

# 高密度全尾砂深锥絮凝浓密最优参数试验研究

聂军<sup>1</sup>, 柳敏<sup>1</sup>, 陈晓良<sup>1</sup>, 丛日明<sup>1</sup>, 肖柏林<sup>2\*</sup>, 刘春康<sup>2</sup>

(1. 中国有色金属建设股份有限公司; 2. 北京科技大学资源与安全工程学院)

**摘要:** 研究针对高密度全尾砂在深锥浓密机(DCT)中的絮凝过程开展试验研究,旨在确定最佳絮凝参数,以提高高密度全尾砂的浓密效率和稳定性。通过实验室絮凝试验,探索了不同絮凝剂单耗、全尾砂料浆浓度、沉降时间等因素对尾砂絮凝浓密的影响。基于实验室试验得出的高密度全尾砂最优絮凝浓密参数,开展了DCT调试运行,且絮凝沉降结果良好,验证了实验室试验结果的正确性。研究表明,确定最优的絮凝参数能够保证高密度全尾砂深锥絮凝浓密效果,为高密度全尾砂的环保处理和资源化利用提供了有效的技术和理论支持。

**关键词:** 高密度; 全尾砂; 深锥浓密机; 絮凝浓密; 单耗; 尾砂浆浓度

中图分类号: TD98

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)04-0034-05

doi:10.11792/hj20250407

## 引言

随着矿业开采的不断发展,尾矿处理成为环境保护的重要挑战<sup>[1]</sup>。尾矿作为选矿过程中的废弃物,通常以尾砂形式存在,含有大量未完全提取的矿物质。不同尾砂的物理化学特性存在差异,其处理不仅要降低对环境的负面影响,还要提高资源化利用率。传统的尾砂处理方法,如干堆和湿法堆放<sup>[2]</sup>,已无法满足日益严格的环保要求<sup>[3]</sup>。因此,优化尾砂处理工艺,提升其浓密效率和稳定性<sup>[4]</sup>,成为当前亟待解决的关键问题。

深锥浓密机(DCT)作为一种高效的尾砂浓缩设备<sup>[5]</sup>,在尾砂处理过程中得到了广泛应用。该设备利用深锥结构并添加适量絮凝剂<sup>[6]</sup>,絮凝剂成为提升尾砂浓密效率的关键因素。絮凝剂能够促使尾砂浆中的细小颗粒聚集成较大的絮凝体,从而加速其沉降速度,提高浓密效果<sup>[7-9]</sup>。然而,不同矿山尾砂的级配和化学成分不同,其颗粒特性和絮凝性能差异较大。因此,在深锥浓密操作前,通过试验研究优化絮凝剂的选择<sup>[10]</sup>、用量等参数<sup>[11]</sup>,对于提升尾砂的浓密效果具有重要意义。

对于高密度全尾砂,其含有大量细粒级和超细粒级颗粒,这些颗粒比表面积大、表面能高,导致颗粒间相互作用复杂,影响絮凝剂的吸附与架桥作用<sup>[12]</sup>。由于细粒级颗粒分散性强,易形成稳定悬浮体系,降低絮凝沉降效率;同时,粒径分布不均可能引发絮凝团

的分离或解体,影响底流浓度稳定性。此外,在DCT运行期间,高密度尾砂会增大耙架扭矩<sup>[13]</sup>,增加设备能耗,甚至发生机械故障;而底流滞留时间过长可能会导致板结现象发生<sup>[14]</sup>,阻碍浆体均匀排放,并增大压耙风险<sup>[15]</sup>。由此可见,对于高密度全尾砂的絮凝浓密研究至关重要。

本文以国外某铅锌矿全尾砂为研究对象,通过系统的絮凝试验,探索不同絮凝剂单耗、全尾砂料浆浓度等参数对高密度全尾砂絮凝浓密的影响,旨在为高密度全尾砂深锥浓密提供最优的工艺参数。通过深锥絮凝浓密验证,为高密度全尾砂的高效处理提供理论依据和技术支持,同时为全尾砂资源化利用及环境保护提供新思路<sup>[16-22]</sup>。

