

基于某铁矿细粒级尾砂絮凝沉降的试验研究

耿碧瑶^{1,2}, 李浩宇^{1,2}, 李胜鹏^{1,2}, 张 欢^{1,2}, 温震江^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 国家矿山安全监察局金属矿膏体充填安全绿色开采重点实验室, 北京 100038)

摘要: 絮凝沉降是矿山充填过程中尾砂浓密脱水的关键环节。辽宁某铁矿矿物成分复杂多样且细粒级尾砂占比较大, 该矿山的絮凝沉降面临沉降速率慢、溢流浊度高难题。为研究该铁矿絮凝沉降性能及机理, 以全尾砂为主要试验材料, 开展了自然沉降和絮凝沉降对比试验。试验以上层液澄清度和沉降速率为主要考察指标, 结合单因素法开展絮凝剂选型试验, 最终选取沉降效果最优的655S絮凝剂开展后续絮凝沉降试验研究。分别分析了絮凝剂单耗和充填料浆浓度这两种因素对絮凝沉降性能的影响。研究表明: 该铁矿尾砂絮凝沉降入料浓度不超过20%时, 絮凝剂最佳添加量控制在 15 ± 5 g/t, 底流浓度可达到62.61%。本研究结果可为提高类似矿山细粒级尾砂充填质量和效率提供理论依据, 具有重要的应用价值和工程指导意义。

关键词: 全尾砂; 絮凝沉降; 澄清度; 絮凝剂

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.013

中图分类号: TD853 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)02-0124-07

随着矿产资源的不断开发, 矿山领域的可持续发展与环境保护已成为绿色发展的重要议题^[1-3]。在此背景下, 充填采矿技术因具备有效控制地表沉降、减少废石排放、提高资源回收率等优点, 受到广泛关注, 并在实践中得到普遍应用^[4]。尾砂絮凝沉降作为充填技术中的关键环节, 沉降性能直接影响充填体的稳定性和充填效果^[5]。在充填过程中, 通过添加絮凝剂促使尾砂中的细颗粒聚集成较大的絮凝体, 从而加快沉降速度, 这一过程对于优化料浆配比、降低充填成本、提高充填效率具有重要意义^[6-8]。目前, 国内外学者对尾砂絮凝沉降开展了大量研究。黎梦圆^[9]等基于超细磷尾砂的理化性质, 研究了尾砂的最佳絮凝沉降条件。刘光永等^[10]以铅锌矿全尾砂为试验材料, 研究絮凝剂类型和单耗对絮凝沉降效果的影响规律, 并采用灰色理论模型对絮凝沉降试验结果进行预测, 预测精度较高。张高飞等^[11]为提高细粒级尾砂综合利用效率, 以八台矿细粒级尾砂为研究对象开展絮凝沉降试验, 确定了最优絮凝沉降参数。卞继伟等^[12]运用浓密机动态试验装置模拟絮凝沉降环境, 研究发现尾砂絮凝沉降性能与絮凝剂单耗、料浆浓度、供料速度呈正相关, 与底流

浓度存在相关性。陈秋松等^[13]为降低絮凝沉降成本、提高絮凝沉降效果, 将磁化水引入絮凝沉降试验中, 探究其促凝作用, 发现磁化水在减少絮凝剂单耗、提高絮凝沉降性能等方面具有显著优势。

尾砂的絮凝沉降性能受多种因素影响, 现有研究多采用多因素絮凝剂沉降试验探究最佳絮凝沉降参数^[14-18]。因此, 本研究以某铁矿细粒级尾砂为原料, 以上层液澄清度和沉降速度为主要指标, 结合单因素法探究絮凝剂类型、絮凝剂单耗、料浆浓度对絮凝沉降性能的影响规律, 以期为矿山尾砂充填实践提供科学的数据参考。

1 试验

1.1 全尾砂

试验所用尾砂取自某铁矿。全尾砂烘干后, 参照《土工试验方法》标准(GB/T 50123—2019), 测定其相对密度、松散密度、孔隙率和自然安息角等物理参数^[19-21], 结果见表1。测得的尾砂固体密度为 2.810 g/cm^3 , 松散密度为 1.888 g/cm^3 , 孔隙率为59.53%, 自然安息角为 36.8° 。利用X射线荧光光谱(XRF)测定尾砂样品主要化学成分, 包括Si, Fe, Ca, Mg等元素,

