# 改性淀粉强化含锌尘泥压块的性能及作用机理

金路恒，陈铁军，万军营，郑锡瀚，周仙霖，张 露
(武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院; b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081)

**摘要:** 压块是转底炉工艺处理含锌粉尘的重要工序，实际生产中存在湿团块强度低、黏结剂价格贵、团块在皮带转运过程中易破损等问题。本文采用常规的改性淀粉作为黏结剂参与含锌粉尘混合料压块，探究水分、辊轮转速、辊间压力及黏结剂用量等相关压球参数对压块强度的影响，并通过基团行为分析、红外光谱分析、XPS 光电子能谱分析等阐释黏结剂的作用机理。结果表明: 在改性淀粉添加量为 2% 时，压块强度与现场黏结剂为 3.5% 时相似，相比之下黏结剂成本降低 53 元/t; 继续增加黏结剂用量可大幅提高压块强度，当改性淀粉添加量为 3.5% 时压块强度取得最优值。此时，湿压块的落下强度为 7.80 次/(0.5 m)、抗压强度为 91.78 N/P，干压块的抗压强度为 388.55 N/P。对预糊化淀粉提高球团强度的机理进行分析，发现添加淀粉后干球粉末在 1 404 $cm^{-1}$ 和 860 $cm^{-1}$ 处的特征吸收峰明显增强，且在 549 $cm^{-1}$ 处出现—OH 相对 Fe 平移的特征吸收峰; 光电子能谱研究表明，添加淀粉后 Fe 的 2p 轨道能由 719.7 eV 降低至 719.35 eV，说明淀粉中的极性基团与含锌粉尘表面产生吸附，这是压块强度升高的关键因素。本文研究成果可为保障转底炉低成本、高效处理含锌粉尘及转底炉工艺的发展奠定基础。

**关键词:** 含锌粉尘; 转底炉; 压块; 抗压强度; 落下强度; 有机黏结剂
**中图分类号:** TF046.6; X705 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000－8764(2025)06－0127－07
**doi:** 10.13403/j.sjqt.2025.06.104

# Modified starch strengthens properties and mechanism of zinc-containing dust sludge briquettes

JIN Luheng, CHEN Tiejun, WAN Junying, ZHENG Xihan, ZHOU Xianlin, ZHANG Lu
(Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

**Abstract:** Briquetting is an important process for the treatment of zinc-containing dust in the rotary hearth furnace process, and there are such problems as low strength of wet agglomerates, expensive binders, and easy breakage of agglomerates during belt transfer. In this paper, conventional modified starch is used as a binder to participate in briquetting of zinc-containing dust mixtures, and the effects of moisture, roller speed, inter-roller pressure and binder dosage on the strength of the briquettes are explored, and the action mechanism of the binder is explained by group behavior analysis, infrared spectroscopy analysis, and XPS photoelectron spectroscopy. The results show that when the amount of modified starch is added at 2%, the briquetting strength is similar to that when the binder is 3.5%, the cost of binder is reduced by 53 yuan/t. Continuing to increase the amount of binder can greatly improve the briquette strength, and the briquette strength achieves the optimal value when the amount of modified starch is 3.5%. At this time, the falling strength of the

**收稿日期:** 2024－07－25; **修回日期:** 2024－09－29
**基金项目:** 湖北省教育厅科学研究计划资助项目(B2022014); 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202107)
**作者简介:** 金路恒(2001—)，男，硕士研究生，从事铁矿低碳造块方面的研究。
**通信作者:** 陈铁军(1973—)，男，教授，从事铁矿低碳造块与直接还原、复杂难选铁矿分选、冶金二次资源综合利用等方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

wet briquette is 7.80 times/(0.5 m), the compressive strength is 91.78 N/P, and the compressive strength of the dry briquette is 388.55 N/P. The mechanism of pregelatinized starch to improve pellet strength is analyzed, and it is found that the characteristic absorption peaks of dry ball powder at 1 404 $cm^{-1}$ and 860 $cm^{-1}$ are significantly enhanced after the addition of starch, and the characteristic absorption peak of —OH relative to Fe translation appeared at 549 $cm^{-1}$. Photoelectron spectroscopy shows that the 2p orbital energy of Fe is decreased from 719.7 eV to 719.35 eV after the addition of starch, indicating that the polar groups in starch are adsorbed with the surface of zinc-containing dust, which is the key factor for the increase of briquetting strength. The research results can lay a foundation for the low-cost and efficient treatment of zinc-containing dust in the rotary hearth furnace and the development of the rotary hearth furnace process.

