

文章编号:1007-9629(2022)04-0344-09

碳纤维布约束下水泥砂浆动态力学及能量特征

王佳¹, 徐颖^{1,2,*}, 杨荣周¹, 郑强强¹, 倪贤¹

(1.安徽理工大学土木建筑学院,安徽淮南 232001;2.安徽理工大学省部共建深部
煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽淮南 232001)

摘要:为研究碳纤维复合材料(CFRP)对水泥砂浆的加固效果,针对普通水泥砂浆和 CFRP 布端面约束水泥砂浆,采用分离式霍普金森压杆(SHPB)分别进行恒定气压(0.3 MPa)和递增气压(0.2、0.3、0.4、0.5 MPa)循环冲击压缩试验,分析了试件的应力-应变曲线、破坏形态和能量特征.结果表明:与普通水泥砂浆试件相比,CFRP 布端面约束水泥砂浆试件的循环冲击次数、峰值应力和峰值应变均有显著提高,且其峰值应力随着应变率的提高而增大;CFRP 布的断裂部位主要发生在碳纤维横向连接处,CFRP 布减缓了试件内部裂缝的产生,提高了试件的延性,表现出更好的抗冲击能力,试件的残余强度增加;端面粘贴 CFRP 布可以提高水泥砂浆的能量吸收能力,在相同冲击气压作用下,CFRP 布端面约束水泥砂浆产生裂纹所需的能量高于普通水泥砂浆.

关键词:碳纤维复合材料;分离式霍普金森压杆;水泥砂浆;动态力学;能量特征;循环荷载

中图分类号:TU501

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.003

Dynamic Mechanics and Energy Properties of Cement Mortar with CFRP Confines

WANG Jia¹, XU Ying^{1,2,*}, YANG Rongzhou¹, ZHENG Qiangqiang¹, NI Xian¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to explore the reinforcement effect of carbon fibre reinforced plastics(CFRP) pasted on cement mortar, the cyclic compressive impact tests were carried out on ordinary cement mortar and cement mortar with CFRP on the end faces with constant impact pressure(0.3 MPa)and increasing impact pressure(0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa) by using split Hopkinson pressure bar(SHPB)system. The stress-strain curves, failure states, and energy properties of specimens under cyclical impact compression test were analyzed. The results show that compared with ordinary cement mortar, the number of cyclic impact, peak stress and peak strain of CFRP-attached cement mortar are increased. The failure state shows that the fracture site of CFRP mainly occurred at the transverse connection of CFRP. The generation of cracks are slowed down and the ductility of specimens is improved. The impact resistance is obtained by the introduction of CFRP. CFRP can improve the energy absorption capacity of the specimens, so that the energy required for cracking of cement mortar with CFRP end face confines specimen under the same impact air pressure is higher than ordinary cement mortar.

Key words: carbon fibre reinforced plastic (CFRP); split Hopkinson pressure bar (SHPB); cement mortar; dynamic mechanics; energy property; cyclic loading

收稿日期:2020-12-09; 修订日期:2021-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074009)

第一作者:王佳(1997—),女,山西朔州人,安徽理工大学硕士生.E-mail:944109713@qq.com

通讯作者:徐颖(1965—),男,安徽泗县人,安徽理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yxu@aust.edu.cn

当前,建筑行业的发展已进入工程新建与维修并重的阶段.由于建筑物常年暴露在恶劣环境中,受到地震、爆炸和碰撞等动态扰动的影响,越来越多的建筑物需要改造、维修和加固^[1-2].研究表明^[3-6],CFRP具有质量轻、刚度大、抗拉强度高和弹性模量高等优点,并且只需在结构表面粘贴,施工速度快、周期短、成本低.因此,使用CFRP加固混凝土结构是一种经济有效的方法,可广泛应用于建筑物梁、板、柱、墙的加固^[7-8].

目前国内外高校和研究机构针对CFRP布的加固试验多集中于混凝土柱环向约束的研究.如高鹏等^[9]研究发现,随着混凝土强度等级的提高,CFRP对混凝土柱的加固效果愈发显著,混凝土柱受压承载力逐渐增强;Yang等^[10]研究了CFRP层数对方形混凝土柱力学性能的影响;Amran等^[11]研究了CFRP对混凝土透水性能和硬化性能的影响;Kabir等^[12]使用CFRP对严重受损的梁进行加固,其修复效果表明受损梁的刚度和强度恢复率在110%以上.

众多学者研究了混凝土在静态和动态抗压试验条件下CFRP布的力学性能,但对于粘贴CFRP布的混凝土构件局部动态力学性能及能量分析的研究可能尚存在空白.由于混凝土和水泥砂浆均为水泥基材料,都具有较高的抗压强度和耐久性能,同时存在脆性高、塑性收缩大、抗拉强度低及抗冲击韧性差等缺陷,因此本文以水泥砂浆为研究对象,开展了CFRP布端面约束水泥砂浆的分离式霍普金森压杆(SHPB)试验,分析了试件在循环冲击压缩试验下的应力-应变曲线、破坏形态和能量特征.

1 试验

1.1 SHPB系统及试验方法

试验采用安徽理工大学冲击动力学实验室 $\phi 50$ SHPB试验系统,对水泥砂浆试件进行不同循环方式的单轴冲击压缩试验.杆件为高合金钢,其弹性模量为210 GPa,波速为5 190 m/s.SHPB系统各装置如图1所示.

