

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.015

不同防护敷设材料对钢筋混凝土板 抗动力冲击性能影响的试验研究*

黄秋月¹, 钟冬望^{1,2}, 李腾飞¹, 杨志龙¹, 何理^{1,2}

(1. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065; 2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065)

摘要: 钢筋混凝土结构通常会受到爆炸冲击载荷的作用, 导致其发生严重破坏。为了提升钢筋混凝土板的抗爆炸性能, 通常在钢筋混凝土板敷设不同防护材料。采用落锤冲击试验系统, 开展了敷设不同防护材料的钢筋混凝土板抗冲击性能试验研究, 使用加速度传感器测试了钢筋混凝土的动力响应, 并利用嵌入式压电智能骨料对钢筋混凝土板在落锤冲击荷载作用下的内部损伤信号进行了监测。试验结果表明: 在单层加强结构中, 碳纤维增强基复合材料(CFRP)和聚脲均能够有效保护试件, 相对钢筋混凝土加速度降幅平均值分别为78.20%、79.05%; 冲击应力峰值降幅平均值分别为40.98%、65.79%。在复合防护结构中, 聚脲-混凝土-CFRP(IPC)、聚脲-CFRP-混凝土(ICP)和CFRP-混凝土-聚脲(CIP)相较于钢筋混凝土板加速度降幅平均值分别为70.29%、77.46%、79.85%, 冲击应力峰值降幅平均值分别为32.73%、56.32%、51.07%, 均能有效保护试件, 提高混凝土板的抗冲击性能, 可为相关工程应用提供参考。

关键词: 钢筋混凝土板; 落锤冲击; CFRP; 聚脲; 复合防护结构

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)02-0120-09

Experimental Study on Effect of Different Protective Laying Materials on Dynamic Impact Resistance of Reinforced Concrete Slabs

HUANG Qiu-yue¹, ZHONG Dong-wang^{1,2}, LI Teng-fei¹, YANG Zhi-long¹, HE Li^{1,2}

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
2. Hubei Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center, Wuhan 430065, China)

Abstract: Reinforced concrete structures are usually subjected to explosion impact load, resulting in severe damage. Different protective materials are typically laid on reinforced concrete slabs to improve the explosion resistance. The experimental study on the explosion resistance of reinforced concrete slabs with different protective materials was conducted using the drop hammer test, and an accelerometer tested the impact of reinforced concrete. An embedded piezoelectric intelligent aggregate is used to monitor the internal damage signal of a reinforced concrete slab under the drop hammer impact load. The test results show that both carbon fiber reinforced matrix composites (CFRP) and

收稿日期 (Date of reception): 2023-11-20

网络首发日期 (Published online): 2024-01-15

作者简介: 黄秋月 (2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事爆炸动力学及应用研究, (E-mail) Huangqiuyue@wust.edu.cn.

通讯作者: 钟冬望 (1963-), 男, 教授、博士生导师, 主要从事工程爆破、控制爆破方面研究, (E-mail) zhongdw123@wust.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金 (52274136); 湖北省重点研发计划项目 (2020BCA084)

About the author: HUANG Qiu-yue (2000-), female, master candidate, mainly engaged in explosion dynamics and application research, (E-mail) Huangqiuyue@wust.edu.cn.

Corresponding author: ZHONG Dong-wang (1963-), male, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in engineering blasting and controlled blasting research, (E-mail) zhongdw123@wust.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52274136), National key research and development program of Hubei province (2020BCA084)

polyurea can effectively protect the specimens in the single-layer reinforced structure, with an average decrease of 78.20% and 79.05% relative to reinforced concrete acceleration and 40.98% and 65.79% peak impact stress, respectively. Additionally, the average acceleration reduction of polyurea-concrete-CFRP (IPC), polyurea-CFRP-concrete (ICP), and CFRP-concrete-polyurea (CIP) compared with reinforced concrete slabs are 70.29%, 77.46% and 79.85% in the composite protective structure, respectively. The average peak impact stress reduction is 32.73%, 56.32%, and 51.07%, respectively, which can effectively protect the specimens and improve the impact resistance of concrete slabs. It can provide a reference for related engineering applications.

Key words: reinforced concrete slabs drop; hammer impact; CFRP; polyurea; compound protective structure

钢筋混凝土是目前使用最广泛的建筑材料,随着现代工程行业的发展,钢筋混凝土也逐渐向多种类、多应用场景方向发展,不同的环境、工程及建筑结构对混凝土的性能也有着不一样的需求^[1]。各种钢筋混凝土建筑结构经常受到爆炸^[2,3]、落石冲击等动荷载作用^[4],引起钢筋混凝土材料的应变率效应及关键结构构件的损坏。因此钢筋混凝土的抗冲击设计成为结构设计中重要的一环,对钢筋混凝土结构表面敷设抗冲击材料,可以有效提高结构的抗冲击性能^[5-7]。

近年来,随着材料科学的飞速发展,国内外学者为了提升钢筋混凝土板的抗冲击性能,在钢筋混凝土板表面敷设聚脲弹性体、碳纤维布、钢板、泡沫铝等多种材料^[8-10],对其进行了大量的试验、理论分析和数值模拟研究,取得了丰富的研究成果。不同的材料在应用过程中呈现不一样的特点。例如:聚脲涂层具有成本低、强度高、韧性高等特点,在抗爆防护等军用防护领域上有很大的优势^[11];CFRP 具有密度小、抗拉强度大、耐腐蚀性好和耐疲劳性等特点,在提高结构的抗冲击能力上有一定的作用^[12]。

