球团

高硅铁精矿碱性球团性能优化试验

张耀斌[1]，王 磊[1]，王 帅[2]，范建军[3]，李泽岩[1]，郭宇峰[2]
（1. 太钢集团岚县矿业有限公司，山西 吕梁 033599；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；
3. 太原钢铁（集团）有限公司技术中心，山西 太原 030003）

摘要：碱性球团的应用可提高球团矿入炉比例，能有效降低渣比、能源消耗，提高高炉利用系数、减少碳排放。本文通过研究碱度对高硅铁精矿球团制备的影响，明确采用链算机—回转窑法生产高硅铁精矿碱性球团的最优工艺参数。试验结果表明：石灰石的成球性指数高于铁精矿；石灰石在生球内部均匀分布，无明显偏析现象；提高球团碱度后，生球的性能变化不大。提高预热温度能增大球团抗压强度；随着焙烧温度的提高，不同碱度焙烧球的抗压强度有所增大，且在各个焙烧温度点，基本呈现碱度越高，球团抗压强度越大的规律。在焙烧温度为 1 230 ℃，焙烧时间为 10 min 时，各碱度焙烧球抗压强度均能达到 3 000 N/P。在低碱度球团中，熔剂与铁精矿反应生成硅酸盐或钙铁硅酸盐矿物；在高碱度球团中，黏结相矿物转变为以铁酸钙为主。球团的还原膨胀率随着碱度的提高呈先升高后下降的趋势。当碱度为 0.8 时，球团还原膨胀率最大，超过了 20%；当碱度大于 1.0 时，球团还原膨胀率低于 10%。

关键词：高硅铁精矿；碱性球团；抗压强度；冶金性能；还原膨胀率
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0031－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.072

Performance optimization test of alkaline pellets of high silica concentrate

ZHANG Yaobin[1], WANG Lei[1], WANG Shuai[2], FAN Jianjun[3], LI Zeyan[1], GUO Yufeng[2]
(1. Lanxian Mining Company, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Lüliang 033599, Shanxi, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Technology Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co., Ltd., Taiyuan 030003, Shanxi, China)

Abstract: The application of alkaline pellets can increase the proportion of pellets into the furnace, effectively reduce the slag ratio and energy consumption, improve the utilization coefficient of the blast furnace, and reduce carbon emissions. The effect of alkalinity on the preparation of high silica concentrate pellets is studied, and the optimal process parameters for the production of high silica concentrate alkaline pellets by chain grate-kiln method are clarified. The results show that the spherical index of limestone is higher than that of iron concentrate. The limestone is evenly distributed in the fresh pellet without obvious segregation. After the alkalinity of the pellets is increased, there is not much change in performance of the fresh pellet. Increasing the preheating temperature can increase the compressive strength of the pellets. With the increase of roasting temperature, the compressive strength of the roasted pellets with different alkalinity increases, and the higher the alkalinity, the greater the compressive strength of the pellets at each roasting temperature point. When the roasting temperature is 1 230 ℃ and the roasting time is 10 min, the compressive strength of each alkalinity roasted pellets can

收稿日期：2023－10－08；**修回日期**：2023－11－07
基金项目：山西省科技重大专项计划资助项目(20191101002)
作者简介：张耀斌(1972—)，男，工程师，从事冶金矿山采、选、冶工艺技术研究与管理工作。
通信作者：王 帅(1988—)，男，副教授，从事烧结球团、复杂矿综合利用等方面的研究工作。

reach 3 000 N/P. In low-alkalinity pellets, the flux reacts with iron ore concentrate to form silicate or calcium-iron silicate minerals; In high-alkalinity pellets, the binder phase minerals are converted to calcium ferrite. The reductive expansion rate of pellets increases first and then decreases with the increase of alkalinity. When the alkalinity is 0.8, the reduction expansion rate of pellets is the largest, exceeding 20%. When the alkalinity is greater than 1.0, the reductive expansion rate of pellets is less than 10%.

