高炉用生物质含碳团块制备及冶金性能

熊 林[1]，王广伟[2]，吴君毅[2]
（1. 宝山钢铁股份有限公司 中央研究院，上海 201900；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：以生物质为碳源的高强度含碳团块制备和应用是降低高炉炼铁生产 CO_2 排放的技术措施之一。本文以冷压成型—热处理提升强度的方法制备高强度生物质含碳团块，并从低温还原粉化、还原性及软熔滴落性三方面与传统球团矿开展对比分析，评估其在高炉工序应用的可行性。结果表明：以磁铁矿粉为原料制备的生物质含碳团块具有较高的抗压强度和落下强度，赤铁矿粉制备的生物质含碳团块由于低温还原过程中晶型转变引起的体积膨胀破坏黏结剂固结强度，致使其低温还原粉化性能较差，不满足高炉冶炼对炉料性能的要求。$n(C)/n(O)$ 比是影响含碳团块高温性能的关键参数，控制块 $n(C)/n(O)$ 比为 0.55 时，生物质含碳团块的低温还原粉化性能、还原性和软熔滴落性能优于传统氧化球团，可以作为新型低碳炉料部分替代球团矿应用于高炉炼铁生产，实现高炉低碳高效生产。

关键词：含碳团块；生物质能；冶金性能；低碳炼铁
中图分类号：TF046.6；TF55 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0146－08
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.012

Preparation and metallurgical properties of biomass carbon-containing agglomerates for blast furnaces

XIONG Lin[1], WANG Guangwei[2], WU Junyi[2]
(1. Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China; 2. School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The preparation and application of high-strength carbon-containing agglomerates with biomass as carbon source is one of the technical measures to reduce CO_2 emissions in blast furnace ironmaking production. In this paper, high-strength biomass carbon-containing agglomerates are prepared by cold pressing and heat treatment to improve strength, and the feasibility of their applications in blast furnace process is evaluated by comparing them with traditional pellets from such three aspects as low temperature reduction powdering, reducing properties and soft melting and dripping properties. The results show that the biomass carbon-containing agglomerates prepared from magnetite powder have high compressive strength and falling strength, the volume expansion of the carbon-containing agglomerates of biomass prepared by hematite powder caused by the crystal shape change during the low-temperature reduction process destroys the binder consolidation strength, resulting in poor low-temperature reduction powdering properties, which does not meet the requirements of blast furnace smelting for charge properties. The $n(C)/n(O)$ ratio is the key parameter affecting the high-temperature properties of carbon-containing agglomerations. When the $n(C)/n(O)$ ratio of the control block is 0.55, the low-temperature reduction powdering properties, reduction and soft melt dripping properties of the biomass carbon-containing agglomerates are better than those of the traditional oxidized pellets, so the biomass carbon-containing agglomerates can be used as a new low-carbon charge to partially replace pellets in blast furnace ironmaking production to

收稿日期：2025－09－08；**修回日期**：2025－11－13
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202305)；国家自然科学基金资助项目(52174295)
作者简介：熊 林(1982—)，男，高级工程师，从事烧结球团和生物质低碳冶金方面的研究。
通信作者：王广伟(1986—)，男，教授，从事高炉炼铁过程节能减排和低品质燃料提质利用方面的研究。

achieve low-carbon and efficient production of blast furnaces.

Key words: carbon-containing agglomerates; biomass energy; metallurgical properties; low-carbon ironmaking

钢铁工业作为国民经济的支柱产业，同时也是能源消耗和 CO_2 排放的大户，在国家积极推动“双碳”战略的背景下，发展低碳冶金技术已成为钢铁企业提升竞争力的关键[1-2]。高炉作为长流程钢铁企业生产的核心环节，其炉料结构的合理性直接影响冶炼效率、能耗水平及 CO_2 排放强度。当前，我国高炉炉料以高碱度烧结矿配加酸性球团矿为主，虽能满足基本冶炼需求，但传统炉料存在两大突出问题：烧结矿生产能耗高(每吨烧结矿能耗约为 50 ~ 60 kg 标准煤)，且 CO_2 排放强度大；氧化球团高温还原性和高温软熔滴落性能差，制约了高炉冶炼能效水平的提升。开发新型低碳炉料已成为钢铁工业绿色转型的迫切需求[3-7]。

