冶金工程

不同含量 SiO_2 对邯郸球团质量的影响

孙健宁[1]，刘小杰[1]，严照照[1]，卢建光[2]，吕庆[1]

（1. 华北理工大学冶金与能源学院，华北理工大学现代冶金技术重点实验室，河北 唐山 063009；2. 河钢集团邯郸公司，河北 邯郸 056009）

摘要：通过邯钢现有生产所用的四种矿粉，配矿得到不同 SiO_2 含量的球团矿，运用一系列的实验方案和检测手段找出邯钢球团矿最优的抗压强度和冶金性能时 SiO_2 含量，并探究了不同 SiO_2 含量对邯钢球团矿的抗压强度和冶金性能的影响规律。实验结果表明，SiO_2 含量在 3% 时所生产的球团矿抗压强度最强，随着 SiO_2 含量的增加球团矿的抗压强度下降，但实验所得到的球团矿均在 2000 N 以上；SiO_2 含量在 3% 时，还原度最高，达到了 83%，随着 SiO_2 含量的增加球团矿的还原度下降；SiO_2 含量在 3% 时，低温还原粉化率最大，随着 SiO_2 含量的增加球团矿的低温还原粉化率趋于下降，但下降幅度不是太大；SiO_2 含量在 3% 时，软化温度最高，熔滴温度区间最窄，熔滴性最好，随着 SiO_2 含量的增加球团矿的软化温度下降，熔滴温度区间变宽，熔滴性能变差。

关键词：球团矿；抗压强度；冶金性能；FactSage 模拟

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.01.020

中图分类号：TD989 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-6532（2021）01-0118-06

生产高品位的球团矿不仅能使生铁成本得到更好的控制，同时也对生态环境产生了积极的影响。我国大部分钢铁企业所生产的球团矿 SiO_2 含量都较高，过高 SiO_2 含量会严重影响高炉的顺行[1]。适宜的 SiO_2 含量能极大的提高球团矿的冶金性能，而良好的冶金性能也是评价球团矿质量的重要指标。青格勒等人对低硅含镁球团矿抗压强度及冶金性能的研究表明：SiO_2 含量低于 2% 时会使球团矿的还原膨胀率急剧增加，从而严重破坏球团矿的冶金性能[2]。李杰等对 SiO_2 对镁质酸性球团性能的影响研究表明：随着 SiO_2 质量分数升高，低温还原粉化率上升，还原性和还原膨胀率呈直线下降趋势[3]。Bahgat 等对含 SiO_2 的浮氏体小饼研究表明：随着 SiO_2 含量的上升，在金属铁表面会产生絮状结构阻碍了通过空隙的还原气体，使其还原程度下降[4]。王晓哲等人对低硅含镁球团矿还原行为研究表明：过高的 SiO_2 质量分数会使球团矿的空隙分不均匀从而使球团矿内外部还原不完全[5]。宋健丽等人对降低酸性球团 SiO_2 含量的措施及效果研究表明：球团矿中 SiO_2 质量分数的增加会提高石灰石的用量且产生的渣量也明显增多，同时焦比上升[6]。崔智鑫等对巴西卡拉加斯赤铁矿球团还原膨胀性能研究表明，SiO_2 质量分数的上升明显使球团矿的还原膨胀率下降[7]。王兆才等对还原气氛和脉石成分对氧化球团还原膨胀的影响研究表明：适当的 SiO_2 含量有助于降低还原膨胀率[8]。适宜的 SiO_2 含量不仅提高球团矿的抗压强度这一重要指标，还能对于企业的一系列经济指标起到良好的控制作用，同时对环境的保护和清洁也有积极的影响[9]。本试验是通过对

收稿日期：2019-07-29；**改回日期**：2019-09-12

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（52004096）；唐山市科技计划项目（19150241E）

