球团

配加不同粒度镁橄榄石对球团矿性能的影响

郑安阳[1]，王榕榕[1]，青格勒[2]，刘征建[1]，苍大强[1]
（1. 北京科技大学冶金与生态工程学院，北京，100083；2. 首钢技术研究院，北京，100043）

摘 要： 本文使用挪威 Sibelco 公司提供的大粒度镁橄榄石作为镁质添加剂进行造球试验，通过对镁橄榄石进行不同时间的预磨处理，研究其粒度对球团性能的影响。使用化学分析、X 射线衍射分析及扫描电镜－能谱分析等手段对造球原料及试验结果进行分析，结果表明：增加镁橄榄石预磨时间有利于提高球团生球性能；焙烧后球团中存在两种孔隙，液相生成导致的圆形大气孔及赤铁矿连晶间的孔隙，二者均对球团强度有一定影响；随着预磨时间增加，球团中大气孔形状和分布逐渐变得均匀，气孔直径逐渐变大，赤铁矿连晶间孔隙尺寸及数量逐渐变小，球团抗压强度先增加后缓慢降低，孔隙率变化呈现相反的趋势；镁橄榄石最佳预磨时间为 40 min，此条件下镁橄榄石及生产的球团均可满足生产实践要求。

关键词： 镁橄榄石；粒度分布；抗压强度；孔隙率
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2018)01－0040－04
doi： 10.13403/j.sjqt.2018.01.009

Effect of magnesium olivine particle size on the performance of pellet

Zheng Anyang[1], Wang Rongrong[1], Qing Gele[2], Liu Zhengjian[1], Cang Daqiang[1]
(1. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing*, 100083;
2. *Shougang Research Institute of Technology, Beijing*, 100043)

Abstract A type of large-grained magnesium olivine was used as Mg additive to prepare pellet. Effect of olivine particle size distribution was studied by changing pre-grinding time of olivine. Properties of raw materials and prepared pellets were analyzed by Chemical analysis, XRD, SEM-EDS, etc. Results showed that, the pre-grinding time of the magnesium olivine is beneficial to improving the performance of green pellet, there are two kinds of pores in the roasted pellet, the circular large pores caused by liquid phase generation and hematite intergranular pores, both of which have a certain effect on the strength of pellet. With the increase of the pre-grinding time, the shape and distribution of circular large pores in pellets gradually become uniform, pore size and quantity of hematite intergranular pores become smaller, compressive strength of the pellet increased at first and then decreased slowly, porosity changes in the opposite direction. The optimal pre-grinding time of magnesium olivine is 40 min, under which condition can the olivine and pellet meet the requirements of production practice.

Key words magnesium olivine; particle size distribution; compressive strength; porosity

1 前 言

随着进口铁矿石在我国钢铁生产中占有的比重逐年增大，进口铁矿石的数量也逐步提高，铁矿石大量的消耗导致了优质资源逐渐减少，矿石中 Al_2O_3 含量大大增加。这类铁矿石的大量使用导致高炉渣中 Al_2O_3 含量也相应增加，使得炉渣熔化性，流动性，脱硫能力和排碱能力都受到很大的影响。炉渣中的 MgO 不仅能降低炉渣粘度，改善炉渣流动性、熔化性、脱硫能力，且能

收稿日期： 2017－11－28
基金项目： 高等学校学科创新引智计划资助(B13004)
作者简介： 郑安阳(1978－)，男，博士研究生，主要从事冶金环保与资源高效利用方面的研究。
通讯作者： 刘征建(1982－)，男，教授，硕士生导师，博士，主要从事高炉炼铁及炼铁资源优化方面的研究。

