

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230104003

BFRP-FRCM 加固砌体填充墙抗爆性能试验研究*

毛永康^{1,2}, 廖维张^{1,2}, 马超^{1,2}, 李会芳^{1,2}, 闫秋实³, 田栓柱³

(1. 北京建筑大学工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 3. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 砌体填充墙在爆炸荷载作用下会发生破坏, 甚至会出现碎片飞散等现象, 从而造成人员伤亡或设备损坏。为了提高砌体填充墙的抗爆性能, 提出采用玄武岩纤维网-纤维增强水泥基(BFRP-FRCM)复合层加固砌体填充墙, 并通过现场爆炸试验研究复合层对砌体填充墙的抗爆加固效果, 从破坏模式、碎块分布、位移响应和反射超压响应等角度对比分析了不同比例距离、加固方式砌体填充墙的抗爆性能, 探究了BFRP-FRCM复合层对砌体填充墙的抗爆加固机理。结果表明: BFRP-FRCM加固能够有效减弱砌体墙在爆炸荷载下的破坏程度, 迎爆面加固减小了砌体墙灰缝脱落范围、爆炸碎块的数量和飞行距离, 但砌体墙的残余位移较大; 背爆面加固对其位移的限制效果更好, 墙体无碎块飞散现象; 双面加固显著提高砌体墙的抗压和抗弯承载力, 墙体的峰值位移和残余位移最小, 即使在比例距离较小时, 双面加固后仅在砌体墙中心部位出现局部变形及细小裂缝, 并未出现碎块散落现象; 引入冲量和强化参数分析不同加固方案对砌体墙抗爆性能提升的影响, 在相同比例距离情况下, 未加固墙体与加固墙体的反射超压和冲量大致相同, 但BFRP-FRCM加固能够提高砌体墙的强化参数。

关键词: BFRP-FRCM; 砌体填充墙; 加固; 抗爆试验; 抗爆性能

中图分类号: TU362 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1122-10

Experimental Study on Explosion Performance of Masonry Infilled Wall Reinforced by BFRP-FRCM

MAO Yongkang^{1,2}, LIAO Weizhang^{1,2}, MA Chao^{1,2}, LI Huifang^{1,2}, YAN Qiushi³, TIAN Shuanzhu³

(1. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Civil Engineering Structure and Renewable Material, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Once masonry infill walls were destroyed by explosion loadings, explosion-induced splashed fragments will cause injuries and equipment damage. This study proposed to apply the basalt fiber mesh-fiber reinforced cement matrix (BFRP-FRCM) composite layer to improve the explosion performance of masonry infilled walls. Then the reinforcement effect of BFRP-FRCM enhancing the masonry infilled walls under explosion loadings was experimentally studied. The enhancing mecha-

* 收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878028)、北京市自然科学基金项目(8222015; 8212007)资助

作者简介: 毛永康(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事结构加固抗爆方面的研究。E-mail: 18956260619@163.com

通讯作者: 廖维张(1978—), 男, 教授, 博士。主要从事结构加固抗爆与建筑材料方面的研究。

E-mail: liaoweizhang@bucea.edu.cn

nism was explored by analyzing the proportional distances and reinforced schemes that influence the failure mode, fragment distribution, displacement response and reflected overpressure. The results showed that BFRP-FRCM reinforcement can effectively reduce the explosion-induced damage of the masonry walls. Blasting surface reinforcement could reduce the range of the mortar joint shedding, the number of explosive fragments and the distance of fragments from the masonry wall, however, the residual displacement of the masonry wall was still large. Reinforcement of the back blasting surface could reduce the displacement response of the wall more effectively, and there was no visible fragmentation. Double surface reinforcement significantly improved the compressive bearing capacity and flexural bearing capacity of the masonry wall. Both the peak displacement and residual displacement of the wall were the smallest. On the other hand, even with the decrease of the proportional distance, only local deformation and small cracks appeared in the center of the masonry wall after double surface reinforcement, and did not occur the debris scattered. The influence of different reinforcement schemes on the explosion performance of masonry infill walls was analyzed by introducing impulse and strengthening parameters. Under the same proportional distance, the reflected overpressure and impulse of the unreinforced wall and the reinforced wall were roughly the same, but BFRP-FRCM reinforcement could improve the strengthening parameters of the masonry wall.

Keywords: BFRP-FRCM; masonry infilled wall; reinforced; blast test; blast resistance

0 引 言

近年来,居民楼、办公楼和工业厂房等建筑意外爆炸的事故频发^[1],建筑结构的抗爆防护问题倍受关注。砌体墙多为建筑的围护填充结构,一般不进行抗爆设计,但在爆炸荷载下,砌体墙的破坏会导致碎片飞散^[2-3],其造成的二次伤害甚至会超过爆炸本身造成的伤害^[4],对周围环境和人员安全造成严重威胁。因此,研究砌体填充墙的破坏模式^[5-12]并进行抗爆加固,对建筑结构防爆减灾具有重要的理论意义与实用价值。

采用纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer, FRP)对砌体填充墙表面进行外贴加固^[13-17],可以提高墙体承受爆炸荷载的能力,减少爆炸引起的墙体碎片飞散,但FRP存在耐高温性能差的缺点^[18-19],且在爆炸荷载下,FRP的固定端易发生断裂脱黏^[20-21],从而严重影响加固效果。采用聚脲喷涂砌体墙进行加固^[22-23],提高了砌体墙在爆炸荷载下所能承受的压力峰值,但火灾高温影响会使聚脲分子链薄弱处发生断裂,导致墙体衰减冲击波的能力减弱,墙体的抗爆性能降低^[24]。采用外包钢板对墙体进行加固^[25],可以提高墙体的抗爆能力,但这种加固方法中的钢材在使用过程中容易遭受化学侵蚀,导致加固效果下降。综上所述,目前砌体墙的

