高炉返矿冷固结压块的物化性能及应用经济性评价

尹 浩[1]，王吕辉[2]，杨吉祥[2]，欧 泳[2]，席皇达[2]，严礼祥[2]
（1. 湖南钢铁集团有限公司 绿色低碳研究中心，湖南 长沙 410004；
2. 重庆臻焱节能环保科技股份有限公司，重庆 400084）

摘要：冷固结压块工艺是一种低碳冶金炉料绿色制备技术，因其生产过程具有原料适应性强、工艺调整灵活、能源消耗少等突出特性，已成为冶金工业副产物或固体废弃物资源高质高效化利用和推动绿色转型的重要途径。为此，本文通过研究高炉返矿冷固结压块的制备工艺，寻找适宜的原料配比，考察压块的冶金物理化学性能，同时分析 3% 压块配比下涟钢 6# 高炉（2 200 m^3）的各项技术经济指标变化情况。结果表明：该压块具有较好的冷态和热态强度，并且在工业应用期间高炉炉况稳定，相关指标呈现向好趋势，高炉利用系数提升至 3.28 t/（m^3·d），透气性指数提升 3.06%，折算生铁成本降低 2.07 元/t，对高炉炼铁工序降碳降本起到积极作用。本文研究结论可为返矿等含铁副产物的高值化利用提供富有潜力的实践路径。

关键词：高炉返矿；厂内循环物；冷固结压块；绿色炉料；冶金性能
中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0083－10
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.032

Evaluation of physical and chemical properties and application economy of cold bonded briquettes from blast furnace return fines

YIN Hao[1], WANG Lühui[2], YANG Jixiang[2], OU Yong[2], XI Huangda[2], YAN Lixiang[2]
(1. Green Low-Carbon Research Center, Hunan Iron and Steel Group Co., Ltd., Changsha 410004, Hunan, China;
2. Chongqing Zhenyan Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Chongqing 400084, China)

Abstract: Cold bonded briquettes process is a green preparation technology of low-carbon metallurgical charge, which has become an important way to promote the high-quality and efficient utilization of by-products or solid waste resources in the metallurgical industry and promote green transformation due to its outstanding characteristics such as strong raw material adaptability, flexible process adjustment and low energy consumption. Therefore, the preparation process of cold bonded briquettes from blast furnace return fines is studied, the appropriate raw material ratio is found, the metallurgical physicochemical properties of briquettes are investigated, and the changes of various technical and economic indicators of Liangang No. 6 blast furnace (2 200 m^3) under the 3% briquettes ratio are analyzed. The results show that the briquettes have good cold and hot strength, and the furnace conditions of blast furnace are stable during industrial application, and the relevant indicators show a positive trend, the blast furnace utilization coefficient is increased to 3.28 t/(m^3·d), the air permeability index is increased by 3.06%, and the converted pig iron cost is reduced by 2.07 yuan/t, which plays a positive role in reducing carbon and cost reduction in blast furnace ironmaking process. The conclusions can provide a potential practical path for the high-value utilization of iron-containing by-products such as return fines.

Key words: blast furnace return fines; in-plant recycled materials; cold bonded briquettes; green charge; metallurgical properties

收稿日期：2025－04－25；**修回日期**：2025－06－23

作者简介：尹 浩（1989—），男，工程师，从事烧结技术研究与生产管理工作。
通信作者：王吕辉（1995—），男，助理工程师，从事冶金固废资源循环利用技术开发工作。

钢铁行业是国民经济的基础性、支柱型产业，也是碳排放大户。据《中国钢铁工业节能低碳发展报告(2023)》统计，钢铁行业碳排放量约占总碳排放量的15%左右，居全国工业领域排放首位。在“3060”双碳目标背景下，长流程钢铁联合企业绿色低碳发展的任务尤显艰巨，特别是在碳排放量较高的“烧结—高炉炼铁”工序，降碳减排任务更加繁重和必要。这也对冶金炉料的绿色制备技术提出了更高期待。冷固结压块工艺是一种绿色造块技术，又称团聚造粒(块)工艺，是指采取压块成型、低温固结等方法使铁精粉、返矿等较细小含铁物料聚集、缩合成一定尺寸且具有较好冶金性能的颗粒物扩大化技术[1]。其生产步骤少、对原料适应性强、造块过程能源消耗少和碳排放量低，已在转炉、矿热炉等多种冶炼场景中得到应用[2]。随着冶炼技术的持续发展，冷固结压块工艺已具备较高的成熟水平和实践价值，制备产品的冶金性能得到明显改善[3]。该技术已在榆中钢铁、略阳钢铁、汉钢集团等国内钢铁企业的高炉等高温、高压逆流反应器中实现工业化、规模化运用[4-5]。

新时代下钢铁企业正因地制宜培育和发展新质生产力，也走上了一条自主、低碳、智慧、高质量发展道路，对绿色高品质炉料的需求持续旺盛。作为钢铁冶金新型炉料制备的关键技术之一，冷固结压块技术则是对传统造块方式的一种有益补充。涟源钢铁返矿、氧化铁皮、球磨铁粒等厂内循环产物主要通过烧结工序再加工后投入高炉中利用，在烧结原料中占比较大。这种循环复烧的处理方式存在比较严重的物质流不合理和能量流浪费的缺陷，既占用了烧结机处理能力，又二次消耗了能源，增加了额外排放，阻碍了铁前系统高质量发展[6-7]。为此，本文通过调研该厂实际情况并结合现有案例[8-9]，采取将厂内循环物制成冷固结压块后直接用于高炉炼铁工序。通过研究返矿、氧化铁皮等含铁副产物的理化性质，并从外观形貌、微观结构、冶金性能等层面对冷固结压块进行全面考察，同时在2 200 m^3高炉开展工业化应用验证，分析其对炼铁生产的主客观影响，以提高厂内循环物利用水平，进一步推动优化炉料结构，为高炉用冷固结压块技术的规模化应用提供参考依据。