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

提高炉渣排碱能力，综合炉渣中 Al_2O_3 的负面效果。因此，提高高炉入炉料中 MgO 被认为是保证高炉正常冶炼的一种重要的措施和途径。

对于 MgO 在高炉中的添加方式，可通过提高球团中的 MgO 含量来提高炉渣中 MgO 含量，即生产镁质熔剂性球团矿。与传统酸性球团相比，镁质熔剂性球团矿具有还原膨胀低，还原性好，还原粉化低及软熔性能好等优势，因此已在欧美等国家大幅度利用，近年来我国部分钢厂也已进行研究[1~3]。张金良等人[4]向巴西赤铁精矿中配加石灰石、菱镁矿、轻烧菱镁矿等熔剂制备球团矿，发现 MgO 含量从 0.08% 增大到 3.0% 时，球团还原度有所提高，高温软熔性能有所改善，但球团的抗压强度明显下降。S Dwarapudi 等人[5~8]以磁铁矿、赤铁矿混合矿为含铁原料，添加石灰石、白云石生产熔剂性球团，将其碱度控制在 0 ~ 0.8 范围内，MgO 含量控制在 0 ~ 1.5% 范围内。试验结果表明，MgO 含量为 1.5% 时，焙烧球团的抗压强度较自然 MgO 含量的球团的抗压强度小；周国凡等[9]通过向磁铁矿中配加轻烧氧化镁，使 MgO/SiO_2 比在 0.09 ~ 0.34 内变化，结果表明随着 MgO 含量增大，预热球团及焙烧球团的抗压强度均有下降趋势。可以看出，研究的焦点主要在于不同种类的添加剂如白云石、菱镁矿、氧化镁粉等对球团的影响，但对原料粒度的影响研究较少，尤其是添加剂的粒度。

本文采用挪威 Sibelco 公司提供的大粒度镁橄榄石作为镁质添加剂进行造球试验，通过改变镁橄榄石预磨时间改变其粒度，首先采用化学分析、X 射线衍射分析(XRD)、扫描电镜和能谱分析(SEM - EDS)等方法分析了原料及球团性能和微观形貌，随后进一步研究了不同镁橄榄石粒度对球团性能的影响，为镁橄榄石在球团中应用的合理粒度提供理论依据。

2　试验原料及方法

2.1　试验原料

试验所用分别为高硅矿粉、低硅矿粉、膨润土及某种大粒度镁橄榄石，主要成分见表 1。

表 1　原料的化学组成(%)

成分	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	S	P	LOI
高硅矿粉	69.30	29.70	1.84	0.31	0.67	<0.05	0.074	0.20	0.004	≤0.01
低硅矿粉	59.52	27.0	7.58	1.90	2.38	1.37	0.22	0.65	0.054	≤0.01
膨润土	–	0.4	63.23	2.82	2.68	14.65	–	0.088	0.082	9.26
镁橄榄石	5.18	6.42	41.63	0.116	48.73	0.642	–	–	–	0.98

由表 1 可以看出，大粒度镁橄榄石主要由 SiO_2 和 MgO 及少量 FeO 组成，其原始粒度分布如图 1 所示。

由图 1 可以看出，镁橄榄石粒度较粗，粒度分布主要集中在 0.074 ~ 1 mm 范围内，仅 3% 左右的镁橄榄石粒度小于 0.074 mm，不能很好地满足造球要求。因此，采用球磨机对镁橄榄石进行预磨，不同预磨时间下粒度及比表面积分布如表 2 所示。

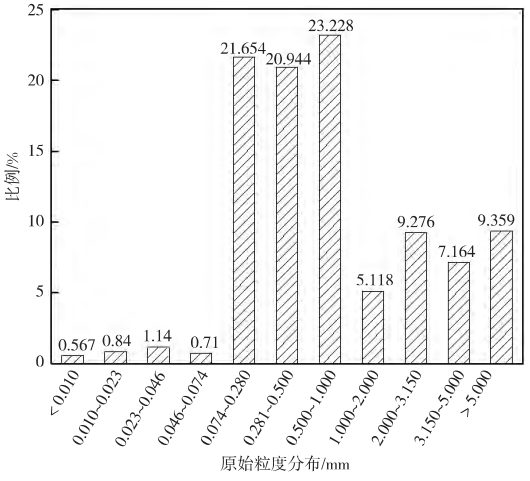


图 1　镁橄榄石原始粒度分布

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

表2 不同预磨时间下镁橄榄石粒度及比表面积分布

预磨时间/min	5	10	20	30	40	50	60
-0.074 mm/%	15.058	43.903	59.241	69.798	88.061	94.273	96.485
比表面积/$cm^2 \cdot g^{-1}$	973.3	1 273.3	1 788.3	2 488	2 671.3	3 917.3	4 344.3

由表2可知，随着预磨时间增加，镁橄榄石粒度逐渐变小，比表面积相应增大，预磨时间50 min后镁橄榄石粒度基本不变。对预磨60 min后的镁橄榄石进行激光粒度分析，结果如图2所示，可以看出，此时镁橄榄石粒度均小于0.1 mm且粒度小于0.074 mm的比例已达96.485%，完全可满足球团渣球的要求。