国内外大量学者的研究表明,聚脲和 CFRP 具有优良的力学性能和抗冲击性能,对钢筋混凝土板敷设聚脲或 CFRP 可以有效保护试件。聚脲拥有高弹性及强化应变率效应的力学性能,在准静态到冲击之间,应变率不同的情况下聚脲材料也能起到较好的保护作用,底部涂敷聚脲可以有效地增强混凝土板的抗冲击性能^[13-15]。赵苏政、葛文璇采用 LS-DYNA,基于 CONWEP 加载方法研究了聚脲加固钢筋混凝土柱在爆炸荷载作用下的响应^[16]。Kantar、Girum S 和 He 进行了 CFRP 增强混凝土梁的落锤冲击和抗爆试验,陈锐林、Urgessa 和 He 采用有限元进行了数值模拟,发现 CFRP 可以承受部分冲击力,能有效提高梁的动态受力性能和抗冲击性能,起到了增强混凝土整体抗爆性能的作用^[17-20]。前人的研究可以发现,关于敷设单种防护材料钢筋混凝土板的研究较多,对敷设组合防护材料的钢筋混凝土板

的研究较少。

针对不同防护材料以及不同的防护结构开展敷设单层材料和复合材料钢筋混凝土板的落锤冲击试验,通过压电陶瓷传感器、加速度和应变传感器测试混凝土板的动态响应,通过数据对比分析,以探究不同防护材料的防护性能,综合分析试验所得数据,对比研究普通钢筋混凝土板与单层材料防护、复合材料防护的钢筋混凝土板在落锤冲击荷载作用下的抗冲击能力,具有重要的理论和现实意义。

1 试验概况

1.1 试验系统

试验在长为 80 cm,宽为 70 cm,高为 4 m 的落锤试验系统上进行,该落锤冲击系统使用重量为 10 kg、20 kg 的圆柱形落锤进行冲击,落锤直径均为 15 cm,高分别为 15.5 cm、32 cm,落锤通过自由落体方式加速,落锤试验测试系统如图 1 所示,实物图如图 2 所示。

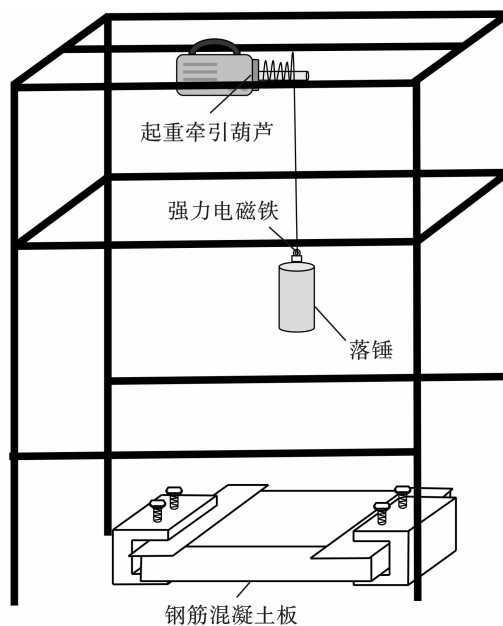


图 1 落锤试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of drop hammer test system

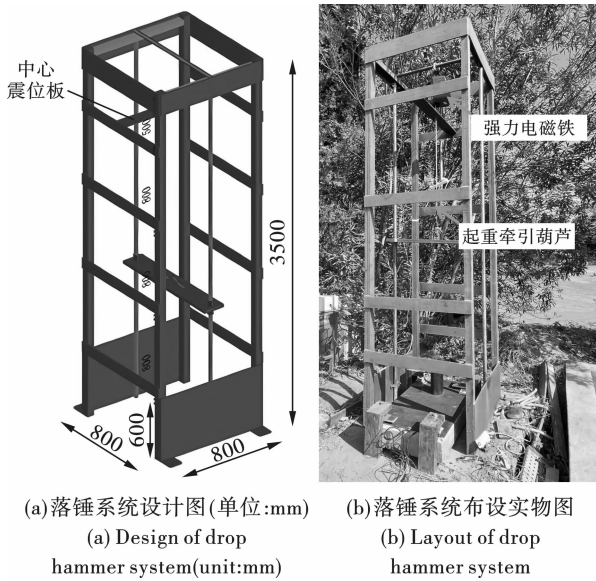


图2 落锤系统

Fig. 2 Drop hammer system

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)确定配合比,混凝土试件强度等级为C30,最终浇筑试件为80 cm×50 cm×15 cm的长方体混凝土试件,其中水泥:砂:石:水配比为1:1.13:2.72:0.38。

1.2 模型试件

在混凝土板中预埋4个压电陶瓷传感器,待浇筑混凝土以后传感器与混凝土相粘连,形成嵌入式压电智能骨料^[21]。压电陶瓷传感器沿长轴中线间

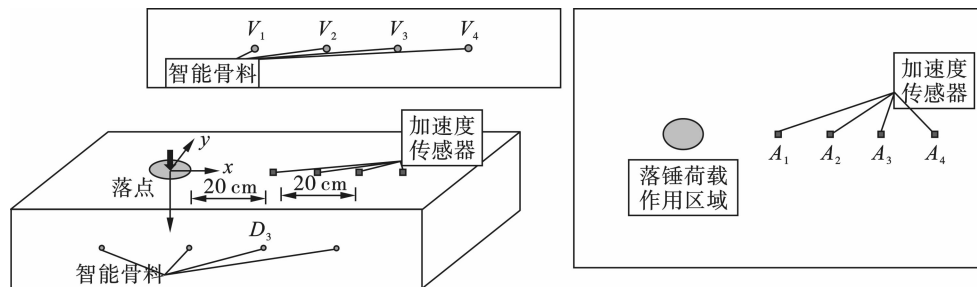


图5 各传感器相对位置布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the relative position of each sensor

