

文章编号:1674-2974(2016)01-0061-07

## 近距离爆炸荷载作用下砌体墙动态响应 及破坏过程的数值模拟\*

郭玉荣<sup>†</sup>, 张楠

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为了探索砌体墙在近距离爆炸荷载作用下的破坏规律及碎块抛射规律,通过AUTODYN建立数值模型,得到在近距离手提箱包炸弹爆炸荷载作用下砌体墙的荷载分布规律及碎块抛射速度规律.结果表明:12墙、24墙、加固24墙在爆炸荷载作用下破坏规律是相似的.24墙及加固24墙相对12墙碎片抛射速度有较明显的降低.加固24墙由于聚氨酯加固膜的兜裹作用,最终会明显减小碎块的出墙面位移和速度.此外砌体墙各测点抛射速度与比例距离的关系曲线与超压峰值与比例距离关系比较相似.

**关键词:**砌体墙;动态响应;爆炸荷载;爆炸碎片;防爆

**中图分类号:**TU375

**文献标识码:**A

## Numerical Simulation of Masonry Wall Dynamic Response and Failure Process under Close Range Blast Load

GUO Yu-rong<sup>†</sup>, ZHANG Nan

(College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** In order to explore the failure process and fragments ejection rule of blast case for masonry walls, the AUTODYN program was used to simulate the dynamic response of masonry walls under close range blast load. The distribution of blast pressure on masonry walls and debris ejection laws were obtained. The results show that the destruction rules of 120 mm, 240 mm masonry walls, and the strengthened 240 mm wall under close range blast load are similar. The debris ejecting speed of 240 mm wall and the strengthened 240 mm wall declines obviously when compared with 120 mm masonry wall. The debris ejecting speed of the strengthened 240 mm wall declines significantly on account of the consolidated film of PU. Moreover, the relationship between ejecting speed and scaled distance is similar to the relationship between scaled distance and peak overpressure.

**Key words:** masonry walls; dynamic response; blast load; explosion fragments; explosion prevention

日益频繁的恐怖爆炸袭击活动,使工程师们不得不面对更加严峻的挑战:即如何保证结构在爆炸

\* 收稿日期:2015-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978096), National Natural Science Foundation of China(50978096);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0179)

作者简介:郭玉荣(1970-),男,浙江青田人,湖南大学工学博士,教授

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: yurongguo@hnu.edu.cn

冲击荷载下的安全,以避免人员伤亡及财产损失.由于砌体墙的经济性,砌体墙几乎应用于所有的建筑结构中.然而在爆炸冲击荷载作用下,相对于钢筋混凝土结构砌体墙表现出很强的脆性<sup>[1]</sup>,高速爆炸冲击波产生冲击荷载使砌体碎片以很高的速度抛射,给建筑的使用者造成严重的伤害.因此自 9.11 恐怖袭击事件以来,世界各国的政府和研究机构对砌体墙的抗爆问题进行了广泛而深入的研究.2002年,美国 The Technical Support Working Group (TSWG),进行了一系列的砌体墙试验对超压—冲量破坏进行考察.此外他们对墙体的破坏形态做了分类,共 4 种<sup>[2]</sup>:“可使用”、“可修复”、“倒塌”和“碎片飞出”.当墙体出现碎片飞出的情况时,只要速度达到 9.2 m/s,就会对人员造成较大的威胁.

研究砌体墙抗爆性能时,曾采用现场爆炸<sup>[3-5]</sup>、摆锤<sup>[6]</sup>、落锤<sup>[7]</sup>、爆炸模拟器<sup>[8]</sup>等试验法.鉴于真实试验的危险性和不易观测性,进行数值模拟分析就成了较好的替代方法.在数值模拟研究方面,许三罗<sup>[9]</sup>用单砖长度的砌体棱柱来代替整面墙,进行了砌体填充墙的破坏过程分析.虽然得出了砌体填充墙大体破坏规律,但是用砌体棱柱代替整面墙体的模拟方法忽略了相邻棱柱对砌体的约束作用,与砌体墙的实际情况有所出入.张彦春等<sup>[10]</sup>分析了砌体墙炸洞尺寸与炸药量的关系,得出了随着炸药量的增大,炸洞尺寸变大的结论,但是随着炸药量的继续增加,炸洞尺寸增大速度变慢.