## 1 全尾砂性质

试验所用全尾砂取自该铅锌矿尾砂泵房,并于烘箱中烘干,如图1所示。全尾砂烘干后,取出磨碎至粉状,为后续化学成分分析、密度试验、粒级分析和絮凝试验等备用。

### 1.1 全尾砂化学成分分析

全尾砂化学成分分析采用XRF-1800波长色散型荧光光谱仪,结果如表1所示。由表1可知:该全尾砂主要组分为 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ ,氧化铁/磁铁矿含量较高,这是造成其密度较大的主要原因,也可能加速絮凝过程中的尾砂絮团沉降。

收稿日期:2024-11-20; 修回日期:2025-01-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(QNXM20230019)

作者简介:聂军(1988—),男,工程师,硕士,从事采矿工艺研究工作;E-mail:xfeyesu@126.com

\*通信作者:肖柏林(1989—),男,副教授,博士,从事充填采矿研究工作;E-mail:bxiao@ustb.edu.cn

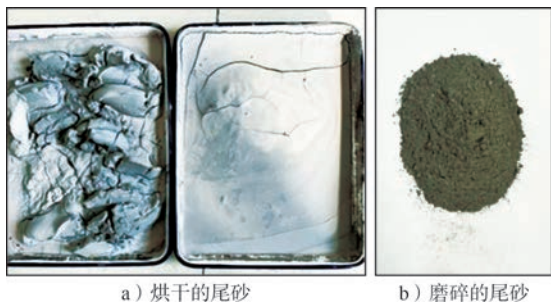


图 1 烘干后的全尾砂

Fig. 1 Dried ungraded tailings

表 1 全尾砂化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of ungraded tailings

| 成分  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   | MnO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | 其他   |
|-----|--------------------------------|------------------|-------|-------|--------------------------------|------|------|
| w/% | 32.89                          | 26.25            | 21.48 | 11.88 | 3.13                           | 1.66 | 2.71 |

1.2 密度测定

全尾砂密度是指全尾砂单位体积内所含物质的质量。全尾砂总体积包括固体颗粒体积、封闭型孔隙及敞开型孔隙组成的全部体积。本次全尾砂密度测定采用比重瓶法,对样品进行6次平行测定,以测定结果平均值作为最终的测定结果,如表2所示。

表 2 密度测定结果

Table 2 Density measurement results

| 指标                          | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m(比重瓶)/g                    | 109.3 | 94.2  | 115.1 | 109.3 | 94.2  | 115.1 |
| m(比重瓶+全尾砂)/g                | 172.9 | 170.5 | 184.0 | 186.1 | 161.2 | 177.2 |
| m(比重瓶+全尾砂+水)/g              | 423.8 | 423.4 | 430.1 | 433.4 | 416.8 | 425.0 |
| m(比重瓶+水)/g                  | 378.6 | 369.1 | 381.1 | 378.6 | 369.1 | 381.1 |
| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )    | 3.446 | 3.458 | 3.452 | 3.480 | 3.461 | 3.402 |
| 密度平均值/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 3.459 |       |       |       |       |       |

由表2可知:对比第6组与前5组测定结果,发现第6组结果误差较大,因此舍弃该数据。对前5组试验结果进行平均值计算,结果为3.459 g/cm<sup>3</sup>。

相比于其他矿山尾砂密度基本不大于3.1 g/cm<sup>3</sup>(如表3所示),该矿山尾砂被定义为高密度尾砂。根据全尾砂化学成分分析结果,其主要氧化物为Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,高含量的氧化铁/磁铁矿是造成尾砂密度较大的主要原因。

表 3 尾砂密度汇总

Table 3 Summary of tailings density

| 尾砂来源   | 尾砂密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|--------|----------------------------|
| 文献[14] | 2.690                      |
| 文献[16] | 3.016                      |
| 文献[17] | 2.690                      |
| 文献[18] | 2.640                      |
| 文献[19] | 2.687                      |
| 文献[20] | 3.080                      |
| 文献[21] | 3.060                      |
| 文献[22] | 2.740                      |