Key words: high silica concentrate; alkaline pellets; compressive strength; metallurgical properties; reduction expansion rate

目前我国钢铁企业高炉炉料结构普遍以高碱度烧结矿为主，并配以酸性球团矿和块矿。近年来，我国高炉冶炼向大型化、绿色化、低碳化方向发展，对高炉炉料结构和质量的要求也越来越高[1]。球团工艺能源消耗仅为烧结工艺的一半，粉尘、NO_x、二噁英等污染物排放量也比烧结工艺低；且碱性球团相比酸性球团能有效改善高温冶炼性能，可以提高球团矿的入炉比例。高比例球团矿替代烧结矿进行高炉冶炼，对降低钢铁工业能源消耗、节能减排、清洁生产具有重要作用[2]。大量研究和生产实践证明，提高球团矿入炉比例可以显著减少渣量和降低燃料消耗，提高高炉的利用系数[3-5]。欧美钢铁企业高炉球团入炉比处于较高水平，部分企业的球团矿的使用量可达100%[6]。与传统的酸性球团矿相比，碱性球团矿具备更优的冶金性能，其已逐渐成为我国球团生产的发展方向[7]。

碱性球团矿的综合性能优异，但其在工业生产中存在爆裂温度降低、低温还原粉化率升高和易导致回转窑结圈等问题。针对这些问题，近年来，国内外学者进行了大量的研究。中南大学[8]探究了碱度对生球特性的影响规律，结果表明：提高碱度能增大生球的落下强度，促使铁矿球团的还原度升高、软熔区间变窄，当碱度超过0.8以后球团的还原膨胀率降低。首钢京唐公司[9]使用消石灰生产低硅碱性球团矿（SiO_2质量分数为2.1%），高炉配加低硅碱性球团矿后取得了良好的技术经济指标和降碳效果。宝武湛江钢铁[10]使用链算机—回转窑工艺生产碱度为0.85左右的熔剂性球团矿（SiO_2质量分数为1.8%），认为碱性球团生产应重点控制总液相量和膨胀指数等指标，这对原料中的SiO_2和碱金属含量提出了更高的要求。蔡幸福等[11]研究了高镁碱性球团（SiO_2质量分数为4.54%）抗压强度的变化规律，结果表明：随着碱度的提高，生球的落下强度先增加后逐渐趋于平缓，生球的抗压强度逐渐增加，而球团矿强度先增加后降低，并在碱度为1.3时达到最大值。兰臣臣等[12]研究了不同碱度下镁质低硅球团矿（SiO_2质量分数为3.50%）的冶金性能，结果表明：随着碱度的增加，球团矿的抗压强度、还原性和还原膨胀指数均先增大后减小；高碱度球团的软熔滴落性能优于低碱度球团；当碱度为0.60时球团矿的综合性能最佳。柴铁凡等[13]研究了碱度对白云鄂博矿铁精矿（SiO_2质量分数为2.79%）还原膨胀性能的影响，结果表明：随着碱度的提高，球团矿的膨胀率先增加后减小；当碱度为0.8时，球团矿的膨胀率最大，综合得到制备球团矿的最优碱度为1.4。总的来看，目前关于碱性球团制备的研究主要是针对低硅铁精矿。而我国铁矿资源中富矿少，低硅铁矿资源多需要国外进口，存在资源安全隐患，采用自产含硅量较高的铁精矿来生产碱性球团势在必行。采用高硅铁精矿制备碱性球团时，由于铁精矿中SiO_2质量分数较高，需要配入的熔剂量较多，这对生球制备、球团固结等过程均具有重要影响，因此，开展高硅铁精矿碱性球团制备技术的研究很有必要。

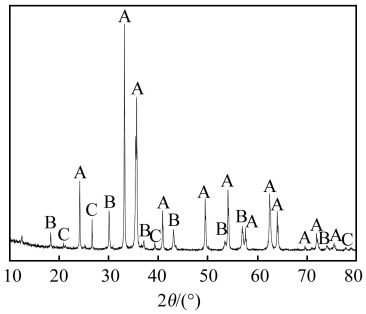
本文采用SiO_2质量分数大于3%的自产铁精矿粉为原料，在实验室模拟链算机—回转窑法制备碱性球团，并获得最优工艺参数，查明高硅铁精矿碱性球团固结及还原膨胀行为，为高硅铁精矿制备优质碱性球团提供指导。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用的造球原料为太钢袁家村自产的铁精矿粉以及石灰石粉和膨润土，其主要化学成分

如表 1 所示。由表 1 可见：该铁精矿粉全铁质量分数为 64.93%、SiO_2 质量分数为 4.01%；膨润土中主要成分 SiO_2、Al_2O_3 的质量分数分别为 60.01%、13.09%；试验用石灰石粉 CaO 质量分数达到 54.53%，粒度较细且相对均匀，有利于其在球团预热焙烧过程的分解和矿化反应。高硅铁精矿的物相组成如图 1 所示。由图 1 可以看出，该铁精矿主要物相为赤铁矿、磁铁矿及少量的石英。