恐怖袭击事件的频发,使越来越多的国家和地区提高了防范恐怖袭击的意识并采取各种措施来隔离汽车炸弹与建筑物的距离,取得了一定的效果.然而手提箱包炸弹由于其高度的灵活性、隐蔽性及不确定性,正越来越成为建筑和人员安全的威胁<sup>[11]</sup>.手提箱包炸弹的等效 TNT 当量从 5 磅到 20 磅不等,本文 TNT 当量取上限值为 20 磅.作者应用爆炸动力学数值模拟程序 ANSYS/AUTODYN,分别对 12 墙、24 墙、加固 24 墙(端部通过角钢及螺栓锚固在混凝土梁上的聚氨酯(PU)膜)在相同的 TNT 炸药(20 磅)爆炸荷载作用下的破坏过程进行了研究,获得了砌体填充墙表面载荷分布规律、砌体墙的动态破坏过程规律和砌体的抛射规律,并结合结果探讨砌体墙受爆炸荷载直接作用下的抗爆性能.

## 1 数值计算模型

由于在实际建筑中,外填充墙主要为 24 墙,内

填充墙主要为 12 墙.因此建立三片墙体模型:12 墙、24 墙和加固 24 墙.由于我国房屋建筑的层高一般为 3 m 左右,所以墙体模型的几何尺寸为 1 990 mm×3 000 mm×115(240) mm 的砌体墙,利用对称性建立一半宽度的砌体墙.在模拟过程中,一块砌块的具体尺寸为 240 mm×90 mm×115 mm,在墙体长度方向放置 4 块(X 向),高度方向放置 30 块(Y 向),厚度方向放置 1 块(2 块)(Z 向),砂浆灰缝厚度均为 10 mm.为了模拟砌体墙的边界条件,约束住砌体墙顶部和底部处的 X,Y,Z 方向速度(即约束住砌体墙底部和顶部的位移);给整个墙体施加沿墙体高度方向速度限制,来模拟刚性楼地面对墙体 Y 方向的速度约束;在对称面上施加 X 方向速度限制的边界条件,具体情况如图 1 所示.

为了模拟手提箱包炸弹恐怖袭击,将 9.10 kg (20 磅) TNT 炸药放在距离墙体表面 0.5 m(炸药质心到砌体墙表面距离)处对称轴所处的地面上,比例距离  $Z$  ( $Z = R/W^{1/3}$ ,其中  $R$  为距离(m), $W$  为炸药质量(kg))为 0.24 m/kg<sup>1/3</sup>.在砌体墙对称轴的正面(即放置炸药一面)建立 6 个压强测点,来得到 6 个测点处的爆炸超压荷载数据.同时在砌体墙的背面同样高度处建立另外 6 个速度测点,来得到砌体墙的不同部位砖块的抛射速度和位移,具体正面压强测点和背面速度测点布置见图 1.

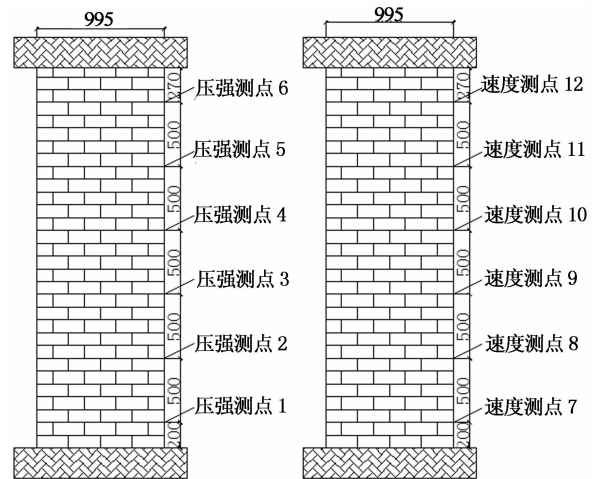


图 1 计算模型和测点布置示意图(1/2 模型)

Fig. 1 Diagram of computational model and gauges arrangement

在墙体周围用 Euler Idea Gas 来模拟空气介质,以此来传递 TNT 炸药爆炸产生的冲击波.同时在 Euler 网格的边界添加流出边界条件来模拟无限

边界的空气,完整模型见图 2.

