



钢纤维混凝土动态力学特性及损伤规律研究

余一松 李地元 蒋京泰 马金银 刘家明

Experimental study on dynamic mechanical properties and damage law of steel fiber concrete

YU Yisong, LI Diyuan, JIANG Jingtai, MA Jinyin, LIU Jiaming

引用本文:

余一松, 李地元, 蒋京泰, 马金银, 刘家明. 钢纤维混凝土动态力学特性及损伤规律研究[J]. 北科大: 工程科学学报, 2024, 46(12): 2181–2190. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.003

YU Yisong, LI Diyuan, JIANG Jingtai, MA Jinyin, LIU Jiaming. Experimental study on dynamic mechanical properties and damage law of steel fiber concrete[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(12): 2181–2190. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.15.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粗骨料及混杂纤维对UHPC力学性能的影响

Effect of coarse aggregates and hybrid fibers on mechanical properties of ultra high performance concrete
工程科学学报. 2024, 46(3): 536 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.12.21.003>

高温花岗岩热冲击后力学特性及损伤演化规律研究

Mechanical properties and damage evolution of granite under high temperature thermal shock
工程科学学报. 2022, 44(10): 1746 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.12.005>

硫酸盐侵蚀作用下纤维锂渣混凝土裂缝的分形特征

Fractal characteristics of fiber lithium slag concrete cracks under sulfate attack
工程科学学报. 2022, 44(2): 208 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.09.10.001>

侧向冲击荷载下钢筋混凝土墩柱的性能

Performance of reinforced concrete pier columns subjected to lateral impact
工程科学学报. 2019, 41(3): 408 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.03.015>

模拟冻结法施工环境对大体积混凝土的性能影响

Effects of a simulated freezing construction environment on the mass concrete performance
工程科学学报. 2022, 44(5): 857 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.07.01.002>

盐岩巴西劈裂损伤愈合特性实验研究

Experimental study of the self-healing property of damaged salt rock by Brazilian splitting
工程科学学报. 2020, 42(5): 570 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.06.04.001>

钢纤维混凝土动态力学特性及损伤规律研究

余一松^{1,2)}, 李地元^{1)✉}, 蒋京泰¹⁾, 马金银¹⁾, 刘家明²⁾

1) 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083 2) 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 长沙 410011

✉通信作者, E-mail: diyuan.li@csu.edu.cn

摘要 以云南某矿山超深井衬砌支护为工程背景, 对不同掺配方案、不同标号的钢纤维混凝土试样进行动态冲击试验, 并采用数字图像相关技术分析了冲击荷载下试样表面的应变场演化。试验结果表明: 三掺钢纤维混凝土动态抗压强度和耗散能占比大于单掺和双掺钢纤维混凝土; 素混凝土的动态强度越小, 掺配钢纤维后混凝土试样的动态强度提升越显著。采用高速摄像机记录了钢纤维混凝土试样的破坏全过程, 试样破坏模式受混凝土标号和钢纤维掺配方案控制, 可分为剪切、劈裂和剪切-劈裂复合型破坏。与素混凝土试样相比, 钢纤维混凝土试样在冲击荷载下的裂纹数量减少, 反射能占比更低, 透射能和耗散能占比更高, 表明钢纤维能有效抑制裂纹萌生扩展, 增强井壁混凝土的稳定性。钢纤维混凝土试样的非破坏性冲击试验结果显示三掺钢纤维方案能够最大程度抑制混凝土在冲击荷载下的损伤。最终建议该矿山深部竖井衬砌支护采用混凝土标号为 C50, 钢纤维的掺配方案为每立方米混凝土掺配端钩型长纤维 40 kg、镀铜平直型中长纤维 5 kg 以及短镀铜平直型短纤维 10 kg。

关键词 钢纤维混凝土; 动态冲击; 损伤变量; 数字图像处理; 矿山深部竖井

分类号 TU458

Experimental study on dynamic mechanical properties and damage law of steel fiber concrete

YU Yisong^{1,2)}, LI Diyuan^{1)✉}, JIANG Jingtai¹⁾, MA Jinyin¹⁾, LIU Jiaming²⁾

1) School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2) Changsha Nonferrous Metallurgy Design & Research Institute, Changsha 410011, China

✉Corresponding author, E-mail: diyuan.li@csu.edu.cn

ABSTRACT Investigating the effect of steel fiber blending schemes on the dynamic mechanical properties and damage evolution of concrete is crucial for deep-shaft construction projects. Dynamic impact tests were conducted on steel fiber concrete specimens with varying mixing schemes and grades, according to the settings of the ultra-deep shaft-lining support project of a mine in Yunnan Province. The evolution of strain fields on the specimen surfaces under impact loads was analyzed using digital image correlation techniques. The steel fiber mixing schemes were as follows: single mixing, in which 55 kg of end-hook long fibers were added per cubic meter of concrete; double mixing, which involved the addition of 15 kg of end-hook long fibers and 40 kg of short copper-plated straight fibers per cubic meter of concrete; and triple mixing, which involved the addition of 40 kg of end-hook long fibers, 5 kg of copper-plated straight medium-length fibers, and 10 kg of short copper-plated straight fibers per cubic meter of concrete. The test results indicated that the dynamic compressive strength and dissipated energy ratio of the triple-mixed steel fiber concrete specimens were greater than those of the single- and double-mixed steel fiber concrete specimens. The smaller dynamic strength of plain concrete, the more pronounced the enhancement in the dynamic strength observed in concrete specimens with a steel fiber admixture. A high-speed camera was used to

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52374153, 52074349)

record the complete failure process of the steel fiber concrete specimens. The camera revealed that the failure mode was influenced by the concrete grade and steel fiber mixing scheme. The observed failure modes included shear, splitting, and shear-splitting failures. Compared with plain concrete specimens, steel fiber concrete specimens exhibited fewer cracks, a lower percentage of reflected energy, and higher percentages of transmitted and dissipated energy under impact loading. This indicates that the steel fibers effectively inhibited crack initiation and propagation, thereby enhancing the stability of the shaft wall concrete. Non-destructive impact tests on steel fiber concrete specimens showed that the triple-mixed steel fiber scheme inhibited concrete damage under impact loading to the maximum extent. It is recommended that the lining support for the deep shaft of the mine be constructed using grade C50 concrete with steel fibers mixed with 40 kg of end-hooked long fibers, 5 kg of copper-plated straight medium-length fibers, and 10 kg of short copper-plated straight fibers per cubic meter of concrete.