抗爆加固方法主要集中在外贴FRP、喷涂聚脲和外包钢板,但FRP和聚脲加固存在耐高温性能差,钢板存在易锈蚀等缺点。

BFRP-FRCM是一种将耐腐蚀、弹性模量大和抗拉强度高的BFRP网格作为加筋材料,将FRCM作为黏结剂的新型复合材料。FRCM包裹BFRP网格并与墙体表面有效黏结^[26],能够提高加固层和墙体基底的协调性,黏结效果几乎不受温度的影响^[27]。此外,FRCM具有强度高、流动性和黏结性良好的优势,可以填补被加固墙体表面的缺陷和缝隙。Y.Z.Zheng等^[28]用BFRP-FRCM加固RC梁并进行四点弯曲试验,研究表明采用BFRP-FRCM对RC梁进行外部加固后,其开裂、屈服和极限荷载较未加固RC梁均有较大提高。P.K.V.R.Padalu等^[29]用BFRP-FRCM对砌体墙进行加固并进行了抗弯试验,结果表明,与未加固砌体墙相比,加固砌体墙的强度提高了4倍,变形能力提高了29倍,能量吸收能力提高了139倍。朱忠锋^[30]用BFRP-FRCM涂抹钢筋混凝土圆柱并进行静力轴向受压试验,结果表明BFRP-FRCM对核心钢筋混凝土柱提供有效的侧向约束应力,延缓了纵筋的屈服。

关于BFRP-FRCM加固砌体墙抗爆性能的研究鲜见报道,本文通过现场爆炸试验对不同比例距离和加固方式下BFRP-FRCM加固砌体墙的抗爆性能进行研究,从砌体墙的破坏模式、碎块分布、墙

体位移和反射超压的角度,探讨不同加固方式对砌体墙抗爆性能的影响规律。

1 试验概况

1.1 试件设计

砌体墙试件由底梁、顶梁、构造柱和墙体部分组成,如图1所示,试件尺寸为2 600 mm×3 100 mm×200 mm(宽度×高度×厚度),构造柱、底梁和顶梁尺寸均为200 mm×300 mm(宽度×高度)。构造柱和梁混凝土强度等级均为C40,纵筋和箍筋均采用直径为8 mm的HRB400钢筋,钢筋保护层厚度为20 mm,保证梁柱可以承受墙体重量和爆炸荷载。沿墙高每500 mm设置2根直径为6 mm的HPB300通常拉结筋,砌体墙采用蒸压加气混凝土砌块,砌块尺寸为600 mm×240 mm×200 mm(长度×高度×宽度),抗压强度为4.4 MPa,采用混合砂浆砌筑,砂浆抗压强度为20.1 MPa。

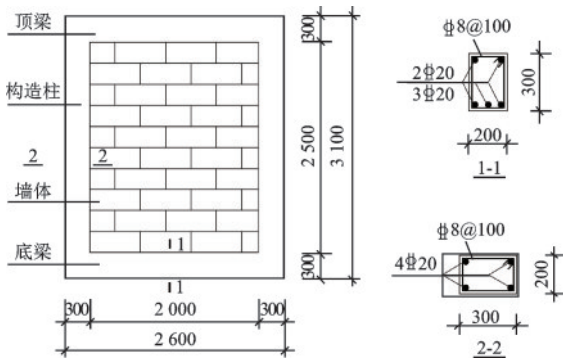


图1 砌体墙立面图和截面图

Fig.1 Elevation and section diagrams of the tested masonry walls

1.2 试件加固方案

BFRP-FRCM使用内掺PE纤维的FRCM材料,PE纤维具有抗拉强度高和弹性模量大的优势,与水泥基之间存在良好的界面黏结力。研究表明^[31]与掺入其他纤维相比,在相同的纤维掺量下,PE-FRCM破坏时具有更明显的多裂缝发展现象,PE纤维能显著增加FRCM的抗压、抗弯和抗折强度。同时PE纤维在水泥基中容易搅拌均匀,具有良好的流动性。参考前期研究^[32],确定的FRCM配合比见表1,试验测定的FRCM的抗压强度和抗拉强度分别为53.10 MPa和3.87 MPa。试验加固施

工中只采用一层纤维网,BFRP网格布的网格尺寸如图2所示,弹性模量为26.2 GPa,抗拉强度为1.575 GPa,伸长率为2.20%。

表1 FRCM配合比

Table 1 Mixture proportion of the FRCM

单位:g/L

| 水泥 | 水 | 粉煤灰 | 石英砂 | 硅灰 | PE纤维 | 减水剂 | 增稠剂 |
|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|------|
| 793 | 366 | 366 | 488 | 61 | 18 | 5 | 0.64 |

