钢铁冶金含锌固废制备含碳压块的工艺参数优化

朱昊喆，张朝晖，折 媛，邢相栋，郭鹏辉
（西安建筑科技大学 冶金工程学院，陕西 西安 710055）

摘要：为实现钢铁冶金含锌固废的高效资源化利用，并解决其含碳冷压块强度不足的问题，本文以转炉高锌污泥和兰炭为主要原料，系统开展了压块制备工艺优化及黏结剂性能研究。通过优化冷压工艺参数（水分添加量为 8%、成型压力为 16 MPa）及真空焙烧制度（1 100 ℃、40 min），重点探究了膨润土、水泥、氧化钙及创新型黏结剂腻子粉对压块强度的影响规律与作用机理。结果表明，腻子粉凭借其独特的有机－无机复合黏结体系（HPMC 与水泥、石膏协同作用），在最低添加量（3%）下即可实现最优的增强效果，其干压块抗压强度达 571.2 N/P，还原后金属化团块强度高达 840.4 N/P，显著优于传统黏结剂，且完全满足转炉入炉的强度要求（>800 N/P）。热力学分析表明，在 10 Pa 真空度下，铁酸锌等含锌物相的碳热还原反应在 600 ℃以上均可自发进行，升温至 1 100 ℃可显著促进锌的挥发脱除。本文研究结果可为钢铁冶金含锌固废制备高性能含碳压块提供有效的工艺参数与黏结剂选择依据。

关键词：含锌固废；含碳压块；金属化团块；压块强度；黏结剂
中图分类号：TF46.6；X757 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764（2026）02－0123－09
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.037

Optimization of process parameters for preparation of carbon-containing briquettes from zinc-containing solid waste in iron and steel metallurgy

ZHU Haozhe, ZHANG Zhaohui, SHE Yuan, XING Xiangdong, GUO Penghui
(School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to realize the efficient resource utilization of zinc-containing solid waste in iron and steel metallurgy and solve the problem of insufficient strength of its carbon-containing cold briquettes, converter high-zinc sludge and blue carbon are used as the main raw materials, and the optimization of the briquetting process and binder properties are systematically carried out. By optimizing the cold pressing process parameters (8% moisture addition, forming pressure of 16 MPa) and vacuum roasting system (1 100 ℃, 40 min), the effects of bentonite, cement, calcium oxide and innovative binder putty powder on the strength of briquettes were explored. The results show that, with its unique organic-inorganic composite bonding system (HPMC synergizes with cement and gypsum), putty powder can achieve the optimal reinforcement effect at the lowest addition amount (3%), and its compressive strength of dry briquettes reaches 571.2 N/P, and the strength of metallized aggregates after reduction is as high as 840.4 N/P, which is significantly better than traditional binders, and fully meets the strength requirements of converter furnace (>800 N/P). Thermodynamic analysis shows that the carbothermal reduction reaction of zinc-containing phases such as zinc ferrite can be carried out spontaneously above 600 ℃ at a vacuum of 10 Pa, and the volatilization removal of zinc can be significantly promoted when

收稿日期：2025－08－29；**修回日期**：2025－09－01
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52174325）；陕西省创新能力支撑计划资助项目（2023-CX-TD-53）；中央引导地方科技发展资金资助项目（24ZYQB003）
作者简介：朱昊喆（2001—），男，硕士研究生，从事冶金环保与资源高值化利用方面的研究。
通信作者：折 媛（1982—），女，副教授，从事钢铁冶金新工艺、新技术方面的研究。

the temperature rises to 1 100 ℃. The results can provide an effective process parameters and binder selection basis for the preparation of high-performance carbon-containing briquettes from zinc-containing solid waste in iron and steel metallurgy.

Key words: zinc-containing solid waste; carbon-containing briquettes; metallized aggregates; briquetting strength; binder

钢铁工业是典型的资源与能源密集型行业，在生产过程中消耗大量资源，同时产生大量含铁、锌的粉尘及污泥等固体废弃物。据统计，钢铁企业每年产生的冶金尘泥约占粗钢产量的8%~12%，这些废弃物主要来源于烧结、炼铁、炼钢、轧制等工序的除尘灰及废水处理污泥，具有产生环节多、产量大、成分复杂等特点[1-2]。该类资源属于典型的难处理冶金固废，若处置不当，不仅会造成铁、锌等有价资源的浪费，其中的含锌组分还可能迁移扩散，对生态环境构成长期潜在威胁[3]。通过冶金方法实现含锌尘泥的资源化回收，既可回收其中的有价金属铁，又可提取锌、铅等有价元素，从而降低对原生矿产的依赖与资源进口成本[4-5]。

目前，处理含锌尘泥的主要火法工艺包括回转窑法、转底炉法等。这些方法虽能实现锌的初步富集，但普遍存在能耗高、工艺流程长、二次污染严重等问题，且最终产物多为氧化锌，需进一步通过湿法冶炼提纯方可获得金属锌，增加了处理成本与环境风险[6-7]。真空碳热还原技术是一种先进的清洁冶金方法，其在低压条件下以碳为还原剂，使锌等金属氧化物被还原并挥发，随后冷凝为锌单质，可直接获得高附加值产品，显著缩短工艺流程。该技术具有反应温度低、金属回收率高、环境污染小等优点，尤其适用于复杂二次资源的高效回收[8-9]。