收稿日期: 2025-02-27; 修订日期: 2026-01-14

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC2907203); 山东省重点研发计划(2022CXPT032)资助

作者简介: 耿碧瑶(1987—), 男, 山东新泰人, 博士, 工程师, 研究方向: 矿山充填及大宗固废资源化, E-mail: gengby@enfi.com.cn; 通信作者: 李浩宇, 正高级工程师, E-mail: lihy@enfi.com.cn

表1 尾砂基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of tailings

类型	固体密度/ (t/m ³)	松散密度/ (t/m ³)	孔隙率/ %	自然安息角/ (°)
全尾砂	2.810	1.888	32.81	34.5

测试结果见表2。全尾砂中SiO₂质量分数最大，为73.07%。其次为Fe，MgO，CaO，Al₂O₃，质量分数分别为11.03%，3.66%，2.68%，0.51%。S质量分数为0.054%，含量较低，对充填体强度影响较小。在井下充填时，应注意及时排干充填采场泌水，防止有害元素(如As等)富集。经检测，该矿全尾砂不含黏

表2 尾砂主要化学成分

Table 2 Chemical composition of tailings

化学成分	Al ₂ O ₃	CaO	Fe	K ₂ O	MgO	Mn	Na ₂ O	P ₂ O ₅	S	SiO ₂
质量分数/%	0.51	2.68	11.03	0.062	3.66	0.088	0.053	0.17	0.054	73.07

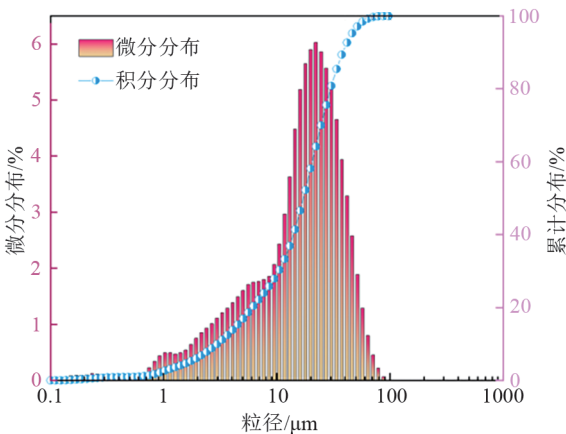


图1 尾砂粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of tailings

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} \tag{2}$$

将全尾砂粒径相关参数代入式(1)和式(2)，得到该全尾砂的不均匀系数 $C_u=7.47>5$ ，表明该尾砂级配较好，可用作充填原材料。曲率系数 $C_c=1.7>1$ ，说明尾砂连续性稳定。综合分析可知，全尾砂粒径呈单峰分布，粒径为10~74 μm尾砂颗粒占尾砂总量的69.60%，粒径超过74 μm的尾砂颗粒仅占0.07%，因此，该全尾砂属于细尾砂。

1.2 絮凝剂

根据全尾砂的性质，基于“絮凝效果好和成本低”的原则，初步筛选出8种聚丙烯酰胺絮凝剂

土矿物。

采用丹东百特BT-9300ST型激光粒度分析仪对尾砂样品进行测试。图1为全尾砂的粒径分布曲线图。由图可知，有效粒径 $d_{10}=5.56\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_{30}=16.40\text{ }\mu\text{m}$ ，中值粒径 $d_{50}=43.20\text{ }\mu\text{m}$ 、限制粒径 $d_{60}=60.76\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_{90}=243.00\text{ }\mu\text{m}$ ，总体平均粒径 $d_{av}=89.50\text{ }\mu\text{m}$ 。其中，粒径分布范围为1~100 μm，主要集中在10~100 μm。颗粒不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别表征尾砂粒级均匀程度和连续性，计算公式见式(1)和式(2)。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{1}$$

