本溪某铁尾矿絮凝剂沉降过程优化及细观结构研究*

王丹[1]，张艺邺[2]，王宁[2]，胡国光[3]，冉迪[1]

（1.沈阳城市建设学院 机械工程学院， 辽宁 沈阳 110167；
2.辽宁省东合矿冶科技有限公司， 辽宁 沈阳 110623；
3.本溪思山岭中泰矿业有限公司， 辽宁 本溪市 117013）

摘要：为了解决本溪某选厂铁尾矿沉降慢的问题，通过絮凝剂优选试验选择合适的絮凝剂，运用单因素试验探究了矿浆质量浓度、絮凝剂单耗和矿浆pH对絮凝沉降的影响，对沉降过程的细观结构进行显微观察，总结了铁尾矿的沉降规律。结果表明：自然沉降在600 min时基本结束，到达沉降临界点后的沉积物还会经历主固结阶段和次固结阶段，主固结阶段在2 000 min时结束，次固结阶段在3 500 min时结束，澄清层高度随即保持稳定；在絮凝剂为阴离子型聚丙烯酰胺（APAM）、矿浆质量浓度为15%、絮凝剂单耗为20 g/t、矿浆pH=9的情况下絮凝效果最好，此条件下的10 min含固率为233.13 mg/L，10 min沉降率为67.15%。

关键词：铁尾矿；絮凝剂；沉降机理；细观结构

中图分类号：TD926　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)01-0178-08

Study on Optimization of Settling Process and Microstructure of Flocculant used in Benxi Iron Tailings

WANG Dan[1], *ZHANG Yiye*[2], *WANG Ning*[2], *HU Guoguang*[3], *RAN Di*[1]

(1.College of Mechanical Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, Liaoning 110167, China;
2.Liaoning Donghe Mining & Metallurgy Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110623, China;
3.Benxi Sishanling Zhongtai Mining Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117013, China)

Abstract: In order to solve the problem of slow settling of iron tailings in a concentrator in Benxi, the appropriate flocculant was selected through the flocculant optimization test. The effects of slurry mass concentration, flocculant unit consumption and slurry pH on flocculant settling were investigated by single factor test. The microstructure of the settling process was observed microscopically, and the settling law of iron tailings was summarized. The results show that the natural settling basically ends at 600 min, and the sediments after reaching the critical point of settling will undergo the main consolidation stage and the secondary consolidation stage. The main consolidation stage ends at 2 000 min, and the secondary consolidation stage ends at 3 500 min. The height of the clarification layer remains stable immediately. The flocculation effect is the best when the flocculant is anionic polyacrylamide (APAM), slurry mass concentration is 15%, flocculant unit consumption is 20 g/t, and slurry pH=9. Under this condition, the solid content of 10 min is 233.13 mg/L, and the settling rate of 10 min is 67.15%.

Key words: Iron tailings, Flocculant, Settling mechanism, Microstructure

0 引言

铁矿资源是钢铁产业的核心，也是人类社会发展的重要物质基础[1-2]。我国铁矿资源丰富，储量相对较多，钢铁产量约占全球总量的一半[3-4]。2021年，我国铁矿石原矿需求量约为21.04亿t，是全球最大的钢铁生产和消费国，但我国铁矿以贫矿为主，嵌布粒度细且伴生组分多，据估计，平均含铁量仅为18%左右[5]。随着铁矿石的持续开采，国内铁矿石的开采品位逐年降低[6-7]，尾矿排放量逐渐增加，2016年，我国尾矿累计堆存量高达146亿t，年排放量超15亿t[8]。铁尾矿的大量排放对尾矿库的正常

* **收稿日期**：2024-03-07
基金项目：辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20231543)
作者简介：王丹(1986—)，女，辽宁沈阳人，硕士，高级工程师，主要从事矿山设备及工艺试验研究。E-mail：wangdan@syucu.edu.cn
通信作者：张艺邺(1996—)，男，山东淄博人，硕士，工程师，主要从事矿物加工技术方面的研究。E-mail：qqqwwweee1860@163.com

运行带来了安全隐患,近年来,我国尾矿库溃坝事故频发,不仅造成人民生命财产的重大损失,也面临严重的环境污染问题[9-10]。

提高铁尾矿的浓密效率,减少铁尾矿浆的排放是选矿企业面临的重要问题,也对选矿技术的发展具有深远的现实意义。DENG 等[11]采用 4 种不同絮凝剂对程潮铁尾矿进行了加速沉降试验,发现人工沉降效果明显好于自然沉降。杨子龙等[12]对全尾砂进行了不同分子量的絮凝剂选型试验,发现分子量在 1.6×10^7～1.8×10^7 之间的阴离子型絮凝剂 ZYZ 对尾砂的沉降效果最好。NIU 等[13]根据温度对溢流超细铁尾矿沉降特性的影响,建立了优化模型,发现当温度高于 60 ℃时,絮体的粒径、分形维数和密度均逐渐减小。XU 等[14]研究了铁尾矿絮凝沉降规律对尾矿砂力学性能的影响,测定了最佳投加方案对尾矿固结剪切强度的影响规律。王少勇等[15]设计了深锥浓密机内部流场可视化系统,探究了进料流量对给料井内全尾砂颗粒流场的影响。郑伯坤[16]通过响应面设计,构建了二次多项式回归模型,对全尾砂的絮凝沉降参数进行了优化。

