碱度对镁质低硅球团矿冶金性能的影响

兰臣臣[1]，卢建光[2]，吕 庆[1]，张淑会[1]，刘 然[1]，李福民[1]
(1. 华北理工大学 a. 冶金与能源学院; b. 教育部现代冶金技术重点实验室，河北 唐山 063210;
2. 河北钢铁集团邯郸分公司，河北 邯郸，056000)

摘要: 为寻找镁质低硅球团矿最优碱度条件，提高球团矿的质量，本文通过对不同碱度下镁质低硅球团矿冶金性能的变化规律进行研究，并对不同碱度下球团矿的矿相结构、元素分布、孔径分布等进行分析，探讨碱度对球团矿综合冶金性能的影响机理，通过灰色关联度法确定球团矿综合性能最佳的碱度条件。结果表明: 随着碱度的增加，球团矿的抗压强度、还原性和还原膨胀指数均先增加后降低，球团矿的抗压强度在碱度为 0.40 ~ 0.80 时相对较好，低温还原粉化性能逐渐劣化，熔化温度区间整体呈降低的趋势，料层最大压差和综合透气性指数均逐渐降低，这表明高碱度球团的软熔滴落性能优于低碱度球团。在试验条件下，碱度为 0.60 时球团矿的综合性能最佳。

关键词: 球团矿; 碱度; 冶金性能; 矿相结构; 孔隙率
中图分类号: TF046.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000 - 8764(2022)04 - 0049 - 09
doi: 10.13403/j.sjqt.2022.04.053

Effect of alkalinity on metallurgical properties of magnesian low-silica pellets

LAN Chenchen[1], **LU Jianguang**[2], **LÜ Qing**[1], **ZHANG Shuhui**[1], **LIU Ran**[1], **LI Fumin**[1]
(1. *North China University of Science and Technology a. School of Metallurgy and Energy; b. Key Laboratory of Modern Metallurgical Technology, Ministry of Education, Tangshan* 063210, *Hebei, China*; 2. *Handan Branch, Hebei Iron and Steel Group, Handan* 056000, *Hebei, China*)

Abstract: In order to find the optimal alkalinity conditions of magnesian low-silica pellets and improve the quality of pellets, the influence mechanism of alkalinity on the comprehensive metallurgical performance of pellets is discussed by studying the variation law of the metallurgical properties of magnesian low-silicon pellets at different alkalinity levels, and the ore phase structure, element distribution and pore size distribution of pellets under different alkalinity levels are analyzed, while the best alkalinity conditions for the comprehensive performance of pellets are determined by the grey correlation degree method. The results show that the compressive strength, reducibility and reduction expansion index of pellets increase and then decrease with the increase of alkalinity, and the compressive strength of pellets is relatively good at 0.40 ~ 0.80, the low temperature reduction pulverization performance is gradually deteriorated, the melting temperature interval shows an overall decreasing trend, and the maximum pressure difference of the material layer and the integrated permeability index are both gradually decreased, which indicates that the soft melting drip performance of the high alkalinity pellets is better than that of the low alkalinity pellets. Under the test conditions, the overall performance of the pellets is best when the alkalinity is 0.60.

Key words: pellets; alkalinity; metallurgical properties; mineral phase structure; porosity

球团矿作为人造富矿之一，由于其特有的冶金性能而成为当今高炉炉料中不可缺少的重要组成部分。与烧结矿相比，球团矿具有品位高、机械强度高、粒度小而匀、工序能耗低、

收稿日期: 2021 - 12 - 20; **修回日期**: 2022 - 03 - 21
基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2021209046&E2019209424&E2020209208); 唐山市科技计划项目(21130209C)
作者简介: 兰臣臣(1989—)，男，博士，讲师，从事炼铁理论与工艺方面的研究。
通信作者: 吕 庆(1954—)，男，博士，教授，从事炼铁理论与工艺方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

污染物排放量少、冶金性能优良等优势[1-3]。高炉炼铁在目前的环保压力下，提高球团矿的使用量已经成为了势在必行的发展趋势。随着我国钢铁事业的发展，国内铁矿石远远不能满足高炉炼铁的需求，国外铁矿大量使用的同时使得高炉原料中 $w(Al_2O_3)$ 升高，当 $w(Al_2O_3)$ 达到一定水平时，高炉生产必须增加 $w(MgO)$，以保证高炉炉渣具有良好的冶金性能[4-5]。目前，大多数企业把高炉所需要的 MgO 通过烧结矿加入到高炉。但是，烧结矿中 $w(MgO)$ 升高将影响烧结矿的质量和产量[6-7]。为了保证烧结矿质量，MgO 加入到球团矿中既能保证高炉炉渣对 $w(MgO)$ 的需求，又能避免烧结矿质量下降的问题，也能保证球团矿的冶金性能[8-11]，因此镁质球团矿得到了迅速发展。

同时，为满足高炉冶炼球团矿使用量的增加和高炉炉料结构多样化的要求，碱性球团矿的需求也在增加[12]。碱度的增加将使得球团矿内矿相组成和固结机理发生较大的变化，科研工作者也做了一些研究。DWARAPUDI[13] 等指出：当 $w(MgO)$ 为0%时，球团矿的还原膨胀性能整体呈降低的趋势；当 $w(MgO)$ 为 1.5%时，球团矿还原膨胀性能的变化趋势趋于平缓，有小幅度的降低。范建军[14] 在不考虑 $w(MgO)$ 影响的条件下，研究了碱度对细粒级铁矿粉球团性能的影响，指出当碱度为 1.2 时抗压强度达到最大值，当碱度为 0.8 时还原膨胀率达到最大值。ILJANA 等[15] 研究了在低 $w(MgO)$ 条件下石灰石对球团矿性能的影响，指出石灰石的加入提高了球团矿的还原性，还原过程中的膨胀率和软熔温度区间增加，冷态强度降低。张元波等[16] 研究了碱度对高硅镁质球团矿质量影响，指出碱度增加不仅能有效地改善镁质球团矿的抗压强度，而且可以进一步改善球团矿的冶金性能指标。对优良的碱性球团矿应具有较低的 $w(SiO_2)$ 和合适的 $w(MgO)$，且球团矿的综合冶金性能需要达到最佳[12,17]。