(655S, 645S, 665S, 695S, 625S, 615S, 6013S和6003)，如图2所示。絮凝剂均为白色粉末，无味。在100 mL烧杯中加入100 mL水，称取0.1 g絮凝剂加入水中。然后利用磁力搅拌器搅拌2 h制备成1 g/L的絮凝剂溶液。



图2 8种型号絮凝剂

Fig. 2 Eight types of flocculants

1.3 沉降试验

深锥浓密机中浓密速率受尾砂沉降速度的影响，并直接制约充填料浆的制备和采场充填效率。尾砂进入浓密设备后，大密度颗粒因重力作用不断下沉，但浆体中仍存在大量难以沉降的悬浮物，影响料浆的底流浓度和浓密效率。工程应用中可利用絮凝剂的絮凝吸附作用，使微细颗粒相互结合聚集成大絮团，加速沉降。

2 结果与讨论

2.1 自然沉降试验

为探究该全尾砂的沉降性能，在不添加絮凝剂条件下开展了自然沉降试验。配制质量分数为15%的1000 mL尾砂浆体并倒入量筒中，使用孔式搅拌器搅拌均匀后，每间隔一段时间记录液面下降高度。图3为自然沉降试验结果。

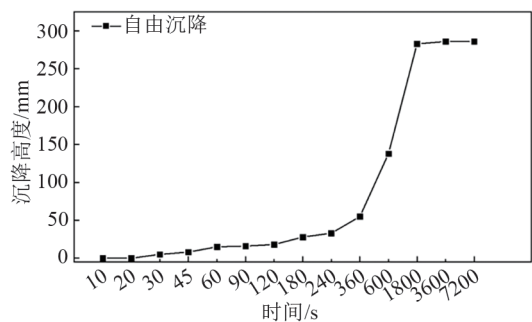


图3 自由沉降试验沉降曲线
Fig. 3 Sedimentation curves of free settling test

从图3中可知，该尾砂在不添加絮凝剂的条件下，沉降速度较为缓慢。前3600 s尾砂颗粒近似匀速沉降，沉降高度为276 mm。此后沉降速度逐渐减缓，12 h时沉降基本结束，沉降高度为278 mm。沉降过程中由于微细颗粒难以沉降造成上层清液浑浊，24 h底流浓度为54.87%。因此，实际生产中需要添加絮凝剂提高沉降效率。

2.2 尾砂絮凝沉降特性研究

2.2.1 絮凝剂型号对沉降效果的影响

目前市场上絮凝剂种类较多，工程经验表明，不同型号的絮凝剂对同一尾砂的沉降效果差异显著。为探究絮凝剂对该尾砂沉降效果的影响，本研究选用阴离子絮凝剂开展絮凝沉降试验。试验所用絮凝剂共8种，采用单因素控制变量法进行絮凝剂选型试验。表3为试验方案。

665S、695S、625S和6003 4种絮凝剂由于沉降效果不佳，本试验不纳入后续研究。试验用全尾砂较细，自然沉降时速度缓慢，未能观察到明显的澄清层液面。添加絮凝剂后沉降效果显著，尾砂迅速沉降且上清液澄清。絮凝剂选型结果如图4所示。尾砂沉降分为快速沉降和压缩沉降两个阶段。料浆开始沉降即进入快速沉降阶段，沉降速度较快，持

表3 絮凝剂选型试验方案

Table 3 Flocculant selection test scheme

絮凝剂种类	絮凝剂用量	尾砂料浆浓度
655S、645S、 665S、695S、 625S、615S、 6013S、6003	20 g/t	15%



图4 絮凝剂选型试验结果图
Fig. 4 Results of flocculant selection test

续时间为0~180 s。随着沉降继续，尾砂颗粒之间相互干扰，沉降速度逐渐减缓。300 s后沉降曲线趋于平缓，尾砂被压缩密实。絮凝沉降高度曲线和沉降速率曲线分别如图5、图6所示。从图中可知，655S、645S、615S三组试样的沉降速度相对6013S组较快，其中655S组的澄清层澄清度最好，因此后续最佳沉降条件及压缩沉降试验采用655S型号絮凝剂。

