高硅磁精粉球团矿预热焙烧工艺制度优化研究

路 明[1]，陈小艳[1]，王兴锋[1]，张建良[2]，刘征建[2]，王耀祖[3]，李 卓[2]
(1. 鞍山钢铁集团 大孤山球团厂，辽宁 鞍山 114046；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，
北京 100083；3. 北京科技大学 人工智能研究院，北京 100083)

摘要： 针对我国球团用磁精粉普遍存在 $w(SiO_2)$ 较高的问题，本文通过对大孤山球团厂两种高硅磁精粉进行球团制备试验，探究了鞍千矿和大球矿两种高硅磁精粉适宜的配矿结构，并优化了 $w(SiO_2)$ 为 7% 的高硅磁铁矿球团热工制度。结果表明，当鞍千矿粉与大球矿粉配比为 3∶7 时，生球的抗压强度随水分的增加变化不大，落下强度逐渐增加，水分质量分数为(9.5 ± 0.5)% 时，生球性能最佳，爆裂温度均大于 700 ℃。在相同矿粉配比下，随着预热焙烧温度的升高，球团矿的抗压强度逐渐升高，当预热温度为 1 100 ℃ 时，预热球强度超过 400 N/P，当焙烧温度为 1 250 ℃ 时，焙烧球强度超过 2 500 N/P。

关键词： 预热；焙烧；SiO_2；磁精粉；赤铁矿
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)03－0059－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.040

Research on optimization of preheating roasting process system for high silicon magnetic powder pellet

LU Ming[1], CHEN Xiaoyan[1], WANG Xingfeng[1], ZHANG Jianliang[2],
LIU Zhengjian[2], WANG Yaozu[3], LI Zhuo[2]
(1. *Dagushan Pelletizing Plant, Ansteel Group, Anshan* 114046, *Liaoning, China*; 2. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*; 3, *Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In response to the problem that $w(SiO_2)$ is generally high in magnetic powder for pelletizing in China, the suitable ore proportioning structure of two high-Si magnetic powders of Anqian mine and Daqiu mine is researched, by conducting pellet preparation tests on two high-Si magnetic powers at Daguoshan pelletizing Plant, and the 7% $w(SiO_2)$ of the high-Si magnetite pellet thermal regulation is optimized. The results show that the compressive strength of fresh pellet does not change much with the increase of moisture when the ratio of magnetic powders of Anqian mine and Daqiu mine is 3∶7, and the falling strength increases gradually, and the best performance of fresh pellet is achieved when the moisture content is (9.5 ± 0.5)%, and the bursting temperatures are all greater than 700 ℃. Under the same ore powder ratio, the compressive strength of pellet gradually increases with the increase of preheat roasting temperature, the preheat ball strength exceeds 400 N/P when the preheat temperature is 1 100 ℃, and the roasted ball strength exceeds 2 500 N/P when the roasting temperature is 1 250 ℃.

Key words: preheating; roasting; SiO_2; magnetic powder; hematite

球团矿作为含铁炉料，相比烧结矿而言，具有粒度均匀、铁品位高、环境污染小等优点[1]。在节能减排的背景下，高炉炉料结构逐渐从高配比烧结矿向高配比球团矿的方向发展，

收稿日期： 2021－10－23；**修回日期：** 2021－11－22
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(52174291)
作者简介： 路 明(1980—)，男，工程师，从事球团方面工作。
通讯作者： 刘征建(1982—)，男，教授，从事炼铁方面的工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

以此来降低高炉燃料比，提高铁水产量[2-4]。但随着世界铁矿石资源逐渐劣化，进口铁矿石和国内自产铁矿石 $w(SiO_2)$ 逐年提高，球团品位逐渐降低冶炼难度逐渐增加。因此优化高硅磁精粉的球团制备工艺成为当前诸多企业和学者的研究热点。李杰等[5]采用国外矿粉配加国内高硅磁精粉来控制球团矿中的含硅量，发现含硅量过高时，会形成大量硅酸盐而降低抗压强度。GAN 等[6]探究 $w(SiO_2)$ 对球团矿矿相结构的影响，发现含量较少时可以产生一定量液相有助于连晶，含量较多时 Fe_2O_3 晶粒间会填充大量 SiO_2 阻碍连晶。