KEY WORDS steel fiber concrete; dynamic impact; damage variable; digital image correlation; mine deep shaft

随着浅部资源的日益枯竭,我国矿山开采逐步向深部开采.据统计未来 10 年内,我国将有三分之一的地下矿山开采深度将达到或超过 1000 m,部分矿山最深可达 2000 m.深部井巷工程建设面临的围岩赋存条件急速恶化、支护难度增大等困境,而我国超深井开采技术研究尚处于起步阶段,相关支理论和技术成果比较匮乏.因此,开展深部竖井支护技术及支护工艺的研究意义重大.

深部巷道围岩、超深竖井及其支护体系经常受到采场爆破、岩爆、地震波等动态荷载作用,引起围岩和支护体系的损伤累积、变形和破坏^[1].研究混凝土在冲击荷载下的力学响应及损伤演化规律对深部资源开采的支护体系设计至关重要.分离式霍普金森压杆(SHPB)通常用以研究岩石和混凝土材料在中高应变率下的动态力学行为^[2].Li 等^[3]在素混凝土中加入钢纤维,发现钢纤维混凝土的动态力学性能明显优于素混凝土.叶中豹等^[4]发现钢纤维混凝土的动态强度、峰值应变随着纤维含量的增加而增大,并且呈现明显的率效应.杜修力等^[5]采用直径 75 mm 的 SHPB 装置对不同 PVA(Polyvinyl alcohol fiber)纤维和钢纤维含量的混凝土试样进行冲击试验,观察到相似的试验结果.岩石和混凝土试样在冲击荷载的破坏模式也受到应变率的影响,主要分为劈裂拉伸破坏、剪切破坏和劈裂-剪切复合型破坏^[6].李晓锋等^[7]发现钢纤维混凝土的动态强度增长因子随应变率呈指数增长.Sun 等^[8]指出应变率在 50 ~ 150 s⁻¹ 之间时,钢纤维混凝土的动态强度增长因子较大,并且增大钢纤维含量降低了动态强度因子对应变率的敏感性.Yang 等^[9]基于不同纤维掺量、不同纤维类型和不同基体强度的混凝土试样的动力学响应,构建了适用于钢纤维混凝土的动态强度因子计算模型.董进秋和杜艳廷^[10]分析了不同纤维掺量的玄武岩纤维混凝土在多次

冲击荷载下的抗冲击性能和损伤演化规律,基于超声波变速定义了损伤变量,用以表征循环冲击下混凝土疲劳损伤特性.谢磊等^[11]对超高韧性水泥基复合材料进行了多次冲击试验,发现热激活损伤演化模型能较好地描述复合材料在首次冲击下的力学响应;而基于 Weibull 分布的损伤演化模型能够较好地描述复合材料在多次冲击下的损伤演化规律.陈璋等^[12]对掺有钢纤维的超高性能混凝土进行了冲击试验,基于耗散能定义了损伤变量,将混凝土损伤演化分为 3 个阶段,揭示了钢纤维对损伤演化的抑制作用.徐腾飞等^[13]对超高性能混凝土与普通混凝土开展了徐变损伤与失效试验,结果表明当持久应力水平超过一定水平后,开始出现徐变损伤;当持久应力进一步提升后,钢纤维与水泥基体的粘结出现损伤,并且钢纤维无法约束试样内部微裂纹的扩展.

综上所述,国内外学者对钢纤维混凝土的动态力学性能开展了大量研究,分析了纤维类型、钢纤维掺量和应变率对混凝土试样的动态强度和破坏模式的影响,但关于不同钢纤维配比混凝土的动态力学性能和损伤演化规律研究鲜有报道.钢纤维混凝土作为超深井井壁的永久型支护材料,需要较强的韧性才能抵御爆破等动态荷载并抑制井壁裂纹扩展.本文依托矿山现场深部竖井衬砌支护现状,利用 SHPB 装置开展不同掺配比钢纤维混凝土冲击破坏和冲击损伤试验,借助高速摄影机和数字图像相关技术分析钢纤维混凝土试样的动态破坏过程,讨论了 3 种钢纤维掺配方式对混凝土试样的动态强度、破坏模式、能量耗散和损伤演化的影响.

1 工程背景

为满足云南省某矿深部探矿需求,拟开展深

部探矿竖井工程建设工作, 该竖井为盲竖井, 井口埋深 1500 m. 竖井围岩以白云岩、砂岩、灰岩为主, 易发生围岩失稳和岩爆现象. 为了确保工程施工安全, 确定井壁支护材料, 亟待开展钢纤维混凝土动态力学特性及损伤规律研究.

2 试样制备与试验装置

2.1 试样方案及制备

混凝土试样的制备材料(骨料、水泥以及钢纤维)均来自现场. 如图 1 所示, 钢纤维有 3 种类别: 端钩型长纤维, 长 50 mm, 直径为 0.6 mm; 镀铜平直型中长纤维, 长 30 mm, 直径为 0.35 mm; 短镀铜平直型短纤维, 长 13 mm, 直径为 0.18 mm. 现场采用普通硅酸盐水泥, 型号为 P.O 32.5; 骨料采用的是矿山废矸石, 主要成分是白云岩, 含少量的石英、云母和方解石, 粒径为 10~20 mm, 细骨料模数为 2.5. 该竖井工程目前采用 C30 混凝土, 在骨料不变的前提下, 在混凝土中添加高性能混凝土外加剂来提高混凝土标号至 C40、C50. 外加剂为山西建华化工有限公司生产的 BR 型高性能复合剂, 密度为 2100 kg·m⁻³. 3 种素混凝土的配合比如表 1 所示. 矿山优选出 3 种钢纤维配方: 单掺, 每立方混凝土加入端钩型长纤维 55 kg; 双掺, 每立方混凝土加入端钩型长纤维 15 kg 及短镀铜平直型短纤维 40 kg; 三掺, 每立方混凝土加入端钩型长纤维 40 kg, 镀铜平直型中长纤维 5 kg, 短镀铜平直型短纤维 10 kg.