试验分为单层防护结构和双层复合防护结构的冲击试验,落锤质量为10 kg、20 kg,落锤释放高度均为2.0 m,不同敷设方式分别进行20次试验,不同冲击荷载下敷设材料正面冲击5次为一个工况,背面冲击5次为一个工况(下文分别称为迎击面、背击面)。单层防护结构落锤试验将钢筋混凝土结构与单面加强结构的各项物理参数横向对比,综合评判来比较出单面加强结构中最优的抗冲击结构,准备试件如图6所示,对不敷设任何材料及敷设单

隔20 cm、15 cm、15 cm、15 cm、15 cm排开,分别为 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 四处测点,如图3所示,浇筑后的混凝土试件如图4所示。

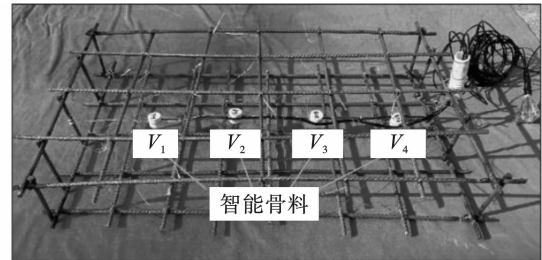


图3 试件钢筋骨架及骨料位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of steel bar skeleton and aggregate position of the specimen



图4 混凝土试件

Fig. 4 Concrete specimen

为了监测混凝土的动态响应,冲击试验之前,在抗爆结构表面,距落点20 cm、30 cm、40 cm、50 cm处分别布置1个加速度计,分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 共4处测点,监测落锤冲击下试件不同测点的加速度,最终所有测点布置如图5所示。

层钢板的钢筋混凝土板进行5次循环落锤冲击对照试验。

落锤冲击复合防护结构试验具体试件如图7所示,通过落锤冲击实验,验证复合防护结构的抗冲击性能。ICP(Item-CFRP-Polyurea)结构为聚脲在最上层,CFRP在中层,待保护试件在最下层;CIP(CFRP-Item-Polyurea)结构为CFRP在最上层,待保护试件在中层,聚脲在下层;IPC(Item-Polyurea-CFRP)结构为CFRP在最上层,聚脲在中层,待保护试件在最下层。

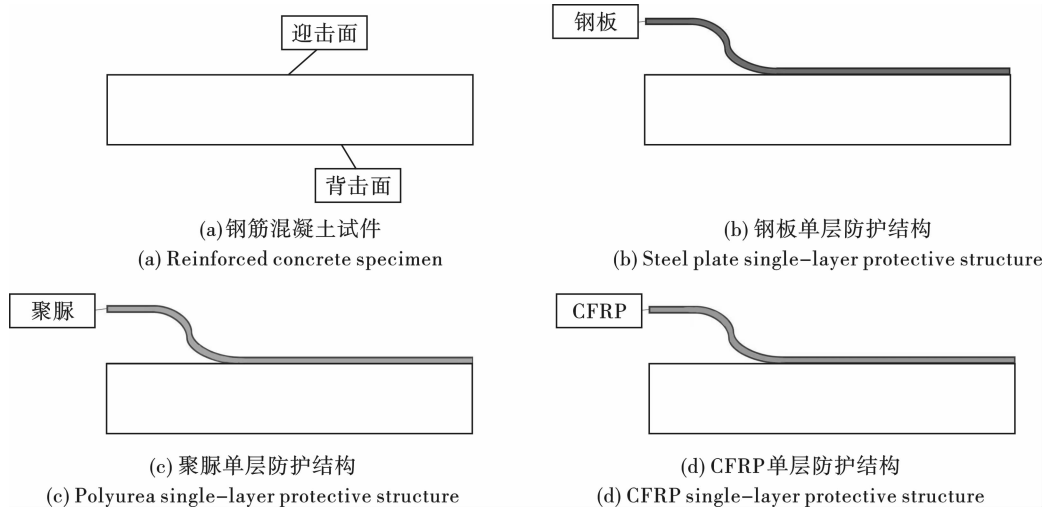


图 6 落锤冲击单层防护结构
Fig. 6 Drop hammer impact test on single-layer protective structure

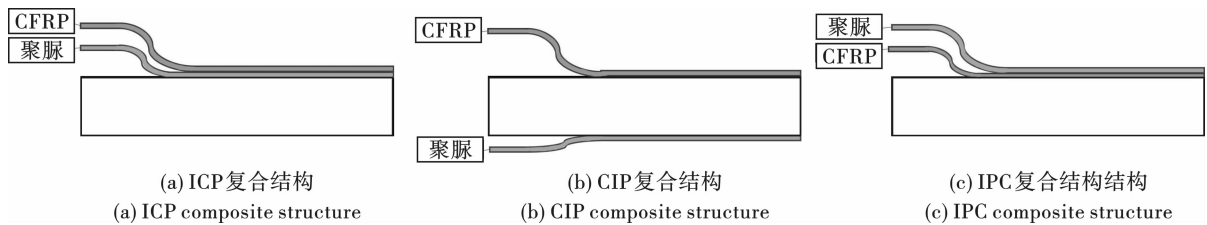


图 7 落锤冲击复合防护结构试验准备示意图
Fig. 7 Schematic diagram of test preparation for drop hammer test on composite protective structure