1.3 全尾砂粒度分析

全尾砂粒度测试采用Winner 3008激光粒度分析仪,结果如图2所示。由图2可知:-5 μm、-10 μm、-20 μm的极细颗粒分布率分别为4.547 %、10.372 %、16.887 %, -75 μm颗粒分布率为47.081 %,全尾砂粒级较粗。此外,全尾砂颗粒不均匀系数为10.742,大于5;曲率系数为1.656,说明颗粒级配良好。全尾砂平均粒径为92.293 μm,也表明该尾砂粒径相对较粗。

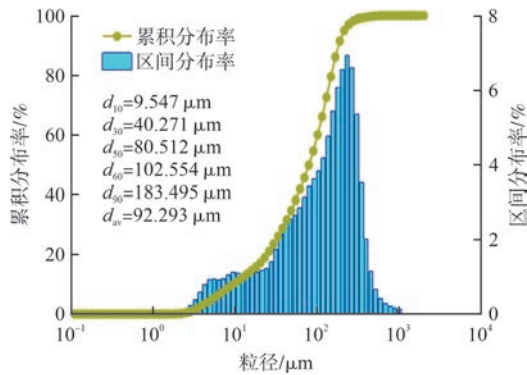


图 2 全尾砂粒度分析结果

Fig. 2 Particle size analysis results of ungraded tailings

2 全尾砂絮凝试验

高密度全尾砂絮凝试验是一种评估尾砂浆絮凝行为的试验方法,主要用于观察和分析不同絮凝剂单耗在尾砂处理中的效果。通常在实验室环境中进行,研究全尾砂颗粒在不同絮凝条件下的沉降速度、絮凝效率和底流浓度等关键特性,为DCT的高效、稳定运行提供技术和理论支撑。

2.1 絮凝试验材料

全尾砂稀释用水:尾砂泵房用水;絮凝剂稀释用水:纯水。该铅锌矿仅使用1种絮凝剂,因此不再进行絮凝剂选型。絮凝试验所用絮凝剂如图3所示。

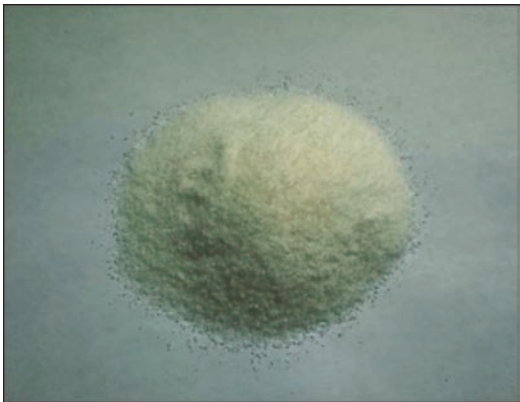


图 3 絮凝试验所用絮凝剂

Fig. 3 Flocculants used in flocculation tests

2.2 絮凝试验原理

全尾砂絮凝试验通过絮凝剂使全尾砂浆中的细小颗粒聚集成较大的絮团,加速沉降。全尾砂颗粒表

面带负电荷,絮凝剂的加入可减小颗粒间排斥力,促进颗粒聚集。高分子絮凝剂还可通过架桥作用连接全尾砂颗粒,形成较大絮凝体,提高沉降效率。絮凝体在重力作用下沉降,体积越大,沉降速度越快。沉降过程中,流体阻力增加,最终达到平衡,沉降速度稳定。良好的絮凝效果可实现上清液清澈、底流浓度高等。

### 2.3 试验方案

絮凝试验对比了不同全尾砂料浆浓度、絮凝剂单耗条件下的尾砂絮凝效果,全尾砂料浆浓度分别为15%、18%、25%,絮凝剂单耗分别为10 g/t、20 g/t、30 g/t。

