

高硅镁质熔剂性球团焙烧试验研究

王晓磊, 师学峰¹, 胡长庆¹, 王新东², 胡启辰²

(1. 华北理工大学冶金与能源学院 河北 唐山 063210; 2. 河钢股份 河北 石家庄 050023)

摘要: 球团冶金性能的好坏直接关系到高炉是否顺产, 质量好的熔剂性球团可以起到提产降耗作用。为探明 SiO₂、碱度及 MgO 含量对球团粘结率及抗压强度的影响规律, 以唐钢生产所用三种磁铁矿为原料, 通过添加白灰调节碱度, 添加白云石调节 MgO 含量, 调节三种铁矿粉不同配比调节 SiO₂ 含量, 进行了球团焙烧试验。研究发现, 焙烧球团的粘结率随着 SiO₂ 含量及碱度的提高而升高, 随着 MgO 含量提高而降低。而球团强度随着 SiO₂ 含量及碱度提高呈先上升后下降的趋势, 随 MgO 含量的提高呈下降趋势。

关键词: 熔剂性球团; 粘结率; 抗压强度; 焙烧试验

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.04.014

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 04-0087-06

我国钢铁工业正向着高效化、清洁化、绿色化、低成本化方向发展^[1-3]。在国家大力倡导节能减排、高炉精料号召下^[4-5], 拥有良好机械强度及优良冶金性能的镁质熔剂性球团矿在优化高炉炉料结构的过程中起到了非常重要作用^[6-8], 因此要生产高质量的球团矿, 必须要摸清影响球团性能的影响规律^[9-11], 高强健等^[12]研究了 MgO 对铁矿球团低温还原粉化率、还原性以及还原膨胀率等几种冶金性能的影响, 结果表明, 随着 MgO 含量的提高, 铁矿球团的还原粉化和还原现象都得到抑制, 而还原性能呈上升趋势。李杰等^[13]研究发现随着 MgO 含量的提高, 软化开始温度略微升高, 软化区间逐渐降低, 还原膨胀率呈降低趋势, 冶金性能得到明显改善。王黎光等^[14]研究了碱度对镁质熔剂性球团抗压强度的影响, 并基于孔结构及显微形貌分析了抗压强度变化的原因, 建立了孔隙

率与抗压强度之间的关系。邢宏伟^[15]等研究了熔剂性球团孔结构以及碱度对熔剂性球团性能的影响, 采用压汞试验法, 结合分形理论, 通过对试验数据的分析及球团图像的处理, 利用软件仿真, 得到了球团孔径分布的多重分形谱拟合曲线。

本文以唐钢生产所用三种磁铁矿为原料, 通过改变 SiO₂、碱度及 MgO 含量, 系统的研究了 SiO₂、碱度及 MgO 含量对镁质熔剂性球团强度及粘结率的影响规律, 为企业的生产实践提供理论依据。

1 试验原料

本试验所用矿粉为唐钢生产所用铁精粉, 包含 PMC 铁精粉、庙沟矿铁精粉、砚山 3[#] 铁精粉 3 种, 三种铁矿粉全为磁铁矿, 熔剂使用白云石和白灰, 粘结剂为膨润土, 具体成分见表 1。

收稿日期: 2019-7-31; 改回日期: 2019-09-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC0210600)

作者简介: 王晓磊 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事炼铁原料生产工艺方面的研究。

通讯作者: 胡长庆 (1973-), 男, 博士, 教授, E-mail: hiq-73@163.com。

表 1 原料化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of the raw material

原料	TFe	FeO	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	烧损
PMC	63.76	26.93	1.96	3.45	1.54	0.53	-1.7
庙沟矿	66.30	28.40	6.17	0.5	0.55	0.57	-3.16
研山 3 [#]	66.85	24.58	5.66	0.29	0.24	0.25	-2.51
白云石粉	0.00	0.00	2.98	20.95	29.14	0.13	46.99
白灰	0.00	0.00	2.90	2.85	80.00	/	39.31
膨润土	0.00	0.00	56.23	2.56	4.59	/	11.92