**Key words:** zinc-containing dust; rotary hearth furnace; briquettes; compressive strength; fall strength; organic binders

2024年我国粗钢产量为10.05亿吨，钢铁冶炼过程中产生的含锌尘泥约为3 000万吨[1]。含锌尘泥以铁元素(铁质量分数为30%~60%)为主，且富含锌、碳、钙等有价成分，具有较高利用价值[2]。但由于粒度细、表面活性低、制粒性能差，含锌尘泥直接返回烧结会降低烧结料层透气性，影响烧结矿的产量和质量；且粉尘中的锌易在高炉炉顶和炉壁富集，造成炉内结瘤、腐蚀炉衬等问题，导致其处理难度大[3-4]。转底炉工艺由于具有能源消耗量低、次氧化锌产品质量高等优点被广泛运用，成为处理含锌尘泥的热门工艺之一[5]。

转底炉直接还原工艺过程主要包括配料混合、压制成球、直接还原、烟气处理和回收五个部分[6]。国内钢铁厂采用直接还原脱锌工艺处理含锌尘泥时，在压块过程中普遍存在湿团块强度差、黏结剂成本高、团块易在皮带转运过程中破损等问题。针对此类问题，人们进行了相关研究，如张胜全等[7]往马铃薯全粉溶液中配加不同比例的CaO制备复合黏结剂，在CaO添加量为7%、压块时间为1 h、焙烧时间为1 150 ℃时，高炉细灰的去锌效果良好。王贤君[8]采用回归模型预测了3种黏结剂配比下的压块强度，得出了适宜的复合黏结剂配方。侯明洲[9]固定黏结剂用量为3.3%，考察了膨润土、水玻璃、糊化淀粉、波特兰水泥及复合黏结剂用量对压块强度的影响。李宏煦等[10]通过接触角测量、光电子能谱分析等手段阐释了羧甲基钠改性淀粉提高球团强度的机理。齐建玲等[11]分析了有机黏结剂中的作用基团、有机架链，筛选出适合造球的黏结剂种类并阐明其制备过程。周耀等[12]将不锈钢粉尘和高炉除尘灰两者混合压块，并使用电炉精炼，探究两种原料配比、黏结剂添加量、成型压力和保压时间对含碳压块强度的影响，试验结果表明：当不锈钢粉尘和高炉除尘灰配比为7∶3、焦煤配比为12.25%、膨润土添加量为5%、水分质量分数为8%、压力为40 MPa时，湿压块的强度达到13.4次/(0.5 m)，干压块的强度达到724.8 N/P。

前人对黏结剂增强压块强度的作用机理研究尚不充分，且在降低黏结剂成本和提高压块强度方面仍有改善空间。为此，本文选用常规的改性淀粉作为黏结剂，探究压球水分、辊轮转速、辊间压力及黏结剂用量等相关参数对压块强度的影响规律，并通过基团行为分析、红外光谱分析、XPS光电子能谱分析等来阐释黏结剂的作用机理。本文旨在为压块工序找寻兼具经济性与可靠性的工艺参数，为含锌尘泥资源化处理提供借鉴与参考。

## 1 试验条件和方法

### 1.1 试验原料

试验原料取自武钢有限转底炉，三种含锌粉尘包括炼钢污泥、高炉炉前灰(高炉出铁口除尘灰)、TRT灰(高炉瓦斯灰进入透平机组发电过程中收集的烟尘)，还原剂采用CDQ粉(干熄焦)。原料化学成分如表1所示，粒度组成如表2所示。试验选用JDOB-46淀粉作为黏结剂，该淀粉水分、灰分质量分数分别为9.84%、0.098%，5%水溶液下黏度为46.33 MPa·s，80 μm过筛率(细度)为74.27%。原淀粉采用物理糊化的方式改性，改性过程[13]：原淀粉→加热→糊化→干燥→粉碎→过筛→包装→预糊化淀粉。改性后淀粉分子之间的胶束结构被破坏，氢键断裂，形成多孔、无结晶

中国知网 https://www.cnki.net

表 1　原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of raw materials　%

| 原料种类 | TFe | FeO | $SiO_2$ | CaO | C | Zn | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 炼钢污泥 | 51.540 | 57.740 | 1.53 | 9.780 | 2.37 | 7.650 | 0.086 | 0.172 |
| 高炉炉前灰 | 52.450 | 53.600 | 4.06 | 6.780 | 6.18 | 5.510 | 0.231 | 0.201 |
| TRT 灰 | 35.840 | 12.250 | 5.79 | 3.459 | 25.24 | 2.974 | 0.513 | 0.117 |
| CDQ 粉 | 1.475 | 1.805 | 7.22 | 3.169 | 85.10 | 0.028 | 1.391 | 0.119 |

表 2　原料粒度组成(质量分数)