## 3 絮凝试验结果与分析

### 3.1 絮凝试验结果

不同絮凝剂单耗、全尾砂料浆浓度下尾砂絮凝沉降效果如图4所示。

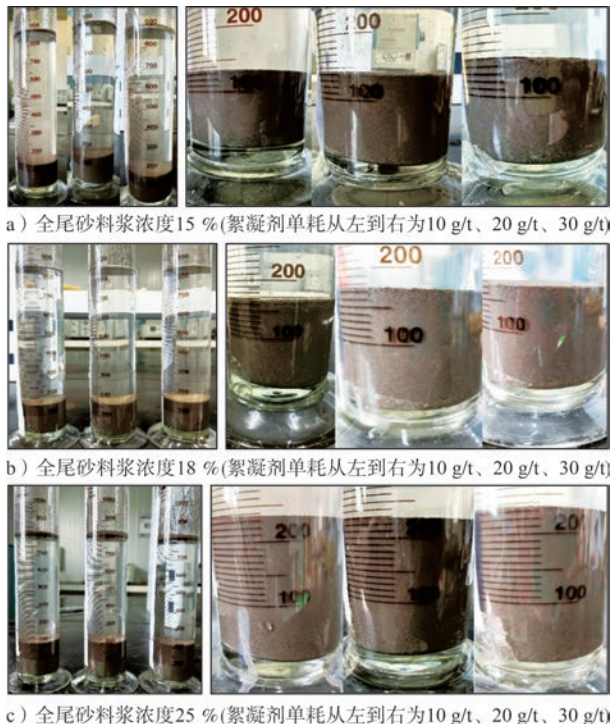


图4 不同全尾砂料浆浓度下尾砂絮凝沉降效果

Fig. 4 Flocculation and settling effect of ungraded tailings under different slurry concentrations

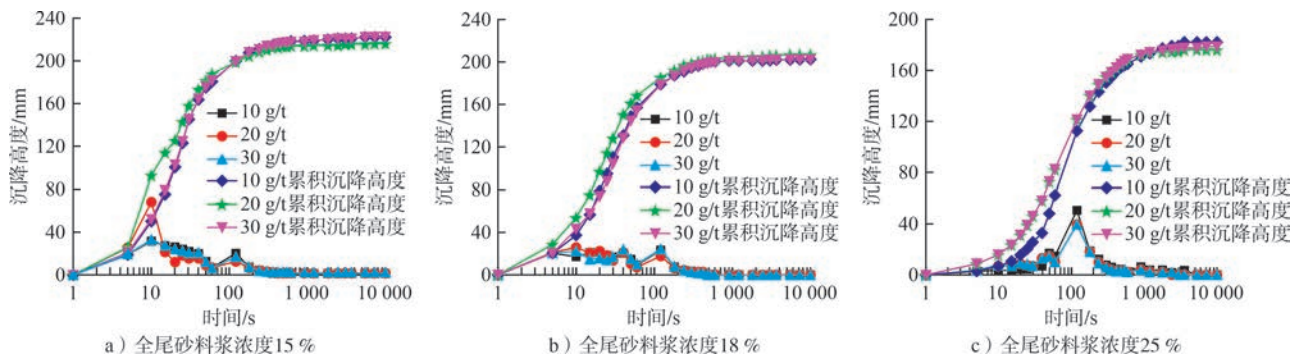


图5 不同全尾砂料浆浓度下尾砂絮凝沉降结果

Fig. 5 Flocculation and settling results of ungraded tailings under different slurry concentrations

