球团

Fe_2O_3 对高硅碱性球团固结性能的影响

李绍春[1]，程福超[1]，王兴锋[1]，张建良[2a]，刘征建[2a]，王耀祖[2b]，
马黎明[2a]，江回青[2a]

（1. 鞍山钢铁集团有限公司 大孤山球团厂，辽宁 鞍山 114046；2. 北京科技大学 a. 冶金与生态工程学院；b. 智能科学与技术学院，北京 100083）

摘要：深入研究 Fe_2O_3 对于高硅碱性球团生球以及成品球性能的影响，有助于促进基于我国铁矿资源特征的低碳炼铁技术发展。本文通过调整碱性球团用混合料中 Fe_2O_3 的含量，解析 Fe_2O_3 对高硅碱性球团生球、预热球和成品球性能的影响规律，并采用扫描电镜以及图像识别处理系统表征高硅碱性球团的微观矿相结构。结果表明：随着混匀矿中赤铁矿配比的提高，高硅碱性球团生球、预热球和成品球的抗压强度均有所降低，随着 Fe_2O_3 配比的升高，成球性能劣化，生球的抗压强度降低至 9.04 N/P。赤铁矿连晶固结性能变差，成品球的强度降低至 3 433 N/P。当两种矿粉的配比为 50% 时，球团孔隙率急剧增大为 32.8%，A 矿粉配比不宜超过 40%。微观矿相结果表明，随着 Fe_2O_3 含量的增加，球团内部小颗粒尺寸晶粒变多，大颗粒尺寸晶粒减少，平均颗粒面积减少，晶粒间连晶性能变差，固结性能削弱，内部孔隙率提高。在制备高硅碱性球团时，含 Fe_2O_3 的精矿粉配加不宜太高，会对球团矿的固结性能产生不利影响。

关键词：Fe_2O_3；高硅碱性球团；矿相结构；抗压强度；焙烧固结

中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)01－0080－07

doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.011

Influence of Fe_2O_3 on consolidation properties of high silica alkaline pellets

LI Shaochun[1], CHENG Fuchao[1], WANG Xingfeng[1], ZHANG Jianliang[2a], LIU Zhengjian[2a], WANG Yaozu[2b], MA Liming[2a], JIANG Huiqing[2a]

(1. Dagushan Pelletizing Plant, Ansteel Group, Anshan 114046, Liaoning, China; 2. University of Science and Technology Beijing a. School of Metallurgy and Ecological Engineering; b. School of Intelligent Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The in-depth research of the influence of Fe_2O_3 on consolidation properties of high silica alkaline pellets fresh pellet and finished pellets is helpful to promote the development of low-carbon ironmaking technology based on the characteristics of iron ore resources in China. The influence of Fe_2O_3 on the properties of high silica alkaline pellets in fresh pellets, preheated pellets and finished pellets is analyzed by adjusting the content of Fe_2O_3 in the compound for alkaline pellets, and the microscopic mineral facies structure of high silica alkaline pellets is characterized by scanning electron microscope and image recognition processing system. The results show that with the increase of the hematite ratio in the mixed ore, the compressive strength of the high silica alkaline pellet fresh pellets, preheated pellets and finished

收稿日期：2022－08－22；**修回日期**：2022－11－05

基金项目：中国博士后科学基金面上资助项目(2021M690369)；北京市科技新星计划资助项目(Z211100002121115)

作者简介：李绍春(1979—)，男，高级工程师，从事中高硅熔剂性球团制备方面的研究工作。

通信作者：张建良(1965—)，男，教授，从事炼铁原(燃)料性能优化、高炉操作及高炉长寿、非高炉炼铁、炼铁过程大数据及智能化等方面的研究。

pellets decreases, and with the increase of the ratio of Fe_2O_3, the pelletizing properties deteriorate, and the compressive strength of the fresh pellets decreases to 9.04 N/P. The consolidation properties of hematite deterioration become worse, and the strength of the finished ball decreases to 3 433 N/P. When the ratio of the two mineral powders is 50%, the porosity of the pellets increases sharply to 32.8%, and the ratio of A ore powder should not exceed 40%. The results of microscopic mineral facies show that with the increase of Fe_2O_3 content, the small particle size in the pellet increases, the large particle size decreases, the average particle area decreases, the intergranular cohesion performance deteriorates, the consolidation performance weakens, and the internal porosity increases. In the preparation of high silica alkaline pellets, the addition of concentrate powder containing Fe_2O_3 should not be too high, which will adversely affect the consolidation properties of pellets.

