

# 隐形梁柱法加固砖砌体墙抗火性能有限元分析

王凤池,刘柯依,许树兵

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 为解决简易砖砌体结构抗震抗火性能差的问题,提出在砌体两面粘贴钢板,并用缀条、螺栓连接的隐形梁柱加固的方法.方法 运用有限元分析软件 ABAQUS 分别模拟在火灾单独发生及地震次生火灾情况下,不同隐形梁柱尺寸对加固墙片在不同温度下应力分布、破坏形态、极限承载力、极限位移的影响.结果 火灾单独作用下,最优加固墙片 W-S-2 的极限荷载较未加固墙片在 200 °C、400 °C、800 °C 下分别提高 143.93%、136.98%、145.46%;在 200 °C、400 °C 下极限位移分别提高 78.41%、53.10%.地震次生火灾作用下,最优加固墙片 W-S-1 的极限荷载较未加固墙片在 200 °C、400 °C、800 °C 下分别提高 182.47%、170.79%、170.97%;在 200 °C、400 °C 下极限位移分别提高 35.34%、10.31%.结论 加固墙片较未加固墙片的整体应力有所提升且分布更均匀,各部位等效塑性应变减小,延缓了裂缝的产生;极限荷载也有不同程度的提高.隐形梁柱法能有效提高砖砌体墙的抗火性能.

**关键词** 隐形梁柱法;加固;砌体结构;有限元分析

中图分类号 TU362 文献标志码 A

## Finite Element Analysis of Fire Resistance of Brick Masonry Wall Strengthened by Invisible Beam-Column Method

WANG Fengchi, LIU Keyi, XU Shubing

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to solve the problem of poor seismic and fire resistance of simple brick masonry structure, an invisible beam-column reinforced method, which attaches steel plate on both sides of the masonry and connects the steel plate with bolts, is put forward. The finite element analysis software ABAQUS is used to simulate the influence of different size of the invisible beam and column on stress distribution, failure mode, ultimate bearing capacity and ultimate displacement of reinforced wall in the case of fire and post-earthquake fires. Under the action of fire, the ultimate load of the optimal reinforced wall sheet W-S-2 is 143.93%, 136.98%, 145.46% higher than that of the unreinforced wall sheet under 200 °C, 400 °C, 800 °C respectively. The ultimate displacement at

收稿日期:2017-05-25

基金项目:国家十二五科技支撑计划项目(2012BAJ11B02)

作者简介:王凤池(1970—),男,教授,博士,主要从事土木工程防灾减灾方面研究.

200 °C, 400 °C, is increased by 78.41%、53.10% respectively. Under the action of post-earthquake fire, the ultimate load of the optimal reinforced wall sheet W-S-2 is 182.47%、170.79%、170.97% higher than that of the unreinforced wall sheet under 200 °C, 400 °C, 800 °C respectively. The ultimate displacement at 200 °C, 400 °C, is increased by 35.34%、10.31% respectively. Compared with the unreinforced wall, the integral stress of the strengthened wall is increased and distributed more evenly, the equivalent plastic strain of each part is reduced, and the occurrence of the crack has been delayed. The ultimate load of the strengthened wall is higher than that of the unreinforced wall. The invisible beam-column method can effectively improve the fire resistance of brick masonry walls.

**Key words:** invisible beam-column method; reinforce; masonry structure; finite element analysis

砌体结构是村镇主要建筑形式,这类简易砌体房屋在抗震防灾方面存在很大的安全隐患,一旦遭遇地震或火灾,会造成无法估量的人员伤亡与经济损失<sup>[1]</sup>。地震不仅会对砌体房屋造成直接破坏,还会诱发许多次生灾害,包括火灾、泥石流、海啸等,其中地震次生火灾最为常见且最为危险<sup>[2]</sup>,火灾产生的高温会使砌体结构产生裂缝、变形甚至倒塌。近几十年来,许多国内外学者对高温下砌体力学性能<sup>[3-7]</sup>及砌体结构加固方法<sup>[8-17]</sup>进行了研究。E. L. Gawady 等<sup>[18]</sup>对粘贴 FRP 材料加固砌体结构进行了分析;赵彤等<sup>[19]</sup>通过 4 片碳纤维布加固砖砌体在周期反复荷载作用下受力性能的试验,研究了碳纤维布加固砖砌体的抗震性能;苗生龙等<sup>[20]</sup>运用有限元分析软件 ANSYS 建立砌体试件在高温下的模型,并进行了温度场分析。隐形梁柱加固法是以粘钢法为基础,即在砌体墙两面用结构胶粘贴钢片,相邻钢片之间用缀条连接,墙两面相对应的钢片用螺栓连接,使其形成一种类似框架结构的加固方法,并在加固的墙体表面涂一层抹面砂浆,使墙体保持外表美观。笔者运用有限元分析软件 ABAQUS 分别模拟在火灾单独发生及地震次生火灾情况下,隐形梁柱加固法对砌体结构抗火性能的影响,为实际工程提供理论依据。