Table 2　Particle size composition of raw material particle size　%

| 原料种类 | >0.074 mm | | | | | | (0.045, 0.074] mm | ≤0.045 mm | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | >2.000 mm | (0.850, 2.000] mm | (0.208, 0.850] mm | (0.150, 0.208] mm | (0.104, 0.150] mm | (0.074, 0.104] mm | | (0.038, 0.045] mm | (0.020, 0.038] mm | ≤0.020 mm |
| 高炉炉前灰 | 9.42 | | | | | | 5.37 | 1.89 | 3.80 | 79.52 |
| TRT 灰 | 22.86 | | | | | | 14.36 | 7.92 | 11.16 | 43.70 |
| CDQ 粉 | 23.04 | 11.8 | 21.98 | 17.16 | 9.56 | 7.95 | 7.31 | 1.20 | | |
| 炼钢污泥 | 0.38 | 0.76 | 5.33 | 11.05 | 12.38 | 34.86 | 33.65 | 1.59 | | |

的预糊化淀粉[14]。此类淀粉的亲水性较强，可在冷水中溶解，并具有热稳定性高的特点[15]。

### 1.2　试验方法

试验流程如图 1 所示。试验根据现场 3 种含锌粉尘的产出量进行混合压球，设置炼钢污泥、高炉炉前灰、TRT 灰配比分别为 58.8%、35.3%、5.9%。实际炼钢污泥被压滤成块状，其水分高达 20%。在压球试验前，需将炼钢污泥放入 105 ℃的烘箱内烘干至水分小于 6%，碾碎后取 3 mm 的筛下污泥作为试验原料。按照配比称取含锌尘泥、还原剂、黏结剂，放入强力混合机中混合，设置混合机转速为 600 r/min、混合时间为 10 min。混匀后的物料放入密封袋中封存。

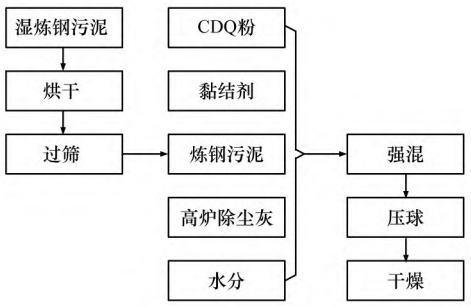



图 1　改性淀粉强化含锌尘泥压块试验流程

Fig. 1　Test process of starch-modified material enhances zinc-containing sludge briquetting

取 5 kg 混匀料倒入 YZ150A 型辊式压球机，在设定的压力及转速下，待出球稳定后，取长度为 30 mm、宽度为 20 mm、高度为 15 mm 的椭圆形压块。其中，辊式压球机压辊的直径为 175 mm、宽度为 30 mm。将刚压制成的椭圆形压块从 0.5 m 高度自由下落到 5 mm 厚的钢板上，测试湿压块的落下强度；将压块置于 K-QT6 型全自动抗压强度测试仪的中心位置，测试湿压块的抗压强度；将压块置于 200 ℃马弗炉内干燥 2 h，干燥结束后测试干压块的抗压强度。此外，试验采用 VERTEX 70 型傅里叶变换红外光谱分析仪、AXIS SUPRA 型 X 射线光电子能谱仪对压块进行表面吸附及表面化学分析。

## 2　试验结果与讨论

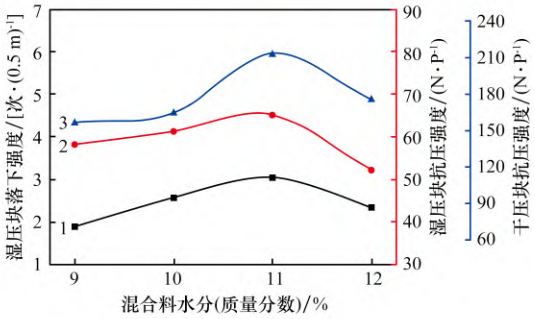
### 2.1　压球参数的确定

固定现场所用黏结剂添加量为 3.5%，在此基础上考察压球水分、辊轮转速、辊间压力对压块强度的影响。

混合料水分对压块强度的影响如图 2 所示。由图 2 可见，压块强度随水分提高呈先升高后降低的趋势。当混合料水分从 9% 增加至 11% 时，压块的强度随混合料水分的增加而升高，这是由于当水分质量分数较低时，$H_2O$ 分布较分散，其只能与含锌粉尘颗粒以点接触的形式进行黏结；随着水分质量分数的增加，压块内部的水分逐渐达到饱和，从点状结构转变为网状结构，压块内

中国知网　https://www.cnki.net

毛细力达到最大值[16]。当水分质量分数继续增大至 12% 时，压块强度反而减弱。分析原因认为，混合料中水分质量分数过高不仅不利于压块结构的稳定，而且会使混合料与辊壁之间相互粘连，从而影响生产顺行[17]。当混合料水分质量分数为 11% 时，压块的强度达到最优值，湿压块的落下强度为 3.04 次/(0.5 m)、抗压强度为 65.03 N/P，干压块的抗压强度为 213.32 N/P。

