粒度对熔剂性球团冶金性能及矿相结构的影响

李振铠，高 冰，贾 彬，刘慧芬，董 齐，李 欢
（唐山钢铁集团有限责任公司，河北 唐山 063000）

摘要：为提高熔剂性球团质量，解析不同粒度条件下球团性能的变化规律，本文以唐钢新区带式焙烧机球团生产线为研究对象，通过投笼造球试验和冶金性能检测等方式，分别对 8.0 ~ 10.0、10.0 ~ 12.5、12.5 ~ 16.0、16.0 ~ 20.0 mm 4 种粒度条件下球团冶金性能和矿相结构进行研究。结果表明：随着熔剂性球团粒度的逐渐提高，球团抗压强度从 1 767 N/P 提高至 3 606 N/P，1 h 还原度从 78.5% 降低至 47.8%，还原膨胀指数略有降低，整体维持在 12% 以下，低温还原粉化指数（>6.3 mm）从 87.8% 降低至 66.5%，低温还原粉化指数（>3.15 mm）从 95% 降低至 87.2%，低温还原粉化指数（<0.5 mm）变化幅度较小，约为 4%；随着熔剂性球团粒度的逐渐提高，气孔率降低，从 38.93% 降低为 31.4%，液相率略有降低，固相比例显著提高，从 41.05% 提高至 58.41%，致密度提高但液相率降低可能使得原本存在的链接状态失去效果，侧面减弱了熔剂性球团的低温还原粉化性能。因此，在熔剂性球团生产过程中应控制合适的球团粒度，改善熔剂性球团性能和微观结构，以便有利于高炉提产顺行。

关键词：带式焙烧机；熔剂性球团；粒度；冶金性能；矿相结构
中图分类号：TF046.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000 - 8764(2024)02 - 0059 - 06
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.025

Effect of particle size on metallurgical properties and mineral phase structure of fluxed pellets

LI Zhenkai, GAO Bing, JIA Bin, LIU Huifen, DONG Qi, LI Huan
(Tangshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: In order to improve the quality of fluxed pellets and analyze the variation law of pellets properties under different particle sizes, the pellets production line of belt roaster in new area of Tangshan iron and steel is taken as the research object, and the metallurgical properties and mineral phase structure of pellets under such four particle sizes as 8.0 ~ 10.0, 10.0 ~ 12.5, 12.5 ~ 16.0 and 16.0 ~ 20.0 mm are studied by means of cage pelletizing test and metallurgical performance testing, respectively. The results show that, with the gradual increase of the particle size of the fluxed pellets, the compressive strength of the pellets is increased from 1 767 N/P to 3 606 N/P, the reduction degree is decreased from 78.5% to 47.8% at 1 h, the reduction expansion index is decreased slightly, remaining below 12%, the low-temperature reduction pulverization (>6.3 mm) is decreased from 87.8% to 66.5%, the low-temperature reduction pulverization (>3.15 mm) is decreased from 95% to 87.2%, and the low-temperature reduction pulverization (<0.5 mm) is changed slightly, about 4%. With the gradual increase of the particle size of the fluxed pellets, the porosity is decreased, from 38.93% to 31.4%, the liquid phase ratio is decreased slightly, and the solid phase ratio is increased significantly, from 41.05% to 58.41%. The density is increased but the decrease of liquid phase rate may make the existing link state ineffective, and the low-temperature reduction and pulverization performance of fluxed pellets is weakened. Therefore, in the production process of fluxed pellets, the appropriate particle size of pellets should be controlled to improve the

收稿日期：2022 - 11 - 19；**修回日期：**2023 - 04 - 11
作者简介：李振铠（1996—），男，工程师，从事烧结球团质量优化方面的技术工作。
通信作者：刘慧芬（1986—），女，工程师，从事钢铁冶金自动化方面的工作。

properties and microstructure of fluxed pellets, which is conducive to the smoothly increasing output of blast furnaces.

