球团

大孤山磁铁精粉微观结构与氧化焙烧性能

王兴锋[1]，路 明[1]，于洪军[1]，张建良[2a]，刘征建[2a]，王耀祖[2b]，马黎明[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. 人工智能研究院，北京 100083）

摘要： 为探究大孤山磁铁矿精粉微观结构对其氧化焙烧性能的影响，本文采用SEM-EDS分析大孤山球团厂两种高硅磁铁矿粉中SiO_2的赋存形式，利用TG/DTA分析高硅磁铁矿粉的氧化性能，并对高硅磁铁矿进行压块焙烧，分析高硅磁铁矿粉的连晶生长特征。XRD-Rietveld精修结果表明：1#磁铁矿中主要物相为Fe_3O_4，含有部分Fe_2O_3和SiO_2；2#磁铁矿主要物相为Fe_3O_4和SiO_2。SEM分析结果表明，两种高硅磁铁矿中SiO_2主要以石英形式与Fe_3O_4磁铁矿紧密结合。TG/DTA差热分析发现：1#磁铁矿开始氧化温度为270 ℃，综合氧化性指数为2.442 2，1#磁铁矿中原生赤铁矿较多，原生赤铁矿氧化连晶所需温度更高，氧化性相对较差；2#磁铁矿开始氧化温度为237 ℃，综合氧化性指数为9.046 2，2#磁铁矿氧化焙烧性能更好。通过调整1#、2#磁铁矿配比可知，随着1#磁铁矿配比的增加，氧化开始温度增加，综合氧化性指数由5.160 9降低到3.671 9。单种磁铁矿压块氧化焙烧后抗压强度测试表明：2#磁铁矿压块抗压强度为2 300 N/P，1#磁铁矿压块抗压强度为2 100 N/P，2#磁铁矿压块抗压强度优于1#磁铁矿。SEM分析发现：1#磁铁矿中新生的赤铁矿多呈点状连晶，微细孔较多，固结效果较差；2#磁铁矿中新生赤铁矿多呈片状连晶，固结效果更好。因此，配加1#高硅磁铁矿制备球团时，需适当提高预热焙烧温度，使磁铁矿充分氧化，并保证新生赤铁矿连晶生长充分。

关键词： 磁铁矿；矿相组成；氧化性能；连晶作用
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0075－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.088

Microstructure and oxidation roasting properties of Dagushan magnetite flavor powder

WANG Xingfeng[1], LU Ming[1], YU Hongjun[1], ZHANG Jianliang[2a],
LIU Zhengjian[2a], WANG Yaozu[2b], MA Liming[2a]
(1. *Dagushan Pelletizing Plant, Anshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Anshan* 114046, *Liaoning, China*;
2. *a. School of Metallurgical and Ecological Engineering*; *b. Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to investigate the influence of microstructure of Dagushan magnetite flavor powder on its oxidation roasting properties, SEM-EDS is used to analyze the presence modes of SiO_2 in two high-silica magnetite powders from Dagushan Pellet Plant, and TG/DTA is used to analyze the oxidation properties of high-silica magnetite powders, and briquetting and roasting of high-silica magnetite is used to analyze the continuous crystal growth characteristics of high-silica magnetite powders. The XRD-Rietveld refinement results show that the main phase of 1# magnetite is Fe_3O_4, which contains part of Fe_2O_3 and SiO_2; the main phase of 2# magnetite is Fe_3O_4 and SiO_2. SEM analysis results show that SiO_2 in both high-silica magnetites is mainly in the form of quartz tightly bound to Fe_3O_4 magnetite. TG/DTA

收稿日期： 2021－04－06；**修回日期：** 2021－06－04
作者简介： 王兴锋(1982—)，男，工程师，从事球团矿氧化焙烧方面的研究。
通讯作者： 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。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

differential thermal analysis founds that: the initial oxidation temperature of 1# magnetite is 270 ℃, and the comprehensive oxidation index is 2.442 2. There are more primary hematite in 1# magnetite, the temperature required for oxidation of primary hematite is higher and the oxidation is relatively poor; the initial oxidation temperature of 2# magnetite is 237 ℃, and its comprehensive oxidation index is 9.046 2. So the oxidation roasting property of 2# magnetite is better. By adjusting the ratio of 1# and 2# magnetite, the initial oxidation temperature increases with the increase of 1# magnetite ratio, and the comprehensive oxidizability index decreases from 5.160 9 to 3.671 9. The compressive strength test of single magnetite briquettes after oxidation and roasting shows that: the compressive strength of 2# magnetite briquette is 2 300 N/P, and the compressive strength of 1# magnetite briquette is 2 100 N/P. The compressive strength of 2# magnetite briquette is better than the one of 1# magnetite. SEM analysis founds that the newly-born hematite in 1# magnetite is mostly dot-like contiguous crystals with many micropores, and the consolidation effect is poor. The newly-born hematite in 2# magnetite mostly presents lamellar contiguous crystals, so its consolidation effect is better. Therefore, when preparing pellets by adding 1# high-silica magnetite, the preheating roasting temperature should be increased appropriately to make the magnetite fully oxidized and ensure the growth of newborn hematite continuous crystals.

