还原温度对球团还原膨胀性能的影响

马成伟[1]，左海滨[2]，曹 宇[1]，田筠清[3]，王 伟[2]，谷端跃[1]
（1. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司，河北 唐山 063210；2. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京 100083；3. 首钢集团有限公司技术研究院，北京 100043）

摘要：鉴于还原温度对不同类型球团还原膨胀行为有显著差异，本文通过研究还原温度对球团还原膨胀性能的影响，采用可视化卧式电阻炉在 900～1 200 ℃温度条件下对不同类型球团进行还原膨胀率检测。结果表明：在还原过程中，球团均出现还原膨胀率开始逐步升高至峰值再降低的过程；在 900～1 200 ℃条件下四种球团还原 1 h 后最大还原膨胀率的排序：普通碱性球＞含镁碱性球＞普通酸性球＞低钛酸性球；而随着还原温度由 900 ℃逐步提高至 1 200 ℃时，碱性球团发生恶性膨胀。在还原 41 min、温度为 1 105 ℃时，普通碱性球的还原膨胀率达到最大值 98.13%；在还原 37 min、温度为 1 082 ℃时，含镁碱性球的还原膨胀率达到最大值 84.10%。在高温还原条件下，碱性球的外观出现明显的裂纹和粉化现象，外层出现大量的铁晶须和铁晶粒。本文研究结果对认识不同类型球团在高炉内高温条件下的实际还原膨胀变化规律具有一定指导意义，可为高配比球团矿冶炼研究和生产调整提供科学依据。

关键词：球团；还原膨胀率；还原温度；微观形貌
中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0075－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.031

Effect of reduction temperature on pellets reduction expansion performance

MA Chengwei[1], ZUO Haibin[2], CAO Yu[1], TIAN Junqing[3], WANG Wei[2], GU Duanyue[1]
(1. Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063210, Hebei, China; 2. National Key Laboratory of Green and Low-Carbon Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Technology, Shougang Group Corporation, Beijing 100043, China)

Abstract: In view of the significant differences in the reduction and expansion behavior of different types of pellets at various reduction temperatures, the effect of reduction temperature on the reduction and expansion properties of pellets is studied, a visualized horizontal resistance furnace is used to measure the reduction expansion rates of different types of pellets at temperatures ranging from 900 ℃ to 1 200 ℃. The results indicate that during the reduction process, the reduction expansion rate of all types of pellets gradually increases, reaches a peak, and then decreases again. When it is reduced at temperatures ranging from 900 ℃ to 1 200 ℃ for 1 hour, the order of the maximum reduction expansion rate for the four types of pellets is as follows: ordinary alkaline pellets > magnesium-containing alkaline pellets > ordinary acidic pellets > low titanium acid pellets; however, as the reduction temperature gradually is increased from 900 ℃ to 1 200 ℃, the alkaline pellets undergo malignant expansion. At a reduction time of 41 minutes and a temperature of 1 105 ℃, the reduction expansion rate of ordinary alkaline pellets is reached to a maximum value of 98.13%; at a reduction time of 37 minutes and a temperature of 1 082 ℃, the reduction expansion rate of magnesium-containing alkaline pellets is reached to

收稿日期：2025－07－11；**修回日期**：2025－12－17
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2024YFB3713900)
作者简介：马成伟(1984—)，男，高级工程师，从事高炉炼铁及烧结球团配矿等方面的工作。

a maximum value of 84.10%. Under high-temperature reduction conditions, the alkaline pellets exhibit significant cracking and pulverization, with a large number of iron crystal whiskers and iron crystal grains forming on their outer surface. The results have certain guiding significance for understanding the actual reduction and expansion changes of different types of pellets under high temperature conditions in blast furnaces, and can provide a scientific basis for the research and production adjustment of high-ratio pellets ore smelt.

Key words: pellets; reduction expansion rate; reducing temperature; microstructure

在“双碳”战略目标驱动下，高配比球团矿高炉冶炼作为一项经济有效的降碳技术，近几年在国内得到迅速发展。随着球团矿占比的不断提高，高炉对球团矿质量也提出了更高的要求。还原膨胀率是球团生产的重要冶金性能指标之一，该指标直接影响到高炉的冶炼效率和稳定性。还原膨胀率过高会恶化高炉块状带的透气性，严重时会造成崩料、悬料，破坏高炉顺行，球团矿配比超过50%以后影响更加明显。