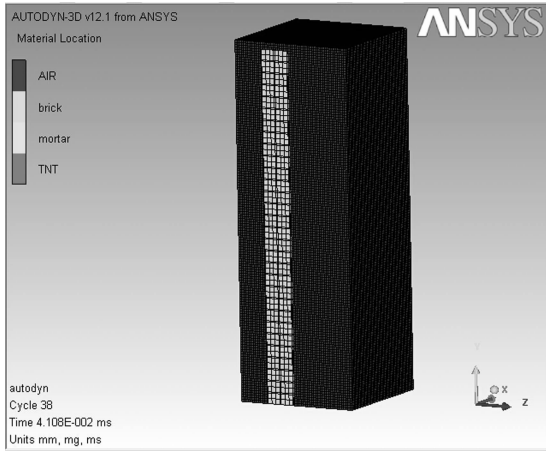


图 2 置于空气中的砌体墙示意图

Fig. 2 Diagram of masonry wall in the air

## 2 材料模型和材料参数

为了模拟爆炸荷载对砌体墙的破坏作用,涉及到 5 种材料,即 TNT 炸药、空气、砌块、砂浆和 PU 膜.在材料模型选取方面,主要参考了张彦春等<sup>[11]</sup>和 Irshidat Mohammed<sup>[8]</sup>在砌体墙抗爆研究中所采用的模型,如表 1 和表 2 所示.这些材料模型的合理性和正确性已在该两篇文献中得到证明.

本文算例涉及的主要材料参数<sup>[12]</sup>如表 3 所示.

表 1 材料模型

Tab. 1 Material model

材料	状态方程	强度模型	失效准则
空气	Idea Gas	None	No. ne
砌块	Porous	Drucker-Prager	Hydro(Pmin)
砂浆	Compaction	MO Granular	Hydro(Pmin)
TNT	JWL	None	None
PU	Linear	Elastic	Principal Stress

表 2 部件网格类型

Tab. 2 Grid types of all parts

部件	墙体	空气	加固膜	TNT
网格类型	Lagrange	Euler-FCT	Shell	填于空气

表 3 材料参数

Tab. 3 Material parameters MPa

材料	体积模量	剪切模量	失效主拉应力
聚氨酯	$2.0 \times 10^3$	5.0	34.5
砌块	$11 \times 10^3$	$4.4 \times 10^3$	2.6
砂浆	$5.8 \times 10^3$	$2.2 \times 10^3$	1.0

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 砌体墙表面不同时刻超压荷载分布情况

从图 3 中可见砌体墙正面各部位不同时刻压强分布差别很大,而且随着时间衰减得很快.根据文献<sup>[1]</sup>,对于普通砌体墙当超压荷载介于 50~76 kPa 时,墙体严重开裂,倾斜很大角度甚至倒塌.当超压荷载大于 76 kPa 时,墙体完全倒塌.

通过图 4 可以发现离爆炸中心越远,压力峰值越小,而且减小得非常迅速,测点 2,3,4,5,6 的压力峰值大约只有测点 1 的 1/5.从图 4 可见各测点的超压峰值均大于 1 MPa,远远大于 76 kPa,因此砌体填充墙在 20 磅的 TNT 当量箱包炸弹爆炸荷载作用下会完全倒塌.

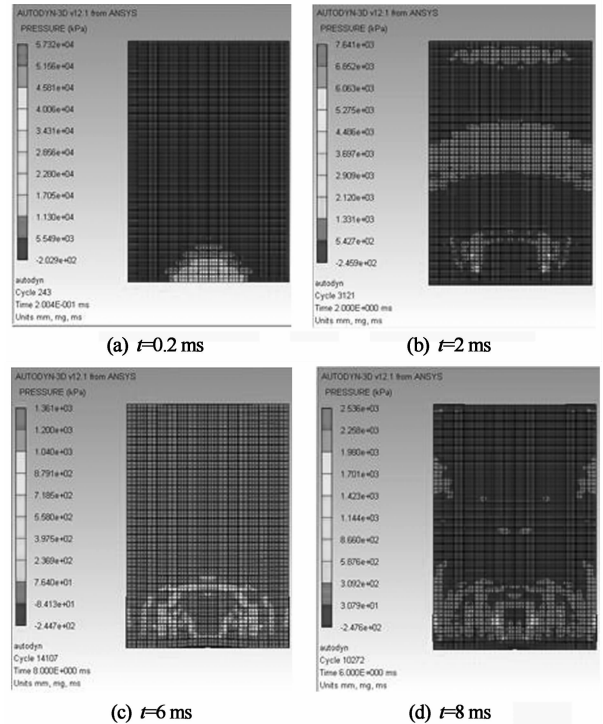


图 3 砌体墙不同时刻正面压强荷载分布图

Fig. 3 Pressure load distribution of masonry wall at different times

### 3.2 各砌体墙破坏模式演变

了解砌体填充墙的破坏模式可以对砌体墙的抗爆设计及加固设计提供有益建议.