Key words: Fe_2O_3; high silica alkaline pellets; mineral facies structure; compressive strength; roasting consolidation

炼铁工序的含铁原料主要为人造富矿与天然块矿，人造富矿经过多年的发展，逐渐发展为烧结矿与球团矿两大类[1]。其中，烧结工序产能占比超过 70%，但铁矿烧结需消耗大量的含碳燃料，产生大量的粉尘、NO_x、CO_2、SO_2，同时还会生成二噁英等剧毒物质[2]。而相对于烧结工序而言，球团工序排放的 NO_x、二噁英、粉尘颗粒物等污染物的量都较低，其能源消耗仅为前者的一半。且球团矿的铁品位相对于烧结矿较高，加入高炉后，其产生的渣量更少，可减少被炉渣带走的热量，进一步降低高炉炼铁过程中的碳素消耗。随着我国“双碳”目标战略的提出，钢铁企业加强了对入炉原料的节能减排控制，提高高炉中球团矿的入炉比例，提升球团矿的入炉质量，实施高球比冶炼成为当前诸多企业的重点工作方向[3]。为了避免因烧结减产带来的综合炉料结构碱度不足的情况出现，许多钢铁企业开展了钙质碱性球团的相关探索。钙质碱性球团的机械强度较高、还原性较好，对于降低炼铁焦比有着重要意义[4]。

我国球团矿的生产原料以磁铁精矿为主，随着资源的日益消耗以及国际环境的变化，优质磁铁精矿的价格也逐渐走高，而在我国铁矿资源中，高硅磁铁矿以及磁赤混合矿（磁铁矿和赤铁矿的混合矿）等品位较低的磁铁矿储量丰富，具有较高的应用前景[5-6]。此外，目前我国球团生产主要采用链箅机—回转窑工艺，该工艺对原料的适应性强，可以用于赤铁矿球团和碱性球团的制备[7]。针对我国的资源现状和低碳绿色生产需求，研究赤铁矿对高硅碱性球团固结性能和冶金性能的影响，不仅可以促进我国本土矿粉资源的利用，降低原料成本，还能为发展符合我国资源特征的高球比冶炼工艺提供支撑。国外学者从赤铁矿球团的固结机理、二元碱度对于渣相以及球团抗压强度的影响以及氢气还原不同赤铁矿球团的机理等方面进行了深入的探究[8-10]。国内范晓慧等[11]研究了提高赤铁矿配比对造球过程和球团预热、焙烧性能的影响，发现随着赤铁矿配比的提高，球团矿的强度降低；余正伟等[12]研究了低铁高硅赤铁精矿对氧化球团性能的影响，发现配加该矿粉会导致生球与预热球强度降低，球团的还原膨胀性能和还原性能得到一定程度的改善；马黎明等[13]采用基于碱性生球的复合造块工艺处理钒钛磁铁矿，发现随着碱性生球碱度的增加，生球强度提高，料层透气性改善；易陆杰等[14]研究了钙镁熔剂对于高赤铁矿配比球团的影响，发现适量配加钙质熔剂（石灰石）对成品球质量有显著影响，而镁质熔剂对成品球质量有着一定的负面作用；赵连达等[15]发现在实际生产过程中，可以采用一部分赤铁矿来代替磁铁矿；王耀祖等[16]结合高温焙烧试验与分子动力学研究了 MgO 对磁铁矿焙烧微观组织及固结行为的影响以及 MgO 脉石在不同矿物形态条件下（Fe_2O_3、MgO、$MgFe_2O_4$）与赤铁矿连晶生长行为，探明了高温条件下 MgO 类矿物与赤铁矿间的连晶结构的形成机制，明确了矿物之间“烧结颈”的产生是由原子迁移和扩散引起的，这对于从机理上探究球团矿的固结行为有着很好的指导意义。

