

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0252

# 燃气爆炸作用下蒸压加气混凝土砌体墙的加固性能\*

彭 培<sup>1</sup>, 李 展<sup>1</sup>, 张亚栋<sup>2</sup>, 陈 力<sup>2</sup>, 方 秦<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学国防工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 东南大学教育部爆炸安全防护工程研究中心, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 为研究燃气爆炸作用下蒸压加气混凝土砌体墙的加固性能, 基于有限元软件 LS-DYNA, 建立了砌体墙简化数值模型, 分析了 GB 50779-2012 石油化工控制室抗爆设计规范中建议的荷载作用下砌体墙高度和厚度的影响, 对比了玄武岩纤维 (basalt fiber reinforced plastic, BFRP) 布与喷涂式聚脲对蒸压加气混凝土单向砌体墙的加固效果, 并以防止砌体墙倒塌为设计目标, 给出了加固建议。研究表明, 本文中建立的简化数值模型能较好地模拟燃气爆炸作用下蒸压加气混凝土砌体墙的变形和破坏模式, 计算结果与试验吻合良好; 《规范》建议荷载作用下, 未加固砌体墙以弯曲破坏为主, 随着墙体高度增加, 破坏模式由弯曲破坏向剪切破坏转变; BFRP 布条加固可以有效提高墙体抗弯刚度和压拱效应, 而聚脲涂层加固对抗弯刚度提高有限但墙体拉拱效应明显, 二者均能显著提高墙体抗爆性能; 加固墙体均发生弯曲破坏, BFRP 布条材料的断裂一般发生在墙体位移最大处, 而聚脲涂层材料的断裂发生在跨端边界处。

**关键词:** 燃气爆炸; 蒸压加气混凝土; 砌体墙; 玄武岩纤维布; 喷涂式聚脲

中图分类号: O381; TU362 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Performance of retrofitted autoclaved aerated concrete masonry walls subjected to gas explosions

PENG Pei<sup>1</sup>, LI Zhan<sup>1</sup>, ZHANG Yadong<sup>2</sup>, CHEN Li<sup>2</sup>, FANG Qin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. Engineering Research Center of Safety and Protection of Explosion & Impact of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

**Abstract:** Numerical studies were conducted by using the finite element software LS-DYNA to investigate the performances of the retrofitted autoclaved aerated concrete masonry (AAC) walls subjected to gas explosions. A simplified numerical model for the masonry walls was developed and calibrated with the test data. Under the blast loads specified by the design codes, the influences of wall height and thickness on the structural response of the unstrengthened one-way AAC masonry walls were discussed. In addition, the performances of the BFRP strip and spray-on polyurea strengthened one-way AAC masonry walls were compared and the retrofitting suggestions for engineering practice were proposed. It is found that the numerical predications of the mid-span displacements and failure modes are in agreement with the test data. Under the specified blast loads, the unstrengthened masonry walls mainly fail for bending of the structures, and with the increase of wall height, the failure mode changes from flexure failure to shear failure. Using the BFRP strips can improve the stiffness and arching effect of the walls significantly while the spray-on polyurea can enhance the tensile membrane effect of walls effectively. The failure

\* 收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2019-11-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB058000); 国家自然科学基金(51622812); 江苏省自然科学基金(BK20190571)

第一作者: 彭 培(1993—), 男, 硕士研究生, 961405626@qq.com

通信作者: 李 展(1990—), 男, 博士, 讲师, lz.9008@163.com

mode of the strengthened masonry walls is a typical flexure failure. The fracture of the BFRP strips generally occurs at the mid-span area of the one-way masonry walls, while the fracture of spray-on polyurea occurs at the boundary of the masonry walls.

**Keywords:** gas explosion; autoclaved aerated concrete; masonry wall; BFRPstrip; spray-on polyurea

随着我国天然气工业和城市燃气市场迅速发展,用气人口持续增长,用气总量迅速提高,燃气爆炸事故也越来越频繁,成为建筑结构安全领域重要的危险源之一。蒸压加气混凝土作为一种新型节能墙体材料,是以粉煤灰、石灰、水泥、石膏等为主要原料,加入发气剂、调节剂等添加剂,经配料、搅拌、浇筑、高压蒸养等工艺过程而制成的多孔混凝土制品,因其具有重量轻、比强度高、可加工性和隔热隔音效果好等优点被人们广泛使用<sup>[1-3]</sup>。然而,蒸压加气混凝土材料强度较低,在爆炸荷载作用下更容易发生破坏。

目前关于砌体墙抗爆性能和加固方面的研究<sup>[4-7]</sup>主要集中于凝聚相爆炸(TNT、C4等高能材料)荷载。范俊余等<sup>[5]</sup>在野外试验基础上,利用墙体精细化数值模型,研究了墙体裂缝发展过程和墙体破坏模式;Davidson等<sup>[6]</sup>使用LS-DYNA3D有限元软件,对聚合物加固混凝土砌块墙体的破坏机理与抗爆性能进行了研究;Chen等<sup>[7]</sup>针对1/2缩比砌体墙开展了爆炸试验和数值模拟,研究了CFRP布、钢丝网和钢板对墙体的加固性能。以上针对凝聚相爆炸荷载作用的研究,尤其是数值模拟工作,对研究燃气爆炸作用下砌体墙抗爆性能具有重要参考价值。燃气爆炸作用下砌体墙抗爆性能的研究起步较晚,且集中于燃气爆炸荷载对未加固墙体的破坏效应<sup>[8-10]</sup>,对加固墙体尤其是新型蒸压加气混凝土墙体的研究还相当欠缺。Li等<sup>[11]</sup>对燃气爆炸作用下黏土砖砌体墙的抗爆性能进行了全尺寸试验和数值模拟研究,讨论了边界条件、砌筑方式和墙体厚度对其抗爆性能的影响。韩永利等<sup>[12-13]</sup>将燃气爆炸荷载简化为升压、降压时间均为50 ms的三角形载荷,并基于LS-DYNA和简化数值模型对混凝土空心砌块墙体的抗爆能力进行了数值模拟。韩笑等<sup>[14]</sup>使用精细化和均匀化数值模型对燃爆事故中砌体墙的破坏进行了数值模拟分析,指出了精细化模型和均匀化模型的优缺点。以上针对燃气爆炸荷载作用的研究局限于传统黏土砖和混凝土砌块砌体墙,未涉及到当前大量应用的新型蒸压加气混凝土砌体墙,也未涉及到墙体的加固问题,考虑到蒸压加气混凝土砌块抗爆性能较差的特点,开展燃气爆炸荷载作用下蒸压加气混凝土砌体墙破坏机理与抗爆性能研究具有重要的科学意义和工程应用价值。

为规范石油化工控制室的抗爆设计,《石油化工控制室抗爆设计规范》<sup>[15]</sup>(以下简称《规范》)建议了两种设计荷载用于指导结构设计,但尚未涉及墙体加固问题。本文中,基于简化数值模型,对燃气爆炸作用下蒸压加气混凝土砌体墙的抗爆性能进行数值模拟,并与多组工况试验数据进行对比,验证模型的合理性。在此基础上,研究《规范》<sup>[15]</sup>建议荷载作用下BFRP布与喷涂式聚脲加固砌体墙的变形与破坏模式,讨论墙体高度和厚度对砌体墙抗爆性能的影响,并以防止墙体倒塌为标准,给出不同尺寸蒸压加气混凝土砌体墙的加固建议。

