

文章编号: 1674-9669(2024)06-0890-11 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjckx.2024.06.012

引文格式: 胡谱达, 刘艳章, 李凯兵, 等. 温度与灰砂比对尾砂胶结充填体力学及损伤特性的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(6): 890-900.

温度与灰砂比对尾砂胶结充填体力学及损伤特性的影响

胡谱达¹, 刘艳章^{*1,2}, 李凯兵³, 黄诗冰^{1,2}, 王文杰^{1,2},
田琴¹, 张军¹, 张增贵⁴

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 武汉 430081;
3. 金川集团工程建设有限公司, 甘肃 金昌 737102; 4. 武钢资源集团大冶铁矿有限公司, 湖北 黄石 435006)

摘要: 温度与灰砂比是影响尾砂胶结充填体力学及损伤特性的2个重要因素。利用某金属矿全尾砂制备不同灰砂比(1:4、1:6、1:8、1:10、1:12)(质量比,下同)全尾砂胶结充填体试样,经不同温度(20、35、40、45、50℃)养护后对试样进行单轴压缩、波速和孔隙率测定试验,获得试样的应力-应变关系曲线及物理力学参数。基于应变等价原理,建立损伤演化方程和损伤本构模型,研究温度与灰砂比对充填体力学及损伤特性的影响,并结合灰色关联分析法探究两者影响的差异。研究表明:充填体抗压强度及弹性模量随温度的升高先增加后减小,随灰砂比的增大而增大,并在温度为45℃、灰砂比为1:4时达到最大;通过本构模型理论值与试验实测值的对比验证了模型的可靠性;灰色关联分析的结果表明,温度对波速、孔隙率和峰值损伤的贡献率大于灰砂比,对抗压强度和弹性模量的贡献率小于灰砂比。研究结果可为矿山绿色充填开采设计提供参考。

关键词: 温度;灰砂比;尾砂胶结充填体;力学特性;本构模型;灰色关联

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A

Influence of temperature and cement-tailings ratio on the mechanical and damage characteristics of cemented tailings backfill

HU Puda¹, LIU Yanzhang^{*1,2}, LI Kaibing³, HUANG Shibing^{1,2}, WANG Wenjie^{1,2},
TIAN Qin¹, ZHANG Jun¹, ZHANG Zenggui⁴

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, China;
3. Jinchuan Group Engineering and Construction Co., Ltd., Jinchang 737102, Gansu, China;
4. Daye Iron Mine Limited Corporation, WISCO Resources Group, Huangshi 435006, Hubei, China)

Abstract: Temperature and cement-tailings ratio are the two main factors affecting the mechanical and damage characteristics of cemented tailings backfill. The cemented unclassified tailings backfill samples with different cement-tailings ratios (1:4, 1:6, 1:8, 1:10 and 1:12) were prepared by using the unclassified tailings of a metal mine. After curing at different temperatures (20, 35, 40, 45, 50 °C), the samples were subjected to uniaxial compression, wave velocity and porosity measurement tests to obtain the stress-strain relationship curve and physico-mechanical parameters. Based on the principle of strain equivalence, a damage evolution equation and a

收稿日期: 2023-12-02; 修回日期: 2023-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072300)

通信作者: 刘艳章(1969—), 博士, 教授, 主要从事矿山岩石力学、采矿工艺、矿山测试技术等方面的研究工作。

E-mail: liuyanzhang@163.com

damage constitutive model were established to investigate the effects of temperature and cement-tailings ratio on the backfill mechanics and damage characteristics, and the difference between the two effects was explored by grey correlation analysis. The results showed that the compressive strength and elastic modulus of the backfill increased first and then decreased with the increase of temperature, and increased with the increase of cement-tailings ratio, reaching the maximum at a temperature of 45 °C and cement-tailings ratio of 1:4; the reliability of the model was verified by the comparison between the theoretical value of the constitutive model and the experimentally measured value. The results of the grey correlation analysis indicated that the contribution rate of temperature to wave velocity, porosity, and peak damage was greater than that of the cement-tailings ratio, and the contribution rate to compressive strength and elastic modulus was smaller than that of the cement-tailings ratio. The results can provide a reference for the design of green-filling mining in mines.

Keywords: temperature; cement-tailings ratio; cemented tailings backfill; mechanical characteristics; constitutive model; grey correlation

尾砂充填开采技术是有效控制采场地压、采区地表沉降及促进矿山环保的重要手段,尾砂充填开采是绿色矿山建设与发展的必然趋势^[1-5]。矿山的不同开采区域由于所处开采技术条件变化,使得满足充填体强度的灰砂比,以及充填体所处的环境温度条件不同,而温度与灰砂比影响着充填体力学特性,进而影响其损伤特性及稳定性^[6-8],因此,研究温度与灰砂比对充填体力学及损伤特性的影响,是尾砂充填开采技术顺利实施的必要条件。

近年来,国内外诸多学者针对充填体的力学及损伤特性开展了大量研究。李凯兵^[9]、LIU等^[10]、王勇等^[11]研究了温度对充填体力学特性的影响,建立了不同温度下充填体的损伤本构模型;刘志祥等^[6]分析了不同灰砂比充填体变形与破坏特征,用损伤力学建立了4种不同配比充填体损伤本构方程;侯永强等^[12]、HOU等^[13]系统研究了龄期对充填体强度、应力-应变关系和破坏形态的影响,构建了考虑龄期的分段式本构模型;WANG等^[14-15]、李召峰等^[16]探究了含水率对充填体力学特性的影响,发现充填体抗压强度随着含水率的增加先增大后减小,并建立了不同含水率的损伤本构模型;赵康等^[17]、LAI等^[18]、YIN等^[19]研究发现纤维能极大增强充填体的韧性,对裂纹的扩展有良好的阻滞作用,含纤维的充填体破坏后仍有一定的承载能力;赵永辉等^[20]、郭育霞等^[21]探讨了不同尺寸对矽石胶结充填体的损伤演化和破坏特征的影响,结果表明不同尺寸充填体的初始压实阶段和峰后破坏阶段的声发射信号强度不同,并建立了考虑尺寸的损伤本构模型。这些研究虽然取得了一些成果,但主要是考虑单因素的影响。在实际充填开采过程中,充填体往往处在多种因素相互影响的环境下,其力学及损伤特性同时受到多个因素的影响,其中温度和灰砂比是非常关键的影响因素。然

