

基于 CT 扫描的矿山充填材料深度脱水细观机理研究

张力友¹, 张伊辉¹, 焦华喆^{2,3}, 王金星^{2,3}, 杨涵^{2,3}

1. 郑州煤炭工业(集团)有限责任公司, 河南 郑州 450000;
2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003;
3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003

中图分类号: TD853.34 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)02-0022-10
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.02.003

摘要 针对全尾砂浓密脱水困难、底流质量浓度低的问题,开展了基于压缩床层不同高度处料浆絮团细观结构深度浓密脱水研究。通过对全尾砂进行动态浓密实验获取压缩床层料浆样品,借助 SEM 及高精度 CT 扫描设备,对获取的絮团结构进行扫描及三维重构处理分析沿压缩床层方向孔隙结构变化规律。结果表明:沿着床层向下,五组料浆内部孔隙平均半径分别为 9.58 μm 、9.23 μm 、8.76 μm 、8.63 μm 及 8.31 μm 。床层顶部料浆质量浓度为 59.4%,絮团呈现松散无规则状,底部料浆质量浓度为 62.1%,絮团呈现致密规则状。对比顶部和底部料浆,孔隙率下降 3.7 个百分点,连通孔隙比下降了 35.53%,孔隙平均配位数减小了 22.73%,孔隙连通性大大降低。本文从细观角度定量表征了微观孔隙结构特征,为矿山充填材料进一步脱水提供理论依据。

关键词 全尾砂; 压缩床层; 絮团结构; CT 扫描; 孔隙率

引言

河南省矿产资源以矿种齐全、分布广泛、产地相对集中、矿种组合配套好、区位优势明显为显著特征,河南省的矿产资源开发生产了巨量的废石和尾矿,其中尾矿多堆存于尾矿库。河南省尾矿库大多建库时间早,建设标准低^[1],各种危库、险库、无主库数量较多,这不仅给人们的正常生活和工作带来安全隐患,还对自然环境造成了难以消除的污染^[2]。

金属矿山尾矿利用问题是河南关注的热点,然而省内矿山开采带来的尾矿及固体废弃物积存总量较大并且尾矿综合利用率低^[3]。近年来,膏体充填凭借着安全、环保、经济、高效的显著优势,成为众多矿山企业充填采矿法的首选,而河南省内尾矿具有矿区集中的自身优势,可就近充填^[4-5]。将尾矿充填至井下采空区既可解决尾矿地表堆存带来的安全、环境问题,又可缓解井下采空区垮塌、地表塌陷压力^[6-7]。

其中,尾砂浓密脱水是膏体充填工艺的关键环节,传统的尾砂浓密脱水主要依靠尾砂自重而沉降,由于尾砂细颗粒居多、尾砂沉降速度慢,导致底流质量浓

度低而达不到充填要求^[8]。而质量浓度是影响尾矿处置效果的关键因素,尾矿的原始状态是选矿厂排出的低质量浓度矿浆,质量浓度仅为 20%~30%。含水量大造成尾矿地表堆存和井下充填效果较差^[9-10]。低质量浓度处置的尾矿利用率不高,在充填采矿过程中忽视了细颗粒尾矿,造成顶板围岩控制效果差,易产生地表塌陷^[11-13]。因此,低质量浓度料浆的脱水浓缩成为了处理尾砂的发展瓶颈。

由于全尾砂浓密过程中疏松的絮网结构泥层具有可压缩性,因此需要考虑絮团致密化情况下的絮网结构压缩性能。而在较高的底流质量浓度条件下运行时,膏体浓密机将处于受压缩性限制的运行模式,意味着尾矿颗粒有足够的停留时间,整个泥层内产生压缩脱水效应。20 世纪初提出的 Kynch 模型^[14]是尾矿浓密脱水理论的基础,其后智利的 Fernando Concha 和 Raimund Buijger^[15]对 Kynch 模型进行了改进,分别从间歇沉降、连续沉降、絮凝沉降、动态浓密角度建立了尾矿浓密底流质量浓度控制模型,并以此为基础开发了动态浓密模拟分析软件。澳大利亚的 Phillip Fawell 团队^[16]通过实验与 CFD 数值模拟技术,研究了

收稿日期: 2024-03-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52374121); 国家重点研发计划课题(2023YFC2907203)

作者简介: 张力友,男,安徽宿州人,工程师,硕士,主要从事矿山开采技术研究, E-mail: zlyadd@163.com。

通信作者: 焦华喆(1985—),男,河南商丘人,副教授,博士,主要从事矿山充填技术研究, E-mail: jiaohuazhe@126.com。

絮凝剂混合程度、停留时间、进料质量浓度、尾砂级配、絮凝剂种类与用量、搅拌条件以及浓密机结构等因素对尾砂悬浮液絮凝沉降特性的影响,并尝试从细观层面研究尾砂絮团粒径变化对尾砂浓密质量浓度与流变特性的影响,以此对浓密机的结构与性能进行优化。之后,牛永辉等^[17]通过自制全尾砂动态剪切浓密实验系统开展絮凝剂筛选及单耗优选实验、动态剪切环境深度浓密实验,分析超细尾砂颗粒在自然沉降、絮凝沉降以及动态剪切环境下的浓密特性。王勇等人^[18]认为床层高度和床层压力是深锥浓密机底流质量浓度稳定控制的关键,基于 Terzaghi 有效应力原理推导并建立了床层高度和压力的数学模型。焦华喆等^[19]从微观角度对超细钨尾矿进行了连续浓密实验,采用 CT 扫描的方法研究了剪切前后尾矿床微孔结构和渗流,揭示了剪切过程的浓密机理。