A—赤铁矿；B—磁铁矿；C—石英。

图 1　高硅铁精矿的物相组成

Fig. 1　Phase composition of high silica iron concentrate

对石灰石粉进行了热重差热分析，以了解其在球团预热焙烧过程的热行为，结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，试验用石灰石粉在约 679 ℃时开始分解，821.3 ℃时失重速率最大，此时为沸腾分解温度，约 830 ℃后石灰石粉分解完全。上述测定结果表明，球团预热温度应在 830 ℃以上，才能保证石灰石中 $CaCO_3$ 分解完全，使生成的 CaO 与铁精矿进一步发生矿化反应。

1.2　研究方法

造球、预热和焙烧试验步骤：首先将铁精矿、石灰石、膨润土（黏结剂）按比例准确称量，充分混匀后进行造球。造球设备选用圆盘造球机，设定其转速为 22 r/min、造球时间固定为 12 min，生球密实时间为 2 min；采用两段式管炉进行预热和焙烧试验，模拟实际链箅机—回转窑生产过程的热工制度。

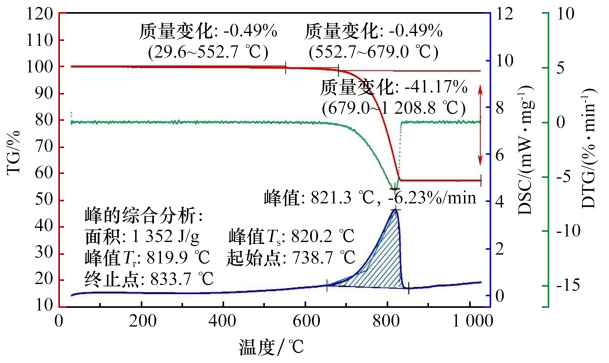


图 2　石灰石粉热重差热分析

Fig. 2　TG-DSC of limestone powder

球团性能参数检测方法：随机选取 10 ~ 15 mm 粒级合格生球，检测相关性能指标。球团抗压强度采用门式金属球团抗压机（华翰 HH-WNCL3000）测定。每组试验点测定 20 个球团，取平均值作为该组试验球团矿的抗压强度值[14]。球团矿的化学成分、冶金性能等均按照相关国家标准进行测定。球团物相组成采用 X 射线衍射仪（布鲁克 D8 advance）测定。采用扫描电镜（SEM 型号为 MIRA4 LMH，EDS 型号为 Ultim Max 40）观察球团矿显微结构。

2　结果与讨论

2.1　碱度对生球性能的影响

控制实验室造球试验条件：原料初始水分质量分数为 7.5%，生球水分为 9.0%，膨润土配比为 1.1%。试验控制石灰石粉添加量来调整生球碱度进行造球，试验结果如表 2 所示。由表 2 可知：在添加 1.1% 膨润土的条件下，提高生球碱度，生球的落下强度、抗压强度均可满足生产要求。铁精矿与石灰石粉的静态成球性指数如表 3 所示。由表 3 可见：铁精矿和石灰石的成球性能好且石灰石的成球性指数高于铁精矿，因此提高球团碱度，在一定程度上有利于改善生球质量。

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	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	S	P	烧损
铁精矿	64.93	10.47	0.64	4.01	0.48	0.73	0.053	0.077 0	0.048	0.026 0	1.02
膨润土	2.74	—	3.58	60.01	2.73	13.09	1.380	2.790 0	0.032	0.035 0	13.68
石灰石	0.36	—	54.53	1.06	0.53	0.44	0.140	0.003 7	0.018	0.008 4	42.68

表 2 不同碱度下生球强度对比

Table 2 Comparison of the strength of green balls with various basicity

二元碱度	配比(质量分数)/%		生球性能指标			
	石灰石粉	膨润土	水分(质量分数)/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
基准(0.1)	0	1.1	9.58	3.5	16.52	540
0.6	3.62	1.1	9.72	3.1	13.56	535
0.8	5.01	1.1	9.66	3.2	12.84	520
0.9	5.70	1.1	9.36	3.4	17.22	515
1.0	6.37	1.1	9.67	3.2	12.59	540
1.2	7.71	1.1	9.62	3.3	11.56	557