2.2.2 絮凝剂单耗对沉降效果的影响

为探究絮凝剂单耗对沉降试验的影响，采用655S作为絮凝剂，单耗分别设置为10、15、20和

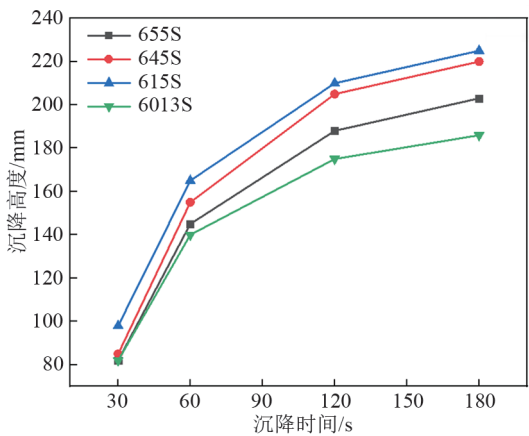


图5 絮凝剂选型试验沉降曲线
Fig. 5 Sedimentation curves of flocculant selection test

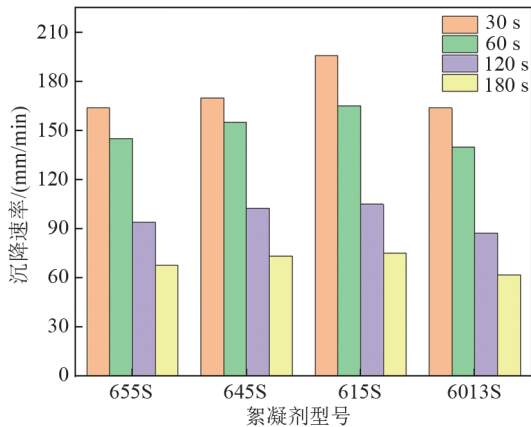


图6 不同型号絮凝剂沉降速率对比图

Fig. 6 Comparison of sedimentation rates of different types of flocculants

25 g/t, 添加到质量分数为 10%, 15%, 20% 和 25% 的料浆中, 分别开展絮凝沉降试验。絮凝沉降高度随沉降时间变化曲线如图 7 所示。

当料浆质量分数为 10% 时, 随着絮凝剂单耗

从 10 g/t 增加到 15 g/t, 上层清液澄清度更高。继续提高絮凝剂的单耗, 沉降性能改善效果不明显, 上层清液的澄清度趋于稳定。随着料浆浓度增加到 15%, 絮凝剂单耗为 20 g/t 时上层澄清液的清晰度达到最优。在前 90 s 内, 随着絮凝剂单耗的增加, 沉降速度呈现先增大后减小的变化趋势。单耗为 20 g/t 时沉降速度达到最大, 沉降高度为 176 mm。料浆质量分数较高时(20%), 絮凝剂的絮凝沉降效果明显减弱。这是由于随着絮凝剂单耗的增加: 一方面, 矿浆中絮凝剂分子密度增大, 颗粒与絮凝剂的有效碰撞概率提高; 另一方面, 在絮团重组过程中絮凝剂分子未吸附的位点暴露出来, 与矿物颗粒生成更致密的絮团, 但高黏度影响絮团下沉, 削弱沉降效果。综合澄清度、沉降速率和经济效益等多因素考虑, 确定 655S 的最佳单耗量为 20 g/t。