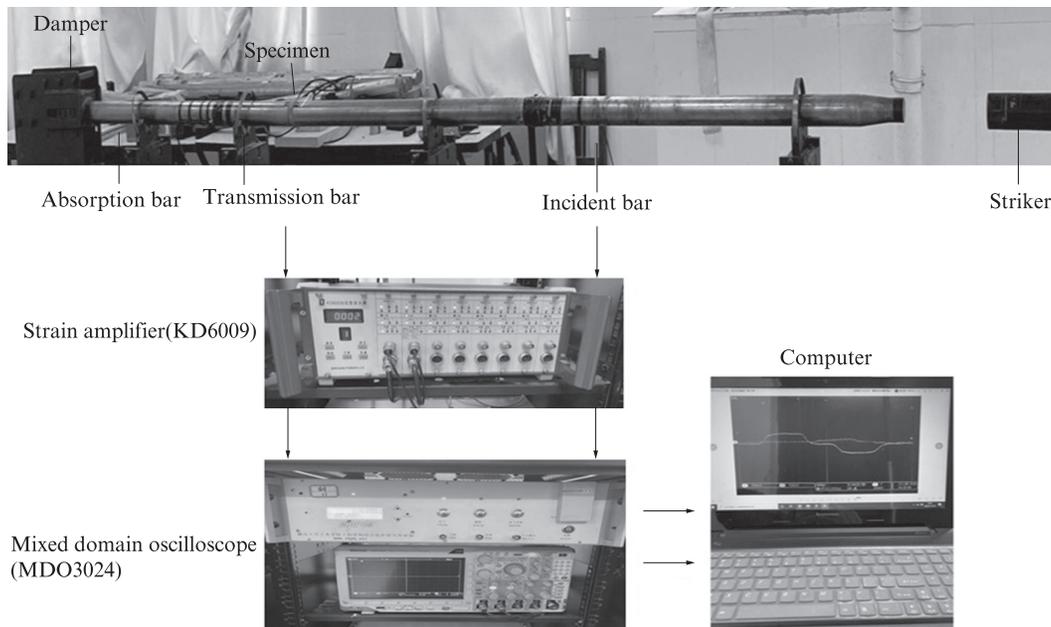


图1 SHPB测试系统
Fig. 1 SHPB test system

试验前调整霍普金森压杆入射杆、撞击杆和透射杆的轴线,使其处于同一直线上.在试件与杆的接触面涂上凡士林,以减少端面摩擦约束.入射杆和透射杆中部贴有应变片,按照一维应力波理论和均匀性假定^[13],试件的应力、应变和应变率计算表达式如下:

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_s} E \epsilon_s(t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \epsilon_r(t) \quad (3)$$

式中: σ 、 ϵ 和 $\dot{\epsilon}$ 分别为试件的应力、应变和应变率; ϵ_s 为透射波应变; ϵ_r 为反射波应变; A_s 、 l_s 分别为试件的横截面积和长度; A 、 E 分别为压杆的横截面积和弹性模量; C_0 为应力波在压杆中的传播速率; t 为冲击时间.

1.2 试验材料、配合比及试件制备

胶凝材料采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;细骨料采用中砂,密度为2 600 kg/m³、细度模数为2.6;拌和水为实验室自来水.试件配合比m(水):m(水泥):m(中砂)=1:2:4^[14].

试件制备过程如下:(1)按照材料配比制备水泥砂浆混合料,并将新拌混合料倒入内径50 mm,高度100 mm的模具中.(2)在养护室内放置24 h后脱模,然后将试件置于(20±2)℃、相对湿度95%的环境中养护28 d.(3)待试件养护完成后,将φ50×100 mm的圆柱体试件切割、打磨为φ50×25 mm的冲击试件.(4)采用湿粘法将CFRP布(材料物理性能见表1)加固于水泥砂浆试件的端面,步骤如下:首先在CFRP布的一面充分涂抹环氧树脂;然后将CFRP布平铺到试件的端面,并且在CFRP布表面反复辊压,直到赶出气泡为止;最后在室温中放置3 d左右至粘贴牢固.表2为试件循环冲击气压和冲击次数.

表1 CFRP布物理性能

Table 1 Physical property of CFRP sheet

Gram weight/(g·m ⁻¹)	Thickness/mm	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation break/%
200	0.111	≥3 000	≥2 100	≥1.5

表2 试件循环冲击气压和冲击次数

Table 2 Cyclic impact pressure and impact times of specimens

Specimen No.	Code	Number of impact/times	Cyclic impact pressure/MPa
C-P	C-P-1	1	0.3
	C-X-1	1	0.3
C-X	C-X-2	2	0.3
	C-X-3	3	0.3
	C-X-4	4	0.3
V-P	V-P-1	1	0.2
	V-P-2	2	0.3
V-X	V-X-1	1	0.2
	V-X-2	2	0.3
	V-X-3	3	0.4
	V-X-4	4	0.5

Note: C—Constant cyclic pressure; V—Increasing cyclic impact pressure; P—Ordinary cement mortar specimen; X—Cement mortar specimen with CFRP on the end face; The number on the right of specimen No. represents the cyclic impact times.