Key words: magnetite; mineral phase composition; oxidation properties; crystallization

近年来，随着世界铁矿资源的大量消耗，优质铁矿逐渐减少，品位逐渐劣化，进口铁矿呈现硅、铝质量分数升高的趋势[1-2]，而我国自产铁矿也存在品位低、成分杂的缺点[3]，这类型铁矿粉资源选矿后更适合发展球团工艺[4]。由于成矿机理复杂、选矿难度和成本等多方面因素的制约，我国球团用磁铁矿粉普遍存在矿石品位较低，SiO_2 质量分数较高，含有部分赤铁矿等问题。如何充分利用国内自产铁矿石资源，开发适应高硅磁铁矿的球团氧化焙烧工艺成为热点。

针对此类高硅磁铁矿球团，由于其矿相特征和脉石赋存状态的复杂性，现有的球团矿氧化焙烧理论不能很好地解析其高温特性，因此，需对高硅磁铁矿的氧化焙烧性能进行更深入研究。目前，对于磁铁矿球团氧化焙烧性能已有大量研究，COOKE 等[5]、罗艳红[6]、MONAZAM 等[7]研究发现，磁铁矿球团氧化过程首先是在颗粒表面形成赤铁矿层，此时的赤铁矿层为多孔结构，高温下再结晶使得氧气顺利扩散到球核，使得核心磁铁矿(Fe_3O_4)充分氧化；SANDERS 等[8]、GILLOT[9]利用 TG/DSC 研究了磁铁矿(Fe_3O_4)在空气中氧化为赤铁矿($a-Fe_2O_3$)的动力学，认为磁铁矿在较低温度下氧化生成中间产物 $\gamma-Fe_2O_3$，然后在高温下转变成 $a-Fe_2O_3$；傅菊英等[10]通过磁铁矿氧化“单界面未反应核模型”研究了磁铁矿球团的氧化动力学；王耀祖等[11]利用图像分析法从微观矿物学的角度提出了新的磁铁矿焙烧性能评价体系，开创性地提出了铁矿粉连晶特征温度和球团固结指数、颗粒生长指数、颗粒均匀度指数，为磁铁矿氧化焙烧性能评价体系的完善提供了新的定量化研究方法。综合以往的研究成果，磁铁矿球团氧化焙烧性能相关的研究多集中于氧化过程中磁铁矿转变为赤铁矿的晶型转变，或者球团氧化反应的反应模型和氧化速率。针对脉石质量分数较高的矿物氧化焙烧的反应机理的研究较少，随着铁矿石资源的逐渐劣化，球团用磁铁矿微观结构变得复杂。因此亟待深入研究高硅磁铁矿微观结构对磁铁矿氧化焙烧性能的影响，探究适合低品位磁铁矿的球团氧化焙烧工艺。

本文通过 XRD 和 SEM-EDS 分析两种高硅磁铁矿中的物相组成和 SiO_2 的赋存形式；通过热重氧化试验(TG-DTG)研究两种高硅磁铁矿氧化性能的影响因素，并通过混合矿粉差热试验得出两种磁铁矿混合适宜的氧化焙烧制度和配比；通过压块氧化焙烧试验，得到两种高硅磁铁矿压块的连晶性能；并探究高硅磁铁矿微观结构对磁铁矿氧化焙烧性能的影响，为高硅磁铁矿球团氧化焙烧奠定理论基础，对高脉石质

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量分数磁铁矿球团的制备具有参考意义。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验用铁矿粉化学成分和粒度分布分别如表 1、2 所示。由表 1 可以看出：两种磁铁矿矿粉全铁品位较高，但 SiO_2 质量分数高；其中，1#磁铁矿 TFe 质量分数为 66.25%，SiO_2 质量分数为 5.20%，－0.074 mm 粒级质量分数为 87.01%，－0.048 mm 微细粉的质量分数达到 66.93%，比表面积为 1 837 cm^2/g；2#磁铁矿粉的 TFe 质量分数为 65.43%，SiO_2 质量分数为 7.84%，－0.074 mm 粒级质量分数为 97.78%，－0.048 mm 微细粉质量分数达到 69.23%，比表面积为 2 188 cm^2/g。

表 1　高硅磁铁矿粉的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of high-silica magnetite concentrates　%

原料种类	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
1#磁铁矿	66.25	23.25	5.20	0.20	0.34	0.39	0.01	0.08
2#磁铁矿	65.43	29.05	7.84	0.14	0.25	0.29	0.01	0.12

表 2　高硅磁铁矿粉粒度分布(质量分数)