## 1 有限元模型的建立

运用 ABAQUS 软件建立三维有限元分

析模型,模型各单元均采用三维八节点等参单元(C3D8R),六面体单元划分网格。砌体墙采用整体式模型,模型下端完全固定。砌体墙模型长宽高为 1 700 mm × 1 000 mm × 240 mm(见图 1)。有限元模型如图 2 所示。

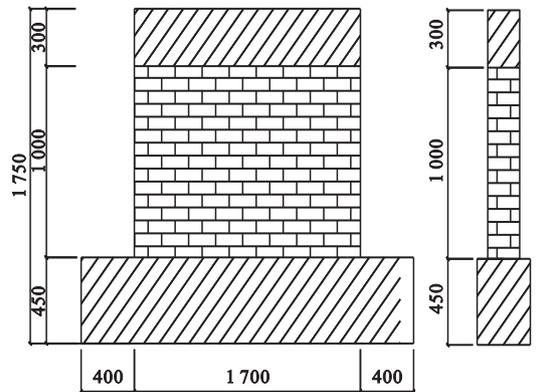
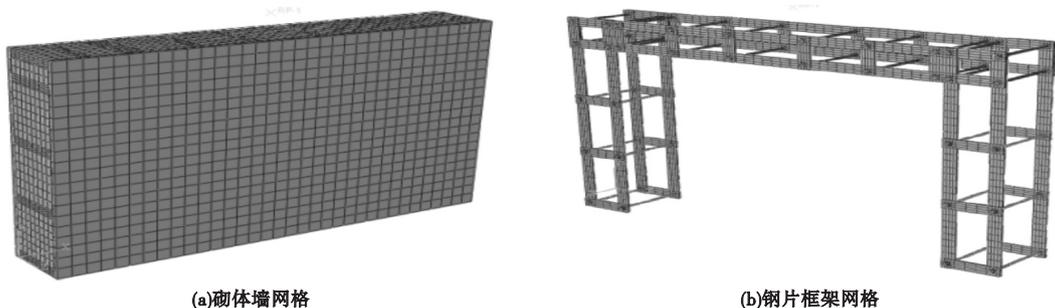


图 1 砌体模型尺寸

Fig. 1 The size of masonry model

模型中各构件之间采用面面接触,法相硬接触,切向摩擦接触,经反复试算,取摩擦系数为 0.5。钢片与砌体、螺栓与砌体之间的结构胶,通过调节损伤以及相互作用属性中的黏性来模拟。砌体模型选用 MU10 普通烧结砖与 M10 砂浆,钢材选用 Q235 级钢板。模型基本力学参数如表 1 所示。表 1 中  $f_{b0}/f_{c0}$  为双轴与单轴抗压强度比值,通常取 1.16;  $k$  为系数,影响屈服面形态,通常取 2/3。

笔者共建立 5 个砌体模型,其中 W-S-0 为未加固墙体, W-S-1 至 W-S-4 为运用隐形梁柱法加固后的墙体。模型设计参数如表 2 所示。



(a)砌体墙网格

(b)钢片框架网格

图2 砌体与钢片框架网格模型

Fig. 2 The model of masonry and steel

表1 模型基本力学参数

Table 1 Basic mechanics parameters of the model

材料名称	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	膨胀角	偏心率	$f_{b0}/f_{c0}$	$k$	黏性参数
钢材	7 850	$2.06 \times 10^5$	0.30	—	—	—	—	—
砌体	1 700	3 177.3	0.15	30	0.1	1.16	0.666 7	0.005
抹面砂浆	1 700	18 900	0.15	30	0.1	1.16	0.666 7	0.005