国内外学者针对赤铁矿对球团性能的影响进行了广泛的研究，但对高硅碱性球团的影响少有提及，本文通过向高硅磁铁精矿中配加含有一定量赤铁矿的磁赤混合矿粉制造碱性球团，探究 Fe_2O_3 含量对于碱性球团生球、预热球、焙烧球固

结性能的影响，这对促进我国高硅磁精矿和磁赤混合矿的应用，以及实际工业生产具备借鉴意义。

1 试验原料及研究方法

1.1 试验原料

试验用两种铁矿粉来自辽宁某钢铁厂，其化学成分如表 1 所示。由表 1 可见：A 矿粉的 TFe 质量分数达到 67.07%，其铁品位相较于 B 矿粉略高；两种矿粉 SiO_2 含量均较高，其中 B 矿粉的 SiO_2 质量分数达 7.84%，两种铁矿粉的 <0.074 mm 粒级占比均超过 80%。对两种矿粉进行 X 射线衍射分析发现，A 矿粉为磁赤混合矿，B 矿粉为高硅磁精矿。试验所用膨润土为复合膨润土，其配比为 1.2%，<0.074 mm 粒级占比为 100%。试验用碱性熔剂为生石灰，其在配加前需经过细磨处理使 <0.074 mm 粒级占比超过 95%。造球前，需对生石灰进行消化处理。试验中，选择生石灰作为钙质熔剂与铁矿粉混合均匀后加入 8% 水分静置消化 30 min，将球团碱度[$w(CaO)/w(SiO_2)$]恒定设置为 0.8。

铁矿粉的粒度组成对生球性能的影响很大。为了解矿粉粒度的分布规律，采用 LMS-30 型激光衍射粒度分布测定仪对两种矿粉进行激光粒度分析，并对矿粉的成球性指数进行测定。矿粉的粒度分布和成球性指数分别如图 1、表 2 所示。由图 1 可知：A、B 矿粉的中值粒度(D_{50}，样品的累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒度)分别为 16.90、23.5 μm，边界粒度(D_{10} ~ D_{90}，样品粒度分布的范围，D_{10}、D_{90}分别为样品的累计粒度分布百分数达到 10%、90% 时所对应的粒度)分别为 2.95 ~ 76.60、5.51 ~ 65.70 μm。

1.2 研究方法

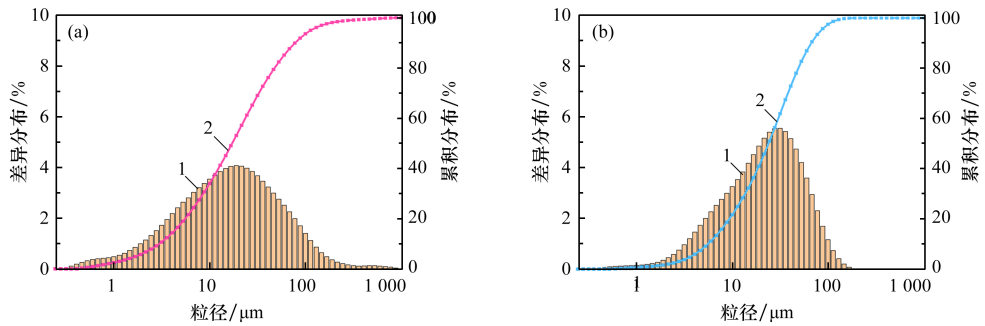
试验造球设备采用圆盘造球机，其主要技术参数：倾角为 47°，转速为 38 r/min，直径为 800 mm，边高为 150 mm。造球时设置每批原料的质量为 3 kg。采用人工方式将造好的生球筛分，选取 12 ~ 16 mm 的生球测定其抗压强度、落下强度；设定抗压强度大于 10 N/P、落下强度大于 4 次/(0.5 m)的球团作为合格生球；采用鼓风干燥箱，将生球在 105 ℃下干燥脱出自由水以供后续的预热、焙烧试验用。其中，预热、焙烧实验均在马弗炉中进行，设置升温速率为 10 ℃/min。

