

文章编号:1674-2974(2016)01-0117-07

木结构榫卯节点耐火极限试验研究*

张晋^{1†}, 王斌¹, 宗钟凌², 侯士通¹, 柏益伟¹

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 淮海工学院 土木工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要:为研究我国古建木结构榫卯节点的抗火性能,进行了4个燕尾榫榫卯节点的耐火极限试验,以及1个未受火对比试件的承载力试验研究。承载力试验表明,未受火对比试件的梁跨中竖向位移基本随荷载线性变化,没有明显屈服点,延性较差。根据该对比试件的承载力试验值、以及各耐火极限试件持荷比参数取值,确定了耐火极限试件的预加恒定荷载值。耐火极限试验中,持荷比25%,37.5%,50%试件的耐火极限分别为59,44,21 min,持荷比50%并涂有防火涂料试件的耐火极限为58 min,表明持荷比的减小、以及采用防火涂料均可显著提高耐火极限。温度数据表明,持荷比对温度上升速率没有明显的影响,榫头与卯口之间2~4 mm的微小间隙对传热的影响几乎可以忽略。

关键词:榫卯节点;耐火极限;截面温度;持荷水平;破坏形态

中图分类号:TU366.2;TU352.5

文献标识码:A

Experiment Study on Fire Endurance of Mortise-tenon Joint in Timber Structures

ZHANG Jin^{1†}, WANG Bin¹, ZONG Zhong-ling², HOU Shi-tong¹, BAI Yi-wei¹

(1. Key Lab of Concrete and Prestressed Concrete Structures of China Ministry of Education, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 2. School of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang, Jiangsu 222005, China)

Abstract: To learn the fire resistance performance of wood mortise-tenon joints of commonly used wooden species in China, 4 framed mortise-tenon joints commonly used in ancient wooden structures were exposed to fire, and 1 contrast specimen of bearing capacity test was experimentally studied. It is found that, in the capacity test, the vertical displacement of the contrast specimen in the middle of the beam changes linearly with the load. Meanwhile, there is no obvious yield point and the specimen has poor ductility. The value of the constant load of 4 specimen applied in the fire endurance test was identified according to the bearing capacity of the reference specimen and the different load ratio. The fire endurance of specimen with a load ratio of 25%, 37.5% and 50% was 59, 44, 21 minutes respectively, and the fire endurance of the specimen with fire proof coating and a load ratio of 50% was 58 minutes, which indicates that the decrease of load ratio and the fire proof coating can both effectively increase the fire endurance of mortise-tenon connection. Temperature data have shown that the load ratio has little impact on the rate of temperature rise, and the small gaps of 2~4 mm between the tenon and the mortise has little impact on the

* 收稿日期:2014-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178115), National Natural Science Foundation of China(51178115); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012239)

作者简介:张晋(1974-),男,安徽巢湖人,东南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: zhangjin0622@139.com

heat transfer of wood.

Key words: mortise-tenon joint; fire endurance; section temperature; load level; failure mode

榫卯连接是中国古建筑木结构的特色之一,作为结构受力的关键部位,其耐火极限是古建筑木结构抗火性能的重要研究内容。

国外学者对木结构节点的耐火性能进行了相当数量的试验研究. Norén^[1]做了木材-木材-木材钢钉(WWW)连接节点的耐火极限试验,结果表明持荷水平和侧材的厚度对 WWW 的耐火极限影响很大,而钢钉的直径影响作用不大. Audebert 等^[2]对木材-钢板-木材(WSW)连接木结构节点进行了试验研究和数值分析,主要研究了顺纹受拉 WSW 连接节点在受火状态下力在螺栓或销栓中的温度分布情况以及两者的异同,并利用三维有限元模型进行了验证. De Moraes 等^[3]在小型加热炉中对木材-木材-木材螺栓连接形式的连接节点进行了恒温耐火极限试验,指出温度对木结构连接节点耐火极限性能影响很大. Lei^[4]进行了 WWW, WSW, SWS 连接耐火极限的试验研究和有限元模拟,分析了木材厚度、螺栓的直径、螺栓的端距对木结构节点的耐火极限的影响。