作者简介：孙健宁（1993-），男，硕士研究生，主要研究方向为炼铁新工艺。

通讯作者：刘小杰（1985-），男，博士，副教授，电话：15133960257，邮箱：xiaojie19851003@163.com

万方数据

不同矿粉的配比调节球团矿不同 SiO_2 含量，研究其抗压强度、还原性、低温还原粉化率等冶金性能，从而进一步为邯钢企业的实际生产提供参考依据。

1　原料及方法

1.1　原料及化学成份

采用四种邯钢现场生产使用的高品位铁精粉为原料，铁品位均达到 60% 左右，粘结剂为邯钢现场生产使用的膨润土，四种矿粉和膨润土成份见表 1。

1.2　配矿方案

表 1　矿粉的主要化学成分 /%

Table 1 Main chemical composition of mineral power

TFe	SiO_2	CaO	MgO	S	Al_2O_3	烧损
65.36	3.65	1.34	2.15	0.233	0.61	1.59
63.43	4.01	4.08	2.15	0.19	0.78	2.75
66.2	6.94	0.32	0.48	0.043	0.5	1.35
64.30	1.08	2.57	3.41	-	-	1.57
-	56.23	4.59	2.56	-	12.12	-

根据邯钢实际生产所使用的四种铁精粉来控制球团矿的 SiO_2 含量变化，此次试验采用 2% 配比的膨润土。五组不同 SiO_2 含量的球团矿具体配比见表 2。

1.3　试验方法

表 2　配矿试验方案 /%

Table 2　Ore matching test plan

SiO_2 含量 /%	D 矿粉	A 精粉	C 精粉	B 精粉	膨润土
3.0	61.6	36.4	-	-	2.0
4.0	22.7	75.3	-	-	2.0
5.0	-	85.3	12.7	-	2.0
6.0	-	-	36.3	61.7	2.0
7.0	-	-	98.0	-	2.0

根据表 2 方案，在直径为 1000 mm 的圆盘造球机上制造生球，然后将制备好的生球在 10 ~ 12.5 mm 的筛子上进行筛分，其中生球水分为 8%。选取粒度为 10 ~ 12.5 mm 的五组生球在温度为 950℃和 1250℃的高温炉中进行预热和焙烧，其中预热时间为 15 min，焙烧时间为 20 min。将焙烧好的五组球团矿根据 GB/T 14201-93 进行抗压强度测试；根据国标 GB13241-91 进行球团矿的还原性测定；根据国际标准 ISO4696 进行球团矿的低温还原粉化性；以及根据 GB/T 34211-2017 进行球团矿的熔滴性的实验。

2　结果与分析

2.1　不同含量的 SiO_2 对球团矿抗压强度的影响

从图 1 可以看出随着 SiO_2 含量的增加，球

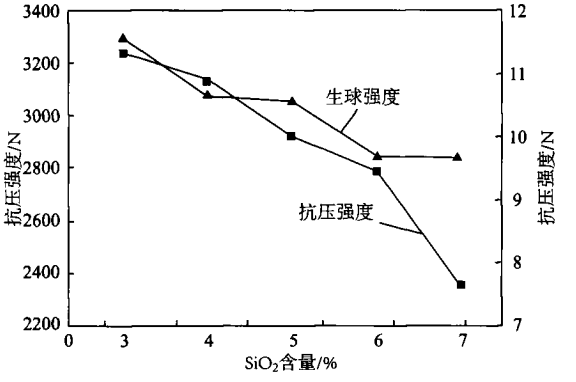

图 1　不同 SiO_2 含量球团矿的抗压强度

Fig. 1　Compressive strength of different content of SiO_2 pellets

团矿的抗压强度和生球的抗压强度都是逐渐降低的。SiO_2 含量为 3% 时球团矿的抗压强度最高，同时生球的抗压强度也是最大的，当 SiO_2 含量为 7% 时球团矿的抗压强度和生球的抗压强度最差，球团矿的抗压强度降低了 27.6%，生球强度降低了 16.3%，但五组球团矿的抗压强度均在 2000 N 以上。

根据球团矿的矿相图分析可知，随着 SiO_2 含量的增加赤铁矿晶粒尺寸越来越小，且赤铁矿晶粒周围的钙铁橄榄石越来越多，阻碍了赤铁矿晶粒连晶发育，同时赤铁矿晶粒结晶与再结晶所形成的网状结构越来越复杂。当 SiO_2 含量的为 3% 时，网状结构联结密集同时赤铁矿晶粒发育很好且尺寸很大，少部分的钙铁橄榄石渣相出现在赤铁矿晶粒周围，造成球团矿此时强度最强的原因：首先由于钙铁橄榄石阻碍了赤铁矿的发育与再结晶，而 SiO_2 含量为 3% 时钙铁橄榄石产生较少，球团矿强度很强，其次由于少量的钙铁橄榄石所形成的液相量较少，而少量的液相量起到粘结作用，

