

# 搅拌剪切对全尾砂膏体细观结构影响研究

郑攻关<sup>1</sup> 王永彬<sup>2</sup> 谢经鹏<sup>1</sup> 胡亚桥<sup>1</sup> 张九雨<sup>1</sup>

(1. 安徽铜冠产业技术研究院有限责任公司, 安徽 铜陵 244000;

2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

**[摘要]** 搅拌剪切促使全尾砂、水泥及外加剂等物料相互混合,同时也影响了所制备的膏体料浆的物理化学性质,然而目前对其作用机理知之甚少。为深入研究搅拌剪切对膏体料浆性能的影响,采用聚焦光束反射测量技术(FBRM)对膏体料浆细观结构进行测试,分析搅拌剪切速率对全尾砂膏体细观结构的影响。结果表明,搅拌剪切对膏体细观结构具有显著影响。随着搅拌剪切速率的增加,膏体中聚集的颗粒被分散,平均弦长减小,实时颗粒数增多;当搅拌速率超过一定阈值后,膏体料浆的颗粒平均弦长增大、测得的实时颗粒数减少,表明高速剪切可能改变颗粒表面物理化学特征,从而增强颗粒之间的相互作用力,而这些变化将进一步影响膏体流变特征及固化后力学性能。

**[关键词]** 全尾砂膏体; 搅拌剪切; 细观结构; 颗粒

**[中图分类号]** TD853

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-2423(2024)06-0022-06

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.06.003

## 0 前言

在矿石开采过程中,大量的尾矿遗留地表造成环境污染,同时井下采空区导致地表塌陷,对矿区构筑物带来安全威胁。为此,充填采矿技术应运而生,为实现无废开采提供了可能。其中,全尾砂膏体充填技术以其高效、环保的特点,逐渐成为解决尾砂处理问题和采空区充填问题的关键手段<sup>[1-2]</sup>。该技术通过将全尾砂、水泥和水等原料混合搅拌,形成具有特定流动性和稳定性的膏体料浆,用于地下采空区的充填,不仅实现了尾砂的资源化利用,还显著提高了矿山开采的安全性和环境友好性<sup>[3]</sup>。

膏体充填技术主要分为三大技术环节:尾砂浓

密、搅拌制备及管道输送。其中,搅拌制备作为膏体充填技术中的重要环节,通过机械力作用,使原料混合均匀,形成具有特定物理和化学特性的膏体<sup>[4]</sup>。然而,全尾砂膏体由于具有颗粒细、料浆黏度高、屈服应力大等特点,使得搅拌剪切过程变得尤为复杂。搅拌剪切不仅影响膏体的宏观流动性和稳定性,更在细观尺度上改变膏体的微观结构,进而影响其力学性能和充填效果。因此,深入研究搅拌剪切对全尾砂膏体细观结构的影响,对于优化搅拌工艺、提高充填体质量、降低充填成本具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

目前,全尾砂膏体充填技术在矿山充填领域具有重要的应用价值,但膏体性能受到搅拌剪切的显著影响,尤其是在细观结构层面<sup>[7-8]</sup>。尽管搅拌剪切对膏体流变性能和宏观力学性能的影响已被广泛研究,但有关搅拌剪切对细观结构变化的影响的深入探讨较少。本文采用聚焦光束反射测量技术(FBRM)对膏体料浆细观结构进行测试,分析剪切速率对全尾砂膏体细观结构的影响,揭示搅拌剪切速率与膏体细观结构变化之间的关系,并对剪切停止后膏体聚集动力学进行了描述,为优化搅拌工艺和提高充填效果提供了新见解。

## 1 实验材料

### 1.1 全尾砂

本文以某铜矿的全尾砂为研究对象,其比重为

**[收稿日期]** 2024-12-17

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(52104129)。

**[作者简介]** 郑攻关(1972—),男,安徽宿州人,高级工程师,主要从事矿山固废利用研究工作。

**[引用格式]** 郑攻关,王永彬,谢经鹏,等. 搅拌剪切对全尾砂膏体细观结构影响研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(6): 22-27, 40.

ZHENG Gongguan, WANG Yongbin, XIE Jingpeng, et al. Study on the effect of mixing shear on the meso-structure of full tailings paste [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(6): 22-27, 40.

