

四面受火状态下木-H型钢-混凝土方截面组合柱温度场数值模拟

刘永军,张浚哲

(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-H型钢-混凝土方截面组合柱,研究火灾下组合柱的温度场分布规律。方法 应用 ABAQUS 有限元分析软件建立组合柱的热传递模型,采取 ISO-834 标准升温曲线进行升温,研究混凝土厚度、再生粗骨料取代率和螺栓对组合柱内木材温度场和炭化的影响。结果 木材的温度场呈双向对称分布;混凝土厚度每增加 10 mm,螺栓孔处木材的炭化深度平均减少 25.43%,初始炭化时间平均延后 22.82%;再生粗骨料取代率每增加 20%,木材炭化深度平均减小 6.34%,初始炭化时间平均延后 5.60%;螺栓的存在会加剧木材的炭化,螺栓孔处的木材的炭化深度多出 57.13%。结论 在火灾作用下,组合柱内部的木材炭化后仍有较大的有效剩余截面;H 型钢腹板有木材包裹,强度劣化速度缓慢;木-H型钢-混凝土组合柱的抗火性能良好。

关键词 组合柱;标准火灾;温度场;有限元分析

中图分类号 TU366

文献标志码 A

引用格式:刘永军,张浚哲.四面受火状态下木-H型钢-混凝土方截面组合柱温度场数值模拟[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):921-929.(LIU Yongjun, ZHANG Junzhe. Numerical simulation of temperature field in wood-H shaped steel-concrete composite column with square cross section after exposure to four-side fire[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(5):921-929.)

Numerical Simulation of Temperature Field in Wood-H Shaped Steel-Concrete Composite Column with Square Cross Section after Exposure to Four-Side Fire

LIU Yongjun, ZHANG Junzhe

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

Abstract: A new type of wood-H shaped steel-concrete composite column with square cross section was proposed to study the temperature field distribution law of composite column under fire. ABAQUS finite element software was used to establish the heat transfer model of the

收稿日期:2023-05-16

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100403)

作者简介:刘永军(1966—),男,教授,博士,主要从事建筑结构抗火性能等方面研究。

composite column, and ISO-834 standard fire curve was adopted to warm up the column, and the influence of concrete thickness, recycled coarse aggregate substitution rate and bolts on the temperature field and charring of wood in the composite column was investigated. The temperature field of the wood was distributed bi-directionally and symmetrically; for every 10mm increase in concrete thickness, the charring depth of the wood at the bolt holes decreased by 25.43% on average, and the initial charring time was delayed by 22.82% on average; for every 20% increase in recycled coarse aggregate substitution rate, the charring depth of the wood decreased by an average of 6.34%, and the initial charring time was delayed by an average of 5.60%; the presence of bolts exacerbated the charring of the wood, and the charring depth of the wood at the bolt holes was 57.13% more. Under fire, there is still a large effective residual cross-section after the charring of the wood inside the composite column. The H shaped steel is wrapped with wood, and the strength deterioration is slow. The fire resistance performance of wood-H shaped steel-concrete composite columns is good.

Key words: composite column; standard fire; temperature field; finite element analysis

随着“双碳”政策的提出,大力发展低碳环保的绿色建筑成为我国建筑业的主要方向。木材作为一种天然的建筑材料,具有可再生、低碳环保和轻质高强的优点。在钢管混凝土中填充木材来取代部分混凝土,可以减少混凝土的用量,减少碳排放,符合绿色建筑理念。同时,H型钢腹板被木板包裹,其升温速度减缓,减小了钢材在高温下力学性能的劣化程度,国内外学者对木结构及其组合结构进行了详细研究。A. Nabati 等^[1]研究了木芯钢管混凝土组合柱的轴压性能,结果表明,木芯在减轻复合材料重量方面的作用显著,提高了组合柱的延性性能。Xu Feiyang 等^[2]研究了角钢-胶合木组合柱的轴压力学性能,结果表明,提高木材等级、柱长或减小配钢率均能较好地发挥木材对钢材的侧向约束作用。Yang Ruyuan 等^[3]对钢-木组合梁进行了有限元分析,结果表明,胶合木与H型钢连接处的力学性能能够影响整个STC梁的受力性能。Duan Shaowei 等^[4]研究了H型钢-木新型组合梁的抗弯性能,结果表明,钢梁腹板两侧粘贴木板可提高承载力,且构件形式更为合理有效。Hu Qibin 等^[5]研究H型钢-胶合木新型组合柱的轴压性能,提出了考虑柱屈服时参数选择的承载力计算公式。李幅昌等^[6]对方钢管-