2 单层材料防护冲击试验结果及分析

2.1 加速度结果及分析

图 8 展示了各试验混凝土板在迎击面和背击面测点处的加速度峰值(绝对值)对比效果。由图可知,随着落锤重量的增加,各板加速度峰值均表现为增大。对同一块板, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 四个测点的加速度峰值依次减小,这说明距落点越近,所受到的冲击越大。观察发现,在同一工况下,对于相同测点的加速度数据,普通混凝土板的加速度峰值远大于 CFRP 和聚脲加强的混凝土板,说明敷设聚脲和 CFRP 可以提高钢筋混凝土板的抗冲击性能。

迎击面工况中,钢板、CFRP 和聚脲相较于钢筋混凝土板加速度降幅平均值分别为 -69.77%、77.03%、75.75%,CFRP 加强的混凝土板的加速度降幅最大,钢板降幅出现负值是因为钢板在受到冲击荷载作用下会与钢筋混凝土板脱落,振幅较大,加速度为无效值;背击面工况中,钢板、CFRP 和聚脲相较于钢筋混凝土板加速度降幅平均值分别为 72.92%、79.36%、82.34%,聚脲加强的混凝土板的加速度降幅最大。

2.2 压电结果及分析

压电陶瓷信号强度的数值大小能够在一定程度上代表落锤冲击在试件内部一个方向引起的应力峰值大小,根据公式(1)及试验中所用到的压电陶瓷尺寸,我们可以得到相应的冲击应力峰值^[22]。在压电信号方面,不同工况下 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 测点处的冲击应力信号强度对比如图 9。

$$\sigma = \frac{Q}{Sd_{33}} \quad (1)$$

式中: σ 为冲击应力峰值; Q 为压电陶瓷输出电荷量; S 为压电陶瓷受力面面积; d_{33} 为纵向压电应变常数。

由图 9 可以发现,随着距离冲击位置的增加,其冲击应力峰值随之减小,这说明距落点越近,所受到的应力越大。对同一块板,随着冲击荷载的增大,冲击应力峰值明显增大,在迎击面冲击荷载变大时,聚脲单层防护试件 V_1 测点处冲击应力提升了 6.04 倍,CFRP 单层防护试件 V_1 测点处冲击应力提升了 2.48 倍,说明冲击荷载越大,钢筋混凝土板所受到的应力越大。迎击面工况中,钢板、CFRP 和聚脲相较于钢筋混凝土板冲击应力峰值降低幅值分别为 33.87%、44.28% 和 76.57%,背击面工况中,钢板、CFRP 和聚脲相较于钢筋混凝土板冲击应力峰值降