Table 2　High-silica magnetite concentrates particle size distribution　%

原料种类	0.150 mm	0.150～0.109 mm	0.109～0.096 mm	0.096～0.074 mm	0.074～0.048 mm	－0.048 mm
1#磁铁矿	2.86	2.97	1.23	5.93	20.08	66.93
2#磁铁矿	0.20	0.30	0.10	1.62	28.55	69.23

1.2　试验设备及方法

采用 WCT-2C 型微机差热天平进行铁矿粉的氧化性试验，如图 1 所示。氧化性试验过程：取 50 mg 烘干后的样品置于氧化铝坩埚中，设置升温速率为 5 ℃/min，空气气氛下，将其由室温加热到 1 000 ℃，并在 1 000 ℃恒温 30 min，控温精度为 0.01 ℃，系统自动采集数据，得到 TG-DTA 曲线，根据 TG 数据计算得到铁矿粉氧化过程的 DTG 曲线，通过差热数据可分析得出高硅铁矿粉氧化焙烧性能[12]。焙烧性能试验采用高温电炉进行，称取高硅磁铁矿粉 50 g 与 4 mL 去离子水充分混合；取 15 g 混匀铁矿粉，在 10 MPa 的压力下将矿粉压制成高度为 10 mm、直径为 20 mm 的团块；将团块置于 105 ℃烘箱中保温 3 h，常温下将球团置于氧化铝瓷片上，然后将电炉以 5 ℃/min 进行升温，在 Ar(3 L/min)保护下预热；当温度升高至 850 ℃时，将保护气体转换为压缩空气(5 L/min)，氧化 30 min；待氧化结束，将球团移至高温炉，在空气气氛下升温至 1 300 ℃焙烧 10 min。取出焙烧后的团块测量抗压强度，利用环氧树脂进行镶嵌，采用扫描电子显微镜对球团矿的微观结构进行表征[13]。

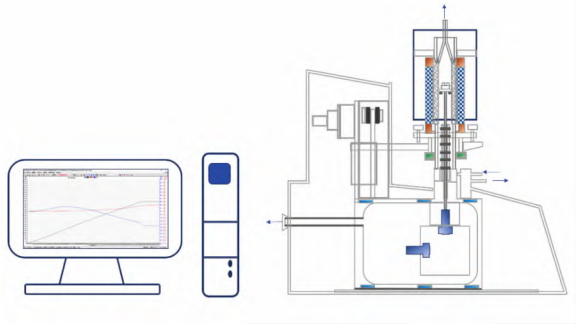


图 1　WCT-2C 型微机差热天平设备示意

Fig. 1　Schematic of WCT-2C type microcomputer differential thermal balance equipment

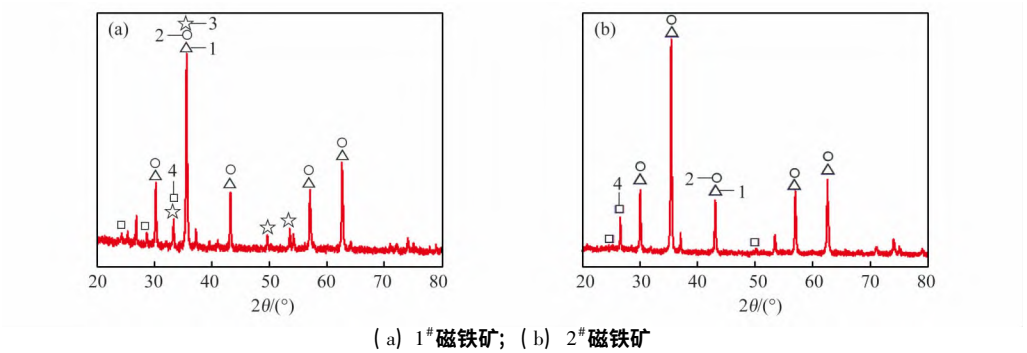
2　试验结果与讨论

2.1　高硅矿粉的微观形貌分析

为研究两种高硅矿粉的物相组成，对其进行 XRD 分析。XRD 设备型号为 Ultima IV，波长为 1.541 8，电压为 40 kV，电流为 40 mA，扫描速率为 2°/min，利用 Jade 对两种矿粉进行 XRD 物相分析，得到 XRD 图谱如图 2 所示。由图 2 可以看出：1#磁铁矿主要矿相为磁铁矿，

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

含有部分赤铁矿，脉石主要为石英；2#磁铁矿粉的主要物相为磁铁矿相，脉石主要为石英相。对 1#磁铁矿进行 XRD-Rietveld 精修发现，其 Fe_3O_4 质量分数为 79.2%，Fe_2O_3 质量分数为 14.2%，SiO_2 质量分数为 6.5%。