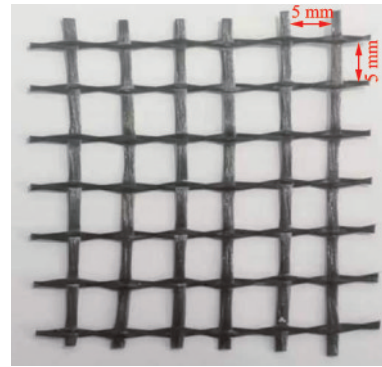


图2 BFRP网格布

Fig.2 BFRP grid cloth

混凝土框架钢筋绑扎完成后一次性浇筑成型,养护28天后开始墙体的砌筑作业,墙体砌筑完成后养护28天。墙体养护完成后,进行加固作业:首先在墙体基面涂抹一层界面剂,界面剂主要由醋酸乙烯高分子改性材料组成,可以封闭砌体墙表面的孔隙,避免FRCM被孔隙吸水而导致黏结强度降低,同时界面剂可以增加墙体基面的粗糙程度,增强基面与FRCM的黏结力;待界面剂干燥后,涂抹1层FRCM,厚度为1 cm;其次将BFRP网格按压入FRCM层中,并保证BFRP网格拉紧且不改变FRCM的厚度;在BFRP网格外再涂抹一层1 cm厚的FRCM,并压光找平,洒水养护28天。加固示意如图3所示。

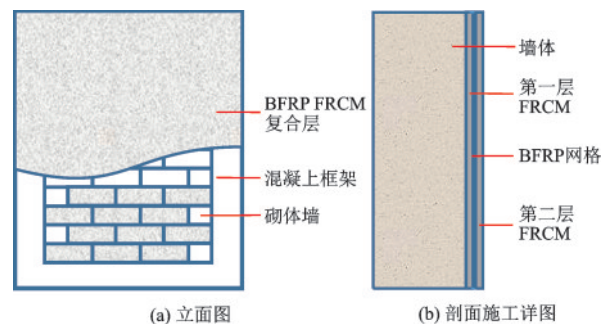


图3 BFRP-FRCM加固层简图

Fig.3 Sketch of the BFRP-FRCM strengthening layer

1.3 试验工况及试验准备

试验共制作5片砌体填充墙,未加固墙2片,单面加固墙2片和双面加固墙1片。未加固和单面加固试件只爆炸一次,双面加固试件累计爆炸2次,各工况的TNT炸药当量均为2 kg。为了综合考虑炸药当量和爆炸距离的影响,引入比例距离 Z ,即:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

式中, W 为TNT炸药当量(kg); R 为爆炸距离(m),即墙体表面中心点至炸药中心点的距离,如图4(a)所示,各工况比例距离见表2。

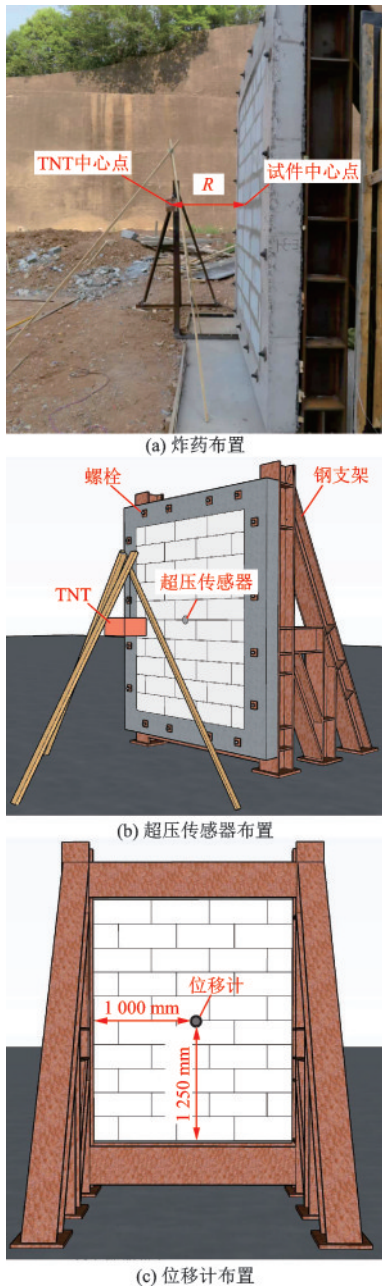


图4 加载及监测示意

Fig.4 Sketch of the loading and monitoring schemes

表2 试验工况

Table 2 Description about the tested specimens

| 试验序号 | 试件编号 | 加固方式 | 爆炸距离 R/m | 比例距离 $Z/(m \cdot kg^{-1/3})$ |
|--------|------|-------|----------|------------------------------|
| Test 1 | W0-1 | 未加固 | 1.5 | 1.191 |
| Test 2 | W0-2 | | 0.8 | 0.635 |
| Test 3 | WR-3 | 迎爆面加固 | 1.5 | 1.191 |
| Test 4 | WR-4 | 背爆面加固 | 1.5 | 1.191 |
| Test 5 | WR-5 | 双面加固 | 1.5 | 1.191 |
| Test 6 | | | 0.8 | 0.635 |

试验前,将试件通过螺栓固定在钢支架上,防止墙体发生整体位移,长方体TNT炸药吊在三脚架上。炸药高度与构件中心点高度相同,与试件的水平距离通过移动三脚架调整。迎爆面中心点布置超压传感器,试件背爆面中心点布置位移传感器,如图4(b~c)所示。

2 破坏模式

2.1 $Z=1.191 m/kg^{1/3}$ 时砌体墙的破坏模式

在爆炸荷载下,试件W0-1迎爆面中心处,砌块间灰缝开裂,砌块错位;砌块局部开裂,并发生受压破坏,如图5(a)所示。背爆面中心相邻砌块之间发生错位,砌块间砂浆灰缝发生剪切破坏,水平和竖向灰缝与砌块脱粘,如图5(b)所示。