2.72。通过利用X射线荧光光谱分析技术(XRF)对该尾砂的化学成分进行测定,结果见表1。根据

表1数据, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 是构成该尾砂的主要化学成分。

表1 全尾砂化学成分

组成	$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	Ag	As	Zn	S	Cu	Pb
含量/%	64.68	1.4	6.19	9.26	1.59	0.057	0.003	0.39	0.05	0.7

尾砂的粒径分布对膏体性能具有重要影响,因此,使用激光粒度分析仪对全尾砂的粒径分布进行测定。该仪器具有1%的高精度,并能覆盖0.02~2000  $\mu\text{m}$ 的粒径范围,全尾砂的粒径分布如图1所示。

## 1.2 水泥、外加剂及水

在实际充填中,膏体制备需加入适量水泥作为胶凝材料。为此,采用了42.5 R普通硅酸盐水泥作为胶凝材料。水泥厂提供的水泥化学组成检测报告见表2,其比表面积为401  $\text{m}^2/\text{kg}$ ,比重为3.15,粒径分布如图1所示。

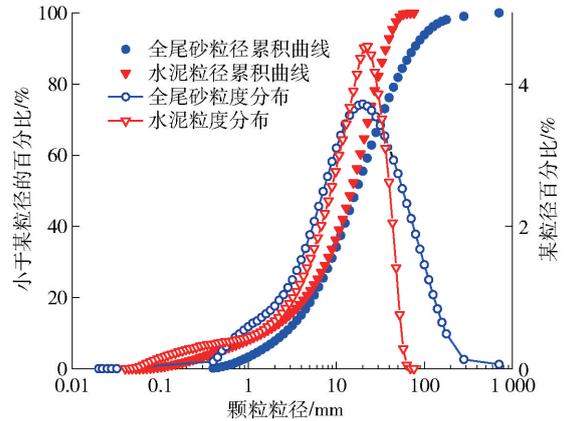


图1 全尾砂及水泥颗粒粒径分布曲线

表2 水泥化学成分

组成	MgO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$
含量/%	1.40	20.70	4.50	3.30	65.10	0.48	0.18	4.50	2.60

外加剂的使用也会改变搅拌对料浆性能的影响<sup>[9]</sup>,因此本文选用了一种超性能塑化剂(下文简称“塑化剂”)作为外加剂进行对照测试。此外,为确保实验结果免受额外因素的干扰,在制备膏体样品时特地使用了去离子水。

## 1.3 样品配比

在B-1至B-4的4组实验中,分别设定了三种不同的固体体积分数,同时保持水灰比恒定(3:1),具体数值参见表3。需要特别指出的是,在B-4组实验中向膏体料浆中加入了占水泥质量1%的塑化剂(SP)。一般而言,在实际工程应用中这种塑化剂的常规添加范围是水泥质量的0.5%~1.5%。为了探究搅拌剪切速率对料浆性能影响,研究采用了固定的灰砂比(1:8),物料配比详见表3。

表3 实验配比表

组别	灰砂比	质量分数/ %	塑化剂/ g	水泥/g	水/g	尾砂/ g
B-1	1:8	77	0	171.11	460	1368.89
B-2	1:8	75	0	166.67	500	1333.33
B-3	1:8	73	0	162.22	540	1297.78
B-4	1:8	73	1.62	162.22	540	1297.78

