

充填料浆泌水特性及其细观结构演变

谢经鹏^{1,2} 杨柳华² 郑攻关¹ 李一凡²

(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] 充填料浆泌水对接顶率、挡墙压力及充填体力学性能均有较大影响,然而目前对料浆的泌水机制认识不明。为此,研究了灰砂比、料浆质量分数、颗粒级配及减水剂掺量对充填料浆泌水特征的影响,同时结合计算机断层扫描技术(CT)分析了泌水过程细观结构的演变。研究表明,料浆的泌水受到颗粒级配、灰砂比、质量分数及减水剂掺量的影响,增加细颗粒含量、灰砂比、质量分数均可以显著降低料浆的泌水,而掺入减水剂提高料浆泌水离析的风险。结合CT测试结果和多孔网络建模,充填料浆泌水过程可划分为5个阶段:诱导期、加速期、恒定期、密实期及固结期,在整个泌水周期内伴随着泌水通道的形成、发育及闭合演变。研究结果对深入认识料浆泌水过程以及实现充填料浆泌水调控具有重要意义。

[关键词] 料浆泌水; 细观结构; 泌水通道; 减水剂

[中图分类号] TD853

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)04-0001-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.04.001

0 前言

矿产资源是我国经济发展的物质基础,然而开发矿产资源的同时,也引发了严重的环境污染及安全问题,这些问题制约了矿山的可持续发展^[1-2]。近年来,矿业领域迈向绿色发展方向^[3],在此背景下,膏体充填采矿法以其安全、环保、高效的明显优势在越来越多的矿山中应用^[4-5]。充填采矿法利用

矿石开采过程中产生的固体废弃物,回填至地下采空区,不仅可大幅减少地表固体废弃物的堆存^[6],而且可以降低尾矿库溃坝^[7]、采空区坍塌的风险,最大程度保护地表及井下人员的安全,目前已逐渐成为绿色矿山建设采用的开采方法。

在实际充填工程中,充填料浆通过管道输送进入采场后,充填料浆易发生沉降现象^[8],尤其是充填体中的粗颗粒沉降最为明显,同时充填料浆中有部分自由水泌出^[9],因此,充填至采场的料浆的实际质量分数与设计值相比存在一定误差。而料浆的泌水特性会严重影响其充填接顶率^[10]、挡墙压力^[11]及充填体力学强度^[12]等关键性能,因此,有必要研究料浆泌水特性并探究其对充填体性质的影响。然而目前针对尾砂充填料浆泌水特性的研究,基本为单因素定性分析^[13],大部分考虑水泥含量^[14]、质量分数^[15]、外加剂^[16]等因素对充填料浆泌水特性的影响。如邓代强等^[17]根据膏体料浆不同配合比制定充填生产核算指标;杨陆海等^[18]从膏体料浆不同质量分数入手,提高充填接顶率;吕宪俊^[19]、李宗楠^[20]等通过研究分级尾砂、极细粒级尾砂,得到料浆沉降规律。充填料浆泌水特性涉及多个因素,然而针对料浆泌水特性的影响因素及其造

[收稿日期] 2024-07-10

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(52104129);
河南省双一流学科建设专项项目(AQ20230735)。

[作者简介] 谢经鹏(1989—),男,江苏徐州人,硕士,主要从事矿山固废利用研究工作。

[通信作者] 杨柳华(1987—),男,江西赣州人,副教授,主要从事膏体充填采矿技术等研究工作。

[引用格式] 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.

XIE Jingpeng, YANG Liuhua, ZHENG Gongguan, et al. Bleeding characteristics and the evolution of microstructure of tailings backfill slurry[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024,40(4):1-7.