1 试验原料与方法

1.1 原料性质

含铁物料的可压制性和塑性重构性能是保障高炉返矿冷固结压块质量的关键因素之一。该阶段试验原料选用槽下返矿、氧化铁皮、球磨铁粒等物料，搭配使用粒度较细的高硅精粉，含铁原料具体成分如表1所示。由表1可知，返矿与烧结矿的化学成分大致相当，其R_2(二元碱度)约为2.05；高硅精粉的FeO质量分数较高；氧化铁皮是钢铁生产中的副产物，含铁量较高且出现较大部分氧化，FeO质量分数高达59%，高硅精粉则因其含有较高的磁铁矿，属于超高硅、低铝类矿；球磨铁粒具有含杂质少、含铁品位高和含水率较低等优点，高品位有利于提升团块整体品质，但其含硫量较高。

试验原料粒度分布如表2所示。由表2可知：此次选用是筛分后的球磨铁粒，其粒度相对均匀且大粒级部分占比较少，>3 mm粒级仅占7.25%；氧化铁皮的粒度集中于<3 mm，占比约为88.66%；返矿的粒级主要为1~3 mm，占比为42.09%。此外，高硅精粉的≥0.250、0.250~0.150、0.150~0.075、0.075~0.045 mm粒级占比分别为0.09%、6.94%、23.21%、22.41%、47.35%，该矿粉的粒级较小且各粒度均有一定分布。

表1 试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical composition and loss on ignition of the test raw materials %

原料名称	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P	Zn	K_2O	Na_2O	FeO	Cr	烧损
返矿	55.9	5.02	10.31	1.80	1.88	0.01	0.060	0.024	0.068	0.025	0	0.003	0
氧化铁皮	69.3	2.50	2.41	0.76	0.60	0.05	0.055	0.060	0.030	0.010	59.0	0.125	0.5
球磨铁粒	87.0	3.45	5.60	1.10	1.07	0.17	0.070	0.100	0.035	0.300	0	0.020	0.5
高硅精粉	62.8	9.63	0.13	0.30	0.82	0.04	0.040	0.010	0.035	0.010	24.5	0.001	0.5

表 2　试验原料的粒度分布及平均粒径

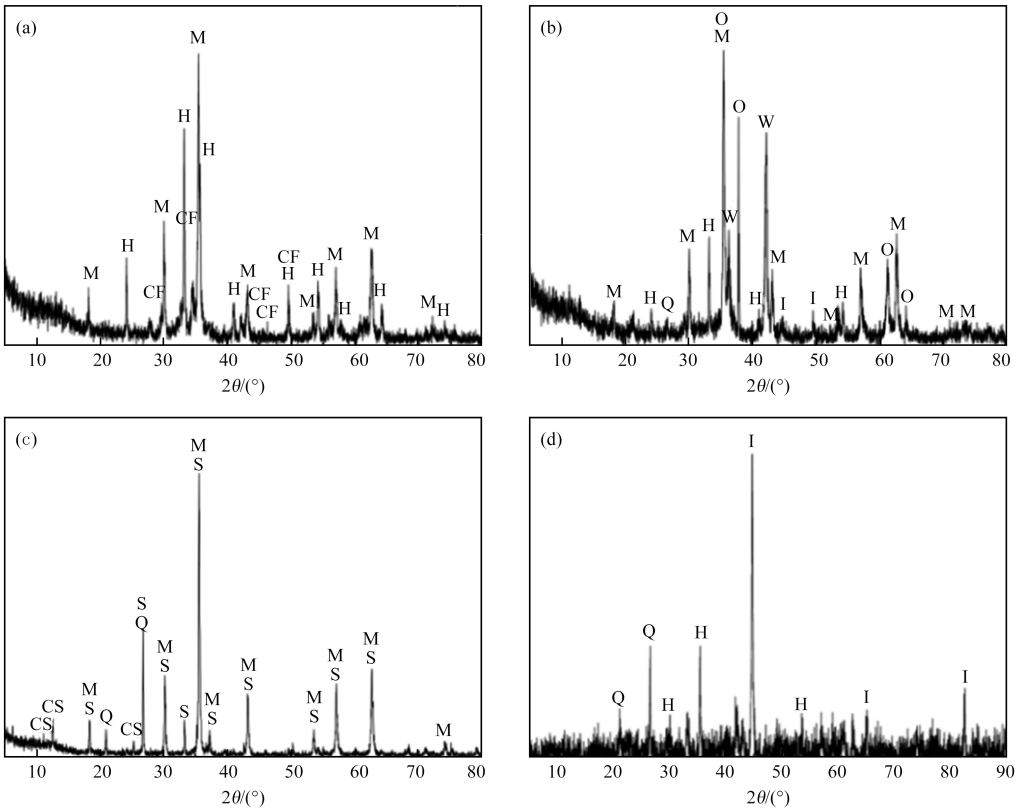
Table 2　The particle size distribution and average particle diameter of the test raw materials

原料名称	粒度组成(质量分数)/%						平均粒径/mm
	≥8 mm	[5,8) mm	[3,5) mm	[1,3) mm	[0.5,1) mm	<0.5 mm	
返矿	—	0.58	20.00	42.09	19.72	17.61	1.92
氧化铁皮	1.15	1.92	8.27	22.51	19.09	47.06	1.38
球磨铁粒	—	—	7.25	56.39	22.43	13.93	1.74