表2 模型设计参数

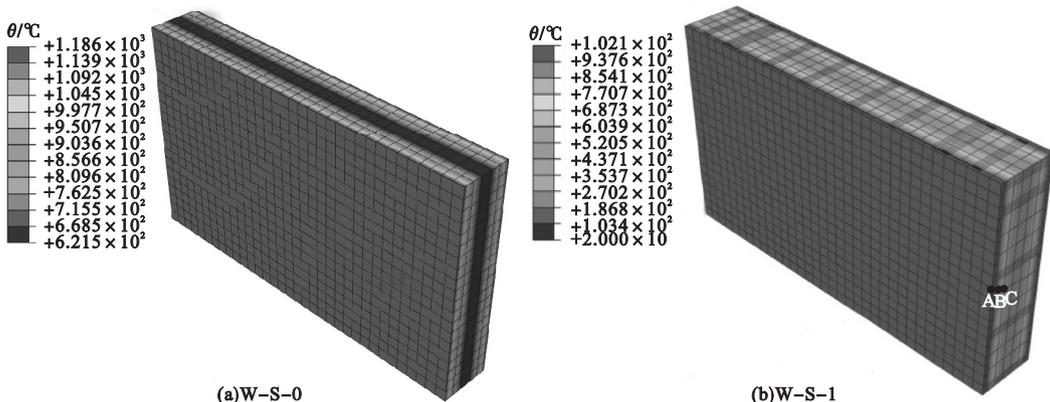
Table 2 Design parameters of the models

编号	梁宽 × 高/mm	柱高 × 宽/mm	抹面砂浆厚度/mm	螺栓预紧力/kN
W-S-0	—	—	0	—
W-S-1	240 × 150	240 × 180	20	13.2
W-S-2	240 × 150	240 × 240	20	13.2
W-S-3	240 × 150	240 × 300	20	13.2
W-S-4	240 × 180	240 × 240	20	13.2

## 2 抹面砂浆对温度传递的影响

设定沿砌体厚度方向的温度场为一维不稳定温度场,钢材与砌体及钢材之间温度完

全传递.为研究抹面砂浆对温度传递的影响,将无抹面砂浆的W-S-0与抹面砂浆厚度为20 mm的W-S-1分别双面受火6h.两墙片的温度场分布如图3所示.



(a)W-S-0

(b)W-S-1

图3 墙片温度场

Fig. 3 Temperature field of the wall

由图3可以看出,抹面砂浆对墙体温度有降低作用.墙体沿厚度方向间隔为48 mm的A、B、C三点如图3(b)所示,其中A点位于墙体表面.通过比较W-S-0与W-S-1各点温度变化曲线(见图4)可以看出,抹面砂浆对温度的传递具有延缓作用,并且随受火时间的增加,延缓作用逐渐加强.

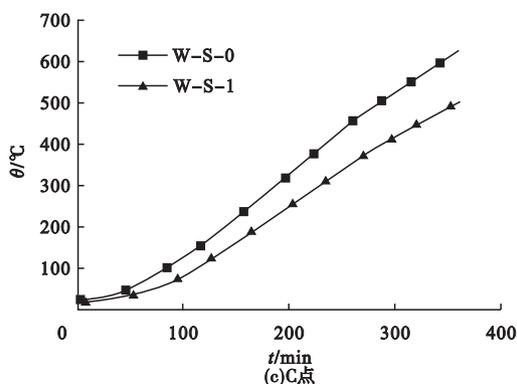
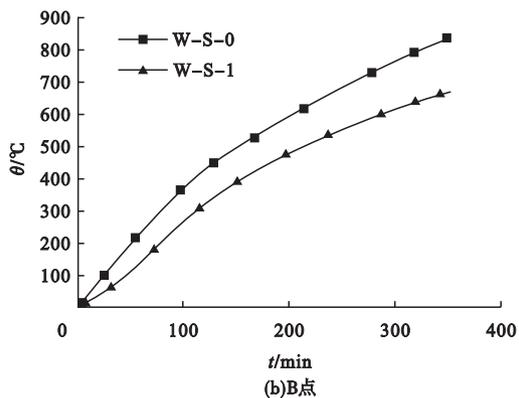
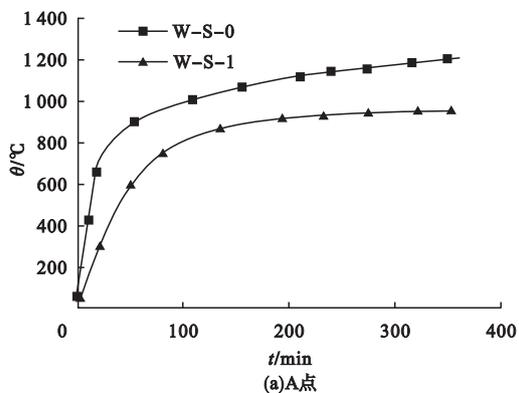


