内配碳双层球团抗压强度的影响因数分析

姚 娜[1]，兴 超[1]，胡启武[2]
(1. 济源职业技术学院，河南 济源 459000；2. 罗源闽光钢铁有限公司，福建 罗源 350600)

摘要： 为了使球团内层充分氧化和还原，提高球团矿的抗压强度，本文以磁铁矿和赤铁矿混合料为原料，对球团的内层进行配碳，然后进行造球、干燥、预热和焙烧，研究内径、碱度、赤铁矿和磁铁矿配比对球团矿抗压强度的影响。试验结果表明：随着内径的增加，球团矿的抗压强度先升高后降低，当内径为6～8 mm时，球团矿的平均抗压强度最大，为3 265 N/P；随着配比的增加，球团的抗压强度先升高后降低，当赤铁矿和磁铁矿配比为3∶7时，球团矿的抗压强度最大；随着碱度的增加，球团的抗压强度逐渐增加。当球团内径为6～8 mm，赤铁矿与磁铁矿的配比为3∶7以及碱度为1.0时，成品球团矿的抗压强度最高，为3 319 N/P。

关键词： 球团；内径；抗压强度；双层球团
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0089－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.090

Analysis on influencing factors of compressive strength of carbon-burdened double-layer pelleting

YAO Na[1], XING Chao[1], HU Qiwu[2]
(1. *Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan* 459000, *Henan, China*;
2. *Luoyuan Minguang Iron & Steel Co., Ltd., Luoyuan* 350600, *Fujian, China*)

Abstract: In order to fully oxidize and reduce the inner layer of pelleting and improve the compressive strength of pellets, the mixture of magnetite and hematite is used as raw materials to carbonate the inner layer of pelleting. And then the carbon is pelletized, dried, preheated and roasted to study the influence of the ratio of inner diameter, alkalinity, hematite and magnetite on the compressive strength of pelleting. The results show that the compressive strength of pellets increases and then decreases with the increase of inner diameter, and the average compressive strength of pellets is 3 265 N/P when the inner diameter is 6～8 mm; the compressive strength of pelleting increases and then decreases with the increase of proportion, and the compressive strength of pellets is maximum when the ratio of hematite and magnetite is 3∶7; the compressive strength of pellets gradually increases with the increase of alkalinity. The highest compressive strength of the finished pellets is 3 319 N/P when the inner diameter of pelleting is 6 to 8 mm, the ratio of hematite to magnetite is 3∶7 and the alkalinity is 1.0.

Key words: pelleting; inner diameter; compressive strength; double-layer pelleting

随着我国钢铁行业的快速发展，富矿日益稀少，贫矿日益增多，生产成本日益增加，寻找出一种新的球团工艺来改善球团的冶金性能并降低成本，已经成为球团行业研究者的当务之急。当前研究多以优化燃料和熔剂配比、碱度、球团的预热焙烧温度和时间等来改善球团矿冶金性能，从焙烧时间、碱度和MgO质量分数等来研究球团矿抗压强度的影响因数。如：杨福[1]研究表明，膨润土质量分数保持为2.0%时，含镁熔剂性球团矿的碱度为0.8～

收稿日期：2021－04－06；修回日期：2021－06－18
作者简介：姚 娜(1979—)，女，副教授，从事烧结球团原料性能方面的研究工作。
通讯作者：胡启武(1987—)，男，助理工程师，从事烧结生产工艺技术方面的工作。

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

1.0、MgO 质量分数为 1.6%~1.8%、焙烧时间为 25 min 时，球团矿的抗压强度大于 2 500 N/P；张林林等[2]研究表明，提高碱度能使适宜的膨润土配比略有下降，当碱度提高到 0.6 以上时，适宜的膨润土配比由 1.2% 下降到 1.1%，抗压强度变化不大，约为 14~15 N/P；信自成等[3]通过建立 MgO 质量分数、二元碱度、焙烧温度、焙烧时间与球团矿熟球抗压强度的多元线性回归模型，来改善镁质熔剂性球团的抗压强度；李杰等[4-5]研究了 SiO_2 质量分数、碱度对镁质熔剂性球团质量的影响。

