



低品质膨润土有机插层改性及机理

马磊¹, 李文波², 雷杰^{1a}, 夏子豪^{1a}, 龙红明¹

(1. 安徽工业大学 a 冶金工程学院; b. 冶金工程与资源利用安徽省重点实验室, 安徽 马鞍山 243032;
2. 铜陵有色金属集团股份有限公司 铜冠冶化分公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 针对传统膨润土提质改性工艺手段单一、质量波动大, 未从根本上改变膨润土质量现状的问题, 本文提出通过机械外力对膨润土进行半干法有机插层改性试验。试验结果表明: 有机插层膨润土显著改善了球团性能, 当其配比为 1.2% 时, 生球落下强度、抗压强度和爆裂温度分别达到 7.8 次/(0.5 m)、29.5 N/P 和 575 °C, 相较于传统复合改性法, 分别提升 3.0 次/(0.5 m)、9.2 N/P 和 65 °C。有机插层后膨润土最大毛细水由传统复合改性法的 18.0% 提升至 20.6%, 接触角由 11.59° 降低至 4.93°, 对液体的亲和程度提高, 亲水能力增强, 整体体系已从良好的分散稳定性体系转变为一般稳定性体系, 提高了其黏结性能, 有利于改善生球性能指标。

关键词: 膨润土; 有机插层; 球团; 亲水性

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0072-07

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.02.027

Modification and mechanism of organic intercalation of low-quality bentonite

MA Lei¹, LI Wenbo², LEI Jie^{1a}, XIA Zihao^{1a}, LONG Hongming¹

(1. Anhui University of Technology a. School of Metallurgical Engineering, b. Anhui Provincial Key Laboratory of Metallurgical Engineering and Comprehensive Utilization of Resources, Ma'anshan 243032, Anhui, China;
2. Tongguan Metallurgical Branch, Tongling Nonferrous Metals Group Corporation, Tongling 244000, Anhui, China)

Abstract: In view of the problems of single means of traditional bentonite quality improvement and modification process, large quality fluctuations, and no fundamental change in the status quo of bentonite quality, the semi-dry organic intercalation modification test of bentonite is proposed by mechanical external force. The results show that the pellet performance of organically intercalated bentonite is significantly improved, and when its ratio is 1.2%, the falling strength, compressive strength and burst temperature of fresh pellets reach 7.8 times/(0.5 m), 29.5 N/P and 575 °C, respectively, which are increased by 3.0 times/(0.5 m), 9.2 N/P and 65 °C, respectively, compared with the traditional composite modification method. After organic intercalation, the maximum capillary water of bentonite is increased from 18.0% to 20.6% by the traditional composite modification method, and the contact angle is reduced from 11.59° to 4.93°, the affinity with liquid is improved, the hydrophilic ability is enhanced, and the whole system is changed from a good dispersion stability system to a general stability system, which improves its adhesive performance and is conducive to improving the fresh pellet performance index.

Key words: bentonite; organic intercalation; pellets; hydrophilicity

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 安徽省自然科学基金杰青资助项目(2208085J19); 安徽省研究生创新创业实践项目(2023xcycsj071)