## 1 试验概述

Li等<sup>[16-17]</sup>设计了9组泄爆空间燃气爆炸试验,对蒸压加气混凝土砌体墙动力响应进行了研究。试验墙体尺寸为3 m×2 m×0.12 m,使用尺寸为590 mm×240 mm×120 mm的蒸压加气混凝土砌块砌筑,界面剂(砂浆)层厚度为5 mm。由于混凝土框架尺寸限制,填充墙最上层砌块高为60 mm。BFRP布条宽度为50 mm,厚度为0.12 mm,BFRP布条间距为250 mm。使用角钢对BFRP布条端部进行锚固,角钢的宽度为50 mm,厚度为5 mm。单向墙试件上下边界使用界面剂与混凝土框架粘结,左右边界使用塑料薄膜隔开,以确保左右两侧框架和砌块之间没有约束;双向墙试件边界均使用界面剂与混凝土框架粘结,同时左右边界每隔25 cm设置直径为5 mm的拉结钢筋。蒸压加气混凝土砌体墙试件如图1所示,试验装置如图2所示。

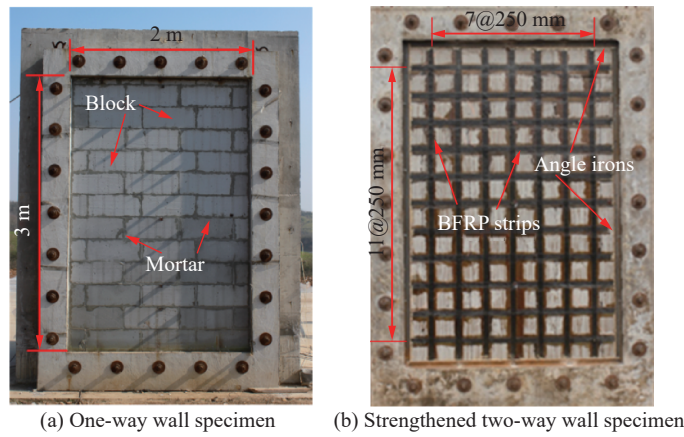


图 1 蒸压加气混凝土砌体墙试件

Fig. 1 Test specimens for autoclaved aerated concrete (AAC) masonry wall

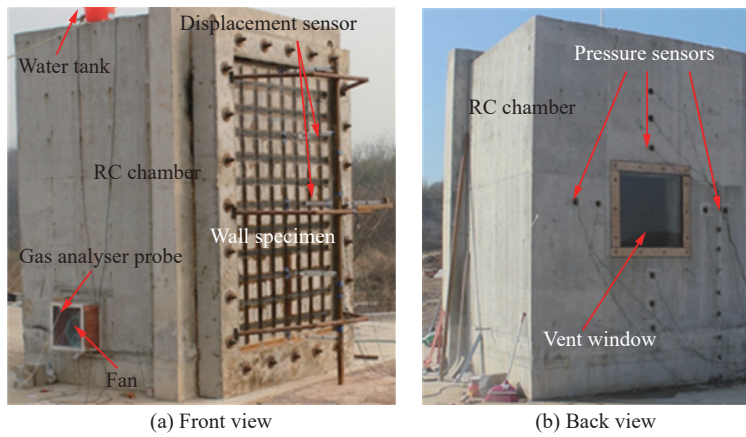


图 2 试验装置(背爆面加固)<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Test setup (rear-face strengthened cases)<sup>[17]</sup>

爆炸荷载超压、墙体位移测点布置及典型爆炸荷载超压时程曲线如图 3~4 所示。P1~P10 为压力测点编号, D1~D5 为位移测点编号。试验采用 99.9% 的商用甲烷作为可燃气体, 通过改变甲烷体积浓度和窗口封闭物来调整爆炸压力大小, 试验工况及试验概况如表 1 所示。试验研究表明: 蒸压加气混凝土

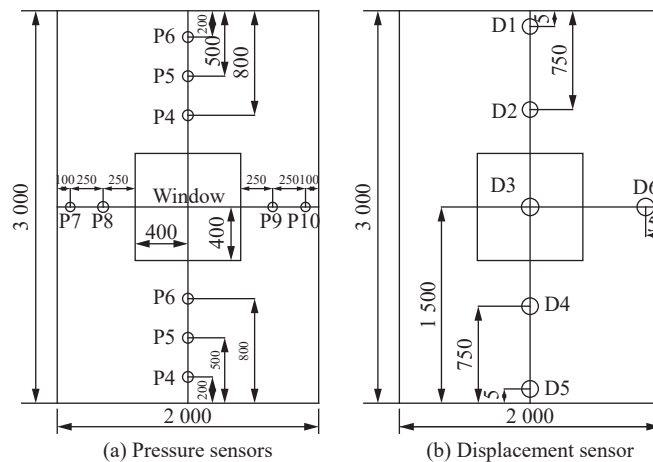


图 3 荷载超压及位移的测点布置(单位: mm)

Fig. 3 Layout of measuring points for load overpressure and displacement (unit in mm)

土砌块单向墙体的抗爆能力很低,容易发生倒塌;墙体破坏大部分是砌块首先破坏,而不是发生在界面剂(砂浆)位置;使用 FRP 材料外贴加固能明显提高砌体墙的抗力。

## 2 数值模型的建立

利用 LS-DYNA 有限元软件建立墙体有限元模型,对燃气爆炸荷载作用下蒸压加气混凝土砌体墙的动力响应进行数值模拟,并使用试验数据对数值模型进行验证。

### 2.1 结构模型及其简化

在数值模拟中,墙体模型与试验试件尺寸保持一致,为  $3\text{ m}\times 2\text{ m}\times 0.12\text{ m}$ 。考虑到计算的效率和精度,选用简化数值模型对蒸压加气混凝土砌体墙进行模拟。在简化模型中,将界面剂厚度折算到砌块上,砌块之间设置无厚度接触面,通过固连-失效接触(tie-break)模拟界面剂的粘结,处理后砌块尺寸为  $595\text{ mm}\times 245\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ ,简化模型如图 5 所示。砌块和混凝土框架均采用 solid 164 实体单元模拟,角钢和 BFRP 布条采用 shell 单元模拟。为得到合理的网格密度,对简化墙体模型进行了网格收敛性分析,墙体模型网格尺寸选为  $20\text{ mm}$ 。