木-混凝土中长柱的轴压性能进行了有限元分析,结果表明,木材可显著提高中长柱的延性,减轻结构自重。刘永军等^[7]研究了木-钢梁板组合结构的耐火性能,结果表明,该组合结构拥有更好的耐火性能和支撑能力。李蒙杰^[8]研究了型钢再生混凝土组合框架结构的抗火性能,结果表明,火灾作用下,再生混凝土对型钢具有良好的保护作用,整体组合框架具有良好的抗火性能。陈阳婷^[9]对L形多腔方钢管混凝土柱的抗火性能进行了研究,结果表明,荷载比的减小、钢材强度的减小、混凝土强度的增大和柱肢宽度的增大有利于构件耐火极限的提高。张晋等^[10]对12根松木梁在ISO834标准火灾条件下进行了四面受火试验和受火后抗弯承载能力测试,结果表明,木梁的破坏位移、刚度和弯曲弹性模量随着受火时间的延长均降低;在木材表面涂防火涂料,可以延缓初始炭化时间,提高受火后的剩余承载力。胡小峰等^[11]对7根胶合木梁进行了三面受火耐火极限试验,结果表明,胶合木梁剩余承载力随受火时间增加而明显降低;表面有阻燃涂料处理的试件剩余承载力略大于无阻燃涂料处理的试件。

综上所述,笔者提出一种钢管-混凝土-木-H型钢新型组合柱构件,利用ABAQUS有限元分析软件对该组合柱的温度场进行分

析;研究表明:在火灾作用下,组合柱内部的木材炭化后仍有较大的有效剩余截面;H型钢腹板有木材包裹,强度劣化速度缓慢;木-H型钢-混凝土组合柱的抗火性能良好。

1 材料热工参数

1.1 钢材热工参数

钢材的导热系数受钢材种类等因素影响较小,因此忽略导热系数受钢材种类的影响^[12]。笔者采用T. T. Lie^[13]提出的钢材导热系数计算公式。比热容和密度采用T. T. Lie^[13]提出的钢材比热容的计算公式。

1.2 再生混凝土热工参数

再生混凝土的导热系数和比热容参考文献[14]提出的公式,再生混凝土密度取2 210 kg/m³。

1.3 木材热工参数

笔者选取的木材为东北落叶松,其热工参数具体如下:导热系数采用规范^[15]中的建议值;比热容采用规范^[15]中的建议值。

笔者模拟选用木材为东北落叶松,气干密

度参考《木结构设计手册》^[16],取值641 kg/m³。木材密度折减系数参考规范^[15]中的建议值。

2 有限元模拟

2.1 模型参数

笔者设计了13根组合柱模型,紧固H型钢和木材的螺栓杆直径8 mm,螺栓位置及间距具体见图1。模型具体参数见表1。

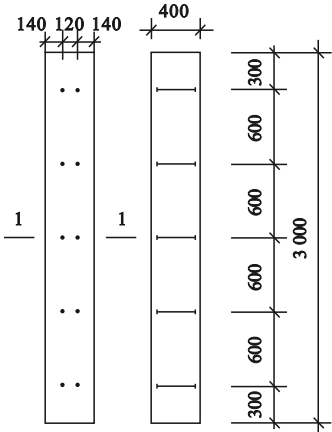


图1 螺栓位置及间距示意图

Fig. 1 The schematic diagram of bolts positions and spacings

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

构件编号	混凝土厚度/mm	$a \times b \times c \times t$ / mm	木材边长/ mm	薄壁钢管厚/ mm	再生粗骨料 取代率/%
TSC45B	45	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSC55B	55	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSC65B	65	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSC75B	75	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSRC30-45B	45	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	30
TSRC50-45B	45	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	50
TSRC70-45B	45	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	70
TSRC100-45B	45	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	100
TSC45	45	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSC55	55	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSC65	65	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSC75	75	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0
TSB	0	$300 \times 300 \times 10 \times 15$	270×145	5	0