上述研究多集中在外界物理因素对尾砂絮凝浓密的影响,而忽略了絮团内部细观结构的作用。本文为探究全尾砂深度浓密的细观机理,以全尾砂压缩床层不同高度处料浆为研究变量,进行室内动态絮凝浓密实验,并借助 SEM 扫描从絮团尺寸、结构以及储水状态等方面对全尾砂浓密效果进行定性描述;为得到定量结果,进一步通过 CT 扫描对样品的孔隙率进行定量描述,从而获得不同高度处料浆孔隙的演化规律,以期尾砂浓密脱水研究提供理论参考。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

1.1.1 全尾砂

实验采用的材料为某金属矿全尾砂,采用马尔文 3000 激光粒度分析仪对全尾砂粒度组成进行测定,测得粒径分布曲线如图 1 所示。全尾砂粒级组成中,−74 μm 的尾砂颗粒占 64.32%,尾砂颗粒曲率系数为

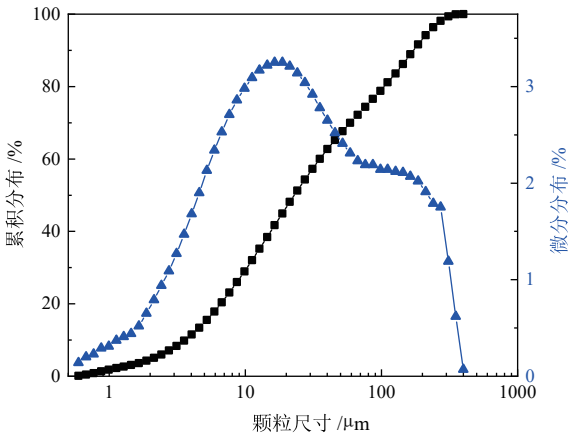


图 1 全尾砂粒级分布
Fig. 1 Grain size distribution of unclassified tailings

1.62,不均匀系数为 18.36,密实性良好,为级配良好全尾砂。

1.1.2 絮凝剂

新型聚丙烯酰胺絮凝剂与传统链式絮凝剂不同,新型絮凝剂具有一定的空间结构,使得颗粒与颗粒之间通过高分子链进行吸附连接形成大的絮团,这种大絮团具有尺寸大、重力大和不易破裂等特点,并依靠自身重力沉降到浓密机底部,形成高质量浓度底流。本文针对该矿进行不同分子量絮凝剂优选实验,取得了较好的效果,如图 2 所示。通过全尾砂静态沉降实验,考虑实际效果,最终选取最优实验参数:分子量为 1 800 万的阴离子型絮凝剂。

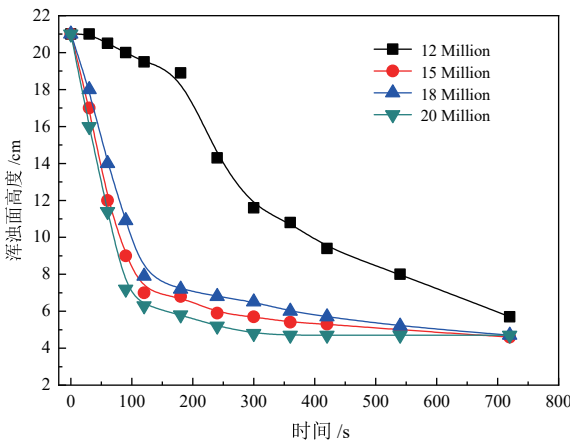


图 2 不同分子量絮凝剂作用的浑浊面沉降高度变化
Fig. 2 Sedimentation height change of turbidity surface under the action of different molecular weight flocculants

絮凝剂基本特性参数如表 1 所示。

表 1 1 800 万分子量阴离子型絮凝剂基本特性表
Table 1 Basic characteristics of 18 million molecular weight anionic flocculants

聚丙烯酰胺	单位 分子量/万	固相 质量分数/%	粘度/(mPa·s)	溶解 速度/h
阴离子型	1 800	88~92	3~4	≤1

1.2 动态浓密实验

1.2.1 实验设备

基于工业浓密机的实际运行情况,自行搭建了小型尾砂动态浓密实验装置,如图 3 所示。该装置由沉降系统、搅拌系统、尾砂浆添加系统、絮凝剂添加系统组成。沉降系统为直径 10 cm、高度 100 cm 多节可拆卸亚克力管。该装置对深锥浓密机内絮团行为进行模拟,深度还原深锥浓密机的实际运行状态。

1.2.2 实验方案及取样

前期通过对影响絮凝沉降的参数进行优选分析,

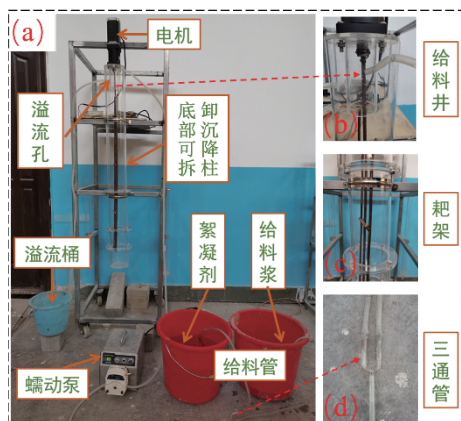


图 3 小型尾砂动态浓密实验装置

Fig. 3 Small tailings dynamic thickening experimental device

选用最优参数: 耙架剪切速率为 0.121 r/min、尾矿入料质量浓度为 21.24%、絮凝剂单耗为 16.73 g/t、絮凝剂溶液质量浓度为 0.031%。为了便于对压缩床层料浆的研究, 设定床层高度为 20 cm, 同时为了提高实验的精确度, 对实验样品原位取样。实验结束后开始取样, 取样位置如图 4。

