球团

$w(SiO_2)$对高赤铁矿配比球团的影响

易陆杰[1]，彭道胜[2]，黄代亮[1]
(1. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524072；2. 宝钢股份中央研究院 武钢有限技术中心，湖北 武汉 430000)

摘要： 为保证宝山基地高炉渣系流动性、减少高炉硅石配入量，同时合理利用低铁高硅赤铁矿资源、降低球团原料成本，文章探索以高配比低铁高硅赤铁矿生产酸性球团矿的方法，以达到稳定高炉冶炼过程、拓宽球团原料来源的目的；该方法采用高配比赤铁矿的原料结构，通过改变$w(SiO_2)$，研究其对球团性能的影响。结果表明：随着$w(SiO_2)$的增加，生球的落下强度改善，但爆裂温度有所降低；适当增加$w(SiO_2)$有利于球团的焙烧性能、还原性和软熔性能，但当其超过7%时，焙烧球团的强度有所下降，球团的还原膨胀率高于20%；随着$w(SiO_2)$的增加，球团矿相中赤铁矿晶体互联程度提高，石英和玻璃体出现的频率增加。在实验室研究结果的基础上开展工业试验，结果表明：以赤铁矿配比50%~80%的原料结构生产$w(SiO_2)$为4.0%~6.0%的酸性球团，生产成本显著下降。

关键词： SiO_2；赤铁矿球团；生球性能；冶金性能；微观结构
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-8764(2023)05-0074-05
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.073

Influence of $w(SiO_2)$ on pellets with high ratio of hematite

YI Lujie[1], PENG Daosheng[2], HUANG Dailiang[1]
(1. Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524072, Guangdong, China; 2. Research and Development Center of Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Baosteel Central Research Institute, Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: In order to ensure the fluidity of blast furnace slag in Baoshan base, reduce the incorporation amount of blast furnace silica, rationally utilize low-iron and high-silica hematite resources, and reduce the cost of pellet raw material, the method of producing acid pellets with high-ratio low-iron and high-silica hematite is explored, so as to stabilize the blast furnace smelting process and broaden the source of pellets raw material. This method adopts the raw material structure of high-ratio hematite is used to research the effect of $w(SiO_2)$ on the performance of pellets by changing it. The results show that, with the increase of $w(SiO_2)$, it is beneficial to improve the falling strength of the fresh pellet, but the bursting temperature is decreased. Appropriately increasing $w(SiO_2)$ is conducive to the roasting performance, reduction and soft melting performance of pellets, but when it exceeds 7%, the strength of roasted pellets is decreased, and the reduction expansion rate of pellets is higher than 20%. With the increase of $w(SiO_2)$, the degree of interconnection of hematite crystals in the pellet phase is increased, and the frequency of quartz and vitreous occurrence is increased. On the basis of the results of laboratory research, industrial experiments are carried out to produce acidic pellets with $w(SiO_2)$ of 4.0%~6.0% with a raw material structure with a ratio of 50%~80% hematite, and the cost of pellet raw material is significantly reduced.

Key words: SiO_2; hematite pellets; fresh pellet performance; metallurgical properties; microstructure

宝钢股份大型高炉通常使用优质自熔性球团作为含铁炉料，为保证高炉渣流动性，渣中$w(Al_2O_3)$常控制在15%以下，同时为保证炉渣脱硫效果，高炉吨铁硅石加入量为3~12 kg/t。从高炉冶炼的角度，通常希望全部熔剂从烧结或球团工序加入，以使得炉料更加均匀，冶炼过程更为

收稿日期： 2022-09-14；**修回日期：** 2023-07-12
作者简介： 易陆杰(1978—)，男，工程师，从事球团生产技术管理方面的工作。
通信作者： 彭道胜(1989—)，男，工程师，从事烧结球团新工艺、低碳冶金方面的研究。

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

稳定。若球团中的SiO_2质量分数由当前的 3% 提高到 6%，则高炉可少加或不加硅石，有利于高炉冶炼，同时也有利于湛江球团配矿结构突破低硅矿石资源的限制，控制炼铁成本[1-5]。