采用 X 射线衍射仪对上述含铁物料物相进行测定，得到各类含铁物料中主要矿物组成。衍射阳极靶为 Cu 靶，扫描速度为 2°/min，衍射角的变化范围为 10°~90°。试验结果如图 1 所示。由图 1 可见：返矿中除了赤铁矿和磁铁矿，还含有一定量的铁酸钙；氧化铁皮的物相组成复杂，以赤铁矿、磁铁矿和浮氏体为主；高硅精粉属于磁铁矿，其中含有较高的硅和铁的化合物，石英质量分数超过 10%；球磨铁粒主要由金属铁、赤铁矿和石英等物相构成，其衍射峰的特征表明球磨铁粒中含有铁、钙和硅的化合物。

1.2　试验方法

高炉返矿冷固结压块的制备方法如图 2 所示。由图 2 可见，将返矿、氧化铁皮等主要原料按配矿方案混合均匀后投入到强力搅拌机中，加入指定配比的专用黏合剂后再次混匀，并添加适当配比的工业用水，将搅拌至均匀状态后的混合料加入对辊压球机中制成压块。成型的压块经过筛分后送入烘干设备中进行脱水和固化处理，以得到水分和质量指标合格的冷固结压块。



（a）返矿；（b）氧化铁皮；（c）高硅精粉；（d）球磨铁粒

H—赤铁矿；M—磁铁矿；CF—铁酸钙；O—$Fe_{0.98}O$；W—浮氏体；I—金属铁；Q—石英；S—硅掺杂磁铁矿；CS—蛇纹石－绿泥石。

图 1　含铁物料的 X 射线衍射图谱

Fig. 1　X-ray diffraction pattern of the iron-containing materials

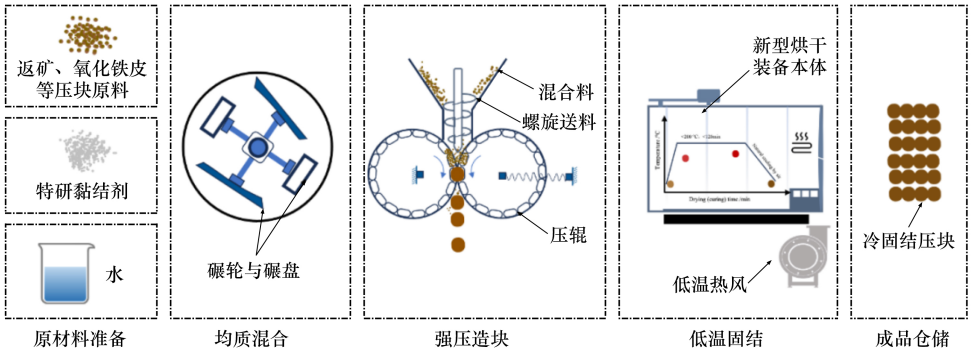


图 2 高炉返矿冷固结压块的制备工艺流程

Fig. 2 The preparation process flow of cold bonded briquettes from blast furnace return fines

试验分为实验室制备和工业放大两个阶段。其中，工业放大试验利用现场现有生产线(以静置堆存方式暂时性替代低温固结工序)简易加工 3 批次约 3 000 t 成品冷固结压块。所用原料结构主要结合厂内循环物产生量、入炉经济性等情况以及冷固结压块制备工艺要求，具体配比如表 3 所示。

表 3 高炉返矿冷固结压块制备的原料配比(质量分数)

Table 3 The raw material ratio for preparing cold bonded briquettes from blast furnace return fines %

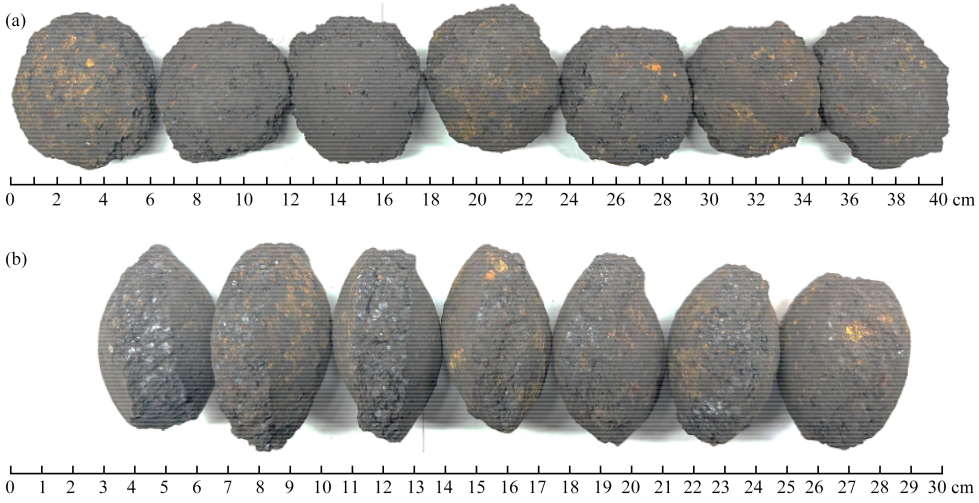
项目	返矿	氧化铁皮	球磨铁粒	高硅精粉
湿基	52.8	10.3	12.7	24.2
干基	55.0	10.0	12.0	23.0

2 试验结果与讨论

2.1 物理性能

(1) 外观形貌。高炉返矿冷固结压块外观形貌如图 3 所示。由图 3 可见，该压块的表面较为粗糙、颜色较黑、粒度总体均匀，呈现出中间厚、边缘薄的团块结构，四角有磨损，属于较粗粒度的人造块矿。在工业放大试验期间，受制于现场加工设备，所得到的成品粒度较粗，其尺寸约为 50 mm×50 mm×35 mm。压块粒度分布如表 4 所示。由表 4 可见，成品压块的粒度主要分布在 >10 mm范围，占比超 90%，5 ~ 8 mm 粒级占比最低；此外，成品压块规整均匀、粉末率低、返料量少，产品的完整性较好。

