

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2187

基于不同粒径分布尾砂的充填体强度及损伤特性研究

金爱兵^{1,2}, 王 杰^{1,2}, 陈帅军^{1,2}, 李 海^{1,2}

(1. 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;

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为探究尾砂粒径分布对充填体强度和损伤特性的影响, 对超细尾砂 (中值粒径 $D_{50}=10.1\ \mu\text{m}$)、细尾砂 ($D_{50}=37.1\ \mu\text{m}$) 和粗尾砂 ($D_{50}=121.31\ \mu\text{m}$) 充填体开展单轴压缩试验、扫描电镜试验和数字图像相关 (digital image correlation, 简称 DIC) 试验, 分析其强度特性和微观结构特征, 并基于尖点突变理论, 采用小波包技术构建充填体损伤识别指标, 量化分析充填体损伤特性。研究结果表明: 充填体强度和弹性模量随尾砂 D_{50} 的增大呈先增大后减小的趋势, 但随着料浆浓度的升高, 尾砂粒径对充填体强度和弹性模量的影响减小; 相对超细尾砂和粗尾砂充填体, 细尾砂充填体粗、细颗粒结合紧密, 孔隙度最低, 微观结构致密性最好; 定义能量变化率 (energy change rate, 简称 ECR) 突变点为试件损伤突变的阈值, 用于区分试件稳定损伤阶段和加速损伤阶段, 其中, 超细尾砂、细尾砂和粗尾砂充填体分别在峰值应力的 92.83%、92.31% 和 72.93% 处发生损伤突变; 随尾砂 D_{50} 的增大, 充填体破坏模式由剪切破坏向张拉破坏转变, 破坏时 ECR 由 20.65% 增大为 28.25%, 损伤破坏程度逐渐加重。研究结果为改良矿山尾砂颗粒级配, 进而提高充填体强度奠定了基础。

关 键 词: 尾砂粒径; 数字图像相关法; 小波包能谱分析; 微损伤识别指标; 尖点突变理论

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 11-3083-11

Strength and damage characteristics of tailings filling body with different particle size distributions

JIN Ai-bing^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, CHEN Shuai-jun^{1,2}, LI Hai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the influence of tailings particle size distribution on strength and damage characteristics of filling body, uniaxial compression, scanning electron microscopy, and digital image correlation (DIC) tests were carried out on the filling body composed of ultrafine tailings (median particle size $D_{50}=10.1\ \mu\text{m}$), fine tailings ($D_{50}=37.1\ \mu\text{m}$), and coarse tailings ($D_{50}=121.31\ \mu\text{m}$), and the strength and microstructure characteristics were analyzed. Based on the cusp mutation theory, the damage identification index of the filling body was established using wavelet packet technology, and the damage characteristics of the filling body were quantitatively analyzed. The results reveal that the strength and elastic modulus of the filling body first increase and then decrease with the increase of D_{50} , but the influence of tailings particle diameter on the strength and elastic modulus of the filling body is reduced with the increase of slurry concentration. Compared with the ultrafine and coarse tailings filling body, the coarse and fine particles of the fine tailings backfill are more closely combined, and its porosity is the lowest and microstructure compactness is the best. The energy change rate (ECR) mutation point is defined as the threshold of the backfill specimen damage mutation, which is used to distinguish the stable damage stage and the accelerated damage stage of the specimen, and the damage mutations of the ultrafine, fine, and coarse tailings filling body occur when their stresses reach 92.83%, 92.31%, and 72.93% of the corresponding peak stresses. With the increase of D_{50} , the failure mode of the backfill changes from shear failure to tensile failure, with the ECR increasing from 20.65% to 28.25%, and the damage degree is gradually aggravated. The research results lay the foundation for improving the particle gradation of mine tailings and enhancing the strength of filling body.

收稿日期: 2021-12-28

修回日期: 2022-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51804018, No. 52174106)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51804018, 52174106).

第一作者简介: 金爱兵, 男, 1974 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn

Keywords: particle size of tailings; digital image correlation (DIC); wavelet packet energy spectrum analysis; micro damage identification index; cusp mutation theory

1 引言

尾砂作为金属矿山中最常用的充填骨料,通常与胶凝材料和水按一定比例混合,制备具有一定承载能力的充填体^[1-3]。随着浮选工艺的进步,充填采场的尾砂逐渐向着超细粒级发展,而尾砂粒度对充填体的力学性能有显著影响^[4]。因此,研究尾砂粒径分布对充填体强度和损伤过程的影响对指导矿山改良尾砂颗粒级配具有重要意义。

充填体单轴抗压强度和损伤特性是评价其稳定性的关键指标,考虑尾砂粒径分布的影响,相关学者进行了大量研究^[5-6]。Fall 等^[7]对不同尾砂细度(粒径小于 20 μm 尾砂颗粒所占比例)充填体进行力学试验,发现中等细度的尾砂更有利于充填体强度的提高。Qiu 等^[8]制备了几种不同细度的人工硅尾矿,研究了尾矿细度对充填体单轴抗压强度和超声波速的影响。Ke 等^[9]发现一定量细颗粒的加入可以改善粗颗粒的堆积密度,进而使充填体强度增大。杨柳华等^[10]研究了尾砂粒径组成对充填体强度的影响,在相同充填配比及浓度下,良好的粒径组成有助于充填体强度的提高。Kesimal 等^[11]发现当粒径小于 20 μm 的尾砂颗粒占比为 25%~27%时,充填体强度最佳。而徐文彬等^[12]认为细骨料过多、过少均不利于充填体强度的提高。程爱平等^[13]基于 Talbot 理论确定尾砂颗粒级配,通过单轴压缩试验,得出尾砂颗粒级配与破坏特征的对应关系。尹升华等^[14]通过开展混合集料充填体的单轴压缩试验,得出了粗骨料含量对充填体破坏模式的影响规律。吴疆宇等^[15]认为较多的粗骨料,会加剧充填体的早期局部应力集中和块体剥落现象;Zhou 等^[16]提出粗骨料体积比的增大将使混凝土裂纹的扩展范围扩大,并使张拉裂纹所占比重增加;Wu 等^[17]发现骨料粒度过粗将会导致充填体在加载过程中具有更多的早期破坏区和裂纹数目,建议矿山所用骨料的 Talbot 级配指数不应大于 0.6。以上研究仅对充填体的强度特性或从裂纹角度对破坏模式进行了分析,缺乏对充填体微观结构和损伤特性的研究。

已有研究证明,数字图像相关技术(digital image correlation, 简称 DIC)结合小波包技术可定量表征混凝土试件的裂纹损伤过程^[18-19]。Lei 等^[20]利用 DIC 技术对混凝土试件静态三点弯曲损伤应变场进行了观测,通过小波包技术对 DIC 图像进行分解,得到混凝土裂纹萌生的预警指标,并发现该方