注:T表示木材;S表示钢;C表示混凝土;RC表示再生混凝土;B表示螺栓;C45表示厚度为45 mm的混凝土;RC30表示再生粗骨料取代率为30%的再生混凝土; a 为腹板高度; b 为翼缘宽度; c 为腹板厚度; t 为翼缘厚度。

2.2 建立模型

为了使热量充分传递,将木材、H型钢、混凝土和钢管接触面设置为绑定约束。各材料网格尺寸均为沿截面方向 20 mm,沿长度方向网格尺寸分为 20 mm 和 50 mm。螺栓网格大小为 4 mm。单元类型采用 DC3D8。采用 ISO834 升温曲线进行加载。柱受火面

为四面受火,上下端面设为绝热面,受火面对流换热系数^[17]取 $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,绝热面对流换热系数取 $9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,钢材热辐射系数取值 0.7。模型网格划分如图 2 所示,截面示意图见图 3,测温截面截取 1-1 截面(见图 1)。

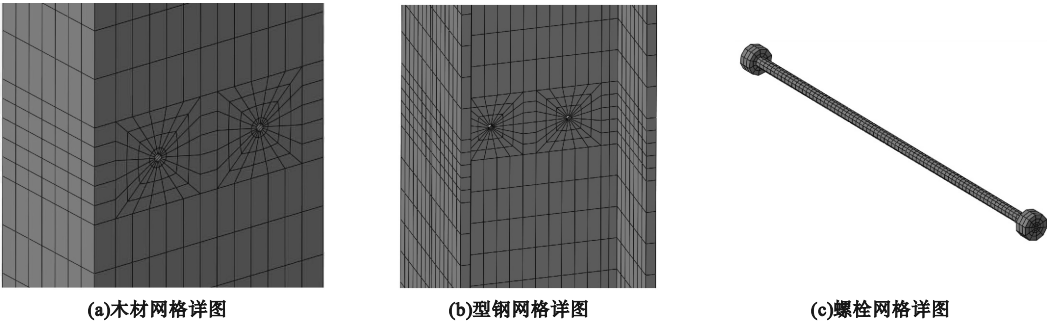


图 2 构件网格划分示意图

Fig. 2 The schematic diagrams of mesh generation for components

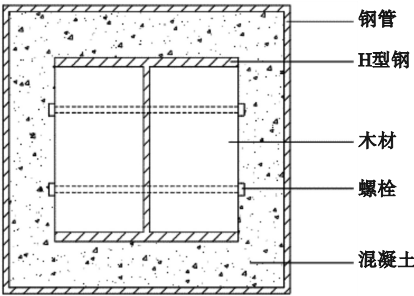


图 3 柱截面

Fig. 3 Cross section of the column

钢管与混凝土接触面间可能存在空气和水,产生接触热阻,对构件的热传递产生影响,但由于接触热阻对构件温度场影响较小,且学者对接触热阻的研究没有统一论^[18],而且木材在施工前会进行表面刷防潮防腐涂料处理,隔绝水分的传递。因此,笔者并未考虑接触热阻带来的影响。

2.3 模型验证

选取文献[19]中试件 WC-F-1 中的测点 U8、U10 和 U15 的升温曲线进行验证,该试件在四面受火状态下进行试验的。测点的试验值与模拟值对比如图 4 所示。