上述研究从絮凝剂分子量、温度、入料量等方面出发,探讨了孔径分布、分形维数、密度和固结剪切强度等因素对絮凝沉降的影响,但对沉降过程的细观结构特征研究较少。因此,本研究以本溪某选厂铁尾矿为研究对象,通过静态沉降试验,探究矿浆质量浓度、絮凝剂单耗和矿浆 pH 对尾矿絮凝沉降的影响,并对沉降过程进行细微观察,总结沉降规律和特点,分析沉降时间对沉积物固结形态变化的影响,基于试验探讨絮凝剂的工作机理,以期解决铁尾矿沉降速度慢的问题。

1 试验部分

1.1 试验原料

以本溪某选厂尾矿库铁尾矿为试验原料,对其进行物理性质和粒度检测,结果分别如表 1 和图 1 所示。由图 1 可知,小于 74 μm 的颗粒约占 88%,小于 20 μm 的颗粒约占 43.5%,代表粒径特征的 d_{10}、d_{50}、d_{90}分别为 3.72 μm、27.8 μm、87.4 μm,径距为 3.008,一致性为 0.929,比表面积为 644.6 m^2/kg,面积平均径为 9.31 μm,体积平均径为 37.8 μm,不均匀系数 C_u(表示组成尾矿的颗粒均匀程度)为 9.87,曲率系数 C_c(反映了尾矿颗粒粒径分布的曲线形态)为 1.38,粒径齐全且连续分布,级配良好。

表 1 铁尾矿的物理性质

Table 1 Physical properties of iron tailings

含水率/%	密度/(g/cm³)	干密度/(g/cm³)	相对密度	孔隙比	孔隙率/%
6.75	2.04	1.91	2.55	0.34	25.37

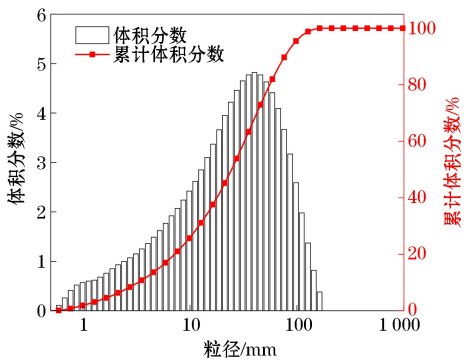


图 1 原料粒级分布

Fig.1 Particle-size distribution of raw materials

1.2 药剂和设备

1.2.1 絮凝剂

试验使用了 4 种有机高分子絮凝剂[17],分别是阴离子型聚丙稀酰胺(分子量 1.8×10^7,简称为 APAM)、阳离子型聚丙稀酰胺(50 离子度,简称为 CPAM)、非离子型聚丙稀酰胺(分子量 1.2×10^7,简称为 NPAM)以及工厂现有的絮凝剂 65E,均为分析纯。

1.2.2 试验设备

试验设备名称及型号参数见表 2。

表 2 试验设备名称及型号参数

Table 2 Test equipment name and model parameters

设备名称	设备型号
循环水式多用真空泵	SHZ-D(Ⅲ)
电热恒温鼓风干燥箱	DHG-92
升降油浴锅	ZKYY-5L
激光粒度分析仪	Mastersizer 3000
电子显微镜	ANDONSTAR 500

1.3 试验方法

为了更直观清晰地观察絮凝沉降效果,开展了静态沉降试验。静态沉降在一个由量筒模拟的沉降柱内进行,如图 2 所示。将配制好的絮凝剂和矿浆在量筒中充分搅拌均匀,抽取 4 个时间节点的上清液,通过高清电子显微镜拍摄沉降过程,记录沉降时间和澄清层界面高度。

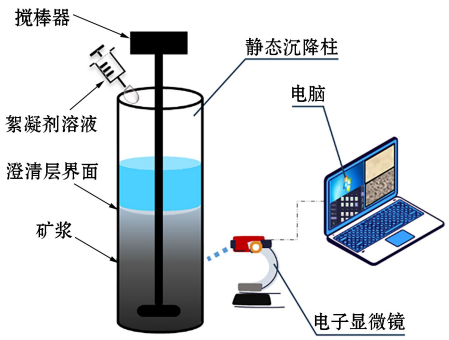


图 2 静态沉降柱试验系统

Fig.2 The system of static settling coumn test

1.4 试验指标

(1) 固体浓度(ϕ_i)和沉降速率(v)。通过 Kynch 沉降理论[18]可知,沉降曲线上任意点的固体浓度和沉降速率可通过式(1)和式(2)进行计算:

$$\phi_i=\frac{\phi_0 H_0}{H_i} \tag{1}$$

$$v=\frac{H}{T} \tag{2}$$

式中:ϕ_i为沉降曲线上任意点 i 的固体浓度,%;v 为任意点 i 的沉降速率,mm/min;ϕ_0为初始悬浮液浓度,%;H_0为初始悬浮液界面高度,mm;H、T 分别为过 i 点的切线在横坐标与纵坐标上的截距。