而,目前关于温度与灰砂比对充填体力学及损伤特性的耦合影响和影响的差异研究较少。

本文以某金属矿山全尾砂为骨料,改性胶结剂为胶凝材料制备充填体试样,研究5种不同温度和灰砂比条件下全尾砂胶结充填体的力学特性。基于应变等价原理,建立了充填体损伤演化方程和本构模型,并采用灰色关联计算方法分析温度和灰砂比对充填体力学及损伤特性的贡献大小。研究结果加深了对不同因素下矿山充填体力学及损伤特性的认知,可为矿山绿色充填开采设计提供参考。

1 试验过程与方法

1.1 试验材料

试验材料包括尾砂、胶凝材料和水。其中尾砂为某金属矿全尾砂,其粒径分布如图1所示,中值粒径为28.6 μm,属细粒级尾砂,主要成分为SiO₂、CaO、Fe₂O₃、Al₂O₃和CuO等,胶凝材料为基于PO42.5水泥改性的胶结剂,水为实验室用自来水。

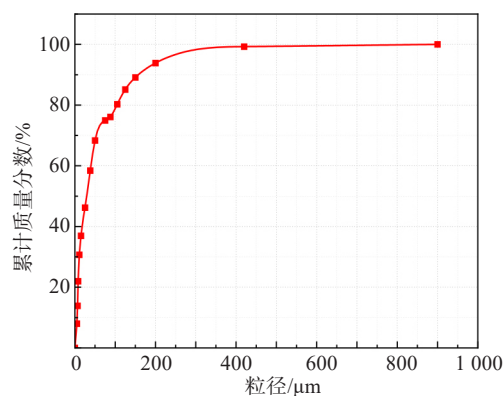


图1 尾砂粒度分布

Fig.1 Tailings particle size distribution

1.2 试样制备与养护

按灰砂比分别为1:4、1:6、1:8、1:10、1:12,浆料质量浓度为70%制备试样。将充填体材料(尾砂、改性胶结剂、水)在搅拌机中充分混合7 min以上,同时用钢棒搅拌混合物以消除气泡。混合均匀后,将混合物浇注到 $\Phi 50\text{ mm}\times L100\text{ mm}$ 的圆柱形塑料模具中。经24 h脱模后,将制备的充填体试样分别放入20、35、40、45、50 °C的恒温水箱中进行养护,养护28 d后取出试样,进行测试,制作的部分充填体试样如图2所示。

1.3 测试方法

采用型号为WAW-100的电液伺服万能试验机对试样进行单轴抗压测试。以0.02 kN/s速率进行加载,每组测试3个试样,测试结果取平均值。为了深入研究温度与灰砂比对力学特性的影响,单轴压缩之前采用RSM-SY5(T)非金属声

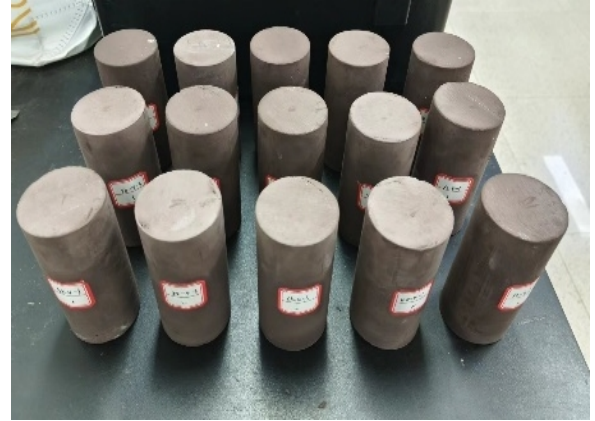


图2 全尾砂胶结充填体试样

Fig.2 Cemented unclassified tailings backfill samples

波监测仪对试样波速进行测定,另用真空饱和装置对孔隙率进行测定。各测试设备如图3所示。

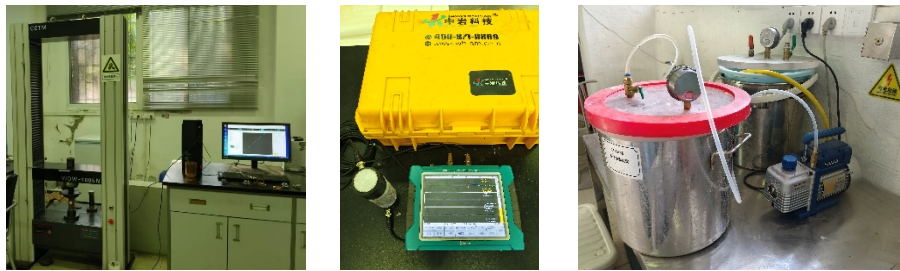


图3 试验测试设备

Fig.3 Test equipment diagram

2 充填体力学特性分析

2.1 单轴压缩应力-应变特征

在不同温度和灰砂比条件下,充填体试样的全应力-应变曲线如图4所示。由图4可知,不同温度和灰砂比充填体试样的单轴压缩试验曲线变化趋势相似,所有试样均经历初始压密阶段(OA)、线弹性阶段(AB)、塑性屈服阶段(BC)和峰后破坏阶段(CD)。当灰砂比为1:6时,随着温度的升高,曲线弹性阶段斜率和破坏前的峰值应力均呈现出先增大后减小的趋势,这表明,随着温度的升高,充填体的抗变形能力先增强后减弱,抗压强度先升高后降低;灰砂比为1:4、1:8、1:10和1:12的充填体试样的应力-应变曲线也表现出类似的规律。

2.2 抗压强度和弹性模量

不同温度和灰砂比充填体单轴力学特性关系如图5所示。由图5可知,充填体试样的抗压强

度和弹性模量均随温度的升高先增大后减小,随灰砂比的增大而增大,并在温度为45 °C、灰砂比为1:4时达到最大值,分别为4.853、1 217.94 MPa,即适宜温度和高灰砂比对充填体的单轴抗压强度和刚度具有强化效应。这可能是由于温度的升高,加快了胶结剂的水化反应速率,生成了更多的水化产物,使充填体的结构更加致密,从而提高了强度与刚度。而当温度过高时,会导致充填体内部自由水的蒸发散失,引起水化反应速率的下降和孔隙的增多,破坏其结构,使强度与刚度降低。在其他文献^[22-24]中也有类似的结果被报道。另外,随着灰砂比的增大,参与水化反应胶结剂的量越多,所生成的水化产物的量越多,使充填体内部结构更为密实,颗粒间的黏聚力更强,从而提高强度与刚度^[25-26]。

当温度为20~45 °C,灰砂比从1:12增大到1:4时,试样的抗压强度从0.369、0.809、1.102、1.224 MPa显著增加到1.727、3.401、4.294、4.853 MPa。当灰砂

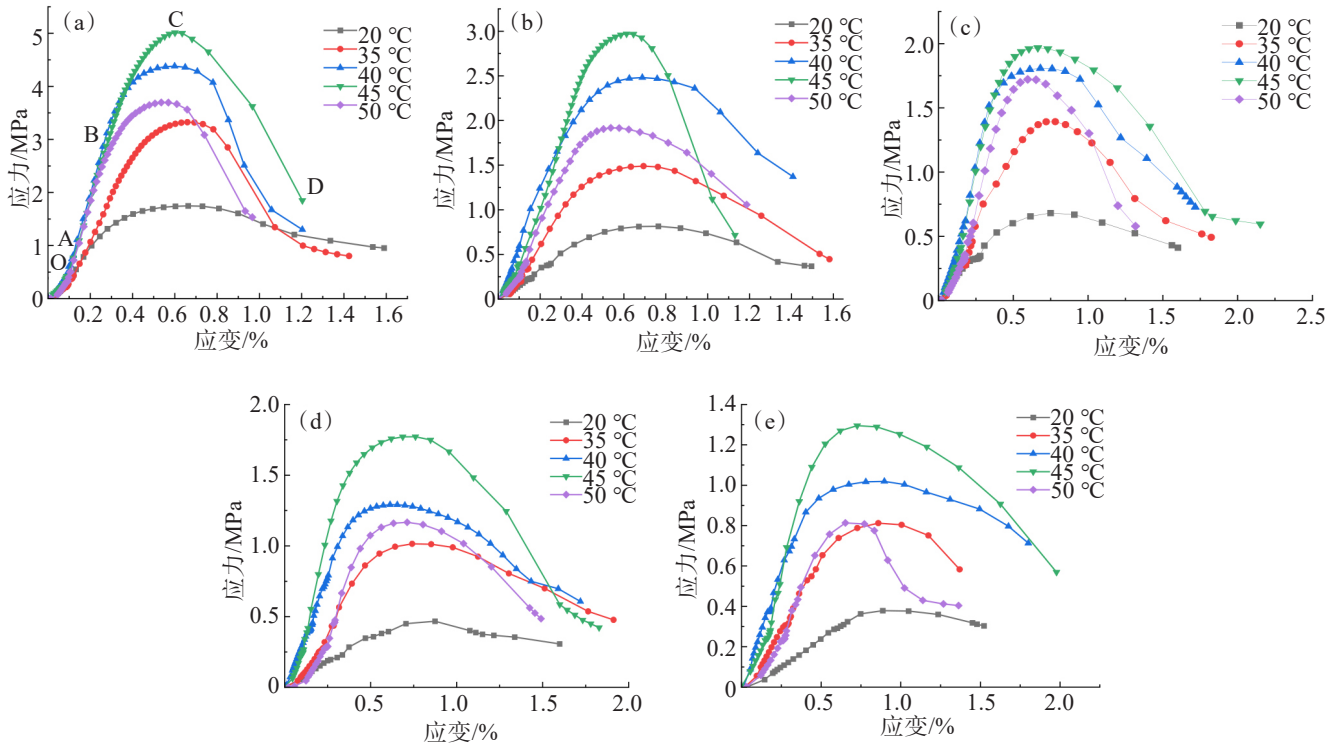


图 4 不同灰砂质量比下不同温度充填体应力-应变曲线:(a) 1:4;(b) 1:6;
(c) 1:8;(d) 1:10;(e) 1:12

Fig.4 Stress-strain curves of backfill at different temperatures under different cement-tailings ratios:
(a) 1:4;(b) 1:6;(c) 1:8;(d) 1:10;(e) 1:12

比为 1:12~1:4,温度从 20 °C 升至 45 °C 时,试样的抗压强度也有一定程度的增加,但增加幅度较小,分别从 0.369、0.496、0.695、0.842、1.727 MPa 增加到

1.224、1.695、1.867、2.808、4.853 MPa。可以看出,灰砂比对试样抗压强度增加的影响更大。同理,可推出灰砂比对试样弹性模量的影响大于温度。

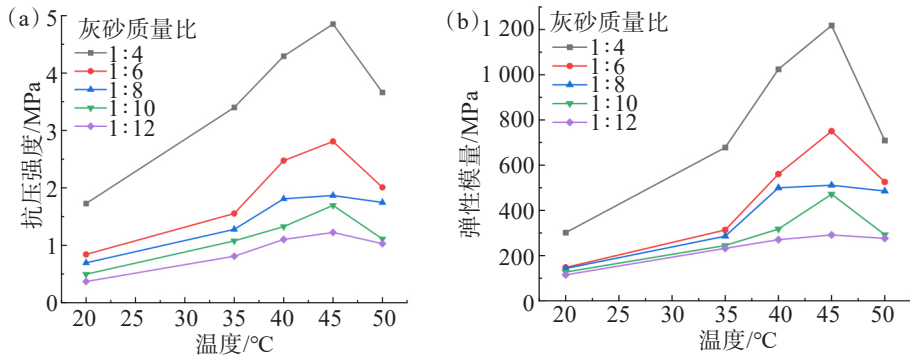


图 5 不同温度和灰砂质量比充填体力学特性:(a) 抗压强度变化;(b) 弹性模量变化

Fig.5 Mechanical properties of backfill with different temperatures and cement-tailings ratios:
(a) compressive strength change diagram; (b) elastic modulus change diagram

2.3 力学特性影响分析

根据声波测试的情况,可得不同灰砂比下充填体波速随温度的变化规律如图 6 所示。由图 6 可以清楚地观察到,波速值随温度的升高先增大后减小,随灰砂比的增大而增大。这是因为在适宜温度和高灰砂比条件下,胶结剂水化反应更加迅速,生成更多

的水化产物填充内部孔隙,使得试样具有更致密的内部结构,更有利于波的传播,宏观表现为抗压强度的增大,而当温度超过 45 °C 时,对充填体内部结构造成热损伤,不利于波的传播,宏观表现为抗压强度的减小。充填体试样波速随温度和灰砂比变化的变化特征与抗压强度非常一致。为了更加精确地定量

出它们之间的关系,对已知数据进行拟合,拟合结果如图7所示,拟合系数为0.9708,可知充填体的抗压强度随波速的增大呈指数增大。

根据孔隙率测试的情况,可得不同灰砂比下充填体孔隙率随温度的变化规律如图8所示,与充填体的抗压强度变化规律相反,孔隙率均以45℃为临界值呈先减小后增大的趋势。充填体的灰砂比越大,孔隙率越小,孔隙率随温度变化的规律越显著。适宜的养护温度和高灰砂比能够促使充填体内部微观结构更为密实,孔隙结构变得不明显,从而提高充填体强度,而当温度超过45℃时,过高的温度产生的自由水蒸发效应会导致水化产物减少及空隙结构增多,从而对充填体抗压强度产生不利的影响。

为了更加精确地定量出充填体抗压强度和孔隙率之间的关系,拟合已知数据,结果如图9所示,拟合系数为0.9795,可知充填体抗压强度与孔隙率之间存在反比关系,随着孔隙率的减小,充填体的抗压强度线性增大,这说明充填体微观结构的改善将有利于抗压强度的增强。

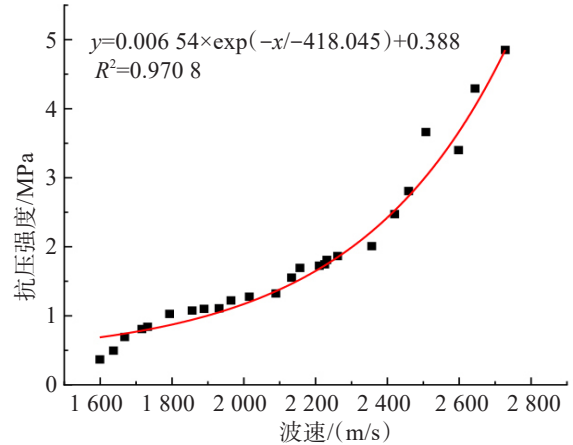


图7 抗压强度与波速之间的关系
Fig.7 Relationship between compressive strength and wave velocity

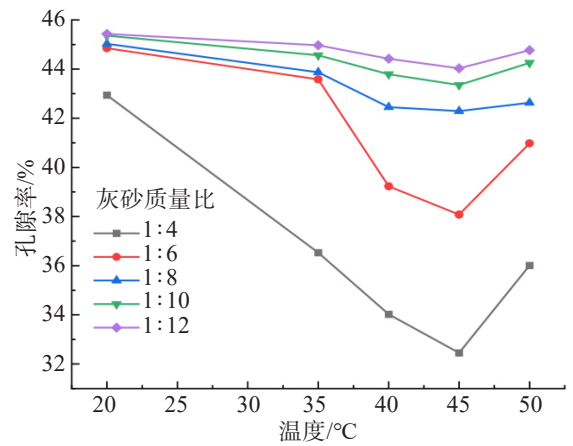


图8 孔隙率随温度变化特征
Fig.8 Characteristics of porosity changing with temperature

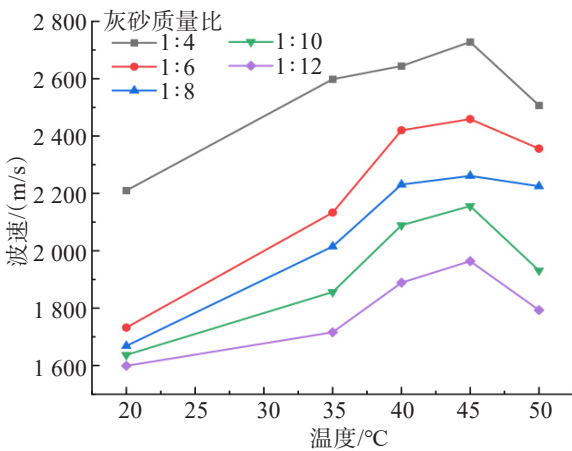


图6 波速随温度变化特征
Fig.6 Characteristics of wave velocity changing with temperature

3 充填体损伤特性分析

3.1 充填体损伤本构模型

根据Lemaitre(1971)提出的应变等价原理,可知作用在受损充填体上应力引起的应变等价于作用在无损充填体上实际应力(有效应力)引起的应变^[27]。如果将充填体视为各向同性连续介质,则:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (1)$$

式(1)中: σ 为充填体所承受的有效应力; ε 为轴向应

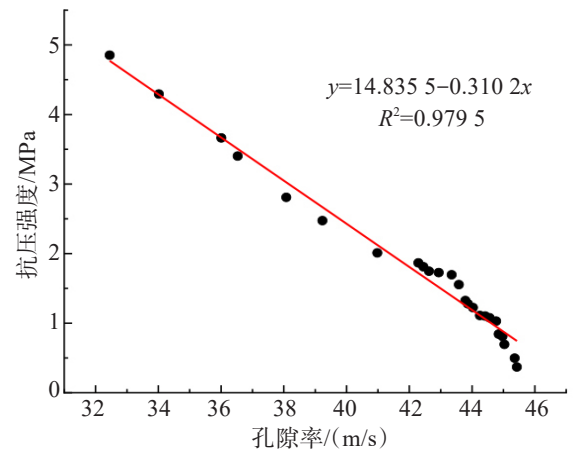


图9 抗压强度与孔隙率之间的关系
Fig.9 Relationship between compressive strength and porosity

变; E 为弹性模量; D 为损伤值。

充填体的应力-应变曲线服从 Weibull 统计分布密度函数^[28],该函数可以在损伤程度与各微元所包含的缺陷之间建立关系,可得尾砂胶结充填体在单轴压缩下的损伤值(D)为:

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{1}{\lambda}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)^{|\lambda|}\right] \quad (2)$$

式(2)中: λ 为 Weibull 统计分布的形状参数,可以表示为:

$$\lambda = \frac{1}{\ln\left(\frac{E\varepsilon_p}{\sigma_p}\right)} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: σ_p 为充填体的峰值应力, ε_p 为峰值

应变。

根据试验所得数据,代入式(3)中得到 λ ,再代入式(1)、式(2)中,即得到不同温度和灰砂比条件下充填体试样损伤本构方程如表1所列,由于篇幅有限,不同灰砂比条件下结论相同,因此仅列出灰砂比为1:6的充填体试样的分析过程。

根据损伤本构方程,得到灰砂比为1:6不同温度充填体应力-应变理论曲线如图10所示,通过与试验曲线对比分析可以看出,所建立的本构模型理论曲线与实测试验曲线具有较高的相似性,尤其是曲线上阶段拟合较好,在曲线下阶段,它们略有偏离,但具有相同的发展趋势。表明所建立的损伤本构模型也能有效描述尾砂胶结充填体在单轴压缩下的应力分布特征,验证了模型的可靠性。

表1 不同温度充填体的损伤演化方程和本构方程

Table 1 Damage evolution equation and constitutive equation of backfill at different temperatures

| 温度/°C | 灰砂质量比 | λ | 损伤演化方程(D) | 损伤本构方程(σ) |
|-------|-------|-----------|---|---|
| 20 | 1:6 | 3.192 | $D=1-\exp[-0.313\times(\varepsilon/0.007\ 58)^{3.192}]$ | $\sigma=147.62\times\varepsilon\times\exp[-0.313\times(\varepsilon/0.007\ 58)^{3.192}]$ |
| 35 | 1:6 | 2.678 | $D=1-\exp[-0.373\times(\varepsilon/0.006\ 94)^{2.678}]$ | $\sigma=313.34\times\varepsilon\times\exp[-0.373\times(\varepsilon/0.006\ 94)^{2.678}]$ |
| 40 | 1:6 | 2.372 | $D=1-\exp[-0.422\times(\varepsilon/0.006\ 80)^{2.372}]$ | $\sigma=560.44\times\varepsilon\times\exp[-0.422\times(\varepsilon/0.006\ 80)^{2.372}]$ |
| 45 | 1:6 | 2.150 | $D=1-\exp[-0.465\times(\varepsilon/0.006\ 28)^{2.150}]$ | $\sigma=750.50\times\varepsilon\times\exp[-0.465\times(\varepsilon/0.006\ 28)^{2.150}]$ |
| 50 | 1:6 | 2.646 | $D=1-\exp[-0.378\times(\varepsilon/0.005\ 32)^{2.646}]$ | $\sigma=525.82\times\varepsilon\times\exp[-0.378\times(\varepsilon/0.005\ 32)^{2.646}]$ |

3.2 充填体损伤演化

根据试验结果,将参数 λ 代入式(2),即得到灰砂比1:6不同温度充填体损伤演化方程如表1,进而得损伤随应变变化曲线如图11所示。由图11可知,充填体损伤分为4个阶段:①无损伤:损伤值为0,充填体试样处于压实阶段和部分线弹性阶段。内部微裂纹和裂隙已压实,损伤-应变曲线为应变轴上的一条直线。②初始损伤形成:损伤值从0开始缓慢增加,损伤-应变曲线呈凹形。③损伤加速增长:损伤值线性增加。④损伤稳定发展:损伤值增长缓慢,大多数损伤值接近1,损伤-应变曲线由凸形变为直线。

峰值损伤被定义为与充填体试样的峰值应力相对应的损伤值^[15]。采用表1中损伤演化方程计算,温度为20、35、40、45、50 °C充填体的峰值损伤(D_p)分别为0.269、0.312、0.344、0.372、0.315,对应坐标在图11中已标出,可知峰值损伤随温度的升高先增大后减小,在45 °C时达到最大值,这与前文强度随温度的变化规律相对应。

比较图11中不同养护温度下单轴压缩充填体的损伤情况,结果表明,在峰值应力前,充填体损伤增长缓慢,损伤增长率随温度升高先增大后减小;峰值应力后,充填体损伤增长迅速,损伤增长率随温度升高先减小后增大;最后损伤又缓慢增长,直到损伤值达到1,充填体发生完全破坏。

4 温度和灰砂比与力学及损伤特性灰色关联分析

根据前文可知温度和灰砂比与力学及损伤特性之间存在某种关系,这种关系是复杂的,非线性的,再加上试验数据量相对偏少,为进一步探究这种关系,采用灰色关联理论进行分析^[29]。本研究以不同温度和灰砂比条件下的充填体为研究对象,以温度、灰砂比、单轴抗压强度、弹性模量、孔隙率、波速和峰值损伤为基础数据,分析温度和灰砂比与充填体力学及损伤特性之间的关联性。具体分析过程包括评

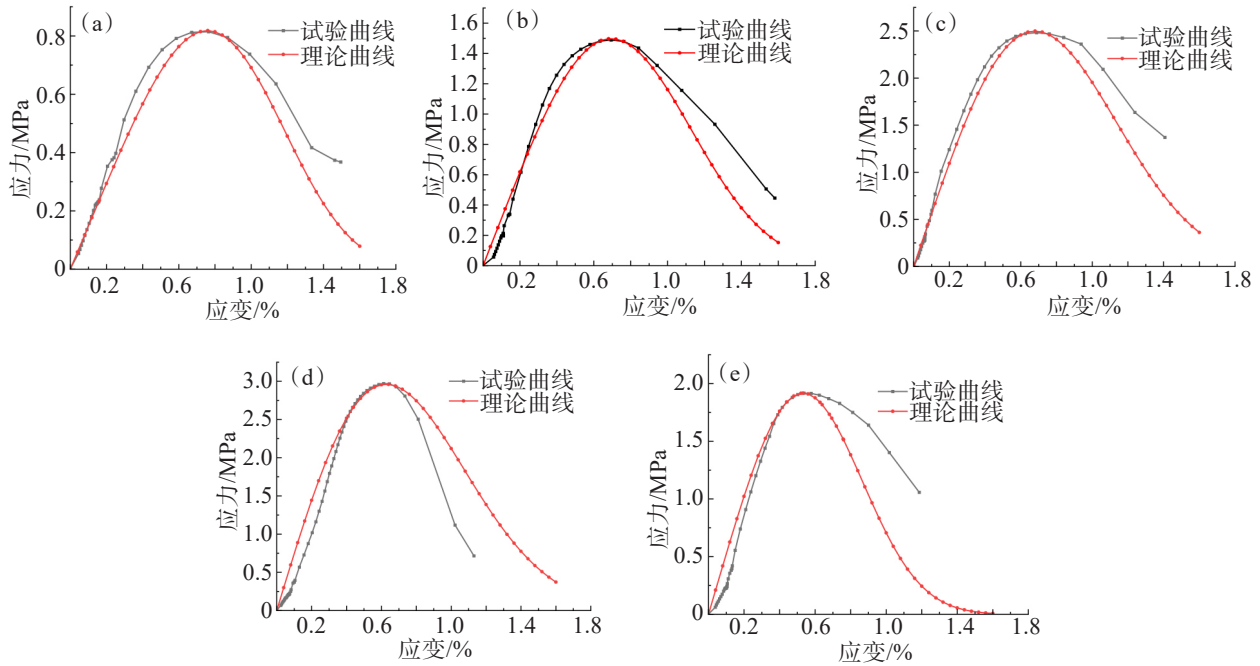


图10 灰砂质量比为1:6时不同温度下充填体理论曲线与试验曲线比较:(a) 20 °C;(b) 35 °C;(c) 40 °C;(d) 45 °C;(e) 50 °C
 Fig.10 Comparison of theoretical curve and experimental curve of backfill at different temperatures with cement-tailings ratio of 1:6: (a) 20 °C;(b) 35 °C;(c) 40 °C;(d) 45 °C;(e) 50 °C

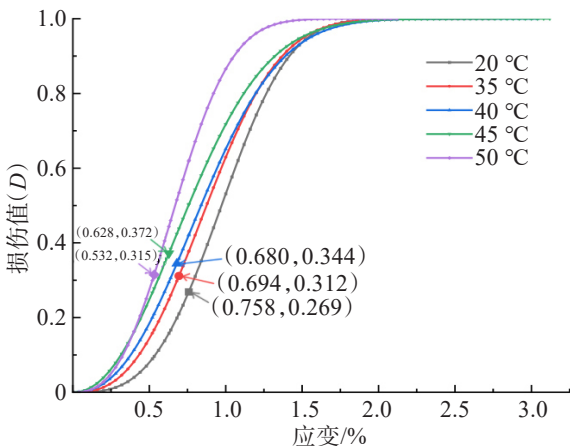


图11 灰砂质量比为1:6时不同温度下充填体损伤随应变变化曲线

Fig.11 The curve of damage of backfill with strain at different temperatures with cement-tailings ratio of 1:6

价参数选取、参数无量纲化处理、计算差序列、计算关联系数、关联度和贡献率计算等^[30-31]。

4.1 参数的选取与无量纲化处理

1)评价参数选取。设 $X_0=[X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)]$ 为主序列, $X_i=[X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)]$; $i=1, 2, 3, \dots, m$ 为子序列。其中: n 为样本容量; i 为第 i 个关联因素。

根据前面的试验结果,将单轴抗压强度、弹性模量、孔隙率、波速和峰值损伤设为主序列,温度和灰砂比设为子序列,共25组数据,因此 $n=25$; $i=1, 2$, 各

参数数据如表2所列。

2)参数无量纲化处理。由于各评价指标参数物理意义不完全相同,各参数量纲也不尽相同,为了消除量纲和量纲单位不同所带来的不可公度性,决策之前首先应将评价指标进行无量纲化处理^[30]。无量纲化方法有初值法、均值法、区间值法等,本文采用均值法,其公式为:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k)}{\bar{X}_i}; \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i(k) \quad (4)$$

式(4)中: $X_i(k)$ 为第 k 次试验第 i 个关联因素变量值; \bar{X}_i 为均值; $X_i^*(k)$ 为处理后的参数值; $i=1, 2$; $k=1, 2, 3, \dots, 25$ 。

采用式(4)对表2的数据进行无量纲化处理,其中温度和灰砂比为输入量 x , 温度为 x_1 , 灰砂比为 x_2 , 强度、弹性模量、孔隙率、波速和峰值损伤为输出量 y , 分别用 y_1, y_2, y_3, y_4 和 y_5 表示,处理后的结果见表3所列。

4.2 贡献率的计算

1)计算差序列。根据无量纲处理后的结果,计算出每个关联因素序列与特征变量序列之间的差序列 $(\Delta_{oi}(k))$, 及两极最小差 (a) 与最大差 (A) , 计算公式如式(5)一式(7):

$$\Delta_{oi}(k) = |X_0^*(k) - X_i^*(k)| \quad (5)$$

$$a = \min_i \min_k \Delta_{oi}(k) \quad (6)$$

表 2 充填体力学及损伤特性参数数据

Table 2 Data of mechanical and damage characteristic parameters of backfill

| 序号 | 养护温度/°C | 灰砂质量比 | 抗压强度/MPa | 弹性模量/MPa | 波速/(m/s) | 孔隙率/% | 峰值损伤 |
|----|---------|-------|----------|-----------|----------|-------|-------|
| 1 | 20 | 0.250 | 1.727 | 301.670 | 2 210 | 42.94 | 0.126 |
| 2 | 20 | 0.167 | 0.842 | 147.620 | 1 732 | 44.85 | 0.269 |
| 3 | 20 | 0.125 | 0.695 | 143.100 | 1 668 | 45.03 | 0.356 |
| 4 | 20 | 0.100 | 0.496 | 127.190 | 1 637 | 45.36 | 0.400 |
| 5 | 20 | 0.083 | 0.369 | 114.910 | 1 599 | 45.43 | 0.432 |
| 6 | 35 | 0.250 | 3.401 | 678.360 | 2 598 | 36.53 | 0.258 |
| 7 | 35 | 0.167 | 1.553 | 313.340 | 2 133 | 43.58 | 0.312 |
| 8 | 35 | 0.125 | 1.278 | 285.800 | 2 015 | 43.87 | 0.363 |
| 9 | 35 | 0.100 | 1.077 | 244.480 | 1 856 | 44.56 | 0.407 |
| 10 | 35 | 0.083 | 0.809 | 232.120 | 1 716 | 44.97 | 0.508 |
| 11 | 40 | 0.250 | 4.294 | 1 024.470 | 2 644 | 34.02 | 0.286 |
| 12 | 40 | 0.167 | 2.474 | 560.440 | 2 420 | 39.23 | 0.344 |
| 13 | 40 | 0.125 | 1.810 | 500.090 | 2 231 | 42.45 | 0.427 |
| 14 | 40 | 0.100 | 1.325 | 325.380 | 2 089 | 43.79 | 0.433 |
| 15 | 40 | 0.083 | 1.102 | 270.260 | 1 889 | 44.42 | 0.518 |
| 16 | 45 | 0.250 | 4.853 | 1 217.940 | 2 728 | 32.45 | 0.314 |
| 17 | 45 | 0.167 | 2.808 | 750.500 | 2 459 | 38.08 | 0.372 |
| 18 | 45 | 0.125 | 1.867 | 522.400 | 2 261 | 42.29 | 0.452 |
| 19 | 45 | 0.100 | 1.695 | 471.530 | 2 156 | 43.35 | 0.453 |
| 20 | 45 | 0.083 | 1.224 | 295.260 | 1 964 | 44.03 | 0.522 |
| 21 | 50 | 0.250 | 3.663 | 709.070 | 2 507 | 36.01 | 0.079 |
| 22 | 50 | 0.167 | 2.009 | 525.820 | 2 356 | 40.98 | 0.315 |
| 23 | 50 | 0.125 | 1.746 | 485.550 | 2 225 | 42.63 | 0.405 |
| 24 | 50 | 0.100 | 1.110 | 292.330 | 1 931 | 44.25 | 0.439 |
| 25 | 50 | 0.083 | 1.029 | 276.400 | 1 793 | 44.77 | 0.511 |

表3 无量纲化处理结果

Table 3 Dimensionless processing results

| 序号 | x_1 | x_2 | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.526 | 1.724 | 0.954 | 0.697 | 1.046 | 1.023 | 0.339 |
| 2 | 0.526 | 1.149 | 0.465 | 0.341 | 0.820 | 1.068 | 0.693 |
| 3 | 0.526 | 0.862 | 0.384 | 0.330 | 0.789 | 1.072 | 0.918 |
| 4 | 0.526 | 0.690 | 0.274 | 0.293 | 0.775 | 1.080 | 1.031 |
| 5 | 0.526 | 0.575 | 0.204 | 0.265 | 0.757 | 1.082 | 1.113 |
| 6 | 0.921 | 1.724 | 1.879 | 1.565 | 1.230 | 0.870 | 0.664 |
| 7 | 0.921 | 1.149 | 0.858 | 0.723 | 1.009 | 1.038 | 0.797 |
| 8 | 0.921 | 0.862 | 0.706 | 0.659 | 0.954 | 1.045 | 0.937 |
| 9 | 0.921 | 0.690 | 0.595 | 0.564 | 0.878 | 1.061 | 1.048 |
| 10 | 0.921 | 0.575 | 0.447 | 0.535 | 0.812 | 1.071 | 1.308 |
| 11 | 1.053 | 1.724 | 2.372 | 2.363 | 1.251 | 0.810 | 0.738 |
| 12 | 1.053 | 1.149 | 1.367 | 1.293 | 1.145 | 0.934 | 0.887 |
| 13 | 1.053 | 0.862 | 1.000 | 1.154 | 1.056 | 1.011 | 1.102 |
| 14 | 1.053 | 0.690 | 0.732 | 0.751 | 0.989 | 1.043 | 1.116 |
| 15 | 1.053 | 0.575 | 0.609 | 0.623 | 0.894 | 1.058 | 1.336 |
| 16 | 1.184 | 1.724 | 2.681 | 2.810 | 1.291 | 0.773 | 0.810 |
| 17 | 1.184 | 1.149 | 1.551 | 1.731 | 1.164 | 0.907 | 0.959 |
| 18 | 1.184 | 0.862 | 1.031 | 1.205 | 1.070 | 1.007 | 1.166 |
| 19 | 1.184 | 0.690 | 0.936 | 1.088 | 1.020 | 1.032 | 1.168 |
| 20 | 1.184 | 0.575 | 0.676 | 0.681 | 0.929 | 1.049 | 1.345 |
| 21 | 1.316 | 1.724 | 2.024 | 1.636 | 1.186 | 0.858 | 0.204 |
| 22 | 1.316 | 1.149 | 1.110 | 1.213 | 1.115 | 0.976 | 0.811 |
| 23 | 1.316 | 0.862 | 0.965 | 1.120 | 1.053 | 1.015 | 1.045 |
| 24 | 1.316 | 0.690 | 0.613 | 0.674 | 0.914 | 1.054 | 1.132 |
| 25 | 1.316 | 0.575 | 0.569 | 0.638 | 0.849 | 1.066 | 1.316 |

$$A = \max_i \max_k \Delta_{0i}(k) \quad (7)$$

2) 计算关联系数($\gamma_{0i}(k)$):

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{a + \delta A}{\Delta_{0i}(k) + \delta A} \quad (8)$$

式(5)一式(8)中: $\gamma_{0i}(k)$ 为每个关联因素与特征变量的

关联系数; δ 为分辨系数,在0~1之间取值,一般取0.5。

3) 计算关联度(R_i):

$$R_i = \frac{1}{25} \sum_{k=1}^{25} \gamma_{0i}(k) \quad (9)$$

式(9)中: R_i 为第*i*个因素 X_i 与特征变量 X_0 的灰色关

联度,其数值越大,表示 X_i 对 X_0 的影响越大。

4) 计算贡献率(C_i):

$$C_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^2 R_i} \quad (10)$$

式(10)中: C_i 为第*i*个因素的贡献率,即第*i*个因素对充填体该特征变量贡献大小所占的比例。

4.3 灰色关联计算结果分析

各贡献率的计算结果如表4所列,其中 C_1 为温

度对特征变量的贡献率, C_2 为灰砂比对特征变量的贡献率。对比分析温度与灰砂比对充填体单轴抗压强度、弹性模量、波速、孔隙率和峰值损伤的贡献率,结果表明,温度与灰砂比对充填体弹性模量的贡献较为接近,灰砂比对充填体抗压强度的贡献大于温度,温度对充填体波速、孔隙率和峰值损伤的贡献大于灰砂比,表明灰砂比对充填体的力学性质影响更大,温度对充填体的密实度、孔结构和损伤影响更大。

表4 各影响因素贡献率结果

Table 4 Contribution rate of each influencing factor

| 抗压强度 | | 弹性模量 | | 波速 | | 孔隙率 | | 峰值损伤 | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C_1 | C_2 | C_1 | C_2 | C_1 | C_2 | C_1 | C_2 | C_1 | C_2 |
| 0.468 | 0.532 | 0.486 | 0.514 | 0.523 | 0.477 | 0.542 | 0.458 | 0.556 | 0.444 |

5 结 论

1) 单轴压缩下尾砂胶结充填体的抗压强度和弹性模量均随着温度的升高呈先增大后减小的趋势,随着灰砂比的增大而逐渐增大,并在温度为 45 °C、灰砂比 1:4 时达到最大值,分别为 4.853、1 217.94 MPa。波速和孔隙率的分析结果与抗压强度和弹性模量随温度和灰砂比的变化规律具有一致性。

2) 在灰砂比一定的条件下,基于应变等价原理建立了尾砂胶结充填体的损伤演化方程和本构模型,通过与试验曲线的比较验证了模型的可靠性;充填体的损伤演化分为 4 个阶段:无损伤、初始损伤形成、损伤加速增长和损伤稳定发展;随着温度的升高,峰值损伤先增大后减小,损伤增长率峰值应力前先增大后减小,峰值应力后先减小后增大。

3) 采用灰色关联分析方法,计算温度和灰砂比对充填体抗压强度、弹性模量、波速、孔隙率和峰值损伤的贡献率,其结果分别为 0.468、0.486、0.523、0.542、0.556 及 0.532、0.514、0.477、0.458、0.444,可知温度对抗压强度和弹性模量的贡献率小于灰砂比,对波速、孔隙率和峰值损伤的贡献率大于灰砂比。

参考文献:

[1] 张吉雄,张强,周楠,等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报,2022,47(12):4167-4181.
 [2] 郭利杰,刘光生,马青海,等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. 煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.

[3] 柯愈贤,曾杰,胡凯建,等. 渗透水压作用下全尾砂胶结充填体的三轴力学特性及演变机制[J]. 有色金属科学与工程,2024,15(3):422-431.
 [4] 廖宝泉,柯愈贤,方立发,等. 膏体充填开采覆岩移动变形规律研究[J]. 有色金属科学与工程,2022,13(3):99-105.
 [5] ZHAO K, YANG J, YU X, et al. Damage evolution process of fiber-reinforced backfill based on acoustic emission three-dimensional localization[J]. Composite Structures, 2023, 309: 116723.
 [6] 陈启渐,吴锐. 综采面条带式充填开采覆岩运移规律及稳定性控制[J]. 江西冶金,2024,44(5):320-326.
 [7] 徐文彬,万昌兵,田喜春. 温度裂隙对充填体强度耦合效应及裂纹扩展模式[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(3):612-619.
 [8] 金爱兵,王杰,陈帅军,等. 基于不同粒径分布尾砂的充填体强度及损伤特性研究[J]. 岩土力学,2022,43(11):3083-3093.
 [9] 李凯兵. 温度影响下尾砂胶结充填体单轴压缩的力学及声发射特性研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
 [10] LIU W Z, CHEN J T, GUO Z P, et al. Mechanical properties and damage evolution of cemented coal gangue-fly ash backfill under uniaxial compression: effects of different curing temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 305: 124820.
 [11] 王勇,吴爱祥,王洪江,等. 初始温度条件下全尾胶结膏体损伤本构模型[J]. 工程科学学报,2017,39(1):31-38.
 [12] 侯永强,尹升华,曹永,等. 尾砂胶结充填体单轴受压应力—应变关系及其损伤本构模型[J]. 材料导报,2022,36(16):175-182.
 [13] HOU Y Q, YIN S H, CHEN X, et al. Study on

- characteristic stress and energy damage evolution mechanism of cemented tailings backfill under uniaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124333.
- [14] WANG J, ZHANG C, FU J X, et al. Effect of water saturation on mechanical characteristics and damage behavior of cemented paste backfill[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 6624-6639.
- [15] WANG M, HE X, YANG K. Mechanical properties and damage characteristics of coal-based solid waste paste filling materials with different moisture content[J]. *Sustainability*, 2023, 15(2): 1523.
- [16] 李召峰,张晨,张健,等. 不同水饱和度充填体力学性能及损伤机制研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 1063-1070.
- [17] 赵康,宋宇峰,于祥,等. 不同纤维作用下尾砂胶结充填体早期力学特性及损伤本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(2): 282-291.
- [18] LAI Y M, ZHAO K, YAN Y J, et al. Damage study of fiber-doped superfine tailings cemented backfill based on acoustic emission cumulative ringing count[J]. *Journal of Materials Science*, 2022, 57(25): 11612-11629.
- [19] YIN S H, HOU Y Q, CHEN X, et al. Mechanical behavior, failure pattern and damage evolution of fiber-reinforced cemented sulfur tailings backfill under uniaxial loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 332: 127248.
- [20] 赵永辉,冉洪宇,冯国瑞,等. 单轴压缩下不同高宽比矽石胶结充填体损伤演化及破坏特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 674-682.
- [21] 郭育霞,赵永辉,冯国瑞,等. 矽石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2434-2444.
- [22] WU A X, WANG Y, ZHOU B, et al. Effect of initial backfill temperature on the deformation behavior of early age cemented paste backfill that contains sodium silicate[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016: 1-10.
- [23] PANG X Y, SUN L J, CHEN M, et al. Influence of curing temperature on the hydration and strength development of Class G Portland cement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 156: 106776.
- [24] 周平锋,王伟. 不同养护温度下尾砂胶结充填体抗压强度及破坏形态的试验研究[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(8): 167-176.
- [25] ZHANG Y, GAN D, XUE Z, et al. Influence of mass concentration, cement-to-tailings ratio, and stirring duration on the strength of CPB considering pore characteristics[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(4): 4373-4382.
- [26] LI J L, LIU H W, AI K M, et al. An NMR-based experimental study on the pore structure of the hydration process of mine filling slurry[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018: 1-12.
- [27] JEAN L. How to use damage mechanics[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233-245.
- [28] 赵康,朱胜唐,周科平,等. 钼铌矿尾砂胶结充填体力学特性及损伤规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(2): 413-419.
- [29] 陈顺满. 压力-温度效应下膏体充填体力学特性及响应机制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [30] 汪恩良,任志凤,王储,等. 基于灰色关联分析模拟月壤抗压强度性能试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2024, 54(7): 2015-2025.
- [31] 张修香,乔登攀,李广涛,等. 基于RSM和CFD的废石-尾砂充填料浆流变及输送特性研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(1): 30-39.

(责任编辑:赵中波)