万方数据

有利于提高球团矿的抗压强度。

从图 2 的 Fctsage 模拟球团矿液相量的图中

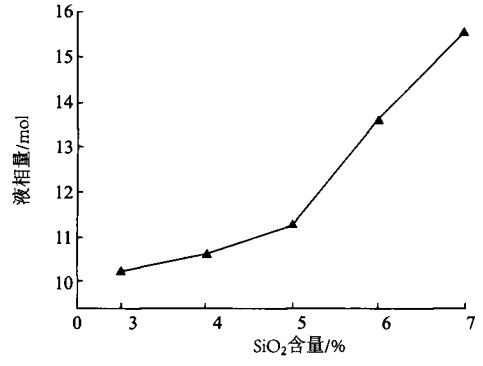

图 2　FactSage 模拟球团矿液相量结果

Fig. 2　Liquid phase results of FactSage simulated pellets

可以得到 SiO_2 含量为 3% 时液相量较少，所以当 SiO_2 含量为 3% 时球团矿的强度最强。当 SiO_2 含量为 7% 时，从图中看到赤铁矿晶粒的粒径较小且周围的钙铁橄榄石也较多，过多的钙铁橄榄石严重阻碍了赤铁矿的结晶与再结晶，所以组织形成的网状结构也比 SiO_2 含量为 3% 时形成的网状结构更复杂，同时看出液相量明显增加，过多的钙铁橄榄石的的出现会使球团矿中的液相量明显增加，但过多的液相量严重影响了球团矿的抗压强度，同时球团矿中出现了气孔和石英，这也影响了球团矿的抗压强度，所以当 SiO_2 含量为 7% 时球团矿的强度最差。

2.2　不同含量的 SiO_2 的球团矿还原性能分析

从图 3 可以明显看出，随着 SiO_2 含量的增加，

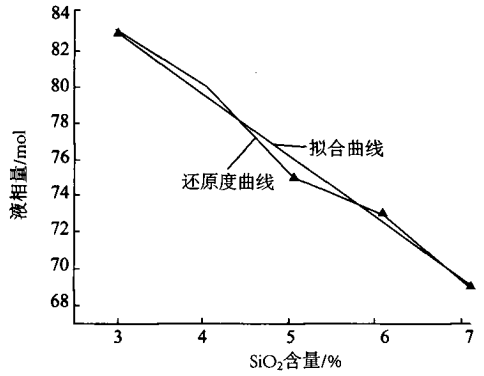

图 3　不同 SiO_2 含量球团矿还原度曲线

Fig. 3 Pellet reduction degree curve of different content of SiO_2

球团矿的还原度逐渐下降。SiO_2 含量为 3% 时球团矿的还原度最高，达到了 83%；SiO_2 含量增加到 5% 时，还原度下降了 9.64%；当 SiO_2 含量从 5% 增加到 7% 时，还原度下降了 8%；同时 SiO_2 含量从 3% 增加到 7% 时，还原度下降了大约 16.87%。可以得到随着 SiO_2 含量的增加球团矿的还原度下降幅度很明显，这是由于随着 SiO_2 含量的增加，球团矿中钙铁橄榄石也随之增加。根据不同 SiO_2 含量球团矿 EDS 图可以清楚看到赤铁矿晶粒周围的难被还原的钙铁橄榄石逐渐增多，同时 SiO_2 含量为 3% 时，从之前矿相图可以得到球团矿的赤铁矿晶粒尺寸较大且赤铁矿晶粒连晶所形成的网状结构很密集，所以导致球团矿在 SiO_2 含量为 3% 时还原度最高，在 SiO_2 含量为 7% 还原度很低。

2.3 不同含量的 SiO_2 的球团矿低温还原粉化性

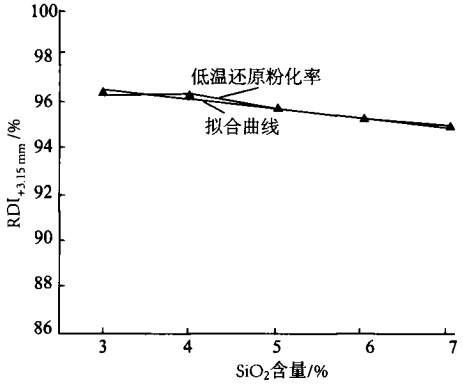

图 4　不同 SiO_2 含量球团矿低温还原粉化率

Fig .4　Low-temperature reduction pulverization rate of pellets with different content of SiO_2