前人针对 SiO_2 对球团矿抗压强度和矿相结构的影响研究较多，但针对工业生产中，高硅磁铁矿球团制备相关的研究较少。大孤山铁矿粉为典型的磁铁矿粉，具有铁品位低、含硅量高、粒度细等特点，部分矿粉还含有少量赤铁矿[7-8]。本文针对大孤山矿粉和鞍千矿粉造球进行研究，为避免 SiO_2 过高对球团矿带来的一些不利因素，需调整配矿结构来降低其含量，优化高硅磁铁矿球团的热工参数，为进一步扩展球团矿生产的矿物种类奠定基础，也期为促进高硅磁铁矿球团的应用推广提供技术支撑。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验采用两种铁精粉(鞍千矿粉和大球矿粉)和一种膨润土，原料主要化学成分及铁精矿粒度组成分别如表1、2所示。由表1可知：鞍千矿粉的铁品位略高于大球矿粉，达到66.25%；鞍千矿粉 $w(SiO_2)$ 为5.2%，大球矿粉 $w(SiO_2)$ 为7.84%；两种矿粉P、S、K、Na等有害元素质量分数较低。由表2可知：鞍千矿粉的粒度较粗，-0.074 mm占比达到20.08%，-0.048 mm占比达到66.93%；大球矿粉的粒度较细，-0.074 mm占比达到28.55%，-0.048 mm占比达到69.23%。

表1 原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

原料	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	K_2O	Na_2O	LOI
鞍千矿粉	66.25	23.52	5.20	0.20	0.34	0.39	0.01	0.002	0.01	0.08	-3.34
大球矿粉	65.43	29.05	7.84	0.14	0.25	0.29	0.01	0.02	0.01	0.12	-3.40
膨润土	2.68	<0.05	58.10	13.65	3.62	4.85	0.05	0.05	0.50	—	—

表2 铁矿粉粒度组成(质量分数)

Table 2 Size of iron ore fines %

矿粉种类	+0.150mm	0.150~0.106mm	0.106~0.098mm	0.098~0.074 mm	0.074~0.048 mm	-0.048 mm
鞍千	2.86	2.97	1.23	5.93	20.08	66.93
大球	0.20	0.30	0.10	1.62	28.55	69.23

1.2 试验方法

为探究水分和矿粉配比对生球性能的影响，固定矿粉配比(鞍千:大球)为3:7，膨润土配比为1.19%，调节水分质量分数分别为7%、8%、9%和10%；为探究矿粉配比对生球性能的影响，固定膨润土配比为1.19%，水分质量分数为9.5%，调节矿粉配比为3:7、4:6和5:5。具体试验方案见表3。

按照表3中的配料比例称取一定量的矿粉和黏结剂进行混匀，并在圆盘造球机上造球，筛分出尺寸合格的生球进行抗压强度、落下强度和爆裂温度的测量。剩余球团烘干后进行预热试验，预热试验采用马弗炉进行，预热温度分别选取950、1 050、1 080、1 100、1 120、1 150和1 180 ℃，预热完冷却后测量其抗压强度。根据预热试验结果，保证预热球焙烧球强度的情况下，对球团进行焙烧。由于受回转窑最高温度的限制，且试验所用高硅铁矿粉需要较高焙烧温度才能获得质量合格的球团矿，同时为了保证试验结果的差异性，焙烧温度选

