

# 木-钢复合楼板托梁体系耐火试验研究

刘永军,吴灏暄,张翰天,王紫怡

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 提出一种新型的木-钢复合楼板托梁体系,研究在相同持荷水平和相同火荷载条件下木-钢复合楼板托梁体系的耐火性能。**方法** 参照实际木楼,在平炉上布置左右2组不同楼板托梁体系,在相同持荷水平和相同火荷载条件下进行受火对比试验。**结果** 传统楼板托梁体系在试验时间到达1 h16 min后发生坍塌,而复合楼板托梁体系直到试验结束也未坍塌,只是底部木板烧坏、格栅部分烧毁、顶部局部烧穿和托梁出现较大挠度。**结论** 木-钢复合楼板托梁体系相较于传统楼板托梁体系的耐火时间有大幅度提升,在试验结束后,楼板仍然具有整体性和一定承载能力。

**关键词** 木结构;复合楼板;耐火时间;升温速率

中图分类号 TU366

文献标志码 A

## Experimental Study on Fire Resistance of Wood-steel Composite Floor Joist System

LIU Yongjun, WU Haoxuan, ZHANG Hantian, WANG Ziyi

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

**Abstract:** A new type of wood-steel composite floor joist system which is proposed to study the fire resistance performance of wood-steel composite floor joist system is better than traditional floor joist system under the same holding load level and the same fire load condition. With reference to the actual wooden building, two groups of different floor joist systems are arranged on the flat stove, and the fire comparison test is carried out under the same load holding level and the same fire load conditions. The traditional floor joist system collapsed at 1h6min, while the composite floor joist system did not collapse until the end of the experiment, but the bottom board was burned, the grill was partially burned, the top was partially burned through and the joist showed large deflection. The wood-steel composite floor joist system showed a significant increase in fire resistance time compared to the traditional floor joist system, and at the end of the test, the floor slab still had integrity and a certain load-bearing capacity.

**Key words:** wooden structure; composite floor; fire resistance time; temperature rise rate

我国西南地区气温高且空气潮湿,林木资源丰富。由于取材方便,当地村镇建筑多为木结构。木材为可燃材料,作为承重构件时耐火能力较差。目前,国内外木结构建筑抗火性能的研究多数集中在添加阻燃剂、外加保护层、增大构件截面面积等方面<sup>[1-4]</sup>。L. R. Richardson<sup>1</sup>等<sup>[5]</sup>在木楼板下设置石膏板,取得很好的抗火效果,其耐火极限可提高18~20 min,但石膏板对于整幢木楼自重的影响较大。D. H. Le等<sup>[6]</sup>进行了木与H型钢复合结构的耐火性能研究,研究表明,该结构能够在火灾中很好地保证结构的完整性,提供至少1 h的构件耐火时间。M. F. Eiza等<sup>[7]</sup>在木材间添加钢板作为连接件进行受火试验,研究表明,木材与火源无法直接接触,以此达到延长火灾蔓延的时间,使构件的耐火时间显著提高。许清风等<sup>[8]</sup>进行了三面受火托梁的耐火极限试验研究,研究表明,随着构件的持荷比增加,三面受火托梁的耐火极限明显降低。张晋<sup>[9]</sup>进行了在标准升温曲线ISO834受火条件下木梁的四面受火和灾后剩余承载力研究,研究表明,木梁构件截面尺寸的变化对受火后剩余承载力影响不大。蔡炎等<sup>[10]</sup>进行了四面受火托梁的温度场模拟,得出构件截面尺寸的变化对受火后剩余承载力影响不大。廖家男<sup>[13]</sup>利用ABAQUS有限元分析软件进行了数值模拟分析,通过与试验数据做对比验证了胶合木板的耐火极限优于普通木板。于涛郡等<sup>[11]</sup>进行木-钢复合楼板的耐火时间数值模拟研究,板间添加镀锌板后,楼板的耐火时间明显增加。

然而,我国西南地区已有的村镇木结构的木楼板常以一层木板进行简单拼合而成,在实际火灾环境中,木楼板常以底部受火、托梁以三面受火,这种简单的结构构造很难起到有效的防火作用,楼板往往短时间内就失去承载能力。为此,笔者提出一种新型梁板构造,即在木梁外包镀锌板与木楼板内夹镀