由图4可知:在全尾砂料浆浓度为15%时,随着絮凝剂单耗逐渐增大,上清液浊度逐渐减小;在絮凝剂单耗为10 g/t时,上清液浊度最大;在絮凝剂单耗为20 g/t时,底流分层相对较少,即在全尾砂料浆浓度为15%、絮凝剂单耗为20 g/t时,尾砂絮凝效果相对较好。在全尾砂料浆浓度为18%时,随着絮凝剂单耗逐渐增大,上清液浊度逐渐减小;同样在絮凝剂单耗为20 g/t时,底流分层相对较少,即此时尾砂絮凝效果相对较好。在全尾砂料浆浓度为25%时,随着絮凝剂单耗逐渐增大,上清液浊度逐渐减小;在絮凝剂单耗为10 g/t时,尾砂絮凝效果相对较差;在絮凝剂单耗为30 g/t时,底流分层相对较少,说明在全尾砂料浆浓度较高时,可以通过提高絮凝剂单耗来改善絮凝效果。

整体而言,在不同全尾砂料浆浓度、不同絮凝剂单耗条件下,底流均会出现不同程度的分层,原因可能是全尾砂颗粒较粗,且粒径大于75  $\mu\text{m}$ 的分布率超过52%。当全尾砂料浆浓度为15%、18%,絮凝剂单耗为20 g/t时,尾砂絮凝效果相对最好,底流分层相对较少;当全尾砂料浆浓度为25%、絮凝剂单耗为30 g/t时,尾砂絮凝效果相对最好,底流分层相对较少,即在全尾砂料浆浓度较高时,可通过提高絮凝剂单耗来改善絮凝效果。

### 3.2 絮凝结果分析

根据全过程实验室絮凝试验结果,全尾砂的快速絮凝沉降基本在前3 min(180 s),不同全尾砂料浆浓度下尾砂絮凝沉降结果如图5所示。当全尾砂料浆浓度为15%和18%、絮凝剂单耗为20 g/t,全尾砂料浆浓度为25%、絮凝剂单耗为30 g/t时,尾砂在前期的絮凝沉降速度快。当全尾砂料浆浓度增大时,需要提升絮凝剂单耗,以改善尾砂絮凝浓密效果。

根据图5结果,得到了全尾砂浆在前180 s平均沉降速度及极限底流浓度,如表4所示。由表4可知:随着全尾砂料浆浓度逐渐增大,180 s平均沉降速度逐渐减小。当全尾砂料浆浓度为25%时,极限底流浓度最大,原因是料浆浓度较高时,粗颗粒含量相对

多,在絮凝过程中粗颗粒快速下沉聚集,造成底流分层相对严重,最终导致絮凝效果相对较差,因此 180 s 平均沉降速度相对最慢、底流浓度最高。综合考虑,不推荐深锥絮凝浓密使用浓度 25 % 的全尾砂浆。

表 4 絮凝沉降试验结果分析

Table 4 Analysis of flocculation and settling test results

| 全尾砂浆浆浓度/% | 絮凝剂单耗/<br>(g·t <sup>-1</sup> ) | 180 s 平均沉降<br>速度/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 极限底流<br>浓度/% |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------------|--------------|
| 15        | 10                             | 1.150                                  | 63.3         |
|           | 20                             | 1.139                                  | 61.2         |
|           | 30                             | 1.142                                  | 59.5         |
|           | 10                             | 1.041                                  | 62.5         |
| 18        | 20                             | 1.068                                  | 61.4         |
|           | 30                             | 1.039                                  | 60.8         |
|           | 10                             | 0.728                                  | 65.9         |
|           | 20                             | 0.776                                  | 64.9         |
| 25        | 30                             | 0.778                                  | 62.8         |

相比于全尾砂浆浆浓度 18 %,全尾砂浆浆浓度 15 % 时的 180 s 平均沉降速度较快,且极限底流浓度也较大。结合图 4 来看,当全尾砂浆浆浓度 15 % 时,絮凝后底流分层相较于 18 % 时严重。因此,在深锥絮凝浓密时,推荐将全尾砂浆浆浓度稀释至 18 % 左右再进行絮凝浓密;对于絮凝剂单耗,推荐为 20 ~ 30 g/t。