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　试验方案

Table 3　Test plan

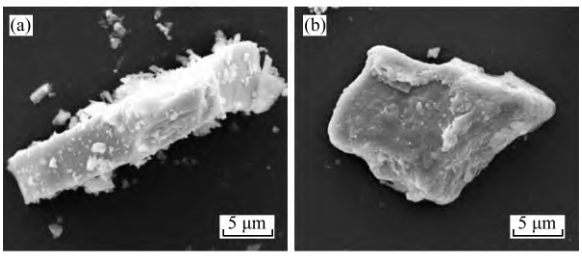
序号	矿粉配比(鞍千∶大球)	混合矿粉质量/kg	膨润土配比/%	膨润土加入量/g	含水量/%
1#	3∶7	3	1.19	35.6	7±0.5
2#	3∶7	3	1.19	35.6	8±0.5
3#	3∶7	3	1.19	35.6	9±0.5
4#	3∶7	3	1.19	35.6	10±0.5
5#	3∶7	3	1.19	35.6	9.5±0.5
6#	4∶6	3	1.19	35.6	9.5±0.5
7#	5∶5	3	1.19	35.6	9.5±0.5

取 1 200、1 250 和 1 280 ℃，焙烧完冷却后测量其抗压强度。

2　结果与讨论

2.1　高硅磁铁矿粉微观形貌及矿物组成

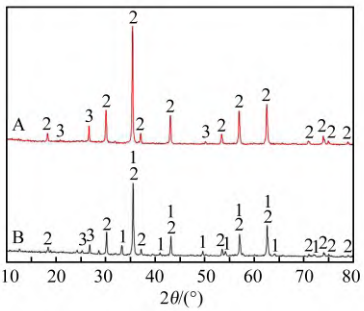
两种磁铁矿粉 SEM 扫描电镜图及 XRD 分析结果分别如图 1、2 所示。由图 1 可知：鞍千矿粉颗粒表面较为平滑，呈片状，棱角分明；大球矿粉颗粒表面较为粗糙，呈块状，棱角模糊。矿粉颗粒表面粗糙，具有较大的比表面积，表面能较大，成球过程前可有效增加毛细水的吸附作用，具有较好的成球性[9-10]。



(a)　鞍千(×10 000)；(b)　大球(×5 000)

图 1　磁铁矿 SEM 微观结构

Fig. 1　SEM microstructure of magnetite



A—大球；B—鞍千；1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—二氧化硅。

图 2　磁铁矿 XRD 分析

Fig. 2　XRD pattern of magnetite

由如图 2 可知：鞍千矿粉中铁氧化物矿相结构为磁铁矿和部分赤铁矿，脉石杂质主要为石英；大球矿粉的铁氧化物全部为磁铁矿，脉石杂质主要为石英。

2.2　高硅磁铁矿粉生球性能

两种矿粉生球性能试验结果如表 4 所示。当鞍千矿粉与大球矿粉配比为 3∶7 时，随着生球含水量的增加，生球的抗压强度变化不大，落下强度呈上升趋势。当水分为 10% 时，落下强度最大，生球的强度主要取决于铁矿石颗粒之间的液体饱和、孔隙和表面的毛细管负压；

表 4　生球性能

Table 4　Green properties of ore pellets

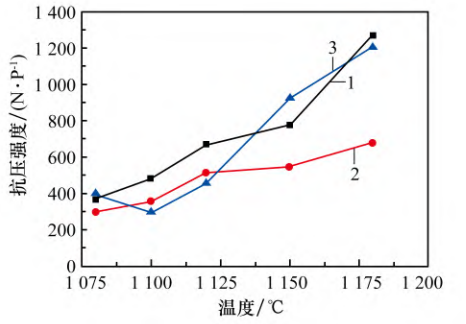
序号	含水量/%	矿粉配比(鞍千∶大球)	抗压强度/(N·P^{-1})	落下强度/[次·(0.5 mm)$^{-1}$]	爆裂温度/℃
1#	7.0±0.5	3∶7	9.90	3.4	>700
2#	8.0±0.5	3∶7	8.99	4.0	>700
3#	9.0±0.5	3∶7	9.39	4.0	>700
4#	10.0±0.5	3∶7	9.58	10.4	>700
5#	9.5±0.5	3∶7	8.63	10.5	>700
6#	9.5±0.5	4∶6	9.30	3.1	>700
7#	9.5±0.5	5∶5	5.99	7.1	>700

