doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.202503180005
引用格式:邓代强,李步贤,周子林,等.某矿山尾砂自然与絮凝沉降预测模型研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2026,51(5):32-44.
Citation:Deng Daiqiang,Li Buxian,Zhou Zilin,et al. Prediction models for natural and flocculent sedimentation of mine tailings[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science),2026,51(5):32-44.

某矿山尾砂自然与絮凝沉降预测模型研究

邓代强[1],李步贤[1*],周子林[1],龙云刚[2],李　玉[2],曹国栋[1],王　博[1],杨云飞[1]
(1. 湘潭大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411105;2. 古田天宝矿业有限公司 生产技术部,福建 宁德 352200)

摘要:针对某矿山尾砂浓密过程中存在细尾砂颗粒沉降速度慢,上清液浊度过高的问题,对该矿山现有的尾砂进行了自然沉降实验和絮凝沉降实验,探究 10、20、35、50 g/t 四种不同絮凝剂单耗下对尾砂沉降速度的影响,并观测添加聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM)后的尾砂的沉降速度和上部清液的浊度.研究发现:单耗为 20 g/t 的絮凝剂掺量既高效又能节省成本,其中 20 g/t 的 PAC 能将沉降的平均速度从自然沉降的 1.09 cm/min 提升到 1.42 cm/min,20 g/t 的 PAM 能将沉降的平均速度提升到 41 cm/min.絮凝剂单耗的增加对尾砂初始沉降速率有一定的提升,但是整体的沉降速度并没有加快.通过以上研究构建了自然沉降与絮凝沉降的数学模型来表达各沉降情况下的沉降规律,能够对矿山充填作业提供一定的参考.

关键词:矿山充填;絮凝沉降;PAC;PAM;预测模型
中图分类号:TD926.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1007-855X(2026)05-0032-13

Prediction models for natural and flocculent sedimentation of mine tailings

Deng Daiqiang[1],Li Buxian[1*],Zhou Zilin[1],Long Yungang[2],Li Yu[2],
Cao Guodong[1],Wang Bo[1],Yang Yunfei[1]
(1. College of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan,China;
2. Production & Technology Department,Gutian Tianbao Mine Co.,Ltd., Ningde 352200, Fujian, China)

Abstract: To address the problems of slow settlement of fine tailings particles and excessively high supernatant turbidity during the thickening process of tailings in a mine, natural sedimentation and flocculent sedimentation experiments were carried out on the existing tailings of the mine. The study explored the effects of four different flocculant dosages (10, 20, 35, and 50 g/t) on the tailings settlement velocity, and observed the settlement velocity of tailings and the turbidity of the upper supernatant after adding polyaluminum chloride (PAC) and polyacrylamide (PAM). The results show that a flocculant dosage of 20 g/t is both efficient and cost-saving. Specifically, 20 g/t PAC can increase the average settlement velocity from 1.09 cm/min (natural sedimentation) to 1.42 cm/min, while 20 g/t PAM can increase the average settlement velocity to 41 cm/min. An increase in flocculant dosage can improve the initial settlement rate of tailings to a certain extent, but the overall settlement

收稿日期:2025-03-18. **基金项目**:湖南省自然科学基金项目(2023JJ50041);砖石质文物智慧化保护利用技术湖南省重点实验室开放基金(HUSE-2024-01);湖南省学位与研究生教学改革研究项目(2024LXBZZ046);湘潭大学 2025 年专业学位案例库建设项目(XDAL2025Y026);湘潭大学 2025 年教学改革研究项目-基于 CDIO 工程教育视域的土木工程专业继续教育教学改革.
作者简介:邓代强(1974-),男,博士,教授,博士生导师.主要研究方向:采矿与岩土工程. **E-mail**:65780042@qq.com
通信作者:李步贤(2001-),男,硕士研究生.主要研究方向:岩土工程. **E-mail**:lbx16670006079@163.com

velocity is not enhanced. Through the above research, mathematical models for natural sedimentation and flocculent sedimentation were established to express the settlement laws under various settlement conditions. This research can provide certain reference value for mine filling operations.

Keywords: mine filling; flocculent sedimentation; Polyaluminum chloride (PAC); Polyacrylamide (PAM); prediction model

0 引 言

随着全球矿业的快速发展,矿石开采和矿物加工过程中产生的尾砂处理逐渐成为矿山生产中的重要环节之一[1-2]. 尾砂是一种由矿石中有用矿物提取后遗留下的细粒废料,其体积庞大且含有不同含量的重金属、有毒物质等,直接排放不仅会对环境造成严重污染,还可能引发尾砂库的安全隐患[3]. 因此,如何有效处理尾砂并实现对尾砂的综合利用,成为当前矿山生产中亟待解决的重要问题. 目前,将尾砂经过处理后用于矿山采空区充填,是解决尾砂外排堆积问题的主要途径之一[4]. 而尾砂沉降作为矿山充填的核心环节,将直接影响矿山充填的效率和环境可持续性[5].

尾砂自然沉降是指在无外加化学助剂的情况下,仅依靠重力作用使尾砂颗粒在悬浮液中逐渐下沉并分离出上清液的过程[6]. 然而,由于尾砂颗粒通常呈现细小、分布均匀的特性,导致自然沉降速度较慢,难以达到高效固液分离的目标[7]. 此外,尾砂浆中的细小颗粒和胶体物质极易悬浮在水中,导致上清液浑浊,影响后续的水处理和回收利用. 因此,自然沉降通常难以满足现代矿山尾砂处理的要求[8-9]. 为解决自然沉降效率低下的问题,通过向尾砂浆中添加絮凝剂(如 PAC、PAM 等),使尾砂颗粒聚集成较大的絮团,从而加速颗粒沉降和固液分离[10]. 相比于细颗粒尾砂的自然沉降,絮凝沉降显著提高了沉降效率,能够在较短时间内实现尾砂浆固液的高效分离,得到较为清澈的上清液,这一技术大大提高了尾砂处理的经济效益[11]. 已有研究表明,合理控制絮凝剂掺量不仅可显著改善尾砂沉降性能,还能在保证效果的同时降低药剂使用成本[12]. 将絮凝沉降技术应用于尾砂处理过程,与绿色矿山的核心理念高度契合,有助于实现清洁生产、资源高效利用及矿山全生命周期的环境保护.

近年来,针对不同类型尾砂的絮凝沉降研究不断涌现,此方面工艺技术取得了显著进展. 如黎梦圆等[13]研究了超细磷尾砂在不同絮凝剂用量和入料浓度下的沉降行为,发现适当的絮凝剂添加量和浆体浓度能够显著提高尾砂的沉降速度,并优化了磷尾砂的充填体性能. 阮竹恩等[14]通过对不同絮凝剂和絮凝条件下全尾砂絮凝过程中絮团弦长的测定,分别研究絮凝和沉降两个过程,确定了 Magnafloc 525 絮凝剂,全尾砂料浆固相质量分数为 10%,絮凝剂单耗 10 g/t,絮凝剂溶液中絮凝剂质量分数为 0.025%,剪切速率 94.8/s 的最优絮凝条件. 林金山等[15]研究了银山矿全尾砂的絮凝沉降特性,通过比较不同絮凝剂的沉降效果,确定了最优絮凝剂及其用量. 在超细全尾砂的絮凝沉降研究中,焦国芮等[16]通过实验优化了絮凝剂的选择与参数调控,显著提高了沉降效率,并提供了实用的指导方案. 郑银珠[17]则对多种高分子絮凝剂进行了筛选,通过成本分析,推荐了最适合铜绿山矿尾砂处理的絮凝剂型号.