## 2 实验装置及实验过程

以往研究中,为了观测膏体微观结构,通常采用CT或冷冻电镜等手段<sup>[9-10]</sup>。然而,这些技术均无法实现实时无干扰观测,不可避免地破坏了样品的微观结构。而随着聚焦光束反射测量技术(FBRM, Focused Beam Reflectance Measurement)的发展,无扰动原位观测膏体微观结构成为了可能。FBRM可以在实现原位无扰动的前提下,实时监测体系中细观粒度的变化及变化速率<sup>[11-12]</sup>。FBRM还能够实现对平均弦长和相对颗粒数量的高精度、可重复性测量。其中,平均弦长的测量包括独立颗粒的单个数据以及颗粒相互聚集形成的聚集体或絮团的整体数据。通过FBRM,可获得颗粒(如单个颗粒、聚集体或絮团等)的弦长分布和数量等基本参数<sup>[13-16]</sup>。FBRM可快速测定体系中颗粒的弦长值,并对结果进行统计分析。在工作过程中,FBRM的探头发出一束激光,该激光通过光学组件校准后,从窗口射入检测样品中。当射出的激光接触到颗粒或聚集体时,会发生反射,反射光被探头接收并被记录为脉冲信号。通过分析脉冲信号的时间与激光扫描速度的

乘积,即可计算出颗粒的弦长值。进一步对这些弦长值求平均,即可得到平均弦长值,用于表征料浆中颗粒或聚集体的平均粒径,进而反映膏体料浆的微观结构特征。

为此,FBRM实验装置如图2所示。实验装置包括FBRM探头、装样品的烧杯、计算机及搅拌机,其中搅拌机可调速模拟不同搅拌剪切条件<sup>[17-18]</sup>。

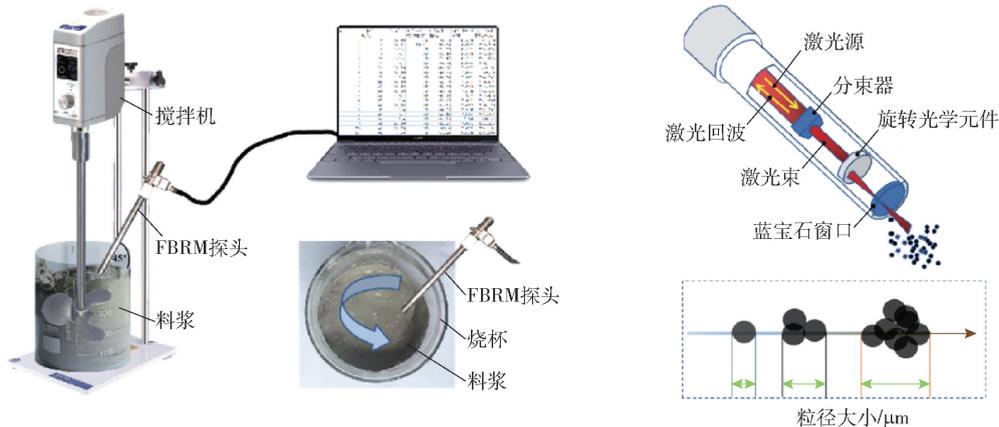


图2 FBRM实验装置及其原理

### 3 实验结果与讨论

根据FBRM的测试结果,得到样品实时颗粒数及平均弦长参数,绘制数据曲线,如图3~图6所示。测试结果主要包含两个维度:一是实时记录的颗粒总数,具体见图3~图6中的(a)部分,此处的颗粒总数涵盖了颗粒聚集体与独立颗粒的总和;二是颗粒聚集体与独立颗粒的平均弦长,具体见图3~图6中的(b)部分。

从测试结果(图3~图6)可以看出,当搅拌剪切速率超过某值(不同实验组该值不同)时,同一样品测得的平均弦长相较于更低剪切速率时更大,而对应时刻颗粒总数则减少。这表明不同剪切速率下制备的膏体微观结构特征不同,剪切速率变化直接影响了颗粒的聚集状态。

另外,根据以上4组实验数据,搅拌剪切速率较低时,全尾砂膏体样品的颗粒数量与平均弦长虽保持动态平衡,但相较于更高剪切速率时,其数据波动更为显著。这是因为低剪切速率下,样品中仍存在大量未分散大颗粒,当检测探头探测到大颗粒时,会导致平均弦长数据突增(观测到的数量减少),进而增大了数据的波动性。