法能够准确确定微裂纹的萌生位置和损伤程度。Zhou 等^[21]采用三维 DIC 技术对混凝土梁的四点弯曲试验进行观测、计算,借助二维小波包技术对主应变云图进行分析,分别定义能量变化率(energy change rate, 简称 ECR)和能量变化率标准差(energy change rate standard deviation, 简称 ECRSD)为微损伤识别指标,实现了对试件表面微观损伤的实时定位和观察。同时,对于充填体试件损伤过程中存在的突变现象,可借助尖点突变理论来表征。徐晓冬等^[22]基于尖点突变理论,将耗散能和弹性应变能突变构成的区间定义为充填体失稳预警区间,为充填体的失稳预警提供一种思路。Wang 等^[23]构建了关于声发射振铃计数的尖点突变模型,用于分层充填体的失稳预测。因此,采用小波包技术,将 DIC 主应变云图中的信号特征提取并分解,作为试件损伤的识别指标,并借助尖点突变理论确定损伤突变阈值,可实现充填体损伤过程的精确分析。

针对上述问题,本文对不同粒径分布尾砂的充填体强度特性和损伤破裂特性进行研究。利用取自金鼎矿山的、不同粒径分布的尾砂制备充填体,进行单轴压缩试验和扫描电镜(scanning electron microscope, 简称 SEM)试验,分析尾砂粒径分布对充填体强度特性和微观特征的影响,并通过 DIC 技术获取试件损伤时的主应变云图。基于小波包技术和尖点突变理论,构建充填体试件损伤的识别指标,计算不同受载情况下试件的 ECR 值,分析尾砂粒径分布对充填体损伤突变过程和破坏模式的影响规律,为借助 DIC 手段定量表征充填体损伤状态提供了一种方法,研究结果可为矿山改良尾砂颗粒级配,提高充填体强度奠定基础。

2 试验设计与方法

对取自金鼎矿山的 3 种尾砂进行烘干和还原粒径处理后,根据设定的料浆浓度和灰砂比,分别将 3 种尾砂和水泥加水混合,制备充填料浆,并养护成模,待试件达到养护龄期后,分别进行单轴压缩试验、DIC 试验和 SEM 试验。为使分析结果更加符合矿山实际工况,试验所用不同尾砂均来自山东金鼎矿业有限责任公司,具体试验流程如图 1 所示。

2.1 试验材料

分别将 3 种不同尾砂烘干、还原粒径后,采用 LS-POP(9)激光粒度分析仪测试其粒度组成,得到尾砂粒度分布曲线,如图 2 所示。

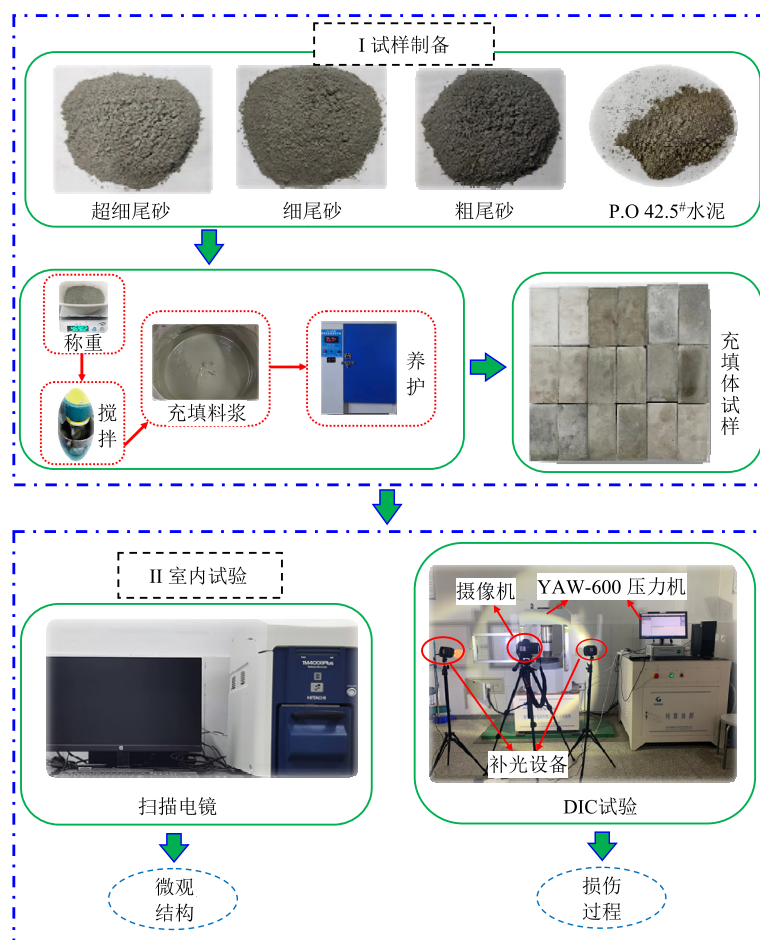


图 1 试验流程

Fig.1 Experimental workflow

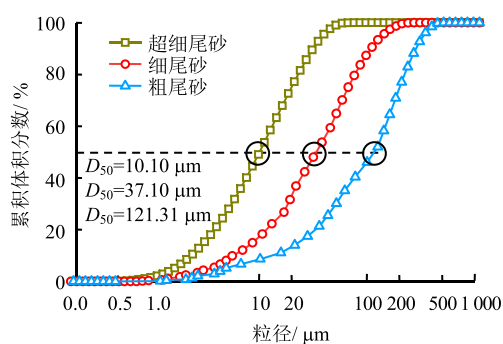


图 2 尾砂粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of tailings

经测定,3 种尾砂的中值粒径 D_{50} 分别为 10.10、37.10、121.31 μm , 分别属于超细尾砂、细尾砂和粗尾砂。试验所用胶结剂为 P.O 42.5#普通硅酸盐水泥, 水为普通自来水。

为确保试验材料的化学成分对试验结果无影响, 分别对 3 种尾砂和水泥进行 X 射线荧光光谱分析 (X-ray fluorescence spectrometry, 简称 XFS), 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 3 种尾砂所含主要化学成分为 MgO、SiO₂、Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 等, 水泥

所含主要化学成分为 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 等, 均为常规化学成分, 尾砂中不含影响充填体强度的特殊成分 (如硫化物) [24]。

表 1 尾砂及水泥化学成分

Table 1 Chemical composition of tailings and cement

化合物	质量分数/%			
	超细尾砂	细尾砂	粗尾砂	水泥
MgO	20.52	21.68	22.96	3.71
CaO	17.79	19.54	18.42	51.42
SiO ₂	38.02	36.89	39.49	24.99
Fe ₂ O ₃	10.87	9.87	10.57	4.03
Al ₂ O ₃	8.29	7.41	5.21	8.26
MnO	0.00	0.19	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	2.51
K ₂ O	1.86	0.69	0.37	3.31
其他	2.65	3.73	3.98	5.48

2.2 试件制备及室内试验

2.2.1 试件制备

将尾砂和水泥按照灰砂比为 1:4, 料浆浓度分别为 68%、70%和 72%混合, 搅拌均匀后, 浇入尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm 的模具中, 制备充填