2 试验结果与分析

2.1 应力平衡性分析

本文采用SHPB系统测试水泥砂浆的动态抗压强度.只有达到应力平衡状态时,水泥砂浆的动态抗

压强度才是有效的^[11].图2为普通水泥砂浆V-P-1的平衡三波图.由图2可见,V-P-1的入射波和反射波之和与透射波曲线几乎重合,说明在不考虑时间滞后的情况下,试验达到应力平衡状态.

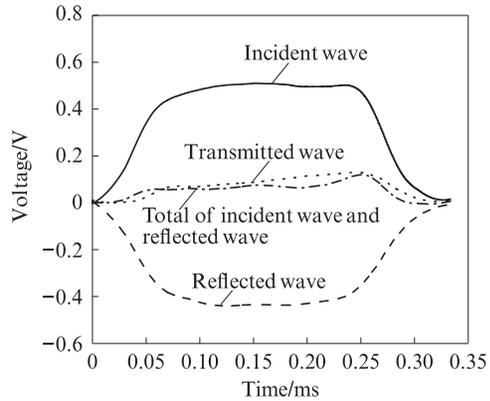


图2 V-P-1的平衡三波图

Fig. 2 Equilibrium three wave diagram of V-P-1

2.2 应力-应变曲线分析

图3为各试件在循环冲击荷载下的应力-应变曲线.图3显示,普通水泥砂浆试件C-P、V-P与CFRP布端面约束水泥砂浆试件C-X与V-X在循环冲击后的应力-应变曲线形状基本一致.说明2类水泥砂浆试件本身差异较小.这为研究水泥砂浆试件在冲击荷载作用提供了良好条件.

由图3(a)、(b)可知:V-P-2的峰值应力明显大于C-P-1,主要原因是试件V-P在第1次冲击时气压较小,冲击荷载不足以使试件破坏,冲击后试件内部部分微裂缝和微孔隙被压密,试件出现应变硬化现象,在一定程度上增强了试件的强度,因此当再次冲击且冲击气压增大时,入射波的传播速度远大于试件裂缝的发展速度,在短时间内试件内部冲击能无法耗散,表现出较高的应力水平;随着应变率的增大,试件内部积聚的冲击能进一步增大,致使其产生更高的应力值^[15].由图3(c)、(d)可知:(1)CFRP布和循环冲击次数均显著影响CFRP布端面约束水泥砂浆试件的应力-应变曲线.(2)随着冲击次数的增加,CFRP布端面约束水泥砂浆试件在初始变形阶段的应力-应变曲线斜率逐渐减小,即冲击荷载作用下试件内部微裂纹被压密的时间越来越久,这是由于循环冲击后试件内部产生了更多的微裂缝;在后续冲击作用下,试件内部微裂缝逐渐闭合,应力达到峰值后迅速下降,应力-应变曲线呈现脆性行为;随着冲击次数的增加,CFRP布端面约束水泥砂浆试件的峰值应变逐渐增大,峰值应力先增加后减小,这是由于裂缝被压密后出现应变硬化现象,使得第2次冲击后

峰值应力显著增大;试件 C-X 经历第 3 次、第 4 次冲击后,试件内部裂缝逐渐延伸,与过渡区的原始裂缝相互贯通,导致试件强度逐渐降低,直到破坏。

由图 3 还可见:首次冲击后,C-X-1 的峰值应力相较于 C-P-1 增加了 16.7%,而 V-X-1 的峰值应力相较于 V-P-1 变化不大,这主要由于在冲击应力较小的情况下,试件塑性变形较小,CFRP 未起到明显的强度增强作用。值得一提的是,相较 V-P-2,V-X-2 的峰值应力增加了 13.6%,且 V-X-3 仍出现峰值应力增大

的现象,说明在冲击次数增加且冲击气压增大的情况下 CFRP 起到了明显的约束作用。通过调整冲击气压从而增大应变率,从 V-P-1、C-P-1 与 V-X-1、C-X-1 的峰值应力可以看出,材料的峰值应力随着应变率增高而增高,反映出应变率效应。同时粘贴 CFRP 布后试件的延性显著增强,这对工程应用有较好的参考意义。综上所述,在 CFRP 布加固作用下,试件的循环冲击次数、峰值应力和峰值应变均有显著提高。