研究人员对影响还原膨胀率因素的问题做了大量研究。姜涛等[1]、青格勒等[2]研究了脉石成分、MgO含量等对球团还原膨胀性能的影响，研究发现：提高球团中SiO_2、MgO含量可在一定程度上降低球团的还原膨胀率，镁质添加剂对提高球团中MgO含量、控制低硅球团还原膨胀率、改善球团还原度和熔滴性效果最好。李艳茹等[3]研究发现CaO会恶化球团的还原膨胀性能，MgO能够降低球团的膨胀率，且膨胀率会随熔剂配比的增加而降低。罗果萍等[4]揭示了MgO抑制含K、Na碱金属球团还原膨胀的机理。范晓慧等[5]通过向铁精矿中添加菱镁石和石灰石改变球团MgO含量和碱度(R)的试验研究得到一种低碱度镁质球团，其具有机械强度高、还原性能好、还原膨胀低、软熔温度高的特点。青格勒等[6]、王兆才等[7]研究了焙烧温度和还原气氛对还原膨胀率的影响，结果表明：焙烧温度相对较高、还原气氛中H_2体积分数的增加有利于降低球团的还原膨胀率。刘安康等[8]、沈茂森等[9]、赵路遥等[10]研究了有害元素对还原膨胀率的影响，结果表明：随着碱金属含量的增加，球团还原膨胀率呈升高趋势。国内研究人员[11-13]研究并形成了一些比较经典的理论，如碳沉积膨胀理论、气体压力膨胀理论、铁晶须膨胀理论、碱金属膨胀理论等。

在实际高炉冶炼过程中，球团还原是一个由低温逐渐升温至高温的过程。目前，基于现有还原膨胀率检测方法所获得的结果与实际冶炼情况存在一定偏差，尤其是关于高温条件下球团还原膨胀的变化规律，鲜见文献报道。为此，本文采用自主研发的可视化在线还原装置，对还原过程中球团的膨胀率进行在线检测，以获取整个还原过程中球团体积膨胀率的变化规律；同时，观察不同类型球团(如酸性球、碱性球等)在900～1 200 ℃温度下还原膨胀率的变化，揭示高炉实际工况温度变化对球团还原膨胀的影响，为实际生产提供参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验原料为以低硅磁铁精粉为主生产的氧化球团，包括普通碱性球、含镁碱性球(MgO质量分数为0.97%)、普通酸性球、低钛酸性球(TiO_2质量分数为0.90%)。每组试验均选取10.0～12.5 mm粒度范围的球团进行还原膨胀率检测。4种球团化学成分及性能如表1所示。由表1可见：与普通碱性球相比，含镁碱性球的抗压强度略有降低，还原膨胀率有所下降；而与普通酸性球相比，低钛酸性球的还原膨胀率同样降低，且抗压强度保持在较高水平。

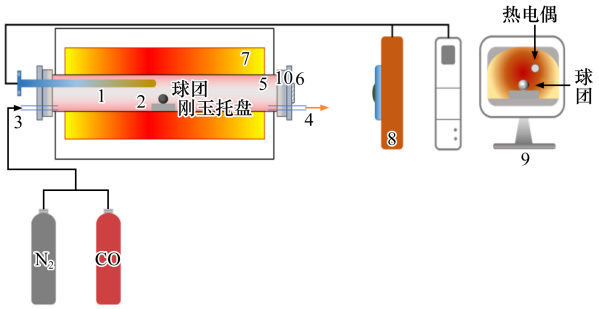
1.2 试验设备

试验采用可视化卧式电阻炉进行还原膨胀指数检测，设备结构如图1所示。由图1可知，该设备主体包括炉壳、硅碳棒加热元件、刚玉管、进出气通道及铂铑S型热电偶(量程为200～1 700 ℃)5个部分。刚玉管右端法兰处安装耐高温高强度玻璃视窗，炉体右端15 cm处布置CCD相机，通过视窗对炉内试样变化进行图像采集，采集速率为10张/min，所采集图像由相机传输至计算机进行后期处理。

表 1　4 种球团的化学成分及性能

Table 1　Main chemical composition and properties of the 4 types of pellets

球团类型	化学成分(质量分数)/%						R_2	抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)	还原膨胀率/%
	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2			
普通碱性球	65.54	2.29	0.48	2.51	0.53	0.07	1.10	3152	13.37
含镁碱性球	65.39	2.27	0.46	2.48	0.97	0.08	1.09	3110	12.45
普通酸性球	66.26	2.98	0.63	0.87	0.54	0.08	0.29	3243	12.10
低钛酸性球	65.71	3.01	0.70	0.93	0.54	0.90	0.31	3312	11.79