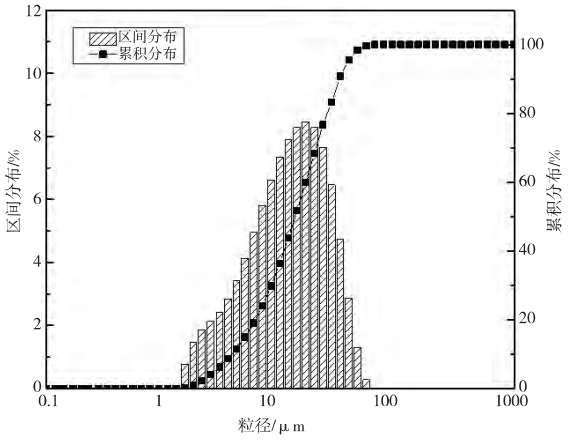


图2 预磨60 min后镁橄榄石粒度分布

2.2 试验方法

试验包括球团制备试验、球团预热焙烧试验及孔隙率测定试验，主要考察镁橄榄石粒度对球团抗压强度及孔隙率的影响。试验配料方案如下表所示，其中MgO含量为球团中预计含量。

表3 配料方案(%)

高硅矿粉	低硅矿粉	膨润土	镁橄榄石	MgO含量
96	4	1.2	2.9	2.05

球团制备试验中，将原料按比例均匀混合在圆盘造球机上进行造球，造球盘直径为500 mm，转速为18 r/min，倾角43°，造球时间为10 min。造球时严格控制造球加入水量、造球时间、加入料的顺序和间隔。然后用筛取10~12.5 mm的生球进行生球指标的分析，生球指标包括落下次数、生球抗压强度和水分，其余球准备用于焙烧试验。

球团预热焙烧试验中，把配加不同粒度镁橄榄石的生球在恒定温度的管式炉内进行预热和高温焙烧试验，随后测量焙烧后球团的抗压强度。

3 试验结果与分析

3.1 镁橄榄石粒度对生球性能影响

通过对镁橄榄石进行预磨，分别配加预磨时间为5 min，10 min，20 min，30 min，40 min，50 min，60 min的镁橄榄石进行造球试验，将生球含水量均控制在7%~7.5%的范围内，生球及干燥后球团的指标情况如图3所示。

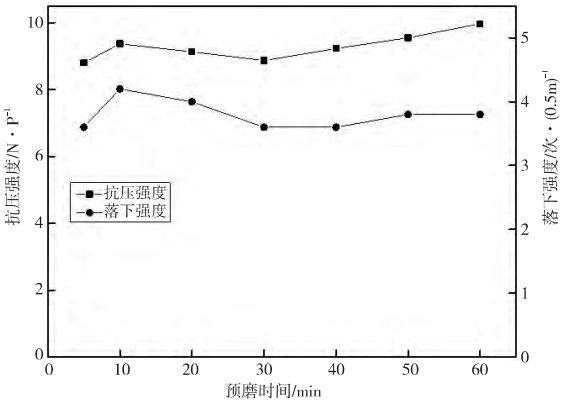


图3 生球强度随预磨时间变化

由图3可以看出，预磨时间为10 min时，生球抗压强度及落下强度均达到极大值，这是由于造球原料中镁橄榄石粒度较大，可起到一定的骨架作用，提高原料成球性能，从而进一步提高生球强度。随着预磨时间进一步增加，镁橄榄石粒度继续减小，骨架作用逐渐减弱，因此生球强度均有不同程度的下降。当镁橄榄石预磨时间大于30 min时，镁橄榄石比表面积迅速增加，其小于200目的比例也逐渐增加，这些细粒镁橄榄石可填充在矿粉颗粒间，减少颗粒之间的摩擦力，使物料堆积密实，增加颗粒间接触面积或减小颗粒间距，从而增加颗粒间的分子力，提高球团强度。

3.2 镁橄榄石粒度对成品球孔隙率的影响

为了分析不同粒度镁橄榄石添加剂对球团焙烧强度及孔隙率的影响，首先用管式炉对配加不同粒度镁橄榄石添加剂的生球进行了焙烧试验。管式炉的预热温度为980 ℃，预热时间为24 min，焙烧温度为1 280 °C，焙烧时间为24 min。