Key words: belt roaster; fluxed pellets; particle size; metallurgical properties; mineral phase structure

球团矿作为高炉生产的高品质含铁原料，具有粒度均匀、铁品位高、环境污染低等优点[1]。与铁矿粉烧结相比，球团工艺更环保，能源消耗更低，温室气体排放量更少。球团矿作为高炉生产的高品质含铁原料，由于能够达到降低高炉炼铁成本的目的，日益受到钢铁企业的青睐[2-4]。近年来，提高入炉料中球团矿占比的研究日益增多，高配比球团高炉生产更符合当前钢铁行业绿色发展的趋势。高炉内软熔带料柱是高炉炉床透气性的限制环节，其形成与位置对炉内煤气流分布和还原过程都会产生明显的影响，进而影响焦比[5-6]。高配比入炉球团有利于改善高炉料柱透气性，提高入炉含铁品位和煤气利用率，降低焦比和燃料比，有助于高炉降耗增产，且球团工序的能源消耗相较于烧结工序有明显降低，而在 CO_2 排放量方面，球团工序的吨矿 CO_2 排放量仅为烧结工序的20%~46%[7-8]。

河钢唐钢新区建有国内最大规模带式焙烧机球团生产线，是国内自主设计和制造的最大规模带式焙烧机。该带式焙烧机以熔剂性球团、酸性球团等多元化氧化球团矿为核心，为高炉提供60%以上的球团矿炉料[9-10]。一般来说，成品球的合格范围为8~16 mm，生球粒度越均匀越有利于焙烧过程中的物化反应，粒度太小不利于生产过程的透气性，粒度过大不利于球团内部反应完全。GUDENAU 等[11]通过研究球团最佳直径问题，发现将球团的粒径减少1.0~2.0 mm 可以节省大量热能，改善球团冶金性能；DWARAPUDI 等[12]通过研究不同尺寸(8.0~16.0 mm)球团的物理、机械和冶金性能，发现粒径为10.0~12.5 mm 的球团具有较好的性能；此外，通过图像分析发现，不同粒径球团的赤铁矿含量、孔隙密度、硅酸盐熔体的数量和分布不同，并明显影响球团质量。

本文以该带式焙烧机产线生产的熔剂性球团为研究对象，基于多种球团粒度特性条件，对熔剂性球团的最佳粒度进行摸索，重点研究不同粒度条件下的熔剂性球团冶金性能和微观结构的变化，以期为熔剂性球团优化生产提供参考。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

试验原料取自当地钢厂仓库，配置为 A、B、C、D 矿粉以及熔剂(消石灰和皂土)，试验所用原料的主要化学成分如表1所示。由表1可知，4种矿粉均为磁铁矿，包含两种低硅精粉和两种高硅精粉，除 B 矿粉外，其余三种铁精粉的含铁质量分数均在66%以上。其中，A 矿粉的 SiO_2 质量分数最高，达到了4.18%；B 矿粉的 MgO 质量分数最高，为3.79%；C 矿粉 TFe、SiO_2、FeO 质量分数分别为69.69%、1.53%、28.59%，属于优质铁精粉；D 矿粉的 Al_2O_3 质量分数较高，为1.03%。4种铁精粉粒度组成如表2所示。由表2可知：A、B 两种矿粉粒度较大，C、D 两种矿粉粒度较低，4种矿粉按一定比例混合可满足造球对原料的要求。

1.2 试验方法

以熔剂性球团生产现场带式焙烧机的热工制度为基础进行试验。熔剂性球团热工参数：鼓干

表1 试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

原料名称	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P	FeO	H_2O
A 矿粉	68.02	4.18	0.34	0.31	0.29	0.012	0.008	25.56	7.97
B 矿粉	62.10	1.60	2.24	3.79	0.53	0.053	0.240	26.32	5.74
C 矿粉	69.69	1.53	0.36	0.62	0.17	0.107	0.011	28.59	8.01
D 矿粉	66.3	3.76	0.63	0.81	1.03	0.012	0.022	25.26	8.88
消石灰	—	1.21	65.84	—	—	—	—	—	—
膨润土	—	55.86	3.54	2.12	12.55	—	—	—	—