成的充填体微观结构变化的研究仍较为薄弱。

因此,本文针对粗骨料充填料浆的泌水特性进行研究,分析颗粒级配、灰砂比、质量分数及减水剂掺量对充填料浆泌水特征的影响规律,并利用计算机断层扫描技术(CT)测试料浆泌水过程的细观结构,从而为深入了解充填料浆泌水特性、研究充填体性能及参数设计提供参考。

表 1 全尾砂化学成分分析

成分	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	CO ₂	Cl	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	NiO	SrO	BaO	ZrO ₂	%
含量	62.90	5.86	1.16	15.20	2.31	0.90	3.10	7.20	0.55	0.22	0.04	0.03	0.02	0.20	0.30	0.01	

含量较高,说明该矿的尾砂是一种比较好的惰性材料,无毒无害,较适宜作为井下充填材料。

全尾砂密度为 2.68 g/cm³,孔隙率为 49.89%,
 $d_{10} = 2.786 \mu\text{m}$ 、 $d_{50} = 32.128 \mu\text{m}$ 、 $d_{90} = 405.077 \mu\text{m}$,



(a) 全尾砂



(b) 减水剂

图 1 全尾砂及减水剂的外观形貌

1.1.2 分级与筛分尾砂

为研究尾砂的粒度组成对充填料浆泌水的影响,对全尾砂进行分级与筛分处理。以 28 μm 、50 μm 作为分级界限,设置 4 个级配(小于 28 μm 、全尾砂,28 ~ 50 μm ,大于 50 μm)用于考虑颗粒级配对充填料浆泌水特性的影响。

1.1.3 胶凝材料与充填用水

胶凝材料选用矿山充填常用的标准 42.5 型水

1 实验材料及方案设计

1.1 实验材料

1.1.1 全尾砂

采用某矿山的全尾砂作为实验材料,通过采用 X 射线荧光光谱分析仪(XRF)得到该全尾砂的化学成分,结果见表 1。从表 1 中可知, SiO₂、Al₂O₃、CaO

其外观形态如图 1 示。全尾砂粒径 -20 μm 、-35 μm 、-75 μm 的颗粒累计含量分别为 46.55%、51.34%、59.85%。

泥。根据厂商提供的检测报告,其主要化学成分见表 2。该水泥的比表面积为 4.2 m²/kg,比重为 3.14。本次实验不讨论料浆化学性质对其泌水性的影响,因此采用自来水作为充填用水。

1.1.4 减水剂

聚羧酸减水剂(UHPC)是一种性价比较高的减水剂,其外观形貌如图 1 所示。UHPC 通常用于降低膏体料浆的屈服应力,优化料浆的流动性能,具有

表 2 水泥主要化学成分

成分	MgO	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO ₃	%
含量	1.40	20.70	0.18	0.48	4.50	2.60	3.30	65.10	

明显的时间效应。

1.2 方案设计

1.2.1 不同质量分数充填料浆泌水实验方案

采用全尾砂作为骨料,固定灰砂比 1:10、外加剂掺量为 0,仅通过改变用水量来改变料浆的质量

分数。料浆质量分数设置为 4 个梯度:62%、66%、70%、72%,制备料浆的固体物料总质量为 500 g。料浆制备好后每隔 2 h 进行一次泌水量测试。

1.2.2 不同颗粒级配的充填料浆泌水实验方案

采用单一变量法,固定料浆质量分数为 70%、

灰砂比 1:10、外加剂掺量 0 制备料浆, 配制固体物料的总质量为 500 g, 变量为尾砂颗粒级配。同样, 在料浆制备好后每 2 h 记录一次泌水量。

1.2.3 不同灰砂比的充填料浆泌水实验方案

采用单一变量法, 固定质量分数为 70%、外加剂掺量 0。设置 4 个不同的灰砂比 (0、1:5、1:10、1:20), 各组固体物料仍保持 500 g 不变, 每隔 2 h 测试一次料浆泌水量。

1.2.4 不同减水剂掺量充填料浆泌水实验方案

采用单一变量法, 固定灰砂比 1:10、质量分数为 70%。减水剂掺量设置 5 个梯度 (0、0.5%、1%、1.5%、2%), 各组固体物料仍保持 500 g 不变, 料浆制备好后每隔 2 h 测试一次泌水量。

2 实验过程

2.1 泌水测试

1) 实验准备。先将洗净且干燥的圆柱形容器稳定地放置在实验台上。根据实验要求, 将不同配比料浆样品倒入试验圆柱容器中, 用工具轻轻刮平料浆的表面, 以确保其表面平整。将样品装入容器后, 立刻用封口膜密封其顶端, 防止水分蒸发。

2) 观测记录。遵循测定泌水率的标准操作程序, 并记录下料浆初始的高度作为实验的基准数据, 每隔 2 h 记录相应实验组的泌水量。最后, 利用式 (1) 计算实验样品动态泌水率, 实验基本流程如图 2 所示。



图 2 尾砂浆液泌水观测实验

$$B = \frac{W_w}{W} \times 100\% \quad (1)$$

$$G_w$$

式中: B 为泌水率, %; W_w 为泌水总量, g; G_w 为所取试样质量, g; W 为制备料浆总用水量, g; G 为制备的尾砂浆浆总质量, g。

2.2 细观结构测试

为了解泌水过程料浆细观结构的变化, 采用工业 CT 技术对料浆进行扫描。选取全尾砂质量分数为 70%、灰砂比为 1:10、外加剂掺量为 0 的实验组作为典型代表进行细观结构测试。受限于论

文篇幅, 仅给出了泌水时间为 0 h、7 h、14 h、21 h、28 h 的 CT 扫描结果, 分别命名这 5 个时刻点为 T1 ~ T5。每组试样进行 3 次试验取平均值, 然后将不同时期的各个试样进行标注。

进行 CT 测试后, 获得了每个样本的 1 800 层横截面图像, 以及沿着样本垂直方向的 1 350 层纵截面图像。同时, 为避免管壁对采样扫描干扰, 选取了中间区域进行深入分析。随后利用 ImageJ 软件对原始图像数据进行预处理, 以便于后续的三维重建工作, 扫描过程如图 3 所示。

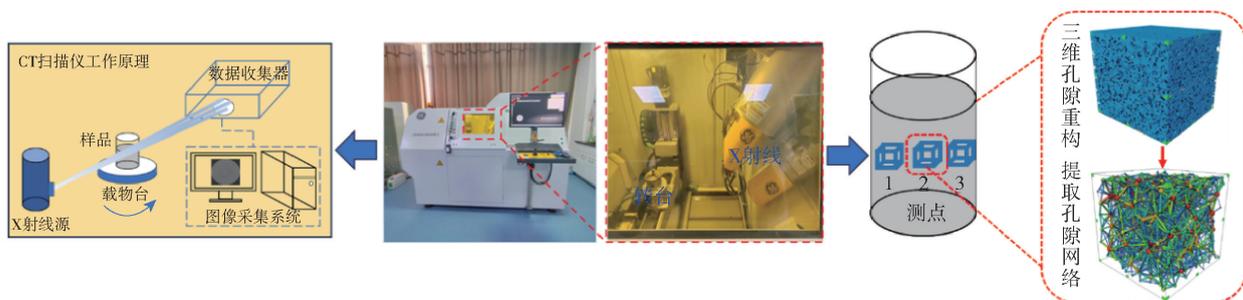


图 3 计算机断层扫描实验流程

3 结果及讨论

3.1 料浆质量分数对泌水特性影响

不同的质量分数料浆泌水率随时间变化如图4所示。从图4可以看出,随着质量分数增加,料浆泌水得到显著抑制。当质量分数为62%时,料浆在短时间内出现泌水现象,且泌水率最大可达25%左右;当质量分数增加至70%时,泌水速率及泌水量均明显降低;而当质量分数达到72%时,最大泌水率降低至不足2.5%,料浆几乎不泌水。

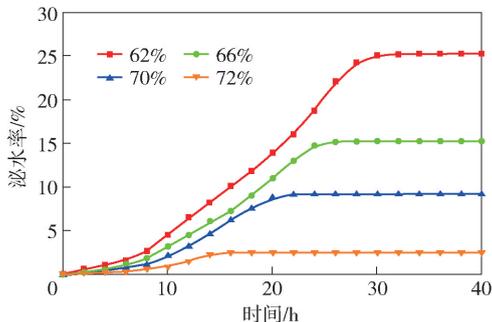


图4 料浆质量分数对泌水率的影响

这表明充填料浆质量分数是影响料浆泌水率的关键因素之一,充填料浆泌水率与质量分数之间呈负相关关系,随着料浆质量分数不断增大,料浆的泌水率呈不断下降趋势。首先,料浆中尾砂、水泥等颗粒能够吸收一部分水,使得可泌出水逐渐减少,从而泌水率不断降低。其次,随着料浆质量分数增加,料浆单位体积内固体体积增大,使得料浆结构更为密实,水分分布变得更为均匀,减少了水的渗透和泌出。

3.2 颗粒级配对料浆泌水特性影响

物料颗粒尺寸、形状、颗粒间的间隙都会影响料浆的泌水性能。如图5所示,在相同料浆质量分数、灰砂比等条件下,泌水率随颗粒级配的变化而变化。当尾砂颗粒级配小于 $28\ \mu\text{m}$ 时,料浆的泌水率小于2%。这是因为料浆中大量的细颗粒,在同等质量下与水有更大的接触面积,能够更有效地吸附和保持水分。其次,细颗粒之间微小孔隙可以在料浆静置过程中储存水分,从而提供了良好的保水能力。此外,细粒级颗粒之间的紧密堆积减少了料浆中导水通道的形成,阻止水扩散和析出。同时,致密的结构使得水分的流动受到限制,有助于保持水分在料浆中的相对稳定。

当颗粒级配为 $28\sim 50\ \mu\text{m}$ 时,其泌水率相比全

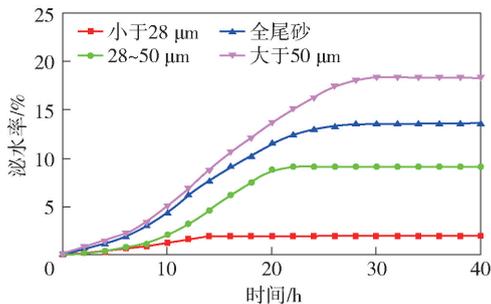


图5 颗粒级配对料浆泌水率的影响

尾砂制备料浆有所增加;而当尾砂颗粒级配大于 $50\ \mu\text{m}$ 时,料浆的泌水率开始大幅增加,最大泌水率接近20%,料浆的水分析出量明显增多。这说明不同级配改变了料浆中颗粒的堆积方式,粗颗粒使得料浆中出现了更多的孔隙,导致导水通道的增加,使得水分在静置时更容易在颗粒间扩散和泌出。

3.3 灰砂比对料浆泌水特性影响

灰砂比对料浆泌水率的影响如图6所示。从图6可知,当充填料浆为非胶结充填时,充填料浆的泌水现象非常明显,最大泌水率超过15%;而添加水泥后,胶结料浆的泌水量显著减少,而当灰砂比达到1:5时,充填料浆的泌水率小于5%,泌水量较少。可以认为,胶凝材料可有效抑制充填采场的泌水,从而提高充填接顶率。

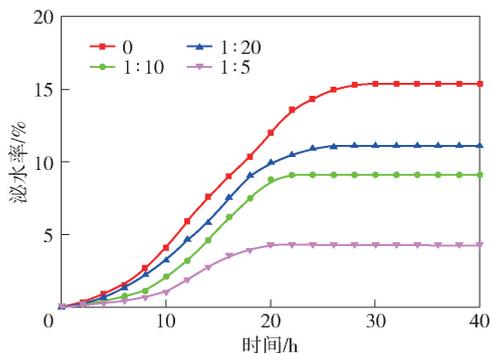


图6 料浆灰砂比对泌水率的影响

添加水泥等胶凝材料将对充填料浆的泌水起显著的抑制作用,这是因为水泥颗粒具有较强吸水性,同时早期水化产物可将尾砂等颗粒黏结在一起,迅速吸收料浆中的水分形成均匀的充填浆体,提高料浆的稳定性并减少泌水。另外,水泥的水化反应也会消耗自由水,因此增加水泥掺量会导致料浆自由水减少,从而进一步降低泌水率。

3.4 减水剂掺量对料浆泌水特性影响

减水剂不同掺量下料浆泌水率的变化如图7所

示。从图7可知,随着减水剂掺量的增加,泌水量呈现增大趋势。当减水剂添加量为0时,料浆的泌水率小于10%;随着减水剂掺量增加,泌水率逐渐增大并超过了10%。另外,从图7中也可以看出减水剂的减水作用效果并未随着掺量增大而持续增加,在掺量达到1.5%左右时减水效果最为显著,掺量为2%(相比1.5%)时料浆泌水率并未显著变化。