将上清液排出后, 拆开沉降柱, 用胶头滴管依次取出高度为 16~20 cm、12~16 cm、8~12 cm、4~8 cm 和 0~4 cm 的少许全尾砂料浆, 将样品依次编号为 L1、L2、L3、L4 和 L5, 用金属托盘盛装送至实验室, 采用烘干机对其进行质量浓度测试。

1.3 SEM 扫描实验

为研究处在压缩床层料浆内部不同高度处水分分布规律, 借助河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验

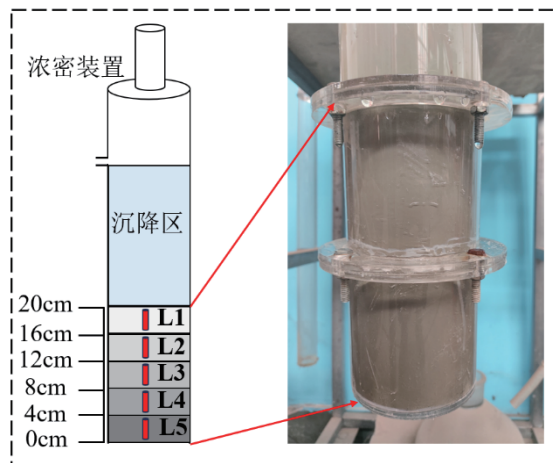


图 4 浓密实验装置底部取样处

Fig. 4 Sampling at the bottom of the thickening experimental device

室的 SEM 设备(型号为 Merlin Compact)对不同高度处五组料浆样品进行取样扫描, 获取其微观絮团结构, 扫描设备如图 5, 而未受到外界因素扰动的样品的制取是 SEM 扫描的关键步骤, 其能够实现对料浆内部结构的可靠反映。实验使用硅酸钠固定法来达到对料浆的原位固定, 实验步骤: 借助玻璃取样管将压缩床层不同高度处五组料浆移至金属盘内; 向金属盘内注入适量的液态硅酸钠, 并让其自由流动直至全部渗入料浆样品内部, 然后靠空气将其硬化成坚固块状; 将硬化后的块状料浆样品放入设备并固定住, 然后设定放大倍数后开始拍摄, 得到样品 SEM 图像; 将扫描后输出的图像导入 Matlab 软件开展去噪、增强等操作并加以分析。

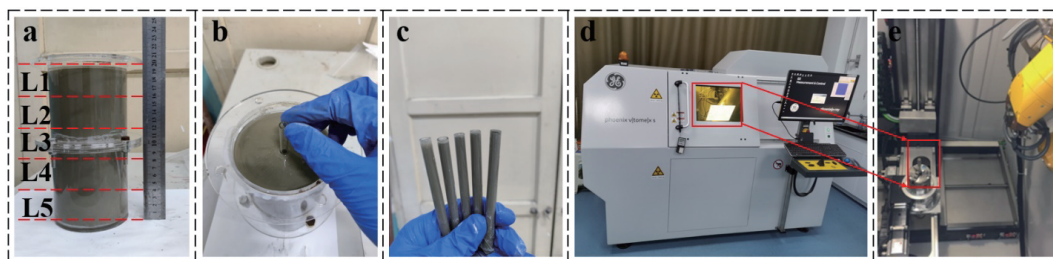


图 5 样品取样及 CT 扫描过程

Fig. 5 Sample sampling and CT scanning process

1.4 CT 扫描实验

1.4.1 实验设备

为研究沿压缩床层方向料浆内部孔隙结构变化规律, 本实验采用的是由河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室的 phoenix v|tome|x|s 高精度工业 CT 机对料浆进行扫描, 获取料浆三维可视化固、液相分布模型, 扫描设备如图 5。CT 设备主要由 X 射线伽玛射线、探测器系统、数据采集及传输系统、机械扫描装置等

组成, 具有维护率低和以生产为导向的设计特点^[20]。该设备凭借自身具备射线利用率高的优势而作为本次实验的首选, 并且对被测物体尺寸约束比较小, 可扫描物体的最大规格为 250 mm×450 mm。

1.4.2 取样及 CT 扫描过程

压缩床层料浆样品制取是 CT 扫描的重要环节, 而尽可能减少对样品的扰动是样品制取的核心步骤。为达到能够在扫描实验中获取料浆内部真实结构的目的, 实验对沉降柱内料浆进行原位取样的方法, 取

样步骤如下: 利用实验平台进行动态浓密实验, 当实验达到要求时, 拆卸沉降柱及耙架, 排出上部清水; 插入直径 10 mm、高 40 mm 的取样管, 依次取出压缩床层 16~20 cm、12~16 cm、8~12 cm、4~8 cm 及 0~4 cm 处料浆; 将取样管底部与塑料板利用速干胶固定连接, 将五个样本分别标记为 L1、L2、L3、L4 和 L5; 制备完毕的样品, 不宜受到任何的扰动, 直接放入 CT 设备中, 过程如图 5。

1.5 CT 图像处理

由于计算机运行内存和 CPU 性能限制, 过大的图片导致计算时间过长, 不利于多次模拟操作分析, 因此, 需要对 CT 切片进行裁剪操作, 获取表征性单元 REV(Representative Elementary Volume)。

因全尾砂压缩床层料浆属于固、液混合物, 在提高研究准确性的同时考虑计算机的运行能力, 选取样品中间区域来进行研究, 借助软件对料浆样品进行小体积选取, 当五组样品的 ROI (感兴趣区域) 的孔隙率没有明显变化时, 即可得到整个料浆样品的 REV。重复实验表明, 当模型尺寸为 $100 \times 100 \times 100$ 体素 (Voxel) 时, 孔隙率几乎不受尺寸的影响, 约为 8% 左右, 实际尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 过程如图 6。

