



我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势

阮竹恩^{1,2,5}, 吴爱祥^{1,5}, 焦华喆³, 李翠平^{1,5}, 李公成⁴, 莫逸^{1,5}, 王洪江^{1,5}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学 顺德研究生院, 佛山 528399;

3. 河南理工大学 土木工程学院, 焦作 454000;

4. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 淄博 255000;

5. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 全尾砂料浆的高效和深度浓密是获得合格膏体浓度、决定膏体充填质量的关键。全尾砂高效絮凝是全尾砂料浆浓密的前提, 全尾砂絮团的快速沉降决定全尾砂料浆浓密的效率, 而全尾砂浓密床层的深度脱水决定全尾砂料浆浓密的效果。为此, 本文对近 20 年来我国在全尾砂料浆浓密方面的研究方法和研究成果进行了分析与总结, 详细分析了全尾砂絮凝行为及其动力学模型、全尾砂絮团沉降规律及其机理、全尾砂浓密床层深度脱水规律及其机理、深锥浓密机的耙架扭矩模型及关键结构参数设计, 并对未来发展趋势进行了展望。

关键词: 膏体充填; 全尾砂; 絮凝; 沉降; 浓密; 脱水

文章编号: 1004-0609(2022)-01-0286-16

中图分类号: TD853

文献标志码: A

引文格式: 阮竹恩, 吴爱祥, 焦华喆, 等. 我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 286–301. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42459

RUAN Zhu-en, WU Ai-xiang, JIAO Hua-zhe, et al. Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1): 286–301. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42459

金属矿业有力地支撑了国民经济的快速发展, 但是金属矿开采也产生了尾砂等大量固体废弃物。据统计, 尾砂占一般工业固体废弃物的 1/3 左右, 成为工业废物的第一排放大户^[1], 导致了严重的安全与环境问题^[2–3]。

全尾砂膏体充填技术具有安全、环保、经济、高效的显著优势, 可实现“一废治两害”的目标, 在全世界范围内广泛应用于尾砂处置与采空区的治理, 是实现矿山绿色开采的关键技术之一^[4–7]。其中, 全尾砂料浆的高效和深度浓密是获得合格膏体浓度、决定膏体充填质量的关键。为此, 近 20 年来, 我国科研工作者、设备工程技术人员以及矿

山技术人员围绕着全尾砂料浆的浓密进行了广泛而深入的研究。

本文对我国在全尾砂料浆浓密研究方面取得的进展进行了全面的分析与总结, 并对其未来发展趋势进行了展望。

1 全尾砂料浆的性质

1.1 全尾砂的性质

全尾砂是指金属或非金属矿山进行矿石选别后排出的未经分选的全粒级尾砂^[8]。

粒级分布是全尾砂最重要的性质之一。一般情

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52130404, 51774039, 52004152); 中国博士后科学基金资助项目(2021M690011); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE100)

收稿日期: 2021-09-30; **修订日期:** 2021-10-28

通信作者: 吴爱祥, 教授, 博士; 电话: 010-62333563; E-mail: wuaixiang@126.com

况下,全尾砂的最大粒径都在 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 以下,而全尾砂膏体充填要求全尾砂中 $<20\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒含量需在15%以上^[8-9]。随着经济发展对矿产品的不断需求和选矿技术的不断发展进步,选矿过程中产生的尾砂粒度越来越细,甚至达到了超细的级别。目前,对于全尾砂粒级的“超细”的界定,国外SIVAMOHAN等^[10]从重力浓密的角度认为 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒为超细颗粒,而PATIL等^[11]则认为 $<10\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒为超细颗粒;国内吴爱祥等^[12]从粒级组成的角度对超细全尾砂进行了界定:平均粒径 $<30\text{ }\mu\text{m}$ 、直径 $<19\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒含量大于50%、直径 $>74\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒含量小于10%、直径 $>37\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒含量小于30%。

全尾砂的密度、形貌和化学组成也显著影响全尾砂料浆的浓密效果。全尾砂的密度一般为 $2.1\sim 3.1\text{ g/cm}^3$ 之间。全尾砂颗粒形貌不规则,且表面粗糙。全尾砂的化学组成主要有 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 等,其中有的全尾砂中 SiO_2 的含量高达75%^[13]。

1.2 全尾砂料浆的性质

从选矿厂来的全尾砂都是以低浓度料浆的形式存在,全尾砂料浆中的质量浓度一般都在40%以下,料浆呈悬浮液状态。因为全尾砂颗粒与水的强相互作用,在自然状态下全尾砂料浆很难实现快速的固液分离,常需要通过添加絮凝剂并应用机械设备来实现全尾砂料浆的深度浓密脱水。

2 深锥浓密机内全尾砂料浆浓密过程

应用深锥浓密机进行浓密是常见的全尾砂料浆深度浓密技术之一^[5-7, 14-16]。云南会泽铅锌矿和内蒙古乌山铜钼矿分别是我国第一家应用深锥浓密机进行全尾砂膏体充填^[17-18]和全尾砂膏体堆存^[12, 19]的矿山。全尾砂料浆在深锥浓密机内的浓密过程示意如图1所示,主要分为以下三个过程。

1) 全尾砂絮凝:低浓度全尾砂料浆进入深锥浓密机上部的给料井后,在流场剪切作用下,全尾砂颗粒和絮凝剂高分子不断混合、碰撞、吸附、絮凝,形成大尺寸的全尾砂絮团^[20]。

2) 全尾砂絮团沉降:全尾砂絮团从给料井进入深锥浓密机的沉降区域后,经历自由沉降、干涉沉

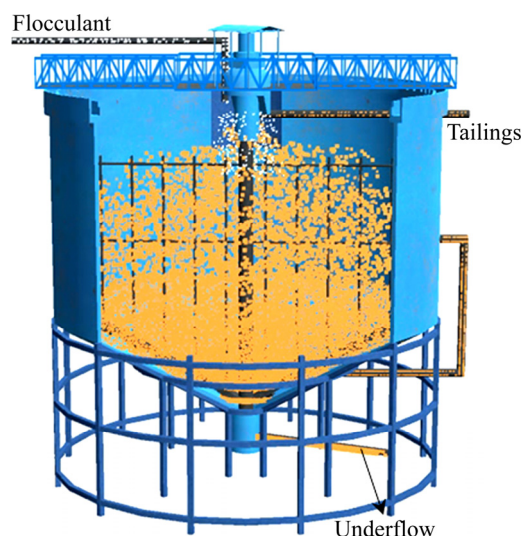


图1 深锥浓密机内的全尾砂浓密过程示意图

Fig. 1 Schematic of full-tailings thickening in deep cone thickener

降和压缩沉降等多个沉降过程,在深锥浓密机下部形成全尾砂浓密床层^[21]。

3) 全尾砂浓密床层脱水:全尾砂浓密床层在泥层压力和耙架剪切的联合作用下,絮团内的内含水从絮团内部排出形成絮团间的自由水^[22-23];然后在导水杆作用下,浓密床层内形成导水通道,自由水沿着导水通道逆向上排并最终从深锥浓密机上部的溢流槽排出,从而在深锥浓密机的底部获得高浓度的底流^[24-26]。

3 全尾砂料浆浓密研究方法

3.1 全尾砂絮凝行为的研究方法

全尾砂在深锥浓密机内的絮凝行为主要发生在给料井内。目前对于全尾砂的絮凝行为的研究主要有实验研究、理论分析和数值模拟。

1) 实验研究方法:采用絮凝实验杯开展搅拌絮凝实验,模拟给料井内全尾砂颗粒在流场湍流作用下与高分子絮凝剂混合、絮凝过程,并可用聚焦光束反射测量(Focused beam reflectance measurement, FBRM)技术实时监测絮凝过程全尾砂絮团尺寸的演化规律^[27-28]。

2) 理论分析方法:以Smoluchowski动力学模型^[29]为基础,从理论的角度分析全尾砂絮凝过程中聚并过程与破碎过程,进而建立聚并模型与破碎模

型,再以群体平衡模型(Population balance model, PBM)^[30]为基本框架,构建出全尾砂絮凝的动力学模型^[31]。

3) 数值模拟方法:应用 MATLAB 软件对结合全尾砂絮凝动力学模型数值模拟分析全尾砂絮团尺寸随着时间的演化规律;同时可应用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)数值模拟技术耦合全尾砂絮凝动力学模型,对深锥浓密机内全尾砂絮团的时空分布与演化进行模拟分析^[31-32]。

