

# 夹芯镀锌钢板复合墙板对木结构建筑外部 火灾蔓延的延缓与阻断作用研究

谷凡,郭莽声,白月,张景川,应傲

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁沈阳110168)

**摘要** 目的 提出一种新型夹芯镀锌钢板复合墙板,以延缓与阻断村镇木结构建筑的外部火灾蔓延。**方法** 采用火灾环境模拟软件 PyroSim 建立西南地区穿斗式木结构建筑数值模型,从发生火灾后的室外温度和外部火灾蔓延时间的角度,对比分析复合墙板对外部火灾蔓延的延缓与阻断效果及其合理布设方式。**结果** 综合考虑地形、地势以及大气环境等不确定因素的影响,建议西南地区穿斗式木结构建筑防火间距取值为 6.0 m 以上。对于封堵山墙通风洞口的木结构建筑而言,当前后立面方向的建筑间距为 3.0 m 时,复合墙板的布设能够将火灾蔓延至相邻建筑物的时间延长约 60 s;当前后立面方向的建筑间距为 4.0 m 时,复合墙板的布设将有效阻断外部火灾蔓延。**结论** 对于未封堵山墙通风洞口的木结构建筑物而言,应以合理设置防火间距作为控制外部火灾蔓延的手段。对于封堵山墙通风洞口的木结构建筑物而言,在前后立面外墙布设复合墙板,既能延缓外部火灾蔓延,又能有效降低成本。

**关键词** 木结构建筑;外部火灾蔓延;复合墙板;防火间距

中图分类号 TU366.2

文献标志码 A

**引用格式:**谷凡,郭莽声,白月,等.夹芯镀锌钢板复合墙板对木结构建筑外部火灾蔓延的延缓与阻断作用研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):723-730.(GU Fan, GUO Qiaosheng, BAI Yue, et al. Study on barrier effect of sandwich galvanized steel composite wallboard on outdoor fire spread of timber buildings[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(4):723-730.)

## Study on Barrier Effect of Sandwich Galvanized Steel Composite Wallboard on Outdoor Fire Spread of Timber Buildings

GU Fan, GUO Qiaosheng, BAI Yue, ZHANG Jingchuan, YING Ao

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

**Abstract:** A new type of sandwich galvanized steel composite wallboard is proposed to delay and

收稿日期:2023-06-01

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100403);辽宁省科技厅科技计划项目(2019-ZD-0299);辽宁省教育厅科学研究项目(Lnjc201906)

作者简介:谷凡(1973—),男,副教授,博士,主要从事结构工程和工程力学等方面研究。

prevent the outdoor fire spread of timber buildings. The numerical model of the perforated timber buildings in southwest China was established by PyroSim, and the reasonable arrangement methods of composite wallboard were compared analyzed from the point of view of outdoor temperature and outdoor fire spread time during the occurrence of fires. Simulation results show that considering the influence of uncertain factors such as terrain and atmospheric environment, it is recommended that the fire separation distance of rural timber buildings in southwest China should be greater than 6.0 m. For the timber buildings with blocked gable ventilation, when the building interval in the front and rear direction is 3.0 m, the layout of composite wallboard can prolong the time of the fire spreading to the adjacent building by about 60 s. When the building interval in the front and rear direction is 4.0 m, the layout of composite wallboard will effectively prevent the outdoor fire spread. In addition, for the timber buildings with unblocked gable ventilation, reasonable fire separation distance should be set as a means to control the outdoor fire spread. For the timber buildings with blocked gable ventilation, composite wallboard laying on the front and rear facades can prevent outdoor fire spread besides its high cost performance.

**Key words:** timber building; outdoor fire spread; composite wallboard; fire separation distance

受人口密度、自然气候、民族文化等方面的影响,我国西南地区村镇民居以连片建造的木结构建筑为主,其耐火等级低、火灾荷载大,一旦发生火灾,火势将在建筑间迅速蔓延,存在严重的火灾隐患。因此,需深入研究村镇木结构建筑外部火灾蔓延规律,提出有针对性的适宜性防火技术措施。