(2) 含固率(E_1)。称取滤膜重量,将抽取的上清液用抽滤机抽滤,随后连同滤膜一起烘干,烘干后称重。含固率可通过式(3)进行计算:

$$E_1=\frac{W_1-W_{膜}}{0.15}\times 100\% \tag{3}$$

式中:E_1 为含固率,mg/L;W_1 为滤膜和固体烘干后的总质量,mg;$W_{膜}$为滤膜质量,mg。

(3) 沉降率(E_2)。称取铁盆重量,在 10 min 时将剩余矿浆倒入铁盆中并称取总质量,然后进行烘干,烘干后再次称取总质量。沉降率可通过式(4)进行计算:

$$E_2=\frac{W_2-W_{盆}}{W_3-W_{盆}}\times 100\% \tag{4}$$

式中:E_2 为沉降率,%;W_2 为矿浆和铁盆烘干后的总质量,g;W_3 为矿浆和铁盆烘干前的总质量,g;$W_{盆}$为铁盆的质量,g。

2 结果与讨论

2.1 絮凝剂优选试验

为了更好地开展单因素条件试验,絮凝剂的优选是首要工作。在矿浆质量浓度为 10%的条件下,选用絮凝剂 APAM、CPAM、NPAM、65E 进行对照试验,并设置自然对照组。在 20 ℃条件下,分别配制 APAM、CPAM、NPAM、65E 为 0.2 ‰质量浓度的絮凝剂溶液,陈化 24 h,固定絮凝剂单耗为 20 g/t。观察澄清层界面高度随沉降时间的变化曲线,如图 3 所示,计算对应的固体浓度和沉降速率,如图 4 所示。

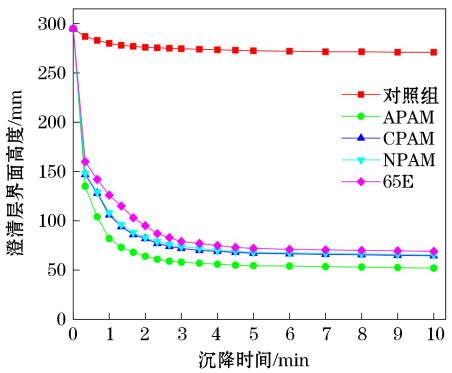


图 3 澄清层界面高度随沉降时间变化曲线

Fig.3 Change curves of interface height of clarification layer with the settling time

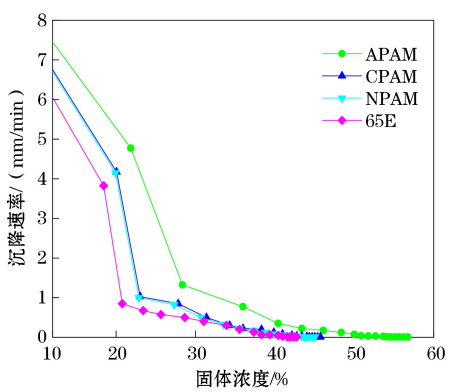


图 4 沉降速率随固体浓度变化曲线

Fig.4 Change curves of settling speed with solid concentration

由图 3 和图 4 可知,高分子絮凝剂影响效果显著,添加絮凝剂组的沉降效果明显好于自然对照组,效果大小排序依次为:APAM>CPAM≈NPAM>65E>对照组。阴离子型絮凝剂分子链上的羧基相互排斥,在水中延展度较大,键合能力较强,使颗粒絮凝的结构更加牢固,比其他高分子絮凝剂絮凝效果更好,因此后续选用 APAM 作为试验絮凝剂。

2.2 单因素条件试验

2.2.1 矿浆质量浓度对絮凝沉降的影响

改变矿浆质量浓度,将配置好的 APAM 按单耗 20 g/t 加入量筒,充分搅拌均匀,在 1 min、3 min、7 min、10 min 时抽取上清液,剩余矿浆进行烘