试件WR-3迎爆面墙体和混凝土框架的交界处产生竖向裂缝,如图5(c)所示。与试件W0-1相比,试件WR-3迎爆面未出现明显的加固层开裂与受压破坏现象,说明加固层与墙体表面有效黏结,增强了墙体的抗爆性能。根据弹性波在不同介质界面上的反射和透射理论^[33],弹性波在声阻抗不同的介质中传播时,在接触面发生反射与透射,爆炸冲击波在试件WR-3加固层与砌体墙之间经过一次界面反射、透射后衰减,导致砌体墙承担的冲击荷载减小,继而墙体背爆面水平和竖向灰缝砂浆脱落范围减小,如图5(d)所示。

与试件W0-1相比,在爆炸荷载作用下,试件WR-4背爆面BFRP-FRCM加固层主要承担拉伸荷载,限制了砌块的位移,虽然砌块在爆炸荷载下受压破坏,迎爆面产生多条竖向裂缝和斜裂缝,但迎爆面中心处砌块和砂浆的受压破坏情况有所减轻,如图5(e)所示。由于BFRP-FRCM具有较强的抵抗拉伸荷载和弯曲荷载的能力,因此加固层未出现明显的裂缝和变形,如图5(f)所示。

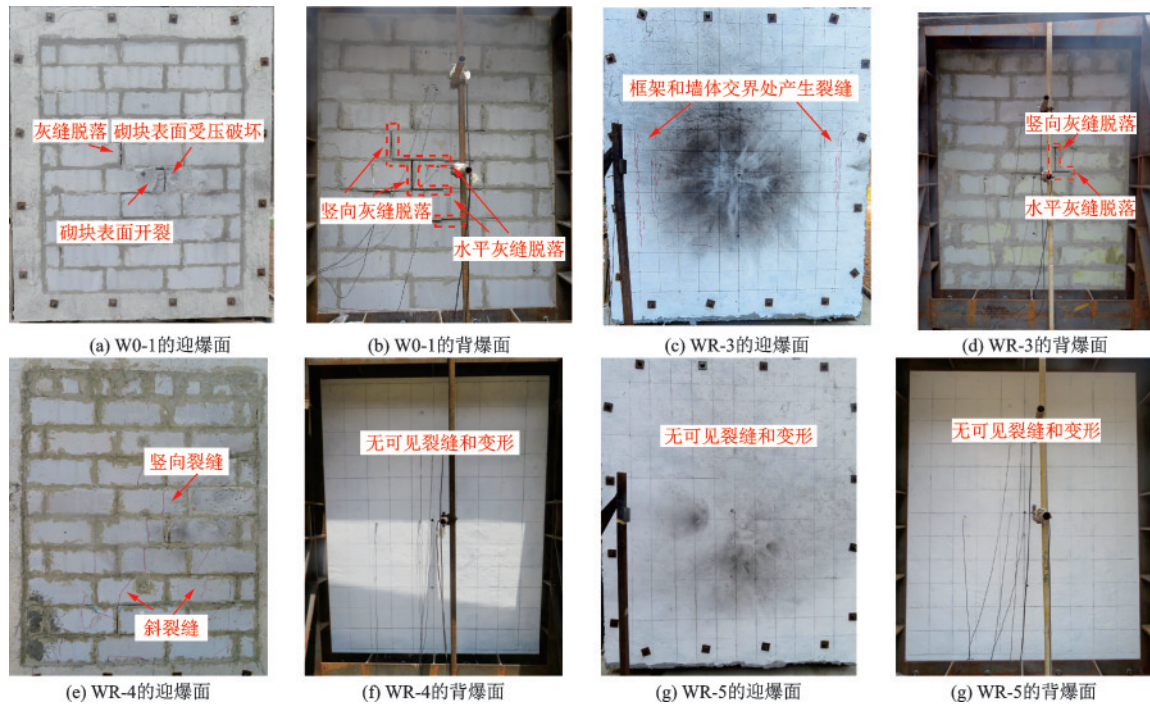


图5 $Z=1.191 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时试件的破坏模式
Fig.5 Failure modes of the walls when $Z= 1.191 \text{ m/kg}^{1/3}$

试件 WR-5 迎爆面除了有灼烧痕迹外,迎爆面和背爆面均无可见的裂缝和变形,如图 5(g)和 5(h)所示,说明双面加固能够更有效地提升砌体填充墙的抗爆性能。

2.2 $Z=0.635 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时砌体墙的破坏模式

由于双面加固对砌体填充墙的抗爆性能提升效果最优,故 $Z=0.635 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,仅开展了未加固墙与双面加固墙的爆炸试验。试件 W0-2 迎爆面中心处砌块和砂浆在爆炸荷载下压溃,产生贯穿洞,洞口宽度约为 42 cm,高度约为 50 cm,洞口左右两侧砌块发生断裂。在迎爆面洞口周围出现直径约为 1.2 m 的环向裂缝,如图 6(a)所示。背爆面砌块在爆炸冲击波经反射形成的拉伸应力作用下剥落,剥落区域围绕贯穿洞大致呈椭圆形,剥落区宽度为 1.2 m,高为 1 m,由于砌块的抗拉强度远低于抗压强度,因此背爆面砌块剥落范围更大。此外,背爆面出现“X”型裂缝,裂缝从洞口处向四角延伸,如图 6(b)所示。砌体墙未产生明显的弯曲变形,整体上表现为局部贯穿性的震塌破坏模式。

