

富集污泥成型低成本粘结剂开发与应用

齐建玲¹, 彭碧君¹, 秦洁¹, 罗林根², 王华², 师学峰³

(1. 攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 中国钢研科技集团有限公司资源应用与合金材料事业部, 北京 100081; 3. 华北理工大学冶金与资源学院, 河北 唐山 063000)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。针对攀钢富集污泥球团成型粘结剂成本高, 粉碎率高等问题, 开发出低成本有机粘结剂。并研究了水分、压力、烘干温度等因素对球团落下强度和粉碎率的影响。粘结剂添加 1.5%, 生球落下强度 > 5 次/m, 干球落下强度 > 28 次/2 m, 粉碎率 < 2%, 完全满足现场生产要求, 吨球粘结剂成本降低 35% 以上。

关键词: 矿业工程; 富集污泥; 粘结剂; 落下强度; 粉碎率

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.002

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)03-0006-08

引用格式: 齐建玲, 彭碧君, 秦洁, 等. 富集污泥成型低成本粘结剂开发与应用[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(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, 45(3): 6-13.

含铁尘泥是钢铁生产过程中产生的含有铁、碳、锌、钾、钠等有价值元素废弃物, 直接堆放或排放, 不仅会造成环境污染, 而且尘泥中的有价值元素未得到有效利用。根据生产冶炼工序不同, 含铁尘泥的理化性质存在较大差异, 难以使用单一工艺进行回收处理, 其资源化利用包括物理法、湿法、火法、火法-湿法联合等诸多处理工艺^[1]。粉尘冷固结球团法是目前处理粉尘较好的方法, 具有简便、灵活、成熟、投资低、成本低、粉尘处理产品消耗量大等优点, 现已被国内外很多企业所采用, 但需要添加适宜的粘结剂以保证球团强度^[2-3]。

攀钢钒每年产生的各类含铁尘泥多达数十万 t, 其中富集污泥约 2 万 t, 主要采用冷固成型作为转炉炼钢造渣剂, 兼顾回收其中铁元素, 进一步促进攀钢钒降本增效, 改善生产环境。

目前条件下, 攀钢富集污泥球团生产采用复

合型粘结剂, 添加量为 4.5%~6.0%, 吨球粘结剂成本高, 干燥后球团粉碎率高, 球团利用率低; 而且复合型粘结剂中 P 元素等杂质含量较高, 严重制约了冷固球团经济效益的发挥, 因此, 有必要开发一种具备价格低廉、性能良好等应用特质的新型粘结剂。

1 有机粘结剂选择依据

含铁物料成型常用的无机粘结剂主要有膨润土、水玻璃、水泥等、有机粘结剂主要有废糖浆、聚乙烯醇和改性的玉米淀粉等^[4-8]。

由企业标准可知, 富集污泥粘结剂必须达到以下四个方面的要求: 一是成本低; 二是球团落下强度高、粉碎率低; 三是尽量不降低球团中铁的品位; 四是有害元素 S、P 含量控制在要求范围内。无机粘结剂由于不易分解, 带入杂质

收稿日期: 2022-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1900500); 国家重点研发计划项目(2017YFB0603802); 四川钒钛产业发展研究中心(2020VTCY-Y-02)资助项目

作者简介: 齐建玲(1982-), 男, 工程师, 主要从事固废资源综合利用、非高炉炼铁、高炉渣提钛的研究工作。
通信作者: 师学峰(1984-), 男, 讲师, 主要从事钢铁冶金新技术、钢铁资源综合利用研究。

多，会降低球团中铁品位，同时还会增加有害元素 S、P 含量，因此不适合用作富集污泥球团粘结剂。而有机粘结剂属高分子有机物，用量小，分解温度低，杂质含量少，在炼钢温度下能够分解成为气体挥发，对球团铁品位影响较小。有机粘结剂废糖浆有害杂质少，但资源缺乏，NaOH 改性的玉米淀粉由于引入 Na 元素，会降低转炉耐火砖的使用寿命，故不予采用。

通过对有机粘结剂在球团中作用原理的相关研究可知^[9]，应用于富集污泥的有机粘结剂分子结构应具备以下特征：具有与富集污泥物料表面发生强烈化学吸附作用的亲固极性官能团；具有增强富集污泥物料表面亲水性的亲水基团；具有良好的胶结性能、本身链架不易断裂。