干并称重。上清液含固率随沉降时间的变化曲线如图 5 所示,10 min 时静态沉降指标(含固率和沉降率)随矿浆质量浓度的变化曲线如图 6 所示。

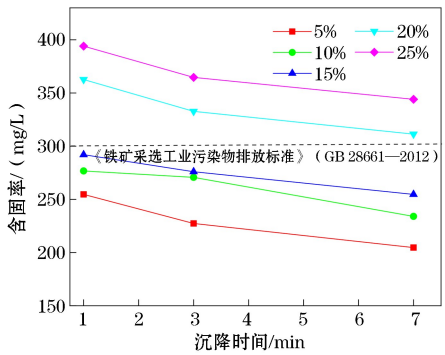


图 5 不同矿浆质量浓度的含固率随沉降时间变化曲线

Fig.5 Change curves of solid content with settling time under different slurry mass concentration

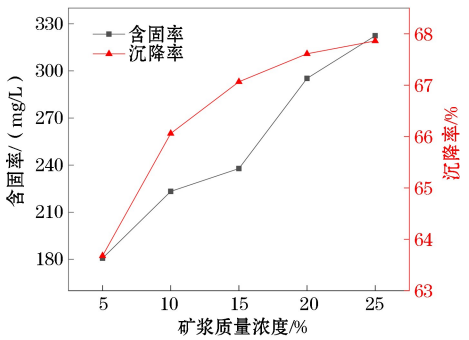


图 6 10 min 时含固率和沉降率随矿浆质量浓度变化曲线

Fig.6 Change curves of solid content and settling rate with slurry mass concentration at 10 min

由图 5 可知,随着矿浆质量浓度的增加,含固率逐渐增加,这是因为絮凝剂单耗固定,多余部分的矿浆颗粒无法与絮凝剂充分反应,难以下沉,导致上清液含固率增加。随着沉降时间的增加,含固率逐渐降低,这是因为在重力作用下,上清液中残留的颗粒还会不断下沉。在矿浆质量浓度为 15%时,上清液含固率较低,满足《铁矿采选工业污染物排放标准》(GB 28661—2012)。由图 6 可知,随着矿浆质量浓度的增加,10 min 时的含固率近似呈直线上升趋势,10 min 沉降率呈先快速上升后逐渐稳定的趋势,在矿浆质量浓度为 15%时,10 min 含固率为 237.8 mg/L,10 min 沉降率为 67.07%。矿浆质量浓度为 15%时,沉降效果较好,符合排放标准,因此选定矿浆质量浓度 15%作为后续沉降试验矿浆质量浓度。

2.2.2 絮凝剂单耗对絮凝沉降的影响

在矿浆质量浓度为 15%的条件下,改变絮凝剂单耗。不同絮凝剂单耗的上清液含固率随沉降时间变化曲线如图 7 所示。10 min 时含固率和沉降率随絮凝剂单耗变化曲线如图 8 所示。

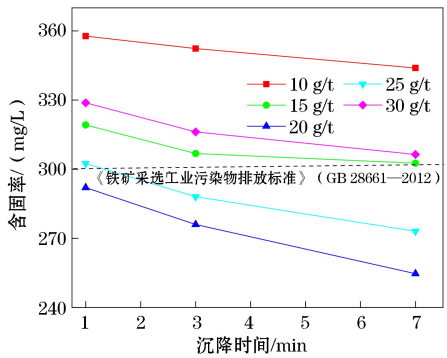


图 7 不同絮凝剂单耗的含固率随沉降时间变化曲线

Fig.7 Change curves of solid content with settling time under different flocculant unit consumption

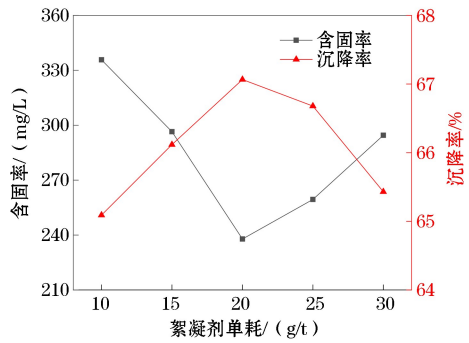


图 8 10 min 时含固率和沉降率随絮凝剂单耗变化曲线

Fig.8 Change curves of soild content and settling rate with flocculant unit consumption at 10 min

由图 7 可知,随着絮凝剂单耗的增加,含固率呈现先降后升的趋势。单耗过低时,矿浆颗粒与絮凝剂接触困难,微细颗粒难以下沉;单耗过量时,多余的絮凝剂分子又会吸附微细颗粒,但沉降速度依然很慢,导致含固率增加。由图 8 可知,随着絮凝剂单耗的增加,10 min 时含固率呈现先降后升的趋势,沉降率呈现先升后降的趋势。这是因为超过最佳絮凝剂单耗时,絮凝剂分子包裹矿浆颗粒,絮团内部充满大量水分,导致沉降率降低。综合考虑,选取 20 g/t 作为后续试验所用絮凝剂单耗。

2.2.3 矿浆 pH 对絮凝沉降的影响

在矿浆质量浓度为 15%、絮凝剂单耗为 20 g/t 的条件下,调节矿浆的 pH。不同 pH 的上清液含固率随沉降时间变化曲线如图 9 所示。10 min 时含固率和沉降率随矿浆 pH 变化曲线如图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知,随着 pH 的增加,含固率呈现先降后升的趋势,10 min 时沉降率呈现先升后降