试件 WR-5 迎爆面中心处出现直径约 20 cm 的局部圆形漏斗状凹陷,最大深度约为 3.6 cm,凹陷范围和最大深度如图 6(c~d)所示。凹陷内部砌块和

加固层受压破坏,凹陷表面密布环形细裂缝,裂缝围绕试件中心呈环形分布,混凝土框架和墙体交界处也产生了竖向裂缝,如图 6(e)所示,由于 PE 纤维的桥联作用,限制了加固层在爆炸荷载作用下裂缝的发展,裂缝最大宽度不超过 2 mm。背爆面加固层未出现剥落现象,但产生了细小裂缝,一部分裂缝集中在试件中心处,呈环形分布,另一部分裂缝向墙体四角延伸呈“X”形,如图 6(f)所示,这主要是由于加固层具有良好的弯曲韧性和带裂工作能力,能够承担较大的拉伸荷载,增强了墙体的整体抗弯能力,墙体在试验爆炸荷载下仅表现出弯曲变形,未出现压溃或剪切破坏形态。

2.3 砌体墙碎块分布

为了探究 BFRP-FRCM 加固对砌体填充墙碎块飞散的影响规律,对比分析各工况下碎块的分布,见表 3。试件 W0-1 碎块最远飞行距离为 3.8 m,碎块最大尺寸为 15 cm,碎块分布情况和最大尺寸如图 7(a)和 8(a)所示。试件 WR-3 碎块最大尺寸和飞行距离分别为 5 cm 和 1.5 m,碎块分布情况和最大尺寸如图 7(c)和 8(c)所示。试件 WR-4 未发生碎块飞散现象。对比可知,迎爆面加固使的碎块尺寸和飞行距离分别减小了 66.7% 和 60.5%。因此,迎爆面加固和背爆面加固均能减小爆炸产生的碎块导致的二次伤害。

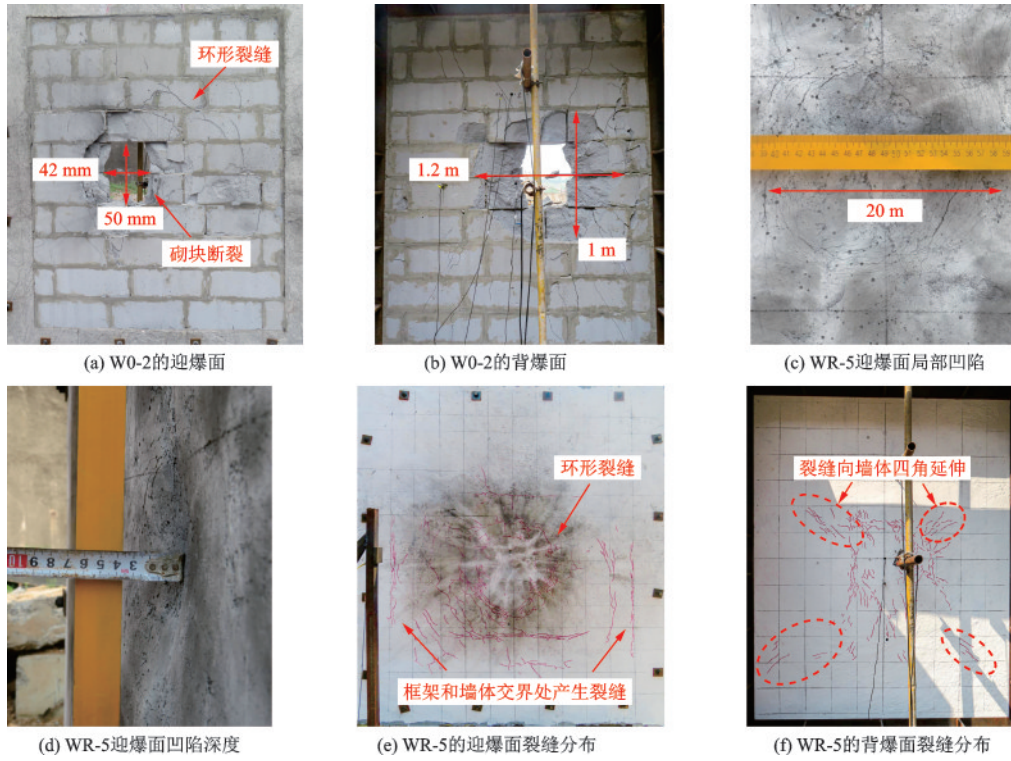


图6 $Z=0.635 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时试件的破坏模式

Fig.6 Failure modes of the walls when $Z= 0.635 \text{ m/kg}^{1/3}$



图7 飞散碎块分布情况

Fig.7 Distribution of the flying fragments

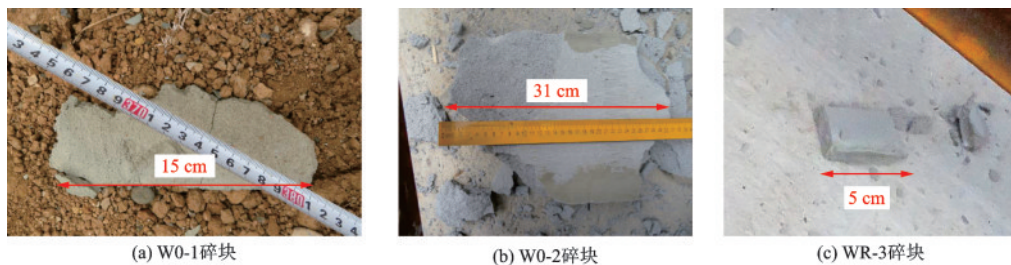


图8 飞散碎块最大尺寸

Fig. 8 Maximum size of the flying fragments

试件 W0-2 产生的碎块最大尺寸为 31 cm, 最远飞行距离为 6 m, 但碎块尺寸主要为 15 cm 左右, 主

要分布在 2 m 范围内, 如图 7(b) 和 8(b) 所示。与试件 W0-1 相比, 碎块尺寸和最远飞行距离分别增加

了106.7%和57.9%，即比例距离的减小显著增大碎块尺寸和最远飞行距离。试件 WR-5 因BFRP-FRCM对墙体两面进行外包，在爆炸荷载下未被穿透，因此无碎块散落现象。