低幅值分别为 74.27%、37.67% 和 55.00%。当载荷不变,迎击面工况中,削减冲击应力峰值效果最佳

的为 CFRP 单层防护结构,背击面工况中,削减冲击应力峰值效果最佳的为钢板单层防护结构。

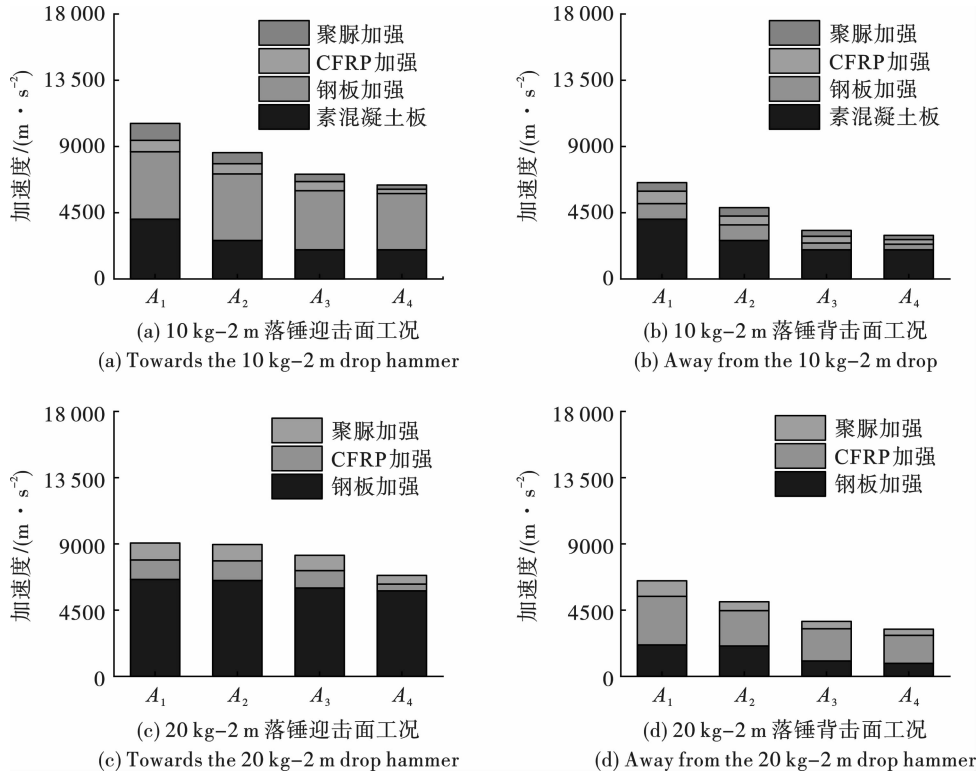


图 8 不同工况加速度峰值对比图

Fig. 8 Comparison of peak acceleration under different working conditions

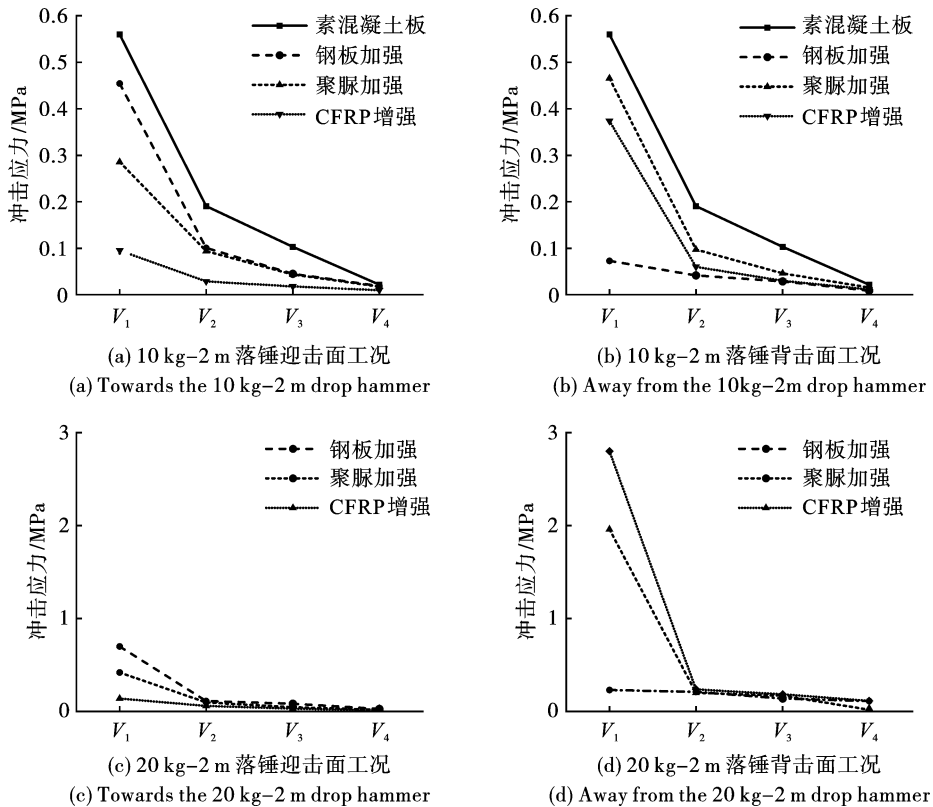


图 9 不同工况下压电信号峰值对比图

Fig. 9 Comparison of peak values of piezoelectric signals under different working conditions

3 复合材料防护冲击试验结果及分析

3.1 加速度结果及分析

图 10 为各试验混凝土板在迎击面和背击面测点处的加速度峰值(绝对值)对比图。由图可知,落锤重量增加与同一块板 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 四个测点的加速度峰值的特点与单层防护冲击试验一致。且迎击

面工况中,CIP 加强的混凝土板的加速度峰值最小,IPC、ICP、CIP 降幅分别为 59.88%、70.82%、85.62%;背击面工况中,ICP 加强的混凝土板的加速度峰值最小,IPC、ICP、CIP 降幅分别为 80.69%、84.10%、74.08%,由此看出 CIP 迎击面工况下最优,ICP 背击面工况下最优。

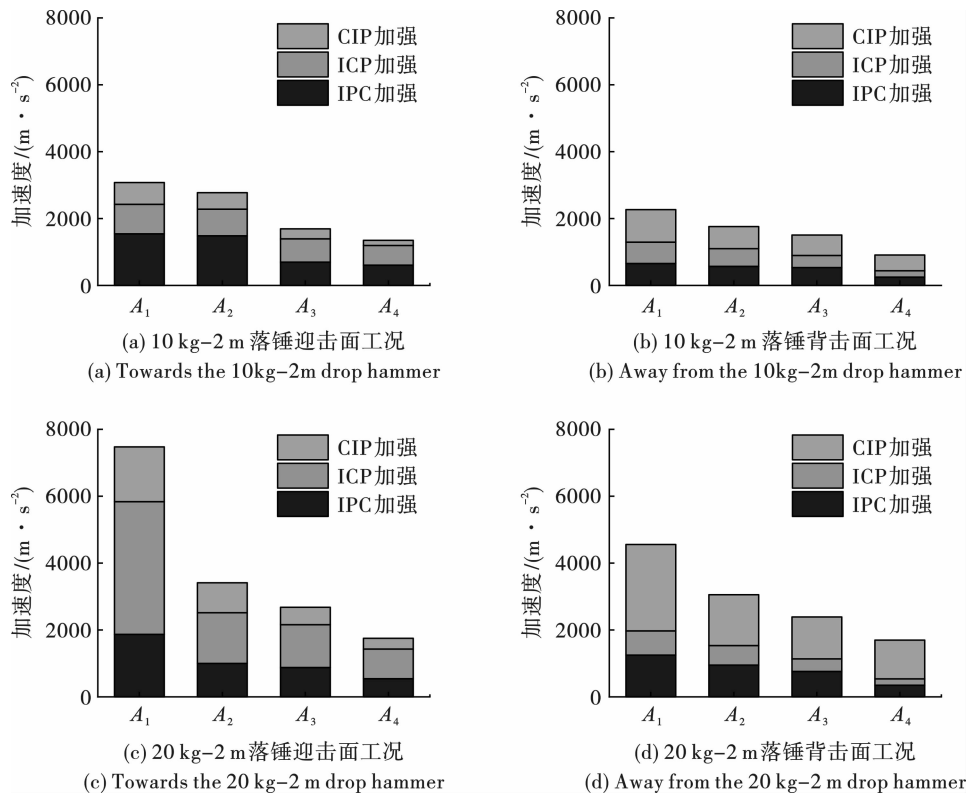


图 10 不同工况下加速度峰值对比图

Fig. 10 Comparison of peak acceleration under different working conditions

两种防护结构在 4 个测点的加速度平均值如表 1,可以看出,载荷增大时,CIP 加速度增幅为 53.42%,ICP 加速的增幅为 32.99%,说明在抑制加速度大小的效果中,ICP 复合结构更优。