#### 3.2.1 24 墙破坏模式

从图 5 可见,砌体墙底部对称轴灰缝部位首先表现出塑性,并以圆形迅速向上和向两侧扩展.底部砌块首先出现失效破坏,然后破坏部位从底部向上部发展,且主要表现为水平灰缝失效破坏.从最终的

破坏形态发现破坏部位主要集中在中下部,而上部破坏相对较轻。

失效的是砌体底部被约束砌块及约三分之一高度处砌块,接着大量水平灰缝失效破坏出现在中部及上部,并在靠近两墙边出现两条竖直通缝。最终破坏最严重的部位主要分布在砌体墙下部三分之一处。

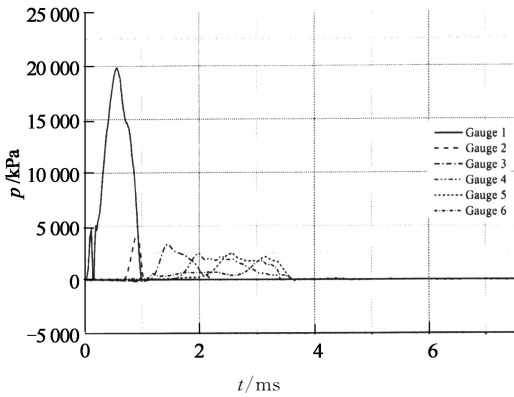


图4 砌体墙正面测点压力时程曲线  
Fig. 4 Frontage pressure time history of masonry wall

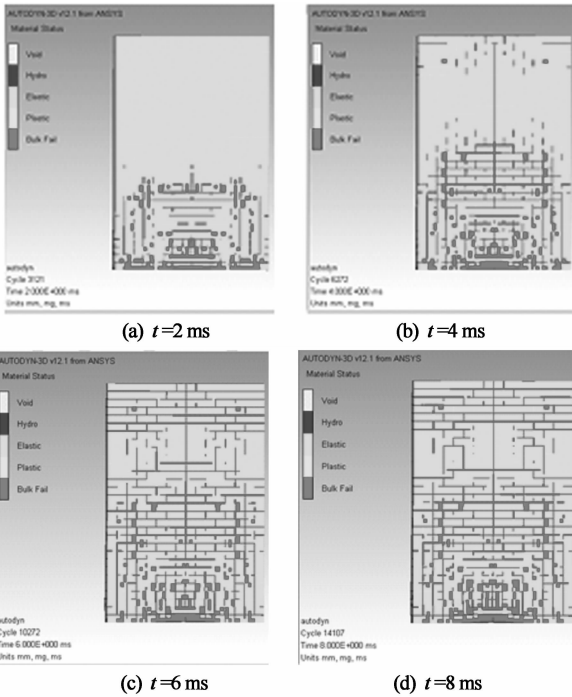


图5 24墙破坏过程演变示意图  
Fig. 5 Diagram of 240 mm masonry wall failure process

### 3.2.2 加固24墙破坏模式

从图6可见,砌体墙底部对称轴处水平灰缝处首先表现出塑性,并迅速向上部和两侧扩展。下部零星分散竖直灰缝首先失效,砌体底部约束部位砌体失效,失效水平灰缝从底部向上部和两侧迅速发展。最终破坏部位也主要集中在中下部,上部破坏相对较轻。