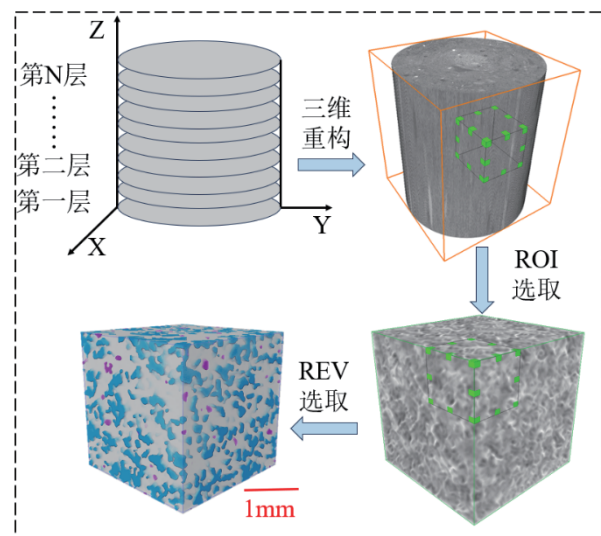


图 6 表征单元体提取流程
Fig. 6 REV

2 结果分析与讨论

2.1 浓密实验结果

浓密实验质量浓度检测结果见表 2, 全尾砂料浆样品 L1 至 L5 的质量浓度分别为 59.4%、60.3%、60.9%、61.5% 和 62.1%。对比压缩床层顶部样品 L1 和底部样品 L5 的质量浓度, 可以发现在浓密过程中压缩床层底部料浆比顶部料浆质量浓度增加了

4.55%, 表明在不同床层高度处料浆质量浓度有着明显差距。

表 2 压缩床层不同高度处样品质量浓度
Table 2 Mass concentration of samples at different heights of compressed bed

样品编号	L1	L2	L3	L4	L5
样品料浆取样高度/cm	16~20	12~16	8~12	4~8	0~4
平均质量浓度/%	59.4	60.3	60.9	61.5	62.1

2.2 基于 SEM 絮团结构分析

床层不同高度处料浆内部絮团的结构及其内部水分的分布规律, 是影响料浆渗流导水特性的关键因素。絮团在沉降区下沉至压缩区之后, 自身结构的形状会导致压缩区床层的差异性, 絮团内部存水空间越大, 则会引起压缩床层内部含水量较高, 导致床层需要进一步脱水浓密, 处理后的五组料浆样品 SEM 图像如图 7。

从图 7 中可以看出, 料浆内部是由许多大大小小的蜂窝状絮团、尾砂颗粒及水分组成, 其中以网状结构为主要成分, 这些网状结构则是由絮凝剂与尾砂相互连接而成的, 水分存于网状结构内或网状结构之间, 而处在床层底部的料浆内部, 颗粒搭接形成的网状结构被挤压得更为致密, 不过在其局部区域还是分布有大小不一的存水孔隙。

从图中可观测到, 料浆内部结构分别呈现出以下几种形态: 松散无规则状(L1), 此形态下水分含量较大, 占据过大的孔隙空间, 内部连通通道较多、通道比较宽, 具有巨大的排水潜力; 致密多孔状(L2 和 L3), 此形态下絮网结构散乱分布, 呈现出多孔状态, 内部含水量有一定的减少, 连通的导水通道面积及数量减少; 致密无规则状(L4), 此状态下料浆内部水分含量大幅下降, 残留的少量水分分布在絮团之间及内部, 絮团比较致密; 致密规则状(L5), 此状态下的水分含量极少, 并且水分主要存于絮团内部, 料浆内部颗粒较为致密, 水分的排出需要消耗大量的能量。

料浆内部絮团形状不仅会对自身流变性能产生影响, 还会使自身的导水浓密效果带来一定的变化。料浆内部絮团结构由松散无规则直至致密规则状, 其内部含水量不断下降, 引起料浆质量浓度提升; 絮网结构紧密接触, 造成流动性下降。

2.3 基于 CT 扫描的孔隙演化过程

2.3.1 孔隙分离提取

孔隙率是三维模型中孔隙所占体素数值与总体素数值的比值。图 8 所示, 沿床层向下分布, 从 5 组样品孔隙结构图中可看出, 处在压缩床层较低位置处, 料浆基质更加密实, 孔隙则变得更加分散, 且孤立孔隙数量更多。