基于课题组前期研究基础[10]，含锌粉尘真空碳热还原技术已取得初步进展，但仍面临压块强度不足的问题。强度过低会导致压块在运输、储存及真空还原过程中发生严重粉化，不仅影响炉内透气性与反应效率，还会降低金属锌的回收率及产品质量，成为制约该技术工业化应用的关键瓶颈[11]。因此，开发高强度、高金属化率的含碳压块制备工艺具有重要意义。目前常用的黏结剂如膨润土、水泥等虽在一定程度上可提升压块强度，但存在添加量大、降低球团铁品位、引入杂质(如SiO_2、Al_2O_3)及成本高等不足。探索高效、低成本、低添加量的新型复合黏结剂，已成为突破含锌固废高值化利用瓶颈的重要方向。为此，本文以转炉高锌污泥和兰炭为主要原料，采用冷固结压块-真空还原技术路线，系统研究成型工艺参数及黏结剂种类对压块强度的影响规律与作用机理，旨在制备满足真空冶炼要求的含碳压块，为钢铁冶金含锌固废的高效资源化利用提供新思路与技术支撑。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

本文以国内某钢铁企业转炉产出的高锌污泥为主要原料，其化学成分如表1所示。由表1可知，该污泥中总铁(TFe)质量分数为48.82%，锌质量分数为11.42%。根据《钢铁工业含铁尘泥回收及利用技术规范》(GB/T 28292—2012)，该资源属于典型的高锌固废。其X射线衍射(XRD)分析结果如图1所示。由图1可知，锌主要赋存于氧化锌(ZnO)和铁酸锌($ZnFe_2O_4$)物相中；铁则以金属铁(Fe)、方铁矿(FeO)、磁铁矿(Fe_3O_4)及铁酸锌等形式存在；钙主要以方解石($CaCO_3$)形式存在。激光粒度分析结果如图2所示。由图2可知，该污泥粒度较小，粒度小于0.050 mm的颗粒质量分数达97%以上，有利于后续造块。

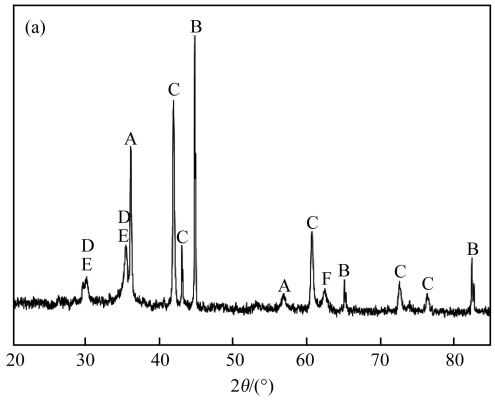
采用兰炭作为还原剂，试验前将其破碎、筛分至粒度小于0.15 mm。兰炭是由优质侏罗纪精煤在中低温(约600~800 ℃)条件下干馏热解得到的固体产物，具有固定碳含量高、化学活性好、硫氮含量低、价格低廉等特点，其反应活性显著高于冶金焦炭，是铁矿石粉矿、冶金尘泥等物料还原的理想还原剂[12]。工业分析表明，其空气干燥基固定碳、灰分、挥发分和水分的质量分数分别为80.70%、16.50%、1.30%和1.50%。

试验选用的黏结剂包括膨润土、水泥、分析纯氧化钙(CaO的质量分数≥98%，粒度≤74 μm)

表 1　转炉污泥的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of the converter sludge　　%

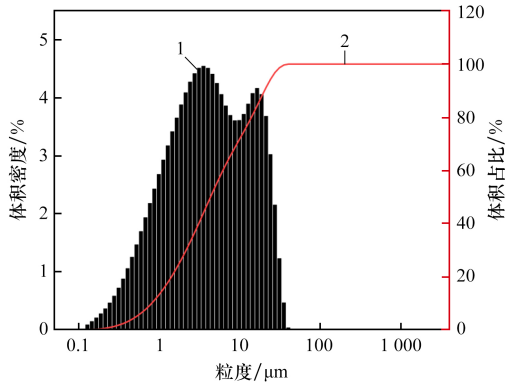
TFe	FeO	Fe_2O_3	CaO	Zn	K_2O	MgO	SiO_2	MnO	Al_2O_3	Pb	S	Cl	C
48.82	20.55	46.96	6.90	11.42	1.29	0.50	0.91	1.05	0.30	0.73	0.70	0.69	4.29



A—ZnO；B—Fe；C—FeO；D—$ZnFe_2O_4$；E—Fe_3O_4；F—$CaCO_3$。

图 1　转炉污泥的 XRD 物相图谱

Fig. 1　XRD pattern of the converter sludge



1—体积密度；2—体积占比。

图 2　原料粒度分布

Fig. 2　Particle size distribution of raw materials

及市售普通内墙腻子粉，其化学成分如表 2 所示。由表 2 可知，腻子粉主要成分为水泥、石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)及有机添加剂羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methylcellulose，HPMC)等。

表 2　黏结剂的主要化学成分(质量分数)

Table 2　Main chemical composition of the binders　　%

黏结剂名称	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	SiO_2	SO_3
膨润土	8.96	10.89	8.63	2.25	60.53	0.15
水泥	9.65	48.20	3.78	3.80	27.70	4.13
腻子粉	0.79	54.84	—	13.70	5.62	0.30