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

试验结束后测定焙烧球的抗压强度及球团孔隙率，结果如图 4 所示。

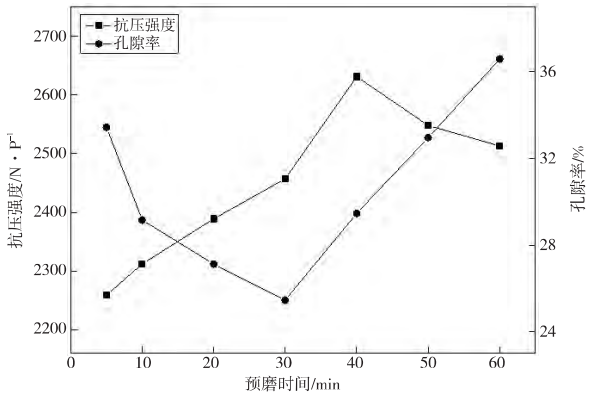


图 4　焙烧后球团强度及孔隙率随预磨时间变化

由图 4 可知，球团的抗压强度随着预磨时间的增加先增加后逐渐降低，预磨时间为 40 min 时达到最大值2 631 N，预磨时间为 5 min 时抗压强度最低，仅为 2 259 N；焙烧后球团的孔隙率与抗压强度呈现相反的趋势，孔隙率最小的球团为添加预磨时间为 30 min 镁橄榄石的球团，其孔隙率仅为 25.45%，添加预磨时间为 60 min 的镁橄榄石的球团孔隙率最大，为 36.59%。为进一步研究焙烧后球团抗压强度及孔隙率变化趋势及原因，使用 SEM－EDS 对焙烧后球团微观形貌进行表征，结果如图 5 所示。

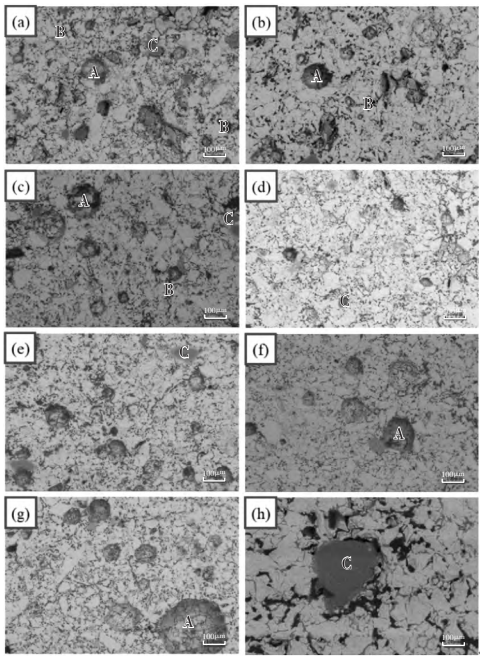


图 5　球团微观形貌

(a)－5min；(b)－10min；(c)－20min；(d)－30min；(e)－40min；(f)－50min；(g)－60min

(A)－圆形大气孔；(B)－赤铁矿连晶间孔隙；(C)－未反应镁橄榄石颗粒

图 5 中，(a)～(h) 分别为添加不同预磨时间镁橄榄石球团焙烧后的微观形貌，可以看出，球团中孔隙主要有两种存在形式，一种为球团在预热焙烧过程中产生液相，进而产生的圆形大气孔，这种气孔在球团中分布不均匀，会一定程度上降低球团的抗压强度；另一种孔隙主要存在于大片的赤铁矿连晶中间，此种孔隙较小且在球团中分布均匀。图 5 中(h) 为球团中大颗粒镁橄榄石的存在形态，其中深色部分为未与铁矿粉颗粒反应的镁橄榄石，这种未反应颗粒会阻碍赤铁矿连晶且周围存在第二种孔隙，孔隙尺寸大于赤铁矿连晶间的孔隙，因此未反应颗粒的存在会增加球团的孔隙率。

镁橄榄石预磨时间为 5 min 时，球团中大气孔较多且形状和分布都不均匀，赤铁矿连晶间孔隙尺寸较大且球团中存在大量大颗粒未反应镁橄榄石，因此此时球团孔隙率较大，为 33.43%；随着预磨时间增加至 30～40 min，球团中添加的镁橄榄石粒度逐渐变小，球团中赤铁矿连晶区域变大，其间孔隙变小，大气孔形状逐渐变得规则且气孔数量变少，球团孔隙率逐渐下降，球团强度则逐渐上升至 2 631 N；进一步增加预磨时间，镁橄榄石颗粒变得很细，可充分与铁矿粉颗粒反应生成铁酸镁等，球团中几乎不存在未反应镁橄榄石颗粒，赤铁矿连晶间孔隙进一步减少，对提高强度有利，与此同时圆形大气孔数量增加且变大，因此球团强度会有一定程度的降低，但仍可以满足实际生产对球团强度及熔剂性球团矿孔隙率的要求。因此，基于球团性能及成本考虑，需要对此种大粒度镁橄榄石进行预磨且最佳预磨时间为 40 min，此条件下镁橄榄石及其制备的球团均可满足生产实践要求。

(下转第 56 页)

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

(2) 随着碱度的提高,液相中的铁酸镁逐渐被 CaO 替代,生成铁酸钙和 MgO,使液相变得粘稠,抑制了液相中元素的扩散,也阻碍了液相周围物质的溶解,导致液相生成量降低,进而抗压强度降低。

参考文献

[1] 周明顺,沈峰满,翟立委,等. MgO 添加方式对改善球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁,2012,04:14-18.