(2) 抗压强度。对压块开展 3 批次随机抽样检测抗压强度，每次检测 2 ~ 9 颗压块。结果如表 5 所示。由表 5 可见，压块的机械强度较高，最高值达 4 355.12 N/P，均值超过 3 000 N/P，明显高于自产烧结矿和外购球团矿，这可保证压块在转运等环节的完整性。



(a) 正面；(b) 侧面

图 3 高炉返矿冷固结压块的形貌尺寸

Fig. 3 The morphology and size of cold bonded briquettes from blast furnace return fines

表 4　高炉返矿冷固结压块的粒度分布(质量分数)

Table 4　Particle size distribution of cold bonded briquettes from blast furnace return fines　　%

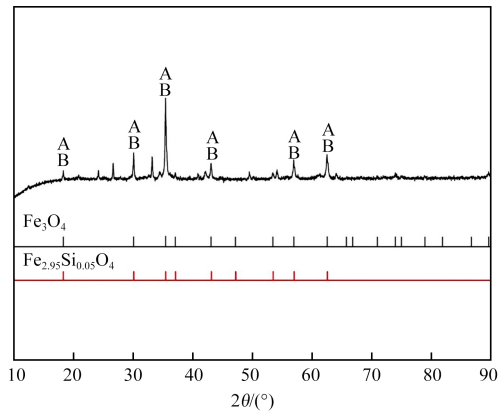
批次	(0,5] mm	(5,8] mm	(8,10] mm	(10,25] mm	>25 mm
1	2.62	1.03	5.40	12.45	78.50
2	3.28	2.38	4.54	9.43	80.37
3	3.12	1.95	5.56	11.94	77.43

表 5　高炉返矿冷固结压块的抗压强度

Table 5　Compressive strength of cold bonded briquettes from blast furnace return fines　　N/P

批次	最大值	最小值	平均值	偏差值
1	3 826.90	3 114.44	3 470.67	—
2	4 355.12	2 229.50	3 200.91	766.95
3	4 021.92	2 562.70	3 487.70	563.36

(3) 微观结构。样品的 XRD 图谱如图 4 所示。由图 4 可见，高炉返矿冷固结压块的主要物相为磁铁矿(Fe_3O_4)和铁硅酸盐($Fe_{2.95}Si_{0.05}O_4$)，衍射峰强度较高，表明其在样品中含量相对较高。压块的扫描电子显微镜图(SEM)如图 5 所示。由图 5 可以看出，压块由多种含铁物料经外力挤压后组成非致密性多孔洞集合体，组织结构疏松，表面及内部无规律分布着微观孔洞(含半穿透空隙)，且面积多样(大气孔少，以直径小于 50 μm 的气孔为主)，而这一特殊结构可降低高炉煤气穿透阻力，改善其还原性，并在一定程度上有利于改善高炉透气性。

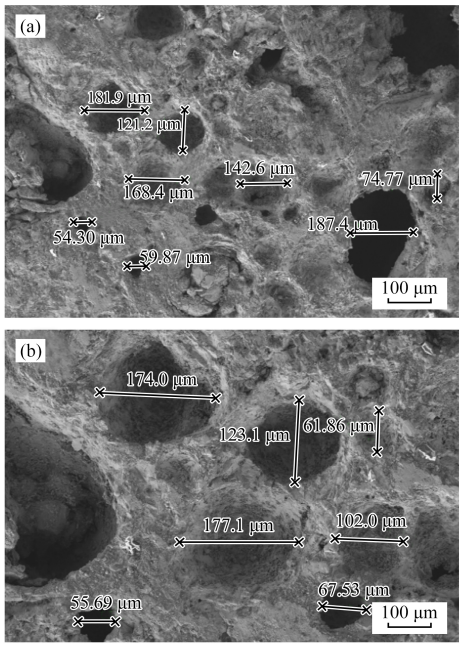


A—磁铁矿(Fe_3O_4)；B—铁硅酸盐($Fe_{2.95}Si_{0.05}O_4$)。

图 4　高炉返矿冷固结压块的 X 射线衍射图谱

Fig. 4　X-ray diffraction pattern of cold bonded briquettes from blast furnace return fines

压块的矿相结构如图 6 所示。由图 6 可见，此类压块呈现出以返矿和氧化铁皮为骨架，高硅精粉、球磨铁粒分散镶嵌咬合的结构特征，其中黏结剂与小颗粒物质共同形成物料黏结区域，且紧围着大颗粒物料。这表明黏结剂可对其周围的核矿石(返矿或氧化铁皮)与填充料(高硅精粉、球磨铁粒)进行有效固结。另外，在压块内部的烧结返矿及周边区域观察到了较为完整的二元铁酸钙(CF)结构，烧结返矿内弥散分布的铁酸钙可能改善了压块的高温强度。