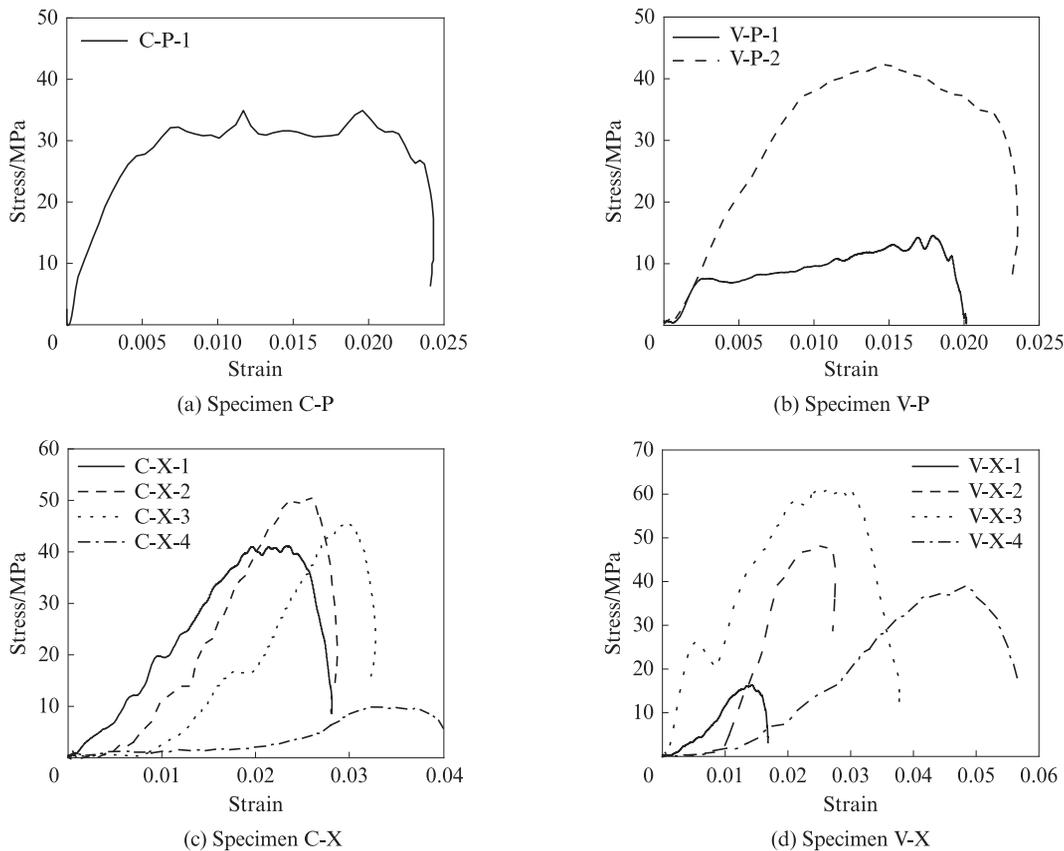


图 3 试件在循环冲击荷载下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of specimens under cyclic impact loading

2.3 破坏状态分析

水泥砂浆的裂缝断裂面主要由水泥、细骨料和界面过渡区组成。试件裂纹的产生是冲击应力作用下损伤不断累积的过程^[16]。在加载过程中,微裂缝多出现在试件相对薄弱处(界面过渡区、试件形成时的损伤处)。随着冲击次数的增加,表面微裂缝的数量也逐渐增加,当微裂缝达到一定数量时,试件可承载的外力开始降低,裂纹开始扩展,再次冲击后裂纹相互贯通,试件发生破碎。图 4 为 C-P-1 和 V-P-2 在循环冲击荷载下的破坏状态。由图 4 可见,普通水泥砂浆试件在冲击压缩试验中表现出明显的脆性破坏,在恒定气压 0.3 MPa 作用下冲击 1 次即出现脆性破坏(图 4(a)),递增气压

作用下冲击 2 次发生完全破坏(图 4(b))。

图 5 为恒定气压 0.3 MPa 作用下 CFRP 布端面约束水泥砂浆试件 C-X 在循环冲击荷载下的破坏状态。试件 C-X 在恒定气压冲击作用下有 4 种破坏形态:(1)未裂形态 第 1 次冲击时,试件侧面未出现明显裂纹,当冲击气压较低时,水泥砂浆试件受到冲击时的应力小于微裂纹的阈值应力,此时试件依然保持完整形态,CFRP 布形态不变;(2)初裂破坏形态(图 5(a)) 第 2 次冲击时,试件侧面开始出现裂纹,产生了不可恢复变形,但 CFRP 布依然完整;(3)边角破坏形态(图 5(b)) 第 3 次冲击时,试件端面的 CFRP 布有明显的被拉伸迹象,试件边缘处产生较大

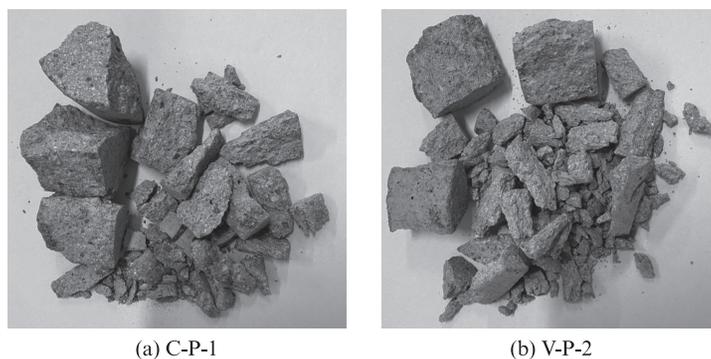


图4 C-P-1和V-P-2在循环冲击荷载下的破坏状态
Fig. 4 Failure state of C-P-1 and V-P-2 under cyclic impact loading

拉应力,内部产生压应力,水泥砂浆的压缩极限远大于拉伸极限,导致大量碎块沿试件边缘脱落,破碎块数量少、体积小;(4)整体开裂破坏形态(图5(c))第4次冲击时,试件端面的CFRP布部分被拉断,内