国内外学者在木结构建筑防火方面进行了广泛研究,包括木材炭化机理与炭化速率<sup>[1-4]</sup>、木材热解动力过程<sup>[5-6]</sup>、木构件以及结点的耐火性能<sup>[7-11]</sup>、木结构建筑内部火灾蔓延规律<sup>[12-15]</sup>等。由于组团布局、分布密集的木结构建筑群在国外较为鲜见,因此关于木结构建筑外部火灾蔓延规律以及防控措施的研究多局限于国内,且略显薄弱。王雁楠等<sup>[16]</sup>对木结构建筑外部火灾蔓延规律进行了数值模拟研究,探索了建筑间距、风速、木材含水率等因素对木结构建筑外部火灾蔓延特性的影响规律。郭福良<sup>[17]</sup>以木结构吊脚楼为研究对象,探索了防火分隔对木结构外部火灾蔓延的影响规律。谷凡等<sup>[18]</sup>以西南地区穿斗式木结构建筑为研究对象,探究了风速对木结构建筑防火间距的影响规律。吴兴绍等<sup>[19]</sup>提出了在火灾蔓延至相邻建筑的

临界时间内拆除茅草屋顶的措施,以降低木结构建筑的外部火灾蔓延速率,并提出该临界时间的计算公式。翟滢莹等<sup>[20]</sup>指出对于扁长型布局的建筑群,宜将鼓楼坪设置在组团最底部中间位置;在组团长边和短边方向上设置防火隔离带是最优的防火策略。鄢银连等<sup>[21]</sup>以丽江古城木结构建筑群为研究对象,总结了不同建筑间距下的防火措施设置方法。

我国西南地区村镇木结构建筑的外墙板通常采用厚度 25 mm 左右的单层杉木板,其耐火时间较短。鉴于此,笔者提出一种新型夹芯镀锌钢板复合墙板。当木结构建筑发生室内火灾时,一方面,镀锌钢板能够直接阻断内层木墙板燃烧时的火焰以及热空气的对流换热现象;另一方面,镀锌钢板与外层木墙板之间空气量很少,外层木墙板在高温下热解释放出来的可燃气体不具备燃烧条件,从而提高了复合墙板的抗火性能以及对室内火焰的约束能力。研究表明,以该复合墙板作为木结构建筑的外墙,能够降低木结构建筑间的火灾蔓延速率,延长木结构建筑物间的火灾蔓延时间,可以为人员逃生以及火灾扑救工作赢取宝贵时间。

# 1 数值模型

## 1.1 夹芯镀锌钢板复合墙板

笔者提出一种在两层木板中间夹厚度 0.4 mm 镀锌钢板的夹芯镀锌钢板复合墙板(见图 1)。对于既有木结构建筑,可在原木板外墙的外部铺设厚度 0.4 mm 的镀锌钢板,然后在镀锌钢板外部再铺设一层木板。

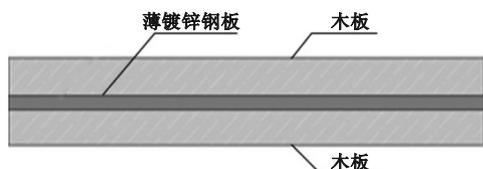


图 1 夹芯镀锌钢板复合墙板

Fig. 1 Sandwich galvanized steel composite wallboard

当木结构建筑发生室内火灾时,复合墙板中的镀锌钢板能够直接阻断内层木墙板燃烧时的火焰以及热空气的对流换热现象;同时,镀锌钢板与外层木墙板之间空气量较少,外层木墙板在高温下热解释放出来的可燃气不具燃烧条件,从而提高了复合墙板的耐火极限以及对室内火焰的约束能力。

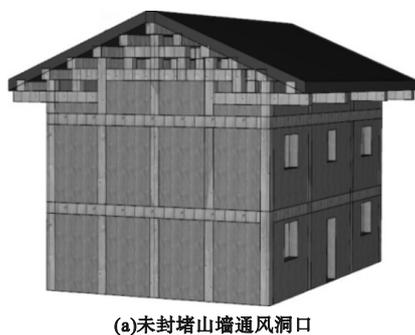
## 1.2 模型参数

以我国西南地区村镇穿斗式木结构建筑物为研究对象,采用建筑火灾仿真工程软件 PyroSim 建立未封堵山墙通风洞口和封堵山墙通风洞口的木结构建筑数值模型(见图 2)。建筑物模型长 × 宽 × 高为 10.8 m × 7.2 m × 7.5 m,外墙门、窗洞口宽 × 高分别为 0.9 m × 1.8 m、1.2 m × 0.9 m,室内门洞口宽 × 高为 0.9 m × 1.8 m。火源位于一层中厅位置,面积为 0.9 m × 0.9 m,火源单位面积热释放速率为 1 000 kW/m<sup>2</sup>,火源燃烧类型采用非稳态 *t*<sup>2</sup> 火模式。木材参考温度为 150 °C,热解反应热为 5 000 kJ/kg,燃烧热为 18 000 kJ/kg。