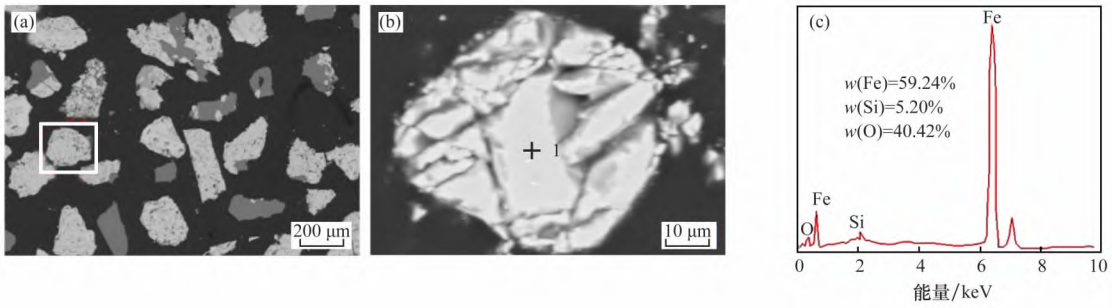
(a) 1#磁铁矿；(b) 2#磁铁矿

1—Fe_3O_4；2—$MgFe_2O_4$；3—Fe_2O_3；4—SiO_2。

图 2 两种高硅矿粉的 XRD 图谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of two kinds of high-silica concentrates

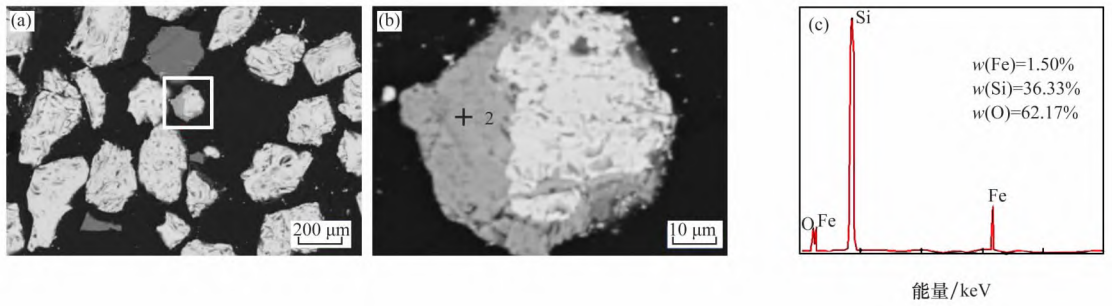
为深入研究高硅磁铁矿中石英相的存在形式，将两种高硅磁铁矿粉镶样后进行 SEM-EDS 分析，得到 1#、2#磁铁矿的扫描电镜图像如图 3、4 所示。由图 3、4 可知：两种磁铁矿脉石质量分数较高，且部分脉石和磁铁矿紧密胶结嵌合。结合 EDS 分析可知，两种高硅磁铁矿中脉石相主要为石英。



(a) 1#磁铁矿(200 倍)；(b) 1#磁铁矿(5 000 倍)；(c) 1#磁铁矿 1 点处的 EDS 能谱

图 3 1#磁铁矿微观结构图像

Fig. 3 Microstructure images of 1# magnetite concentrates



(a) 2#磁铁矿(500 倍)；(b) 2#磁铁矿(4 000 倍)；(c) 2#磁铁矿 2 点处的 EDS 能谱

图 4 2#磁铁矿粉微观结构图像

Fig. 4 Microstructure images of 2# magnetite concentrates

2.2 单种磁铁矿粉的氧化性能

为定量化表征磁铁矿氧化反应的特征温度，定义综合氧化特征数如下[15-16]。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$S_o = \frac{(dw/dt)_{max}(dw/dt)_{mean}}{T_i^2 T_e} \quad (1)$$

式中：S_o 为磁铁矿的氧化特征温度，℃；T_i 为氧化起始温度，℃；T_e 为氧化终止温度，℃，w 为氧化增重质量，mg，t 为氧化时间，min。两种高硅矿粉非等温氧化特征参数如表 3 所示。

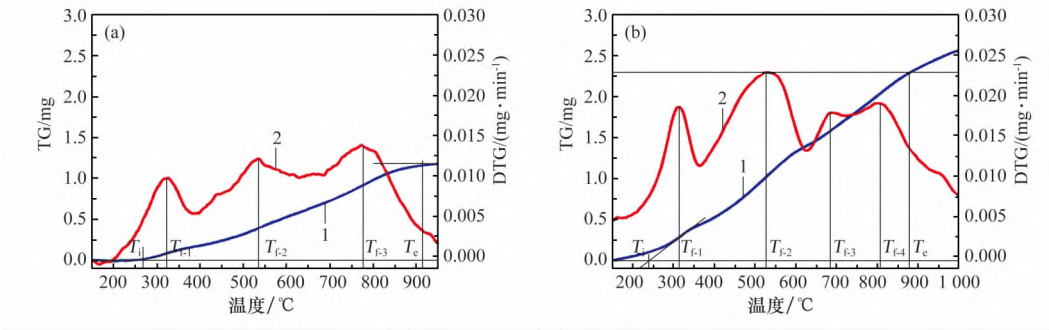
表 3　两种高硅铁矿粉的非等温氧化特征参数

Table 3　Non-isothermal oxidation characteristic parameters of two high-silica iron ore concentrates