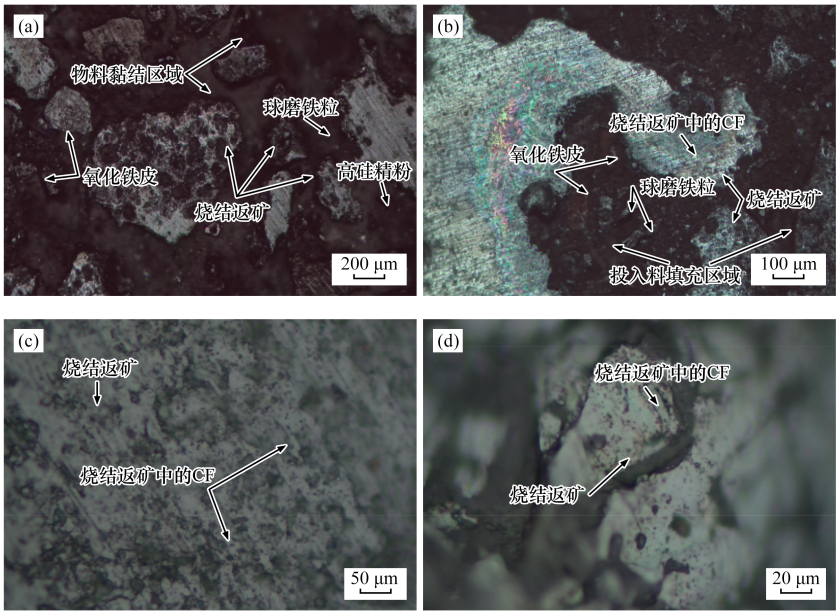
(a) 样品局部；(b) 样品局部放大

图 5　高炉返矿冷固结压块的扫描电子显微镜图

Fig. 5　Scanning electron microscope (SEM) image of cold bonded briquettes from blast furnace return fines

2.2　化学成分

高炉返矿冷固结压块的主要化学成分和碱度由表 6 可见。由表 6 可知，压块的化学成分总体稳定，其中 P、K、Na、Ti、Cu、Pb、Cr、Zn 等有害元素控制满足高炉入炉要求，S 含量略有偏高。相比于烧结矿，TFe 质量分数提升了 5%～6%，此外，其 FeO 质量分数控制在 11%左右。



（a）物料黏结区域；（b）物料填充区域；（c）烧结返矿集中区域；（d）烧结返矿局部

图 6 高炉返矿冷固结压块的矿相结构

Fig. 6 Mineralogical structure diagram of cold bonded briquettes from blast furnace return fines

表 6 高炉返矿冷固结压块的主要化学成分和碱度

Table 6 Main chemical composition and basicity of cold bonded briquettes from blast furnace return fines

批次	化学成分(质量分数)/%															R_2
	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P	K_2O	Na_2O	V	TiO_2	Cu	Pb	Cr	Zn	
1	62.62	4.77	6.33	1.11	1.50	0.031	0.052	—	—	0.011 5	0.130 0	0.015 5	0.010 0	0.052 0	0.010 0	1.33
2	62.06	5.20	6.34	1.35	1.67	0.032	0.067	0.017	0.010	0.010 0	0.125 6	0.014 7	0.001 0	0.012 4	0.010 2	1.22
3	62.76	4.96	6.49	1.35	1.63	0.033	0.068	0.014	0.010	0.011 7	0.134 3	0.014 1	0.001 1	0.015 6	0.010 0	1.31

2.3 冶金性能

根据《烧结返矿复合冷固结球团》(T/SSEA 0205—2022)对压块的部分冶金性能关键指标进行检测分析。结果如表 7 所示。由表 7 可知，压块的 >3.15 mm 低温还原粉化指数大于 75%、<6.3 mm 热裂指数小于 5%、还原膨胀指数小于 10%，满足高炉要求；受到粒度较粗和 FeO 含量较高等因素影响，压块的还原度指数约为 65%，可满足正常冶炼要求。

单一炉料的荷重还原软熔滴落性能如图 7 所示。在荷重还原软化性能方面，压块的开始软化温度(T_{10})为 1 118 ℃，介于烧结矿和球团矿之间，但软化过程相对较缓慢，软化终了温度(T_{40})和软化区间(ΔT_1)较宽。分析认为 FeO 含量较高和碱度较低所致。此外，压块具有较好的熔化开始温度(T_s)，滴落温度(T_d)优于一般球团矿，软熔区间(ΔT_2)与烧结矿接近，融滴区间(ΔT_3)最小，可能减少高温区的滞留时间，最大压差为 0.62 kPa，低于其它三类炉料指标，有利于降低软熔带的厚度，增加块料带的厚度，从而改善高炉料柱透气性，熔滴性能特征值 $S \leqslant 40$ kPa·℃[10]。