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

当固定水分为9.5%时，随着鞍千矿粉配比增加，生球的抗压强度和落下强度均呈下降趋势，当矿粉配比为3:7时，生球性能最好。由于大球矿粉粒度较细，鞍千矿粉粒度较粗，随着鞍千矿粉配比的增加，铁矿粉粗粒级占比增加，生球致密度降低，球团内部矿粉颗粒间形成的毛细管直径变大，产生的毛细力变小，不利于提高生球的强度[11-12]；各试验组生球爆裂温度均大于700 ℃。

2.3 预热温度对预热球抗压强度的影响

在生球性能研究结果中，当矿粉配比为3:7时，生球性能最好，所以选定3:7配比的生球探索预热试验。当采用950 ℃预热15 min时，预热球抗压强度为219 N/P；当采用1 050 ℃预热15 min时，抗压强度为330 N/P。由于预热球强度偏低，所以提高整体预热温度。为探究预热温度对不同矿粉配比的球团矿抗压强度的影响，对5#、6#和7#试验组生球分别进行1 080、1 100、1 120、1 150和1 180 ℃的预热试验，预热时间为15 min，结果如图3所示，由图3可知，当鞍千矿粉与大球矿粉配比为3:7，预热温度为1 180 ℃时，球团抗压强度达到最高，为1 267 N/P。球团矿的抗压强度随着预热温度的升高逐渐升高。这是由于预热阶主要为Fe_3O_4的氧化，新生的Fe_2O_3晶粒之间形成微晶键，球团由表面向内部逐渐氧化[13]，随着温度升高，Fe_3O_4氧化速率变快，FeO氧化释放热量，改善了球团矿内部传热不足的问题，增加了球团矿的氧化程度，从而提高球团矿的固结强度[14-15]。在相同预热温度下，球团矿的抗压强度随着鞍千矿粉配比的增加呈下降趋势。由于鞍千矿粉含有部分赤铁矿，相对于磁铁矿氧化生成的次生赤铁矿而言，原生赤铁矿活性较低，粒子的迁移扩散能力弱，削弱了Fe_2O_3的连晶，所以鞍千配比增加使得球团矿抗压强度降低[10]。



矿粉配比：1—3:7；2—4:6；3—5:5。

图3 预热温度对不同配比球团矿抗压强度的影响

Fig. 3 The influence of preheating temperature on the compressive strength of pellets with different proportions

2.4 焙烧温度对球团抗压强度的影响

为探究焙烧温度对不同矿粉配比的球团矿抗压强度的影响，在1 100 ℃预热15 min的基础上，继续对5#、6#和7#试验组生球进行不同温度的焙烧试验。由表5可知，球团矿抗压强度随着焙烧温度的升高呈上升趋势，当矿粉配比为3:7，在1 280 ℃焙烧15 min时，球团矿抗压强度达到最高为3 513 N/P。球团矿的固结方式主要是Fe_2O_3的再结晶固结，温度升高会进一步促使Fe_2O_3晶粒之间的相互连接[16]。同时，温度升高使低熔点物质生成液相，原生赤铁矿晶粒之间也相互连接，降低球团矿的孔隙率，提高球团矿的抗压强度[17-19]。在相同焙烧温度下，球团矿抗压强度随着鞍千矿粉配比的增加逐渐降低。由于鞍千矿粉带入的部分原生赤铁矿只能通过液相黏结起来，且颗粒表面迁移能力不大，原生赤铁矿占比增加，不利于提高球团矿的固结强度[20-21]。

表5 焙烧球团矿抗压强度

Table 5 Compressive strength of roasted pellets

N/P

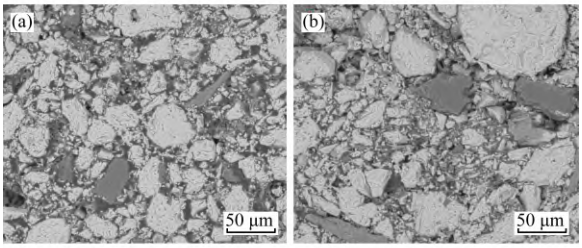
矿粉配比(鞍千:大球)	1 200 ℃	1 250 ℃	1 280 ℃
3:7	1 835	2 570	3 513
4:6	1 321	2 386	3 474
5:5	1 706	2 895	2 847