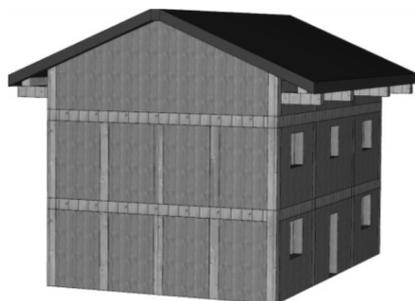
## 1.3 网格划分

网格尺寸对数值模拟的计算精度有很大影响,应同时兼顾计算精度和运行时间。由

火灾规模确定文中木结构建筑最大热释放速率为 8 000 kW,根据文献[22]计算得到木结构建筑数值模型的合理网格尺寸为 0.139 ~ 0.558 m,最终数值模型的网格长 × 宽 × 高选取为 0.3 m × 0.3 m × 0.3 m,计算区域设定为 27.3 m × 23.7 m × 8.4 m,单元总数为 201 292 个。



(a)未封堵山墙通风洞口



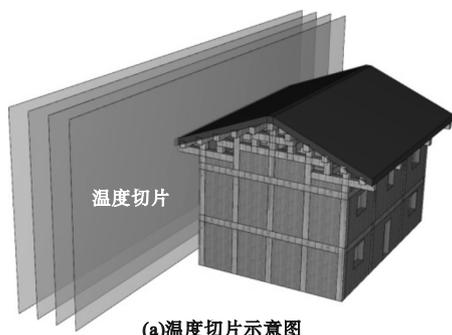
(b)封堵山墙通风洞口

图 2 木结构建筑数值模型

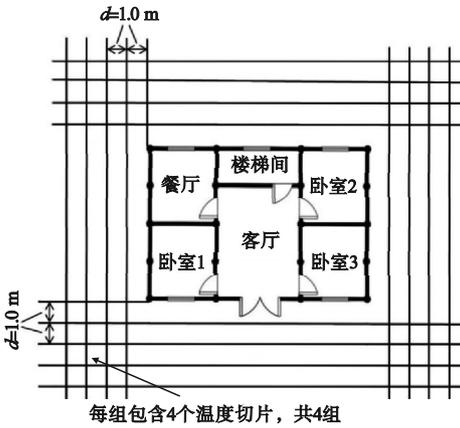
Fig. 2 Numerical models of timber buildings

## 1.4 温度切片布置

在起火建筑四周布置 4 组竖向温度切片,以监测火灾过程中不同位置处的温度变化情况。每组包含 4 个温度切片,与相应的外立面墙体平行,在水平方向上距离外立面墙体分别为 1 m、2 m、3 m 和 4 m(见图 3)。



(a)温度切片示意图



(b)温度切片平面布置图

图3 温度切片布置图

Fig. 3 Layout of temperature slices

### 1.5 工况设置

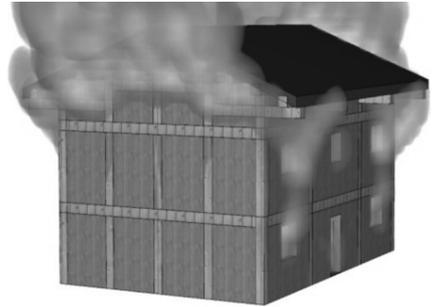
笔者从木结构建筑发生火灾后的室外温度在空间上的衰减规律、建筑间火灾蔓延时间两个角度,对比研究夹芯镀锌钢板复合墙板对木结构建筑外部火灾蔓延的延缓与阻断作用,并探索复合墙板的最优布设位置。为此设置4种工况,工况1:建筑物外墙不布设复合墙板;工况2:仅在建筑物一层外墙布设复合墙板;工况3:仅在建筑物二层外墙布设复合墙板;工况4:建筑物全部外墙布设复合墙板。在数值模拟过程中,建筑物门窗均设置为开启状态。