体试件。24 h 后脱模, 将试块放入恒温 ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) 恒湿 ($95 \pm 1\%$) 养护箱中养护, 60 d 后取出试件, 进行单轴压缩试验。

2.2.2 单轴压缩和 DIC 测试

采用 YAW-600 型岩石力学试验机对充填体试件开展单轴压缩。加载方式为位移控制, 研究表明, 加载速率为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm/min}$ 时, 试件变形较均匀^[25], 因此, 加载速率设为 0.5 mm/min 。加载过程中, 采用摄像设备对压缩过程进行拍摄, 图像采集帧率为 60 帧/s。为使试件损伤过程严格对应试件加载过程, 保证录像与加载同时开启。图像采集完成后, 将其导入 Vic-2D 图像分析系统进行应变定量化处理。

2.2.3 扫描电镜试验

采用日立 TM4000Plus 型扫描电子显微镜对强度测试后的充填体试件进行 SEM 微观扫描, 观察尾砂粒径分布对充填体试件微观结构的影响。

2.3 小波包损伤指标构建

二维小波包分析可以对图像的特征信号进行识别、分解, 因此, 借助小波包技术对 DIC 图像进行处理, 对试件的损伤信号进行提取、分解、重构为能量特征向量, 根据能量的变化指示结构损伤。

2.3.1 小波包分解原理

小波包变换是一种线性傅里叶变换, 满足能量守恒定律, 同时, 小波包系数具有能量量纲, 可以进行能量分析^[26]。小波包是由相应的小波函数线性组合而成, 小波包函数 $\psi_{i,k}^j$ 可以表示为

$$\psi_{i,k}^j = 2^{i/2} \psi^j(2^i t - k) \quad (1)$$

式中: i, j, k 为整数, 分别表示尺度、调制、平移参数; t 为时间参数。

小波基函数的选取直接决定小波包计算结果的准确性, 因此, 在利用小波包变换计算和分析图像信息时, 需选择合适的小波函数类型。Daubechies 小波主要用于离散小波变换, 具有正交性、双正交性和紧支撑性等特点, 是常用的小波变换。阶数 N 是 Daubechies 小波的一个关键参数, 阶数 N 过大或过小都不利于信号的时域局部聚焦性。因此, 选用 Daubechies 小波进行小波包分析时, 需要选择合适的阶数 N 。一般来讲, 根据范数能量熵 I^p (p 为常数, $1 \leq p \leq 2$) 的值来确定 N ^[18], 即用下式确定:

$$S_i(E_i) = \sum_{j=0}^{4^i-1} |E_{i,j}|^p \quad (2)$$

式中: $S_i(E_i)$ 为小波函数的代价函数; E_i 为重构信号在第 i 层分解所有频带的总能量; $E_{i,j}$ 为重构信号在第 i 层分解、第 j 个频带的能量。

采用小波包处理图像信号时, 分解层数的选择对计算结果的准确性有显著影响。研究表明, 常用 3 层小波分解获取图像的能量谱特征^[21]。

2.3.2 信号特征向量提取

将 DIC 图像进行去噪、加强处理后, 进行小波包 3 层分解和节点信息重构, 各节点代表的所有能量为

$$E_{3,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m x_{j,k,l}^2} \quad (3)$$

式中: $x_{j,k,l}$ ($j=0, 1, 2, \dots, 63; k=1, 2, \dots, n; l=1, 2, \dots, m$) 指信号重构后离散点的幅值; n, m 为图像的大小。

将 3 层分解后的各频带 (节点) 能量按频率顺序形成新的特征向量, 表示信号中的能量信息, 构成信号的能量谱向量 E_3 :

$$E_3 = [E_{3,0}, E_{3,1}, \dots, E_{3,63}] \quad (4)$$

2.3.3 微损伤识别指标确定

在采用小波包对结构损伤进行识别时, 信号分解尺度的增加可以起到降噪的效果, 因此, 将小波包各频带能量比变化率 ECR 作为试件损伤识别指标^[27-28]:

$$\text{ECR} = \sum_{j=0}^{63} \frac{|(E_{3,j})_d - (E_{3,j})_o|}{(E_{3,j})_o} \quad (5)$$

式中: $(E_{3,j})_o$ 和 $(E_{3,j})_d$ 分别为充填体试件处于初始和损伤状态时图像各频带中的能量。

2.4 损伤指标的突变模型

充填体试件的损伤过程是一个由渐变到突变的过程, 当试件所受载荷到达一定水平时, 其损伤程度会发生显著变化, 这个过程可以借助尖点突变理论定量表征。不同加载阶段的损伤程度可以通过图像的 ECR 值来表示, 将此作为突变理论判据, 可为确定充填体损伤突变阈值提供一种方法。

由于加载过程为位移控制, 以试件损伤图像的 ECR 值为研究对象, 将连续的 7 组 ECR 值与 ε 的数据进行拟合, 得到 ECR 值关于 ε 的四阶函数, 拟合结果作为中心点的尖点突变模型^[29]:

$$\text{ECR}(\varepsilon) = \sum_{i=0}^4 \frac{\partial^i f}{\partial k^i} = \sum_{i=0}^4 a_i \varepsilon^i \quad (6)$$

式中: $\text{ECR}(\varepsilon)$ 为能量比变化率的拟合函数; ε 为试件应变; a_i 为待定系数。

根据 Tschirnhaus 变换, 消去三次项, 令 $\varepsilon = x - a_3 / (4a_4)$, 当应变为 0, 且拟合数据包含 $\text{ECR}(0)$

时, 试件 ECR 值为 0, 即 $a_0 = 0$; 但当拟合数据不包含 ECR (0) 时, a_0 不为 0, 故可将式 (6) 转化为标准势函数^[30]:

$$\text{ECR}(x) = x^4 + ux^2 + vx + c \quad (7)$$

式中: u 、 v 为突变参数; c 为常数。

其中, 参数 u 、 v 由下式计算:

$$u = \frac{a_2}{a_4} - \frac{3a_3^2}{8a_4^2}, \quad v = \frac{a_1}{a_4} - \frac{a_2a_3}{2a_4^2} + \frac{a_3^3}{a_4^3} \quad (8)$$

分别对式 (7) 求一阶导和二阶导, 并令其为 0, 可求得 ECR 作为判据时的分叉集方程:

$$\Delta = 8u^3 + 27v^2 \quad (9)$$

式中: Δ 为突变特征值, 用于判断某一点处 ECR 值是否突变。

因此, 以 ECR 作为突变判据确定充填体损伤阈值的方法简述如下:

(1) $\Delta > 0$, 试件未发生损伤或损伤较小;

(2) $\Delta < 0$, 试件产生较大损伤, 此时试件产生损伤即为该充填体的损伤突变阈值。

3 充填体强度特性分析

3.1 应力-应变曲线

鉴于不同浓度下, 尾砂粒径分布对充填体应力-应变曲线影响一致, 以料浆浓度 70% 为例, 对 3 种粒径分布尾砂充填体的应力-应变曲线进行分析。同时, 对不同浓度时充填体的弹性模量进行分析, 结果如图 3、4 所示。

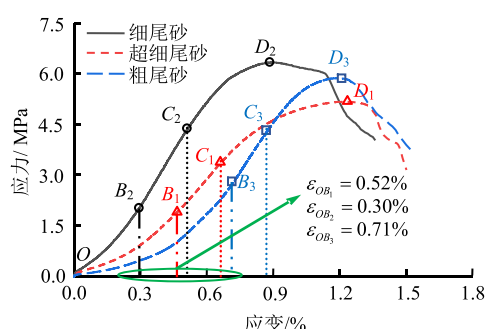


图 3 70%浓度不同尾砂充填体的应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of tailings filling body with slurry concentration of 70%

由图 3 可知, 3 种粒径分布尾砂充填体的峰前曲线大致分为 3 个阶段: 微孔隙压密阶段 (OB)、弹性阶段 (BC) 和塑性屈服阶段 (CD)。对比分析可知, 超细尾砂、细尾砂和粗尾砂充填体的压密阶段分别结束于应变为 0.52%、0.30%和 0.71%时, 即粗尾砂充填体具有较长的压密阶段 (OB_3), 超细尾

砂充填体 (OB_1) 次之, 细尾砂充填体压密阶段 (OB_2) 最短。

由图 4 可知, 随料浆浓度的增大, 3 种粒径分布尾砂充填体的弹性模量逐渐增大, 但差异减小。当料浆浓度为 68% 时, 细尾砂充填体的弹性模量为 0.57 GPa, 相较超细尾砂和粗尾砂充填体, 增幅分别为 24.5%和 19.29%; 当料浆浓度为 70% 时, 细尾砂充填体的弹性模量为 0.86 GPa, 相较超细尾砂和粗尾砂充填体, 增幅分别为 12.79%和 5.81%; 当料浆浓度为 72% 时, 细尾砂充填体的弹性模量为 0.96 GPa, 相较超细尾砂和粗尾砂充填体, 增幅分别为 5.21%和 2.08%。料浆浓度的提高减小了尾砂粒径分布对充填体弹性模量的影响。

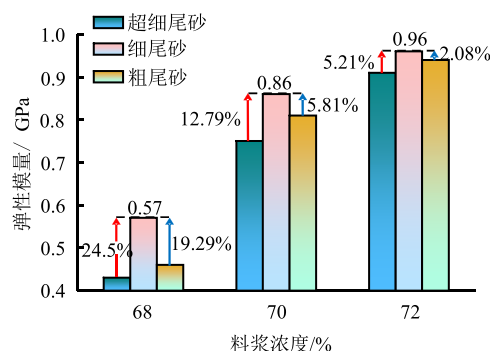


图 4 不同粒径分布尾砂充填体的弹性模量
Fig.4 Elastic moduli of tailings filling body with different particle size distributions

3.2 单轴抗压强度

料浆浓度为 68%、70%和 72% 时, 3 种粒径分布尾砂充填体的单轴抗压强度如图 5 所示。结果表明: 随料浆浓度的增加, 超细尾砂、细尾砂和粗尾砂充填体单轴抗压强度均呈递增趋势, 但强度差异逐渐降低。当料浆浓度由 68% 增长为 72% 时, 细尾砂充填体的单轴抗压强度由 4.20 MPa 增大为 6.85 MPa,

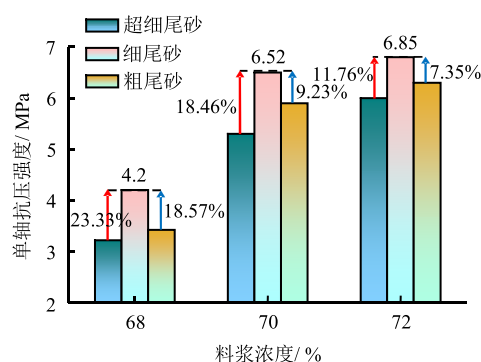


图 5 不同尾砂粒径分布充填体的强度结果
Fig.5 Strengths of tailings filling body with different particle size distributions

而超细尾砂和粗尾砂充填体的单轴抗压强度分别由 3.22 MPa 和 3.42 MPa 增大为 6.00 MPa 和 6.30 MPa。不难发现, 细尾砂充填体相较于超细尾砂和粗尾砂充填体的强度差异分别由 23.33% 和 18.57% 降低为 11.76% 和 7.35%, 说明料浆浓度的提高减小了尾砂粒径分布对充填体强度的影响。因此, 在进行矿山充填时, 提高料浆浓度或可规避尾砂粒径过细或过粗存在的弊端。

3.3 微观结构分析

充填体的微观结构包括尾砂骨料与水化产物交错形成的骨架结构和由微孔洞、微裂隙组成的孔隙结构^[31]。对 3 种粒径分布尾砂的充填体试件进行 SEM 试验, 结果如图 6 所示。由图可知: 超细尾砂充填体含有大量微孔洞和微裂隙构成的孔隙结构, 并与水泥颗粒之间存在明显的弱边界; 粗尾砂充填体中的主要孔隙结构为粗颗粒之间的较大间隙, 受压时易率先产生局部损伤, 引起微裂纹扩展; 细尾

砂充填体中微裂隙较少、弱结构面不明显, 水化产物 (C-S-H 凝胶和针状钙矾石) 分布较多, 紧紧包裹在大颗粒尾砂周围, 形成了较为稳定的微观结构。为进一步表征充填体微观结构差异并解释成因, 图 7 给出了 3 种粒径分布尾砂充填体的微观结构示意图。分析可知: 对于超细尾砂充填体, 大部分尾砂的粒径小于水泥细度, 容易产生弱结构面, 同时, 水化作用初期大量超细颗粒被水膜包裹, 占据粗颗粒所在空间, 导致充填密度减小^[17], 随养护时间的延长, 水膜逐渐褪去, 产生大量微孔洞并贯通形成微裂隙, 影响微观结构稳定性; 对于粗尾砂充填体, 虽然大粒径尾砂可为 Aft、C-S-H 凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物提供生长空间, 但当胶结剂含量较少、大粒径尾砂较多时, 颗粒间隙无法被水化产物充分填充, 导致孔隙分布较多, 强度较低; 而细尾砂充填体中粗、细颗粒排列紧密, 颗粒间隙被水化产物充分填充, 形成了稳定的骨架结构。

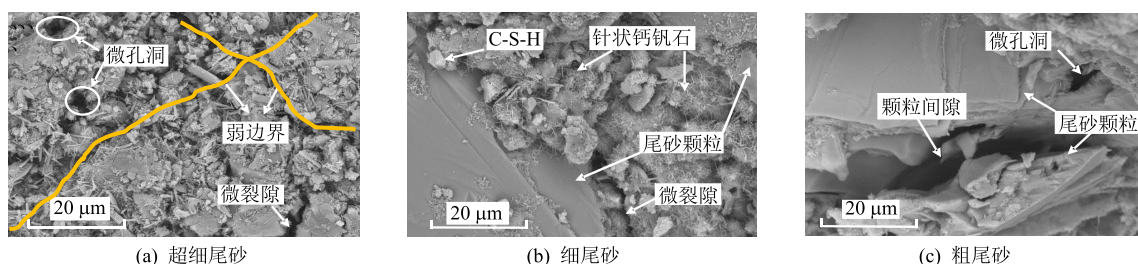


图 6 不同尾砂粒径分布充填体的微观结构差异

Fig.6 Microstructure images of tailings filling body with different particle size distributions

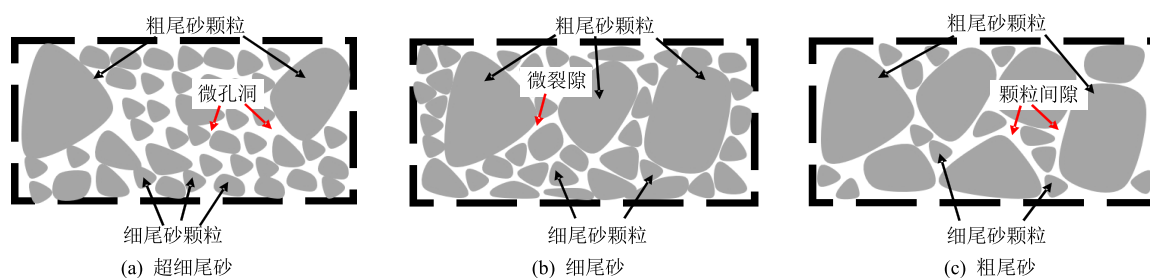


图 7 不同粒径分布尾砂充填体的微观结构示意图

Fig.7 Microstructure sketches of tailings filling body with different particle size distributions

为定量表征充填体微观结构的差异, 对 SEM 图像进行二值化处理, 计算孔隙度^[32], 结果如表 2 所示。由表可知, 超细尾砂、细尾砂和粗尾砂充填体的微观孔隙度分别为 0.248、0.183 和 0.200, 细尾砂充填体孔隙率最低, 孔隙结构较少, 微观结构最致密。

基于上述分析, 不同粒径分布尾砂充填体的强度特性和微观结构特性有明显差异。随尾砂 D_{50} 的增大, 充填体的单轴抗压强度和弹性模量均呈先增大后减小的趋势, 产生这种现象的微观解释为相对

超细尾砂和粗尾砂充填体, 细尾砂充填体微观孔隙度小, 粗、细尾砂颗粒和水化产物紧密结合, 形成的骨架结构较稳定。

表 2 充填体微观孔隙度

尾砂	黑色像素数 / 10^7	白色像素数 / 10^7	总像素数 / 10^7	孔隙度
超细	1.221	3.694	4.921	0.248
细	0.902	4.014	4.915	0.183
粗	0.987	3.931	4.918	0.200

4 充填体损伤特性分析

充填体的损伤特性是评价其力学性能优劣的关键指标。本节采用 DIC 技术、小波包技术及尖点突变理论相结合的方法对充填体的损伤特性进行定量分析，为不同粒径分布尾砂充填体的失稳预测提供依据。

4.1 应变云图获取

DIC 技术通过云图中颜色的差异，直观地反映试件在加载过程中产生的应变，应变值越大，损伤越严重。图 8 展示了料浆浓度为 70% 时，细尾砂充填体在 4 种轴向应变情况下的 DIC 主应变分布情况。图中， ε_1 为第 1 主应变。

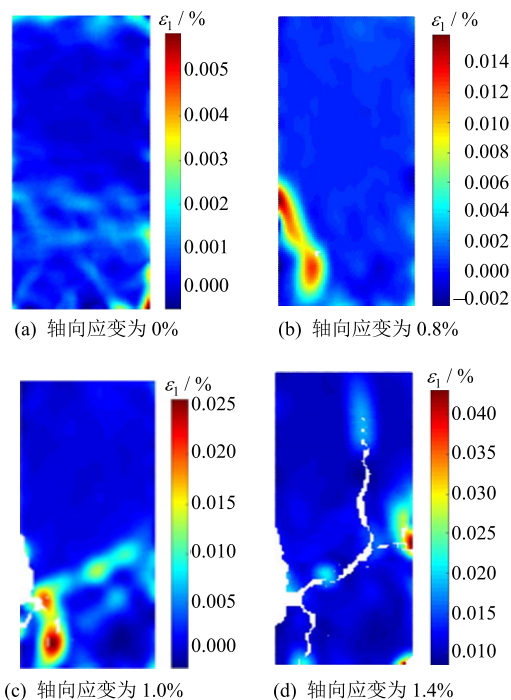


图 8 试件损伤主应变云图

Fig.8 Principal strain contours of damaged filling body specimen

由图 8 可知，在试件轴向应变由 0 逐渐发展为 1.4% 的过程中，试件右侧率先出现应变集中区，并不断扩展，损伤程度不断加深，最终出现宏观裂纹。因此，DIC 图像经小波包分解后，各频带的能量信号会随损伤过程的变化而变化，可作为识别试件表面损伤的依据。

4.2 小波函数阶数确定

采用二维小波包分析软件对图像进行去噪处理。提取图 8(a) 中的图像信息，借助 Daubechies 小波进行 3 层分解，根据式 (2) 确定合适的阶数 N ， p 取 1.5，计算结果如表 3 所示。由表可知，当小波阶数为 10 时，代价函数的值最小，因此，选取 db10 小波对图像进行分解。

表 3 分解层次为 3 时 db 小波的代价函数

Table 3 Cost functions of db wavelet with decomposition level of 3

小波阶数 N	$S_i(E_i)$ / 10^{10}	小波阶数 N	$S_i(E_i)$ / 10^{10}
7	1.919	14	1.981
8	1.982	15	1.938
9	1.917	16	1.957
10	1.916	17	1.996
11	1.975	18	1.957
12	1.924	19	1.986
13	1.931	20	2.006

4.3 尾砂粒径分布对充填体损伤突变的影响

充填体在压缩过程中，先后经历微孔隙压密阶段、弹性阶段、塑性屈服阶段和破坏发展阶段。其中，塑性屈服阶段被认为是裂纹萌生与发展的关键阶段^[13]。研究表明，裂纹自萌生、扩展至大面积发育过程中，存在一个裂纹扩展速度迅速增加的损伤突变过程^[14]。该过程可由某个突变点量化表征，定义为损伤突变阈值。借助小波包对 DIC 图像进行 3 层分解，重构能量向量，通过损伤识别指标的突变确定该阈值，总结其与尾砂粒径分布的关系，为判定不同粒径分布尾砂充填体的失稳提供数据支持。

以料浆浓度 70% 为例，超细尾砂、细尾砂和粗尾砂充填体的能量变化率随应变变化曲线与应力-应变曲线的关系如图 9 所示，同时，为定量表示 ECR 值的突变情况，借助尖点突变理论计算不同应变阶段 ECR 值的特征值，计算结果如表 4 所示。