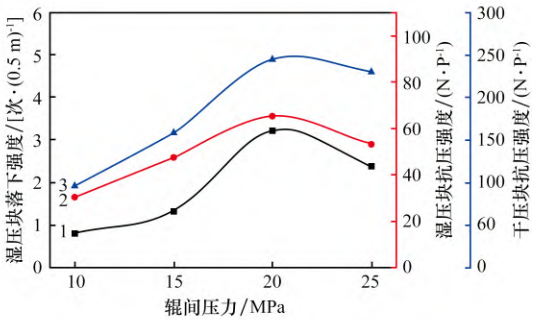



1—湿压块落下强度；2—湿压块抗压强度；3—干压块抗压强度。

图 2 混合料水分对压块强度的影响

Fig. 2 Effect of moisture in the mixture on the strength of briquetting

辊间压力对压块强度的影响如图 3 所示。由图 3 可见，当辊间压力从 10 MPa 增加至 25 MPa 时，压块强度随压力增加呈现先升高后降低的趋势。这是由于当辊间压力过低时，颗粒内部的水分无法被挤压至颗粒表面，使得水分不能在颗粒之间形成网状分布而提供足够的毛细力[18]；另外，由于辊间压力不足，不同表面形貌的颗粒之间不能形成物理“啮合”，导致压块强度低。继续



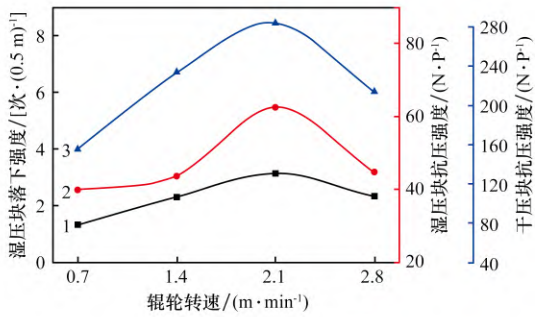

1—湿压块落下强度；2—湿压块抗压强度；3—干压块抗压强度。

图 3 辊间压力对压块强度的影响

Fig. 3 Effect of inter-roll pressure on the strength of briquetting

提高辊间压力至 25 MPa 时，压块强度小幅度降低。这是由于当辊间压力过大时，团块内颗粒组织过于紧密反而容易爆裂，导致生团块韧性不足、强度下降[19]。在辊间压力为 20 MPa 时压块强度达到最大值，此时湿压块的落下强度为 3.23 次/(0.5 m)、抗压强度为 65.30 N/P，干压块的抗压强度为 245.56 N/P。

辊轮转速对压块强度的影响如图 4 所示。由图 4 可见，在压球水分质量分数为 11%、辊间压力为 20 MPa 的条件下，当辊轮转速由 0.70 m/min 增加至 2.80 m/min 时，压块强度先增大后减小，其在 2.10 m/min 时取得最优值，此时湿压块的落下强度为 3.13 次/(0.5 m)、抗压强度为 62.56 N/P，干压块的抗压强度为 283.77 N/P。这是因为辊轮转速对应着压块在压球机中的保压时间，转速越快，保压时间越短。当转速过快时，压块的保压时间不足，颗粒之间的“啮合”不充分，使得压块的松散强度低；当转速过慢时，压块保压时间过长，颗粒僵化、团块塑性降低，导致压块强度下降[20-21]。




1—湿压块落下强度；2—湿压块抗压强度；3—干压块抗压强度。

图 4 辊轮转速对压块强度的影响

Fig. 4 Effect of roller speed on the strength of briquetting

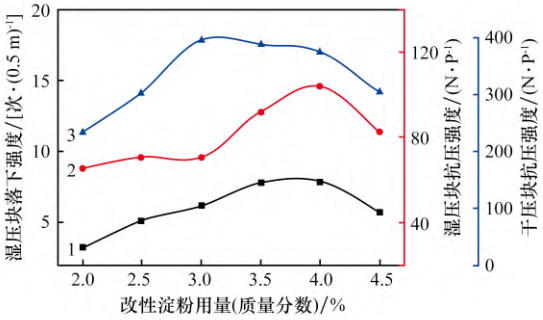
综上，在 3.5% 现场黏结剂用量条件下，考虑干、湿压块强度确定最佳压块工艺参数：混合料水分质量分数为 11%、辊间压力为 20 MPa、辊轮转速为 2.1 m/min。在此条件下，试验取得较优的压块强度：湿压块的落下强度为 3.13 次/(0.5 m)、抗压强度为 62.56 N/P，干压块抗压强度为 283.77 N/P。