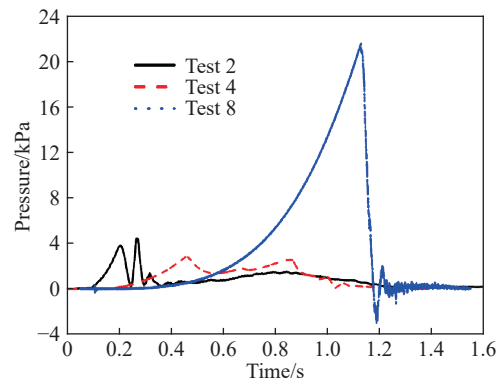


图4 荷载超压时程曲线

Fig. 4 Load overpressure-time curves

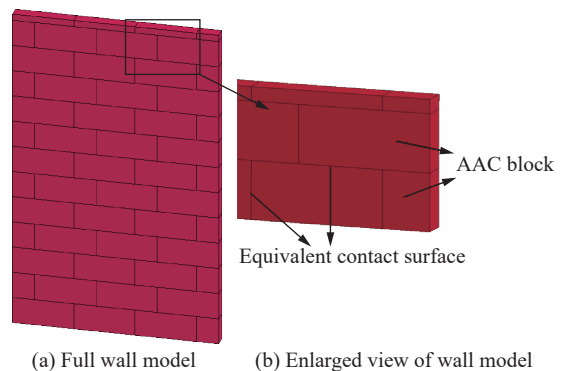


图5 墙体几何模型

Fig. 5 Geometric models of AAC masonry walls

表1 试验方案

Table 1 Testing scheme

工况编号	墙体类型	甲烷体积分数/%	窗口封闭物	荷载峰值/kPa	备注
Test 1	单向墙W1 <sup>[16]</sup>	12.50	聚乙烯薄膜	0.74	
Test 2		12.50	聚乙烯厚膜	3.84	
Test 3		12.50	4 mm玻璃	5.15	墙体倒塌
Test 4	双向墙W2 <sup>[16]</sup>	12.50	聚乙烯厚膜	2.91	
Test 5		12.50	4 mm玻璃	13.25	
Test 6		9.50	聚乙烯薄膜	85.88	墙体倒塌
Test 7	BFRP加固墙W3 <sup>[17]</sup>	12.50	聚乙烯厚膜	2.96	
Test 8		12.50	5 mm玻璃	21.26	
Test 9		9.50	12 mm玻璃	43.17	墙体倒塌

### 2.2 材料模型及参数

#### 2.2.1 蒸压加气混凝土砌块

蒸压加气混凝土砌块<sup>[18-19]</sup>采用 96 号材料模型 MAT\_BRITTLE\_DAMAGE 模拟,砌块的密度、杨氏模量、抗压强度等基本参数根据测试标准 GB/T11971-1997<sup>[20]</sup>和 JGJ/T70-2009<sup>[21]</sup>在实验室内实测得到。材料的泊松比、拉伸极限、断裂韧度和剪力滞留系数等从文献 [16] 中获取,如表 2 所示。

表 2 AAC 砌块的材料参数

Table 2 Material parameters of AAC blocks

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/MPa	泊松比 $\mu$	拉伸极限/MPa	剪切极限/MPa	抗压强度/MPa	断裂韧度/(N·m <sup>-1</sup> )	剪力滞留系数
砌块	625	530	0.20	0.70	1	3	80	0.03

2.2.2 BFRP 材料

采用各向同性材料模型 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 模拟 BFRP 布条, 将 BFRP 纤维布简化为各向同性的弹脆性材料。根据 ASTM 3039-14<sup>[22]</sup> 和 ASTM 7565-10<sup>[23]</sup> 对 BFRP 布条试件进行准静态拉伸试验, 从而获得 BFRP 布条的抗拉强度、极限应变和杨氏模量, 如表 3 所示。

表 3 BFRP 的材料参数<sup>[17]</sup>

Table 3 Material parameters of BFRP strips<sup>[17]</sup>

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/GPa	泊松比 $\mu$	抗拉强度/MPa	极限应变/%
BFRP	2 500	77.90	0.17	1 642	2.1

2.2.3 聚脲材料

喷涂式聚脲材料的材料参数参考文献 [24] 选取, 如表 4 所示。

表 4 聚脲涂层的材料参数<sup>[24]</sup>

Table 4 Material parameters of spray-on polyurea<sup>[24]</sup>

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/MPa	泊松比 $\mu$	屈服应力/MPa	单元失效应变	切线模量/MPa
聚脲涂层	1 150	80	0.17	8	1.20	6.45

2.2.4 角钢及混凝土框架

混凝土框架和角钢的材料模型选用 MAT\_ELASTIC 模拟。在数值计算时为了避免单元严重畸变导致的困难, 加入 erosion 失效准则, 删除严重畸变单元。取应变作为失效准则, 砌块的失效应变为 0.02。当材料的应变达到限定值时, 单元失效退出工作。

2.3 边界及接触面处理

为了真实地模拟墙体试件边界, 数值模型中通过建立真实的混凝土框架来模拟单向墙和双向墙的边界条件, 并约束框架顶部、底部及两侧边缘节点在 X、Y 和 Z 三个方向上的位移来模拟固定边界, 如图 6 所示。

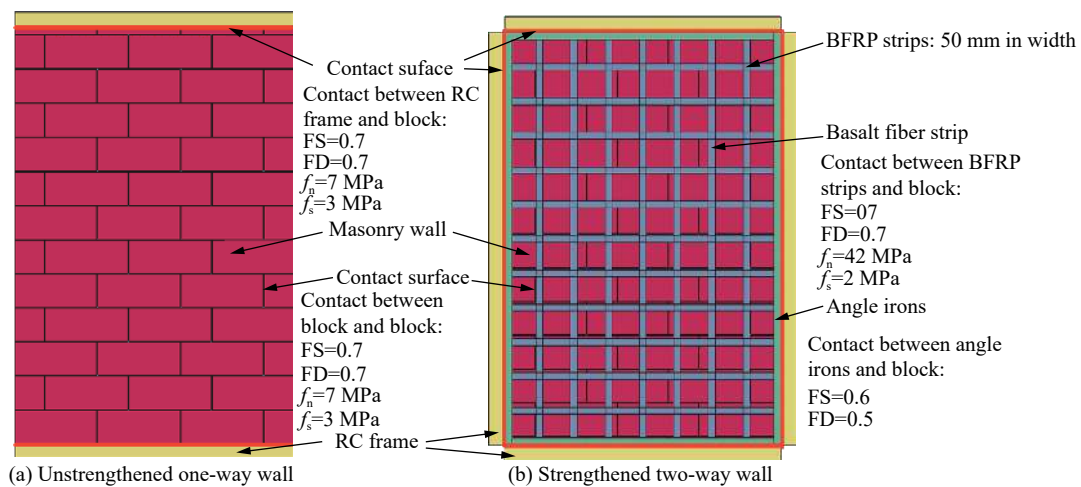


图 6 简化模型的边界条件

Fig. 6 Boundary conditions of simplified numerical model

简化模型中混凝土框架与砌体墙之间、砌块与砌块之间以及BFRP布条与砌体墙之间均通过固连-失效接触模拟。燃气爆炸试验中发现FRP布条在结构铰线处被直接拉断,未发现布条与砌体墙之间的剥落和相对滑动,这说明加固材料和砌体墙之间的黏结作用是十分有效的。参考文献[25-26]的取值,本文混凝土框架与砌块之间、砌块与砌块之间以及BFRP布条与砌块之间的静摩擦因数FS和动摩擦因数FD均取为0.7。文献[27]中选取接触面允许剪应力 $f_s$ 为砌块抗剪强度的2/3,允许正应力 $f_n$ 为允许剪应力的4/5,取值范围为0.53~0.73 MPa。文献[28]中认为允许剪应力和允许正应力的取值范围在荷载较高时取2.76~3.11 MPa,荷载较低时取1.73~2.21 MPa。文献[29]中则认为,允许正应力和允许剪应力对墙体在爆炸荷载作用下的动力响应影响不大。本文中结合材料试验,经数值模拟结果与试验的验证,取砌块与砌块之间的接触面允许正应力和允许剪应力分别为7 MPa和3 MPa,框架与砌体墙之间的接触面允许正应力和允许剪应力分别为7 MPa和3 MPa,BFRP布条与砌体墙之间接触面允许正应力和允许剪应力分别为42 MPa和2 MPa。角钢与砌体墙之间的接触采用面-面自动接触,接触面上的静摩擦因数取0.6,动摩擦因数取0.5。