生物质作为唯一可替代化石能源的可再生碳源，其经过热化学转化获得的生物质炭具有固定碳含量高、灰分低、反应活性高等特点[8-10]。将生物质炭与铁矿粉混合制备成含碳团块可实现在炉内升温过程中的“自还原”，减少高炉生产对化石燃料的依赖，理论上可降低吨铁 CO_2 排放 10%~15%[11-12]。赵满祥等[13]以生物质热解炭作为还原剂制备高强度含碳球团，系统分析了成型工艺参数对冷强度和还原后强度的影响规律。结果表明，含碳球团冷态强度随成型压力的增加呈现先升高而后降低的规律，还原后强度随焙烧温度的升高呈现先降低而后升高的趋势，球团强度值在 900 ~ 1 000 ℃时最低。方书霖等[14]以转底炉用生物质含碳球团为研究对象，对比分析了生物质炭种类、温度和时间对还原过程和动力学的影响，结果表明温度对含碳球团的影响最为显著，扩散过程是含碳球团高温还原过程的限制性环节。目前有关生物质含碳团块的研究多聚焦于转底炉工艺，制备高强度生物质含碳团块并应用于高炉工序的研究相对较少。生物质含碳团块的高温冶金性能是决定其能否应用于高炉冶炼的关键，其中低温还原粉化性影响块状带透气性，高温还原性决定还原效率，软熔滴落性则关乎软熔带结构与煤气利用率。目前，关于生物质含碳团块高温还原行为的研究仍存在盲区：一是铁矿类型对团块性能的影响机制不明确，赤铁矿与磁铁矿因晶体结构差异，其还原过程中的体积变化与强度演化规律显著不同；二是 $n(C)/n(O)$ 比的调控缺乏系统研究，过高或过低的配碳量可能导致渗碳过度或还原不足，进而恶化软熔滴落性能。

本文以磁铁矿、赤铁矿为含铁原料，木炭粉为还原剂，改性沥青作为黏结剂，采用冷压成型—热处理提升强度的方法制备高强度生物质含碳团块，并系统对比其与传统氧化球团在低温还原粉化性、还原性及软熔滴落性的差异。研究成果旨在为生物质含碳团块的制备和高炉应用提供理论支撑，推动高炉炼铁向低耗、低碳、高效方向发展，为钢铁工业实现“双碳”目标提供解决方案。

1　试验方法

1.1　试验原料

含碳团块制备所用的生物质炭采用高温裂解制备的工业木炭，铁矿粉分别选用钢铁企业使用的赤铁矿和磁铁矿。试验前，首先对工业木炭和铁矿粉进行干燥、研磨和筛分，选取粒度小于 0.15 mm 木炭粉和赤铁矿粉，以及粒度小于 0.074 mm的磁铁矿粉作为试验原料使用。木炭粉工业分析和元素分析见表 1，铁矿粉主要化学成分见表 2，各原料粒度组成见表 3。

由表 1 可知，木炭粉固定碳质量分数高达 92.46%，灰分为 2.94%，挥发分质量分数为 4.60%。由表 2 可知，赤铁矿铁品位稍低为 63.02%，SiO_2 质量分数较高为 5.93%，磁铁矿铁品位较高为 68.84%，SiO_2 质量分数较低为 1.75%。此外，对比用的氧化球团为炼铁厂高炉用酸性球团矿，铁品位为 64.54%，SiO_2 和 CaO 的质量分数分别为 5.66% 和 0.45%。由表3可知，木炭粉和赤铁矿

表 1　木炭粉工业分析和元素分析(质量分数)

Table 1　Proximate analyses and ultimate analyses of charcoal powder　　%

工业分析				元素分析			
固定碳	灰分	挥发分	C	H	O	N	S
92.46	2.94	4.60	93.66	1.58	1.82	0.23	—

表2 铁矿粉主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of iron ore powder %

铁矿粉	TFe	FeO	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	S	P
赤铁矿	63.02	1.32	0.32	5.93	0.24	0.81	—	0.09
磁铁矿	68.84	27.26	0.46	1.75	0.68	0.38	0.05	0.03

表3 原料粒度组成(质量分数)

Table 3 Particle size distribution of different samples

原料名称	>0.150 mm	[0.100,0.150] mm	[0.074,0.100) mm	[0.063,0.074) mm	[0.054,0.063) mm	<0.054 mm
木炭粉	1.73	15.88	25.16	29.22	18.66	9.35
赤铁矿	0.65	41.73	29.27	20.26	6.54	1.55
磁铁矿	—	0.65	1.89	33.26	28.66	35.54

粉的粒度较粗，木炭粉在[0.063,0.100] mm粒度范围内质量分数达到54.38%，赤铁矿粉在[0.100,0.150] mm粒度区间的质量分数最大，达到了41.73%。相比之下，磁铁矿粉的粒度较细，小于0.074 mm的质量分数高达97.46%。