表 3 试验原料的成球性能

Table 3 Ballability of raw materials

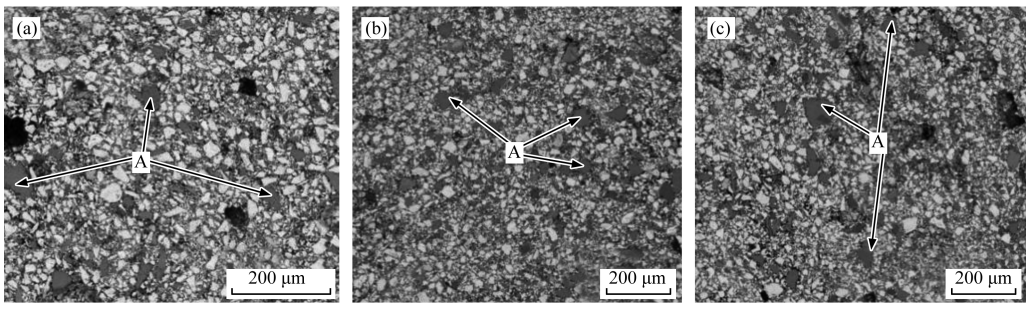
原料名称	最大分子水(质量分数)/%	最大毛细水(质量分数)/%	成球性指数
铁精矿	5.36	16.13	0.49
石灰石	12.51	26.55	0.89

2.2 熔剂在铁精矿球团中的分布行为

对不同碱度(R=0.8、1.0、1.2)的生球进行扫描电镜分析，研究生球制备过程中铁精矿、熔剂的分布行为，得到不同碱度生球的显微结构如图 3 所示。由图 3 可知，不同碱度的生球团内部结构致密，伴随有少量孔洞，SEM 视域中主要有浅灰色和深灰色两种色度的物相。以碱度为 0.8 的生球为例，对生球内部的铁精矿和熔剂分布情况进行分析，结果如图 4 所示。图 4 中，浅灰色主要物相为石灰石，深灰色颗粒主要为硅酸盐或石英。由图 4 可见，熔剂石灰石在生球内部均匀分布，无明显偏析现象。

2.3 碱性球团预热焙烧过程相图分析

由石灰石的差热分析结果可知，在预热过程中向碱性球团中添加的石灰石熔剂首先会分解生成氧化钙，并与铁精矿中的主要成分 Fe_2O_3 和 SiO_2 组成 Fe_2O_3—SiO_2—CaO 反应体系。采用 FactSage 8.0 热力学软件“Phase diagram”模块对 Fe_2O_3—SiO_2—CaO 三元体系进行相图计算与分析，计算结果如图 5 所示。由图 5 可知：当 Fe_2O_3—SiO_2—CaO 体系碱度较高时，铁酸钙为初生液相；随着碱度的提高，液相区增大，铁酸钙大量生成；且提高焙烧温度，液相区域面积也会逐渐扩大。在区域 A 内，CaO 与 Fe_2O_3 含量较高，SiO_2 含量较少，CaO 与 Fe_2O_3 形成铁酸钙相 $CaFe_2O_4$、$CaFe_4O_7$、$Ca_2Fe_2O_5$。从 A 区域的液相线可以看出，铁酸钙($CaFe_2O_4$)和铁酸半钙($CaFe_4O_7$)在焙烧温度为 1 250 ℃时可熔融形成液相，促进碱性球团的液相固结。在区域 B 内，形成的主要物质为 $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$。从区域 B 的液相线温度可知，$Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$可在 1 200 ℃的焙烧温度时形成液相。对比铁酸钙相，$Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$的熔化温度更低，更容易促进碱性球团的液相固结。