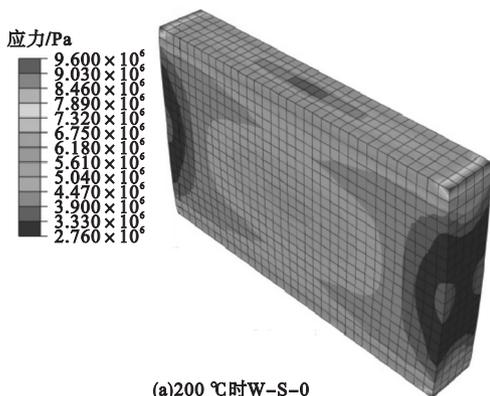
图4 各点温度随时间变化曲线

Fig.4 Temperature curves varying with time of each point

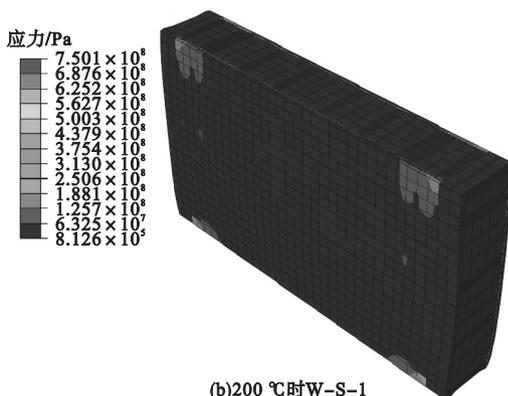
### 3 火灾作用下砌体有限元分析

通过标准升温曲线分别升温到200 °C、400 °C、800 °C,保持温度30 min,并在加载点匀速向下对墙片施加竖向位移.通过各温度下W-S-0和W-S-1应力云图(见图5)可以看出,随温度升高,同一墙片整体应力有所下降;同一温度下,W-S-1应力分布更均匀,不易产生应力集中.

200 °C下墙体等效塑性应变云图如见图6所示,可以看出,W-S-0裂缝主要产生在墙片中心、四角及中心与对应四角连线位置,形成X型,W-S-1裂缝主要产生在墙片中心.W-S-1各位置等效塑性应变较W-S-0普遍减小,说明隐形梁柱加固法对墙片裂缝的产生起到了延缓的作用.