作者简介: 马磊(1997—), 男, 硕士研究生, 从事炼铁新技术方面的研究。

通信作者: 龙红明(1979—), 男, 教授, 从事炼铁新技术方面的研究。

黏结剂作为球团生产中不可或缺的辅助原料,其合理选择是影响球团矿品质的重要因素。适量黏结剂的添加可显著提升生球指标、改善焙烧球强度^[1-3]。长期以来,由于良好的成球性能及丰富的资源储备,以膨润土为主的无机黏结剂在国内外铁矿球团生产过程中得到广泛应用^[4-5]。然而,我国膨润土储备主要以低品质钙基膨润土为主,优质膨润土资源较少,过度开采导致其质量日趋劣化^[6]。现阶段,膨润土原土的加工制备以半干法堆积钠化为主,生产方式原始、周期长且质量波动非常大。同时,单纯的钠化改性只是以金属离子交换的形式改善了膨润土的物理性能。有机黏结剂凭借其低用量、生球质量改善显著等优势受到了研究者的重点关注,有机复合改性成为球团膨润土质量优化的研究焦点^[7-10]。张元波等^[11]制备了膨润土基复合黏结剂,在添加0.5%腐殖酸改性膨润土的条件下,生球性能得到改善。李彩霞等^[12]采用羧甲基纤维素钠与膨润土制备了一种新型有机复合黏结剂,在其使用量为0.8%时,生球落下强度可达3.6次/(0.5 m)。LI等^[13]使用高品质钠基膨润土进行有机插层改性研究,在使用量为1.2%时,落下强度达到7.8次/(0.5 m)。传统的有机改性仅将有机黏结剂与膨润土通过简单混合来提升膨润土的黏结性能,但并未从根本上改变膨润土的品质。通过机械外力破坏蒙脱石层间结构并与有机分子链充分交合,在膨润土的层间插入亲水基团,大幅提高膨润土与铁矿颗粒的化学键合能力是膨润土提质改性最有效的手段之一^[14-16]。

本文以国内典型低品质钙基膨润土为研究对象,开展原土半干法有机插层改性研究,并结合

晶体结构、亲水性官能团以及接触角分析等手段,揭示了膨润土有机插层改性机理,为低品质膨润土的提质改性和高效利用提供理论指导和技术支撑。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

膨润土原矿呈现不规则团状以及块状,水分在20%~25%之间,经过烘干,破碎后检测其物理性质,检测结果表1所示。由表1可知,蒙脱石质量分数为58.45%,2 h吸水率和膨胀指数分别为119%和5 mL/g,说明原土中蒙脱石含量一般,整体品质较差。

表1 膨润土原土物理性质

Table 1 Physical properties of bentonite raw soil

蒙脱石含量 (质量分数)/%	吸蓝量/ [g·(100 g) ⁻¹]	膨胀指数/ (mL·g ⁻¹)	2 h 吸水率/%
58.45	25.8	5.0	119.0

试验采用的有机黏结剂Y,含有一OH、—COO—和—CHO等基团,具有较强的亲水性,分子结构式如图1所示。

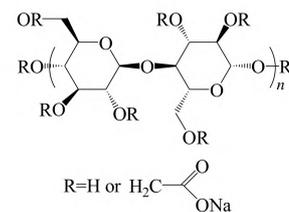


图1 有机黏结剂Y的分子结构式

Fig. 1 Molecular structural formula of organic binder Y

试验采用的铁精矿源自某球团厂,其化学成分、粒度组成与比表面积和静态成球性指数等重要指标分别如表2、3所示。由表2、3可知,铁精矿品位较高,达到67.36%,<74 μm粒级质量

表2 铁精矿主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 2 Main chemical compositions and losses on ignition of iron ore concentrate

TFe	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	烧损
67.36	25.94	1.98	0.89	0.58	0.85	0.66	0.050	-2.38

表3 铁精矿主要物理性能

Table 3 Main physical performance of iron ore concentrate

粒度组成(质量分数)/%				比表面积/ (cm ² ·g ⁻¹)	静态成球性 指数
>0.074 mm	[0.045~0.074]mm	<0.074 mm	<0.045 mm		
14.16	26.29	85.84	59.56	1 223.0	0.90

分数为 85.84%，< 45 μm 粒级质量分数为 59.56%，比表面积为 1 223.0 cm²/g，静态成球指数为 0.90，成球性能优良。从球团工艺来说，原料比表面积为 1 500 ~ 2 100 cm²/g 时为宜，因此，该铁精矿粒度基本满足造球要求，但最好通过高压辊磨提高比表面积。