3.2 全尾砂絮团沉降行为的研究方法

对于全尾砂絮团的沉降行为主要采用静态沉降实验进行研究。在沉降柱或量筒中,应用固液分界面的沉降速度来表征全尾砂絮团的沉降速度^[13, 23, 28, 33-37]。对于分界面沉降速度,主要有以沉降过程中瞬时最大速度^[33-34]、整个下降过程的平均速度^[13]和线性下降阶段的初始沉降速度^[28, 37]三种表示方法。其中,以最大速度计算出的固体通量偏大,以平均速度计算出的固体通量偏小,而以初始沉降速计算出的固体通量介于上述两者之间,因此以初始沉降速度来表征全尾砂絮团的沉降速度更合理。

近年来,人们应用浓密效果因子来综合表征全尾砂絮团的沉降效果,浓密效果因子为沉降时间 t_1 内的平均沉降速度和 t_2 时刻底流浓度的乘积^[38]。但是对于 t_1 和 t_2 的合理取值还有待进一步研究。

3.3 全尾砂浓密床层脱水的研究方法

为了模拟研究全尾砂浓密床层脱水过程,除了采用静态沉降实验分析絮凝沉降的底流浓度以外^[33, 39-40],更多地采用自制小型连续浓密机开展动态浓密实验,分析絮凝条件、泥层高度或压力、停留时间、耙架转速等因素影响下的全尾砂浓密床层脱水规律^[24, 26, 40-54]。同时,为了更加接近生产实际,可采用半工业化中型深锥浓密实验系统^[55]、工业化大型深锥浓密实验系统^[56]开展全尾砂料浆的浓密床层脱水研究。小型、中型、大型浓密实验系统如图 2 所示,它们的主体结构 and 深锥浓密机结构相似,具有给料井、装有导水杆的耙架、浓密池体等关键结构。

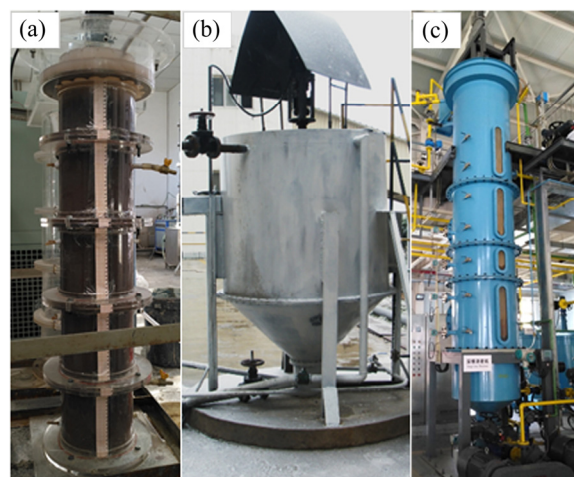


图 2 浓密实验系统

Fig. 2 Thickening experiment system: (a) Small-scale; (b) Semi-industrial pilot-scale; (c) Industrial large-scale

3.4 全尾砂絮团特性的表征方法

絮团是全尾砂在深锥浓密机内存在的主要形式,因此对絮团特性的表征是研究全尾砂料浆浓密的关键。目前国内对全尾砂絮团特性的主要关注点为絮团的尺寸和结构,而对絮团的强度关注较少。

对于絮团尺寸,主要是采用激光粒度仪^[57]、高速摄像系统^[20]、FBRM^[28, 53]对全尾砂絮团尺寸进行测量;对于絮团结构,主要是采用显微 CT^[58]、工业 CT^[22, 24-25, 47, 50, 52]、扫描电子显微镜^[51, 54, 59-65]或环境扫描电子显微镜^[36, 66]、颗粒录像显微镜(Particle video microscope, PVM)^[53]等设备获取全尾砂絮团的结构或全尾砂絮团的孔隙结构后再应用图像处理技术,分析全尾砂絮团的分形维数。其中联合使用 FBRM 和 PVM 可以原位实时监测絮团的尺寸和结构^[45, 53],避免了取样过程对测量结果的影响,是目前对全尾砂絮凝及沉降浓密过程比较先进的监测设备。FBRM 所测得的絮团尺寸为弦长,其探头结构和弦长测试原理如图 3 所示。PVM 获取的全尾砂絮团结构如图 4 所示。但是 FBRM 和 PVM 只能对全尾砂料浆浓密过程中某一点进行监测,不能同时对整个浓密区域进行监测。

对于絮团的强度,应用压缩屈服应力可间接表示全尾砂絮团网状结构强度^[67]。压缩屈服应力是指当絮团网状结构产生不可恢复的屈服形变,从而达到更高的浓度所能承受的最大压缩应力。同时,也可对絮团内部颗粒之间的相互作用力进行分析^[68],进而对絮团的强度进行表征。

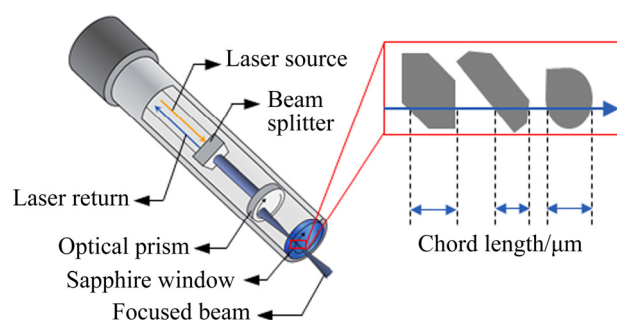


图 3 FBRM 探头结构和弦长测试原理示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of FBRM probe structure and chord length measuring principle

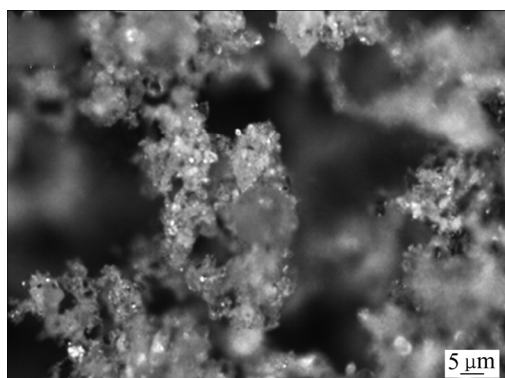


图 4 PVM 监测获取的全尾砂絮团结构

Fig. 4 Structure of full-tailings floc obtained by PVM

4 全尾砂料浆浓密研究进展

4.1 全尾砂絮凝行为及其动力学模型

4.1.1 全尾砂絮凝行为研究

由于全尾砂的絮凝和沉降两个过程往往同时发生, 并且给料井内的流场剪切速率也不断变化, 因此, 我国针对全尾砂絮凝行为本身的研究相对较少, 而对全尾砂的絮凝沉降的研究较多。

在常见的静态絮凝沉降实验过程中, 首先向全尾砂料浆中加入高分子絮凝剂溶液, 再应用自制的搅拌棒上下搅动^[23, 33, 35, 40, 69]或上下晃动量筒^[37-38], 使得全尾砂快速絮凝; 但由于无法计算搅动或晃动产生的流场剪切速率, 从而无法对全尾砂絮凝过程进行定量研究。在动态浓密实验过程中, 通过三通管的方式将全尾砂料浆和絮凝剂溶液加入混合进料管中, 全尾砂在混合进料管以及沉降柱的上部发生絮凝^[24, 40, 43, 48-49]; 但由于忽视了混合管直径、长度以及料浆流速对絮凝的影响, 因此也不能对全尾砂絮凝过程进行量化研究。

为了对全尾砂絮凝效果进行定量分析, 采用超级絮凝测试仪, 通过产生不同的流场剪切速率, 研究流场剪切作用、全尾砂料浆性质和絮凝剂性质等絮凝条件对全尾砂絮凝效果的影响^[70]。研究发现, 全尾砂料浆的相对絮凝率在一定范围内随着料浆 pH、絮凝剂单耗、流场剪切速率的增加而先增加后减少, 并随着浆料浓度的增加逐渐减少^[70]。同时, 在流场的高速剪切作用下, 全尾砂料浆在极短时间内(<6 s)就可达到很好的絮凝效果, 这对于深锥浓密机新型给料井结构的设计具有重要参考意义^[70]。