部裂纹的发展方向与外荷载加载方向一致,形成了许多高度与试件长度相当的柱状碎块,此阶段CFRP布起到连接作用,试件虽然仍旧完整,但内部损伤很大,无法再承受冲击作用。

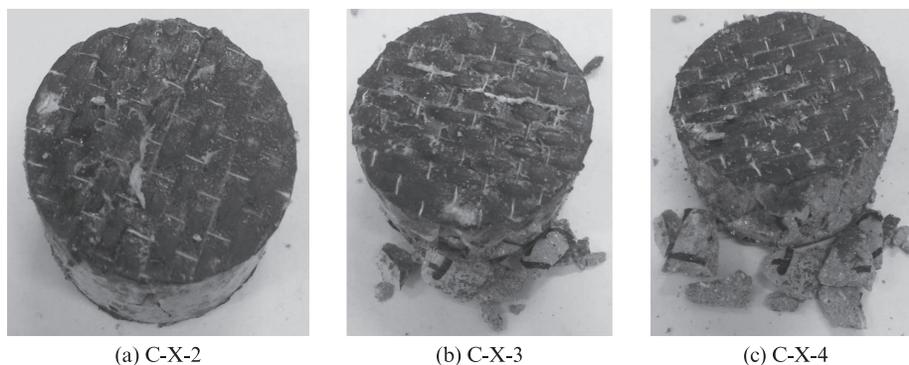


图5 恒定气压循环冲击作用下试件C-X的破坏状态
Fig. 5 Failure state of specimen C-X under cyclic impact of constant air pressure

图6为递增气压循环冲击作用下CFRP布端面约束水泥砂浆试件V-X的破坏状态.由图6可见:与恒定气压相比,递增气压作用下V-X出现了第5种破坏形态,即粉碎性破坏形态(图6(c));冲击气压提高后,对应的冲击荷载较大,试件的横向变形增大,CFRP布在端面的1/2处被拉断,说明试件中部受到

拉应力,其在径向冲击荷载劈裂成柱状体的同时被压成较小的碎块。

由于CFRP布沿纤维方向抗拉强度较高,其断裂部位主要发生在碳纤维的横向连接处.由图6还可见:试件的一侧破坏较严重,这可能由于试件端面与杆端面未完全接触所致;另外试件的初始损伤和后

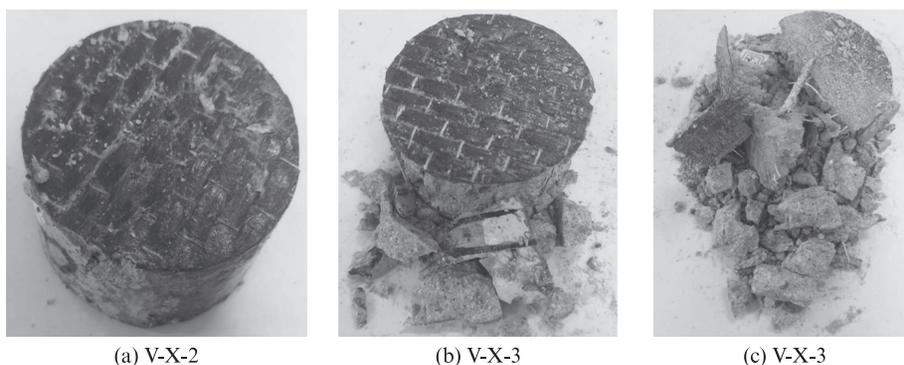


图6 递增气压循环冲击作用下试件V-X的破坏状态
Fig. 6 Failure state of specimen V-X under cyclic impact of increasing air pressure

续损伤具有随机性^[17],其破坏位置具有不确定性,试件受到冲击后,在其薄弱位置先发生破坏^[18].观察试件断裂面后发现,水泥砂浆中砂附近更容易与水泥基体出现剥离现象,其主要原因是在振捣时中砂周围形成了水膜,从而导致这些区域成为薄弱面^[16].

2.4 能量特征分析

在 SHPB 冲击过程中,试件的输入能量(入射能)主要转化为反射能、透射能及吸收能^[19].在 SHPB 系统应力平衡状态下,试件单位体积吸收能(U)可由式(4)^[14]计算得到.

$$U = \frac{W_d}{V} = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \quad (4)$$

其中, $W_d = W_i - W_r - W_t$; $W_i = AEC_0 \int_0^t \epsilon_i^2 dt$; $W_r = AEC_0 \int_0^t \epsilon_r^2 dt$; $W_t = AEC_0 \int_0^t \epsilon_t^2 dt$.

式中: V 为试件的体积; W_i 、 W_r 、 W_t 和 W_d 分别为试件的入射能、反射能、透射能和吸收能.

图 7、8 分别为各试件在循环冲击压缩荷载作用下的单位体积吸收能-时间曲线和透射能-时间曲线.对比图 7(a)、(c)可见:CFRP 布端面约束水泥砂浆试件 C-X 在递增气压循环冲击作用下单位体积吸

收能的总和显著大于普通水泥砂浆试件 C-P; C-X 在冲击入射能相同的情况下,其单位体积吸收能随着冲击次数的增加逐渐减小.