由图 9 可知，随着充填体应变逐渐增加，ECR 值随之增加，表明试件损伤不断加深，其过程存在稳定损伤和加速损伤两个阶段：

(1) 稳定损伤阶段，充填体的 ECR 值增长稳定、数值较小，表明试件没有产生明显损伤和应力集中区，仅有局部区域的应变发生小幅度变化，主要包括微孔隙压密阶段和弹性阶段前期；

(2) 加速损伤阶段，充填体的 ECR 值增速加快、数值较大，说明试件应变集中区逐渐发展，损伤不断加剧。

由表 4 特征值计算结果表明：超细尾砂、细尾砂和粗尾砂充填体的 ECR 值分别在应变为 1.0%、0.8% 和 0.9% 时发生突变，即各自损伤突变阈值分别为峰值应力的 92.83%、92.31% 和 72.93%。结合应力-应变曲线，突变点与塑性屈服阶段起点存在偏差，超细尾砂和细尾砂充填体的 ECR 值突变点滞后于塑性屈服阶段起点，而粗尾砂充填体的 ECR 值突变点与塑性屈服阶段起点近似重合。这是因为超细尾砂和细尾砂充填体塑性较大，脆性较差，微裂纹

自产生至大面积扩展需经历较长时间, 导致其损伤突变滞后于塑性屈服阶段; 而粗尾砂充填体塑性较差、脆性较强, 受压时, 粗颗粒边角易出现应力集中, 导致试件的局部损伤突变与塑性屈服近乎同步发生。

基于上述分析, 尾砂粒径分布对充填体试件的损伤过程影响显著, 粗尾砂颗粒过多, 会使试件过早发生损伤突变, 引发充填体失稳。因此, 对采空区进行充填时, 应综合考虑充填体强度和损伤特性, 合理选择尾砂粒径分布。

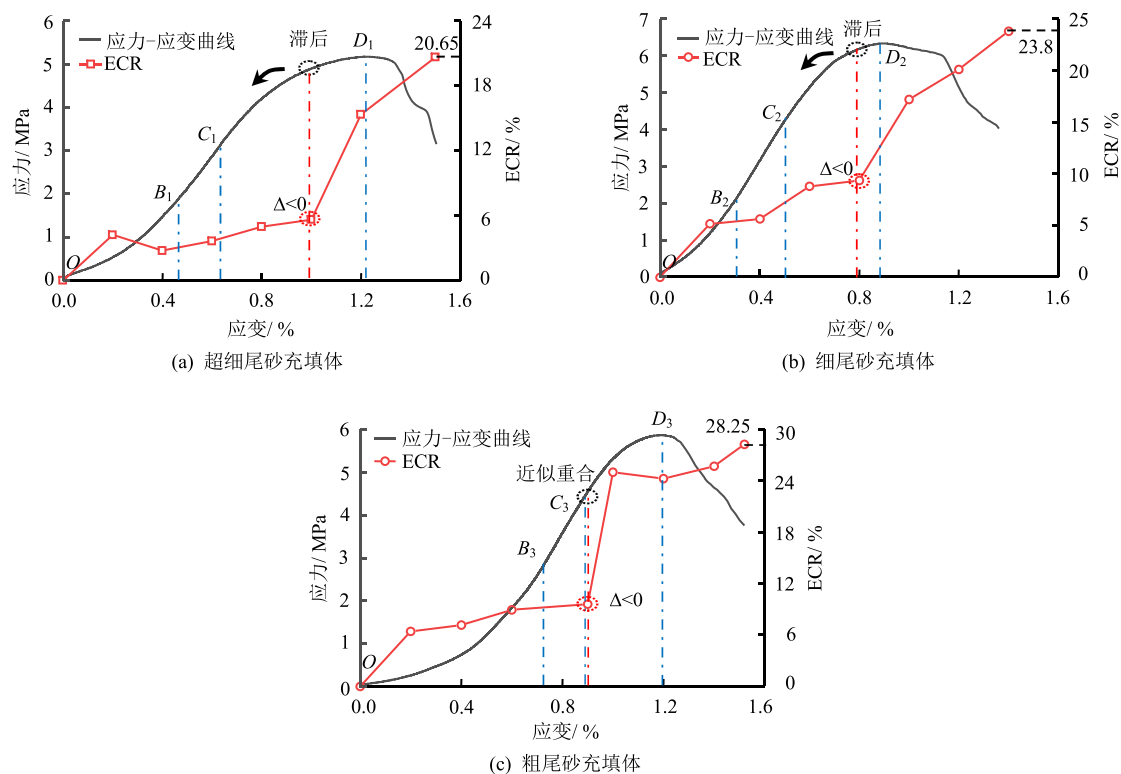


图9 充填体能量变化率突变曲线

Fig.9 Energy change rate curves with mutation segments of tailings filling body

表4 ECR 值突变特征值计算结果

Table 4 Characteristic mutation values of ECR index

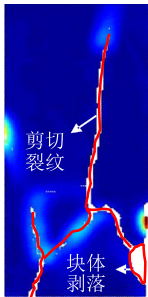
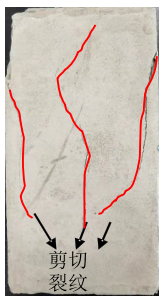
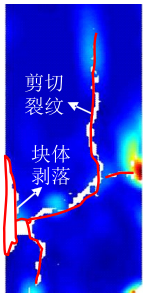
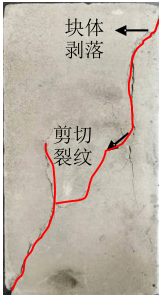
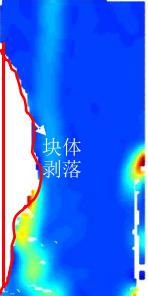
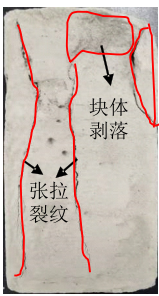
尾砂	应变/%	拟合函数	特征值 Δ	是否突变
超细尾砂	0.8	$ECR(\varepsilon) = 611.6\varepsilon^4 - 1\ 843\varepsilon^3 + 2\ 041.9\varepsilon^2 - 978.4\varepsilon + 174.4$	4×10^{-4}	否
	0.9	$ECR(\varepsilon) = -140.4\varepsilon^4 + 643.8\varepsilon^3 - 987.7\varepsilon^2 + 633.5\varepsilon - 141.7$	0.195 5	否
	1.0	$ECR(\varepsilon) = -967.3\varepsilon^4 + 3\ 822.7\varepsilon^3 - 5\ 522\varepsilon^2 + 3\ 472.1\varepsilon - 799.5$	-0.009 9	是
	1.1	$ECR(\varepsilon) = 144.84\varepsilon^4 - 801.25\varepsilon^3 + 1\ 605.5\varepsilon^2 - 1\ 354.8\varepsilon + 412.4$	0.084 8	否
细尾砂	0.7	$ECR(\varepsilon) = -267.15\varepsilon^4 + 906.16\varepsilon^3 - 1\ 064.6\varepsilon^2 + 530.26\varepsilon - 87.37$	0.009 1	否
	0.8	$ECR(\varepsilon) = -632.27\varepsilon^4 + 2\ 033.7\varepsilon^3 - 2\ 345.6\varepsilon^2 + 1\ 163.7\varepsilon - 202.2$	-0.008 2	是
	0.9	$ECR(\varepsilon) = -661.31\varepsilon^4 + 2\ 156.3\varepsilon^3 - 2\ 526\varepsilon^2 + 1\ 277.5\varepsilon - 228.25$	0.001 1	否
	1.0	$ECR(\varepsilon) = 947.7\varepsilon^4 - 3\ 940.2\varepsilon^3 + 6\ 026.2\varepsilon^2 - 3\ 987.9\varepsilon + 971.85$	0.004 8	否
粗尾砂	0.7	$ECR(\varepsilon) = 1\ 768.5\varepsilon^4 - 4\ 501.6\varepsilon^3 + 4\ 186.1\varepsilon^2 - 1\ 666.4\varepsilon + 247.83$	9.22×10^{-5}	否
	0.8	$ECR(\varepsilon) = -2\ 424.7\varepsilon^4 + 7\ 856.9\varepsilon^3 - 9\ 112.1\varepsilon^2 + 4\ 551.6\varepsilon - 829.9$	1.36×10^{-4}	否
	0.9	$ECR(\varepsilon) = -1\ 668.9\varepsilon^4 + 5\ 572.3\varepsilon^3 - 6\ 745.9\varepsilon^2 + 3\ 531.8\varepsilon - 668.76$	-0.009 3	是
	1.0	$ECR(\varepsilon) = 1\ 988.5\varepsilon^4 - 8\ 317.3\varepsilon^3 + 12\ 808\varepsilon^2 - 8\ 550.9\varepsilon + 2\ 095.2$	9.16×10^{-4}	否

