

不同加载速率下胶结充填体损伤特性与 能量耗散特征分析

侯永强^{1,2}, 尹升华^{1,2†}, 曹永^{1,2}, 戴超群^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 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)

摘要:针对矿体回采所导致的充填体破坏可近似看作不同加载速率下的加载过程,在实验室开展了 5 种加载速率下的胶结充填体单轴压缩试验,在得到充填体应力-应变曲线的基础上,根据能量耗散原理及损伤力学,计算了不同加载速率下的充填体能耗值并构建了相应的损伤演化方程,研究了不同加载速率下胶结充填体的能量耗散与轴向压缩时间、应变间的内在关系,探讨了胶结充填体受压破坏的能量损伤演化过程. 研究表明,不同于高强度的岩石,胶结充填体存在临界加载速率现象,当加载速率超过临界值后,充填体强度随加载速率增加而降低;充填体的峰前能耗量、峰后能耗量、单位体积应变能及总能耗量与加载速率呈二次函数曲线关系;充填体的总能耗量随轴向压缩时间、轴向应变的增大呈现 Logistic 函数形式增长规律,但加载速率的不同使得能耗值增长速率及充填体达到相同轴向变形所需能耗量存在明显差异;不同加载速率下充填体的压缩破坏均属同一类损伤过程,充填体受压破坏的能量损伤演化过程可划分为初始损伤、损伤稳定发展、损伤加速及损伤破坏 4 个阶段.

关键词:充填体;加载速率;应变能;损伤特性;能耗特征

中图分类号:TD853

文献标志码:A

Research on Damage and Energy Dissipation Characteristics of Cemented Backfill under Different Loading Rates

HOU Yongqiang^{1,2}, YIN Shenghua^{1,2†}, CAO Yong^{1,2}, DAI Chaoqun^{1,2}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: As the destruction of the backfill caused by the mining of the ore body can be regarded as a loading process at different loading rates, a uniaxial compression test of cemented filling bodies under five loading rates was carried out in the laboratory. Based on the stress-strain curve of the filling body, according to the principle of energy dissipation and damage mechanics, the energy consumption value of the backfill at different loading rates was calcu

* 收稿日期:2019-11-18

基金项目:国家优秀青年科学基金资助项目(51722401), National Science Foundation for Excellent Young Scholars of China(51722401); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(51734001), Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China(51734001); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(FRT-TP-18-003C1), Fundamental Research Funds for the Central Universities(FRT-TP-18-003C1)

作者简介:侯永强(1992—),男,江西抚州人,北京科技大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail:ustxsh@163.com

lated and the corresponding damage evolution equation was constructed. Therefore, the internal relationship between the energy dissipation of cemented filling and the axial compression time and strain at different loading rates was studied, and the evolution process of energy damage for the cemented filling body under compression was discussed. The results show that unlike high-strength rocks, there is a critical loading rate for cemented backfill. When the loading rate exceeds the critical value, the backfill strength decreases with the increase of loading rate. The pre-peak energy consumption, post-peak energy consumption, strain energy per unit volume, and total energy consumption of the filling body have a quadratic function curve relationship with the loading rate. The total energy consumption of cemented backfill increases with the increase of axial compression time and axial strain in the form of a logistic function. However, the difference in loading rate makes the increase rate of energy consumption value, and the energy consumption of the backfill under the same axial deformation has obvious differences. The compression failure of backfill under different loading rates exhibits the same kind of damage process. The energy damage evolution process of the backfill under uniaxial loading can be divided into four stages: initial damage, stable development of damage, acceleration of damage and damage failure.

Key words: backfill; loading rate; strain energy; damage characteristics; energy consumption characteristics

充填体通常由骨料、胶凝材料与水按照一定的比例混合制成,其强度及力学特性受颗粒级配、充填材料、胶结剂类型、养护龄期等因素的影响^[1-3]。近年来,矿山科技工作者对充填体强度及力学性能开展了诸多研究,李茂辉等^[4]研究了粉煤灰复合胶凝材料充填体强度与水化机理;贺桂成等^[5]对废石胶结充填体强度及其应用展开了研究,得出了控制废石胶结充填体强度的关键因素;徐文彬等^[6]借助 XRD 能谱分析和电镜扫描(SEM)方法,得到不同条件下的超细全尾砂材料胶凝成岩的微观规律;王有团等^[7]研究了铜尾渣粉作为胶凝材料对充填体强度的影响规律,并优化出最佳的添加量;杨志强等^[8]研究了全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度,分析了棒磨砂作为粗骨料替代部分全尾砂后充填体强度的变化规律;姜关照等^[9]研究了含硫量对充填体强度的影响,并揭示了影响机理。由上述研究结果可知,目前对充填体强度的研究主要集中在胶凝材料及充填材料组成等方面,关于加载速率的改变对充填体强度及力学性能的影响则鲜有报道。

大量研究结果表明,加载速率的改变能够对材料的力学特性产生显著的影响,如肖诗云等^[10]对钢筋混凝土梁进行了不同加载速率下的力学性能试验,结果表明随着加载速率的增大,钢筋混凝土梁的开裂极限、破坏载荷、极限位移和位移延性系数明显增大,耗能也显著增加;王海龙等^[11]研究了不同加载速率下干燥与饱和状态的混凝土的劈拉强度变化情

况,结果表明随着加载速率的增大,饱和混凝土的动态劈拉强度有较大的提高;汪劲丰等^[12]研究了 CA 砂浆在不同加载速率下的抗压性能,发现 CA 砂浆的抗压性能和弹性模量随加载速率的增大而增大。上述研究验证了加载速率对材料的力学特性具有显著的影响,但大部分的研究成果多集中在混凝土等高强度的介质材料,对于强度较低的胶结充填体研究较少。

在生产实际中充填体并不存在严格意义上的加载,充填体发生变形的诱因主要来自卸载,即充填体由稳定的三向应力状态转变为失去某方向束缚的状态,卸载之后充填体的变形将进一步发展,其特征相当于实验室条件下的加载,因此,室内试验所研究的加载速率在现场条件下可反映为卸载速率^[13],如矿体回采速度等。以二步骤嗣后充填开采为例,一步骤采场充填体受力状态可近似为三向应力状态,当对相邻的二步骤矿体进行回采时,充填体处于卸载状态,因此二步骤矿体回采所导致的充填体破坏可近似看作为不同加载速率下的加载过程。通过室内试验确定出合理的加载速率,进而换算出相应的矿体回采速度,对井下安全生产具有一定的指导意义。

目前公开发表的文献资料中仅有李雅阁等^[14]研究了加载速率对充填体力学参数及破坏模式的影响规律及甘德清等^[15]研究了加载速率对充填体强度特性的影响规律,文献[14-15]虽然开展了不同加载速率下充填体力学性能的试验研究,但是研究重点仅集中在充填体宏观强度及破坏模式上,关于加载速

率的改变对全尾砂胶结充填体损伤破坏及能耗特征的影响则并未涉及。

本文通过开展不同加载速率下全尾砂胶结充填体单轴压缩试验,揭示了不同加载速率下,全尾砂胶结充填体能量耗散与时间、应变及损伤破坏间的内在关系,从能量观点阐述不同加载速率下尾砂胶结充填体变形破坏规律,并揭示了尾砂胶结充填体受压破坏的能量损伤演化过程.研究结果对探讨尾砂胶结充填体的破坏机制及保证安全生产提供参考依据。

1 试验设计与准备

1.1 试验材料

试验所用的材料为某矿山全尾砂,PC.32.5R 硅酸盐水泥及自然水.全尾砂进行烘干处理后,采用欧美克 TopSizer 激光粒度分析仪测定尾砂粒径分布,测试结果如图 1 所示.采用 X 射线荧光光谱分析仪(XRF)进行化学组成分析.经检测分析可知,全尾砂的主要化学物质为 SiO_2 及 MgO ,其活性也较低,可用作惰性充填材料.具体成分如表 1 所示。

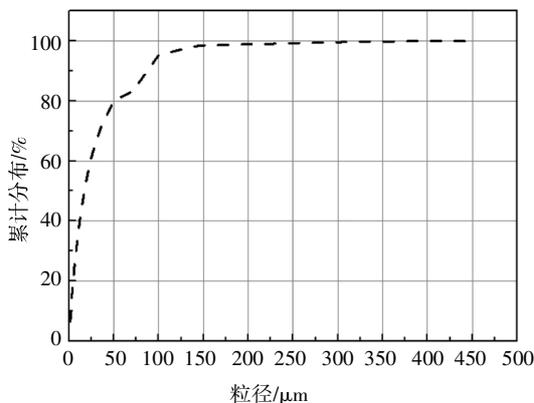


图 1 尾砂粒径分布

Fig.1 Tailings particle size distribution

表 1 全尾砂主要化学组成(质量分数)

Tab.1 Main chemical composition of full tailings(mass fraction) %

SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3
42.20	3.73	32.71	4.04	12.14
SO_3	K_2O	TiO_2	MnO	其他
3.37	0.39	0.33	0	0.85

通过试验所测得的数据可分析得到尾砂粒径累积分布结果为 $d_{60} = 26.51 \mu\text{m}$, $d_{50} = 18.41 \mu\text{m}$, $d_{30} = 8.82 \mu\text{m}$, $d_{10} = 2.03 \mu\text{m}$. 其中尾砂的不均匀系数为 C_u

$= 13.25$, 曲率系数 $C_c = 1.47$, 可以看出试验尾砂级配良好。

1.2 试样制作

试样的制作均按照 JGJ 55—2011 《普通混凝土配合比设计规程》正式版的要求所制作^[6],采用直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱形模具制作试样.首先将矿山尾砂、硅酸盐水泥、自然水按照灰砂比(水泥与尾砂质量比)1:8、质量分数为 72%进行配制,将材料搅拌均匀后,按照顺序将每勺充填料浆快速均匀地浇入圆柱形模具中,待料浆初凝后将试模表面抹平,24 h 后脱模将试块放入标准养护箱内进行养护(养护温度和湿度分别调节到 20 °C 和 93%).养护龄期达到 28 d 后对每个试块称重,精确到 0.1 g,随后作为试样进行单轴压缩试验.试验配制的部分试样如图 2 所示。



图 2 部分充填体试件

Fig.2 A part of backfilling specimen

2 试验方法与设备

2.1 试验设备

试验采用 RMT-150C 岩石力学试验系统进行充填体单轴压缩试验. RMT-150C 垂直液压缸最大出力分为 1 000 kN 及 100 kN 两级,精度 3‰ F.S.(系统).由于充填体强度远低于岩石及混凝土强度,压力机垂直液压缸的垂直出力选择 100 kN 级别,试验误差仅为 0.3 kN,其试验系统精度与误差在充填体单轴抗压强度试验中是可行的,设备如图 3 所示.试验加载采用位移控制模式,参考甘德清等^[15]在加载速率为 0.01 ~0.05 mm/s 下对质量分数为 75%,灰砂质量比分别为 1:4、1:6 及 1:8 的充填体抗压强度试验得出的临界加载速率为 0.04 ~0.05 mm/s 及安徽某铁矿山二步骤矿体 5~10 m/d 的回采速度,本次试验的加载速率细分为 5 个梯度,分别为 0.005 mm/s、0.02 mm/s、0.05 mm/s、0.1 mm/s、0.2 mm/s. 每级加载

速率下测试 3 个试样, 对于试验结果偏离度大于 20% 及以上的试样进行剔除, 并增补试样进行测试, 取 3 个试样的平均值作为试验数据.



图 3 RMT-150C 压力机

Fig.3 RMT-150C press

2.2 能量耗散原理

考虑一个充填体单元在受到外力作用下产生的变形, 假设在此物理过程中与外界没有热交换, 根据热力学第一定律有如下关系^[7]:

$$U = U^e + U^d \quad (1)$$

式中: U 为外力所做的总功; U^d 为单元耗散能, 用于形成充填体单元内部损伤和塑性变形; U^e 为单元可释放的弹性应变能. U^e 表达式为^[17]:

$$U^e = \frac{1}{2E_u} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\bar{\mu}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (2)$$

式中: E_u 及 $\bar{\mu}$ 分别为试件的卸载弹性模量与卸载泊松比. 图 4 为充填体单元应力-应变曲线, 面积 U^d 表示耗散能, 阴影面积 U^e 表示单元中储存的可释放弹性应变能, E_u 为卸载弹性模量. 试验采用初始弹性模量 E_0 替代卸载弹性模量 E_u 进行计算, 对于采用初始弹性模量替代卸载弹性模量进行计算的可行性论证, 可参考文献[18].

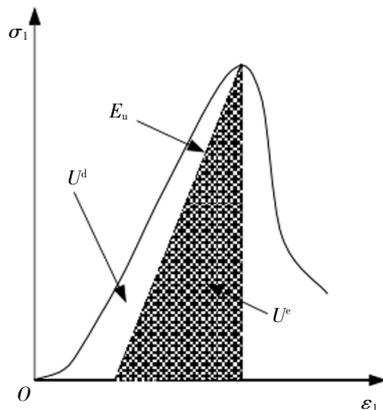


图 4 单位体积中的能量耗散和可释放应变能的量值关系

Fig.4 Quantitative relationship of energy release and releasable strain energy

在单轴压缩过程中仅轴向应力做功, 故单位体积充填体各部分应变能可表示为:

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 \quad (3)$$

$$U^e = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon^e = \frac{1}{2E_u} \sigma_1^2 \quad (4)$$

计算时采用初始弹性模量 E_0 进行替代, 则式(4)可改写为:

$$U^e \approx \frac{1}{2E_0} \sigma_1^2 \quad (5)$$

根据上述各部分能量计算公式, 可计算出各级加载速率下充填体能量变化值.

3 试验结果分析

3.1 充填体应力-应变形态及峰值强度特征

图 5 为各级加载速率下的充填体单轴压缩应力-应变曲线. 通过观察图 5 中应力-应变曲线可知, 不同加载速率下充填体单轴压缩破坏过程主要经历了孔隙、裂隙压密阶段、线弹性变形阶段、破裂发展阶段及峰后破裂阶段, 但加载速率不同, 充填体的应力-应变曲线具有一定的差异性.

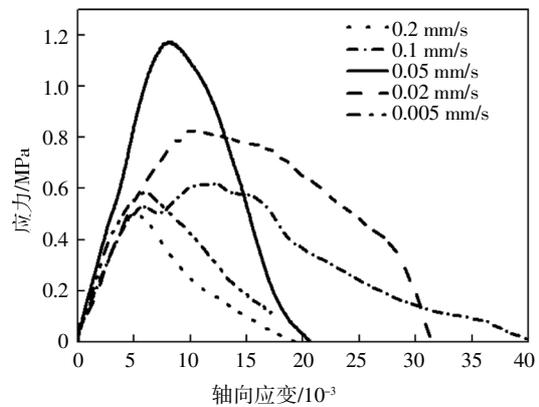


图 5 不同加载速率下充填体应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of backfill with different loading rate

加载速率对充填体应力-应变曲线的影响直观体现在线弹性变形阶段曲线上, 当加载速率为 0.005~0.05 mm/s 时, 随着加载速率的增大, 充填体的线弹性变形阶段能够延伸到更高的水平, 此时峰值应力与加载速率呈正相关关系; 而当加载速率为 0.05~0.2 mm/s 时, 随着加载速率的增大, 充填体的线弹性变形阶段延伸水平呈降低的趋势, 此时峰值应力呈逐渐减小的趋势. 由峰值应力变化规律可知, 不同于硬脆性岩石, 低强度的胶结充填体存在临界加载速率现象.

甘德清等^[15]通过试验得出灰砂质量比为1:8~1:4,质量分数为75%的尾砂胶结充填体临界加载速率为2.4 mm/min左右,且灰砂质量比为1:8时,充填体试块强度增幅为14%,随着加载速率增加,强度的减幅为20%。由图5可知,充填体试块的抗压强度随加载速率的增加呈先增加后减小的趋势,将其强度变化转折点所对应的加载速率临界值称为临界加载速率。对于质量分数为72%,灰砂质量比为1:8的充填体试块,其临界加载速率为0.05 mm/s左右;当加载速率低于0.05 mm/s时,充填体试块强度与加载速率正线性相关;当加载速率高于0.05 mm/s时,试块强度随着加载速率的增加而减小。随着加载速率的增加,充填体试块抗压强度由最初的0.584 MPa增加至1.173 MPa,强度增幅达到1.01倍,随着加载速率增加至0.2 mm/s,与最大值相比,抗压强度减幅达到了12%。与甘德清等的试验结果相比,本次试验配制的灰砂质量比为1:8,质量分数为72%的充填体也存在临界加载速率现象,进一步验证了低强度的尾砂胶结充填体存在临界加载速率的特性。

加载速率对充填体力学性能的影响机理可归结为以下两个方面:

1)从充填体内部微观结构上看,充填体属于人工复合材料,其内部存有大量的微裂纹、微孔隙等缺陷^[9]。当加载速率较低时,充填体内部的微裂隙等初始缺陷具有充足的时间演化发展,因而造成充填体强度较低,随着加载速率增大,充填体内部的微裂隙等初始缺陷发育受到限制,充填体损伤程度降低,因而其强度不断增加,这一现象与硬脆性岩石的变化规律相一致。然而,充填体与岩石相比,其强度相差几个数量级,自身承载能力十分有限,当加载速率超过临界值后,其内部更小的初始缺陷被激活,随着加载速率的进一步增大,缺陷处的应力集中水平将不断提高,导致充填体内部裂隙更易扩展贯通,因而其强度反而逐渐降低。

2)从能量角度看,不同加载速率下的尾砂胶结充填体单轴压缩破坏实质上是能量耗散与能量释放综合作用的结果^[9]。因此可从能量角度对充填体力学性能差异进行说明:①当加载速率处于临界加载速率范围内时,随着加载速率的增大,输入的能量也相应提高,该部分能量用于限制胶结充填体内部微裂隙的发育并使其密度增大,使得线弹性变形阶段能够延伸到更高的水平,从而提高充填体承载能力^[20]。

②继续提高加载速率,输入的能量进一步增大,充填体内部的裂隙发育时间进一步缩短,此时大部分能量以应变能的形式储存在实体承载结构中,当介质强度较高时(如天然岩石),实体承载结构储存较多应变能而不发生破坏,表现出随加载速率增加峰值应力表现出不断增加的趋势。然而对于介质强度较低的充填体,实体承载结构将会由于内部较多的应变能率先发生破断(随着加载速率增大,其破坏时间逐渐提前),造成有效承载面积的实质性减小,表现为胶结充填体线弹性变形阶段水平降低,从而降低了胶结充填体的承载能力^[13]。

3.2 不同加载速率下充填体试样的能量特征

通过上述能量耗散原理,可对全尾砂胶结充填体在单轴压缩应力-应变曲线不同阶段进行能量值计算,得出不同加载速率下尾砂胶结充填体单轴压缩能量值如表2所示。由表2可知,当胶结充填体加载速率为0.005 mm/s时,破坏所需的单位体积变形能为2.5 kJ/m³;当加载速率分别增加至0.02 mm/s、0.05 mm/s、0.1 mm/s、0.2 mm/s时,胶结充填体所需的单位体积变形能分别为6.6 kJ/m³、8.4 kJ/m³、6.8 kJ/m³、2.4 kJ/m³,可以看出随着加载速率的增大,充填体破坏所需的单位体积变形能呈先增加后减小的趋势;在临界加载速率范围内,加载速率与单位体积变形能间呈正相关关系,超过临界加载速率范围后,两者呈负相关。

表2 不同加载速率下充填体的能量分析

Tab.2 Energy analysis of cemented backfill at different loading rates

试样编号	$\lg(V)/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	峰前能耗量/J	峰后能耗量/J	破坏时单位体积变形能/(kJ·m ⁻³)	总能耗量/J
A	-2.3	1.96	16.54	2.5	18.50
B	-1.7	2.78	31.82	6.6	34.60
C	-1.3	2.80	44.08	8.4	46.88
D	-1.0	1.40	33.80	6.8	35.20
E	-0.7	0.20	15.50	2.4	15.70

当加载速率由0.005 mm/s增加至0.2 mm/s时,胶结充填体峰前能量占总能耗的比例分别为10.65%、8.03%、5.97%、4.10%、1.30%,说明在单轴压缩破坏过程中,随着加载速率的增加,绝大多数的能量消耗在胶结充填体峰后破裂阶段,使得胶结充填体峰后破坏变形更剧烈,这与试验现象相一致(加载速率越大,胶结充填体变形破坏越严重,甚至有掉块

现象). 本次试验中, 胶结充填体峰前能耗量与加载速率呈先增加后减小的趋势, 在临界加载速率范围内, 峰前能耗量随加载速率增加而增大, 说明越来越多的能量消耗在充填体的峰前变形阶段, 间接体现了加载速率增大提高了充填体的屈服强度, 而超过临界加载速率范围后, 由于输入的能量进一步增多, 实体承载结构由于内部较多的应变能率先发生破坏, 导致能耗量、单位体积变形能均降低.

结合表 2 中的试验数据可知, 全尾砂胶结充填体峰前能耗量、峰后能耗量、单位体积变形能及总能耗量随加载速率对数的增加呈先增加后减小的趋势, 由统计回归分析得到全尾砂胶结充填体峰前能耗量、峰后能耗量、单位体积变形能及总能耗量随加载速率对数的增长遵循二次函数 $Y=AX^2+BX+C$ 增长模式. 其中 X 为加载速率对数, A 、 B 及 C 均为为试验系数, Y 值为能耗值. 图 6 为胶结充填体能耗值与加载速率间的关系曲线.

3.3 不同加载速率下充填体试样的能耗变化特征

单轴压缩下充填体破坏是其内部能量变化与转化的过程^[2], 由图 5 的应力-应变曲线的形态大致可以看出, 不同加载速率下的充填体应力-应变曲线均可分为 4 个阶段进行描述(孔隙、裂隙压密阶段、线弹性变形阶段、破裂发展阶段及峰后破裂阶段), 因此加载速率的改变不会对充填体内部能量变化与转化过程造成影响. 本文分别以加载速率 0.005 mm/s、0.05 mm/s、0.2 mm/s 为例, 研究胶结充填体能耗值与轴向压缩时间、轴向应变间的关系. 图 7 反映了不同加载速率下, 尾砂胶结充填体总能耗值与受载时间的关系; 图 8 反映了尾砂胶结充填体试样在不同加载速率下的总能耗值与轴向应变间的关系.

由图 7 可知, 在轴向压缩初期, 充填体能耗值相对平缓, 能耗值增长不明显. 在胶结充填体达到峰后变形破坏阶段时, 随着加载速率的不断增大, 充填体能耗值达到极值的时间缩短. 分别以加载速率为 0.005 mm/s、0.05 mm/s、0.2 mm/s 为例, 胶结充填体能耗值达到极值的时间分别为 330 s、40 s、9 s, 说明随着加载速率的增大, 胶结充填体的能耗值增长更迅速. 在单轴压缩状态下, 能耗值使得充填体损伤强度丧失, 能耗值增长越迅速, 意味着充填体损伤强度丧失越迅速, 达到整体破坏阶段的时间越短. 不同加载速率下, 充填体能耗值与轴向压缩时间关系曲线变化规律基本类似, 其主要差异在加载速率越大, 能耗量达到极值的时间越短.

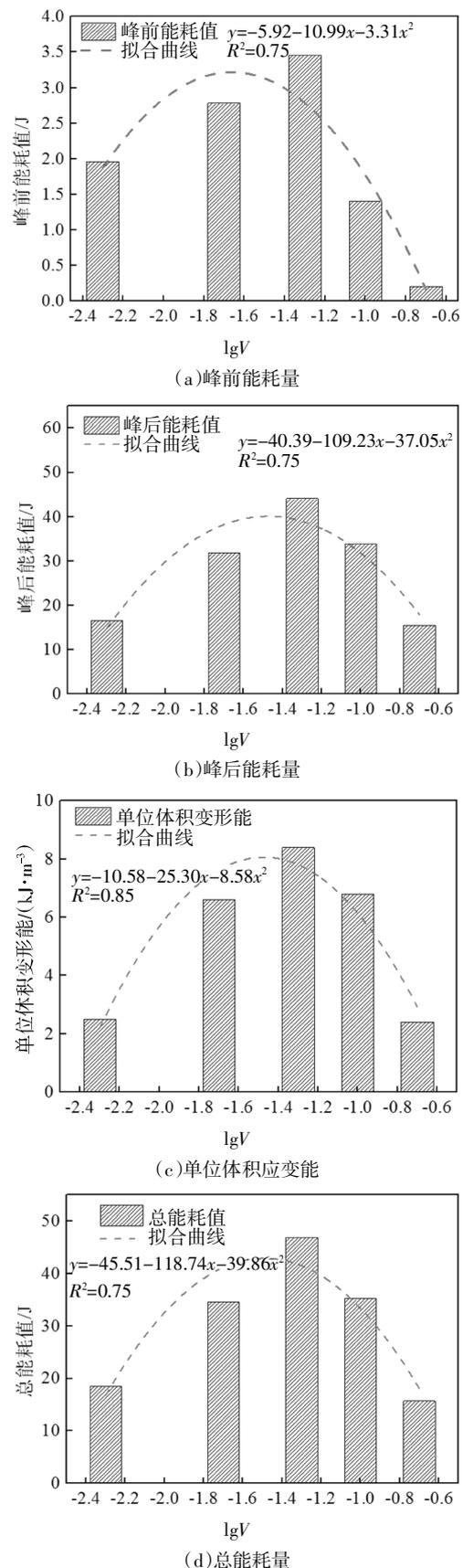
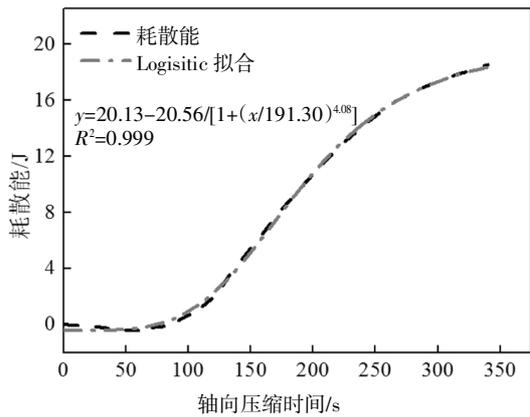


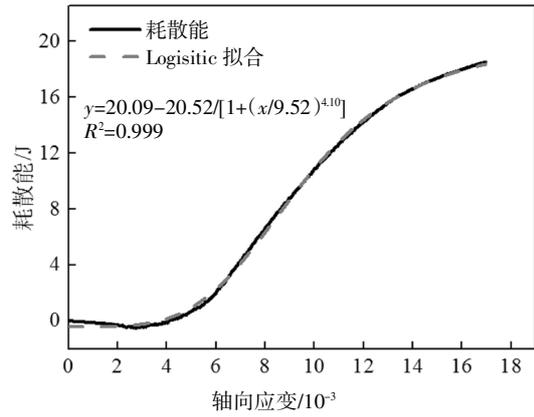
图 6 胶结充填体能耗值与加载速率间的关系曲线
Fig.6 Curve of energy consumption value and loading rate of cemented backfill

由图 8 可知,随着轴向应变的增加,胶结充填体能耗量呈不断增加的趋势.在加载初期,胶结充填体主要为压密、线弹性变形阶段,此时轴向应变均较小,能耗值也相对平缓;当充填体达到屈服、峰后变形破坏阶段时,胶结充填体能耗值随轴向应变增加均大幅度上升,说明当能耗值大幅度增加时,充填体开始发生破坏.随着加载速率增加,充填体峰前能耗量及峰后能耗量呈先增加后减小的趋势,这是因为临界加载速率内,加载速率对充填体强度及刚度具

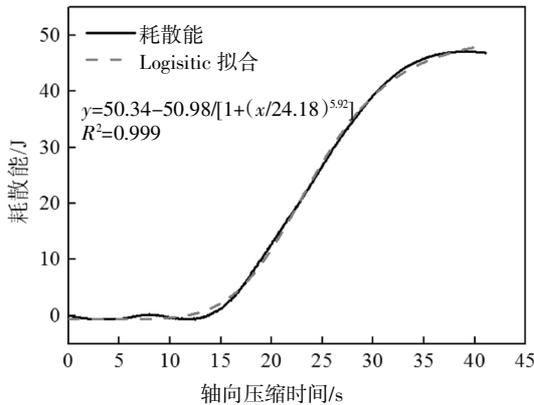
有明显的强化效应,使得胶结充填体具有较强的承载能力及抗变形能力,从而使得需要更多的能耗量才能导致充填体产生较大的轴向变形;而当加载速率超过临界加载速率后,加载速率增大削弱了充填体的承载能力,导致充填体达到相应轴向变形所需的能耗量可相应地降低.不同加载速率下,充填体能耗值与轴向压缩应变关系曲线变化规律基本类似,其主要差异在于达到相同的轴向变形所需的能耗量在数值上具有明显的差异.



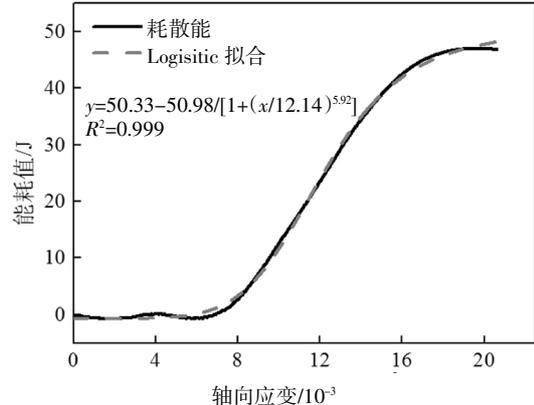
(a)0.005 mm/s 时耗散能与轴向压缩时间



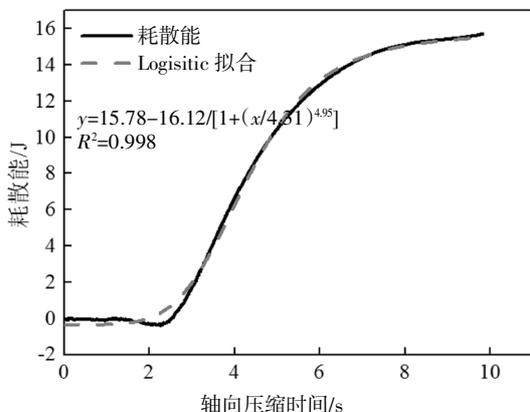
(a)0.005 mm/s 时耗散能与轴向应变



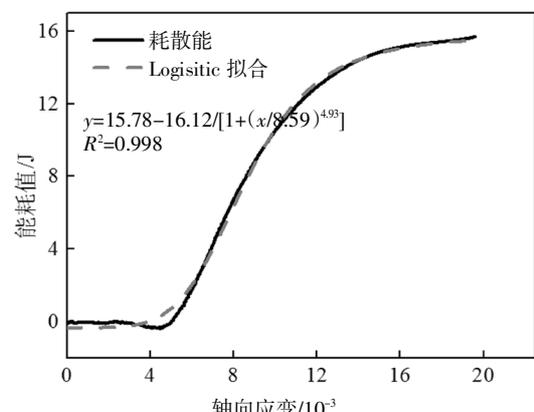
(b)0.05 mm/s 时耗散能与轴向压缩时间



(b)0.05mm/s 时耗散能与轴向应变



(c)0.2 mm/s 时耗散能与轴向压缩时间



(c)0.2 mm/s 时耗散能与轴向应变

图 7 充填体能耗值与轴向压缩时间的关系曲线

Fig.7 Relationship between filling energy consumption and axial compression time

图 8 充填体能耗值与应变的关系曲线

Fig.8 Relation curve between filling energy consumption and strain

结合图 7 和图 8 的拟合结果可知,胶结充填体能耗值与轴向压缩时间、轴向应变的增长总体上遵循 Logistic 模型 $Y=a+(b-a)/[1+(x/c)^p]$ 的增长模式,参数 $a、b、c、p$ 取决于加载速率等影响因素, x 为轴向压缩时间及应变,模型拟合相关系数均在 0.99 以上,表明拟合效果良好。

3.4 充填体破坏的能量损伤演化过程分析

结合之前的研究结果,在不同加载速率下,尾砂胶结充填体能耗值存在明显的差异,而胶结充填体的屈服破坏与损伤实质上是能量耗散的结果,因此本文进一步探究不同加载速率下胶结充填体损伤破坏机制,分析充填体能量耗散特征与损伤演化间的联系.依据目前的损伤力学理论,采用 Mazars 模型及 Lemaitre 应变等价原理建立不同加载速率下充填体峰值应力前后的损伤演化模型,文献[22]详细推导了胶结充填体峰值应力前后损伤演化方程,如式(6)及式(7)所示.因此,本文不再对该模型的推导过程进行介绍。

充填体在峰值应力 σ_p 之前, $\varepsilon \leq \varepsilon_p$, 充填体内部的裂纹小范围扩展,在这个阶段试件的损伤值 D 为:

$$D = A\varepsilon^\beta \tag{6}$$

式中: $A、\beta$ 均为常数。

结合 Mazars 模型对峰值应力后的损伤描述,当应力达到峰值时,试验已经产生损伤,充填体在峰值应力后的损伤值 D 可以表示为:

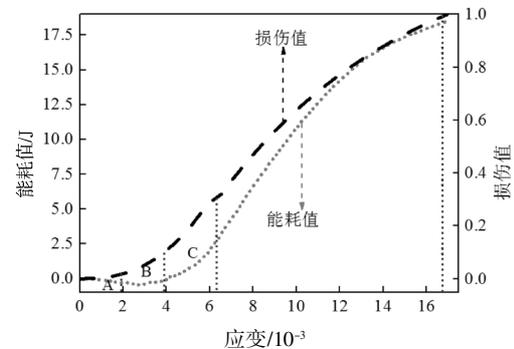
$$D = D_p + 1 - \exp[-B(\varepsilon - \varepsilon_p)] \tag{7}$$

式中: B 为常数; D_p 为充填体在峰值应力时的损伤值, $D_p = A\varepsilon_p^\beta$. $D = 0$ 时,对应材料处于无损状态; $D = 1$ 时,材料处于完全损伤状态(或破坏状态). 根据不同加载速率下充填体应力-应变曲线,可准确得到充填体损伤参数 $\beta、A、B、D_p$ 的值. 结合 4 个参数,可获得不同加载速率下充填体峰值应力前后的损伤演化方程,如表 3 所示。

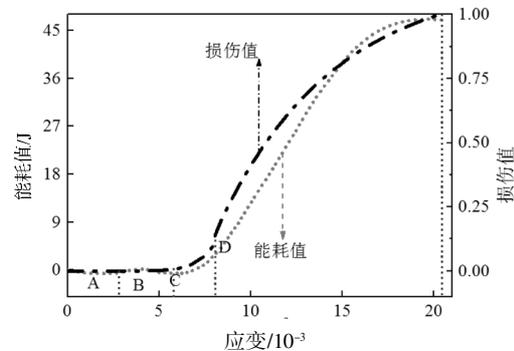
分别以加载速率为 0.005 mm/s、0.05 mm/s 及 0.2 mm/s 为例,绘制损伤值 D 与能耗值的关系曲线,如图 9 所示.由图 9 可知,不同加载速率下充填体的损伤演化曲线均可分为 4 个阶段,除了数值上有差别,其余均相似,说明不同加载速率下充填体的压缩破坏均为同一类的损伤过程. 充填体的损伤演化过程与充填体能耗值增长规律相一致,当能耗值达到极值时,充填体损伤值达到最大值 1. 根据充填体损伤值 D 、能耗值与轴向应变的增长规律,可将胶结充填体受压破坏的能量损伤演化过程划分为 4 个阶段:

表 3 充填体损伤演化方程

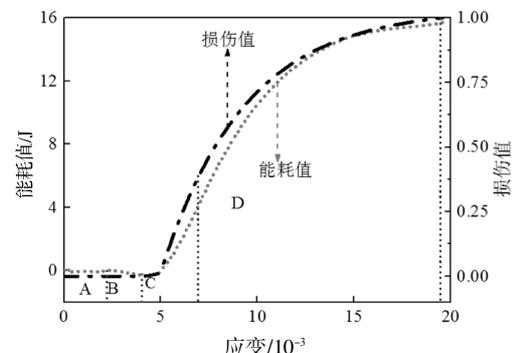
Tab.3 Damage evolution equation of the backfill	
加载速率/(mm·s ⁻¹)	峰值应力前 ($\sigma \leq \sigma_p$)
0.005	$D = 0.112 \times 10^6 \times \varepsilon^{2.517}$
0.02	$D = 1.049 \times 10^8 \times \varepsilon^{4.393}$
0.05	$D = 0.320 \times 10^{17} \times \varepsilon^{8.340}$
0.1	$D = 0.206 \times 10^3 \times \varepsilon^{1.364}$
0.2	$D = 0.197 \times 10^{63} \times \varepsilon^{2.78}$
加载速率/(mm·s ⁻¹)	峰值应力后 ($\sigma > \sigma_p$)
0.005	$D = 1.284 2 - \exp[-112.3(\varepsilon - 0.006)]$
0.02	$D = 1.204 2 - \exp[-77.0(\varepsilon - 0.010 4)]$
0.05	$D = 1.142 9 - \exp[-158.1(\varepsilon - 0.008)]$
0.1	$D = 1.432 6 - \exp[-28.04(\varepsilon - 0.121)]$
0.2	$D = 1.434 8 - \exp[-231.5(\varepsilon - 0.005)]$



(a) 加载速率为 0.005 mm/s



(b) 加载速率为 0.05 mm/s



(c) 加载速率为 0.2 mm/s

图 9 充填体损伤值 D 与能耗值关系曲线
Fig.9 Relationship between damage value D and dissipative energy of the backfill

1)初始损伤阶段(OA),应力-应变曲线的压密阶段.此时充填体的应力值、耗散能及弹性能均较小,充填体内部的微裂隙压密,对应的损伤变量几乎为0.

2)损伤稳定发展阶段(AB),应力-应变曲线的弹性变形阶段.在此阶段内充填体吸收的总应变能主要以弹性能的形式储存在充填体内.根据充填体的损伤演化曲线可知,随着加载的不断进行,充填体处于弹性变形阶段内仍产生了损伤且呈稳定增长的趋势.在充填体压密阶段及弹性变形阶段,耗散能出现小于0且曲线出现耗散能减小的情况,其原因在于计算充填体弹性应变能时采用初始弹性模量代替卸载模量进行各点弹性应变能的计算,从而导致耗散能有所偏差.

3)损伤加速阶段(BC),应力-应变曲线的塑性变形阶段.在此阶段内充填体的耗散能呈现出明显的增加趋势,此阶段内胶结充填体应变软化机制开始增强,损伤值 D 开始快速增长,该阶段内的损伤值为峰值应力点对应的损伤值达到 D_p .

4)损伤破坏阶段(CD),应力-应变曲线的破裂阶段.该阶段内充填体不再吸收应变能,能耗值快速增大使得充填体损伤加剧从而丧失强度.当能耗值达到极值时,此时损伤值达到最大值,充填体形成整体破坏.

4 结论

1)通过对全尾砂胶结充填进行不同加载速率下的单轴抗压强度试验,发现对于强度较弱的尾砂胶结充填体存在临界加载速率现象.当低于临界加载速率时,加载速率的增加对胶结充填体抗压强度具有明显的强化效应,反之则产生劣化效应,与硬脆性岩石具有明显的区别.

2)不同压缩阶段的尾砂胶结充填体能耗量与加载速率对数的增长规律基本相同,遵循二次函数 $Y = AX^2 + BX + C$,其中 X 为加载速率对数, Y 为各参量的能量指标(如峰前能耗量、峰后能耗量、总能耗量及单位体积变形能), A 、 B 、 C 均为试验系数.随着加载速率的不断增大,各参量的能量指标呈先增加后减小的趋势.

3)胶结充填体总能耗值与轴向压缩时间、轴向应变的增长总体上遵循 Logistic 模型.在加载初期阶段,充填体的能耗值随轴向压缩时间、应变的增加而增加但增速缓慢,当胶结充填体达到屈服破坏阶段

后,充填体试样的能耗值随轴向应变、轴向压缩时间的增加呈剧烈增加趋势.加载速率越大,能耗值达到极值的时间则越短,且达到相同轴向变形所需的能耗量随加载速率的增加呈先增加后减小的趋势.

4)不同加载速率下胶结充填体损伤破坏均为同一类过程,充填体的损伤值与充填体能耗值增长规律相一致.当能耗值达到极值时,充填体损伤值达到最大值1,此时充填体试样进入整体破坏阶段;根据充填体损伤值 D 、能耗值与轴向应变的增长规律,可将胶结充填体损伤破坏演化过程划分为4个阶段.

参考文献

- [1] 韩斌,王贤来,肖卫国.基于多元非线性回归的井下采场充填体强度预测及评价[J].采矿与安全工程学报,2012,29(5):714—718.
HAN B,WANG X L,XIAO W G. Estimation and evaluation of backfill strength in underground stope based on multivariate nonlinear regression analysis [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012,29(5):714—718. (In Chinese)
- [2] 吴浩,赵国彦,陈英.多目标条件下矿山充填材料配比优化实验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(11):101—108.
WU H,ZHAO G Y,CHEN Y. Multi-objective optimization for mix proportioning of mine filling materials [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017,49(11):101—108. (In Chinese)
- [3] 王新民,薛希龙,张钦礼,等.碎石和磷石膏联合胶结充填最佳配比及应用[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(10):3767—3773.
WANG X M,XUE X L,ZHANG Q L,et al. Optimum ratio and application of joint cemented backfill with crushed rock and phosphogypsum [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015,46(10):3767—3773. (In Chinese)
- [4] 李茂辉,杨志强,王有团,等.粉煤灰复合胶凝材料充填体强度与水化机理研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(4):650—655.
LI M H,YANG Z Q,WANG Y T,et al. Experimental study of compressive strength and mechanical property of filling body for fly ash composite cementitious materials [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015,44(4):650—655. (In Chinese)
- [5] 贺桂成,刘永,丁德馨,等.废石胶结充填体强度特性及其应用研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):74—79.
HE G C,LIU Y,DING D X,et al. Strength characteristic of cemented waste rock backfills and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013,30(1):74—79. (In Chinese)
- [6] 徐文彬,杜建华,宋卫东,等.超细全尾砂材料胶凝成岩机理试验[J].岩土力学,2013,34(8):2295—2302.
XU W B,DU J H,SONG W D,et al. 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. (In Chinese)

- [7] 王有团,杨志强,李茂辉,等. 金川铜尾渣粉对充填体强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(12):4391—4397.
WANG Y T, YANG Z Q, LI M H, *et al.* Effect of Jinchuan copper slag on filling body strength[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2015,46(12):4391—4397. (In Chinese)
- [8] 杨志强,高谦,王永前,等. 金川全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3985—3991.
YANG Z Q, GAO Q, WANG Y Q, *et al.* Research on filling body strength and rheological properties of mixed filling mortar with unclassified tailings and rod milling sand in Jinchuan mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(S2):3985—3991. (In Chinese)
- [9] 姜关照,吴爱祥,李红,等. 含硫尾砂充填体长期强度性能及其影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(6):1504—1510.
JIANG G Z, WU A X, LI H, *et al.* Long-term strength performance of sulfur tailings filling and its affecting factors [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(6):1504—1510. (In Chinese)
- [10] 肖诗云,曹闻博,潘浩浩. 不同加载速率下钢筋混凝土梁力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(12):142—146.
XIAO S Y, CAO W B, PAN H H. Experimental study on mechanical behavior of reinforced concrete beams at different loading rates[J]. Journal of Building Structures,2012,33(12):142—146. (In Chinese)
- [11] 王海龙,李庆斌. 不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验研究及强度变化机理[J]. 工程力学,2007,24(2):105—109.
WANG H L, LI Q B. Experimental study on tensile behavior and strength change mechanism of saturated concrete under different loading rates [J]. Engineering Mechanics,2007,24(2):105—109. (In Chinese)
- [12] 汪劲丰,陈一日,吴熙,等. 不同加载速率下 CA 砂浆的抗压性能试验[J]. 材料科学与工程学报,2015,33(4):479—483.
WANG J F, CHEN Y R, WU X, *et al.* Compressive behavior of CA mortar subject to different loading rates[J]. Journal of Materials Science and Engineering,2015,33(4):479—483. (In Chinese)
- [13] 李海涛,蒋春祥,姜耀东,等. 加载速率对煤样力学行为影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(3):430—436.
LI H T, JIANG C X, JIANG Y D, *et al.* Mechanical behavior and mechanism analysis of coal samples based on loading rate [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2015,44(3):430—436. (In Chinese)
- [14] 李雅阁,金龙哲,谭昊,等. 胶结充填体力学特性的加载速率效应试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):49—53.
LI Y G, JIN L Z, TAN H, *et al.* Experiment of loading rate effect on mechanical characteristics of cemented filling body [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2016,48(9):49—53. (In Chinese)
- [15] 甘德清,韩亮,刘志义. 加载速率对充填体强度特性影响的试验研究[J]. 金属矿山,2016(12):150—153.
GAN D Q, HAN L, LIU Z Y. Experimental study of the effect of loading rate on strength performance of filling body [J]. Metal Mine,2016(12):150—153. (In Chinese)
- [16] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:1—18.
JGJ 55—2011 Specification for mix proportion design of ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011:1—18. (In Chinese)
- [17] 彭瑞东,谢和平,鞠杨. 砂岩拉伸过程中的能量耗散与损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):2526—2531.
PENG R D, XIE H P, JU Y. Analysis of energy dissipation and damage evolution in sandstone stretching process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(12):2526—2531. (In Chinese)
- [18] 谢和平,鞠杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3003—3010.
XIE H P, JU Y, LI L Y. Rock strength and overall failure criterion based on energy dissipation and release principle [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(17):3003—3010. (In Chinese)
- [19] 吴疆宇,冯梅梅,郁邦永,等. 连续级配废石胶结充填体强度及变形特性试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(1):101—108.
WU J Y, FENG M M, YU B Y, *et al.* Experimental study of strength and deformation characteristics of cemented waste rock backfills with continuous gradation [J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(1):101—108. (In Chinese)
- [20] 徐文彬,宋卫东,王东旭,等. 三轴压缩条件下胶结充填体能量耗散特征分析[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(5):808—814.
XU W B, SONG W D, WANG D X, *et al.* Analysis of energy dissipation characteristics of cemented filling under triaxial compression [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2014,43(5):808—814. (In Chinese)
- [21] 邓代强,姚中亮,唐绍辉,等. 充填体单轴压缩韧性性能试验研究[J]. 矿业研究与开发,2005,25(5):30—32.
DENG D Q, YAO Z L, TANG S H, *et al.* An experimental study on the toughness properties of backfill under uniaxial compression [J]. Mining Research and Development,2005,25(5):30—32. (In Chinese)
- [22] 刘志祥,李夕兵,戴塔根,等. 尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析[J]. 岩土力学,2006,27(9):1442—1446.
LIU Z X, LI X B, DAI T G, *et al.* On damage model of cemented tailings backfill and its match with rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(9):1442—1446. (In Chinese)