## 2 结果与分析

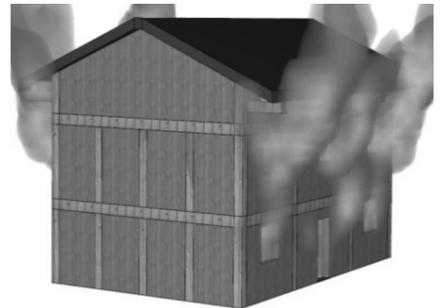
### 2.1 室外温度

当燃烧时间为 800 s 时,木结构建筑进入燃烧充分发展阶段,易引发外部火灾蔓延(见图4)。以未封堵山墙通风洞口的建筑为例,选取距起火建筑前立面墙体 1.0 m 处温度切片,获得该位置处在任意时刻的温度云图以及该时刻所对应的温度极值(见图5)。进一步得到该位置处温度极值随时间的变化曲线(见图6)。提取图6中曲线最大值作为距起火建筑前立面墙体 1.0 m 处的最高温度值,并对距起火建筑前立面墙体 2.0 m、3.0 m和 4.0 m 位置处进行相同处理,获得

火灾过程中距起火建筑前立面墙体不同位置处的室外最高温度值如图7所示。同理,可获得火灾过程中距起火建筑后立面、左立面墙体不同位置处的室外最高温度值如图8、图9所示。由于模型具有左右对称性,因此火灾过程中距起火建筑右立面墙体不同位置处的室外最高温度值与左立面情况相似。