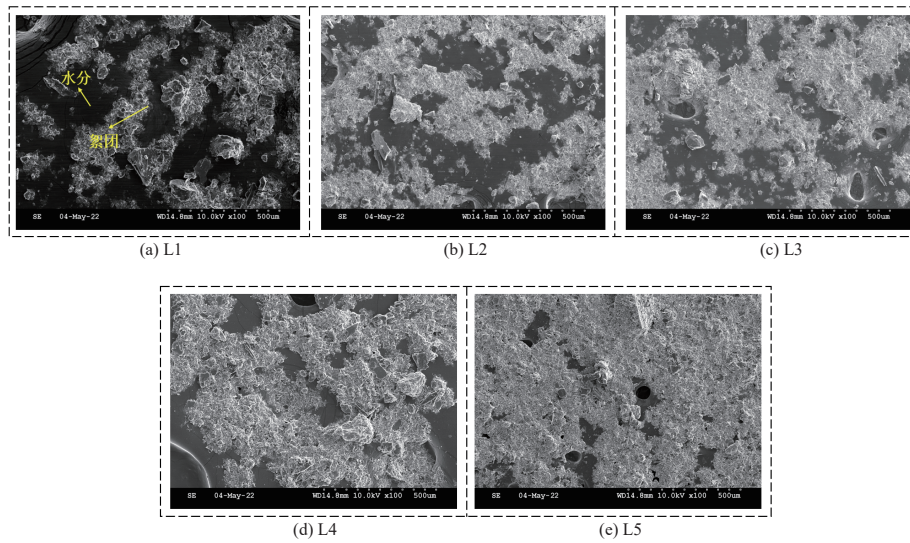


图 7 压缩床层不同高度处样品料浆 SEM 图像

Fig. 7 SEM images of sample slurry at different heights of the compressed bed

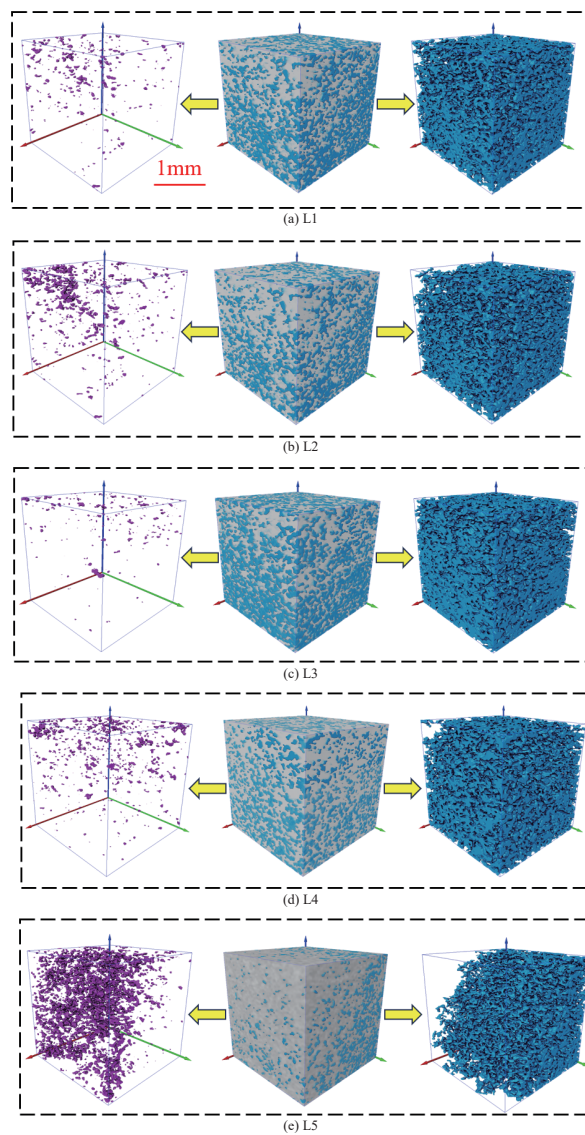


图 8 不同床层高度样品的孔隙结构(从左至右依次为孤立孔隙、料浆重构体及连通孔隙)

Fig. 8 Pore structure of samples with different bed heights (from left to right : isolated pore, slurry reconstructed body and connected pore)

从图 8 中我们可以看出,随着料浆质量浓度不断变化,料浆内部孔隙在不断减少,而孤立孔隙整体上呈现出逐渐增加的趋势,孤立孔隙数量大幅增加。对比表 3 可知,随着质量浓度增加,料浆内部孔隙率由 41.6% 下降至 37.9%,下降幅度为 8.89%,说明料浆内部变得更加密实。样品 L1 和 L5 的孤立孔隙数量分别为 454、1 829,孤立孔隙数量大幅增加,而连通孔隙占比不断下降。样品 L1 的连通孔隙比为 0.76,反映了孔隙之间连通性较好,有助于水分更好排出;样品 L5 连通孔隙比为 0.49,下降了 35.53%,部分连通孔隙被尾砂颗粒充填演化为孤立孔隙,孤立孔隙占比增多,剩余少量的水被封闭在孤立的闭孔中,连通孔隙比降低,孔隙结构更加复杂多变,导致水分不能完全被排出。

表 3 孔隙连通性结果统计表
Table 3 Statistical table of pore connectivity results

样品	L1	L2	L3	L4	L5
总孔隙率/%	41.6	39.7	39.1	38.5	37.9
孤立孔隙数量/个	454	696	301	839	1829
连通孔隙比 f_p	0.76	0.71	0.64	0.58	0.49

对床层料浆样品进行孔隙提取并分离,从表 3 中孤立孔隙数量变化可看出,样品 L1 至 L5,即从床层顶部至床层底部,孤立孔隙数量呈现先减少后增加的趋势,连通孔隙数量则逐渐下降;而两种孔隙数量的变化趋势表明出在床层底部料浆更加密实。

由图 9 可知,处在压缩床层最高位置 16~20 cm 处的料浆 L1 质量浓度最低为 59.4%,对应的孔隙率最大,

其值为 41.6%,沿着压缩床层向下,孔隙率呈非线性下降;处在压缩床层最底部位置 0~4 cm 处的料浆 L5 质量浓度最高为 62.1%,对应的孔隙率最小为 37.9%,孔隙率下降了 3.7 百分点,表明压缩床层自身重力作用损坏絮团结构,孤立孔隙内部水分排出,有助于增加全尾砂床层浓密效果。样品从 L1 至 L5,越靠近压缩床底部对应的孔隙率不断下降,内部水分逐渐减少,尾砂颗粒不断向下床层底部移动、堆积,此时孔隙结构分布均匀,底流料浆趋于浓密稳定状态。

2.3.2 孔隙网络模型分析

图 10 展示了五组料浆提取后的等效孔隙网络模

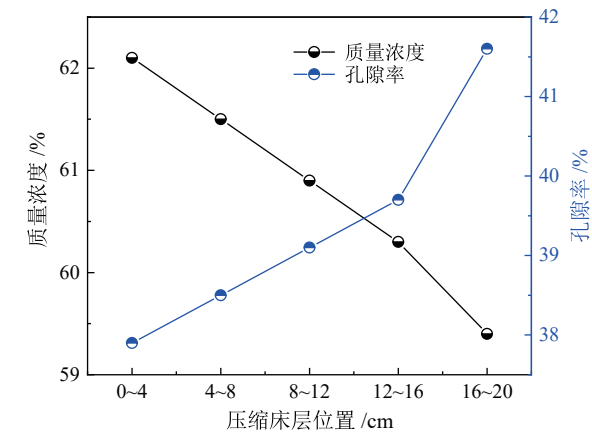


图 9 孔隙率与质量浓度分布关系曲线
Fig. 9 Relationship curve between porosity and mass concentration distribution