## 2.2 改性淀粉添加量

试验采用改性淀粉作为黏结剂，在混合料水分

中国知网 https://www.cnki.net

质量分数为 11%、辊间压力为 20 MPa、辊轮转速为 2.1 m/min 的条件下，探究淀粉添加量对压块强度的影响。试验结果如图 5 所示。由图 5 可知，当改性淀粉添加量为 2% 时，其压块强度和 3.5% 现场黏结剂用量时的压块强度相近，而且继续提高改性淀粉用量后，压块强度呈先上升后降低的趋势。当黏结剂用量为 3.5% 时压块强度取得最优值，此时湿压块的落下强度为 7.80 次/(0.5 m)、抗压强度为 91.78 N/P，干压块的抗压强度为 388.55 N/P。




1—湿压块落下强度；2—湿压块抗压强度；3—干压块抗压强度。

图 5　改性淀粉用量对压块强度的影响

Fig. 5　Effect of the amount of starch-modified material on the strength of briquetting

黏结剂成本明细如表 3 所示。由表 3 可见，改性淀粉与现场黏结剂的单价差别不大，但 2% 的改性淀粉用量即可达到与添加 3.5% 现场黏结剂时相似的压块强度，使得黏结剂成本降低 53 元/t。另外，继续提高改性淀粉用量至 3.5% 时，压块性能还可大幅提高。

表 4　黏结剂成本明细

Table 4　Cost breakdown of binders

| 黏结剂种类 | 单价/(元·t⁻¹) | 配比(质量分数)/% | 使用成本/(元·t⁻¹) |
|---|---|---|---|
| 现场黏结剂 | 3 800 | 3.5 | 133 |
| 改性淀粉 | 4 000 | 2.0 | 80 |

## 3　黏结剂作用机理

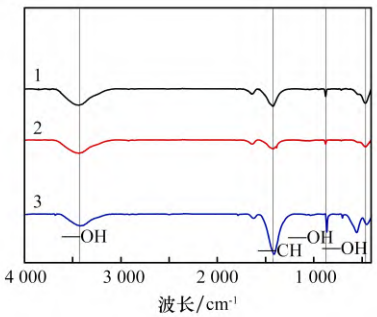
### 3.1　黏结剂中极性基团的行为

改性淀粉中主要的极性基团为—OH 以及—COOH，而含锌粉尘以铁元素为主。查询 Pauling 电负性量表可知，—OH 和—COOH 的电负性分别为 3.84 和 3.91，铁元素的电负性为 1.80。根据 Pauling 离子键判定公式[21]：当两个键合原子的电负性差值为 1.7 时，键的离子性和共价性分别为 50%，且随着电负性差值的增大，离子性的占比上升。—OH 和—COOH 两者与铁元素的电负性差值分别达到 2.04 和 2.11，分子间形成以离子键为主的化学键，这可大幅提高压块的强度[22]。

另外，根据硬软酸碱理论可知：淀粉中—OH 和—COOH 极性基团属于硬酸型；含锌粉尘中的 Fe 主要以 $Fe^{3+}$ 存在，属于硬酸型。根据路易斯酸碱理论可知，硬酸和硬碱之间形成离子键、极性键或者稳定络合物。故—COOH 和—OH 极性基团可与 $Fe^{3+}$ 形成离子键[23]，这与上述 Pauling 离子键判定公式结果相吻合。

### 3.2　红外光谱分析

试验对添加 3.5% 现场黏结剂、3.5% 改性淀粉的混合料以及添加 3.5% 改性淀粉制成的干压块粉末分别进行红外光谱分析，结果如图 6 所示。由图 6 可见，三者的吸收峰位置大体相同：3 401～3 420 $cm^{-1}$ 的宽强度带、860 $cm^{-1}$ 处的锐锋以及 549、446 $cm^{-1}$ 处的特征锋分别表明混合物中—OH 存在伸缩振动、摆动以及平动，且因为混合料中氢键和铁阳离子共存时产生了一定偏移，在 1 404 $cm^{-1}$ 观察到的峰与—CH 的弯曲有关。其中，添加改性淀粉所制成的干压块粉末在 1 404 $cm^{-1}$ 和 860 $cm^{-1}$ 处的吸收峰明显增强，且在 549 $cm^{-1}$ 处新增的吸收峰为—OH 相对于 Fe 的平移，说明预糊化淀粉与水反应生成的高黏度胶体在含锌粉尘表面发生了吸附反应，大幅提高了液桥的黏度，




1—添加现场黏结剂的混合料；2—添加改性淀粉的混合料；3—添加改性淀粉的干压块粉末。

图 6　混合料和干压块的红外光谱分析

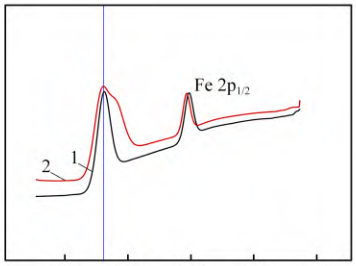
Fig. 6　Infrared spectroscopy analysis of mixtures and dry briquetting

中国知网　https://www.cnki.net

从而提高了颗粒间的界面能、毛细引力能和黏滞作用能，使压块强度大幅提高[24-25]。

### 3.3 XPS 光电子能谱分析

试验对含锌粉尘混合料和添加 3.5% 改性淀粉的混合料压块后的干球粉末进行 XPS 光电子能谱分析，结果如图 7 所示。由图 7 可见，两条曲线具有类似的变化趋势，且均包含两个峰。其中一个峰结合能均为 706.1 eV，另一个峰(添加改性淀粉后的干压块粉末)的结合能为 719.35 eV，略低于未加改性淀粉的 719.70 eV，说明改性淀粉与水反应产生的胶体在含锌粉尘表面产生了化学吸附，这进一步佐证了改性淀粉中极性基团与铁以离子键形式键合[26]。




1—含锌粉尘混合料；2—添加 3.5% 改性淀粉的干压块粉末。

**图 7 混合料和干压块的 XPS 光电子能谱分析**

**Fig. 7 XPS photoelectron spectroscopy of mixtures and dry briquetting**

## 4 结 论

(1) 固定现场黏结剂添加量为 3.5% 的条件下，得出压球的最佳工艺参数：辊间压力为 20 MPa，辊轮转速为 2.1 m/min，混合料水分质量分数为 11%。在此条件下取得的较优压块强度：湿压块的落下强度 3.13 次/(0.5 m)、抗压强度为 62.56 N/P，干压块的抗压强度为 283.77 N/P。

(2) 在改性淀粉添加量为 2% 的条件下，压块的强度即可与添加 3.5% 现场黏结剂时相似，且黏结剂成本降低 53 元/t，继续增加改性淀粉用量仍可大幅提高压块强度。

(3) 改性淀粉富含—COOH、—OH 基团，且极性基团易在含锌粉尘表面以离子键形式键合，使得颗粒表面的化学能提高；黏结剂的活性基团可以吸附在含锌粉尘颗粒表面，使红外光谱中 1 404 $cm^{-1}$ 和 860 $cm^{-1}$ 处的吸收峰明显增强，新增 549 $cm^{-1}$ 处—OH 相对 Fe 平移的吸收峰，并使 Fe 的 2p 轨道结合能由 719.7 eV 降低至 719.35 eV。

## 参考文献:

[1] 刘梅. 两种冶金含锌含铁尘泥处理工艺的对比[J]. 工业加热,2022,51(12):23-26.
LIU Mei. Contrast of two metallurgical zinc-iron-containing dust and sludge treatment processes[J]. Industrial Heating,2022,51(12):23-26.

[2] 张建良,闫永芳,徐萌,等. 高炉含锌粉尘的脱锌处理[J]. 钢铁,2006,41(10):78-81.
ZHANG Jianliang, YAN Yongfang, XU Meng, et al. Research on removal of Zn from blast furnace dust[J]. Iron and Steel,2006,41(10):78-81.

[3] HAN H L, DUAN D P, YUAN P. Exploration of straw fiber as reducing agent utilization in rotary hearth furnace process for direct reduced iron production[J]. Steel Research International,2015,86(11):1361-1369.

[4] 邢相栋,张建良,曹明明,等. 高炉含锌粉尘中铁资源的富集回收[J]. 矿冶工程,2012,32(3):86-88;91.
XING Xiangdong, ZHANG Jianliang, CAO Mingming, et al. Enrichment and recovery of iron from zinc-bearing blast furnace dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2012,32(3):86-88;91.

[5] WU Y L, JIANG Z Y, ZHANG X X, et al. Process optimization of metallurgical dust recycling by direct reduction in rotary hearth furnace[J]. Powder Technology,2018,326:101-113.

[6] 王定武. 转底炉工艺生产直接还原铁的现况和前景[J]. 冶金管理,2007(12):53-55.
WANG Dingwu. Present status and prospect of direct reduced iron production by rotary hearth furnace process[J]. China Steel Focus,2007(12):53-55.

[7] 张胜全,张茂林,王胜,等. 高炉细灰冷压成型回收铁锌[J]. 环境工程学报,2017,11(9):5249-5255.
ZHANGShengquan, ZHANG Maolin, WANG Sheng, et al. Iron and zinc recovery of fine ash by cold pressed forming[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(9):5249-5255.

[8] 王贤君. 转底炉处理冶金含锌尘泥的理论分析及实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
WANG Xianjun. Theoretical analysis and experimental

中国知网 https://www.cnki.net

study on the treatment of metallurgical zinc-containing dust by rotary hearth furnace. Chongqing: Chongqing University,2012.

[9] 侯明洲. 复合黏结剂改善含锌尘泥团块性能的研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
HOU Mingzhou. Study on improving the performance of zinc-containing dust-mud agglomerates by composite binder [D]. Changsha: Central South University,2022.

[10] 李宏煦,王淀佐,胡岳华,等. 羧甲基淀粉钠提高球团强度的机理[J]. 中南工业大学学报(自然科学版),2001,32(4):351 - 354.
LI Hongxu, WANG Dianzuo, HU Yuehua, et al. The mechanism of improving pellet strength by carboxyl methlated amylum [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2001, 32(4):351 - 354.

[11] 齐建玲,彭碧君,秦洁,等. 富集污泥成型低成本黏结剂开发与应用[J]. 矿产综合利用,2024(3):6 - 13.
QI Jianling,PENG Bijun,QIN Jie,et al. Development and application of low cost binder for iron enriched sludge [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024(3):6 - 13.

[12] 周耀,刘培军,马玉尚,等. 电炉精炼不锈钢粉尘与高炉除尘灰协同制备含碳压块冷压工艺研究[J]. 钢铁研究学报,2025,37(9):1246 - 1256.
ZHOU Yao,LIU Peijun,MA Yushang,et al. Study on the cold pressing process of carbon-containing briquettes prepared synergistically from EAF stainless steel dust and blast furnace dust [J]. Journal of Iron and Steel Research,2025,37(9):1246 - 1256.

[13] 张隋鑫,曹勇,许秀颖,等. 预糊化淀粉的制备、性质及应用[J]. 食品科技,2019,44(3):252 - 255.
ZHANG Suixin, CAO Yong, XU Xiuying, et al. Preparation, properties and application of pregelatinized starch [J]. Food Science and Technology,2019,44(3):252 - 255.

[14] 吕莹果,郭玉,高学梅. 预糊化淀粉制备、性质及其在食品工业中应用[J]. 粮食与油脂,2012,25(7):47 - 49.
LÜ Yingguo, GUO Yu, GAO Xuemei. Production and properties of pre-gelatinazed starch and its application in food industry [J]. Cereals & Oils,2012,25(7):47 - 49.

[15] 马春敏,高欣茹,吴巧艳,等. 预糊化淀粉的制备、性质及其在淀粉基食品中的应用[J]. 食品工业科技,2024,45(15):409 - 418.
MA Chunmin, GAO Xinru, WU Qiaoyan, et al. Preparation, properties and applications of pre-gelatinized starch on starch based foods [J]. Science and Technology of Food Industry,2024,45(15):409 - 418.

[16] 居天华. 提高转炉除尘灰冷压球团强度的黏结剂研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.
JU Tianhua. Study on binder to improve the strength of cold-pressed pellets of converter dust [D]. Shenyang: Northeastern University,2014.

[17] 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.

[18] ZHENG H Y, GUO Y C, SHEN F M. Production of titanium powder by metallothermic reduction of $TiO_2$ in cold pressed pellets [J]. Journal of Central South University,2021,28(1):48 - 57.

[19] 吴佩佩,张然. 钢铁厂电炉灰和转炉干法灰压团试验研究[J]. 江西冶金,2022,42(6):82 - 90.
WU Peipei,ZHANG Ran. Research and analysis of EAF ash and converter dry ash sludge briquetting tests in steel plants [J]. Jiangxi Metallurgy,2022,42(6):82 - 90.

[20] 李强,陈铁军,李奇勇,等. 钢铁行业含锌冶金尘泥资源化利用现状与研究进展[J]. 中国冶金,2023,33(7):1 - 9;39.
LI Qiang, CHENTiejun, LI Qiyong, et al. Situation and research development on resource utilization of metallurgical dust containing zinc in iron and steel industry [J]. China Metallurgy,2023,33(7):1 - 9;39.

[21] 莱纳斯·鲍林. 化学键的本质[M]. 卢嘉锡,黄耀曾,曾广植,等译. 上海:上海科学技术出版社,1966.
PAULING L C. The nature of chemical bonds [M]. LU Jiaxi, HUANG Yaozeng, ZENG Guangzhi, et al, Trans. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers,1966.

[22] 李宏煦,姜涛,邱冠周,等. 铁矿球团有机黏结剂的分子构型及选择判据[J]. 中南工业大学学报(自然科学版),2000,31(1):17 - 20.
LI Hongxu,JIANG Tao,QIU Guanzhou,et al. Molecular structure mould and selecting criterion of organic binder for iron ore pellet [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science),2000,31(1):17 - 20.