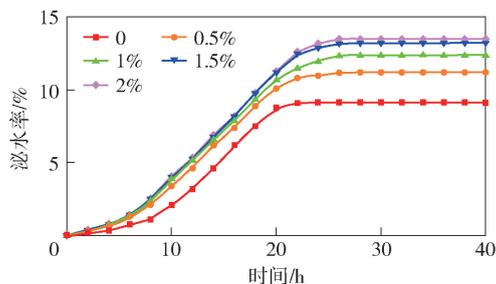


图7 减水剂掺量对料浆泌水率的影响

由此可见,添加适量减水剂能够改变水泥颗粒

的分散性和润湿性,水泥颗粒更均匀地分散在充填料浆中,使得包裹的水被释放出来提高料浆流动性。因此,在保证相同流动性前提下,添加减水剂可以适当减少用水量,从而提高充填料浆质量分数。然而当减水剂掺量与料浆配比不合理时,极易导致料浆中自由水增多,从而增加料浆的泌水。

3.5 泌水过程的细观结构演变

为进一步了解料浆泌水机制,有必要对泌水过程细观结构进行分析。为此,将获得的切片数据导入至 Avizo 软件中,对原始数据进行处理,实现料浆三维重构,然后采用软件中的 Interactive Thresholding Top-Hat 算法对切片进行图像二值化处理;选用分水岭算法进行图像分割,基于灰度分割孔裂隙,调整阈值大小,进行人机交互式阈值分割,最终提取出扫描区域的孔裂隙构,从而得到各个时期料浆的三维重构结构,如图8所示。

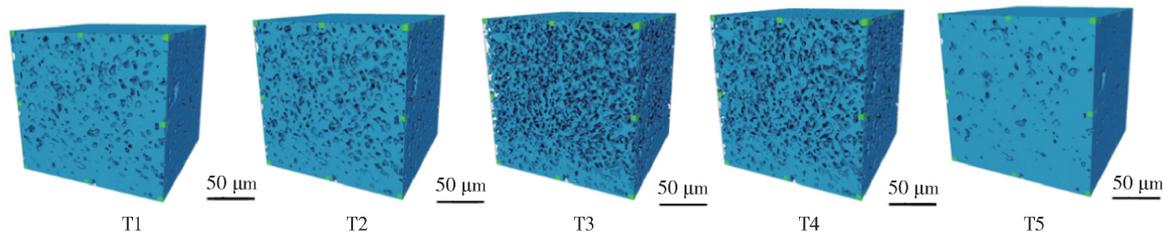


图8 泌水过程中孔隙结构演化过程

为了更为直观反映出孔隙结构的演变过程,采用 PNM(Porous Network Modeling),进行多孔网络建模。PNM 是一种用于定量描述和分析多孔介质的孔隙结构和网络连接性的技术方法。在这种模型中,孔隙被抽象为球体,而连接这些孔隙的喉道被简化为管状结构(棒体)^[21-23]。球体的大小对应于孔隙的体积,而管状结构的尺寸和位置则对应着喉

道的特性。通过这种几何化的表征,PNM 能够提供孔隙结构的定量描述,并以直观的方式揭示孔隙和喉道的分布特性。从孔隙网络模型的角度来看,尾砂料浆可以被认为是由大量大小、形状和连接性各异的孔隙组成的多孔介质。进行 T1~T5 各时期料浆试样多孔网络建模,并提取 PNM,结果如图9所示。