表3 碎块最大尺寸及最远飞行距离

Table 3 Maximum size and farthest flight distance of the fragments

| 试验序号 | 试件编号 | 比例距离/ (m·kg ^{-1/3}) | 最大尺寸/ cm | 最远飞行 距离/m |
|--------|------|----------------------------------|-------------|--------------|
| Test 1 | W0-1 | 1.191 | 15 | 3.8 |
| Test 2 | W0-2 | 0.635 | 31 | 6.0 |
| Test 3 | WR-3 | 1.191 | 5 | 1.5 |

3 位移响应

$Z=1.191 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时，墙体中心处位移时程曲线如图9所示，峰值位移和残余位移见表4。从位移时程曲线可以看出，试件受到爆炸荷载后中心点表现为接近正弦形式的有阻尼衰减振动，加固试件的峰值位移显著减小。与试件 W0-1 相比，WR-3、WR-4 和 WR-5 试件的峰值位移分别下降了48.5%、58.5%和70.8%，试验结果表明，单面加固能够减小峰值位移，但背爆面加固能更好地增加墙体抗弯刚度从而更大地减小墙体的峰值位移；相较于单面加固，双面加固在减小墙体位移响应方面有最好的优势。

对比墙体中心处的残余位移可知，试件 WR-3 的残余位移最大，这主要是由于试件 WR-3 在混凝土框架和墙体交界处的BFRP-FRCM表面产生了竖向裂缝，使得墙体发生了整体位移。试件 WR-5

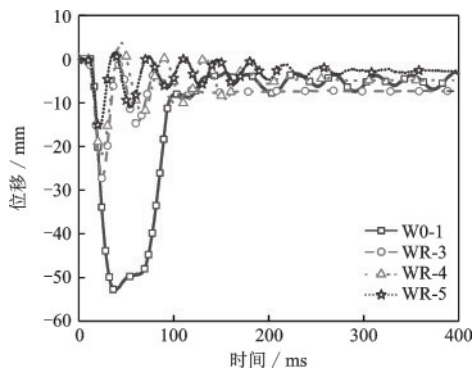


图9 试件中心点的位移时程曲线

Fig.9 Displacement time history curves at the center of specimens

表4 各工况的峰值位移与残余位移

Table 4 Peak and residual displacements at the center of the specimens

| 试验序号 | 试件编号 | 位移峰值/mm | 残余位移/mm |
|--------|------|---------|---------|
| Test 1 | W0-1 | 53.0 | 5.0 |
| Test 3 | WR-3 | 27.3 | 7.5 |
| Test 4 | WR-4 | 22.0 | 4.9 |
| Test 5 | WR-5 | 15.5 | 2.6 |

刚度最大，爆炸荷载作用后，墙体的残余位移最小，约为2.6 mm，仅占墙厚度(240 mm)的1.1%，可忽略不计。

4 反射超压响应

图10给出了 $Z=1.191 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时试件 W0-1、WR-3 和 WR-5 中心点的反射超压时程曲线。每条曲线变化趋势大致相同，反射超压达到峰值后呈指数衰减。试件 W0-1 中心点的反射超压峰值为5.45 MPa，试件 WR-3 和 WR-5 中心点反射超压峰值分别为5.96 MPa和6.18 MPa，未检测到试件 WR-4 中心点反射超压数据，各工况下反射超压峰值的最大值与最小值相差13.4%。

为了分析不同加固方案对砌体填充墙抗爆性能提升的影响，引入冲量 I 和强化参数 $S^{[20]}$ ，定义式分别如式(2)和(3)。冲量是正压作用持续时间内对冲击力的积分，强化参数是反射超压峰值与位移峰值的比值，强化参数越大说明加固强化的效果越好。

$$I = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} P(t) dt \quad (2)$$

$$S = \frac{P}{D} \quad (3)$$

式中， $P(t)$ 为 t 时刻的瞬时超压； t_1 为冲击波到达时间； Δt 为冲击波正压作用持续时间； P 为反射超压峰值； D 为位移峰值。

表5给出了3种加固方案下 I 与 S 的计算结果。由表可知， $Z=1.191 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时，各试件的冲量差距不大，最大值为0.99 MPa·ms，最小值为0.96 MPa·ms，相差不超过4%，说明冲击波对各试件的作用能大致相等。反射超压峰值与冲量相同时，加固试件的强化参数均有提高，其中双面加固的提升最为显著，即双面加固显著提高了砌体墙在爆炸荷载下的承载力和变形能力，抗爆效果最好。