2 试验方案

试验设备用于球团焙烧的竖式管式炉，试验步骤如下：

(1) 焙烧过程及抗压强度测定：球团焙烧试验在竖式电炉中进行，高温吊篮装入 500 g 左右生球，待电炉温度升至设定温度，将吊篮放入电炉炉顶，然后使吊篮缓慢下行。干燥预热约 20 min，焙烧约 20 min，均热和冷却约 10 min，全过程共计 50 min。焙烧完成的球团矿，在弹簧压力试验机上测定抗压强度（压力机量程 5000 N，感量 10 N，压下速度 0.2 mm/s），每组试样测量 60 个球，结果取其平均值。

(2) 粘结率 (η) 测定：将焙烧后的球团进行分类，筛选出粘结的球团，并对其称重 $G_{粘}$ ，粘结率计算公式：

$$\eta = \frac{G_{粘}}{G_{总}}$$

3 结果分析

3.1 SiO₂ 对熔剂性球团强度及粘结率的影响

为了研究 SiO₂ 含量对生球性能的影响规律，固定膨润土为 1%，通过白云石调整 MgO 含量为 1.8%，通过白灰调整碱度为 1.0。试验方案见表 2。

表 2 试验方案 /%

Table 2 Test scheme

原料	Si _{4.0}	Si _{4.5}	Si _{5.0}	Si _{5.5}	Si _{6.0}
研山 3 [#]	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
PMC 矿	55.22	42.57	29.82	16.40	2.99
庙沟粉	0.00	11.85	22.68	34.06	45.45
白灰	3.78	4.58	4.68	4.78	4.89
白云石	0.00	0.00	1.83	3.75	5.67
膨润土	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

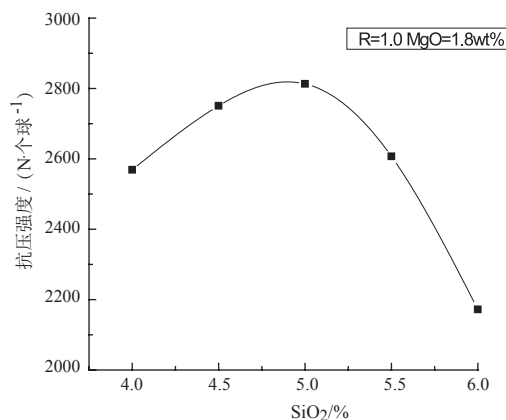
3.1.1 SiO₂ 对抗压强度试验结果与分析

表 3 试验结果

Table 3 Test results

试验编号	抗压强度 (N/个球)
Si _{4.0}	2569
Si _{4.5}	2751
Si _{5.0}	2813
Si _{5.5}	2607
Si _{6.0}	2172

注：焙烧温度为 1250 ℃，时间为 20 min。

图 2 SiO₂ 含量对抗压强度的影响 (1250 ℃)Fig. 2 Effect of SiO₂ content on compressive strength

由图 2 可知，在焙烧温度 1250 ℃，碱度为 1.0，MgO 含量为 1.8% 时，随 SiO₂ 含量的增加，球团抗压强度先上升后下降；SiO₂ 含量为 5.0% 时，球团抗压强度达到最大 2813 N/个球；SiO₂ 含量继续升高，球团抗压强度呈下降趋势，主要是因为 SiO₂ 增加后，势必会增加球团液相含量，而适宜的液相量有利于球团强度的提高，但过量后将会抑制 Fe₂O₃ 晶粒的长大，并阻碍 Fe₂O₃ 晶粒连接，生成部分的硅酸盐体系，从而降低了球团的抗压强度，尤其是 SiO₂ 含量从 5.5% 提高到 6.0% 时，下降了 435 N。