为大幅提高尾砂的利用率,本文结合采矿方法与充填工艺技术,采空区需要进行全尾砂胶结充填处理,高质量的胶结充填材料是矿山安全生产的有力保障,同时大量尾砂的综合利用可有效缓解尾矿库使用年限逐年骤减的压力. 鉴于安全生产、防灾减灾、生态环保及可持续发展等方面的强烈需求,通过实验分析尾砂材料性质,开展尾砂在不同条件下的沉降规律和特征实验,探究自然沉降和絮凝沉降的沉降规律及关键沉降技术指标,通过添加两种不同的絮凝剂(PAC、PAM)测定各自的沉降速度、推导尾砂自然沉降与絮凝沉降的数学预测模型,从而探究两种絮凝条件下的沉降机理,以期为矿山大批量尾砂快速沉降工作提供有效的技术依据.

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 全尾砂

实验尾砂来自某大型钼矿,经过容重实验测试得到该尾砂松散容重为 1.31 g/cm^3,密实容重为

1.58 g/cm^3,运用比重瓶法测得尾砂的比重为2.63.尾砂松散堆积密实度为0.498,最大孔隙率为50.19%;密实堆积密实度为0.601,最小孔隙率为39.92%.

1.1.2 絮凝剂

通过分析与调研,得到大多数矿山普遍使用的两种絮凝剂,絮凝剂名称为聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM),本矿山自有的PAC(左)和PAM(右),如图1所示.图1中聚合氯化铝颗粒较细,呈褐色粉末状;聚丙烯酰胺为白色晶体颗粒,为阴离子型聚丙烯酰胺,分子量为1 600万.两种类别絮凝剂数据统计如表1所示.

表1 絮凝材料类别统计

Tab.1 Classification of flocculant materials

絮凝剂名称	材料来源	材料单价/(元·t^{-1})	备注
PAC	矿山自有	2 000	絮凝沉降
PAM	矿山自有	13 500	絮凝沉降

1.2 实验方法

全尾砂自然沉降是指在不添加任何絮凝剂等化学药剂的情况下,尾砂颗粒在重力作用下在水体中自然下沉堆积的过程.尾砂的自然沉降性能决定着充填物料的沉降特性,对充填体的物理性质具有较大影响.实验过程中按照一定的时间间隔,仔细观察并记录初始体积、起始位置、沉降高度和最后体积参数及相关变量的变化规律,进而可计算出尾砂的沉降速度,分析尾砂料浆沉降速度的变化过程及规律.



图1 絮凝沉降实验所用的PAC(左)和PAM(右)

Fig.1 PAC (left) and PAM (right) used in the flocculant sedimentation experiment

南区尾砂库的全尾砂自然沉降实验测试起始料浆的浓度为20%,测试全尾砂的自然沉降速度随时间的变化规律.用1 000 mL的量筒盛装750 mL水,称量187.5 g南区尾砂库全尾砂,调配成质量浓度为20%的尾砂浆,用矿浆搅拌棒在量筒中搅拌数次直至混合均匀,将尾砂浆搅拌均匀后置于1 000 mL量筒中,记录量筒中尾砂沉降距离随时间的变化规律,时间分别为0、10、20、30、60、120、180、240、300、420、600、900、1 200、1 800 s时的尾砂沉降距离.

在南区尾砂库全尾砂絮凝沉降实验中,测试起始浓度同样为20%,测试全尾砂料浆分别添加两种絮凝剂后全尾砂料浆的沉降距离随时间的变化规律.首先,将几种絮凝剂都调配成0.3%的溶液,即实验室采用500 mL的烧杯加水400 mL,再采用精确电子天平称取絮凝剂颗粒1.2 g,用絮凝剂搅拌器进行搅拌,搅拌时间不少于30 min,转速太快容易打断絮凝剂分子链,太慢则絮凝剂溶液搅拌不均匀,故转速一般控制在100~300 r/min;其次,用1000 mL的量筒盛750 mL水,称量187.5 g南区尾砂库全尾砂,调配成质量浓度为20%的尾砂浆,用矿浆搅拌棒在量筒中来搅拌数次直至混合均匀;再次,絮凝剂添加量为10、20、35、50 g/t样品,分别添加3‰的絮凝剂溶液为0.625、1.25、2.187 5、3.125 g,分别添加3‰的絮凝剂溶液,也可近似为0.625、1.25、2.187 5、3.125 mL;最后,将全尾砂浆搅拌均匀后置于1 000 mL量筒中,记录量筒中尾砂沉降距离随时间的变化规律,时间分别为0、10、20、30、60、120、180、240、300、420、600、900、1 200、1 800 s时的尾砂沉降高度.

2 实验结果与分析

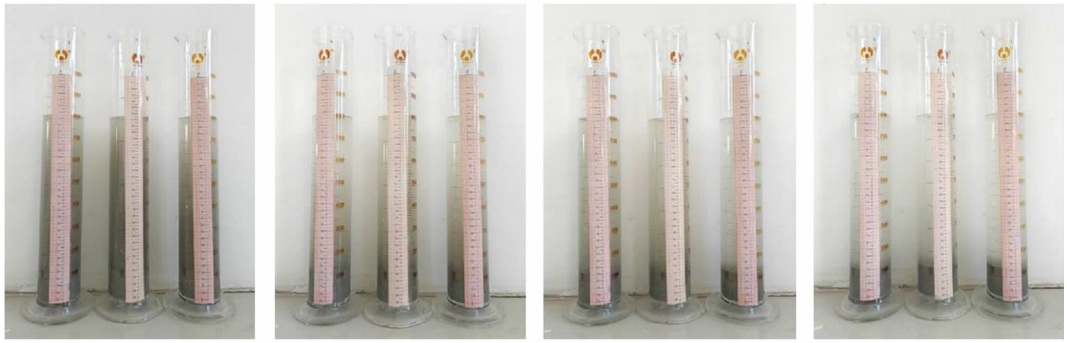
2.1 自然沉降

为了与絮凝沉降作对比,确定较适合的尾砂性质的絮凝剂种类及添加量,需要对不添加絮凝剂的尾砂料浆的沉降情况进行对比分析,因此进行了南区尾砂库全尾砂自然沉降测试,其测试结果如表2所示,不同时间段沉降实验照片见图2.