1.2 含碳团块制备及性能表征

高强度生物质含碳团块的制备采用冷压成型—热处理提升强度的方法，首先将木炭粉、铁矿粉和黏结剂按设定比例进行称量并混合，混合均匀后加入适量去离子水并拌匀，利用粉末压片机在74 MPa的压力下将混匀料压制成∅20 mm × 15 mm圆柱体，然后放置于烘箱中在105 ℃温度下干燥2 h，干燥后的生物质含碳团块放置于带盖的坩埚内转移到马弗炉中以600 ℃进行无氧焙烧热处理20 min，促进黏结剂的固化，提升含碳团块的强度，热处理完成后取出在惰性气体保护下进行自然冷却，获得高强度生物质含碳团块样品。

生物质含碳团块样品的冶金性能表征采用铁矿石综合性能测试设备分别按照“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—2023)和“铁矿石还原性的测定方法”(GB/T 13241—2023)测定不同样品的低温还原粉化性能和还原性能。采用铁矿石熔滴炉测定装置，按照“铁矿石高温荷重还原软熔滴落性能测定方法”(GB/T 34211—2017)测定不同样品的软熔滴落性能。为明确高温还原过程中样品微观结构和组成的演变规律，采用历程分割试验获取在不同还原阶段的金属化团块样品，并利用X射线衍射仪和扫描电镜对其物相组成和微观结构进行分析。表4为试验所涉及的熔滴实验标准参数及其意义。

表4 熔滴实验标准参数及其意义

Table 4 Standard parameters and significance of droplet experiment

试验指标	意义
T_{10}/℃	软化开始温度,样品软化收缩10%的温度
T_{40}/℃	软化终了温度,样品软化收缩40%的温度
T_s/℃	压差为500 Pa的温度
T_d/℃	第一滴铁液滴落的温度
H_d/mm	渣铁开始滴落时样品的位移量
H_s/mm	熔融阶段开始时样品的位移量
$\Delta T_1(T_{40}-T_{10})$/℃	软化区间
$\Delta T_2(T_d-T_s)$/℃	熔融区间
$\Delta T_3(T_d-T_{10})$/℃	融滴区间
$\Delta H(T_s-T_d)$/mm	熔落带厚度

2 结果与讨论

2.1 生物质含碳团块强度

黏结剂性能是影响含碳团块强度的关键因素，本研究选用沥青、糊化淀粉和无机矿物混合改性而成的复合黏结剂，其粒度小于0.15 mm，烧损为89.52%，固定碳质量分数为53.67%，黏结指数为93，软化温度为182 ℃。将木炭粉、铁矿粉和复合黏结剂按照表5所示的物料配比进行备料，采用冷压成型—热处理提升强度方法制备生物质含碳团块，制备的含碳团块按照文献[13]方法进行抗压强度和2 m水泥地落下强度的测量，结果

如表 5 所示。为方便分析讨论，对 4 种样品进行编号，其中氧化球团为方案 1、$n(C)/n(O)=0.85$ 赤铁矿生物质含碳团块为方案 2、$n(C)/n(O)=0.85$ 磁铁矿生物质含碳团块为方案 3、$n(C)/n(O)=0.55$ 磁铁矿生物质含碳团块为方案 4。从表 5 中可以看出：赤铁矿粉制备的含碳团块的强度最低，抗压强度为 1 214 N，落下强度为 11 次/(2 m)；磁铁矿制备含碳团块的强度值较高，特别是 $n(C)/n(O)$ 比为 0.55 的含碳团块，抗压强度达到了 2 172 N，落下强度超过了20 次/(2 m)。从颗粒堆积的角度分析，当原料由细颗粒和粗颗粒混合而成时，细颗粒填充于粗颗粒之间的缝隙中，减少了团块内部的孔隙，有利于提升团块的强度值[15]。根据原料粒度分布的数据可知，赤铁矿粉和木炭粉的粒度较粗，磁铁矿粉的粒度较细，赤铁矿粉制备的含碳团块粗颗粒比例过高是引起强度差的主要因素。

表 5　生物质含碳团块物料配比和成品抗压强度

Table 5　Proportion and compressive strength of biomass carbonaceous agglomerates

样品	物料配比(质量分数)/%				抗压强度/N	落下强度/[次·(2 m)$^{-1}$]
	赤铁矿粉	磁铁矿粉	黏结剂	木炭粉		
方案 1	—	—	—	—	>3 000	>20
方案 2	80.0	—	12.5	7.5	1 214	11
方案 3	—	80.0	12.5	7.5	1 794	>20
方案 4	—	85.4	11.0	3.6	2 172	>20

2.2　低温还原粉化

含铁炉料低温还原粉化性能(>3.15 mm)主要表征高炉上部低温区(500～550 ℃)抵抗铁氧化物还原过程体积膨胀而不粉碎的能力[16-17]。不同炉料低温还原粉化试验结果如表 6 所示。由表 6 可知，方案 1 样品的强度为高温氧化焙烧而形成的固结作用，具有较好的抵抗低温还原粉化性能，其低温还原粉化性能(>3.15 mm)为 95.9%。方案 2 样品低温还原粉化性能(>3.15 mm)为 30.1%，远低于传统高炉使用的烧结矿、球团矿以及块矿的低温还原粉化冶金性能指标，不满足高炉对含铁炉料冶金性能的要求。方案 3、方案 4 样品低温还原粉化性能(>3.15 mm)分别为 96.6% 和 96.89%，都优于传统含铁炉料的低温还原粉化性能。