1.2 试验方法

1.2.1 高压辊磨有机插层改性

通过颚式破碎机将原土破碎至 1 mm 以下。随后将破碎得到的原土与 1.5% 的有机黏结剂 Y 通过强力混合机充分混匀，为了尽可能模拟实际生产，保持原料水分与膨润土原土一致，在混匀过程添加 25% 的水分。采用对辊压力机对其进行挤压改性，实验室小型高压辊磨机辊子尺寸为 ∅200 mm × 200 mm，设定辊轮线压力为 2.35 t/cm、辊轮转速为 4.0 r/min，开路辊磨 1 次。改性后的膨润土(标记为 Bent-R)通过鼓风干燥箱在 105 °C 下完全烘干，采用制样机研磨至 < 0.074 mm 质量分数达到 99% 以上。另一方面，向烘干后的原土添加 1.5% 的有机黏结剂 Y，充分混匀后研磨至 < 0.074 mm 质量分数达到 99% 以上，标记为 Bent-F，作为对比样。通过球团试验、亲水性能、X 射线衍射(XRD)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)等手段对比两种工艺对膨润土质量的影响。具体流程如图 2 所示。

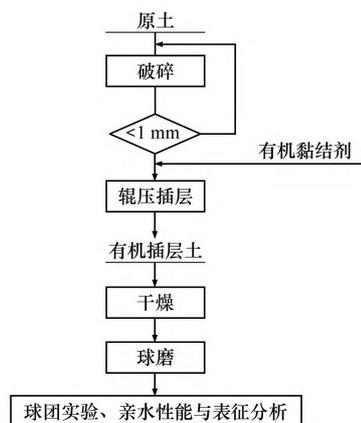


图 2 试验流程

Fig. 2 Experimental flow

1.2.2 亲水性能检测

Washburn 动态法是一种常用的方法，用于通过测量液体在多孔介质中的渗透高度随时间的变

化来确定固体表面的接触角。

润湿高度、润湿时间以及表面张力间的关系见式(1)。

$$h^2 = R_{\text{cap}} \gamma \cos \theta \cdot \frac{t}{\eta} \quad (1)$$

式中： h 为润湿高度，m； t 为润湿时间，s； R_{cap} 为粉体孔隙的毛细管平均半径，m； γ 为液体表面张力，mN/m； η 为黏度，mPa·s。

对于本试验，采用的液体普遍为蒸馏水，由此可得 $\gamma = 72.8$ mN/m、 $\eta = 1$ mPa·s，样本选用不加黏结剂的铁精矿，根据上述公式可得出斜率 k_0 。

以 h^2 对 t 作图得到一条直线，通过斜率 k 即可得到接触角、表面张力和黏度三者间的关系。测得 h^2 对 t_1 作图得到的直线斜率 k_0 ，考虑到一样品的毛细管平均半径与液体种类无关，令 $\theta_0 = 0^\circ$ ，液体种类均为蒸馏水， $\gamma_0 = \gamma$ 、 $\eta_0 = \eta$ ，则

$$\theta = \arccos \frac{k}{k_0} \quad (2)$$

式中： k 为样本(铁精矿)的斜率，m²/s； k_0 为样本 + 黏结剂的斜率，m²/s。

1.2.3 Zeta 电位检测

取 0.5 g 黏结剂与 20 mL 蒸馏水充分混合，放入超声波混匀装置，使黏结剂完全溶解在蒸馏水中。接下来采用移液枪，将 3 ~ 5 mL 的混匀样品放置纳米粒度电位分析仪，重复三次检测，将三次检测结果平均值记为最终电位差结果。