本文通过对球团内层进行配碳来造双层球团矿，揭示内径(内核直径)大小、赤铁矿与磁铁矿的配比和碱度对球团性能的影响原因和规律，寻找最佳的造球工艺参数，并改善球团矿性能，用于指导实际生产。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料与配料方案

试验原料为巴西某公司生产的卡拉加斯粉(赤铁矿)、国内磁铁矿、膨润土、焦粉、石灰石粉，所有原料的 -0.074 mm 粒级占比为 90% 以上。试验原料的化学成分如表 1 所示。由表 1 可以看出：赤铁矿的全铁品位达到 66.77%，磁铁矿的全铁品位达到 64.30%；铁矿粉的脉石成分主要为 Al_2O_3、SiO_2，各种原料的 P、S 等有害元素质量分数较低。

将试验原料经高压辊磨预处理后，与 2% 膨润土、1% 焦粉按一定比例混合均匀。试验配料方案如表 2 所示。

表 1 试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw material %

原料名称	H_2O	TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	FeO	P	S
赤铁矿	2.67	66.77	2.06	0.88	1.020	1.27	0.33	0.03	0.36
磁铁矿	6.72	64.30	4.44	0.45	1.250	0.73	23.56	0.03	0.43
膨润土	7.08	—	55.25	2.35	16.140	4.22	—	—	—
石灰石	0.06	—	0.551	53.01	0.181	0.37	—	0.01	—
焦粉	1.34	—	6.46	1.03	4.430	0.21	—	—	—

表 2 试验配料方案

Table 2 Batching scheme of the experiment material

试验编号	配比(质量分数)/%		R	内径/mm	内外料比	赤铁矿和磁铁矿的配比
	赤铁矿	磁铁矿				
1#	47.25	47.25	0.5	6~8	3∶7	5∶5
2#	37.70	56.54	0.5	6~8	3∶7	4∶6
3#	28.19	65.78	0.5	6~8	3∶7	3∶7
4#	45.46	45.46	1.0	6~8	3∶7	5∶5
5#	36.20	54.29	1.0	6~8	3∶7	4∶6
6#	27.02	63.04	1.0	6~8	3∶7	3∶7
7#	45.46	45.46	1.0	8~10	37∶27	5∶5
8#	36.20	54.29	1.0	8~10	37∶27	4∶6
9#	27.02	63.04	1.0	8~10	37∶27	3∶7
10#	47.25	47.25	0.5	8~10	37∶27	5∶5
11#	37.70	56.54	0.5	8~10	37∶27	4∶6
12#	28.19	65.78	0.5	8~10	37∶27	3∶7
13#	47.25	47.25	0.5	4~6	1∶7	5∶5

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

(续表 2)

试验编号	配比(质量分数)/%		R	内径/mm	内外料比	赤铁矿和磁铁矿的配比
	赤铁矿	磁铁矿				
14#	37.70	56.54	0.5	4～6	1∶7	4∶6
15#	28.19	65.78	0.5	4～6	1∶7	3∶7
16#	45.46	45.46	1.0	4～6	1∶7	5∶5
17#	36.20	54.29	1.0	4～6	1∶7	4∶6
18#	27.02	63.04	1.0	4～6	1∶7	3∶7

1.2　试验方法

试验工艺流程包括原料准备、生球制备、生球干燥、焙烧等。生球的制备在圆盘造球机上进行，圆盘参数：直径为 1 000 mm，边高为 130 mm，转速为 20 r/min，倾角为 55°。造球过程分为如下 3 个阶段。

(1) 造球阶段：先造内核，按一定比例将原料配好后，逐渐加入适量的水，将水分控制为 8.0%～8.5%，筛分滚动的小球，选出不同内径的球团；然后造球团的外层，并控制生球的直径为 13～15 mm。

(2) 干燥、预热阶段：将人工筛分选出的合格生球，在 120 ℃温度下的鼓风干燥箱中干燥 2 h，然后放入 101-2 型电热鼓风干燥箱(120 ℃)内，稳定风速，干燥 2 h；将干燥好的球团放入管式电阻炉的入口处，让其由室温缓慢升至预热温度，然后在 900 ℃预热温度下预热 10 min。