基于此，本文在碱度为 0.17～1.20 的条件下，研究其对低硅镁质球团矿综合冶金性能的影响规律及机理，并通过灰色关联度法得到最佳碱度值，为碱性镁质低硅球团矿的应用提供理论参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验采用秘鲁铁精矿粉、庙沟铁精矿粉、生石灰以及菱镁石粉配制不同碱度的球团矿，固定 $w(SiO_2)$ 为 3.50%，$w(MgO)$ 为 2.50%，用膨润土作为造球黏结剂，其配入量固定为2%，试验原料的主要化学成分如表1所示，膨润土性能分析如表2所示。

试验采用圆盘造球机造球，其转速为 20 r/min，倾斜角度为45°，造球水分为8.0%，造球时间为12 min。将得到的生球进行预热和焙烧，预热温度为 900 ℃，预热时间为 15 min，焙烧温度为1 250 ℃，焙烧时间为20 min。在整

表1 试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main compositions of raw materials %

原料名称	TFe	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	S	P	K_2O	Na_2O	TiO_2
秘鲁铁精粉	69.19	0.33	1.47	0.44	0.55	30.60	—	—	—	—	—
庙沟铁精粉	66.30	0.55	6.17	0.57	0.50	27.14	—	—	—	—	—
生石灰	—	80.00	2.90	0.18	2.85	—	0.01	0.03	—	—	—
菱镁石粉	—	3.00	2.00	0.24	38.50	—	0.04	0.06	—	—	—
膨润土	3.38	7.64	54.48	13.31	2.34	—	—	—	1.90	2.18	0.54

表2 膨润土的物理性能

Table 2 Physical properties of bentonite

蒙脱石质量分数/%	胶质价/(mL·g^{-1})	膨胀容/(mL·g^{-1})	吸水比/%	吸蓝量/(mol·g^{-1})
50.77	33.42	21	28.57	0.550 0

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

个预热焙烧过程中，通入 5 L/min 的空气。不同碱度球团的配矿方案及生球质量如表 3 所示。球团矿碱度[$R = w(CaO)/w(SiO_2)$]的变化范围为 0.17 ~ 1.20(其中，0.17 为自然碱度)，由酸性球团矿逐渐变化至碱性球团矿，变化步长为 0.20。

表 3　不同碱度球团的配矿方案及生球质量

Table 3　Ore blending scheme and quality of pellets with different basicity

方案编号	配比(质量分数)/%					落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})
	秘鲁铁精粉	庙沟铁精粉	生石灰	菱镁石粉	膨润土		
1#	67.20	25.80	0	5.00	2.00	4.30	9.18
2#	66.30	26.00	0.80	4.90	2.00	4.20	7.23
3#	66.00	25.50	1.60	4.90	2.00	4.40	6.36
4#	66.00	24.70	2.50	4.80	2.00	4.80	8.15
5#	65.70	24.20	3.40	4.70	2.00	4.90	8.25
6#	65.40	23.70	4.20	4.70	2.00	4.50	7.01

1.2　试验方法

(1) 抗压强度。采用全自动球团抗压强度测试机对球团矿的抗压强度进行检测。每组数据检测 20 个经过焙烧冷却后的球团矿(粒度为 10.0 ~ 12.5 mm)，其中去掉该组数据中的最小值和最大值，其余数据的平均值为该组球团矿的抗压强度。

(2) 还原性。根据《铁矿石还原性的方法》(GB/T 13241—2017) 对球团矿的还原性能进行检测。检测方法：将 500 g 粒度为 10.0 ~ 12.5 mm 的球团矿放入中温炉内进行恒温还原，试验气体为 CO 和 N_2 的混合气体，气体流速为 15 L/min，CO 与 N_2 的体积分数比为 3∶7，反应温度为 900 ℃，反应时间为 3 h。还原度指数(*RI*)计算方法如下所示。

$$RI = \left(\frac{0.11W_1}{0.430W_2} + \frac{m_1 - m_t}{m_0 \times 0.43W_2}\right) \times 100\% \tag{1}$$

式中：m_0 为试样的质量，g；m_1 为还原开始前试样质量，g；m_t 为还原 t min 后试样的质量，g；W_1 为试验前试样中 FeO 质量分数，%；W_2 为试验前试样的 TFe 质量分数，%。

(3) 还原粉化性。根据《铁矿石低温粉化试验静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—91) 进行球团矿的低温还原粉化试验。试验方法：将 500 g 粒度为 10.0 ~ 12.5 mm 的球团矿在 500 ℃下进行恒温还原，试验气体为 CO_2、CO 和 N_2 的混合气体，气体流速为 15 L/min，CO_2、CO 和 N_2 的体积分数比为 1∶1∶3，反应时间为 1 h。还原后的试样在纯 N_2 保护下冷却至室温，称重后装入尺寸为∅130 mm × 200 mm 的转鼓，以 10 r/min 的速度转鼓 30 min，取出后分别用 3.15 mm 的方孔筛进行筛分分离，将试样中大于 3.15 mm 的质量百分比以 $RDI_{+3.15\ mm}$ 表示。

$$RDI_{+3.15\ mm} = \frac{m_3}{m_2} \times 100\% \tag{2}$$

式中：m_2 为还原后转鼓前试样的质量，g；m_3 为留在 3.15 mm 筛上的试样质量，g。

(4) 还原膨胀性。根据《球团矿相对自由膨胀指数的测定方法》(GB/T 13240—91) 进行球团矿的还原膨胀性能测定。随机取 10.0 ~ 12.5 mm 的无缝球 18 个，将球团每层 6 个呈自由状放在容器上进行恒温还原。反应温度为 900 ℃，试验气体为 CO 和 N_2 的混合气体，气体流速为 15 L/min，CO 与 N_2 的体积分数比为 3∶7，反应时间为 1 h。球团矿还原结束后，用氮气冷却后从反应管内取出并测定其体积。还原膨胀性指数(RSI)计算方法如下。

$$RSI = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中：V_0 和 V_1 分别为还原前后球团矿的体积，m^3。