3.3 深锥絮凝浓密验证

实验室试验结果显示,最佳全尾砂浆浆浓度为 18 % 左右,絮凝剂最优单耗为 20 ~ 30 g/t。在此基础上,开展 DCT 调试与絮凝浓密(如图 6 所示)。调试期间,记录了 DCT 的主要运行参数:进料流量为 70 ~ 90 m<sup>3</sup>/h,存在一定波动,平均为 85 m<sup>3</sup>/h;进料浓度为 30 % ~ 50 %,后经 PDUC 泵主动稀释至 18 % 左右;DCT 稳定运行时的泥层高度为 5.5 ~ 6.0 m、底流浓度可达 72 % ~ 82 %、泥层压力为 160 ~ 180 kPa、耙架扭矩均小于 40 %,未出现耙架扭矩激增、压耙等现象。

通过现场工业运行可知,在实验室试验得出的最优参数下开展全尾砂深锥絮凝浓密,可以实现 DCT 稳定运行,以及全尾砂高效絮凝,底流浓度达到膏体制备标准,验证了实验室试验结果的正确性。

3.4 深锥操作规范

为保证 DCT 稳定、高效、安全运行,根据 DCT 运行情况,提出了以下运行规范:

1)未充填静置超过 5 d 时,DCT 的泥层高度必须小于 2 m。超过 7 d 时,实时关注 DCT 扭矩变化,当扭矩超过 18 % 时,需要开高位循环;当扭矩超过 40 % 时,需要开启底流稀释泵小流量稀释或采取其他紧急措施,必要时需将深锥中的料放空,避免压耙。



图 6 DCT 调试与絮凝浓密

Fig. 6 DCT commissioning, and flocculation and thickening

2)每班检查干粉絮凝剂用量,及时补充。检查絮凝剂制备装置运行是否正常,絮凝剂制备参数是否正确、絮凝剂干料是否拥堵、成品机中絮凝剂是否全部溶化,添加管路是否拥堵。

4 结 论

1)密度测试结果显示,该铅锌矿全尾砂密度为 3.459 g/cm<sup>3</sup>,明显高于其他矿山尾砂密度。其中,高含量氧化铁/磁铁矿是造成尾砂密度较大的主要原因。

2)根据实验室絮凝沉降试验,最优全尾砂浆浆浓度为 18 % 左右,絮凝剂单耗为 20 ~ 30 g/t。

3)DCT 运行中的高密度全尾砂絮凝浓密效果良好,验证了实验室试验结果的正确性。因此,确定最优絮凝参数能够保证高密度全尾砂深锥絮凝浓密效果,为尾砂的环保处理和资源化利用提供有效的技术和理论支持。

4)该铅锌矿只使用了某型号絮凝剂开展絮凝试验,因此这些参数只能反映该絮凝剂对尾砂的絮凝浓密效果,后续若有其他型号絮凝剂,需重新开展絮凝沉降试验。研究结果为高密度全尾砂深锥絮凝及深锥浓密机安全高效运行提供了指导。

[参 考 文 献]

[1] 丁锐,陈玉琦,刘清顺,等.固废胶凝材料协同尾砂制备胶结充填材料的研究进展[J].北方建筑,2024,9(5):40-43.  
[2] 邱子昱,刘晓峰,赵自越.城门山铜矿尾砂干式堆存工艺试验研究[J].有色冶金设计与研究,2024,45(5):44-46,54.