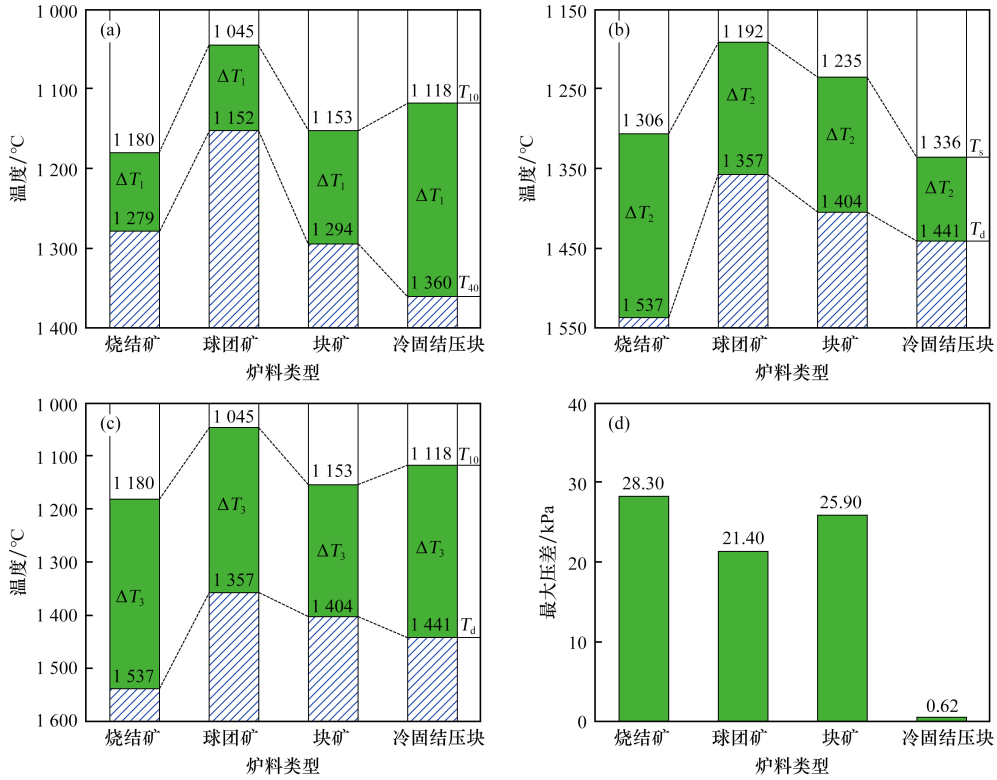
表 7 高炉返矿冷固结压块的主要冶金性能指标

(质量分数)

Table 7 Main metallurgical performance indices of cold bonded briquettes from blast furnace return fines %

批次	>3.15 mm 低温还原粉化指数	<6.3 mm 热裂指数	还原膨胀指数	还原性度指数
1	80.29	0.62	7.00	66.90
2	82.34	1.73	9.30	72.91
3	77.34	1.35	8.95	73.09

综合炉料以原有的炉料结构为基础，考虑不同炉料之间的交互化反应，探索高炉返矿冷固结压块与烧结矿、球团矿、块矿等传统炉料的搭配



（a）软化区间；（b）软熔区间；（c）融滴区间；（d）最大压差

图 7　单一炉料的软熔性能

Fig. 7　Softening-melting properties of the single charge

比例，以改善综合炉料的软化性能和熔滴性能，从而改善软熔带位置、厚度及透气性等参数，降低软熔带阻力损失[11-14]。同时结合碱度和碱金属含量控制要求，在碱度稳定在 1.50 左右，K、Na 质量分数 <0.1% 的情况下，逐步降低原炉料结构中各矿种配比，将冷固结压块配比增加至 6%。具体方案如表 8 所示。

表 8　不同冷固结压块配比条件下高炉的综合炉料构成

Table 8　Comprehensive charge composition of blast furnace under different ratios of cold bonded briquettes

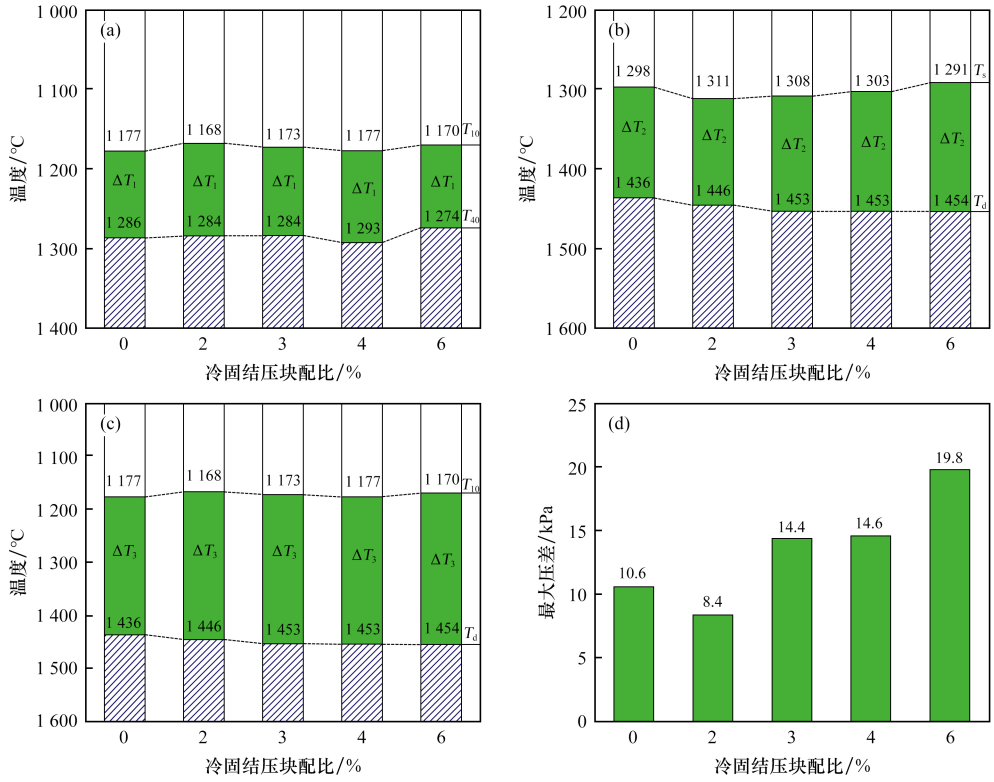
方案编号	炉料构成(质量分数)/%				R_2	[w(K)+w(Na)]/%
	烧结矿	球团矿	块矿	冷固结压块		
1	74.8	8.2	17.0	0	1.52	0.096
2	73.3	8.0	16.7	2	1.52	0.095
3	72.5	8.0	16.5	3	1.51	0.095
4	71.8	7.9	16.3	4	1.51	0.097
5	70.3	7.7	16.0	6	1.51	0.098