1—热电偶；2—试样；3—进气口；4—出气口；5—刚玉管；6—视窗口；7—加热元件；8—CCD 相机；9—图像分析计算机；10—法兰。

图 1　可视化卧式电阻炉示意

Fig. 1　Diagram of visual horizontal resistance furnace

1.3　试验方法

试验采用高纯 N_2 和 CO 作为还原气氛，二者纯度均为 99.99%。首先，将置于刚玉片上的球团试样放置在靠近热电偶末端的恒温段，以尽可能保证球团所处温度与热电偶实测温度一致。设计两组对比试验：① 第一组试验的还原温度参照国标检测方法设为 900 ℃。在 5 L/min 的 N_2 保护气氛下，以 10 ℃/min 的升温速率将试样加热至 900 ℃，随后在 $\varphi(N_2):\varphi(CO)=7:3$(体积分数比)、总流量为 15 L/min 的条件下还原 60 min。② 第二组试验的还原温度设定为从 900 ℃逐步升温至 1 200 ℃。同样在 5 L/min 的 N_2 保护气氛下，以 10 ℃/min 的升温速率将试样加热至 900 ℃，再以 5 ℃/min 的升温速率加热至 1 200 ℃，并在 $\varphi(N_2):\varphi(CO)=7:3$、总流量为 15 L/min 的条件下还原 60 min。

还原过程中，通过 CCD 相机采集球团的实时图像，传输至计算机后使用 ImageJ 软件计算其横截面积，并根据球体面积与体积的关系计算还原膨胀率，具体计算方法如式(1)所示。

$$\sigma_{RSI}=\frac{V_t-V_0}{V_0}\times 100\%=\left[\left(\frac{S_t}{S_0}\right)^{3/2}-1\right]\times 100\% \quad (1)$$

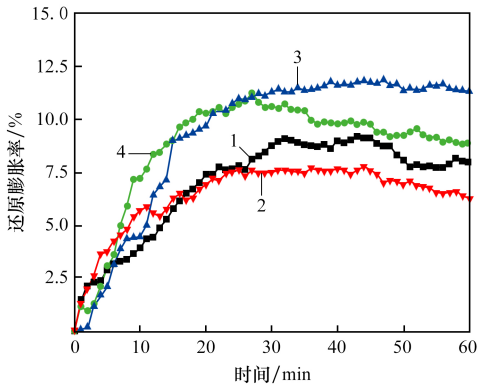
式中：σ_{RSI} 为还原膨胀率,%；V_0、S_0 分别为还原前球团的体积(m^3)和表面积(m^2)；V_t、S_t 分别为还原后球团的体积(m^3)和表面积(m^2)。

2　结果与讨论

2.1　不同温度下球团的还原膨胀率变化

2.1.1　900 ℃下还原膨胀率变化

为准确反映 900 ℃还原过程中球团的连续体积变化，采用图像处理方法对球团还原膨胀率的变化进行计算分析，结果如图 2 所示。由图 2 可知：普通碱性球在还原过程中，还原膨胀率于 43 min 时达到最大值 9.17%，随后出现明显下降，反应结束时降至 7.75%，较峰值收缩 1.42 个百分点；含镁碱性球的还原膨胀率在 44 min 时达到最大值 7.76%，之后显著下降，反应结束后降至



1—普通碱性球；2—含镁碱性球；3—普通酸性球；4—低钛酸性球。

图 2　900 ℃下球团还原膨胀率随还原时间的变化

Fig. 2　Variation of RSI of pellets with reduction time at 900 ℃

6.10%，较峰值收缩 1.66 个百分点；普通酸性球的还原膨胀率在 47 min 时达到最大值 11.85%，随后保持相对稳定直至还原结束；低钛酸性球的还原膨胀率在 27 min 时达到最大值 10.82%，之后略有下降，还原结束时降至 8.79%，较峰值收缩 2.03 个百分点。