(5) 软熔性能。在石墨坩埚中先装入 20

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

mm 焦炭，再装入 50 mm 球团矿，最后再装入 20 mm 焦炭。将坩埚放入反应炉中，加荷重 1 kg/cm^2。900 ℃之前以 10 ℃/min 的速率升温，900 ~ 1 100 ℃以 2 ℃/min 的升温速率升温，超过 1 100 ℃后以 5 ℃/min 的升温速率升温直至试样升温至预定温度。整个升温过程中往样品表面通入 N_2 与 CO 混合气体，CO 与 N_2 的体积分数比为 3∶7，流量为 5 L/min。试验过程中实时记录料层的上下压力差的变化。计算软熔带综合透气性指数 S(kPa·℃)。S 越大，表明球团矿的软熔性能越差。

$$S = \int_{T_s}^{T_d} (\Delta P_T - \Delta P_S)\, dT \quad (4)$$

式中：ΔP_T 是温度 T_d 下的压差，kPa；ΔP_S 是温度 T_s 下的压差，kPa。

2 结果与讨论

2.1 球团矿抗压强度

碱度对球团矿抗压强度的影响如图 1 所示。由图 1 可知，随着碱度的增加，球团矿的抗压强度先增加后降低。当碱度为 0.40 时，球团矿的抗压强度达到最大值。当碱度为 0.17 时，球团矿的抗压强度为 2 635 N/P；当碱度增加至 0.40 时，球团矿的抗压强度增加至 3 087 N/P，增加了 452 N/P，增加幅度较大。当碱度继续增加至 1.01 时，球团矿的抗压强度缓慢降低，球团矿的抗压强度降低至 2 864 N/P，降低了 223 N/P。当碱度继续增加至 1.20 时，球团矿的抗压强度迅速降低，球团矿的抗压强度降低至 2 143 N/P，降低了 721 N/P，降低幅度较大。

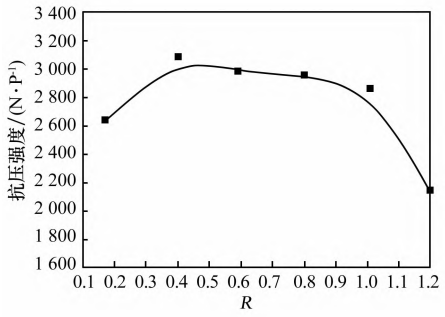


图 1 碱度与球团矿抗压强度的关系

Fig. 1 Relationship between compressive strength of pellets and *R*

2.2 球团矿还原及还原膨胀性能

碱度对球团还原度指数(*RI*)的影响如图 2 所示。由图 2 可知，随着球团矿碱度的增加，球团矿的 *RI* 先增加后降低。当碱度为 0.59 时，球团矿的 *RI* 达到最大值。当碱度为 0.17 时，球团矿的 *RI* 为 71.89%；当碱度增加至 0.59 时，球团矿的 *RI* 增加至 79.01%，增加了 7.12%，增加幅度较大。当碱度继续增加至 1.20 时，球团矿的 *RI* 逐渐降低，球团矿的 *RI* 降低至 69.28%，降低了 9.73%，降低幅度较大。

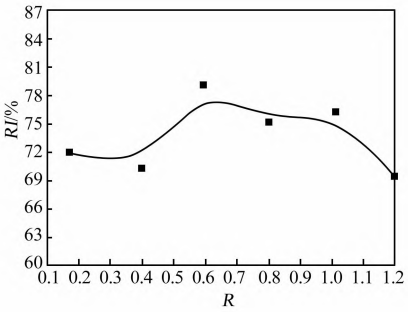


图 2 不同碱度下球团矿的 *RI*

Fig. 2 *RI* of pellets with different *R*

碱度对球团矿还原膨胀指数(*RSI*)的影响如图 3 所示。由图 3 可知，随着球团矿碱度的增加，*RSI* 呈先增加后降低的趋势，当碱度为 0.40 时，*RSI* 达到极值。当碱度为 0.17 时，*RSI* 为 11.85%；当碱度增加至 0.40 时，*RSI* 增加至 24.11%，增加了 12.26%，增加幅度较大，对高炉生产将存在较大的影响。当碱度继续增加至 1.20 时，*RSI* 逐渐降低至 12.75%，降低了 11.36%，此时其对高炉生产的影响大幅度减小。

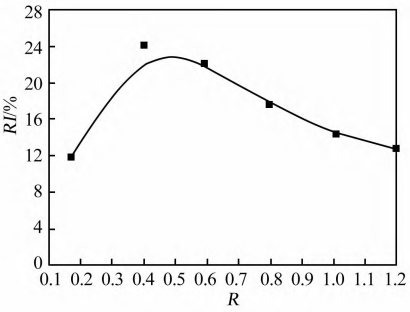


图 3 不同碱度下球团矿的 *RSI*

Fig. 3 *RSI* of pellets with different *R*

碱度对球团矿 $RDI_{+3.15\ mm}$ 的影响如图 4 所示。由图 4 可知，随着球团矿碱度的增加，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$RDI_{+3.15\ mm}$整体呈降低的趋势，但在碱度为 0.40 至 0.80 时，存在小幅度的增加。当碱度由 0.17 增加至 1.20 时，$RDI_{+3.15\ mm}$由 97.11% 降低至 86.66%，降低了 10.45%，降低幅度较大。这表明碱度对球团矿的 $RDI_{+3.15\ mm}$有较强的影响。