从图 4 可以得到，球团矿的低温还原粉化率逐渐下降但总体下降幅度较小，SiO_2 含量从 3% 增加到 7% 时，低温还原粉化率下降 1.51%，SiO_2 含量从 3% 增加到 5% 时，低温还原粉化率基本保持不变。造成粉化率稍有降低的一部分原因是由于 SiO_2 含量的增加，球团矿中的钙铁橄榄石形成的液相量明显增多，在低温还原过程中过多的液相量会影响到赤铁矿晶粒的发育，同时发育不完整的赤铁矿会被其他低熔点的物相所补充（β-C_2S 相转变成 γ-C_2S 时体积发生膨胀），这样会产生过大

万方数据

的应力，而过大的应力在一起累加使得低温还原粉化率降低[11]，所以当球团矿中的 SiO_2 的含量增加到 7% 时低温还原粉化率最低。

2.4 不同含量的 SiO_2 的球团矿熔滴性

从表 3 中可以看到，随着 SiO_2 含量的增加球团矿的 T 10 逐渐降低，SiO_2 含量为 3% 时 T10 温度最高，软化性能最好，达到了 1217℃，SiO_2 含量为 7% 时 T 10 温度最低，达到 1170℃，相比 SiO_2 含量为 3% 时下降了 3.86%，软化性能最差，但五组球团矿的 T10 温度都达到了 1120℃以上；随着 SiO_2 含量的增加球团矿的 T40 也仍然降低但基本都维持在 1320 ~ 1305℃之间，从图 5 明显看到球团矿的软化温度区间变宽，区间值在 103 ~ 135℃之间。随着 SiO_2 含量的增加球团矿的 Ts 和 Td 逐渐升高，SiO_2 含量为 3% 时 Ts 和 Td 最低，达到 1379℃和 1396℃，SiO_2 含量为 7% 时 Ts 和 Td 最高，达到 1417℃和 1447℃，相比 SiO_2 含量为 3% 时升高了 2.76% 和 3.65%。

表 3　不同 SiO_2 含量球团矿熔滴性结果

Table 3　Dropping results of pellets of different content of SiO_2

样品名称	T10%/℃	T40%/℃	ΔT1/℃	Ts/℃	Td/℃	ΔPm/kPa	ΔT2/℃	ΔH/mm	S/（kPa·℃）
SiO_2=3%	1217	1320	103	1339	1383	3.540	44	12	60
SiO_2=4%	1209	1316	107	1342	1387	3.613	45	14	87
SiO_2=5%	1195	1311	116	1347	1396	3.701	49	17	93
SiO_2=6%	1183	1309	126	1350	1405	3.806	55	18	99

从图 5 得到球团矿的熔滴温度区间的宽度（17 ~ 30℃）和 ΔPm 逐渐增加。SiO_2 含量为 3% 时球团矿的熔滴区间宽度最窄（区间为 17℃）、ΔPm 最小，此时球团矿的熔滴性能最好，当 SiO_2 含量为 7% 时球团矿的熔滴区间宽度最宽（区间为 30℃）、ΔPm 最大，球团矿的熔滴性能最差；随着 SiO_2 含量的增加球团矿的熔滴性能总特征值 S 逐渐增加，SiO_2 含量为 3% 时球团矿的 S 值最低，达到 60，而 SiO_2 含量为 7% 时球团矿的 S 值最大，达到 121，增加了 50.42%，从熔滴性能总特征值来分析 SiO_2 含量为 3% 时球团矿的熔滴性能最好也越有利于高炉的透气性。造成软化开始温度降低的原因一方面是由于随着 SiO_2 含量的增加，球团矿的钙铁橄榄石的增多，而钙铁橄榄石的熔点相对较低，这样球团矿的软化开始温度变低[12]；另一方面随着 SiO_2 含量的增加，球团矿的还原度逐渐下降，这使得球团矿的孔隙结构变得较差，而孔隙结构也影响着软化开始温度。造成 ΔPm 逐渐增加的原因是由于熔滴带厚度从 12 mm 增加到 21 mm 使得气体受阻造成料上下压差变大[13]。