2.5 预热焙烧参数对球团矿矿相结构的影响

当矿粉配比为3:7，预热温度为1 100 ℃时，球团矿抗压强度超过400 N/P；焙烧温度为1 250 ℃时，球团矿抗压强度超过2 500 N/P。为了对比预热焙烧对球团矿矿相结构的影响，分别对两组球团矿进行显微结构分析。同时为了进一步探究焙烧温度变化对矿相结构

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的影响，选取 1 200 ℃试验组进行显微结构分析。1 100 ℃预热球团矿显微结构如图 4 所示。由图 4 可知：预热球团矿边缘部位的 Fe_3O_4 已经开始氧化为 Fe_2O_3，Fe_2O_3 晶粒有了初步的连晶和长大，但大部分保持原有的形状，中心部位残余的 Fe_3O_4 较多，氧化程度不够，Fe_2O_3 晶粒棱角分明，由于没有焙烧，晶粒间的缝隙整体较大，抗压强度较差[23]。

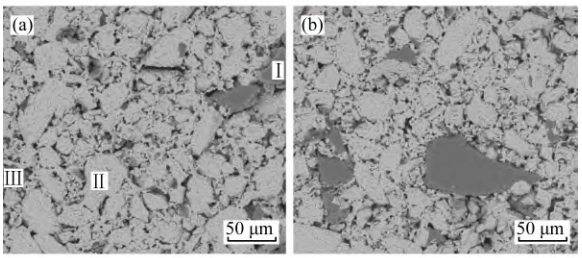


(a) 边缘部分(×1 000)；(b) 中心部分(×1 000)

图 4　1 100 ℃预热球团矿显微结构

Fig. 4　Microstructure of pellets preheated at 1 100 ℃

1 200 ℃焙烧球团矿显微结构及 EDS 能谱分析分别如图 5、6 所示。由图 5 可知：焙烧球团矿边缘部分的 Fe_3O_4 氧化比较充分，相比预热球团矿，已经有明显的连晶，细小的 Fe_2O_3 晶粒已经完全消失，连接的晶粒逐渐长大，中心部位还存在一些小晶粒，连晶状况相对于边缘部位较差，由于焙烧温度不高，液相没有完全熔化，导致孔隙率偏大，从而降低了球团矿的抗压强度[23]。此外，通过 EDS 能谱分析(图 6)得到：图 5 中，Ⅰ区镶嵌式的灰色区域，跟周围的铁氧化物没有连接，为 SiO_2；Ⅱ区大面积白色区域为 Fe_2O_3 晶粒；Ⅲ区填充在 Fe_2O_3 晶粒之间的灰色区域为硅酸盐类。由于矿粉中 $w(SiO_2)$ 高，焙烧过程中直接以石英的形式镶嵌在晶粒之间，不仅阻碍了 Fe_2O_3 晶粒的连晶，还降低了球团的抗压强度。



(a) 边缘部分(×1 000)；(b) 中心部分(×1 000)