A 矿粉属于磁赤混合矿，经 XRD-Rietveld 精修后发现其中赤铁矿的物相占比为14.2%。根据

表 1 试验原料化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Chemical composition and burning loss analysis of experimental raw materials %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S	烧损
A 矿粉	67.07	19.65	5.06	0.22	0.54	0.51	<0.01	0.035	−1.35
B 矿粉	65.43	29.05	7.84	0.14	0.25	0.29	<0.01	0.020	−3.40
膨润土	3.58	0.52	55.00	14.18	3.92	3.02	0.19	0.060	—
生石灰	—	—	4.41	0.91	74.55	4.30	—	—	13.87



(a) A 矿粉；(b) B 矿粉

1—差异分布；2—累积分布。

图 1 两种铁矿粉的激光粒度分析

Fig. 1 Laser particle size analysis of two kinds of iron ore powders

表 2　两种铁矿粉的成球性指数

Table 2　The ballability index of two iron ore powders

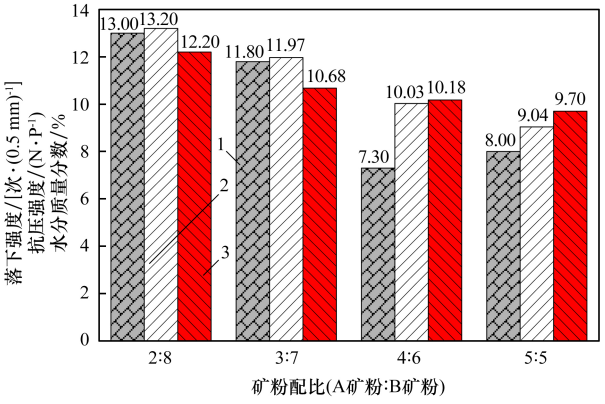
矿粉名称	成球性指数	最大分子水/%	最大毛细水/%
A 矿粉	0.476	5.63	16.73
B 矿粉	0.507	5.15	15.97

矿粉化学成分，通过配加不同比例的 A 矿粉，使得矿粉中含有不同比例的赤铁矿，然后进行造球试验，测量其生球、预热球以及成品球性能，评价不同 Fe_2O_3 含量对于碱性球团性能的影响；同时，充分结合企业现场的实际生产情况，将 A、B 矿粉的配比设置为 2∶8、3∶7、4∶6、5∶5等 4 个试验组，以探究赤铁矿配比对球团矿性能的影响。其中，A 矿配比增加代表混合料中 Fe_2O_3 含量增加。

2　结果与讨论

2.1　Fe_2O_3 对高硅碱性球团生球强度的影响

试验通过改变两种矿粉的配比来调整高硅碱性球团矿中赤铁矿的比例，并以此为变量，探究 Fe_2O_3 含量对高硅碱性球团固结性能的影响，结果如图 2 所示。随着 Fe_2O_3 含量的增加，碱性球团生球的抗压强度逐渐降低，当 A、B 矿粉的配比达 5∶5时，抗压强度降低至 9.04 N/P。故 A 矿粉的配比不宜超过 40%，否则会引起生球质量恶化。这主要是由于生石灰在碱性球团制备过程中已充分消化为消石灰，消石灰由于具有良好的分散性和黏结性，可以充当黏结剂作用，而随着 A 矿粉配比的增加，碱性球团的 SiO_2 质量分数降低，在相同碱度条件下造球需要配加的生石灰量减少，故使得生球性能劣化。当 A 矿粉配比较低时，球团中 SiO_2 质量分数较高。为了控制相同的碱度，造球所需要配加的生石灰量增多，导致所需要的水分质量分数更高，而由于消石灰的黏结作用，球团的抗压强度增加。此外，相对于 B 矿粉，A 矿粉的成球性能较差，因此，当 A 矿粉配比较高时，生球的抗压强度较低。在实际生产过程中，不宜配加较高比例含有原生赤铁矿的矿粉，易导致生球质量劣化。



