

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240923003

## 钢-木组合柱抗火性能分析研究\*

高路巧<sup>1,3</sup>, 李国强<sup>1,2</sup>, 郑修知<sup>1</sup>, 刘冰<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 3. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 钢-木组合柱是一种绿色低碳、承载高效的新型装配式构件,其抗火性能研究显著缺乏。采用数值分析方法对钢-木组合柱的抗火性能开展研究。首先建立了考虑热力耦合效应的钢-木组合柱抗火性能数值分析模型,利用火灾试验数据验证了数值模型的准确性。随后基于验证的数值分析模型对钢-木组合柱的抗火性能进行模拟,揭示了其轴向位移、受火破坏模式和耐火极限,并与纯钢(木)柱进行对比。最后,通过参数分析探究了木材密度、含水率、包覆木材厚度和含钢率对钢-木组合柱耐火极限的影响规律。结果表明:荷载比较小的组合柱轴向变形以热膨胀变形为主,而荷载比较大的组合柱轴向变形以受压变形为主。火灾下轴压钢-木组合柱的破坏模式主要有两种,长细比较小的短柱主要发生强度破坏,长细比较大的长柱和细长柱,均发生整体屈曲破坏。荷载比和长细比对钢-木组合柱的耐火极限影响显著,木材密度、含水率、包覆木材厚度和含钢率对钢-木组合柱耐火极限亦有较大影响,但对短柱和长柱的影响趋势不同。此外,钢-木组合柱的耐火极限大于纯钢(木)柱,且荷载比越小,钢-木组合柱耐火极限的提高幅度越大。

**关键词:** 钢-木组合柱; 抗火性能; 数值分析; 耐火极限; 参数分析

**中图分类号:** TU398.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0313-12

## Analysis of Fire Resistance Performance of Steel-timber Composite Columns

GAO Luqiao<sup>1,3</sup>, LI Guoqiang<sup>1,2</sup>, ZHENG Xiuzhi<sup>1</sup>, LIU Bing<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Tongji Architectural Design (Group) Co.Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Steel-timber composite columns are a new type of prefabricated component that is green, low-carbon, and highly efficient in load-bearing. However, research on their fire resistance performance remains notably limited. Numerical analysis methods were employed to investigate the fire resistance performance of steel-timber composite columns. Firstly, a numerical analysis model for the fire resistance performance of steel-timber composite columns considering thermal coupling effects was established. The accuracy of the numerical model was then verified using fire test data. Subsequently, based on the validated numerical analysis model, the fire resistance performance of steel-timber composite columns was simulated. Their axial displacement, fire-induced failure mode, and fire resistance were revealed and compared with those of pure steel (timber) columns. Finally, parameter

\* 收稿日期:2024-09-23;修回日期:2024-11-20

基金项目:上海市浦江人才计划(23PJ1414100)资助

作者简介:高路巧(1989—),男,工程师,硕士。主要从事钢木混合结构抗火性能研究。E-mail:gaoluqiao09@163.com

通信作者:郑修知(1995—),男,博士后,博士。主要从事钢木混合结构抗火性能研究。E-mail:xiuzhi@tongji.edu.cn

analysis was conducted to investigate the effects of timber density, moisture content, encasing timber thickness, and steel ratio on the fire resistance of steel-timber composite columns. The results indicated that for composite columns with low load ratios, axial deformation was dominated by thermal expansion, whereas for those with high load ratios, axial deformation was dominated by compressive deformation. There were mainly two failure modes of axially loaded steel-timber composite columns under fire conditions. Short columns with small slenderness ratios primarily underwent strength failure, while long and slender columns with large slenderness ratios both experienced overall buckling failure. The load ratio and slenderness ratio significantly influenced the fire resistance of steel-timber composite columns. Timber density, moisture content, encasing timber thickness, and steel ratio also had a significant impact on the fire resistance of steel-timber composite columns, but their influence trends differed between short and long columns. In addition, the fire resistance of steel-timber composite columns exceeded that of pure steel (timber) columns, and the smaller the load ratio, the greater the increase in the fire resistance of the steel-timber composite columns.

**Keywords:** steel-timber composite column; fire resistance performance; numerical analysis; fire resistance; parameter analysis

## 0 引言

钢材和木材作为建筑材料,材料轻质高强、低碳环保,建造过程工业化程度高,契合当前低碳建筑和装配式建筑的发展需求。两种材料组合形成的钢-木组合构件,可扬长避短,发挥材料性能优势,实现低碳与高性能建造<sup>[1-2]</sup>。

国内外学者针对钢-木组合构件常温下的受力性能开展了大量研究。P.Haase等<sup>[3]</sup>通过四点弯曲试验研究了胶接钢-木组合梁的抗弯性能,研究结果表明,钢-木组合梁抗弯刚度和承载力相较同截面胶合木梁均大幅提高,为了充分利用材料潜力,钢材和木材组合时应合理匹配材料性能。S.A.Waseem等<sup>[4]</sup>通过试验对采用自攻螺钉、螺栓和环氧胶三种方式连接的钢-木组合梁受力性能进行了研究,结果表明钢-木组合梁可延迟甚至防止受弯木梁的典型脆性破坏,三种连接方式中环氧胶连接最可靠,螺栓连接效率最低。Q.B.Hu等<sup>[5]</sup>开展了H型钢-胶合木组合柱的轴心受压试验,试验结果表明钢-木组合柱的力学性能受柱长度的影响较为显著,当组合柱长度较短时,发生强度破坏,当组合柱长度较长时,发生屈服破坏。刘朋等<sup>[6]</sup>通过试验研究了轴心受压十字形钢-木组合柱的工作机理和破坏模式,研究结果表明组合柱中外围方木能够对钢骨提供屈曲约束,对整体受力贡献较小,随着组合柱长细比增加,组合柱承载力能力降低,破坏模式由材料强度破坏

转变为弯曲失稳破坏。李征等<sup>[7]</sup>通过往复加载试验对比了普通螺栓连接和高强螺栓连接下钢木组合墙体的破坏模式和荷载-位移关系,结果表明高强螺栓连接的钢木组合墙受力性能更优。K.Orlowski等<sup>[8]</sup>提出了一种后张法预制钢-木组合加劲墙,并研究了其在轴向垂直荷载作用下的屈曲性能,结果表明该组合墙在峰值荷载作用下均发生方形钢空心型材和木材分离的脆性破坏。

关于钢-木组合构件抗火性能的研究鲜有报道,H.L.T.Di等<sup>[9]</sup>通过试验研究了钢-木组合柱在标准火灾下的升温特性及木材的炭化速率,研究表明采用适用于传统木结构的平均炭化面积模型来评估钢-木组合结构火灾下的结构退化,与试验结果有较大差异。高路巧等<sup>[10]</sup>通过数值分析方法对比了火灾下无防火保护钢-木组合柱中钢骨与纯钢柱升温特性差异,对比结果显示,纯钢柱升温速率先快后慢,而钢-木组合柱中钢骨升温速率先慢后快,钢骨外缘包覆木材隔热作用明显。然而,对于考虑荷载作用的钢-木组合构件抗火性能研究尚无报道,亟需开展相关研究。