不同冷固结压块用量下的综合炉料的软化和熔滴性能如图 8 所示。由图 8 可以看出，随着压块配比的增加，综合炉料的软化开始温度（T_{10}）和终了温度（T_{40}）先降低后增加，软化区间（ΔT_1）总体较窄，最大值为 116 ℃，均小于 150 ℃，软化性能保持在较好水平。其中，方案 4 对应的炉料结构的软化开始温度（T_{10}）与不使用压块时相同，且软化终了温度（T_{40}）有明显提高，这表明软熔带向高温区移动。这是由于压块自身体积较大，改善了炉料之间的间隙，促进了与烧结矿、球团矿、块矿之间的交互反应，改善了综合炉料的软化性能[15]。受到压块配比上升的影响，熔化开始温度（T_s）在 6% 的配比下最低，滴落温度（T_d）升高且增长趋势明显收窄，综合炉料的最大压差均呈现出先降低后上升趋势，方案 2 的最大压差和 S 值最低。

3　工业应用及经济性评价

3.1　高炉工业应用试验

2024 年 1 月在涟源钢铁 6# 高炉（有效炉容积为 2 200 m^3）开展工业应用试验，按照 3% 配比使用冷固结压块总计 3 004.44 t。使用前后经济技术指标变化如表9所示。由表9可以看出，在炼铁厂



（a）软化区间；（b）软熔区间；（c）融滴区间；（d）最大压差

图 8 综合炉料软熔性能

Fig. 8 Softening-melting properties of the comprehensive charge

表 9 使用冷固结压块前后高炉的经济技术指标变化

Table 9 Changes in economic and technical indices before and after using cold bonded briquette in the blast furnace

项目	产量/t	燃料比/(kg·t^{-1})	煤比/(kg·t^{-1})	风量/(m^3·min^{-1})	富氧量/(m^3·h^{-1})	透气性指数	鼓风动能/(kg·m·s^{-1})
使用前	6 623.37	534.29	181.25	4 429.55	21 515.97	2 510.29	9 599.61
使用后	7 213.79	526.80	189.80	4 712.00	23 743.50	2 587.00	11 119.50

风温/℃	理论燃烧温度/℃	炉腹煤气量指数/(m·min^{-1})	炉顶温度/℃	煤气利用率/%	物理热/℃	[Si]质量分数/%	R_2
1 178.68	2 319.10	68.87	149.13	43.60	1 495.06	0.35	1.18
1 183.50	2 328.00	70.00	140.00	44.00	1 489.00	0.32	1.16

注：使用前指标为 2023 年 12 月的数据均值；使用后指标为工业放大试验期间的数据均值。

的精细操作下，使用冷固结压块后，6#高炉的生铁日产量由 6 623.37 t 增至 7 213.79 t，高炉利用系数进一步提高，由 3.01 t/(m^3·d) 提升至 3.28 t/(m^3·d)，但矿耗(1.6 t/t)保持相对稳定。使用期间，高炉整体冶炼强度提升，鼓风动能(9 599.61→11 119.50 kg·m/s)、风量(4 429.55→4 712.00 m^3/min)和富氧量(21 515.97→23 743.50 m^3/h)均呈现增长趋势，且料柱透气性得到改善，透气性指数从 2 510.29 升至 2 587.00。

当前阶段，提煤降焦作为高炉生产最直接、最有成效的降本措施[16]，一直备受行业关注。而 6#高炉的燃料比从 534.29 kg/t 降低至 526.80 kg/t，且煤比从 181.25 kg/t 提升至 189.80 kg/t，可见高炉焦比的降低，意味着高炉炼铁生产的经济性增强。此外，高炉炉腹煤气量指数从 68.87 m/min 提升至 70.00 m/min，表明高炉冶炼得到强化，且处于较适宜的水平[17-18]。在炉顶温度控制方面，顶温从 149.13 ℃降低至 140.00 ℃，使得高炉上

部间接还原区域扩大，利于提高煤气利用率。而事实上，高炉煤气利用率从 43.60% 微升至 44.00%，煤气生成与流动效率提高，有利于降低高炉燃料消耗和生产成本。铁水中[Si]质量分数从 0.35% 降低至 0.32%，物理热微降(1 495.06→1 489.00 ℃)，仍处于合理范围，保持了炉缸活跃及炉况的长周期稳定顺行。

3.2　效益评价

(1) 经济效益。3 000 t 高炉使用冷固结压块代替外购球团矿(入炉比为 3%)后，以综合原料的价差和减少返矿再加工成本计算，剔除综合炉料含铁品位降低 0.11% 致使生铁成本增加(1.83 元/t)的影响后，铁水生产总成本降低约 2.07 元/t。

(2) 社会效益。生产期间吨产品耗电约为 20 kW·h(现有生产线无烘干工序)，折算成工序能耗(折标煤)约为 2.458 kg/t，CO_2 排放系数(强度)约为 11.406 kg(其中，电力 CO_2 排放因子取 2022 年度全国电网平均排放因子 0.570 3 kg CO_2/kW·h 计算)。相比于传统造块手段(按烧结工序能耗(折标煤)为 48.25 kg/t、工序吨产品 CO_2 排放量为 0.18 ~ 0.20 t/t 对比)，工序能耗减少约 95% 以上，CO_2 排放减少 93% 以上。则 3 000 t 高炉使用冷固结压块可减少 CO_2 排放 505 782 kg。按照 2023 年全国碳市场交易均价 68.15 元/t 计算，可再增加经济效益约 18 957.97 元(压块中返矿占比为 55%)。

4　结　论

(1) 高炉返矿冷固结压块的物理性能优异，颗粒形貌规整(平均尺寸为 50 mm × 50 mm × 35 mm)，碎球率及粉末含量低，含水量稳定控制在 2% 以下，平均抗压强度超过 3 000 N/P，满足高炉对入炉料机械强度的要求。化学组成特征显示，压块的化学成分与原料配比高度相关，其 K、Na 等有害元素含量控制得当，镁铝比处于合理范围，S、P 含量略高但未超出高炉冶炼允许范围，二元碱度(R_2)符合熔剂性人造压块特性。压块的低温还原粉化指数、还原度指数、热爆裂及还原膨胀指数均达到高炉操作标准，但软化温度区间较宽，需通过工艺参数优化进一步调控。