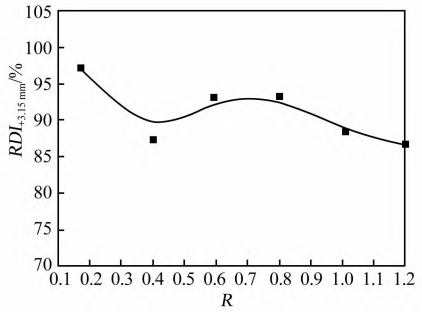
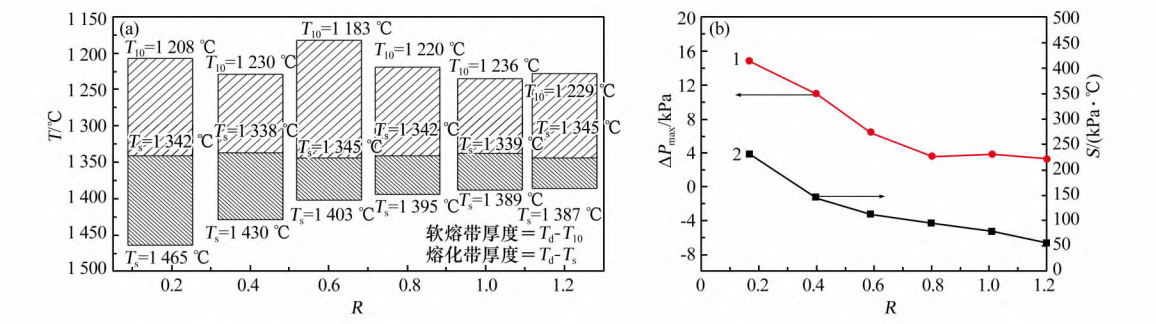


图 4　不同碱度下球团矿的 $RDI_{+3.15\ mm}$

Fig. 4　$RDI_{+3.15\ mm}$ of pellets with different R

2.3　球团矿的软熔性能

球团矿碱度对软熔性能的影响如图 5 所示。由图 5 可知，球团矿碱度为 0.17 ~ 1.20，炉料的 T_{10}（料层收缩 10% 时的温度）随碱度的升高整体呈先降低后升高，在碱度为 0.60 时 T_{10}达到最小值，为 1 183 ℃。随着碱度的增加，T_s（压差陡升温度，即熔化开始温度）变化幅度较小，T_d（发生滴落时的温度）逐渐降低，使得球团矿的熔化温度区间逐渐降低。说明球团矿碱度对炉料的熔化性能有较明显的影响，熔化温度区间的减小有利于提高软熔带的透气性。随着碱度的增加，ΔP_{max}逐渐降低，当碱度超过 0.80 后，ΔP_{max}的变化幅度减小。这说明随碱度的升高，软熔带气体压力损失降低，这为高炉顺行提供了保障。S 随碱度的增加而降低，软熔带的透气性能得到了明显的改善。上述分析表明，高碱度球团矿的软熔滴落性能优于低碱度球团。



（a）软熔带特征温度；（b）最大压差

1—ΔP_{max}；2—S。

图 5　碱度对球团矿软熔性能的影响

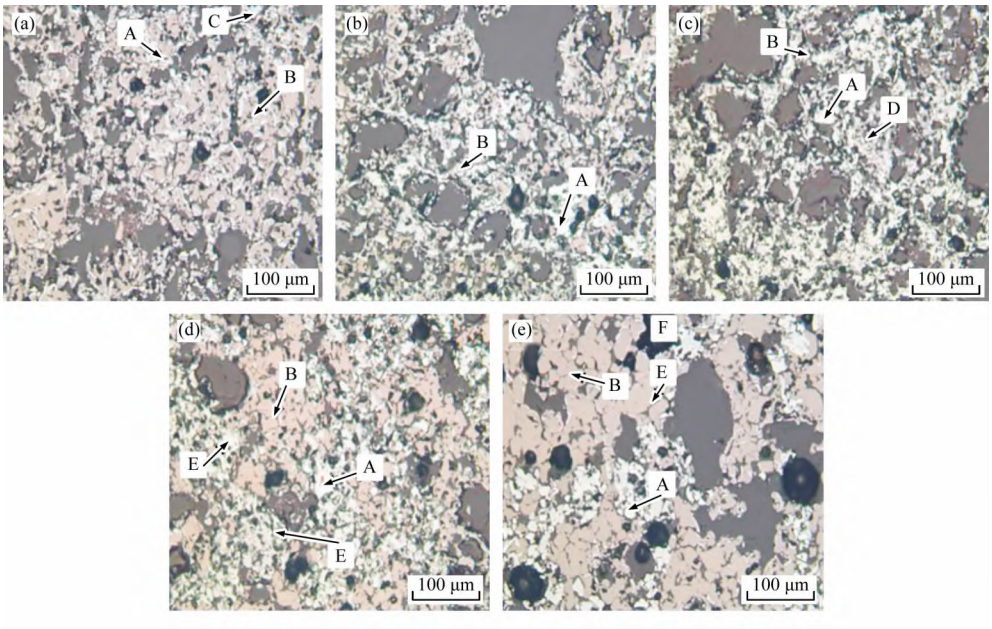
Fig. 5　Effect of basicity on softening-melting properties of pellets