2.1.2 900～1 200 ℃还原膨胀率变化

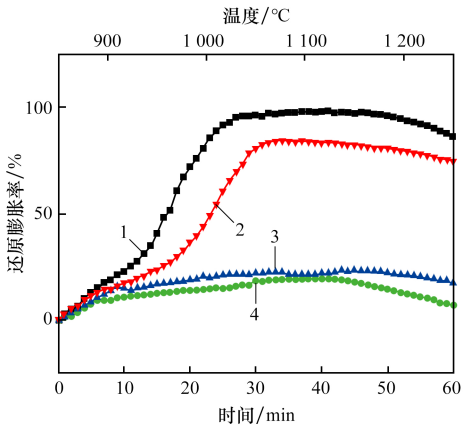
为准确表征球团在 900～1 200 ℃逐步升温还原过程中的连续体积变化，采用图像处理方法对还原过程中的膨胀率变化进行计算分析，结果如图 3 所示。由图 3 可知，普通碱性球在还原过程中，还原膨胀率于 15 min(还原温度 975 ℃)时达到 40.77%，20 min(1 000 ℃)时升至 71.95%，41 min(1 105 ℃)时达到最大值 98.13%，随后开始下降，反应结束时降至 85.06%，较峰值收缩 13.07 个百分点；含镁碱性球的还原膨胀率在 15 min(973 ℃)时达到 23.34%，20 min(998 ℃)时升至 36.49%，37 min(1 082 ℃)时达到最大值 84.10%，之后出现下降，反应结束时降至 73.17%，较峰值收缩 10.93 个百分点；普通酸性球的还原膨胀率在 15 min(977 ℃)时达到 16.84%，20 min(1 002 ℃)时升至 18.92%，45 min(1 127 ℃)时达到最大值 23.18%，随后下降，反应结束时降至 17.41%，较峰值收缩 5.77 个百分点；低钛酸性球的还原膨胀率在 15 min(974 ℃)时达到12.50%，20 min(999 ℃)时升至 13.81%，38 min(1 089 ℃)时达到最大值 19.21%，之后明显下降，还原结束时降至 6.15%，较峰值收缩 13.06 个百分点。

综上，在 900 ℃和 900～1 200 ℃还原条件下，4 种球团在还原过程中均呈现还原膨胀率先逐步升高、达到峰值后再下降的变化趋势，其中在900～1 200 ℃条件下该变化更为显著。分析原因认为，随着还原反应的进行，金属铁开始析出，浮氏体相互紧密连接，颗粒间孔隙数量减少，导致体积收缩。球团的还原膨胀主要发生在还原前 30 min 内，约在 40 min 左右达到最大膨胀值。

2.2 还原后球团实物及最大还原膨胀率

4 种球团矿还原后的实物对比如图 4 所示。由图 4 可以看出，在 900～1 200 ℃还原条件下，碱性球的外观较酸性球出现明显的裂纹和粉化现象，体积膨胀了近 1 倍。4 种球团在不同还原温度下的最大还原膨胀率如表 2 所示。由表 2 可见，900 ℃还原温度下，在线检测的还原膨胀率与国标检验方法的检测结果差异不大，均未出现 25% 以上的恶性膨胀情况，球团的膨胀主要源于赤铁矿向磁铁矿的晶格转化过程。在 900～1 200 ℃条件下，普通碱性球和含镁碱性球在还原过程中还原膨胀率随着温度的升高急剧上升，最大值分别达到 98.13% 和 84.10%。