表 1 不同载荷下两种复合结构各自最大加速度均值表
Table 1 Mean of maximum acceleration of two kinds of composite structures under different loads

工况	10 kg-2 m 下测点均值加速度/ (m·s ⁻²)	20 kg-2 m 下测点均值加速度/ (m·s ⁻²)
迎击面 CIP	329.19	706.72
背击面 IPC	497.37	742.28

3.2 压电结果及分析

图 11 为三种复合防护结构的冲击应力峰值对

比图,根据冲击应力峰值的对比,发现随着距离冲击位置的增加,其冲击应力峰值随之减小;对同一块板,随着冲击载荷的增大,冲击应力峰值明显增大,与单层防护结构试验现象一致。在迎击面工况下,CIP 复合结构的冲击应力峰值幅值最低,在背击面工况下,ICP 复合结构的冲击应力幅值最低,与加速度数据的研究中保持一致。

V_1 测点与落锤冲击位置较近,能更好的反映混凝土板内部的损伤情况,可以利用 V_1 测点的压电信号幅值来进行 CIP 与 ICP 两种防护结构的对比,冲击应力峰值如表 2 所示,迎击 CIP 结构相对于背击 ICP 结构在 V_1 测点处的冲击应力峰值在不同载荷下的综合降低率为 18.14%,说明 CIP 结构优于 ICP 结构。

表2 不同载荷下两种复合结构 V_1 压电信号峰值表
Table 2 V_1 piezoelectric signal Peak Table of two kinds of Composite structures under different loads

工况	迎击面 CIP 冲击 应力峰值/MPa	背击面 ICP 冲击 应力峰值/MPa
10 kg-2 m	0.26	0.29
20 kg-2 m	0.51	0.87

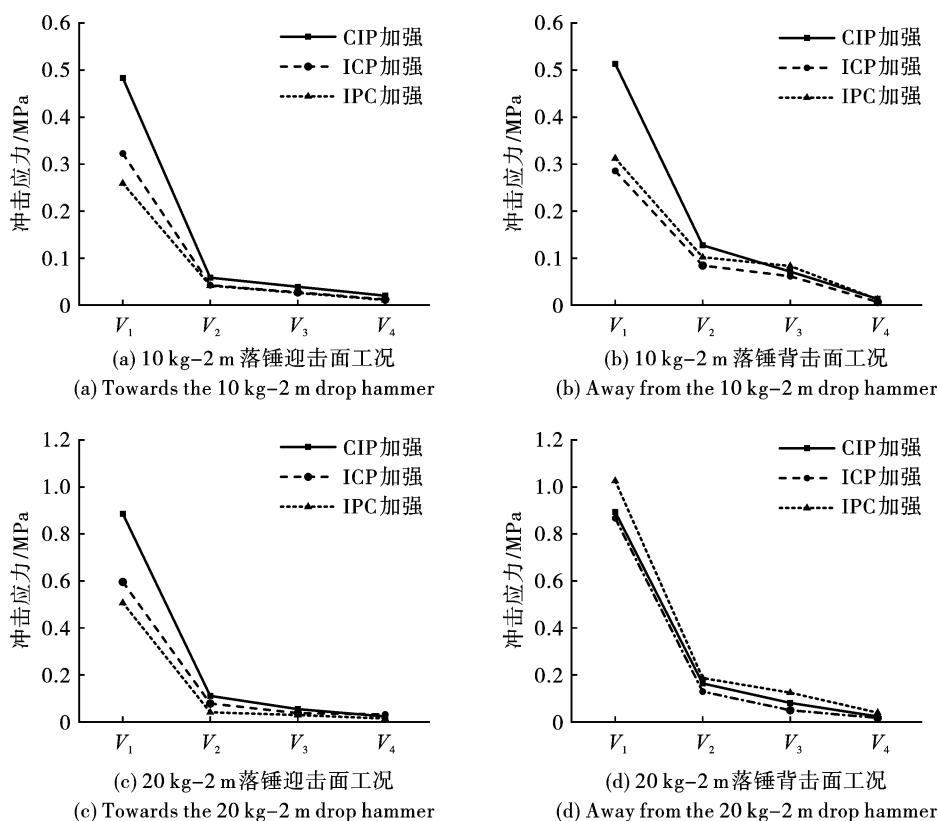


图11 不同工况下压电峰值对比图

Fig. 11 Comparison of peak values of piezoelectric signals under different working conditions

(1) 单层防护结构迎击工况中, CFRP 和聚脲相较于钢筋混凝土板加速度降幅平均值分别为 79.36%、82.34%, 冲击应力峰值降幅平均值分别为 44.28%、76.57%; 背击面工况中, CFRP 和聚脲相较于钢筋混凝土板加速度降幅平均值分别为 79.36%、82.34%, 冲击应力峰值降幅平均值分别为 55.00%、37.67%。表明对钢筋混凝土板敷设 CFRP 或聚脲均能有效抑制钢筋混凝土板在冲击作用下的振动, 并有效提高钢筋混凝土板的抗爆炸性能。