### 3.2.3 12墙破坏模式

从图7可见,砌体墙首先会在底部对称轴部位表现出塑性,并以圆形迅速向上和向两侧扩展。然后出现

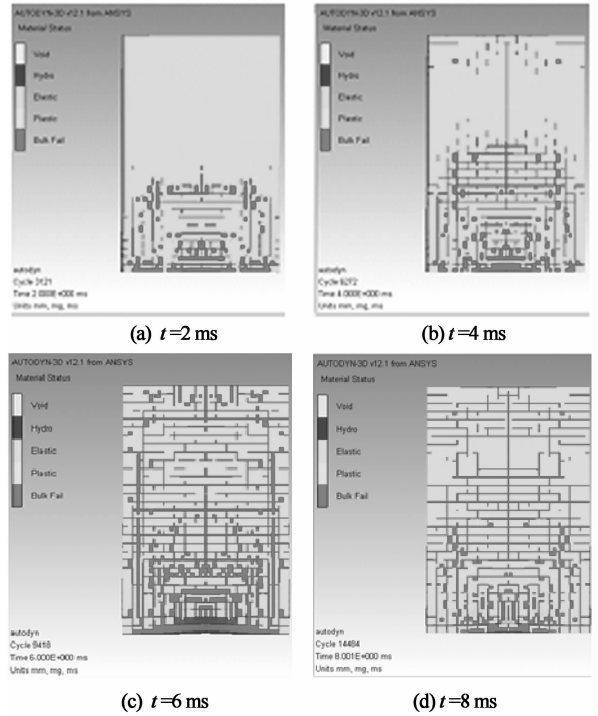


图6 加固24墙破坏过程演变示意图  
Fig. 6 Diagram of fortified 240 mm masonry wall failure process

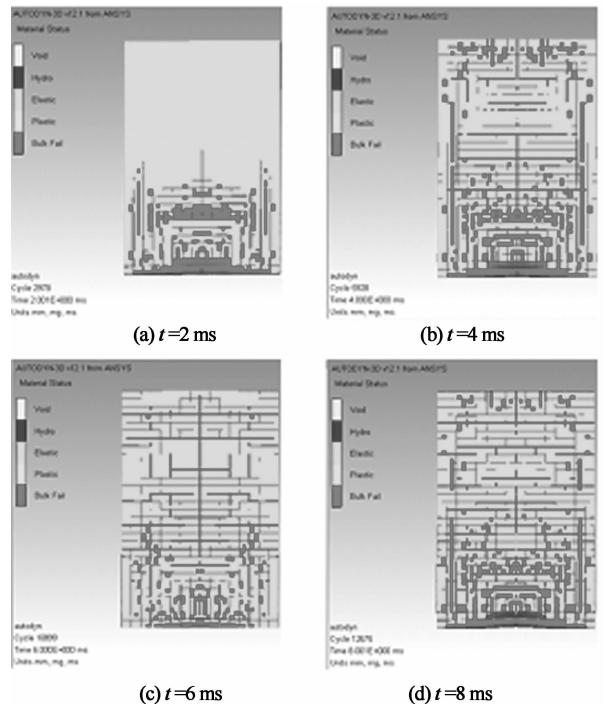


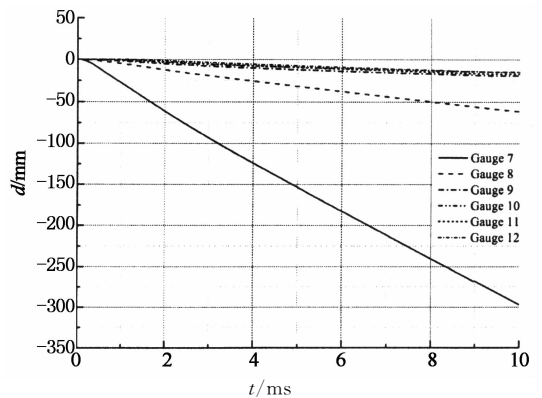
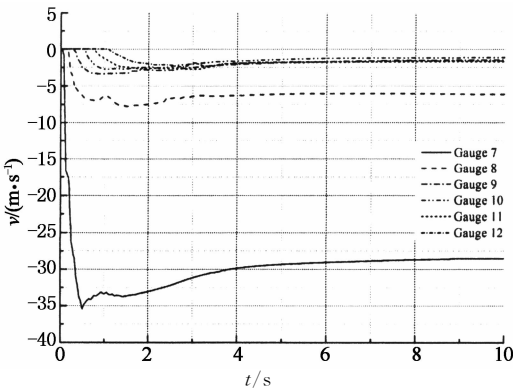
图7 120墙破坏过程演变示意图  
Fig. 7 Diagram of 120 mm masonry wall failure process

通过以上各砌体墙的破坏模式演变可知 3 种砌体墙在手提箱包炸弹的爆炸荷载作用下,破坏模式大体一致,不同的只是破坏程度的轻重.