的趋势。矿浆酸碱性对沉降效果排序依次为弱碱>中性>强碱>弱酸>强酸,在酸性环境中,APAM分子上的羧基会受到 H^+ 的抑制,降低解离的程度,从而导致絮凝效果不佳。综合考虑,pH=9 时沉降效果最好,此时的 10 min 含固率为 233.13 mg/L,10 min 沉降率为 67.15%。

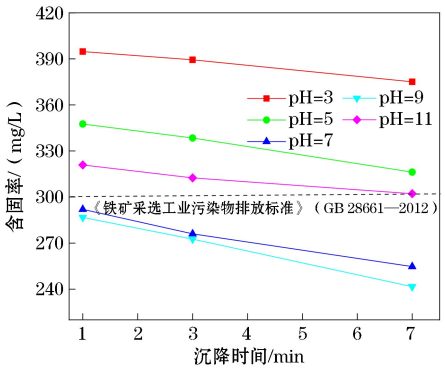


图 9 不同 pH 的含固率随沉降时间变化曲线

Fig.9 Change curves of solid content with settling time under different slurry pH

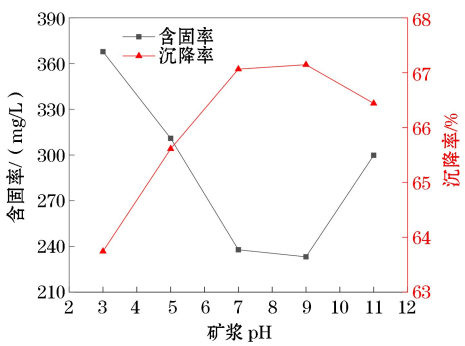


图 10 10 min 时含固率和沉降率随矿浆 pH 变化曲线

Fig.10 Change curves of soild content and settling rate with slurry pH at 10 min

3 沉降过程作用机理

3.1 沉降分层现象

观察整个絮凝沉降过程,可以看到沉降柱内分为 3 个明显的区域,如图 11 所示。随着时间的推移,沉降柱顶部的区域逐渐变得清澈,高度不断增加,这部分被称为澄清区(A 区)。在澄清区下方是悬浮区,包括沉降区(B 区)和过渡区(C 区),沉降区中的颗粒相互作用达到平衡,高度逐渐减少直至消失,过渡区的高度在开始时基本不变,但随着沉降区的消失而逐渐减少,最终消失。压缩区(D 区)位于沉降柱底部,被截住的悬浮固体导致接触应力和浓度急剧增加,沉降速度逐渐减小至 0,其高度逐渐增加。经过充分的絮凝沉降过程,B 区和 C 区消失,只剩下 A 区和 D 区[19]。澄清区-悬浮区界面会与悬浮区-压缩区界面重合,重合所对应的时间 t_c 称为临界时间,所对应的高度 z_c 称为临界高度,临界时间和临界高度称为沉降过程的临界点,如图 12 所示。

如果悬浮液是理想悬浮液,即固体颗粒完全分散,互不干扰,则沉降过程会在临界点结束。但如果固体颗粒发生絮凝反应,在经过临界点之后沉降过程会继续,压缩区持续压缩,沉降速度逐渐减少并趋向于 0,直到水分从絮团内部和絮团之间完全排出,达成新的平衡。

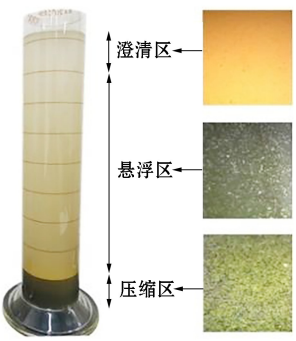


图 11 沉降柱中的分层现象

Fig.11 Stratification phenomenon in settling colume

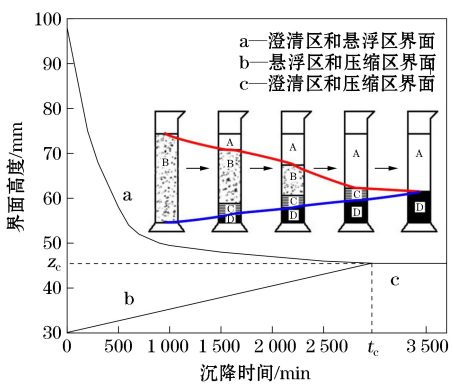


图 12 静态沉降曲线

Fig.12 Curves of static settling

3.2 自然沉降数学模型

本溪地区铁尾矿属于黏土矿物,粒度较细,在沉降过程中易形成絮团、絮网结构,在多种力的协同作用下沉降。定性描述可以直观地判断出沉降过程的特点,但为了更科学准确地描述黏性铁尾矿沉降过程,对 600 min 内的沉降数据进行非线性拟合,建立数学模型,从而做出定量描述,如图 13 所示。该模型中的准确度 $R^2=0.991\ 47$,准确度 $R^2_{adj}=0.990\ 16$,相关系数接近 1,表明拟合程度较高,可以很好地对