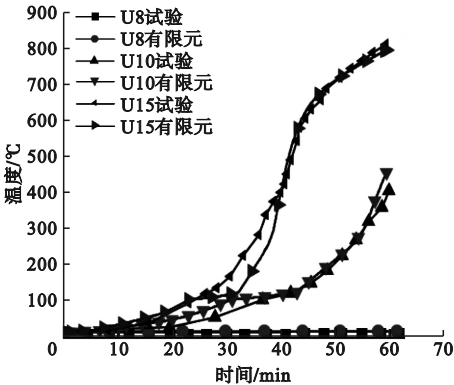


图 4 升温曲线

Fig. 4 The rising curves of temperature

试验中三个测点温度值有限元与试验对比如表 2 所示。

表 2 测点温度

Table 2 Temperature comparison at measuring points

测点	温度试验值/ $^{\circ}\text{C}$	温度模拟值/ $^{\circ}\text{C}$	误差/ $\%$
U8	19.67	17.93	8.85
U10	402.12	454.27	12.97
U15	809.02	793.21	1.95

三个测点温度有限元模拟值与试验值相对误差平均值为 7.92%,模拟值与试验值吻合良好,笔者的建模方法和材料热工参数取

值是合理的。

3 有限元模拟分析

笔者选取构件 TSC45B 为例进行分析。图 5 为构件 TSC45B 受火 3 h 的截面温度云图,图 6 为构件 TSC45B 内部的木材在标准火灾下受火 1 h、2 h、3 h 的温度云图。木材截面温度云图以及炭化后的剩余截面呈现双向对称分布,主要原因是受火面的对称性及构件截面的几何对称性。多数学者认为 300 ℃^[20] 为木材的炭化温度,超过 300 ℃ 的灰色部分表示已发生炭化的区域。随着受火时间的增加,炭化线逐渐向内部移动,木材未

炭化面积逐渐减小,矩形截面拐角处炭化线呈圆弧状。螺栓孔处的木材的炭化线向内凹陷,其炭化深度大于非螺栓孔处的木材,且二者差值越来越大。主要原因是由于混凝土的导热性能较差,在受火初期构件温度相对较低,从钢管表面途径混凝土传递至木材的热量较少,所以螺栓孔处和非螺栓孔处的木材炭化深度基本一致。但是随着受火时间的增加,从钢管表面途径混凝土传递至木材的热量大幅度增加且钢材的导热性能较强,二者共同作用导致螺栓孔处的木材温度高于无螺栓处的木材温度,导致有螺栓处的木材的炭化深度较于无螺栓处的木材的炭化深度越来越大。

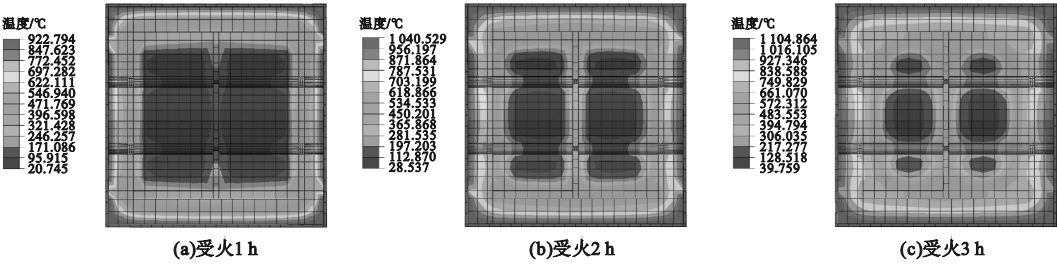


图 5 TC45B 截面温度云图(1-1 截面)

Fig. 5 The temperature contour plots of TC45B section(section 1-1)

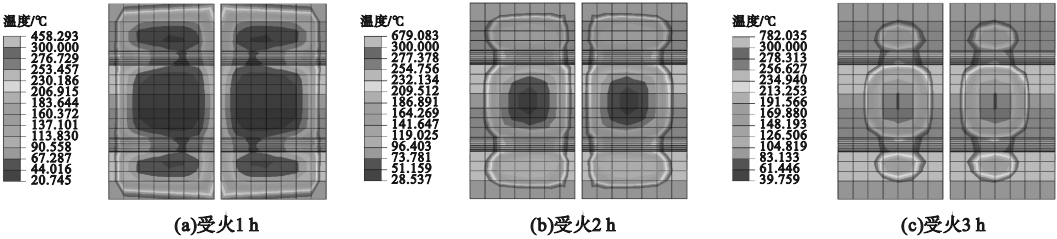


图 6 木材温度云图(1-1 截面)