## 2.4 模型验证

将试验实测超压荷载施加在墙体模型的表面单元,对试验中墙体的变形和破坏过程进行模拟,得到跨中位移曲线与试验数据的对比如图7所示。

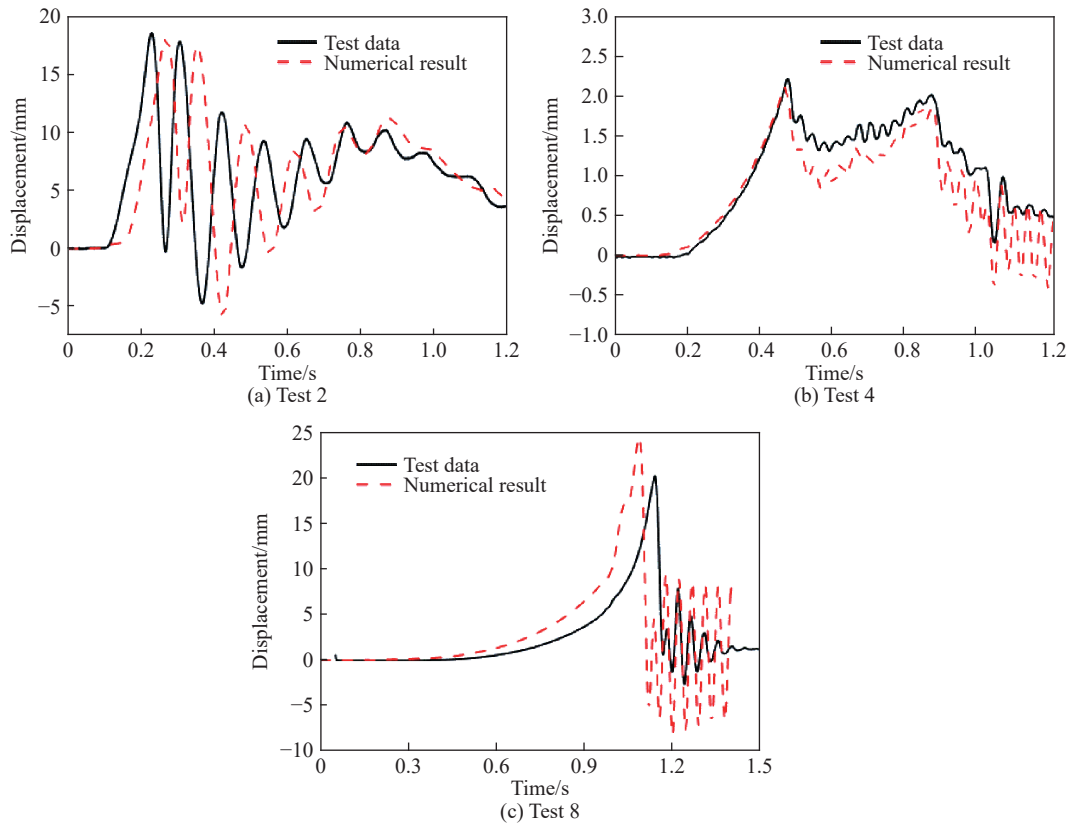


图7 数值结果与试验数据的位移时程曲线对比

Fig. 7 Comparison of mid-span displacements between numerical results and test data

从图7(a)可知,Test 2中蒸压加气混凝土单向砌体墙使用简化模型计算得到的跨中位移为18.04 mm,试验测得的跨中位移为18.50 mm,计算结果比试验结果小2.49%;从图7(b)可知,Test 4中简化模型计算得到的跨中位移为2.11 mm,试验测得的跨中位移为2.22 mm,计算结果与试验结果相差4.96%。从图7(c)可知,Test 8中数值计算得到的跨中位移为24.70 mm,比试验实测值20.26 mm大21.9%。对比分析发现,数值计算得到的变形和破坏模式、跨中位移等与试验结果吻合良好,尤其是对单向墙体弹性阶

段的位移响应模拟,无论是最大位移还是墙体振动预测频率都与试验数据吻合得相当好。但在模拟BFRP加固双向砌体墙时结果偏大,这可能是由以下原因引起:(1)所用的材料模型不够精确,难以精确求得简化建模方式的相关参数;(2)模拟边界条件与实际边界条件存在差异;(3)也可能是模型中忽略砂浆层造成的影响。总体来说,本文中建立的数值模型基本能反映砌体墙在燃气爆炸荷载作用下的弹塑性响应特征,说明该简化数值模型是合理的。

图8~9给出了单向未加固墙体和双向加固墙体破坏模式与试验破坏现象的对比。从图8可以看出,Test 3中蒸压加气混凝土单向墙破坏时属于典型的弯曲破坏,破坏时跨中位置出现贯穿裂缝,墙体断成两截,与试验现象一致。从图9可以看出,Test 9中蒸压加气混凝土加固双向墙由于边界的对称性,其位移也是对称的。破坏时,墙体呈现“X”型的裂缝,与试验观察到的现象一致。从图8~9的数值模拟结果可以看到,简化数值模型能成功捕捉砌体墙的破坏特征。

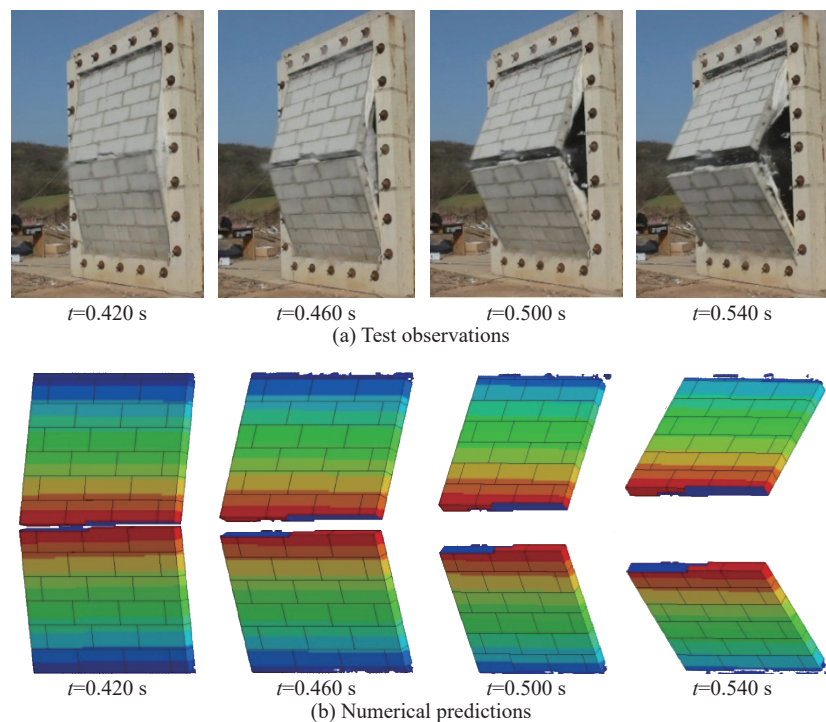


图8 未加固单向砌体墙试验观察与数值预测破坏过程对比(工况3)

