w(MgO)对镁质酸性球团制备及冶金性能的影响

王晓磊，师学峰，胡长庆，韩伟刚，赵 凯
(华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063210)

摘 要： 基于特定铁精粉配比，通过改变 w(MgO)，对镁质酸性球团制备及其冶金性能进行了详细实验研究。结果表明：当 $w(SiO_2)$ 为 5.5%，w(MgO) 在 1.4%~2.2% 之间变化时，w(MgO) 对铁矿粉的成球率、生球强度影响不大；球团爆裂温度呈先降低后升高的趋势，且在 w(MgO) 为 2.0% 时，爆裂温度最低；抗压强度呈下降的趋势，w(MgO) 每增加 0.1%，抗压强度降低 71.9 N/P；低温还原粉化性呈先降低后升高的趋势，w(MgO) 每增加 0.1%，还原性能降低 1.6%，总体软化性能得到改善。

关键词： MgO；酸性球团；成球率；爆裂温度；冶金性能
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-8764(2020)01-0035-05
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.01.007

Effect of w(MgO) on the preparation and metallurgical properties of magnesium acidic pellets

Wang Xiaolei, Shi Xuefeng, Hu Changqing, Han Weigang, Zhao Kai
(*School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan* 063210, *Hebei*)

Abstract Based on the specific iron concentrate ratio, detailed experimental studies on the preparation and metallurgical properties of magnesium acidic pellets are made by changing w(MgO). The results show that when $w(SiO_2)$ is 5.5% and w(MgO) varies from 1.4% to 2.2%, w(MgO) has little effect on the spheronization rate and green pellet strength of iron ore powder; the burst temperature of pellets decreases first and then increases, and is at the lowest when w(MgO) is 2.0%; the compressive strength shows a downward trend, with each increase of w(MgO) by 0.1%, the compressive strength decreases by 71.9 N/P; the tendency of low-temperance reduction and pulverization decreases first and then increases, with each increase of w(MgO) by 0.1%, reduction performance decreases by 1.6%, the overall softening performance is improved.

Key words MgO; acidic pellets; spheronization rate; burst temperature; metallurgical properties

合理的高炉炉料结构通常为高碱度烧结矿配加酸性球团矿，为维持高炉顺行，一般要求高炉炉渣中 w(MgO) 在 8%~11%[1]。实际生产中，MgO 加入方式主要是通过向烧结矿中添加含镁熔剂来实现。但当烧结矿中 w(MgO) 超过一定值后，将造成烧结矿强度下降、烧结能耗增加，因此为了保证烧结矿质量及控制烧结成本，一般将烧结矿中 w(MgO) 控制在 2% 以下[2-5]。

酸性球团矿常与高碱度烧结矿搭配作为高炉炉料，但酸性球团矿具有初始软熔温度低、膨胀率高等缺点[6-9]，若添加量过大，将会对高炉料柱透气性及高炉顺行产生严重影响[10-12]。MgO 能使渣相和富氏体熔点升高，可改善球团的膨胀率、高温还原性、荷重软化性能[13-16]，近年来镁质球团已成为炼铁原料方面的研究热点。

镁质酸性球团矿将部分原本添加在烧结中的含镁熔剂转移到酸性球团矿中，高炉炉料结

收稿日期： 2019-07-21
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，从事炼铁原料工艺方面的研究。
通讯作者： 胡长庆(1973—)，男，博士，教授，从事铁矿粉造块、炼铁和钢铁工业能源环境的相关研究。

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

构可以由“高碱度高镁烧结矿+酸性球团矿”向冶金性能更好的“高碱度低镁烧结矿+镁质酸性球团矿”转变，以达到节能降耗与高炉顺行双赢的效果。因此，研究并开发镁质球团矿技术及生产工艺，势在必行且意义深远。以唐山本地原料条件为基础，通过确定具体精粉配比，深入研究 $w(MgO)$ 对球团制备及冶金性能的影响，以期为其更好的进行工业生产提供理论基础。