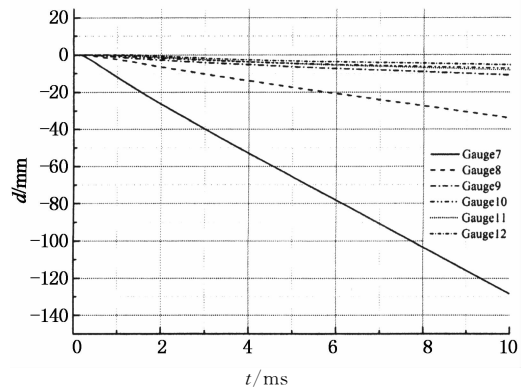
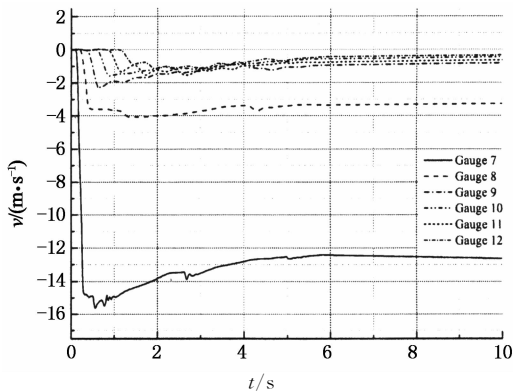
### 3.3 各砌体墙砌块抛射速度及位移时程曲线

了解砌体墙在近距离爆炸荷载作用下碎块抛射速度规律,能更好地防范爆炸破坏作用和调查爆炸恐怖案件.

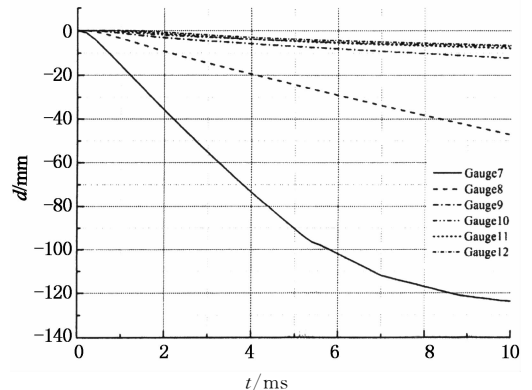
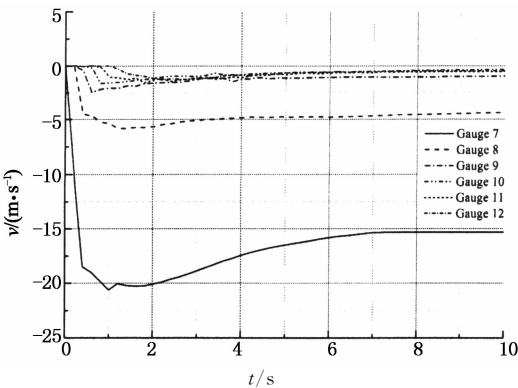
通过图 8 可知:加固 24 墙的位移时程曲线图中,



(a) 12 墙速度及位移时程曲线



(b) 24 墙速度及位移时程曲线



(c) 加固 24 墙速度及位移时程曲线

图 8 砌体墙各测点抛射速度及位移时程曲线

Fig. 8 Ejecting velocity and displacement time history of masonry walls

最下部的测点 7 呈现出明显的非线性,而 12 墙及 24 墙各测点位移时程曲线基本是线性关系.大部分测点抛射速度在 1.0 ms 之前达到峰值,有些测点(如测点 8, 11, 12)达到峰值抛射速度较晚,但在 1 ms 时达到的抛射速度也比较接近峰值.测点达到速度峰值后均有小幅度的回落,然后趋于稳定.因此本文取 4~10 ms 的平均速度来代表各测点的抛射速度.

由于各测点的比例距离不同,各测点的抛射速度也不同.通过数据拟合得出各砌体填充墙在近距离爆炸下的抛射速度与比例距离的关系,具体情况见图9及表4.

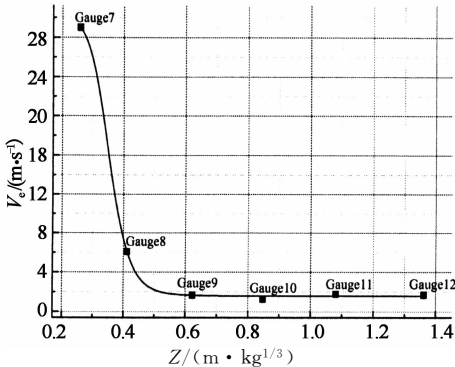
通过图9可以发现砌体墙各测点抛射速度与比例距离关系曲线与比例距离与超压峰值的关系曲线大体轮廓比较吻合,此外比例距离与抛射速度的具体拟合关系见表4.