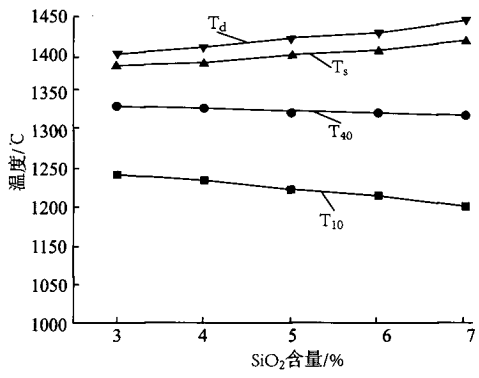

图 5　不同 SiO_2 含量球团矿冶金性能对比

Fig. 5　Comparison of metallurgical properties of pellets with different contents of SiO_2

3　结　论

（1）随着 SiO_2 含量的增加，球团矿的抗压强度和生球的抗压强度逐渐降低，SiO_2 含量为 3% 时生球的抗压强度和球团矿的抗压强度最强，分别达到了 11.6 N 和 3255 N。通过矿相分析主要是由于钙铁橄榄石的增加阻碍了赤铁矿晶粒的发育与连晶，从而使得球团矿的抗压强度下降，同时通过 Fctsage 模拟液相量发现：随着 SiO_2 含量的增

万方数据

加，液相量上升。而过量的液相也影响了球团矿的抗压强度。

（2）随着 SiO_2 含量的增加，球团矿的还原度逐渐下降，SiO_2 含量为 3% 时还原度最高，达到了 83%。通过 EDS 分析，造成还原度下降的主要原因是由于 SiO_2 含量的增加使得球团矿内难被还原的钙铁橄榄石增加，所以球团矿的还原度下降。

（3）随着 SiO_2 含量的增加，球团矿的低温还原粉化率下降，但总体下降趋势不是太大。

（4）随着 SiO_2 含量的增加，球团矿的软化开始温度降低，其原因一方面是低熔点的钙铁橄榄石增多，另一方面由于球团矿的还原度下降使得球团矿的孔隙结构变差。同时随着 SiO_2 含量的增加软化温度区间、熔滴温度区间变宽，使得球团矿的软化性能、熔滴性能变差，熔滴性能总特征值 S 降低。

参考文献：

[1] 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.

XU M X, ZHANG Y L. Current situation and development trend of pellets production technology in China in the new century [J]. Sintering pellets,2017,42(2):25.

[2] 青格勒，王朝东，侯恩俭，等．低硅含镁球团矿抗压强度及冶金性能 [J]. 钢铁研究学报 ,2014,26(4):7.

QING G L, WANG Z D, HOU E J, et al. Compressive strength and metallurgical properties of low silicon magnesium pellets [J]. Journal of I ron and Steel Research,2014,26(4):7.

[3] 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.

LI J, HAN C C, YANG A M, et al. Effect of SiO_2 on the properties of magnesium acid pellets [J]. Journal of Steel and Iron Research,2017,29(11):872.

[4]Bahgat M, Abdel Halim K S, Nasr M I, et al. Morphological changes accompanying gaseous reduction of SiO_2 doped wüstite compacts[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2008, 35(3):205.

[5] 王晓哲，张建良，刘征建，等．低硅含镁球团矿还原行为研究 [J]. 烧结球团 ,2018,43(1):44.

WANG X Z, ZHANG J L, LIU Z J, et al. Research on reduction behavior of low Silicon magnesium-containing pellets [J]. Sintering Pellets, 2008,43(1):44.

[6] 宋建丽．降低酸性球团 SiO_2 含量的措施及效果 [J]. 矿业工程 ,2009,7(4):46.

SONG J L. Measures and effects of reducing SiO_2 content in acid pellets [J]. Mining Engineering,2009,7(4):46.

[7] 崔智鑫，范晓慧，姜涛，等．巴西卡拉加斯赤铁矿球团还原膨胀性能研究 [J]. 矿冶工程 ,2004(3):53.

CUI Z X, FAN X H, JIANG T, et al. Reduction expansion performance of Hematite pellets in Caracas, Brazil [J]. Mining and Metallurgical Engineering,2004(3):53.

[8] 王兆才，储满生，唐珏，等．还原气氛和脉石成分对氧化球团还原膨胀的影响 [J]. 东北大学学报 :(自然科学版),2012,33(1):94.