2 结果与讨论

2.1 有机插层对生球质量的影响

将 1.2% 原土、原土辊磨、Bent-F 和 Bent-R 进行造球试验来判定其性能优劣，不同种类黏结剂生球性能如表 4 所示。

表 4 不同种类黏结剂生球质量

Table 4 Green ball quality of different types of binders

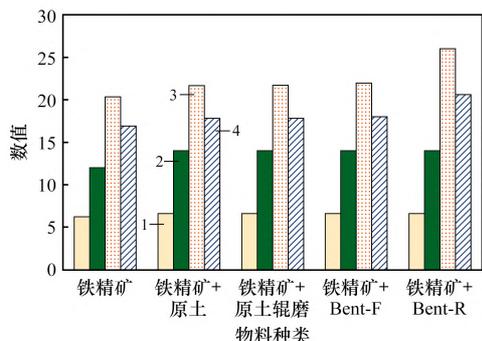
生球种类	落下强度/ [次·(0.5 m) ⁻¹]	水分(质量 分数)/%	抗压强度/ (N·P ⁻¹)	爆裂温 度/°C
原土	3.2	7.5	16.8	475
原土辊磨	3.1	7.5	16.4	470
Bent-F	4.8	8.2	20.3	510
Bent-R	7.8	9.1	29.5	575

由表4可知,原土辊磨前后,生球性能无明显变化,添加有机黏结剂Y所制备的Bent-F对生球质量和焙烧球质量有一定提升,生球落下强度由原土的3.2次/(0.5 m)提升至4.8次/(0.5 m),爆裂温度由475℃提升至510℃,生球水分提升至8.2%;通过有机插层后,球团落下强度达到7.8次/(0.5 m),爆裂温度达到575℃,生球水分提升至9.1%,所生产的球团质量满足生产实际需求。这主要是因为膨润土经过有机插层后,其性能得到较大提升。

2.2 有机插层改善膨润土亲水性能机理分析

在球团形成以及长大过程中,内部毛细力、化学键力和机械啮合力等相关作用力起到共同调控作用,其中毛细力对球团生长及生球质量起到关键作用。在造球过程中,混合矿颗粒在造球盘中相互接触时,相互之间会形成液体联接桥,称桥液。同时,球团黏结剂的添加会提高桥液的黏度,增大桥液之间的毛细力。而毛细力主要表现为最大毛细水,为了探究膨润土有机插层前后亲水性能变化,文章对混合矿进行最大毛细水检测,检测方法可参考文献[17],令不添加黏结剂的铁精矿为样本,与添加1.2%不同种类黏结剂的铁精矿做对比分析。

黏结剂对铁精矿亲水性能影响如图3所示。由图3可知,铁精矿在添加黏结剂后亲水性能得到较大提升,其中添加Bent-R的样品最大毛细水提升幅度最大,为20.6%,较不添加黏结剂的铁精矿提升了3.7%。

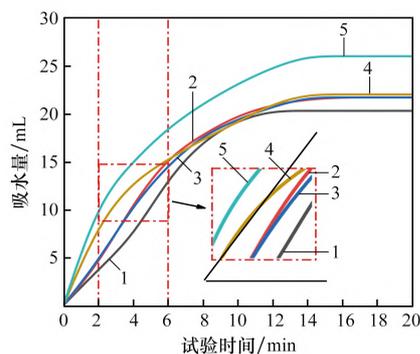


1—原料高度/cm; 2—完成时间/min;
3—最大吸水量/mL; 4—最大毛细水/%。

图3 黏结剂对铁精矿亲水性能影响

Fig. 3 Influence of binding agents on wettability of iron ore fines

铁精矿与添加不同种类黏结剂的混合矿单位时间内吸水量的变化如图4所示。由图4可知,吸水量增长速率逐渐减缓,最终在12~14 min达到平衡。Bent-F的吸水量增长速率较2 min有所降低,这是由于Bent-F中的有机黏结剂含量较低,2 min后对吸水速率的增长不占主导,后续增长曲线与原土相似,说明2 min后吸水量的增长以无机黏结剂为主;而Bent-R的吸水量增长速率仍保持在0~12 min缓慢降低,无较大拐点,说明吸水量的增长速率以有机黏结剂和膨润土两者整体为主,半干法辊磨处理改变了膨润土基复合黏结剂的理化性质。