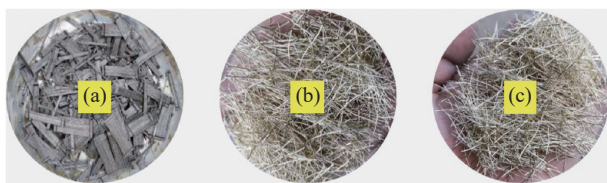


图 1 试样制备采用的钢纤维类型. (a) 端钩型; (b) 镀铜平直型; (c) 短镀铜平直型

Fig.1 Types of steel fiber used for sample preparation: (a) end-hook type; (b) copper-plated straight type; (c) short copper-plated straight type

表 1 C30、C40 和 C50 素混凝土的质量配合比

Concrete grade	Plain concrete proportions				
	Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Additive
C30	0.49	1.00	1.86	2.57	0
C40	0.35	1.00	1.86	2.57	0.05
C50	0.29	1.00	1.86	2.57	0.08

图 2 为钢纤维混凝土试样的制作流程, 将固定配比的混合材料倒入搅拌机充分搅拌, 再将均匀搅拌的混合物倒入模具中, 利用振动台对模具进行充分振动, 随后试样静置两天等待试样成形后脱模, 将脱模试样置入标准养护箱进行 14 d 的养护(养护温度为 20 °C ± 2 °C, 相对湿度为 95%); 切割为直径 75 mm, 厚度 37.5 mm 的圆柱形试样, 用于动态冲击试验^[14]. 对 3 种标号混凝土和 3 种钢纤维掺配方案进行正交搭配, 分别对每种标号混凝土制作单掺、双掺和三掺钢纤维混凝土试样. 此外, 还制作了每种标号的素混凝土试样作对比组. 试样经打磨光滑后, 端面平整度小于 0.02 mm, 共制得试样 72 个. 试样编号类型为 C30/40/50-S/D/T-1/2/3, 其中 C30、C40 和 C50 表示混凝土标号; S 表示单掺, D 表示双掺, T 表示三掺; 1、2、3 表示平行试样编号.

2.2 分离式 SHPB 系统

如图 3 所示, SHPB 装置主要由 3 个直径为 75 mm 的弹性杆组成: 入射杆、透射杆和吸收杆. 三根弹性杆和纺锤体子弹皆由 40Cr 合金制成, 合金密度为 7817 kg·m⁻³, 弹性模量为 233 GPa, 纵波波速为 5458 m·s⁻¹. 纺锤体子弹在高压氮气作用下发射, 撞击入射杆的自由端, 产生压缩波在入射杆中传播(即入射波 ϵ_I), 当压缩波传播到试样和入射杆之间的界面时, 部分波被反射回入射杆(即反射波, ϵ_R), 其余波通过试样到透射杆(即透射波, ϵ_T). 这 3 种应力波的信号由粘在入射杆和透射杆上的应变片记录, 其中入射杆上的应变片记录入射波和反射

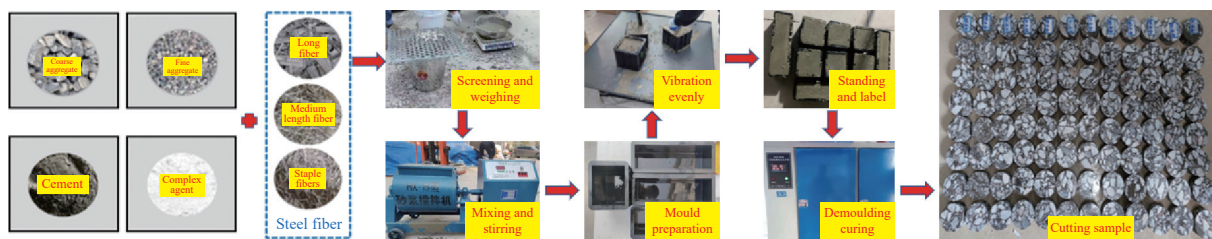


图 2 钢纤维混凝土试样制作流程图

Fig.2 Flow chart for making steel fiber concrete samples

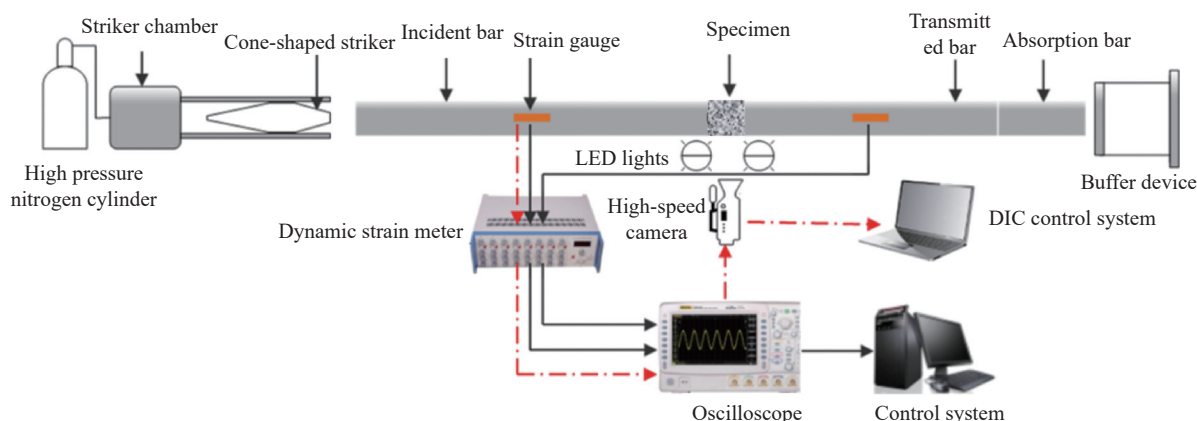


图 3 SHPB 试验装置及高速摄影系统示意图

Fig.3 Schematic of the SHPB device and high-speed photography system

波, 而透射杆上的应变片只记录透射波. 基于一维应力波理论, $\sigma(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ 和 $\dot{\varepsilon}(t)$ 的计算公式如下^[15-18]:

$$\sigma(t) = \frac{A_e}{2A_s} E_e (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_e}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_e}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (3)$$

其中, $\sigma(t)$ 、 $\varepsilon(t)$ 和 $\dot{\varepsilon}(t)$ 分别为试样的动态压应力、应变和应变率; A_e 、 E_e 和 C_e 分别是弹性杆的横截面积、弹性模量和纵波波速; A_s 和 L_s 分别为试样的横截面积和厚度.