(3) 焙烧阶段：在 1 200 ℃温度下焙烧 12 min，然后将冷却至室温的成品球团进行抗压强度测定和矿相测定。

2　结果与讨论

2.1　内径大小对成品球团抗压强度的影响

研究 1#～6#试验球团的预热焙烧时间和温度，得出最佳的焙烧温度为 1 200 ℃、焙烧时间为 12 min。在此温度和时间下对 7#～18#试验球团进行预热焙烧，每组试验取 10 个球团进行抗压强度检测，所得数据如图 1 所示。

由图 1 可知：当球团内径为 6～8 mm 时，焙烧球团的平均抗压强度最大，为 3 265 N/P。分析原因认为：内核中的焦粉，在不同内径大小球团中的分布不同，这导致经过预热和焙烧以后，内径为 4～6 mm 的球团中孔隙分布比较集中，这使得球团内核容易形成空洞，从而使得球团内层抵抗外来压力的能力减弱；内径为 8～10 mm 的球团中孔隙分布比较分散，使得整个球团中晶体连接变弱，从而使得球团的抗压强度下降。

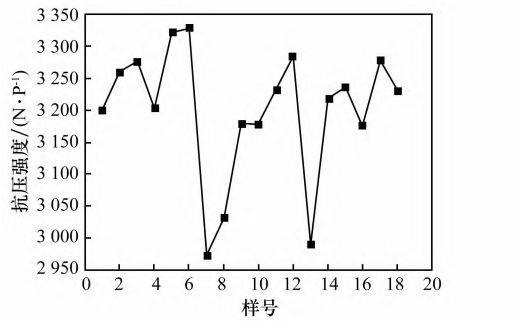
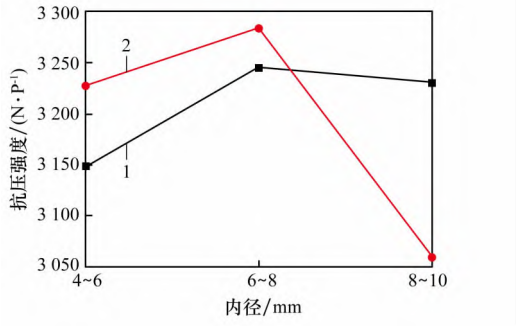


图 1　不同内径大小成品球团的抗压强度的变化

Fig. 1　Changes of compressive strength of finished pellets with different inner diameter

2.2　碱度对成品球团抗压强度的影响

不同碱度成品球团的抗压强度如图 2 所示。从图 2 可看出，不论碱度如何变化，随着内径的增加，球团的抗压强度都是呈现先增加后降



碱度：1—0.5；2—1.0。

图 2　不同碱度成品球团的抗压强度变化

Fig. 2　Changes of compressive strength of finished pellets with different alkalinity

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

低的趋势。在内径为4～8 mm时，1.0碱度球团的抗压强度大；在内径大于8 mm时，0.5碱度球团的抗压强度大；在内径为6～8 mm时，1.0碱度球团的抗压强度最大。

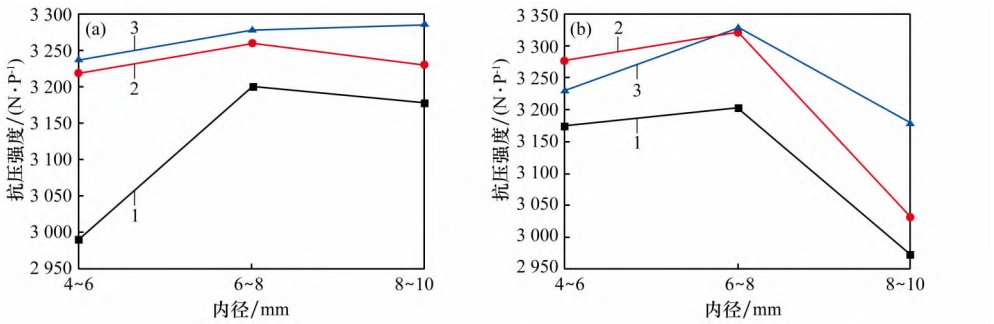
研究表明，不同碱度球团的孔隙密度不同[6]。当碱度为0.5时，球团孔隙密度约为9 500 P/mm^2，球团中的石灰石与赤铁矿、硅酸盐相互连接，气孔从球团中心扩散到表层；当碱度为1.0时，孔隙密度约为8 500 P/mm^2，石灰石与铁酸钙、赤铁矿、磁铁矿、硅酸盐相互连接，在微观组织中起到主导作用的是赤铁矿，在这些球团中，构成外层和表层的铁酸钙相中包含了磁铁矿相。