表 2　南区尾砂库全尾砂自然沉降记录表

Tab. 2　Natural sedimentation of full – tailings in the south area tailings pond

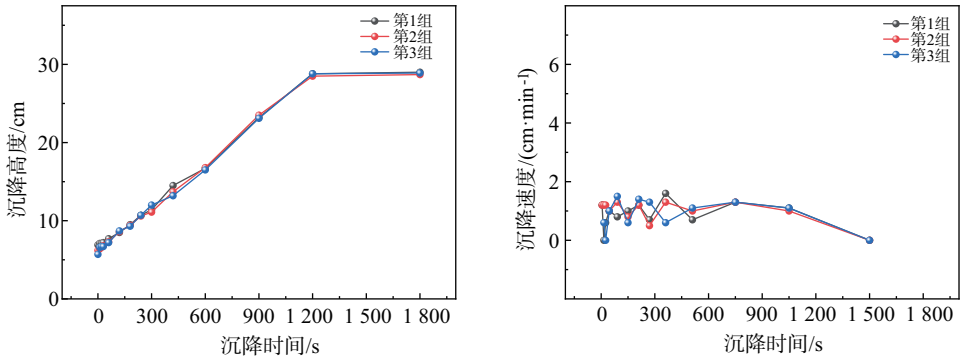
沉降时间/s	沉降高度/cm			沉降时间段/s	沉降速度/(cm·min^{-1})		
	第 1 组	第 2 组	第 3 组		第 1 组	第 2 组	第 3 组
0	6.9	6.2	5.7	[0 ~ 10)	1.2	1.2	5.4
10	7.1	6.4	6.6	[10 ~ 20)	0.0	1.2	0.6
20	7.1	6.6	6.7	[20 ~ 30)	0.6	1.2	0.0
30	7.2	6.8	6.7	[30 ~ 60)	1.0	1.0	1.0
60	7.7	7.3	7.2	[60 ~ 120)	0.8	1.3	1.5
120	8.5	8.6	8.7	[120 ~ 180)	1.0	0.8	0.6
180	9.5	9.4	9.3	[180 ~ 240)	1.2	1.2	1.4
240	10.7	10.6	10.7	[240 ~ 300)	0.7	0.5	1.3
300	11.4	11.1	12.0	[300 ~ 420)	1.6	1.3	0.6
420	14.5	13.7	13.2	[420 ~ 600)	0.7	1.0	1.1
600	16.7	16.8	16.5	[600 ~ 900)	1.3	1.3	1.3
900	23.2	23.5	23.1	[900 ~ 1 200)	1.1	1.0	1.1
1 200	28.8	28.5	28.8	[1 200 ~ 1 800)	0.0	0.0	0.0
1 800	29.0	28.7	28.9	—	—	—	–



(a)10 min　(b)20 min　(c)40 min　(d)720 min

图 2　不同时间段沉降实验照片

Fig. 2　Photographs of natural sedimentation experiments at different time intervals



(a)自然沉降下沉降高度随时间变化规律　(b)自然沉降下沉降速度随时间变化规律

图 3　自然沉降下沉降高度/沉降速度随时间变化规律

Fig. 3　Variation of sedimentation height/sedimentation rate with time under natural sedimentation

通过 3 组平行实验,得到了如图 3 所示的沉降高度与时间、沉降速度与时间的关系. 结果表明,尾砂自然沉降的高度与时间基本呈线性关系,即在 20 min 之前沉降时间与高度基本呈正相关关系,这一阶段尾

砂的沉降速度为1.09~1.15 cm/min. 到达20 min后沉降高度达到28.8 cm左右并开始趋于稳定,此时尾砂与水开始出现分层,悬浮液上部逐渐澄清,尾砂浆体开始进入压缩沉降阶段,经过实验观测,在720 min时悬浮液彻底澄清,如图2所示.

2.2 不同絮凝剂添加量对尾砂絮凝沉降的影响

由克托克斯定律[11]可知,全尾砂的颗粒的沉降速度与颗粒直径的平方成正比,与液体黏度成反比,具体关系如式(1)所示:

$$v=\frac{g(\rho_s-\rho_1)}{18\eta}d^2 \tag{1}$$

式中:v 为颗粒自由沉降的速度,m/s;g 为重力加速度,取9.81 m/s;η 为液体黏度,Pa·s;ρ_s 为颗粒密度,kg/m^3;ρ_1 为液体密度,kg/m^3;d 为颗粒直径,m.

由式(1)可以看出,要使全尾砂浆更快完成沉降,提高尾砂颗粒沉降速度,则需要将细颗粒聚集在一起从而增大颗粒直径,进而提高其沉降速度. 因此,在矿山充填作业中,往往会选择向尾砂料浆中添加絮凝剂以增大颗粒直径达到增大沉降速度的目的.

PAC是目前矿山充填最常用的无机高分子絮凝剂,其絮凝机理以电性中和作用为主[18-19]. 尾砂胶粒通常带电荷,加入PAC后,尾砂胶粒吸附与其自身电荷相反的离子,此时胶粒间排斥力减小,胶粒之间相互碰撞形成絮团,如图4所示,使得尾砂絮团颗粒直径增大,从而加速尾砂颗粒与水分离,促进尾砂细颗粒的沉降.

PAM是矿山常用的有机高分子絮凝剂,其絮凝机理以吸附架桥作用为主. 一般PAM具有数百万的分子量,经过水解后,产生较长的分子链,在分子链上有多个活性基团,尾砂颗粒和分子链碰撞后,尾砂颗粒吸附在分子链的各个活性基团上,而尾砂颗粒上的其他吸附点又能吸附在其他分子链上,随着尾砂颗粒与各个分子链不断吸附,形成了"尾砂-分子链-尾砂-分子链"的絮体,这就是吸附架桥作用[11,18-19],如图5所示. 通过吸附架桥作用,将一个个尾砂颗粒连接在一起,形成了直径较大的絮团,从而加快细尾砂颗粒的沉降,使上层液迅速变清.

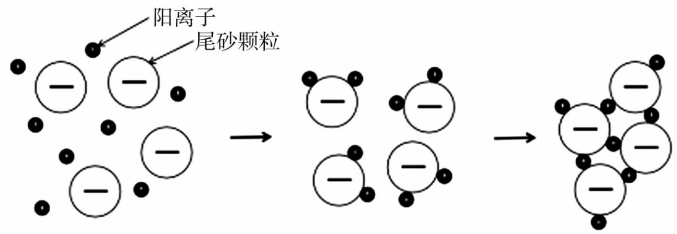


图4 PAC的电性中和作用

Fig. 4 Charge neutralization effect of PAC

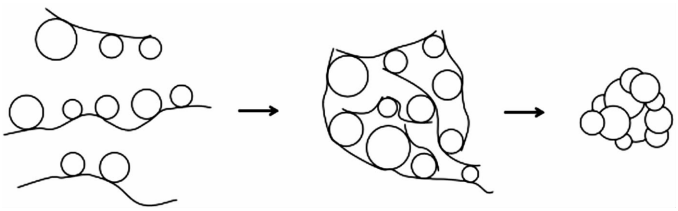


图5 PAM的吸附架桥作用

Fig. 5 Adsorption bridging effect of PAM

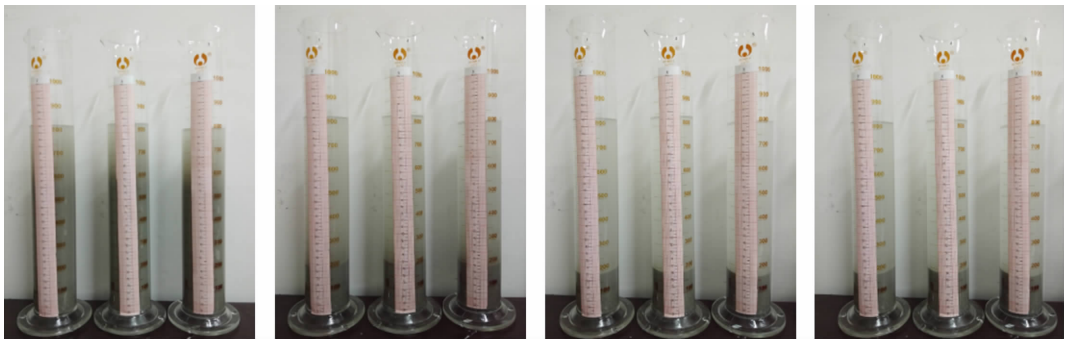
选择PAC和PAM两种类别絮凝剂材料进行南区尾砂库全尾砂絮凝沉降实验,分析不同絮凝剂单耗(10、20、35、50 g/t)下的絮凝沉降,实验结果如表3、表4所示,不同时间段沉降实验照片分别见图6和图8,沉降高度与沉降时间变化规律如图7和图9所示.