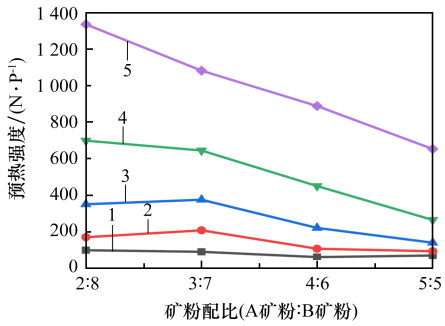
1—落下强度；2—抗压强度；3—水分质量分数。

图 2　赤铁矿配比对碱性球团生球强度的影响

Fig. 2　Effect of hematite proportion on green pellet strength of fluxed pellet

2.2　Fe_2O_3 对预热球性能的影响

为了探究 Fe_2O_3 含量对碱性球团预热球性能的影响，对不同试验组生球进行预热试验，预热温度分别为(950、1 050、1 100、1 150、1 180 ℃)。试验得到赤铁矿配比对碱性球团预热球强度的影响如图 3 所示。由图 3 可知，在相同矿粉配比的情况下，随着预热温度的升高，预热球强度逐渐提高。研究结果表明，试验组高硅碱性球团最佳预热温度为 1 100 ℃，预热时间为 15 min，此时高硅碱性球团预热球的强度基本满足生产需求。随着 Fe_2O_3 含量的增加，预热球的强度明显变差，这主要是由于在预热阶段，发生的主要化学反应是磁铁矿的氧化，以及 Fe_2O_3 微晶键的形成，随着预热温度的提高，原子的迁移能力增强，更容易形成微晶，从而显著提高了预热球的固结强度。同时，在相同预热温度下随着 A 矿粉配比的增加，预热球的强度逐渐降低。A 矿粉配比的增加，使得混合矿粉中赤铁矿含量升高，相较于原生赤铁



温度/℃：1—950；2—1 050；3—1 100；4—1 150；5—1 180。

图 3　赤铁矿配比对碱性球团预热球强度的影响

Fig. 3　Effect of hematite proportion on the strength of fluxed pellet preheating ball

矿，由 Fe_3O_4 氧化形成的新生赤铁矿具有更高的迁移活性，更容易形成微晶，新生的微晶聚集长大，从而使得预热球的强度更高。而原生的赤铁矿，原子活性较低，固结能力较弱，所以随着 Fe_2O_3 含量的增加预热球的强度逐渐降低。

2.3 Fe_2O_3 对焙烧球抗压强度的影响

为探究 Fe_2O_3 含量对碱性球团焙烧球强度的影响，选择在最佳预热制度下预热（预热温度为 1 100 ℃，预热时间为 15 min），然后以 10 ℃/min 的升温速率升温至 1 250 ℃，恒温焙烧 15 min，得到不同矿粉配比下焙烧后球团的强度如图 4 所示。由图 4 可知，各试验组球团的抗压强度均超过 3 000 N/P，其中，随着 A 矿粉配比的增加，成品球的强度逐渐降低。当 A、B 矿粉配比为 4∶6时，成品球的强度可达到 3 526 N/P；而当 A、B 矿粉配比为 5∶5 时，成品球强度为 3 433 N/P。球团焙烧过程主要以固相固结为主，球团矿的强度主要是由 Fe_2O_3 晶格之间的连晶获得的。相对于由磁铁矿氧化生成的次生赤铁矿，原生赤铁矿原子迁移能力较弱，晶格之间的连晶需要更高的焙烧温度，其连晶形成的晶体结构机械强度低。A 矿粉的配加，提高了混合矿粉中原生赤铁矿的比例，因此，在相同的焙烧温度下，Fe_2O_3 含量的增加会降低碱性球团的连晶程度，从而影响成品球的强度。