目前，国内球团矿的生产主要以磁铁矿为原料，但随着优质磁铁精矿资源日益消耗，资源稳定、价格相对低廉的赤铁矿越来越受到国内球团厂的重视。但采用大比例赤铁矿制备球团普遍存在生球质量差、成品球强度低、焙烧性能不佳等问题。针对这一问题，国内外学者开展了相关研究：杨永斌等[6]、熊红云等[7]研究表明，赤铁矿细磨预处理能够改善球团焙烧过程中 Fe_2O_3 晶粒的发育、迁移和连接，细磨预处理导致矿粉比表面积和粒度组成的优化是球团强度提高的主要原因。易陆杰等[8]研究表明，通过配加钙质或镁质熔剂可以提高赤铁矿球团抗压强度。球团矿中的主晶相为赤铁矿，液相主要由铁酸钙、硅酸钙和铁酸镁组成。黄柱成等[9]、彭道胜等[10]研究表明，制备氧化球团矿时添加磁铁矿，可以降低焙烧温度，球团矿的 Fe_2O_3 晶体互连性较好，球团矿的显微结构更致密。但是上述研究，通常采用低硅赤铁矿搭配高比例磁铁矿生产氧化球团，这对于减小高炉内的“硅压力”并无显著的作用。因此，采用高配比低铁高硅赤铁矿生产酸性球团矿，对于拓宽球团矿石资源、降低高炉熔剂配入量具有重要的现实意义。文章以宝钢湛江提供的铁矿粉为原料，针对高硅赤铁矿球团性能较差的问题，通过改变铁矿粉配比调整球团 $w(SiO_2)$，揭示 SiO_2 对生球性能、焙烧性能、冶金性能和微观结构的影响规律，以期为高硅赤铁矿球团的制备和应用提供借鉴作用。

1　原料与研究方法

1.1　原料性能

试验所用的含铁原料理化指标如表 1 所示。由表 1 可知，含铁原料包括 3 种赤铁矿和 2 种磁铁矿，赤铁矿 A、B、C 的铁品位分别为 67.19%、63.37% 与 57.86%，$w(SiO_2)$ 高达 11.86%。磁铁矿 D 和 E 的铁品位分别高达 65.36% 和 69.76%。其中赤铁矿 B 粒度组成较粗，<0.074 mm 粒级的占比为 66.91%，其余含铁原料 <0.074 mm 粒级占比超过 85%，可用于球团制备。

表 1　原料主要化学成分、粒度及比表面积

Table 1　Main chemical composition, particle size and specific surface area of raw materials

原料名称	化学成分(质量分数)/%								<0.074 mm (质量分数)/%	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P		
赤铁矿 A	67.19	0.036	2.95	0.19	0.016	0.60	0.004	0.027	99.41	1 445
赤铁矿 B	63.37	1.390	1.44	0.19	0.120	1.04	0.026	0.067	66.91	1 029
赤铁矿 C	57.86	1.880	11.86	0.55	0.120	1.28	0.024	0.059	95.80	1 871
磁铁矿 D	65.36	28.740	7.66	0.43	0.470	0.33	0.012	0.019	85.61	1 778
磁铁矿 E	69.76	29.380	1.57	0.38	0.640	0.42	0.180	0.011	96.27	974
赤磁混合矿 F	61.85	11.110	9.24	0.67	0.540	0.85	0.023	0.068	94.90	1 715

1.2　研究方法

造球试验的配矿方案如表 2 所示。为了研究 SiO_2 对高赤铁矿配比球团的影响规律，通过调整各矿粉的配比使 $w(SiO_2)$ 分别处于 4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0%、6.5%、7.0%、7.5% 8 个水平。

试验根据表 2 进行配料，每次配料以 3.5 kg 含铁原料为基准，膨润土按 2% 的质量分数外配；采用圆盘造球机(直径为 1 m，转速为 28 r/min，边高为 0.15 m，倾角为 47°)进行造球，控制生球的水分约为 8%；筛分出 10 ~ 12.5 mm 的生球测定其抗压强度、落下强度、爆裂温度；其余生球在烘箱 105 ℃温度下干燥 4 h，在双段卧式管炉中进行预热焙烧试验；最后，筛取 10 ~ 12.5 mm 的球团矿测试抗压强度、冶金性能，并通过光学显微镜进行球团微观结构分析。