2.2.3 料浆浓度对沉降效果的影响

在优选出絮凝剂型号和单耗的基础上, 采用单

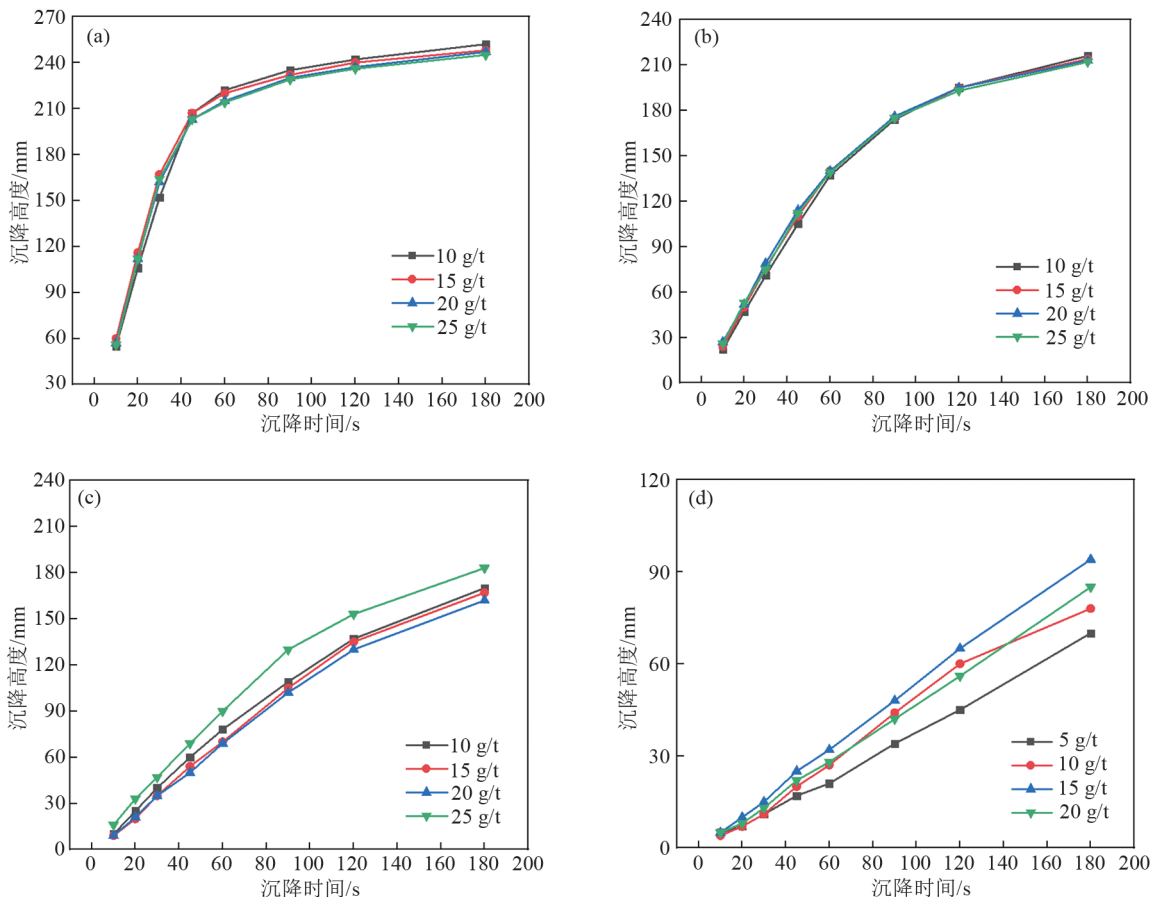


图7 不同单耗条件下絮凝沉降曲线图: (a) 料浆浓度 10%; (b) 料浆浓度 15%; (c) 料浆浓度 20%; (d) 料浆浓度 25%

Fig. 7 Sedimentation curves of flocculation under different dosage conditions: (a) Slurry concentration of 10%; (b) Slurry concentration of 15%; (c) Slurry concentration of 20%; (d) Slurry concentration of 25%

因素控制变量法探究不同料浆质量分数对絮凝沉降性能的影响。絮凝剂655S添加量为20 g/t时，分别探究料浆质量分数为10%、15%、20%、25%、30%条件下的絮凝沉降效果。不同料浆浓度下絮凝沉降曲线如图8所示。