(2) 工业应用实践表明，涟源钢铁 6# 高炉配加 3% 冷固结压块后，风量、富氧率、透气性及煤气利用率等关键参数均有改善，高炉利用系数提升至 3.28 t/(m^3·d)，燃料比持续降低，整体经济性得到提升。采用 3 000 t 返矿制备冷固结压块替代外购球团矿(入炉比为 3%)，可使铁水生产成本降低 2.07 元/t。

参考文献：

[1] KURUNOV I, BIZHANOV A. Stiff extrusion briquetting in metallurgy[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018: 1 – 21.

[2] BIZHANOV A M, AUBERTOT C. Sintering and briquetting synergy in blast furnace smelting[J]. Metallurgist, 2021, 65(7): 699 – 712.

[3] OMRAN M, FABRITIUS T, YU Y W, et al. Improving zinc recovery from steelmaking dust by switching from conventional heating to microwave heating[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021, 7(1): 15 – 26.

[4] 严礼祥. 钢铁厂冷压块与球团矿冶金性能对比研究[J]. 冶金与材料, 2020, 12(6): 32 – 33.
YAN Lixiang. Comparative study on metallurgical properties of cold briquette and pellet in iron and steel plant[J]. Metallurgy and Materials, 2020, 12(6): 32 – 33.

[5] 王吕辉, 祁占林, 王正鹏, 等. 返矿冷固球团在榆钢 2 800 m^3 高炉的应用[J]. 炼铁, 2024, 43(5): 45 – 50.
WANG Lühui, QI Zhanlin, WANG Zhengpeng, et al. Use of cold-bound pellet prepared from recycled sinter in Yuzhong steel 2 800 m^3 BF[J]. Ironmaking, 2024, 43(5): 45 – 50.

[6] 沙永志, 王志花, 李光森, 等. 无返矿炼铁工艺构想[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2017: 1 – 7.
SHA Yongzhi, WANG Zhihua, LI Guangsen, et al. No return fine BF ironmaking process[C]//The 11th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: China Metallurgical Society, 2017: 1 – 7.

[7] DAS B, PRAKASH S, REDDY P S R, et al. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 40 – 57.

[8] 王磊. 榆中钢铁烧结返矿冷压球团研究与使用效果[J]. 冶金能源,2025,44(1):22-26.
WANG Lei. Research and use effectiveness of sinter return cold-bonded briquettes for Yuzhong steel[J]. Energy for Metallurgical Industry,2025,44(1):22-26.

[9] EL-HUSSINY N A, SHALABI M E H. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process[J]. Powder Technology,2011,205(1/2/3):217-223.

[10] 许满兴,张天启. 铁矿石优化配矿实用技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2017.
XU Manxing, ZHANG Tianqi. Practical technology of optimal ore blending of iron ore[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2017.

[11] 董相娟,滕召杰,武建龙,等. 基于交互反应优化高球比炉料结构的研究及应用[J]. 炼铁,2024,43(1):59-62.
DONG Xiangjuan, TENG Zhaojie, WU Jianlong, et al. Study and application of interactive reaction-based optimization technology of the burden mix with high percentage of pellets[J]. Ironmaking,2024,43(1):59-62.

[12] 吴胜利,汪国俊,姜伟忠,等. 高炉内天然块矿与烧结矿高温交互反应研究[J]. 钢铁,2007,42(3):10-13.
WU Shengli, WANG Guojun, JIANG Weizhong, et al. Interaction between lump ore and sinter in BF[J]. Iron & Steel,2007,42(3):10-13.

[13] LOO C E, MATTHEWS L T, O'DEA D P. Lump ore and sinter behaviour during softening and melting[J]. ISIJ International,2011,51(6):930-938.

[14] 张开发,吴胜利,刘新亮,等. 不同单种炉料熔滴特征及初渣形成变化[J]. 科学技术与工程,2015,15(13):36-40.
ZHANG Kaifa, WU Shengli, LIU Xinliang, et al. The characteristics of softening and melting and the formation of the primary slag of different ferrous burden materials[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(13):36-40.

[15] 谭培龙,张建良,黄建强,等. 烧结矿碱度对综合炉料交互反应的影响[J]. 工程科学学报,2023,45(6):890-898.
TAN Peilong, ZHANG Jianliang, HUANG Jianqiang, et al. Effect of sinter basicity on the interactive reaction of composite burdens[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023,45(6):890-898.

[16] 王炜,陈畏林,徐智慧,等. 炼铁工序提高煤比降焦节能探讨[J]. 冶金能源,2006,25(2):15-17;25.
WANG Wei, CHEN Weilin, XU Zhihui, et al. Study on raising coal rate reducing the coke ratio and energy consumption in the iron making working procedure[J]. Energy for Metallurgical Industry,2006,25(2):15-17;25.

[17] 项钟庸. 以高炉炉腹煤气量指数取代冶炼强度的研究[J]. 钢铁,2007,42(9):16-18.
XIANG Zhongyong. Study on substitution of BF bosh gas index for operation intensity[J]. Iron and Steel, 2007, 42(9):16-18.

[18] 王新东,刘存强,刘磊,等. 高炉高顶压强化冶炼技术研究与实践[J]. 钢铁,2024,59(10):11-19.
WANG Xindong, LIU Cunqiang, LIU Lei, et al. Research and practice of intensified operation on BF with high top pressure[J]. Iron and Steel,2024,59(10):11-19.