

碱度对生球质量和球团矿抗压强度的影响

严照照¹, 卢建光^{2,3}, 吕 庆¹, 张淑会¹, 刘小杰¹, 孙 喆⁴

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北钢铁集团邯郸公司, 河北 邯郸 056015; 3. 东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110004; 4. 华北理工大学外国语学院, 河北 唐山 063009)

摘 要:通过改变 A 矿粉和 B 矿粉的配比来研究碱度对生球质量和球团矿抗压强度的影响。研究发现: 随着碱度的提高, 生球的落下强度、抗压强度逐渐降低, 热爆裂温度逐渐升高; 随着碱度提高, 在焙烧过程中赤铁矿晶粒不断发育长大, 但球团矿中产生的低熔点硅酸盐矿物增多并相互聚集在一起, 恶化了赤铁矿晶粒间的连晶程度, 同时增加了球团矿中的孔隙, 导致球团的抗压强度逐渐降低。

关键词:球团矿; 碱度; 成球性; 硅酸盐矿物; 抗压强度

中图分类号: TF046.6 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2018)06-0110-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2018.06.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

The Impact of Basicity on the Green Ball Quality and Cruslring Strength of Pellets

Yan Zhaozhao¹, Lu Jianguang^{2,3}, Lü Qing¹, Zhang Shuhui¹, Liu Xiaojie¹, Sun Zhe⁴

(1. College of Metallurgy and Engineering, North China University of Science and Engineering and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Hebei Iron and Steel Group Co., Ltd., Handan 056015, Hebei, China; 3. College of Metallurgy, North-eastern University, Shengyang 110004, Liaoning, China; 4. College of Foreign Language, North China University of Science and Engineering and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China)

Abstract: In this paper the impact of basicity on the green ball quality and cruslring strength of pellets had been investigated by changing the ratio of A fine powder and B mineral powder. When the basicity is increased, the incidence strength and the compression strength of the green ball gradually decrease, but thermal explosion temperature increases. At the same time hematite crystal grains develops and grows up continuously in the process of roasting, however, the low melting point silicate minerals producing in the pellets increases in volume and aggregate together, which will worsen the connection degree of hematite crystal, at the same time, the ratio of pore in pellets increases, causing the decrease in compressive strength of pellets gradually.

Key words: pellet, basicity, spherionization, silicate minerals, the strength of compression

0 引言

由于球团矿具有能耗低、环境污染小、成分稳

定、强度高等优势^[1], 在欧洲、北美等地区的高炉中加入了大量的球团矿, 甚至部分企业在高炉中球团的加入比例达到了百分之百^[2]。在我国根据原料特

收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 河北省钢铁联合基金资助项目(E2015209073); 华北理工大学杰出青年基金资助项目(JP201508) 河北省重点研发计划自筹项目(162176440)。

作者简介: 严照照(1991—), 男, 硕士生, 主要从事冶金工艺基础研究, E-mail: 1029837374@qq.com。 通讯作者: 吕 庆(1954—), 男, 博士, 教授, E-mail: lq@ heuu.edu.cn。

性,进入高炉中的原料主要为高碱度烧结矿与酸性球团矿相互搭配,外加少量的天然矿。目前炉料中球团矿的配入比例逐渐增大,在高炉冶炼过程中球团的质量起到的作用越来越大^[3]。在满足球团质量前提下尽可能提高球团矿的碱度,为降低高碱度烧结矿的配比提供了可行性。

前人做了大量关于碱度对球团矿质量影响的研究工作,如武志杰^[4]通过加入消石灰来改变球团矿的碱度,研究发现:随着碱度的增加,生球的落下强度、抗压强度和水含量得到了提高,成品球团矿的强度都超过了 2 000 N;蒋大军^[5]通过改变球团碱度研究碱度对球团矿抗压强度的影响,研究发现:随着碱度的提高,球团的抗压强度逐渐降低,主要由于球团中液相含量增加,阻碍了颗粒间的接触,影响了晶粒的再结晶长大,同时 CaO 含量增多,不利于球团中晶粒的接触,还可能生成强度较差的铁酸钙,导致球团抗压强度降低。与通过外加 CaO 添加剂来调节球团矿碱度相比,采用不同碱度矿粉通过改变配比来调节碱度的球团矿的化学成分分布更加均匀。笔者通过采用 A 矿粉和 B 矿粉调节球团矿碱度(二元