锌板组合新型复合梁板,并研究复合梁板的耐火性能,为木结构的防火设计提供参考。

1 试 验

1.1 试件的设计与制作

为提高木楼板耐火极限,笔者提出一种新型梁板构造,在木梁外包镀锌板与木楼板内夹镀锌板组合新型复合梁板,即木-钢-格栅复合楼板托梁体系。为与传统木楼板托梁体系性能比较,分别设计了试验组和对照组两组试件进行对比试验研究,构件的剖面设计如图1所示。

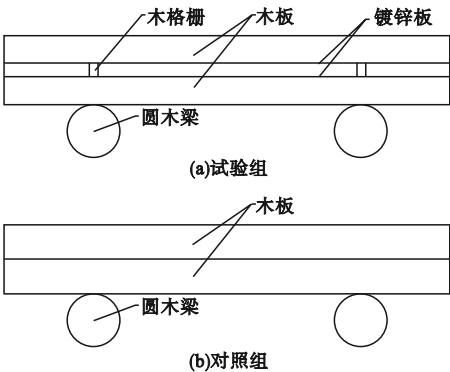


图1 整体立体简图

Fig. 1 The section sketch of composite

试验组的单块木板长×宽为2 000 mm×200 mm、厚26 mm,把单块木板边缘开成榫槽,然后两两插接,进而拼成整个楼板。薄钢板规格为2 000 mm×2 800 mm×0.2 mm,格栅木截面为40 mm×50 mm、间隔为650 mm。楼板下布置直径为120 mm的包裹镀锌板的圆形托梁,间距为650 mm,镀锌板搭接处重叠30 mm,结构形式如图2所示。



图2 复合楼板及复合托梁

Fig. 2 The composite floor and joists

对照组构件的尺寸和拼接方式与试验组相同,区别在于未添加镀锌板和板内木龙骨。在两组楼板上沿木梁方向均放置四组4层红砖模拟真实村镇建筑荷载,两组楼板上预加荷载均为 8.3 kN,整体构件全貌如图 3 所示。

为防止木板与托梁拼接后的组合试件在试验时出现因风向引起的漏火现象,在每根梁之间添加挡火木板封住缺口,构件与挡火板用铁钉连接成一个整体。木板和托梁均选用杉木,通过材性试验测得其顺纹抗压强度为 35.8 MPa,顺纹抗拉强度为 66.1 MPa,弹性模量为 12 353 MPa,密度为 481 kg/m<sup>3</sup>,含水率为 15.2%。



图3 整体布置图

Fig. 3 The overall layout drawing

1.2 试验方案及测点布置

燃烧试验时间设为 1 h30 min。为了得到受火试件内部升温情况,在托梁和楼板上布置热电偶,热电偶布置情况如下。

试验组共布置了 9 个热电偶,1#和 2#测点为顶板处测点;3#和 4#测点为龙骨处测点;5#和 6#测点为底板处测点;7#和 8#测点为木梁内测点;9#测点为炉温测点,整体布置如图 4 所示。

对照组共布置了 7 个热电偶,1#和 2#测点为顶板处测点;3#和 4#测点为底板处测点;5#和 6#测点为木梁内测点;7#测点为炉温测点,整体布置如图 5 所示。在燃烧到预定时间后,向试验炉内喷水,等整体温度下降后再将构件进行拆解处理。