1.2　试验方法

试验流程主要包括配料、混匀、压块、干燥、焙烧及强度检测。根据真空碳热还原反应的理论计算，确定碳氧物质的量之比[n(C)/n(O)]为 1.2，以此计算并称取转炉污泥与兰炭的质量比。随后加入指定量的黏结剂，混合均匀后加入适量去离子水，再次充分混匀，密闭陈化 10 min。将混合料填入模具，采用手动液压机在设定压力下压制成型(∅25 mm × 10 mm 圆柱体)。生压块经 105 ℃烘干 4 h 后制得干压块。采用真空管式炉进行焙烧：将干压块置于刚玉坩埚中，送入真空管式炉内，抽真空至炉内压力低于 10 Pa 后，以 10 ℃/min 的速率升温；待炉温升至设定温度后开始保温，保温结束后停止加热，在真空条件下随炉冷却至室温，随后破真空取出样品，所得即为金属化团块。

依据《炼钢用尘泥团块》(YB/T 4315—2012)检测压块的落下强度与抗压强度。抗压强度测定：随机选取 10 个压块样品，采用全自动数显压力试验机进行准静态压缩测试，加载速率为 10 mm/min，记录样品完全破碎时的峰值载荷，以其算术平均值作为抗压强度表征值(N/P)。落下强度测定：将 10 个压块从规定高度自由坠落至厚度为 8 mm 的淬火钢板上，重复操作直至压块出现可见裂纹或破裂，记录每个压块的落下次数，并取平均值。生压块测试高度为 0.5 m，落下强度结果以“次/(0.5 m)”表示；干压块测试高度为 2 m，落下强度结果以“次/(2 m)”表示。所有强度测试均在室温(25 ± 1)℃、相对湿度 50% ± 5% 的标准条件下进行，单次测试间隔不小于 30 s。试验目标为入炉前压块强度达到 300 N/P、落下强度不低于 2 次/(2 m)，还原后金属化团块强度达到 800 N/P。

将还原后的金属化团块研磨均匀后，取样采用 X 射线荧光光谱分析(XRF)测定其含锌量，并按下式计算脱锌率。

$$\varepsilon = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

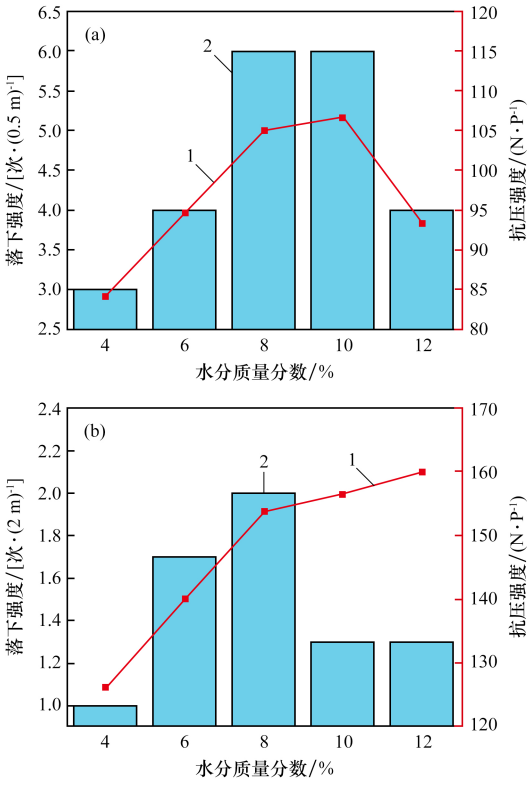
式中：ε 为团块的脱锌率，%；m_0 为入炉前压块中锌质量分数，%；m_1 为焙烧后团块中锌质量分数，%。

2 试验结果与讨论

2.1 工艺参数对压块强度的影响

2.1.1 水分添加量

在固定成型压力为 8 MPa、膨润土为黏结剂、添加量为 3%（质量分数）的条件下，水分添加量对生压块及干压块强度的影响如图 3 所示。由图 3 可知，生压块与干压块的落下强度以及生压块的抗压强度均随水分添加量的增加呈先升高后降低的趋势。当水分添加量为 8% 时，毛细管力作用达到最佳，液桥分布均匀且充分，生压块的强度达到峰值。此时，生压块落下强度为 6 次/(0.5 m)，抗压强度为 105 N/P；干压块落下强度为 2 次/(2 m)，抗压强度为 153.8 N/P。水分添加量过低（<8%）时，润湿不充分，液桥数量不足；水分添加量过高（>8%）时，过厚的液膜会降低颗粒间摩擦力并加剧与模具的黏附，导致强度下降。因此，确定最佳水分添加量为 8%[13]。