1.1 亲固极性官能团和亲水基团的选择

富集污泥中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 和 Ti^{4+} 属于硬酸型， Fe^{2+} 离子属于交界酸型，根据硬软酸碱理论 (HSAB)，硬酸与硬碱、软酸与软碱优先结合。硬酸和硬碱可以结合生成离子键、极性键或者稳定络合物；软酸和软碱可以结合生成共价键或者稳定的络合物；软酸和硬碱或者硬酸和软碱只能形成弱的化学键或者不稳定的络合物；交界的酸碱和软或硬的碱酸都能发生反应，所生成的络合物的稳定性差别不大，所以富集污泥粘结剂选型应选用硬碱基团或部分交界碱，属于硬碱基团的通常有 $-\text{COO}^-$ 、 $-\text{OH}$ 、 Cl^- 、 $-\text{NH}_2$ 等，属于中间碱的有 $-\text{PO}_3\text{H}$ 、 $-\text{NO}_2^-$ 等。

由于 Cl^- 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{NO}_2^-$ 在炼钢温度下易分解，挥发物影响人体健康，污染环境； $-\text{PO}_3\text{H}$ 增加钢水 P 含量，增加脱 P 成本，粘结剂官能基团以 $-\text{COO}^-$ 、 $-\text{OH}$ 为主。

$-\text{COO}^-$ 、 $-\text{OH}$ 基团作为极性官能团和亲水基团可以电负性进行定量标度。一般两种元素（基团）电负性差值 > 1.7 ，在化学反应中容易形成离子键，生成离子键化合物；两种元素（基团）电负性差值 < 1.7 ，在化学反应中容易形成共价键，生成极性共价化合物；两种元素（基团）电负性差值很小或等于零，形成非极性共价键。 $-\text{COO}^-$ 、 $-\text{OH}$ 与 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Si^{4+} 、 Ti^{4+} 、 H^+ 等离子电负性差值见表 1。

当两键合原子电负性差值为 1.7 时，键的离子性和共价性各为 50%，随着电负性增加，离子性所占比例上升^[10]，结合表 1 可以判断，基团 $-\text{COO}^-$ 、

$-\text{OH}$ 与富集污泥中主要金属阳离子形成以离子键为主的化合物。同时由于基团 $-\text{COO}^-$ 和 $-\text{OH}$ 的电负性分别为 3.91 和 3.84，大于 O 的电负性 3.44，基团 $-\text{COO}^-$ 和 $-\text{OH}$ 可以作为粘结剂的极性官能团与富集污泥物料表面发生强烈化学吸附作用。同理，基团 $-\text{COO}^-$ 和 $-\text{OH}$ 与 H^+ 电负性差值大于 O 和 H^+ 的电负性差值 1.34，基团 $-\text{COO}^-$ 和 $-\text{OH}$ 与水发生缔合，同时可以作为亲水基。

表 1 基团与阳离子电负性差值

Table 1 Difference in electronegativity between groups and cations

名称	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Al^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Ti^{4+}	H^+
$-\text{COO}^-$	2.11	2.21	2.3	2.91	2.6	2.37	1.81
$-\text{OH}$	2.04	2.14	2.23	2.84	2.53	2.3	1.74

1.2 有机架链的选择

有机粘结剂分子架链由非极性基构成，非极性基结构对粘结剂影响主要表现在：决定粘结剂分子的架桥作用；影响粘结剂分子间粘滞力，进而影响球团强度；通过诱导效应、共轭效应影响亲固基团的吸附能力；影响水分扩散进而对生球强度及爆裂温度产生影响。

作为粘结剂的有机物分子应具有较长的键架，并具有足够的亲固基团和亲水基团。有机分子结构是否适合作为粘结剂架链可由临界胶团浓度 (CMC) 判断，CMC 越小，缔合能力越高，亲水性能越差，反之说明能力越小，亲水性能越好。CMC 可用式 1 进行推算^[11]：

$$\log \text{CMC} = A - Bn \quad (1)$$

式中：A、B 为与极性基性质有关的常数；n 为非极性基为直链烷基时 $-\text{CH}_2-$ 的数目。

由式 1 可看出，随着 n 的增加，CMC 值呈几何级数减小，由此可判断直链结构亲水性能比支链结构差，而且对于存在支链的异构烃基，碳原子数相同时，烃链长度比正构链短，含有多极性基的异构烃基，由于极性基亲水性或者多极性基之间静电斥力增加，阻止形成胶团能力增加，使 CMC 进一步提高，作为要求有亲水基的粘结剂，支链结构优于直链结构。

对于架链结构含有双键的不饱和烃基，与饱和烃基相比，每增加一个双键，减少两个 $-\text{CH}_2-$ ，相对于饱和烃基，含有双键的不饱和烃基架链能够显著提高溶解分散性能。而且不饱和双键架链

断面积相对更大,可增强粘结剂与固体物料颗粒间的“架桥”作用。

对于含有苯环结构的芳香烃基架链结构,引入苯环对 CMC 的影响相当于加入 2~3 个-CH₂-基,但苯环含有 6 个碳原子,在碳原子数量相同条件下,含有苯环的芳香烃基架链结构的 CMC 高于直链烃基的 CMC。由于苯环结构存在大 π ,增强了苯环结构的亲固能力及架链的胶结性。

综上所述,对有机粘结剂架链选择时,支链结构比直链结构好,不饱和烃基比饱和烃基好,具有苯环结构的非极性基比直链烃基好。

2 实验条件和方法

2.1 实验原料

实验用富集污泥为攀钢钒转炉污泥经磁选后的含铁尘泥,富集污泥堆密度 $2.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,化学成分见表 2,粒度组成见表 3。

表 2 富集污泥原料成分分析/%

MFe	TFe	MgO	SiO ₂	P	S	CaO
39.44	61.38	1.77	4.03	0.083	0.027	5.30

表 3 富集污泥粒度组成

粒度/mm	+0.25	-0.25+0.15	-0.15+0.12	-0.12+0.063	-0.063	合计
含量/%	30.08	37.73	7.46	22.22	2.51	100.00

2.2 有机粘结剂配制

以有机物 A 为原料,对其进行改性后,按表 4 配方制成 YFN-1 型富集污泥压球用有机粘结剂。取表 4 中物质中间值配制的 YFN-1 型粘结剂有害元素 S、P 含量及烧损见表 5。

表 4 富集污泥压球有机粘结剂配方

有机物A	改性剂	增粘剂	固化剂
100%	0.48%~0.53%	1.8%~2.4%	0.27%~0.33%

表 5 YFN-1 型粘结剂有害元素 S、P 含量及烧损/%
Table 5 Contents and burning loss of harmful elements S and P in YFN-1 type binder

P	S	烧损(350 °C)	烧损(950 °C)
0.021	0.117	80.18	98.64

由表 5 可看出, YFN-1 型粘结剂中有害元素 S、P 含量较低,在 950 °C 烧损达到 98.64%。在

转炉炼钢温度下粘结剂基本全部烧损,对钢水成分及炉渣质量影响很小。

2.3 实验步骤及方法

(a) 实验设备

天平(精度达到千分之一)、小型砂浆混料机、液压式电子压力实验机和恒温干燥箱。液压式电子压力实验机极大压力 2000 kN,实验模具为内径 $\Phi 20 \text{ mm}$ 圆柱形模具。

(b) 实验步骤

①称取烘干后的富集污泥 500 g,粘结剂根据配比称取,放入小型砂浆混料机干混 4 min,然后按设定值加入水,湿混 3 min。混好后的物料放入密封袋中保存。

②取混匀的物料 20 g 放入 2000 kN 液压式万能实验机的圆柱形模具内,用一定压力将物料挤压成型,脱模为 $\Phi(20.27 \pm 0.03) \text{ mm}$ 圆柱形球团。

③将刚刚压制的圆柱形球团从 1 m 高度自由落落到 5 mm 厚钢板上,测试生球落下强度。

④在恒温箱内干燥或自然晾干,得干燥球团,将干燥球团自 2 m 高度自由落落到 5 mm 厚钢板上,测试干球落下强度和粉碎率。

2.4 球团落下强度及粉碎率测定方法

2.4.1 生球落下强度

生球的落下强度是指生球由造球系统运输到干燥系统(或晾干容器)过程中所能经受的抗破损强度。

生球落下强度测定:随机取 10 个新压制球团样,自 1 m 高度自由落体运动至 5 mm 厚钢板,球团破裂成块时落下的次数为落下强度指标,取 10 个球团落下次数的算术平均值(次/m)。

2.4.2 干球落下强度及粉碎率

干球粉碎率和落下强度测定方法与生球类似。

干球落下强度及粉碎率的测定:规定 2 m 高度跌落至 5 mm 厚度的钢板 3 次后 < 5 mm 的质量占原始干球质量的百分数为干球粉碎率,从球团主体剥落掉一半时落下的次数为干球落下强度。

3 结果与分析

在保证球团落下强度要求及粉碎率条件下,同时考虑现场适应性,研究了水分、压力、烘干温度等因素对球团落下强度的影响,以求找到合适的压球条件,极大限度降低粘结剂成本。

3.1 水分对富集污泥球团落下强度及粉碎率的影响

压力 40 kN、粘结剂添加量 1.5% 条件下，水分对球团落下强度及粉碎率的影响见图 1。

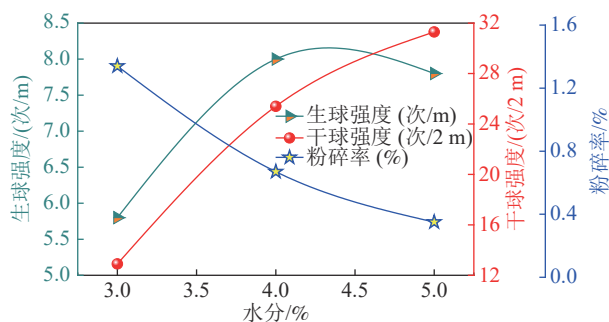


图 1 水分对球团落下强度及粉碎率的影响
Fig.1 Effect of water on falling strength and crushing rate of pellets

由图 1 可知，在压力 40 kN、粘结剂配加 1.5% 条件下，富集污泥球团强度及粉碎率随水分变化关系如下：

水分在 3%~5% 范围内，生球强度 ≥ 5.5 次/m。随着水分的增加，生球落下强度呈先升高后降低的趋势，但降低趋势不明显。水分由 3% 增加到 4%，生球落下强度由 5.8 次/m 提高到 8 次/m，水分由 4% 增加到 5%，生球落下强度降低 0.2 次。

干球落下强度随水分的增加而提高，提高速率逐渐降低。水分由 3% 增加到 4%，干球落下强度由 12.9 次/2 m 提高到 25.4 次/2 m，干球落下强度提高了 100%；水分由 4% 增加到 5%，干球落下强度提高了 23%。

干球粉碎率随水分的增加而降低，且粉碎率在 0.5%~1.4% 之间；当水分超过 4%，干球粉碎率在 1.0% 以下。

3.2 粘结剂添加量对富集污泥球团落下强度及粉碎率的影响

由水分对富集污泥球团落下强度及粉碎率的影响可知，水分添加量在 5% 时，生球和干球落下强度都能达到比较高的指标，粉碎率可以控制在 1.0% 以内。在压力不变的条件下，将水分的添加量固定在 5%，考查不同粘结剂添加量对富集污泥球团落下强度和粉碎率的影响，实验结果见图 2。

由图 2 可知，在压力为 40 kN、水分添加量为 5% 的条件下，干球和生球落下强度都随着粘结剂添加量的增加而提高。当粘结剂添加量为 0.7% 时，生球和干球落下强度都较低，分别为

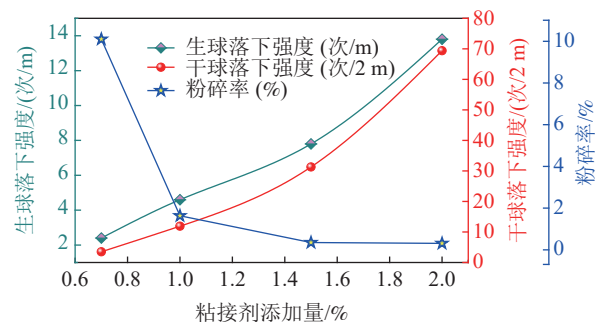


图 2 球团落下强度及粉碎率与粘结剂添加量的关系
Fig.2 Relationship between falling strength and crushing rate of pellets and adding amount of binder

2.4 次/m 和 3.5 次/2 m；当粘结剂添加量为 1.0% 时，生球落下强度 4.6 次/m，干球落下强度 11.9 次/2 m；当粘结剂添加量超过 1.5% 时，生球落下强度在 7.8 次/m 及以上，干球落下强度在 30 次/2 m 以上。随着粘结剂添加量的增加，富集污泥球团粉碎率不断降低。当粘结剂添加量从 0.7% 提高到 1.0% 时，富集污泥球团粉碎率急剧降低；当粘结剂添加量从 2.0% 降低到 1.5% 时，粘结剂加入量已经超过 1.0%，粉碎率升高趋势缓慢，且粉碎率 $< 2\%$ 。

粘结剂的添加量为 1.0% 已经能够满足现场要求，考虑到现场生球倒运次数较多，而且混料等生产条件比实验室差，粘结剂添加量在 1.5% 左右为佳。

3.3 落下高度对富集污泥球团生球落下次数的影响

通过研究落下高度对生球落下次数的影响，可设计压球和运输装置之间的合理落差，提高成球率。在水分为 5%、压力为 40 kN、粘结剂加入量为 1.5% 的条件下，落下高度对生球落下次数的影响见图 3。

从图 3 中可知，在 0.5、1、1.5 m 时生球的落下次数分别为 44.6 次、12 次、5.3 次，从 0.5 m 升高到 1 m 时，生球落下次数减少了 32.6 次，从 1 m 升高到 1.5 m 时，生球落下次数减少了 6.7 次。在 0.5~2 m 高度范围内，随着落下高度的增加，生球落下次数前期快速减少，在落下高度 > 1 m 后生球落下次数逐渐趋于稳定。

将生球落下简化为自由落体运动，生球与钢板接触瞬间受到钢板的反向冲击力：

$$F = \frac{m\sqrt{2gh}}{t} \quad (2)$$

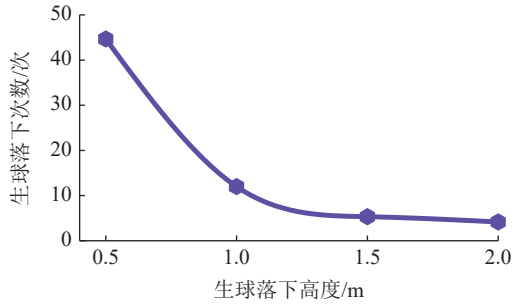


图3 生球落下次数与落下高度的关系

Fig.3 Relationship between the number of falling balls and the height of raw pellets

式中： F —生球受到的反向冲击力，N；

m —生球质量，kg；

g —重力加速度， m/s^2 ；

h —生球落下高度，m；

t —生球与钢板接触时间，s。

以 0.5 m 生球高度自由下落受到钢板冲击力为基准 1 F，在生球与钢板接触时间相同条件下，根据式 2 可计算出生球在其他高度自由下落接触钢板时受到的钢板反向冲击力，见表 6。

表 6 生球由不同高度落下时受到的反向冲击力/N
 Table 6 Reverse impact force of pellets falling from different heights

高度/m	0.5	1	1.5	2
冲击力/N	1 F	1.414 F	1.732 F	2 F

随着高度的增加，生球受到钢板反向冲击力增大，当反向冲击力大于生球内部粘结剂与颗粒间结合力时，生球发生裂纹直至破碎。

由此可知，生产过程中降低生球运输过程中高度差（例如压球机与生球运输皮带之间、转运皮带之间、皮带与生球容器之间），能够有效减少因生球破碎产生的返料量，从而提高生产效率。

3.4 烘干温度对干球强度及粉碎率的影响

采用烟气烘干可提高生产效率，为确定合适的烘干温度，研究了烘干温度对富集污泥球团在干球落下强度及粉碎率的影响，见图 4。

由图 4 可看出，在 110~250 °C 范围内，干球落下强度随着烘干温度的提高而降低，由 110 °C 时的 72.9 次/2 m 降低到 250 °C 时的 1.3 次/2 m，降低 98.3%；粉碎率在 110~200 °C 范围内随温度的升高增加不明显，由 110 °C 时的 0.67% 增加到 200 °C 时的 1.19%，温度超过 200 °C，粉碎率急剧增加。

由于使用的粘结剂为有机粘结剂，主要由 C、

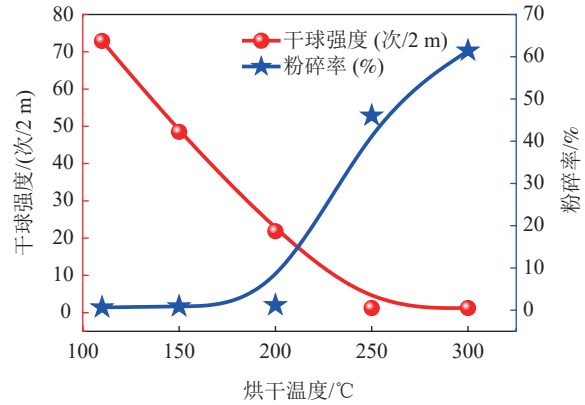


图 4 烘干温度对干球落下强度及粉碎率的影响

Fig.4 Effect of drying temperature on the falling strength and crushing rate of dry pellets

H、O 元素组成，分解温度较低，温度超过一定值时，有机粘结剂发生分解，失去粘结效果，导致球团落下强度急剧降低，粉碎率升高。

3.5 放置时间对干球强度及粉碎率的影响

为研究不同水分含量条件下富集污泥球团干球落下强度，在粘结剂添加量为 1.5%，水分配比为 5%，压力为 40 kN 条件下，测试在该条件下压出的球团放置不同天数时球团在 2 m 落下时的强度及粉碎率，并对放置不同天数后摔碎的球团中水分含量进行测试。图 5 是放置不同天数对球团水分含量、干球在 2 m 落下强度及粉碎率的影响。

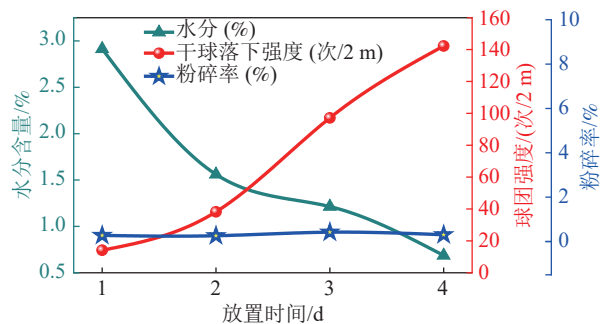


图 5 放置天数对球团中水分、干球强度及粉碎率的影响

Fig.5 Effect of days of storage on moisture, strength and crushing rate of dry pellets

由图 5 可知，随着放置天数的增加，水分不断降低，球团落下强度逐渐升高。当水分 < 1.5% 时，随着水分的不断降低，球团落下强度迅速升高，当水分由 1.56% 降低到 1.21% 时（水分仅减少 0.35%），球团落下强度却由 38.2 次/2 m 升高到 97.1 次/2 m（落下强度提高了 58.9 次）。球团粉碎率在实验过程中变化不大，总体在 1.0% 以下。

3.6 压力对球团强度及粉碎率的影响

在粘结剂添加量为 1.5%，水分加入量为 5% 时，不同压力条件下生球 1 m 落下强度、干球在 110 °C 烘干和自然晾干方式 2 m 落下强度及粉碎率见图 6~8。

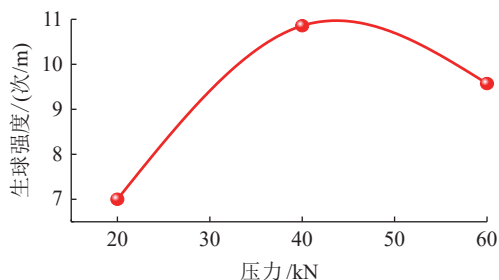


图 6 压力对生球强度的影响

Fig.6 Effect of pressure on the strength of raw pellets

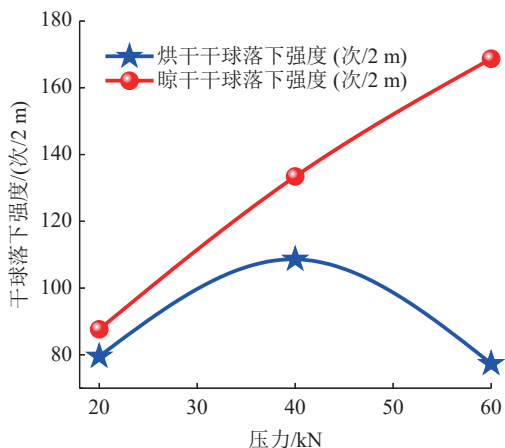


图 7 压力对干球强度的影响

Fig.7 Effect of pressure on dry pellets strength

由图 6 可知，在粘结剂和水分配比一定的条件下，压力从 20 kN 增加到 60 kN 时，生球落下强度随压力的提高呈先增加后降低的趋势。在压力为 40 kN 时，生球落下强度达到较高（10.8 次/m），当压力超过 40 kN，生球落下强度随压力升高而降低。这主要是由于压力超过一定的极限值后，富集污泥颗粒组织脆化爆裂从而产生新的断面，在新的断面处没有粘结剂所以起不到粘合作用，导致生球落下强度降低。

由图 7 可知，在粘结剂和水分配比一定的条件下，压力从 20 kN 增加到 60 kN 过程中，经过 110 °C 烘干的干球落下强度随压力的提高先升高后降低，在压力 40 kN 时该条件下球团强度达到极大值（100.8 次/2 m）。自然晾干的干球落下强度随压力的增大而不断升高，在压力为 60kN 时球团强度达到极大值（168.7 次/2 m）。从图 8 中可

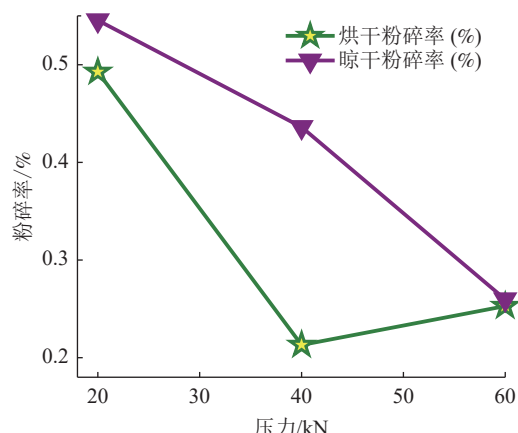


图 8 压力对干球粉碎率的影响

Fig.8 Effect of pressure on dry pellets crushing rate

知，烘干干球的粉碎率一直都低于 0.5%，烘干干球的粉碎率先随着压力的增加不断降低，在压力为 40 kN 时粉碎率达到较小值（0.21%），随后随着压力增大球团粉碎率略有升高，这与图 7 中烘干干球落下强度随压力增大先升高后降低吻合。自然晾干球团粉碎率一直都低于 0.55%，且随着压力的增加逐渐降低，在压力 60 kN 时球团粉碎率达到较小值（0.26%），这与图 7 中烘干干球落下强度趋势吻合。从实验过程得到的数据可知，在粘结剂和水分配比一定的条件下，晾干干球落下强度普遍高于 110 °C 烘干的干球强度，粉碎率也略高于 110 °C 烘干的干球粉碎率。

生球球团在 110 °C 烘干条件下的干燥过程中，生球表面和内部会发生湿度差，从而引起表面和内部收缩不均匀，产生应力使球产生裂纹，因此影响其强度，导致落下强度降低。同时生球在干燥过程中内部会产生蒸汽，随着压制压力的增大物料颗粒间间隙减小、生球致密度增大，导致内部蒸汽扩散阻力增大，蒸汽不能及时扩散到生球表面，球内蒸汽压增加，导致球团产生裂纹。

4 粘结剂应用实验

4.1 富集污泥现场压球效果

根据前期实验室结果，利用 YFN-1 型粘结剂在压球现场进行吨级压球实验。现场压球机压力 5 MPa，辊皮长度 20 cm，每个球团质量约 90 g，产量 1.0~1.2 t/h。富集污泥水分含量 2.68%，每次实验的富集污泥质量约 500 kg，富集污泥和粘结剂一起加入螺旋搅拌机干混 3 min 后，加入水分调整含水量，然后继续混合 4 min 后进行压球成型，

实验结果见表 7。

由表 7 可知，富集污泥在粘结剂配比 1.5%~2.0% 的条件下，生球落下强度 >9.8 次/m，干球落下强度 ≥66.9 次/2 m，粉碎率 ≤1.14%。

4.2 富集污泥球团指标和成本比较

分别用复合粘结剂与 YFN-1 型粘结剂压制得到球团，表 8 为两种球团中有害元素含量、球团

表 7 现场压制的富集污泥球团落下强度及粉碎率
Table 7 Falling strength and comminution rate of enrichment sludge pellets pressed on site

	粘结剂 配比/%	水分/ %	生球强度/ (次/m)	干球强度/ (次/2 m)	粉碎率/ %
实验组1	1.50	4.91	9.8	66.9	1.14%
实验组2	2	4.4	12.8	>72.9	0.67%

实验后所得参数和成本。

表 8 现用复合粘结剂与 YFN-1 型粘结剂各项指标比较
Table 8 Comparison of various indexes between current composite binder and YFN-1 type binder

	粘结剂用量/%	S	P	落下强度/ (次/2 m)	粉碎率/%	粘结剂成本/ (元/球团)
企业标准要求		≤0.10	≤0.15	≥3	≤8	
现用复合粘结剂	6	0.13	0.053	2.18	27.24	>120
YFN-1型粘结剂	1.5	0.024	0.041	66.9	1.14	≤75

从表 8 可知，利用 YFN-1 型粘结剂压制的球团与现用复合粘结剂压制的球团相比，有害元素 S、P 含量分别降低了 82.3% 和 18.8%；干球落下强度提高了 29 倍，粉碎率由 27.24% 降低到 1.14%，吨球团粘结剂成本由 120 元以上降低到 75 元以下，所以无论从球团的性能还是成本来考虑，使用 YFN-1 型粘结剂压制得到的球团都明显优于现有符合粘结剂压制得到的球团。

5 结 论

(1) 经 YFN-1 型粘结剂压制而成的球团，其落下强度随水分的提高和晾干时间的延长而提高；干球落下强度随烘干温度的提高和生球落下次数的增加而降低；生球落下次数随高度的升高呈快速下降。

(2) 生球和烘干干球粉碎率随水分的提高和压力的增加而降低，干球落下强度随烘干温度的升高而降低。

(3) 生球和烘干干球落下强度随压力增加先增加再降低，在 40 kN 时达到较高。晾干干球落下强度随压力增加而增加。

(4) 较佳的压球条件：粘结剂添加量为 1.5%、水分为 4%~5%、压力为 40 kN。

(5) 同现在使用的复合粘结剂压制的球团相比，使用 YFN-1 型粘结剂压制的球团中有害元素 S、P 含量分别降低了 82.3% 和 18.8%，干球落下强度提高了 29 倍，粉碎率由 27.24% 降低到 1.14%，吨球团粘结剂成本由 120 元以上降低到 75 元以下。

参考文献：

[1] 毛瑞, 王飞. 转底炉工艺处理含铁尘泥关键技术[J]. 钢铁, 2020, 55(8):199.
 MAO R, WANG F. Key technology of treating iron-bearing dust and sludge by rotary hearth furnace process[J]. Iron and Steel, 2020, 55(8):199.
 [2] 沈宗斌, 沙永志. 钢铁粉尘冷固结球团工艺研究[J]. 钢铁, 2003, 38(12):3-5.
 SHEN Z B, SHA Y Z. Studies on cold bonded briquettes technology of dust from steel industry[J]. Iron and Steel, 2003, 38(12):3-5.
 [3] 侯静, 吴恩辉, 李军, 等. 攀枝花微细粒级钛精矿冷固结成型实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(1):114-117.
 HOU J, WU E H, LI J, et al. Experimental study on cold-bonded moulding of Panzhihua micro-size fraction titanium concentrate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):114-117.
 [4] 曹 龙, 段东平. 高炉瓦斯灰含碳球团粘结剂研究[N]. 过程工程学报, 2013, 13(1): 164-167.
 CAO L, DUAN D P. Study on binder of blast furnace gas ash containing carbon pellets[N]. Chinese Journal of Process Engineering, 2013, 13(1): 164-167.
 [5] 屈振民, 张帅, 张延玲. 高铁赤泥制备 CaO-SiO₂-Fe₂O₃-Al₂O₃ 系微晶玻璃[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(4):34-38.
 QU Z M, ZHANG S, ZHANG Y L. Preparation of CaO-SiO₂-Fe₂O₃-Al₂O₃ system glass-ceramics from red mud with high iron[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(4):34-38.
 [6] 孙健宁, 刘小杰, 严照照, 等. 不同含量 SiO₂ 对球团质量的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(1):118-123.
 SUN J N, LIU X J, YAN Z Z, et al. Effect of different contents of SiO₂ on the quality of pellets of Hansteel[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):118-123.

[7] 田铁磊, 蔡爽, 刘连继. PMC配加庙沟粉球团氧化焙烧行为研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(6):123-126.

TIAN T L, CAI S, LIU L J. Oxidation roasting behavior of pellets made from PMC and Miaogou powder[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(6):123-126.

[8] 曹明明, 张建良. 钒钛磁铁矿冷压含碳球团的粘结剂选择[J]. *矿冶工程*, 2012, 35(5):67-68.

CAO M M, ZHANG J L. Selection of binder for vanadium titanomagnetite cold-pressed carbon pellets[J]. *Mining Metallurgical Engineering*, 2012, 35(5):67-68.

[9] 李宏煦. 铁矿球团有机粘结剂的分子初步设计及开发研究[J]. *烧结球团*, 1998, 23(1): 30-35.

LI H X. Molecular preliminary design and development of organic binder for iron ore pellets[J]. *Sintered pellets*, 1998, 23(1): 30-35.

[10] L 鲍林. 化学键的本质[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.

Linus Pauling. The nature of bonds[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981.

[11] 王淀佐. 矿物浮选和浮选剂-理论与实践[M]. 湖南: 中南工业大学出版社, 1986.

WANG D Z. Mineral flotation and flotation agents-theory and practice[M]. Hunan: Central South University of Technology Press, 1986.

Development and Application of Low Cost Binder for Iron Enriched Sludge

QI Jianling¹, PENG Bijun¹, QIN Jie¹, LUO Lingen², WANG Hua², SHI Xuefeng³

(1.State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2.Resource Application and Alloy Materials Division, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 3.School of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Aiming at problems of high cost and high comminution rate in the iron enriched sludge pelletizing process, a new kind of low cost binder was developed. In this paper, the effects of water content, pressure and drying temperature on the falling strength and comminution rate of the pellets were studied. The results show that when the binder ratio is 1.5%, the falling strength of the raw pellets is more than 5 times/m, the falling strength of dried ball is more than 28 times/2 m, the comminution rate is less than 2%, which meets the requirements of production. At the same time, the binder cost of per ton pellet is reduced by 35% compared with the previous binder.

Keywords: Mining engineering; Iron enriched sludge; Binder; Falling strength; Comminution rate

(上接第5页)

waste discharged from coal-fired power plants, but also a potential secondary resource. At present, although the resource utilization of fly ash covers a wide range of fields, the high value utilization rate is low. The main chemical components of fly ash are silicon and alumina. Making full use of aluminum and silicon resources is one of the important ways to improve its resource utilization. In this article, the application of fly ash in the extraction of metallurgical grade alumina, preparation of non-metallurgical grade alumina, silica, silica aerogels, silicon-aluminum composites and other high value-added products are reviewed. The existing problems of high value utilization are analyzed and the future development trend is pointed out.

Keywords: Mining engineering; Fly ash; Aluminum; Silicon; High-value utilization