而随着搅拌剪切速率提高且不超过 $480\text{ s}^{-1}$ ,样品的平均弦长逐渐减小,而监测到的颗粒数量则相

样品在不同搅拌条件下制备好后,直接开启FBRM仪器进行测试。同时,为确保FBRM探头所得数据具有代表性,应尽量使探头探测空间范围更大。探头安装时,根据图2中的 $45^\circ$ 倾斜角度进行安装,同时把装有待测试样品的烧杯固定在测试台上。测试过程中,每隔10 s记录一次数据,每组实验测试30 min。

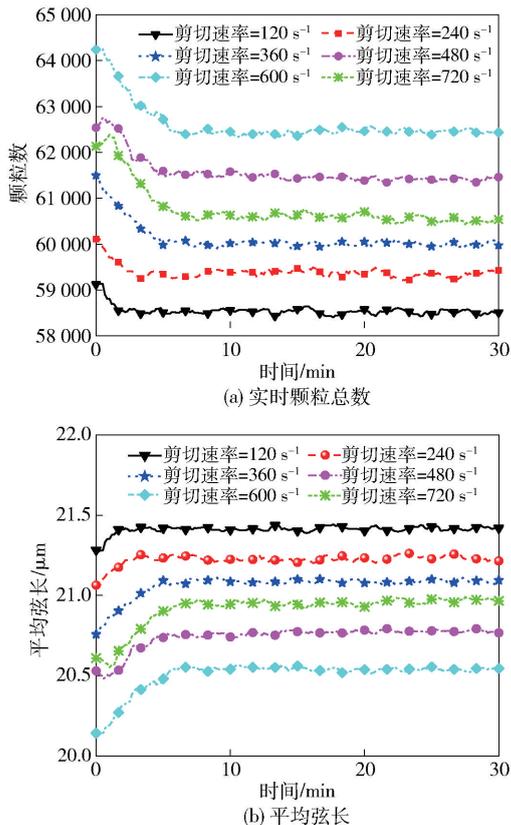
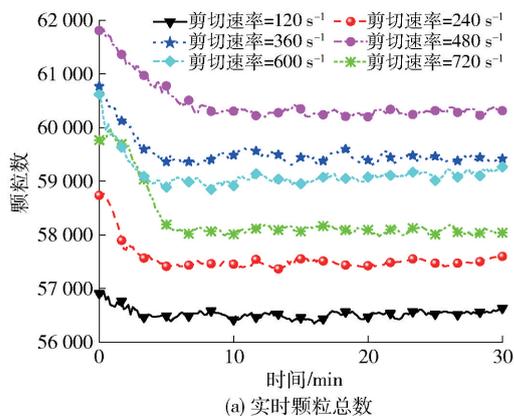
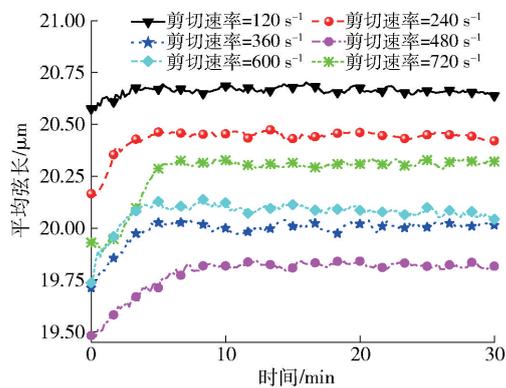


图3 剪切速率对样品B-1微观结构影响

应增加。这表明合理提高搅拌速率,可以有效降低颗粒的聚集,促进膏体中不同成分之间的均质性。然而,当剪切速率超出 $480\text{ s}^{-1}$ (B-1组除外)后,样