随着球团碱度的提高，气孔体积(110～140 μm)从11.6%增加到17.5%。碱度为1.0的球团含有圆孔，气孔的同化吸收现象不会发生。随着球团碱度的增加，液相生成量增加，适量的液相量有利于Fe^{3+}的迁移和Fe_2O_3的微晶长大，形成联结桥，焙烧球团的抗压强度增大。但随着碱度进一步增加，球团矿中CaO的质量分数增加，使铁矿颗粒分散，接触条件变差，氧化减弱，形成的液相量增加，阻碍了固相颗粒的直接接触，不利于赤铁矿的再结晶长大；并且液相沿晶界渗透，使已聚集成的晶体固结粉碎化，成圆形大气孔，从而削弱了以氧化固结为主的作用，使抗压强度降低。

2.3 赤铁矿与磁铁矿配比对成品球团抗压强度的影响

当碱度为0.5、1.0时，不同赤铁矿与磁铁矿配比成品球团的抗压强度如图3所示。由图3可看出，随着磁铁矿质量分数的提高，当内径为6～8 mm时，球团抗压强度最大。这是因为随着磁铁矿配比的提高，在球团的焙烧过程中会有更多的磁铁矿转化为原生赤铁矿(Original Hematite，OH)，如式(1)所示，因此会有更多的SH粒子之间的微晶连接形成，从而提高了球团的强度。来自磁铁矿氧化形成的二次赤铁矿(Secondary Hematite，SH)和OH粒子中的Fe_2O_3显示出不同的活跃性，这导致在不同的焙烧温度时，赤铁矿和磁铁矿混料球团会有不同的固结机理。当焙烧温度达到1 200 ℃时，SH粒子中的Fe_2O_3结晶得到很好的发展，粒子之间的连接变得更强。赤铁矿和磁铁矿混料球团中的Fe_2O_3在预热和焙烧阶段中的结晶表现不同，SH颗粒中的Fe_2O_3比OH颗粒中的Fe_2O_3更加活跃，SH颗粒中Fe_2O_3的再结晶结合在预热和焙烧阶段得到加强，因此，赤铁矿和磁铁矿混料球团中的SH能够提高球团的强度和降低焙烧温度，增加一定配比的磁铁矿能有效改善赤铁矿球团的焙烧表现。