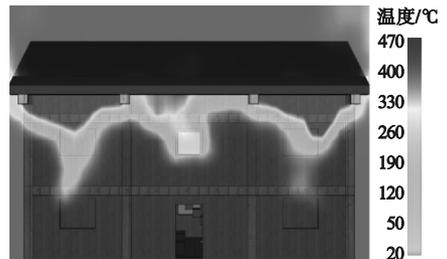
(a)未封堵山墙通风洞口



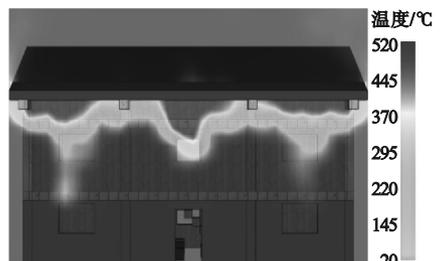
(b)封堵山墙通风洞口

图4 燃烧充分发展阶段

Fig. 4 Full development stage of combustion



(a)工况1



(b)工况2

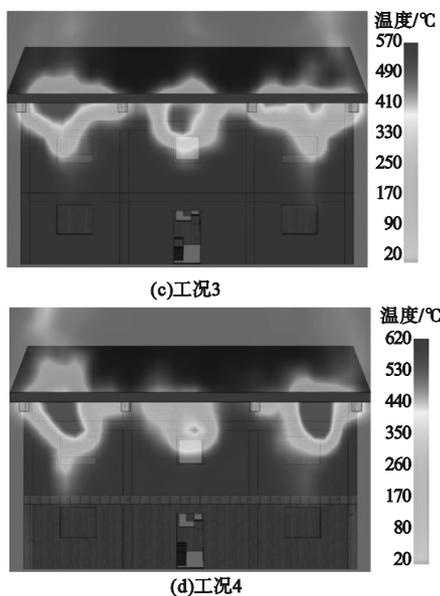


图5 燃烧充分发展阶段时的温度云图

Fig. 5 Temperature distributions at the full development stage of combustion

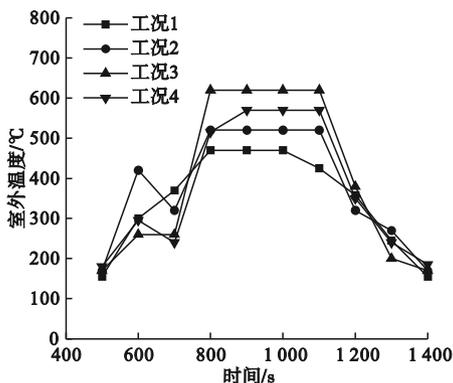
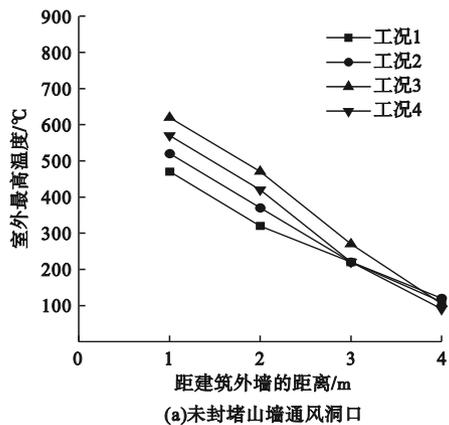
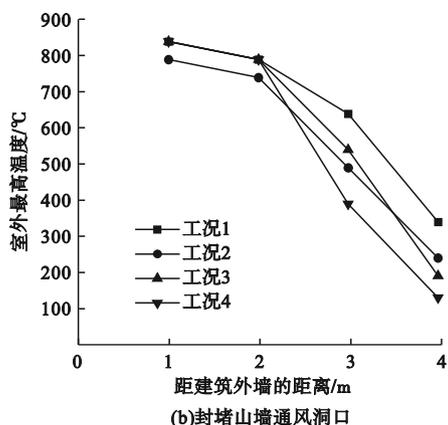


图6 温度极值随时间的变化曲线

Fig. 6 The variation of temperature extremum with combustion time



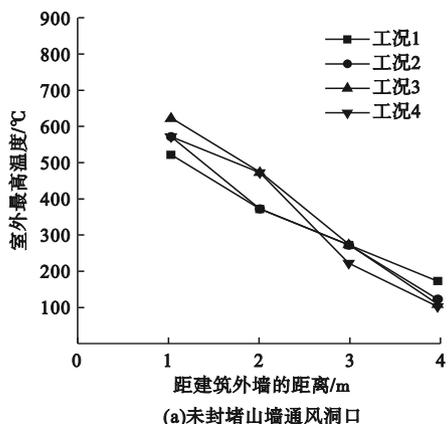
(a)未封堵山墙通风洞口



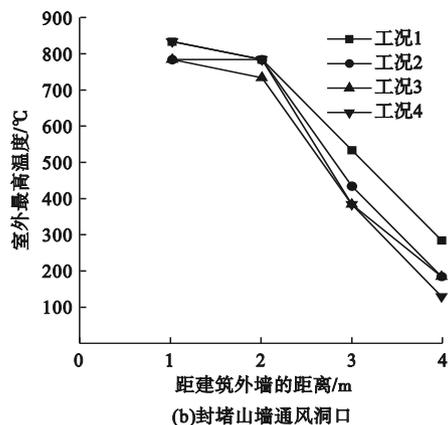
(b)封堵山墙通风洞口

图7 距离起火建筑前立面墙体不同位置处的室外最高温度值

Fig. 7 The maximum temperature at different locations away from the front facade wall of the burning building



(a)未封堵山墙通风洞口



(b)封堵山墙通风洞口

图8 距离起火建筑后立面墙体不同位置处的室外最高温度值

Fig. 8 The maximum temperature at different locations away from the rear facade wall of the burning building

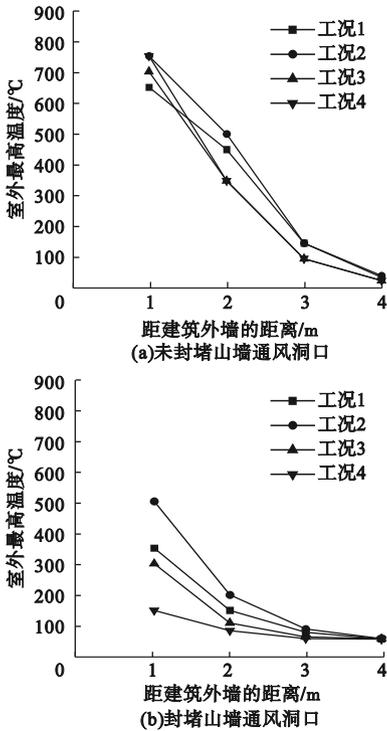


图9 距离起火建筑左、右立面墙体不同位置处的室外最高温度值

Fig. 9 The maximum temperature at different locations away from the left or right facade wall of the burning building