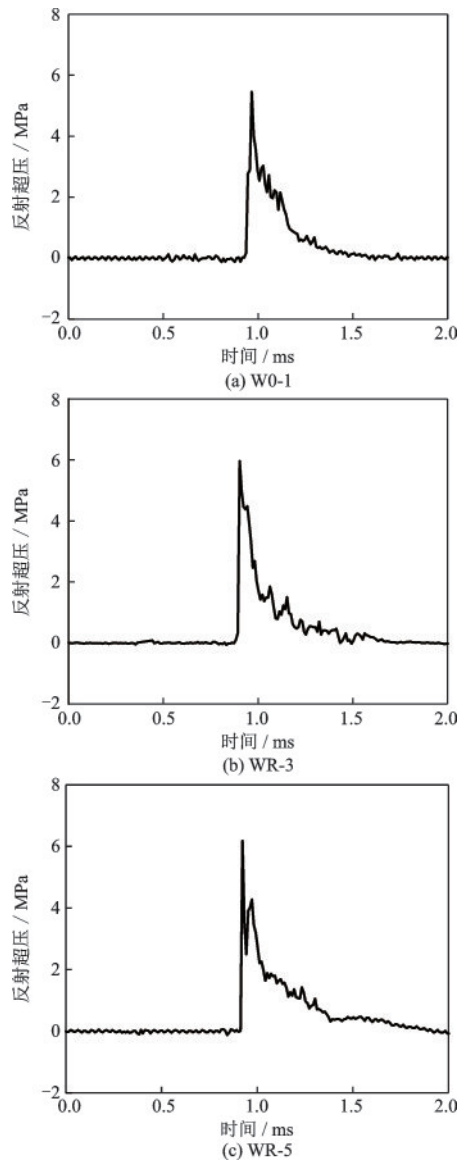


图10 试件中心点的反射超压时程曲线

Fig.10 Time-history curves of the reflective overpressure monitored at the center of specimens

表5 不同加固方案下墙体抗爆炸冲击参数

Table 5 Exploration parameters of the specimens under different reinforcement schemes

| 试验序号 | 试件编号 | 反射超压峰值/MPa | 冲量/(MPa·ms) | 位移峰值/mm | 强化参数/(MPa·mm ⁻¹) |
|--------|------|------------|-------------|---------|------------------------------|
| Test 1 | W0-1 | 5.45 | 0.96 | 53.0 | 0.10 |
| Test 3 | WR-3 | 5.96 | 0.97 | 27.3 | 0.22 |
| Test 5 | WR-5 | 6.18 | 0.99 | 15.5 | 0.40 |

5 结论

通过现场爆炸试验,从砌体墙的破坏模式、碎

块分布、位移时程曲线和反射超压等角度,对比研究了BFRP-FRCM对砌体墙抗爆性能的提升效果,得出以下结论:

(1)未加固墙体在爆炸荷载作用下破坏严重,BFRP-FRCM加固能有效减小砌体墙的破坏程度。迎爆面加固时,砌体墙灰缝脱落范围、爆炸碎块的数量和飞行距离均比未加固时有所减小;背爆面加固砌体墙没有出现碎块飞散现象,加固效果较迎爆面加固更优;相比较而言,双面加固效果最优。

(2)随着比例距离的减小,墙体的破坏程度增加,在本文研究的比例距离范围内,未加固墙体出现震塌和贯穿破坏,而双面加固砌体墙中心部位出现局部变形及细小裂缝,未出现碎块散落现象。

(3)BFRP-FRCM加固砌体墙的抗弯刚度显著增加,能够减小砌体墙中心点处的峰值位移,对比两种单面加固方式,背爆面加固对位移的限制效果更好。

(4)相同比例距离情况下,未加固墙体与加固构件的反射超压和冲量大致相同,但BFRP-FRCM加固能够提高墙体的强化参数。

参考文献:

- [1] 陈大鹏,陈力,还毅,等.盐城响水化工园区“3·21”危化品爆炸事故爆炸威力分析及灾害后果评估[J].防灾减灾工程学报,2020,40(2):196-203.
Chen D P, Chen L, Huan Y, et al. Analysis on the power and disaster consequences of “3·21” explosion accident in the chemical industry park of Xiangshui, Yancheng[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 196-203. (in Chinese)
- [2] Keys R A, Clublely S K. Experimental analysis of debris distribution of masonry panels subjected to long duration blast loading[J]. Engineering Structures, 2017, 130: 229-241.
- [3] Schneider J M, Ramin M V, Stottmeister A, et al. Characterization of debris throw from masonry wall sections subjected to blast [J]. Engineering Structures, 2020, 203(C): 109729.
- [4] 熊维.近距离爆炸下砌体填充墙局部破坏试验研究与数值模拟[D].天津:天津大学,2016.
Xiong W. Experimental study and numerical simulation of local damage of unreinforced masonry under close-in explosion [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)