2　结果及分析

2.1　$w(SiO_2)$ 对生球性能的影响及分析

$w(SiO_2)$ 对生球性能的影响见图 1。由图 1

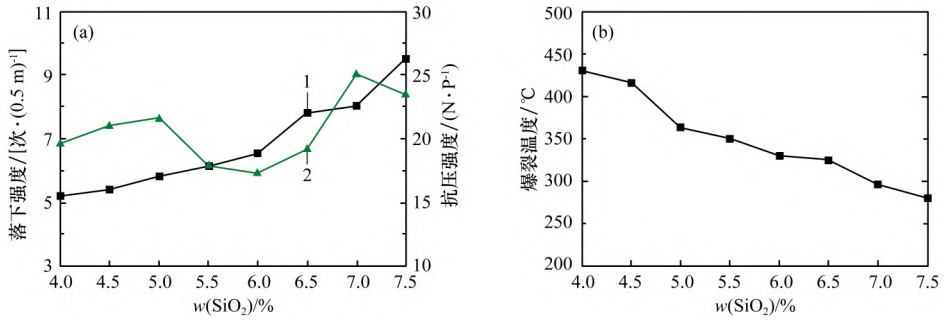
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 配矿方案(质量分数)

Table 2 Ore blending scheme %

$w(SiO_2)$	赤铁矿A	赤铁矿B	赤铁矿C	磁铁矿D	磁铁矿E	赤磁混合矿F
4.0	45	35	0	20	0	0
4.5	32	33	15	0	20	0
5.0	27	35	0	0	0	38
5.5	33	35	15	17	0	0
6.0	28	35	18	19	0	0
6.5	23	35	23	19	0	0
7.0	0	40	5	0	0	55
7.5	0	40	14	0	0	46

可知，各配矿方案所得生球落下强度均在5次/(0.5 m)以上，且抗压强度均高于19 N/P。随着$w(SiO_2)$增加，生球的落下强度大体呈不断上升趋势，但爆裂温度不断降低。当$w(SiO_2)$为6.5时，生球落下强度为7.8次/(0.5 m)，爆裂温度为325 ℃；而当$w(SiO_2)$为7.5时，生球落下强度增至9.5次/(0.5 m)，但爆裂温度却下降至290 ℃。随着$w(SiO_2)$增加，成球性能良好的赤铁矿C和磁赤混合矿F配比增加，造球过程中颗粒间的接触咬合更紧密，生球落下强度大幅提高。但赤铁矿C和磁赤混合矿F配比的增加，使混合料整体粒度变细，构成生球原料的颗粒越细，颗粒间内部毛细管的直径愈小，生球干燥过程中水分迁移的阻碍力也会提高，生球的爆裂温度会随之降低。赤铁矿C和磁赤混合矿F配比较高时，配入一定量粒度较粗的磁铁矿D，能有效改善生球的热稳定性。



(a) 落下强度和抗压强度；(b) 爆裂温度

1—落下强度；2—抗压强度。

图1 $w(SiO_2)$对生球性能的影响

Fig. 1 Effect of $w(SiO_2)$ on properties of green pellets

2.2 $w(SiO_2)$对球团强度的影响及分析

在预热温度为1 050 ℃、预热时间为15 min、焙烧温度为1 250 ℃、焙烧时间为15 min的条件下，$w(SiO_2)$对成品球抗压强度的影响见图2。由图2可知，随着$w(SiO_2)$从4.0%提高到7.5%，成品球抗压强度呈现先上升后下降的趋势。当$w(SiO_2)$为7.0%时，球团抗压强度达到最大值(4 463 N/P)，此时继续提高$w(SiO_2)$反而会使焙烧球的抗压强度出现下降。这是因为$w(SiO_2)$升高会增加球团中的液相量，适宜的液相量有助于Fe_2O_3晶粒的连晶与长大，但是过量的硅酸盐液相会阻碍Fe_2O_3晶粒的相互连接，同时硅酸盐渣相强度较低，导致球团抗压强度降低[12]。

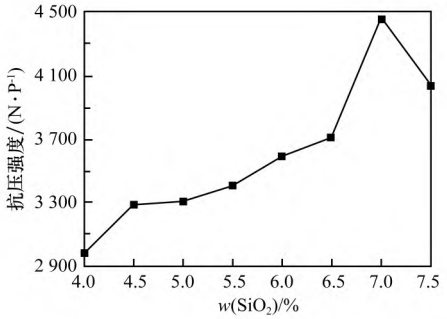


图2 $w(SiO_2)$对成品球抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of $w(SiO_2)$ on compressive strength of pellets