（a）生压块；（b）干压块

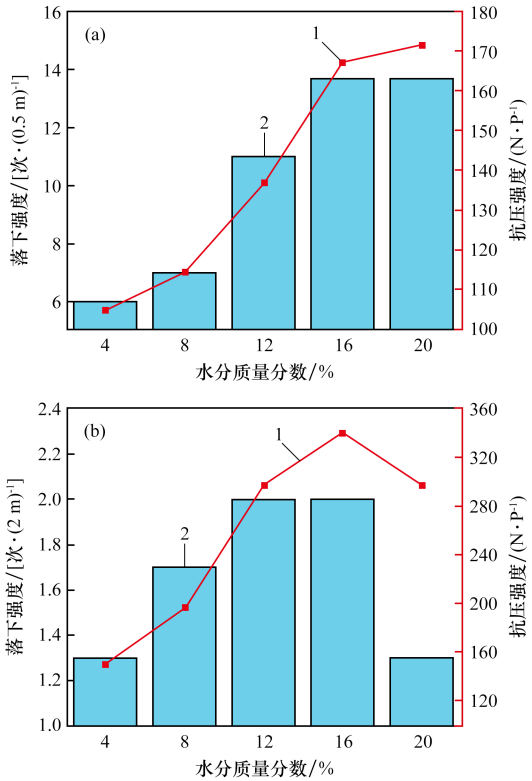
1—抗压强度；2—落下强度。

图 3 水分添加量对压块强度的影响

Fig. 3 Effect of water addition on briquette strength

2.1.2 成型压力

在固定水分添加量为 8%、膨润土添加量为 3%（质量分数）的条件下，得到成型压力对压块强度的影响如图 4 所示。由图 4 可见，随着成型压力的增大，生压块强度持续增加；干压块强度则随压力增加呈现先升高后降低的趋势。当压力增至 16 MPa 时，颗粒排列更为致密，被挤压出的水分更好地填充了颗粒间空隙并形成强化液桥，经干燥后干压块的机械强度[落下强度为 2 次/(2 m)，抗压强度为 340 N/P]显著提升。当压力增大至 20 MPa 时，过高的压力导致部分水分被过度挤出，反而削弱了毛细管的黏结作用，并在干燥过程中易形成微裂纹，导致干压块强度下降(173.4 N/P)。因此，确定 16 MPa 为最佳成型压力。



（a）生压块；（b）干压块

1—抗压强度；2—落下强度。

图 4 成型压力对压块强度的影响

Fig. 4 Effect of forming pressure on briquette strength

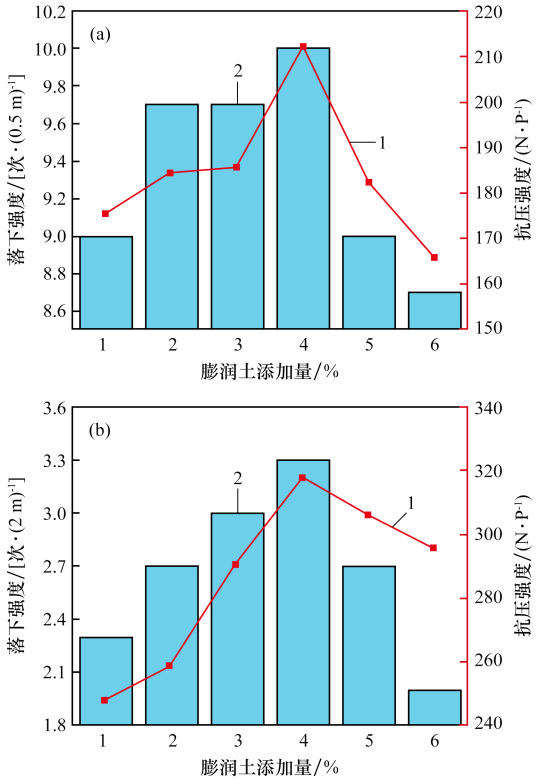
2.2 黏结剂种类对压块强度的影响

在确定最佳水分质量分数（8%）和成型压力（16 MPa）的基础上，系统研究黏结剂种类及添加

量对压块强度的影响。

2.2.1　膨润土添加量

膨润土添加量对压块强度的影响如图 5 所示。由图 5 可见，其强度均随添加量的增加先增大后减小。当添加量为 4% 时，干压块的性能最优[落下强度为 3.3 次/(2 m)，抗压强度为 317.8 N/P]。膨润土中的蒙脱石遇水膨胀并解离成细小的片状颗粒，能够有效填充孔隙并通过其表面的电荷作用连接物料颗粒。过量添加(>4%)会竞争性吸附大量水分，导致有效水分相对不足，且易造成局部富集，造成混料均匀性劣化，使得压块内部产生结构弱点，导致强度下降[14]。