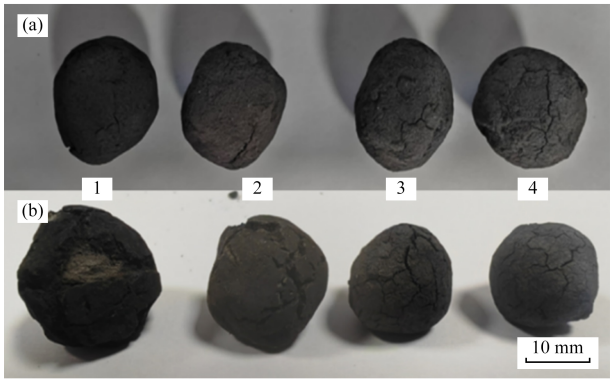
此外，不同温度条件下球团矿还原后的最大还原膨胀率存在显著差异。当还原温度恒定为



1—普通碱性球；2—含镁碱性球；3—普通酸性球；4—低钛酸性球。

图 3 900～1 200 ℃下球团还原膨胀率随还原时间的变化

Fig. 3 Variation of RSI of pellets with reduction time at 900～1 200 ℃



还原温度/℃：(a) 900；(b) 900～1 200

1—普通碱性球；2—含镁碱性球；3—普通酸性球；4—低钛酸性球。

图 4 4 种球团还原后实物对比

Fig. 4 Comparison chart of actual pellets after reduction for four types

表 2　900 ℃和 900 ~ 1 200 ℃条件下球团最大还原膨胀率情况

Table 2　Maximum RSI of pellets under 900 ℃ and 900 ~ 1 200 ℃ conditions

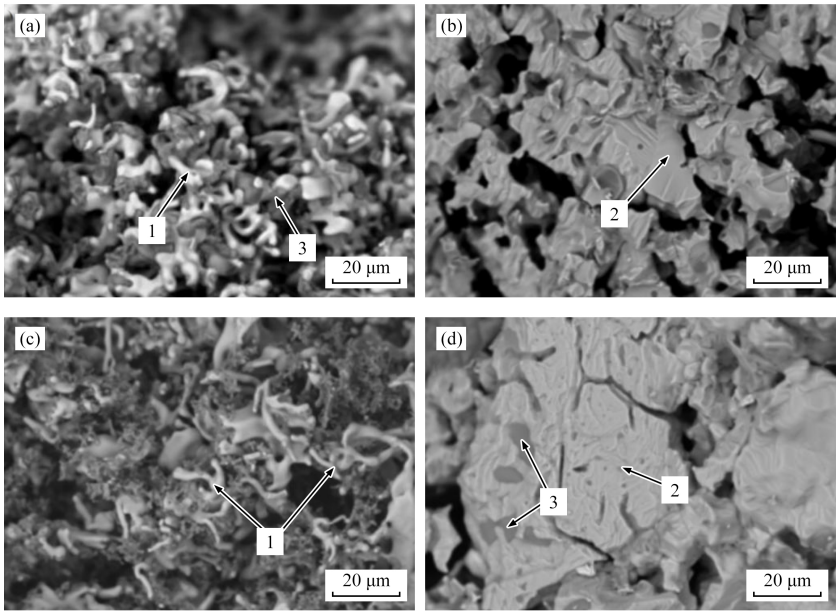
球团类型	900 ℃		900 ~ 1 200 ℃	
	最大还原膨胀率/%	出现时间/min	最大还原膨胀率/%	出现时间/min
普通碱性球	9. 17	43	98. 13	41
含镁碱性球	7. 76	44	84. 10	37
普通酸性球	11. 85	47	23. 18	45
低钛酸性球	10. 82	27	19. 21	38

900 ℃时，含镁碱性球(7. 76%) < 普通碱性球(9. 17%)，低钛酸性球(10. 82%) < 普通酸性球(11. 85%)；当还原温度为 900 ~ 1 200 ℃时，含镁碱性球(84. 10%) < 普通碱性球(98. 13%)，低钛酸性球(19. 21%) < 普通酸性球(23. 18%)。高炉采取高配比碱性球冶炼后，高温条件下碱性球还原出现异常膨胀破裂粉化，恶化高炉块状带透气性，造成高炉内压差升高。这可能是制约高配比球团高炉冶炼的重要原因之一，需要引起炼铁人员的高度重视。

上述结果表明，在球团中适量配加 MgO 和 TiO_2均有利于降低其还原膨胀率，这与国内相关研究结果一致。例如，高强健等[14]研究了 MgO 对球团还原性能的影响，发现当 MgO 添加剂质量分数由 0 增加至 2. 0%时，球团的低温还原粉化率和还原膨胀率均逐渐下降；周明顺等[15]研究了 MgO 添加方式对改善球团冶金性能的影响，指出在合理的 MgO 添加方式下(如添加菱镁石或含 MgO 精矿粉，避免添加白云石)，还原膨胀率可由 23%降至约 20%。然而，上述研究多集中于 MgO 对球团性能的影响，针对 TiO_2对球团还原膨胀率影响的研究相对较少。本文试验表明，在球团中添加 TiO_2同样有助于降低还原膨胀率。

3　球团还原膨胀机理

为探究 900 ~ 1 200 ℃条件下球团(尤其是碱性球团)发生异常还原膨胀的机理，对还原后的普通碱性球和含镁碱性球(MgO 质量分数为 0. 97%)进行显微结构观察。还原 1 h 后两种球团的 SEM 微观结构如图 5 所示。普通碱性球与含镁碱性球的 EDS 分析结果如图 6 所示，具体分析数据详见表 3。由图 5、6 可知，球团中心部位仍存在未还原的磁铁矿、钙铁橄榄石等矿相。在900 ~ 1 200 ℃

