰,白晨晨,等. 熔剂性球团成矿过程抗压强度及微观结构分析[J]. 钢铁,2024,59(2):36 - 43.

NI Jie, SHI Xuefeng, BAI Chengcheng, et al. Study on technology and mechanism of magnesia-containing pellets produced by straight grate indurating machine[J]. Iron and Steel, 2024, 59(2): 36 - 43.

[11] 潘建,王硕,甘牧原,等. 带式焙烧机制备镁质球团的工艺及机理研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):27 - 33.

PAN Jian, WANG Shuo, GAN Muyuan, et al. Analysis of compressive strength and microstructure during the mineralization process of flux based pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(3): 27 - 33.

[12] 张福明,徐文轩,程相锋,等. 高炉高比例球团矿冶炼关键工艺技术分析[J/OL]. 钢铁, 2023: 1 - 21 [2023 - 11 - 21]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449 - 749x.20230381.

ZHANG Fuming, XU Wenxuan, CHENG Xiangfeng, et al. Analysis on key process and technology of blast furnace ironmaking on high charging proportion of pellet ore[J]. Iron and Steel, 2023: 1 - 21 [2023 - 11 - 21]. https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449 - 749x.20230381.

[13] 范建军,郭宇峰,臧龙,等. 碱度对细粒级铁矿粉球团性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2019,31(5):440 - 445.

FAN Jianjun, GUO Yufeng, ZANG Long, et al. Effect of basicity on properties of pellets produced by ultra fine-sized iron concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(5): 440 - 445.

[14] 田筠清,青格勒,刘长江,等. 使用石灰石生产低硅碱性球团矿试验[J]. 中国冶金,2018,28(4):13 - 16;21.

TIAN Yunqing, QING Gele, LIU Changjiang, et al. Production experiment of low silica alkaline pellet by limestone[J]. China Metallurgy, 2018, 28(4): 13 - 16; 21.

[15] 王晓磊,师学峰,胡长庆,等. 高硅镁质熔剂性球团焙烧试验研究[J]. 矿产综合利用,2020,224(4):87 - 92.

WANG Xiaolei, SHI Xuefeng, HU Changqing, et al. Experimental study on roasting of high silica magnesium flux pellet[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 224(4): 87 - 92.

[16] 李建鹏,卢建光,刘小杰,等. 球团矿中 MgO 含量对炉料熔滴性能的影响[J]. 中国冶金,2022,32(4):21 - 26;33.

LI Jianpeng, LU Jianguang, LIU Xiaojie, et al. Effect of MgO content in pellets on softening-dripping properties of burden in BF[J]. China Metallurgy, 2022, 32(4): 21 - 26; 33.

[17] 李卓,宗燕兵,张建良,等. 高硅镁质熔剂性球团还原历程及冶金性能分析[J]. 钢铁,2023,58(3):34 - 42;52.

LI Zhuo, ZONG Yanbin, ZHANG Jianliang, et al. Reduction process and metallurgical properties analysis of high silicon magnesia flux pellets[J]. Iron and Steel, 2023, 58(3): 34 - 42; 52.

[18] 李建鹏,卢建光,刘小杰,等. 球团矿中 MgO 含量对炉料熔滴性能的影响[J]. 中国冶金,2022,32(4):21 - 26;33.

LI Jianpeng, LU Jianguang, LIU Xiaojie, et al. Effect of MgO content in pellets on softening-dripping properties of burden in BF[J]. China Metallurgy, 2022, 32(4): 21 - 26; 33.