表 6　不同样品低温还原粉化试验结果(质量分数)

Table 6　Experimental results of low-temperature reduction pulverization of different samples　%

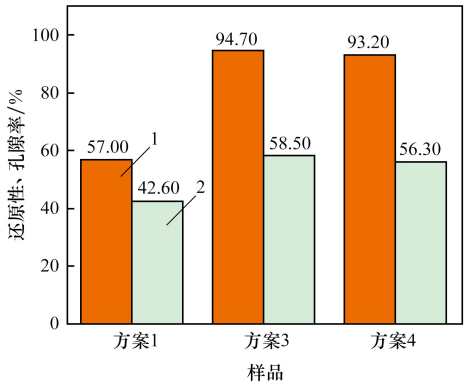
样品	低温还原粉化性能		
	>6.3 mm	>3.15 mm	<0.5 mm
方案 1	92.9	95.9	3.1
方案 2	28.7	30.1	50.6
方案 3	96.6	96.6	3.4
方案 4	96.9	96.9	3.1

方案 2 样品的低温还原粉化性能(>3.15 mm)较低的主要原因包括两个方面：一方面，本次从企业获取的赤铁矿粉粒度较粗，而粒度对生物质含碳团块的强度有重要影响，造成方案 2 样品的抗压强度只有 1 214 N，团块自身强度低造成低温还原粉化性能差；另一方面，方案 2 样品中的含铁矿物为 Fe_2O_3，在低温还原条件下由赤铁矿 α-Fe_2O_3(三方晶系)先转变为中间产物磁赤铁矿 γ-Fe_2O_3(等轴晶系)，晶格转变过程中发生体积膨胀，在低温还原过程中微小的体积膨胀也会对黏结剂固化形成的固桥黏结作用力产生恶性破坏，造成团块强度快速下降，进而引起严重粉化。磁铁矿粉制备的含碳团块在低温还原过程中未发生铁氧化物还原引起的体积膨胀，且固化后的黏结剂再次经过加热处理，进一步炭化形成更为坚固的固桥连接，提升了含碳团块的强度。因此，从团块强度和低温还原粉化性能两方面分析，方案 2 制备的生物质含碳团块不宜作为高炉低碳炉料使用，在后续的研究中主要围绕方案 1、3 和 4 展开。

2.3　还原性

氧化球团和磁铁矿生物质含碳团块还原性试验结果如图 1 所示。由图 1 可知，方案 1、方案 3 与方案 4 样品的还原性指数分别为 57%、94.7%、93.2%，生物质含碳团块的还原性要显著优于氧化球团。众所周知，铁矿石的还原性与其孔隙率有显著的相关性，一般情况下孔隙率越高的铁矿石，其还原性能越好。采用压汞法对 3 种还原后的样品进行孔隙率测定，可以看出两种生物质含碳团块还原后样品的孔隙率分别为 58.5% 和 56.3%，大于氧化球团的 42.6%，较高的孔隙率有利于还原煤气扩散到团块内部与铁矿粉颗粒发生还原反应，改善了团块的还原性能。此外，生

物质含碳团块内部的生物质炭颗粒也具有较好的反应活性并与铁矿粉紧密接触，在还原实验过程中可以作为内部的还原剂，直接参与到铁矿粉的还原反应，进一步提升了含碳团块的还原性。生物质含碳团块优良的还原性可以降低高炉热滞区温度，为进一步提升高炉冶炼的炉身效率和降低高炉燃料比提供了条件。