从图7~图9可以得出,对于未封堵山墙通风洞口的木结构建筑而言,进入燃烧充分发展阶段后,室内火焰将通过左右山墙通风洞口、前后立面门窗洞口向室外溢出,由于山墙通风洞口具有更好的空气流动性,因此山墙通风洞口将是室内火焰向室外溢出的主要途径(见图4(a)),这将导致左右立面方向室外温度高于前后立面方向室外温度,需重视东西方向安全防火间距的设置;而对于封堵山墙通风洞口的木结构建筑而言,室内火焰向室外溢出的主要途径是前后立面门窗洞口(见图4(b)),这将导致前后立面方向室外温度高于左右立面方向室外温度,需重视南北方向安全防火间距的设置。

对于未封堵山墙通风洞口的木结构建筑,当进入燃烧充分发展阶段后,室内火焰主要通过山墙通风洞口向室外溢出(见

图4(a))。若在建筑外墙上布设复合墙板,山墙通风洞口溢出的猛烈火焰将逐渐引燃复合墙板,等效于增加了建筑物火灾荷载,这将导致布设复合墙板的木结构建筑在火灾过程中的室外温度上升100~200 °C,即复合墙板不适用于未封堵山墙通风洞口的木结构建筑。

对于封堵山墙通风洞口的木结构建筑,室内火焰溢出的主要途径是前后立面门窗洞口和后期的外墙板烧穿(见图4(b))。当建筑外墙不布设复合墙板时,在距离建筑前后立面墙体1.0 m、2.0 m、3.0 m和4.0 m位置处最高温度分别为820 °C、770 °C、620 °C和320 °C;当建筑外墙布设复合墙板时,在距离建筑前后立面墙体1.0 m、2.0 m、3.0 m和4.0 m位置处,最高温度值分别降低50 °C、50 °C、100~250 °C和100~210 °C。常见建筑木材燃点为260~400 °C,布设复合墙板将在距离建筑前后立面墙体3.0~4.0 m位置处显著发挥其隔热作用,从而避免相邻木结构建筑被引燃。对于封堵山墙通风洞口的木结构建筑左右立面,当建筑外墙不布设复合墙板时,在距离建筑左右立面墙体2.0 m、3.0 m和4.0 m位置处最高温度值分别为120 °C、50 °C和29 °C,已低于常用建筑木材的燃点,这是因为封堵山墙通风洞口能够有效约束室内火焰。因此,在左右山墙布设复合墙板,对于外部火灾蔓延的延缓与阻断作用并不显著。

此外,对于封堵山墙通风洞口的木结构建筑,当建筑全部外墙布设复合墙板时,能够取得最佳的延缓外部火灾蔓延效果。出于成本的考虑,建议仅在前后立面墙体布设复合墙板。研究表明,仅在前后立面二层墙体布设复合墙板,既能取得一定的延缓外部火灾蔓延的效果,又能有效降低成本。

## 2.2 外部火灾蔓延时间

常见建筑木材在受温260 °C时,热分解速率达到极大值,通常将受火木材的引燃温

度取值为 260 °C。据调查,我国西南地区建筑间距通常为 2~4 m,选取距离木结构建筑外墙 2.0 m、3.0 m 和 4.0 m 位置处的温度切片,提取各位置处温度切片中最高温度值达到 260 °C 的时间作为外部火灾蔓延至该位置处的时间,结果见表 1 和表 2。表中,“∞”表示该位置处的最高温度值低于建筑木材燃点 260 °C,未达到建筑木材的燃烧条件。

表 1 木结构建筑(未封堵山墙通风洞口)  
外部火灾蔓延至不同位置处的时间

Table 1 Fire spread time to different locations of timber building(gable ventilation opening unblocked)

位置	室外火灾蔓延至不同位置处的时间/s			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
距左右立面 2.0 m	644	650	651	∞
距左右立面 3.0 m	∞	∞	∞	∞
距左右立面 4.0 m	∞	∞	∞	∞
距前立面 2.0 m	780	773	776	765
距前立面 3.0 m	∞	∞	822	∞
距前立面 4.0 m	∞	∞	∞	∞
距后立面 2.0 m	770	783	772	776
距后立面 3.0 m	789	836	∞	∞
距后立面 4.0 m	∞	∞	∞	∞

表 2 木结构建筑(封堵山墙通风洞口)  
外部火灾蔓延至不同位置处的时间

Table 2 Fire spread time to different locations of timber building(gable ventilation opening blocked)