本文采用数值分析方法,对轴心受压胶接H型钢-木组合柱的抗火性能开展研究。首先,建立了考虑热力耦合效应的钢-木组合柱抗火性能数值分析模型,利用火灾试验数据验证了数值模型的准确性。随后基于验证的数值模型分析了组合柱的轴向位移、受火破坏模式和耐火极限,并与纯钢(木)柱进行对比。最后,通过参数分析探究了木材密

度、含水率、包覆木材厚度和含钢率等因素对钢-木组合柱耐火极限的影响规律。

# 1 钢-木组合柱热力耦合数值模型

## 1.1 数值模型建立

钢-木组合柱的截面如图1所示,木材采用原木。钢筋采用H型钢,截面尺寸为H150 mm×100 mm×10 mm×10 mm,翼缘间填充木材,翼缘外侧包覆50 mm厚木材。钢木间假设采用耐火结构胶粘结。钢筋常温力学性能参数取自文献[11],见表1。木材常温力学性能参数见表2<sup>[12]</sup>,木材采用樟子松,常温下密度为469 kg/m<sup>3</sup>,含水率为14%。

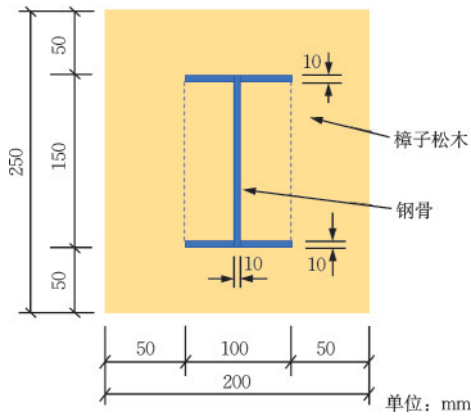


图1 钢-木组合柱截面

Fig.1 Cross-section of steel-timber composite column

表1 钢材常温下力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel at room temperature

屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
360	2.024×10 <sup>5</sup>	0.3

组合柱数值分析模型如图2所示。截面网格尺寸取为10~15 mm,柱长度方向网格尺寸根据柱高不同分别取为50 mm和100 mm。有限元分析时采用顺序热力耦合的方式,先进行传热分析得到温度场,再将温度场导入受力分析模型作为温度条件进行荷载作用下的结构场分析。传热分析采用Heat transfer模块,单元类型为八节点线性六面体热分析单元(DC3D8),四面受火,木材受火面对流换热系数为25 W/(m<sup>2</sup>·°C)<sup>[13]</sup>,热辐射系数取0.8<sup>[14]</sup>,环境温度按ISO834标准升温曲线<sup>[15]</sup>定义。受力分析时采用Explicit显示分析模块进行分析,单元类型为八节

表2 木材常温下力学性能

Table 2 Mechanical properties of timber at room temperature

弹性模量/ MPa	$E_L$ 9 312 $E_R$ 931.2 $E_T$ 465.6	剪切模量/ MPa	$G_{LR}$ 698.4 $G_{LT}$ 558.7 $G_{RT}$ 167.6
泊松比	$\nu_{LR}$ 0.347 $\nu_{LT}$ 0.315 $\nu_{RT}$ 0.407	剪切强度/ MPa	$S_{LR}$ 7.2 $S_{LT}$ 7.2 $S_{RT}$ 2.7
抗拉强度/ MPa	$f_{Lt}$ 73.6 $f_{Rt}$ 7.4 $f_{Tt}$ 7.4	抗压强度/ MPa	$f_{Lc}$ 35.6 $f_{Rc}$ 8.9 $f_{Tc}$ 8.9

注:下角L、R、T分别表示木材顺纹、横纹径向、横纹切向

点六面体缩减积分单元(C3D8R)。柱顶铰接,约束平面内两个方向的水平位移,轴向受压,柱底固接。为避免组合柱受力分析时约束端木材因单元删除失去约束,导致边界条件改变,将组合柱两端100 mm长度范围设为非受火区。本文分析不考虑接触面滑移的影响,假设钢木间采用Tie绑定接触。

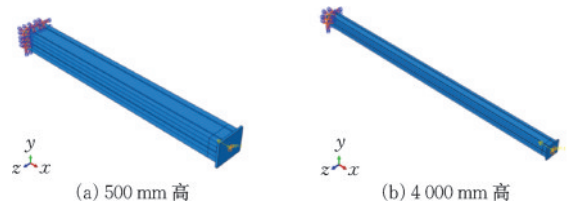


图2 钢-木组合柱抗火性能数值分析模型

Fig.2 Numerical model for fire resistance analysis of steel-timber composite column

钢-木组合柱抗火性能数值分析的试件分组见表3,试件包含短柱、长柱和细长柱。组合柱高度取500、2 500、4 000、6 000 mm四个尺寸,耐火极限分析时荷载比取0.2、0.4、0.6、0.8四个等级。

表3中,钢-木组合柱长细比按式(1)计算:

$$\lambda = \mu L / i \quad (1)$$

式中, $\mu$ 为计算长度系数,本文组合柱一端铰接一端固接,取为0.7; $L$ 为组合柱高度, $i$ 为组合柱横截面回转半径,按式(2)计算:

$$i = \sqrt{\frac{E_t I_t + E_s I_s}{E_t A_t + E_s A_s}} \quad (2)$$

式中, $E_t$ 、 $E_s$ 分别为木材顺纹弹性模量和钢材弹性模量; $I_t$ 、 $I_s$ 分别为木材截面惯性矩和钢材截面惯性矩; $A_t$ 、 $A_s$ 分别为木材截面面积和钢材截面面积。

表3 数值分析的试件分组

Table 3 Specimen groups for numerical analysis

试件编号	柱高度/mm	长细比	是否受火	荷载比
STC500			否	/
STC500(20)			是	0.2
STC500(40)	500	12	是	0.4
STC500(60)			是	0.6
STC500(80)			是	0.8
STC2500			否	/
STC2500(20)			是	0.2
STC2500(40)	2 500	60	是	0.4
STC2500(60)			是	0.6
STC2500(80)			是	0.8
STC6000			否	/
STC6000(20)			是	0.2
STC6000(40)	4 000	145	是	0.4
STC6000(60)			是	0.6
STC6000(80)			是	0.8

### 1.2 材料本构模型及热工参数

木材为各向异性材料,顺纹方向强度最高,横纹方向强度最低。木材受拉时呈现脆性材料特性,达到抗拉强度后发生脆性破坏,受压时呈现理想弹塑性材料特性,达到抗压强度后发生延性破坏(图3(a))。本文采用Hashin屈服准则<sup>[16]</sup>判断木材是否达到屈服状态。通过编写用户材料子程序VUMAT嵌入ABAQUS软件模拟木材本构关系及高温力学性能。