2.4　机理探讨

为了研究碱度对球团矿冶金性能的影响机理，对球团矿的矿相结构及显微形貌进行分析，得到不同碱度下球团矿的矿相结构以及各矿相结构的体积占比如图 6 和表 4 所示。球团矿的元素分布如图 7 所示。由图 6 和表 4 可知，随着碱度的增加，球团矿中的铁酸钙相先增加后降低，在碱度为 0.80 时，铁酸钙体积分数达到最大值，铁酸镁相逐渐消失，硅酸盐相逐渐增加。同时在碱度为 0.80 时，球团矿的矿相结构中赤铁矿的体积分数最大，这表明在该条件下球团矿的氧化最为充分。由图 7 可知，Ca、Si 元素的分布相重合，表明 CaO 主要与 SiO_2 相结合生产硅酸盐类物质。Ca、Si 元素主要分布于铁氧化物的连晶之间，使得铁氧化物的连晶未全部相连，对其有明显的阻碍作用。碱度较低时，Mg 元素的分布相对均匀，其主要与 Fe 氧化物相结合。但是随着碱度的不断增加，Mg 元素逐渐熔入 CaO-SiO_2 类渣相中。Al 元素较少，一部分均匀分布在球团内部，还有一部分聚集在 CaO-SiO_2 类黏结相中。随着碱度的增加，铁氧化物连晶间的 CaO-SiO_2 类黏结相增加，对赤铁矿连晶的阻碍作用增强，使得球团矿的强度降低。

使用汞侵入法（采用压汞仪）来测定球团矿的孔径分布及孔隙率。不同碱度下球团矿的孔径分布及孔隙率如图8所示。由图8可知，随

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



碱度：(a) 0.40；(b) 0.59；(c) 0.80；(d) 1.01；(e) 1.20

A—赤铁矿；B—磁铁矿；C—铁酸镁；D—铁酸钙；E—硅酸盐；F—孔洞。

图6 不同 *R* 下球团矿的矿相结构

Fig. 6 Mineralogical constitution of pellets with different *R*

表4 球团矿矿相组成(体积分数)

Table 4 Composition of pellets mineralogical phase

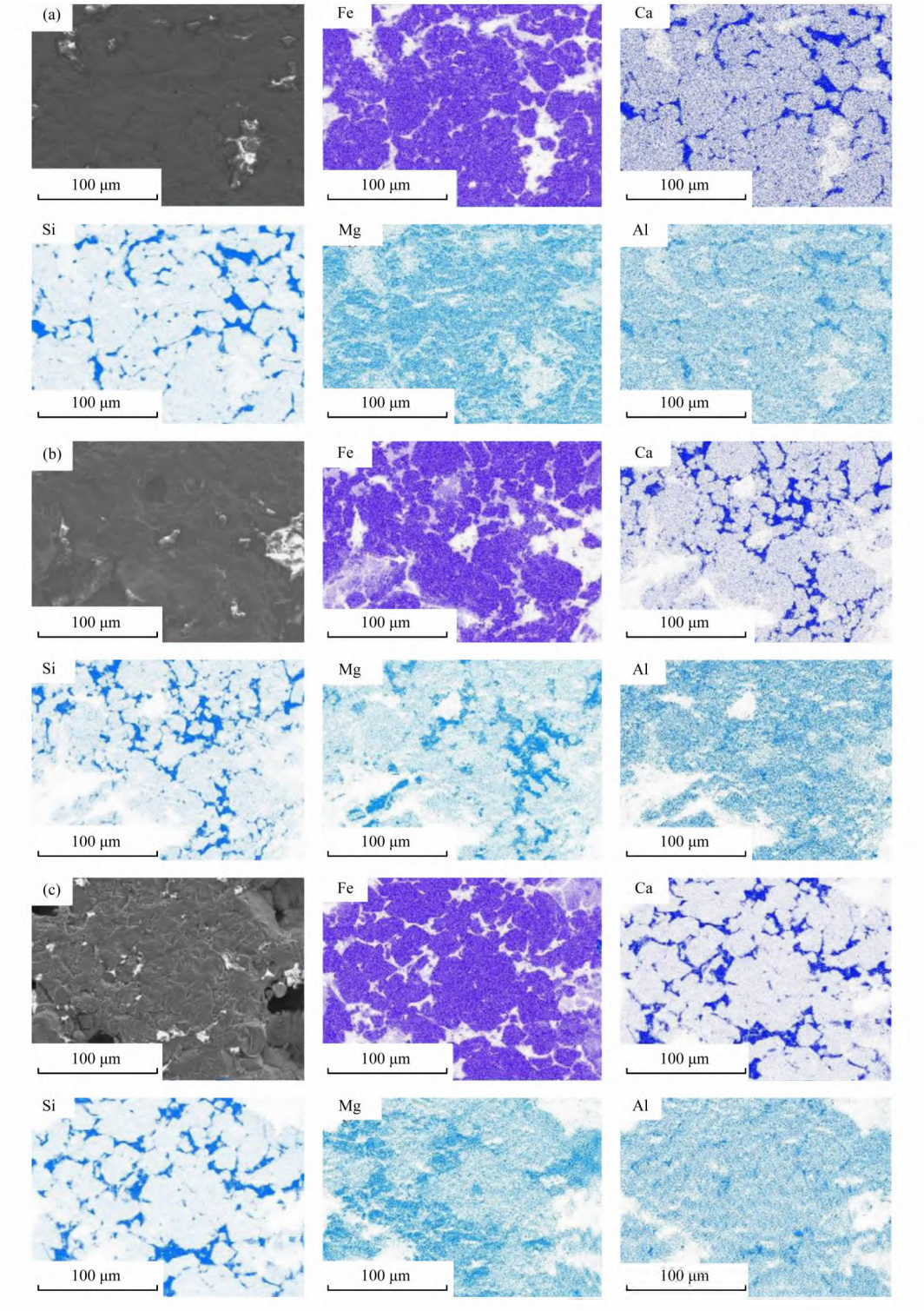
%

R	磁铁矿	赤铁矿	铁酸镁	铁酸钙	硅酸盐	气孔率
0.40	20~23	13~15	7~9	3~5	5~7	20~25
0.59	10~13	17~20	4~6	5~8	7~10	20~25
0.80	5~7	23~25	1~4	8~12	8~12	25~30
1.01	20~23	13~15	—	5~8	15~17	25~32
1.20	25~27	11~13	—	3~6	18~20	27~32