碱度 $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$) 来研究碱度对球团抗压强度的影响,为充分利用 A 矿粉和 B 矿粉生产适宜碱度球团矿提供了依据。

1 原料基础特性

1.1 化学成分

A 矿粉和 B 矿粉的化学成分如表 1 所示,两种矿粉的含铁品位都比较高,都达到了 65% 左右,A 矿粉含铁品位达到了 66.36%,同时 A 矿粉 SiO_2 含量较高,达 6.91%,属于酸性矿粉,水分含量比较高,而 B 矿粉中的 TiO_2 、CaO 和 MgO 较高,分别为 2.17%、2.57%、3.41%,A 矿粉碱度较低,B 矿粉的碱度较高,因此可通过改变两种矿粉的配比来改变球团矿的碱度。

膨润土的化学成分和质量指标如表 2 所示。

表 1 矿粉的化学成分

Table 1 The chemical components mineral powders %							
矿粉名称	TFe	SiO_2	FeO	CaO	TiO_2	MgO	H_2O
A 矿粉	66.36	6.91	24.33	0.80	0.11	0.70	8.74
B 矿粉	64.30	1.08	25.9	2.57	2.17	3.41	4.68

表 2 膨润土的化学成分和质量指标

Table 2 The chemical components and quality indicators of the bentonite

吸蓝量/g	胶质价/%	膨胀容/%	吸水率/%	水分/%	SiO_2 /%	CaO/%	MgO/%	Al_2O_3 /%
18	435	21	374	9.11	51.21	7.12	1.89	12.99

1.2 粒度分布

如表 3 所示,A 矿粉的平均粒径较小,其粒度大

小主要集中在 30.78~140.10 μm ,而 B 精粉的粒径较大,达到了 148.7 μm ,主要集中在 63.71~383.9 μm 。

表 3 矿粉的粒度分布和平均粒径

Table 3 The particle size distribution and average particle size of mineral powders

矿粉名称	体积分布对应粒径/ μm					平均粒径/ μm
	<10%	<25%	<50%	<75%	<90%	
A 矿粉	13.25	30.78	72.72	140.10	243.30	120.10
B 矿粉	25.08	63.71	183.30	383.90	658.80	148.70

1.3 颗粒性质

如表 4 所示,两种矿粉的松密度和紧密度相差不大,即在单位体积两种矿粉的产量不相上下;B 矿粉的亲水性较好,达到了 0.926,而 A 矿粉亲水性稍差。

如表 5 所示,A 矿粉和 B 矿粉的最大毛细水含量相差不大,都达到了 12% 左右,A 矿粉的最大分子水含量比 B 矿粉高很多,达到了 26.14%,同时 A 矿粉的成球性指数较高,属于良好成球性矿粉。

1.4 烧结基础特性

如表 6 所示,B 矿粉同化温度较高,A 矿粉同化温度较低,主要与其矿粉中化学成分有关,A 矿粉中含有较高的 SiO_2 ,有利于与 CaO 反应生成低熔点化合物;A 矿粉液相流动指数较高,而 B 矿粉液相流动指数为 0,其矿粉中含有较高的 TiO_2 ,可能与 CaO 反应生成高熔点的钙钛矿,恶化了液相流动性;粘结相强度与铁矿粉的化学成分密切相关,A 矿粉的粘结

相强度较高,达到了 3 801 N; 在球团矿中主要依靠固相固结,连晶强度越高,球团矿的抗压强度越

高^④,A 矿粉的连晶强度较高,达到了 3 442.8 N,而 B 矿粉的连晶强度为 2 558.5 N。

表 4 矿粉的物理性能
Table 4 Physical performance of mineral powders

名称	m/g	V ₁ /mL	V ₂ /mL	松密度/(g·cm ⁻³)	紧密度/(g·cm ⁻³)	粉体表面亲水性(ATRHL)
B 矿粉	113.710	48	40	2.369	2.843	0.926
A 矿粉	118.750	50	44	2.380	2.700	0.848

