

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.118



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



水-温循环作用下千枚岩的动态拉伸特性

王连华

(中铁二十三局集团有限公司, 中国成都 610072)

摘要:为研究水-温耦合作用下 0° 层理倾角千枚岩的动态拉伸特性变化规律,分别对3组试样进行0、1、3、5、7、8、11次温度循环自然降温、温度循环冷水降温、干湿循环后,采用霍普金森杆试验装置对 0° 层理倾角千枚岩试样开展动态巴西劈裂试验,从动态拉伸应变曲线、动态峰值抗拉强度、动态弹性模量、能量分析与宏观破坏5个角度研究水、温劣化条件下千枚岩的动态拉伸特性。结果表明:千枚岩应力应变曲线包括极速弹性变形阶段、屈服变形阶段、破坏变形阶段;随着水-温循环次数的增加,千枚岩应力-应变曲线极速弹性变形阶段逐渐缩短,屈服变形阶段的应变增长率不断增大;千枚岩动态峰值抗拉强度呈负指数函数关系变化,耗散能比不断减小;水-温耦合条件下,千枚岩峰值抗拉强度、耗散能比普遍小于温度循环自然降温时;动态冲击下,千枚岩发生贯穿层理的张拉破坏,主要破碎为2块;随着水-温循环次数的增加,千枚岩主碎块发生沿层理面的张拉与穿层理面的剪切复合破坏,千枚岩碎块的平均尺寸不断减小;温度循环冷水降温条件下,千枚岩碎块的平均尺寸更小,且降幅最为显著。

关键词:千枚岩;霍普金森杆试验;温度循环;干湿循环;动态拉伸

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)04-0109-11

Dynamic tensile characteristics of phyllite under water-temperature cycle conditions

WANG Lianhua

(China Railway 23RD Bureau Group Co., Ltd., Chengdu 610072, P. R. China)

Abstract: In order to study the variation pattern of dynamic tensile properties of phyllite under the coupling effect of water temperature, three groups of samples were subjected to 0, 1, 3, 5, 7, 8 and 11 times of temperature cycle natural cooling, temperature cycle cold water cooling and dry-wet cycle respectively. The dynamic Brazilian splitting test samples was carried out by Hopkinson bar test device. The dynamic tensile properties of phyllite under water and temperature deterioration were studied from five aspects: dynamic tensile strain curve, dynamic peak tensile strength, dynamic elastic modulus, energy analysis and macroscopic failure. It is found that the stress-strain curve includes extremely fast elastic deformation stage, yield deformation stage and failure stage. With the increase of the number of water temperature cycles, the extreme elastic deformation stage of stress-strain curve gradually decreases, and the strain growth rate in the yield deformation stage increases continuously. The dynamic peak tensile strength of phyllite shows a negative exponential function

收稿日期:2023-07-12

基金项目:国家自然科学基金(41807245)

作者简介:王连华(1977-),男,高级工程师,主要从事岩土与隧道工程研究,E-mail:1980139469@qq.com.

Received: 2023-07-12

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41807245)

Author brief: WANG Lianhua (1977-), senior engineer, main research interests: geotechnical and tunnel engineering, E-mail: 1980139469@qq.com.

distribution, and the dissipation energy ratio decreases continuously. Under the condition of water temperature coupling, the peak tensile strength and dissipation energy ratio of phyllite are generally smaller than those of temperature cycle natural cooling. Under the dynamic impact, the phyllite occurs tensile failure throughout the bedding, mainly broken into 2 pieces. With increase of the number of water temperature cycles, the main phyllite fragments undergo tensile failure along the bedding plane and shear failure across the bedding plane, and the average size of the phyllite fragments decreases continuously. Under the condition of temperature circulating cold water cooling, the average size fragment is smaller and the decrease is the most significant.

Keywords: phyllite; Hopkinson bar test; temperature cycles; dry-wet cycles; dynamic tensile

作为中国中西部建设过程中常见的地质软岩,千枚岩往往受周围环境的影响,如温度和水分的快速变化,导致其动、静态力学强度特性弱化,因此,在工程中常被定义为不良地质软岩。

对于千枚岩的力学特性与破坏特征,众多学者开展了大量的研究。Xu等^[1]通过单轴压缩试验发现,千枚岩抗压强度等力学参数均随层理倾角的增大,呈V型分布规律。周阳等^[2]通过三轴压缩试验发现,千枚岩的强度、变形参数和破裂模式与层理倾角、围压密切相关,围压可明显弱化千枚岩各向异性。通过巴西劈裂试验,徐国文^[3]、张闯等^[4]从静力学角度研究了水、层理耦合作用下千枚岩的各向异性特征及破坏形式, Si等^[5]研究了层理角度 β 对千枚岩的力学特性和岩爆倾向性的影响,对不同层理角度的千枚岩进行单轴压缩试验,得出千枚岩在 β 为 0° 、 60° 、 75° 、 90° 时有较强的岩爆倾向。许江波等^[6]、武仁杰等^[7]采用霍普金森杆(SHPB)系统对不同层理的千枚岩进行动态冲击试验,研究表明,动态冲击下,千枚岩层理效应依然明显,饱和状态下,不同层理千枚岩延性增强,且其峰值抗压强度均出现不同程度衰减。Qiu等^[8]则采用霍普金森杆(SHPB)系统深化了对不同层理千枚岩动态拉伸力学特性的认识。刘汉香等^[9]开展了千枚岩在三轴压缩条件下的多级循环加载试验,分析确定了循环周次和上限应力的增加导致残余应变增加,而弹性模量、阻尼参数逐渐递减。王伟等^[10]通过不同层理倾角与不同围压下的千枚岩力学特性试验发现,千枚岩在高围压下易形成穿层理剪切破坏。针对千枚岩的动态与静态力学特性的研究大多聚焦于层理倾角,其劣化特性也是在工程应用中需要重点考虑的因素,对于具有层理的岩石,在温度与水的交替作用下,其层理结构逐渐破坏,最终形成软岩,因此对于千枚岩的研究,也应该逐渐从结构倾角的研究走向岩石劣化,这样才能为工程中围岩劣化的判别提供参考。