(a) 生压块；(b) 干压块

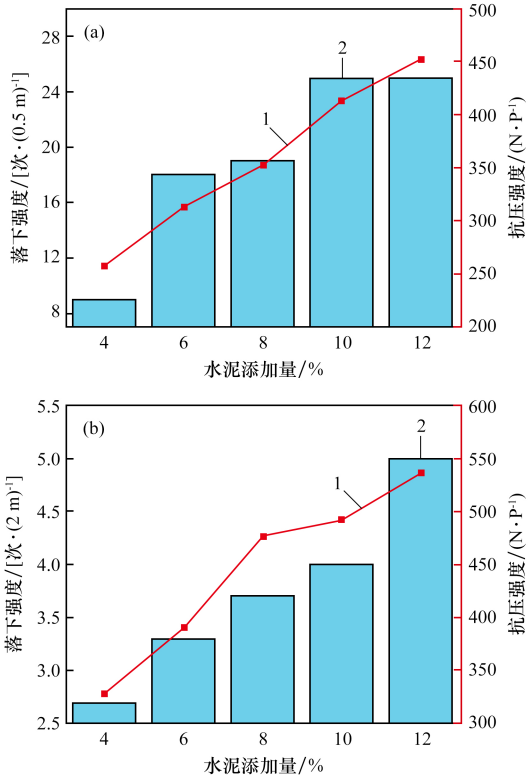
1—抗压强度；2—落下强度。

图 5　膨润土添加量对压块强度的影响

Fig. 5　Effect of bentonite addition amount on briquette strength

2.2.2　水泥添加量

水泥基压块的强度发展受水化动力学支配。将压制成型的压块置于室内养护 72 h，养护完毕后测试其强度。该时段覆盖水泥主要水化期(水化程度>80%)。结果如图 6 所示。由图 6 可见，随着水泥添加量的增加，压块的强度逐渐增高，当添加量为 12% 时，干压块的落下强度为 5 次/(2 m)，抗压强度为 537.1 N/P。水泥水化反应过程中，硅酸钙水合物(C—S—H)凝胶的持续生成导致浆体稠度增加，塑性逐渐丧失。凝结阶段后，C—S—H 凝胶相不断增殖，形成致密包覆层将压块内颗粒紧密结合，促使离散物料固结为整体结构。伴随硬化时间的延长，水泥基体内部胶凝产物持续累积，使得压块强度呈渐进式提升。然而，水泥添加量过高会引入大量 SiO_2、Al_2O_3 等杂质，降低压块的铁品位并影响其碱度，使得经济性和技术性均较差[15]。



(a) 生压块；(b) 干压块

1—抗压强度；2—落下强度。

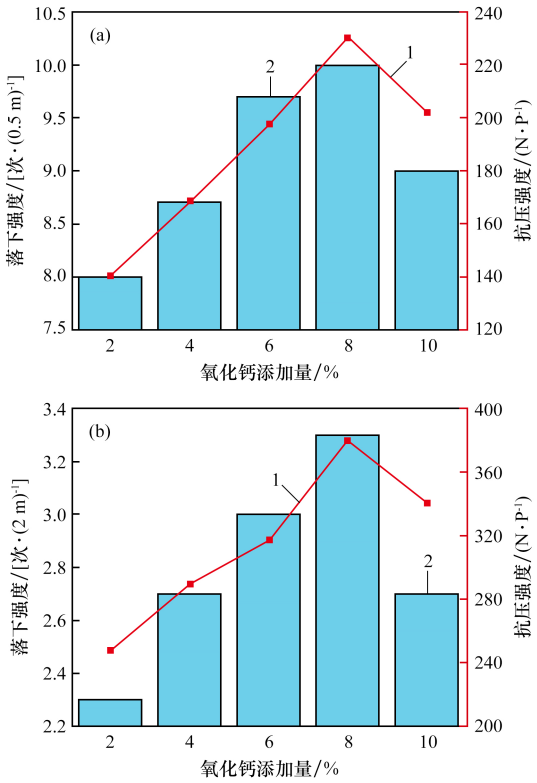
图 6　水泥添加量对压块强度的影响

Fig. 6　Effect of cement addition amount on briquette strength

2.2.3　氧化钙添加量

采用分析纯氧化钙作黏结剂时，需先进行预消化以防止其在压块内部反应放热膨胀。其添加量对压块强度的影响如图 7 所示。由图 7 可见，氧化钙添加量对压块强度的影响呈先增后减变化。当添加量低于 8% 时，生压块与干压块强度均随添加量上升而提升，8% 添加量时达到强度峰值[干

压块的落下强度为 3.3 次/(2 m)，抗压强度为 380.4 N/P]。继续增加添加量则因水分不足导致混料不均，强度显著降低。混料阶段 CaO 与水反应生成氢氧化钙胶体，通过界面黏结作用增强颗粒结合力；干燥过程中氢氧化钙与 CO_2 反应生成碳酸钙晶须，在压块表面构建网状增强结构，有效提升干压块抗压性能[16]。