4.4 尾砂粒径分布对充填体破裂模式的影响

由图9可知, 不同粒径分布尾砂充填体的 ECR 值发展趋势基本一致, 但程度有所差异, 特别是在破坏阶段, 粗尾砂充填体的 ECR 值明显较大。以 70% 浓度为例, 根据加载结束条件 (峰值应力的 60%),

选取 3 种粒径分布尾砂充填体峰后破坏节点 (分别对应各自峰值应力的 59.43%、61.81%和 62.71%) 的 ECR 值进行比较, 并结合试件实际破坏特征, 分析尾砂粒径分布对充填体破裂模式的影响, 结果如表 5 所示。

表 5 充填体破坏时 ECR 值与 DIC 云图对比
Table 5 ECR indices and DIC contours of filling body at failure point

尾砂	破坏时 DIC 云图	破坏形态	破坏时 ECR 值/%
超细尾砂			20.65
细尾砂			23.8
粗尾砂			28.25

由表 5 可知, 随尾砂 D_{50} 的增大, 充填体破坏时的 ECR 值逐渐增大, 充填体破坏程度增大。结合试件 DIC 主应变云图和实际破坏形态可知: 超细尾砂充填体的破坏形态以半贯穿剪切破坏为主, 裂纹两侧相对位移较小, 损伤程度较轻, ECR 值仅为 20.65%; 细尾砂充填体的破坏形态表现为贯穿剪切破坏, 伴有相对较大的块体剥落, 裂纹两侧相对位移较大, 损伤程度较大, ECR 值增大为 23.8%; 粗尾砂充填体的破坏形态以贯穿张拉破坏为主, 同时伴有大范围块体剥落, 试件损伤破坏严重, ECR 值达到 28.25%。

由于尾砂粒径分布的不均匀性, 试件的裂纹扩展不具明显规律性, 因此, 本节根据 ECR 值的变化情况, 着重分析了不同粒径分布尾砂充填体的损伤特性, 发现随 D_{50} 的增大, 充填体的局部损伤突变逐渐提前, 且损伤程度不断增大, 破坏模式逐渐由剪切破坏转向张拉破坏, 并伴有局部剥落。而对于裂纹扩展具有明显规律的充填体试件, 可借助此方法定量揭示其动态损伤过程, 进一步分析充填体的

破坏机制。同时, 如何根据本文研究结果, 对该矿山所用尾砂的粒径进行深入优化, 将是接下来研究的重点。

5 结 论

(1) 随尾砂 D_{50} 的不断增大, 充填体的单轴抗压强度和弹性模量呈先增大后减小的趋势, 并随料浆浓度的提高, 尾砂粒径对充填体强度和弹性模量的影响减小。

(2) 从微观角度来看, 尾砂粒径分布不同会引起充填体微观结构的差异。细尾砂充填体粗、细颗粒结合紧密, 并被水化产物紧紧包裹, 孔隙度最低, 形成了稳定的骨架结构, 微观结构致密性最好。

(3) 根据充填体 ECR 值的变化趋势, 将其损伤过程划分为稳定损伤阶段和加速损伤阶段; 通过计算 ECR 值的突变特征值, 发现超细尾砂、细尾砂和粗尾砂充填体的 ECR 值分别在其峰值应力的 92.83%、92.31% 和 72.93% 处发生突变, 突变点位置与塑性屈服阶段起点并不完全吻合, D_{50} 越大, 突变点位置

越靠前, 充填体越早发生失稳。

(4)通过分析充填体破坏时的DIC主应变云图、破坏形态及 ECR 值可知, 随尾砂 D_{50} 的增大, 充填体 ECR 值由 20.65%逐渐增大为 28.25%, 对应破坏模式由剪切破坏转变为张拉破坏, 并逐渐伴有较大块体剥落, 说明尾砂粒径过粗将导致充填体的破坏程度更为剧烈。

研究表明, 借助充填体 ECR 值判定其损伤状态和破坏模式的方法是可行的, 有效规避了以肉眼观测定性描述试件损伤的主观性和随机性等缺点, 为定量表征充填体的损伤状态提供新的思路。