1—还原性；2—孔隙率。

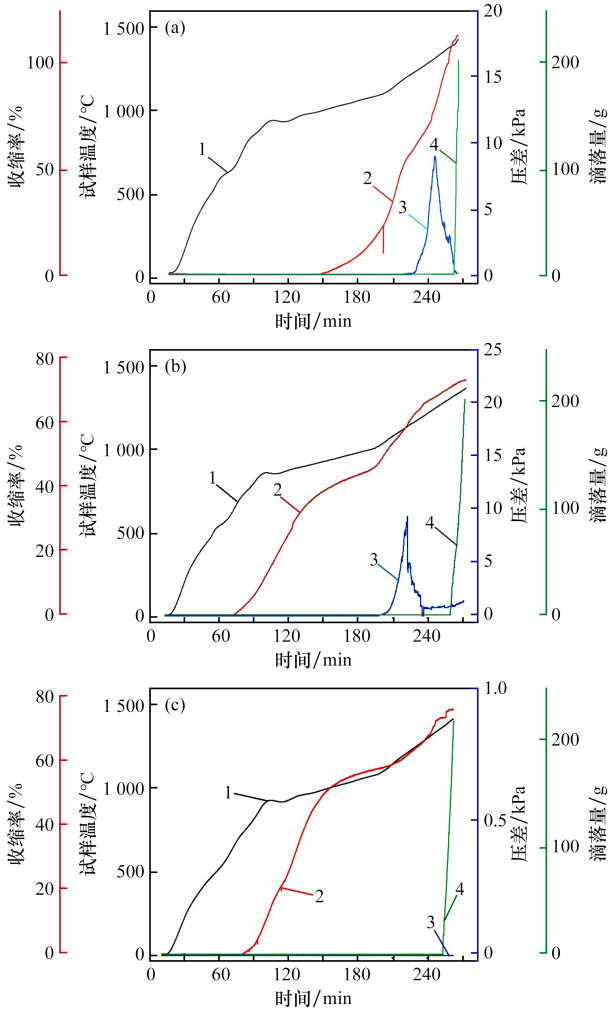
图 1 不同样品还原性和孔隙率

Fig. 1 Reducibility and porosity of different samples

2.4 软熔滴落性能

含铁炉料加入高炉后随料柱逐渐下移而被加热和还原，在高温区经历软化、熔融、滴落等过程，对料柱的孔隙率、透气透液性产生显著的影响[18]。不同样品的软熔滴落性能检测曲线如图 2 所示。由图 2 可知，方案 1 的氧化球团在 1 000 ℃左右开始发生软化收缩，约为 1 200 ℃时样品开始熔化，炉料软化后的填充作用引起压差升高，约为 1 400 ℃样品熔化后通过焦炭缝隙和石墨坩埚的孔洞发生滴落。方案 3 和方案 4 的熔滴位移曲线约在 700 ℃时开始有明显的收缩，温度升高到 1 000 ℃时收缩量趋于平缓，当温度超过1 100 ℃后，炉料再次快速收缩，直至样品熔化滴落。

对 3 种团块的软熔滴落曲线进行软熔滴落特征参数提取，结果如表 7 所示。传统氧化球团矿加热还原过程中有软化收缩过程，按照样品收缩为 10% 的温度记为软化开始温度（T_{10}），收缩 40% 的温度记为软化终了温度（T_{40}），对于含碳团块样品，在焙烧还原中存在明显的收缩现象，含碳团块焙烧还原和氧化球团还原收缩的机理不同，不宜简单将收缩率10% 作为团块开



（a）方案 1；（b）方案 3；（c）方案 4

1—温度；2—收缩率；3—压差；4—滴落量。

图 2 不同样品软熔滴落性能检测曲线

Fig. 2 Testing curve of different samples soft melt droplet performance

始软化温度分析。由表 7 可知，方案 3 样品压差为 500 Pa 时的温度（T_s）为 1 158 ℃，小于方案 1 样品的 1 241 ℃，方案 4 样品压差为 0，没有明显的熔融区间。方案 3 样品的第一滴铁液滴落温度（T_d）为 1 384 ℃略小于方案 1 样品的 1 397 ℃，方案 4 的 T_d为1 379 ℃，与方案 1 接近。方案 1 和方案 3 样品最大压差分别为9 kPa 和9. 3 kPa，方案4 的最大压差为 0。方案 3 样品熔融区间为 226 ℃，略高于方案 1 样品 156 ℃，方案 3 的熔落带厚度（ΔH）为 14. 8 mm，方案 1 的熔落带厚度为 14. 8 mm，方案 4 样品软化后马上滴落，没有熔落带的存在。