Fig. 6 The temperature contour plots of woods(section 1-1)

4 构件参数分析

为了进一步分析四面受火状态下的组合柱内部的木材炭化深度的变化规律及温度变化规律,笔者在构件截面选取了 4 个测点 U1,U2,U3,U4 和 4 个接触面 L1,L2,L3,L4 进行参数分析,参考点位置具体见图 7 所示。

4.1 混凝土厚度

构件 TSC45B, TSC55B, TSC65B, TSC75B 在标准火灾下受火 3 h,L1,L2,L3,L4 处的木材炭化深度随时间的变化规律见图 8。混凝土厚度对木材炭化深度影响很大,在混凝土厚度相同的条件下,木材炭化深度随时间大致呈线性增长趋势。以图 8(a)为例,在受火 3 h 时,TSC45B, TSC55B, TSC65B,TSC75B 的 L1 处的木材炭化深度

依次减少约 9 mm,11 mm,8 mm。主要原因是混凝土导热性能较差,混凝土厚度越大,木材距离受火面越远,传递至木材的热量越少,导致木材炭化深度越小。

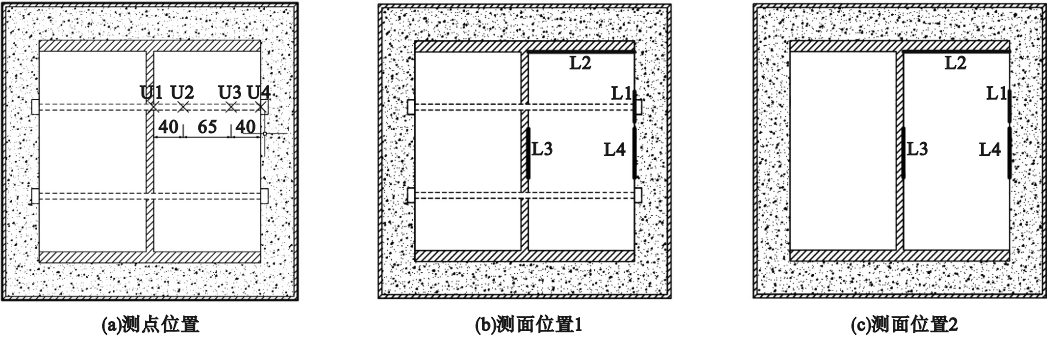


图7 测点与测面位置示意图(1-1截面)

Fig. 7 Schematic diagrams of the measurement points and surface positions(section 1-1)

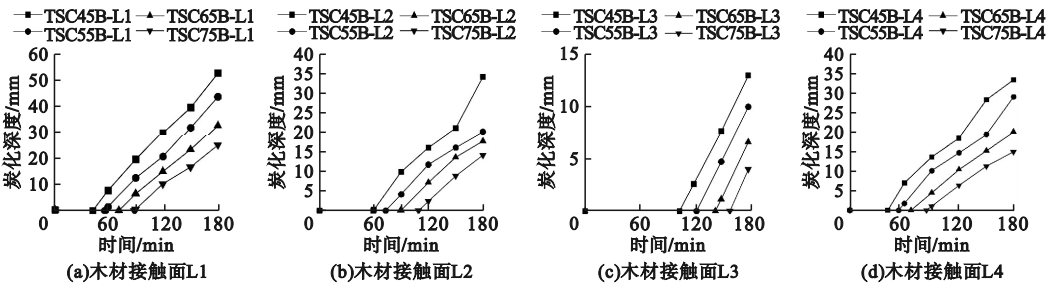


图8 混凝土厚度影响下柱内部木材炭化深度-时间曲线

Fig. 8 Depth-time curves of wood charring inside the columns under the influence of concrete thickness

构件 TSB, TSC45B, TSC55B, TSC65B, TSC75B 内部测点 U1, U2, U3, U4 处的木材的升温曲线如图 9 所示。随着混凝土厚度的增加,不同测点处的木材最高温度呈下降趋势。以图 9(a)为例,在受火 3 h 时,混凝土厚度由 45 mm 增加至 75 mm 时,木材温度依次降低了约 60 ℃,58 ℃,51 ℃,而无混凝土填充的对照组 TSB 内部测点 U1 处的温度大幅度升高,相较于 TSC45B 内部测点 U1