对于不同的PAC掺量,如图7所示,总体上看,10 g/t的PAC单耗下尾砂沉降速度要小于20 g/t,而当该絮凝剂单耗超过20 g/t时,增加絮凝剂的单耗并不能对尾砂的沉降速度产生显著影响. 对于1 min内不同絮凝剂单耗下的沉降速度,可以看出各絮凝剂下沉降速度大小关系为50 g/t>35 g/t>20 g/t>10 g/t,说明对于沉降初期,絮凝剂单耗的提升在前期可以加速尾砂颗粒的沉降. 这是因为在前期,絮凝剂的浓度越高,尾砂颗粒越容易获得溶液中的阳离子,也就能更快地与其他尾砂颗粒形成絮团,所以沉降速度会有所提升. 当所有尾砂颗粒所带的负电荷被溶液中的阳离子中和后,尾砂颗粒的沉降速度便不再受絮凝剂浓度的影响,这也是为什么不同单耗下尾砂沉降速度基本相同的原因. 如图6所示,相比于自然沉降,PAC絮凝沉降上清液的澄清度得到一定程度的提高. 综上所述,在该矿山实际工程应用之中,最适合的PAC单耗为20 g/t.

表 3　南区尾砂库全尾砂 PAC 絮凝沉降实验记录

Tab. 3　Experimental records of PAC flocculent sedimentation for unclassified tailings in the south area tailings pond

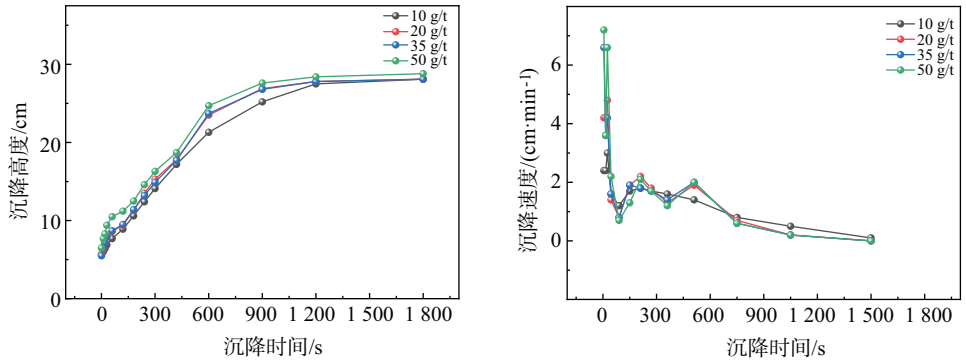
沉降时间/s	沉降高度/cm				沉降时间段/s	沉降速度/(cm·min^{-1})			
	10 g/t	20 g/t	35 g/t	50 g/t		10 g/t	20 g/t	35 g/t	50 g/t
0	5.6	5.7	5.5	6.5	0 ~ 10	2.4	4.2	6.6	7.2
10	6	6.4	6.6	7.7	10 ~ 20	2.4	4.2	3.6	3.6
20	6.4	7.1	7.2	8.3	20 ~ 30	3.0	4.8	4.2	6.6
30	6.9	7.9	7.9	9.4	30 ~ 60	1.6	1.4	1.6	2.2
60	7.7	8.6	8.7	10.5	60 ~ 120	1.2	0.8	0.8	0.7
120	8.9	9.4	9.5	11.2	120 ~ 180	1.7	1.9	1.9	1.3
180	10.6	11.3	11.4	12.5	180 ~ 240	1.8	2.2	1.8	2.1
240	12.4	13.5	13.2	14.6	240 ~ 300	1.7	1.8	1.7	1.7
300	14.1	15.3	14.9	16.3	300 ~ 420	1.6	1.3	1.4	1.2
420	17.2	17.8	17.7	18.7	420 ~ 600	1.4	1.9	2.0	2.0
600	21.3	23.5	23.7	24.7	600 ~ 900	0.8	0.7	0.6	0.6
900	25.2	26.9	26.8	27.6	900 ~ 1 200	0.5	0.2	0.2	0.2
1 200	27.5	27.8	27.8	28.4	1 200 ~ 1 800	0.1	0.0	0.0	0.0
1 800	28.1	28.1	28.1	28.8	—	—	—	—	–



(a)0.5 min　(b)10 min　(c)15 min　(d)20 min

图 6　不同时间段沉降实验照片

Fig. 6　Photographs of PAC flocculation sedimentation experiments at different time intervals



(a)PAC 絮凝沉降高度随时间变化规律　(b)PAC 絮凝沉降速度随时间变化规律

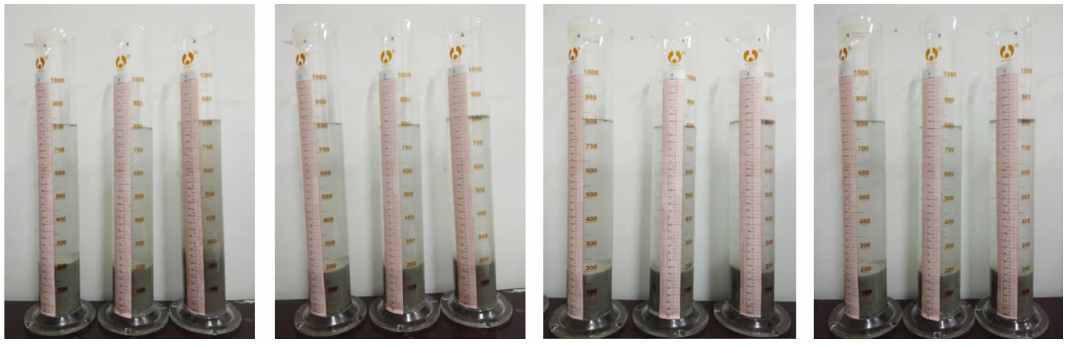
图 7　不同浓度 PAC 沉降高度/沉降速度随时间变化规律

Fig. 7　Variation of sedimentation height/sedimentation rate with time at different PAC concentrations

表 4 南区尾砂库全尾砂 PAM 絮凝沉降实验记录

Tab. 4 Experimental records of PAM flocculant sedimentation for unclassified tailings in the south area tailings pond