钢材为各向同性理想弹塑性材料,常温下本构模型如图3(b)所示。钢材屈服时遵循 von Mises 屈服准则<sup>[17]</sup>。

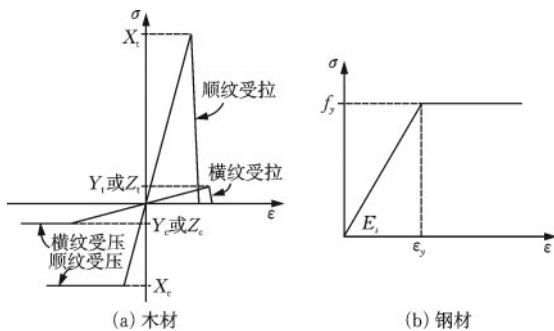


图3 材料本构模型

Fig.3 Constitutive model of materials

木材在高温下因水分蒸发和材料炭化,其热工性能和力学性能随温度升高而发生变化,一般将300 °C作为木材炭化的临界温度<sup>[14]</sup>。钢材在高温下

因内部结构等变化,其热工和力学性能也会随温度升高而发生变化。本研究中木材的热工性能(比热容、导热系数、密度)和高温力学性能折减系数根据欧洲规范 EC5(EN1995-1-2)<sup>[14]</sup>确定。常温下木材热膨胀系数较小,高温下木材炭化前因水分蒸发发生收缩,抵消了木材热膨胀变形,且木材炭化后无力学性能,故本文忽略木材热膨胀性能。

钢材热工性能(比热容、导热系数、密度、热膨胀系数)根据欧洲规范 EC4(EN1994-1-2)<sup>[18]</sup>确定,高温下应力—应变曲线根据 EC3(EN1993-1-2)<sup>[19]</sup>确定,高温下屈服强度和弹性模量的折减系数依据《建筑钢结构防火技术规范》<sup>[20]</sup>确定。

### 1.3 数值模型验证

针对所建立的轴心受压钢-木组合柱的抗火性能数值分析模型,基于已有轴压木柱和钢柱的火灾试验数据,通过木材材性设置验证、钢材材性设置验证和钢-木组合柱传热分析验证,验证数值模型的准确性。

#### 1.3.1 木材材性设置验证

基于编制的木材 VUMAT 子程序,建立四面受火轴心受压胶合木柱的有限元分析模型,将分析结果与陈玲珠等<sup>[12]</sup>的试验结果进行对比。常温下木柱荷载—位移曲线对比结果如图4所示。有限元模型得到的木柱荷载—位移曲线与试验结果基本一致,其中木柱轴心受压极限荷载试验值和模拟值分别为1 060 kN和1 068 kN,二者基本相同。

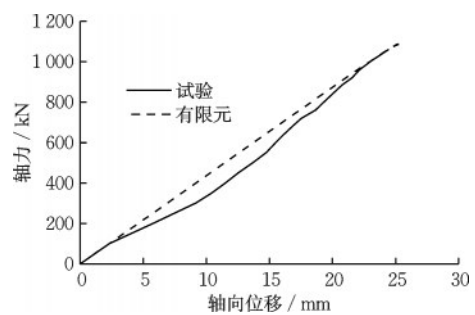


图4 常温下木柱荷载—位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves of timber columns at room temperature

对比不同测点处升温曲线可看出,有限元模拟结果与试验结果比较吻合,在温度100 °C左右时因木材中水分蒸发带走热量,构件升温曲线会有一段平台段,试验结果和有限元模拟结果均有体现,如图5所示。

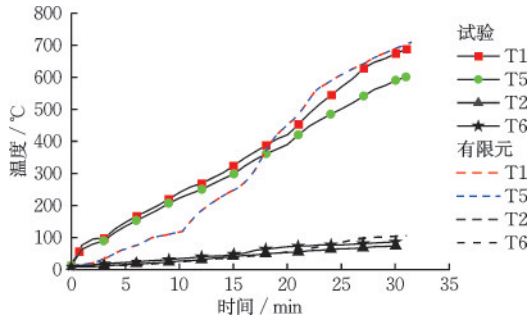


图5 不同测点升温曲线对比

Fig.5 Comparison of temperature curves at different measurement points

木柱在不同荷载比下耐火极限的模拟结果见表4,木柱受火的破坏形态如图6所示。木柱耐火极限的模拟值与试验结果相比误差小于10%,二者结果吻合较好,木柱受火的破坏形态也基本一致。

表4 不同荷载比下木柱耐火极限

Table 4 Fire resistance of timber columns under different load ratios

构件编号	轴压力/kN	持荷比/%	耐火极限试验值/min	耐火极限模拟值/min	误差/%
EC200-30	318	30	34	31.2	-8.2
EC200-50	530	50	16	16.9	5.6

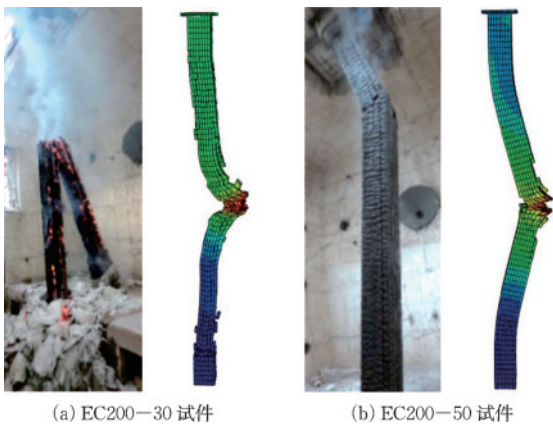


图6 木柱受火破坏时形态

Fig.6 Failure modes of timber columns in fire

上述有限元分析结果与试验结果对比表明,基于木材VUMAT子程序在ABAQUS中对木柱进行受火状态下的热力耦合分析,分析结果可靠,材性设置合理,可用于本文钢-木组合柱中的木材材性模拟。

### 1.3.2 钢材材性设置验证

建立火灾下轴心受压约束钢柱的有限元分析

模型,将分析结果与李国强等<sup>[11]</sup>的试验结果进行对比。钢柱升温曲线、荷载一位移曲线、破坏形态及对比结果分别如图7~9和表5所示。从对比结果可知,有限元模型的模拟结果与试验结果均吻合较好,表明本文基于钢材高温材性的钢柱热力耦合分析方法合理,分析结果可靠,可用于本文钢-木组合柱中的钢材材性模拟。

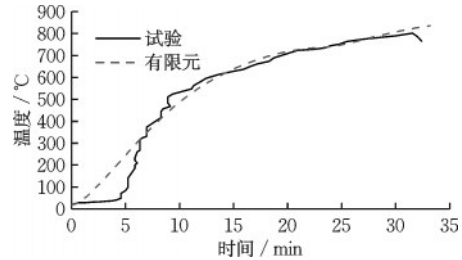


图7 钢柱升温曲线对比

Fig.7 Comparison of temperature curves of steel columns

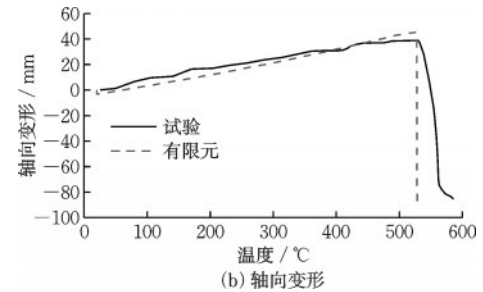
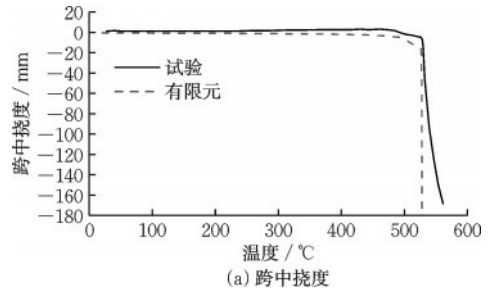