1 实验原料与方法

1.1 实验原料

实验用原料主要有4种铁精粉(庙沟、研山、PMC、红土矿)、添加剂与膨润土。原料主要化学成分如表1所示。

表1 原料主要化学成分(质量分数) %

原料	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	TiO_2	Al_2O_3	烧损	细度
庙沟	66.56	27.98	5.46	0.25	0.56	0.20	1.38	-3.06	81.44
研山	66.45	24.56	6.31	0.15	0.26	0.15	0.84	-2.48	81.42
PMC	64.33	26.62	1.32	0.91	3.33	2.31	0.92	-1.60	42.78
红土矿	52.34	1.02	2.16	0.29	0.54	—	8.31	12.93	—
高镁粉	—	—	5.92	1.70	83.64	—	0.99	6.96	96.5
膨润土	—	—	56.23	4.59	2.56	—	12.12	11.92	96.40

由表1可知：庙沟和研山(国产精矿粉)品位均达到66%以上，但 $w(SiO_2)$ 也较高，分别为5.46%、6.31%；PMC矿粉品位略低(64.33%)，但 $w(SiO_2)$ 仅为1.32%，且 $w(CaO)$ 和 $w(MgO)$、$w(TiO_2)$ 均较高(0.91%、3.33%、2.31%)，故PMC矿粉配比不宜太高；红土矿品位偏低(52.34%)，Al_2O_3 偏高(8.31%)，因此，配比亦不宜太高。

1.2 实验方法

为了研究 $w(MgO)$ 对球团性能的影响，固定红土矿配比为3%、膨润土配比为0.7%，通过PMC、庙沟矿调整 $w(SiO_2)$ 为5.5%，改变高镁粉调整 $w(MgO)$ 为1.4%~2.2%，梯度为0.2%。实验方案如表2所示。

表2 实验方案(质量分数) %

原料	$Si_{5.5}Mg_{1.4}$	$Si_{5.5}Mg_{1.6}$	$Si_{5.5}Mg_{1.8}$	$Si_{5.5}Mg_{2.0}$	$Si_{5.5}Mg_{2.2}$
PMC矿	24.69	24.67	24.64	24.62	24.59
红土矿	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
庙沟矿	71.26	71.04	70.83	70.61	70.40
高镁粉	0.35	0.59	0.83	1.07	1.31
膨润土	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70

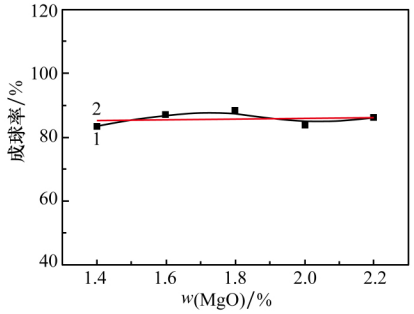
注：$Si_{5.5}$ 代表为 $w(SiO_2)=5.5\%$，$Mg_{1.4}$ 代表为 $w(MgO)=1.4\%$，其他相同。