表 5 矿粉的物理性能
Table 5 Physical performance of mineral powders

矿粉名称	最大毛细水/%	最大分子水/%	成球性指数
B 矿粉	12.71	2.73	0.27
A 矿粉	11.12	26.14	0.74

表 6 矿粉的烧结基础性能
Table 6 The basic sintering characteristics of mineral powders

矿粉名称	同化温度/℃	液相流动性指数	黏结相强度/N	连晶强度/N
A 矿粉	1 282	0.585 1	3 801	3 442.8
B 矿粉	1 355	0	241 0	2 558.5

1.5 外观形貌

A 矿粉和 B 矿粉的外观形貌如图 1 所示。A 矿粉颗粒表面比较光滑,棱角分明,同时表面还有少许细小颗粒,含有少量的片状、不规则颗粒; B 矿粉表面比较粗糙,大体呈现圆形,同时含有片状小块颗粒,棱角模糊。

2 试验方法

2.1 配料方案

为了考察碱度对球团矿冶金性能的影响,采用 A 矿粉和 B 矿粉通过配矿来调节球团矿的碱度,配矿方案如表 7 所示。

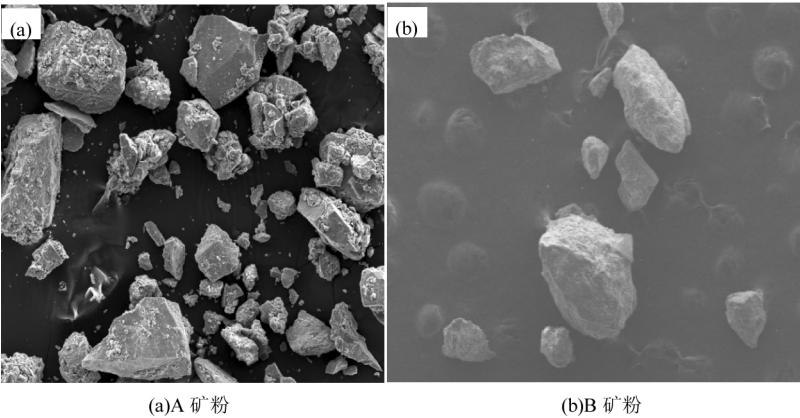


图 1 矿粉的颗粒形貌
Fig.1 Particle morphology of mineral powders

表 7 配矿方案
Table 7 The scheme of ore blending

编号	碱度	配比/%		
		A 矿粉	B 矿粉	膨润土
1 [#]	0.12	98.0		2.0
2 [#]	0.25	66.4	31.6	2.0
3 [#]	0.40	44.7	53.3	2.0
4 [#]	0.55	30.6	67.4	2.0
5 [#]	0.70	20.8	77.3	2.0
6 [#]	0.85	13.5	84.5	2.0

2.2 试验流程

混料和造球过程在直径为 1 000 mm 的圆盘造球机中进行,其圆边高度为 250 mm,圆盘倾斜角度为 45°,转速 20 r/min。混料时将称量好的矿粉、膨润土和水加入到圆盘中混匀,并放入到铁盆中在隔绝空气条件下焖料 30 min,使原料与水混匀效果更好,矿粉和水接触的更加紧密;以 A 矿粉和 B 矿粉为原料进行造球,每次试验称量矿粉总重 3 000 g,

造球过程选取最佳造球时间为 13 min,水分含量为 8.5%,膨润土最佳含量为 2%,造出球后进行人工筛分,以直径为 10~16 mm 生球作为合格生球,以 10~12.5 mm 生球作为试验用球,取出少量的试验用球用作水分、生球抗压强度、落下强度和热爆裂试验,其余球放入到烘箱中烘干,用于焙烧。生球的抗压强度检测采用弹簧压力计检测,一般采用 22 个试验用球,去掉最大值和最小值,算出二十个球抗压强度值的平均数就是该生球的抗压强度。

生球的落下强度在厚度为 10 mm 的钢板上进行,取 22 个试验用球在 0.5 m 的高度自由落下,记下球落下不破裂的次数,去掉最大值与最小值,算这 20 个球落下次数的平均数就是该球的落下强度。

生球的热爆裂温度测试在电阻丝加热炉中进行,采用动态介质法进行试验。将加热炉温度加热到设定温度后采用空压机通入流速为 1 m/s 的气体,保持炉温恒定,将 50 个试验用球放入到吊篮中,同时将吊篮放入到直径为 50 mm 的加热管中,5 min 后取出试验用球并观察生球的破裂情况,每隔 25 °C 放入一批球,直到 50 个球中有两个球破裂即该温度为生球的热爆裂温度。