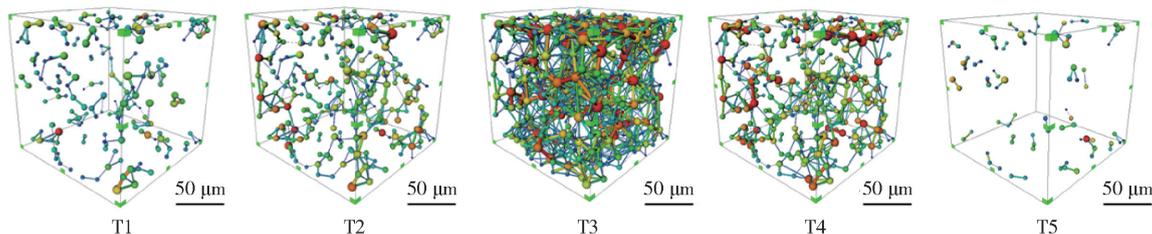


图9 泌水过程中 PNM 网络演化

从图8、图9中 T1~T5 孔隙结构及 PNM 网络演化可知,在初期,完整的导水通道并未形成,少量泌水主要来自料浆顶部水的析出,此时孔隙结构并未

发生较大改变,可称之为诱导期。当浆液进入快速沉降期,由于全导水通道形成,水分可以较快地通过颗粒之间的通道移动,这一时期中下层料浆的孔隙

体积变化较大,可称之为加速期。随着时间的推移,孤立孔隙逐渐连通,松散破碎的结构逐渐密实,这是由于尾砂颗粒位移重组导致松散破裂的孔隙逐渐消失,泌水量恒定增加,这个阶段称之为恒定期。随着缓慢沉降阶段的到来,颗粒间距逐渐缩小,导致水流通道变窄,孔隙体积占比的变化开始放缓,进入密实

期。随后,颗粒之间开始相互挤压,形成了更紧实的结构,一部分水分被颗粒间的表面张力牢牢吸附,剩余水分即使在重力的作用下也不易泌出,此时料浆进入固结期。结合实验结果及以上分析,绘制全尾砂充填料浆泌水周期,如图 10 所示。泌水过程可划分为诱导期、加速期、恒定期、密实期及固结期 5 个时期。

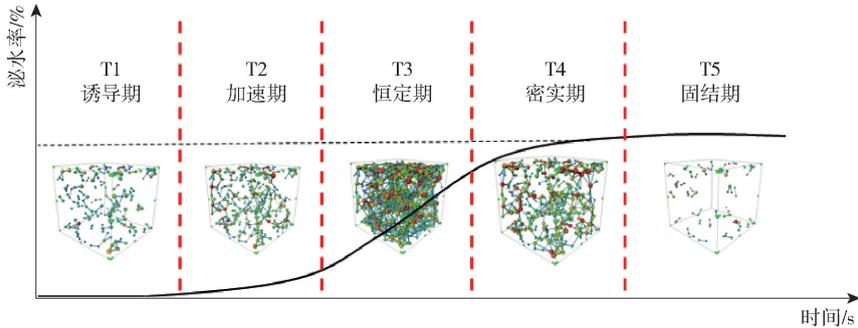


图 10 全尾砂充填料浆泌水周期

4 结论

1) 伴随着水泥掺量、质量分数的增大,料浆泌水得到抑制,有助于形成均匀的充填浆体,提高料浆的稳定性,有效降低充填采场的泌水量,并促进充填体快速固结。

2) 颗粒级配对于料浆泌水性能具有显著影响,料浆的泌水率随着细颗粒含量增加而降低。粗颗粒促使料浆内部孔隙增加,进而形成导水通道,使得水分更容易扩散和泌出。

3) 料浆的泌水率随着减水剂掺量增大而增大,这说明减水剂可以促进颗粒的分散,从而释放絮团内部包裹的水分并提高料浆流动性。然而,减水剂掺量不合理时极易导致料浆泌水离析,增大充填事故发生风险。

4) 根据 CT 扫描的试验结果,结合多孔网络建模发现,泌水周期内伴随着导水通道的形成、发育及闭合演变过程,可划分诱导期、加速期、恒定期、密实期及固结期等 5 个阶段。

[参考文献]

[1] 邵志君,师艳. 金矿开采过程中资源综合利用方法的应用与效果评价——评《黄金矿山》[J]. 有色金属工程, 2024,14(5):155-156.

[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] LIU L, XIN J, HUAN C, et al. Pore and strength characteristics of cemented paste backfill using sulphide tail-

ings: Effect of sulphur content [J]. Construction and Building Materials, 2020, 237:117452.