图8 钢柱荷载一位移曲线试对比

Fig.8 Comparison of load-displacement curves of steel columns

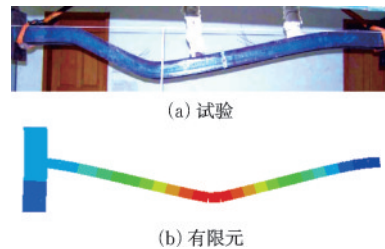


图9 钢柱破坏时形态对比

Fig.9 Comparison of failure modes of steel columns

### 1.3.3 钢-木组合柱传热分析验证

建立四面受火钢-木组合柱的传热分析数值模

表5 钢柱屈服时临界温度和耐火极限

Table 5 Critical temperature and fire resistance at yield of steel column

	临界温度/°C	耐火极限/min
试验值	528	9.8
模拟值	527	11.0

型,参考H.L.T.Di等<sup>[9]</sup>研究中的试验构件尺寸,钢骨截面为H150 mm×100 mm×2 mm×2 mm,翼缘间填充木材,翼缘外侧包覆50 mm厚木材,木材采用花旗松木,钢、木间采用TIE绑定接触,环境升温曲线为ISO 834标准升温曲线,将分析得到的钢骨升温曲线与H.L.T.Di等<sup>[9]</sup>的试验结果进行对比。

对比结果如图10所示。总体上看,有限元分析结果与试验结果基本一致,特别是在0~100 °C升温段。当温度升到100 °C附近时,有限元结果和试验结果均表明,钢骨升温曲线均出现一段温度平台稳定段,这是因为此时木材中水分蒸发消耗热量而使钢骨温度不再升高。木材中水分蒸发完后,钢骨翼缘和腹板温度均快速上升。对比结果表明,有限元模型可准确模拟钢-木组合柱的受火升温特性,钢-木组合柱传热分析的相关参数设置合理,可用于本文钢-木组合柱的抗火性能分析。

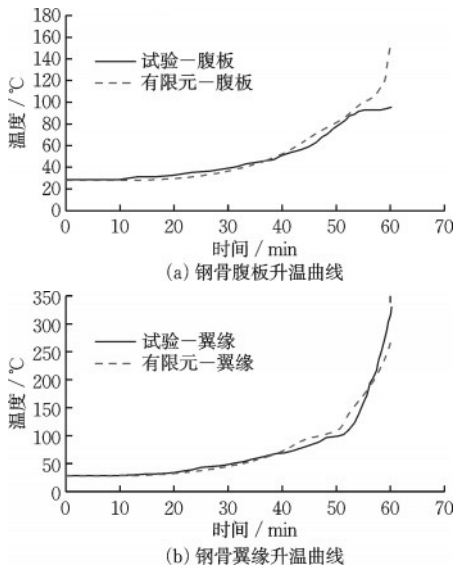


图10 钢-木组合柱钢骨升温曲线对比

Fig.10 Comparison of temperature curves of steel-timber composite columns

## 2 钢-木组合柱抗火性能分析

### 2.1 常温下极限承载力

在对钢-木组合柱进行抗火性能分析前,需先进

行常温下组合柱轴压性能分析,得到组合柱常温下轴压极限承载力。常温下不同高度钢-木组合柱的荷载—轴向位移曲线如图11所示,破坏形态如图12所示。随着柱高增加,钢-木组合柱的轴压极限承载力随之减小,不同高度组合柱常温下轴压极限承载力见表6。500 mm高组合柱发生强度破坏,2 500 mm、4 000 mm、6 000 mm高组合柱则均发生整体屈曲破坏。

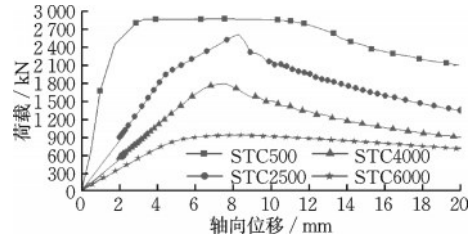


图11 常温下钢-木组合柱荷载—轴向位移曲线

Fig.11 Load-axial displacement curves of steel-timber composite columns at room temperature

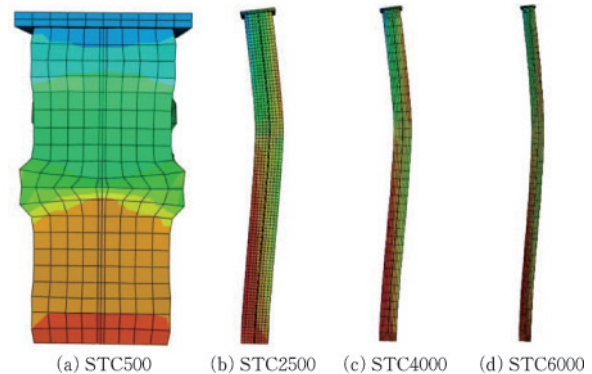


图12 常温下钢-木组合柱破坏形态

Fig.12 Failure modes of steel-timber composite columns at room temperature

表6 常温下轴压钢-木组合柱极限承载力

Table 6 Ultimate bearing capacity of axially compressed steel-timber composite columns at room temperature

试件	STC500	STC2500	STC4000	STC6000
极限承载力/kN	2 875	2 621	1 796	934

根据表6中钢-木组合柱的常温极限承载力,可确定组合柱抗火性能分析时各试件的轴心压力,见表7。

### 2.2 火灾下轴向位移和破坏模式

轴压钢-木组合柱受火时轴向变形-受火时间变化曲线如图13所示。组合柱受火时轴向变形由两部分组成:一为受火后温度升高引起的构件受热膨胀变形;二为因受火后材料力学性能退化引起的附

表7 钢-木组合柱抗火性能分析的轴压力

Table 7 Axial loads for fire resistance performance analysis of steel-timber composite columns

试件	荷载比	轴压力/kN
STC500(20)	0.2	575.0
STC500(40)	0.4	1 150.0
STC500(60)	0.6	1 725.0
STC500(80)	0.8	2 300.0
STC2500(20)	0.2	524.2
STC2500(40)	0.4	1 048.4
STC2500(60)	0.6	1 572.6
STC2500(80)	0.8	2 096.8
STC4000(20)	0.2	359.2
STC4000(40)	0.4	718.4
STC4000(60)	0.6	1 077.6
STC4000(80)	0.8	1 436.8
STC6000(20)	0.2	186.8
STC6000(40)	0.4	373.6
STC6000(60)	0.6	560.4
STC6000(80)	0.8	747.2

加轴向压缩变形。由图13可知,当钢-木组合柱所受轴压力较小时,组合柱在破坏前受火时间较长,组合柱轴向变形以受热膨胀变形为主,组合柱轴向位移在受火前期不断减小,甚至引起了柱的伸长,如STC500(20)、STC500(40)、STC2500(20)、STC4000(20)、STC6000(20)等试件。但当钢-木组合柱所受轴心压力较大时,组合柱在破坏前受火时间较短,组合柱轴向变形以轴向压缩变形为主,组合柱轴向位移在受火前期缓慢变大,如STC500(60)、STC500(80)、STC2500(40)等试件。在接近耐火极限时,钢-木组合柱轴向位移变化主要有两种模式,一种为达到耐火极限时发生急剧陡降,如STC500(20)、STC2500(20)、STC4000(20)等试件,另一种为在接近耐火极限前,轴向位移先是缓坡增大,之后再发生陡降,如STC500(40)、STC2500(60)、STC6000(20)等试件,此种情况利于构件破坏前预警。

钢-木组合柱各试件受火破坏后形态如图14所示。由图可知,对于500 mm高钢-木组合柱,除STC500(60)试件外,其余试件均发生强度破坏,而STC500(60)则发生绕钢骨弱轴方向的整体屈曲破坏,并伴随钢骨翼缘的局部屈曲。对于2 500 mm、4 000 mm和6 000 mm高钢-木组合柱,均发生绕钢骨弱轴方向的整体屈曲破坏,且破坏区域均发生在

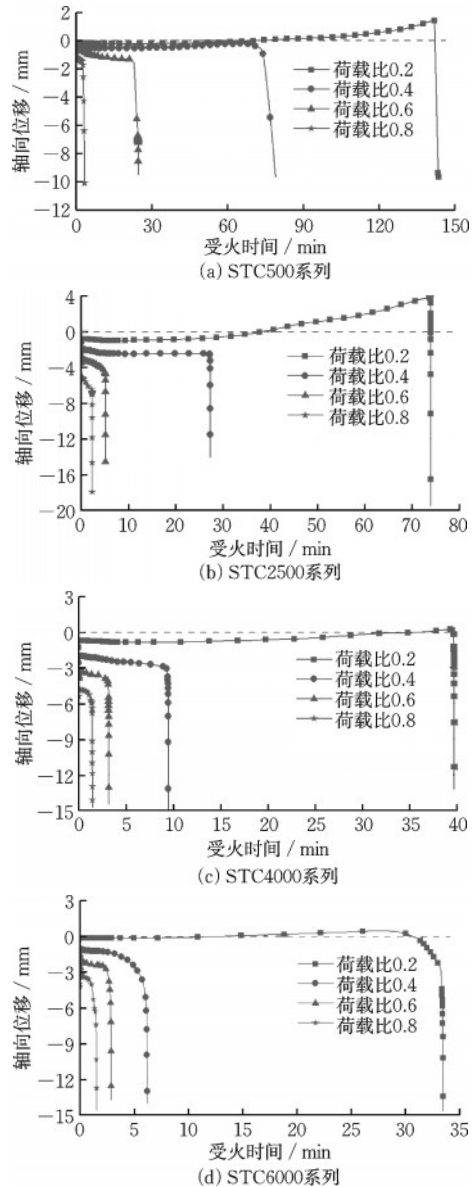


图13 轴压钢-木组合柱轴向位移随受火时间变化曲线  
Fig.13 Variation curves of axial displacement of axially loaded steel-timber composite columns with fire exposure time

距柱顶1/3高度处。总体上,轴心受压组合柱受火时破坏模式与常温下破坏模式一致。

### 2.3 耐火极限

根据国家标准《建筑构件耐火试验方法第1部分:通用要求》(GB/T9978.1—2008)<sup>[21]</sup>中规定,当轴向承载构件极限轴向压缩变形达到 $l/100$ 或极限轴向压缩变形速率达到每分钟 $3l/1000$ 时( $l$ 为构件初始高度),即可认为构件丧失承载能力。本文以极限轴向压缩变形量为指标判断钢-木组合柱是否达到耐火极限。

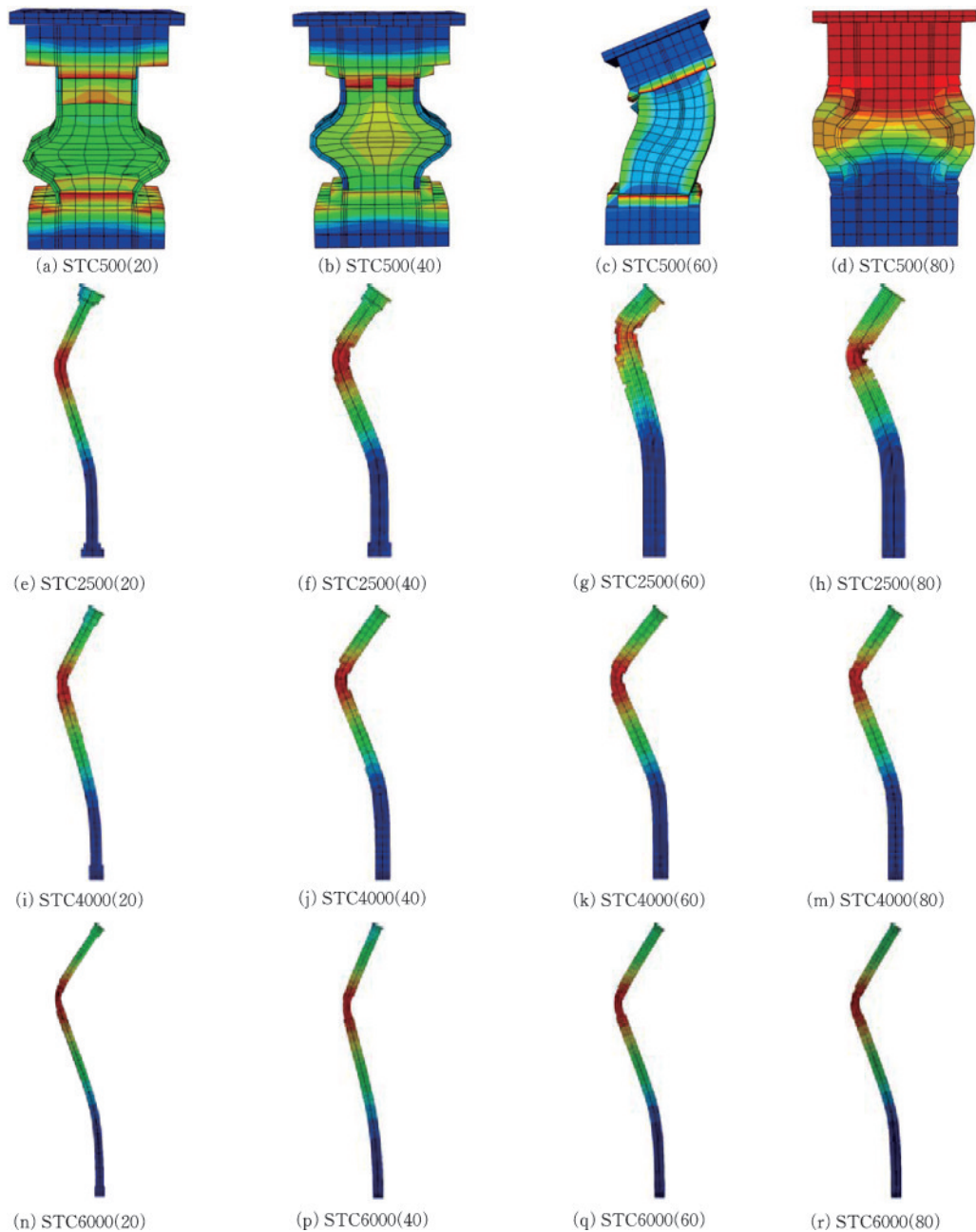


图 14 钢-木组合柱受火破坏形态

Fig.14 Failure modes of steel-timber composite columns in fire

分析得到的钢-木组合柱耐火极限如图 15 所示。由图可知,对于 500 mm 高钢-木组合柱,耐火极限最长为 142.1 min,超过 2 h,而当柱高达到 6 000 mm 时,钢-木组合柱耐火极限最大仅为 0.5 h。对于不同高度钢-木组合柱,荷载比对耐火极限影响较大,随着荷载比增大,组合柱耐火极限迅速减小,二者呈非线性关系,组合柱越高,长细比越大,组合柱耐火极限受荷载比变化的影响更明显。当荷载比达到 0.8 时,不同高度钢-木组合柱耐火极限均小于 3 min,即无耐火承载能力。对于 4 000 mm 和 6 000 mm 高钢-木组合

柱,当荷载比大于 0.4 时,其耐火极限均小于 10 min。钢-木组合柱耐火极限随柱长细比变化曲线如图 16 所示。荷载比相同时,随着组合柱长细比变大,其耐火极限迅速下降,二者亦呈非线性关系。总体而言,随着荷载比或长细比增大,钢-木组合柱耐火极限迅速减小。对于长柱和细长柱,当荷载比大于 0.4 时,组合柱耐火极限均不足 0.5 h。

#### 2.4 与纯钢(木)柱耐火极限对比

分别建立与钢-木组合柱截面相同的纯木柱

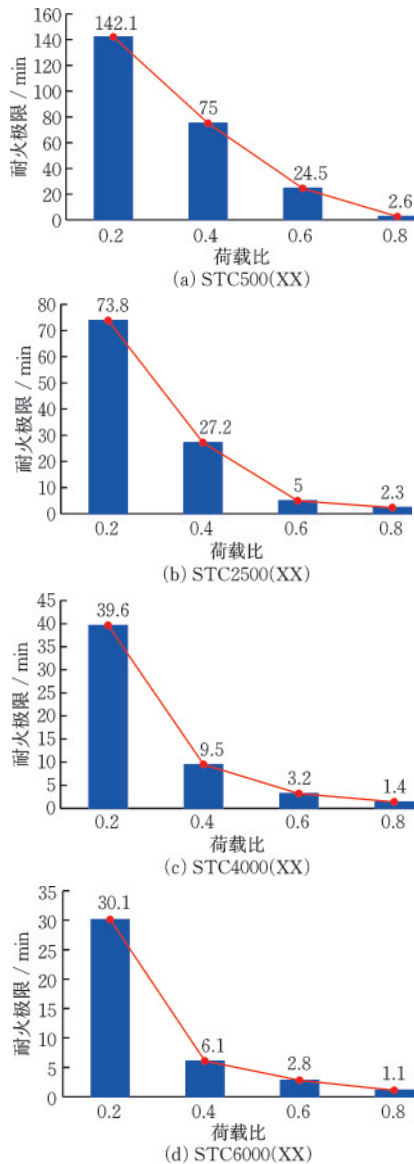


图 15 钢-木组合柱耐火极限

Fig.15 Fire resistance of steel-timber composite columns

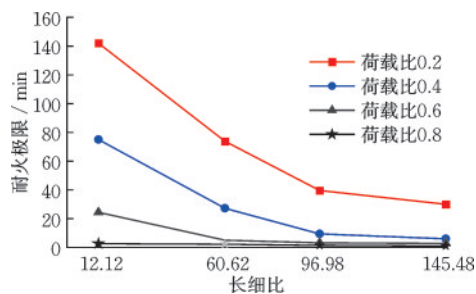


图 16 钢-木组合柱耐火极限随长细比变化曲线

Fig.16 Variation curves of fire resistance of steel-timber composite columns with slenderness ratio

( $b \times h = 200 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ )和与钢-木组合柱钢骨截面相同的纯钢柱有限元模型,开展轴压作用下耐火极限分析,纯木柱和纯钢柱均无防火保护,边界

条件同钢-木组合柱。

钢-木组合柱、纯钢柱和纯木柱耐火极限的对比结果如图 17 所示,图中 TC 表示纯木柱,SC 表示纯钢柱。从图中可知,钢-木组合柱的耐火极限均大于同高度、同荷载比条件下纯钢柱和纯木柱的耐火极限。当荷载比较小时,与同高度、同荷载比的纯钢柱和纯木柱相比,钢-木组合柱的耐火极限大幅提高,部分试件组合柱的耐火极限甚至大于纯木柱和纯钢柱的耐火极限之和,即能达到“ $1+1>2$ ”的耐火效果。当荷载比较大时,因构件耐火极限绝对值较小,与同高度、同荷载比的纯钢柱和纯木柱相比,钢-木组合柱耐火极限的提高幅度较小。

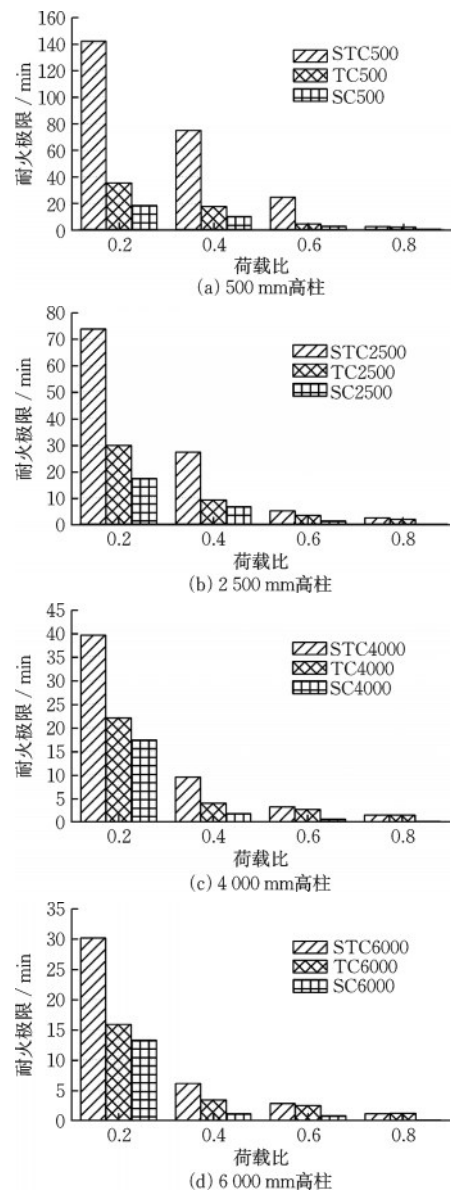


图 17 钢-木组合柱耐火极限与纯钢(木)柱对比

Fig.17 Comparison of fire resistance between steel-timber composite columns and pure steel (timber) columns

### 3 参数分析

基于上述有限元模型,开展参数分析,进一步研究木材密度、含水率、包覆木材厚度和含钢率对钢-木组合柱耐火极限的影响。

#### 3.1 木材密度的影响

考虑 300、400、500、600 kg/m<sup>3</sup> 四种不同的木材密度,其余参数不变,研究木材密度对钢-木组合柱耐火极限的影响,分析结果如图 18 所示。由图可知,对于 500 mm 高和 6 000 mm 高组合柱,随着木材密度增大,组合柱耐火极限均随之增大,二者呈线性正相关关系,但当荷载比为 0.8 时,因组合柱耐火极限绝对值较小,随着木材密度增大,组合柱耐火极限变化较小。木材密度主要影响钢-木组合柱传热过程,木材密度越大,木材对钢骨的隔热作用越大,木材和钢骨的升温速率均减慢,从而提高钢-木组合柱的耐火极限。总体看,增大木材密度是提高钢-木组合柱耐火极限的有效途径。

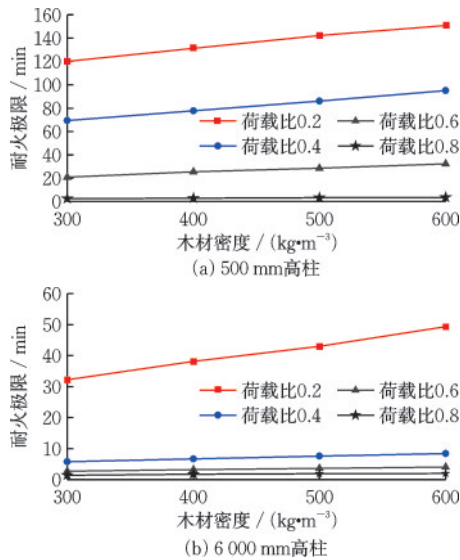


图 18 钢-木组合柱耐火极限随木材密度变化曲线

Fig.18 Variation curves of fire resistance of steel-timber composite columns with timber density

#### 3.2 木材含水率的影响

选取 15%、20%、25%、30% 四种不同的木材含水率,其余参数不变,研究木材含水率对钢-木组合柱耐火极限的影响,分析结果如图 19 所示。结果表明,随着木材含水率增大,500 mm 高和 6 000 mm 高

钢-木组合柱耐火极限均随之减小,二者呈线性负相关关系。但木材含水率对组合柱耐火极限影响较小,主要通过改变木材密度间接影响组合柱耐火极限。常温下密度相同时,木材含水率越大,其干密度越小,当木材温度上升到 100 °C 后,木材中水分全部蒸发,此时即为干密度。由 3.1 节分析可知,密度越小,木材和钢骨升温速率越快。故含水率越大,木材和钢骨在 100 °C 后的升温速率越快,从而降低钢-木组合柱的耐火极限。

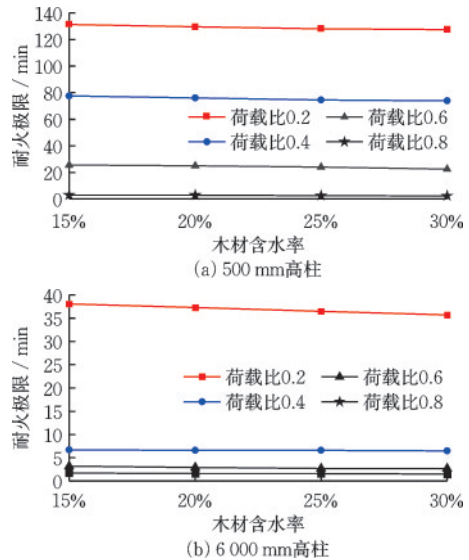


图 19 钢-木组合柱耐火极限随木材含水率变化曲线

Fig.19 Variation curves of fire resistance of steel-timber composite columns with timber moisture content

#### 3.3 包覆木材厚度的影响

考虑钢骨外缘包覆木厚度分别为 50、100、150 和 200 mm,其余参数不变,分析包覆木材厚度对钢-木组合柱耐火极限的影响,分析结果如图 20 所示。由图可知,随着包覆木材厚度增大,500 mm 高和 6 000 mm 高钢-木组合柱耐火极限均随之增大。当包覆木材厚度为 200 mm 时,对于 500 mm 高组合柱耐火极限最大可超过 3 h,而对于 6 000 mm 高组合柱耐火极限最大亦可达到 2 h。但当荷载比为 0.8 时,即使包覆木材厚度达到 200 mm,500 mm 高组合柱和 6 000 mm 高组合柱耐火极限均小于 10 min。500 mm 高组合柱耐火极限随包覆木材厚度变化曲线呈线性正相关,而对于 6 000 mm 高组合柱耐火极限随包覆木材厚度变化曲线呈非线性关系。包覆木材厚度的变化,不仅影响组合柱传热过程,还会影响组合柱受力性能,包覆木材厚度增大,不仅使

组合柱升温速率变慢,还能提高其截面承载力和稳定系数,故包覆木材厚度变化对以屈曲破坏为特征的长柱和细长柱影响更大。

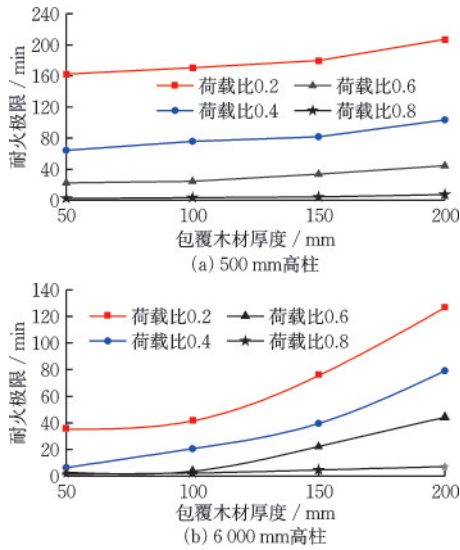


图20 钢-木组合柱耐火极限随包覆木材厚度变化曲线  
Fig.20 Variation curves of fire resistance of steel-timber composite columns with encasing timber thickness

### 3.4 含钢率的影响

钢-木组合柱含钢率计算公式为:

$$\rho_v = \frac{V_s}{V} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $\rho_v$  为钢-木组合柱含钢率;  $V_s$  为钢-木组合柱中钢筋体积;  $V$  为钢-木组合柱总体积。

选取钢骨腹板和翼缘厚度分别为 6、10、15、20 mm, 对应含钢率分别为 4.0%、6.6%、9.6%、12.4%, 其余参数不变, 研究含钢率对钢-木组合柱耐火极限的影响。如图 21 所示, 随着含钢率增大, 500 mm 高和 6 000 mm 高钢-木组合柱耐火极限均随之增大。当含钢率为 12.4% 时, 对于 500 mm 高组合柱耐火极限最大可超过 3 h, 而对于 6 000 mm 高组合柱耐火极限最大可达到 1.5 h。对于 500 mm 高组合柱, 当荷载比为 0.8 时, 不同含钢率条件下组合柱耐火极限均小于 10 min, 而对于 6 000 mm 高组合柱, 当荷载比为 0.6 和 0.8 时, 不同含钢率条件下组合柱耐火极限均小于 10 min。500 mm 高组合柱耐火极限随含钢率变化曲线呈线性正相关, 而 6 000 mm 高组合柱耐火极限随含钢率变化曲线呈非线性关系。含钢率的变化, 对组合柱传热过程影响较小, 主要影响组合柱受力性能, 可提高其截面承载力和稳定系数。