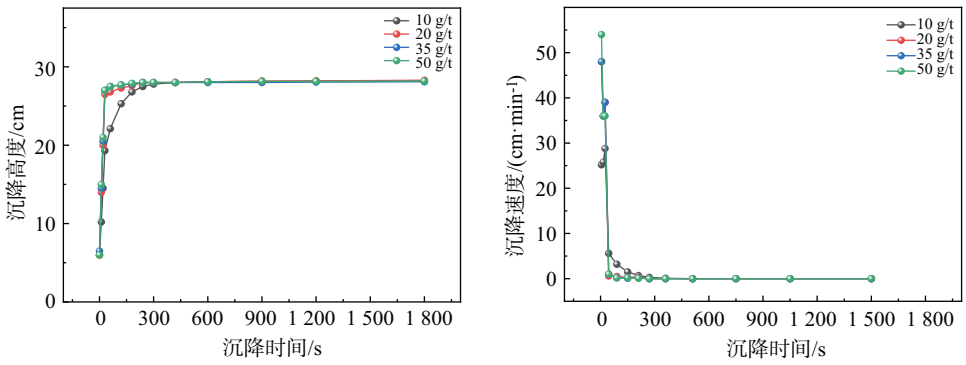
沉降时间/s	沉降高度/cm				沉降时间段/s	沉降速度/(cm·min^{-1})			
	10 g/t	20 g/t	35 g/t	50 g/t		10 g/t	20 g/t	35 g/t	50 g/t
0	6	6.0	6.5	6.0	[0~10)	25.2	48.0	48.0	54.0
10	10.2	14.0	14.5	15.0	[10~20)	25.8	36.0	36.0	36.0
20	14.5	20.0	20.5	21.0	[20~30)	28.8	39.0	39.0	36.0
30	19.3	26.5	27.0	27.0	[30~60)	5.6	0.6	1.0	1.0
60	22.1	26.8	27.5	27.5	[60~120)	3.2	0.5	0.2	0.2
120	25.3	27.3	27.7	27.7	[120~180)	1.5	0.3	0.1	0.2
180	26.8	27.6	27.8	27.9	[180~240)	0.7	0.4	0.2	0.1
240	27.5	28.0	28.0	28.0	[240~300)	0.3	0.0	0.0	0.0
300	27.8	28.0	28.0	28.0	[300~420)	0.1	0.0	0.0	0.0
420	28	28.0	28.0	28.0	[420~600)	0.0	0.0	0.0	0.0
600	28.1	28.1	28.0	28.1	[600~900)	0.0	0.0	0.0	0.0
900	28.1	28.2	28.1	28.2	[900~1 200)	0.0	0.0	0.0	0.0
1 200	28.2	28.2	28.1	28.2	[1 200~1 800)	0.0	0.0	0.0	0.0
1 800	28.2	28.3	28.1	28.2	—	—	—	—	–



(a)0.5 min (b)10 min (c)15 min (d)20 min

图 8 不同时间段沉降实验照片

Fig. 8 Photographs of PAM flocculant sedimentation experiments at different time intervals



(a)PAM 絮凝沉降高度随时间变化规律 (b)PAM 絮凝沉降速度随时间变化规律

图 9 不同浓度 PAM 沉降高度/沉降速度随时间变化规律

Fig. 9 Variation of sedimentation height/sedimentation rate with time at different PAM concentrations

对于不同的 PAM 单耗,如图 9 所示,从总体上看,当 PAM 单耗为 10 g/t 时,尾砂沉降速度要远小于 20 g/t,而当 PAM 单耗超过 20 g/t 时,絮凝剂单耗的增加不能明显提升沉降速率,3 种单耗下沉降速度基

本相同,说明 20 g/t 的絮凝剂单耗已经基本达到最大沉降速率,能够满足矿山充填作业的需求. 在加入 PAM 后的 30 s 内,可以看出各絮凝剂单耗下沉降速度大小关系为 50 g/t > 35 g/t = 20 g/t > 10 g/t,说明当絮凝剂单耗小于 20 g/t 时,絮凝剂单耗的增加能提高尾砂沉降速度,当絮凝剂单耗大于 20 g/t 时,絮凝剂单耗的增加并不能显著提升尾砂沉降速度. 当絮凝剂掺量过多时,还有可能导致过多絮凝剂吸附在尾砂上包裹尾砂颗粒,发生絮凝保护作用,尾砂的沉降效果较差[11,20]. 如图 8 所示,相比于自然沉降与 PAC 絮凝沉降,PAM 絮凝沉降的上清液的澄清度得到进一步提高,说明 PAM 对料浆中细尾砂颗粒的捕捉效果更好. 所以,综合矿山充填作业的效益来说,20 g/t 的 PAM 单耗更适合实际施工作业.

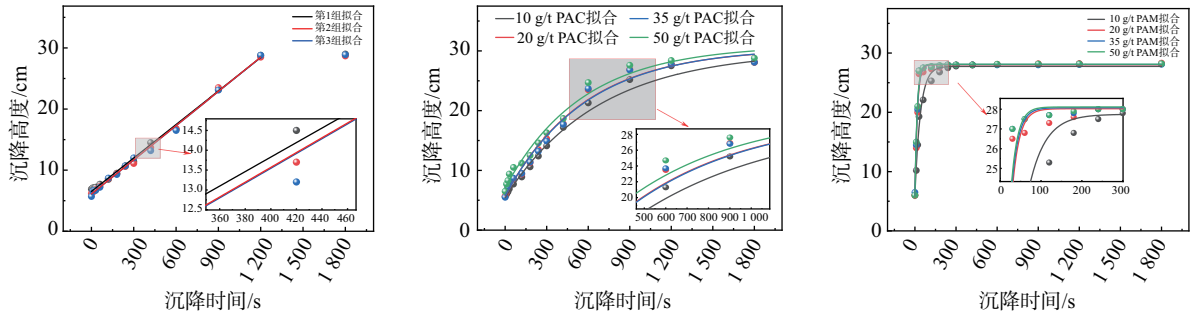
2.3 沉降高度随时间变化的数学模型拟合

以上研究表明,在不同的絮凝剂种类和单耗下,尾砂的沉降高度随时间变化规律存在差异,并且呈现一定的数学关系. 为了探究其中的数学关系,使用 Origin 软件将自然沉降、添加不同单耗 PAC 的尾砂沉降、添加不同单耗 PAM 的沉降进行拟合,得到不同的拟合曲线,如图 10 所示. 不同沉降情况下得到不同的拟合方程,其中自然沉降为线性拟合,其拟合方程如式(2)所示,拟合参数见表 5;絮凝沉降则采用非线性拟合,经过各拟合曲线对比,发现曲线比较符合一定的指数关系,经过拟合得到 PAC 与 PAM 絮凝沉降拟合方程如式(3)所示,PAC 与 PAM 的沉降模型拟合参数见表 6.

$$y = ax + b \tag{2}$$

$$y = a - bc^{x} \tag{3}$$

式中:x 为沉降时间;y 为沉降高度;a、b、c 为方程拟合参数.



(a)自然沉降拟合曲线　(b)PAC 絮凝沉降拟合曲线　(c)PAM 絮凝沉降拟合曲线

图 10　各沉降情况下尾砂沉降高度随时间变化拟合曲线

Fig. 10　Fitted curves of sedimentation height variation with time under different sedimentation conditions

表 5　自然沉降模型的拟合参数

Tab. 5　Fitting parameters of the natural sedimentation modle

参数	第 1 组	第 2 组	第 3 组
a	0. 018 27	0. 018 66	0. 018 65
b	6. 518 53	6. 105 93	6. 085 21
R^2	0. 998 64	0. 998 04	0. 998 64

表 6　PAC 与 PAM 絮凝沉降模型的拟合参数

Tab. 6　Fitting parameters of PAC and PAM flocculation sedimentation models

参数	PAC 模型				PAM 模型			
	10 g/t	20 g/t	35 g/t	50 g/t	10 g/t	20 g/t	35 g/t	50 g/t
a	30. 820 18	30. 448 03	30. 543 18	30. 923 18	27. 741 65	28. 021 34	28. 070 36	28. 110 65
b	25. 517 24	24. 740 77	24. 794 70	23. 839 17	21. 671 03	22. 575 75	22. 169 44	22. 572 24
c	0. 998 48	0. 998 24	0. 998 27	0. 998 20	0. 975 42	0. 944 36	0. 941 84	0. 938 73
R^2	0. 992 69	0. 986 80	0. 984 93	0. 984 40	0. 989 83	0. 982 86	0. 982 05	0. 986 93

由表5可知,自然沉降的数学模型的 $R^2>0.998$,说明该数学模型拟合度较好,也进一步说明自然沉降的沉降高度与沉降时间呈线性关系,所以该沉降模型适用于自然沉降的预测. 由表6可知,PAC和PAM絮凝沉降的数学拟合模型的 $R^2>0.982$,说明采用式(3)预测某一时间点的沉降高度通常比较准确. 所以在实际矿山生产过程中,可以采用式(2)预测自然沉降规律,采用式(3)预测PAC、PAM絮凝沉降规律,可对矿山尾砂沉降作业提供一定参考.