该矿沉降过程进行描述。沉降过程指标可以通过式(5)进行计算:

$$y=52.57+237.85e^{-0.01x} \quad (5)$$

式中:y 为澄清层的高度,mm;x 为沉降时间,min。

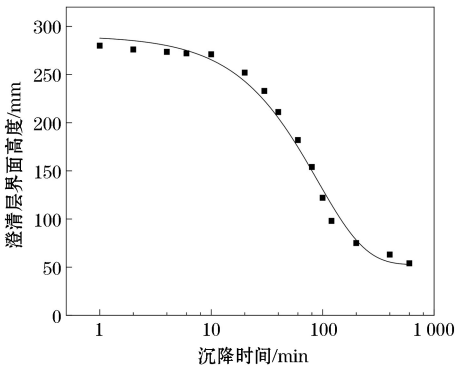


图 13 自然沉降拟合函数曲线

Fig.13 Fitting function curve of natural settling

3.3 沉积物的时间效应

在沉降前期,粗颗粒由于自身的重力作用会迅速下沉至筒底,形成沉积物下层的粗颗粒层;随着沉降时间的增加,细颗粒和微细颗粒也会慢慢下沉,填充粗颗粒之间的空隙,形成沉积物的中层和上层,这3层在肉眼和电子放大镜观察下都具有明显的粒度特征,沉积物的分层现象如图14所示。

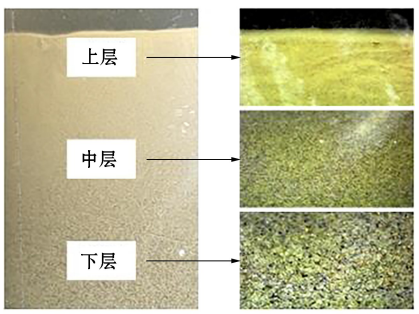


图 14 沉积物的分层现象

Fig.14 Stratification phenomenon of sediments

在600 min时,铁尾矿自然沉降基本结束,后续沉积物的压缩过程称为铁尾矿的固结阶段,固结阶段又分为主固结阶段和次固结阶段。主固结阶段是沉积物的排水过程,在这个过程中会排出孔隙内部的水分,可以观察到澄清层界面高度持续下降,在2 000 min时,主固结阶段结束;次固结阶段是黏土矿物特有的阶段,在这个阶段,超静孔隙水压力消失,微细颗粒在自重作用下填充进排出水分的孔隙中,表现在澄清层界面略微下降,在3 500 min时,次固结结束。1 000 min内和3 500 min内的固结曲线分别如图15和图16所示。

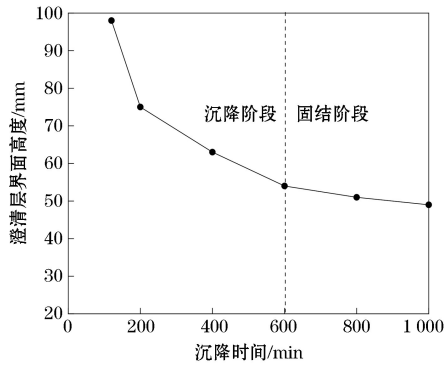


图 15 1 000 min内的固结曲线

Fig.15 Consolidation curve within 1 000 min

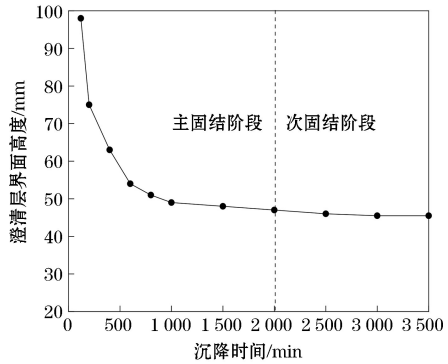
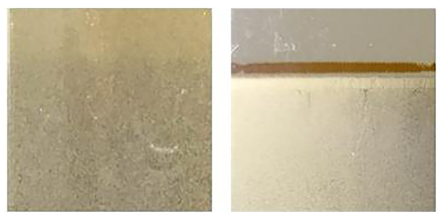


图 16 3 500 min内的固结曲线

Fig.16 Consolidation curve within 3 500 min

观察沉降前期和沉降后期沉积物的变化,可以发现前期的沉积物表面上充满微小孔隙,内部也有排水通道,这是因为颗粒间充满水分,压缩还未完毕;在沉降后期,水分排出,孔隙大量减少,排水通道逐渐上移,随后消失,压缩基本完成,如图17所示。