近年来,林业资源的恢复和进口木材数量的增多促成了我国木结构建筑市场的升温,木结构火灾性能的研究探索也日益受到重视. 李向民等^[5]进行了四面受火木柱耐火极限的试验研究,研究不同持荷水平、采用石灰膏抹面对木柱耐火极限的影响. 许清风等^[6]进行了石灰膏抹面木梁受火后受力性能静力试验研究,分析石灰膏抹面对木梁火灾性能的影响. 张晋等^[7]进行了三面受火木梁耐火极限的数值模拟,结果表明持荷水平、木材密度对三面受火木梁耐火极限影响较大. 汝华伟等^[8]进行了胶合木构件螺栓连接的火灾试验,表明螺栓的直径和间距对耐火极限影响不大,而增加侧材厚度、降低荷载水平、增加连接端距能提高其耐火极限. 倪照鹏等研究了木构架墙体、木构架楼板、天花板吊顶,以及胶合木梁和木柱的耐火性能、破坏模式,同时验证了构件的耐火极限^[9]。

对于榫卯节点,目前对其抗震机理及加固后的耗能特性已有大量的阐述和研究^[10-13],但对其抗火性能的研究则很少,目前为止,尚未见到国内外公开发表的相关文献。

本文通过 1 个榫卯节点未受火对比试件极限承

载力试验和 4 个梁柱式榫卯节点耐火极限试验,研究不同持荷水平、不同表面处理方式对榫卯节点耐火极限的影响,为木结构的防火设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设备、材料

试验在东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室的大型水平试验炉中进行,炉体尺寸为 4.0 m×2.5 m×1.5 m。

试件木材采用胶合木花旗松,常温(20 ℃)下的密度为 480 kg/m³,含水率为 10.4%,顺纹抗压强度为 29.38 MPa,顺纹抗拉强度为 78 MPa,径面抗剪强度为 5.76 MPa,弦面抗剪强度为 4.53 MPa,顺纹弹性模量为 10 178 MPa。

试验中采用镍铬-镍硅材料制成的 K 形铠装热电偶,测温范围为 -200 ℃~1 300 ℃. 防火涂料为球盾牌 B60-2 饰面型,对表面要求涂刷防火涂料的试件,每 3 h 涂刷 1 次,共涂刷 3 次,每平方米防火涂料用量约为 450~500 g,涂料厚度约为 1 mm。

1.2 试件设计

本次试验的 5 个榫卯节点试件编号见表 1. 各试件尺寸均相同,如图 1 所示。

表 1 榫卯节点试件一览表

Tab. 1 List of framed mortise-tenon connection

试件编号	类别	表面处理	持荷水平 / %	试件数量
k0	未受火对比试件	无	—	1
k25	耐火极限试件	无	25	1
k37.5	耐火极限试件	无	37.50	1
k50	耐火极限试件	无	50	1
kp50	耐火极限试件	涂防火涂料	50	1

注:试件编号中,字母 k 后面的数字代表其持荷水平百分比,p 代表涂刷防火涂料。

1.3 对比试件承载力试验加载方案及测点布置

1.3.1 加载方案

未受火对比试件承载力试验与受火试件耐火极限试验加载装置相同,如图 2 所示。

试验中,将榫卯节点柱底部插入固定于试验炉底部的柱础内,柱顶部利用液压千斤顶施加固定荷载 200 kN,用以模拟柱中轴力;梁的另一端简支在混凝土柱墩顶端,在梁的跨中处利用液压千斤顶施