(a)200 °C时W-S-0



(b)200 °C时W-S-1

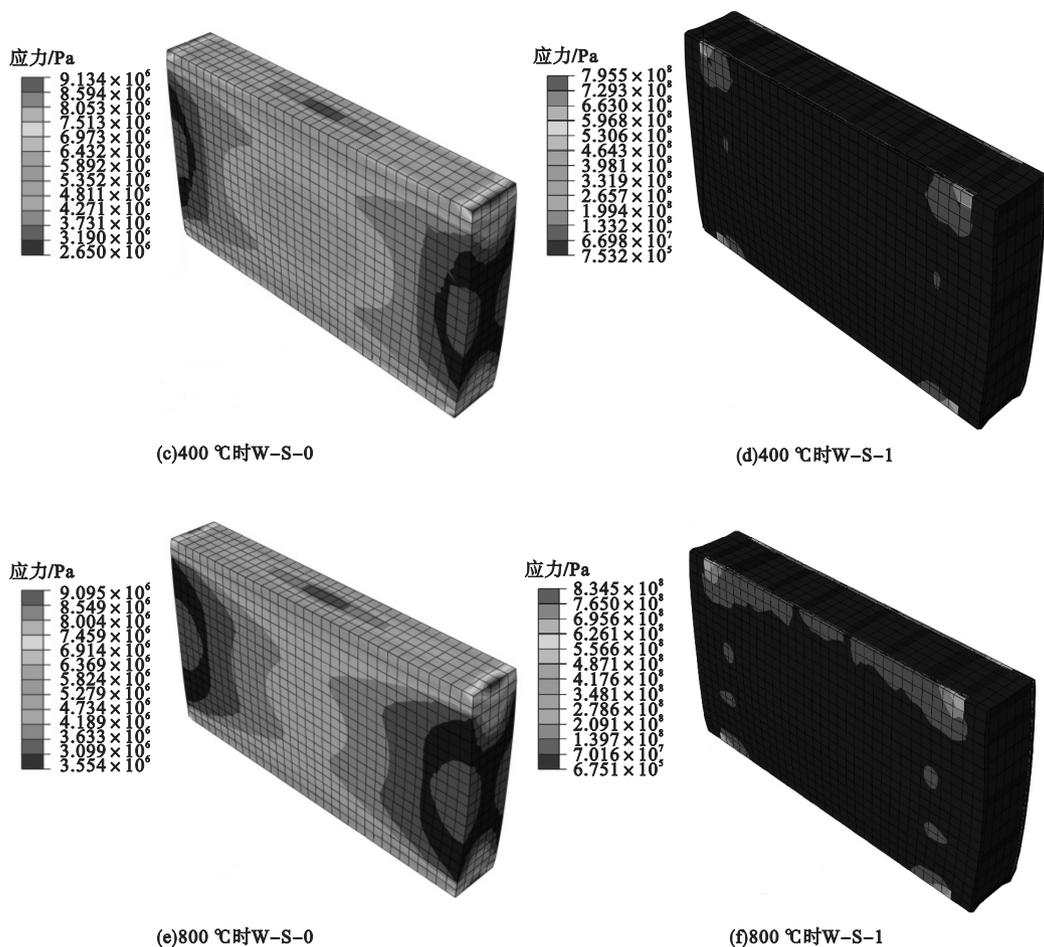


图5 不同温度下墙片的应力云图

Fig. 5 Stress cloud image of walls at different temperatures

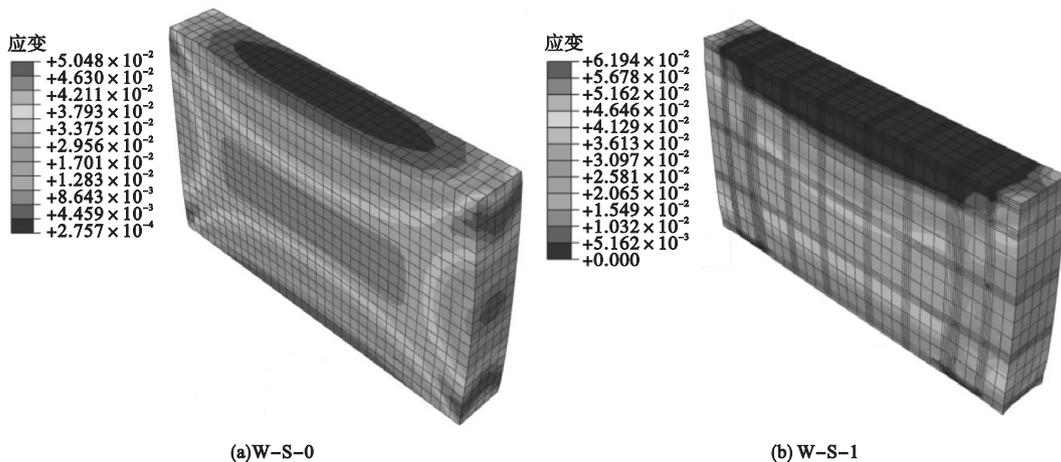


图6 墙片的等效塑性应变

Fig. 6 Equivalent plastic strain of W-S-0 and W-S-1

图7为墙片在200℃、400℃、800℃下的荷载-位移曲线。可以看出,随着温度的升高,各墙片极限荷载不断减小;加固墙片所能承受的极限荷载较未加固墙片有明显提升,其中W-S-2提升的最多。

不同温度下各墙片的极限荷载与极限位移如见表3所示。可以看出,加固墙片的极限荷载比未加固墙片大很多。W-S-1、W-S-2、W-S-4墙片极限位移随着温度的升高而减小,W-S-0墙片极限位移则随着温度的升高而增大,加固墙片在200℃与400℃下极限位移均大于未加固墙片;通过比较W-S-1、W-S-2、W-S-3的数据

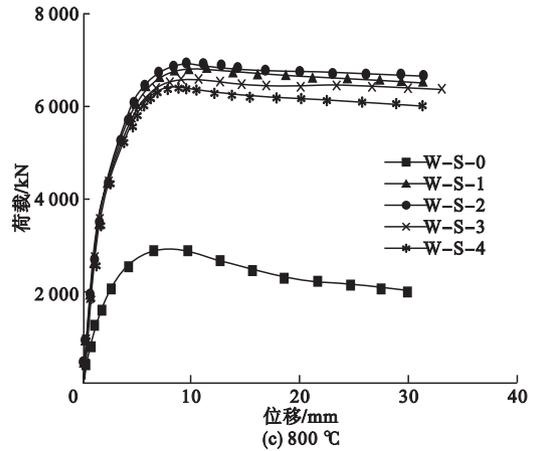
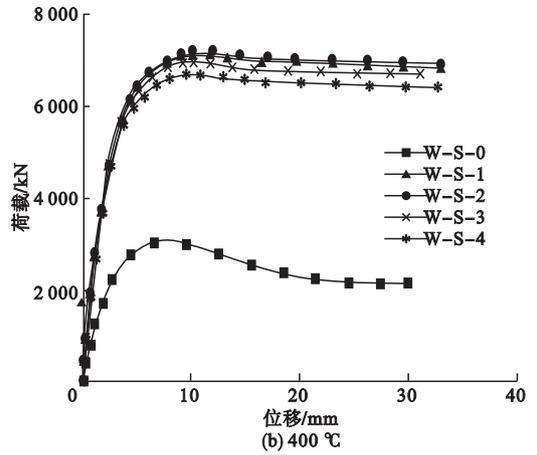
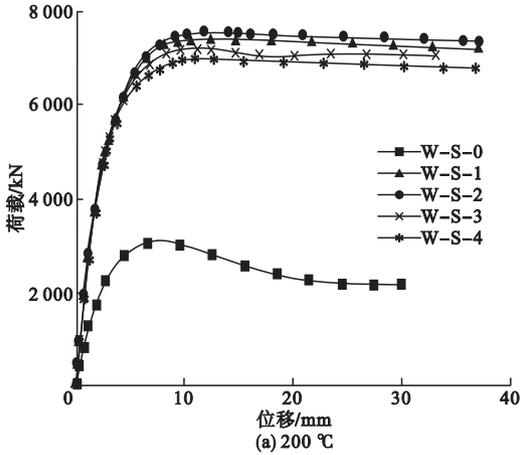