但是, 上述静态沉降实验、动态浓密实验和超级絮凝实验中, 采用全尾砂料浆絮凝沉降过程的沉降速度、或沉降后上清液的浊度、或絮凝前后料浆料浆浊度的变化来间接评价絮凝效果, 缺少对全尾砂絮凝效果的直接评价。为此, 应用絮凝实验杯开展搅拌絮凝实验, 通过调整搅拌叶片的转速产生不同的流场剪切速率, 然后再应用 FBRM 原位实时监测絮凝过程中全尾砂絮团尺寸的变化规律, 从而实现对全尾砂絮凝过程的定量描述和对絮凝效果的直接评价^[27-28]。研究发现, 在不同絮凝条件下, 全尾砂料浆中全尾砂絮团首先快速生长、絮团平均尺寸快速达到峰值, 之后在流场剪切的持续作用下, 絮团不断破碎或重构, 平均尺寸逐渐下降直至达到稳定状态, 其中絮团平均尺寸达到峰值的时间为 30 s 左右。但是, 该方法也仅仅关注了絮团的尺寸, 而对絮团的结构、强度等特征缺少研究。剪切作用下全尾砂絮凝过程示意如图 5 所示。

4.1.2 全尾砂絮凝动力学模型

全尾砂粒级范围分布广, 既有 $<1 \mu\text{m}$ 的极细颗粒, 也有 $>40 \mu\text{m}$ 的颗粒。根据不同尺寸颗粒的主

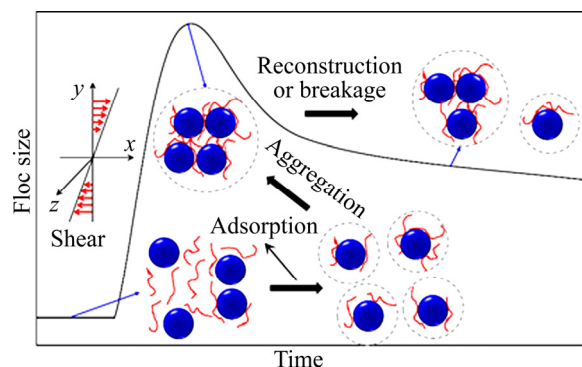


图 5 剪切作用下全尾砂絮凝过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of flocculation of full tailings under shear

要絮凝机理^[71],在流场剪切作用下,全尾砂的絮凝是异向絮凝、同向絮凝和差速沉降絮凝共同作用的结果,因此全尾砂的絮凝属于剪切诱导作用下的多重絮凝^[31]。

为了描述全尾砂絮凝行为随时间的演化规律,以 PBM 为基本理论框架,分析全尾砂絮团的聚并与破碎机理,建立全尾砂絮团的碰撞效率模型、碰撞模型、破碎后概率分布函数和破碎频率模型,从而构建出全尾砂絮团的聚并核与破碎核,进而构建出含有待定系数的全尾砂絮凝动力学模型^[31]。PBM 的基本方程和示意图分别如式(1)和图 6 所示^[72],构建絮凝动力学模型的关键在于建立碰撞效率 $\alpha_{i-1,j}$ 、碰撞频率 $\beta_{i-1,j}$ 、破碎概率分布函数 $\Gamma_{i,j}$ 和破碎频率 S_i 。

$$\begin{aligned} \frac{dN_i}{dt} = & \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-i+1} \alpha_{i-1,j} \beta_{i-1,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} \alpha_{i-1,i-1} \beta_{i-1,i-1} N_{i-1}^2 - \\ & N_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-i} \alpha_{i,j} \beta_{i,j} N_j - N_i \sum_{j=i}^{\max} \alpha_{i,j} \beta_{i,j} N_j + \\ & \sum_{j=i}^{\max} \Gamma_{i,j} S_j N_j - S_i N_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中: N_i 为 t 时刻体积为 v_i 的颗粒或絮团数量; $\alpha_{i-1,j}$ 为絮团(v_{i-1})和絮团(v_j)的碰撞效率; $\beta_{i-1,j}$ 为絮团(v_{i-1})和絮团(v_j)的碰撞频率; $\max$ 为絮团粒径分布的区间总数; $\Gamma_{i,j}$ 为絮团(v_j)破碎后生成絮团(v_i)的概率分布函数; S_i 为絮团(v_i)的破碎核,即絮团(v_i)的破碎频率。

以某镍矿全尾砂为例,分别建立了加和碰撞频率模型和双幂率破碎频率模型,再结合碰撞效率模型和二元分布函数,应用 FBRM 监测所得的尺寸数据模拟求解确定待定系数,进而构建出了适用于描述该全尾砂在不同条件下的絮凝动力学模型^[31]。

应用全尾砂絮凝动力学模型,结合 CFD 模拟技术,可以模拟分析全尾砂絮团在给料井内的时空分布规律,进而可为给料井的优化设计提供指导^[31-32]。但是,目前只是针对某镍矿的全尾砂构建了絮凝动力学模型,通用的絮凝动力学模型还有待进一步研究。

4.2 全尾砂絮团沉降规律及其机理

4.2.1 全尾砂絮团沉降影响因素

全尾砂絮团沉降的影响因素众多,主要包括:全尾砂料浆的性质(全尾砂的密度、粒度组成、化学成分、颗粒形貌等以及料浆的浓度、pH 值、温度等)^[28, 33-36, 39-40, 43, 49, 60, 69, 73-78]、絮凝剂的性质(絮凝剂单耗、絮凝剂溶液浓度;絮凝剂的分子量、结构、离子度或水解度等)^[23, 28, 33-36, 38-40, 43, 49, 69, 73-77, 79-80]、流场条件^[27-28, 43]、絮凝时间^[27-28]以及其他外加条件(磁化、声波、超声波、增效剂)^[13, 63, 66, 81-84]等。

全尾砂料浆的质量浓度和絮凝剂单耗是最重要的两个影响因素^[34-35, 76],为此,许多学者在忽略其他影响因素的条件下,针对这两个因素进行了广泛的研究^[23, 33, 36, 40, 69, 73, 75, 77, 79]。在其他条件一定时,絮凝剂分子在料浆中的扩散速率随着料浆浓度

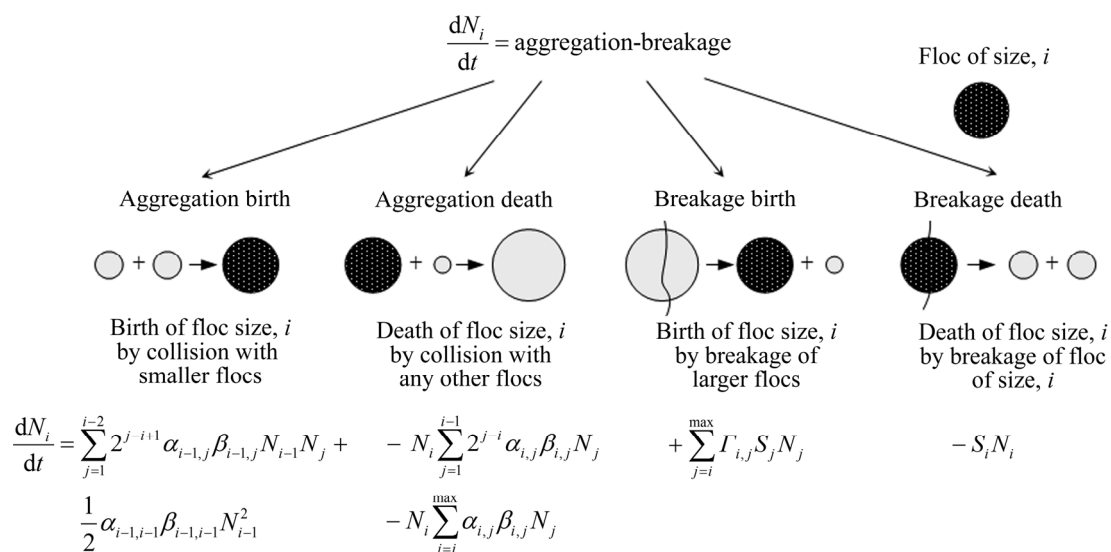


图 6 剪切作用下全尾砂絮凝过程示意图^[72]

Fig. 6 Schematic diagram of flocculation of full tailings under shear^[72]

的升高而降低,导致全尾砂颗粒和絮凝剂分子的混合效果差、进而导致絮凝效果不理想。因此,料浆浓度越低,全尾砂絮团的沉降效果越好。据不完全统计,针对我国一些矿山的全尾砂,最优料浆浓度的范围为5%~25%、平均值为14.52%。但是,对于全尾砂絮团的沉降,不应简单地以沉降速度为指标,而应以固体通量为指标对沉降效果进行评价。以固体通量为指标进行评价时,最低的料浆浓度并不一定是最优^[28, 35, 40]。同时,全尾砂颗粒之间有效“架桥”才能高效絮凝,但若絮凝剂单耗过高时,导致全尾砂颗粒表面全被覆盖而无多余“空位”用于“架桥”,从而造成絮凝沉降效果不好。据不完全统计,针对我国一些矿山的全尾砂,最优的絮凝剂单耗的范围为7.5~45 g/t、平均值约为18.91 g/t。