Fig. 8 Comparison of failure process between numerical predictions and test observations (Test 3)

### 3 《规范》建议荷载作用下墙体的加固方案

单向墙是建筑结构中常见的墙体结构,与双向墙相比,其抗爆性能更低,更容易发生倒塌。基于前文已验证的简化数值模型,对《规范》<sup>[15]</sup>建议爆炸荷载作用下蒸压加气混凝土单向砌体墙的动力响应进行数值模拟,并讨论BFRP布条和喷涂式聚脲对砌体墙抗爆性能的影响,为防止墙体倒塌提供加固方案。图10为《规范》建议的两种荷载,荷载A的峰值压力为21 kPa,持续时间为100 ms;荷载B的峰值压力为69 kPa,持续时间为20 ms。

#### 3.1 模型简述

数值模拟中,蒸压加气混凝土单向砌体墙分为3、4和5 m等3种高度和120、240和360 mm等3种厚度,共9种尺寸类型的墙体,仅考虑上下边界约束情况,墙体几何模型如图11所示。BFRP布条沿墙体单向布置,布条宽度为50 mm,厚度为0.12 mm,间距为250 mm,如图12(a)所示。喷涂式聚脲为满面喷涂,如图12(b)所示。

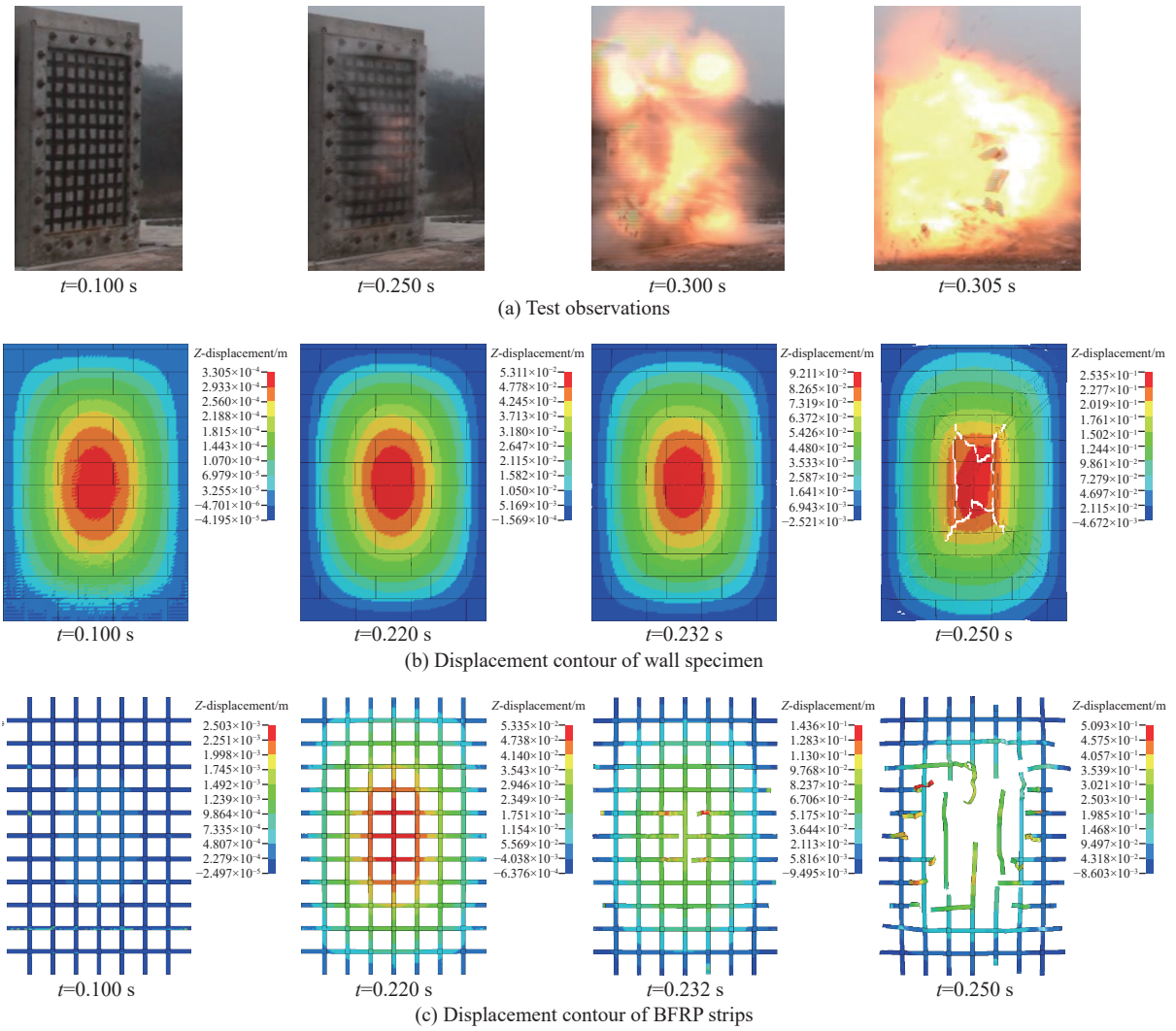


图 9 BFRP 加固砌体墙试验观察与数值预测破坏过程对比(工况 9)

Fig. 9 Comparison of failure process between numerical predictions and test observations (Test 9)

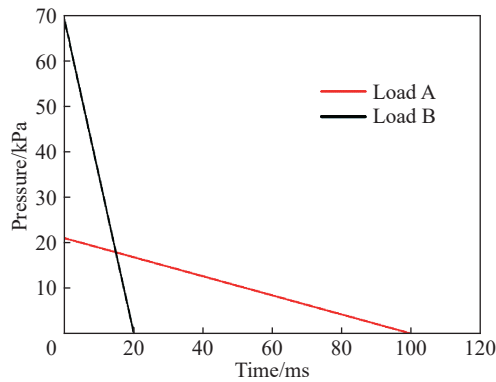


图 10 规范建议的爆炸荷载

Fig. 10 Blast load recommended by the design code

### 3.2 未加固墙体的抗爆性能

参考 UFC 规范<sup>[30]</sup>中关于单向砌体墙破坏等级的划分,依据墙体边界的转角允许值将墙体分为可修复和不可修复两个等级;对于未经加固的砌体墙,当墙体跨中位移大于墙体厚度时,定义为墙体倒塌。