2 实验结果与分析

2.1 $w(MgO)$ 对镁质酸性球团的影响

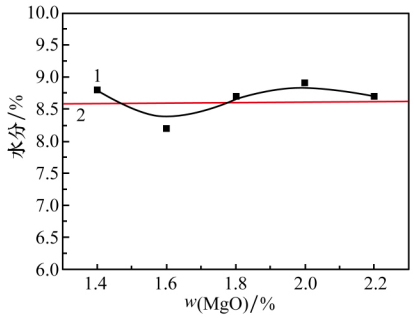
2.1.1 $w(MgO)$ 对成球率及生球水分的影响

不同 $w(MgO)$ 对成球率及生球水分的影响分别如图1、2所示。



1—$w(SiO_2)=5.5\%$；2—拟合曲线

图1 不同 $w(MgO)$ 对成球率的影响



1—$w(SiO_2)=5.5\%$；2—拟合曲线

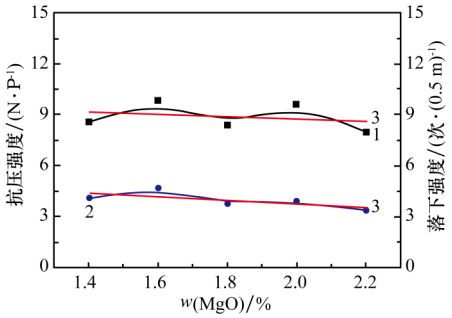
图2 不同 $w(MgO)$ 下的生球水分

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

由图 1、2 可知：w(MgO) 在 1.4%～2.2%、w(SiO_2) 为 5.5% 时，对铁矿粉的成球率影响不大；在 w(MgO) 为 1.4%、w(SiO_2) 为 5.5% 时，镁质球团成球率最低，为 86.9%；镁质球团的成球率基本在 90% 左右，成球性能较好；铁矿粉的适宜水分变化不大。

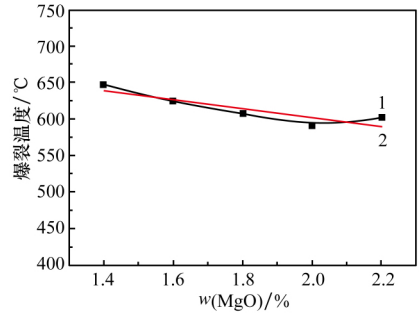
2.1.2　w(MgO) 对生球强度及爆裂温度的影响

不同 w(MgO) 对生球强度及爆裂温度的影响分别如图 3、4 所示。



1—抗压强度；2—落下强度；3—拟合曲线。

图 3　不同 w(MgO) 对生球质量的影响



1—w(SiO_2) =5.5%；2—拟合曲线。

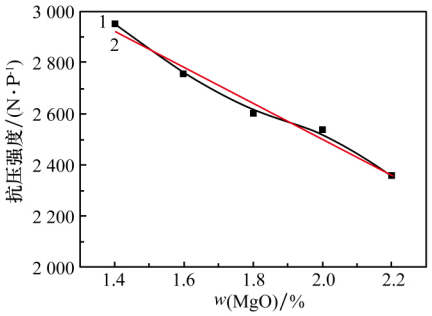
图 4　不同 w(MgO) 对生球爆裂温度的影响

由图 3 可知：当 w(SiO_2) 为 5.5%、w(MgO) 在 1.4%～2.2% 变化时，生球抗压强度和落下强度总体为降低趋势，生球抗压强度在 8.0～9.8 N/P，落下强度在 3.4～4.7 次/(0.5 m)，对生球强度影响不大，生球强度均能满足生产需要。分析认为这是因为高镁粉与水的亲和力远远低于膨润土，随着高镁粉配比的提高，原料粘结性降低。

由图 4 可知：当 w(SiO_2) 为 5.5%、w(MgO) 在 1.4%～2.2% 变化时，爆裂温度变化较平缓，w(MgO) 由 1.4% 增加到 2.0%，爆裂温度整体呈下降趋势，分析认为随着高镁粉配比的提高，因其粒度很小，从而使生球变得更加密实，水分不易蒸发，最终降低了生球的爆裂温度，但是随着高镁粉配比继续升高，生球粘结性下降，水分蒸发加快从而又提高了爆裂温度；为确定 w(MgO) 与生球爆裂温度间的定量关系，建立 w(MgO) 与生球爆裂温度函数关系：$y=-89.5x+765.4$，$R^2=0.9729$，w(MgO) 每增加 0.1%，爆裂温度降低 8.95 ℃。

2.1.3　w(MgO) 对抗压强度的影响

不同 w(MgO) 对球团抗压强度的影响如图 5 所示。



1—w(SiO_2) =5.5%；2—拟合曲线。

图 5　不同 w(MgO) 对球团抗压强度的影响

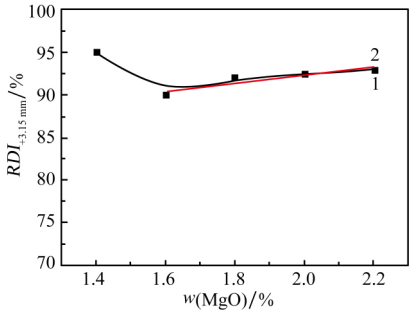
由图 5 可知：当焙烧温度为 1 300 ℃，w(SiO_2) 为 5.5% 时，w(MgO) 由 1.4% 增加到 2.2% 时，球团抗压强度逐渐降低，由2.9 kN/P 降低到约2.35 kN/P。分析认为，随着 w(MgO) 的升高，球团中生成了 $MgO\cdot Fe_2O_3$，并且很有可能存在未矿化的 MgO，阻碍了 Fe_2O_3 初晶发育，不利于结晶长大，并且 Mg^{2+} 会扩散进入 Fe_3O_4 晶格形成固溶体，减弱了 Fe_3O_4 的再结晶能力，而 Fe_3O_4 的存在也会阻碍 Fe_2O_3 之间的连晶，会使球团矿抗压强度进一步下降；为了确定w(MgO) 与球团抗压强度间的定量关系，建立了 w(MgO) 与抗压强度间的函数关系：$y=3\,927.4-719x$，$R^2=0.985\,5$，w(MgO) 每升高 0.1%，抗压强度降低 71.9 N/P。

2.1.4　w(MgO) 对球团冶金性能的影响

不同 w(MgO) 对球团冶金性能的影响分别如图 6～9 所示。

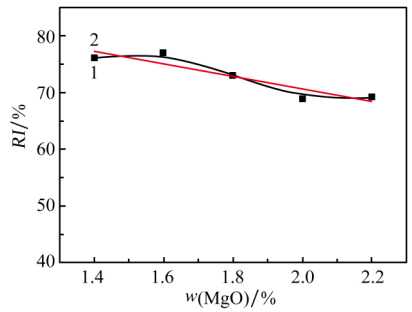
由图 6 可知：随着 w(MgO) 的提高，球团矿低温还原粉化指数($RDI_{+3.15\ mm}$) 先降低然后逐