1—铁精矿; 2—铁精矿+原土; 3—铁精矿+原土辊磨;
4—铁精矿+Bent-F; 5—铁精矿+Bent-R。

图4 吸水量随试验时间的变化

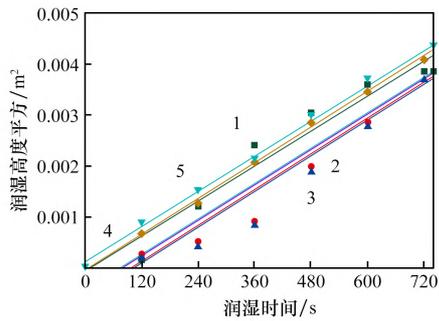
Fig. 4 Variation of water absorption with test time

2.3 接触角分析

接触角的测量也是评估混合矿表面亲水性或疏水性的一个重要手段。当接触角接近 0° 时,表明液体能够完全展开并湿润固体表面,如果接触角接近 180° ,则表示液体几乎无法在固体表面扩散,显示出固体表面的显著疏水性。

黏结剂与铁精矿充分混合后的混合矿接触角如图5所示,由图5可知,铁精矿的斜率值(k)为 5.710×10^{-6} ,其余种类斜率值记为 k_0 ,将其带入公式(2)可得原土、原土辊磨、Bent-F和Bent-R混合矿的接触角(θ)分别为 12.12° 、 12.53° 、 11.59° 和 4.93° 。因此,混合矿亲水性能大小: Bent-R >> Bent-F > 原土 > 原土辊磨。

为进一步验证接触角的准确性,将样本以及混合矿的 k_0 进行线性拟合数据汇总和方差分析,结果如表6所示。



1—铁精矿；2—铁精矿 + 原土；3—铁精矿 + 原土辊磨；
4—铁精矿 + Bent-F；5—铁精矿 + Bent-R。

图 5 润湿高度平方和时间的关系及线性拟合分析

Fig. 5 Relationship between the square of the wetting height and time, along with linear fitting analysis

表 5 混合矿接触角

Table 5 Binder-iron ore concentrate contact angle

原土	原土(辊磨)	Bent-F	Bent-R
12.12	12.53	11.59	4.93

表 6 中： R^2 亦称为决定系数，是线性模型解释因变量变异的百分比，介于 0 和 100% 之间，0 表示模型无法解释响应变量在其均值附近的任何变异，100% 表示模型可以解释响应变量在其均值附近的所有变异； F 值是进行假设检验时常用的统计指标，用于判断检验结果的显著性。一般情况下： $0.01 < F < 0.05$ ，表示相关性显著； $F < 0.01$ ，表示相关性极为显著。由表 6 可知：表中所示 R^2 均高于 90%。最高为 Bent-F， R^2 达到了 99.77%；最低为原土辊磨， R^2 达到了 91.45%；模型显著关系为铁精矿 + Bent-F > 铁精矿 + Bent-R > 铁精矿 > 铁精矿 + 原土 > 铁精矿 + 原土辊磨，且模型 F 均低于 0.01，相关性极为显著，构成线性关系。

2.4 有机插层强化膨润土性能机理

通过球团试验和亲水性能分析可得：有机插层土性能显著优于原土、原土辊磨和有机复合土。

表 6 试样线性拟合数据汇总和方差分析

Table 6 Summary and variance analysis of linear fit data

试样	斜率	R^2	平方和	均方	F
铁精矿	5.710×10^{-6}	0.954 4	1.73×10^{-5}	1.73×10^{-5}	$1\ 900.00 \times 10^{-8}$
铁精矿 + 原土	5.840×10^{-6}	0.922 3	1.81×10^{-5}	1.81×10^{-5}	$9\ 480.00 \times 10^{-8}$
铁精矿 + 原土辊磨	5.849×10^{-6}	0.914 5	1.81×10^{-5}	1.81×10^{-5}	$12\ 670.00 \times 10^{-8}$
铁精矿 + Bent-F	5.829×10^{-6}	0.997 7	1.80×10^{-5}	1.80×10^{-5}	0.24×10^{-8}
铁精矿 + Bent-R	5.731×10^{-6}	0.992 8	1.74×10^{-5}	1.74×10^{-5}	7.40×10^{-8}