原料名称	T_i/℃	T_{f-1}/℃	T_{f-2}/℃	T_{f-3}/℃	T_{f-4}/℃	T_e/℃
1#磁铁矿	270	324	536	775	—	908
2#磁铁矿	237	310	528	682	802	875

原料名称	$(dw/dt)_{max-1}$/(mg·min^{-1})	$(dw/dt)_{max-2}$/(mg·min^{-1})	$(dw/dt)_{max-3}$/(mg·min^{-1})	$(dw/dt)_{max-4}$/(mg·min^{-1})	$(dw/dt)_{mean}$/(mg·min^{-1})	$S_o \times 10^{-12}$/(mg^{-2}·min^{-2}·℃$^{-3}$)
1#磁铁矿	0.009 7	0.012 0	0.013 7	—	0.011 8	2.442 2
2#磁铁矿	0.018 5	0.022 8	0.017 8	0.018 9	0.019 5	9.046 2

为深入研究两种高硅矿粉的氧化性能，分别对其进行差热试验，得到高硅磁铁矿氧化性能 TG-DTG 曲线如图 5 所示。由图 5 可知，2#磁铁矿的氧化增重大于 1#磁铁矿，2#磁铁矿起始氧化低于 1#磁铁矿。由表 4 可知：2#磁铁矿起始氧化温度为 237 ℃，氧化终止温度为 875 ℃，综合氧化度为 9.046 2；1#磁铁矿起始氧化温度为 270 ℃，氧化终止温度为 908 ℃，综合氧化度为 2.442 2；2#高硅磁铁矿的氧化能力较 1#高硅磁铁矿更好，1#磁铁矿中含有 14.2% 的原生赤铁矿，原生赤铁矿氧化性能活性较差，氧化过程中需要在较高温度才能发生固相扩散和连晶，因此赤铁矿球团需要更高的氧化焙烧温度。同时根据前人的研究结果可知，不同 SiO_2 质量分数的磁铁矿在氧化过程中，随着的 SiO_2 质量分数的升高，其整体氧化性能逐渐变差[14]。试验中，综合分析 SiO_2、FeO 质量分数和矿粉粒度的影响，发现 FeO 质量分数高、比表面积大的 2#磁铁矿粉的氧化固结性能更好。



(a) 1#磁铁矿；(b) 2#磁铁矿

1—TG；2—DTG。

图 5　两种高硅磁铁矿的氧化性能分析

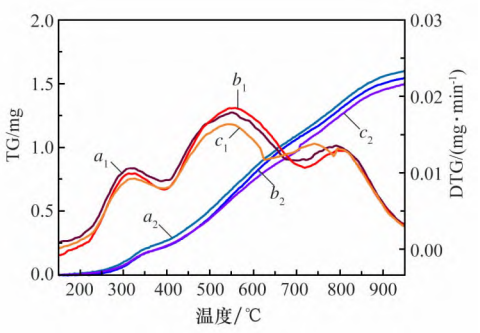
Fig. 5　Analysis of oxidation properties of two high-silica magnetites concentrates

2.3　不同配比条件下磁铁矿粉的氧化性能

在实际生产过程中，由于 1#磁铁矿粉含有部分赤铁矿，其氧化焙烧性能较差，而 2#磁铁矿中 SiO_2 质量分数较高，且资源逐渐劣化，常将 1#、2#磁铁矿粉配矿后制备球团。为探究 1#、2#磁铁矿的适宜氧化焙烧性能，对不同配比条件下的两种矿粉进行差热试验，得到不同配比条件下高硅磁铁矿的氧化性能 TG-DTG 曲线如图 6 所示。

由图 6 可知：随着 1#磁铁矿配比的增加，矿粉氧化增重降低，氧化峰峰强和峰面积减小，起始氧化温度升高；当 1#、2#磁铁矿配比为 3∶7 时，起始氧化温度为 251 ℃，综合氧化性指数为 5.160 9；当 1#、2#磁铁矿配比为 4∶6 时，起

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1#、2#磁铁矿粉配比：a_1、a_2—3∶7；b_1、b_2—4∶6；c_1、c_2—5∶5；a_1、b_1、c_1—DTG；a_2、b_2、c_2—TG。