3.1.2 SiO₂ 对粘结现象试验结果与分析

焙烧温度定为 1250 ℃，各 SiO₂ 含量条件下均有不同程度的粘结现象，且随着 SiO₂ 含量的提高，粘结程度呈增多趋势。

粘结率见表 4。

表 4 SiO₂ 含量对粘结率的影响
Table 4 Effect of SiO₂ content on bonding rate

种类	粘结率 /%
Si=6.0	26.43
Si=5.5	14.61
Si=5.0	5.54
Si=4.5	5.14
Si=4.0	0

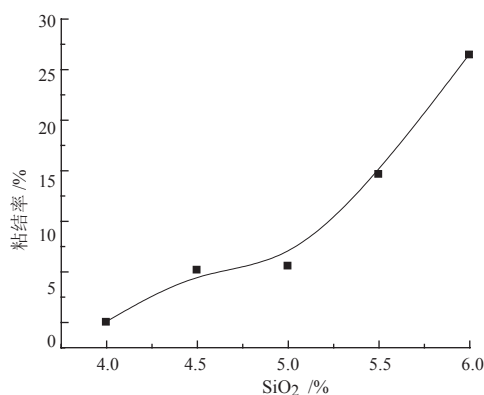


图 3 SiO₂ 含量对粘结率的影响

Fig. 3 Effect of SiO₂ content on Bonding Rate

由图 3 可知当 SiO₂ 含量在 5.0 以下时粘结率较低，超过 5.0 后粘结率上升明显，分析认为随着 SiO₂ 含量升高，容易生成低熔点液相，同时在球团焙烧过程中，磁铁矿向赤铁矿氧化不充分时，FeO 容易与 SiO₂ 反应生成低熔点化合物，液相量增加，过多的液相量促使球团相互间发生粘结现象，从而导致球团粘结率呈增加趋势。

3.2 碱度对熔剂性球团强度及粘结率的影响

通过研究 SiO₂ 含量对球团性能影响，在 SiO₂ 含量为 4.5% ~ 5.0% 时，球团性能较好，下边将进一步研究 SiO₂ 含量为 5.0% 时，碱度对球团性能影响规律，固定研山 3[#] 为 40%、膨润土为 1%，通过 PMC、庙沟矿调整 SiO₂ 含量为 5.0%，通过白云石调整 MgO 含量为 1.8%，白灰调整碱度为 0.6 ~ 1.4。试验方案见表 5。

表 5 试验方案 /%

Table 5 Test scheme

原料	R _{0.6}	R _{0.8}	R _{1.0}	R _{1.2}	R _{1.4}
研山 3 [#]	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
PMC 矿	31.79	30.8	29.82	28.83	27.85
庙沟粉	23.24	22.96	22.68	22.39	22.11
白灰	2.13	3.40	4.68	5.95	7.22
白云石	1.84	1.83	1.83	1.82	1.82
膨润土	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3.2.1 碱度对抗压强度试验结果与分析

表 6 抗压强度与焙烧粘结现象试验结果与分析

Table 6 Test results and analysis of compressive strength and calcination bonding

试验编号	抗压强度 (N/ 个球)
Si _{5.0} Mg _{1.8} R _{0.6}	2599
Si _{5.0} Mg _{1.8} R _{0.8}	2687
Si _{5.0} Mg _{1.8} R _{1.0}	2813
Si _{5.0} Mg _{1.8} R _{1.2}	2375
Si _{5.0} Mg _{1.8} R _{1.4}	2072

注：焙烧温度为 1250℃，时间为 25 min。

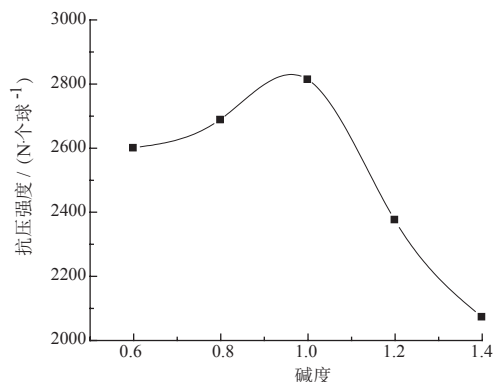


图 4 碱度对抗压强度的影响 (1250℃)

Fig. 4 Effect of alkalinity on compressive strength (1250 °C)

由图 4 可知，在焙烧温度 1250℃，MgO 含量 1.8%，SiO₂ 含量为 5.0% 时，碱度由 0.6~1.4，随着碱度的提高，球团抗压强度呈现出先升高后降低的趋势，并在碱度为 1.0 时最高，抗压强度为 2813 N。

分析认为随着碱度的提高，适量液相有助于球团内部颗粒表面张力的提高，以及固相质点的扩散，从而加快了晶体的重结晶速度、降低了球团内部气孔率，使气孔分布均匀，球团内部结构更加紧密与完整，从而会提高球团强度。

碱度过大而造成抗压强度下降的主要原因是：

(1) 碱度继续升高，球团中 CaO 含量占比过大，导

致铁矿颗粒分散严重,接触条件变差,减弱氧化作用;(2)形成液相量过大,阻碍固相颗粒间的直接接触,不利于赤铁矿再结晶长大,并且液相沿晶界渗透,会破坏已聚集成晶体固结,呈圆形大气孔状,进而削弱了以氧化固结为主的作用;(3)添加熔剂后焙烧过程中会出现铁酸钙体系矿物,尤其是在 SiO_2 较少的情况下,更易生成铁酸盐,随着碱度的继续提高,过剩的 CaO 会使生成的液相量不断增大,导致球团强度剧烈下降。