(a) 生压块；(b) 干压块

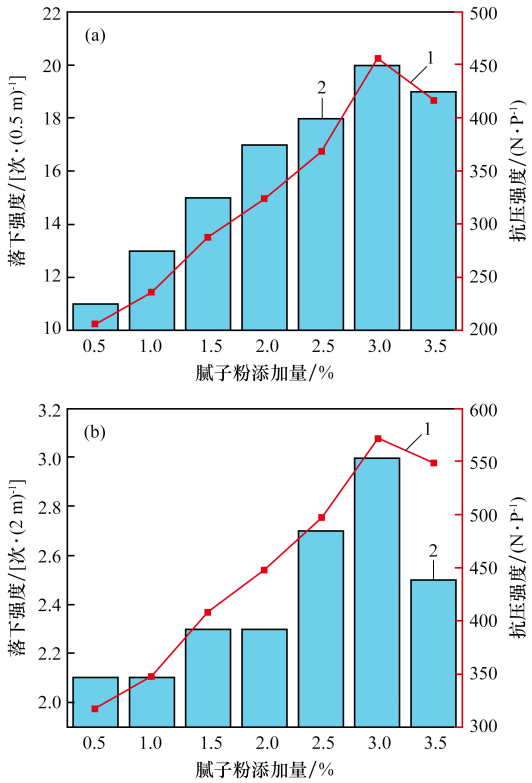
1—抗压强度；2—落下强度。

图 7 氧化钙添加量对压块强度的影响

Fig. 7 Effect of calcium oxide addition amount on briquette strength

2.2.4 腻子粉用量

黏结剂的性能直接决定了压块的强度特性。腻子粉作为一种广泛应用于建筑领域的墙面找平材料，其核心功能在于提供优异的黏结力和填充性，确保涂层与基体的牢固结合。鉴于其在建筑行业中已证实的黏结能力以及潜在的成本优势，在压块制备领域，对腻子粉能否作为新型黏结剂进行研究。腻子粉中含有有机黏结剂组分(HPMC)，该有机黏结剂对压块强度影响较大[17]，故以 0.5% 为一个区间制备试样。结果如图 8 所示。由图 8 可见，腻子粉作黏结剂时，压块强度随添加量增加呈先升高后降低的趋势，在 3% 添加量时达到最佳[干压块落下强度为 3 次/(2 m)，抗压强度为 571.2 N/P]。这是由于腻子粉中多种物质协同作用的影响，水泥水化反应生成水化硅铝酸钙(C—A—S—H)凝胶相，构成胶凝基质主体；同时，石膏参与反应产生针状钙矾石晶体，通过桥接作用强化颗粒界面结合力；HPMC 能够吸收并保留水分，延缓水分的蒸发速度，这使得胶凝物质能够有足够的时间进行水化反应，形成坚固的结构，保证了压块的强度。当腻子粉添加量大于 3% 时，水化所需水量增加，而水的添加量是一定的，使体系中水化反应不彻底，进而导致压块强度有所下降[18]。



(a) 生压块；(b) 干压块

1—抗压强度；2—落下强度。

图 8 腻子粉添加量对压块强度的影响

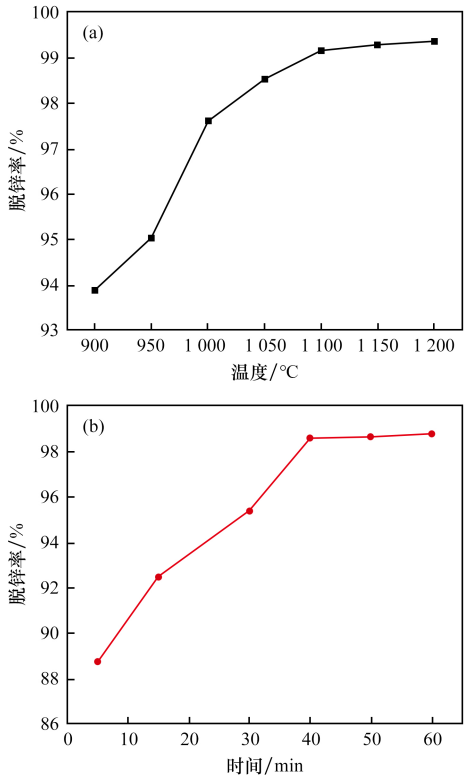
Fig. 8 Effect of putty powder addition amount on briquette strength

与传统黏结剂相比，腻子粉显示出显著的成本优势。市售普通内墙腻子粉价格约为 500 ~ 800 元/t，虽略高于水泥(300 ~ 400 元/t)，但其最佳添加量(3%)远低于膨润土(4%)、氧化钙(8%)和水泥(12%)。这意味着使用腻子粉不仅

单位用量成本可控，且因添加量少而对压块铁品位的稀释效应最小，综合经济性优势明显。

2.3　高温焙烧对不同黏结剂压块强度的影响

在课题组之前研究[19]的基础上，为探究黏结剂在还原过程中的行为及其对金属化团块强度的作用机制，首先需明确最佳的还原制度。在固定碳氧比[$n(C)/n(O)=1.2$]及腻子粉添加量(3%)的条件下，得到还原温度与还原时间分别对脱锌率的影响。固定还原时间为 30 min，研究温度对压块脱锌率的影响，如图 9(a)所示。由图 9(a)可见，随着温度升高，在 900 ~ 1 100 ℃时，锌的脱除率快速增长，当温度增加到 1 100 ℃之后，锌脱除率趋势平缓，故选择还原温度为 1 100 ℃。固定还原温度为 1 100 ℃，研究还原时间对压块脱锌率的影响，如图 9(b)所示。由图 9(b)可见，当还原时间延长至 40min 时，继续延长时间，脱除率增长变缓，故选择还原时间为 40 min。