目前,关于流场剪切作用对沉降的影响研究相对较少,初步发现在剪切速率较低时,适当增加剪切速率有助于絮凝剂分子与全尾砂颗粒的混合从而增加絮凝沉降效果;而当剪切速率较高时,继续增加剪切速率会破坏全尾砂絮团从而不利于沉降^[28]。同样也发现,全尾砂絮团沉降效果随給料井内初始湍流强度的增加而先增加后降低^[20]。

4.2.2 全尾砂絮团沉降模型

以固液分界面的沉降速度为目标,对沉降速度与影响因素之间的关联关系进行回归,先后建立了沉降速度的单因素^[13, 28]、两因素^[34, 40]、三因素^[34, 39, 76, 81]以及多因素^[27]经验模型。随着人工智能技术的发展,采用支持向量机(SVM)、遗传算法(GA)、BP神经网络等方法先后建立了沉降速度的 GA-SVM 优化预测模型^[73-74, 82]和 BP 神经网络沉降参数优选预测模型^[75, 77],实现优化沉降速度的优化预测。

上述经验模型或预测模型考虑的影响因素不全,并且只适用于某特定全尾砂。为此,借助人工智能技术在数据处理方面的高效性与经济性,通过扩大全尾砂种类^[85]、增加影响因素数量^[86]进一步建立了沉降速度预测模型,增加了模型的适用性。采用梯度推进机(GBM)、萤火虫算法(FA)等方法对27种全尾砂的沉降规律进行研究,提出了一种数据驱动的沉降速度预测模型^[85]。同时,利用主成分分析(PCA),结合粒子群优化算法(PSO)、自适应神经模糊推理系统(ANFIS)和蒙特卡罗方法,在考虑17个影响因素的条件下,提出了一种沉降速度的新的混合机器学习预测模型^[86]。数据驱动预测模型和混合

机器学习预测模型均能对沉降速度实现较好的预测,如图7所示^[85-86]。

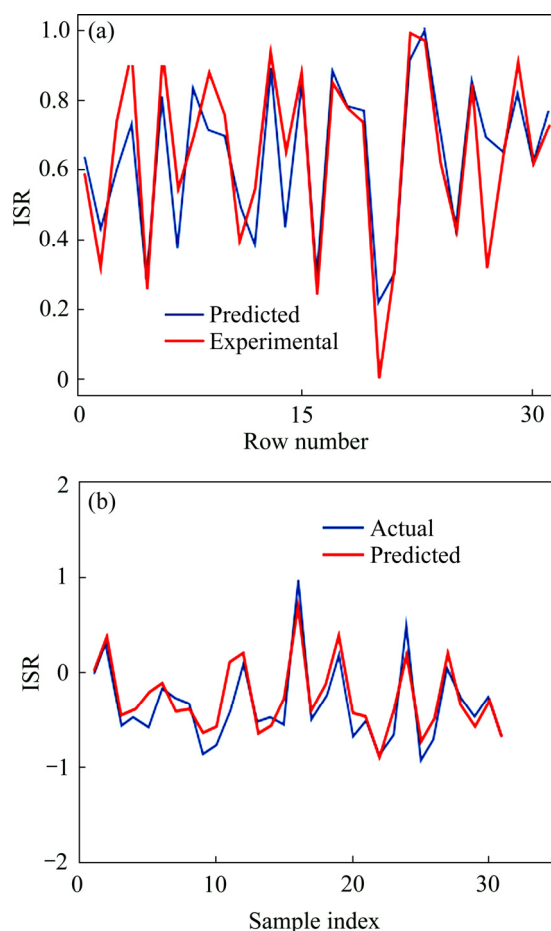


图7 沉降速度预测效果

Fig. 7 Prediction effect of settlement velocity: (a) Data-driven prediction model^[85]; (b) Hybrid machine-learning prediction model^[86]

但是,上述沉降模型均是以固液界面的沉降速度为目标,而不是直接构建的全尾砂絮团沉降速度模型。虽然在将絮团假设为球形的前提下初步建立了全尾砂絮团的沉降速度理论计算模型^[33],但忽略了絮团结构的影响。因此,对于全尾砂絮团的沉降模型还有待进一步研究。

4.3 全尾砂浓密床层深度脱水规律及其机理

4.3.1 全尾砂浓密床层深度脱水影响因素

除了全尾砂料浆的性质和絮凝剂溶液性质这两个基本影响因素以外^[33-34, 39, 41, 43, 78-79, 87],全尾砂浓密床层深度脱水时更多受泥层高度(或泥层压力)^[46, 54, 88-89]、耙架(转速、结构等)^[24, 26, 45-53, 89-92]、

停留时间^[48, 78-79, 87, 90, 92]以及外加条件(磁化、超声波、增效剂等)^[13, 51, 81, 83-84, 93-95]等因素的影响。通常情况下,泥层高度越高、耙架转速越大、停留时间越长,底流浓度越高。

全尾砂浓密床层内大量的自由水被包裹在絮团内难以排出,从而导致底流浓度进一步提高。在泥层压力和耙架的剪切力联合作用下,絮团结构被压碎或剪破,使得絮团内部自由水得以释放^[45, 47, 53]。在导水杆的作用下,在浓密床层内形成大量的主导水通道和次导水通道,如图8所示。由图8可见,主导水通道上下联通,次导水通道则伴随主导水通道随机分布,次导水通道汇流至主导水通道,从而使得从絮团内释放的自由水沿着主导水通道逆向排出^[22, 24-25, 46-47, 50, 52]。因此,全尾砂浓密床层经历絮团内自由水的释放和逆向排出两个过程,可获得高浓度底流。

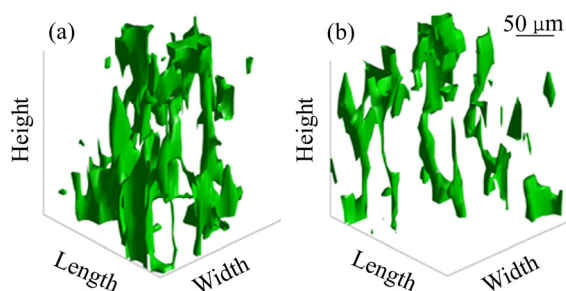


图8 导水通道

Fig. 8 Drainage channels: (a) Main channels; (b) Subchannels

同时,磁化降黏作用^[83, 94]、超声波作用(振动效应、空化效应和声流效应)^[13, 51, 81, 93, 95]和浓密增效剂的分散作用^[84]可进一步破坏絮团结构,使得絮团内部自由水得以进一步被释放,从而可进一步提高底流浓度。

4.3.2 深锥浓密机底流浓度预测模型

为了进一步分析各因素对底流浓度的影响,先后建立了关于絮凝条件^[13, 34, 41, 48, 51, 81, 87]、停留时间^[87]等因素的底流浓度经验模型,并重点建立了关于深锥浓密机的高径比或泥层高度的底流浓度经验模型^[44, 88]。但是经验模型只能适用于某特定矿山的全尾砂料浆,对其他矿山的全尾砂料的浓密只能提供一定的参考。为此,借助沉降实验和压滤实验,通

过分析凝胶浓度、压缩屈服应力和干涉沉降系数在全压力范围内与底流浓度的关系,并以Coe-Clevenger理论和Buscall-White理论为基础,建立了深锥浓密机全区域性能数学分析模型;通过输入压缩屈服应力、干涉沉降系数数据、浓密机尺寸因子、给料固体浓度、固体和液体密度、致密参数等参数,可以分析固体通量与深锥浓密机处理能力,从而实现对深锥浓密机浓密性能的分析^[67, 96]。该模型的分析过程及分析结果示意分别如图9和10所示。

同时,全尾砂颗粒在深锥浓密机内的停留时间从几十分钟到近十个小时不等,各个影响因素对底流浓度的影响存在大时滞性,因此导致理论计算模型无法精确预测浓度的变化趋势。为此,提出了一种双重注意神经网络模型分析全尾砂料浆浓密过程中各参数的空间与时间特征,可以显著提高底流浓度的预测精度^[97]。但是,该模型中参数众多、操作复杂,导致模型效率不高。

4.4 深锥浓密机内耙架扭矩模型

装有导水杆的耙架结构是深锥浓密机获得高浓度底流的关键,但是由于深锥浓密机内底部料浆浓度高、屈服应力大,从而容易致耙架扭矩过载而发生压耙,影响正常生产^[92, 98-99]。间歇式充填导致深锥浓密机内的料浆浓度分布不均、进而其屈服应力不同,从而间歇式充填也容易导致压耙^[41]。同时,全尾砂料浆中的粗颗粒在深锥浓密机锥部壁面的堆积也是导致压耙的一个原因^[41, 99]。