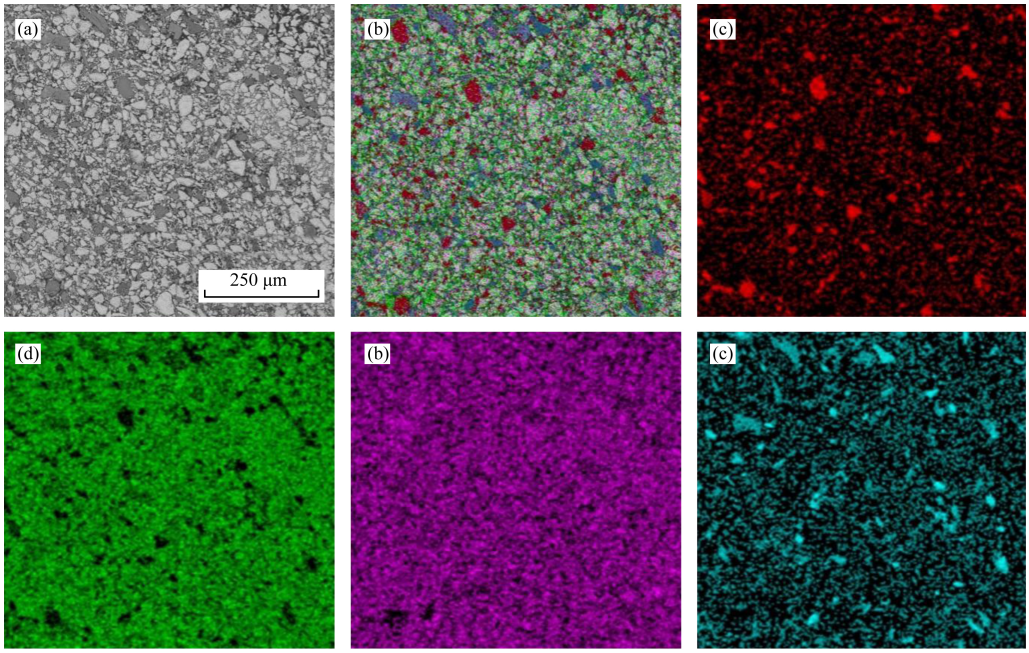


碱度：(a) 0.8；(b) 1.0；(c) 1.2

A—石灰石。

图 3 不同碱度生球显微结构

Fig. 3 Microstructure of raw spheres with different basicity



（a）SEM 图谱；（b）总谱；（c）Ca 元素；（d）Fe 元素；（e）O 元素；（f）Si 元素。

图 4　碱度为 0.8 生球的 SEM 扫描元素分布

Fig. 4　Element distribution SEM map of green pellet of basicity 0.8

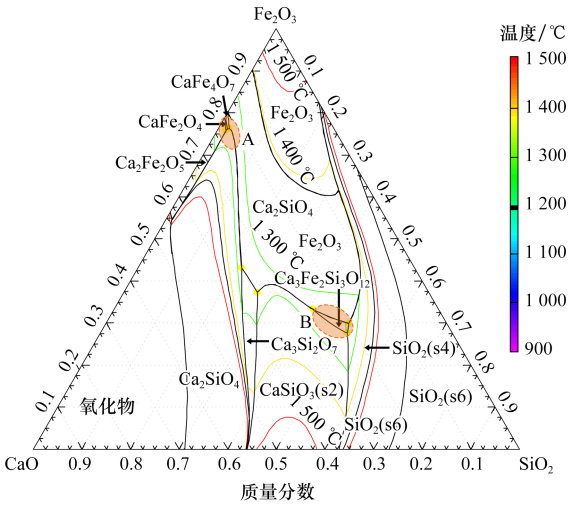


图 5　Fe_2O_3—SiO_2—CaO 系三元相图

Fig. 5　Ternary phase diagram of Fe_2O_3—SiO_2—CaO system

（注：空气气氛，标准大气压 101 kPa）

2.4　碱度对球团预热焙烧行为的影响

2.4.1　碱度对预热球抗压强度的影响

生产实践发现，碱性球团较酸性球团更加容易产生粉末，这是其在回转窑生产易结圈的主要原因之一。为减轻回转窑结圈现象，减少预热球团入窑粉末量，在实际生产中以强度大于 1 000 N/P 作为预热球团的质量评价指标。在预热时间为 10 min、预热温度为 1 140 ℃的条件下，研究二元碱度对预热球抗压强度的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可见：随着碱度的提高，预热球的抗压强度逐渐提高。除基准球团（R = 0.1）和 R = 0.6 的球团外，在 1 140 ℃温度下预热 10 min，其余碱度预热球的抗压强度均达到 1 000 N/P 以上，R = 1.2 的球团抗压强度最大，增幅为 24.60%。

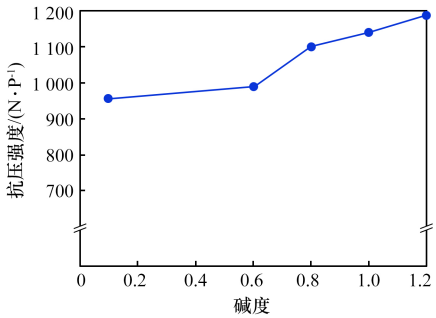


图 6　碱度对预热球抗压强度的影响

Fig. 6　Effect of basicity on compressive strength of preheated pellets

2.4.2　预热制度对预热球抗压强度的影响

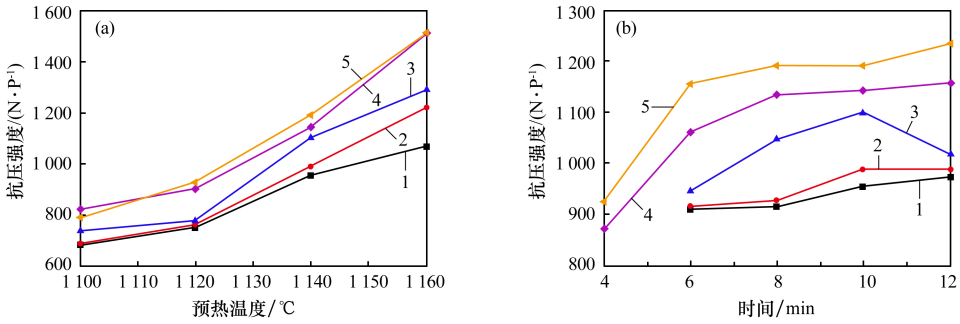
在预热时间为 10 min 条件下，得到预热温度对预热球抗压强度的影响如图 7(a)所示。由图 7(a)可知：随着预热温度的增加，各碱度球团的抗压强度均有所增大。降低预热温度至 1 120 ℃时，