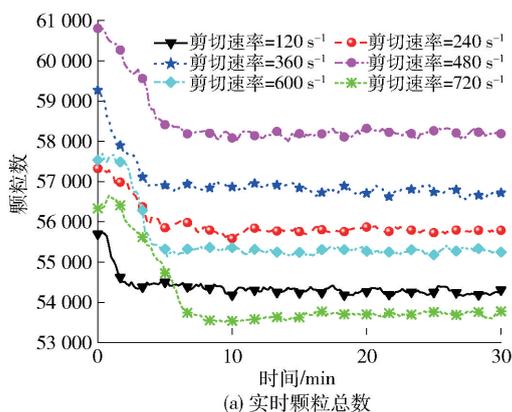


(a) 实时颗粒总数

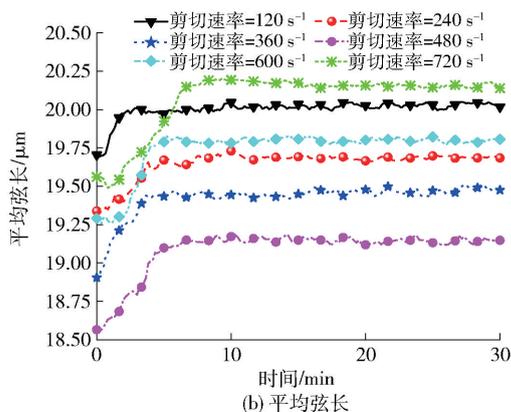


(b) 平均弦长

图4 剪切速率对样品 B-2 微观结构影响

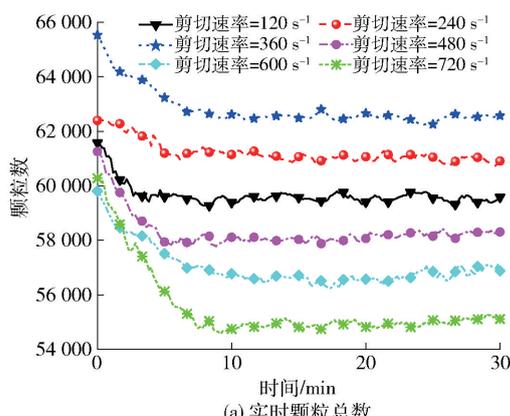


(a) 实时颗粒总数

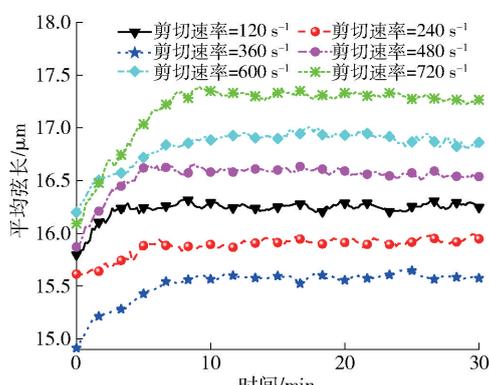


(b) 平均弦长

图5 剪切速率对样品 B-3 微观结构影响



(a) 实时颗粒总数



(b) 平均弦长

图6 剪切速率对样品 B-4 微观结构影响

品测得的平均弦长并未进一步减小,反而出现了平均弦长增长的趋势,因此将该搅拌剪切速率定为搅拌阈值。

从以上结果可以看出,剪切作用对膏体微观结构的影响还受到膏体固体质量分数的影响,如样品 B-1 组,由于其固体质量分数较高,其搅拌剪切阈值更高;而 B-4 组由于加入了塑化剂(SP),制备的膏体样品对剪切速率的响应更为敏感(相较于 B-3 组),这表明 SP 的加入有利于加快膏体中颗粒的分散,使膏体样品搅拌阈值降低。

## 4 搅拌剪切对膏体微观结构的影响机制

实验结果表明,搅拌剪切作用不仅通过直接促进水泥颗粒与尾砂的分散从而改变膏体的微观结构,还对膏体静止后微观结构的演变产生显著影响。基于此,本文从搅拌剪切过程中颗粒分散效果和搅拌剪切结束后颗粒聚集速率两个角度展开了深入分析。

### 4.1 剪切过程中的分散效果

通过 FBRM 能够得到搅拌完成后(FBRM 开始测试时)膏体料浆的平均弦长,并绘制成图 7 所示,

其结果显示了不同搅拌剪切速率下制备样品的平均弦长变化。

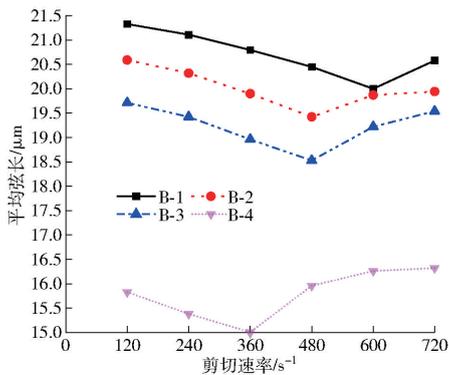


图7 剪切速率与膏体的平均弦长关系

从图7可以看出,在搅拌剪切速率不高于 $480\text{ s}^{-1}$ 时(B-4组除外),平均弦长随着剪切速率的增加而减小。这是因为更高的搅拌速率有助于尾砂、水泥等固体颗粒的分散,降低了颗粒之间的聚集,促进膏体的均质性,从而改善料浆的流动性及固化后的力学性能。

另外,样品B-4显著区别于其他3个试验组。这是因为不同于另外3个实验组,B-4组添加了塑化剂。塑化剂能减弱颗粒间的相互作用,有利于颗粒的分散,从而降低分散颗粒所需剪切速率。因此,可以认为塑化剂可能改变了膏体样品对搅拌剪切的敏感性。

#### 4.2 搅拌剪切停止后的聚集速率

观察测试结果(图3~图6)可以发现,样品测得的平均弦长在测试初期有一个上升阶段。这说明经历搅拌剪切破坏之后,当剪切作用停止膏体料浆颗粒会有一个逐渐聚集恢复的过程。将搅拌剪切停止后膏体料浆颗粒逐渐聚集并趋于稳定这一过程,定义为膏体的细观结构聚集期。通过这一定义,可以从图3(a)~图6(a)分别得到4组料浆在不同搅拌剪切速率作用下的聚集期时长,结果见表4。

表4 搅拌剪切速率对聚集时长的影响 s

组别	搅拌剪切速率( $\text{s}^{-1}$ )					
	120	240	360	480	600	720
B-1	$170 \pm 10$	$280 \pm 40$	$360 \pm 20$	$390 \pm 30$	$490 \pm 20$	$500 \pm 30$
B-2	$190 \pm 20$	$320 \pm 20$	$360 \pm 10$	$400 \pm 10$	$440 \pm 40$	$460 \pm 20$
B-3	$260 \pm 10$	$350 \pm 30$	$360 \pm 20$	$400 \pm 10$	$420 \pm 30$	$450 \pm 10$
B-4	$310 \pm 30$	$360 \pm 20$	$370 \pm 10$	$380 \pm 20$	$390 \pm 10$	$430 \pm 30$

从表4可以看出,在不同搅拌剪切速率作用下,相同配比的料浆的聚集期有着明显差异,可以认为搅拌剪切作用改变了膏体料浆颗粒之间的聚集动力学<sup>[19]</sup>。

为了量化膏体料浆细观结构的变化,结合水泥浆聚集动力学的研究成果,引入颗粒动力学模型对膏体细观结构变化进行研究,采用颗粒聚集速率来表征膏体料浆内部颗粒悬浮体的细观结构变化<sup>[20]</sup>,如式(1)所示。

$$\varepsilon = \frac{\bar{C}}{V_i} \quad (1)$$

式中, $\varepsilon$ 为悬浮体颗粒聚集速率; $\bar{C}$ 为平均弦长变化量; $V_i$ 为聚集期的时长。

分析公式(1)中各物理量关系,该公式反映了颗粒之间作用力的大小情况。为了使结果更为准确,在计算 $\bar{C}$ 时取1 min范围内数据的平均值。 $\varepsilon$ 正负号反映了细观结构处于聚集或分散状态(正代表聚集,负则代表分解)。依据公式(1),计算4组样品的弦长变化参数,最后得到结果如图8所示。

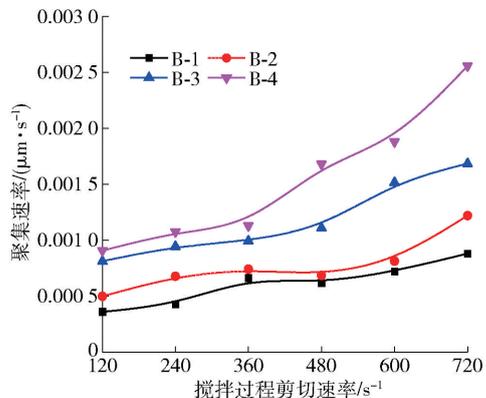


图8 不同剪切速率下膏体细观演变速率

从图8可以看出,伴随着剪切速率的提高,在高剪切作用下制备膏体料浆的细观结构变化速率大幅增大。在搅拌剪切速率超过 $480\text{ s}^{-1}$ 时,B-2和B-3组所制备的样品颗粒聚集速率大幅增大;而在塑化剂作用下,当搅拌剪切速率超过 $360\text{ s}^{-1}$ 时,B-4组样品的聚集速率就出现显著上升;相较于固体质量分数更低的实验组,固体质量分数更高的B-1组的颗粒聚集速率则在剪切速率超过 $600\text{ s}^{-1}$ 时才显著增大。以上分析结果表明,膏体料浆的细观结构演变受到多种因素的共同影响,不仅与其搅拌过程的剪切速率有关,还与料浆的配比、外加剂等因素密切相关。因此,膏体料浆细观结构的变化应该综合考虑各项因素,从而科学评估其宏观性能的演变。

## 5 结论

1) 膏体料浆的细观结构受到其搅拌制备过程

的剪切速率影响,适当提高搅拌剪切速率有助于促进颗粒分散,促进尾砂、水泥等固体颗粒的相互混合。然而,如果搅拌剪切速率过大,不仅导致搅拌能耗增加,还会促进颗粒之间的聚集趋势,不利于膏体的细观结构稳定。

2) 膏体料浆的搅拌制备存在剪切速率阈值,当搅拌剪切速率小于该阈值时,提高搅拌剪切速率可以减少颗粒的聚集;而当剪切速率超过该阈值时,制备的膏体料浆的细观结构变化速率显著增大。

3) 搅拌剪切对膏体细观结构的影响,还与其固体质量分数及外加剂有关。提高膏体的固体质量分数,会导致其搅拌剪切速率阈值增大;而在膏体中掺入塑化剂,则会显著提高搅拌剪切对其细观结构的影响,降低膏体的搅拌剪切速率阈值。

### [参考文献]

- [1] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等. 膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J]. 中国有色金属学报,2024,34(5):1652-1666.
- [2] 陈玉国,李刚,王连松. 铁矿山尾矿减排方法、潜在安全风险及对策研究[J]. 绿色矿冶,2024,40(3):15-19.
- [3] 刘浪,辛杰,张波,等. 矿山功能性充填基础理论与应用探索[J]. 煤炭学报,2018,43(7):1811-1820.
- [4] 吴爱祥,王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [5] 阳京平. 全尾砂膏体充填采矿技术现状及展望[J]. 中国矿业,2021,30(S1):17-23.
- [6] 杨柳华. 膏体搅拌过程流变特性及剪切作用机制研究[D]. 北京:北京科技大学,2020.
- [7] WU A X, WANG Y, WANG H J, et al. Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill [J]. International Journal of Mineral Processing, 2015, 143: 65-71.
- [8] 陈峰宾,苏芮,杨柳华,等. 搅拌速度对全尾砂膏体流

变性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2022,32(11):3541-3552.

- [9] 陈鑫政,郭利杰,史采星,等. 深锥浓密膏体充填工艺在国内某铜矿的应用与改进[J]. 中国矿业,2022,31(5):135-141.
- [10] YANG L H, WANG H J, WU A X, et al. Shear thinning and thickening of cemented paste backfill [J]. Applied Rheology, 2019, 29(1): 80-93.
- [11] 王洪江,杨柳华,王勇,等. 全尾砂膏体多尺度物料搅拌均质化技术[J]. 武汉理工大学学报,2017,39(12):76-80.
- [12] 周旭,阮竹恩,吴爱祥,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.
- [13] 程海勇. 时效效应下膏体流变参数及管阻特性[D]. 北京:北京科技大学,2018.
- [14] 冯忠绪,郝俊峰. 搅拌设备设计讲座(第二十五讲):立轴行星搅拌机[J]. 工程机械,2020,51(9):107-110.
- [15] 闫泽鹏,尹升华,严荣富,等. 搅拌时间对粗骨料膏体均质性及早期强度的影响[J]. 中国有色金属学报,2022,32(4):1164-1174.
- [16] 吴爱祥,李红,程海勇,等. 全尾砂膏体流变学研究现状与展望(下):流变测量与展望[J]. 工程科学学报,2021,43(4):451-459.
- [17] Han D, Ferron D R. Effect of mixing method on microstructure and rheology of cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93278-288.
- [18] 周英烈,宾峰,王雁波. 全尾砂膏体充填连续搅拌均匀性评价方法[J]. 现代矿业,2021,37(1):53-56.
- [19] 谢经鹏,杨柳华,郑攻关,等. 充填料浆泌水特性及其细观结构演变[J]. 绿色矿冶,2024,40(4):1-7.
- [20] YANG L, JIA H, WU A, et al. Particle aggregation and breakage kinetics in cemented paste backfill [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(9):1965-1974.

## Study on the Effect of Mixing Shear on the Meso-structure of Full Tailings Paste

ZHENG Gongguan<sup>1</sup>, WANG Yongbin<sup>2</sup>, XIE Jingpeng<sup>1</sup>, HU Yaqiao<sup>1</sup>, ZHANG Jiuyu<sup>1</sup>

(1. Anhui Copper Crown Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Tongling 244000, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Mixing shear significantly enhances the homogeneity of full tailings, cement and admixtures, and also affects the physicochemical properties of prepared paste slurries. However, the underlying

(下转第40页)

## Research on Resource Treatment of Oily and High-salt Wastewater in Non-ferrous Metal Industry

HUANG Songyu<sup>1</sup>, YU Miao<sup>2</sup>

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The raffinate in the production of copper sulfate in a non-ferrous metal smelting enterprise is a kind of oily high-salt wastewater. The concentration of petroleum is 92.5 mg/L, the concentration of TOC is 89.5 mg/L, and the main salt is sodium sulfate. In this paper, the air flotation oil removal method was selected as the pretreatment process, and the fixed bed activated carbon adsorption method was used to remove the oil from the wastewater. The results show that the oil removal effect of air flotation method is limited, the removal rate of petroleum pollutants is 30.9%, the removal rate of TOC is 33.1%, and there are still most of the oil residues. In the fixed bed activated carbon adsorption method, the up-flow water inlet method has a higher oil removal rate, which can reach about 80%. When the water flow rate is set to 500 ~ 1 000 mL/h, the better treatment effect and higher treatment efficiency can be obtained, and the effluent effect is stable from 2 h after the adsorption to the end of the adsorption. Anhydrous sodium sulfate (sodium sulfate) can be obtained by separating and extracting the wastewater after oil removal, and its quality is close to the first-class product of national standard I by analysis.

**Key words:** high salt wastewater; dissolved air flotation; activated carbon adsorption; oily wastewater; low-temperature thermal concentration; sodium sulfate

---

(上接第 27 页)

mechanisms remain poorly understood. In order to deeply understand the effect of mixing shear on the properties of paste slurry, the meso-structure of paste slurry was tested by the Focused Beam Reflectometry (FBRM) technique to analyze the effect of shear rate on the meso-structure of full tailings paste. The results indicate that the mixing shear has a significant effect on the pastemeso-structure. As the shear rate increases, the aggregated particles in the paste are dispersed, the average chord length decreases, and the number of real-time particles increases; However, beyond a certain threshold the average chord length of the particles in the paste increases, and the measured number of real-time particles decreases, which suggests that the high-speed shear may alter the physicochemical characteristics of particle surfaces, thereby enhancing inter-particle interaction forces, and these changes further influence the rheological behavior and post-curing mechanical properties of the paste.

**Key words:** full tailings paste; mixing shear; meso-structure; particle