对比方案 3 和方案 4 样品的软熔滴落曲线还

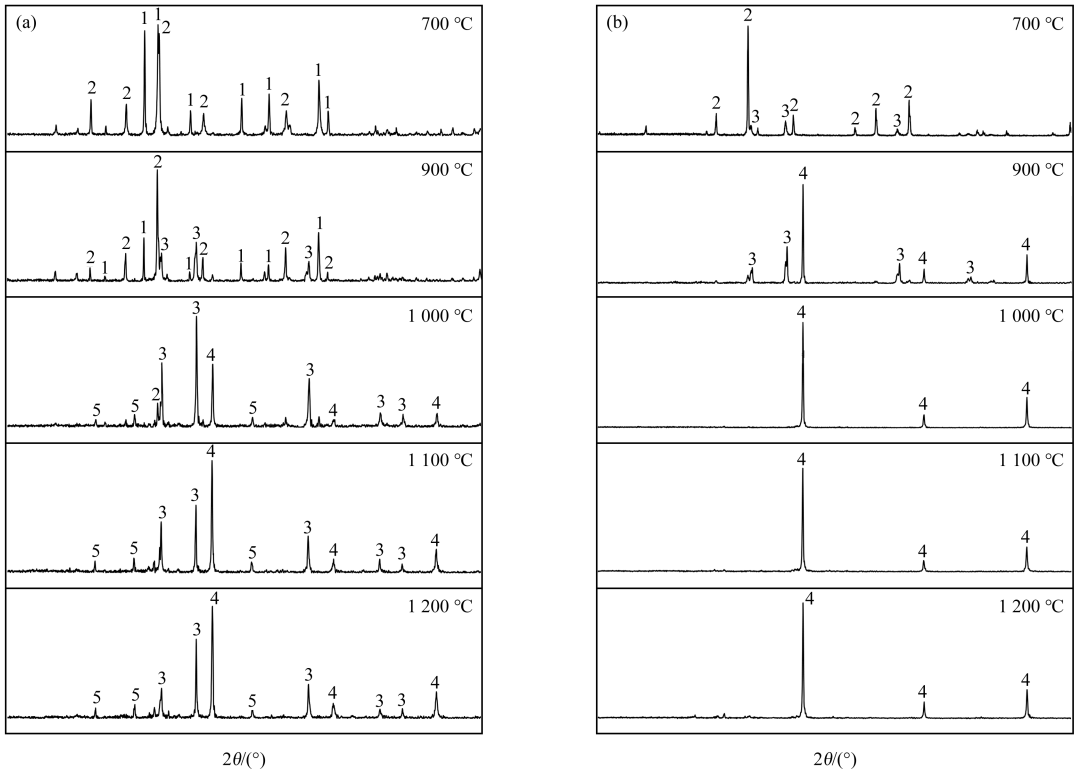
可以看出，方案 3 样品在约为 1 200 ℃时出现了明显的压差曲线峰值，而方案 4 样品在整个试验过程中未出现明显的压差升高现象。分析引起的主要原因是方案 3 团块的配碳量较高，在有外部还原气作用下造成金属化团块内部的生物质炭粉过剩，致使金属化团块强度降低，在有荷重的情况下容易粉碎，产生的粉末进入料柱造成孔隙率降低，引起压差升高。

为明确引起含碳团块软熔滴落曲线变化的原因，采用历程分割试验方法对无荷重还原条件下样品的矿相转变进行解析，不同还原阶段方案 1 和方案 3 样品对应还原产物的矿物组成如图 3 所示。由图 3 可知，方案 1 样品在还原温度低于 900 ℃时，主要矿物组成为 Fe_2O_3、Fe_3O_4 和 FeO，温度升高到 1 000 ℃时开始有大量的 Fe 相生成，Fe_2O_3、Fe_3O_4 大部分被还原为 FeO 和 Fe。同时，高温条件下氧化球团样品中脉石组分与还原生成的低价态铁氧化物反应，生成还原性极差的 Fe_2SiO_4，即使温度进一步增加到 1 300 ℃时，还能观察到显著的 Fe_2SiO_4 峰值，这也是造成方案 1 样品还原性差的一个主要因素。方案 3 样品在700 ℃条件下铁氧化物主要以 Fe_3O_4 形式存在，团块并未发生显著的还原反应，说明磁铁矿生物质含碳团块在软熔滴落曲线中低温区域的体积收缩主要由黏结剂进一步固化过程的缩聚反应引起。当温度升高到 900 ℃时，含碳团块开始大量生成金属 Fe；温度

表 7　不同样品软熔滴落特征参数

Table 7　Characteristic parameters of softening-melting and dropping for different samples

样品	T_{10}	T_{40}	T_s	T_d	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔH
方案 1	1 066	1 153	1 241	1 397	87	156	331	26.4
方案 3	—	—	1 158	1 384	—	226	—	14.8
方案 4	—	—	—	1 379	—	—	—	—



（a）方案 1；（b）方案 3

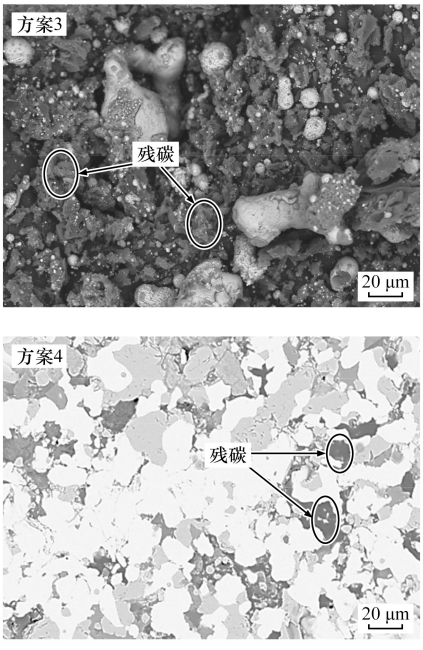
1—Fe_2O_3；2—Fe_3O_4；3—FeO；4—Fe；5—Fe_2SiO_4。