各碱度预热球抗压强度均低于 1 000 N/P；升高预热温度至 1 160 ℃时，除基准预热球(R = 0.1)抗压强度略低外，其余碱度预热球抗压强度远大于 1 000 N/P，高碱度球团(1.0 ~ 1.2)强度高达 1 500 N/P。这说明预热温度对碱性球团强度影响较大。在实际生产过程中，为达到预热球的生产强度要求，高碱度球团所需的预热温度可适当降低。在预热温度为1 140 ℃条件下，研究预热时间对预热球抗压强度的影响，结果如图 7(b)所示。由图 7(b)可知：当预热温度为 1 140 ℃时，各碱度球团抗压强度随预热时间的延长而逐渐增大，但当预热时间超过 10 min 后，抗压强度不再出现显著变化。因此，可通过提高预热温度并适当延长预热时间的手段，从而提高 0.8 碱度以下预热球的抗压强度。

2.4.3 焙烧制度对焙烧球团抗压强度的影响

为降低实际生产中的能源消耗，不同碱度的预热球在满足抗压强度 >1 000 N/P 的同时应尽可能降低预热温度。由前文可知，对于 R = 0.1 的球团，预热制度为 1 160 ℃、8 min；对于 R = 0.6 的球团，预热制度为 1 160 ℃、6 min；对于 R = 0.8 的球团，预热制度为 1 140 ℃、8 min；对于 R = 1.0 和 1.2 的球团，预热制度为 1 140 ℃、6 min。

保持焙烧时间为 10 min 不变，得到焙烧温度对焙烧球抗压强度的影响如图 8(a)所示。由图 8(a)可知：提高焙烧温度可使各碱度球团的抗压强度均有所增大；且在各个焙烧温度点，基本呈现碱度越高抗压强度越大的规律。其中，当焙烧温度为 1 250 ℃时，基准焙烧球(R = 0.1)的抗压强度达到3 000 N/P 的入炉标准，其他不同碱度下焙烧球抗压强度在焙烧温度为 1 230 ℃时便已超过 3 000 N/P。因此保持焙烧温度为 1 230 ℃，研究焙烧时间对不同碱度焙烧球抗压强度的影响，结果如图8(b)所示。由图8(b)可知：延长焙烧

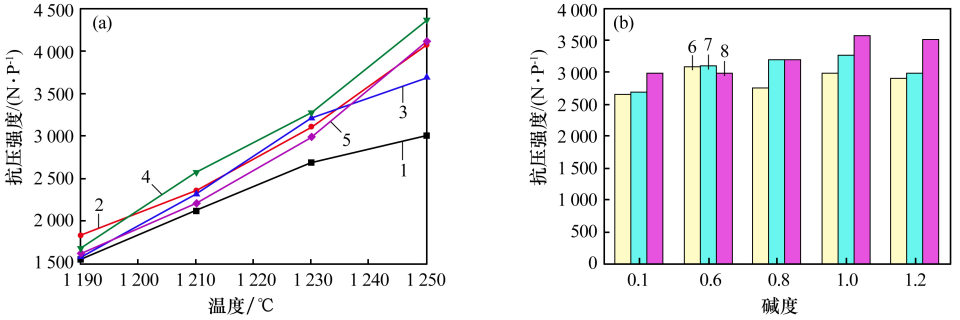


碱度：1—0.1；2—0.6；3—0.8；4—1.0；5—1.2。

(a) 预热温度(预热时间为 10 min)；(b) 预热时间(预热温度为 1 140 ℃)

图 7 预热温度和时间对预热球抗压强度的影响

Fig. 7 Effect of preheating temperature and preheating time on compressive strength of preheated pellets