生球的焙烧试验在硅钼棒电阻加热炉中进行,焙烧过程中从底部通入空气,即在氧化气氛中进行,当炉温升高到预热温度,将干燥的生球放入到炉中,保温一段时间升温到焙烧温度,保温 20 min 取出。空冷后的球团采用 GB/T14201—1993 标准检测其抗压强度。

焙烧试验方案如表 8 所示。

表 8 焙烧试验方案
Table 8 The scheme of roasting tests

编号	碱度	预热温度/°C	预热时间/min	焙烧温度/°C	焙烧时间/min
1 [#]	0.12	900	15	1 300	20
2 [#]	0.25	900	15	1 300	20
3 [#]	0.40	900	15	1 300	20
4 [#]	0.55	900	15	1 300	20
5 [#]	0.70	900	15	1 300	20
6 [#]	0.85	900	15	1 300	20

3 试验结果与分析

3.1 不同碱度对生球性能的影响

生球的质量和碱度关系不大,主要与矿粉的基础性能联系紧密。生球的落下强度、抗压强度和热爆裂温度随碱度变化如图 2、3 所示。

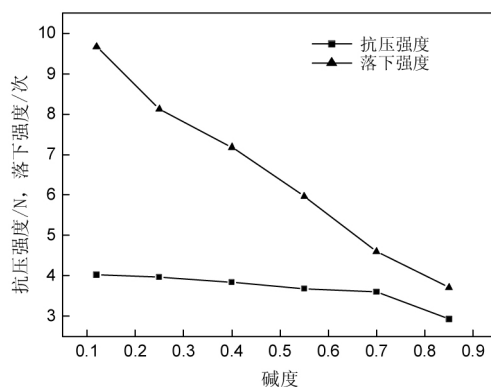


图 2 生球落下强度和抗压强度随碱度的变化

Fig.2 The change of green ball compression strength and incidence strength with the change of basicity

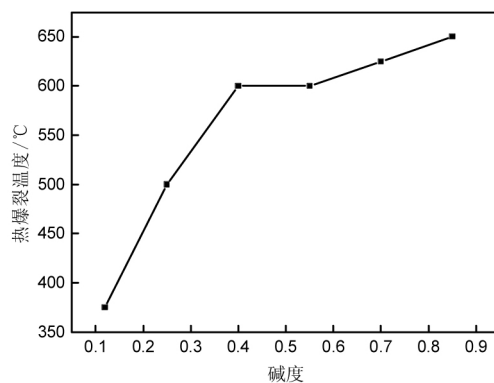


图 3 生球热爆裂温度随碱度的变化

Fig.3 The change of green ball thermal explosion temperature with the change of basicity

由图 2 可以看出,随着碱度的增大,生球的落下强度逐渐降低,特别是碱度 0.7~0.85 时,落下强度变化幅度较大;同时生球的抗压强度也逐渐降低。矿粉颗粒之间的毛细黏结力、分子黏结力和内摩擦力相互作用使生球具有了一定的强度^[4]。在碱度增大过程中,配料中 B 矿粉含量逐渐增加,而 B 矿粉粒度较大,比表面积小,分子黏结力和毛细黏结力较小,持水能力差,导致生球的机械强度降低。

由图 3 可以看出,随着碱度增大,生球的热爆裂温度逐渐增大,特别是碱度由即矿粉中加入的 B 越来越多,与 A 矿粉相比较,B 矿粉平均粒度较大,生球气孔较多,在高温状态下有利于水蒸气的及时排出,使生球的热爆裂温度较高,A 矿粉粒度较细,生球比较密实,气孔较少,A 矿粉含量较高的生球在高温状态下水蒸气散出不及时导致生球破裂。

3.2 不同碱度对成品球团矿抗压强度的影响

碱度对成品氧化球团矿抗压强度影响如图 4 所

示,随着碱度的提高,球团抗压强度逐渐降低。球团矿强度主要依靠固相固结,随着碱度逐渐增加,球团矿中 B 矿粉含量逐渐增加,B 矿粉连晶强度较差,导致球团矿的抗压强度降低。