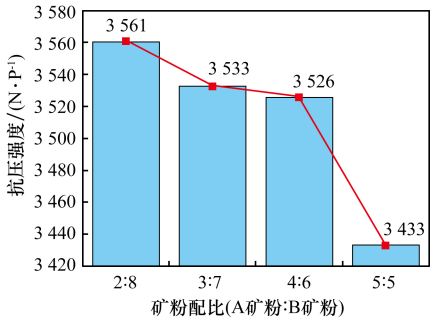
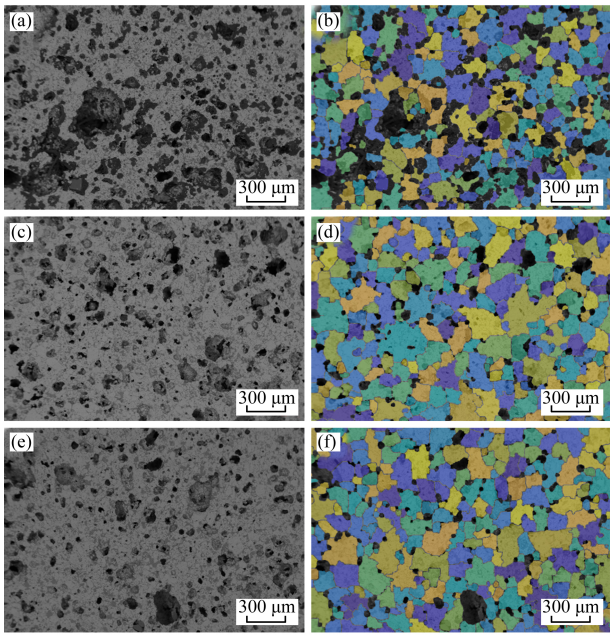


图 4 不同赤矿粉配比对碱性球团强度的影响

Fig. 4 Effect of different ratio of hematite powder on the strength of fluxed pellet

2.4 Fe_2O_3 对高硅碱性球团连晶固结性能的影响

基于扫描电镜以及图像识别处理系统，得到不同矿粉配比下成品球团矿的 SEM 微观矿相结构如图 5 所示。采用图像识别处理系统，将图5(a)、(c)、(e)所示的原始 SEM 微观形貌图，通过灰度转换、中值滤波、膨胀掩膜方法，并采用分水岭算法进行颗粒分割，最终得到图 5(b)、(d)、(f)；该系统可依据分割结果自动输出各颗粒的面积。由图 5 可知：当混匀矿中 Fe_2O_3 含量较少时，球团内部晶粒之间的孔隙较少，颗粒之间紧密接触，赤铁矿之间连晶固结相对较为充分；随着 A 矿粉配加量的增加，原料中原生赤铁矿含量增加，高温下原子的迁移活性相对较弱，球团内部颗粒分明，孔隙率较高，大孔隙含量增加，赤铁矿之间连晶性能变差，进而导致成品球的抗压强度降低。对于高硅碱性球团而言，由于高温下赤铁矿的分解、较高的 SiO_2 含量以及 CaO 的存在，球团内很容易生成硅酸盐、铁橄榄石等低熔点化合物，其冷凝后会产生大量孔隙，且低熔点化合物填充在晶粒之间会对 Fe_2O_3 连晶造成阻碍，从而导致成品球强度降低。