表 2　铁精粉的粒度组成(质量分数)

Table 2　Particle size composition of iron concentrate powder　%

原料名称	>0.150 mm	(0.075,0.150] mm	≤0.075 mm
A 矿粉	5.1	30.3	64.6
B 矿粉	2.3	21.5	76.2
C 矿粉	1.4	12.9	85.7
D 矿粉	0.3	10.9	88.8

温度为 270 ℃，抽干温度为 310 ℃，预热和焙烧温度分别为 1 020 ℃和 1 240 ℃，焙烧时间为 10 min，均热温度为 1 080 ℃，冷却二段温度为 180 ℃。采用圆盘造球机进行造球(造球盘直径为 1 000 mm，造球时间为 30 min，倾角为 43°，转速为 18 r/min)。将造好的生球(不分粒度)放入投笼篮中，同批放入生产中的带式焙烧机上。用于盛放熔剂性球团的投笼篮放置于带式焙烧机的最上层，与料层表面持平。固定每次投笼的熔剂性球团的位置、数量固定，保证试验的准确性和科学性。试验得到熔剂性球团的化学成分如表 3 所示。由表 3 可知，成品球的 TFe、FeO 质量分数分别为 61.69%、0.49%，SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3 和 TiO_2 的质量分数分别是 3.31%、1.51%、3.85%、0.88%和 0.888%，碱度为 1.16。通过粒度筛将碱性球按需筛分为 8.0～10.0、10.0～12.5、12.5～16.0、>16.0 mm 4 种粒度，使用该钢铁厂冶金性能实验室的检测设备，依次进行抗压强度、低温还原粉化性、还原膨胀性等检测。试验过程采用相同的设备，以减少误差、提高精度。

2　结果与讨论

2.1　粒度对熔剂性球团性能的影响

试验得到不同粒度熔剂性球团的冶金性能结果如图 1 所示。由图 1 可以看出，随着熔剂性球团粒度的提高，球团的冶金性能出现明显变化。当粒度从 8.0～10.0 mm 提高至 16.0～20.0 mm 时，球团抗压强度从 1 767 N/P 提高至 3 606 N/P，这主要是因为大粒度的熔剂性球团球体直径大，抵抗粉化的能力强，通过后续矿相结构分析发现，大粒度的熔剂性球团微观结构中气孔比例低，固相比例高，有利于抗压强度提高；还原性呈降低趋势，900 ℃条件下的 1 h 还原度从 78.5%降低至 47.8%，还原膨胀指数略有降低，整体维持在 12%以下，均处于较为优秀的水平，满足生产所需。低温还原粉化性随粒度的提高而变差，>6.30 mm 低温还原粉化指数变化最为明显，从 87.8%降低至 66.5%，>3.15 mm 低温还原粉化指数从 95%降低至 87.2%，<0.50 mm 低温还原粉化指数变化幅度较小，约为 4%。这主要是因为大粒度的熔剂性球团在低温粉化还原过程中受到的内外应力较大而导致球体破碎，进而导致球团粉化程度加剧，使得熔剂性球团的低温还原粉化性降低。