图 3　不同温度条件还原产物的物相组成

Fig. 3　Phase composition of the reduction products under different temperature conditions

超过1 000 ℃时，FeO的特征峰消失，此时含碳团块中的铁氧化物已经被完全还原生成金属Fe，再次验证了生物质含碳团块还原性优于氧化球团的结论。

图4为1 200 ℃条件下方案3和方案4样品还原后金属化团块的扫描电镜图。由图4可知，方案3样品高温还原后存在大量残炭，说明$n(C)/n(O)$为0.85的含碳团块在熔滴试验还原条件下，由于外部的还原气体参与了铁氧化物的还原反应，造成团块内部的生物质炭未能被消耗完全，过剩的生物质炭分布在还原生成的金属铁颗粒周边，影响金属铁连晶的生成和长大，进而对金属化团块的高温强度产生负面影响。方案4样品还原后团块内部的生物质炭基本被消耗殆尽，还原生成的金属铁与周边的金属铁颗粒汇聚长大，形成大片铁连晶具有良好的高温强度。以上分析表明，当配碳量比较高时[$n(C)/n(O)=0.85$]，含碳团块还原后存在大量残炭颗粒，造成金属化团块强度差，形成的粉末填充在料柱中造成压差增加，料柱透气性变差，对应图2可以观察显著的压差曲线。在配碳量较低[$n(C)/n(O)=0.55$]的情况下，含碳团块还原生成的金属化团块在高温区域具有较高的强度，起到了骨架支撑作用，保证了料柱的透气性，对应图2软熔滴落曲线中方案4样品未观察到压差曲线。



(a) 方案3；(b) 方案4

图4 不同样品在1 200 ℃条件下还原后微观形貌

Fig. 4 Microstructure of different samples after reduction at 1 200 ℃

3 结 论

(1) 采用冷压成型热处理提升强度方法制备的生物质含碳团块具有较高的强度，以磁铁矿粉为原料制备的低$n(C)/n(O)$比含碳团块抗压强度达到了2 172 N，落下强度大于20次/(2 m)。

(2) 磁铁矿粉制备的生物质含碳团块在低温还原过程中无$Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$反应发生，有效克服了晶格膨胀对黏结剂固结强度的破坏，低温还原粉化指数(>3.15 mm)超过了96.6%，优于传统的氧化球团。

(3) 磁铁矿生物质含碳团块还原性优于氧化球团。含碳团块具有较高的孔隙率，有利于还原气体的扩散与反应，并且团块内部的生物质炭颗粒与铁矿粉反应距离短、还原效率高。

(4) 软熔滴落试验表明，$n(C)/n(O)$比是影响生物质含碳团块高温性能的关键因素，在有外部还原煤气存在的条件下，控制磁铁矿生物质含碳团块$n(C)/n(O)=0.55$时具有较好的软熔滴落性能。

参考文献：

[1] 刘清梅,张福明. 钢铁工业减碳与CO_2资源化利用技术的研究进展[J]. 钢铁,2024,59(2):13－24.
LIU Qingmei, ZHANG Fuming. Research progress of carbon reduction and CO_2 resource technology utilization in iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2024, 59(2):13－24.

[2] 唐珏,秦纪乐,储满生,等. 低碳炼铁工艺发展现状探讨与展望[J]. 中国冶金,2025,35(7):83－95.
TANG Jue, QIN Jile, CHU Mansheng, et al. Discussion and prospects on development status of low-carbon ironmaking processes[J]. China Metallurgy, 2025, 35(7):83－95.

[3] 宋昀霏,湛文龙,张盟,等. 典型高炉块矿的粉化机制[J]. 钢铁,2025,60(6):44－54.
SONG Yunfei, ZHAN Wenlong, ZHANG Meng, et al. Disintegration mechanism of typical blast furnace lump ore[J]. Iron & Steel,2025,60(6):44－54.

[4] 肖扬武,刘强,易正明. 碱度对烧结矿致密化行为的

影响[J]. 烧结球团,2025,50(2):30 – 37.
XIAO Yangwu, LIU Qiang, YI Zhengming. Effect of alkalinity on sinter densification behavior[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(2):30 – 37.

[5] 孙大为,龙伟,寇明银,等. 基于高炉块状带工况的球团矿还原历程分析[J]. 钢铁,2024,59(11):34 – 44.
SUN Dawei,LONG Wei,KOU Mingyin,et al. Analysis of pellet reduction process based on blast furnace block zone working condition[J]. Iron & Steel,2024,59(11):34 – 44.