参考文献

- [1] 吴浩, 赵国彦, 陈英, 等. 非胶结充填材料侧限压缩变形机制及级配效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1225-1232.
WU Hao, ZHAO Guo-yan, CHEN Ying, et al. Deformation mechanism of un-cemented filling materials and grading in confined compaction tests[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2018, 35(6): 1225-1232.
- [2] 魏晓明, 郭利杰, 周小龙, 等. 高阶胶结充填体全时序应力演化规律及预测模型研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3613-3620.
WEI Xiao-ming, GUO Li-jie, ZHOU Xiao-long, et al. Full sequence stress evolution law and prediction model of high stage cemented backfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(11): 3613-3620.
- [3] 金爱兵, 巨有, 孙浩, 等. 相变储能充填体孔隙结构及强度劣化机制研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2623-2633.
JIN Ai-bing, JU You, SUN Hao, et al. Pore structure and strength deterioration mechanism of phase change energy storage backfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(10): 2623-2633.
- [4] 肖柏林, 苗胜军, 高谦, 等. 冶金渣胶结材料对超细全尾砂的固化特性研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(4): 1152-1163.
XIAO Bo-lin, MIAO Sheng-jun, GAO Qian, et al. Study on solidification characteristics of metallurgical slag binder materials for ultra-fine tailings backfill[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2022, 32(4): 1152-1163.
- [5] 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 Hai-yong, WU Ai-xiang, WU Shun-chuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2022, 44(1): 11-25.
- [6] QIU J P, YANG L, SUN X G, et al. Strength characteristics and failure mechanism of cemented super-fine unclassified tailings backfill[J]. **Minerals**, 2017, 58(7): 1-13.
- [7] FALL M, BENZAAZOUA M, OUELLET S. Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill[J]. **Minerals Engineering**, 2004, 18(1): 41-44.
- [8] QIU J P, GUO Z B, YANG L, et al. Effect of tailings fineness on flow, strength, ultrasonic and microstructure characteristics of cemented paste backfill[J]. **Construction and Building Materials**, 2020, 263: 120645.
- [9] KE X, HOU H B, ZHOU M, et al. Effect of particle gradation on properties of fresh and hardened cemented paste backfill[J]. **Construction and Building Materials**, 2015, 96: 378-382.
- [10] 杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂戈壁集料膏体充填粒级优化[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1552-1558.
YANG Liu-hua, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Gradation optimization of unclassified tailings paste with Gobi aggregates[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2016, 26(7): 1552-1558.
- [11] KESIMAL A, ERCIKDI B, YILMAZ E. The effect of desliming by sedimentation on paste backfill performance[J]. **Minerals Engineering**, 2003, 16(10): 1009-1011.
- [12] 徐文彬, 杜建华, 宋卫东, 等. 超细全尾砂材料胶凝成岩机制试验[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2295-2302.
XU Wen-bin, DU Jian-hua, SONG Wei-dong. Experiment on the mechanism of consolidating backfill body of extra-fine grain unclassified tailings and cementitious materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(8): 2295-2302.
- [13] 程爱平, 董福松, 舒鹏飞, 等. 连续级配胶结充填体力学特性及声发射特征[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 46-52.
CHENG Ai-ping, DONG Fu-song, SHU Peng-fei, et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of continuous graded cemented backfill[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2021, 49(8): 46-52.
- [14] 尹升华, 侯永强, 杨世兴, 等. 单轴压缩下混合集料胶结充填体变形破坏及能耗特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 936-947.
YIN Sheng-hua, HOU Yong-qiang, YANG Shi-xing, et al. Analysis of deformation failure and energy dissipation of mixed aggregate cemented backfill during uniaxial

- compression[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2021, 52(3): 936-947.
- [15] 吴疆宇, 靖洪文, 浦海, 等. 分形矽石胶结充填体的宏观力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (10): 2083-2100.
- WU Jiang-yu, JING Hong-wen, PU Hai, et al. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of cemented waste rock backfill using fractal gangue[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(10): 2083-2100.
- [16] ZHOU X, XIE Y J, LONG G S, et al. Effect of surface characteristics of aggregates on the compressive damage of high-strength concrete based on 3D discrete element method[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 301: 101-124.
- [17] WU J Y, FENG M M, MAO J M, et al. Particle size distribution of aggregate effects on mechanical and structural properties of cemented rockfill: experiments and modeling[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 193: 295-311.
- [18] YANG K M, CUI Y H, QIAN X. A method on obtaining best wavelet packet decomposition level and reducing noise of hyperspectral image[J]. **Sensor Letters**, 2013(6): 1042-1049.
- [19] HE H X, ZHENG J C, LIAO L C, et al. Damage identification based on convolutional neural network and recurrence graph for beam bridge[J]. **Structural Health Monitoring**, 2021, 20(4): 1392-1408.
- [20] LEI D, YANG L Q, XU W X, et al. Experimental study on alarming of concrete micro-crack initiation based on wavelet packet analysis[J]. **Construction and Building Materials**, 2017, 149: 716-723
- [21] ZHOU K Y, LEI D, HE J T, et al. Real-time localization of micro-damage in concrete beams using DIC technology and wavelet packet analysis[J]. **Cement and Concrete Composites**, 2021, 123: 104198.
- [22] 徐晓冬, 孙光华, 姚旭龙, 等. 基于能量耗散与释放的充填体失稳尖点突变预警模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3003-3012.
- XU Xiao-dong, SUN Guang-hua, YAO Xu-long, et al. A cusp catastrophe warning model for instability of backfill based on energy dissipation and release[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 3003-3012.
- [23] WANG J, FU J X, SONG W D, et al. Acoustic emission characteristics and damage evolution process of layered cemented tailings backfill under uniaxial compression[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 295: 123663.
- [24] WU J Y, FENG M M, NI X Y, et al. Aggregate gradation effects on dilatancy behavior and acoustic characteristic of cemented rockfill[J]. **Ultrasonics**, 2019, 92: 79-92.
- [25] XIU Z G, WANG S H, JI Y C, et al. Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB)[J]. **Construction and Building Materials**, 2020, 242: 118-132.
- [26] ZHOU K Y, LEI D, HE J T, et al. Single micro-damage identification and evaluation in concrete using digital image correlation technology and wavelet analysis[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 267: 120951.
- [27] ZHAO B N, LEI D, FU J J, et al. Experimental study on micro-damage identification in reinforced concrete beam with wavelet packet and DIC method[J]. **Construction and Building Materials**, 2019, 210: 338-346.
- [28] GUO X, LI Y, SUO T, LIANG J. De-noising of digital image correlation based on stationary wavelet transform[J]. **Opt and Lasers in Engineering**, 2017, 90: 161-172.
- [29] 齐宽. 永平铜矿全尾砂胶结充填材料性能与采场围岩稳定性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- QI Kuan. Study on performance of cemented backfill materials with unclassified tailings and stability of stope surrounding rock in Yongping copper mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [30] 薛晓辉, 刘铁骊, 周亦涛. 基于尖点突变理论和 R/S 分析的基坑安全性评价及事故处理措施研究[J]. 工程勘察, 2022, 50(7): 15-21.
- XUE Xiao-hui, LIU Tie-li, ZHOU Yi-tao. Safety evaluation and accident treatment of foundation pit based on cusp catastrophe theory and R/S analysis[J]. **Geo-technical Investigation & Surveying**, 2022, 50(7): 15-21.
- [31] WU J Y, FENG M M, HAN G S, et al. Experimental investigation on mechanical properties of cemented paste backfill under different gradations of aggregate particles and types and contents of cementing materials[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2019(1), 9456861.
- [32] 徐文彬, 曹培旺, 程世康. 深地充填体断裂特性及裂纹扩展模式研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(10): 2508-2518.
- XU Wen-bin, CAO Pei-wang, CHENG Shi-kang. Study on fracture characteristics and crack propagation mode of cemented backfill in deep mine[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2018, 49(10): 2508-2518.