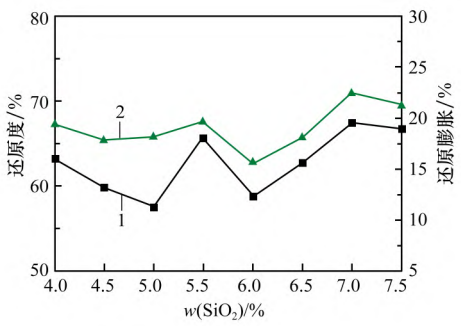
2.3 $w(SiO_2)$对球团冶金性能的影响及分析

$w(SiO_2)$对球团还原性能和还原膨胀的影响见图3。由图3可知，当$w(SiO_2)$为6.0%时，其成品球还原膨胀率只有15.5%，但还原度低于60%；当$w(SiO_2)$为6.5%时，成品球的还原度提高至62.66%，还原膨胀率也只有18.1%，此时具有最佳的还原性能指标。当$w(SiO_2)$达7.0%以

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

上时，球团的还原膨胀率升高至 20% 以上。这是因为w(SiO_2) 过高时，成品球中的 SiO_2 容易与赤铁矿还原生成浮氏体及 CaO 反应生成低熔点的橄榄石相，不能抵抗赤铁矿还原为磁铁矿时产生的膨胀应力，从而增加球团的还原膨胀指数。

w(SiO_2) 对球团高温软熔性能的影响见表 3。由表 3 可知，随 w(SiO_2) 升高，球团软化开始温度和熔融开始温度逐渐降低，软化区间和熔融区间变化不大。这主要是因为当w(SiO_2) 升高时，球团中橄榄石液相会增加，而低熔点的橄榄石液相在高温时容易软熔。



1—还原膨胀；2—还原度。

图 3　w(SiO_2) 对球团还原性能的影响

Fig. 3　Effect of w(SiO_2) on reduction performance of pellets

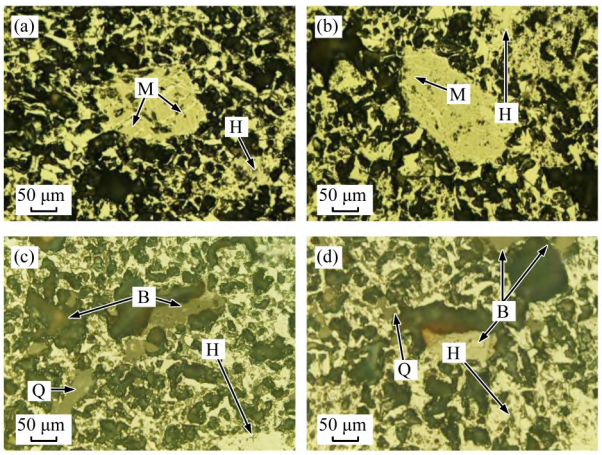
表 3　w(SiO_2) 对球团软熔性能的影响

Table 3　Effect of w(SiO_2) on reflow properties of pellets

w(SiO_2)/%	软化开始温度/℃	软化结束温度/℃	软化区间/℃	熔融开始温度/℃	熔融结束温度/℃	熔融区间/℃
4.0	969	1 099	129	1 055	1 313	258
5.0	934	1 041	108	1 011	1 290	280
6.0	927	1 038	111	991	1 294	302
7.0	907	1 008	101	961	1 281	320

2.4　w（SiO_2）对矿相结构的影响

不同 w(SiO_2) 球团矿的矿相结构和物相组成见图 4 和表 4。由图 4 可知，不同 w(SiO_2) 成品球中最主要的铁矿物均为赤铁矿，磁铁矿质量分数均极低，说明球团预热焙烧过程氧化完全。磁铁矿多呈自形晶残留于赤铁矿晶粒上，粒度多在 0.1 mm 以下，根据晶体形态和产出形式推断，主要是原



w(SiO_2)/%：(a) 4.0；(b) 5.0；(c) 6.0；(d) 7.0。H—赤铁矿；M—磁铁矿；B—玻璃体；Q—石英。

图 4　不同 w(SiO_2) 球团矿矿相结构

Fig. 4　Mineralogic structure of pellets on different w(SiO_2)

表 4　不同 w(SiO_2) 球团物相组成(质量分数)

Table 4　Phase composition of pellets on different w(SiO_2)　%

w(SiO_2)	赤铁矿	磁铁矿	石英	玻璃质	其他
4.0	85.7	6.8	2.0	1.9	3.6
5.0	84.6	7.0	2.5	2.3	3.6
6.0	83.5	6.7	3.2	2.6	4.0
7.0	82.7	6.2	4.0	3.1	4.0

料中氧化不完全的残余磁铁矿。赤铁矿为球团中最主要的铁矿物，赤铁矿晶粒多呈再结晶长大的他形晶，以粒状或片状紧密交织镶嵌构成集合体，分布均匀，晶粒间多为固相固结。当 w(SiO_2) 为 6.0%、7.0% 时，赤铁矿晶粒粒径较粗，晶体互联程度良好。

球团中脉石矿物以石英为主，其次为玻璃质。石英主要呈他形晶、粒状，分布不均匀，零星充填于赤铁矿晶粒间。玻璃质出现的频率低于石英，主要呈不定形充填于赤铁矿晶粒间形成渣相固结。随着 w(SiO_2) 增加，球团中玻璃质出现的频率增加。综上所述，当 w(SiO_2) 从 4.0% 提高到 7.0% 时，球团中赤铁矿晶体互联程度提高，球团渣相增加，球团矿矿相结构逐渐致密。

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

3 工业试验

制备高硅赤铁矿球团的工业试验在湛江基地球团厂开展，目标碱度为 0.15 ~ 0.20，球团 $w(SiO_2)$ 为4.0%~6.0%。高硅赤铁矿球团工业试验参数及结果分别如表5、6所示。由表6可知，高硅赤铁矿球团抗压强度高，4种方案的球团抗压强度均高于2 800 N/P。随着 $w(SiO_2)$ 的升高，还原膨胀指数逐渐下降，球团还原度均在59%以上。

表5 工业试验参数

Table 5 Parameters of industrial test

区域	鼓干段风箱	抽干段烟罩	预热一段烟罩	预热二段烟罩	焙烧段
温度/℃	200 ~ 220	350 ~ 400	800 ~ 850	1 050 ~ 1 100	1 250 ~ 1 260
风速/($m \cdot s^{-1}$)	1.5 ~ 1.8	1.8 ~ 2.1	2.4 ~ 2.7	2.4 ~ 2.7	—

表6 工业试验球团指标

Table 6 Pellet index of industrial test

$w(SiO_2)$/%	$w(CaO)$/%	$w(TFe)$/%	抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)	*RSI*/%	*RDI*(<2.8 mm)/%	*RI*/%
3.92	1.12	65.40	3 005	24.70	1.30	60.55
4.45	1.02	64.90	2 810	22.40	0.80	59.09
4.97	1.02	64.62	2 904	21.26	0.75	59.90
6.02	1.08	63.57	2 978	15.10	0.58	64.51

注: *RSI* 为还原膨胀指数; *RDI* 为还原粉化指数; *RI* 为还原度。

4 结 论

(1) 当 $w(SiO_2)$ 为4.0% ~7.5%时，制备的生球落下强度均在5次/(0.5 m)以上，抗压强度高于19 N/P，生球爆裂温度高于290 ℃。随着 $w(SiO_2)$ 升高，成球性能较好的赤铁矿C和磁赤混合矿F配比逐渐增加，生球落下强度逐渐提高，但生球的爆裂温度随之降低。

(2) 在适宜预热焙烧制度下，当 $w(SiO_2)$ 为4.0% ~7.5%时，制备的成品球抗压强度均在2 500 N/P以上。但随 $w(SiO_2)$ 提高，成品球抗压强度呈现先上升后下降的趋势。当 $w(SiO_2)$ 为7.0%时，球团抗压强度最高达到4 463 N/P，此时再提高 $w(SiO_2)$ 会使成品球抗压强度降低；随 $w(SiO_2)$ 升高，球团软化开始温度和熔融开始温度逐渐降低，高温软熔性能变差。

(3) 在高配比赤铁矿的原料结构条件下，不同 $w(SiO_2)$ 制备的成品球中最主要的铁矿物为赤铁矿，磁铁矿含量均极低；成品球的脉石矿物以石英为主，次为玻璃体。当 $w(SiO_2)$ 从4.0%提高到7.0%时，球团中赤铁矿晶体互联程度提高，球团渣相增加，球团矿矿相结构逐渐致密。

参考文献:

[1] 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 Z W,XIANG A P,LIU S P,et al. Effect of low iron and high silicon hematite concentrate ratio on properties of oxidized pellets [J]. China Metallurgy,2020,30(6):8-13.