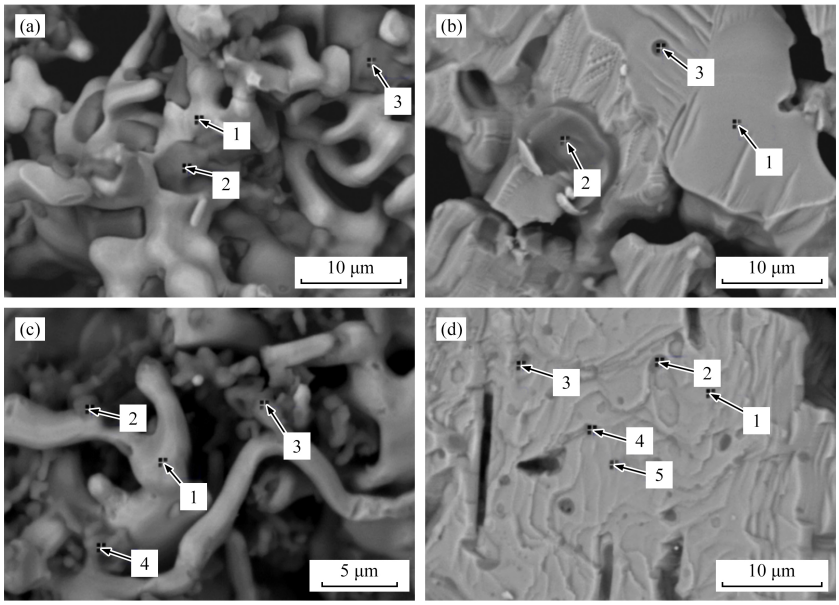


普通碱性球：(a) 外层；(b) 中心。含镁碱性球：(c) 外层；(d) 中心

1—金属铁；2—磁铁矿；3—钙铁橄榄石。

图 5　900 ~ 1 200 ℃还原后普通碱性球和含镁碱性球 SEM 图像

Fig. 5　SEM images of ordinary alkaline spheres and magnesium-containing alkaline spheres after reduction at 900 ~ 1 200 ℃



普通碱性球：(a) 外层；(b) 中心。含镁碱性球：(c) 外层；(d) 中心

1 ~5—位置检测点。

图 6 900 ~1 200 ℃还原后普通碱球和含镁碱性球 EDS 分析结果

Fig. 6 EDS analysis results of ordinary alkali balls and magnesium-containing alkaline balls after reduction at 900 ~1 200 ℃

表 3 还原后普通碱性球和含镁碱性球 EDS 能谱分析结果

Table 3 The EDS analysis results for ordinary alkali balls and magnesium-containing alkaline balls after reduction at 900 ~1 200 ℃

球团类型	检测部位	位置点	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Mn	Fe
普通碱性球	外层	1	1. 12	—	0. 12	0. 17	0. 51	—	—	0. 72	—	97. 36
		2	43. 27	0. 58	2. 00	2. 04	16. 55	—	—	21. 31	0. 46	13. 79
		3	37. 10	0. 63	1. 90	3. 07	18. 92	—	—	24. 39	0. 38	13. 61
	中心	1	25. 12	—	—	—	—	—	—	—	—	74. 88(磁铁矿)
		2	35. 85	0. 77	—	5. 15	14. 71	—	1. 85	24. 59	—	17. 09(钙铁橄榄石)
		3	20. 86	0. 55	—	3. 01	8. 63	—	—	18. 30	—	48. 64
含镁碱性球	外层	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100. 00(还原的铁)
		2	51. 18	1. 07	2. 92	2. 32	14. 29	—	—	15. 38	—	12. 83(钙铁橄榄石)
		3	51. 54	0. 71	3. 50	1. 48	15. 54	—	—	18. 69	0. 36	8. 19
		4	48. 25	0. 73	4. 15	2. 52	15. 89	—	—	18. 53	—	9. 95
	中心	1	26. 25	—	0. 52	0. 25	—	—	—	—	—	72. 98(还原的磁铁矿)
		2	30. 42	0. 53	0. 28	3. 23	11. 39	0. 23	0. 46	19. 77	—	33. 69(钙铁橄榄石)
		3	26. 55	0. 65	0. 33	3. 16	8. 82	—	0. 49	12. 88	—	47. 12(钙铁橄榄石)
		4	32. 24	0. 66	0. 26	3. 07	10. 02	—	0. 62	17. 84	—	35. 29(钙铁橄榄石)
		5	34. 25	0. 65	0. 36	2. 73	8. 65	0. 25	0. 35	13. 35	—	39. 40(钙铁橄榄石)