加逐级增大的荷载,直至试件发生破坏,确定试件的极限承载力。

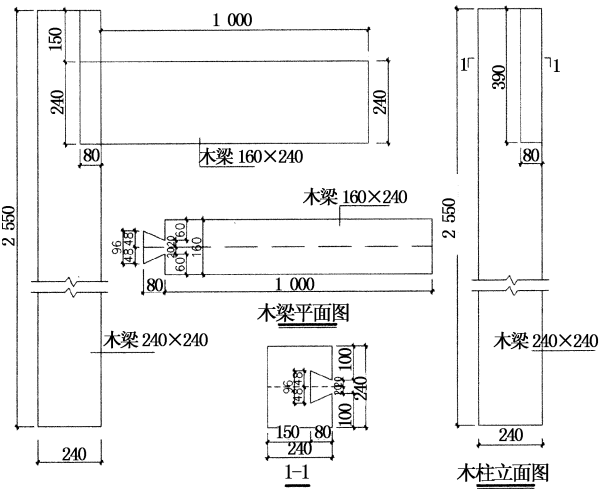


图 1 榫卯节点试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Size of framed mortise-tenon connection(Unit:mm)

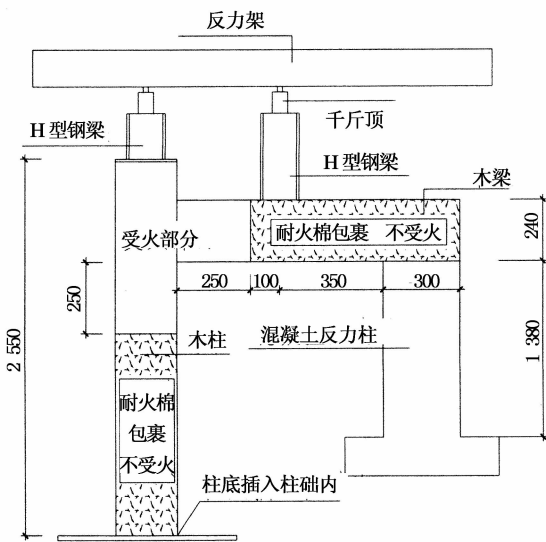


图 2 加载装置简图(单位:mm)

Fig. 2 Diagram of loading device(Unit:mm)

1.3.2 测点布置

在梁的跨中位置布置拉线式位移计,拉线式位移计缠绕在梁跨中的钢钉上。

在梁的不同位置黏贴应变片,位置如图 3 所示。

1.4 耐火极限试件加载方案及测点布置

1.4.1 加载方案

加载装置与未受火对比试件承载力试验相同。

受火前,与对比试件一样在柱顶部施加固定荷载 200 kN;而梁跨中预加的恒定荷载则由对比试件梁跨中的极限承载力和持荷水平来确定。各耐火极限试件的持荷水平见表 1。

本次试验采用 ISO834 标准升温曲线。在受火过程中,柱受火部分为梁底部向下 25 cm 范围内,梁受火部分为柱端右侧 25 cm 范围内。采用耐火棉包裹住试件不受火的部分,并封闭试件顶部以避免千斤顶受火。

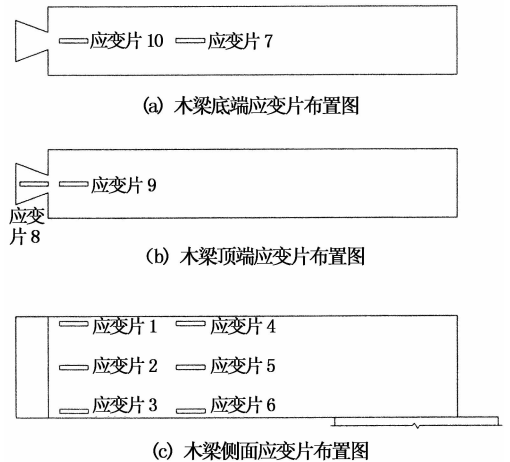


图 3 应变片位置图

Fig. 3 Strain gauge location

受火过程中,由专人通过油泵维持千斤顶油压使千斤顶对梁跨中施加恒定荷载;试件临近破坏时,变形速度明显增加;当变形速度增加到油压不能维持稳定时,试件达到耐火极限。

1.4.2 测点布置

在梁的跨中位置布置拉线式位移计,拉线式位移计缠绕在梁跨中的钢钉上。

在受火试件截面内部不同部位布置了热电偶,位置如图 4 所示,埋置深度如表 2 所示。

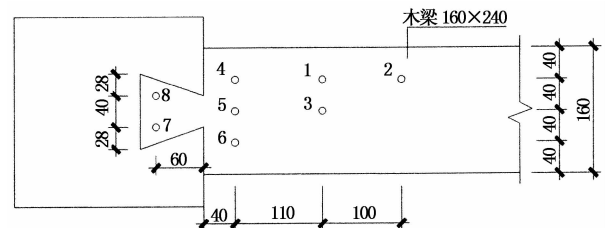


图 4 热电偶布置图(单位:mm)

Fig. 4 Location of thermocouple(Unit:mm)

表 2 各温度测点埋置深度

Tab. 2 Embedded depth of each temperature point

测点	1	2	3	4	5	6	7	8
埋置深度/mm	60	90	60	90	60	90	90	60

2 结果及分析

2.1 对比试件极限承载力试验

2.1.1 试验现象

试验过程中,随着荷载的增加,木梁梁端底部与柱边之间开始出现间隙,当梁跨中荷载施加到 40 kN 时,会发出轻微声响,表面并未有其它现象;当荷载施加到 80 kN 会有持续不断的连续声响;荷载施加到 180 kN 时候,发生一声巨响,荷载无法继续保持,试件破坏. 观察试件发现:木梁榫头部位在榫窄底部位置处约一半的高度处被剪断,然后在中间位置处沿着木梁顺纹方向劈开,产生一条巨大裂缝,试件破坏,破坏照片如图 5 所示.



图 5 梁柱式榫卯节点承载力试验破坏图

Fig. 5 The destruction diagram of framed mortise-tenon connection in bearing capacity test

2.1.2 主要试验结果

图 6~图 8 分别给出了梁柱式榫卯连接荷载-位移曲线和荷载-应变曲线. 由于在试验过程中应变片 3,4 被扯断,数据丢失,本节给出其它测点应变数据.

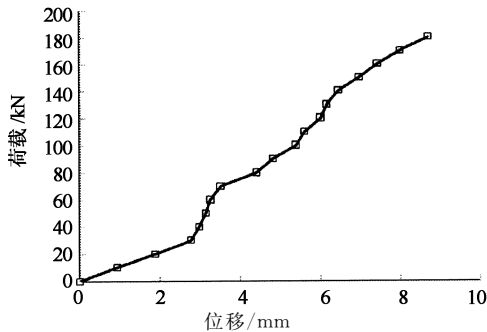


图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve

从图 6 可以看出,梁跨中位移随着荷载的增大而逐渐增大,并没有屈服点,其延性较差. 从图 7,图 8 可以看出,测点应变数据基本随着荷载的增大呈

线性增大.

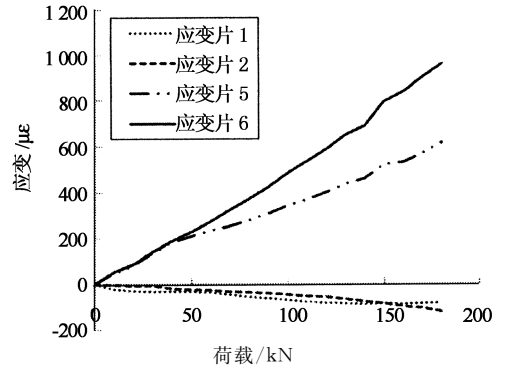


图 7 荷载-应变曲线(应变片 1~6)

Fig. 7 Load-displacement curve(strain gauge 1~6)

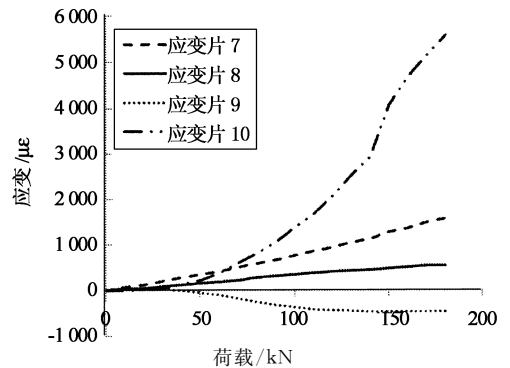


图 8 荷载-应变曲线(应变片 7~10)

Fig. 8 Load-displacement curve(strain gauge 7~10)

2.2 耐火极限试验

2.2.1 试验现象

极限承载力试验中对比试件梁跨中的极限承载力为 180 kN,故 k25,k37.5,k50,kp50 耐火极限试验过程梁跨中的预加荷载分别取为 45 kN,67.5 kN,90 kN,90 kN. 柱顶施加的预加荷载和对比试件极限承载力试验中柱顶施加的荷载一样,均为 200 kN.

在试验初期,榫卯节点试件受火后,温度升高,试件开始炭化,大量烟雾从炉中冒出. 随着时间的增加,试件开始燃烧,烟雾减少,梁跨中的位移逐渐增加. 在试验将近结束的时候,梁跨中位移急剧增大,施加的预加荷载无法继续保持,耐火极限试验结束. 图 9 为试件 k37.5 试验后的照片.

2.2.2 主要试验结果

将各耐火极限试验过程中各试件梁的跨中位移时间曲线汇总如图 10 所示.

从图 10 可以看出:k25,k37.5,k50 3 组试件跨中位移最大值分别为 26.62 mm,23.63 mm,17.21 mm. 受火时间相同时,梁柱式榫卯连接节点梁跨中的位移随着荷载的增大而增大,且荷载越大,跨中位移增加的幅度越大. 随着受火时间的增加,跨中位移

增大的速度越来越快,试验进行到一定时间后,梁跨中位移急剧增大,当位移速度超过某一速度时,梁跨中的预加荷载无法继续维持,即认定试件破坏,此时对应的时间就是耐火极限。各试件耐火极限汇总如表 3 所示。

比相同持荷水平无表面处理措施的试件提高约 176%,由此可见,对试件表面进行处理可较大程度提高耐火极限。

2.2.3 截面温度变化

榫卯节点耐火极限试验结束时,梁跨中的位移突然增大,埋置在梁截面内部的热电偶线被拔出,未能采集到降温阶段的温度数据,故本节只给出了测点在升温阶段的温度数据。图 11 为试件 k37.5 的炉温及部分测点温度随时间的变化曲线,可以看出试验中炉温升温曲线与 ISO834 标准升温曲线吻合较好,其余试件情况相同。同时可以看出,由于炉温远高于测点温度,将炉温、各测点温度绘制在同一图表中导致难以清晰表达各测点的温度,故后续相关图表中,略去炉温变化曲线。



图 9 受火后试件 k37.5

Fig. 9 Specimen of k37.5 after fire

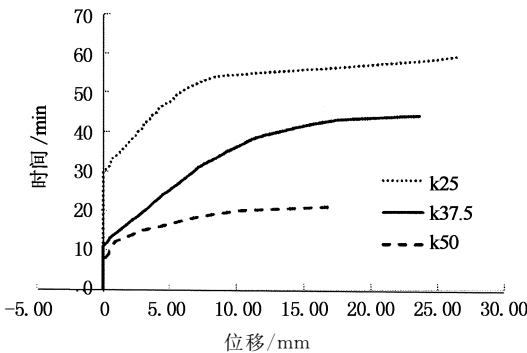


图 10 位移-时间曲线

Fig. 10 Displacement-time curve

表 3 梁柱式榫卯连接耐火极限汇总
Tab. 3 Fire endurance List of framed mortise-tenon connection

试件编号	梁跨中荷载 /kN	持荷水平 /%	表面处理	耐火极限 /min
k25	45	25	无	59
k37.5	67.5	37.5	无	44
k50	90	50	无	21
kp50	90	50%	防火涂料	58

由表 3 可以看出,在试件材料、截面相同的情况下,持荷水平、有无表面处理措施成为影响耐火极限的重要因素,k37.5 的耐火极限比 k25 降低了 25.4%,k50 的耐火极限比 k37.5 降低了 52.3%,这表明随着持荷水平的增加,试件耐火极限减小,在持荷水平较低时,持荷水平对试件耐火极限影响较小;本试验中,持荷水平为 50% 的四面防火涂料试件要

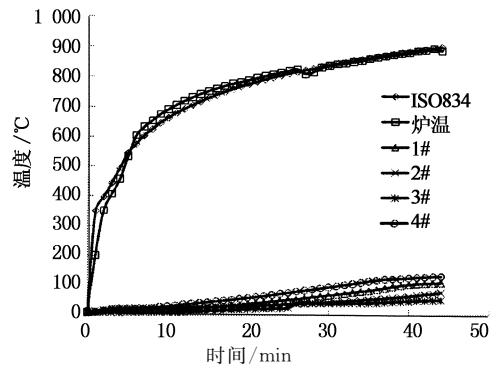


图 11 k37.5 炉温及部分测点温度变化曲线

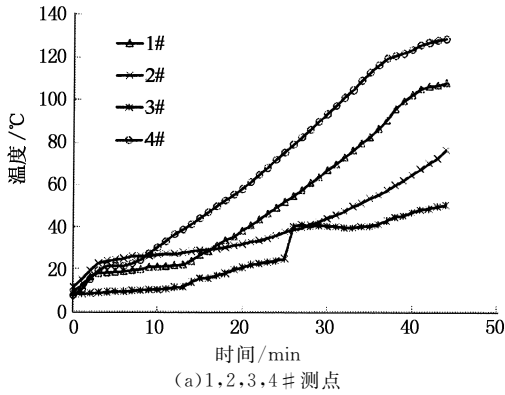
Fig. 11 Furnace and measure points temperature curve of k37.5

试件 k37.5 测点保存较为完好,且其余各组试件的测点与 k37.5 具有相似的升温趋势,故本节仅取试件 k37.5 进行分析,温度变化曲线见图 12。

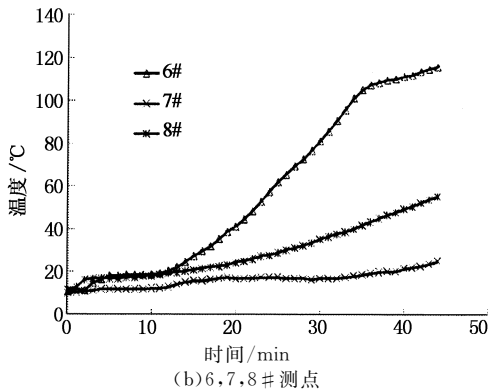
比较 7#、8# 和 1#、2# 两组温度测点:测点 7# 和 8# 测量的都是榫头处的温度,但 7# 测点的埋置深度比 8# 深 30 mm。可以发现 8# 测点的温度始终大于 7# 测点,且两者之间的温差随着时间的增加逐渐增大,在达到极限破坏时温差为 57.90 °C。同样 1# 和 2# 测点的距受火侧面距离相等,但 2# 测点的埋置深度比 1# 深 30 mm,由于 1# 测点温度一开始仅比 2# 测点小 2.3 °C,可认为两者初始温度相等,试件破坏时 1# 测点温度比 2# 测点大 31.5 °C。表明其他条件相同时,测点埋置深度越浅,其温度越高。

比较温度测点 1#、3#:两者测量的是梁同一截面处的温度,两者埋置深度相同,但 1# 测点距受火侧面更近。分析试验结果可以发现 1# 测点的温

度始终大于 3# 测点,且两者之间的温差从最初的 1.8℃ 扩大为试件极限破坏时的 30.4℃,表明其他条件相同时,距受火侧面越近,测点温度越高。



(a) 1, 2, 3, 4# 测点



(b) 6, 7, 8# 测点

图 12 k37.5 测点温度变化曲线

Fig. 12 Measuring points curve of k37.5

3#, 8# 测点的埋置深度、距受火表面的距离均近似相同,但 8# 测点与受火面之间存在榫头与卯口之间的 2~4 mm 的微小间隙而 3# 测点没有这条间隙. 试验结果发现 3#, 8# 测点的温度几乎相同,两者之间的最大温差仅为 5.1℃,表明榫头与卯口之间 2~4 mm 的微小间隙对木材的传热几乎没有影响。

将无防火涂料试件(k50)和四面防火涂料试件(kp50)进行测点 2#, 7# 的温度数据对比,结果见图 13. 可以看出,涂刷防火涂料后,测点温度明显降低,从而降低了木材的炭化速度,并最终极大地提高了试件的耐火极限。

将试件 k25, k37.5 和 k50 测点 2#, 7# 的温度数据进行对比,结果见图 14. 为更好地进行对比,图中的温度为相对于各自初始温度的温差. 对于 2# 测点,持荷水平为 50% 的试件温度上升速率要远大于持荷水平为 25% 的试件,对于 7# 测点,持荷水平为 50% 的试件和持荷水平为 25% 的试件温度上升速率基本相同,因此可以看出,持荷比对测点温度上

升速率的影响并没有明显的规律性。

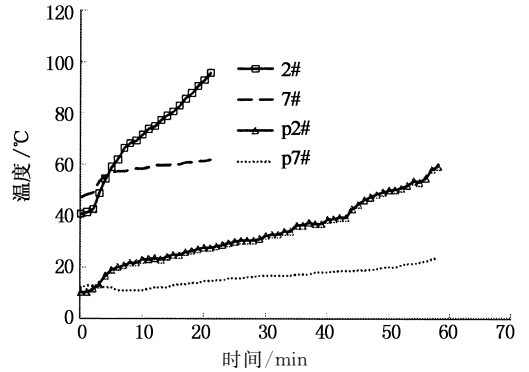
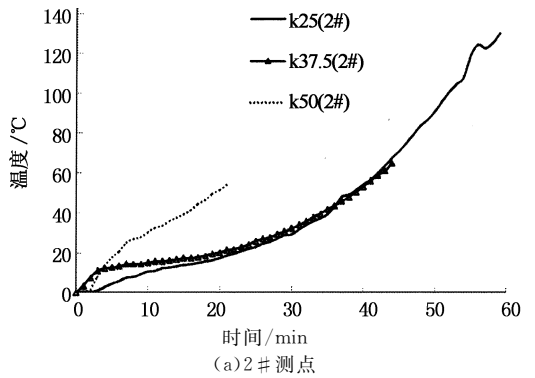
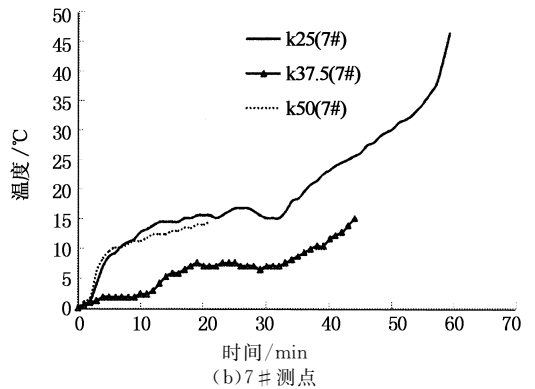


图 13 有、无防火涂料试件测点温度对比
Fig. 13 Specimen temperature contrast of fire proof coating



(a) 2# 测点



(b) 7# 测点

图 14 不同持荷比试件相同测点温度对比
Fig. 14 Same measuring point temperature contrast with different load ratio

3 结 语

1) 对比试件的梁跨中竖向位移基本随荷载线性变化,并没有明显屈服点,延性较差。

2) 耐火极限试验中, k37.5 的耐火极限比 k25 降低了 25.4%, k50 的耐火极限比 k37.5 降低了 52.3%, 这表明随着持荷水平的增加,试件耐火极限减小,同时在持荷水平较低时,持荷水平对试件耐火极限影响较小。