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



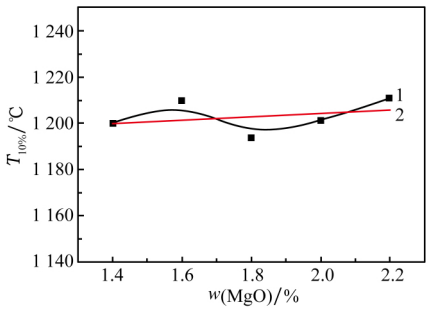
1—w(SiO_2) =5.5%；2—拟合曲线。

图 6 w(MgO) 对球团低温还原粉化性能的影响



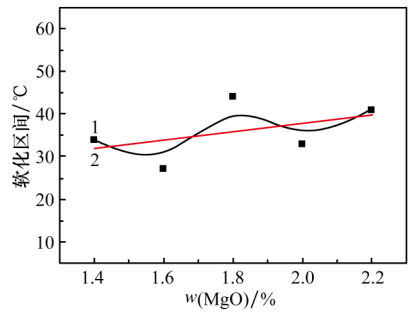
1—w(SiO_2) =5.5%；2—拟合曲线。

图 7 w(MgO) 对球团还原性能的影响



1—w(SiO_2) =5.5%；2—拟合曲线。

图 8 w(MgO) 对球团软化开始温度影响



1—w(SiO_2) =5.5%；2—拟合曲线。

图 9 w(MgO) 对球团软化区间影响

渐增加；当 w(SiO_2) 为 5.5%，w(MgO) 为 1.6% 时，镁质球团的 $RDI_{+3.15\,mm}$ 最低为 90.3%；镁质球团在 w(SiO_2) 为 5.5%，w(MgO) 为 1.6%～2.2% 时，w(MgO) 与镁质球团的 $RDI_{+3.15\,mm}$ 呈线性关系。分析认为：MgO 以熔剂形式添加到球团中，抑制了 Fe_2O_3 还原及粉化；此外，w(MgO) 的提高，会抑制 CaO 与 Fe_2O_3 矿化反应，从而阻碍液相量的增加，促进 Fe_2O_3 的再结晶，改善晶格缺陷，减小晶格之间的应力，从而改善了低温还原粉化性能；w(MgO) 与镁质球团的 $RDI_{+3.15\,mm}$ 间的函数关系：$y=3.85x+84.36$，$R^2=0.947\,9$，w(MgO) 每升高 0.1%，$RDI_{+3.15\,mm}$ 提高约 0.39%。可见，提高球团矿 w(MgO)，有利于改善球团矿的低温还原粉化性能。

由图 7 可知：当 w(SiO_2) 为 5.5%，w(MgO) 由 1.4% 增加到 2.2% 时，球团还原度指数(RI) 逐渐降低。这是因为随着 w(MgO) 的提高，会有大量较难还原的镁橄榄石及部分钙镁橄榄石形成，它们也会降低煤气流与 Fe_2O_3 的接触面积，使还原反应受到阻碍，进而降低了还原性能；w(MgO) 与镁质球团还原性能间的函数关系：$y=-10.15x+90.79$，$R^2=0.904\,0$，w(MgO) 每升高 0.1%，还原性能分别降低 1.26%。综上分析可知，随着 w(MgO) 的升高，球团还原性能恶化。

由图 8、9 可知：当 w(SiO_2) 为 5.5% 时，随着 w(MgO) 的提高，镁质球团的软化开始温度($T_{10\%}$) 总体呈逐渐提高的趋势，软化区间温度变化不大，普通酸性球团的软化温度大致为 1 170 ℃左右，整体上镁质球团的软化开始温度较普通酸性球团高 30～40 ℃，总体软化性能改善。分析认为，Mg^{2+} 与 Fe^{2+} 离子半径相近，二者可以互相取代而形成取代型固溶体，从而使球团矿中 FeO 减少；此外，渣相中 FeO 的熔点也由于 MgO 的固溶而升高。随着 $MgO\cdot Fe_2O_3$ 的还原，渣相中的 MgO 不断提高，导致渣的熔点进一步增大。

3 结 论

(1) 当 w(SiO_2) 为 5.5%，w(MgO) 在 1.4%～2.2% 变化时，w(MgO) 对铁矿粉的成球率、生球强度影响不大，成球率及生球强度均能满足生产要求，此范围内成品球团含水率约为 8%。

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

(2) 当 $w(SiO_2)$ 为 5.5%，$w(MgO)$ 在 1.4%~2.2% 变化时，随着 $w(MgO)$ 的升高，爆裂温度降低 8.95 ℃；当 $w(MgO)$ 为 2.0% 时，爆裂温度达到最低 590 ℃；$w(MgO)$ 继续增加，爆裂温度呈上升趋势。

(3) 当焙烧温度为 1 300 ℃、$w(SiO_2)$ 为 5.5% 时，随着 $w(MgO)$ 的提高，球团矿抗压强度逐渐降低；$w(MgO)$ 每增加 0.1%，抗压强度降低 71.9 N/P。

(4) 随着 $w(MgO)$ 的提高，$RDI_{+3.15\ mm}$ 呈先降低后提高的趋势。$w(MgO)$ 为 1.6% 时，$RDI_{+3.15\ mm}$ 最低，为 90.3%，还原性能变差，$w(MgO)$ 每增加 0.1%，还原性能降低 1.6%。

(5) 当 $w(SiO_2)$ 为 5.5% 时，随着 $w(MgO)$ 的提高，球团的软化开始温度总体呈上升趋势，软化区间温度变化较小，整体上镁质球团的软化开始温度较酸性球团提高 30~40 ℃，总体软化性能得到改善。

(6) 综合认为，球团中 $w(MgO)$ 在 1.8%~2.0% 较为合理。

参考文献

[1] 王新东，李建新，胡启晨. 基于高炉炉料结构优化的源头减排技术及应用[J]. 钢铁，2019，54(12)：104-110；131.