翟越等^[20]研究表明,试件在动态试验中的破碎能主要包括断裂能、碎块动能及其他能量(热能、声能等)3个部分,试件在加载率不是非常高的情况下热能等非常小,可以将其忽略.由于水泥砂浆开始产生微裂缝所吸收的能量大于裂缝扩展所需的能量^[16],在第 1 次冲击后,试件内部吸收的能量用于产生微裂纹;在随后的冲击过程中,微裂缝不断延伸,导致试件有效截面积显著降低,吸收的能量逐渐减小.

从应力波角度来看:由于 CFRP 布与水泥砂浆的状态参数不同,CFRP 布、水泥砂浆和高合金钢杆件的波阻抗值不同,且相差较大;由于应力波会在不同材料界面产生反射波和透射波,恒定气压条件下 CFRP 布端面约束水泥砂浆试件 C-X 受到冲击后,在入射杆与 CFRP 布界面、CFRP 布与水泥砂浆左端面、水泥砂浆右端面与 CFRP 布、CFRP 布和透射杆界面共产生 4 次反射和透射,使得 CFRP 布和水泥砂浆界面存在间断波波阵面^[21].相较 C-P-1, C-X-1 的波阻抗减小,反射波增大,透射波减小(图 8(a)、(c)).

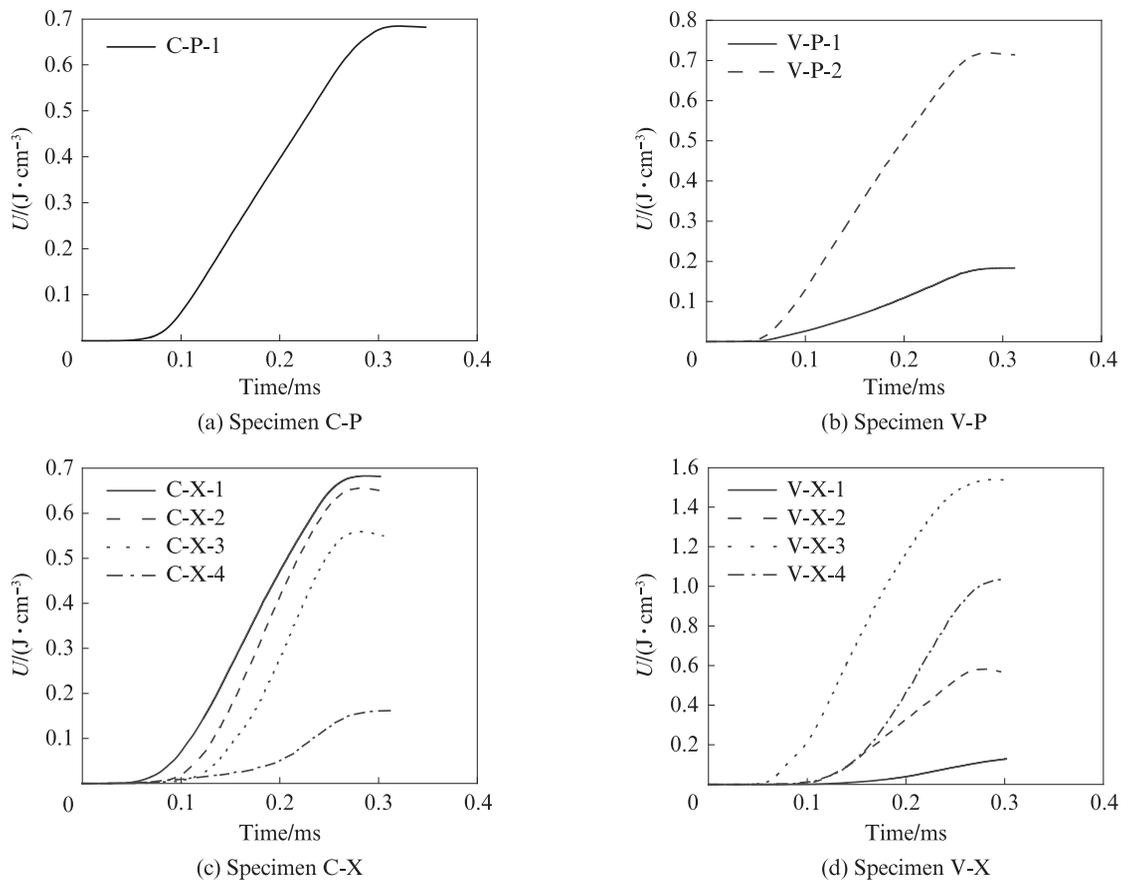


图 7 试件在循环冲击荷载下的单位体积吸收能-时间曲线

Fig. 7 Unit volume absorbed energy-time curves of specimens under cyclic impact loading