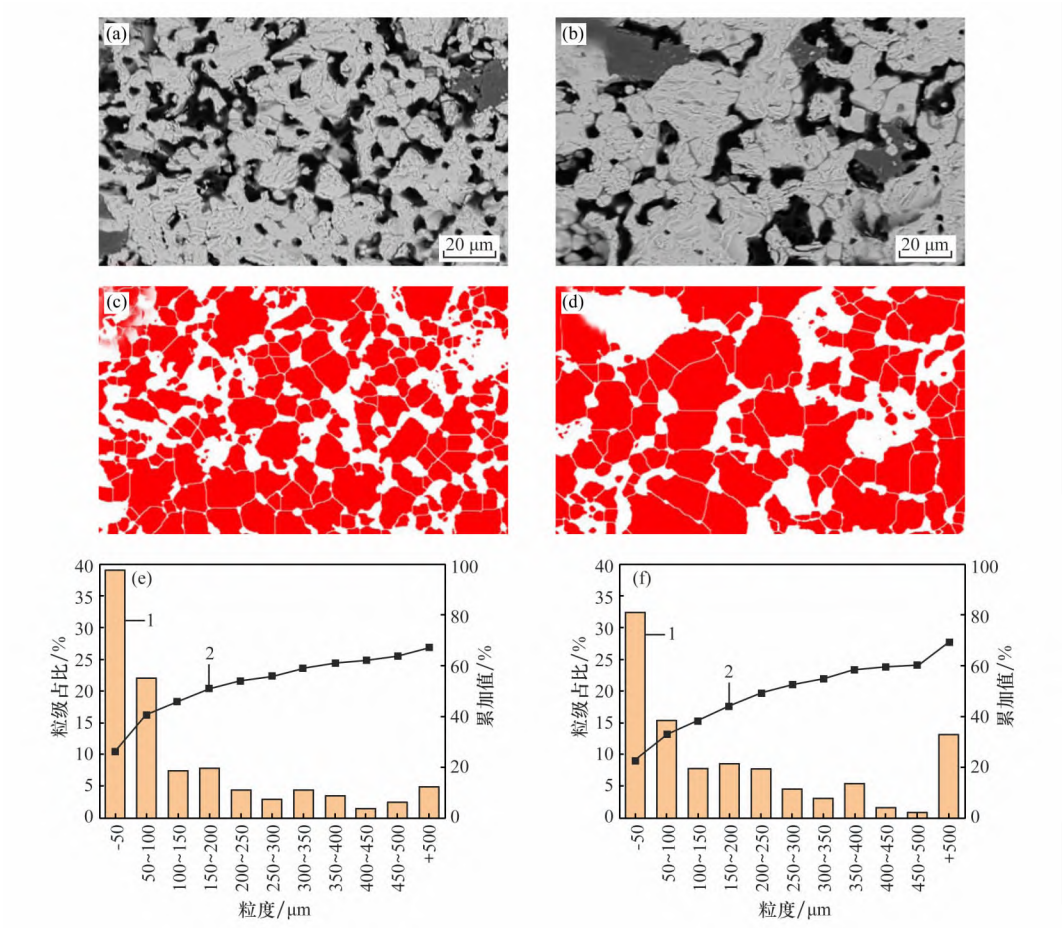
图 6 不同配比条件下两种高硅磁铁矿氧化性能

Fig. 6 The oxidation properties of two high-silica magnetite concentrates under different proportioning conditions

始氧化温度为 264 ℃，综合氧化性指数为 4.521 3；当 1#、2#磁铁矿粉配比为 5∶5 时，起始氧化温度为 267 ℃，综合氧化性指数为 3.671 9；随着 1#磁铁矿配比的增加，氧化峰面积逐渐减小，综合氧化性指数逐渐降低。因此，提高 1#磁铁矿粉配比，需要适当提高氧化焙烧温度，保证混合矿氧化充分，防止因原生 Fe_2O_3 质量分数增加，导致混合矿粉整体焙烧连晶温度升高，防止质量分数较高的 SiO_2 与未氧化的 Fe_3O_4 反应生成铁橄榄石相。

2.4 高硅磁铁矿焙烧连晶性能

两种高硅磁铁矿氧化焙烧性能如图 7 所示。由图 7 可知：1#磁铁矿粉压块抗压强度为 2 100 N/P，连晶分割图像可以观察到，1#磁铁矿压块



(a) 1#磁铁矿连晶生长图像；(b) 2#磁铁矿连晶生长图像；(c) 1#磁铁矿连晶生长状态图像；(d) 2#磁铁矿连晶生长状态图像；(e) 1#磁铁颗粒粒径分布；(f) 2#磁铁颗粒粒径分布

1—粒级占比；2—累加值。

图 7 两种高硅磁铁矿的氧化焙烧性能

Fig. 7 Oxidation roasting performance of two high-silica magnetites concentrates

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

微观图像中小粒级占比较多，连晶效果较差，新生赤铁矿呈小区域点状连晶；2#磁铁矿压块抗压强度达到 2 300 N/P，连晶分割图像可以观察到，2#磁铁矿压块中大粒径颗粒占比较多，新生赤铁矿呈片状连晶[17-19]，连晶固结效果相对较好。由两种矿粉压块的焙烧连晶特性可知，1#磁铁矿中含有的原生 Fe_2O_3 连晶固结所需温度更高，且其在球团内部分散存在，导致新生的 Fe_2O_3 之间固相扩散难度增大，孔隙率增大，强度降低。而 SiO_2 与未氧化完全的 Fe_3O_4 反应生成铁橄榄石相，抑制磁铁矿氧化反应的进行，在对 1#、2#磁铁矿混合高硅球团进行焙烧时，需适当降低 1#磁铁矿配比，提高氧化焙烧温度，保证足够的成品球团强度。