(2) 复合防护结构迎击工况中, IPC、ICP 和 CIP 相较于钢筋混凝土板加速度降幅平均值分别为 59.88%、70.82%、85.62%, 冲击应力峰值降幅平均值分别为 37.77%、59.40%、63.88%; 背击面工况中, IPC、ICP 和 CIP 相较于钢筋混凝土板加速度降幅平均值分别为 80.69%、84.10%、74.08%, 冲击

4 结论

对钢筋混凝土板敷设不同的抗爆炸冲击材料, 从动态响应及压电智能骨料监测损伤的角度, 研究了单层防护结构和多层防护结构对钢筋混凝土板的抗爆炸性能的改变情况, 得到了如下结论:

应力峰值降幅平均值分别为 27.68%、53.23%、38.25%。表明对钢筋混凝土板组合敷设 CFRP、聚脲均能有效抑制钢筋混凝土板在冲击作用下的振动, 并有效提高钢筋混凝土板的抗爆炸性能。

(3) 单层防护结构最优值与复防护结构最优值相比, 加速度降幅均值分别是 82.34%、85.62%; 冲击应力峰值降幅均值分别是 55.00%、63.88%。说明在落锤冲击防护中, 复合防护结构优于单层防护结构。

参考文献 (References)

- [1] 叶云霄, 胡少伟, 杨金辉, 等. 增幅冲击下钢筋混凝土板的抗冲击性能[J]. 哈尔滨工业大学学报: 1-12. [2024-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20221227.1523.002.html>.

- [1] YE Yu-xiao, HU Shao-wei Yan, YANG Jin-hui, et al. Impact resistance of reinforced concrete slabs under amplitude impacts[J]. Journal of Harbin Institute of Technology: 1-12. [2024-01-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20221227.1523.002.html>. (in Chinese)
- [2] 汪维,杨建超,汪剑辉,等. POZD 涂层方形钢筋混凝土板抗接触爆炸试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(12):14-23.
- [2] WANG Wei, YANG Jian-chao, WANG Jian-hui, et al. Experimental research on anti-contact explosion of POZD coated square reinforced concrete slab[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(12):14-23.
- [3] 孙加超,陈小伟,邓勇军,等. 爆炸荷载下基于细观建模的素/钢筋混凝土板破坏模式[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11):32-42.
- [3] SUN Jia-chao, CHEN Xiao-wei, DENG Yong-jun, et al. Dynamic response of mesoscopic plain/reinforced concrete slabs under blast loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(11):32-42.
- [4] 吴建利,胡卸文,梅雪峰,等. 落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1):78-87.
- [4] WU Jian-li, HU Xie-wen, MEI Xue-feng, et al. Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact[J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2021, 48(1):78-87. (in Chinese)
- [5] R Dinan, J Fisher, M Hammons, et al. Failure mechanisms in unreinforced concrete masonry walls retrofitted with polymer coatings [C] // Proceedings of the 11th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, 2003(12):5-9.
- [6] OLENA P, TETIANA M, NATALIA S, et al. Modern materials for fire protection of reinforced concrete agro-industrial structures [J]. Key Engineering Materials, 2023, 952:105-110.
- [7] 蔡桂杰. 弹性体涂层钢筋混凝土板抗爆作用设计方法研究[D]. 太原:中北大学, 2015.
- [7] CAI Gui-jie. The design method of the reinforced plate coated polyurea under the action of explosion [D]. Taiyuan: North university of China, 2015. (in Chinese)
- [8] CHEN Hai-ong, WEI Xie, JIANG Mei-rong, et al. Blast-loaded behaviors of severely damaged buried arch repaired by anchored CFRP strips[J]. Compos Struct, 2015, 122:92-103.
- [9] 王曦浩,夏志成,龚自明,等. 钢板夹泡沫铝组合板抗爆性能研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(2):117-122.
- [9] WANG Xi-hao, XIA Zhi-cheng, GONG Zi-ming, et al. Anti-blast performance of aluminum foam-core sandwich panels[J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(2):117-122. (in Chinese)
- [10] 赵士永,崔梦飞,褚少辉,等. 碳纤维布加固达到承载力极限状态混凝土梁有限元分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(6):119-124.
- [10] ZHAO Shi-yong, CUI Meng-fei, ZHU Shao-hui, et al. Finite element analysis of concrete beam strengthened by CFRP with the ultimate bearing capacity[J]. Journal of Building Structures, 2018, 40(6):119-124. (in Chinese)
- [11] 梁龙强,黄微波,武迪,等. 聚氨酯-橡胶复合阻尼材料减振优化设计[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1):184-190.
- [11] LIANG Long-qiang, HUANG Wei-bo, WU Di, et al. Optimization design of vibration reduction of polyurethane-rubber composite damping material[J]. Engineering Science and Technology, 2020, 52(1):184-190. (in Chinese)
- [12] 奉星宇. 侧向冲击下 CFRP 圆钢管混凝土构件的抗冲击性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- [12] FENG Xing-yu. Study on impact resistance of CFRP strengthened concrete filled steel tube members under lateral impact[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [13] 韩龙,马赛尔,鞠京龙,等. 喷涂聚脲弹性体黏弹-高弹本构模型的研究[J]. 信息记录材料, 2022, 23(6):51-54.
- [13] HAN Long, MA Sai-er, JU Jing-long, et al. Study on viscoelastic-high elastic constitutive model of sprayed polyurea elastomer[J]. Materias Reports, 2022, 23(6):51-54. (in Chinese)
- [14] CHEN Yi-shun, WANG Bo, ZHANG Bei, et al. Polyurea coating for foamed concrete panel: An efficient way to resist explosion [J]. Defence Technology, 2020, 16(1):136-149.
- [15] ACKLAND K, ANDERSON C, NGO T D. Deformation of polyurea-coated steel plates under localized blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 51:13-22.
- [16] 赵苏政,葛文璇. 聚脲涂层防护下钢筋混凝土柱的抗爆性能研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(6):85-91.
- [16] ZHAO Su-zheng, GE Wen-xuan. Study on anti-detonation performance of reinforced concrete columns protected by polyurea coating [J]. Engineering blasting, 2022, 28(6):85-91. (in Chinese)
- [17] KANTAR E, ANIL Ö. Low velocity impact behavior of concrete beam strengthened with CFRP strip [J]. Steel and Composite Structures, An International Journal, 2012, 12(3):207-230.