着碱度的提高，球团矿的孔隙率降低，这与上述分析一致。当碱度为0.17时，球团矿孔隙的孔径主要分布于0~2 μm和6~12 μm，球团矿的整体孔隙率为45.11%。当碱度增加至0.40时，孔径为0~2 μm的孔隙大幅度减少，几乎全部消失，6~12 μm的孔隙的占比存在小幅度的增加，孔隙率降低至25.12%，降低了19.99%，孔隙率的整体降低幅度较大。当碱度继续增加时，球团矿的孔径主要分布在6~12 μm，且随着碱度的增加6~12 μm的孔隙占比逐渐降低。当碱度由0.40逐渐增加至1.20时，球团矿的整体孔隙率逐渐降低至19.79%，孔隙率降低了5.33%，孔隙率的变化幅度较碱度为0.17~0.40时有所降低。

综上所述，由于碱度的增加，球团矿内部铁酸钙的质量分数增加，同时也促进了球团矿焙烧过程氧化率的提高，这改善了球团矿的还原性能，同时劣化了球团矿还原膨胀性能。由于铁氧化物的氧化结晶充分，同时铁酸钙的黏结强度较高，球团矿的致密化度增加，使得球团矿在碱度为0.4~0.8时的抗压强度相对较高。随着碱度的继续升高，液相量增加，球团矿的致密化程度不断增加，使得球团矿中铁氧化物的氧化率降低，铁酸钙质量分数降低，CaO和MgO大多与SiO_2形成渣相，使得球团矿内硅酸盐类物质快速增加，且这些液相的黏结强度相对较低，阻碍了Fe_2O_3晶粒的聚集长大，使得球团矿的抗压强度和还原性能均被劣化，但是还原性能的降低使得还原膨胀性能得到了一定程度的改善。球团矿的低温还原粉化性能主要受其还原性、赤铁矿质量分数和结晶强度的影响。球团矿碱度由0.17增加至0.8时，球团矿内部的赤铁矿质量分数增加，且还原性整体呈升高的趋势，使得球团矿的低温还原粉化性能劣化，虽然在碱度为0.4时存在波动，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