2.4 不同絮凝剂种类对尾砂沉降的影响

为探究PAC和PAM对尾砂沉降的促进效果,将自然沉降与添加相同单耗的PAC和PAM进行对比,实验数据如表7~表10所示,沉降高度与时间变化曲线见图11~图14.

表7 自然沉降与掺量为10 g/t的PAC和PAM絮凝沉降实验记录

Tab. 7 Experimental records of natural sedimentation and flocculant sedimentation with 20 g/t PAC and PAM

沉降时间/s	自然沉降沉降高度/cm	PAC沉降高度/cm	PAM沉降高度/cm	沉降时间段/s	自然沉降沉降速度/(cm·min^{-1})	PAC沉降速度/(cm·min^{-1})	PAM沉降速度/(cm·min^{-1})
0	6.9	5.6	6	[0~10)	1.2	2.4	25.2
10	7.1	6	10.2	[10~20)	0.0	2.4	25.8
20	7.1	6.4	14.5	[20~30)	0.6	3.0	28.8
30	7.2	6.9	19.3	[30~60)	1.0	1.6	5.6
60	7.7	7.7	22.1	[60~120)	0.8	1.2	3.2
120	8.5	8.9	25.3	[120~180)	1.0	1.7	1.5
180	9.5	10.6	26.8	[180~240)	1.2	1.8	0.7
240	10.7	12.4	27.5	[240~300)	0.7	1.7	0.3
300	11.4	14.1	27.8	[300~420)	1.6	1.6	0.1
420	14.5	17.2	28	[420~600)	0.7	1.4	0.0
600	16.7	21.3	28.1	[600~900)	1.3	0.8	0.0
900	23.2	25.2	28.1	[900~1 200)	1.1	0.5	0.0
1 200	28.8	27.5	28.2	[1 200~1 800)	0.0	0.1	0.0
1 800	29.0	28.1	28.2	—	—	—	-

表8 自然沉降与掺量为20 g/t的PAC和PAM絮凝沉降实验记录

Tab. 8 Experimental records of natural sedimentation and flocculation sedimentation with 20 g/t PAC and PAM

沉降时间/s	自然沉降沉降高度/cm	PAC沉降高度/cm	PAM沉降高度/cm	沉降时间段/s	自然沉降沉降速度/(cm·min^{-1})	PAC沉降速度/(cm·min^{-1})	PAM沉降速度/(cm·min^{-1})
0	6.9	5.7	6	[0~10)	1.2	4.2	48.0
10	7.1	6.4	14	[10~20)	0.0	4.2	36.0
20	7.1	7.1	20	[20~30)	0.6	4.8	39.0
30	7.2	7.9	26.5	[30~60)	1.0	1.4	0.6
60	7.7	8.6	26.8	[60~120)	0.8	0.8	0.5
120	8.5	9.4	27.3	[120~180)	1.0	1.9	0.3
180	9.5	11.3	27.6	[180~240)	1.2	2.2	0.4
240	10.7	13.5	28	[240~300)	0.7	1.8	0.0
300	11.4	15.3	28	[300~420)	1.6	1.3	0.0
420	14.5	17.8	28	[420~600)	0.7	1.9	0.0
600	16.7	23.5	28.1	[600~900)	1.3	0.7	0.0
900	23.2	26.9	28.2	[900~1 200)	1.1	0.2	0.0
1 200	28.8	27.8	28.2	[1 200~1 800)	0.0	0.0	0.0
1 800	29.0	28.1	28.3	—	—	—	-

表 9　自然沉降与掺量为 35 g/t 的 PAC 和 PAM 絮凝沉降实验记录

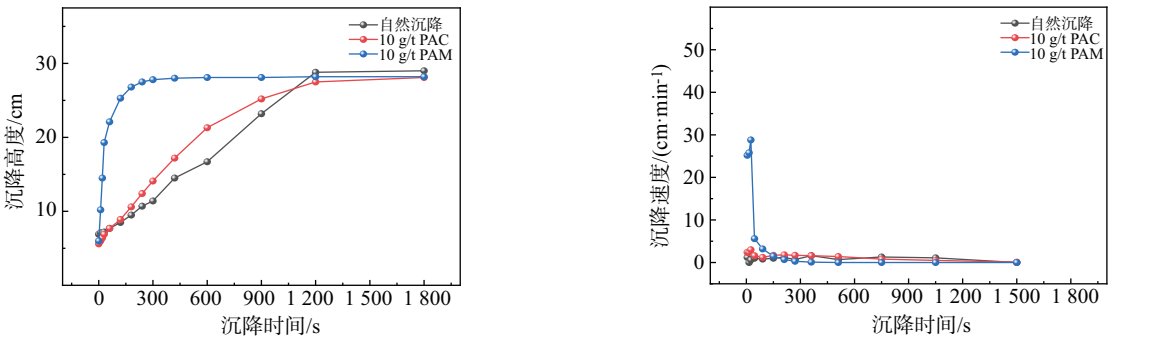
Tab. 9　Experimental records of natural sedimentation and flocculation sedimentation with 35 g/t PAC and PAM

沉降时间/s	自然沉降沉降高度/cm	PAC 沉降高度/cm	PAM 沉降高度/cm	沉降时间段/s	自然沉降沉降速度/(cm·min^{-1})	PAC 沉降速度/(cm·min^{-1})	PAM 沉降速度/(cm·min^{-1})
0	6.9	5.5	6.5	[0~10)	1.2	6.6	48.0
10	7.1	6.6	14.5	[10~20)	0.0	3.6	36.0
20	7.1	7.2	20.5	[20~30)	0.6	4.2	39.0
30	7.2	7.9	27.0	[30~60)	1.0	1.6	1.0
60	7.7	8.7	27.5	[60~120)	0.8	0.8	0.2
120	8.5	9.5	27.7	[120~180)	1.0	1.9	0.1
180	9.5	11.4	27.8	[180~240)	1.2	1.8	0.2
240	10.7	13.2	28	[240~300)	0.7	1.7	0.0
300	11.4	14.9	28	[300~420)	1.6	1.4	0.0
420	14.5	17.7	28	[420~600)	0.7	2.0	0.0
600	16.7	23.7	28	[600~900)	1.3	0.6	0.0
900	23.2	26.8	28	[900~1 200)	1.1	0.2	0.0
1 200	28.8	27.8	28.1	[1 200~1 800)	0.0	0.0	0.0
1 800	29.0	28.1	28.1	—	—	—	–

表 10　自然沉降与掺量为 50 g/t 的 PAC 和 PAM 絮凝沉降实验记录

Tab. 10　Experimental records of natural sedimentation and flocculation sedimentation with 50 g/t PAC and PAM