冲击试验中, 入射能 (E_{inc})、反射能 (E_{ref}) 和透射能 (E_{tra}) 分别可以通过以下公式进行计算^[19-22]:

$$E_{inc} = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^t \sigma_{inc}^2(t) dt \quad (4)$$

$$E_{ref} = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^t \sigma_{ref}^2(t) dt \quad (5)$$

$$E_{tra} = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^t \sigma_{tra}^2(t) dt \quad (6)$$

其中, ρ_e 为弹性杆密度, σ_{inc} 、 σ_{ref} 和 σ_{tra} 分别为入射应力、反射应力和透射应力.

根据能量守恒定律, 入射总能量等于试样的反射能、透射能和耗散能之和. Li 等^[23] 认为耗散能 (E_{dis}) 由 3 部分组成, 分别是破碎能量耗散、运动能量耗散以及热能、摩擦能等, 破碎能量耗散几乎占总耗散能量的 85%. 本文中岩屑抛射的动能和其他耗散能难以求解, 总耗散能可直接由下式计算^[24]:

$$E_{dis} = E_{inc} - E_{ref} - E_{tra} \quad (7)$$

2.3 高速数字图像相关系统

采用高速摄像机和数字图像相关 (DIC) 技术

对冲击荷载下试样变形破坏特征进行监测和分析 (图 3). 高速摄像机镜头垂直于试样表面, 图像分辨率设置为 256 像素×256 像素, 拍摄频率设置为 79166 帧·s⁻¹. 试验前需要对试样表面进行散斑处理, 首先在表面喷上均匀的白漆, 然后用直径在 1.5 和 3.0 mm 之间随机分布的球齿塑料刷在白漆表面印上随机分布的黑斑. 将冲击试验采集的图像导入二维视觉图像相关软件 VIC-2D 中, 得到试样表面应变场和位移场的演化过程.

3 试验结果及分析

3.1 动态应力平衡

有效的动态冲击试验须保证破坏前试样两端的应力动态平衡, 通过计算获取试样两端的动态应力可验证试样是否达到应力平衡. 以试样 C30-S-1 为例, 其两端的动态应力数据如图 4 所示, 入射端的动态应力为入射应力与反射应力之和, 透射端的动态应力为透射应力. 由图 4 可知, 300 μs 以内, 动态应力在入射端和透射端具有良好的—

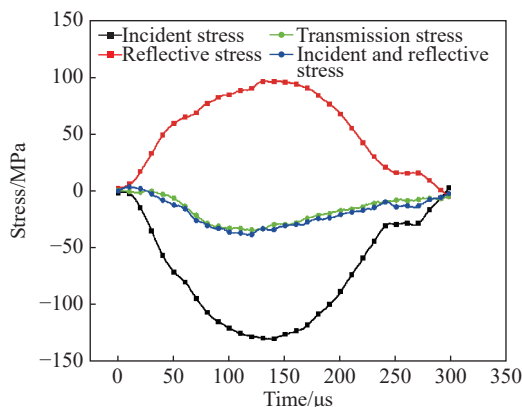


图 4 典型试样 C30-S-3 冲击荷载下的动态应力平衡

Fig.4 Dynamic stress balance of the typical C30-S-3 specimens under the impact load

致性,说明试样在冲击荷载下已经达到动态应力平衡,试样的试验数据是有效的.每个试样在冲击荷载的应力平衡都需要检查,不满足动态应力平衡的试样视为废样.

3.2 动态强度分析

对每种标号不同掺配方案的钢纤维混凝土试

样进行动态冲击试验,固定冲击气压为 0.35 MPa.基于应变片记录的数据,利用式 (1)~(3) 计算试样在冲击荷载下的动态强度 (σ_p)、应变率 ($\dot{\epsilon}$),利用式 (4)~(7) 计算冲击试验中的入射能、透射能、反射能和耗散能.表 2 统计了所有测试试样的试验结果,所有试样在冲击荷载下的应变率范围为 75 ~

表 2 冲击荷载下试样的力学参数及能量演化

Table 2 Mechanical parameters and energy evolution of samples under impact load

Sample No.	σ_p/MPa	$\dot{\epsilon}$	E_{inc}/J	E_{ref}/J	E_{tra}/J	E_{dis}/J
C30-1	29.93	118.84	254.82	187.22	5.82	61.79
C30-2	29.22	135.45	264.21	193.26	7.08	63.91
C30-3	28.18	129.96	214.97	166.60	6.50	41.95
C30-S-1			Stress imbalance			
C30-S-2	48.02	109.98	280.90	161.45	18.79	100.70
C30-S-3	41.53	97.61	226.59	134.53	13.11	79.00
C30-D-1	32.01	131.74	250.27	187.17	5.83	57.32
C30-D-2	35.48	150.17	288.50	239.45	9.79	40.03
C30-D-3	41.17	156.19	360.51	269.43	9.54	88.55
C30-T-1			Stress imbalance			
C30-T-2	64.71	75.00	172.28	51.02	43.75	77.76
C30-T-3	72.46	115.02	181.64	72.84	51.98	61.70
C40-1	46.44	132.84	244.04	147.12	17.14	79.79
C40-2	43.50	111.98	167.04	91.33	18.54	57.84
C40-3	46.26	79.53	198.39	93.70	20.88	83.89
C40-S-1	58.88	78.89	179.06	59.64	37.42	82.73
C40-S-2	69.42	96.60	290.57	110.39	46.28	134.00
C40-S-3	57.84	118.93	276.56	142.28	26.20	108.12
C40-D-1	53.61	90.55	216.57	91.52	28.50	96.67
C40-D-2	73.56	119.15	207.68	85.03	42.07	80.93
C40-D-3	65.72	75.97	244.94	99.18	35.86	109.96
C40-T-1	73.93	96.77	335.59	141.15	46.09	148.37
C40-T-2	72.65	94.43	256.72	90.75	46.96	119.32
C40-T-3	65.21	101.82	187.36	69.86	42.63	76.14
C50-1	90.63	88.94	449.08	206.22	58.87	183.99
C50-2	77.49	115.06	365.67	161.93	45.94	157.80
C50-3	80.60	139.65	357.04	157.33	51.17	148.56
C50-S-1	102.85	159.31	377.28	147.11	84.26	146.29
C50-S-2	86.02	95.04	320.73	94.52	73.99	152.55
C50-S-3	93.41	134.44	390.13	152.20	67.93	170.01
C50-D-1	82.57	98.97	269.02	85.93	59.75	123.67
C50-D-2	81.50	112.24	380.71	155.33	56.26	169.15
C50-D-3	99.98	114.17	406.11	138.51	83.89	183.76
C50-T-1	97.46	92.16	396.38	127.05	81.62	187.78
C50-T-2	103.00	95.10	428.56	156.14	81.82	190.60
C50-T-3	108.39	119.75	362.46	113.31	91.64	157.57

160 s⁻¹. 图 5 显示了冲击荷载下单掺、双掺、三掺及素混凝土试样的应力-应变曲线, 其中 C30-1、C40-3 和 C50-2 表示素混凝土试样。

根据表 2 中的统计数据, 计算了每种类型混凝土试样的平均动态强度及标准差, 如图 6 所示. 在混凝土中加入钢纤维材料能够显著提升混凝土的动态强度, 采用 C30 混凝土, 其单掺、双掺和三掺钢纤维混凝土动态强度比素混凝土强度分别提高了 53.81%、24.42% 和 135.60%; 采用 C40 混凝土,

其单掺、双掺和三掺钢纤维混凝土动态强度分别提高了 36.67%、41.62% 和 55.50%; 采用 C50 混凝土, 其单掺、双掺和三掺钢纤维混凝土动态强度分别提高了 11.08%、6.16% 和 24.18%. 结果显示素混凝土动态强度越小, 加入钢纤维提升动态强度越显著, 其中三掺钢纤维混凝土对动态强度提升最大. C30 和 C50 单掺混凝土试样的动态强度大于双掺混凝土, 采用 C40 的混凝土则刚好相反, 说明双掺钢纤维对不同标号混凝土试样动态强度的影响不同。

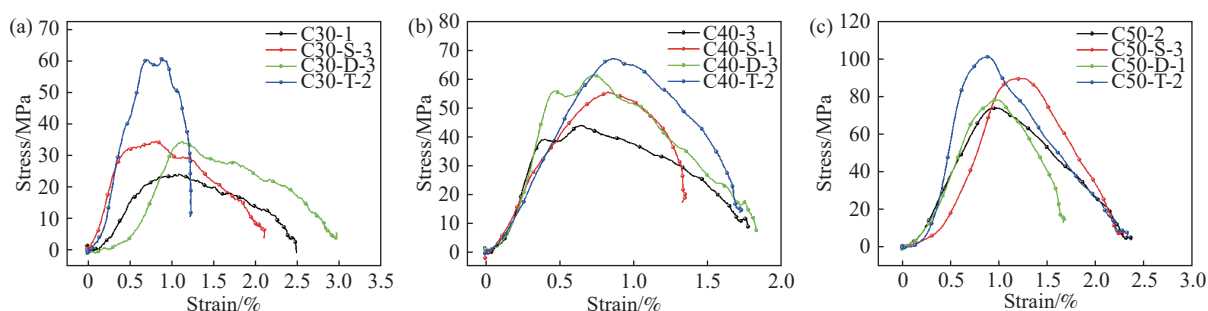


图 5 冲击荷载下不同标号混凝土典型试样的动态应力-应变曲线. (a) C30; (b) C40; (c) C50

Fig.5 Dynamic stress-strain curves of typical specimens of different concrete grades under impact loading: (a) C30; (b) C40; (c) C50

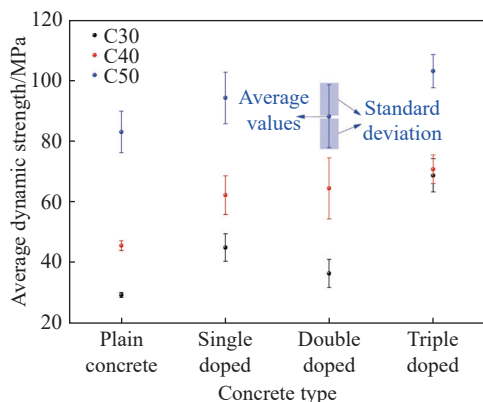


图 6 混凝土试样的平均动态强度及标准差

Fig.6 Average dynamic strength and standard deviation of concrete samples

3.3 能量分析

图 7 对比了不同掺配方案下 3 种标号混凝土试样在冲击荷载下的能量演化规律. C30 混凝土的平均入射能范围 176.96 ~ 299.76 J, 三掺混凝土试样的入射能偏小, 可能是因为氮气瓶气压较低导致. C40 和 C50 混凝土试样的平均入射能范围分别为 203.16 ~ 259.89 J 和 351.95 ~ 395.80 J, 同标号混凝土试样的入射能相差不大, 保证了试验过程良好的一致性. 与素混凝土相比, 加入钢纤维的混凝土试样的反射能占比降低, 透射能和耗散能占比增加. C30 混凝土试样的能量占比对钢纤维掺配方

案更加敏感, 其反射能、耗散能占比波动的幅度较大. C40 和 C50 混凝土试样按照素混凝土、单掺、双掺、三掺顺序, 其反射能占比依次降低, 透射能和耗散能占比逐渐增加. 3 种标号混凝土试样在三掺方案下的耗散能占比最高, 说明三掺钢纤维能够最大程度地增加混凝土的吸能特性, 有利于井壁的支护. 反射能占比与弹性杆和试样的波阻抗大小有关, 反射能占比降低表示试样的波阻抗增大, 因此在相同混凝土标号下, 三掺钢纤维混凝土的波阻抗最大。

3.4 应变演化及破坏模式

以试样 C30-T-2 为例, 基于 DIC 技术获取了混凝土试样在冲击荷载作用下的应变场演化, 如图 8 所示. 由图 8(b) 观察到, 当时间为 0 μs 时, 对应图 8(a) 中 A 点, 冲击荷载尚未作用在试样上, 试样表面无应变. 当时间为 75.6 μs 时, 此时对应图 8(a) 中 B 点, 荷载大约为峰值荷载的 50%, 试样表面的应变仍然呈现均匀的分布, 并没有出现较大的应变集中. 当荷载处于峰值时, 对应图 8(a) 中 C 点, 最大主应变开始出现局部集中, 主应变云图表现为一条绿色的应变集中带, 应变值 ϵ_1 的范围为 0.10% ~ 0.40%. 当时间为 163.8 μs 时, 对应图 8(a) 中 D 点, 绿色的应变集中带演化为一红色的应变集中区域, 并且应变值明显增大. 当时间为 214.2 μs 时, 对

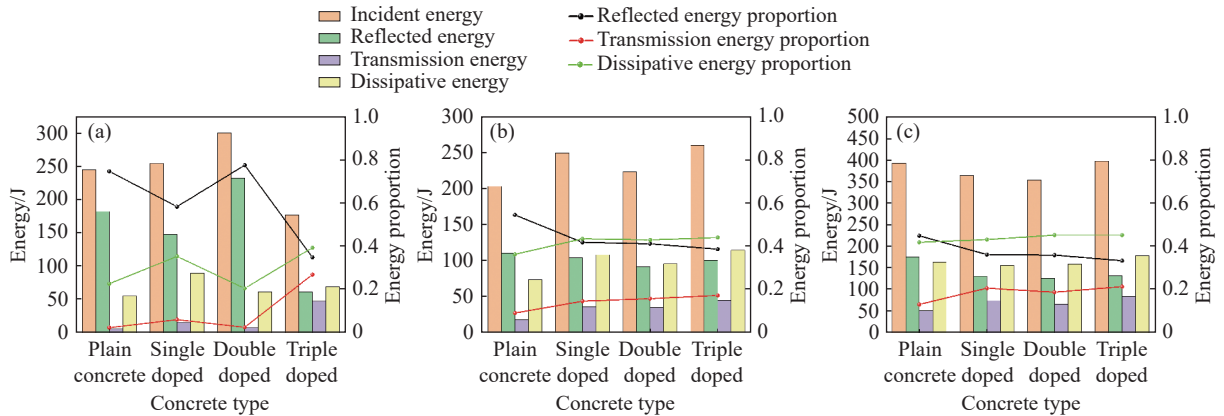


图7 冲击荷载下不同标号混凝土试样的能量及占比。(a) C30; (b) C40; (c) C50

Fig.7 Energy and percentage of concrete specimens of different grades under impact loading: (a) C30; (b) C40; (c) C50

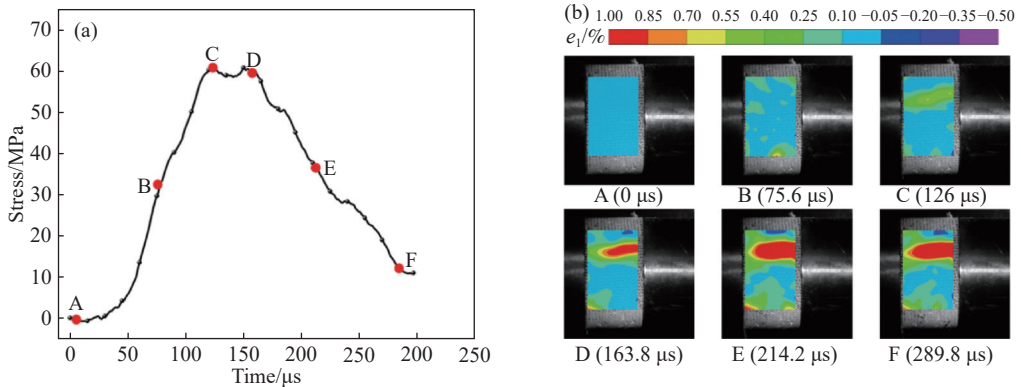


图8 试样 C30-T-2 在冲击荷载下的应力-时间曲线 (a) 及典型时刻的最大主应变云图 (b)

Fig.8 Stress-time curve of sample S30-T-2 under impact load (a) and contour of major principal strain at a typical moment (b)

应图 8(a) 中 E 点, 应变集中区域继续变大, 并且向透射杆扩展一段距离, 区域的最大主应变值继续增大. 冲击荷载作用完成后, 即应变-时间曲线上的 F 点, 主应变集中区域已经扩展至试样与透射杆的接触面, 试样最终发生劈裂破坏. 由最大主应变云图的演化过程, 可以得到试样 C30-T-2 发生与冲击荷载方向平行的劈裂破坏, 并且起裂点为试样与入射杆的接触端, 裂纹扩展方向与冲击荷载方向相同.

试样最终破坏模式受混凝土型号和钢纤维掺配方案影响, 表 3 统计了 3 种标号混凝土试样在不同掺配方案下的最终破坏模式. 混凝土试样的破坏模式主要分 3 种: 剪切破坏、劈裂破坏和剪切-劈裂复合破坏. C30 混凝土试样的掺配方案由素混凝土改变至单掺、双掺和三掺, 混凝土试样的破坏模式由剪切破坏改变至剪切-劈裂复合破坏再至劈裂破坏, 且裂纹数量不断减少. C40 混凝土试样在冲击荷载下发生剪切-劈裂复合型破坏, 且均是在入射端发生剪切破坏, 在透射端发生劈裂破坏, 然后剪切裂纹和劈裂拉伸裂纹相连, 形成破裂主