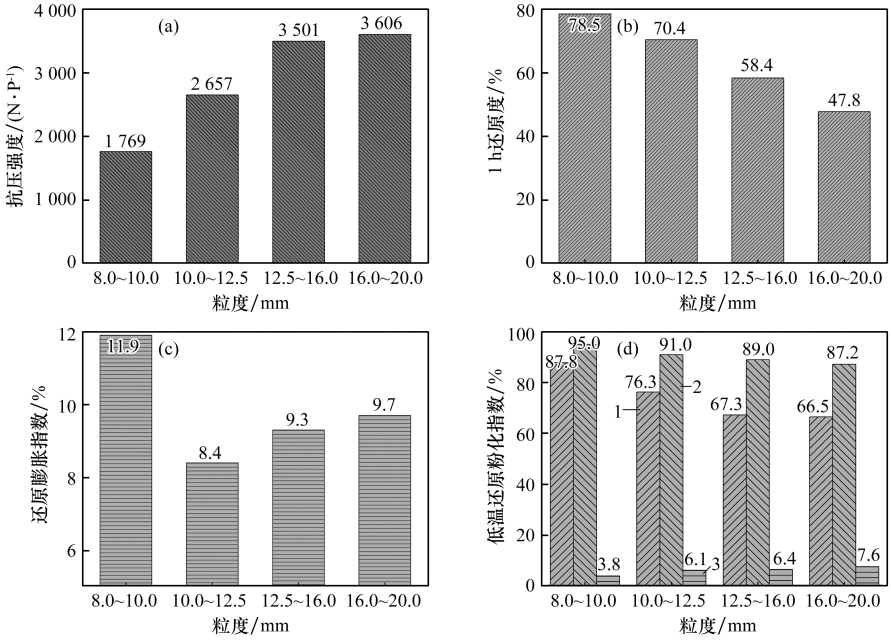
2.2　粒度对熔剂性球团熔滴性能的影响

不同粒度熔剂性球团的熔滴性能如图 2 所示。由图 2 可以看出，随着熔剂性球团粒度的增大，球团的熔滴性能呈先提高后降低的趋势。当熔剂性球团的粒度由 8～10 mm 提高至 16～20 mm 时，球团的 T_{10} 与 T_{40} 变化较小，温差不超过 20 ℃，软化区间($T_{40}-T_{10}$)从 99 ℃提高至 107 ℃；T_s 降低幅度较高，温差接近 50 ℃，T_d 增温 10 ℃左右，这导致熔化区间(T_d-T_s)增大，从 75 ℃提高至 133 ℃，且由于 T_s 降低的缘故，导致高炉软熔带中熔化区间上移，且温度区间增大，使得高炉软熔带透气性变差，不利于高炉顺行。软熔滴落实验过程中的最大压差呈先降低后增加的趋势，在粒度为 10～16 mm 时，最大压差较低，为 9.4～10.7 kPa。S 值可以很好地衡量炉料的熔滴性能。随着熔剂性球团粒度的增大，S 综合特性值呈先降低后增加的趋势，在粒度为 10～16 mm 时，该值保持在 178.4～266.1 kPa·℃,处于较为优秀的水平。

表 3　熔剂性球团的主要化学成分和碱度

Table 3　Main chemical composition and bacisity of fluxed pellets

化学成分(质量分数)/%									R_2
TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S	TiO_2	
61.69	0.49	3.31	3.85	1.51	0.88	0.029	0.005	0.888	1.16