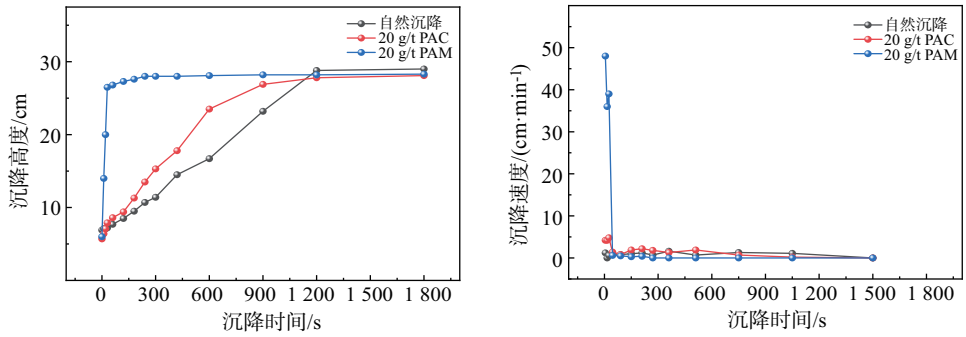
沉降时间/s	自然沉降沉降高度/cm	PAC 沉降高度/cm	PAM 沉降高度/cm	沉降时间段/s	自然沉降沉降速度/(cm·min^{-1})	PAC 沉降速度/(cm·min^{-1})	PAM 沉降速度/(cm·min^{-1})
0	6.9	6.5	6	[0~10)	1.2	7.2	54.0
10	7.1	7.7	15	[10~20)	0.0	3.6	36.0
20	7.1	8.3	21	[20~30)	0.6	6.6	36.0
30	7.2	9.4	27	[30~60)	1.0	2.2	1.0
60	7.7	10.5	27.5	[60~120)	0.8	0.7	0.2
120	8.5	11.2	27.7	[120~180)	1.0	1.3	0.2
180	9.5	12.5	27.9	[180~240)	1.2	2.1	0.1
240	10.7	14.6	28	[240~300)	0.7	1.7	0.0
300	11.4	16.3	28	[300~420)	1.6	1.2	0.0
420	14.5	18.7	28	[420~600)	0.7	2.0	0.0
600	16.7	24.7	28.1	[600~900)	1.3	0.6	0.0
900	23.2	27.6	28.2	[900~1 200)	1.1	0.2	0.0
1 200	28.8	28.4	28.2	[1 200~1 800)	0.0	0.0	0.0
1 800	29.0	28.8	28.2	—	—	—	–



(a) 自然沉降与絮凝剂为 10 g/t 的沉降高度随时间变化规律　　(b) 自然沉降与絮凝剂为 10 g/t 的沉降速度随时间变化规律

图 11　自然沉降与絮凝剂添加量为 10 g/t 的沉降高度/沉降速度随时间变化规律

Fig. 11　Variation of sedimentation height/sedimentation rate with time for natural sedimentation and 10 g/t flocculant addition

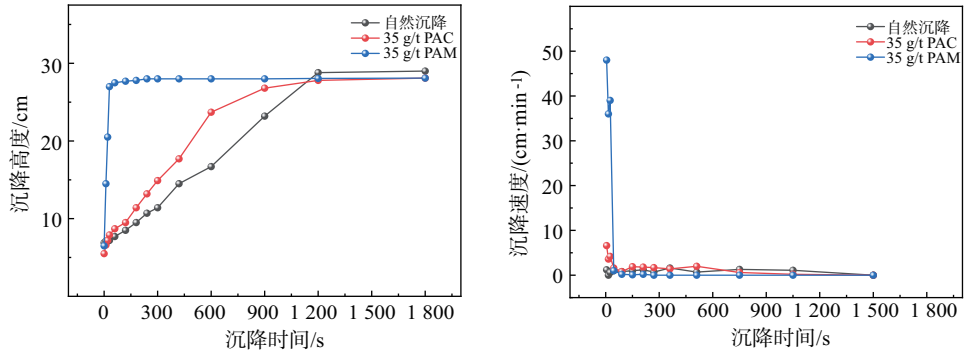


(a) 自然沉降与絮凝剂为 20 g/t 的沉降高度随时间变化规律

(b) 自然沉降与絮凝剂为 20 g/t 的沉降速度随时间变化规律

图 12 自然沉降与絮凝剂为 20 g/t 的沉降高度/沉降速度随时间变化规律

Fig. 12 Variation of sedimentation height/sedimentation rate with time for natural sedimentation and 20 g/t flocculant addition

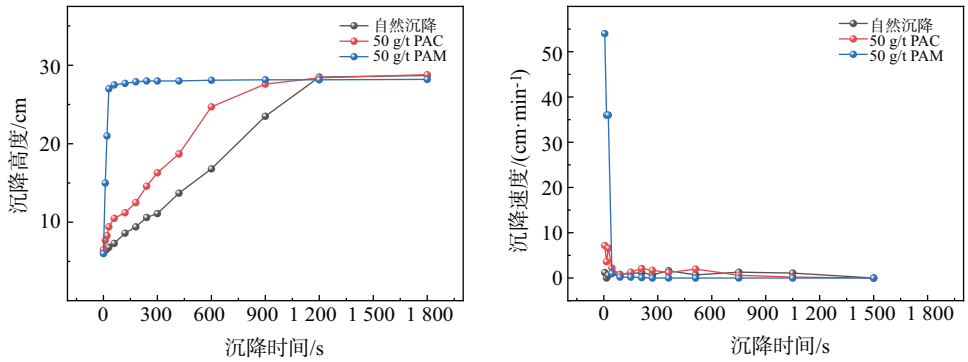


(a) 自然沉降与絮凝剂为 35 g/t 的沉降高度随时间变化规律

(b) 自然沉降与絮凝剂为 35 g/t 的沉降速度随时间变化规律

图 13 自然沉降与絮凝剂添加量为 35 g/t 的沉降高度/沉降速度随时间变化规律

Fig. 13 Variation of sedimentation height/sedimentation rate with time for natural sedimentation and 35 g/t flocculant addition



(a) 自然沉降与絮凝剂为 50 g/t 的沉降高度随时间变化规律

(b) 自然沉降与絮凝剂为 50 g/t 的沉降速度随时间变化规律

图 14 自然沉降与絮凝剂添加量为 50g/t 的沉降高度/沉降速度随时间变化规律

Fig. 14 Variation of sedimentation height/sedimentation rate with time for natural sedimentation and 50 g/t flocculant addition

由图 11 ~ 图 14 可以看出,无论添加多少絮凝剂,沉降效率都是 PAM > PAC > 自然沉降,自然沉降的速率基本按照线性增长,沉降速度基本维持在 1.1 cm/min 左右. 当加入 PAC 后,在前 30 s 内,PAC 对沉降速度的

提升较为明显,能达到2.4 ~7.2 cm/min ,将近自然沉降速度的2 ~7 倍,但是,从30 s ~10 min,沉降速度逐渐降低,10 min 后,由于此时上部清液尾砂颗粒不多,沉降速度进一步降低,到 20 min 后,水中的尾砂颗粒基本完成沉降. 当将絮凝剂替换成 PAM 后,与 PAC 相比,料浆沉降速度有了明显的提升,在 1 min 以内沉降高度最少达到了 22.1 cm,平均沉降速度最低达到 25.2 cm/min. 对于悬浮液的澄清度,料浆上清液在相同时间点的澄清度有很大区别. 与自然沉降相比,加入 PAC 后,溶液变得更加澄清,在 10 min 时就出现明显分层. 而加入 PAM 后,料浆在 1 min 内产生明显的分层,悬浮液也比加入 PAC 后更澄清. 以上均可说明 PAM 的沉降效率远高于 PAC. 综上,PAM 是更好地加速尾砂沉降的絮凝剂,能更好地将尾砂与水分离.