图 5　1 200 ℃焙烧球团矿显微结构

Fig. 5　Microstructure of pellets roasted at 1 200 ℃

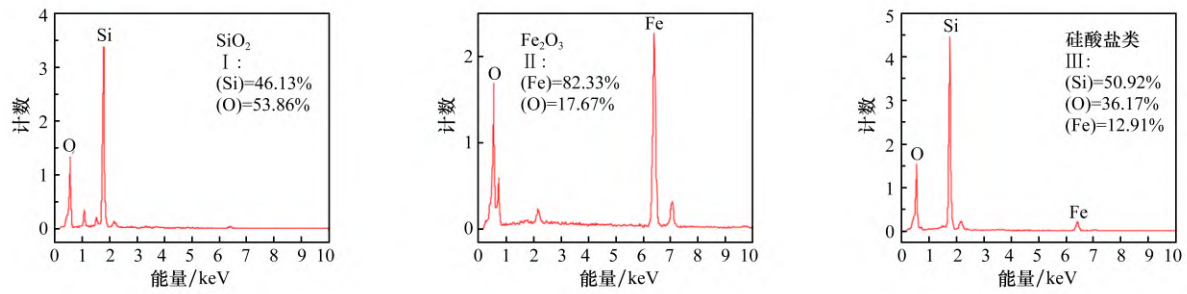
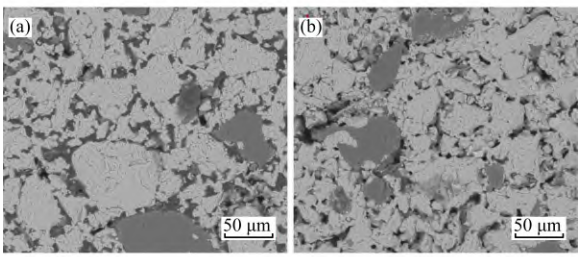


图 6　1 200 ℃焙烧球团矿 EDS 能谱分析

Fig. 6　EDS energy spectrum analysis of pellets roasted at 1 200 ℃

1 250 ℃焙烧球团矿显微结构如图 7 所示。由图 7 可知，在 1 250 ℃下焙烧球团矿边缘部位的 Fe_3O_4 基本完全氧化，Fe_2O_3 晶粒连晶状况良好，球团矿孔隙率降低，适量的液相促进 Fe^{3+} 的迁移，使结构变得更加致密[24]。相比之下，中心部位的 Fe_2O_3 晶粒较小，孔隙率增大，晶粒之间存在大块的石英和少量的硅酸盐阻碍连晶。所以随着焙烧温度的升高，Fe_3O_4 氧化程度增加，次生的 Fe_2O_3 晶粒再结晶和长大，球团矿连晶程度逐渐增强[25-26]。原生的赤铁矿晶粒



(a) 边缘部分(×1 000)；(b) 中心部分(×1 000)

图 7　1 250 ℃焙烧球团矿显微结构

Fig. 7　Microstructure of pellets roasted at 1 250 ℃

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

不会像磁铁矿一样产生微晶键连接，会保持其原有的状态[27-28]。当焙烧温度达到一定程度时，液相熔化，将 Fe_2O_3 晶粒黏结到一起，从而提高球团矿的抗压强度，但是在大量 SiO_2 存在的情况下，填充在 Fe_2O_3 晶粒之间，阻碍晶粒的连晶，反而会降低球团矿的抗压强度[29-30]。

3 结 论

(1) 生球的抗压强度随含水量的增加变化不大，落下强度呈上升趋势。选定 9.5% 作为适宜含水量，当矿粉配比为 3∶7时，生球性能最佳，爆裂温度大于 700 ℃。

(2) 随着预热温度升高，球团矿抗压强度呈上升趋势。当鞍千矿粉与大球矿粉配比为 3∶7，预热温度为 1 100 ℃时，球团抗压强度超过 400 N/P；预热温度为 1 180 ℃时，球团抗压强度达到最高为 1 267 N/P。

(3) 随着焙烧温度升高，球团矿抗压强度呈上升趋势。当矿粉配比为 3∶7，焙烧温度为 1 250 ℃时，球团矿抗压强度超过 2 500 N/P；焙烧温度为 1 280 ℃时，球团矿抗压强度达到最高为 3 513 N/P。

参考文献:

[1] 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. Progress in iron ore pellet technology[J]. Sintering and pelleting，2017，42(3)：42－49.

[2] 许满兴，张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团，2017，42(02)：25－30；37.
XU Manxing，ZHANG Yulan. The current situation and development trend of my country′s pellet production technology in the new century[J]. Sintering and pelleting，2017，42(2)：25－30；37.