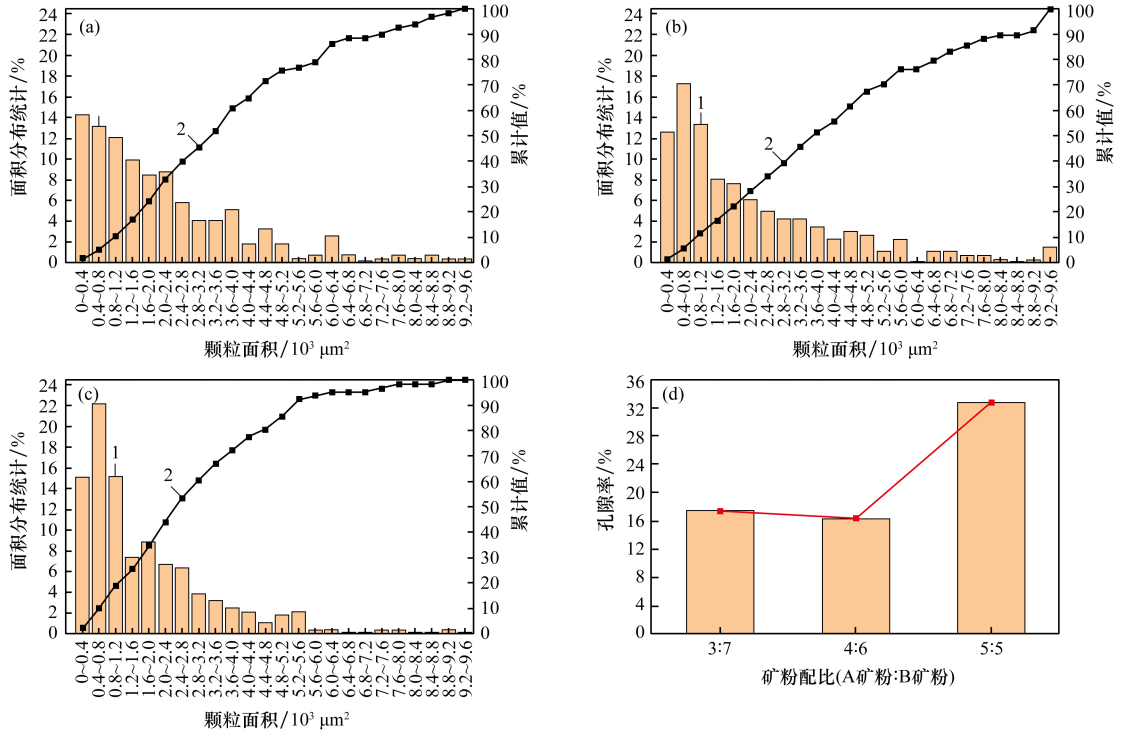


A、B 矿粉配比：(a)、(b)5∶5；(c)、(d)4∶6；(e)、(f)3∶7

图 5 不同矿粉配比成品球团矿的 SEM 微观矿相结构分析

Fig. 5 SEM microstructure analysis of mineral phase of finished pellets with different mineral powder ratio

不同矿粉配比下颗粒的面积分布统计以及球团的孔隙率变化如图6 所示。由图6 可见，随着 A 矿粉配比的增加，混合矿粉中原生赤铁矿增加，小颗粒晶粒数量大为增加，大颗粒晶粒数量逐渐减少，球团内部连晶性能变差，孔隙率变高。当



A、B 矿粉配比：（a）3∶7、（b）4∶6、（c）5∶5；（d）球团孔隙率

1—面积分布统计；2—累计值。

图 6　不同矿粉配比下颗粒的面积分布统计及球团孔隙率变化

Fig. 6　Statistical diagram of particle area distribution and pore changes of pellets with different hematite ratio

A、B 矿粉配比为 3∶7时，孔隙率为 17.4；当矿粉配比改变为 5∶5时，球团孔隙率急剧增大为 32.8%。分析原因认为，原生赤铁矿原子的迁移活性较弱，在球团焙烧时，Fe_2O_3 连晶不充分，从而造成球团的孔隙率较高，使得焙烧球的强度降低。

3　结　论

（1）随着混匀矿中 Fe_2O_3 含量的提高，高硅碱性球团生球、预热球和成品球强度均呈现降低的趋势，当磁赤混合矿粉配比超过 50% 时，生球的抗压强度降低至 9.04 N/P，成品球强度降低至 3 433 N/P，赤铁矿连晶固结性能较差。适宜的 A、B 矿粉配比为 4∶6，此时，球团全铁品位较高，预热温度相对适中，成品球强度达到 3 526 N/P，满足高炉冶炼标准。

（2）随着混匀矿中 Fe_2O_3 含量的提高，球团内部小颗粒晶粒占比逐渐升高，平均颗粒面积减少，晶粒间连晶性能变差，固结性能削弱。

（3）随着混匀矿中 Fe_2O_3 含量的提高，球团内部孔隙率变大，当 A 矿粉与 B 矿粉配比为 3∶7 时，球团的孔隙率为 17.4，当矿粉配比改变为5∶5 时，球团孔隙率急剧增大为 32.8%，原生赤铁矿不利于高硅碱性球团连晶性能的改善，会提高成品球团矿的孔隙率，降低球团矿的抗压强度。

参考文献：

[1]　王筱留．钢铁冶金学（炼铁部分）：第 2 版[M]．北京：冶金工业出版社，2005.
WANG Xiaoliu. Iron and steel metallurgy (Iron making part): Second Edition[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.