表4 砌体墙测点比例距离与抛射速度拟合曲线关系表

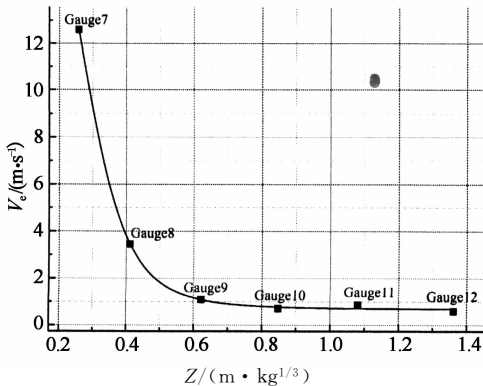
Tab.4  $Z-V_e$  fitting curve of masonry walls

类型	抛射速度 $V_e$ 与比例距离 $Z$ 的拟合关系
12 墙	$V_e = 1.59 + 28.35[1 + (2.84Z)^{10.77}]^{-1}$
24 墙	$V_e = 0.68 + 18.26[1 + (3.42Z)^{5.02}]^{-1}$
加固 24 墙	$V_e = 0.58 + 19.36[1 + (3.06Z)^{5.76}]^{-1}$

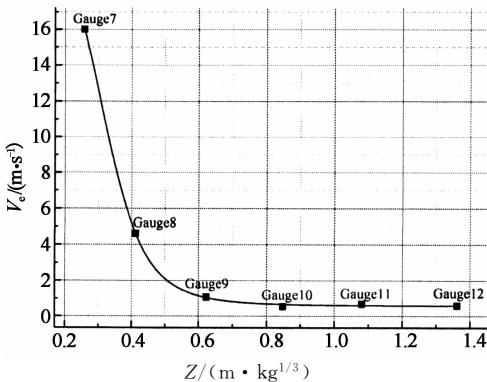
通过图10,可以发现3种砌体墙表现出的峰值抛射速度的不同之处:24墙及加固24墙相较于12墙各部位峰值抛射速度均有所降低,墙体顶部和底部降低的多,中间降低的少.此外可以发现12墙较24墙各相对应的部位峰值抛射速度出现时间要滞后一些.加固24墙较24墙下部峰值抛射速度有稍微增大,其他部位差异很小.



(a) 12 墙各测点抛射速度与比例距离的关系曲线



(b) 24 墙各测点抛射速度与比例距离的关系曲线



(c) 加固 24 墙各测点抛射速度与比例距离的关系曲线

图9 砌体墙各测点  $Z-V_e$  的拟合曲线图

Fig.9  $Z-V_e$  fitting curve of masonry walls

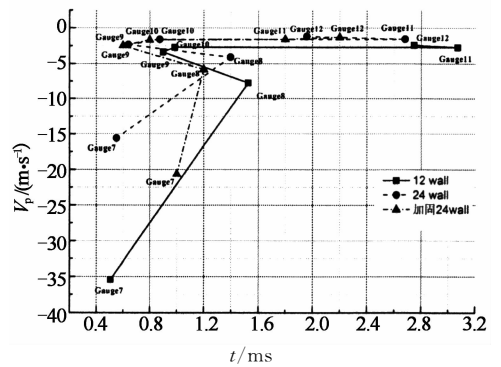


图10 各砌体墙测点峰值抛射速度对比图

Fig.10 Peak ejecting velocity of masonry walls

### 3.4 砌体墙最大位移对比分析

通过表5可以发现在相同的时刻24墙及加固24墙相较于12墙最大出墙面位移(碎块最大出墙面位移)均有大幅度的减小.此外加固24墙相较于24墙初期位移相当;但是随着位移的变大,最大位移比越来越小,由初期的0.91变为0.65,且位移增幅逐渐变小,说明PU加固膜逐渐发挥效力.