(a) 温度；(b) 时间

图 9　时间 – 温度对压块脱锌率的影响

Fig. 9　Effect of time-temperature on zinc removal rate of briquettes

为进一步分析还原过程，对真空体系内可能发生的主要反应进行热力学计算，得到可能发生的反应如式(2) ~ (12)所示。对应的 $\Delta G - T$(吉布斯自由能 – 温度)关系如图 10 所示。由图 10 可以看出，在真空度为 10 Pa 条件下，反应温度超过 600 ℃时所有反应均能发生，铁酸锌与碳的还原反应较易发生，铁酸锌直接被 C 还原为 Zn 和铁的化合物，生成铁的化合物的难易程度为 Fe、Fe_3O_4、FeO(由易到难)，生成 CO 的反应较生成 CO_2 的反应更易进行，增加温度可以降低还原反应的 ΔG，有利于反应的正向进行。

$$FeO(s)+C(s)=Fe(s)+CO(g) \quad (2)$$

$$3Fe_2O_3(s)+C(s)=2Fe_3O_4(s)+CO(g) \quad (3)$$

$$Fe_3O_4(s)+C(s)=3FeO(s)+CO(g) \quad (4)$$

$$PbO(l)+C(s)=Pb(l)+CO(g) \quad (5)$$

$$ZnO(s)+C(s)=Zn(g)+CO(g) \quad (6)$$

$$ZnFe_2O_4+4C=Zn(g)+2Fe+4CO(g) \quad (7)$$

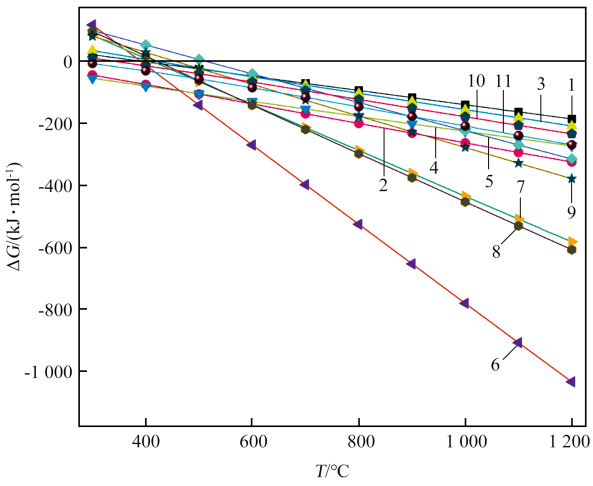
$$ZnFe_2O_4+2C=Zn(g)+2Fe+2CO_2(g) \quad (8)$$

$$ZnFe_2O_4+2C=Zn(g)+2FeO+2CO(g) \quad (9)$$

$$ZnFe_2O_4+C=Zn(g)+2FeO+CO_2(g) \quad (10)$$

$$3ZnFe_2O_4+C=3ZnO+2Fe_3O_4+CO(g) \quad (11)$$

$$6ZnFe_2O_4+C=6ZnO+4Fe_3O_4+CO_2(g) \quad (12)$$



1 ~ 11—式(2) ~ (12)所示反应。

图 10　10 Pa 条件下主要反应 ΔG-T 关系

Fig. 10　ΔG-T diagram of the main reaction at 10 Pa

在选定的试验条件下(1 100 ℃，40 min)，对 4 种黏结剂最佳配比(膨润土配比为 4%、水泥配比为 12%、氧化钙配比为 8%、腻子粉配比为 3%)的压块进行真空还原，得到金属化团块的抗压强度如表 3 所示。由表 3 可知，不同黏结剂压块还原后抗压强度不同，水泥和腻子粉压块的抗压强

度均超过 800 N/P，符合作为炼钢原料强度要求。以腻子粉作为黏结剂的压块强度最高(840.4 N/P)，达到预期要求，且添加量最少，不会过多影响压块铁品位，可作为转炉入炉原料使用。

表 3 不同黏结剂对金属化团块强度的影响

Table 3 Effect of different binders on the strength of metallized briquette

黏结剂种类	添加量(质量分数)/%	抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)
膨润土	4	684.8
水泥	12	824.3
氧化钙(分析纯)	8	758.6
腻子粉	3	840.4

3 结 论

(1) 以转炉污泥为原料的冷固结含碳压块的最佳制备工艺参数：水分添加量为8%、成型压力为16 MPa。此条件下，生压块和干压块的强度达到最优。

(2) 系统比较4种黏结剂的增强效果与适宜添加量。腻子粉在最低添加量(3%)下效果最优，其干压块抗压强度达571.2 N/P，这得益于其有机组分(HPMC)保水调控与无机组分(水泥、石膏)水化增强的协同作用。

(3) 确定真空碳热还原的最佳制度为1 100 ℃、40 min。此条件下，腻子粉黏结的压块还原后强度高达840.4 N/P，显著高于传统黏结剂，满足转炉入炉要求。

(4) 腻子粉作为一种低成本高效复合黏结剂，在提升压块强度、维持铁品位和降低成本方面展现出综合优势，为钢铁冶金含锌固废制备高性能含碳压块提供了新的技术方向。

参考文献：

[1] 王静松,李岩,冯怀萱,等. 钢铁产业集聚区难处理尘泥处理与全量资源化利用进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1737－1749.
WANG Jingsong,LI Yan,FENG Huaixuan,et al. Progress in treating difficult-to-handle dust and sludge and full-scale resource utilization in an iron and steel industry cluster[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(12):1737－1749.

[2] MAO R, WANG F, XU Y, et al. Preparation process of cold bonded pellets with iron-bearing dust and sludge from steel production process[J]. Metallurgical Research & Technology,2021,118(6):602.

[3] BOGDAN E O, PAVLYUKEVICH Y G, LARIONOV P S, et al. Comprehensive analysis of the physicochemical properties of metallurgical dust for determining the main directions of its reprocessing[J]. Glass and Ceramics, 2020,77(5):183－189.

[4] 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.