为了探究黏结剂性能变化的原因，本文采用 XRD 分析、红外光谱分析等多种表征手段对有机插层前后晶体结构进行分析。

2.4.1 蒙脱石层间距结构分析

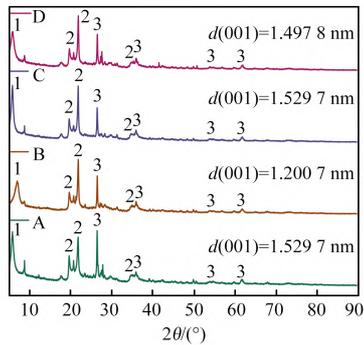
对原土、原土辊磨、Bent-F 和 Bent-R 进行 XRD 检测，结果如图 6 所示。由图 6 可知，原土辊磨后，其蒙脱石 $d(001) = 1.529\ 7\ \text{nm}$ 降低到 $d(001) = 1.200\ 7\ \text{nm}$ ，加入有机黏结剂复合之后层间距未发生改变，将 Bent-F 进行机械处理，Bent-F 蒙脱石 $d(001) = 1.529\ 7\ \text{nm}$ 降低到 Bent-R 的 $d(001) = 1.497\ 8\ \text{nm}$ 。说明机械处理后，膨润土原土(辊磨)和 Bent-R 的蒙脱石层间距结构被破坏，Bent-R 层间距较原土辊磨高出许多，是由于 Y 嵌入蒙脱石层中，提高了蒙脱石层间距。

2.4.2 膨润土电位差分析

4 种 Zeta 电位分析结果如图 7 所示。由图 7 可知，原始膨润土的 Zeta 电位为 $-18.00\ \text{mV}$ ，原土辊磨后 Zeta 电位提高至 $-6.76\ \text{mV}$ ，辊磨后改变了膨润土的结构，进而改变了其表面电荷分布，与 XRD 结果相符合；Bent-R 的 Zeta 电位和 Bent-F、原始膨润土相比较有一定的提高，达到了 $-5.49\ \text{mV}$ ，说明相比较有机黏结剂与膨润土的单一混合，辊压处理后的有机改性土进一步提升了表面电荷密度分布。表明膨润土体系已从良好的分散稳定性体系转变为一般稳定性体系，有机复合膨润土的重结能力得到了增强^[13]。这有利于有机复合膨润土与铁精矿之间的界面相互作用，在造球过程中增加了黏结剂的黏结性能，改善了生球的性能指标。

2.4.3 亲水性官能团分析

4 种黏结剂红外光谱(FTIR)分析如图 8 所示。由图 8 可知，通过机械外力，有机复合膨润土中



A—原土; B—原土辊磨; C—Bent-F; D—Bent-R;
1—蒙脱石; 2—石英; 3—长石。

图 6 原土、原土辊磨、Bent-F 和 Bent-R 的 XRD 分析
Fig. 6 XRD analysis of raw soil, raw soil roller mill,
Bent-F and Bent-R