表5 各砌体墙不同时刻最大出墙面位移  
Tab.5 Maximum displacements of walls at different times

类别	各对应时刻最大出墙面位移/mm				
	10 ms	20 ms	30 ms	40 ms	50 ms
12 墙	401.2	751.53	1099.43	1446.9	1794.05
24 墙	218.9	399.62	579.45	750.34	924.29
加固 24 墙	198.9	316.99	435.54	528.17	603.14

## 4 结 论

通过以上分析可以得到如下结论:

1)在近距离手提箱包炸弹爆炸荷载作用下,12墙,24墙均表现出较明显的脆性并倒塌,且砌体填充墙的下部破坏较为严重,因此应对砌体墙的下部予以特殊加强.此外下部碎块的抛射速度较高,会给建筑使用者生命安全带来较大威胁.加固24墙也会倒塌,但是由于加固膜的兜裹作用,高速抛射碎块会被兜住,因此能较大程度的减轻碎块抛射带来的威胁.

2)加固24墙和24墙相比,在砌块峰值抛射速度方面除下部有一定幅度的增大,其他部位基本相同;此外中部砌块抛射速度峰值出现时间有一定程度的提前,而下部及顶部砌块抛射速度峰值出现时间则有所滞后.

3)无论是12墙还是24墙,在手提箱包炸弹的爆炸荷载作用下,从碎块的抛射速度来看,其碎块的抛射速度均能对建筑使用者带来较严重的伤害.通过延长分析时间可以发现加固24墙的最大出墙面位移在初期与24墙相当,但是随着出墙面位移的增大,加固膜逐渐发挥效力,可以较大程度的减小最大出墙面位移,因此其对减轻人员伤亡有较大帮助.

4)通过拟合各测点抛射速度和比例距离得到关系曲线,发现其大致轮廓与比例距离与峰值超压关系曲线大致轮廓比较吻合,且当比例距离大于0.6以后,碎块抛射速度随比例距离的变化幅度较小.

## 参考文献

[1] CHIPLEY Michael, KAMINSKAS Michael, LYON Wesley. Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings[R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2003:28-31.

[2] SUNSHINE Douglas, AMINI Ali, SWANSON Mark. Overview of simplified methods and research for blast analysis[J]. Structures, 2004:1-11.

[3] DAVIDSON James, PORTER Jonathan, DINAN Robert, *et al.* Explosive testing of polymer retrofit Masonry walls[J].

Journal of Performance of Constructed Facilities, 2004,18(2): 100-106.

[4] DAVIDSON James, FISHER Jeff, HAMMONS Michael, *et al.* Failure mechanisms of polymer reinforced concrete masonry walls subjected to blast[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(8):1194-1205.

[5] BAYLOT James, BULLOCK Billy, SLAWSON Thomas, *et al.* Blast response of lightly attached concrete masonry unit walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(8): 1186-1193.

[6] CHENG Li-juan, MCCOMB Ashley. Unreinforced concrete masonry walls strengthened with CFRP sheets and strips under pendulum impact[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(6):775-783.

[7] 郭玉荣, 喻忠操, 郭磊. 砌体墙抗冲击落锤试验方法研究与应用[J]. 结构工程师, 2012,28(6): 123-127.

GUO Yu-rong, YU Zhong-cao, GUO-Lei. Impact testing methods for masonry walls based on the drop hammer[J]. Structural Engineers, 2012,28(6):123-127. (In Chinese)

[8] IRSHIDAT Mohammed, ALOSTAZ Ahmed, CHENG Alexander, *et al.* Blast vulnerability evaluation of concrete masonry unit infill walls retrofitted with nano-particle reinforced polyurea: modelling and parametric evaluation[J]. Structures Congress, 2011:2126-2141.

[9] 许三罗. 爆炸荷载作用下砌体结构响应的有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007,27(3): 357-362.

XU San-luo. Finite element analysis of masonry wall structure under blast load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007,27(3): 357-362. (In Chinese)

[10] 张彦春, 王仲琪, 尤祖明, 等. 爆炸荷载下砌体墙破坏过程模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2010,30(10):1139-1142.

ZHANG Yan-chun, WANG Zhong-qi, YOU Zu-ming, *et al.* Numerical analysis of damage to brick walls subjected to blast loading[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010,30(10):1139-1142. (In Chinese)

[11] HINMAN Eve. Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks[R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2003:59-62.

[12] 喻忠操. 基于落锤冲击试验机的砌体填充墙抗爆加固试验研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院, 2013:38-52.

YU Zhong-cao. Study on blast resistance of reinforced masonry infill wall based on impact of drop hammer machine[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2013:38-52. (In Chinese)