(a)沉降前期 (b)沉降后期

图 17 沉积物的形态变化

Fig.17 Morphological changes of sediments

3.4 沉降过程的絮凝剂作用

添加絮凝剂可以加速铁尾矿浆的沉降速度,有无絮凝剂条件下固液分离时间对比如图18所示。由图18可知,无絮凝剂添加的铁尾矿浆至少要1 440 min才能达到固液分离阶段,而添加絮凝剂的铁尾矿浆只需要120 min就可以达到近乎相同的固液分离阶段。用电子显微镜观察絮凝沉降各分区过程,沉降过程中的各层形态如图19所示。由图19

可知,在沉降区中,絮凝剂水解,释放出长线结构的高分子聚合物,聚合物两端吸附胶粒形成“桥”,吸附悬浮颗粒;过渡区中会吸附更多的颗粒,形成粗大絮体,同时沉降过程中也会网捕卷扫细颗粒,从而加速下沉;在压缩区中,上端不断沉积的絮体向下挤压,压缩下端被筒底截住的絮体,释放出絮体内部和絮体之间的水分,逐渐达到密实,有无絮凝剂条件下 24 h 沉积物形态对比如图 20 所示。由图 20 可知,经过 24 h 后,添加絮凝剂的沉积物形态仍存在大量排水孔隙,其结构以互相挤压的大体积絮体为主,比较松散,还会随时间进一步压缩密实,直至排出所有水分,而没有添加絮凝剂的沉积物形态已压缩密实,结构牢固。

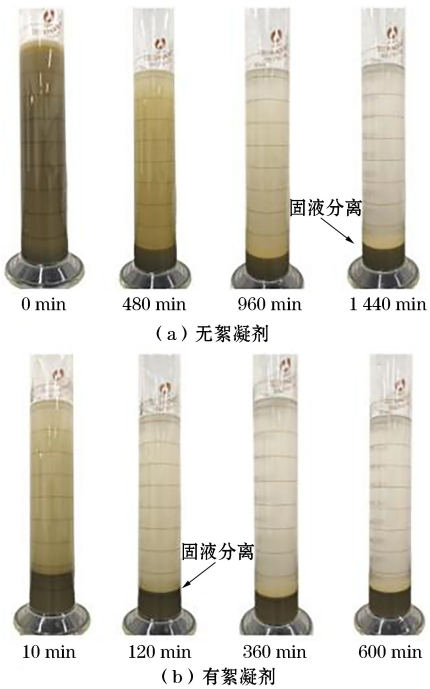


图 18 有无絮凝剂条件下固液分离时间对比

Fig.18 Comparison of solid-liquid separation time with and without flocculant

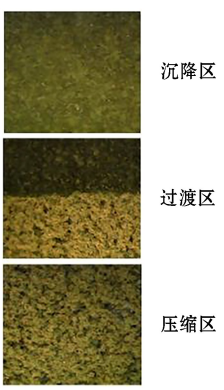


图 19 添加絮凝剂后沉降过程中的各层形态

Fig.19 Morphology of each layer during settling after adding flocculant

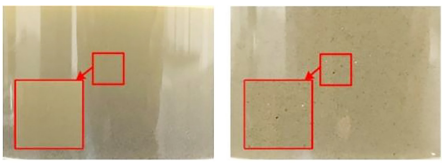


图 20 有无絮凝剂条件下 24 h 沉积物形态对比

Fig.20 Morphological comparison of sediments at 24 h with and without flocculant

4 结论

(1) 为了解决本溪某选厂铁尾矿沉降慢的问题,通过絮凝剂优选试验选择合适的絮凝剂,与 CPAM、NPAM、65E 相比,APAM 沉降效果更好。在矿浆质量浓度为 15%、絮凝剂单耗为 20 g/t、矿浆pH=9 的条件下,尾矿具有最佳沉降效果,此时含固率为 233.13 mg/L,10 min 沉降率为 67.15%,符合铁矿采选工艺污染物排放标准。

(2) 自然沉降下,矿浆的沉降会出现 3 个明显分层,分别是澄清区、悬浮区和压缩区,悬浮区又可以分为沉降区和过渡区。到达临界点时,悬浮区消失,最终只剩下澄清区和压缩区。铁尾矿的沉降过程可以通过澄清层界面高度与沉降时间的函数关系来定量描述。

(3) 压缩区中沉积物的形态变化具有时间效应。600 min 时自然沉降过程基本结束,在上覆压力作用下,沉积物会经历主固结阶段和次固结阶段,可以排出多余水分,逐渐达到密实。

(4) 添加絮凝剂可以加速沉降,使各区出现的时间变短,更快完成沉降过程,但会导致压缩区的沉积物结构松散,需要更多的固结时间。

参考文献(References):

[1] 赵立群,王春女,张敏,等.中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析[J].地质与勘探,2020,56(3):635-643.
ZHAO Liqun, WANG Chunnv, ZHANG Min, et al. Current exploration status and supply-demand situation of iron ore resources in China mainland[J]. Geology and Exploration,2020,56(3):635-643.