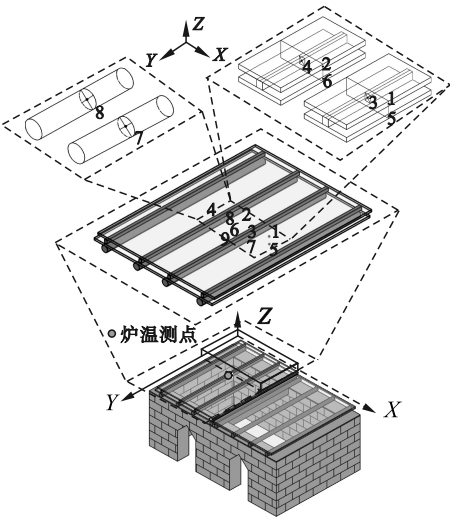


图4 试验组热电偶布置图

Fig. 4 The layout of thermal couples for test group

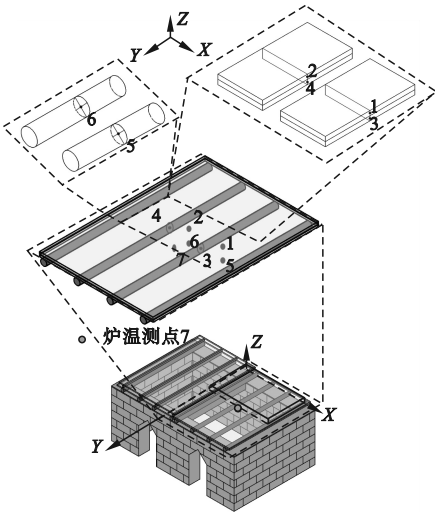


图5 对照组热电偶布置图

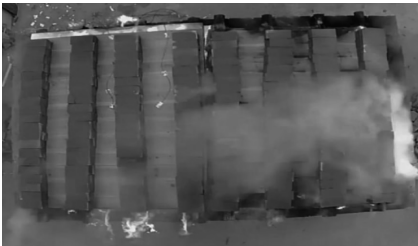
Fig. 5 The layout of thermal couples for control group

2 结果与分析

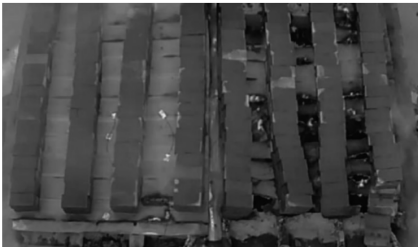
2.1 试验现象

试验初期,对照组出现大量白色烟雾向外溢出,楼板的顶面出现零星的炭化区域,在 25 min 时顶层楼板部分区域被烧穿开始出现火苗;在受火时间为 51 min 30 s 时,对照组的顶层楼板中大量木板被烧毁,并且可以明显看到中间两根梁上的红砖发生了偏移,

可知对照组整体楼板托梁体系即将失去剩余承载力而发生破坏。而试验组楼板上的红砖未出现明显位移,只是木板出现了轻微炭化;在受火时间 1h6 min 时,对照组传统楼板托梁体系彻底失去承载能力,整体塌陷掉落炉内,而试验组整体仍保存相对完好,楼板上的红砖仍未出现明显位移。对照组构件完全烧毁,失去承载能力,如图 6 所示。



(a)试验初期现象



(b)对照组大面积烧毁



(c)对照组完全烧毁

图 6 试验现象对比图

Fig. 6 Comparison of experimental phenomena  
试验结束后,试验组楼板如图 7 所示。



图 7 试验后试验组楼板

Fig. 7 The floor slab of test group after the experiment

综上所述,对照组构件在试验组构件顶面还没出现炭化区域时就已经完全烧毁,而试验组构件直至试验结束也没有被烧毁,且试验组构件的顶面只在木板拼接处有出现零星炭化区域和零星火焰,试验组构件保持相对完整。主要试验结果汇总如表 1 所示。

表 1 耐火极限对比结果

| Table 1 The comparison results of fire resistance |       |         |
|---|-------|---------|
| 组别  | 现象    | 时间      |
| 对照组   | 大面积烧毁 | 0:51:30 |
|   | 完全烧毁  | 1:06:00 |
| 试验组   | 出现炭化  | 1:10:00 |
|   | 未烧毁   | 1:30:00 |

2.2 试验结果与分析

2.2.1 整体结构温度曲线变化分析

试验组构件温度变化如图 8 所示。

当温度接近 100 ℃前有一个相对较平缓的平台,这主要是由于木材中自由水分的蒸发所引起,与文献[12]中所做试验结论相吻合。相同时间下,顶面 1#和 2#热电偶的温度明显低于其他测点的温度,并且其升温速率远远低于同一构件的其他测点,在试验结束时温度曲线仍处于相对较平缓状态,峰值温度低于 100 ℃。介于复合楼板中间的格栅处 3#测点温度和升温速率明显高于顶面 1#和 2#测点,同时低于其他板上测点,符合试验规

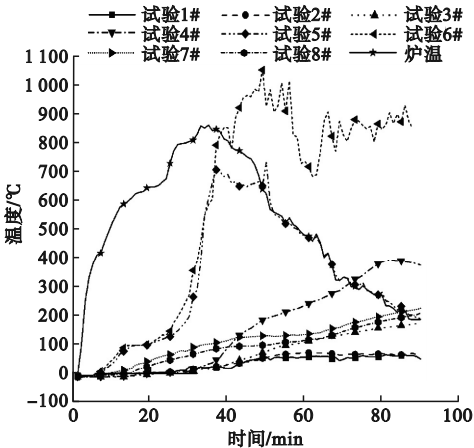


图 8 试验组温度曲线

Fig. 8 Temperature curves of the test group



律。底面5#和6#测点的温度在短时间内迅速升高,远高于其他测点,其中,5#测点温度曲线的下降段与炉温基本重合,说明底面木板完全被烧毁,6#测点的温度曲线与5#测点基本吻合。而后面出现异常,发现是木板烧毁后将热电偶烧毁导致的。7#和8#测点温度和升温速率基本重合,在试验结束时均未达到木材的燃点 $280\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,证明了外包镀锌板对于延长托梁的耐火时间有着显著效果。