WANG Z C, CHU M S, TANG J, et al. Effects of reducing atmosphere and gangue composition on the reduction expansion of oxidized pellets [J]. Journal of Northeastern University (natural science edition),2012,33(1):94.

[9] 王能高，尹礼辉，汪锐，等．我国烧结球团的现状和发展趋势 [J]. 中国设备工程 ,2018(5):207.

WANG N G, YIN L H, WANG R, et al. Current situation and development Trend of sintered pellets in China [J]. China Equipment Engineering,2018(5):207.

[10] 张景智．控制高硅型烧结矿粉化的研究 [J]. 烧结球团 ,1986(6):34.

ZHANG J Z. Study on the control of high silicon sinter pulverization [J]. Sinter Pellet,1986(6):34.

[11] 张开发，吴胜利，刘新亮，等 .MgO 含量合理配置对综合炉料熔滴特征及形成初渣特性的影响 [J]. 科学技术与工程 ,2015,15(15):17.

ZHANG K F, WU S L, LIU X L, et al. Influence of reasonable MgO content allocation on droplet characteristics and primary slag formation characteristics of integrated charge [J]. Science, Technology and Engineering,2015,15(15):17.

[12] 史远，薛庆国，佘雪峰，等．添加金属化球团的炉料熔滴性能试验研究 [C]. 第九届冶金工程科学论坛论文集．北京科技大学 ,2010:19-22.

SHI Y, XUE Q G, SHE X G, et al. Experimental study on the performance of furnace charge droplet with metallized pellets [C]. Proceedings of the 9th Metallurgical Engineering Science Forum. University of Science and Technology Beijing,2010: 19-22.

万方数据

Effect of Different Contents of SiO_2 on the Quality of Pellets of Hanstell

Sun Jianning[1], Liu Xiaojie[1], Yan Zhaozhao[1], Lu Jianguang[2], Lv Qing[1]
(1.School of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Key Laboratory of Modern Metallurgical Technology, North China University of Technology, Tangshan, Hebei, China; 2.HBIS Group Hansteel Company, Handan, Hebei, China)

Abstract: Through the four kinds of mineral powders used in the existing production of Hansteel, the ore concentrates with different SiO_2 content are obtained, and a series of test schemes and testing methods are used to find out the optimal compressive strength and metallurgy properties of the pellets of Hansteel. Meanwhile, the test explored the influence of different SiO_2 content on the compressive strength and metallurgical properties of the pellets of Hansteel. The test results show that the compressive strength of pellets produced by SiO_2 content is 3%, which is the strongest. The compressive strength of pellets decreases with the increase of SiO_2 content, but the pellets obtained by the test are above 2000 N. When the content of SiO_2 is 3%, the degree of reduction is the highest, reaching 83%. With the increase of SiO_2 content, the reduction degree of pellets decreases. When the content of SiO_2 is 3%, the low tempera-ture Break-down rate is the largest. With the increase of SiO_2 content, the low tempera-ture Break-down rate of pellets tends to decrease, but the decline is not too large.When the SiO_2 content is 3%, the softening temperature is the highest, the droplet temperature range is the narrowest, and the droplets are the best. The pellets increase with the increase of SiO_2 content. The softening temperature of the ore is lowered, the temperature range of the droplet is widened, and the droplet performance is deteriorated.

Keywords: Pellet; Compressive strength; Metallurgical properties; FactSage simulation

（上接 103 页）

Experimental Study on Beneficiation of a Low-grade Phosphate Ore in Beipiao, Liaoning Province

Cheng Liang[1], Ma Zhijun[1], Shao Kun[2], Weng Xingyuan[1], Gao Jing[1]
(1.College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, China; 2.Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang, Liaoning, China)

Abstract: The experimental study on beneficiation of a low-grade apatite phosphate ore from Beipiao area in Liaoning was carried out. After rough grinding process, with SA-6A as collector and sodium carbonate and sodium silicate as regulators, a phosphate concentrate with P_2O_5 grade of 34.04%and recovery of 57.46% was obtained from the open-circuit test, while a phosphate concentrate with P_2O_5 grade of 34.05%and recovery of 93.66%, was obtained from the closed-circuit test. Then after regrinding process of the phosphate tailings, with the intensity of magnetic separation of 1.2 T, an iron concentrate with TFe grade of 65.59% and recovery of 43.33% was obtained from the open-circuit test.

Keywords: Apatite; Phosphate ore; Flotation; Magnetic separation

万方数据