3　结　论

（1）1#磁铁矿粉主要矿相为磁铁矿相，含有部分赤铁矿相，脉石主要为石英相；2#磁铁矿粉主要物相为磁铁矿相，脉石主要为石英相。两种矿粉中部分石英和磁铁矿紧密胶结嵌合。

（2）2#磁铁矿氧化增重大于 1#磁铁矿，2#磁铁矿起始氧化温度为 237 ℃，氧化终止温度为 875 ℃，综合氧化度为 9.046 2；1#磁铁矿起始氧化温度为 270 ℃，氧化终止温度为 908 ℃，综合氧化度为 2.442 2；随着 1#磁铁矿配比增加，氧化峰面积逐渐减小，综合氧化性指数由 5.160 9 降低到 3.671 9。

（3）1#磁铁矿焙烧连晶性能较 2#磁铁矿差，1#磁铁矿焙烧后颗粒主要呈点状小晶粒连晶生长，存在较多微细孔，1#磁铁矿含有较多原生的 Fe_2O_3，其反应活性较低，连晶生长温度更高。2#磁铁矿颗粒主要呈片状连晶，但强度依然较低，过多的硅酸盐液相阻碍了晶粒的进一步生长。在对 1#、2#磁铁矿混合高硅球团进行焙烧时，需适当降低 1#磁铁矿配比，提高氧化焙烧温度，保证足够的成品球强度。

参考文献：

[1] YELLISHETTY M，RANJITH P G，THARUMARAJAH A. Iron ore and steel production trends and material flows in the world：Is this really sustainable？ [J]. Resources，Conservation and Recycling. 2010，54(12)：1084－1094.

[2] 徐满兴，冯根生，张天启，等. 高炉炉料进步与球团矿发展 [M]. 北京：冶金工业出版社，2019.
XU Manxing，FENG Gengsheng，ZHANG Tianqi，et al. Blast furnace charge progress and pellet ore development [M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2019.

[3] 叶匡吾. 球团矿的发展历史和前景 [C]//2006 年度全国烧结球团技术交流年会. 呼和浩特：全国烧结球团信息网，2006.
YE Kuangwu. The history and prospects of pellet ore development [C]//Proceedings of the 2006´s annual conference on sintering&pelletizing technology. Hohhot：The information network of national sintering and pelletizing，2006.

[4] 魏霞，王星亮. 球团矿市场分析 [J]. 矿业工程，2019，17(2)：1－4.
WEI Xia，WANG Xingliang. Market analysis on pellet ore [J]. Mining Engineering，2019，17(2)：1－4.

[5] COOKE S R B，Ban T E. Microstructures in iron ore pellets [J]. Trans AIME，1952，193：1055～1058.

[6] 罗艳红. 磁铁精矿氧化球团的基础研究 [D]. 长沙：中南大学，2011：551－555.
LUO Yanhong. A fundamental investigation on magnetite concentrate oxidized pellets [D]. Changsha：Central South University，2011：551－555.

[7] MONAZAM E R，BREAULT R W，SIRIWARDANE R，et al. Kinetics of magnetite(Fe_3O_4) oxidation to hematite(Fe_2O_3) in air for chemical looping combustion [J]. Industrial & engineering chemistry research，2014，53(34)：13320－13328.

[8] SANDERS J P，GALLAGHER P K. Kinetics of the oxidation of magnetite using simultaneous TG/DSC [J]. Journal of thermal analysis and calorimetry，2003，72(3)：777－789.

[9] GILLOT I A R T. Influence of crystallite size on the oxidation kinetics of magnetite [J]. Journal of Solid State Chemistry，1978，25：263－271.

[10] 傅菊英，李云涛，姜昌伟，等. 磁铁精矿球团氧化动力学 [J]. 中南大学学报(自然科学版)，2004，35(6)：950－954.
FU Juying，LI Yuntao，JIANG Changwei，et al. Oxidation kinetics of magnetite concentrate pellets [J]. Journal of Central South University(Science and Technology)，2004，35(6)：950－954.

[11] WANG Y，SCHENK J，ZHANG J，et al. Novel sintering indexes to evaluate and correlate the crystal characteristics and compressive strength in magnetite pellets [J]. Powder Technology，2020，362：517－526.

（下转第 88 页）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

YE Kuangwu. Present situation and prospect of pellet production in China [J]. Sintering and Pelletizing,2003,28(1):1 – 4.