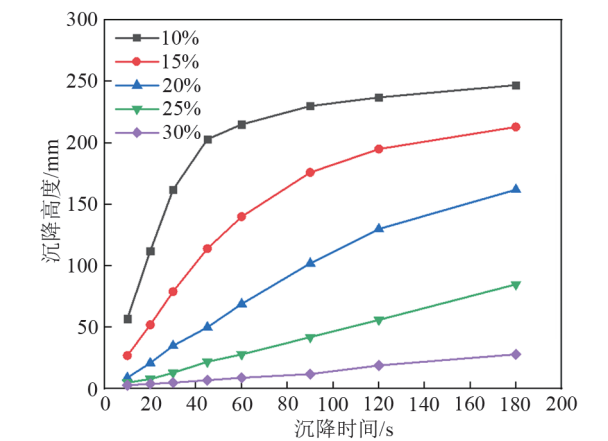


图8 料浆不同质量分数下絮凝沉降曲线图

Fig. 8 Sedimentation curves of flocculation at different slurry concentrations

随着料浆质量分数升高，澄清层呈现逐渐清澈的趋势；当料浆质量分数达到20%时，澄清层透明度达到最好；随着料浆质量分数的继续增加，澄清层逐渐变浑浊。尾砂絮凝沉降主要发生在试验开始的前2 min，随着料浆质量分数的升高，沉降速率呈现下降趋势：当质量分数为10%时沉降高度最大，为237 mm；质量分数为30%沉降高度最小，为65 mm。这是由于料浆浓度的增加，导致尾砂颗粒无法快速与絮凝剂吸附成团沉降。结合沉降速率、澄清度以及现场情况，根据最佳沉降条件试验结果可知：当尾砂浆质量分数为10%时，絮凝剂建议用量为15 g/t或以上；当尾砂浆质量分数为15%时，絮凝剂建议用量为20 g/t或以上；当尾砂浆质量分数为20%时，絮凝剂建议用量为25 g/t或以上。当尾砂质量分数进一步提高时，沉降速度大幅降低，严重影响浓密效率。因此建议尾砂质量分数不超过20%。

2.2.4 底流浓度对比分析

按照最佳沉降条件下浓度配置3组尾砂料浆，其中絮凝剂的添加量为20 g/t，一组添加絮凝剂，另一组则不添加絮凝剂，分别记录其澄清层高度及压实层高度，直至高度无明显变化。图9对比分析了

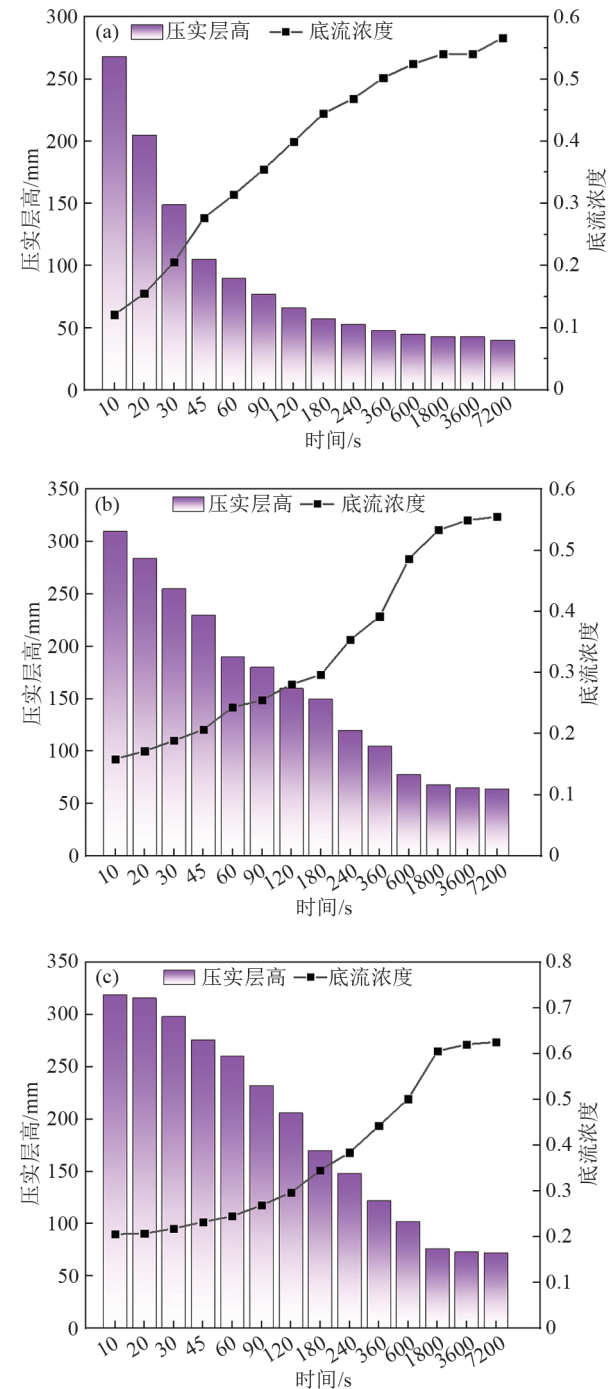


图9 料浆不同质量分数下压缩沉降曲线图：(a)10%；(b)15%；(c)20%

Fig. 9 Compression sedimentation curves at different slurry concentrations: (a) 10%; (b) 15%; (c) 20%