通过计算得到不同高度、厚度条件下未加固单向墙在《规范》建议荷载作用下的破坏损伤情况, 如表 5 所示。

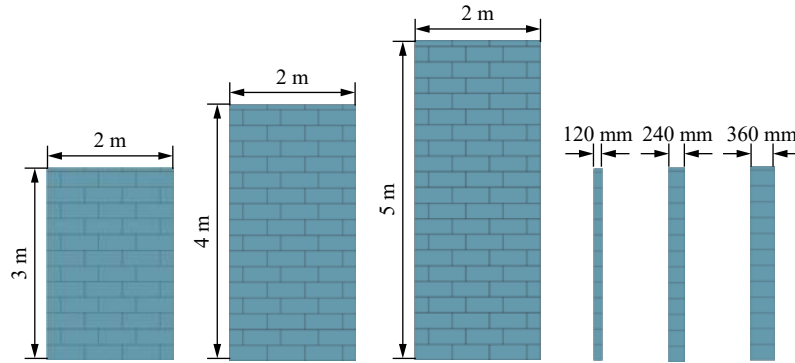


图 11 砌体墙尺寸

Fig. 11 Dimensions of masonry walls

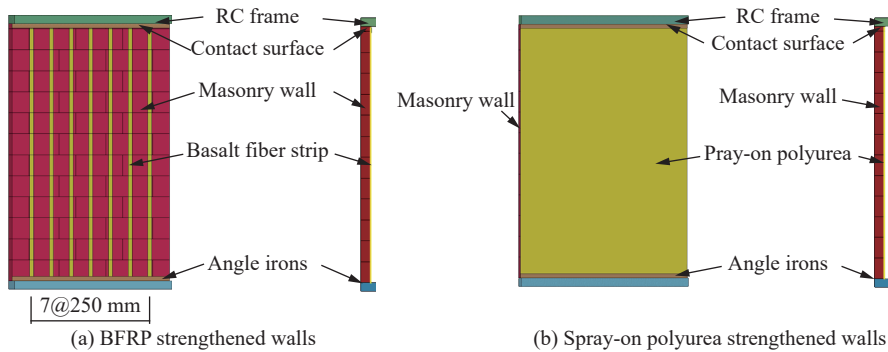


图 12 AAC 单向砌体墙加固有限元模型

Fig. 12 Strengthened AAC masonry wall models

表 5 不同高度、厚度条件下蒸压加气混凝土单向墙损伤情况

Table 5 Damage of one-way AAC masonry walls with different heights and thicknesses

墙体高度/m	不同厚度墙体损伤结果		
	120 mm	240 mm	360 mm
3	倒塌	不可修复	可修复
4	倒塌	倒塌	不可修复
5	倒塌	倒塌	不可修复

以墙高为 3 m 的蒸压加气混凝土单向砌体墙为例, 不同厚度墙体最大变形时刻的变形与破坏模式如图 13 所示。对于未加固砌体墙, 由于砌体材料的抗拉强度较低, 而单向墙拉应力主要集中在墙的背后跨中和迎爆面跨端, 因此墙体破坏时裂缝一般首先出现在墙体背爆面跨中和迎爆面跨端, 图 13 给出的数值模拟结果也验证了这一现象。墙厚为 120 mm 时, 砌体墙在背爆面跨中和迎爆面跨端出现裂缝, 并在跨中位置发生断裂, 最终倒塌。墙厚为 240 mm 和 360 mm 时, 跨中位移的最大值分别为 43.4 mm 和 22.1 mm, 小于墙体厚度, 认为没有倒塌。显然, 墙体厚度越厚, 在相同爆炸荷载作用下砌体墙跨中位移越小, 墙体抗力越高。一方面墙体厚度的增大引起结构整体刚度和截面抗力增加, 另一方面墙体厚度增加使得结构起拱效应更明显, 抑制了弯曲变形的发展。

以 120 mm 厚蒸压加气混凝土单向砌体墙为例, 不同高度墙体的破坏模式如图 14 所示。3 m 高墙体的破坏模式属于典型的弯曲破坏, 跨中位置位移最大, 墙体断裂为两截。4 m 高墙体的破坏模式介于弯曲破坏与剪切破坏之间, 最大位移出现在跨中位置, 在距跨端约四分之一跨处变形较大; 破坏时, 先在距

离跨端约四分之一跨处发生断裂,而后跨中位置处也发生断裂,墙体倒塌。5 m 高墙体的破坏模式类似剪切破坏,砌体在距离跨端约五分之一的跨中位置断裂,墙体中间部分直接飞出。由此可知,在《规范》建议荷载作用下,未加固蒸压加气混凝土砌体墙随着墙高度的增加,破坏模式由典型弯曲破坏向剪切破坏转变。

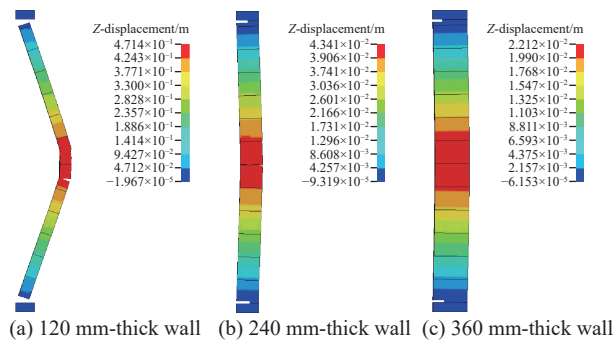


图 13 不同厚度的单向砌体墙最大变形时刻变形与破坏模式

Fig. 13 Deformation and failure modes of masonry walls with different thicknesses at the maximum deflection moment

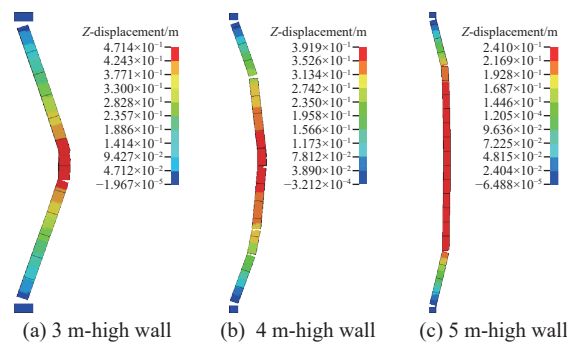


图 14 不同高度砌体墙破坏模式

Fig. 14 Failure modes of masonry walls with various heights

### 3.3 加固墙体的抗爆性能

对表 5 中倒塌的墙体进行数值模拟,研究《规范》建议荷载作用下 BFRP 布条和喷涂式聚脲对砌体墙抗爆性能的影响。对于加固的砌体墙,定义加固材料断裂且跨中最大位移超过墙体厚度为墙体倒塌的条件。经估算,若按可修复的损伤等级<sup>[23]</sup>对倒塌墙体进行加固设计,本文加固方法所需的 BFRP 布条和聚脲涂层材料厚度可能达到 10 cm,考虑到实际情况,这显然是不适合的。而由表 5 可知,砌体墙越厚,墙的抗力越高,更经济和安全的做法是增加墙体的厚度。因此,本文以防止墙体倒塌为设计目标,对《规范》建议荷载作用下墙体加固所需要的 BFRP 布条厚度(层数)和喷涂式聚脲涂层厚度进行估算,墙体刚好不发生倒塌所需的厚度即为加固厚度, BFRP 材料的厚度依次增加 0.12 mm,聚脲涂层的喷涂厚度依次增加 0.10 mm,计算结果如表 6 所示。

对于 120 mm 厚的砌体墙,墙高为 3 m 时需要的 BFRP 布条厚度为 0.48 mm,大于 4 m 和 5 m 高墙体所需的加固厚度 0.36 mm。使用喷涂式聚脲材料加固也可以发现类似的现象,墙高为 3 m 和 4 m 时,使用聚脲材料加固所需的厚度为 0.40 mm,而 5 m 高墙体所需的加固厚度为 0.30 mm,这可能与未加固砌体墙的变形模式有关。

以 3 m 高、120 mm 厚的单向墙为例,两种不同加固方式的砌体墙的变形与破坏模式如图 15~16 所示。当 BFRP 布条厚度等于 0.48 mm 或聚脲涂层厚度等于 0.40 mm 时,墙体未发生倒塌,加固墙体迎爆面跨端的砌块发生开裂;使用喷涂式聚脲加固的墙体跨中位置处砌块的破坏比使用 BFRP 加固时更严