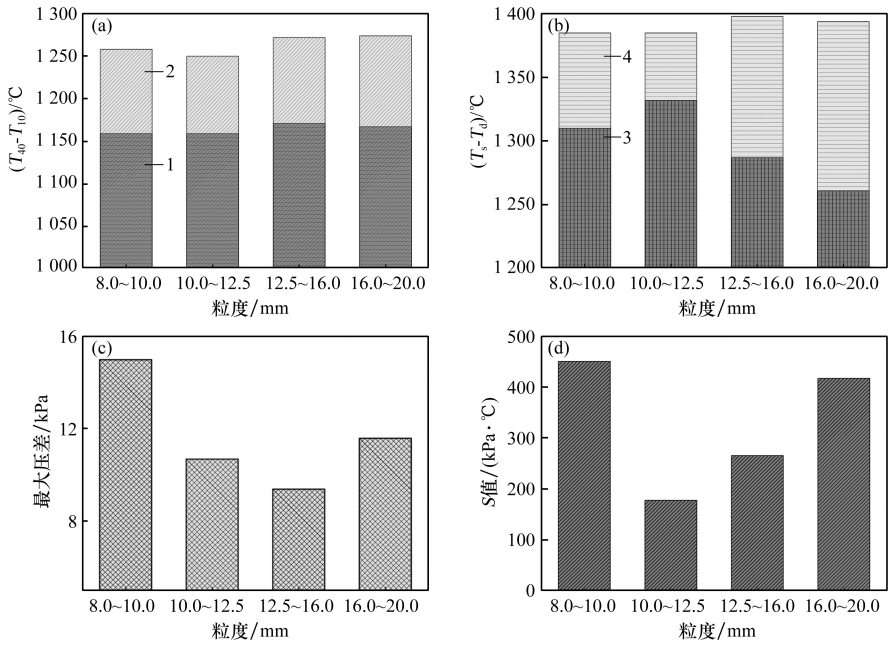


（a）抗压强度；（b）1 h 还原度；（c）还原膨胀指数；（d）低温还原粉化指标

低温还原粉化指数/%：1—>6.30 mm；2—>3.15 mm；3—< -0.50 mm。

图 1 不同粒度熔剂性球团的冶金性能

Fig. 1 Metallurgical properties of flux pellets with different particle sizes



（a）$T_{40}-T_{10}$；（b）T_s-T_d；（c）最大压差；（d）S 值

1—T_{10}；2—T_{40}；3—T_s；4—T_d。

图 2 不同粒度熔剂性球团的熔滴性能

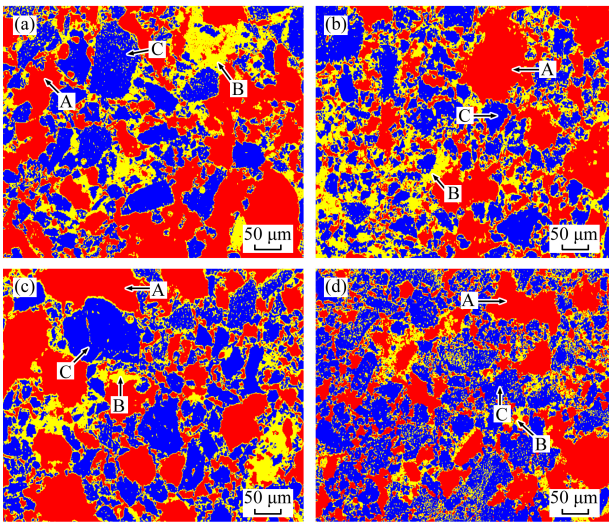
Fig. 2 Droplet properties of flux pellets with different particle sizes

（注：T_{10}为软化开始温度，℃；T_{40}为软化结束温度，℃；T_s 为熔化开始温度，℃；T_d 为滴落温度，℃；S 为综合透气性指数，kPa·℃）

2.3 不同粒度球团的矿相结构与分析

为进一步探究不同粒度熔剂性球团的内部结构，采用矿相显微镜（Axio Imager A2m）进行微观结构分析，得到不同粒度熔剂性球团显微结构如

图 3 所示。图 3 为 Image Pro Plus 软件对球团矿相显微结构处理后得到的 3 种矿相面积占比，其中红色表示气孔，黄色表示液相，蓝色表示固相。选取球团在矿相显微镜下 200 倍时的 4 个环部和中心共五部分作为依据，剔除掉误差部分后进行均算，得出球团显微结构中 3 种矿相元素占整体的比例。图 4 为不同粒度熔剂性球团气孔、液相、固相 3 种矿相元素面积占比结果。由图 3、4 可知，随着熔剂性球团粒度从 8.0 ~ 10.0 mm 增大至 16.0 ~ 20.0 mm，气孔尺寸变小，气孔率降低，从 38.93% 降低为 31.4%，球体表面致密性提高，内部连晶结构由于气孔率减低而变得更为稳固，大尺寸气孔和边缘气孔明显降低，致密度提高。这也是图 1 中大粒度熔剂性球团抗压强度较高的原因之一。大粒度熔剂性球团的微观结构中，气孔比例降低，固相比例提高，连晶结构更为稳固，对外部压力的阻碍作用增强。