在絮凝剂单耗相同条件下(25 g/t)不同料浆质量分数(10%、15%、20%)对底流浓度的影响。

在絮凝剂单耗相同情况下，料浆的底流浓度随着料浆质量分数的增加呈现增长趋势。当料浆质量分数从10%增加到20%时，底流浓度从56.64%

提高至62.61%，增长率为10.54%。在絮凝剂的作用下，该尾砂的沉降过程主要分为絮凝沉降阶段和压密阶段。在絮凝沉降阶段，尾砂絮凝沉降速度较快，固液分界面快速下降，该过程一般持续时间为5~10 min。对图9分析可得，随着料浆质量分数的增加，固液分界面下降速度逐渐变缓，絮凝沉降阶段持续时间变长。这是因为在絮凝剂单耗一定的条件下，随着尾砂料浆质量分数的增加，絮凝剂与尾砂的质量比减小，从而削弱絮凝剂的沉降效果。

3 结 论

以某铁矿全尾砂为原料，开展理化性质、自然沉降和絮凝沉降试验，确定了该铁矿全尾砂最优絮凝剂型号，探究了全尾砂的最佳絮凝沉降条件，研究了不同料浆质量分数对絮凝沉降速率的影响。主要研究结论如下：

1) 尾砂理化性质测试结果表明，全尾砂固体密度和松散密度分别为 2.810 g/cm^3 和 1.888 g/cm^3 。尾砂中 SiO_2 和Fe质量分数最高，分别为73.07%和11.03%。该尾砂属于细粒级尾砂，粒径小于 $74\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒占比99.93%。

2) 絮凝剂选型试验结果表明，综合考虑絮凝沉降速度和澄清层透明度两方面，最佳絮凝剂为655S。降低尾砂料浆质量分数有助于提高尾砂絮凝沉降速率。质量分数为10%时的沉降高度最大，为237 mm，质量分数为30%时沉降高度最小，为65 mm。随着料浆质量分数的增加，絮凝沉降阶段时间变长。

3) 当料浆质量分数为20%时，澄清度最好，底流浓度达到62.61%。全尾砂絮凝沉降试验结果表明，在技术经济合理的前提下，实际工程应用时尾砂料浆质量分数不宜超过20%，絮凝剂单耗控制在 $15\pm 5\text{ g/t}$ 范围之内，可获得最佳沉降效果。