- [18] 陈锐林,李 康,董 琪,等. CFRP 加固钢筋混凝土板爆炸冲击作用下动力响应分析的数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(6):1517-1527.
- [18] CHEN Rui-lin,LI Kang,DONG Qi,et al. Numerical simulation of dynamic response analysis of reinforced concrete slabs strengthened with CFRP under blast load [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2020,17(6):1517-1527. (in Chinese)
- [19] URGESSA G S,MAJI A K. Dynamic response of retrofitted masonry walls for blast loading[J]. Journal of Engineering Mechanics,2010,136(7):858-864.
- [20] HE Qing-feng,LI Jiang,YUE Lei-yang et al. Numerical simulation on impact test of CFRP strengthened reinforced concrete beams[J]. Frontiers in Materials,2020,7:252.
- [21] 李腾飞. 城市综合管廊燃气爆炸动力响应试验研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2022.
- [21] LI Teng-fei. Experimental study on dynamic response of gas explosion in urban pipe gallery[D]. Wuhan:Wuhan University of Science and technology,2022. (in Chinese)
- [22] 许嘉赓. PZT 基压电陶瓷的力电性能及其在混凝土动态应力检测中的应用研究[D]. 成都:西华大学,2020.
- [22] XU Jia-geng. Study on the electromechanical properties of PZT-based piezoelectric ceramics and its application in dynamic stress detection of concrete[D]. Chengdu: Xihua University,2020. (in Chinese)

(上接第 43 页)

- [14] 饶 宇,夏元友,胡英国,等. 预裂缝对爆破振动频谱分布特征的影响[J]. 振动与冲击,2017,36(7):191-198.
- [14] RAO Yu,XIA Yuan-you,HU Ying-guo,et al. Influence of pre-splitting on blasting vibration spectral distribution characteristics [J]. Journal of Vibration and Shock,2017,36(7):191-198. (in Chinese)
- [15] 李祥龙,余 林,黄原明,等. 基于 VMD-HHT 的井下预裂爆破振动效应分析[J]. 黄金科学技术,2024,32(3):501-510.
- [15] LI Xiang-long,YU Lin,HUANG Yuan-ming,et al. Analysis of vibration effect of downhole pre-fracture blasting based on VMD-HHT[J]. Gold Science and Technology,2024,32(3):501-510. (in Chinese)
- [16] 彭 鑫,李祥龙,李 旺,等. 水不耦合径向装药对预裂成缝效果影响分析[J]. 有色金属工程,2023,13(5):103-113.
- [16] PENG Xin,LI Xiang-long,LI Wang,et al. Analysis of the effect of water-uncoupled radial loading on the effect of pre-splitting into seams[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(5):103-113. (in Chinese)
- [17] 于建新,李真珍,高帅杰,等. 水下深孔爆破岩石裂纹扩展及损伤规律[J]. 科学技术与工程,2022,22(7):2907-2913.
- [17] YU Jian-xin,LI Zhen-zhen,GAO Shuai-jie,et al. Crack extension and damage law of rock by underwater deep hole blasting[J]. Science, Technology and Engineering,2022,22(7):2907-2913. (in Chinese)
- [18] 卫 豪. 水下钻孔爆破参数优化模拟研究[D]. 赣州:江西理工大学,2022.
- [18] WEI Hao. Simulation research on optimization of underwater drilling and blasting parameters [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2022. (in Chinese)
- [19] 张兵文,张文扬,吴 暖,等. 预裂爆破与气泡帷幕技术在水下爆破中的应用[J]. 工程爆破,2015,21(5):6-9.
- [19] ZHANG Bing-wen,ZHANG Wen-yang,WU Nuan,et al. Application of precracking blasting and bubble curtain technology in underwater blasting[J]. Engineering Blasting,2015,21(5):6-9. (in Chinese)
- [20] 徐 挺. 相似方法及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [20] XU T. Similarity methods and their applications[M]. Beijing: Machinery Industry Press,1995. (in Chinese)
- [21] JTS 204—2008 水运工程爆破技术规范[S].
- [21] JTS 204—2008 Technical specification for blasting in water transportation projects[S]. (in Chinese)
- [22] 张召冉,左进京,郭义先. 爆炸载荷下空孔及其缺陷对裂纹扩展影响机理研究[J]. 振动与冲击,2019,38(18):115-121.
- [22] ZHANG Zhao-ran,ZUO Jin-jing,GUO Yi-xian. Research on the mechanism of the influence of hollow holes and their defects on crack extension under explosive load [J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(18):115-121. (in Chinese)