3.2.2 碱度对粘结现象试验结果与分析

焙烧温度定为 1250°C ,各碱度条件下均有不同程度的粘结现象,且随着碱度的提高,粘结程度呈增多趋势。

粘结率见下表 7:

表 7 碱度对粘结率的影响
Table 7 Effect of alkalinity on bonding ratio

种类	粘结率 / %
R=0.6	0
R=0.8	1.43
R=1.0	5.54
R=1.2	10.43
R=1.4	16.68

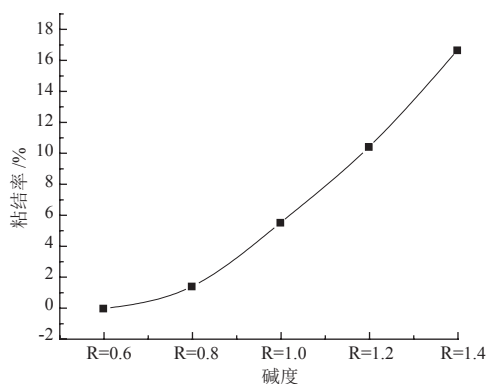


图 4 碱度对粘结现象的影响
Fig. 4 Effect of alkalinity on bonding

由图 4 可知,随着碱度的提高,粘结程度呈增多趋势。分析可知,一方面,由于球团中 SiO_2 含量较高,随着碱度提高,更易生成低熔点液相;另一方面,在球团焙烧过程中磁铁矿向赤铁矿氧化不充分时, FeO 易与 SiO_2 反应生成低熔点化合物,

同时随着碱度提高,低熔点的铁酸钙含量也会升高。由于较多的低熔点化合物生成,液相量必然增加,过多的液相量会加重球团相互之间粘连现象,从而提高了球团粘结率。

3.3 MgO 对熔剂性球团强度及粘结率的影响

结合 SiO_2 、碱度对球团性能影响,研究 MgO 含量对球团性能影响规律,为使球团性能达到最优,固定研山 3[#] 为 40%、膨润土为 1%,通过 PMC、庙沟矿调整 SiO_2 含量为 5.0%,通过白灰调整碱度为 1.0。试验方案见表 8。

表 8 试验方案 / %

Table 8 Test scheme

原料	Mg _{1.6}	Mg _{1.8}	Mg _{2.0}	Mg _{2.2}	Mg _{2.4}	Mg _{2.6}	Mg _{2.8}
研山 3 [#]	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
PMC 矿	30.35	29.82	29.29	28.76	28.23	27.69	27.16
庙沟粉	22.86	22.68	22.50	22.32	22.14	21.96	21.78
白灰	5.07	4.68	4.29	3.90	3.51	3.12	2.73
白云石	0.73	1.83	2.93	4.03	5.13	6.23	7.32
膨润土	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3.3.1 MgO 对抗压强度试验结果与分析

表 9 抗压强度测定结果

Table 9 Compressive strength measurement result

试验编号	抗压强度 (N/个)
Mg _{1.6}	2943
Mg _{1.8}	2813
Mg _{2.0}	2501
Mg _{2.2}	2579
Mg _{2.4}	2442
Mg _{2.6}	2473
Mg _{2.8}	2104

注:焙烧温度为 1250°C ,时间为 25min。

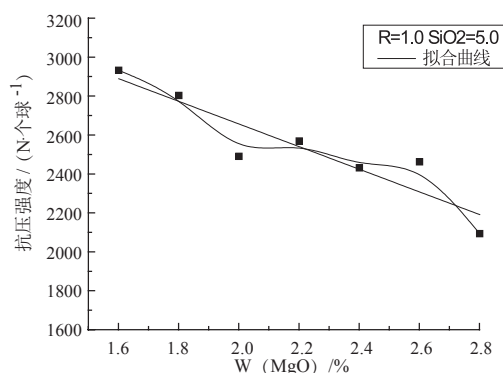


图 6 MgO 含量对抗压强度的影响 (1250°C)
Fig. 6 Effect of MgO content on compressive strength (1250°C)