[2] 乔波,罗果萍,柴轶凡,等. 不同精矿制备球团矿预热焙烧性能对比分析[J]. 烧结球团,2021,46(2):50-56.
QIAO B,LUO G P,CHAI Y F,et al. Comparison and analysis on preheating roasting performance of pellets prepared from different concentrates [J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(2):50-56.

[3] PAL J,GHORAI S,GOSWAMI M C,et al. Behavior of fluxed lime iron oxide pellets in hot metal bath during melting and refining [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2013,3(4):329-337.

[4] WEI L,GUI Q F,CHU M S. Reduction behavior and mechanism of Hongge vanadium titanomagnetite pellets by gas mixture of H_2 and CO [J]. Journal of Iron and Steel Research(International),2017,24(1):34-42.

(下转第107页)

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

deactivated TiO_2–ZrO_2–CeO_2/ATS catalyst for NH_3–SCR of NO_x in glass furnace [J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(2): 130 – 136.

[12] LIU C, CHEN L, CHANG H, et al. Characterization of CeO_2–WO_3 catalysts prepared by different methods for selective catalytic reduction of NO_x with NH_3 [J]. Catalysis Communications, 2013, 40: 145 – 148.

[13] YU W C, WU X D, SI Z C, et al. Influences of impregnation procedure on the SCR activity and alkali resistance of V_2O_5–WO_3/TiO_2 catalyst [J]. Applied Surface Science, 2013, 283: 209 – 214.

[14] 梁磊. 烧结烟气低温 SCR 脱硝催化剂的制备及性能研究 [J]. 烧结球团, 2021, 46(3): 86 – 92.
LIANG L. Preparation and experimental research on low temperature SCR denitration catalyst for sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(3): 86 – 92.

(上接第 78 页)

[5] 朱德庆, 沈文俊, 潘建, 等. 碱度和内配燃料对赤铁矿球团强度的影响 [J]. 金属矿山, 2011, 36(6): 104 – 108.
ZHU D Q, SHEN W J, PAN J. Research on influence of the alkalinity and the fuel flux to the intensity of hematite pellets [J]. Metal Mine, 2011, 36(6): 104 – 108.

[6] 杨永斌, 张健, 钟强, 等. 预处理强化赤铁矿熔剂性球团制备性能的研究 [J]. 矿冶工程, 2019, 23(4): 83 – 88.
YANG Y B, ZHANG J, ZHONG Q, et al. Effect of pretreatment on the ballability of hematite in preparation of a fluxed pellet [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 23(4): 83 – 88.

[7] 熊红云. 高压辊磨强化赤铁精矿制备氧化球团的研究 [J]. 烧结球团, 2011, 36(4): 23 – 27.
XIONG H Y. Study on strengthening production of hematite oxidized pellet by high pressure roller grinding [J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(4): 23 – 27.

[8] 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): 58 – 62.
YI L J, LI Y H, LI J, et al. Influence of calcium magnesium flux on high hematite ratio pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 58 – 62.

[9] 黄柱成, 张元波, 陈耀铭, 等. 以赤铁矿为主配加磁铁矿制备的氧化球团矿显微结构 [J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003(6): 606 – 610.
HUANG Z C, ZHANG Y B, CHEN Y M, et al. Microstructure of oxidized pellet mainly made from hematite with magnetite [J]. Journal of Central South University, 2003(6): 606 – 610.

[10] 彭道胜, 潘建, 李军, 等. 细磨卡粉制备熔剂性球团的试验研究 [J]. 烧结球团, 2021, 46(4): 50 – 57.
PENG D S, PAN J, LI J, et al. Experimental research on preparation of fluxed pellets from fine grinding Carajas powder [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(4): 50 – 57.

[11] PENG L, BING G L, ZHANG L B, et al. Particle motion simulation and pulverized coal injection combustion simulation of titanomagnetite pellets in rotary kiln for reduction process with coal [J]. Journal of Iron and Steel Research: International, 2022, 23(6): 891 – 906.

[12] 李杰, 韩闯闯, 杨爱民, 等. SiO_2 对镁质酸性球团性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(11): 872 – 877.
LI J, HAN C C, YANG A M, et al. Effect of SiO_2 on quality of magnesian acid pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(11): 872 – 877.

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