碱度：1—0.1；2—0.6；3—0.8；4—1.0；5—1.2。

预热时间/min：6—8；7—10；8—12。

(a) 焙烧温度；(b) 焙烧时间

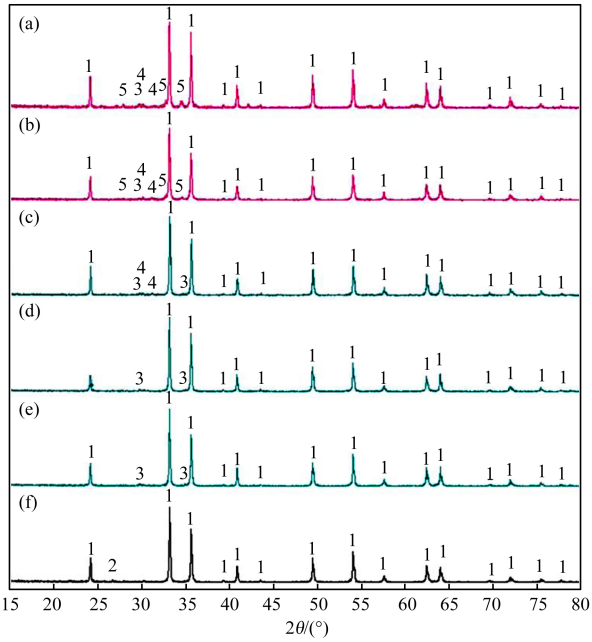
图 8 焙烧制度对焙烧球抗压强度的影响

Fig. 8 Effect of roasting conditions on compressive strength of roasted pellets

时间，各碱度焙烧球抗压强度均有小幅度增加，在焙烧温度为 1 230 ℃、焙烧时间为 10 min 时，碱度在 0.6 以上的焙烧球抗压强度均能达到 3 000 N/P。

2.5　碱度对球团物相组成及冶金性能的影响

不同碱度条件下制备的焙烧球团 XRD 分析结果如图 9 所示。由图 9 可知：焙烧球团主要物相为赤铁矿物相，基准球（$R=0.1$）中没有熔剂的添加，焙烧球物相中除赤铁矿相外，仅含有少量的石英物相；随着球团二元碱度的增大，物相中含钙物相种类和含量也逐渐增多。碱度为 0.4 ~ 0.6 的球团中有少量含钙铁的硅酸盐物相生成，由于结晶不完全，钙铁硅酸盐的特征峰不明显；碱度为 0.8 的球团中出现硅酸钙；碱度为 1.0 ~ 1.2 的球团中除钙铁硅酸盐相、硅酸钙相之外，出现了较明显的复合铁酸钙衍射峰，其属于 SiO_2—Fe_2O_3—CaO—Al_2O_3 多元体系。与硅酸钙相比，复合铁酸钙具有更高的结晶度和连接强度。



碱度：（a）1.2；（b）1.0；（c）0.8；（d）0.6；（e）0.4；（f）0.1。

1—赤铁矿；2—石英；3—钙铁硅酸盐；4—硅酸钙；5—复合铁酸钙。

图 9　不同碱度焙烧球物相组成

Fig. 9　Phase composition of roasted balls with different basicity

碱性球团还原膨胀率随碱度变化的规律如图 10 所示。由图 10 可知，随着碱度的提高，球团还原膨胀率先升高后下降。当球团碱度为 0.8 时，还原膨胀率达到最高，超过了 20%；继续提高碱度，还原膨胀率下降，当碱度大于 1.0 时，还原膨胀率低于 10%。

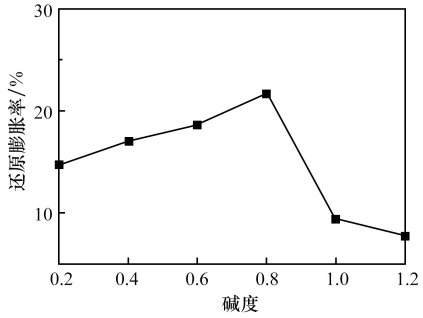


图 10　碱度对碱性球团还原膨胀率的影响

Fig. 10　Effect of basicity on reduced expansion rate of pellets

3　结　论

（1）碱度提高后生球的落下强度、抗压强度均可满足生产要求，石灰石熔剂在生球内部均匀分布，无明显偏析现象，熔剂添加对生球强度无明显影响；在相同的预热制度下，随着碱度的提高，预热球的抗压强度逐渐提高。随着焙烧温度的提高，各碱度球团的抗压强度均有所增大；且在各个焙烧温度点，基本呈现碱度越高抗压强度越大的规律。