对于岩石劣化后的力学特性,大部分学者从温度循环和干湿循环两个角度开展研究, Sun等^[11]以

温度循环处理后砂岩, Zhao等^[12]以水-温处理后砂岩, Zhang等^[13]以不同温度、不同降温方式处理后花岗岩为研究对象,开展静态巴西劈裂试验,揭示了不同岩石在峰值抗拉强度、能量耗散、峰值能率、裂纹扩展、破坏模式等方面的规律。朱建波等^[14]采用霍普金森杆试验装置,对不同干湿循环次数的砂岩开展了动态冲击压缩试验,发现循环次数增加后,砂岩的各项动力学参数减小,破碎分型数增加。徐泽辉^[15]等利用带围压的霍普金森杆装置对不同高温水冷的玄武岩进行动态压缩试验,发现随温度升高或者围压降低,试样的破碎程度加剧。任松等^[16]对不同温度的砂岩进行单轴压缩试验和声发射试验,分析了砂岩在动力扰动和高温条件下的力学特性及破坏特征。基于SHPB试验系统,杜彬等^[17]、Li等^[18]对不同干湿循环作用后砂岩开展了动态巴西圆盘试验,研究了干湿循环次数及加载速率对砂岩劣化作用的影响。Lin等^[19]对常温、负温下饱和砂岩开展了动态巴西劈裂试验,从峰值抗拉强度、岩石破碎块度、分形特征等角度,研究了水-温作用后砂岩的动力学劣化特征。杨仁树等^[20]研究了红砂岩、灰砂岩和花岗岩的动态拉伸力学性能,利用SHPB系统对3种岩石进行不同冲击速度下的动态劈裂拉伸试验。目前,对于岩石的力学特性研究逐步由静力学转向动力学,这也是出于满足实际工程需求。而研究岩石劣化后的动力学特性不仅能够对岩石的动力学特性研究进行补充,也符合目前对岩石力学探索的需求,探究岩石在劣化条件下的动力学特性能够加快学术研究与工程实践接轨,掌握劣化岩石的动力学特性,有助于提高工程施工与运营阶段的设计优化水平。因此,研究岩石的动力学特性,尤其是劣化后的特性,能够促进科学研究和工程实践的结合。

以上研究结果表明,对于岩石的静、动态强度特性和破坏特征,目前已有相当多的研究成果。而其中大部分的成果都是基于砂岩与花岗岩等常见岩石,而对于千枚岩劣化的动力学研究尚有欠缺。千枚岩作为一种具有层理的特殊岩石,在高地应

力、高地温、高渗压的影响下极易发生劣化,导致其在隧道工程中发生软岩大变形。因此,笔者对 0° 层理倾角千枚岩进行研究,探究其在水和温度劣化条件下的力学衰减特性,分析其在不同劣化等级下的破坏特征。

1 试验概况

1.1 试样制备

千枚岩试样产自江西省九江市况家港 G532 线附近。现场采集的完整岩石,在室内通过定向取芯制备获得 0° 层理倾角的千枚岩标准试样,该地的千枚岩为石英质千枚岩,属于工程中常见的千枚岩,石英含量占 50% 左右,绢云母含量占 37%,物性稳定,层理清晰,岩芯取样完整,能够较好地反映水-温循环后岩样的劣化程度,并与原岩进行对比分析。根据《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.7—2009),制备直径 50 mm、高度 25 mm 的

0° 层理倾角千枚岩试样,如图 1 所示。



图 1 千枚岩试样图

Fig. 1 Samples of phyllite

试样制备的精度应满足如下要求:

- 1) 沿试样高度,直径的误差小于 ± 0.03 mm;
- 2) 试样两端面不平行度误差小于 ± 0.05 mm;
- 3) 表面平整度小于 ± 0.02 mm;
- 4) 两端面应垂直于试件轴线,允许轴向偏差 $\pm 0.25^\circ$ 。

千枚岩试样的各项基本物理参数如表 1 所示。

表 1 千枚岩试样基本物理参数表

Table 1 Basic physical parameter table of phyllite sample

岩样劣化类型	平均质量/g	平均高度/mm	平均直径/mm	平均密度/(g/cm ³)
温度循环自然降温	135.39	50.02	25.20	2.734 6
自然循环冷水降温	135.32	49.99	25.19	2.736 9
干湿循环	135.19	50.02	25.18	2.732 1

1.2 水-温循环设计

考虑千枚岩在自然环境中的干湿交替与温度变化环境以及试验的可操作性,在温度循环自然降温、温度循环冷水降温(通过温度循环中的冷水降温完成千枚岩的水-温耦合)、干湿循环 3 种劣化条件下,分别对千枚岩开展 0(干燥状态)、1、3、5、8、11 次劣化处理。

1) 温度循环

岩样首先在烘箱中以 100 °C 保温 4 h,而后分别以自然冷却和冷水降温的方式,将试样温度降至室温,称为 1 次温度循环(见图 2)。

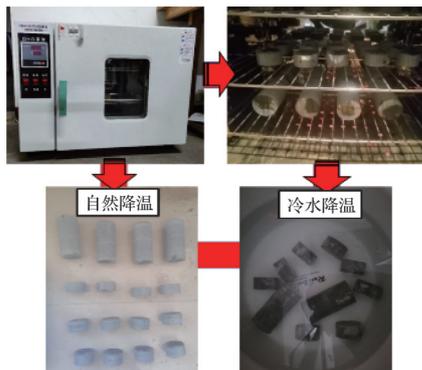


图 2 温度循环示意图

Fig. 2 Schematic diagram of temperature cycle

2) 干湿循环

根据《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561.5—2009),岩样首先入烘箱干燥 24 h,冷却至室温,放入饱和桶中水 24 h,称为干湿循环 1 次(见图 3)。



注:干燥温度按第 1 次干燥温度 110 °C、后续干燥温度 60 °C 执行。

图 3 干湿循环示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wet and dry cycle

1.3 试验设备

SHPB 试验系统主要包括动力系统、测速仪、数据采集系统、传递系统,如图 4 所示。试验系统中入射杆长 2 000 mm,透射杆长 1 500 mm,吸收杆长 500 mm。冲击杆及子弹材质为高强度弹性钢,波速 $C_0=5\ 124$ m/s。应变片采集信息可存储记录于超

动态采集仪。

试验采用 0.2 MPa 冲击气压。如图 5 所示,取

千枚岩应变率时程曲线峰值应变率为岩样应变率标准值,具体见表 2。

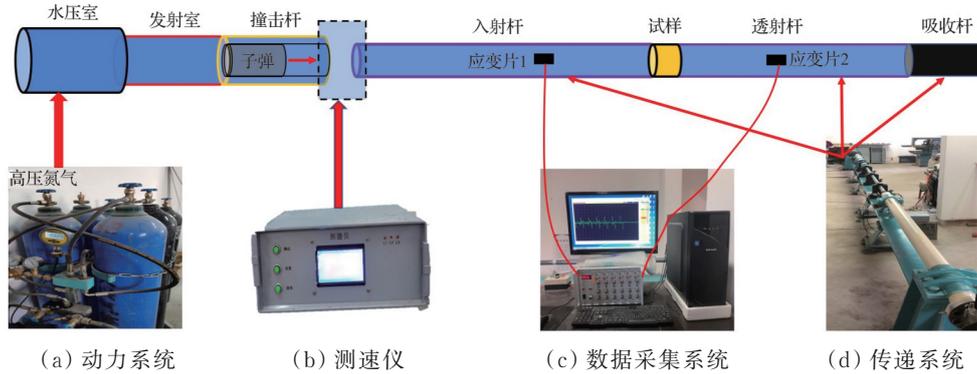


图 4 SHPB 试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of SHPB test system

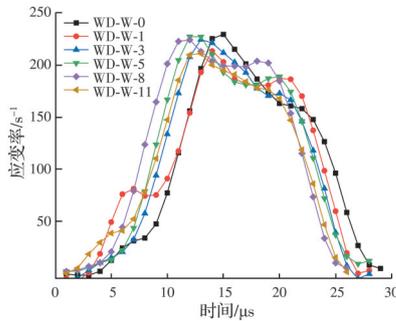


图 5 应变率计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of strain rate calculation

表 2 千枚岩动态拉伸应变率

Table 2 Dynamic tensile strain rate data of phyllite

N	WD-N/s ⁻¹	WD-W/s ⁻¹	GS/s ⁻¹
0		229.35	
1	213.08	213.36	247.69
3	227.61	224.41	211.07
5	218.30	227.22	200.99
8	231.64	224.13	229.56
11	227.89	210.93	230.25

注: N 为循环次数; WD-N 表示温度循环自然降温; WD-W 表示温度循环冷水降温; GS 表示干湿循环。

1.4 试验原理

根据应力波理论, SHPB 试验应满足两个假定: 一维应力波假定, 认为冲击应力波仅产生横向传播, 且不会发生能量衰减; 应力均匀性假定, 认为试样受力在瞬间完成, 试样内部受力均匀。由此, 推导出 SHPB 计算式(1)。根据一维应力波假定, 设杆件应变为 $\epsilon(t)$, 对其进行积分可得出杆件位移为

$$u = C_0 \int_0^t \epsilon(t) dt \quad (1)$$

由式(1)可推导出冲击加载过程中试件的平均应变为

$$\epsilon = \frac{u_1 - u_2}{l_s} = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t [\epsilon_1(t) - \epsilon_R(t) - \epsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

由弹性理论可得

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_1(t) + \sigma_R(t) = E[\epsilon_1(t) + \epsilon_R(t)] \\ \sigma_2 = \sigma_T(t) = E\epsilon_T(t) \\ v_1 = v_1(t) + v_R(t) = C_0[\epsilon_1(t) - \epsilon_R(t)] \\ v_2 = v_T(t) = C_0\epsilon_T(t) \end{cases} \quad (3)$$

动态巴西劈裂试样的平均应力为

$$\sigma_1 = \frac{A}{\pi D l_s} [\sigma_1(t) + \sigma_2(t)] = \frac{A}{\pi D l_s} E [\epsilon_1(t) + \epsilon_R(t) + \epsilon_T(t)] \quad (4)$$

式中: ϵ_R 为反射应变; ϵ_T 为透射应变; C_0 为冲击杆波速, 5 124 m/s; l_s 为试样初始长度, m; D 为试样直径, m; A 为杆件横截面积, m²; E 为冲击杆弹性模量, GPa; ϵ 为冲击时试样的平均轴向应变; σ_1 为冲击时试样冲击面的平均应力。

根据能量守恒定律, 假定入射杆、透射杆是完全刚性的, 应力波传播过程中没有发生能量损失, 由此可得冲击过程中各部分能量的关系, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} E_1 = AEC_0 \int \epsilon_1^2 dt \\ E_R = AEC_0 \int \epsilon_R^2 dt \\ E_T = AEC_0 \int \epsilon_T^2 dt \\ E_D = E_1 - E_R - E_T \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_D 、 E_1 、 E_R 、 E_T 分别为耗散能、入射能、反射能、透射能。

如图 6 所示, 入射应变和反射应变的叠加波峰值处与透射应变波峰值处基本重合, 表明岩样前后

界面基本达到应力平衡。

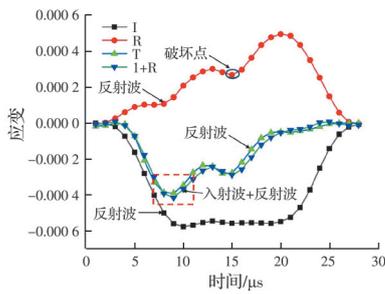


图 6 霍普金森杆试验动态应力波

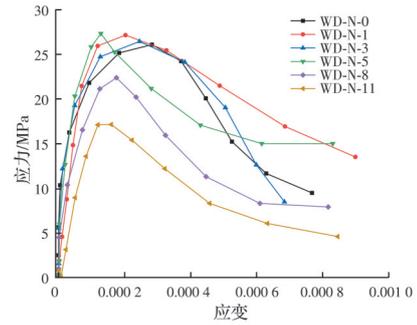
Fig. 6 Dynamic stress wave of Hopkinson bar test

2 千枚岩动力学特性分析

2.1 动态应力-应变曲线分析

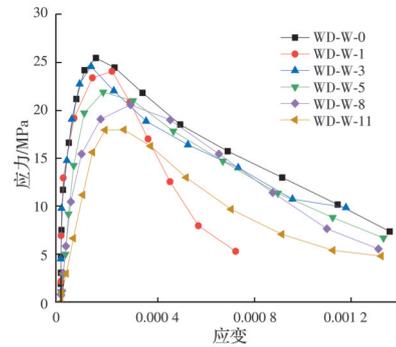
如图 7 所示,千枚岩动态应力-应变曲线包括极速弹性变形阶段、屈服变形阶段及破坏变形阶段。由于千枚岩属于变质岩,长期地质作用下,其层理之间的超薄片已转化为致密的千枚理构造,动力冲击下,千枚岩极速弹性变形阶段应变增加极小,应力则迅速增加,具有明显的硬脆性特征。进入屈服变形阶段后,千枚岩应变增长速率明显增大,应力-应变曲线曲率不断增大,直至达到峰值强度。在冲击过程中,千枚岩 0° 层理与应力波传播方向呈 0° 夹角,主要发生三方面的劣化:首先,冲击作用下,千枚岩层理面承受张拉应力,致使层理间矿物颗粒黏结性减弱,裂纹持续扩展、贯通,形成较大的裂缝,从而促使千枚岩形成多个“长细比”较大的不稳定薄片结构,冲击作用下,该结构极易产生挠曲变形,发生失稳破坏;由于薄片结构并非均质层理构造且裂缝较多,其在挠曲变形过程中,同时发生贯穿薄片结构的张剪复合破坏。最终,多种破坏机制耦合作用下,千枚岩在宏观上表现为发生贯穿层理的张拉复合破坏。

如图 7 所示,随着水-温循环次数的增加,千枚岩应力-应变曲线极速弹性变形阶段逐渐缩短,屈服变形阶段应变增长速率明显增加。如图 7(a)所示,自然降温条件下,当温度循环次数达到 8、11 次时,千枚岩极速弹性变形阶段明显缩短。如图 7(b)所示,冷水降温条件下,千枚岩极速弹性变形阶段从温度循环达到 5 次时即开始变得显著,表明水-温耦合作用加速了千枚岩的劣化,同时,水的作用使得千枚岩峰后应力-应变曲线更为平缓,延性增强。如图 7(c)所示,干湿循环 0~1 次时,千枚岩峰值抗拉强度则由于自由水的 Stefan 效应出现增长^[21]。经过干湿循环后,千枚岩极速弹性变形阶段不断缩短,屈服变形阶段应变增长率不断增加,峰前应力-应变



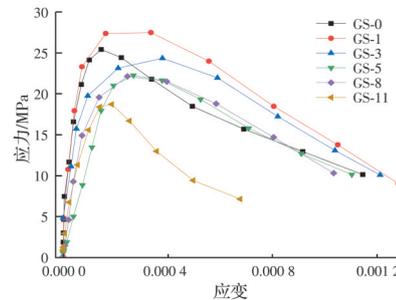
注:WD-N-*n*为试样经过*n*次温度循环,循环中降温方法为自然降温。

(a) 温度循环自然降温



注:WD-W-*n*为试样经过*n*次温度循环,循环中降温方法为冷水降温。

(b) 温度循环冷水降温



注:GS-*n*为试样经过*n*次干湿循环。

(c) 干湿循环

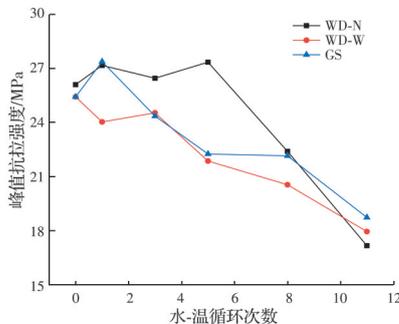
图 7 水-温循环作用下千枚岩应力-应变曲线图
Fig. 7 Stress-strain curves of phyllite after water and temperature cycling

曲线逐渐相互分离,峰后应力-应变曲线延性特征明显。分析认为,水-温循环引起的循环温度梯度拉压应力使得千枚岩层理间矿物颗粒间的黏结性减弱,裂纹不断发育,贯通形成裂缝,千枚岩发生劣化。在水的影响下,温度梯度拉压应力幅值提高,干湿循环饱水作用增强了水的侵蚀性,水-温耦合作用下,千枚岩劣化效果更为明显。

2.2 动态峰值抗拉强度变化规律分析

如图 8 所示,随着水-温循环次数增加,千枚岩动态抗拉峰值强度不断劣化。定义相邻两次水-温循环作用下,千枚岩动态峰值抗拉强度的衰减率为

环比。温度循环1~11次时,千枚岩动态峰值抗拉强度环比分别减小-4.09%、2.62%、-3.36%、18.10%、23.37%。温度循环自然降温0~5次时,千枚岩动态峰值抗拉强度处于波动状态,这主要是由于前期的干湿循环与温度循环只对千枚岩试样表层造成了影响,而没有侵蚀千枚岩岩样内部。当温度循环达到8、11次时,千枚岩动态峰值抗拉强度劣化效果明显,环比降幅迅速扩大。温度循环1~11次时,千枚岩动态峰值抗拉强度环比分别减小5.47%、-2.08%、10.89%、6.03%、12.65%。温度循环冷水降温3次后,千枚岩动态峰值抗拉强度出现显著下降。干湿循环1~11次时,千枚岩动态峰值抗压强度环比分别减小-7.70%、11.05%、8.63%、0.48%、15.44%,干湿循环11次时,千枚岩动态峰值抗拉强度环比降幅最大,劣化最为明显。



注:WD-N表示温度循环自然降温;WD-W表示温度循环冷水降温;GS表示干湿循环。

图8 水-温循环作用下千枚岩动态峰值抗拉强度变化图
Fig. 8 Variation of dynamic peak tensile strength of phyllite after water temperature cycling

图8数据拟合显示,千枚岩动态峰值抗拉强度随着水-温循环次数的增加呈负指数函数关系变化,即随着水-温循环次数的增加,试样的动态峰值抗拉强度先缓慢减小后快速降低,同时,温度循环冷水降温、干湿循环条件下,千枚岩动态峰值抗拉强度拟合曲线呈现负线性相关,在单因素劣化作用下,随着循环次数的增加,千枚岩试样的动态峰值抗拉强度逐次递减。温度循环自然降温、温度循环冷水降温、干湿循环拟合曲线分别如式(6)~式(8)所示。

$$y = \exp(3.26051 + 0.03741x - 0.00686x^2), \quad R^2 = 0.96 \quad (6)$$

$$y = \exp(3.22445 - 0.01582x - 0.00133x^2), \quad R^2 = 0.93 \quad (7)$$

$$y = \exp(3.27161 - 0.02033x - 0.0009x^2), \quad R^2 = 0.88 \quad (8)$$

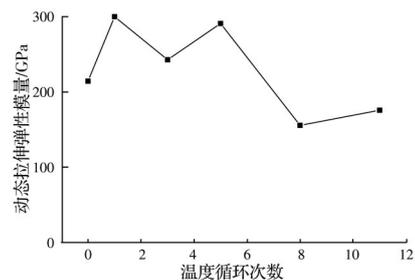
式中: x 为干湿循环次数; y 为动态峰值抗拉强度。

水-温循环0~5次时,温度循环冷水降温、干湿循环条件下,千枚岩动态峰值抗拉强度降幅明显大于温度循环自然降温时。水-温循环达到8~11次时,劣化

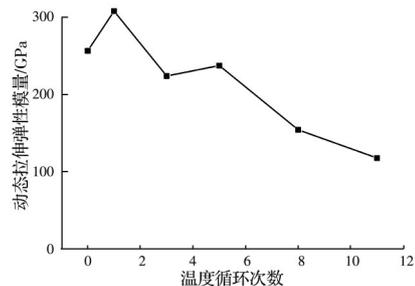
效果凸显,千枚岩动态峰值抗拉强度差距减小。水-温耦合作用对千枚岩动态峰值抗拉强度的劣化更明显。

2.3 动态拉伸弹性模量变化规律分析

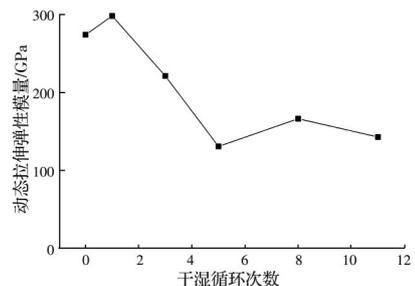
水-温循环作用下千枚岩动态弹性模量变化如图9所示。从图9可以看出,随着水-温循环次数的增加,千枚岩动态拉伸弹性模量呈现动态减小的趋势。水-温循环1次时,千枚岩动态拉伸弹性模量增大。如图9(a)所示,温度循环自然降温0~5次时,千枚岩动态拉伸弹性模量动态波动,当温度循环达到8、11次时,千枚岩动态拉伸弹性模量发生明显劣化。如图9(b)所示,温度循环冷水降温3~5次时,千枚岩动态拉伸弹性模量显著降低。如图9(c)所示,干湿循环1~5次时,千枚岩动态拉伸弹性模量快速下降,随着循环次数的增加,千枚岩动态拉伸弹性模量的变化趋于平稳,而千枚岩动态峰值抗拉强度随着循环次数的增加而降低。由此推断,千枚岩的劣化是沿着既有裂隙不断扩展的,并没有显著影响岩样的整体动态拉伸弹性模量。



(a) 温度循环自然降温



(b) 温度循环冷水降温



(c) 干湿循环

图9 水-温循环作用下千枚岩动态拉伸弹性模量变化图
Fig. 9 Variation of dynamic elastic modulus of phyllite after water and temperature cycling

3 能量分析

岩石的受力变形及破坏过程中始终伴随着能量的吸收和释放。千枚岩能量时程曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,千枚岩入射波能量、反射波能量、透射波能量、破坏耗能时程曲线可分为 3 阶段,即起步阶段、快速增长阶段、稳定阶段。结合式 (2) 可知,能量来自应变平方的积分累加,冲击应力波峰值加载对应能量时程曲线的快速增长阶段,此时,千枚岩处于应力平衡受力阶段,表明千枚岩的动态变形及破坏过程中始终伴随着能量的急剧增长。观察千枚岩能量时程曲线稳定阶段,透射能极小,反射能大于耗散能,成为入射能分解出的主要部分。0.2 MPa 冲击气压下,千枚岩入射波能量值保持在 100~120 J 之间。

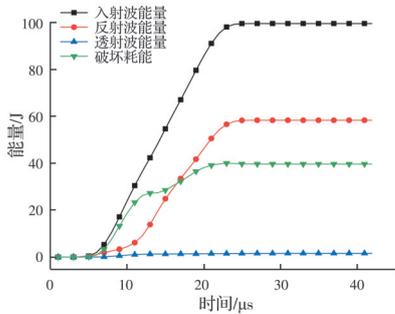


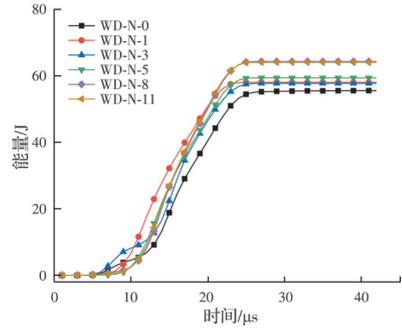
图 10 千枚岩能量时程曲线图

Fig. 10 Plot of the energy time history of phyllite

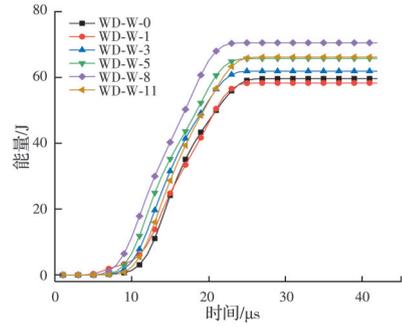
水-温循环作用下千枚岩反射能时程曲线如图 11 所示。从图 11 可以看出,天然状态下,千枚岩反射能时程曲线稳定阶段能量值约为 55 J。水-温循环作用下,千枚岩反射能时程曲线稳定阶段能量值均大于 55 J,其中水-温循环达到 8、11 次时,稳定阶段能量值逐渐增加至高位水平。

水-温循环作用下千枚岩透射能时程曲线如图 12 所示。由图 12 可以看出,天然状态下,千枚岩透射能时程曲线稳定阶段的能量值约为 2 J。水-温循环作用下,稳定阶段能量值明显下降,以水-温循环达到 8、11 次时最为明显。由图 12 可知,千枚岩透射能时程曲线前期为快速增加阶段,后期变为明显缓和增长段。

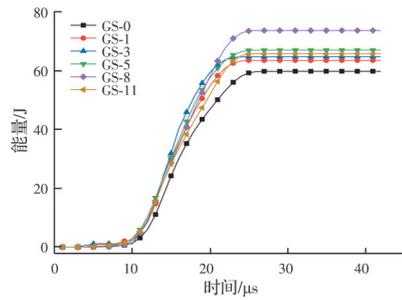
水-温循环作用下千枚岩能量比变化如图 13 所示。从图 13 可以看出,随着水-温循环次数的增加,千枚岩反射能比不断增加,透射能比、耗散能比不断减小。温度循环冷水降温、干湿循环两种水-温耦合条件下,千枚岩反射能比普遍大于温度循环自然降温时,耗散能比、透射能比普遍小于温度循环自



(a) 温度循环自然降温



(b) 温度循环冷水降温



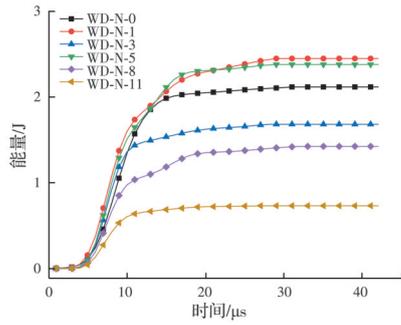
(c) 干湿循环

图 11 水-温循环作用下千枚岩反射能时程曲线
Fig. 11 Time history curve of phyllite reflection energy after water and temperature cycling

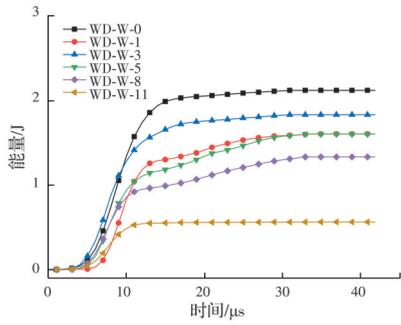
然降温时。分析认为,水-温耦合作用提高了温度梯度拉压应力幅值,加速了千枚岩的劣化,尤以温度循环冷水降温条件下表现最为明显。相比温度循环冷水降温时,千枚岩耗散能比在干湿循环 0~3 次时发生衰减,而干湿循环大于 3 次后,千枚岩耗散能比并未明显低于温度循环冷水降温时,表明与温度循环冷水降温相比,干湿循环作用未在千枚岩力学性能劣化上展现明显的优势,温度循环引起的温度梯度拉压应力是导致千枚岩劣化的主要原因。

4 千枚岩宏观破裂模式分析

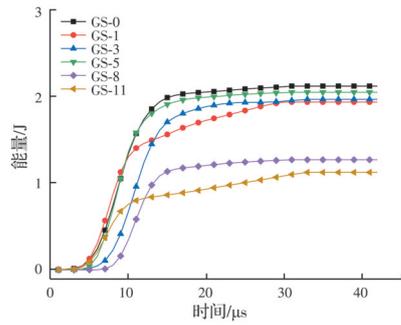
不同水-温循环作用下千枚岩动态拉伸破坏如图 14 所示。由图 14 可以看出,天然状态下,千枚岩宏观上发生贯穿层理的张拉复合破坏,岩样主要破碎为 2 块。与常规静态拉伸破坏形成宏观裂缝相



(a) 温度循环自然降温



(b) 温度循环冷水降温

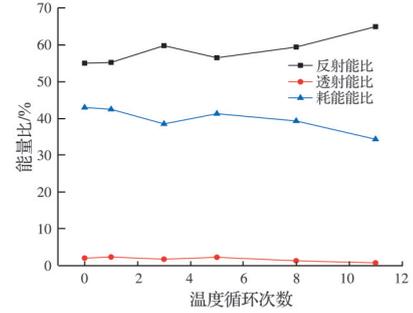


(c) 干湿循环

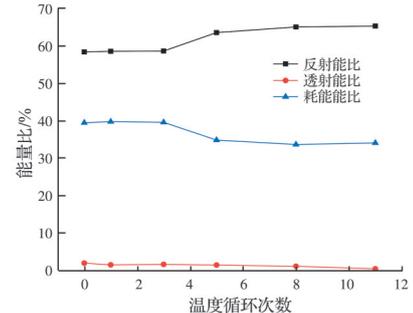
图 12 水-温循环作用下千枚岩透射能时程曲线
Fig. 12 Time history curve of transmitted energy of phyllite after water and temperature cycling

比,动态冲击下,千枚岩岩样沿冲击应力加载方向形成了破碎带。观察发现,破碎带残片中存有较多“长条状”的碎块,分析认为,这是岩样承受张拉应力,沿软弱层理面发生剥离破坏的现象。

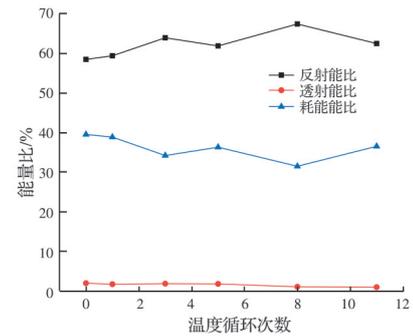
以温度循环自然降温为例,温度循环 1~5 次时,千枚岩主要破碎为 2 块,温度循环造成岩石损伤、裂纹扩展,岩石发生穿层理的剪切破坏,主碎块发生碎块剥离,破碎带尺寸不断减小。随着循环次数增加,千枚岩内部、层理间裂纹深入扩展,矿物颗粒间的黏结性显著降低,在沿层理面的张拉与穿层理面的剪切复合破坏作用下,其主碎块尺寸减小,当循环达到 11 次时,千枚岩岩样主碎块破碎为多个薄片,岩样完全破碎。引入水的影响因素,温度循环冷水降温 5 次、干湿循环 3 次时,千枚岩主碎块即发生沿层理面的张拉与穿层理面的剪切复合破坏,



(a) 温度循环自然降温



(b) 温度循环冷水降温



(c) 干湿循环

图 13 水-温循环作用下千枚岩能量比变化图
Fig. 13 Variation of phyllite energy ratio after water and temperature cycling

表明水-温耦合作用加剧了千枚岩劣化程度。

千枚岩典型破坏碎片如图 15 所示。如图 15(a) 中①、②号区域所示,千枚岩发生了穿层理面的张拉破坏。图 15(b) 中③为“长条状”碎片,④表明岩样发生穿层理面剪切破坏。图 15(c) 中⑤号区域体现了水-温循环作用对千枚岩层理面的劣化损伤,劣化深入即发生图 15(d) 所示的主碎块发生沿层理面的张拉与穿层理面的剪切复合破坏现象。

选用不同筛孔尺寸的标准砂石方孔筛对千枚岩碎片进行筛分试验,并采用碎块平均尺寸 \bar{d} 定量描述水-温循环作用后千枚岩破碎程度^[22]。

$$\bar{d} = \frac{\sum \sum (r_i d_i)}{\sum r_i} \quad (9)$$

式中: d_i 为不同粒径标准筛的平均尺寸; r_i 为对应于 d_i 的碎块质量百分比。

水-温循环作用下千枚岩碎块平均尺寸变化如

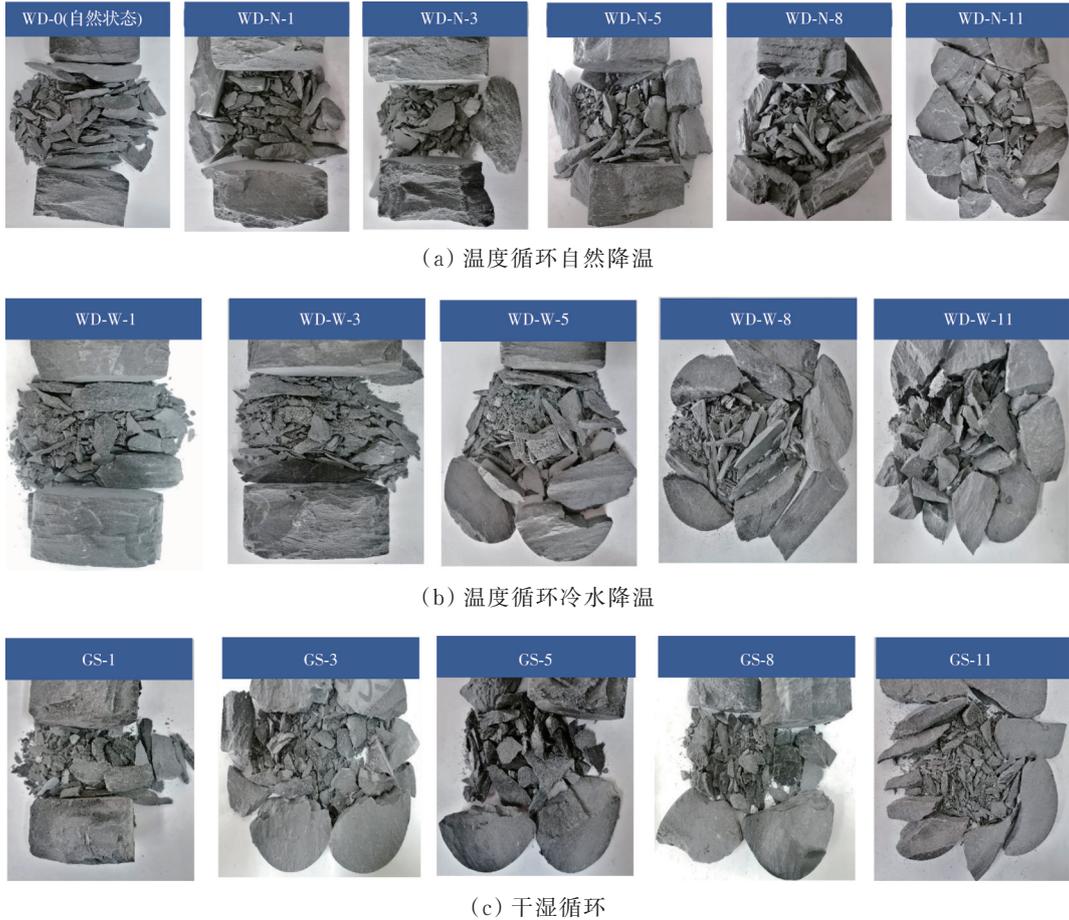


图 14 不同水-温循环作用下千枚岩动态拉伸破坏图

Fig. 14 Dynamic tensile failure diagram of phyllite after different water temperature cycles



图 15 水-温循环作用下千枚岩表现破坏示意图

Fig. 15 Schematic diagram of apparent failure of phyllite after water and temperature cycling

图 16 所示,随着水-温循环次数的增加,千枚岩碎块的平均尺寸不断减小。温度循环冷水降温条件下,千枚岩碎块的平均尺寸降幅最为明显,普遍低于温度循环自然降温、干湿循环条件下碎块的平均尺寸,且以水-温循环 1~5 次时表现最为明显,水-温耦合作用下千枚岩劣化明显,温度循环冷水降温提供了更高的温度梯度拉压应力,这是导致千枚岩劣化加剧的主要原因。

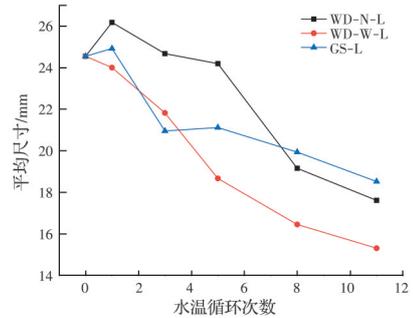


图 16 水-温循环作用下千枚岩碎块平均尺寸变化图

Fig. 16 Diagram of average size change of phyllite fragments after water and temperature cyclin

5 结论

以千枚岩动态力学试验为基础,对水-温循环作用下岩石动态拉伸力学特性进行了系统研究,分析了在不同水-温循环条件下 0°层理倾角千枚岩动态拉伸强度与变形破坏的特征,主要结论如下:

1) 0°层理倾角千枚岩应力-应变曲线包括极速弹性变形阶段、屈服变形阶段、破坏变形阶段。随着水-温循环次数的增加,千枚岩应力应变曲线极速弹性变形阶段逐渐缩短,屈服变形阶段的应变增长

率不断增大。随着水-温循环次数的增加,千枚岩动态峰值抗拉强度呈负指数函数关系变化,温度循环冷水降温、干湿循环条件下,千枚岩动态峰值抗拉强度拟合曲线近似线性变化,峰后应力-应变曲线延性特征明显。