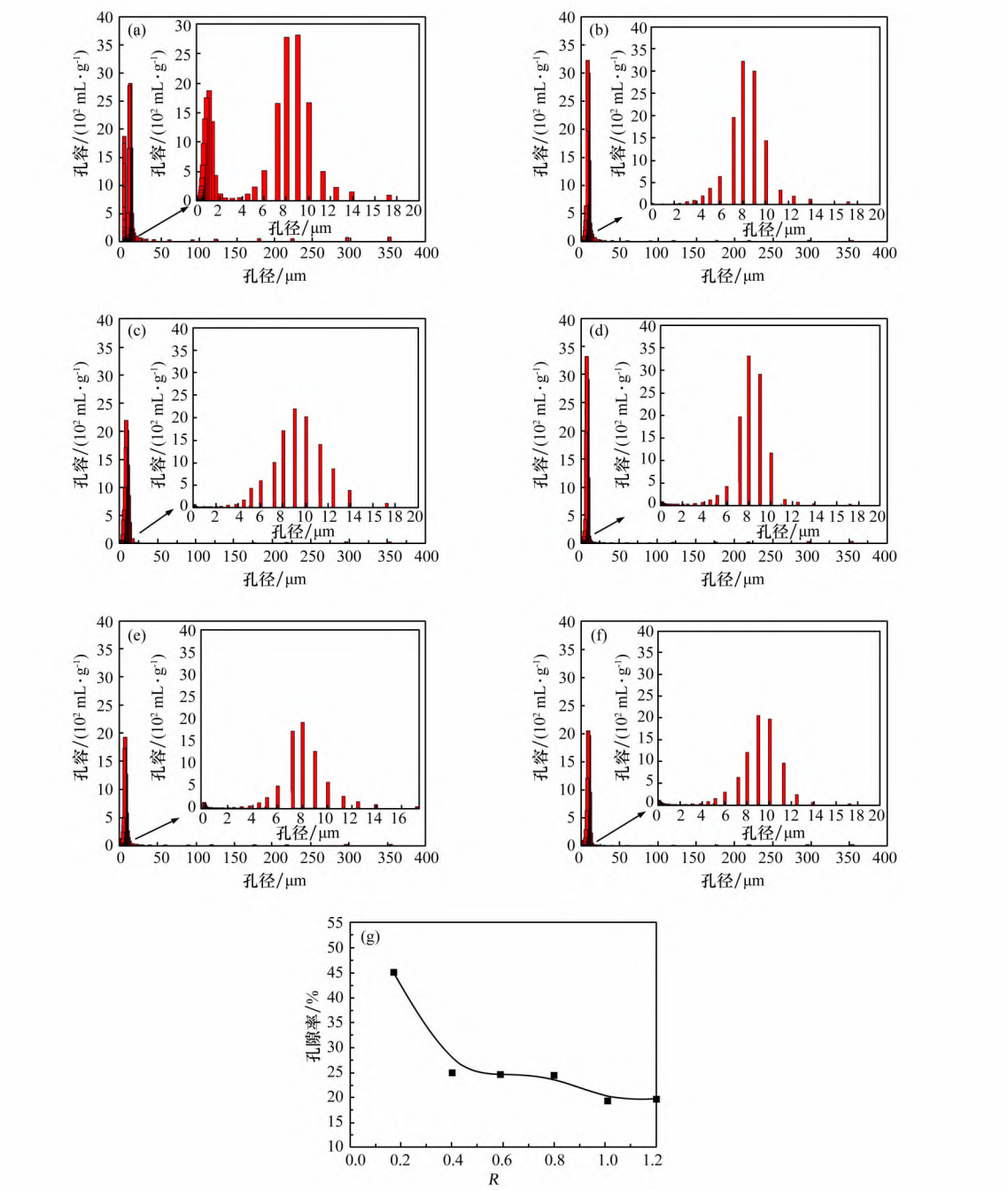
碱度：(a) 0.40；(b) 0.80；(c) 1.20

图 7　不同 *R* 下球团矿的微观形貌及元素分布

Fig. 7　Micro morphology and element distribution of pellets with different *R*

但其 $RDI_{+3.15\ mm}$ 整体呈降低的趋势；当球团矿碱度继续增加时，由于球团矿的结晶强度降低，使得其抵抗还原过程中由于晶格体积膨胀产生的应力的能力大幅降低，进而使得球团矿的还原粉化现象进一步趋于严重。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



碱度：(a) 0.17；(b) 0.40；(c) 0.59；(d) 0.80；(e) 1.01；(f) 1.20；(g) 孔隙率

图 8 不同 *R* 球团矿的孔径分布及孔隙率

Fig. 8 Pore size distribution and porosity of pellets with different *R*

3 最优碱度的选择

加权灰色关联度法是根据数列间的相似程度来判断关联程度。设参考数列为 X_0，被比较数列为 X_t，由此得到 X_0 与 X_t 的关联度公式：

$$f_t = \sum_{j-1}^{n} \varepsilon_t(j)\, w_j / \sum_{j-1}^{n} w_j \qquad (5)$$

式中：$\varepsilon_t(j)$ 为关联系数；ω_j 为指标权重；n 为数列元素个数，个；j 取 1，2，…，n。

根据上式 f_t 值的大小，可得到各方案的优劣。在确定最优碱度时，选择抗压强度、还原性、还原粉化、膨胀率和综合透气性指数对球团矿进行综合评价，赋予球团矿 5 个指标的权

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

重值均为 0.2。由式(5)计算出 X_t 与 X_0 的关联度，根据加权灰色关联度法确定最佳碱度。得到关联度的大小排序如表 5 所示。关联度大小排序即为试验方案优劣排序。

通过加权灰色关联度法的计算，得到在试验条件下碱度为 0.60 时球团矿的综合性能最佳。

表 5　球团矿指标排序

Table 5　Index sequence of pellets

球团编号	关联度	排序
1#	0.650	2
2#	0.506	6
3#	0.671	1
4#	0.626	4
5#	0.640	3
6#	0.574	5

4　结　论

(1) 随着球团矿中碱度的增加，球团矿的抗压强度先增加后降低。当碱度为 0.40 ~ 0.80 时，球团矿的抗压强度相对较好，球团矿的还原性和还原膨胀指数先增加后降低，低温还原粉化性能逐渐劣化。随着球团矿碱度的增加，熔化温度区间整体呈降低的趋势，料层的最大压差和综合透气性指数均逐渐降低，表明高碱度球团的软熔性能优于低碱度球团。

(2) 球团矿的碱度增加改变了矿相组成，铁酸钙质量分数先增加后降低，硅酸盐类物质逐渐增加，铁酸镁质量分数逐渐降低，硅酸盐类黏结相在 Fe_2O_3 晶粒间聚集，阻碍铁氧化物氧化与再结晶，同时液相量的增加也使得球团矿的致密化程度增加。这些变化综合作用于球团矿，影响其冶金性能的变化。

(3) 通过加权灰色关联度法的计算，在试验条件下碱度为 0.60 时球团矿的综合性能最佳。

参考文献:

[1] 王维兴. 2017 年中钢协高炉炼铁系统能耗现状及节能潜力分析[J]. 冶金管理,2018(4):49 - 55.
WANG Weixing. Energy consumption status and energy saving potential analysis of blast furnace ironmaking system of CISA in 2017[J]. Metallurgical Management,2018(4):49 - 55.

[2] 许满兴. 大力推进中国高品质球团矿生产与发展[J]. 矿业工程,2021,19(2):43 - 48.
XU Manxing. Vigorously promoting production and development of high-quality pellets in China[J]. Mining Engineering, 2021,19(2):43 - 48.

[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.
WANG Weixing. Increasing the proportion of pellets in blast furnace burden and promoting energy conservation and emission reduction[J]. Metallurgical Management,2018(9):53 - 58.

[4] LI Tingle, SUN Changyu, LIU Xueyan, et al. The effects of MgO and Al_2O_3 behaviours on softening-melting properties of high basicity sinter[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2017, 45(2):755 - 763.

[5] 沈峰满,郑海燕,姜鑫,等. 高炉炼铁工艺中 Al_2O_3 的影响及适宜 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 的探讨[J]. 钢铁,2014,49(1):1 - 6.
SHEN Fengman,ZHENG Haiyan,JIANG Xin,et al. Influence of Al_2O_3 in blast furnace smelting and discussions on proper $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ ratio[J]. Iron and Steel,2014,49(1):1 - 6.

[6] ZHANG Mingming,ANDRADE Marcelo W. Effect of MgO and basicity on microstructure and metallurgical properties of iron ore sinter[J]. Characterization of Minerals Metals & Materials,2016:167 - 174.