3)对试件表面涂刷防火涂料可在较大程度上提高榫卯节点的耐火极限。

4)持荷比对测点温度上升速率的影响并没有明显的规律性。

5)榫头与卯口之间 2~4 mm 的微小间隙对传热的影响几乎可以忽略。

参考文献

- [1] NORÉN J. Load-bearing capacity of nailed joints exposed to fire [J]. *Fire and Materials*, 1996, 20(3): 133-143.
- [2] AUDEBERT M, DJIMA D, TAAZOUNT M, *et al.* Behavior of dowelled and bolted steel-to-timber connections exposed to fire [J]. *Engineering Structures*, 2012, 39: 116-125.
- [3] DE MORAES P D, RODRIGUES J P C, CORREIA N D F. Behavior of bolted timber joints subjected to high temperatures [J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, 70(1/3): 225-232.
- [4] LEI Peng. performance of heavy timber connections in fire [D]. Canada: Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, 2010: 59-201
- [5] 李向民, 李帅希, 许清风, 等. 四面受火木柱耐火极限的试验研究[J]. *建筑结构*, 2010, 40(3): 115-117.
LI Xiang-ming, LI Shuai-xi, XU Qing-feng, *et al.* Experimental research on fire endurance of timber columns exposed to four-side fire [J]. *Building Structure*, 2010, 40(3): 115-117. (In Chinese)
- [6] 许清风, 李向民, 穆保岗, 等. 石灰膏抹面木梁受火后受力性能静力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(7): 73-79.
XU Qing-feng, LI Xiang-ming, MU Bao-gang, *et al.* Static experimental research on mechanical behavior of timber beams with lime putty finishing after fire [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(7): 73-79. (In Chinese)
- [7] ZHANG Jin, XU Qing-feng, XU Yi-xiang, *et al.* A numerical study on fire endurance of wood beams exposed to three-side fire [J]. *Journal of Zhejiang University Science*, 2012, 13(7): 491-505.
- [8] 汝华伟, 刘伟庆, 陆伟东, 等. 胶合木结构螺栓连接耐火极限的试验[J]. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2011, 33(5): 70-74.
RU Hua-wei, LIU Wei-qing, LU Wei-dong. Fire resistance experiment on bolted connections in glued laminated timber [J]. *Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition*, 2011, 33(5): 70-74. (In Chinese)
- [9] 倪照鹏, 彭磊, 邱培芳, 等. 木结构建筑构件耐火性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(12): 108-114.
NI Zhao-peng, PENG Lei, QIU Pei-fang, *et al.* Experimental study on fire resistance performance of timber assemblies [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(12): 108-114. (In Chinese)
- [10] 姚侃, 赵鸿铁, 葛鸿鹏. 古建木结构榫卯连接特性的试验研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(10): 168-173.
YAO Kan, ZHAO Hong-tie, GE Hong-peng. Experimental studies on the characteristic of mortise-tenon joint in historic timber buildings [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(10): 168-173. (In Chinese)
- [11] 谢启芳, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建筑木结构榫卯节点加固的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(1): 28-34.
XIE Qi-fang, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, *et al.* An experimental study on the strengthening of mortise-tenon joints in ancient Chinese wooden buildings [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(1): 28-34. (In Chinese)
- [12] 陆伟东, 邓大利. 木结构榫卯节点抗震性能及其加固试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(3): 109-116.
LU Wei-dong, DENG Da-li. Experimental research on seismic performance of wooden mortise-tenon joints before and after reinforcement [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 32(3): 109-116. (In Chinese)
- [13] 徐明刚, 邱洪兴. 中国古代木结构建筑榫卯节点抗震试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(2): 345-349.
XU Ming-gang, QIU Hong-xing. Experimental study on seismic behavior of mortise-tenon joints in Chinese ancient timber buildings [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(2): 345-349. (In Chinese)