[2] 于娱,马代鹏,王贤梅.国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性[J].资源科学,2022,44(10):2006-2021.
YU Yu, MA Daipeng, WANG Xianmei, et al. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources[J]. Resources Science,2022,44(10):2006-2021.

[3] 王海风,平晓东,周继程,等.中国钢铁工业绿色发展回顾及展望[J].钢铁,2023,58(2):8-18.

WANG Haifeng, PING Xiaodong, ZHOU Jicheng, et al. Review and prospect of green development for Chinese steel industry[J]. Iron & Steel,2023,58(2):8-18.

[4] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等.金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J].金属矿山,2021(1):1-13.
WU Aixiang, WANG Yong, ZHANG Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine,2021(1):1-13.

[5] 赵文报,李英."走出去"化解钢铁行业产能过剩问题研究[J].河北经贸大学学报,2018,39(2):78-86.
ZHAO Wenbao, LI Ying. Study on the problem of "going out" to resolve the overcapacity in steel industry[J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2018, 39(2):78-86.

[6] YE F P, DENG H Q, GUO Z Q, et al. Separation mechanism and experimental investigation of pulsating high gradient magnetic separation[J]. Results in Physics, 2023, 49(6):106482.

[7] 郑明贵,吴萍,尤碧莹.中国铁矿资源经济安全评价与预警[J].地质通报,2022,41(5):836-845.
ZHENG Minggui, WU Ping, YOU Biying. Economic security evaluation and early warning of iron ore resources in China[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(5): 836-845.

[8] 王昆,杨鹏,EDWARDS Karen Hudson,等.尾矿库溃坝灾害防控现状及发展[J].工程科学学报,2018,40(5):526-539.
WANG Kun, YANG Peng, EDWARDS Karen Hudson, et al. Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents[J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(5):526-539.

[9] KOSSOFF D, DUBBIN W E, ALFREDSSON M, et al. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation[J]. Applied Geochemistry, 2014, 51:229-245.

[10] 荀曦,郑欣,于雁武,等.基于 BWOA-SVM 的尾矿库风险评价[J].金属矿山,2023(12):211-219.
XUN Xi, ZHENG Xin, YU Yanwu, et al. Risk assessment of tailings reservoir based on BWOA-SVM[J]. Metal Mine, 2023(12):211-219.

[11] DENG D Q, CAO G D. Flocculation settling characteristics of ultra-fine iron tailings with rich gypsum[J]. Advances in Civil Engineering,2021(1):6671704.

[12] 杨子龙,谭玉叶,付建新,等.全尾砂最优絮凝剂遴选与絮团核磁共振分析[J].矿业研究与开发,2021,41(4):136-140.
YANG Zilong, TAN Yuye, FU Jianxin, et al. Optimal selection of flocculant for full tailings and flocs NMR analysis[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4):136-140.

[13] NIU F S, ZHANG H M, ZHANG J X, et al. Temperature variation characteristics and model optimization of flocculation sedimentation of overflow ultra-fine iron tailings [J]. Minerals,2022,12(5):643.

[14] XU Y P, WANG C L, LIU J Y, et al. Study on the effect of flocculation and sedimentation on the mechanical properties of iron tailing sand[J]. Advances in Civil Engineering, 2022(1):6045436.

[15] 王少勇,武鹏杰,张敏杰,等.不同进料流量下深锥浓密机给料井流场特性可视化试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):19-24.
WANG Shaoyong, WU Pengjie, ZHANG Minjie, et al. Visualization experimental study on flow field characteristics of deep cone thickener feedwell under different feeding flow rates [J]. Mining Research and Development,2024,44(1):19-24.

[16] 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.
ZHENG Bokun. Flocculation and sedimentation test of full tailings based on response surface methodology and parameter optimization research[J]. Mining Research and Development,2022,42(7):30-34.

[17] 崔宝玉,王小宇,张云海,等.聚丙烯酰胺在矿物加工领域的应用现状及策略[J].中国矿业,2022,31(4):109-115+123.
CUI Baoyu, WANG Xiaoyu, ZHANG Yunhai, et al. Application status and strategy of polyacrylamide in mineral processing[J]. China Mining Magazine,2022,31(4):109-115+123.

[18] KYNCH G J. A theory of sedimentation[J]. Transactions of the Faraday Society,1952,48:166-176.

[19] 张艺邺,王小宇,康长科,等.响应面法优化微细粒钛铁尾矿絮凝沉降研究[J].矿物学报,2023,43(4):425-432.
ZHANG Yiye, WANG Xiaoyu, KANG Zhangke, et al. Optimization of flocculation and sedimentation of the microparticle sized ilmenite tailing by using the response surface method[J]. Acta Mineralogica Sinica,2023,43(4): 425-432.