位置	室外火灾蔓延至不同位置处的时间/s			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
距左右立面 2.0 m	∞	∞	∞	∞
距左右立面 3.0 m	∞	∞	∞	∞
距左右立面 4.0 m	∞	∞	∞	∞
距前立面 2.0 m	660	651	652	664
距前立面 3.0 m	667	681	689	727
距前立面 4.0 m	722	∞	∞	∞
距后立面 2.0 m	627	676	662	675
距后立面 3.0 m	684	720	700	737
距后立面 4.0 m	766	∞	∞	∞

从表 1 可以看出,对于未封堵山墙通风洞口的木结构建筑,四面墙体均存在洞口,因此起火建筑向四周均匀地发生火灾蔓延现象,复合墙板对外部火灾蔓延的延缓和阻断效果并不显著,此时应以设置合理防火间距作为控制外部火灾蔓延的有效手段,数值模

拟得到的防火间距计算值约为 4.0 m。

从表 2 可以看出,对于封堵山墙通风洞口的木结构建筑,建筑左右立面墙体无洞口存在,火焰向室外溢出的途径主要是前后立面门窗洞口,因此起火建筑前后立面方向上的外部火灾蔓延范围增大。如果对起火建筑全部外墙布设复合墙板,当前后立面方向的建筑间距为 3.0 m 时,相邻建筑被引燃的时间延长了 60 s 左右;当前后立面方向的建筑间距为 4.0 m 时,复合墙板的布设将有效阻断外部火灾蔓延。

### 3 结 论

(1)笔者提出的新型夹芯镀锌钢板复合墙板具有很好的耐火性能以及对室内火焰的约束能力,能够延缓和阻隔木结构建筑间的外部火灾蔓延,同时具有造价低廉、施工便捷、不破坏建筑原有内部风貌和外部风貌等优点,可在我国西南地区村镇推广使用。

(2)对于未封堵山墙通风洞口的木结构建筑而言,山墙通风洞口是室内火焰向室外溢出的主要途径,应以合理设置防火间距作为控制外部火灾蔓延的手段。数值模拟得到的防火间距计算值约为 4.0 m,综合考虑《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)中的规定以及各种不确定因素的影响,取安全系数 1.5,建议未封堵山墙通风洞口的木结构建筑防火间距取值为 6.0 m 以上。

(3)为了减少雨水侵袭,很多当地居民采用木板、彩钢板对山墙通风洞口进行了封堵。这种情况下,室内火焰向室外溢出的主要途径是前后立面门窗洞口、外墙板烧穿。此时,在前后立面外墙布设复合墙板,既能取得一定的延缓外部火灾蔓延的效果,又能有效降低成本。当前后立面方向的建筑间距为 3.0 m 时,复合墙板的布设能够延长火灾蔓延至相邻建筑的时间;当前后立面方向的建筑间距为 4.0 m 时,复合墙板的布设将可以有效阻断外部火灾蔓延。