[3] 许满兴. 大力推进中国高品质球团矿生产与发展[J]. 矿业工程，2021，19(2)：43－48；57.
XU Manxing. Vigorously promote the production and development of high-quality pellets in China[J]. Mining Engineering，2021，19(2)：43－48；57.

[4] 刘小燕. 生态文明建设推动钢铁行业超低排放改造[N]. 世界金属导报，2019(A07)：12－17.
LIU Xiaoyan. The construction of ecological civilization promotes the ultra-low emission transformation of the iron and steel industry[N]. World Metal Herald，2019(A07)：12－17.

[5] 李杰，信自成，刘卫星，等. SiO_2 含量对镁质熔剂性球团性能影响[J]. 烧结球团，2017，42(4)：23－27.
LI Jie，XIN Zicheng，LIU Weixing，et al. The influence of SiO_2 content on the properties of magnesia flux pellets[J]. Sintering and pelleting，2017，42(4)：23－27.

[6] GAN M，JI Z Y，FAN X H，et al. Value-added utilization of waste silica powder into high-quality chromite pellets preparation process[J]. Powder Technology，2018，328：122－129.

[7] 石伟，刘政东，陈占金，等. 大孤山铁矿石工艺矿物学及选矿工艺研究[J]. 金属矿山，2005(1)：29－33.
SHI Wei，LIU Zhengdong，CHEN Zhanjin，et al. Research on technological mineralogy and beneficiation technology of dagushan iron ore[J]. Metal Mine，2005(1)：29－33.

[8] SHEN F M，GAO Q J，JIANG X，et al. Effect of magnesia on the compressive strength of pellets[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2014，21(5)：431－437.

[9] 严照照，卢建光，吕庆，等. 碱度对生球质量和球团矿抗压强度的影响[J]. 钢铁钒钛，2018，39(6)：110－115.
YAN Zhaozhao，LU Jianguang，LÜ Qing，et al. The effect of alkalinity on the quality of green pellets and the compressive strength of pellets[J]. Steel Vanadium and Titanium，2018，39(6)：110－115.

[10] 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. Experimental research on preparation of oxidized pellets from GF88 hematite concentrate[J]. Sintering and pelleting，2020，45(6)：61－68.

[11] 孙健宁，刘小杰，严照照，等. SiO_2 对邯郸球团矿抗压强度的影响[J]. 矿产综合利用，2020(4)：191－195；201.
SUN Jianning，LIU Xiaojie，YAN Zhaozhao，et al. The influence of SiO_2 on the compressive strength of Handan pellets[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2020(4)：191－195；201.

[12] 周晓军. 优化球团矿生产工艺参数的实践[J]. 钢铁研究，2017，45(6)：10－14.
ZHOU Xiaojun. Practice of optimizing production process parameters of pellets[J]. Iron and Steel Research，2017，45(6)：10－14.

[13] FORSMO S P E，FORSMO S E，SAMSKOG P O，et al. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets[J]. Powder Technology，2007，183(2)：247－259.

[14] 陈奎元，贾彦忠，梁德兰，等. 预热制度对球团强度的影响[J]. 钢铁研究，2014，42(6)：1－4.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CHEN Kuiyuan，JIA Yanzhong，LIANG Delan，et al. The influence of preheating system on pellet strength [J]. Iron and Steel Research，2014，42(6)：1－4.

[15] 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 the consolidation performance of vanadium-titanium magnetite oxide pellets [J]. Sintering and pelleting，2020，45(5)：49－53.

[16] 李神子，龙跃，潘向阳，等. MgO 及焙烧条件对酸性球团矿抗压强度的影响 [J]. 烧结球团，2019，44(4)：36－39；60.
LI Shenzi，LONG Yue，Pan Xiangyang，et al. The influence of MgO and roasting conditions on the compressive strength of acid pellets [J]. Sintering and pelleting，2019，44(4)：36－39；60.

[17] 方觉，宋建新，高艳甲，等. 球团矿氧化焙烧试验研究 [J]. 钢铁研究，2012，40(4)：11－13；39.
FANG Jue，SONG Jianxin，GAO Yanjia，et al. Experimental study on oxidation roasting of pellets [J]. Iron and Steel Research，2012，40(4)：11－13；39.