2)随着水-温循环次数的增加,千枚岩反射能比不断增加,透射能比、耗散能比不断减小。温度循环自然降温、干湿循环水-温耦合条件下,千枚岩反射能比普遍大于温度循环自然降温时,耗散能比、透射能比普遍小于温度循环自然降温时。

3)动态冲击下,千枚岩主要破碎为2块,发生贯穿层理的张拉破坏。随着水-温循环次数的增加,千枚岩主碎块发生沿层理面的张拉与穿层理面的剪切复合破坏,直至岩样完全破碎。在水-温耦合作用下,千枚岩主碎块更早发生沿层理面的张拉与穿层理面的剪切复合破坏。

4)随着水-温循环次数的增加,千枚岩碎块平均尺寸不断减小。温度循环冷水降温条件下,千枚岩碎块平均尺寸普遍小于其他两种劣化条件下的碎块平均尺寸,且降幅最为显著。

参考文献

- [1] XU J B, FEI D Y, YU Y L, et al. Research on crack evolution law and macroscopic failure mode of joint Phyllite under uniaxial compression [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 4196.
- [2] 周阳, 苏生瑞, 李鹏, 等. 板裂千枚岩微观结构与力学性质[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 504-513.
ZHOU Y, SU S R, LI P, et al. Microstructure and mechanical properties of broken phyllite [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 504-513. (in Chinese)
- [3] 徐国文. 层状千枚岩地层隧道稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
XU G W. Stability analysis of layered phyllite stratum tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [4] 张闯, 任松, 张平, 等. 水、孔洞及层理耦合作用下的千枚岩巴西劈裂试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1612-1624.
ZHANG C, REN S, ZHANG P, et al. Experimental study on Brazilian splitting of phyllite under the coupling effects of water, pore and bedding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1612-1624. (in Chinese)
- [5] SI X F, HUANG L Q, LI X B, et al. Mechanical properties and rockburst proneness of phyllite under uniaxial compression [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(12): 3862-3878.
- [6] 许江波, 费东阳, 孙浩辉, 等. 节理千枚岩能量传递与动力学特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(7): 986-995.
XU J B, FEI D Y, SUN H H, et al. Energy transfer and dynamic characteristics of jointed phyllite [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(7): 986-995. (in Chinese)
- [7] 武仁杰, 李海波, 李晓锋, 等. 不同冲击载荷下层状千枚岩压缩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(Sup2): 3304-3312.
WU R J, LI H B, LI X F, et al. Dynamic mechanical properties of layered phyllite subject to different impact loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup2): 3304-3312. (in Chinese)
- [8] QIU J D, LI D Y, LI X B. Dynamic failure of a phyllite with a low degree of metamorphism under impact Brazilian test [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 94: 10-17.
- [9] 刘汉香, 别鹏飞, 李欣, 等. 三轴多级循环加卸载下千枚岩的力学特性及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(Sup2): 265-274, 281.
LIU H X, BIE P F, LI X, et al. Study on mechanical properties and energy dissipation characteristics of phyllite under triaxial and multistage cyclic loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Sup2): 265-274, 281. (in Chinese)
- [10] 王伟, 张宽, 曹亚军, 等. 层状千枚岩各向异性力学特性与脆性评价研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 975-989.
WANG W, ZHANG K, CAO Y J, et al. Anisotropic mechanical properties and brittleness evaluation of layered phyllite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 975-989. (in Chinese)
- [11] SUN Q, GENG J S, ZHAO F. Experiment study of physical and mechanical properties of sandstone after variable thermal cycles [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7): 3771-3784.
- [12] ZHAO Y, BI J, ZHOU X P, et al. Effect of high temperature and high pressure of water on micro-characteristic and splitting tensile strength of gritstone [J]. Frontiers in Earth Science, 2019, 7: 301.
- [13] ZHANG F, DAI C, ZHANG Y H, et al. Experimental investigations on the tensile behaviour of granite after heating and water-cooling treatment [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(7): 5909-5920.
- [14] 朱建波, 付乙梓, 李瑞, 等. 干湿循环与动态压缩耦合作用下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(Sup1): 3558-3566.
ZHU J B, FU Y Z, LI R, et al. Experimental study on mechanical characteristics of sandstone under drying-

- wetting cycles and dynamic compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42 (Sup1): 3558-3566. (in Chinese)
- [15] 徐泽辉, 何童, 杜光钢, 等. 恒定动载下高温水冷后玄武岩的动力特性及本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43 (6): 62-75.
XU Z H, HE T, DU G G, et al. Dynamic characteristics and constitutive model of basalt after high temperature water cooling under constant dynamic load [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(6): 62-75. (in Chinese)
- [16] 任松, 李凯鑫, 张平. 动力扰动和高温联合作用下砂岩力学特性及破坏特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1087-1097.
REN S, LI K X, ZHANG P. Mechanical properties and failure characteristics of sandstone under combined effect of dynamic disturbance and high temperature [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 1087-1097. (in Chinese)
- [17] 杜彬, 白海波, 马占国, 等. 干湿循环作用下红砂岩动态拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1671-1679.
DU B, BAI H B, MA Z G, et al. Experimental study on the dynamic tensile properties of red-sandstone after cyclic wetting and drying [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1671-1679. (in Chinese)
- [18] LI S W, LI C B, YAO W, et al. Impact of wetting-drying cycles on dynamic tensile strength of rock [J]. Thermal Science, 2019, 23(Sup3): 815-820.
- [19] LIN G, LI M, CHEN Y L, et al. Dynamic tensile mechanical properties and fracture characteristics of water-saturated sandstone under the freezing effect [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(5): 04021044.
- [20] 杨仁树, 李炜煜, 李永亮, 等. 3种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3107-3118.
YANG R S, LI W Y, LI Y L, et al. Comparative analysis on dynamic tensile mechanical properties of three kinds of rocks [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3107-3118. (in Chinese)
- [21] 袁璞, 马芹永. 干湿循环条件下煤矿砂岩分离式霍普金森压杆试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2557-2562.
YUAN P, MA Q Y. Split Hopkinson pressure bar tests on sandstone in coalmine under cyclic wetting and drying [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2557-2562. (in Chinese)
- [22] 洪亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
HONG L. Size effect on strength and energy dissipation in fracture of rock under impact loads [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)