由图 6 可知，在焙烧温度 1250℃，碱度为 1.0，SiO₂ 含量为 5.0% 时，随着 MgO 含量的提高，球团抗压强度呈逐渐降低的趋势；MgO 含量每升高 0.1%，抗压强度降低 69.9 N/ 个球。造成上述结果的原因 Mg²⁺ 会扩散进入 Fe₃O₄ 晶格生成固溶体，降低 Fe₃O₄ 的再结晶能力，而 Fe₃O₄ 的存在也会阻碍 Fe₂O₃ 之间的连晶性能，会进一步降低球团抗压强度。

3.3.2 MgO 对粘结现象试验结果与分析

粘结率见下表 10。

表 10 碱度对粘结率的影响
Table 10 Effect of alkalinity on bonding ratio

种类	粘结率 /%
MgO=1.6	6.97
MgO=1.8	5.54
MgO=2.0	4.22
MgO=2.2	3.21
MgO=2.4	2.98
MgO=2.6	0
MgO=2.8	0

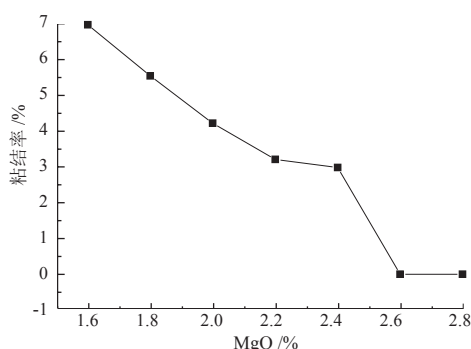


图 7 MgO 含量对粘结率的影响

Fig. 7 Effect of MgO Content on Bonding Rate

由图 6 可知，随着 MgO 含量的提高，粘结程度呈降低趋势，原因是添加 MgO 后的熔剂性球团在焙烧过程中可生成 Fe₂O₃-CaO-MgO-SiO₂ 体系，MgO 进入渣相或进入氧化铁中都能够提高球团的熔点和改善还原性 (MgO 含量的提高会促使生成高熔点渣相，减少低熔点渣相的形成，从而提高了熔化温度；又因为在加热还原过程中 MgO 与 FeO 无限固溶，生成高熔点含镁浮士体，提高熔滴温度)，减少液相生成。

4 结 论

(1) 在焙烧温度 1250℃，碱度为 1.0，MgO 含量为 1.8% 时，随 SiO₂ 含量的增加，球团抗压强度先上升后下降；SiO₂ 含量为 5.0% 时，球团抗压强度达到最大 2813 N/ 个球；SiO₂ 含量继续升高，球团抗压强度呈下降趋势，粘结率呈不断上升趋势。

(2) 在焙烧温度 1250℃，SiO₂ 含量为 5.0%，MgO 含量为 1.8% 时，随着碱度的提高，球团抗压强度呈现出先升高后降低的趋势，并在碱度为 1.0 时最高，抗压强度为 2813 N；粘结率呈不断上升趋势。

(3) 在焙烧温度 1250℃，碱度为 1.0，SiO₂ 含量为 5.0% 时，随着 MgO 含量的提高，球团抗压强度逐渐降低；MgO 含量每升高 0.1%，抗压强度降低 69.9 N/ 个球。粘结率呈不断下降的趋势。

参考文献：

- [1] 朱德庆, 黄伟群, 杨聪聪, 等. 铁矿球团技术进展 [J]. 烧结球团, 2017, 42(3): 42-49.
- [2] Zhu D Q, Huang W Q, Yang C C, et al. Iron ore pellet technology progress [J]. sintering and pelletizing, 2017, 42(3): 42-49.
- [3] 王维兴. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排 [J]. 冶金管理, 2018, (9): 53-58.
- [4] Wang W X. Improve the proportion of pellets in blast furnace charge, promote energy saving and emission reduction [J]. China Steel Focus, 2018, (9): 53-58.
- [5] Srinivas Dwarapudi, Tamal K. Ghosh, Amitabh Shankar, Vilas Tathavadkar, D. Bhattacharjee, R. Venugopal. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets [J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 99(1).
- [6] 张玉柱, 胡长庆. 铁矿粉造块理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012, 83-84.
- [7] Zhang Y Z, Hu C Q. Theory and practice of iron ore powder agglomeration [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012, 83-84.
- [8] 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.
- [9] Xu M X, Zhang Y L. The current situation and development trend of pellet production technology in China in the new

- century [J]. sintering and pelletizing,2017,42 (2): 25-30 , 37.
- [6] 裴元东, 赵志星, 马泽军, 等. 国外铁矿粉烧结理论与技术的进展 (二) [J]. 烧结球团, 2010,35(04): 1-5.
- Pei Y D,Zhao Z X,Ma Z J,et al. Development of foreign iron ore powder sintering theory and technology (2) [J]. sintering and pelletizing,2010,35 (04): 1-5.
- [7] 刘祥, 杜群力, 李响, 等. 镁质球团矿的研究现状与应用进展 [J]. 鞍钢技术, 2018,(3): 8-12.
- Liu X,Du LQ,Li X,et al. Research status and application progress of magnesia pellets [J]. Angang Technology,2018,(3): 8-12.
- [8] 王云龙. 高炉配料优化模型研究及应用分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- Wang Y L. Research and application analysis of blast furnace batching optimization model [D]. Shenyang Northeastern University,2015.
- [9] 张汉泉. 熔剂性球团生产及实践 [J]. 中国矿业, 2009 (4): 89-92.
- Zhang H Q. Production and practice of flux pellets [J]. China Mining,2009 (4): 89-92.
- [10] 叶匡吾. 努力推进我国球团矿的生产 [J]. 烧结球团, 200 (5): 1-5.
- Ye K W. Strive to promote the production of pellets in China [J]. sintering and pelletizing, 2007 (5): 1-5.
- [11] 刘文权. 对我国球团矿生产发展的认识和思考 [J]. 炼铁, 2006,25 (3): 10-13.
- Liu WQ. Understanding and thinking on the development of pellet production in China [J]. Ironmaking,2006,25 (3): 10-13.
- [12] 高强健, 沈峰满, 郑海燕, 等. MgO 对铁矿球团还原冶金性能的影响 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2014,35 (12): 1742-1745.
- Gao Q J,Shen F M,Zheng H Y,et al. Effect of MgO on the reduction metallurgical properties of iron ore pellets [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition,2014,35 (12): 1742-1745.
- [13] 李杰, 韩闯闯, 杨爱民, 等. MgO 含量对镁质熔剂性球团性能的影响 [J]. 烧结球团, 2017,42 (2): 31-37.
- Li J,Han C C,Yang A M,et al. Effect of MgO content on the performance of magnesia flux pellets [J]. sintering and pelletizing,2017,42 (2): 31-37.
- [14] 王黎光, 蔡爽, 田铁磊. 镁质熔剂性球团抗压强度变化规律及机理研究 [J]. 钢铁钒钛, 2017,38 (5): 108-111.
- Wang L G,Cai S,Tian T L. Study on the changing law and mechanism of compressive strength of magnesia flux pellets [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2017,38 (5): 108-111.
- [15] 邢宏伟, 刘振超, 蔡爽, 等. 基于分形理论的熔剂性球团性能研究 [J]. 钢铁钒钛, 2018,39 (3): 94-99.
- Xing H W,Liu Z C,Cai S,et al. Research on the properties of flux pellets based on fractal theory [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2018,39 (3): 94-99.

Experimental Study on Roasting of High Silica Magnesium Flux Pellet

Wang Xiaolei¹, Shi Xuefeng¹, Hu Changqing¹, Wang Xindong², Hu Qichen²

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan, Hebei, China; 2. Hegang Stock, Shijiazhuang, Hebei, China)

Abstract: The quality of the pellet metallurgy is directly related to whether the blast furnace is in good condition, and the good quality flux pellets can play a role in improving production and reducing consumption. In order to find out the influence of SiO₂, alkalinity and MgO content on pellet bondage and compressive strength, three kinds of magnetite used in Tangshan Iron and Steel Co., Ltd. were used as raw materials, and alkalinity was adjusted by adding white ash, and dolomite was added to adjust MgO content. The SiO₂ content was adjusted by adjusting the ratio of the three iron ore fines, and the pellet baking experiment was carried out. It is found that the bonding rate of the calcined pellets increases with the increase of SiO₂ content and alkalinity, and decreases with the increase of MgO content. The pellet strength increased first and then decreased with the increase of SiO₂ content and alkalinity, and decreased with the increase of MgO content.

Keywords: Flux pellet; Bonding ratio; Compressive strength; Calcination test