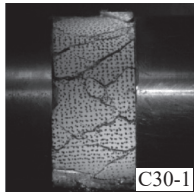
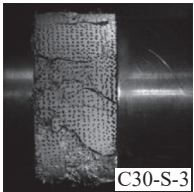
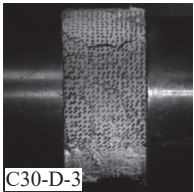
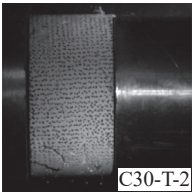
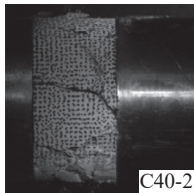
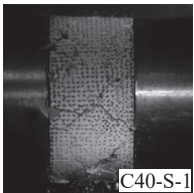
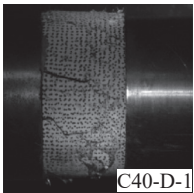
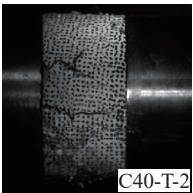
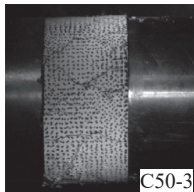
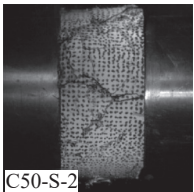
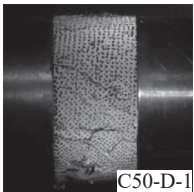
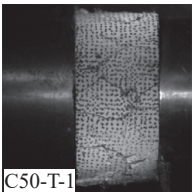
裂纹. C50 混凝土试样同样以剪切-劈裂复合破坏为主, 但与 C40 混凝土试样不同. 试样 C50-3 发生“X”型的剪切破坏, 并且在剪切裂纹两侧存在劈裂拉伸裂纹. 试样 C50-S-2 与入射杆和透射杆接触的部位发生劈裂破坏, 两条劈裂拉伸裂纹的岩桥部分发生剪切破坏; 试样 C50-D-1 的破坏模式与试样 C50-S-2 相似; 而试样 C50-T-1 在与入射杆和透射杆的接触部位发生剪切破坏, 并且两条剪切裂纹近似平行, 剪切裂纹之间的岩桥部位被与端部剪切裂纹不平行的剪切裂纹贯通. 综上所述, 与素混凝土试样相比, 钢纤维混凝土试样在冲击荷载下裂纹数量更少, 试样完整度较高, 说明在混凝土中加入钢纤维能有效抑制裂纹的扩展, 增加井壁稳定性.

3.5 动态损伤演化

利用 SHPB 试验系统对 3 种标号不同掺配方案的混凝土试样进行动力学非破坏性试验, 研究混凝土试样在冲击荷载下的损伤演化, 选用的冲击气压值为 0.25 MPa. 根据金解放等^[25]的研究, 利用波速仪测试冲击前后试样的波速(图 9), 引入动

表 3 冲击荷载下混凝土试样的典型破坏模式

Table 3 Typical failure modes of concrete specimens under impact load

Concrete grades	Plain concrete	Single-doped	Double-doped	Triple-doped
C30	 C30-1	 C30-S-3	 C30-D-3	 C30-T-2
C40	 C40-2	 C40-S-1	 C40-D-1	 C40-T-2
C50	 C50-3	 C50-S-2	 C50-D-1	 C50-T-1

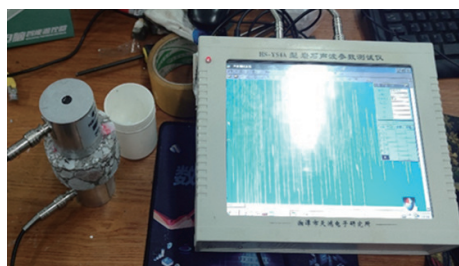


图 9 试样纵波波速测试示意图

Fig.9 Schematic of longitudinal wave velocity of samples

态损伤因子 D , 用以表征试样的损伤程度, 其计算公式如下:

$$D = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \quad (8)$$

其中, V_2 和 V_1 分别为试样冲击后和冲击前的纵波波速.

当混凝土试样受到冲击荷载后, 试样内部微裂纹发育、扩展, 导致纵波波速降低. 试样微裂纹越发育, 其纵波波速降低比例越大, 进而损伤因子也越大. 图 10 为单次冲击后混凝土试样的平均损伤因子. C30、C40 和 C50 素混凝土试样在单次冲击荷载下的平均损伤因子分别为 0.45、0.43 和 0.36. C30 单掺、双掺和三掺钢纤维混凝土试样的平均损伤因子与 C30 素混凝土试样相比分别降低了 13.3%、2.2%、13.3%; C40 单掺、双掺和三掺钢纤维混凝土试样的平均损伤因子与 C40 素混凝土试样相比分别降低了 16.3%、11.6%、16.3%; C50 单

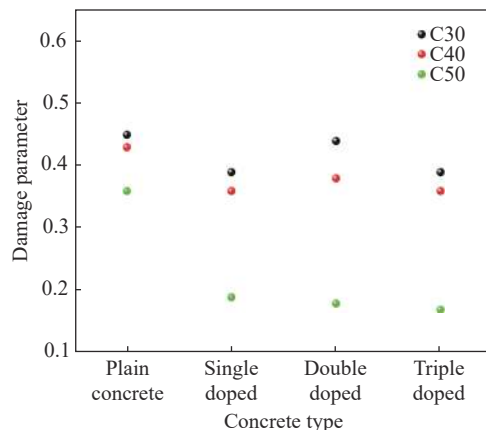


图 10 单次冲击后混凝土试样的平均损伤因子

Fig.10 Average damage factor of concrete samples after a single impact

掺、双掺和三掺钢纤维混凝土试样的平均损伤因子与 C50 素混凝土试样相比分别降低了 47.2%、50.0%、52.8%. 不同标号混凝土试样的损伤因子均是在三掺钢纤维下最小, 说明三掺钢纤维能最大程度上抑制混凝土试样的损伤. C50 混凝土试样在 3 种钢纤维掺配方案下的损伤因子降低的程度最大, 即钢纤维的掺入对高强度混凝土的损伤抑制更显著. 从损伤力学角度, 在混凝土中掺配钢纤维能够更大程度抵御外部动态荷载, 保证井壁混凝土的长期稳定性.

4 结论

(1) 掺入钢纤维, 混凝土试样动态强度增大; 不

同标号三掺钢纤维混凝土试样动态强度最大; 素混凝土试样动态强度越小, 加入钢纤维后对动态抗压强度的提升越显著。

(2) 与素混凝土试样相比, 钢纤维混凝土试样反射能占比降低, 透射能及耗散能占比增加; 低强度素混凝土试样的能量占比对钢纤维掺配方案更加敏感; 三掺钢纤维显著提升混凝土的吸能特性, 有利于深部竖井井壁支护。

(3) 与素混凝土试样相比, 钢纤维混凝土试样在冲击荷载下裂纹数量更少, 说明在混凝土中加入钢纤维能有效抑制裂纹的扩展, 增加井壁的稳定。

(4) 三掺钢纤维混凝土能最大程度上抑制混凝土试样的损伤, 并且钢纤维的掺入对高强度混凝土的损伤抑制更显著, 建议矿山深部竖井衬砌支护采用混凝土标号为 C50, 并且每立方混凝土掺配端钩型长纤维 40 kg、镀铜平直型中长纤维 5 kg 以及短镀铜平直型短纤维 10 kg。