- [5] Abou-Zeid B M, El-Dakhkhni W W, Razaqpur A G, et al. Response of arching unreinforced concrete masonry walls to blast loading[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(10): 1205-1214.
- [6] Dennis S T, Baylot J T, Woodson S C. Response of 1/4-scale concrete masonry unit (CMU) walls to blast [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128 (2): 134-142.
- [7] Michaloudis G, Gebbeken N. Modeling masonry walls under far-field and contact detonations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 123: 84-97.
- [8] Prakash P R, Azenha M, Pereira J M, et al. Finite element based micro modelling of masonry walls subjected to fire exposure: Framework validation and structural implications [J]. *Engineering Structures*, 2020, 213 (C): 110545.
- [9] Shi Y C, Xiong W, Li Z X, et al. Experimental studies on the local damage and fragments of unreinforced masonry walls under close-in explosions[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90(C): 122-131.
- [10] Wei X Y, Stewart M G. Model validation and parametric study on the blast response of unreinforced brick masonry walls [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(11): 1150-1159.
- [11] 胡嘉辉, 吴昊, 方秦. 近区爆炸作用下砌体填充墙损伤破坏与动态响应的数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(9): 1-11.
Hu J H, Wu H, Fang Q. Numerical simulation of damage and dynamic response of masonry infilled wall under near zone explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(9): 1-11. (in Chinese)
- [12] 韩永利, 陈洋, 陈龙珠. 基于LS-DYNA的墙体抗燃气爆炸能力数值分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30 (3): 298-302.
Han Y L, Chen Y, Chen L Z. Simulation on anti-blast ability of masonry wall under gas explosion load based on LS-DYNA [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30 (3) : 298-302. (in Chinese)
- [13] Alsayed S H, Elsanadedy H M, Al-Zaheri Z M, et al. Blast response of GFRP-strengthened infill masonry walls [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 438-451.
- [14] Chen L, Fang Q, Fan J Y, et al. Responses of masonry infill walls retrofitted with CFRP, steel wire mesh and laminated bars to blast loadings [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2014, 17(6): 817-836.
- [15] Myers J J, Belarbi A, El-Domiatty K A. Blast resistance of FRP retrofitted un-reinforced masonry (URM) walls with and without arching action[J]. *The Masonry Society Journal*, 2004, 22(1): 9-26.
- [16] Tan K H, Patoary M K H. Blast resistance of FRP-strengthened masonry walls. I: approximate analysis and field explosion tests[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(5): 422-430.
- [17] 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.
- [18] Gamage J C P H, Al-Mahaidi R, Wong B, et al. Bond characteristics of CFRP-strengthened concrete members subjected to cyclic temperature and mechanical stress at low humidity [J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 1051-1059.
- [19] Hashemi S, Al-Mahaidi R. Flexural performance of CFRP textile-retrofitted RC beams using cement-based adhesives at high temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 28(1): 791-797.
- [20] Li Z, Chen L, Fang Q, et al. Experimental and numerical study of basalt fiber reinforced polymer strip strengthened autoclaved aerated concrete masonry walls under vented gas explosions [J]. *Engineering Structures*, 2017, 152: 901-919.
- [21] 万军. 碳纤维布加固砌体填充墙抗近距离小当量炸药爆炸实验研究 [J]. *工程力学*, 2019, 36 (增 1) : 293-297.
Wan J. Blast response of CFRP-reinforced concrete masonry wall against small stand-off distance explosive charge [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36 (Sup1) : 293-297. (in Chinese)
- [22] Iqbal N, Sharma P K, Kumar D, et al. Protective polyurea coatings for enhanced blast survivability of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 175: 682-690.
- [23] 王军国, 吴祥云, 李泽斌, 等. 聚脲加固黏土砖砌体抗爆性能试验研究 [J]. *防护工程*, 2017(4): 32-38.
Wang J G, Wu X Y, Li Z B, et al. Experimental investigation of response of polymer retrofit masonry walls subjected to blast [J]. *Protective Engineering*, 2017(4) : 32-38. (in Chinese)
- [24] 尚伟, 黄正祥, 祖旭东, 等. 接触爆炸下聚脲加固砌体墙的抗爆性能试验研究 [C]// 中国力学大会论文集 (CCTAM 2019). 北京: [s.n.], 2019: 3843-3851.
Shang W, Huang Z X, Zu X D, et al. Experimental study on anti-explosion performance of masonry wall reinforced by polyurea under contact explosion [C]// Proceedings of the Chinese Mechanics Conference (CC-

- TAM 2019). Beijing: [s. n.], 2019: 3843-3851. (in Chinese)
- [25] Baylot J T, Bullock B, Slawson T R, et al. Blast response of lightly attached concrete masonry unit walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1186-1193.
- [26] 张振, 廖维张, 马超. BFRP-FRCM 复合层与加气砌块黏结性能试验研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(5): 37-45.
Zhang Z, Liao W Z, Ma C. Experimental investigation on bond behavior between BFRP-FRCM composite layer and aerated brick[J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(5): 37-45. (in Chinese)
- [27] 徐世焱, 尹世平, 蔡新华. 纤维编织网增强混凝土加固钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(4): 23-34.
Xu S L, Yin S P, Cai X H. Investigation on the flexural behavior of reinforced concrete beam strengthened with textile-reinforced concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(4): 23-34. (in Chinese)
- [28] Zheng Y Z, Wang W W, Brigham J C. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with a composite reinforcement layer: BFRP grid and ECC [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 424-437.
- [29] Padalu P K V R, Singh Y, Das S. Efficacy of basalt fibre reinforced cement mortar composite for out-of-plane strengthening of unreinforced masonry[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 1172-1190.
- [30] 朱忠锋. FRP 网格/ECC 约束混凝土短柱轴向受力性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
Zhu Z F. Experimental research on axial mechanical behavior of short concrete column strengthened with FRP grid and ECC [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [31] 王俊杰. 织物增强纤维复合水泥基材料力学性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
Wang J J. Experiment on basalt fabric reinforcement polymer-fiber reinforced cementitious matrix mechanical property [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021. (in Chinese)
- [32] 廖维张, 王俊杰, 王秋婉. 玄武岩织物网格-纤维水泥基复合层拉伸性能试验研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(10): 42-50.
Liao W Z, Wang J J, Wang Q W. Experiment on basalt fabric reinforced polymer-fiber reinforced cementitious matrix tensile mechanical properties [J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(10): 42-50. (in Chinese)
- [33] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 47-50.
Wang L L. Foundation of stress waves [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 47-50. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)