- [3] 张浩强. 废石全尾砂料浆稳定性及力学强度特征分析[J]. 黄金, 2024, 45(10): 59–67.
- [4] 李辉, 王洪江, 吴爱祥, 等. 基于尾砂沉降与流变特性的深锥浓密机压耙分析[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(12): 1 553–1 558.
- [5] 王勇, 那庆, 杨军, 等. 深锥浓密机泥层高度与压力关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 257–262.
- [6] 王洪江, 彭青松, 杨莹, 等. 金属矿尾砂浓密技术研究现状与展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(6): 971–980.
- [7] 石孟利, 夏举佩. 铜尾矿浆絮凝沉降及对固化影响研究[J]. 黄金, 2024, 45(10): 102–108.
- [8] 李琳, 吕剑桥, 崔曼, 等. 某细粒黄金尾矿浓缩沉降及流变特性研究[J]. 黄金, 2023, 44(1): 99–101, 105.
- [9] 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, 184(6): 153–159.
- [10] 杨官印, 崔鹏艳, 陈玉明. 絮凝剂对溢流超细尾砂沉降特性影响的试验研究[J]. 黄金, 2019, 40(11): 31–35.
- [11] 郑银珠. 铜绿山矿尾矿沉降絮凝剂优化选型试验研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(5): 71–75, 88.
- [12] 王勇, 曹晨, 吴爱祥. 深锥固体通量与絮凝剂单耗和料浆浓度的数学关系[J]. 工程科学学报, 2021, 43(10): 1 269–1 275.
- [13] TAN K C, BAO J, BICKERT G. A study on model predictive control in paste thickeners with rake torque constrain[J]. Minerals Engineering, 2017, 105: 52–62.
- [14] 王勇, 那庆. 深锥浓密机底流质量分数与停留时间关系研究[J]. 黄金, 2022, 43(2): 33–36.
- [15] 陈辉, 王洪江, 吴爱祥, 等. 哈尔滨某矿深锥浓密机的应用改造[J]. 金属矿山, 2015(5): 158–161.
- [16] 罗卫兵, 刘鹏鹏, 毕成, 等. 某铜铁矿上向分层充填法采场稳定性研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(5): 109–114.
- [17] 朱久隆, 李帅, 杭康, 等. 全尾砂物理化学性质及其似膏体充填试验[J]. 世界有色金属, 2024(12): 183–185.
- [18] 李海波, 朱纪朋, 蒋忠涛, 等. 全尾砂微胶结充填性能研究[J]. 黄金, 2024, 45(10): 54–58.
- [19] 刘勋, 孙远江, 欧任泽, 等. 某铜矿细粒级全尾砂充填试验及应用研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(2): 214–219.
- [20] GAO T, WU A X, WANG S Y, et al. Experimental and numerical investigations of bending mechanical properties and fracture characteristics of cemented tailings-waste rock backfill under three-point bending[J]. Construction and Building Materials, 2024, 447: 138149.
- [21] 王洪江, 白龙剑, 张玺, 等. 低灰砂比细粒尾砂堆存体抗液化强度试验研究[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(9): 3 092–3 103.
- [22] 谢佩, 戴惠新, 赵明珠. 尾砂物理特性对其絮凝沉降性能影响规律的研究[J]. 黄金, 2023, 44(8): 52–57.

## Experimental study on optimal parameters for high-density ungraded tailings flocculation and thickening in deep cone thickeners

Nie Jun<sup>1</sup>, Liu Min<sup>1</sup>, Chen Xiaoliang<sup>1</sup>, Cong Riming<sup>1</sup>, Xiao Bolin<sup>2</sup>, Liu Chunkang<sup>2</sup>

(1. China Nonferrous Metal Industry's Foreign Engineering and Construction Co., Ltd.;

2. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing)

**Abstract:** The study focuses on optimizing flocculation parameters to enhance the thickening efficiency and stability of high-density ungraded tailings in deep cone thickeners (DCT). Laboratory flocculation tests were conducted to investigate the effects of unit consumption of different flocculants, the slurry concentration of ungraded tailings, and settling time on the thickening process. Based on the optimal parameters derived from laboratory experiments for high-density ungraded tailings, the commissioning, and operation of the DCT demonstrated excellent flocculation and sedimentation performance, validating the accuracy of the laboratory findings. The research confirms that determining optimal flocculation parameters ensures effective flocculation and thickening of high-density ungraded tailings in deep cone thickeners, providing robust technical and theoretical support for environmentally sustainable tailings management and resource-based utilization.

**Keywords:** high-density; ungraded tailings; deep cone thickener; flocculation and thickening; unit consumption; tailings slurry concentration