[7] 范晓慧,李文琦,甘敏,等. MgO 对高碱度烧结矿强度的影响及机理[J]. 中南大学学报:自然科学版,2012,43(9):3325 - 3330.
FAN Xiaohui,LI Wenqi,GAN Min,et al. Influence and mechanism of MgO on strength of high basicity sinter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2012, 43(9):3325 - 3330.

[8] MERAJ M,PRAMANIK S,PAL J. Role of MgO and its different minerals on properties of iron ore pellet[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2016,69(6):1141 - 1153.

[9] ZHAO Wei,CHU Mansheng,Feng Cong,et al. Effect of MgO addition on the metallurgical properties of the vanadium-titanium pellet with simulating blast furnace conditions[J]. Ironmaking & Steelmaking,2020,47(4):388 - 397.

[10] LI Jie,An Haifei,LIU Weixing,et al. Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2020(3):239 - 247.

(下转第 70 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

SUN Zengqi, XU Hongbin. Fuzzy-neural network based on T-S model [J]. Journal of Tsinghua University, 1997(3): 77 – 81.

[12] 桂卫华,阳春华. 复杂有色冶金生产过程智能建模、控制与优化[M]. 北京:科学出版社,2010.
GUI Weihua, YANG Chunhua. Intelligent modeling, control and optimization of complex non-ferrous metallurgical production process [M]. Beijing: Science Press, 2010.

[13] ZHANG R, TAO J, GAO F. A New Approach of Takagi-Sugeno fuzzy modeling using an improved genetic algorithm optimization for oxygen content in a coke furnace [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(22): 6465 – 6474.

[14] LIN Y Y, CHANG J Y, LIN C T. Identification and prediction of dynamic systems using an interactively recurrent self-evolving fuzzy neural network [J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2013, 24(2): 310 – 321.

[15] HUANG X, HE L, ZHAO H, et al. Information gain-based modular fuzzy neural network to forecast rainstorm [J]. Water Science & Technology Water Supply, 2020, 21(6): 114 – 127.

[16] ZHANG S, JIANG H, YIN Y, et al. The prediction of the gas utilization ratio based on TS fuzzy neural network and particle swarm optimization [J]. Sensors, 2018, 18(2): 625.

[17] SGI W, LIU D, CHENG X, et al. Particle swarm optimization-based deep neural network for digital modulation recognition [J]. IEEE Access, 2019, 7(99): 104591 – 104600.

[18] 宋君,任廷志,王奎越,等. 基于CF-PSO-SVM的冷连轧非稳态工作辊弯辊模型优化[J]. 钢铁,2021,56(11):78 – 86.
SONG Jun, REN Ting, WANG Kui, et al. Optimization of work roll bending model in unsteady process of tandem cold rolling based on CF-PSO-SVM [J]. Iron and Steel, 2021, 56(11): 78 – 86.

[19] 尹学,李绍铭,闫成忍. 基于GA-PSO-BP神经网络的烧结终点预测模型[J]. 烧结球团,2020,45(6):35 – 39.
YIN Xue, LI Shaoming, YAN Chengren. Prediction model of BTP based on GA-PSO-BP neural network [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(6): 35 – 39.

[20] 徐雪玉,刘琼. 基于改进SVM的淘洗机选矿质量在线预测研究[J]. 烧结球团,2021,46(2):89 – 94.
XU Xueyu, LIU Qiong. Research on online prediction of washing machine beneficiation quality based on improved SVM [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 89 – 94.

[21] 崔桂梅,李静,张勇,等. 基于T-S模糊神经网络模型的高炉铁水温度预测建模[J]. 钢铁,2013,48(11):11 – 15.
CUI Guimei, LI Jing, ZHANG Yong, et al. Prediction modeling study for blast furnace hot metal temperature based on T-S fuzzy neural network model [J]. Iron and Steel, 2013, 48(11): 11 – 15.

[22] AHN C K. Delay-dependent state estimation for T-S fuzzydelayed Hopfield neural networks [J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(3): 483 – 489.

[23] RJH A, ABK B. Another look at measures of forecast accuracy-science direct [J]. International Journal of Forecasting, 2006, 22(4): 679 – 688.

(上接第57页)

[11] 张淑会,王宝勇,兰臣臣,等. 球团矿化学成分控制现状及展望[J]. 钢铁,2020,55(8):19 – 26.
ZHANG Shuhui, WANG Baoyong, LAN Chenchen, et al. Prospects and present status of pellets chemical composition control [J]. Iron and Steel, 2020, 55(8): 19 – 26.

[12] DWARAPUDI S, GHOSH T K, SHANKAR A, et al. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets [J]. International Journal of Mineral Processing, 2011, 99: 43 – 53.

[13] 范建军,郭宇峰,臧龙,等. 碱度对细粒级铁矿粉球团性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2019,31(5):440 – 445.
FAN Jianjun, GUO Yufeng, ZANG Long, et al. Effect of basicity on properties of pellets produced by ultra fine-sized iron concentrate [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(5): 440 – 445.

[14] ILJANA M, KEMPPAINEN A, PAANANEN T, et al. Effect of adding limestone on the metallurgical properties of iron ore pellets [J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 141: 34 – 43.

[15] 张元波,陈茜钧,苏子键,等. 碱度对高硅镁质球团矿质量影响的研究[J]. 烧结球团,2020,45(5):39 – 43.
ZHANG Yuanbo, CHEN Xijun, SU Zijian, et al. Research on effect of basicity on properties of high-silica magnesium pellets [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 39 – 43.

[16] LU Jianguang, LAN Chenchen, LÜ Qing, et al. Effects of SiO_2 on the preparation and metallurgical properties of acid oxidized pellets [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(4): 629 – 636.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net