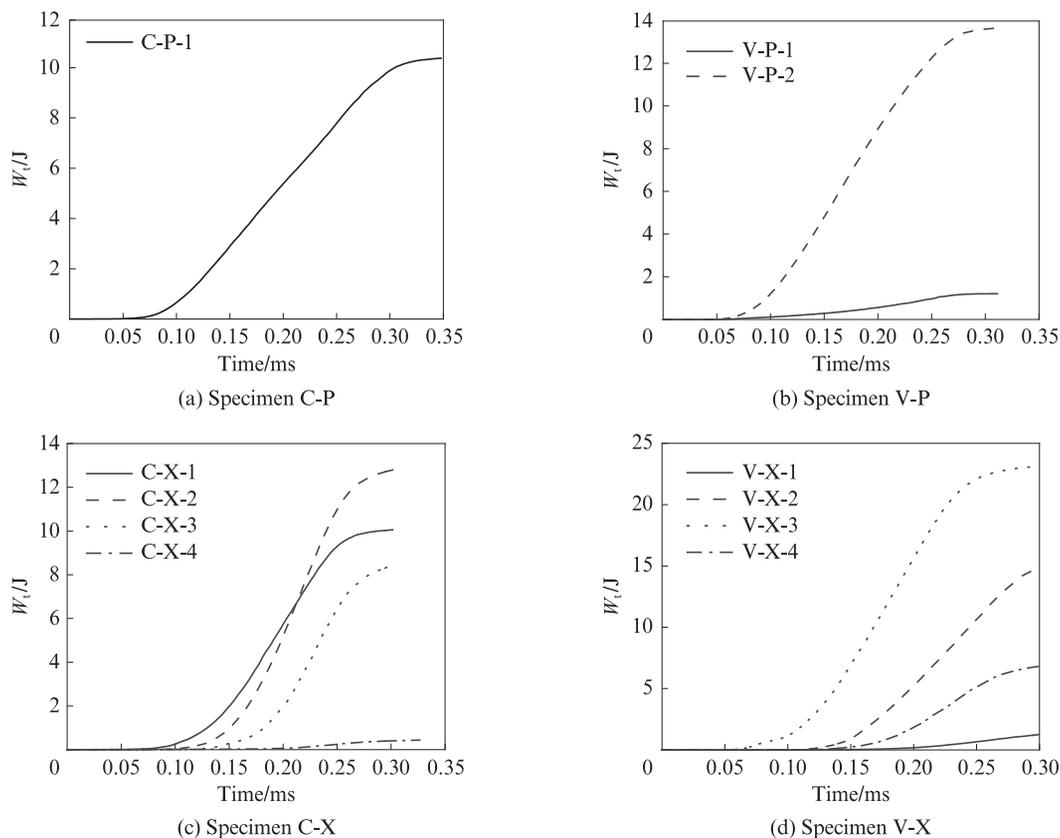


图8 试件在循环冲击荷载下的透射能-时间曲线

Fig. 8 Transmitted energy-time curves of specimens under cyclic impact loading

从吸收能量角度来看:CFRP布中纤维断裂吸收部分能量,应力波经过CFRP布反射部分能量,导致CFRP布端面约束水泥砂浆试件C-X在受到第1次冲击(C-X-1)后产生裂纹所需的能量高于普通水泥砂浆试件;在CFRP布和环氧树脂对水泥砂浆端面的束缚下,水泥砂浆端面不易裂开,不易产生贯穿性裂缝,减缓了大量裂缝的产生,试件在冲击时依然能够保持较好的完整性,提高了其延性,表现出更好的抗冲击能力.

由图8可见:(1)恒定气压条件下,CFRP布端面约束水泥砂浆试件C-X在受到第4次冲击(C-X-4)后,其透射能几乎为0(图8(c));递增气压条件下,CFRP布端面约束水泥砂浆试件V-X在受到第4次冲击(V-X-4)后,其峰值透射能为5 J(图8(d)).这是因为在恒定气压冲击时,入射能基本恒定,试件裂缝仍在原位置扩展,其他位置需要更高能量产生裂缝,随着冲击次数的增加,透射能逐渐降低;在递增气压作用下,试件的入射能逐渐增大,每次均会产生新的损伤位置,导致损伤越来越严重.由图7(d)、图8(d)可见:递增气压条件下,CFRP布端面约束水泥砂浆试件V-X初期冲击能量较小,试件不易破坏;随着冲击气压的增大,试件吸收能逐渐增加,其内部微裂缝

加速发展;试件在受到第3次冲击(V-X-3)后,其透射能迅速增大,试件侧面发生脱落,说明其内部已严重破坏,但因CFRP的加固作用,试件并未完全解体;经历第4次冲击(V-X-4)后,试件的应变率增大,能量不仅可以使之前开裂的裂纹继续扩展,而且产生了更多裂纹,足够大的能量可直接穿过中砂,导致试件破碎的尺寸越来越小^[22].

3 结论

(1)与普通水泥砂浆试件相比,CFRP布端面约束水泥砂浆试件的冲击次数在恒定气压作用下增加了3次,首次冲击后峰值应力增加了16.7%;在递增气压作用下冲击次数增加了2次,在第2次冲击下的峰值应力增加了13.6%,第3次冲击下仍表现出峰值应力增大现象,说明CFRP布起到明显的约束作用.普通水泥砂浆试件的破坏模式为脆性破坏,采用CFRP加固后水泥砂浆试件的破坏模式转变为延性破坏.

(2)在冲击荷载作用下,CFRP布端面约束水泥砂浆试件的破坏形态分为未裂、初裂、边角破坏、整体开裂和粉碎性破坏.端面粘贴CFRP布后,水泥砂浆试件的裂缝大幅减少,其延性提高,表现出更好的

抗冲击能力.