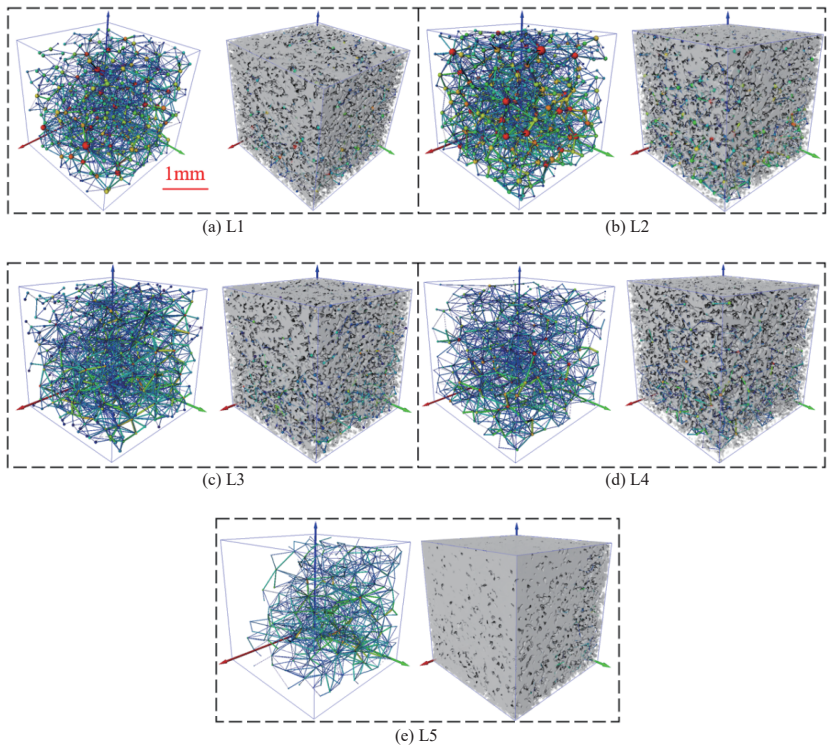


图 10 等效孔隙网络模型
Fig. 10 Equivalent pore network model

型,对比 L1 和 L5,可以清晰地看出较低质量浓度 L1 组模型中储水的球体和棍体数量比较多、体积比较大,各孔隙之间的连通度较好。说明后续有较大的潜力排除其内部水分,提升料浆质量浓度。

压缩床层渗流导水浓密的关键要素是其内部孔隙和喉道的分布特征,借助等效孔隙网络模型可以通过 Avizo 自带的计算功能来对模型中孔隙半径、表面积、体积以及配位数等关键参数进行统计。从三维重

构体中可看出,针对五组样品分别提取了等效孔隙网络模型,质量浓度为 59.4% 的样品 L1 存在大量的孔隙,而处在床层底部,质量浓度为 62.1% 的样品 L5,内部球体呈现无规则散布状态,且数量相比于 L1 有很大程度下降,对比五组模型图,可发现孔隙结构沿床层分布规律。借助软件对模型的分析,得出料浆内部孔隙参数,如表 4,其表明沿压缩床层方向料浆内部孔隙分布情况,间接反映料浆的密实程度。

表 4 孔隙网络模型结构参数统计

Table 4 Statistics of structural parameters of pore network model

样品	值	孔隙数量	孔隙半径/ μm	喉道数量	喉道半径/ μm	配位数
(a)L1	大		20.84		15.43	48
	平均	742	9.58	3 510	3.56	9.46
	最小		2.73		0.27	1
(b)L2	最大		22.41		13.04	46
	平均	715	9.23	3 150	3.40	8.81
	最小		3.09		0.27	1
(c)L3	最大		18.98		10.73	33
	平均	672	8.76	2 627	2.91	8.43
	最小		2.68		0.27	1
(d)L4	最大		21.77		11.73	31
	平均	643	8.63	2 708	3.17	7.82
	最小		3.09		0.30	1
(e)L5	最大		19.61		10.82	32
	平均	464	8.31	1 697	2.91	7.31
	最小		2.86		0.27	1

配位数能够有效反映网络模型的连通性,因此借助配位数来对网络模型连通度进行衡量。喉道是建立孔隙之间连通的关键通道,每个球体所连接的喉道也各不相同。当孔隙为封闭的、不连通的状态时,其对应的配位数即为 0,储存在内部的水分很难排出,此类孔隙亦不参与导水通道的形成。因此,可以用配位数来表征料浆内部连通性,配位数越大,则表明导水通道数量越多,料浆内部处于松散状态,水分易于排出。

如图 11 所示,五组料浆的球体平均配位数分别为 9.46、8.81、8.43、7.82 及 7.31,样品 L1 和 L5 料浆平均配位数减小了 22.73%,孔隙连通性大大降低。从图 12 中可以看出,在样品 L1 料浆的孔隙的配位数平均值最高,达到了 9.46,说明在该质量浓度下渗流导水路线数量最多,样品 L5 料浆的孔隙的配位数平均值最高,达到了 7.31,说明渗流导水路线数量在不断减少,这是由于尾砂浓密过程中,压缩床层内部静力平衡被打破,孔隙聚集形成渗流导水通道,孔隙内部的水分得以排出,孔隙之间的连接通道消失,最终引起料浆质量浓度提升。