（2）在焙烧温度为 1 230 ℃，焙烧时间为 10 min 时，碱度为 0.6 以上的焙烧球抗压强度均能达到 3 000 N/P。焙烧后所得成品球团矿中含钙物相种类和含量逐渐增多，碱度为 0.4 ~ 0.6 成品球团矿中有少量含钙铁的硅酸盐物相生成，碱度提高到 0.8 时出现硅酸钙，碱度大于 1.0 后开始生成复合铁酸钙。随着球团碱度的提高，其还原膨胀率呈先升高后下降的趋势。当球团碱度为 0.8 时，还原膨胀率达到峰值，超过了 20%；随着碱度继续提高，还原膨胀率下降，当碱度大于 1.0 时，还原膨胀率低于 10%。

参考文献：

[1]　叶匡吾. 欧盟高炉炉料结构述评和中国球团生产的进展[J]. 中国冶金,2005,15(10):1 - 3.
YE Kuangwu. Review of BF burden composition

development in EU and the progress of pellet production in China[J]. China Metallurgy,2005,15(10):1 - 3.

[2] 杨佳龙,谭穗勤,王朝平,等. 增加球团矿用量以优化高炉炉料结构[J]. 钢铁,2005,40(10):13 - 17.
YANG Jialong, TAN Suiqin, WANG Chaoping, et al. Increase pellet proportion to optimize burden composition of BF[J]. Iron and Steel,2005,40(10):13 - 17.

[3] 客海滨,袁雪涛,王丽丽,等. 河钢唐钢2号高炉配加碱球生产实践[J]. 冶金能源,2022,41(4):19 - 22.
KE Haibin, YUAN Xuetao, WANG Lili, et al. Production practice of alkali addition in No. 2 BF of HBIS Tangsteel [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2022, 41 (4): 19 - 22.

[4] 闫魁红,冀岗,李宝峰,等. 太钢6号高炉配用碱性球团矿及高比例球团矿冶炼试验[J]. 炼铁,2021,40(6):16 - 20.
YAN Kuihong, JI Gang, LI Baofeng, et al. Smelting test of alkaline pellet ore and high proportion of pellet ore for No. 6 blast furnace of TISCO [J]. Ironmaking, 2021, 40(6):16 - 20.

[5] 雷霄霆. 太钢高炉配用碱性球团生产实践[J]. 山西冶金,2019,42(4):96 - 97.
LEI Xiaoting. Production practice of TISCO blast furnace with alkaline pellet[J]. Shanxi Metallurgy,2019,42(4): 96 - 97.

[6] FEDOROV S A, BEREZHNOI N N, BILOUS V N, et al. New method of producing fluxed pellet cakes[J]. Metallurgist,1983,27(7):237 - 239.

[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 at home and abroad[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(10):1031 - 1039.

[8] GUO Yufeng, LIU Kuo, CHEN Feng, et al. Effect of basicity on the reduction swelling behavior and mechanism of limestone fluxed iron ore pellets[J]. Powder Technology,2021,393:291 - 300.

[9] 青格勒,黄文斌,安钢,等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团,2022,47(1):119 - 126.
QING Gele, HUANG Wenbin, AN Gang, et al. Research on the preparation technology of low-silica alkaline pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 119 - 126.

[10] 敖爱国,易陆杰. 湛江钢铁球团生产技术实践[J]. 宝钢技术,2018(1):34 - 37.
AO Aiguo, YI Lujie. Production of grate-kiln pellet in Zhanjiang iron & steel Co., Ltd[J]. Baosteel Technology, 2018(1):34 - 37.

[11] 蔡幸福,田铁磊. 碱度对高镁碱性球团强度的影响[J]. 矿产综合利用,2014(4):48 - 51.
CAI Fuqing, TIAN Tielei. Effect of basicity on the strength high magnesa basicity pellet[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2014(4):48 - 51.

[12] 兰臣臣,卢建光,吕庆,等. 碱度对镁质低硅球团矿冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2022,47(4):49 - 57;70.
LAN Chenchen, LU Jinguang, LÜ Qing, et al. Effect of alkalinity on metallurgical properties of magnesian low-silica pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(4): 49 - 57;77.

[13] 柴轶凡,樊莹杰,高兴,等. 碱度对白云鄂博矿球团矿还原膨胀性能的影响[J]. 钢铁,2023,58(1):13 - 21;77.
CHAI Yifan, FAN Yingjie, GAO Xing, et al. Influence of basicity on reduction swelling properties of pellets prepared from Bayan Obo iron ore[J]. Iron and Steel, 2023,58(1):13 - 21;77.

[14] 朱德庆,王名,杨聪聪,等. 铝的赋存状态及质量分数对球团焙烧性能的影响[J]. 烧结球团,2022,47(2):1 - 7.
ZHU Deqing, WANG Ming, YANG Congcong, et al. Influence of aluminum occurrence state and mass fraction on roasting performance of pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):1 - 7.