- [4] 刘晓辉,阮竹恩,朱权洁,等. 尾矿絮体结构的分形特征及其沉降速度研究[J]. 矿业科学学报,2023,8(3):390-397.
- [5] 甘德清,张雅洁,刘志义,等. 胶结充填体早期损伤对后期力学性能的影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(2):1-7.
- [6] 杨柳华,李金仓,焦华喆,等. 引发全尾砂料浆触变特征的临界粒径研究[J]. 中国有色金属学报,2024,34(3):970-983.
- [7] JI Y L, SUN Z P, YANG J B, et al. NMR study on bleeding properties of the fresh cement pastes mixed with polycarboxylate (PCE) superplasticizers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240:117938-117938.
- [8] 王立刚,彭剑平,林健,等. 全尾砂充填试验及充填系统方案研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(1):45-50.
- [9] MAUFFRÉ T, KEITA E, CONTRAIRES E, et al. Analysis of water droplet penetration in earth plasters using X-ray microtomography[J]. Construction and Building Materials, 2021, 283,122651.
- [10] 梁学健,孙光华,徐晓冬. 充填体失稳破坏前兆识别及破坏形式演化规律研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(1):22-29.
- [11] 王振波,范雨润,左建平. 温度和骨料预湿对煤矸石砂浆流变性的影响[J]. 矿业科学学报,2024,9(2):190-198.
- [12] 郭加仁,刘江涛,王增加,等. 金属矿山充填浓度多目标优化控制[J]. 有色金属工程,2024,14(5):113-119.

- [13] 张海波,郭朝阳,郭晋辉,等. 煤气化炉渣对煤矸石膏体充填材料性能影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(1):165-171.
- [14] DALIA B, ALICJA W, MARCIN K. The effect of bleeding on ice formation and water transport in blended cement systems[J]. Construction and Building Materials,2022,324.
- [15] ROUSSEL N, BESSAIES-BEY H, KAWASHIMA S, et al. Recent advances on yield stress and elasticity of fresh cement-based materials[J]. Cement and Concrete Research,2019,124: 105798-105798.
- [16] 黎胜龙,缪兵权,秦海兵,等. 某钨尾矿性质分析及制备新型复合掺合料试验研究[J]. 绿色矿冶,2023,39(3):13-18.
- [17] 邓代强,韩浩亮,汪令辉,等. 充填料浆的泌水沉降性能分析[J]. 矿业研究与开发,2012,32(2):15-17.
- [18] ZHEN B G, JING P Q, LEO P, et al. A contribution to understanding the rheological measurement, yielding mechanism and structural evolution of fresh cemented paste backfill[J]. Cement and Concrete Composites,2023,143,105221.
- [19] 杨陆海,周旭. 充填料浆沉降性及泌水性分析[J]. 采矿技术,2013,13(3):32-33.
- [20] 吕宪俊,崔学奇,葛会超. 全尾矿分级浓缩试验研究[J]. 金属矿山,2008(3):147-149.
- [21] WANG J N, YU R, XU W Y, et al. A novel design of low carbon footprint Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on full scale recycling of gold tailings[J]. Construction and Building Materials,2021,304: 124664.
- [22] 李宗楠,郭利杰,许文远,等. 极细粒级尾砂絮凝沉降规律试验研究[J]. 中国矿业,2014,23(S2):215-218.
- [23] YIN S H, YAN Z P. The effect of coarse aggregate on the bleeding and mechanical properties of cemented paste backfill[J]. Journal of Central South University,2023,30(2):555-567.

Bleeding Characteristics and the Evolution of Microstructure of Tailings Backfill Slurry

XIE Jingpeng^{1,2}, YANG Liuhua², ZHENG Gongguan¹, LI Yifan²

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

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

Abstract: Bleeding of backfill material has a significant impact on the backfill rate, retaining wall pressure, and mechanical properties of the backfill body, but the current understanding of the bleeding mechanism is unclear. Therefore, the effects of the ash-sand ratio, quality ratio, particle size distribution, and superplasticizer dosage on the bleeding of backfill material were studied, and the evolution of the microstructure during the bleeding process was tested using CT technology. The results show that the bleeding of the backfill material is affected by the particle size distribution, ash-sand ratio, quality ratio, and superplasticizer dosage, and increasing the fine particles, ash-sand ratio, and quality ratio can significantly reduce the amount of bleeding, while adding superplasticizer increases the risk of bleeding. Based on the CT test results and Porous Network Modeling, the bleeding process of backfill material can be divided into five stages: induction period, accelerating period, constant period, consolidation period, and final consolidated period. The formation, development, and closure of the channels occur throughout the entire bleeding cycle. The research results are of great significance for deepening the understanding of the slurry bleeding process and achieving the regulation of slurry bleeding.

Key words: slurry bleeding; mesostructured; bleeding channel; water reducing agent