对照组构件温度变化如图9所示。少数热电偶在试验时损坏未测出温度变化,当温度接近 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时有一个相对较平缓的平台。顶面1#测点温度在45 min时开始迅速升温,此时木板已经被烧穿进入了燃烧阶段;在65 min时完全烧毁塌陷,又出现再次增长现象,可能是因为热电偶掉入炉中后与火源直接接触所致。底面3#和4#测点温度曲线基本相似,3#热电偶的整体温度曲线左移可能受到当时风向的影响所致,板内测点的温度曲线整体趋势基本相同。托梁中心5#和6#测点温度在烧毁前上升缓慢,烧毁后开始急剧上升,是因为外圈托梁起到了良好的隔热作用,但随着逐步燃烧导致托梁逐渐失去承载能力,直到结构整体塌陷掉落炉内,进一步燃烧,温度又开始上升。

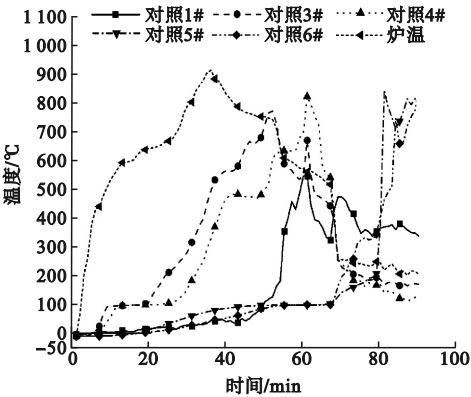


图9 对照组温度曲线

**Fig. 9** Temperature curves of the control group

2.2.2 各构件温度曲线对比分析

两组顶面测点温度变化对比如图10所

示。对照组1#测点温度在43 min开始急剧上升,说明此时对照组的顶层楼板已经被烧穿进入燃烧状态,当时间到达1 h后对照组顶层楼板温度达到峰值并且迅速下降。在这一过程中试验组1#、2#测点温度仍处于靠近 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前的平缓状态,并且直到试验结束仍处于平缓状态。在40 min前时,试验组1#、2#测点均低于对照组1#测点温度,这一现象证明试验组的楼板结构显著提升了耐火时间。

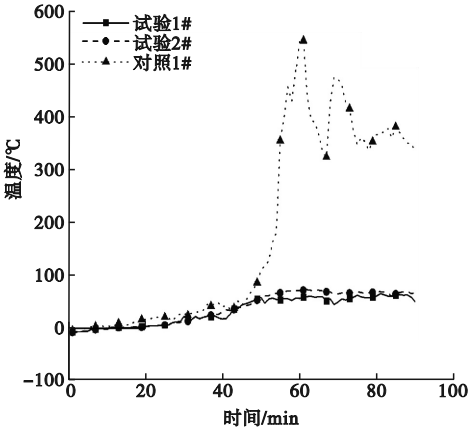


图10 两组的顶面温度对比曲线

**Fig. 10** Comparison curves of the temperature on the top surface for two groups

试验组格栅处与底面纵向相同位置测点温度变化对比见图11。

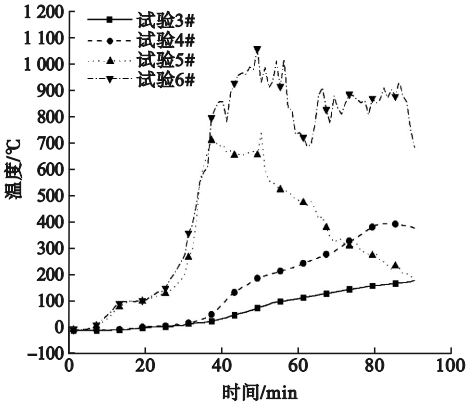


图11 试验组格栅处与底面温度对比曲线

**Fig. 11** Comparison curves of temperature between the keel and near-fire surface for the test group

由于格栅的存在,5#、6#测点与3#、4#测点之间有较大 $50\text{ mm}$ 的间隙,间隙充满导热系数很低的空气,起到了很好的隔热效

果<sup>[13]</sup>,所以当底面5#、6#测点在25 min左右开始燃烧,测点温度急剧升高,格栅处3#、4#测点温度仍然随时间缓慢上升,同一时刻3#、4#测点的温度远低于5#、6#测点,且整体的升温速率也更慢,这一现象证明了利用空气隔热性能的板内设置格栅的组合结构能够明显增加楼板的耐火时间。

两组托梁中心处测点温度场对比见图12。在65 min前,试验组7#、8#和对照组5#、6#测点的升温曲线基本相似,随着时间增加,对照组5#、6#测点温度开始急剧升高,直至被烧毁,而试验组7#、8#仍在稳定升温;说明包裹镀锌板隔绝了构件与火源的直接接触,增加了构件的耐火时间,这一现象也证明了镀锌板的存在虽然不能增加结构的隔热性能,但能够隔绝火源的直接接触,进而能够在较大程度上增加楼板的耐火时间。

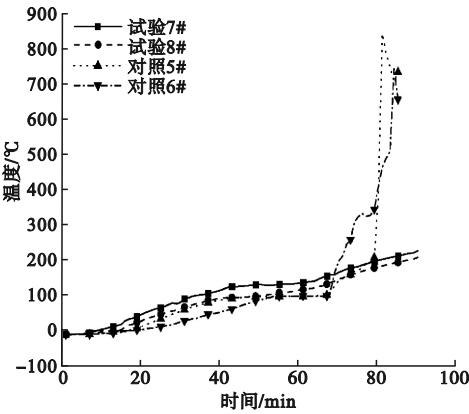


图12 托梁温度对比曲线

Fig. 12 Comparison curves of temperature for wooden beam

2.3 炭化情况

试验组顶部木板炭化情况如图13所示。木板左半边炭化层表面较光亮且面积较大,右半边相对较小,可能是由于试验时的风向影响导致,炭化层沿顺纹及横纹方向存在许多小裂缝,形成类似鳄鱼皮的裂缝分布<sup>[14]</sup>。用小刀在木板的中间处剥落炭化层,测量木板的炭化层厚度与木板的受火后厚度,如图14所示。木板原始厚度为26.2 mm,受火后

剩余厚度为13.3 mm,厚度减少12.9 mm,计算得到受火木板的炭化速率为0.22 (mm/min),远小于欧洲标准建议值。说明通过镀锌板隔绝火源和充分利用木格栅间的不流动空气进行隔热的方式,极大地延缓了木板的升温速度,从而减小了木板的炭化速率。



图13 顶部木板炭化表面

Fig. 13 The carbonized surface of wood board on the top



图14 顶部木板底面炭化层测量

Fig. 14 Thickness of the carbonization layer on the bottom surface of the top board

2.4 试验后托梁跨中挠度

根据《建筑构件耐火试验方法第1部分:通用要求》(GB/T 9978.1—2008)<sup>[15]</sup>的规定,托梁耐火极限为其在受火期间能够保持承载能力的时间,采用变形量 $L^2/400d$ (其中 $L$ 为托梁的跨度, $d$ 为托梁的截面高度)作为判断受火托梁承载能力的参数,即当跨中挠度大于 $L^2/400d$ 时认为托梁丧失承载能力。选取中间两根受火托梁进行跨中挠度的测量,分别为100 mm和105 mm,远远小于

规范中要求的163 mm的限值。证明在相同条件下,托梁包裹镀锌板和增加格栅的木楼板通过隔绝火源与隔热的方式极大程度地提升构件的耐火时间。

### 3 结 论

(1)在相同火灾试验条件下,传统木楼板在1 h 6 min时坍塌失去承载能力,而木-钢复合楼板托梁体系整体保持完好,与传统木楼板结构相比,木-钢复合楼板托梁体系的耐火时间显著提高,提高幅度约50%;

(2)根据各测点的温度和升温速率综合判定,在楼板间添设木格栅的方法在楼板结构隔热性能方面的效果最显著,而铺设镀锌板虽然没有隔热效果,却通过阻隔楼板与火源直接接触,进而增加了楼板的耐火时间。