$$4Fe_3O_4 + O_2 \rightarrow 6Fe_2O_3 \quad (1)$$



碱度：(a) 0.5；(b) 1.0

赤铁矿和磁铁矿的配比：1—5∶5；2—4∶6；3—3∶7。

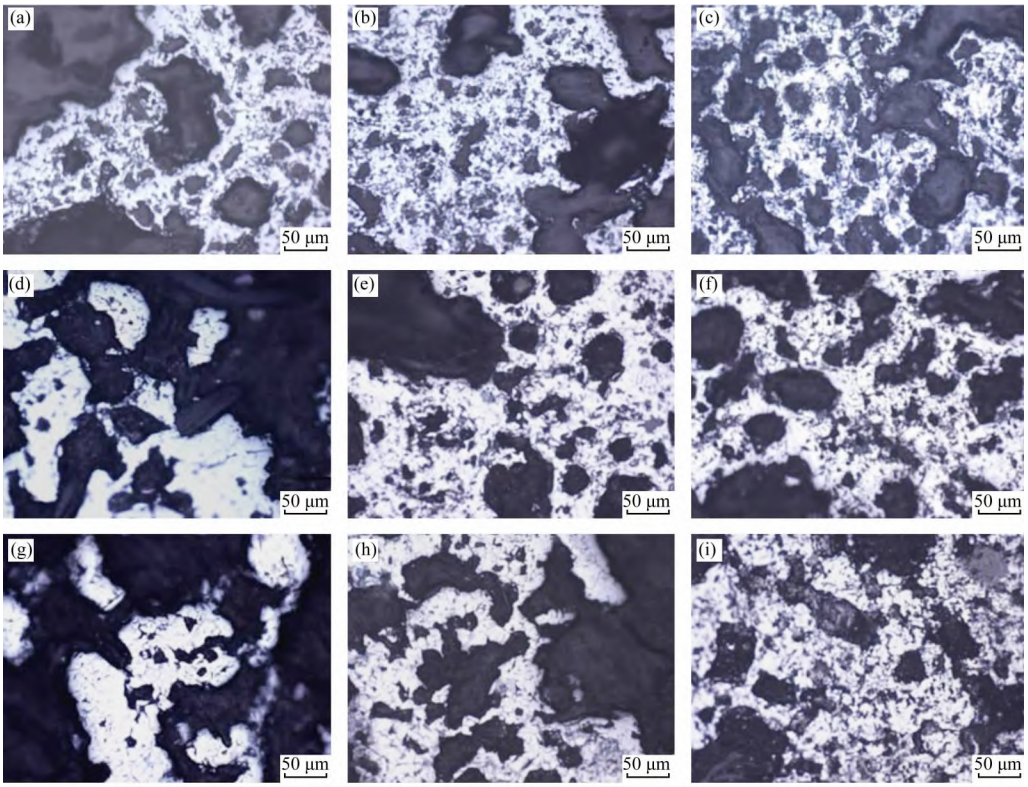
图3 不同赤铁矿与磁铁矿配比下成品球团的抗压强度变化

Fig. 3 Changes of compressive strength of finished pellets with different ratio of hematite and magnetite

2.4 不同内径球团的矿相分析

不同内径球团矿的显微结构如图4所示。由图4可看出：空隙随着球团内径的增大而变小。孔隙的形成原因：焦粉是一种含碳燃料，其在球团的预热焙烧过程中会因为高温和氧化而被燃烧消耗，所以在球团中形成了孔隙(部分

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



内径/mm:(a) 4～6(核心);(b) 4～6(中层);(c) 4～6(外层);(d) 6～8(核心);(e) 6～8(中层);(f) 6～8(外层);(g) 8～10(核心);(h) 8～10(中层);(i) 8～10(外层)

黑色—孔隙;白色—赤铁矿与磁铁矿以及 $CaCO_3$、CaO、硅酸盐和其他物质结晶混合物。

图 4　不同内径球团的显微矿相分析(200 倍)

Fig. 4　Microscopic mineralogical analysis of pellets with different inner diameters(200 times)

石灰石受热分解也会产生孔隙)。虽然球团中的焦粉质量分数相同，但是其分布不同，4～6 mm 球团分布相对集中，6～8 mm 球团分布相对适当，而 8～10 mm 球团分布相对分散。

同时，孔隙的大小分布对球团的抗压强度也有影响，当孔隙分布较多且孔隙较大时，球团的抗压强度会下降；而孔隙分布较少且孔隙较小时，球团的抗压强度会上升。在内径为 4～6 mm 球团的矿相中，空隙分布较多，尤其是在中层[图 4(b)]空隙较大，部分磁铁矿与氧气发生反应转变为赤铁矿与磁铁矿的结晶连接不是很顺畅。内径为 6～8 mm 球团中的空隙整体分布比较均匀，大小适当，赤铁矿与磁铁矿的结晶连接比较顺畅，虽然核心部分[图 4(d)]的孔隙较大，且赤铁矿与磁铁矿的结晶连接不是很顺畅，但由于其位于核心，其对球团的冶金性能影响不大。所以整体而言，内径为 6～8 mm 的球团矿相结构较好。内径为 8～10 mm 球团矿相中孔隙分布较多，且孔隙较大。从核心部分[图 4(g)]以及中层[图 4(h)]均可看出，赤铁矿与磁铁矿的结晶连接不是很顺畅，故内径为 6～8 mm 球团的抗压强度最大。

磁铁矿的氧化转变是赤铁矿预热阶段中的重要反应，氧气由多气孔的球团表面扩散至内部，与磁铁矿微粒发生反应。随着温度的升高，氧化逐渐向球团的中心进行，这显示着球团矿中的赤铁矿有两个来源：OH、SH。OH 和 SH 颗粒的颜色和形状有明显的差异，OH 颗粒的颜色白而亮，其形状像原始的晶体一样有清晰的棱角，带状、三角形和矩形的颗粒能被清楚地观察到，其晶体表面光滑，其紧凑的内部结构不变。两个邻近的 OH 粒子之间的距离较大，它们之间没有结合形成一体的迹象。与 OH 颗粒比较起来，SH 粒子的棱角在氧化期间消失或