## 参考文献

- [1] KNIG J. Structural fire design according to eurocode 5-design rules and their background [J]. *Fire and materials*, 2005, 29(3): 147-163.
- [2] SHNAL T, POZDIEIEV S, SIDNEL S, et al. Determination of the charring rate of timber to estimate the fire resistance of structures at real temperature modes of fires [J]. *Lecture notes in civil engineering*, 2021, 100: 409-418.
- [3] SCHMID J, FRANGI A. Structural timber in compartment fires-the timber charring and heat storage model [J]. *Open engineering*, 2021, 11(1): 435-452.
- [4] HUGI E, WUERSCH M, RISI W. Correlation between charring rate and oxygen permeability for 12 different wood species [J]. *Journal of wood science*, 2007, 53(1): 71-75.
- [5] 怀超平, 刘芳, 董佩文, 等. 木材热重试验及动力学分析[J]. *消防科学与技术*, 2020, 39(6): 757-760.  
(HUI Chao ping, LIU Fang, DONG Pei wen, et al. Thermogravimetric experiment and kinetic analysis of wood [J]. *Fire science and technology*, 2020, 39(6): 757-760.)
- [6] SULC S, SMILAUER V, WALD F. Thermal model for timber fire exposure with moving boundary [J]. *Materials*, 2021, 14(3): 1-10.
- [7] RICHTER F, KOTSOVINOS P, RACKAUSKAITE E, et al. Thermal response of timber slabs exposed to travelling fires and traditional design fires [J]. *Fire technology*, 2021, 57(1): 393-414.
- [8] MENIS A, FRAGIACOMO M, CLEMENTE I. Fire resistance of unprotected cross-laminated timber floor panels; parametric study and simplified design [J]. *Fire safety journal*, 2019, 107: 104-113.
- [9] JESSOP D, ABU A, WADE C, et al. Performance of a light timber-framed compartment in natural fire subjected to lateral load [J]. *Fire and materials*, 2019, 43(2): 175-188.
- [10] BAI Y, ZHANG J, SHEN H. Experimental and numerical analysis of residual load-carrying capacity of cross-laminated timber walls after fire [J]. *Structures*, 2021, 30: 50-61.
- [11] 陈玲珠, 许清风. 基于炭化速度的梁柱木构件防火设计方法研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(2): 11-20.  
(CHEN Lingzhu, XU Qingfeng. Study on the fire design method of timber beams and columns based on charring rate [J]. *China civil engineering journal*, 2018, 51(2): 11-20.)
- [12] HIMOTO K, SHINOHARA M, SEKIZAWA A, et al. A field experiment on fire spread within a group of model houses [J]. *Fire safety journal*, 2018, 96: 105-114.
- [13] DH Kim, JU Lee. An experimental analysis of thatched roof materials to assess fire risk in historical villages [J]. *Journal of the Korean society of hazard mitigation*, 2015, 15(5): 117-122.
- [14] 刘芳, 怀超平, 李竞岚. 木结构古建筑室内火灾发展的数值分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(9): 299-304.  
(LIU Fang, HUI Chao ping, LI Jingji. Numerical analysis of the development of a room fire in a wooden-structure historical building [J]. *Science technology and engineering*, 2019, 19(9): 299-304.)
- [15] 袁春燕, 郎雨佳, 王坤, 等. 砖木结构古建筑不同风速下火灾蔓延规律研究[J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(5): 643-648.  
(YUAN Chunyan, LANG Yujia, WANG Kun, et al. Analysis on the fire spread law of brick-wood structured ancient buildings under different flow velocity [J]. *Fire science and technology*, 2021, 40(5): 643-648.)
- [16] 王雁楠, 邱洪兴. 基于FDS的古建群落火灾蔓延规律数值分析[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(6): 26-32.  
(WANG Yannan, QIU Hongxing. Numerical analysis of spreading law of ancient timber building group fire based on FDS [J]. *China safety science journal*, 2014, 24(6): 26-32.)
- [17] 郭福良. 木结构吊脚楼建筑群火灾蔓延特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.  
(GU Fuliang. Research on fire spread characteristics of wooden stilted buildings [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.)
- [18] 谷凡, 张玉玉, 姜喻涵, 等. 不同风速条件下村镇木结构建筑防火间距的数值模拟研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(5): 854-861.  
(GU Fan, ZHANG Yuyu, JIANG Yuhan, et al. Numerical simulation analysis of fire separation distance of rural timber structure buildings under different wind speeds [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2022, 38(5): 854-861.)
- [19] 吴兴绍, 宋志刚, 陈硕, 等. 瓮丁村典型民居火灾动力学分析[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(2): 120-126.  
(WU Xingshao, SONG Zhigang, CHEN Shuo, et al. Fire dynamics analysis of typical residents in Wengding village [J]. *Journal of natural disasters*, 2016, 25(2): 120-126.)
- [20] 翟滢莹, 叶雁冰, 马黎进, 等. 侗族吊脚楼建筑防火间距的数值模拟研究[J]. *广西科技大学学报*, 2019, 30(2): 66-71.  
(ZHAI Yingying, YE Yanbing, MA Lijin, et al. Study on fire prevention spacing of stilted houses in Dong village with numerical analysis [J]. *Journal of Guangxi university of science and technology*, 2019, 30(2): 66-71.)
- [21] 鄢银连, 相华江, 解志勇, 等. 基于PyroSim的木结构建筑防火间距探讨[J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(8): 1091-1093.  
(YAN Yinlian, XIANG Huajiang, XIE Zhiyong, et al. Discussion on fire-proof distance of wood structural buildings based on PyroSim [J]. *Fire science and technology*, 2019, 38(8): 1091-1093.)
- [22] 李胜利, 李孝斌. FDS火灾数值模拟[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.  
(LI Shengli, LI Xiaobin. FDS fire numerical simulation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.)  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)