[2]　刘稳固．烧结、球团厂循环水热能利用和节水节能探讨[J]．烧结球团，2015，40(2)：57－60.
LIU Wengu. Discussion on utilization of circulating water heat energy and water saving and energy saving in sintering and pelletizing plants[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(2): 57－60.

[3]　王新东，金永龙．高炉使用高比例球团的战略思考与球团生产的试验研究[J]．钢铁，2021，56(5)：7－10.
WANG Xindong, JIN Yonglong. Strategic thinking on using high proportion pellets in blast furnace and

Experimental Research on pellet production[J]. Iron & Steel,2021,56(5):7 – 10.

[4] 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.

[5] 叶匡吾. 三种球团焙烧工艺的评述[J]. 烧结球团,2002,27(1):4 – 7.
YE Kuangwu. Review on three pellet roasting processes [J]. Sintering and Pelletizing,2002,27(1):4 – 7.

[6] 乔庭明,郑志强,江巨贞,等. 竖炉球团配加巴西精矿的生产试验[J]. 烧结球团,2001,26(1):15 – 17.
QIAO Tingming,ZHENG Zhiqiang,JIANG Juzhen,et al. Production test of adding Brazilian concentrate to shaft furnace pellet[J]. Sintering and Pelletizing, 2001, 26(1):15 – 17.

[7] CHEN T, LIANG L, TANG S, et al. A case study on large-scale grate-kiln production of fluxed iron oxide pellets: Zhanjiang pelletizing plant of Baosteel[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Taylor & Francis,2019,40(2):123 – 128.

[8] DWARAPUDI S, GHOSH T K, SHANKAR A, et al. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets[J]. International Journal of Mineral Processing,2011,99(1 – 4):43 – 53.

[9] WU H, CHUN T, WANG P, et al. Consolidation mechanism of fluxed hematite pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2022,29(10):1526 – 1534.

[10] KAZEMI M, POUR M S, SICHEN D. Experimental and modeling study on reduction of hematite pellets by hydrogen gas[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2017,48:1114 – 1122.

[11] 范晓慧,刘昌,陈许玲,等. 提高赤铁精矿配比对制备铁矿氧化球团的影响[J]. 矿冶工程,2012,32(5):94 – 97.
FAN Xiaohui,LIU Chang,CHEN Xuling,et al. Effect of increasing the proportion of hematite concentrate on the preparation of iron oxide pellets[J]. Mining and Metallurgy Engineering,2012,32(5):94 – 97.

[12] 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.
YU Zhengwei,XIANG Aiping,LIU Shanping et al. Effect of hematite concentrate with low iron and high silicon on properties of oxidized pellets[J]. China metallurgy, 2020,30(6):8 – 13.

[13] 马黎明,张建良,吴胜利,等. 基于熔剂性生球的复合造块工艺处理钒钛磁铁矿[J]. 钢铁研究学报,2020,32(6):462 – 469.
MA Liming, ZHANG Jianliang, WU Shengli, et al. Treatment of V-Ti magnetite by composite briquetting process based on flux green pellets[J]. Journal of iron and steel research,2020,32(6):462 – 469.

[14] 易陆杰,李议华,李建,等. 钙镁熔剂对高赤铁矿配比球团的影响[J]. 烧结球团,2021,46(2):57 – 62;88.
YI Lujie, LI Yihua, LI Jian, et al. Effect of calcium magnesium flux on high hematite proportioned pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(2):57 – 62;88.

[15] 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.
ZHAO Lianda,LIU Yingli,XUE Qingguo,et al. Effect of adding hematite on the performance of oxidized pellets [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):36 – 40.

[16] WANG Y, ZHANG J, JIANG H Q, et al. Experimental and molecular dynamics examination of the interface interaction between magnesium oxide and magnetite in a high temperature oxidation environment[J]. Materials & Design, Elsevier,2022,215:110434.