参考文献：

- [1] TAN Y H, ZOU Z M, QU J, et al. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124637.
- [2] LI R F, ZHOU Y, LI C W, et al. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 43.
- [3] 陈鑫政, 郭利杰. 金属矿山充填技术工程实践与发展趋势[J]. 铜业工程, 2024(4): 130-141.
- [4] LI C H, SHI Y Q, LIU P, et al. Analysis of the sedimentation characteristics of ultrafine tailings based on an orthogonal experiment[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(1): 1-13.
- [5] 林金山, 熊泽华. 银山矿全尾砂料浆絮凝沉降特性试验研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(1): 199-202.
- [6] 江科. 某金矿全尾砂絮凝沉降影响因素研究[J]. 采矿技术, 2023, 23(2): 164-168.
- [7] 史誉州, 郑晓燕, 房世龙. 基于正交试验设计的全尾砂浆絮凝沉降参数选择及优化[J]. 有色金属工程, 2023, 13(2): 116-126.
- [8] 刘克爽, 康长科, 崔宝玉, 等. 黑龙江某铜钼混合精矿絮凝沉降性能及机理研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 245-253.
- [9] 黎梦圆, 李航空, 郭利杰, 等. 基于超细磷尾砂的絮凝沉降特性及其胶结膏体充填材料性能研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(5): 28-39.
- [10] 刘光永, 江科, 朱豪, 等. 基于灰色理论的尾砂絮凝沉降底流浓度预测研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(3): 243-247.
- [11] 张高飞, 刘守彪, 高峰. 八台矿细粒级尾砂絮凝沉降试验与应用研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(3): 228-232.
- [12] 卞继伟, 王新民, 肖崇春. 全尾砂动态絮凝沉降试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3278-3283.
- [13] 陈秋松, 张钦礼, 王新民, 等. 磁化水改善全尾砂絮凝沉降效果的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4256-4261.
- [14] 诸利一, 杨鹏, 吕文生. 全尾砂絮凝沉降与浓密影响因素试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(8): 59-64.
- [15] 隋璨, 王晓军, 王新民, 等. 全尾砂絮凝沉降中APAM单耗对不同粒级颗粒絮凝作用规律及机理研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(5): 67-74.
- [16] 焦国芮, 邹开华, 黄毅伟, 等. 超细全尾砂最优絮凝剂配比优化试验研究[J]. 铜业工程, 2023(6): 153-159.
- [17] 郑伯坤. 基于响应面分析法的全尾砂絮凝沉降试验及参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(7): 30-34.
- [18] 刘奇, 岑佑华, 唐鸣东, 等. 不同尾砂物理性质对尾砂浓密性能的影响[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5):

124-130.

[19] 田长林.武山铜矿全尾砂沉降浓缩试验研究[J].铜业工程, 2023(1): 127-131.

[20] 李巧双,程国柱,周明华,等.某铜铁矿尾矿絮凝剂沉降试验研究及应用[J].铜业工程, 2022(2): 39-41.

[21] 丁家铎,李红鹏,宋子安,等.银山矿超细全尾砂精细化絮凝沉降实验研究[J].矿产保护与利用, 2024, 44(6): 71-79.

Experimental Study on Flocculating Sedimentation of Fine-grained Tailings from a Certain Iron Mine

GENG Biyao^{1,2}, LI Haoyu^{1,2}, LI Shengpeng^{1,2}, ZHANG Huan^{1,2}, WEN Zhenjiang^{1,2}
(1. China ENFI Engineering Co., Ltd., Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of Metal Ore Paste Filling Safety and Green Mining, National Mine Safety Administration, Beijing 100038, China)

Abstract: Flocculating sedimentation is a critical step in the thickening and dewatering of tailings during the backfilling process in mines. A certain iron mine in Liaoning has a complex and diverse mineral composition, with a significant proportion of fine-grained tailings, which poses challenges such as slow sedimentation rates and high overflow turbidity for the flocculating sedimentation process. To study the flocculating performance and sedimentation mechanism of tailings from the iron mine, experiments were conducted using whole tailings as the main test material. Results of natural sedimentation and flocculating sedimentation tests were compared. Single-factor method was combined to carry out flocculant selection tests were conducted, with clarity of the supernatant and sedimentation rate being the main evaluation indicators. Ultimately, 655S flocculant with the best sedimentation effect was selected for subsequent flocculating sedimentation experiments. By adjusting flocculant unit consumption and filling slurry concentration, the effects of these two factors on the performance of slurry flocculation and sedimentation were analyzed separately. When feed concentration was below 20%, the optimal flocculant addition was controlled in the range of 15 ± 5 g/t, with the underflow concentration reaching 62.61%. Findings of this study provided a theoretical basis for improving the quality and efficiency of fine tailings backfilling in similar mines, and had significant practical value and engineering guidance significance.

Key words: unclassified tailing; flocculating sedimentation; clarity; flocculant
doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.013

引文格式: 耿碧瑶,李浩宇,李胜鹏,张欢,温震江. 基于某铁矿细粒级尾砂絮凝沉降的试验研究[J]. 铜业工程, 2026(2): 124-130.

GENG Biyao, LI Haoyu, LI Shengpeng, ZHANG Huan, WEN Zhenjiang. Experimental study on flocculating sedimentation of fine-grained tailings from a certain iron mine[J]. Copper Engineering, 2026(2): 124-130.