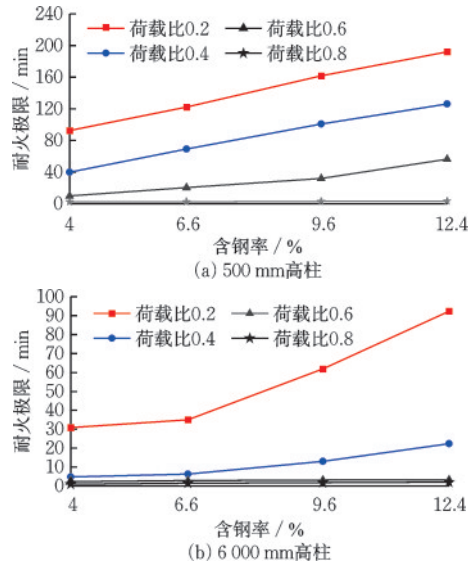


图21 钢-木组合柱耐火极限随含钢率变化曲线  
Fig.21 Variation curves of fire resistance of steel-timber composite columns with steel ratio

## 4 结论

开展了钢-木组合柱抗火性能的数值模拟研究, 建立了钢-木组合柱抗火性能数值分析模型, 揭示了组合柱轴向位移发展规律和破坏模式, 量化了木材密度、含水率、包覆木材厚度、含钢率等关键参数对钢-木组合柱耐火极限的影响。本文的主要结论如下:

(1) 钢-木组合柱受火时轴向位移随受火时间呈现两种变化特征。当荷载比较小、受火时间较长时, 组合柱轴向变形以受热膨胀变形为主, 受火初始阶段组合柱轴向变形会不断减小; 当荷载比较大、受火时间较短时, 组合柱轴向变形以轴压压缩变形为主, 受火后组合柱轴向位移不断变大。多数组合柱在达到耐火极限后轴向位移发生陡降, 部分组合柱达到耐火极限后轴向位移先缓坡增大, 然后再发生陡降。

(2) 火灾下钢-木组合柱主要有两种破坏模式。对于长细比较小的钢-木组合短柱, 主要发生强度破坏, 对于长细比较大的钢-木组合长柱或细长柱, 均发生绕钢骨弱轴方向的整体屈曲破坏, 破坏区域发生在距柱顶 1/3 高度处。

(3) 荷载比和长细比对钢-木组合柱耐火极限影响较大, 随着荷载比或长细比增大, 钢-木组合柱耐火极限迅速减小。当荷载比达到 0.8 时, 不同高度

的钢-木组合柱均无抗火承载能力。

(4)钢-木组合柱的耐火极限均大于纯钢(木)柱。当荷载比较小时,钢-木组合柱耐火极限相比纯钢(木)柱大幅提高;当荷载比较大时,钢-木组合柱耐火极限相比纯钢(木)柱提高较小。

(5)随着木材密度增大、含水率减小,不同高度钢-木组合柱的耐火极限均有所提高,且呈线性变化。增大包覆木材厚度和含钢率可明显提高组合柱耐火极限,随着包覆木材厚度和含钢率增大,对于长细比较小的组合短柱耐火极限线性提高,对于长细比较大的组合细长柱耐火极限则非线性提高。

(6)钢-木组合柱设计时,建议包覆木材厚度不小于50 mm,含钢率不小于4%,荷载比宜小于0.6,不应大于0.8。

## 参考文献:

- [1] 张月强,丁洁民,张峥.大跨度钢木组合结构的应用特点与实践[J].建筑技艺,2018,278(11):14-20.  
Zhang Y Q, Ding J M, Zhang Z. Application features and practice of large span steel-wood composite structures [J]. Architecture Technique, 2018, 278 (11) : 14-20. (in Chinese)
- [2] 贾水钟.太原植物园大跨胶合木网壳结构设计关键技术研究[J].建筑结构,2022,52(4):1-5,62.  
Jia S Z. Research on key technologies of large-span glued laminated timber reticulated shell structure design in Taiyuan Botanical Garden [J]. Building Structure, 2022, 52(4) : 1-5, 62. (in Chinese)
- [3] Haase P, Aurand S, Boretzki J, et al. Bending behavior of hybrid timber-steel beams [J]. Materials, 2024, 17 (5) : 1164.
- [4] Waseem S A, Manzoor Z, Bhat J A. An experimental investigation into the behavior of steel-timber composite beams [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2022, 27(1) : 1-12.
- [5] Hu Q B, Gao Y, Meng X M, et al. Axial compression of steel-timber composite column consisting of H-shaped steel and glulam [J]. Engineering Structures, 2020, 216: 110561.
- [6] 刘朋,钱哲,王浩然,等.钢-木组合柱轴心受压性能试验研究.工程力学,2021,38(增1):159-166.  
Liu P, Qian Z, Wang H R, et al. Experimental study on behavior of steel timber columns under axial load [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38 (Sup1) : 159-166. (in Chinese)

- [7] 李征,王希珺,何敏娟,等.钢木混合墙体抗侧性能试验及钢木混合结构抗震设计方法[J].建筑结构学报,2018,39(增2):191-197.  
Li Z, Wang X J, He M J, et al. Experiment investigation of timber-steel hybrid walls and seismic design method for timber-steel hybrid structural system [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (Sup2) : 191-197. (in Chinese)
- [8] Orłowski K, Baduge S K, Mendis P. Prefabricated composite steel-timber stiffened wall systems with post-tensioning: structural analysis and experimental investigation under vertical axial load [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(2) : 04020325(1-16).
- [9] Di Ha Le Truong, Tsai Mengting. Experimental assessment of the fire resistance mechanisms of timber-steel composites [J]. Materials, 2019, 12(23) : 4003.
- [10] 高路巧,李国强.钢-木组合结构构件受火升温特性分析[J].建筑结构,2023,53(增1):1964-1969.  
Gao L Q, Li G Q. Analysis of temperature elevation characteristics of timber-steel composite members under fire [J]. Building Structure, 2023, 53(Sup1) : 1964-1969. (in Chinese)
- [11] 李国强,王培军,王永昌.约束钢柱抗火性能试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(5):184-190.  
Li G Q, Wang P J, Wang Y C. Experimental study on restrained steel column subjected to fire [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5) : 184-190. (in Chinese)
- [12] 陈玲珠,许清风,胡小锋.四面受火胶合木中长柱耐火极限试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(1):95-103.  
Chen L Z, Xu Q F, Hu X F. Experiment research on fire resistance of moderately long glulam columns exposed to four-side fire [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1) : 95-103. (in Chinese)
- [13] 李国强,韩林海,楼国彪,等.钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:51.  
Li G Q, Han L H, Lou G B, et al. Steel and steel-concrete composite structures fire resistance design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 51. (in Chinese)
- [14] European committee for standardization. eurocode 5: design of timber structures: part 1-2: general: structural fire design: EN 1995-1-2 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

(本文编辑:周小潭)

(下转第336页)