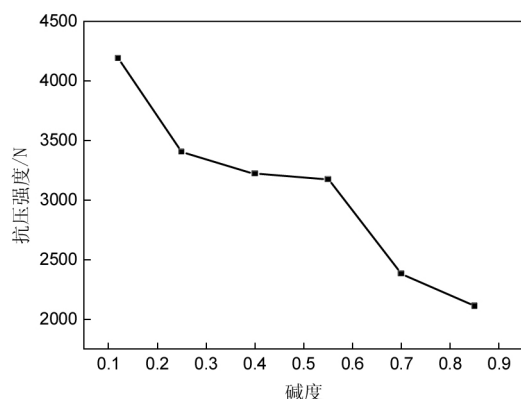
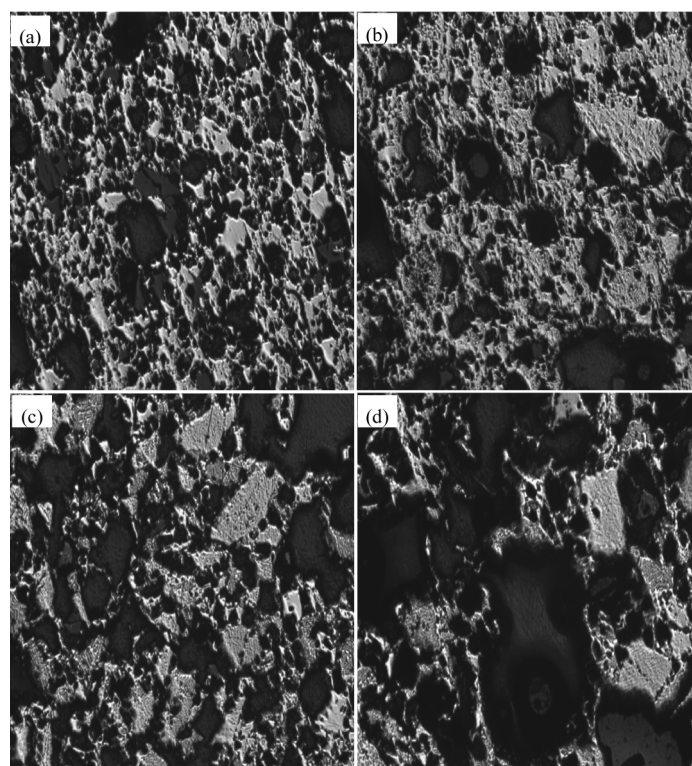


图 4 球团矿抗压强度随碱度的变化

Fig.4 The change of pellets compressive strength with the change of basicity

图 5 为不同碱度球团矿放大 50 倍的矿相微观形貌。

当碱度为 0.12 时,赤铁矿晶粒分布均匀,平均粒径较小,相互连接成网状结构,连接紧密,硅酸盐矿物数量少且孔径较小,硅酸盐矿物和赤铁矿晶粒之间的缝隙较窄,结构力比较强;当碱度为 0.50 时,赤铁矿晶粒逐渐长大,同时赤铁矿晶粒之间连接更加致密,硅酸盐矿物平均直径开始增大,且数量增多,硅酸盐矿物与赤铁矿晶粒间空隙开始增大;当碱度为 0.65 时,赤铁矿晶粒进一步长大呈现块状,周围被其他硅酸盐矿物包围,赤铁矿晶粒之间的连接性恶化,硅酸盐矿物增大;当碱度为 0.80 时,晶粒尺寸变大,但是晶粒之间连晶程度变差,晶粒之间被硅酸盐矿物和气孔分隔开,赤铁矿粒径大小分布不均,硅酸盐矿物相互聚集在一起形成较大的硅酸盐矿物,同时与赤铁矿晶粒间的空隙更加突出,气孔所占比例增大。



(a) $R=0.22$; (b) $R=0.50$; (c) $R=0.65$; (d) $R=0.80$
金黄色—赤铁矿晶粒 灰色—硅酸盐矿物 黑色—气孔

图 5 不同碱度的球团矿的显微结构

Fig.5 Microstructures of pellets with different basicity

根据以上分析可知,随着碱度的增大,球团中的 CaO 含量增多,导致球团矿在焙烧过程中生成了较

多液相,冷却结晶析出硅酸盐矿物,硅酸盐矿物的强度低于赤铁矿;赤铁矿晶粒被气孔和硅酸盐矿物分

隔开,降低了赤铁矿晶粒间的连接程度,削弱了球团矿固相固结的强度;球团在冷却凝固过程中由于液相和赤铁矿晶粒的收缩系数不同,产生的液相越多,硅酸盐矿物和赤铁矿晶粒间的空隙越大,同时球团中的气孔数量和孔径都逐渐增多;A矿粉的连晶强度高,B矿粉的连晶强度较低,而且A矿粉的粒径较小,矿粉粒间的接触点较多,有利于赤铁矿晶粒在再结晶过程中相互连晶,随着碱度的增加,A矿粉的配矿比例逐渐减小,B矿粉的配比增加,因此球团矿的强度随着碱度的增大而降低。

4 结论

1) 随着生球中碱度的提高,生球的落下强度、抗压强度逐渐下降,热爆裂温度逐渐升高,即在提高

碱度过程中,B矿粉配比逐渐加大,与A矿粉相比,B矿粉平均粒径较大,矿粉外形呈现椭圆状,比表面积大,使生球的落下强度和抗压强度变差,同时B矿粉平均粒度较大,生球空隙多,在干燥过程中有利于水分蒸发排出,因此热爆裂温度较高。

2) 球团矿抗压强度随着碱度的提高而降低的原因:球团矿固结主要依靠固相固结,A矿粉的连晶能力较强,B矿粉中 TiO_2 、 MgO 、 CaO 含量较高,连晶性较差。随着碱度提高,配料中B矿粉的配比增大,导致焙烧后球团矿中生成了低熔点的硅酸盐矿物,硅酸盐矿物含量升高并相互聚集在一起,阻碍了赤铁矿晶粒再结晶过程中的连晶,而硅酸盐矿物强度较低,降低了球团矿的抗压强度。

参考文献

- [1] Wang Yi. Research on simulation models and control guidance expert system of grate-kiln process for iron ore oxide pellet production [D]. Changsha: Central South University, 2012.
(王祎.铁矿氧化球团链篦机回转窑模拟模型和控制指导专家系统的研究 [D].长沙:中南大学,2012.)
- [2] Yang Xiaodong, Zhang Dingchen, Liu Kun, *et al.* Pellets instead of sintering—The important ways of saving energy and low carbon pollution before the iron [J]. Journal of Engineering Studies, 2017, 9(1): 44–52.
(杨晓东,张丁辰,刘锟,等.球团替代烧结——铁前节能低碳污染减排的重要途径 [J].工程研究——跨学科视野中的工程,2017,9(1): 44–52.)
- [3] Li Yingkui. Influence of roasting progress condition on pellet reducibility [J]. Hebei Metallurg, 2017(1): 11–14.
(李英魁.焙烧工艺对球团矿还原性能的影响 [J].河北冶金,2017(1): 11–14.)
- [4] Wu Zhijie. Study on iron material rationally and different basicity in pellets of Baotou steel [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.
(武志杰.包钢球团矿铁料的合理配置及变碱度的试验研究 [D].包头:内蒙古科技大学,2012.)
- [5] Jiang Dajun, Lin Qiang, He Muguang, *et al.* Experimentation on effects of pellet property in different basicity and ore matching structure [J]. Sichuan Metallurgy, 2009, 31(5): 7–12.
(蒋大军,林千谷,何木光,等.不同碱度与配矿结构对球团矿性能的影响 [J].四川冶金,2009,31(5): 7–12.)
- [6] Gao Donghui, Wang Yongbin, Luo Guoping, *et al.* Study of crystal stock resistance and comparison of sphericity between the self-produced and Barun ore concentrate powder [J]. Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010, 29(2): 99–102.
(高东辉,王永斌,罗果萍,等.包钢自产和巴润精矿粉的成球性对比和连晶性研究 [J].内蒙古科技大学学报,2010,29(2): 99–102.)
- [7] Long Yue, Xu Chenguang, Zhang Yanhui, *et al.* Effect of MgO content on the strength of high magnesium alkaline pellets [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2016, 37(4): 99–104.
(龙跃,徐晨光,张彦辉,等. MgO 对高镁碱性球团矿强度的影响 [J].钢铁钒钛,2016,37(4): 99–104.)

编辑 杨冬梅