[18] 夏雷阁，苏步新，李新宇，等. 焙烧温度与球团矿强度和还原性的关系 [J]. 烧结球团，2014，39(1)：21－24；39.
XIA Leige，SU Buxin，LI Xinyu，et al. The relationship between the roasting temperature and the strength and reducibility of pellets [J]. Sintering and pelleting，2014，39(1)：21－24；39.

[19] 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 particle size and pellet preheating and roasting process parameters [J]. Iron and Steel，2020，55(10)：21－28.

[20] KUMAR P S，RAVI B P，SIVRIKAVA O，et al. The study of pelletizing of mixed hematite and magnetite ores [J]. Science of Sintering，2019，51(1)：27－38.

[21] WANG C，XV C Y，LIU Z J，et al. Effect of organic binders on the activation and properties of indurated magnetite pellets [J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2021，28(7)：1145－1152.

[22] 杨雪峰. 赤磁混合铁精矿球团焙烧固结机理 [J]. 钢铁研究学报，2010，22(2)：6－8；50.
YANG Xuefeng. Roasting and consolidation mechanism of red magnetic mixed iron concentrate pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research，2010，22(2)：6－8；50.

[23] 刘凯，陈树军，吕庆. 预热焙烧对球团矿抗压强度影响 [J]. 铸造技术，2017，38(3)：636－639.
LIU Kai，CHEN Shujun，LÜ Qing. The influence of preheating roasting on the compressive strength of pellets [J]. Foundry Technology，2017，38(3)：636－639.

[24] 潘向阳，龙跃，徐晨光，等. 碱度及焙烧温度对球团矿抗压强度影响的研究 [J]. 钢铁钒钛，2017，38(3)：88－93.
PAN Xiangyang，LONG Yue，XV Chenguang，et al. Research on the influence of alkalinity and roasting temperature on the compressive strength of pellets [J]. Steel Vanadium and Titanium，2017，38(3)：88－93.

[25] 赵连达，刘迎立，薛庆国，等. 添加赤铁矿对氧化球团性能的影响 [J]. 烧结球团，2020，45(2)：36－40；66.
ZHAO Lianda，LIU Yingli，XUE Qingguo，et al. The effect of adding hematite on the properties of oxidized pellets [J]. Sintering and pelleting，2020，45(2)：36－40；66.

[26] 张淑会，严照照，刘小杰，等. 化学成分对球团矿抗压强度影响的研究现状 [J]. 烧结球团，2017，42(6)：57－62.
ZHANG Shuhui，YAN Zhaozhao，LIU Xiaojie，et al. The research status of the influence of chemical composition on the compressive strength of pellets [J]. Sintering and pelleting，2017，42(6)：57－62.

[27] 李乃尧，张建良，刘兴乐，等. MgO、TiO_2 对镁质钒钛球团矿综合冶金性能的影响 [J]. 钢铁，2017，52(7)：14－21.
LI Naiyao，ZHANG Jianliang，LIU Xingle，et al. The influence of MgO and TiO_2 on the comprehensive metallurgical properties of magnesium vanadium-titanium pellets [J]. Iron and Steel，2017，52(7)：14－21.

[28] 王红兵，贾彦忠，梁德兰，等. 钒钛磁铁矿含碳球团直接还原试验研究 [J]. 钢铁研究，2017，45(1)：23－25.
WANG Hongbing，JIA Yanzhong，LIANG Delan，et al. Experimental study on direct reduction of vanadium-titanium magnetite carbon-containing pellets [J]. Iron and Steel Research，2017，45(1)：23－25.

[29] WANG R R，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Effects of magnesium olivine on the mineral structure and compressive strength of pellets [J]. Ironmaking & Steelmaking，2020，47(2)：100－105.

[30] WANG R R，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Interaction between iron ore and magnesium additives during induration process of pellets [J]. Powder Technology，2020，361(C)：894－902.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net