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

者变得不清晰，它们转变成为大量带状、柱状的有形粒子。在预热阶段，SH 粒子中的 Fe_2O_3 微晶连接形成明显区别于 OH 中的 Fe_2O_3 微晶连接。SH 粒子中的 Fe_2O_3 比 OH 粒子中的 Fe_2O_3 更加活泼。当球团预热时，SH 粒子中的 Fe_2O_3 微晶连接形成，这有利于增加球团的强度。而 SH 粒子则保持它们的原状，在预热阶段没有 Fe_2O_3 微晶连接形成。随着碱度的增大，焙烧球中铁酸钙质量分数逐渐增加，可加快微晶的长大速度，绝大部分的 Fe_3O_4 就会被氧化成 Fe_2O_3，这个反应是放热反应，可以提高球团内部的温度，使得氧化生成的 Fe_2O_3 微晶的活性更高，并发生结晶长大，从而成为互相紧密连接成一片的赤铁矿晶体，球团的强度大大提高，所以碱度为 1.0 时球团矿的强度最好。

3 结 论

(1) 随着内径的增加，球团的抗压强度先升高后降低，当球团内径为 6 ~ 8 mm 时，球团矿的平均抗压强度最大，为 3 265 N/P，其主要原因是球团中空隙的整体分布比较均匀，大小适当，赤铁矿与磁铁矿的结晶连接比较顺畅。

(2) 随着赤铁矿和磁铁矿配比的增加，球团的抗压强度先升高后降低。当赤铁矿和磁铁矿的配比为 3∶7时，球团矿的抗压强度最大，其主要原因：随着磁铁矿配比的提高，在球团的焙烧过程中会有更多的磁铁矿转化为原生赤铁矿(SH)，因此会有更多的 SH 粒子之间的微晶连接形成，从而提高了球团的强度。

(3) 随着碱度的增加，球团的抗压强度逐渐增加，主要原因：随着球团碱度的增加，液相生成量增加，适量的液相量有利于 Fe^{3+} 的迁移和 Fe_2O_3 的微晶长大，形成联结桥，使焙烧球团矿抗压强度增大。

(4) 抗压强度最佳的样号为 6#，当球团内径为 6 ~ 8 mm，赤铁矿与磁铁矿的配比为3∶7以及碱度为 1.0，成品球团的抗压强度为3 319 N/P。

参考文献:

[1] 杨福. 碱度和 MgO 质量分数对球团抗压强度的影响[J]. 中国冶金,2020,30(6):19 - 23.
YANG Fu. Effect of basicity and MgO mass fraction on compressive strength of pellets [J]. China Metallurgy, 2020, 30(6):19 - 23.

[2] 张林林,付刚华,郭宇峰,等. 碱度对熔剂性球团生球性能的影响[J]. 钢铁,2019,54(5):14 - 18.
ZHANG Linlin,FU Ganghua,GUO Yufeng,et al. Effect of basicity on quality of green fluxed pellets [J]. Iron and Steel, 2019,54(5):14 - 18.

[3] 信自成,李杰,韩闯闯,等. 镁质熔剂性球团抗压强度研究[J]. 烧结球团,2018,43(5):56 - 60.
XIN Zicheng,Li Jie,HAN Chuangchuang,et al. Study on compressive strength of magnesium flux pellets [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(5):56 - 60.

[4] 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. Influence of SiO_2 content on the quality of magnesium fluxed pellets [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(4):23 - 27.

[5] 李杰,信自成,杨爱民,等. 碱度对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 钢铁,2017,52(7):35 - 41.
LI Jie,XIN Zicheng,YANG Aimin et al. Effect of basicity on quality of magnesium fluxed pellets [J]. Iron and Steel,2017, 52(7):35 - 41.

[6] 侯向东. 烧结球团生产操作与控制[M]. 北京: 冶金工业出版社,2016.
HOU Xiangdong. Sintering pellet production operation and control [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2016.

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