(3)木-钢复合楼板托梁体系构造形式可显著降低木材的炭化速率,其中背火面木板炭化速率为0.22 mm/min,小于欧洲标准建议值。

### 参考文献

- [1] 李雪进,李炎锋,褚利,等.某侗族村镇木结构建筑火灾试验研究[J].消防科学与技术,2018,37(1):30-32.  
(LI Xuejin, LI Yanfeng, CHU Li, et al. Experimental study of fire in wooden structure buildings in a Dong village and town [J]. Fire science and technology, 2018, 37(1): 30-32.)
- [2] 马国儒,邵路山,张玉涛,等.国内外木结构建筑防火技术研究现状[J].农业与技术,2021,41(24):49-53.  
(MA Guoru, SHAO Lushan, ZHANG Yutao, et al. Current status of research on fire protection technology of domestic and foreign wood structure buildings [J]. Agriculture and technology, 2021, 41(24): 49-53.)
- [3] 王飞,刘君良,吕文华.木材功能化阻燃剂研究进展[J].世界林业研究,2017,30(2):62-66.  
(WANG Fei, LIU Junliang, Lü Wenhua. Research progress on functionalized flame retardants for wood [J]. World forestry research, 2017, 30(2): 62-66.)
- [4] 张晋,李成,张悦洋,等.木结构抗火性能及防火设计研究现状[J].工业建筑,2016,46(2):113-119.  
(ZHANG Jin, LI Cheng, ZHANG Yueyang, et al. Current status of research on fire resistance and fire design of wood structures [J]. Industrial building, 2016, 46(2): 113-119.)
- [5] RICHARDSON L R, BATISTA M. Fire resistance of timber decking for heavy timber

construction [J]. Fire and materials, 2001, 25(1):21-29.

- [6] LE T D H, TSAI M T. Experimental assessment of the fire resistance mechanisms of timber-steel composites [J]. Materials, 2019, 12(2):1-23.
- [7] EIZA M F, LINO S, PEDRO A L, et al. Numerical model to predict the effect of wood density in wood-steel-wood connections with and without passive protection under fire [J]. Journal of fire sciences, 2020, 38(2):122-135.
- [8] 许清风,张晋,商景祥,等.三面受火托梁耐火极限试验研究[J].建筑结构,2012,42(12):127-130.  
(XU Qingfeng, ZHANG Jin, SHANG Jingxiang, et al. Experimental study on the fire resistance limit of wooden beams subjected to fire on three sides [J]. Building structures, 2012, 42(12): 127-130.)
- [9] 张晋,许清风,李维滨等.木梁四面受火炭化速度及剩余受弯承载力试验研究[J].土木工程学报,2013,46(2):24-33.  
(ZHANG Jin, XU Qingfeng, LI Weibin, et al. Experimental study on the carbonization speed and remaining bending bearing capacity of wood beam on all sides [J]. China civil engineering journal, 2013, 46(2): 24-33.)
- [10] 蔡炎,刘永军,李思雨.托梁温度场及受火后力学性能数值模拟[J].消防科学与技术,2020,39(1):38-41.  
(CAI Yan, LIU Yongjun, LI Siyu. Numerical simulation of temperature field and mechanical properties of wood beams after fire [J]. Fire science and technology, 2020, 39(1): 38-41.)
- [11] 于涛郡.村镇建筑新型木-钢复合楼板抗火性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2021.  
(YU Taojun. Research on the fire resistance of new wood-steel composite floor slabs for village buildings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [12] NJANKOUO J, DOTREPPE J, FRANSSEN J. Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods [J]. Fire and materials, 2004, 28(1):15-24.
- [13] 周胤.双层屋面自然对流空气层隔热性能研究[D].杭州:浙江大学,2010.  
(ZHOU Yin. Study on the thermal insulation performance of natural convection air layer of double-layer roofs [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.)
- [14] 王秀丽,张盛东.木材炭化速率及其影响因素分析综述[J].结构工程师,2018,34(3):177-182.  
(WANG Xiuli, ZHANG Shengdong. A review of charring rate of wood and various influencing factors [J]. Structural engineers, 2018, 34(3): 177-182.)
- [15] 公安部天津消防研究所.建筑构件耐火试验方法第1部分:通用要求:GB/T 9978.1—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.  
(Tianjin Fire Research Institute in Ministry of Public Security. Fire resistance test methods for building components part 1: general requirements: GB/T 9978.1—2008 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2008.)  
(责任编辑:王国业 英文审校:范丽婷)