参 考 文 献

- [1] Gu J C, Fan J Q, Kong F L, et al. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology. *Chin J Rock Mech Eng*, 2014, 33(6): 1081
(顾金才, 范俊奇, 孔福利, 等. 抛掷型岩爆机制与模拟试验技术. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1081)
- [2] Li X B, Zhou Z L, Lok T S, et al. Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2008, 45(5): 739
- [3] Li L, Wu A X, Wang Y M, et al. Mechanism of wet shotcrete interacting with rock in support systems. *J Cent South Univ*, 2013, 20(3): 821
- [4] Ye Z B, Li Y C, Zhao K, et al. A new impact dynamic constitutive relation of steel fiber reinforced concrete and the determination of material parameters. *Explos Shock Waves*, 2018, 38(2): 266
(叶中豹, 李永池, 赵凯, 等. 一种新形式的钢纤维混凝土冲击动态本构关系及材料参数的确定. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 266)
- [5] Du X L, Dou G Q, Li L, et al. Exeperimental study on dynamic mechanical properties of fiber reinforced high strength concrete. *Eng Mech*, 2011, 28(4): 138
(杜修力, 窦国钦, 李亮, 等. 纤维高强混凝土的动态力学性能试验研究. *工程力学*, 2011, 28(4): 138)
- [6] Zhao G M, Ma W W, Meng X R. Damage modes and energy characteristics of rock-like materials under dynamic load. *Rock Soil Mech*, 2015, 36(12): 3598
(赵光明, 马文伟, 孟祥瑞. 动载作用下岩石类材料破坏模式及能量特性. *岩土力学*, 2015, 36(12): 3598)
- [7] Li X F, Li H B, Liu K, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rocks subject to impact loading. *Chin J Rock Mech Eng*, 2017, 36(10): 2393
(李晓峰, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(10): 2393)
- [8] Sun X W, Zhao K, Li Y C, et al. A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete. *Constr Build Mater*, 2018, 158: 657
- [9] Yang L, Lin X S, Gravina R J. Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete. *Constr Build Mater*, 2018, 190: 632
- [10] Dong J Q, Du Y T. Impact damage characteristics of basalt fiber reinforced concrete based on ultrasonic technology. *Highway*, 2014, 59(2): 171
(董进秋, 杜艳廷. 基于超声波技术的玄武岩纤维混凝土冲击损伤特性. *公路*, 2014, 59(2): 171)
- [11] Xie L, Li Q H, Xu S L. Multiple impact compressive properties and constitutive model of ultra-high toughness cementitious composites. *Eng Mech*, 2021, 38(12): 158
(谢磊, 李庆华, 徐世焯. 超高韧性水泥基复合材料多次冲击压缩性能及本构关系. *工程力学*, 2021, 38(12): 158)
- [12] Chen Z, Chen X D, Feng L, et al. Impact compression mechanical properties and damage characteristics of steel fiber ultra-high performance concrete under passive confining pressure. *Water Resour Hydropower Eng*, 2023, 54(3): 174
(陈璋, 陈徐东, 冯璐, 等. 被动围压下钢纤维超高性能混凝土冲击压缩力学特性与损伤特征. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(3): 174)
- [13] Xu T F, Zhang Z Y, Bian X G, et al. Influence of steel fibers on creep damage and failure behaviors of UHPC. *J Tongji Univ (Nat Sci)*, 2023, 51(12): 1813
(徐腾飞, 张子颀, 卞香港, 等. 钢纤维对超高性能混凝土徐变损伤与失效行为的影响. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(12): 1813)
- [14] Yin S H, Liu J M, Chen W, et al. Optimization of the effect and formulation of different coarse aggregates on performance of the paste backfill condensation. *Chin J Eng*, 2020, 42(7): 829
(尹升华, 刘家明, 陈威, 等. 不同粗骨料对膏体凝结性能的影响及配比优化. *工程科学学报*, 2020, 42(7): 829)
- [15] Xie F J, Zhang J S, Chen J H. Dynamic damage model of rock under impact loads of compression and tension. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2019, 50(2): 420
(谢福君, 张家生, 陈俊桦. 冲击荷载作用下岩石压动态和拉动态损伤模型. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(2): 420)
- [16] Wu X Y, Jiang L S, Xu X G, et al. Numerical analysis of deformation and failure characteristics of deep roadway surrounding rock under static-dynamic coupling stress. *J Cent South Univ*, 2021, 28(2): 543
- [17] Yin T B, Wang P, Li X B, et al. Effects of thermal treatment on physical and mechanical characteristics of coal rock. *J Cent South*

- Univ*, 2016, 23(9): 2336
- [18] Xiao P, Li D Y, Zhao G Y, et al. Mechanical properties and failure behavior of rock with different flaw inclinations under coupled static and dynamic loads. *J Cent South Univ*, 2020, 27(10): 2945
- [19] Zhou Z L, Zou Y, Li X B, et al. Stress evolution and failure process of Brazilian disc under impact. *J Cent South Univ*, 2013, 20(1): 172
- [20] Yu L Y, Zhang T, Zhu Z H, et al. Physical and dynamic mechanical behaviors of marble after heat treatment in quasi-vacuum and air-filled environments. *J Cent South Univ*, 2021, 28(9): 2770
- [21] Dai B, Shan Q W, Chen Y, et al. Mechanical and energy dissipation characteristics of granite under cyclic impact loading. *J Cent South Univ*, 2022, 29(1): 116
- [22] Xie Q, Li S X, Liu X L, et al. Effect of loading rate on fracture behaviors of shale under mode I loading. *J Cent South Univ*, 2020, 27(10): 3118
- [23] Li M, Mao X B, Lu A H, et al. Effect of specimen size on energy dissipation characteristics of red sandstone under high strain rate. *Int J Min Sci Technol*, 2014, 24(2): 151
- [24] Ma J Y, Li D Y, Luo P K, et al. Dynamic damage and failure of layered sandstone with pre-cracked hole under combined cyclic impact and static loads. *Rock Mech Rock Eng*, 2023, 56(3): 2271
- [25] Jin J F, Li X B, Yin Z Q, et al. A method for defining rock damage variable by wave impedance under cyclic impact loadings. *Rock Soil Mech*, 2011, 32(5): 1385
(金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 循环冲击下波阻抗定义岩石损伤变量的研究. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1385)