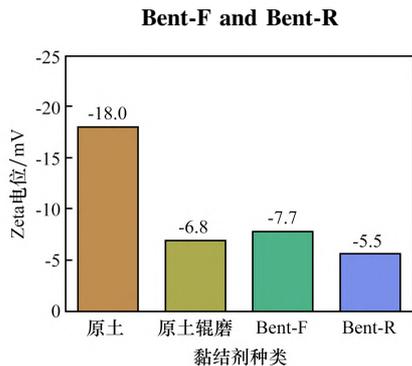


图 7 4 种黏结剂 Zeta 电位分析

Fig. 7 Zeta potentiometric analysis of 4 binders

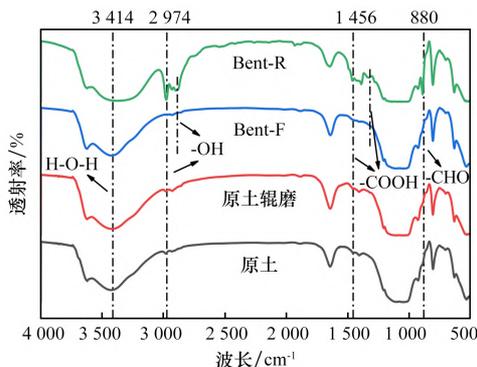


图 8 4 种黏结剂的 FTIR 分析

Fig. 8 FTIR analysis of four binders

的 H—O—H、—COO—和—CHO 特征峰在有机物中得到了强化, 并产生了新的波峰。这表明机械处理后, 有机复合膨润土中更多的蒙脱石晶体键被打断, 更多的硅四面体和氧化铝八面体暴露在膨润土颗粒表面, 从而提高了其保水能力。此外, 通过机械处理过程中的挤压效应, 更多的有机分子被迫插层在蒙脱石晶体中, 并加强了膨润土和有机物之间的插层复合反应。

3 结论

(1) 有机插层土对球团性能提升最为显著, 在 1.2% 用量的情况下, 生球落下强度达到 7.8 次/(0.5 m), 生球水分达到 9.1%, 抗压强度为 29.5 N/P, 爆裂温度为 575 °C, 所生产的球团质量满足工艺实际需求。

(2) 添加黏结剂后, 混合矿的亲水性能有一定程度的提升, 其中有机插层土最大吸水量为 26 mL, 提升幅度最高, 在试验时间为 14 min, 吸水量达到最高值, 由高到低: 有机插层土 > 有机复合土 > 原土 > 原土辊磨 > 铁精矿; 混合矿亲水性能大小: Bent-R >> Bent-F > 原土 > 原土辊磨。

(3) 膨润土原土经辊磨处理后, 有机分子链插入蒙脱石晶体中, 内部 H—O—H、—COO—和—CHO 的特征峰得到了强化, 亲水能力增强, 有机插层土的 Zeta 电位较原土得到提高, 膨润土体系已从良好的分散稳定性体系转变为一般稳定性体系, 有利于有机复合膨润土与铁精矿之间的界面相互作用, 可在造球过程中增加黏结剂的黏结性能, 改善球团矿的性能指标。

参考文献:

- [1] 王新东. 适应高比例球团冶炼的高炉系统设计与生产实践[J]. 钢铁, 2022, 57(12): 23-31.
WANG Xindong. Design and production practice of blast furnace system adapted to high ratio pellet smelting[J]. Iron & steel, 2022, 57(12): 23-31.
- [2] 王新东, 金永龙. “双碳”背景下高炉使用高比例球团的展望[J]. 过程工程学报, 2022, 22(10): 1379-1389.
WANG Xindong, JIN Yonglong. Prospect on high ratio pellet utilized in blast furnace under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(10): 1379-1389.
- [3] 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.
- [4] 刘嘉琦, 夏羽, 康有成, 等. 改性膨润土降低高比例硫酸渣球团黏结剂消耗[J]. 中国冶金, 2024, 34(11):