高温还原 1 h 后，普通碱性球与含镁碱性球的外层呈现多孔、疏松的结构，出现明显的铁晶须和铁晶粒，导致还原膨胀率异常升高、粉化破损严重、抗压强度降低；而中心部位结构相对致密。还原 1 h 后，碱性球表层铁的还原度指数较高，但仍有少量铁氧化物未被还原。SiO_2 的存在使球团内形成低熔点的液相，在新生成的金属铁周围或铁晶须根部阻碍了还原反应的进一步进行。此外，中

心区域仍含有钙铁橄榄石液相及未被还原的铁氧化物磁铁矿。

碱性球内部孔隙较酸性球更为丰富，有利于还原气体的快速扩散。随着还原温度升高，还原反应速率迅速提高，但随着还原度指数的进一步增加，反应速率又趋于减缓。球团的异常膨胀主要发生在浮氏体还原为铁的阶段。从微观机理来看，浮氏体的还原过程符合未反应核模型，基本处于界面化学反应控制阶段。高温条件下，铁离子向晶格内扩散速度加快。碱性球中 SiO_2 含量较低，赤铁矿晶粒间的 SiO_2 亦较少，形成的低熔点硅酸盐液相极少，有利于铁离子向晶格内部迁移，铁离子优先在易于形核的位置聚集形成铁核。快速形成的铁核层随后阻碍了还原气体向内部的进一步扩散。由于晶核下方的氧晶格相对固定，铁核被迫向外迅速生长，形成定向晶，并生成大量针状晶与铁晶须。相比之下，酸性球因 SiO_2 含量较高，生成的大量硅酸盐液相抑制了铁晶须的形成与长大，未出现恶性膨胀。

4　结　论

（1）在还原过程中，球团还原膨胀率均呈现先逐步升高、达到峰值后再降低的变化趋势。在 900 ~ 1 200 ℃高温还原条件下，球团的相对收缩幅度更大，其中普通碱性球和低钛酸性球较峰值的收缩率分别为 13.07% 和 13.06%。

（2）在 900 ℃条件下，还原 1 h 后 4 种球团的最大还原膨胀率排序为普通酸性球 > 低钛酸性球 > 普通碱性球 > 含镁碱性球；而在 900 ~ 1 200 ℃条件下，最大还原膨胀率排序为普通碱性球 > 含镁碱性球 > 普通酸性球 > 低钛酸性球。

（3）900 ~ 1 200 ℃条件下还原 1 h 后的微观结构表明，普通碱性球与含镁碱性球外层孔隙多、结构疏松，还原度极高，出现大量铁晶须和铁晶粒；中心部位结构致密，含有钙铁橄榄石液相及未被还原的铁氧化物磁铁矿。

（4）在 900 ℃条件下，还原温度对 4 种球团矿还原膨胀率的影响较小；而当还原温度由 900 ℃逐步升高至 1 200 ℃时，温度对碱性球团矿还原膨胀率的影响显著增强，球团发生恶性膨胀。当还原温度为 1 105 ℃时，普通碱性球的还原膨胀率达到最大值 98.13%；当还原温度为 1 082 ℃时，含镁碱性球的还原膨胀率达到最大值 84.10%。在高温还原条件下，碱性球团外观出现明显裂纹和粉化现象，这可能是高炉高配比碱性球团冶炼时压差升高的重要原因，需引起炼铁人员的高度重视。

参考文献：

[1] 姜涛，何国强，李光辉，等. 脉石成分对铁矿球团还原膨胀性能的影响[J]. 钢铁，2007，42(5)：7 - 11.
JIANG Tao，HE Guoqiang，LI Guanghui，et al. Effect of gangue composition on reduction swelling of iron ore pellets[J]. Iron & Steel，2007，42(5)：7 - 11.

[2] 青格勒，吴铿，屈俊杰，等. 不同含镁添加剂对球团矿工艺参数及质量的影响[J]. 钢铁，2013，48(7)：17 - 22.
QING Gele，WU Keng，QU Junjie，et al. Effect of different magnesium additives on process parameters and pellet quality[J]. Iron and Steel，2013，48(7)：17 - 22.

[3] 李艳茹，李金莲，张立国，等. 添加熔剂对球团矿还原膨胀率的影响[J]. 钢铁，2009，44(10)：14 - 16；25.
LI Yanru，LI Jinlian，ZHANG Liguo，et al. Effects of additives on reduction swelling of iron ore pellets[J]. Iron and Steel，2009，44(10)：14 - 16；25.