图7 火灾作用下不同温度时墙片荷载-位移曲线  
Fig. 7 Load-displacement curve of walls at different temperatures under the action of fire

表3 火灾作用下不同温度时各墙片极限荷载与极限位移

Table 3 Ultimate load and ultimate displacement of wall plates at different temperatures under the action of fire

编号	温度/℃	极限荷载/kN	极限荷载	极限位移/mm	极限位移
			提高比例/%		提高比例/%
W-S-0	200	3 092.18	—	6.53	—
	400	3 013.52	—	6.61	—
	800	2 808.26	—	9.53	—
W-S-1	200	7 469.88	141.57	12.26	87.75
	400	7 051.50	134.00	11.30	70.95
	800	6 807.45	142.41	9.75	23.08
W-S-2	200	7 542.67	143.93	11.65	78.41
	400	7 141.45	136.98	10.12	53.10
	800	6 893.08	145.46	9.47	-0.63
W-S-3	200	7 232.91	133.91	10.31	57.89
	400	6 978.73	131.58	9.74	47.35
	800	6 509.62	131.80	10.31	81.85
W-S-4	200	7 044.82	127.83	10.97	67.99
	400	6 668.97	121.30	9.49	43.57
	800	6 418.10	128.54	8.63	-9.44

可以发现:当隐形梁尺寸相同时,隐形柱的宽度越大墙片的极限位移提高的越小,但墙片的极限荷载与隐形柱宽度不成比例关系,隐形柱尺寸为240 mm × 240 mm 承受竖向荷载能力最强;通过比较 W-S-2, W-S-4 的数据可以发现:当隐形柱宽度相同时,隐形梁的宽度越大墙片极限位移及极限荷载提高得越小,在隐形柱尺寸相同时,隐形梁尺寸为 240 mm × 150 mm 时加固效果最好.即在火灾作用下, W-S-2 的加固方式较好.

#### 4 地震次生火灾作用下的砌体有限元计算分析

模拟共建立 4 个分析步骤:①加竖向荷载;②加水平方向循环往复荷载;③导入温度场并且取消第一、二分析步中的荷载作用;④

加竖向位移.表 4 为不同温度下各墙片极限荷载与极限位移.根据 W-S-0 与 W-S-1 荷载-位移曲线(见图 8)对比可知:加固后的墙片极限荷载明显增大,说明隐形加固法可以提高墙片承载能力.

由表 4 可以看出,经地震作用后,加固墙片极限位移与极限荷载均随温度升高而减小,未加固墙片极限位移则随着温度的升高而增大;加固后墙片在不同温度下的极限荷载均大于未加固墙片;W-S-2 的加固方式对极限荷载的提升最有效,但极限位移仅在 200 °C 下有所提高.W-S-1 的加固方式对极限荷载的提高程度与 W-S-2 很接近,且在 200 °C 和 400 °C 下对极限位移的提升均优于 W-S-2,固认为地震次生火灾作用下, W-S-1 的加固方式较好.