- 107 - 116.
- LIU Jiaqi, XIA Yu, KANG Youcheng, et al. Modified bentonite demonstrates reduced binder consumption in high-content sulfuric acid slag pellets[J]. China Metallurgy, 2024, 34(11): 107 - 116.
- [5] 陆启财, 陈铁军, 罗艳红, 等. 低品位膨润土改性及其在球团中的应用研究[J]. 烧结球团, 2021, 46(3): 39 - 46.
- LU Qicai, CHEN Tiejun, LUO Yanhong, et al. Research on modification of low-grade bentonite and its application in pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(3): 39 - 46.
- [6] 马磊, 李兴旺, 张玖畅, 等. 膨润土同步提纯钠化研究及在球团中应用[J]. 鞍钢技术, 2024(2): 19 - 25.
- MA Lei, LI Xingwang, ZHANG Jiuchang, et al. Study on simultaneous purification and sodium modification of bentonite and its application in pelletizing[J]. Angang Technology, 2024(2): 19 - 25.
- [7] 韦振宇, 甘牧原, 墙蕾, 等. 有机复合膨润土对铁矿球团生产影响的研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(5): 33 - 39.
- WEI Zhenning, GAN Muyuan, QIANG Qiang, et al. Research on effect of organic composite bentonite on iron ore pellet production[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(5): 33 - 39.
- [8] 侯恩俭, 翁兴洋, 范晓慧. 纤维化复合膨润土强化氧化球团制备研究[J]. 烧结球团, 2019, 44(4): 40 - 44.
- HOU Enjian, WENG Xingyang, FAN Xiaohui. Study on strengthening preparation of oxide pellets with fibration composite bentonite[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4): 40 - 44.
- [9] 雷杰, 汪名赫, 周江虹, 等. 新型复合黏结剂提高生球质量的作用机理及构效关系[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 91 - 97.
- LEI Jie, WANG Minghe, ZHOU Jianghong, et al. Mechanism and structure-activity relationship of a new composite binder to improve the quality of green pellets[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(1): 91 - 97.
- [10] 岳志玲, 杨大兵, 胡明欣, 等. 复合黏结剂对铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团, 2024, 49(2): 31 - 37.
- YUE Zhiling, YANG Dabing, HU Mingxin, et al. Effect of composite binder on quality of iron concentrate pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(2): 31 - 37.
- [11] 张元波, 欧阳学臻, 路漫漫, 等. 腐植酸改性膨润土在铁矿球团中的应用效果[J]. 烧结球团, 2018, 43(4): 27 - 32.
- ZHANG Yuanbo, OUYANG Xuezhen, LU Manman, et al. Application effect of humic acid modified bentonite binder in iron ore pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 27 - 32.
- [12] 李彩霞, 白阳, 赵靖雨, 等. 复合球团黏结剂提高生球性能的模拟试验研究[J]. 非金属矿, 2018, 41(6): 59 - 62.
- LI Caixia, BAI Yang, ZHAO Jingyu, et al. Simulated experiment study on improving the properties of green pellets with compound binder[J]. Non-Metallic Mines, 2018, 41(6): 59 - 62.
- [13] LI S W, PAN J, ZHU D Q, et al. Synthesis, characterization and properties of organically compounded bentonite by molecular intercalation process[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(10): 1127 - 1136.
- [14] 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.
- [15] 周隆林, 莫伟, 洗迪, 等. 钠化膨润土物化性能与生球性能的相关性研究[J]. 烧结球团, 2023, 48(3): 83 - 90.
- ZHOU Longlin, MO Wei, XIAN Di, et al. Correlation study between physical and chemical performance and green pellet performance of sodium bentonite[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(3): 83 - 90.
- [16] 韩风光, 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. Effect and mechanism of composite binder on high-temperature consolidation of pellets[J]. Journal of Engineering Science, 2023, 45(9): 1450 - 1458.
- [17] 汪名赫. 新型复合黏结剂强化球团性能及作用机理[D]. 安徽工业大学, 2021.
- WANG Minghe. Novel composite binder enhances the performance of pellets and its mechanism of action on the enhancement of pellet performance[D]. Anhui University of Technology, 2021.