[2] 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(4)：1-5.

[3] 杨双平. 翼钢高炉炉渣的冶金性能研究[J]. 钢铁研究，2008，36(4)：9-20.

[4] 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.

[5] 郭豪. 适宜太钢 4 350 m^3 高炉炉渣的成分[J]. 钢铁研究学报，2008，20(9)：58-63.

[6] 任伟，杨熙鹏，孙俊波，等. 富镁膨润土用于铁矿球团的试验研究[C]//2014 年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会文集(上). 郑州：中国金属学会，2014：436-442.

[7] 周明顺，翟立委，李艳茹. 鞍钢烧结矿适宜 MgO 含量的试验研究[J]. 烧结球团，2005，30(6)：1-4.

[8] 谭德波，节永烈，龙红明. 马钢生产镁质球团的工业试验[J]. 烧结球团，2011，36(2)：28-31.

[9] 周明顺，沈峰满，翟立伟，等. MgO 添加方式对改善球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁，2012，47(4)：14-18.

[10] 周明顺. 鞍钢炼铁原料准备技术应用基础研究[D]. 沈阳：东北大学，2004.

[11] 潘向阳，龙跃，李神子，等. $w(MgO)$ 对熔剂性球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁，2019，54(10)：17-22.

[12] 张树江，蒋中秋，米立光，等. 球团矿添加镁质添加剂的研究[J]. 河北理上大学学报(自然科学版)，2011，33(4)：22-23.

[13] 吴锦文，李贵松，许彦斌. 氧化镁对酸性球团冶金性能的影响[J]. 烧结球团，1983，9(4)；14-22.

[14] 范晓慧，谢路奔，甘敏，等. 高镁球团焙烧特性及其固结强化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版). 2013. 44(2)：449-454.

[15] 青格勒，吴锵，刘洪松，等. 焙烧温度对低硅含镁球团矿还原膨胀率的影响及机理[J]. 中国有色金属学报，2015，25(10)：2 901-2 912.

[16] 侯恩俭，王斌，马文，等. 鞍钢球团矿添加镁质复合粘结剂的研究[J]. 鞍钢技术，2017(4)：10-14.

(上接第 12 页)

[8] 王崇茂. 南钢铁矿粉评价体系研究[D]. 北京：北京科技大学，2013.

[9] 金明芳，李光森，姜鑫，等. 影响烧结过程最初液相形成的因素[J]. 节能，2008(4)：7-9.

[10] 朱德庆，薛钰霄，潘 建，等. 铁矿粉高温反应性能综合指数评价烧结性能[J]. 钢铁，2017，52(8)：19-28.

[11] 李光森. 粘结相对烧结矿强度的影响机理及其合理组分的探讨[D]. 沈阳：东北大学，2008：2-99.

[12] 吴锵，王梦，赵勇，等. 测定铁矿粉同化特性新方法的探索[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2013，34(7)：961-965.

[13] 朱利，吴锵，申威，等. 表征铁矿粉烧结液相流动性能的新方法[J]. 钢铁研究学报，2016，28(6)：13-18.

[14] 陈小敏，吴锵，秦喧柯，等. 基于粘结强度特征数的烧结矿强度评价方法[J]. 重庆大学学报，2018，41(7)：23-29.

[15] 黄德军，吴锵，赵路朋，等. 铁矿粉高温性能特征数的配合性研究[J]. 烧结球团，2016，41(5)：13-18；47.

[16] 付菊英，姜涛，朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙：中南工业大学出版社：1995.

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