[4] 孙彦广. 钢铁工业数字化、网络化、智能化制造技术发展路线图 [J]. 冶金管理,2015(9):4 – 8.
SUN Yanguang. Development roadmap of digital, networked and intelligent manufacturing technology for iron and steel industry [J]. Metallurgy Management,2015(9):4 – 8.

[5] 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(2):25 – 30;37.
XU Manxing,ZHANG Yulan. Analysis of pellet technology and production of China in 21st century [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2):25 – 30;37.

[6] 温春友,邵志勇. 基于数字图像处理的球团矿粒度检测 [J]. 烧结球团,2004,29(2):38 – 40.
WEN Chunyou,SHAO Zhiyong. A measuring method of pellets diameter based on digital image processing [J]. Sintering and Pelletizing,2004,29(2):38 – 40.

[7] 夏召红,谢元旦,马英海,等. 基于小波变换的球团矿粒度检测 [J]. 科技信息(科学教研),2007(35):101 – 102.
XIA Zhaohong,XIE Yuandan,MA Yinghai,et al. An online-measurement method of pellets diameter based on wavelet transform [J]. Science & Technology Information,2007(35):101 – 102.

[8] 孙星星,郑俊褒,曹志玲. 基于引导滤波与 LoG 算子的安检图像增强算法 [J]. 软件导刊,2020,19(8):226 – 229.
SUN Xingxing,ZHENG Junshuang,CAO Zhiling. Security image enhancement based on guided filter and Lo Goperator [J]. Software Guide,2020,19(8):226 – 229.

[9] 唐庆博,唐超,张恒浩. 一种改进的基于 Hough 变换的精确圆检测方法 [J]. 航空计算技术,2017,47(3):58 – 61.
TANG Qingbo,TANG Chao,ZHANG Henghao. An improved accurate circle detection method based on Hough transform [J]. Aeronautical Computing Technique,2017,47(3):58 – 61.

[10] 秦长泽,刘琼. 基于改进分水岭算法的球团矿图像分割 [J]. 武汉科技大学学报,2015,38(2):134 – 137.
QING Changze,LIU Qiong. Image segmentation of pellet ore based on improved watershed algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology,2015,38(2):134 – 137.

[11] 徐瑶. Qt 中基于 QCustomPlot 实现曲线绘制和显示的研究 [J]. 科技视界,2019,(25):54 – 55.
XU Yao. Qt based on QCustomPlot curve drawing and display research [J]. Science & Technology Vision,2019(25):54 – 55.

[12] AMMAR M K,JAGDISH C P. A novel enhanced cuckoo search algorithm for contrast enhancement of gray scale images [J]. Applied Soft Computing Journal,2019,85(12):105749.

[13] 崔远. 一种改进的 Hough 圆检测快速算法 [J]. 电子世界,2017(6):9 – 10.
CUI Yuan. An improved fast algorithm for Hough circle detection [J]. Electronics World,2017(6):9 – 10.

[14] 焦圣喜,肖德军,阚一凡. 霍夫变换算法在圆心视觉定位中的应用研究 [J]. 科学技术与工程,2013,13(14):4089 – 4093.
JIAO Shengxi,XIAO Dejun,KAN Yifan. Research on the application of hough transform algorithm in the visual localization of center of circle [J]. Science Technology and Engineering,2013,13(14):4089 – 4093.

(上接第81页)

[12] FORSMO S P E,HÄGGLUND A. Influence of the olivine additive fineness on the oxidation of magnetite pellets [J]. International Journal of Mineral Processing,2003,70(1 – 4):109 – 122.

[13] WANG Y,ZHANG J,LIU Z. Mineralogical characteristics and isothermal oxidation kinetics of ironsand pellets [J]. Metals,2019,9(2):265.

[14] 李明. 首钢京唐球团矿降 FeO 含量的生产实践 [J]. 山东冶金,2015,37(4):6 – 7.
LI Ming. Practice of decreasing the FeO content in pellets in Shougang Jingtang [J]. Shandong Metallurgy,2015,37(4):6 – 7.

[15] 王宝海. 磁铁矿球团氧化非等温动力学 [C]//2010 年全国炼铁生产技术会议暨炼铁年会. 北京:中国金属学会,2010.
WANG Baohai. Study on thermal analysis kinetic of oxidation reaction of magnetite concentrate pellets [C]//2010 National Ironmaking Production Technology Conference and Annual Ironmaking Conference. Beijing: Chinese Society of Metals,2010.

[16] 李尉,付贵勤,储满生,等. 红格钒钛磁铁矿氧化物相转变及非等温氧化动力学 [J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(4):517 – 521.
LI Wei,FU Guiqin,CHU Mansheng,et al. Phase transformation and non-isothermal oxidation kinetics of Hongge vanadium-bearing titanomagnetit [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2017,38(4):517 – 521.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net