(3)由于CFRP布与水泥砂浆的状态参数不同,在CFRP布与水泥砂浆界面存在间断波波阵面,端面粘贴CFRP布后,水泥砂浆试件的吸收能增大,在相同冲击气压下产生裂纹所需的能量高于普通水泥砂浆试件.

参考文献:

- [1] 梁猛,李守才,褚世宏,等. CFRP约束混凝土圆柱强度及变形特性研究[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2016:1-4.
LIANG Meng, LI Shoucai, CHU Shihong, et al. Research on the strength and deformation characteristics of CFRP-confined concrete cylinders[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2016: 1-4. (in Chinese)
- [2] 杨志勇,陈军东,赵亮. 混凝土结构CFRP加固技术研究[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2019:1-10.
YANG Zhiyong, CHEN Jundong, ZHAO Liang. Research on CFRP reinforcement technology for concrete structures [M]. Wuhan: University of Technology Press, 2019: 1-10. (in Chinese)
- [3] 李威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.
LI Wei, GUO Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212. (in Chinese)
- [4] 张蕊英,刘明. 碳纤维复合材料的发展及应用[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(11): 132-135.
ZHANG Hanying, LIU Ming. Development and application of carbon fiber composite materials [J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(11): 132-135. (in Chinese)
- [5] JI Y C, KIM Y J, JIA Y M. Performance characterization of plain and CFRP-bonded concrete subjected to sulfuric acid [J]. Materials & Design, 2021, 197: 109176.
- [6] 陈小兵. 高性能纤维复合材料土木工程应用技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:1-4.
CHEN Xiaobing. Technical guidelines for civil engineering application of high-performance fiber composite materials[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009: 1-4. (in Chinese)
- [7] 张军伟,王廷彦. CFRP布加固钢筋混凝土短梁受弯性能试验研究[J]. 混凝土, 2020(9): 31-36.
ZHANG Junwei, WANG Tingyan. Experimental study on the flexural performance of reinforced concrete short beams strengthened with CFRP sheets[J]. Concrete, 2020(9): 31-36. (in Chinese)
- [8] COLOMB F, TOBBI H, FERRIER E, et al. Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials [J]. Composite Structures, 2008, 82(4): 475-487.
- [9] 高鹏,黄镜淳,周安,等. 玄武岩纤维布和碳纤维布加固高强混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 139-144, 160.
GAO Peng, HUANG Jingting, ZHOU An, et al. Experimental study on the axial compression performance of high-strength concrete columns reinforced with basalt fiber cloth and carbon fiber cloth[J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 139-144, 160. (in Chinese)
- [10] YANG J L, LU S W, WANG J Z, et al. Behavior of CFRP partially wrapped square seawater sea-sand concrete columns under axial compression[J]. Engineering Structures, 2020, 222: 111119.
- [11] AMRAN Y M, ALYOUSEF R, ALABDULJABBAR H, et al. Properties and water penetration of structural concrete wrapped with CFRP[J]. Results in Engineering, 2020, 5: 100094.
- [12] KABIR M I, SUBHANI M, SHRESTHA R, et al. Experimental and theoretical analysis of severely damaged concrete beams strengthened with CFRP[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 161-174.
- [13] 刘婷,麻海燕,吴彰钰,等. 碱式硫酸镁水泥混凝土的冲击压缩性能研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 562-570.
LIU Ting, MA Haiyan, WU Zhangyu, et al. Study on impact compression performance of basic magnesium sulfate cement concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 562-570. (in Chinese)
- [14] XU Y, YANG R Z. Dynamic mechanics and damage evolution characteristics of rubber cement mortar under different curing humidity levels[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(10): 04020309.
- [15] 岳承军. 珊瑚混凝土高速冲击力学性能的实验研究与数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019: 68-79.
YUE Chengjun. Research on dynamic and static mechanical properties of coral aggregate seawater concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 68-79. (in Chinese)
- [16] P·库马尔·梅塔, 保罗·J·M·蒙蒂罗. 混凝土微观结构、性能和材料[M]. 欧阳东, 译. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 37-50.
MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete: Microstructure, properties and materials[M]. Translated by OUGANG Dong. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2016: 37-50. (in Chinese)
- [17] 李杰, 吴建营, 陈建兵. 混凝土随机损伤力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-19.
LI Jie, WU Jianying, CHEN Jianbing. Stochastic damage mechanics of concrete structure[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-19. (in Chinese)
- [18] YANG R Z, XU Y, CHEN P Y, et al. Experimental study on dynamic mechanics and energy evolution of rubber concrete under cyclic impact loading and dynamic splitting tension [J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120071.
- [19] CHEN L J, ZHANG X X, LIU G M. Analysis of dynamic mechanical properties of sprayed fiber-reinforced concrete based on the energy conversion principle[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119167.
- [20] 翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩和混凝土在单轴冲击压缩荷载下的动态性能比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4):

- 762-768.
- ZHAI Yue, MA Guowei, ZHAO Junhai, et al. Comparison of dynamic capabilities of granite and concrete under uniaxial impact compressive loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 762-768. (in Chinese)
- [21] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 5-8.
- MA Xiaoqing. Impact dynamics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992: 5-8. (in Chinese)
- [22] CHEN X D, WU S X, ZHOU J K. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 419-430.