不同质量浓度料浆孔隙分布如图 12(a)所示,从

图中可直观看出,整个床层料浆孔隙尺寸分布不均匀。五组料浆质量浓度由低到高,孔隙平均半径分别为 9.58 μm 、9.23 μm 、8.76 μm 、8.63 μm 及 8.31 μm 。对比样品 L1 和 L5 料浆,孔隙等效直径分布在 0~8 μm 的孔隙数量分别占总数量的 43.83% 和 40.25%,减少了

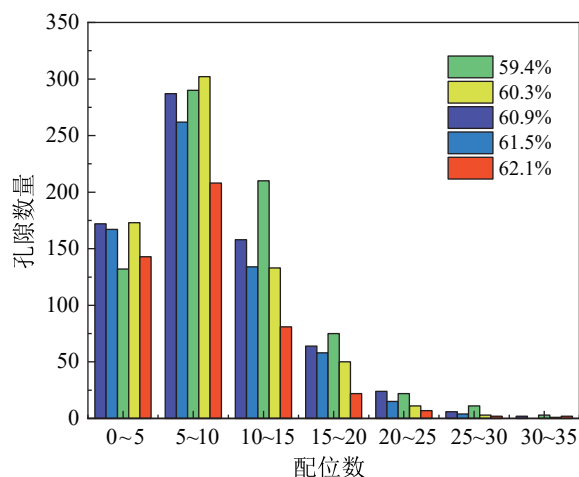


图 11 床层料浆内部配位数分布

Fig. 11 Internal coordination number distribution of bed slurry

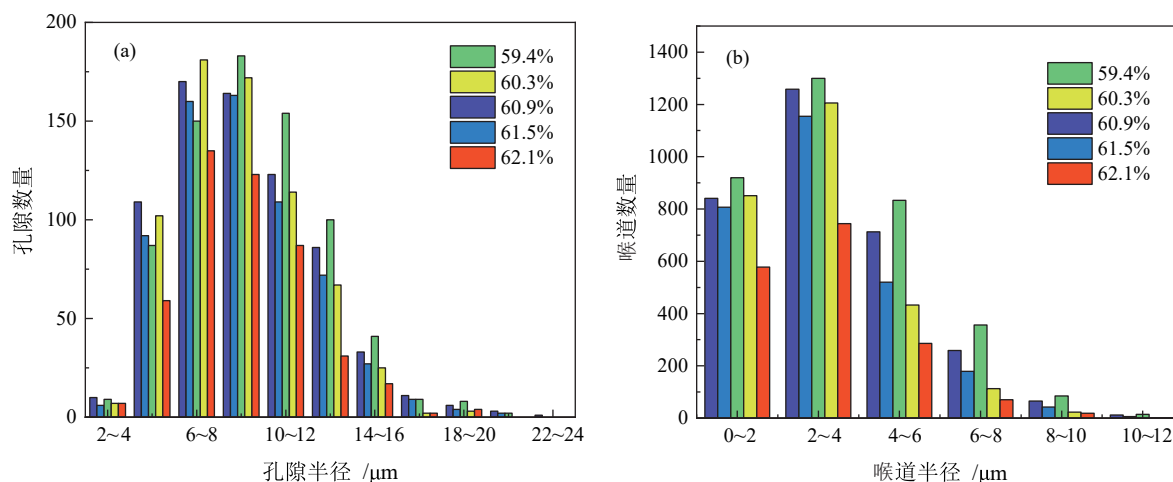


图12 不同质量浓度料浆的孔隙和喉道半径分布

Fig. 12 Pore and throat radius distribution of slurry with different mass concentrations

8.77%。随着料浆质量浓度提升, 8 μm 以上的大体积孔隙逐渐减小, 而 0~8 μm 范围内的小孔隙体积不断提升, 说明床层中大孔隙破裂成小孔隙, 水分不断排出, 质量浓度得到提升。

由图 12(b)可知, 在压缩床层由上部 L1 质量浓度至底部 L5, 料浆内部喉道平均半径逐渐下降, 分别为 3.56 μm、3.40 μm、2.91 μm、3.17 μm 和 2.91 μm。床层底部料浆所受重力较大导致料浆被压缩得更加密实, 从而使喉道平均半径总体呈下降趋势。对比样品 L1 和 L5 质量浓度料浆, 等效直径分布在 0~4 μm 的喉道数量分别占总数量的 34.23% 和 26.27%, 下降了 23.25%, 说明在重力压缩和剪切作用下, 床层料浆内部水分主要从喉道中排出, 水分排出后喉道半径开始减小直至消失, 证明了靠近床层底部的料浆喉道半径及数量减小。

3 结论

(1) 床层顶部料浆呈现松散无规则状, 内部水分含量较大, 连通通道较多具有巨大的排水潜力; 中间料浆分别呈现致密多孔状和致密无规则状, 内部含水量减少, 絮团比较致密; 底部料浆呈现致密规则状, 此状态下水分含量极少, 料浆内部颗粒致密。

(2) 对三维重构模型进行内部孔隙定量分析, 发现床层底部料浆相比于顶部料浆, 孔隙率由 41.6% 下降至 37.9%, 下降幅度为 8.89%, 连通孔隙比下降了 35.53%, 孔隙结构变得更加复杂多变。

(3) 借助等效孔隙网络模型对孔隙的多种关键参数进行了表征, 沿床层向下分布, 料浆平均配位数减小了 22.73%, 孔隙等效直径分布在 0~8 μm 范围的数量减少了 8.77%, 喉道等效直径分布在 0~4 μm 范围的数量下降了 23.25%, 料浆内部孔隙连通性更差, 料浆更加密实。

参考文献:

- [1] 白俊豪, 祝朝辉, 时永志, 等. 河南省金矿山尾矿金属资源调查及综合利用分析[J]. 矿物学报, 2022, 42(5): 683–691.
BAI J H, ZHU C H, SHI Y Z, et al. Investigation and comprehensive utilization analysis of metal resources in tailings of gold mines in He'nan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2022, 42(5): 683–691.
- [2] SUN W, JI B, KHOSO S A, et al. An extensive review on restoration technologies for mining tailings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 33911–33925.
- [3] ARAUJO F S M, TABORDA-LLANO I, NUNES E B, SANTOS R M. Recycling and reuse of mine tailings: a review of advancements and their implications[J]. Geosciences, 2022, 12: 319.
- [4] 吴爱祥, 李红, 杨柳华, 等. 深地开采, 膏体先行[J]. 黄金, 2020, 41(9): 51–57.
WU A X, LI H, YANG L H, et al. Cemented paste backfill paves the way for deep mining[J]. Gold, 2020, 41(9): 51–57.
- [5] 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.
RUAN Z E, WU A X, JIAO H Z, 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.
- [6] WU A X, YANG Y, CHENG H Y, et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 517–525.
- [7] KIVENTERÄ J, PERUMAL P, YLINIEMI J, et al. Mine tailings as a raw material in alkali activation: A review[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2020, 27: 1009–1020.
- [8] 张雷, 郭利杰, 许文远, 等. 细尾砂在矿山充填应用中关键工艺与材料的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 102–112.
ZHANG L, GUO L J, XU W Y, et al. Research on crucial technological and material issues of applying fine tailings to mine filling: a review[J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 102–112.
- [9] Yang Y, Zhou X, CHEN X, et al. Numerical simulation of tailings flow from dam failure over complex terrain[J]. Materials, 2022, 15: 2288.
- [10] KINNUNEN P H M, KAKSONEN A H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 153–160.
- [11] 丁冉伟. 浅析尾矿库扬尘综合治理[J]. 中国金属通报, 2022, (13): 162–164.
DING R W. Analysis of Comprehensive Dust Control in Tailings Ponds,

- China Metal Bulletin, 2022, (13): 162–164.
- [12] GOU M F, ZHOU L F, THEN N, et al. Utilization of tailings in cement and concrete: A review[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2019, 26(1): 449–464.
- [13] RI L G, LIANG Y S, QIN W, et al. Exploration on comprehensive utilization technology of mine tailings[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 165(12): 03003–03011.
- [14] KYNCH G J. A theory of sedimentation[J]. Transactions of the Faraday society, 1952, 48: 166–176.
- [15] RAIMUND B, KENNETH H K, JOHN D. Towers. Mathematical model and numerical simulation of the dynamics of flocculated suspensions in clarifier-thickeners[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 111(2): 119–134.
- [16] STEPHENS D W, FAWELL P D. Process equipment optimization using CFD and surrogate models[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal, 2015, 15(2): 102.
- [17] 牛永辉, 程海勇, 吴顺川, 等. 动态剪切环境超细全尾砂絮凝沉降特性[J]. 有色金属工程, 2022, 12(8): 139–148.
- NIU Y H, CHENG H Y, WU S C, et al. Flocculation and sedimentation characteristics of ultra - fine full tailing sand in dynamic shear environment[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(8): 139–148.
- [18] 王勇, 那庆, 杨军, 等. 深锥浓密机泥层高度与压力关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 257–262.
- WANG Y, NA Q, YANG J, et al. Research on the relationship between mud height and pressure of deep cone thickener[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(2): 257–262.
- [19] 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 H Z, WANG S F, WU A X, et al. 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.
- [20] 位乐, 王登科, 陈旭, 等. 煤的孔隙结构分形特征研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(9): 53–56.
- WEI L, WANG D K, CHEN X, et al. Research on fractal characteristics of coal pore structure[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(9): 53–56.

Study on Meso-mechanism of Deep Dewatering of Mine Filling Materials Based on CT Scanning

ZHANG Liyou¹, ZHANG Yihui¹, JIAO Huazhe^{2,3}, WANG Jinxing^{2,3}, YANG Han^{2,3}

1. Zhengzhou Coal Industry (Group) Company Limited, Zhengzhou 450000, Henan Province, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan Province, China;

3. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, Henan Province, China

Abstract: Aiming at the problems of difficult thickening and dewatering of total tailings and low underflow mass concentration, the deep thickening and dewatering of slurry flocs based on the meso-structure of slurry flocs at different heights of the compressed bed was studied. Through the dynamic thickening experiment of the whole tailings, the slurry sample of the compressed bed layer was obtained. With the help of SEM and high-precision CT scanning equipment, the obtained floc structure was scanned and three-dimensionally reconstructed to analyze the pore structure variation along the direction of the compressed bed layer. The results show that the average pore radius of the five groups of slurry is 9.58 μm , 9.23 μm , 8.76 μm , 8.63 μm and 8.31 μm respectively. The mass concentration of slurry at the top of the bed is 59.4%, and the flocs are loose and irregular. The mass concentration of slurry at the bottom is 62.1%, and the flocs are dense and regular. Compared with the top and bottom slurry, the porosity decreased by 3.7 percentage points, the connected pore ratio decreased by 35.53%, the average coordination number of pores decreased by 22.73%, and the pore connectivity was greatly reduced. This thesis the microscopic pore structure characteristics are quantitatively characterized from the microscopic point of view, which provides a theoretical basis for further dehydration of mine filling materials.

Keywords: unclassified tailings; compressed bed; floc structure; CT scanning; porosity

引用格式: 张力友, 张伊辉, 焦华喆, 王金星, 杨涵. 基于 CT 扫描的矿山充填材料深度脱水微观机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(2): 22–31.

ZHANG Liyou, ZHANG Yihui, JIAO Huazhe, WANG Jinxing, YANG Han. Study on meso-mechanism of deep dewatering of mine filling materials based on ct scanning[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(2): 22–31.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn