

SiO₂ 对邯郸球团矿抗压强度的影响

孙健宁^{1,2}, 刘小杰^{1,2}, 严照照^{1,2}, 卢建光³, 吕庆^{1,2}

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009; 2. 华北理工大学现代冶金技术重点实验室, 河北 唐山 063009; 3. 河钢集团邯郸公司, 河北 邯郸 056009)

摘要: 抗压强度是球团矿的重要指标, 直接影响高炉内炉况顺行及生产指标。改变球团矿的化学成份, 球团矿微观结构也将受到影响, 矿物结构发生改变, 对球团矿的抗压强度也有不同的影响。本试验采用邯钢生产现场所用的邯邢精粉、安徽精粉、沙河精粉、燕山矿粉等五种矿粉进行造球, 利用偏光显微镜等检测手段对不同矿粉的球团矿的抗压强度进行研究。从试验结果分析得出: SiO₂ 含量在 3% 时抗压强度最强, 在 7% 时抗压强度最差。

关键词: 球团矿; 抗压强度; 硅酸盐; 液相; FactSage

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.04.033

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 04-0191-06

1 前言

随着国内钢铁行业的迅猛发展, 炼铁技术的不断创新, 富矿产量减少, 贫铁矿石开采量增加, 烧结球团的地位在未来会越来越重要^[1]。球团矿合理的碱度、SiO₂ 和 MgO 含量不仅对球团矿自身的冶金性能产生影响, 也能提高高炉生产过后高炉炉况的稳定性, 同时也能满足高炉造渣的基本要求^[2]。澳大利亚、巴西等国采购矿粉, 导致钢铁企业增加了对国外矿粉的依赖性, 而近年来国外的矿物价格也逐渐攀升, 使钢铁企业的生产成本提高。

我国大部分钢铁企业的高炉都是采用的高碱度烧结矿配加酸性球团或者天然块矿, 该搭配下能极大发挥球团矿品位高, 强度高的优越性, 但是酸性球团会导致软熔性能差, 同时使得软熔带透气性下降^[3]。潘向阳对碱度对球团矿的冶金性

能及抗压强度的研究得出: 随着碱度的增加, 焙烧球团矿抗压强度呈先上升后下降的趋势, 当碱度为 1.0 时, 焙烧温度控制在 1250℃ 时, 焙烧球团矿抗压强度达到最大, 满足实际生产对抗压强度的要求^[4]。

对于高炉正常冶炼, 提高高炉入炉料中的 MgO 被认为是最重要的一种方法和途径。通过提高球团矿中的 MgO 含量不仅能提高炉渣中的 MgO 含量, 而且还能提高球团矿的冶金性能^[5]。张淑会等对 MgO 对球团矿的抗压强度的研究得出: 当 MgO 含量较高时, 液相增多阻碍连晶, 并且 Mg²⁺ 进入 Fe₃O₄ 晶粒阻碍了 Fe₃O₄ 的氧化, 使得球团矿的抗压强度下降^[6]。李乃尧等对 MgO 对球团矿综合冶金性能的影响的研究得出: 随着 MgO 的增加 MgO 的固溶阻碍了铁元素的氧化和迁移, 从而影响赤铁矿的再结晶, 使球团矿的抗压强度下降^[7]。

收稿日期: 2019-06-20; 改回日期: 2019-07-20

作者简介: 孙健宁 (1993-), 男, 硕士, 主要从事炼铁理论与工艺方面的研究。

通讯作者: 刘小杰 (1985-), 男, 讲师, 主要从事炼铁理论与工艺方面的研究。

SiO₂ 对球团矿的抗压强度和冶金性能有着重要的影响，全国各个钢铁企业也通过对硅粉的运用对成本的降低。青格勒等人研究了低硅对球团矿的影响得出：随着 SiO₂ 含量的降低，球团矿的还原膨胀率恶化^[8]。所以提高 SiO₂ 含量对球团矿冶金性能有所帮助，但王黎光通过对 SiO₂ 对球团结构的影响研究得出：添加化学纯 SiO₂ 会使球团矿的气孔和硅酸盐都增加，使球团矿的抗压强度降低^[9]。抗压强度是衡量球团矿的一个很重要的指标，邯钢高炉目前球团矿的加入量大约在 20% 左右，生产使用的矿粉种类繁多，其所生产的球团矿质量差，抗压强度较低，所以针对调整不同矿粉的搭配调节 SiO₂ 含量从而能使邯钢球团矿抗压强度达到最优，提出此试验研究，同时结合 FactSage 模拟软件的使用为邯钢球团矿的实际生产提出重要依据。

2 试验方法

2.1 试验原料及设备

试验原料：本试验采用邯钢实际生产所使用的五种矿粉（邯邢精粉、安徽精粉、沙河精粉、燕山矿粉、PMC 矿粉、）和膨润土。试验所需的试验设备有：圆盘造球机、电子称、烘箱、球团焙烧炉、X-射线衍射仪、偏光显微镜、蔡司场发射扫描电子显微镜。所需的试验原料化学成分及不同含量 SiO₂ 的球团的配比方案见表 1、2。

2.2 试验步骤：

表 1 矿粉的主要化学成分 /%

Table 1 Main chemical components of the ore powder

物料	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	S	Al ₂ O ₃	TiO ₂	R ₂
邯邢精粉	65.36	3.65	1.34	2.15	0.233	0.61	-	0.37
沙河精粉	63.43	4.01	4.08	2.15	0.19	0.78	-	1.02
安徽精粉	66.2	6.94	0.32	0.48	0.043	0.5	-	0.05
燕山精粉	66.36	6.91	0.80	0.70	-	-	0.11	0.12
PMC 矿粉	64.30	1.08	2.57	3.41	-	-	2.17	2.38

表 2 配矿试验方案 /%

Table 2 Test scheme of the matching ore

编号	SiO ₂ 含量	PMC 矿粉	邯邢精粉	安徽精粉	沙河精粉	膨润土
59	3.0	61.6	36.4	-	-	2.0
60	4.0	22.7	75.3	-	-	2.0
61	5.0	-	85.3	12.7	-	2.0
62	6.0	-	-	36.3	61.7	2.0
63	7.0	-	-	98.0	-	2.0

(1) 制备生球：将四种矿粉按照比例称量好加水混匀，选取 50 g 的矿粉放到烘箱中测水分含量，半个小时后，称量干燥后的矿粉质量，计算出矿粉中的含水量，并将已经混匀好的料盖住进行焖料，将焖好的料放入直径为 1000 mm 的圆盘造球机（倾角为 45°，圆边高度为 230 mm）中制备生球，转速为 20 r/min。（其中工艺参数选择为选择的主要工艺参数为：膨润土加入量 2.0%、造球时间 13 min、干燥温度 300℃）。

(2) 测定生球抗压强度：将直径为 10~12.5 mm 的单个生球放置于抗压强度测试机上，直至生球破裂为止，天平上的数据就为每个球团矿生球的抗压强度，每次测 20 个生球的抗压强度，取平均值就为该批次球团矿的抗压强度。

(3) 测定生球落下强度：将直径为 10~12.5 mm 的生球于 0.5 m 的高度自由落下至 10 mm 厚的钢板上记下球落下不破裂的次数。每组采用 20 个小球，为了减少误差，计算平均值时去掉数据中的最小值与最大值，其余 20 个数据的平均值作为该组试验的数据。

(4) 焙烧生球：取 1 kg 完整的生球放入耐高温吊篮中，并将其吊篮放入球团焙烧炉中进行预热，焙烧和冷却，共计时间 45 min。其中预热 20 min，焙烧 15 min。冷却 10 min。其中干燥风速 0.9 m/s、料层厚度 90 mm、预热温度 900℃、焙烧温度 1300℃。

(5) 采用偏光显微镜对焙烧球团矿进行矿相分析并结合蔡司场发射扫描电子显微镜对焙烧球团矿进行微观扫描，同时运用 X-射线衍射仪并结合 Jade 软件对焙烧球团矿进行图谱分析。最后结

合FactSage软件对焙烧球团矿进行液相模拟分析。

3 试验结果与分析

3.1 生球性能的测定结果和分析

表3 生球性能结果与分析

Table 3 Results and analysis of the pellet property

试验编号	生球粒度分布 /%			水分 /%	成球率 /%	生球抗压强度 /N	生球落下强度 /次·(0.5m) ⁻¹
	> 16 mm	12.5-16 mm	10-12.5 mm				
59	14.7	30.3	53.5	8.7	95.3	11.6	4.5
60	15.0	29.5	50.2	8.5	93.2	10.7	4.2
61	15.7	31.2	51.9	8.5	94.5	10.6	4.3
62	12.3	25.7	52.3	8.5	93.7	9.7	4.1
63	14.5	33.5	42.9	8.3	90.1	9.7	3.6

从表中可以得出通过对不同矿粉的搭配随着SiO₂含量的增加,成球率趋于下降, SiO₂含量从3.0增加到5.0下降不是很明显,当SiO₂含量增加到7.0时成球率下降较明显,但成球率都稳定在90%以上, SiO₂含量为3.0时,成球率最高,达到了95.3%。生球的抗压强度呈直线下降,当SiO₂含量为3.0时,生球的抗压强度最高,达到11.6/N。生球的落下强度也随着SiO₂含量的增加而趋于缓慢的下降,但下降不太明显,都稳定在4.1~4.5之间。造成以上结果的原因主要是由于为了控制SiO₂的含量增加了PMC矿粉的配比,而邯钢球团矿所使用的PMC矿粉和邯那精粉粒度非常细,这样矿粉的比表面积越大,自由能也越大,成球率越高,所造出的生球也非常密实,强度也很强。综上所述当SiO₂含量为3.0时对成球率和生球的性能是最有利的。

3.2 球团矿的抗压强度结果和分析

3.2.1 球团矿的抗压强度

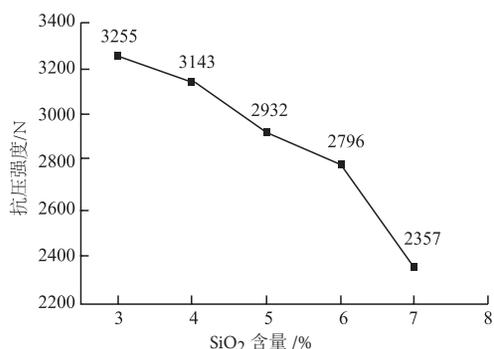


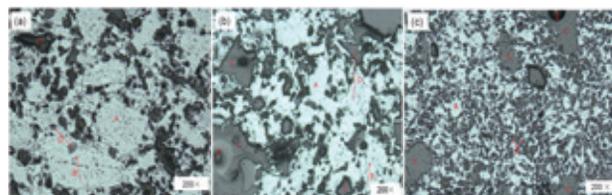
图1 球团矿抗压强度

Fig.1 Compressive strength of pellet ores

从图中可知,随着SiO₂含量的增加球团矿的

抗压强度逐渐下降,且下降趋势非常明显。SiO₂含量为3.0时,球团矿的抗压强度最强,平均达到了3255 N, SiO₂含量为7.0时,球团矿的抗压强度最差,平均只有2357 N。形成这种结果的主要原因由于随着SiO₂含量的增加,球团矿中的硅酸盐矿物增多,一方面少量的硅酸盐矿物能产生较少的液相,而较少的液相有助于球团矿的粘结,使得球团矿的抗压强度的增强,但过多的液相对球团矿的抗压强度起到了破坏的作用,另一方面,过多的硅酸盐会阻碍球团矿中赤铁矿晶粒的结晶和再结晶,这对球团矿的抗压强度的降低起到了主要影响,我们可以通过球团矿的矿相,扫描电镜并结合模拟软件对以上分析的原因加以证明。

3.2.2 球团矿矿相对抗压强度分析



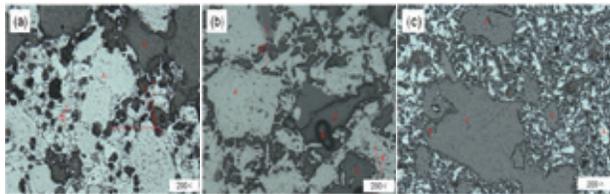
(a)-SiO₂含量3% (b)-SiO₂含量5% (c)-SiO₂含量7%A-Fe₂O₃ (白色,粒状,互联状);B-Fe₃O₄ (浅灰色,网格状);C-孔洞(黑色,不规则) D-钙铁橄榄石(深灰色);E-石英(黑色,圆点状)

图2 球团矿外部矿相图片

Fig.2 Picture of outer ore phase of the pellets

从图2可以看出,每组球团矿的氧化非常充分,球团矿中的未氧化的Fe₃O₄较少,球团矿中Fe₂O₃互联优良,球团矿整体的抗压强度都比较好且都能达到2000 N以上。当SiO₂含量为3%时,可以从矿相图上看,球团矿中Fe₂O₃晶粒粗大,而且Fe₂O₃晶粒互联网状组织也非常多,显微结构

非常紧密，并且球团矿中的钙铁橄榄石含量较少，均匀的分布在 Fe_2O_3 晶粒周围，少量的钙铁橄榄石与 Fe_2O_3 胶结良好，球团矿中的孔洞较少，整体骨架形成，球团矿的抗压强度最高；当球团矿中 SiO_2 含量增加到 5% 时，球团矿中 Fe_2O_3 晶粒较大， Fe_2O_3 晶粒互联网状组织也较多，显微结构相对紧密，球团矿中的钙铁橄榄石含量较多，且分布不是很均匀，阻碍了 Fe_2O_3 晶粒的再结晶，同时球团矿外部出现的孔洞的尺寸也相对较大，影响了球团矿的抗压强度，致使球团矿的抗压强度降低；当 SiO_2 含量为 7% 时，可以从矿相图中看出， Fe_2O_3 晶粒较小， Fe_2O_3 晶粒互联较差，球团矿中的钙铁橄榄石含量很多，过多的钙铁橄榄石阻碍了 Fe_2O_3 晶粒连晶，其中产生的孔洞数量也比较的多，严重破坏了球团矿的抗压强度，也导致了球团矿的抗压强度下降明显。



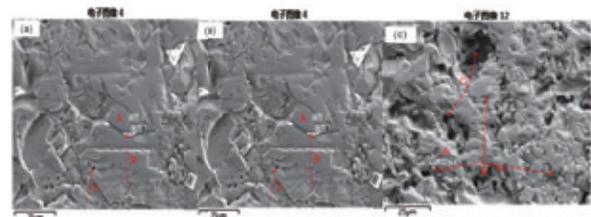
(a)- SiO_2 含量 3%； (b)- SiO_2 含量 5%； (c)- SiO_2 含量 7%
A- Fe_2O_3 (白色, 粒状, 互联状);B- Fe_3O_4 (浅灰色, 网格状);C-孔洞 (黑色, 不规则) D-钙铁橄榄石 (深灰色); E-石英 (黑色, 圆点状)

图 3 球团矿内部矿

Fig.3 Picture of inner ore phase of the pellets

从图 3 分析可知，一般情况下球团矿的边缘和中间层氧化程度较好，但三组球团矿的内部氧化也都基本上完全，未氧化 Fe_3O_4 的同样不是很多这进一步说明了五组球团矿的抗压强度都达到 2000 N 以上。当 SiO_2 含量为 3% 时，内部孔洞较少且孔洞尺寸不是很大， Fe_2O_3 晶粒连晶紧密，球团矿强度很强；当 SiO_2 含量为 5% 时，内部孔洞很多，孔洞尺寸较大， Fe_2O_3 晶粒连晶相对密实，晶粒尺寸也较大；当 SiO_2 含量为 7% 时，内部孔洞非常多，且尺寸很大， Fe_2O_3 晶粒非常小，晶粒连晶非常少，球团矿强度下降。

3.2.3 球团矿的扫描电镜结果与分析



(a)- SiO_2 含量 3%； (b)- SiO_2 含量 5%； (c)- SiO_2 含量 7%
A- Fe_2O_3 ; B- Fe_3O_4 ; C-孔洞

图 4 球团矿扫描电镜

Fig.4 Scanning electron microscope image of the pellets

不同 SiO_2 含量的球团矿的扫描电镜见图 4，当 SiO_2 含量为 3% 时，赤铁矿晶粒分布均匀，晶粒尺寸较大，连晶密集，且周围硅酸盐矿物较少，随着球团矿中 SiO_2 含量增加， SiO_2 进入到赤铁矿晶粒之间，形成了硅酸盐矿物，硅酸盐矿物包围着赤铁矿晶粒，阻碍了晶粒之间的接触，使赤铁矿晶粒间的连晶程度变差，而球团矿强度主要依靠赤铁矿晶粒之间的连晶来获得，当 SiO_2 含量为 7% 时，赤铁矿晶粒尺寸很小，分布混乱，晶粒之间缝隙较大，且硅酸盐含量增加阻碍赤铁矿晶粒再结晶； SiO_2 以复杂离子团形式进入到球团矿中，使硅酸盐网络结构更加复杂，结构单元更加复杂，导致硅酸盐矿物的熔化性温度升高，产生液相量增多，影响赤铁矿晶粒的连晶；同时硅酸盐矿物强度低，在受到外力作用下很容易就碎了，所以球团矿的抗压强度随着 SiO_2 含量增加而降低。

3.2.4 球团矿 X-射线衍射图谱及分析

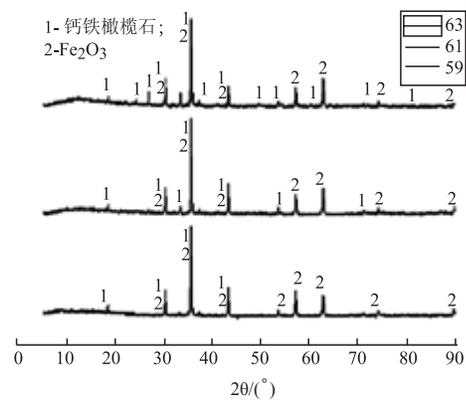


图 5 球团矿 X-射线衍射图谱

Fig.5 X-ray spectrum of the pellets

从图 XRD 上分析可知，三种不同 SiO_2 含量的球团矿的主要矿物组成基本相同，都基本为赤

铁矿, 钙铁橄榄石。随着球团矿中 SiO₂ 含量增加, 焙烧的球团矿中所含的钙铁橄榄石含量增加, 且增加幅度明显, 少量的钙铁橄榄石所形成的液相有助于胶结, 从而使球团矿的抗压强度上升, 这与之前的矿相分析相互印证, 但过多的钙铁橄榄石一方面阻碍赤铁矿晶粒的结晶和再结晶, 另一方面过多的钙铁橄榄石所形成的液相对球团矿起到了严重的破坏作用, 球团矿的抗压强度下降, 而这与之前高倍扫描电镜结果相吻合。

3.3 FactSage 软件对球团矿液相量的模拟结果与分析

FactSage 对球团矿液相量模拟结果见图 6。

根据 FactSage 软件模拟得出的液相量可知, 随着 SiO₂ 含量的增加液相量明显增加, 且增加幅

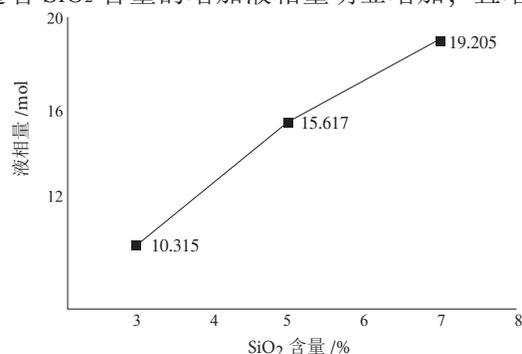


图 6 球团矿液相量模拟结果

Fig. 6 Simulation results of pellets in liquid phase

度很大, 这严重破坏了赤铁矿晶粒的结晶和再结晶, 从而造成抗压强度的下降, 这也与之前的矿相分析和扫描电镜分析结果相吻合, 从而从另一个角度说明了本试验的结论, 也是对本试验的补充。

4 结论

(1) 随着 SiO₂ 含量的增加, 成球率下降, 生球的抗压强度和落下强度也都下降, 但水分变化不大。

(2) 随着 SiO₂ 含量的增加, 球团矿的抗压强度直线下降, SiO₂ 含量在 3% 时强度最强, 在 7% 时强度最差, 但五组球团矿的抗压强度都在 2000 N 以上, 全都达到了钢厂实际生产中对抗压强度的基本要求。

(3) 随着 SiO₂ 含量的增加, 球团矿中的钙铁橄榄石增多, 阻碍 Fe₂O₃ 晶粒的结晶与再结晶, 使

球团矿的抗压强度降低, 同时随着 SiO₂ 含量的增加, 运用 FactSage 模拟软件算出, 液相量也明显增多这也对球团矿的抗压强度产生了影响。

参考文献:

- [1] 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):207-208.
- 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):207-208.
- [2] 李崇贵, 张云平, 胡焕琼, 等. 球团添加镁粉生产试验 [J]. 烧结球团, 2010 (37):40-44.
- Li C Q, Zhang Y P, Hu H Q, et al. Production test of pellets with magnesium powder [J]. Sintered pellets, 2010 (37):40-44.
- [3] 吴钢生, 边美柱, 沈峰满, 等. 碱性含镁球团矿的应用及合理炉料结构研究 [J]. 钢铁, 2006 (41):20-25.
- Wu G S, Bian M Z, Shen F M, et al. Application of alkaline magnesia-containing pellets and study on reasonable charge structure [J]. Steel, 2006 (41):20-25.
- [4] 潘向阳, 龙跃, 徐晨光, 等. 碱度及焙烧温度对球团矿抗压强度影响的研究 [J]. 钢铁钒钛, 2017(38):88-93.
- Pan X Y, Long Y, Xu C G, et al. Study on the influence of alkalinity and calcination temperature on the compressive strength of pellets [J]. Steel Vanadium & Titanium, 2017 (38):88-93.
- [5] 郑安阳, 王榕榕, 青格勒, 等. 配加不同粒度镁橄榄石对球团矿性能的影响 [J]. 烧结球团, 2018 (43):40-44.
- Zheng A Y, Wang R R, Qing G L, et al. Effects of different particle sizes of magnesium olivary on pellet properties [J]. Sintered pellet, 2018 (43):40-44.
- [6] 张淑会, 严照照, 刘小杰, 等. 化学成分对球团矿抗压强度影响的研究现状 [J]. 烧结球团, 2017 (42):57-62.
- Zhang S H, Yan Z Z, Liu X J, et al. Research status of the influence of chemical composition on the compressive strength of pellets [J]. Sintered pellets, 2017 (42):57-62.
- [7] 李乃尧, 张建良, 刘兴乐, 等. MgO、TiO₂ 对镁质钒钛球团矿综合冶金性能的影响 [J]. 钢铁, 2017 (52):14-21.
- Li N Y, Zhang J L, Liu X L, et al. Effects of MgO and TiO₂ on the comprehensive metallurgical properties of magnesium-vanadium titanium pellets [J]. Steel, 2017 (52):14-21.
- [8] 青格勒, 王朝东, 候恩俭. 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):7-12.
- Qing G L, Wang Z D, Hou E J. Compressive strength and metallurgical properties of low silicon magnesium pellets [J]. Chinese Journal of Iron and Steel Research, 2014 (26):7-12.
- [9] 王黎光, 傅菊英. 不同 SiO₂ 源对酸性球团结构和性能的影响 [J]. 钢铁研究, 2001 (3):1-5.
- Wang L G, Fu J Y. Effects of different SiO₂ sources on the structure and properties of acid pellets [J]. Steel research, 2001 (3):1-5.

(下转 201 页)