为此,分析了全尾砂絮凝沉降对浓缩浓密床层的屈服应力的影响,发现屈服应力随着絮凝剂单耗和浓度的增大而增大^[37, 68, 92, 100]。应用小型动态浓密实验,建立了基于泥层高度的耙架扭矩模型^[54]。再从流变学和散体力学的角度,分别分析耙架的刮泥耙、导水杆和横梁的受力与扭矩,建立了复杂架构耙架的扭矩预测模型^[101-102]。

同时,实际生产中,常采用底流循环的方式防止压耙。为此,分析了底流浓度差与底流循环量、循环高度之间的关系,初步建立了基于防止压耙考虑的底流浓度调控模型,可为工程设计与运行提供参考^[42]。

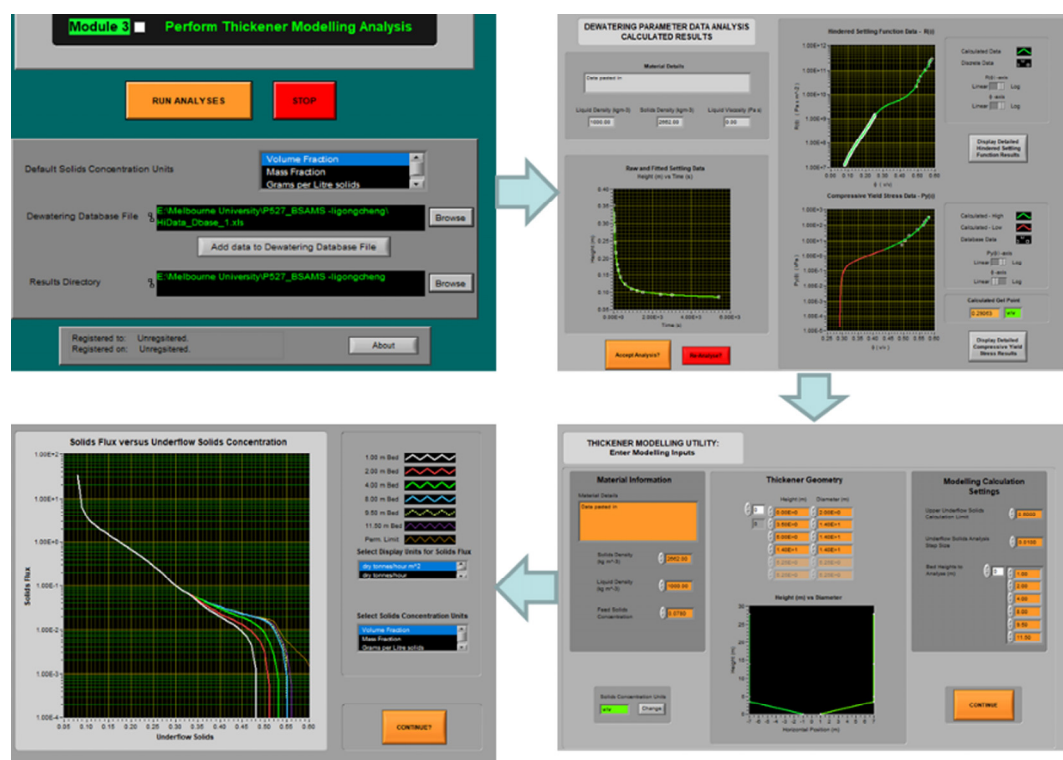


图 9 深锥浓密机浓密性能分析过程

Fig. 9 Analysis process of thickening performance of deep cone thickener

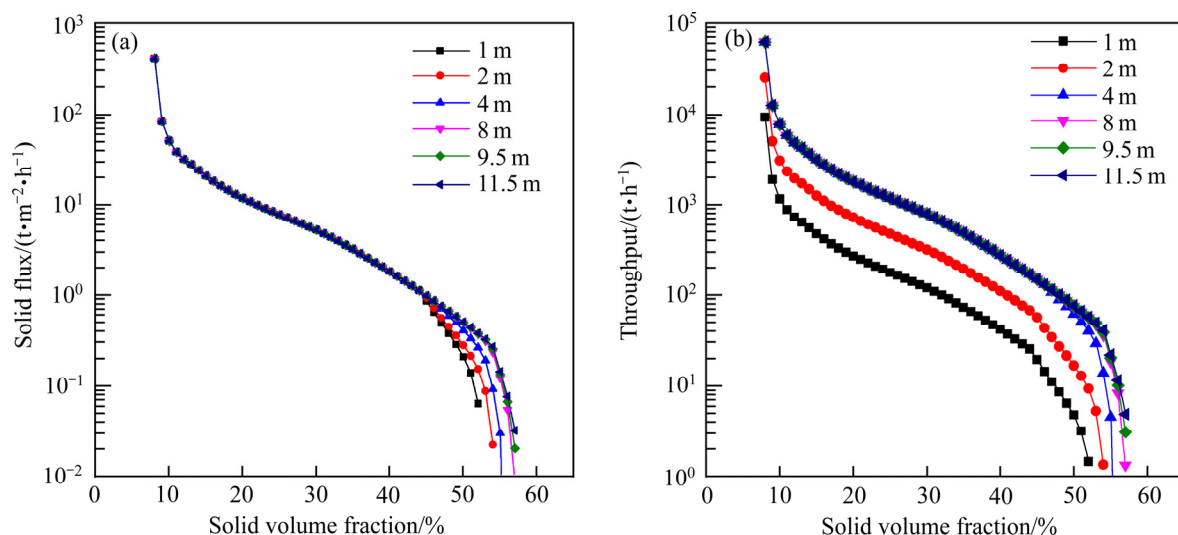


图 10 深锥浓密机浓密性能分析结果

Fig. 10 Results of analysis of thickening performance of deep cone thickener: (a) Relationship between solid flux and solid volume fraction of underflow; (b) Throughput between solid flux and solid volume fraction of underflow

4.5 基于动态浓密的深锥浓密机关键结构参数设计

研究全尾砂料浆浓密的目的在于指导膏体充填中深锥浓密机的选型与关键结构参数设计。首先基于静态絮凝沉降实验结果,应用凯奇沉降模型,对深锥浓密机的最小直径进行了分析与估算^[87]。然

后根据底流浓度与停留时间的关系,确定了达到所需底流浓度的停留时间,再通过确定深锥浓密机料浆的体积确定深锥浓密机体积^[90]。最后基于动态浓密的实验结果,应用凯奇沉降模型和供排料平衡理论,进一步建立深锥浓密机直径的计算模型,再基

于高径比与底流浓度的关系,确定深锥浓密机内的泥层高度^[48]。

但是,全尾砂絮团的沉降不仅有自由沉降,更有干涉、压缩沉降,而凯奇沉降模型只适用于自由沉降区域,因此应用该模型对结构参数进行设计研究存在较大误差。同时,上述研究设计只是聚焦于深锥浓密机的直径和高度(或体积),而缺乏对给料井、耙架等其他关键结构进行设计研究。

5 结论与发展趋势

目前,我国在全尾砂料浆浓密的研究方法和研究结果方面都取得了不错的成果,特别是在全尾砂絮凝动力学模型、絮团沉降模型、底流浓度预测模型方面取得了很好的进展。对于全尾砂料浆浓密研究的未来发展趋势,从理论和技术两个角度展望如下。

5.1 基于流变学的全尾砂料浆浓密机理

全尾砂料浆浓密过程中,浓度由深锥浓密机上部的20%左右逐渐升高到底部的70%左右,全尾砂的存在形式也由细颗粒变为絮团,从而导致料浆的流变特性不断变化。现有研究已经发现全尾砂絮团结构演化直接影响全尾砂料浆的脱水效率和底流浓度,但是絮团结构的生成与破坏所引发的流变行为则少有报道;同时,对重力、压力和剪切力共同作用下絮团结构的演化规律研究还不够深入。因此,需要从流变学的角度,分析全尾砂料浆浓密过程絮团结构生成与破坏所引起的流变特性演化,进而揭示全尾砂料浆的浓密机理。

5.2 基于人工智能的浓密效果预测与调控

智能充填是膏体充填的发展趋势,而底流浓度的精准预测与调控是实现智能充填的关键。但是,全尾砂料浆浓密涉及絮凝、沉降、脱水等多个过程,涉及多参数多变量,各个影响因素对底流浓度的影响存在大时滞性,导致理论计算模型无法精确预测浓度的变化趋势,进而导致无法精确控制底流浓度。因此,需要应用人工智能技术建立多维度底流浓度波动时序预测模型,探明底流浓度理论计算模

型误差补偿机制,再建立智能控制模型,实现浓密效果变化趋势的精准预测与底流浓度的智能控制。

REFERENCES

- [1] 王雪峰,朱欣然,李 为,等. 全国矿产资源节约与综合利用报告[M]. 北京:地质出版社,2018.
WANG Xue-feng, ZHU Xin-ran, LI Wei, et al. Report of mineral resources saving & comprehensive utilization in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [2] SANTAMARINA J C, TORRES-CRUZ L A, BACHUS R C. Why coal ash and tailings dam disasters occur[J]. Science, 2019, 364(6440): 526–528.
- [3] 刘 月,董颖博,林 海,等. 云南某典型锡选矿厂重金属污染特征[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(4): 1084–1090.
LIU Yue, DONG Ying-bo, LIN Hai, et al. Pollution characteristics of heavy metals in typical tin mineral processing plant of Yunnan, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(4): 1084–1090.
- [4] WANG C, HARBOTTLE D, LIU Q, et al. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice[J]. Minerals Engineering, 2014, 58: 113–131.
- [5] YIN S, SHAO Y, WU A, et al. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247(30): 119590.
- [6] 吴爱祥,杨 莹,程海勇,等. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 517–525.
WU Ai-xiang, YANG Ying, CHENG Hai-yong, et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 517–525.
- [7] QI C, FOURIE A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives[J]. Minerals Engineering, 2019, 144(9): 106025.
- [8] 王 勇,吴爱祥,严 鹏. 全尾砂膏体充填关键技术指标标准化研究[J]. 标准科学, 2020(7): 97–103.
WANG Yong, WU Ai-xiang, YAN Peng. Study on the standardization of key technical indexes of full tailings paste filling[J]. Standard Science, 2020(7): 97–103.
- [9] 李国政,于润沧. 充填料浆环管试验计算机仿真应用的研究[J]. 黄金, 2008, 29(4): 21–24.
LI Guo-zheng, YU Run-cang. Study of implementing computer simulation of filling slurry round pipe test[J]. Gold,

- 2008, 29(4): 21–24.
- [10] SIVAMOHAN R, FORSSBERG E. Recovery of heavy minerals from slimes[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1985, 15(4): 297–314.
- [11] PATIL D P, ANDREWS J R G, UHLHERR P H T. Shear flocculation—Kinetics of floc coalescence and breakage[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2001, 61(3): 171–188.
- [12] 吴爱祥, 杨盛凯, 王洪江, 等. 超细全尾膏体处置技术现状与趋势[J]. *采矿技术*, 2011, 11(3): 4–8, 18.
- WU Ai-xiang, Yang Sheng-kai, WANG Hong-jiang, et al. Status and trend of paste disposal technology for superfine unclassified tailings[J]. *Mining Technology*, 2011, 11(3): 4–8, 18.
- [13] 诸利一, 吕文生, 杨 鹏, 等. 声波对全尾砂浓密沉降的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(12): 2850–2859.
- ZHU Li-yi, LÜ Wen-sheng, YANG Peng, et al. Influence of acoustic wave on thickening sedimentation of unclassified tailings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(12): 2850–2859.
- [14] TAO D, PAREKH B K, ZHAO Y, et al. Pilot-scale demonstration of deep coneTM paste thickening process for phosphatic clay/sand disposal[J]. *Separation Science and Technology*, 2010, 45(10): 1418–1425.
- [15] STICKLAND A D, BURGESS C, DIXON D R, et al. Fundamental dewatering properties of wastewater treatment sludges from filtration and sedimentation testing[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63(21): 5283–5290.
- [16] YILMAZ E, FALL M. *Paste tailings management*[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2017.
- [17] YIN S, WU A, HU K, et al. The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 35: 61–66.
- [18] 吉学文, 严庆文. 驰宏公司全尾砂-水淬渣胶结充填技术研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2006(2): 11–13.
- JI Xue-wen, YAN Qing-wen. Technology research on cement backfilling based on unclassified tailings and water quenched slag in Chihong Company[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2006(2): 11–13.
- [19] 谷志君. 最大型深锥膏体浓密机在中国铜钼矿山的应用[J]. *黄金*, 2010, 31(11): 43–45.
- GU Zhi-jun. Application of the biggest deep cone paste thickener in domestic copper-molybdenum mine[J]. *Gold*, 2010, 31(11): 43–45.
- [20] 焦华喆, 刘晨生, 吴爱祥, 等. 初始湍流强度与耙架剪切对全尾砂絮凝行为的影响[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 54–61.
- JIAO Hua-zhe, LIU Chen-sheng, WU Ai-xiang, et al. Influence of initial turbulence intensity and rake frame shear on flocculation behavior of unclassified-tailings[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(2): 54–61.
- [21] DU J H, PUSHKAROVA R A, SMART R S C. A cryo-SEM study of aggregate and floc structure changes during clay settling and raking processes[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2009, 93(1): 66–72.
- [22] JIAO H, WANG S, YANG Y, et al. Water recovery improvement by shearing of gravity-thickened tailings for cemented paste backfill[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 118882.
- [23] 张钦礼, 王 石, 王新民. 絮凝剂单耗对全尾砂浆浑液面沉速的影响规律[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(2): 318–324.
- ZHANG Qin-li, WANG Shi, WANG Xin-min. Influence rules of unit consumptions of flocculants on interface sedimentation velocity of unclassified tailings slurry[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(2): 318–324.
- [24] 焦华喆, 王树飞, 吴爱祥, 等. 剪切浓密床层孔隙网络模型与导水通道演化[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(8): 987–996.
- JIAO Hua-zhe, WANG Shu-fei, WU Ai-xiang, et al. RUAN Zhu-en. Pore network model of tailings thickener bed and water drainage channel evolution under the shearing effect[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(8): 987–996.
- [25] CHEN X, JIN X, JIAO H, et al. Pore connectivity and dewatering mechanism of tailings bed in raking deep-cone thickener process[J]. *Minerals*, 2020, 10(4): 375.
- [26] 吴爱祥, 王 勇, 王洪江. 导水杆数量和排列对尾矿浓密的影响机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(1): 244–248.
- WU Ai-xiang, WANG Yong, WANG Hong-jiang. Effect of rake rod number and arrangement on tailings thickening performance[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(1): 244–248.
- [27] WU A, RUAN Z, BÜRGER R, et al. Optimization of flocculation and settling parameters of tailings slurry by

- response surface methodology[J]. Minerals Engineering, 2020, 156: 106488.
- [28] 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 Zhu-en, WU Ai-xiang, WANG Jian-dong, 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.
- [29] SMOLUCHOWSKI M V. Drei vortrage uber diffusion, brownsche bewegung und koagulation von kolloidteilchen[J]. Zeitschrift Fur Physik, 1916, 17: 557–585.
- [30] RAMKRISHNA D. Population balances: Theory and applications to particulate systems in engineering[M]. New York: Academic Press, 2000.
- [31] 阮竹恩. 給料井内全尾砂絮凝行为及其优化应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- RUAN Zhu-en. Study on flocculation behavior of total tailings in feedwell and its optimization and application[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [32] RUAN Z, LI C, SHI C. Numerical simulation of flocculation and settling behavior of whole-tailings particles in deep-cone thickener[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(3): 740–749.
- [33] 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 Hua-zhe, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, 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.
- [34] 焦华喆, 吴爱祥, 王洪江, 等. 全尾砂絮凝沉降特性实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(12): 1437–1441.
- JIAO Hua-zhe, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Experiment study on the flocculation settlement characteristic of unclassified tailings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(12): 1437–1441.
- [35] 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 Ai-xiang, ZHOU Jing, YIN Sheng-hua, et al. Influence factors on flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 439–446.
- [36] 侯贺子, 李翠平, 王少勇, 等. 尾矿浓密中泥层沉降速度变化及颗粒沉降特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1428–1436.
- HOU He-zi, LI Cui-ping, WANG Shao-yong, et al. Settling velocity variation of mud layer and particle settling characteristics in thickening of tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(6): 1428–1436.
- [37] 阮竹恩, 吴爱祥, 王贻明, 等. 絮凝沉降对浓缩超细尾砂料浆屈服应力的影响[J]. 工程科学学报, 2021, 43(10): 1276–1282.
- RUAN Zhu-en, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming, et al. Effect of flocculation sedimentation on the yield stress of thickened ultrafine tailings slurry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(10): 1276–1282.
- [38] 郭佳宾, 王洪江, 田志刚, 等. 不同类型絮凝剂对超细尾砂浓密性能的影响[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(4): 141–145.
- GUO Jia-bin, WANG Hong-jiang, TIAN Zhi-gang, et al. Effect of different types of flocculant on the thickening property of superfine tailings[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4): 141–145.
- [39] 温震江, 杨晓炳, 李立涛, 等. 基于 RSM-BBD 的全尾砂浆絮凝沉降参数选择及优化[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1437–1445.
- WEN Zhen-jiang, YANG Xiao-bing, LI Li-tao, et al. Selection and optimization of flocculation sedimentation parameters of unclassified tailings slurry based on RSM-BBD[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1437–1445.
- [40] 史采星, 郭利杰, 陈 新. 全尾砂静态絮凝沉降特性[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 194–202.
- SHI Cai-xing, GUO Li-jie, CHEN Xin. Static and dynamic flocculation sedimentation characteristics of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 194–202.
- [41] 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): 1553–1558.
- LI Hui, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Pressure rake analysis of deep cone thickeners based on tailings' settlement and rheological characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(12): 1553–1558.

- 1553-1558.
- [42] 杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等. 基于循环系统的膏体浓密机底流调控及其数学模型[J]. 工程科学学报, 2017, 39(10): 1507-1511.
- YANG Liu-hua, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Regulation and a mathematical model of underflow in paste thickeners based on a circular system design[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(10): 1507-1511.
- [43] 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.
- BIAN Ji-wei, WANG Xin-min, XIAO Chong-chun. Experimental study on dynamic flocculating sedimentation of unclassified tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3278-3283.
- [44] 吴爱祥, 杨莹, 王贻明, 等. 深锥浓密机底流浓度模型及动态压密机理分析[J]. 工程科学学报, 2018, 40(2): 152-158.
- WU Ai-xiang, YANG Ying, WANG Yi-ming, et al. Mathematical modelling of underflow concentration in a deep cone thickener and analysis of the dynamic compaction mechanism[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(2): 152-158.
- [45] 周旭, 王洪江, 吴爱祥, 等. 絮团稠化对全尾砂浓密性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1670-1676.
- ZHOU Xu, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Effects of aggregate densification on unclassified tailings thickening performance[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(7): 1670-1676.
- [46] 周旭, 阮竹恩, 王洪江, 等. 尾矿浓密过程的导水通道分布和演化特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9): 3076-3084.
- ZHOU Xu, RUAN Zhu-en, WANG Hong-jiang, et al. Distribution and evolution characteristics of channeling during tailings thickening[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(9): 3076-3084.
- [47] JIAO H, WU Y, WANG H, et al. Micro-scale mechanism of sealed water seepage and thickening from tailings bed in rake shearing thickener[J]. Minerals Engineering, 2021, 173: 107043.
- [48] 李公成, 王洪江, 吴爱祥, 等. 基于动态沉降压密实验的深锥浓密机关键参数确定[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(8): 1693-1700.
- LI Gong-cheng, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Key parameters determination of deep cone thickener based on dynamical settling and compaction experiments[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(8): 1693-1700.
- [49] BIAN J, WANG H, XIAO C, et al. An experimental study on the flocculating settling of unclassified tailings[J]. PLoS One, 2018, 13(9): e0204230.
- [50] ZHOU X, WANG H, JIAO H, et al. Raking effects on aggregate densification and channelling in thickening[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 2463894.
- [51] 彭青松, 王洪江, 邢鹏, 等. 超声波作用对尾矿底流浓密效果及流变性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5): 1377-1387.
- PENG Qing-song, WANG Hong-jiang, XING Peng, et al. Influence of ultrasonic irradiation on thickening effect and rheology of tailings underflow[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(5): 1377-1387.
- [52] 焦华喆, 王树飞, 吴爱祥, 等. 膏体浓密床层孔隙结构剪切演化与连通机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1173-1180.
- JIAO Hua-zhe, WANG Shu-fei, WU Ai-xiang, et al. Shear evolution and connected mechanism of pore structure in thickening bed of paste[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1173-1180.
- [53] 周旭, 吴爱祥, 王洪江, 等. 基于FBRM和PVM技术的尾矿浓密过程絮团演化规律[J]. 工程科学学报, 2021, 43(11): 1425-1432.
- ZHOU Xu, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Aggregate evolution rule during tailings thickening based on FBRM and PVM[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(11): 1425-1432.
- [54] 杨莹, 吴爱祥, 王洪江, 等. 基于泥层高度的耙架扭矩力学模型及机理分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 165-171.
- YANG Ying, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Mechanics model of rake torque based on sludge height and its mechanism analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(1): 165-171.

- [55] JIAO H, WU A, WANG H, et al. The solids concentration distribution in the deep cone thickener: A pilot scale test[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2013, 30(2): 262–268.
- [56] SUN G, ZHOU K, KANG Q, et al. Design and application of rapid dewatering for tailings containing sodium silicate: Laboratory and industrial test results[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 1918278.
- [57] YANG Y, WU A, KLEIN B, et al. Effect of primary flocculant type on a two-step flocculation process on iron ore fine tailings under alkaline environment[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 132(11): 14–21.
- [58] 侯贺子, 李翠平, 王少勇, 等. 全尾矿浓密压密区微观结构研究[J]. *金属矿山*, 2019, 513(3): 73–78.
HOU He-zi, LI Cui-ping, WANG Shao-yong, et al. Study on the mesostructure of compacted area in total tailings thickening[J]. *Metal Mine*, 2019, 513(3): 73–78.
- [59] ZHENG D, SONG W, TAN Y, et al. Fractal and microscopic quantitative characterization of unclassified tailings flocs[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28(9): 1429–1439.
- [60] WANG S, SONG X, WANG X, et al. Influence of coarse tailings on flocculation settlement[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27(8): 1065–1074.
- [61] ZHANG D, ABRAHAM T, DANG-VU T, et al. Optimal floc structure for effective dewatering of polymer treated oil sands tailings[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 160(8): 106688.
- [62] YUE T, WU X, 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.
- [63] LI S, WANG X. Fly-ash-based magnetic coagulant for rapid sedimentation of electronegative slimes and ultrafine tailings[J]. *Powder Technology*, 2016, 303: 20–26.
- [64] WANG D, ZHANG Q, CHEN Q, et al. Temperature variation characteristics in flocculation settlement of tailings and its mechanism[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27(11): 1438–1448.
- [65] LI S, WANG X, ZHANG Q. Dynamic experiments on flocculation and sedimentation of argillized ultrafine tailings using fly-ash-based magnetic coagulant[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(7): 1975–1984.
- [66] ZHU L, LYU W, YANG P, et al. Effect of ultrasound on the flocculation-sedimentation and thickening of unclassified tailings[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 66(5): 104984.
- [67] 李公成, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂无耙深锥稳态浓密性能分析[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(1): 60–66.
LI Gong-cheng, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Analysis of thickening performance of unclassified tailings in rakeless deep cone thickener[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(1): 60–66.
- [68] RUAN Z, WU A, BÜRGER R, et al. Effect of interparticle interactions on the yield stress of thickened flocculated copper mineral tailings slurry[J]. *Powder Technology*, 2021, 392: 278–285.
- [69] 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): 1269–1275.
WANG Yong, CAO Chen, WU Ai-xiang. Mathematical relationship between the solid flux of deep cone thickener, flocculant unit consumption, and slurry concentration[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(10): 1269–1275.
- [70] 吴爱祥, 阮竹恩, 王建栋, 等. 基于超级絮凝的超细尾砂絮凝行为优化[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(8): 981–986.
WU Ai-xiang, RUAN Zhu-en, WANG Jian-dong, et al. Optimizing the flocculation behavior of ultrafine tailings by ultra-flocculation[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(8): 981–986.
- [71] OYEGBILE B, AY P, NARRA S. Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: A review[J]. *Environmental Engineering Research*, 2016, 21(1): 1–14.
- [72] BIGGS C A, LANT P A. Modelling activated sludge flocculation using population balances[J]. *Powder Technology*, 2002, 124(3): 201–211.
- [73] 王新民, 赵建文, 张德明. 全尾砂絮凝沉降速度优化预测模型[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(3): 793–798.
WANG Xin-min, ZHAO Jian-wen, ZHANG De-ming. Optimal prediction model of flocculating sedimentation velocity of unclassified tailings[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(3): 793–798.
- [74] 张钦礼, 陈秋松, 王新民, 等. 全尾砂絮凝沉降参数 GA-SVM 优化预测模型研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(5): 24–30.
ZHANG Qin-li, CHEN Qiu-song, WANG Xin-ming, et al.

- Study on GA-SVM optimal prediction model on flocculating sedimentation parameter of unclassified tailings[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(5): 24–30.
- [75] 王新民, 赵建文. 全尾砂浆最佳絮凝沉降参数[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1675–1681.
- WANG Xin-min, ZHAO Jian-wen. Optimal flocculating sedimentation parameters of unclassified tailings slurry[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5): 1675–1681.
- [76] 张钦礼, 周登辉, 王新民, 等. 超细全尾砂絮凝沉降实验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2013, 38(2): 451–455.
- ZHANG Qin-li, ZHOU Deng-hui, WANG Xin-min, et al. Experimental study on flocculating sedimentation of ultra-fine unclassified tailings[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2013, 38(2): 451–455.
- [77] 张钦礼, 刘奇, 赵建文. 全尾砂絮凝沉降参数预测模型研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 875–879.
- ZHANG Qin-li, LIU Qi, ZHAO Jian-wen. Study on the parameters prediction model of flocculating sedimentation of crude tailings[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016, 37(6): 875–879.
- [78] 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.
- LIU Qi, CEN You-hua, TANG Ming-dong, et al. Influence of different physical properties of tailings on thickening performance[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(5): 124–130.
- [79] 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 Yong, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Influence mechanism of flocculant dosage on tailings thickening[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(11): 1419–1423.
- [80] ZHAI D, FENG B, GUO Y, et al. Settling behavior of tungsten tailings using serpentine as flocculant[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 224: 304–307.
- [81] 诸利一, 吕文生, 杨鹏, 等. 基于响应面法外场作用下全尾砂浓密沉降试验[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1908–1917.
- ZHU Li-yi, LÜ Wen-sheng, YANG Peng, et al. Thickening sedimentation of unclassified tailings under influence of external field based on response surface method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1908–1917.
- [82] 柯愈贤, 王新民, 张钦礼. 磁化处理的全尾砂料浆沉降参数优化模型[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(1): 48–56.
- KE Yu-xian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li. Optimal prediction model on sedimentation parameters of pre-magnetized crude tailings slurry[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(1): 48–56.
- [83] 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.
- CHEN Qiu-song, ZHANG Qin-li, WANG Xin-ming, et al. Experimental study on effect of magnetized water on flocculating sedimentation of unclassified tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4256–4261.
- [84] 周茜, 刘娟红, 吴爱祥, 等. 浓密增效剂对尾砂料浆浓密性能的影响及机理[J]. 工程科学学报, 2019, 41(11): 1405–1411.
- ZHOU Qian, LIU Juan-hong, WU Ai-xiang, et al. Effect and mechanism of synergist on tailings slurry thickening performance[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(11): 1405–1411.
- [85] QI C C, FOURIE A, CHEN Q S, et al. Data-driven modelling of the flocculation process on mineral processing tailings treatment[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 505–516.
- [86] QI C C, LY H B, CHEN Q S, et al. Flocculation-dewatering prediction of fine mineral tailings using a hybrid machine learning approach[J]. Chemosphere, 2020, 244: 125450.
- [87] 王洪江, 陈琴瑞, 吴爱祥, 等. 全尾砂浓密特性研究及其在浓密机设计中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 676–681.
- WANG Hong-jiang, CHEN Qin-rui, WU Ai-xiang, et al. Study on the thickening properties of unclassified tailings and its application to thickener design[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 676–681.
- [88] 王勇, 王洪江, 吴爱祥. 基于高径比的深锥浓密机底流浓度数学模型[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(8): 113–117.
- WANG Yong, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang. Mathematical model of deep cone thickener underflow

- concentration based on the height to diameter ratio[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(8): 113–117.
- [89] 尹升华, 王 勇. 泥层高度对细粒全尾浓密规律的影响[J]. 科技导报, 2012, 30(7): 29–33.
- YIN Sheng-hua, WANG Yong. Influence of mud height on the concentration of the fine tailing[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(7): 29–33.
- [90] 王 勇, 吴爱祥, 王洪江, 等. 深锥浓密机体积确定方法及其应用[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 45–49.
- WANG Yong, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. A method to determine deep cone thickener volume and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 45–49.
- [91] WU A, RUAN Z, LI C, et al. Numerical study of flocculation settling and thickening of whole-tailings in deep cone thickener using CFD approach[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(3): 711–718.
- [92] WANG Y, WU A, RUAN Z, et al. Reconstructed rheometer for direct monitoring of dewatering performance and torque in tailings thickening process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(11): 1430–1437.
- [93] 王志凯, 杨 鹏, 吕文生, 等. 超声波作用下尾砂浆浓密沉降及放砂[J]. 工程科学学报, 2017, 39(9): 1313–1320.
- WANG Zhi-kai, YANG Peng, LÜ Wen-sheng, et al. Thickening sedimentation and sand discharge of tailings slurry under ultrasonic[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(9): 1313–1320.
- [94] 柯愈贤, 王新民, 张钦礼. 全尾砂料浆磁化絮凝沉降特性[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(2): 392–398.
- KE Yu-xian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li. Flocculating sedimentation characteristic of pre-magnetized crude tailings slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 392–398.
- [95] LI G, LIU S, WEN Z, et al. Effect of ultrasonic frequency on thickener performance[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 6624704.
- [96] 李成成, 王洪江, 焦华喆, 等. 稳态浓密机全尾砂脱水规律物理模拟[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(3): 649–658.
- LI Gong-cheng, WANG Hong-jiang, JIAO hua-zhe, et al. Physical simulation of dewaterability law of unclassified tailings in steady state thickener[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(3): 649–658.
- [97] YUAN Z, HU J, WU D, et al. A dual-attention recurrent neural network method for deep cone thickener underflow concentration prediction[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1260.
- [98] CHENG H, LIU J, WU S, et al. Fluidization analysis of thickening in the deep cone for cemented paste backfill[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 6285981.
- [99] RUAN Z, WANG Y, WU A, et al. A theoretical model for the rake blockage mitigation in deep cone thickener: A case study of lead-zinc mine in China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 2130617.
- [100] 杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等. 絮凝沉降对全尾砂料浆流变特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3523–3529.
- YANG Liu-hua, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Effect of flocculation settling on rheological characteristics of full tailing slurry[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(10): 3523–3529.
- [101] 吴爱祥, 焦华喆, 王洪江, 等. 深锥浓密机搅拌刮泥耙扭矩力学模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1469–1474.
- WU Ai-xiang, JIAO Hua-zhe, WANG Hong-jiang, et al. Mechanical model of scraper rake torque in deep-cone thickener[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1469–1474.
- [102] 王洪江, 周 旭, 吴爱祥, 等. 膏体浓密机扭矩计算模型及其影响因素[J]. 工程科学学报, 2018, 40(6): 673–678.
- WANG Hong-jiang, ZHOU Xu, WU Ai-xiang, et al. Mathematical model and factors of paste thickener rake torque[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(6): 673–678.

Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China

RUAN Zhu-en^{1,2,5}, WU Ai-xiang^{1,5}, JIAO Hua-zhe³, LI Cui-ping^{1,5},
LI Gong-cheng⁴, MO Yi^{1,5}, WANG Hong-jiang^{1,5}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, China;

2. Shunde Graduate School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528399, China;

3. School of Civil and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

4. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology,
Zibo 255000, China;

5. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines of the Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The high efficiency and deep thickening of full-tailings slurry is the key to obtain a qualified concentration of paste and satisfactory quality of cemented paste backfill. The efficient flocculation of full-tailings is the premise of full-tailings slurry thickening. The rapid settlement of full-tailings flocs determines the efficiency of full-tailings slurry thickening, and the deep dewatering of thickened full-tailings bed determines the effect of full-tailings slurry thickening. Therefore, this paper reviewed the research methodology and research results of full-tailings slurry thickening in China in recent 20 years, including the flocculation behavior of full-tailings and its kinetics model, the settling law of full-tailings floc and its mechanism, the dewatering law of thickened full-tailings bed and its mechanism, the torque model of rake of deep-cone thickener (DCT), and the design of key structural parameters of DCT were analyzed detailedly. Moreover, the future development trend was also discussed.

Key words: cemented paste backfill; full tailings; flocculation; settling; thickening; dewatering

Foundation item: Projects(52130404, 51774039, 52004152) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2021M690011) supported by the China Postdoctoral Science Foundation; Project(ZR2020QE100) supported by the Shandong Provincial Natural Science Foundation, China

Received date: 2021-09-30; **Accepted date:** 2021-10-28

Corresponding author: WU Ai-xiang; Tel: +86-10-62333563; E-mail: wuaixiang@126.com

(编辑 何学锋)