3　结 论

本研究将不同絮凝剂以及添加量加入尾砂料浆中,探究絮凝剂种类和添加量对尾砂沉降速度的影响规律,并通过关键沉降指标的拟合曲线得到絮凝沉降的基本预测模型,通过以上研究可以得出如下结论:

1)对于 10、20、35、50 g/t 的絮凝剂单耗下的 PAC 和 PAM,将絮凝剂单耗从 10 g/t 增加到 20 g/t 时,尾砂沉降速度有了明显的提升,但是当絮凝剂单耗大于 20 g/t 时,虽然在前 1 min 左右单耗的增加可以一定程度上提升沉降速度,但是从总体上看,絮凝剂单耗的增加对尾砂整个过程的沉降速度并没有太大的影响,说明存在一个最优掺量使得尾砂的沉降效果较好的同时又具备良好的经济效益. 所以,20 g/t 的絮凝剂单耗已经能够很好地满足矿山充填作业的需求,同时又不会造成絮凝剂的浪费.

2)PAM 和 PAC 都能很好地提升矿山尾砂砂浆的沉降效率,PAM 对尾砂沉降效率的提升效果要比 PAC 更好. 但是如表 1 所示,PAM 单价为 PAC 的 6.75 倍,对于一般的矿山充填作业,可以选择使用 PAC 作为尾砂沉降的絮凝剂,在保证正常生产的同时又能节省成本,提高矿山生产的综合效益. 对尾砂处理要求较高的矿山,PAM 能够在很短的时间内更完全地捕捉溶液中的细尾砂颗粒,此时应当选择 PAM 作为尾砂沉降的絮凝剂. 因此,应当根据矿山实际生产要求选择絮凝剂.

3)自然沉降和絮凝沉降的规律不同,二者沉降的预测模型也会有所不同,本文所提的两种预测模型均能较好地反映自然沉降或絮凝沉降的规律,通过这两种预测模型,能大致预测某一时间点的沉降高度或添加絮凝剂后尾砂的沉降时间和沉降速度等. 通过这些预测,合理设置设备及材料的相关参数,可对尾砂沉降高度有更加精确的判断,有效提升矿山全尾砂充填效率,更能减少矿产开采过程中对环境的破坏,有力推进绿色矿山的建设,为矿山的可持续发展提供重要保障.

4)实验表明,PAC 和 PAM 都能使上清液更加澄清,且 PAM 效果最好. 因此,通过添加絮凝剂使尾砂料浆上清液更加澄清,即上清液中残余的尾砂细颗粒更少,这大大降低了污水处理的压力,节省污水处理成本,大大提高矿山水资源利用率,减少对周边水体的污染. 因此,通过添加絮凝剂能够缓解尾砂处理对环境的污染,有利于矿山用水的循环利用,符合绿色矿山的发展理念.

参考文献:

[1] 李勇明,乔登攀,杨天雨,等. 立式砂仓连续高浓度稳定放砂工作模式的最佳储砂高度[J]. 有色金属工程,2024,14(1):138 -150.
Li Y M,Qiao D P,Yang T Y,et al. Optimal sand storage height of vertical sand silo in working mode of continuous high - concentration stable sand discharge[J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(1):138 -150.

[2] 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报,2022,44(1):11 -25.
Cheng H Y,Wu A X,Wu S C,et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(1):11 -25.

[3] 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.

[4] 温震江,霍思,任海锋,等. 安徽某铁矿分级尾砂胶结充填试验研究[J]. 中国矿山工程,2024,53(1):41 -47.
Wen Z J,Huo S,Ren H F,et al. Experimental study on cemented filling of classified tailings in an iron mine in Anhui Province[J]. China Mine Engineering,2024,53(1):41 -47.

[5] 孙德民,任建平,焦华喆,等. 某矿全尾砂胶结充填物料性能研究[J]. 金属矿山,2012(3):6 -9 +14.
Sun D M,Ren J P,Jiao H Z,et al. Study on the properties of the unclassified tailings cemented backfill materials in a mine[J].

Metal Mine,2012(3):6 - 9 + 14.

[6] 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.
Liu K S,Kang C K,Cui B Y,et al. Flocculation and settling performance and mechanism of a coppermolybdenum mixed concentrate in Heilongjiang Province[J]. China Mining Magazine,2024,33(7):245 - 253.

[7] 李勇明,乔登攀,杨天雨,等. 基于响应面法的全尾砂浆絮凝沉降多因素交互影响及参数优化研究[J]. 有色金属科学与工程,2024,15(6):901 - 910.
Li Y M,Qiao D P,Yang T Y,et al. Study on multiple factor interaction and parameter optimization of flocculation sedimentation of unclassified tailings slurry based on response surface method[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2024,15(6):901 - 910.

[8] Yue T,Wu X Q,Chen X,et al. A study on the flocculation and sedimentation of iron tailings slurry based on the regulating behavior of Fe^{3+}[J]. Minerals,2018,8(10):421.

[9] Wang C,Harbottle D,Liu Q X,et al. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice[J]. Minerals Engineering,2014,58:113 - 131.

[10] 焦华喆,王洪江,吴爱祥,等. 全尾砂絮凝沉降规律及其机理[J]. 北京科技大学学报,2010,32(6):702 - 707.
Jiao H Z,Wang H J,Wu A X,et al. Rule and mechanism of flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2010,32(6):702 - 707.

[11] 吴爱祥,周靓,尹升华,等. 全尾砂絮凝沉降的影响因素[J]. 中国有色金属学报,2016,26(2):439 - 446.
Wu A X,Zhou J,Yin S H,et al. Influence factors on flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2016,26(2):439 - 446.

[12] 王勇,吴爱祥,王洪江,等. 絮凝剂用量对尾矿浓密的影响机理[J]. 北京科技大学学报,2013,35(11):1419 - 1423.
Wang Y,Wu A X,Wang H J,et al. Influence mechanism of flocculant dosage on tailings thickening[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2013,35(11):1419 - 1423.

[13] 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.
Li M Y,Li H K,Guo L J,et al. Study on flocculation sedimentation characteristics and cementedpaste backfill materials properties based on ultrafine phosphorus tailings[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(5):28 - 39.

[14] 阮竹恩,吴爱祥,王建栋,等. 基于絮团弦长测定的全尾砂絮凝沉降行为[J]. 工程科学学报,2020,42(8):980 - 987.
Ruan Z E,Wu A X,Wang J D,et al. Flocculation and settling behavior of unclassified tailings based on measurement of floc chord length[J]. Chinese Journal of Engineering,2020,42(8):980 - 987.

[15] 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.

[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.
Jiao G R,Zou K H,Huang Y W,et al. Optimization of optimal flocculant ratio of superfine total tailings[J]. Copper Engineering,2023(6):153 - 159.

[17] 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.
Zheng Y Z. Experimental research on optimization selection of flocculant for tailing settlement in tonglushan mine[J]. China Mine Engineering,2023,52(5):71 - 75 + 88.

[18] 张艺邺. 辽宁地区两种铁尾砂絮凝沉降特性研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2023.
Zhang Y Y. Study on the flocculation sedimentation characteristics of two types of iron tailings in Liaoning region [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.

[19] 吴再海. 超细尾砂充填料浆絮凝沉降特性与浓密机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2022.
Wu Z H. Study on the flocculation sedimentation characteristics and thickening mechanism of ultrafine tailings backfill slurry [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.

[20] 杨晴,杨仕教,张冉玥. 基于上澄清液浊度的超细尾砂絮凝沉降试验[J]. 黄金科学技术,2022,30(6):948 - 957.
Yang Q,Yang S J,Zhang R Y. Flocculation sedimentation test of ultrafine tailings based on turbidity of supernatant liquid[J]. Gold Science and Technology,2022,30(6):948 - 957.

(编 辑:王丽娟)