表 4 地震次生火灾作用下不同温度时各墙片极限荷载与极限位移

Table 4 The ultimate load and ultimate displacement of wall plates at different temperatures under the action of post-earthquake fire

编号	温度/°C	极限荷载/kN	极限荷载 提高比例/%	极限位移/mm	极限位移 提高比例/%
W-S-0	200	2 389.78	—	11.49	—
	400	2 343.63	—	12.03	—
	800	2 224.14	—	14.89	—
W-S-1	200	6 750.33	182.47	15.55	35.34
	400	6 346.35	170.79	13.27	10.31
	800	6 026.71	170.97	10.80	-27.47
W-S-2	200	6 863.83	187.22	15.12	31.59
	400	6 427.31	174.25	11.36	-5.57
	800	6 065.91	172.73	10.52	-29.35
W-S-3	200	6 654.28	178.45	13.05	13.58
	400	6 358.32	171.30	11.46	-4.74
	800	5 793.56	160.49	11.20	-24.78
W-S-4	200	6 340.49	165.32	12.19	6.09
	400	5 461.09	133.02	10.42	-13.38
	800	5 699.12	156.24	9.15	-38.55

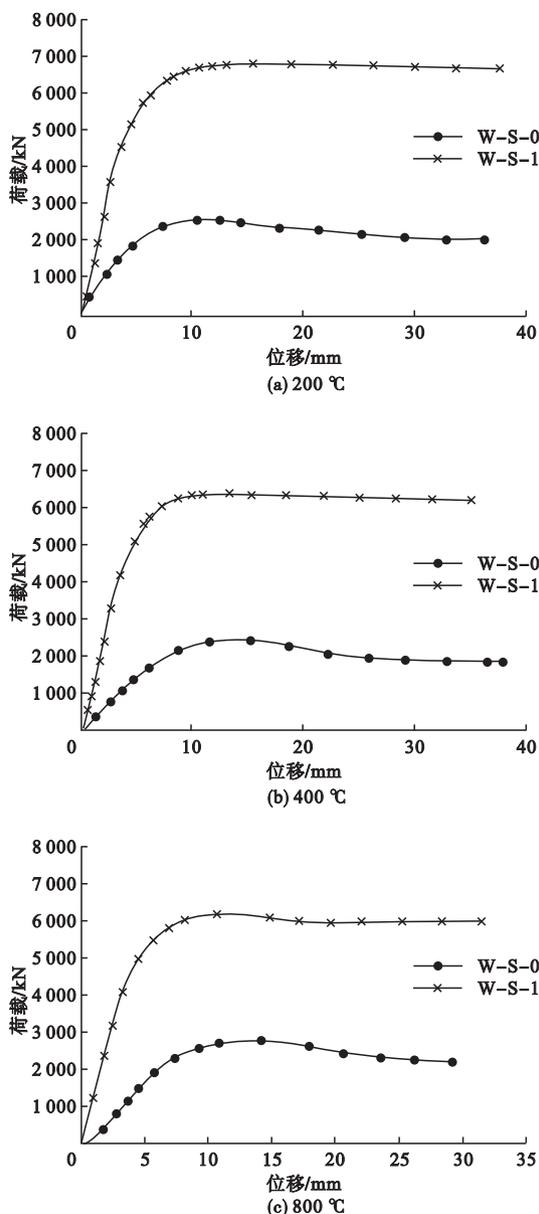


图8 地震次生火灾作用下不同温度时墙片荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curve of walls at different temperatures under the action of post-earthquake fire

## 5 结论

(1)火灾单独作用下,最优加固墙片W-S-2的极限荷载较未加固墙片在200 °C、400 °C、800 °C下分别提高143.93%、136.98%、145.46%;在200 °C、400 °C下极限位移分别提高78.41%、53.10%,在800 °C下

两墙片基本持平.因此,隐形梁柱加固法在高温下能有效提高墙片承载能力及变形能力.

(2)地震次生火灾作用下,最优加固墙片W-S-1的极限荷载较未加固墙片在200 °C、400 °C、800 °C下分别提高182.47%、170.79%、170.97%;在200 °C、400 °C下极限位移分别提高35.34%、10.31%,但在800 °C下极限位移有所减小.因此,运用隐形梁柱加固法加固的墙片在经历地震和高温共同作用后,承载能力有明显提升,但随温度的升高,变形能力提升有限.

(3)墙片经隐形梁柱法加固后,表面抹面砂浆能有效减缓温度向墙片内部传递,延缓了墙片的破坏;墙片整体应力有所增加且应力分布更均匀,不易产生应力集中;墙片各部位的等效应变普遍减小,即隐形梁柱加固法能有效减缓墙片开裂破坏,延缓墙片受火破坏.