(下转第 143 页)

中国知网　https://www.cnki.net

$SO_2$ and NO removal over Ce-Mn/NAC [J]. Fuel,2017, 202:328 – 337.

[37] YUAN B, ZHAO Y, MAO X Z, et al. Simultaneous removal of $SO_2$, NO and $Hg^0$ from flue gas using vaporized oxidant catalyzed by Fe/ZSM-5 [J]. Fuel, 2020,262:116567.

[38] FU H B,WANG X,WU H B,et al. Heterogeneous uptake and oxidation of $SO_2$ on iron oxides [J]. The Journal of Physical Chemistry C,2007,111(16):6077 – 6085.

[39] CAGLAYAN B S, AKSOYLU A E. $CO_2$ adsorption on chemically modified activated carbon [J]. Journal of Hazardous Materials,2013,252:19 – 28.

[40] 张秋菊,王晓,陈建民,等. $SO_2$ 与 $Fe_2O_3$ 生成 Fe(Ⅱ)(aq) 和硫酸盐的复相反应机理 [J]. 高等学校化学学报,2006,27(7):1347 – 1350.
ZHANG Qiuju, WANG Xiao, CHEN Jianmin, et al. Formation of Fe(Ⅱ)(aq) and sulfate via heterogeneous reaction of $SO_2$ with $Fe_2O_3$ [J]. Chemical Journal of Chinese Universities,2006,27(7):1347 – 1350.

(上接第 90 页)

[18] LIU Y S,LIU Y,ZHANG T A,et al. Summary of sulfur hazards in high-sulfur bauxite and desulfurization methods [J]. Science of the Total Environment,2024, 948:174631.

[19] 王运,华一新,徐存英,等. $CaCO_3$ 存在下高铁硫化锌矿氧化焙烧的相变机理 [J]. 有色金属工程,2019, 9(5):51 – 57.
WANG Yun, HUA Yixin, XU Cunying, et al. Phase transformation mechanism of high iron zinc sulfide ore during oxidative roasting in the presence of $CaCO_3$ [J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(5):51 – 57.

[20] 吕国志,张廷安,鲍丽,等. 高硫铝土矿的焙烧预处理及焙烧矿的溶出性能 [J]. 中国有色金属学报,2009, 19(9):1684 – 1689.
LÜ Guozhi, ZHANG Tingan, BAO Li, et al. Roasting pretreatment of high sulfur bauxite and leaching performance of roasted ore [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2009,19(9):1684 – 1689.

[21] 吕国志,张廷安,鲍丽,等. 高硫铝土矿的焙烧预处理 [J]. 过程工程学报,2008,8(5):892 – 896.
LÜ Guozhi, ZHANG Tingan, BAO Li, et al. Roasting pretreatment of high-sulfur bauxite [J]. Process engineering, 2008,8(5):892 – 896.

[22] 陈卓,郑睿琦,堵伟桐,等. 含锌粉尘协同处置含铬尘泥的碳热还原试验 [J]. 钢铁,2021,56(11): 148 – 159.
CHEN Zhuo, ZHENG Ruiqi, DU Weitong, et al. Experiment on co-processing of chromium-containing sludge with zinc-bearing dust by carbothermic reduction method [J]. Iron and Steel,2021,56(11):148 – 159.

[23] NAYAK D,RAY N,DASH N,et al. An optimal route for the preparation of metallized composite pellets from ilmenite concentrate [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021,7(3):1102 – 1115.

(上接第 133 页)

[23] 闻格,梁婉雪,章正刚,等. 矿物红外光谱学 [M]. 重庆:重庆大学出版社,1988:112 – 119.
WEN Ge, LIANG Wanxue, ZHANG Zhenggang, et al. Infrared spectroscopy of minerals [M]. Chongqing: Chongqing University Press,1988:112 – 119.

[24] PAL J,AMMASI A,BANDYOPADHYAY B S,et al. An innovative approach to replace bentonite in hematite ore pelletizing with organic binder [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,2024,45(3):225 – 237.

[25] 朱德庆,蔡汝卓,傅守澄,等. 黏结剂与铁精矿表面作用机理研究 [J]. 烧结球团,1995,20(3):19 – 21;5.
ZHU Deqing,CAI Ruzhuo,FU Shoucheng,et al. Study on mechanism of interaction of binder with iron ore concentrate [J]. Sintering and Pelletizing,1995,20(3): 19 – 21;5.

[26] 姜涛,李宏煦,黄柱成. 铁矿球团黏结剂分子结构设计的初步研究 [J]. 烧结球团,1998,23(1):30 – 35.
JIANG Tao, LI Hongxu, HUANG Zhucheng. Primary molecular design of organic binderfor magnetic concentrate pelletizing [J]. Sintering and Pelletizing, 1998,23(1):30 – 35.

中国知网　https://www.cnki.net