[4] 罗果萍，刘安康，王永斌，等. MgO 对碱金属球团还原膨胀性能的影响[J]. 烧结球团，2016，41(3)：31 - 33；56.
LUO Guoping，LIU Ankang，WANG Yongbin，et al. Influence of MgO on the reduction swelling performance of alkali pellets[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(3)：31 - 33；56.

[5] 范晓慧，甘敏，陈许玲，等. 低碱度镁质氧化球团的试验研究[J]. 钢铁，2009，44(3)：6 - 10.
FAN Xiaohui，GAN Min，CHEN Xuling，et al. Experiments of low-basicity magnesian oxidized pellets[J]. Iron and Steel，2009，44(3)：6 - 10.

[6] 青格勒，吴铿，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)：2905 - 2912.
QING Gele，WU Keng，LIU Hongsong，et al. Effect and mechanism of calcination temperature on reduction swelling rate of low silica magnesium pellets[J]. The

Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(10): 2905 – 2912.

[7] 王兆才,储满生,唐珏,等. 还原气氛和脉石成分对氧化球团还原膨胀的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(1):94 – 97;102.
WANG Zhaocai, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Effects of reducing atmosphere and gangue composition on reduction swelling of oxidized pellets[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2012,33(1): 94 – 97,102.

[8] 刘安康,罗果萍,王永斌,等. 钾钠氟对赤铁矿球团还原膨胀性能的影响[J]. 内蒙古科技大学学报,2016,35(2):113 – 116.
LIU Ankang, LUO Guoping, WANG Yongbin, et al. The influence of K, Na and F on reduction swelling of hematite pellets[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology,2016,35(2):113 – 116.

[9] 沈茂森,吕志义,康文革,等. 白云鄂博铁球团矿异常还原膨胀的机理[J]. 中国冶金,2021,31(3):17 – 21;29.
SHEN Maosen, LÜ Zhiyi, KANG Wenge, et al. Abnormal reduction swelling mechanisms of pellets from Bayan Obo iron ore[J]. China Metallurgy, 2021, 31(3): 17 – 21; 29.

[10] 赵路遥,田筠清,赵满祥,等. 球团矿还原膨胀率影响因素分析[J]. 中国冶金,2023,33(10):60 – 64.
ZHAO Luyao, TIAN Yunqing, ZHAO Manxiang, et al. Analysis on influencing factors of reduction swelling index of pellets[J]. China Metallurgy, 2023, 33(10): 60 – 64.

[11] 傅菊英,姜涛,朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1997.
FU Juying, JIANG Tao, ZHU Deqing. Sintering and pelletizing science[M]. Changsha: Central South University of Technology Press,1997.

[12] 赵志龙,唐惠庆,郭占成. CO 气氛下 CaO 对铁晶须生长影响的原位观察和机理研究[J]. 北京科技大学学报,2011,33(7):817 – 822.
ZHAO Zhilong, TANG Huiqing, GUO Zhancheng. In situ observation and mechanism research of the influence of CaO on the growth of iron whiskers under CO atmosphere [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2011,33(7):817 – 822.

[13] 皮晓东,孙权,罗果萍,等. 球团矿还原膨胀机理研究概况[J]. 烧结球团,2017,42(4):28 – 34.
PI Xiaodong, SUN Quan, LUO Guoping, et al. Research review on reduction expansion mechanism of pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(4):28 – 34.

[14] 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 Qiangjian, SHEN Fengman, ZHENG Haiyan, et al. Investigation on effect of MgO on reduction metallurgical properties of iron ore pellet[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(12): 1742 – 1745.

[15] 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,2012,47(4):14 – 18.
ZHOU Mingshun, SHEN Fengman, ZHAI Liwei, et al. Influences of MgO adding method on improving metallurgical properties of pellet[J]. Iron and Steel, 2012,47(4):14 – 18.

(上接第 44 页)

[26] 侯雯希,梁斌珺. 褐铁矿的烧结特性试验研究[J]. 中国金属通报,2022(5):14 – 17.
HOU Wenxi, LIANG Binjun. Experimental study on sintering characteristics of limonite[J]. China Metal Bulletin,2022(5):14 – 17.

[27] YAN H L, ZHOU X L, GAO L, et al. Prediction of compressive strength of biomass-humic acid limonite pellets using artificial neural network model[J]. Materials,2023,16(14):5184.