## 参考文献

- [1] 杨仕升,申志敏,谢开仲,等.我国村镇砌体房屋震害分析与抗震加固研究进展[J].华南地震,2012,32(3):1-10.  
(YANG Shisheng, SHEN Zhimin, XIE Kaizhong, et al. Seismic damage analysis and seismic strengthening of masonry buildings in villages and towns in China[J]. South China journal of seismology, 2012, 32(3): 1-10.)
- [2] 赵思健,任爱珠,熊利亚.城市地震次生火灾研究综述[J].自然灾害学报,2006,15(2):57-67.  
(ZHAO Sijian, REN Aizhu, XIONG Liya. Review of studies on urban post-earthquake fires[J]. Journal of natural disasters, 2006, 15(2): 57-67.)
- [3] 苗生龙,袁广林,舒前进.高温对混合砂浆力学性能影响研究[J].四川建筑科学研究,2011,37(5):219-221.  
(MIAO Shenglong, YUAN Guanglin, SHU Qianjin. Research on influence of high temperature to mechanical performance of composite mortar[J]. Sichuan building science, 2011, 37(5): 219-221.)
- [4] 苗生龙,舒前进,袁广林.高温后黏土砖砌体

- 的抗压承载力[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2011, 10(2): 201 - 205.
- (MIAO Shenglong, SHU Qianjin, YUAN Guanglin. On bearing capacity of brick masonry after high temperature [J]. Journal of jiangnan university (natural science edition), 2011, 10(2): 201 - 205.)
- [5] 谭巍, 胡克旭. 高温及冷却后砖砌体的力学性能[J]. 住宅科技, 1998(10): 38 - 40.
- (TAN Wei, HU Kexu. Mechanical properties of high temperature and cooling brick masonry [J]. Housing technology, 1998(10): 38 - 40.)
- [6] 陈清山. 火灾后砌体结构受损诊断与处理[J]. 山西建筑, 2008, 34(18): 81.
- (CHEN Qingshan. Damage diagnosis and treatment masonry structure after fire [J]. Shanxi architecture, 2008, 34(18): 81.)
- [7] 刘建中. 粘贴法加固混凝土结构在高温下受力性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- (LIU Jianzhong. Study on mechanical behavior of concrete structure strengthened by bonding method under high temperature [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [8] TRIANTAFILLOU T C. Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates[J]. Journal of composites for construction, 1998, 2(2): 96 - 104.
- [9] TURCO V, SECONDIN S, MORBIN A, et al. Flexural and shear strengthening of unreinforced masonry with FRP bars[J]. Composites science and technology, 2006, 66(2): 289 - 296.
- [10] GILSTRAP J M, DOLAN C W. Out-of plane bending of FRP-reinforced masonry walls[J]. Composites science & technology, 1998, 58(8): 1277 - 1284.
- [11] EHSANI M R, SAADATMANESH H, VELAZQUEZDIMAS J I. Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading [J]. Journal of composites for construction, 2015, 3(3): 134 - 142.
- [12] AI-SALLOUM Y A, ALMUSALLAM T H. Load capacity of concrete masonry block walls strengthened with epoxy-bonded GFRP sheets [J]. Journal of composites for materials, 2005, 19(19): 1719 - 1745.
- [13] 周新刚, 韦昌芹, 叶列平. CFRP 加固砌体结构的力学性能分析[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 51 - 59.
- (ZHOU Xingang, WEI Changqin, YE Lieping. Mechanical performance analysis of masonry structure strengthened with CFRP [J]. Engineering mechanics, 2008, 25(6): 51 - 59.)
- [14] 肖丹. 外贴钢板加固砌体结构的抗震研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- (XIAO Dan. Study on seismic behavior of reinforced masonry structures posting steel plate outside [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.)
- [15] 夏章义. 砖砌体墙常用加固方法的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- (XIA Zhangyi. The analysis on the commonly used seismic reinforcement methods of brick masonry wall [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.)
- [16] LII H R H, HOLBERG A, Caspersen J, et al. Strengthening concrete masonry with fiber reinforced polymers [C]. Baltimore: Fourth international symposium on fiber reinforced polymer for reinforced concrete structures, 1999.
- [17] BENEDETTI A, STELI E. Analytical models for shear-displacement curves of unreinforced and FRP reinforced masonry panels [J]. Construction & building materials, 2006, 22(3): 175 - 185.
- [18] GAWADY E L, LESTUZZI P, BADOUX M. A seismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP [J]. Composites part B engineering, 2006, 37(2/3): 148 - 162.
- [19] 赵彤, 张晨军, 谢剑, 等. 碳纤维布用于砖砌体抗震加固的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 89 - 95.
- (ZHAO Tong, ZHANG Chenjun, XIE Jian, et al. Experimental study on seismic reinforcement of brick masonry walls with continuous carbon fiber sheet [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2001, 21(2): 89 - 95.)
- [20] 苗生龙, 崔道伟. 砖砌体截面温度场分析[J]. 山西建筑, 2010, 36(8): 95.
- (MIAO Shenglong, CUI Daowei. On analysis of temperature field in brick-masonry section [J]. Shanxi architecture, 2010, 36(8): 95.)