重, 墙体最终变形成“拱”状, 其跨中最大位移达到了 547 mm, 而使用 BFRP 加固墙体的跨中最大位移仅为 245 mm, 约为前者的二分之一。从砌体墙跨中位移的大小来看, BFRP 布条的加固效果要优于聚脲涂层。当 BFRP 布条厚度小于 0.48 mm 或聚脲涂层厚度小于 0.40 mm 时, 墙体发生倒塌, BFRP 布条在跨中位置发生断裂, 而由于跨端处砌块的破坏产生应力集中, 聚脲涂层在跨端处发生断裂。

表 6 不同墙体的加固方案

Table 6 Retrofitting suggestions for masonry walls

加固材料	高度/m	不同厚度墙体的加固方案		
		120 mm	240 mm	360 mm
BFRP	3	0.48 mm(4层)	无需加固	无需加固
	4	0.36 mm(3层)	0.12 mm(1层)	无需加固
	5	0.36 mm(3层)	0.24 mm(2层)	无需加固
聚脲涂层	3	0.40 mm	无需加固	无需加固
	4	0.40 mm	0.10 mm	无需加固
	5	0.30 mm	0.10 mm	无需加固

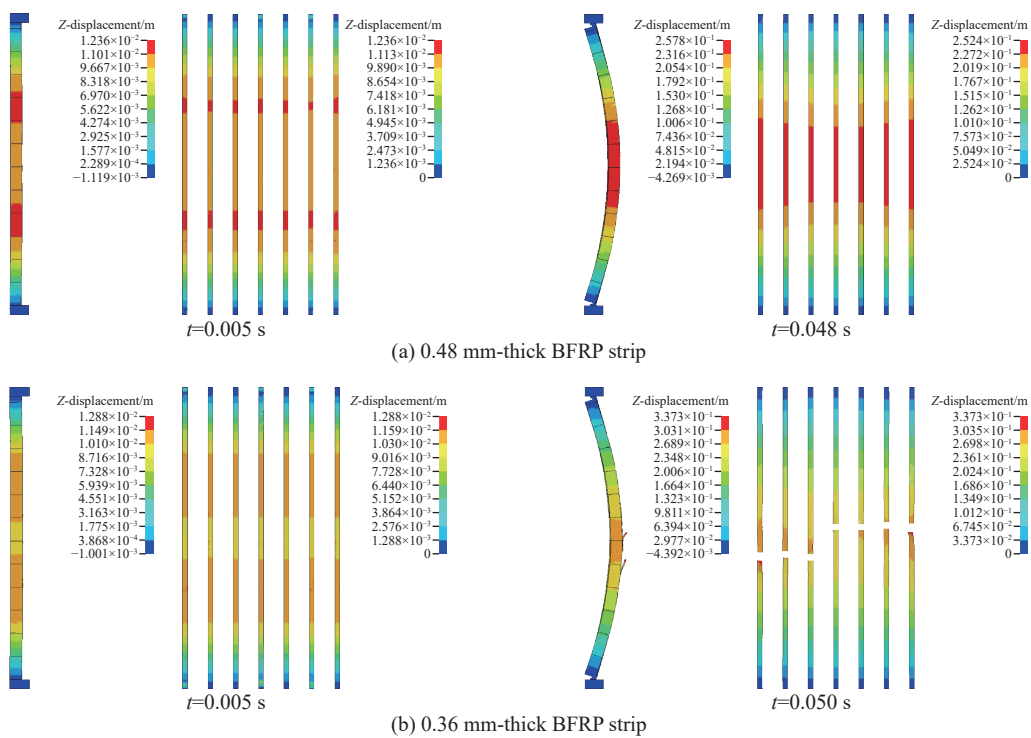


图 15 BFRP 加固墙体的变形与破坏模式

Fig. 15 Deformation and failure modes of BFRP strip strengthened masonry walls

爆炸荷载作用下 BFRP 布条和聚脲涂层加固墙体在变形和破坏特征上的差别主要是由加固材料性能的差异引起。BFRP 布条具有弹性模量高、极限应变低的特点, 而聚脲材料恰恰与其相反, 具有弹性模量低, 极限应变高的特点。使用 BFRP 布条加固可以有效提高墙体抗弯刚度并可能在墙体开裂后与结构压拱效应联合作用提高墙体抗力, 直至布条断裂失效; 使用聚脲涂层加固时, 小变形情况下砌体墙的抗弯刚度增长有限, 而在大变形情况下由于聚脲材料极限应变较高, 结构拉拱效应明显, 墙体变形更充分。

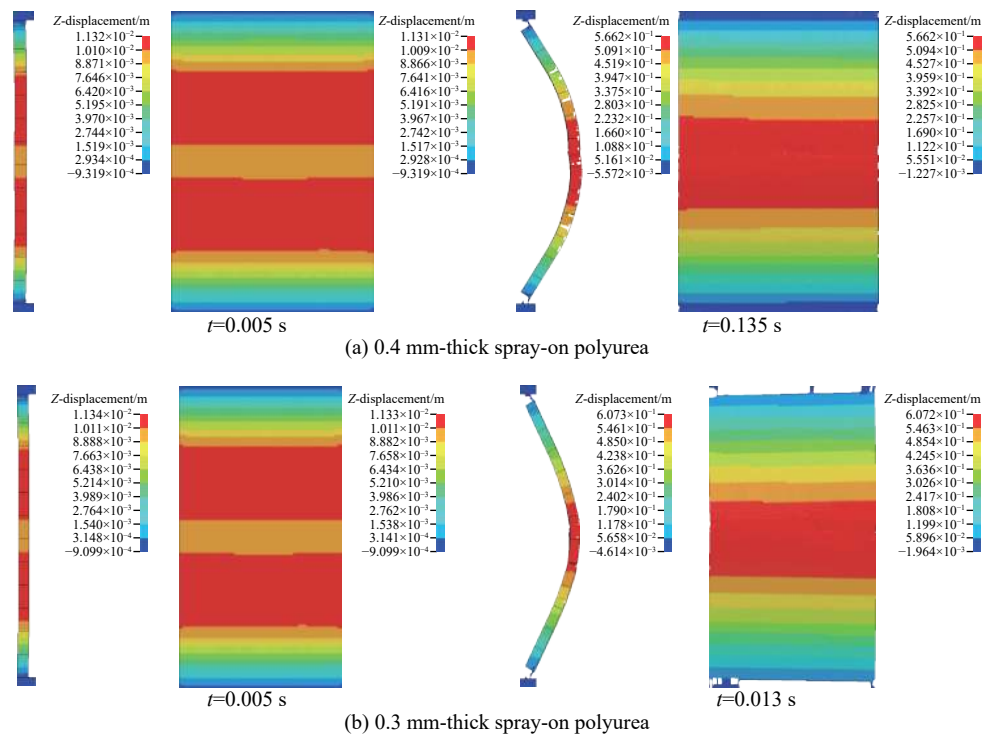


图16 聚脲涂层加固墙体的变形与破坏模式

Fig. 16 Deformation and failure modes of spray-on polyurea strengthened masonry walls

## 4 结论

对燃气爆炸作用下蒸压加气混凝土砌体墙的抗爆性能进行了数值模拟,得到以下结论:

(1)使用无厚度的固连-失效接触面模拟砌块之间的粘结,参考文献并经试算得到材料模型和接触面的各项参数取值,建立了燃气爆炸荷载作用下蒸压加气混凝土砌体墙的简化数值模型;基于此模型计算得到的墙体自振频率、跨中位移和破坏模式等与试验结果对比吻合良好,说明简化数值模型能对燃气爆炸荷载作用下墙体响应特征进行合理预测。

(2)在《规范》建议荷载作用下,未加固的蒸压加气混凝土砌体墙厚度越厚、高度越低,墙体损伤越低;墙厚为120 mm的墙全部发生倒塌,而墙厚为360 mm的砌体墙均未倒塌,不需要加固;墙体破坏以弯曲破坏为主,但随着砌体墙高度增加,破坏模式由弯曲破坏向剪切破坏转变。

(3)BFRP布条加固可以有效提高墙体抗弯刚度和压拱效应,而聚脲涂层加固对抗弯刚度提高有限但是墙体拉拱效应明显,两者均能显著提高燃气爆炸作用下蒸压加气混凝土砌体墙的抗爆性能;加固墙体倒塌时,破坏模式均为弯曲破坏,而BFRP布条的断裂一般发生在单向砌体墙位移最大处,聚脲涂层的断裂则发生在跨端锚固处。

(4)针对《规范》建议的爆炸荷载,为防止砌体墙倒塌,估算了加固不同尺寸砌体墙所需的BFRP布条和喷涂式聚脲厚度,可供设计参考。

## 参考文献:

- [1] 彭军芝. 蒸压加气混凝土孔结构及其对性能的影响研究进展 [J]. 材料导报, 2013, 27(15): 103-107;118. DOI: 10.3969/j.issn.1005-023X.2013.15.022.  
PENG J Z. A review on pore structure and properties of autoclaved aerated concrete [J]. Materials Review, 2013, 27(15): 103-107;118. DOI: 10.3969/j.issn.1005-023X.2013.15.022.
- [2] 马力, 曾力, 张艳花. 加气混凝土节能应用发展现状综述 [J]. 混凝土, 2012(5): 50-52. DOI: 10.3969/j.issn.1002-

- 3550.2012.05.016.
- MA L, ZENG L, ZHANG Y H. Overview of the development of the energy saving application of aerated concrete [J]. *Concrete*, 2012(5): 50–52. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2012.05.016.
- [3] 吴会阁, 赵彦. 蒸压加气混凝土砌块砌体承重墙抗震性能研究综述 [J]. *防灾科技学院学报*, 2012, 14(2): 38–42. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8047.2012.02.007.
- WU H G, ZHAO Y. Review of studies on the seismic behavior of autoclaved aerated block bearing walls [J]. *Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology*, 2012, 14(2): 38–42. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8047.2012.02.007.
- [4] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2007.03.019.
- XU S L. Finite element analysis of response of masonry wall under blast loading [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(3): 357–362. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2007.03.019.
- [5] 范俊余, 方秦, 陈力, 等. 砌体填充墙的抗爆性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(1): 59–66. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)01-0059-08.
- FAN J Y, FANG Q, CHEN L, et al. Anti-blast properties of masonry infill walls [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(1): 59–66. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)01-0059-08.
- [6] DAVIDSON J S, FISHER J W, HAMMONS M I, et al. Failure mechanisms of polymer-reinforced concrete masonry walls subjected to blast [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1194–1205. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:8(1194).
- [7] 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. DOI: 10.1260/1369-4332.17.6.817.
- [8] COOPER M G, FAIRWEATHER M, TITE J P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions [J]. *Combustion and Flame*, 1986, 65(1): 1–14. DOI: 10.1016/0010-2180(86)90067-2.
- [9] MERCX W P M, VAN WINGERDEN C J M, PASMAN H J. Venting of gaseous explosions [J]. *Process Safety Progress*, 1993, 12(1): 40–46. DOI: 10.1002/prs.680120106.
- [10] BAO Q, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures [J]. *Fuel*, 2016, 175: 40–48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084.
- [11] LI Z, CHEN L, FANG Q, et al. Experimental and numerical study of unreinforced clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 104: 107–126. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.02.002.
- [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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2010.03.012.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2132.2010.03.012.
- [13] 韩永利, 陈龙珠, 陈洋. 民用住宅墙体抗燃气爆炸能力的数值模拟研究 [J]. *建筑科学*, 2010, 26(9): 49–53. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2010.09.012.
- HAN Y L, CHEN L Z, CHEN Y. Numerical analysis of civil house wall under gas explosion load [J]. *Building Science*, 2010, 26(9): 49–53. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2010.09.012.
- [14] 韩笑. 燃气爆炸荷载下砖砌墙体的动力响应研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012: 32–40.
- HAN X. The dynamic response of brick masonry wall subjected to gas explosion load [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012: 32–40.
- [15] 中国石油化工集团公司. 石油化工控制室抗爆设计规范: GB 50779-2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012: 9–13.
- [16] LI Z, CHEN L, FANG Q, et al. Study of autoclaved aerated concrete masonry walls under vented gas explosions [J]. *Engineering Structures*, 2017, 141: 444–460. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.03.033.
- [17] 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.055.
- [18] HALQUIST J. LS-DYNA keyword user's manual: Version 971 [M]. Livermore, CA: Livermore Software Technology

- Corporation, 2007: 350–352.
- [19] GOVINDJEE S, KAY G J, SIMO J C. Anisotropic modelling and numerical simulation of brittle damage in concrete [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1995, 38(21): 3611–3633. DOI: 10.1002/nme.1620382105.
- [20] 国家建筑材料工业局. 加气混凝土力学性能试验方法: GB/T11971-1997[S]. 北京: 中国标准出版社 1998: 10–14.
- [21] 陕西省建筑科学研究院. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T70-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 1–22.
- [22] U.S. Department of Defense. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D 3039-14 [S]. 2014.
- [23] American Society of Testing Materials. Standard test method for determining tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composites used for strengthening of civil structures: ASTM D 7565-10 [S]. 2010.
- [24] IRSHIDAT M, AL-OSTAZ A, CHENG A, et al. Nanoparticle reinforced polymer for blast protection of unreinforced masonry wall: laboratory blast load simulation and design models [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(10): 1193–1204. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000361.
- [25] 许三罗, 方秦. 弹性聚合物和碳纤维布加固的砌体墙抗爆性能的数值分析 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2010, 11(3): 306–311. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2010.03.013.
- XU S L, FANG Q. Numerical analysis on blast-resistant capacity of masonry walls retrofitted with elastomeric polymer and CFRP [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 11(3): 306–311. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2010.03.013.
- [26] 黄华, 吕卫东, 刘伯权. 爆炸荷载作用下粘贴 Polymer Sheet 膜材砌体墙防护性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(19): 131–138. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.19.023.
- HUANG H, LYU W D, LIU B Q. Protective performance of masonry walls strengthened with polymer sheet under explosive loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(19): 131–138. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.19.023.
- [27] EAMON C D. Reliability of concrete masonry unit walls subjected to explosive loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(7): 935–944. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:7(935).
- [28] EAMON C D, BAYLOT J T, O'DANIEL J L. Modeling concrete masonry walls subjected to explosive loads [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(9): 1098–1106. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1098).
- [29] 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. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:2(134).
- [30] U.S. Department of Defense. Structures to resist the effects of accidental explosions: UFC 3-340-02 [S]. 2008: 1635–1649.

(责任编辑 张凌云)