[5] STEWART D J C, BARRON A R. Pyrometallurgical removal of zinc from basic oxygen steelmaking dust: A review of best available technology[J]. Resources, Conservation and Recycling,2020,157:104746.

[6] 李岩,赵志坚,冯怀萱,等. 转底炉处理钢铁厂含锌尘泥工艺技术[J]. 烧结球团,2022,47(6):106－115;145.
LI Yan, ZHAO Zhijian, FENG Huaixuan, et al. Technology of treating zinc-containing dust and mud in iron and steel plant by rotary hearth furnace[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(6):106－115;145.

[7] 魏汝飞,张飞虎,孟东祥,等. 生物污泥还原钢铁厂含锌粉尘规律[J]. 钢铁,2023,58(6):134－142.
WEI Rufei,ZHANG Feihu,MENG Dongxiang,et al. Law of zinc-bearing dust from iron and steel plant reduced by biological sludge[J]. Iron and Steel,2023,58(6):134－142.

[8] QI J F, ZHAO Y, ZHA G Z, et al. Measurement and effect of volatilization kinetic parameters in the production of high-purity zinc by vacuum distillation [J]. Vacuum,2023,208:111730.

[9] ZHANG W J,DONG T,ZHU D Q,et al. Improving zinc reduction and removal from pellets of zinc-bearing dusts via vacuum microwave-assisted carbothermal reduction process[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024,192:896－906.

[10] 徐书祥. 含锌电炉尘真空碳热还原工艺及机理研究

[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
XU Shuxiang. Study on vacuum carbothermal reduction process and mechanism of zinc-containing electric furnace dust[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2020.

[11] 李航宇,王定政,朱德庆,等. 高强度含锌粉尘内配碳球团制备工艺[J]. 烧结球团,2025,50(2):63 – 71.
LI Hangyu, WANG Dingzheng, ZHU Deqing, et al. Preparation process of carbon-burdened pellets in high-strength zinc-containing dust[J]. Sintering and Pelletizing,2025,50(2):63 – 71.

[12] 李信. 铁合金冶炼用高强度兰炭制备基础研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2024.
LI Xin. Basic research on the preparation of high-strength semi-coke for ferroalloy smelting[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2024.

[13] 杨涛,雷杰,任晓健,等. 转底炉用含碳球团制备及生产工艺优化[J]. 钢铁,2023,58(4):157 – 166.
YANG Tao,LEI Jie,REN Xiaojian,et al. Preparation and production process optimization of carbon-bearing pellets for rotary bottom furnace[J]. Iron and Steel, 2023, 58(4):157 – 166.

[14] 李骞,马永和,唐银华,等. 铁矿球团用有机黏结剂研究进展[J]. 钢铁,2022,57(11):11 – 21.
LI Qian, MA Yonghe, TANG Yinhua, et al. Research progress of organic binder for iron ore pellets[J]. Iron & Steel,2022,57(11):11 – 21.

[15] 刘征建,陈龙智,张建良,等. 冶金竖炉反应器处理垃圾焚烧飞灰工艺[J]. 钢铁研究学报,2020,32(7):601 – 609.
LIU Zhengjian,CHEN Longzhi,ZHANG Jianliang,et al. Metallurgical treatment for municipal solid waste incineration fly ash[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(7):601 – 609.

[16] 杨正华,张朝晖,李新涛,等. 黏结剂在转炉造渣剂中的应用研究[J]. 矿冶工程,2019,39(3):99 – 102.
YANG Zhenghua, ZHANG Zhaohui, LI Xintao, et al. Utilization of binders in slagging agent for converter[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(3): 99 – 102.

[17] 韩凤光,杨涛,赵贺喜,等. 复合黏结剂对球团高温固结的影响及机理[J]. 工程科学学报,2023,45(9):1450 – 1458.
HAN Fengguang, YANG Tao, ZHAO Hexi, et al. Effects and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets[J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(9):1450 – 1458.

[18] 段德丹,廖洪强,王佳娜,等. 固废基建筑室内用腻子粉的制备及性能研究[J]. 电镀与涂饰,2020,39(22):1578 – 1582.
DUAN Dedan, LIAO Hongqiang, WANG Jiana, et al. Preparation of solid-waste-based putty powder for building interiors and study on its properties[J]. Electroplating & Finishing,2020,39(22):1578 – 1582.

[19] MA S B,ZHANG Z H,XU S X,et al. Recovery of zinc from electric arc furnace dust by vacuum carbothermal reduction[J]. Metallurgical Research & Technology, 2021,118(4):415.

(上接第 107 页)

[15] LI C G. Current status and future trends of green metallurgical technology[J]. Scientific and Social Research,2024,6(7):119 – 126.

[16] 吉伟,冯二莲. 烧结矿转鼓强度和冶金性能研究[J]. 河北冶金,2024(5):14 – 23;34.
JI Wei, FENG Erlian. Research on drum strength and metallurgical properties of sinter ore[J]. Hebei Metallurgy,2024(5):14 – 23;34.

[17] 周磊,卜昭晨. 锌对高炉的危害及应对措施[J]. 天津冶金,2019(2):16 – 18.
ZHOU Lei,BU Zhaochen. Harm of zinc to blast furnace and countermeasures[J]. Tianjin Metallurgy,2019(2):16 – 18.