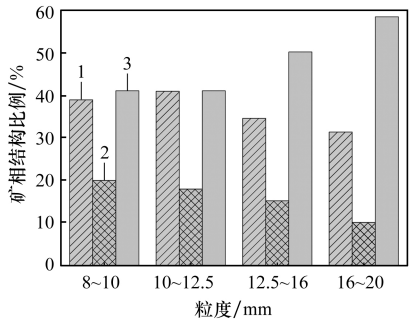


（a）8.0 ~ 10.0 mm（环部）；（b）10.0 ~ 12.5 mm（环部）；（c）12.5 ~ 16.0 mm（环部）；（d）16.0 ~ 20.0 mm（环部）
A（红色）—气孔；B（黄色）—液相；C（蓝色）—固相。

图 3　不同粒度熔剂性球团微观结构

Fig. 3　Microstructure of fluvial pellets with different particle sizes

通常，球团的固结有固相固结、液相固结两种方式，但不管是酸性球团还是碱球球团，都应以固相固结为主，液相固结为辅[13]。不同粒度熔剂性球团的矿相面积占比如图 4 所示。由图 4 可知，随着熔剂性球团粒度的提高，固相比例显著提高，从 41.05% 提高至 58.41%，致密度提高，且熔剂性球团的固相结构多为赤铁矿结晶，连晶效果较好，可以有效提高抗压能力和抗粉化能力，提高熔剂性球团的性能。当熔剂性球团的粒度提高时，液相率从 20.02% 降低为 10.19%，虽然液相比例的降低使得致密度提高，但一方面液相依旧分布于整个球面的各个部分，且存在局部液相堆积的情况，出现液相、固相混杂的结构，阻碍赤铁矿的再结晶；另一方面，一定量的液相存在于气孔、液相间时存在一定的链接状态，有助于连晶结构间的稳定，侧面增强了熔剂性球团的抗粉化能力。这也是大粒度熔剂性球团低温还原粉化性能降低的原因之一。



1—气孔率；2—液相率；3—固相率。

图 4　不同粒度熔剂性球团中的矿相面积占比

Fig. 4　Area proportion of mineral phases of fluxic pellets with different particle sizes

因此，熔剂性球团生产过程中应控制合适的粒度以保证得到的成品球具有良好的冶金性能，球团粒度不应过小或过大，当粒度为 10.0 ~ 16.0 mm 时，球团的抗压强度较好，低温粉化性能适中，熔滴性能较为优秀，综合性能最佳。

3　结　论

（1）随着熔剂性球团粒度逐渐提升，抗压强度明显提升，还原性降低，还原膨胀性能整体处于优秀水平，低温还原粉化性能随粒度的提高变差，＞6.30 mm 低温还原粉化指数变化最为明显，从 87.8% 降低至 66.5%，＞3.15 mm 低温还原粉化指数从 95% 降低至 87.2%，＜0.50 mm 低温还原粉化指数变化幅度较小，约为 4%。

（2）随着熔剂性球团粒度逐渐提升，熔化区间（$T_d - T_s$）增大，从 75 ℃提高至 133 ℃，而且由于 T_s 降低的缘故使得熔化区间上移，使得高炉软

熔带透气性变差。在粒度为 10.0 ~ 16.0 mm，最大压差范围在 9.4 ~ 10.7 kPa 时的特性值保持在 178.4 ~ 266.1 kPa·℃，处于较为优秀的水平。

（3）随着熔剂性球团粒度逐渐提升，气孔率降低，从 38.93% 降低为 31.4%，固相比例显著提高，从 41.05% 提高至 58.41%，致密度提高，但液相率的降低可能使得原本存在的链接状态失去效果，侧面削弱了熔剂性球团性能。因此在熔剂性球团生产过程中应控制合适的球团粒度，使得熔剂性球团具备良好的性能。

参考文献：

[1] 朱德庆，黄伟群，杨聪聪，等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团，2017，42(3)：42 - 49.
ZHU Deqing，HUANG Weiqun，YANG Congcong，et al. Progress in iron ore pellet technology[J]. Sintering and pelleting，2017，42(3)：42 - 49.