[2] 王天雄. 熔剂性球团的生产试验[J]. 烧结球团,2012,02:45-47,74.

[3] 李坤,王昌华. 石灰石熔剂性球团试验研究[J]. 烧结球团,2015,02:32-35.

[4] 朱德庆,高子富,潘建,等. 碱度及 MgO 质量分数对球团焙烧及冶金性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,(10):3963-3970.

[5] 吕志义,陈革,马利,等. 不同碱度及含氧化镁球团矿实验研究[J]. 包钢科技,2003,04:1-3,11.

[6] GB/T14201-1993. 铁矿球团抗压强度测定方法[S]. 包头:包头钢铁公司,1993.

[7] 闫东杰,柳青,黄学敏,等. 基于正交实验的颗粒移动床烟气脱硫工艺参数优化[J]. 环境工程学报,2014,(09):3899-3904.

[8] 田铁磊,李杰,邢宏伟. 液相量对高镁碱性球团强度的影响[J]. 烧结球团,2015,(03):22-24.

(上接第43页)

4 结 论

在实验室条件下,通过对大粒度镁橄榄石进行不同时间的预磨改变其粒度,添加到球团中进行造球及预热焙烧试验,得到镁橄榄石粒度对含镁熔剂性球团强度及孔隙率的影响及机理。

(1) 大颗粒镁橄榄石可在球团中起到骨架作用,提高造球原料成球性能;随着镁橄榄石预磨时间增加,镁橄榄石粒度逐渐变细,可填充在矿粉颗粒间,减少颗粒之间的摩擦力,从而增加颗粒间的分子力,提高球团强度;添加不同预磨时间镁橄榄石的生球抗压强度和落下强度随预磨时间增加均呈现先降低后增加的大致趋势。

(2) 球团中孔隙有两种存在形式:一种为圆形大气孔,由于球团在预热焙烧过程中产生液相而产生,在球团中分布不均匀,会一定程度上降低球团的抗压强度;另一种孔隙存在于大片的赤铁矿连晶中间,孔隙较小且分布均匀。

(3) 随着镁橄榄石预磨时间增加,铁矿粉颗粒与镁橄榄石之间反应变得充分,球团孔隙率先降低后增加,抗压强度呈现相反趋势。球团中大气孔形状和分布逐渐变得均匀,气孔直径逐渐变大,利于提高球团还原度;赤铁矿连晶间孔隙尺寸逐渐变小且孔隙变少,对提高球团抗压强度有利。镁橄榄石最佳预磨时间为 40 min。

参考文献

[1] 杨天钧,张建良,刘征建,等. "新常态"下高炉炼铁技术转型升级和创新之路[C]//宝钢学术年会. 2015.

[2] 许贵宾. 熔剂性球团矿的生产实践[C]//全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会. 2014.

[3] 许贵宾. 生产高 MgO 熔剂性球团的优势[C]//2015 京津冀钢铁业清洁生产、环境保护交流会论文集. 2015.

[4] 张金良. 熔剂性赤铁矿球团焙烧特性及高炉还原行为研究[D]. 长沙:中南大学,2012.

[5] Dwarapudi S, Sekhar C, Paul I. Effect of fluxing agents on reduction degradation behaviour of hematite pellets [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2015, 43(3).

[6] Dwarapudi S, Ghosh T K, Tathavadkar V. Effect of MgO in the form of magnesite on the quality and microstructure of hematite pellets [J]. International Journal of Mineral Processing, 2012, 112-113(4):55-62.

[7] Dwarapudi S, Ghosh T K, Shankar A. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets [J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 99(1-4):43-53.

[8] Dwarapudi S, Ghosh T K, Shankar A. Effect of pyroxenite flux on the quality and microstructure of hematite pellets [J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 96(1-4):45-53.

[9] 周国凡,杨福. 添加 MgO 对球团矿成球性能及强度的影响[J]. 钢铁研究,2009,37(2):10-12.

[10] 张一敏. 球团理论与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,1997.

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