[6] 李国良,李乾坤,周晓冬,等. 多工艺协同降低烧结机工序能耗生产实践[J]. 烧结球团,2021,46(1):55 – 59.
LI Guoliang, LI Qiankun, ZHOU Xiaodong, et al. Production practice on reducing energy consumption of sintering machine process with multi-technique[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1):55 – 59.

[7] 邓睿,苏鸿,韩基祥,等. 高球比炉料结构下镁质球团的冶金性能研究[J]. 烧结球团,2020,45(2):31 – 35.
DENG Rui, SU Hong, HAN Jixiang, et al. Study on metallurgical properties of magnesium pellet under the burden structure of high pellet ratio[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):31 – 35.

[8] 康月,刘超,张玉柱,等. 生物质煤焦制备及性能优化研究[J]. 烧结球团,2023,48(5):95 – 100.
KANG Yue, LIU Chao, ZHANG Yuzhu, et al. Research on preparation and performance optimization of biomass coke[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(5): 95 – 100.

[9] 何志军,盛宏沅,高立华,等. 利用生物质能实现低碳炼铁的研究进展[J]. 钢铁,2025,60(1):1 – 14.
HE Zhijun, SHENG Hongyuan, GAO Lihua, et al. Research progress on utilizing biomass energy to achieve low-carbon ironmaking[J]. Iron & Steel,2025,60(1):1 – 14.

[10] 王广伟,阚光泽,宁晓钧,等. 水热耦合热解方法制备炼铁用高品质生物质炭[J]. 中国冶金,2025,35(2):86 – 93.
WANG Guangwei, KAN Guangze, NING Xiaojun, et al. Preparation of high-quality biochar for ironmaking by hydrothermal coupled pyrolytic method[J]. China Metallurgy,2025,35(2):86 – 93.

[11] 甘敏,李浩锐,范晓慧,等. 果核生物质炭燃烧特性及其应用于烧结的减排行为[J]. 烧结球团,2022,47(1):65 – 69.
GAN Min, LI Haorui, FAN Xiaohui, et al. Combustion characteristics of kernel biomass char and its emission reduction behavior applied to sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):65 – 69.

[12] 荣涛,唐惠庆,范楷,等. 利用高含碳金属化团块实现高炉炼铁的节焦[J]. 钢铁,2020,55(5):10 – 19.
RONG Tao, TANG Huiqing, FAN Kai, et al. Applying high-carbon metallic briquette in blast furnace for coke saving[J]. Iron & Steel,2020,55(5):10 – 19.

[13] 赵满祥,刘嘉雯,贾国利,等. 高强度生物质含碳球团制备及性能优化[J]. 中国冶金,2024,34(4):96 – 105.
ZHAO Manxiang, LIU Jiawen, JIA Guoli, et al. Preparation and performance optimization for biomass carbon-bearing pellets with high strength[J]. China Metallurgy,2024,34(4):96 – 105.

[14] 方书霖,王浩,孙武,等. 生物质含碳球团还原过程的影响因素及其动力学行为[J]. 烧结球团,2025,50(4):64 – 72.
FANG Shulin, WANG Hao, SUN Wu, et al. Influencing factors and dynamics behavior of biomass carbon-containing pellets reduction process[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(4):64 – 72.

[15] 卢昊鹏,袁朝新,孙贯永. 黏结剂对含碳球团强度影响的试验研究及机理分析[J]. 烧结球团,2023,48(5):79 – 85.
LU Haopeng, YUAN Chaoxin, SUN Guanyong. Experimental research and mechanism analysis on effect of adhesive for strength of carbon-containing pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(5):79 – 85.

[16] 王英春,胡启晨. 熔剂性球团低温还原粉化问题解析[J]. 烧结球团,2024,49(4):70 – 76.
WANG Yingchun,HU Qichen. Analysis of low temperature reduction pulverization of fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(4):70 – 76.

[17] 杨聪聪,夏光辉,朱德庆,等. 铁矿氧化球团低温还原粉化性能的影响因素评述[J]. 工程科学学报,2024,46(11):1978 – 1988.
YANG Congcong, XIA Guanghui, ZHU Deqing, et al. Review of influencing factors on the reduction disintegration performance of iron ore oxidized pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(11): 1978 – 1988.

[18] 张旭孝,韩宏亮,姜曦. 高炉添加金属化球团炉料的冶金性能试验[J]. 中国冶金,2015,25(5):15 – 18.
ZHANG Xuxiao, HAN Hongliang, JIANG Xi. Experiment on metallurgical properties of blast furnace burden containing metalized pellets[J]. China Metallurgy,2015,25(5):15 – 18.