[2] 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.
WANG Xindong，LI Jianxin，HU Qichen. Application practice of source and process sulfur-nitate reduction technology based on optimization of blast furnace charge structure[J]. Iron and Steel，2019，54(12)：104 - 110；131.

[3] 余正伟，向爱平，刘山平，等. 低铁高硅赤铁精矿对氧化球团性能的影响[J]. 中国冶金，2020，30(6)：8 - 13；23.
YU Zhengwei，XIANG Aiping，LIU Sanping，et al. Effect of low iron and high silicon hematite concentrate ratio on properties of oxidized pellets[J]. China Metallurgy，2020，30(6)：8 - 13；23.

[4] 卢建光，刘小杰，吕庆. PMC 矿粒度及球团预热、焙烧工艺参数的选择[J]. 钢铁，2020，55(10)：21 - 28.
LU Jianguang，LIU Xiaojie，LÜ Qing. Selection of PMC ore particle size and pellet preheating and roasting process parameters[J]. Iron and Steel，2020，55(10)：21 - 28.

[5] KON T，NATSUI S，MATSUHASHI S，et al. Influence of cohesive zone thickness on gas flow in blast furnace analyzed by DEM-CFD model considering low coke operation[J]. Steel Research International，2013，84(11)：1146.

[6] 刘征建，黄建强，张建良，等. 高炉高比例球团冶炼技术发展和实践[J]. 辽宁科技大学学报，2021，44(2)：85 - 91.
LIU Zhengjian，HUANG Jianqiang，ZHANG Jianliang，et al. Development and practice of high proportion pellet smelting technology in blast furnace[J]. Journal of Ning Technology University，2021，44(2)：85 - 91.

[7] 王维兴. 提高高炉炉料中球团矿配比浅析[N]. 世界金属导报，2019 - 08 - 13(B2).
WANG Weixing. Analysis of increasing pellet ratio in blast furnace charge[N]. World Metal Herald，2019 - 08 - 13(B2).

[8] 杨晓东，张丁辰，刘锟，等. 球团替代烧结 - 铁前节能低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究 - 跨学科视野中的工程，2017，9(1)：44 - 52.
YANG Xiaodong，ZHANG Dingchen，LIU Kun，et al. Pellet is an important way of energy saving，low carbon pollution and emission reduction before sintering-iron[J]. Engineering Studies-Engineering in an interdisciplinary perspective，2017，9(1)：44 - 52.

[9] 王新东，胡小东，胡启晨. 河钢唐钢新区 760 m^2 带式焙烧机[J]. 河北冶金，2021(8)：31 - 38.
WANG Xindong，HU Xiaodong，HU Qichen. Hesteel Tanggang new area 760 m^2 belt roasting machine[J]. China Metallurgy，2021(8)：31 - 38.

[10] 王新东. 以高质量发展理念实施河钢产业升级产能转移项目[J]. 河北冶金，2019(1)：1 - 9.
WANG Xindong. Implementing the industrial upgrading and capacity transfer project of HBIS with the concept of high quality development[J]. Hebei Metallurgy，2019(1)：1 - 9.

[11] GUDENAU W，WALDEN H. 铁矿石球团直径对球团生产及其质量特性的影响[J]. 烧结球团，1985(1)：106 - 115.
GUDENAU W，WALDEN H. Effect of diameter of iron ore pellet on the process of pellet production and its quality characteristics[J]. Sintering and Pelletizing，1985(1)：106 - 115.

[12] DWARAPUDI S，DEVI T U，RAO S M，et al. Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets[J]. ISIJ International，2008，48(6)：768 - 776.

[13] 高冰，张文强，单庆林，等. 焙烧温度对熔剂性球团性能及微观结构的影响[J]. 烧结球团，2022，47(5)：53 - 58；94.
GAO Bing，ZHANG Wenqiang，SHAN Qinglin，et al. Effect of firing temperature on properties and microstructure of fluxed pellets[J]. Sintering and Pelleting，2022，47(5)：53 - 58；94.