处的温度增大约 600 ℃。主要原因是构件 TSB 内部木材和 H 型钢无混凝土包裹且钢材的导热性能较强,钢管表面的热量快速传递至核心区导致对照组构件内部木材温度大幅度提高;由于混凝土导热性能较差,随着混凝土厚度的增加,由钢管表面途径混凝土传递至木材的热量减少,故随着混凝土厚度增大,木材温度降低。

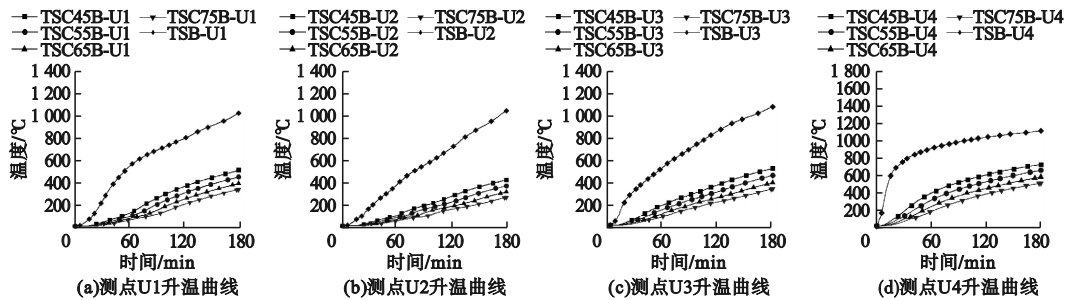


图9 混凝土厚度不同的柱内部木材升温曲线

Fig. 9 The temperature rising curves of wood inside columns with different concrete thicknesses

4.2 再生粗骨料取代率

构件 TSRC30-45B, TSRC50-45B, TSRC70-45B, TSRC100-45B 在标准火灾下受火 3 h, 其内部接触面 L1, L2, L3, L4 处的木材炭化深度随时间的变化规律如图 10 所示。再生粗骨料取代率的增加对各接触面处的木材炭化深度影响较小, 木材炭化深度随再生粗骨料取代率的增加而减小, 在再生粗骨料取代率不变的条件下, 木材炭化深度随时间大致

呈线性增长。以图 10(a) 为例, 受火 3 h 时, 构件 TSRC30-45B, 构件 TSRC50-45B, TSRC70-45B, TSRC100-45B 内部接触面 L1 处的木材炭化深度依次减少 2 mm, 2 mm, 3 mm。再生粗骨料取代率的增加对木材炭化深度影响不大, 主要原因是随着再生粗骨料取代率的增加, 再生混凝土的导热性能逐渐减弱。

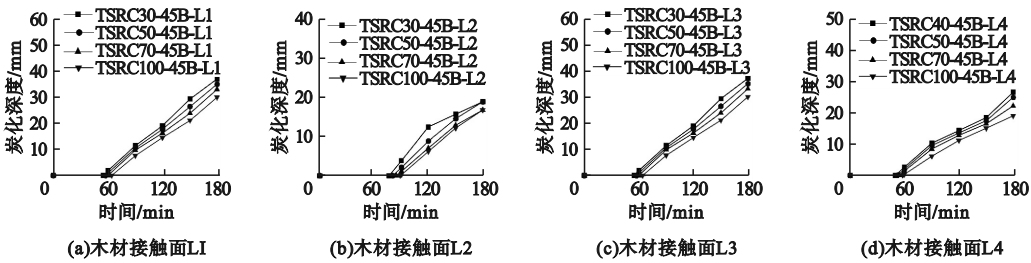


图 10 再生粗骨料取代率影响下柱内部木材炭化深度-时间曲线

Fig. 10 Depth-time curves of wood charring inside the columns under the influence of recycled coarse aggregate substitution rate

构件 TSRC30-45B, TSRC50-45B, TSRC70-45B, TSRC100-45B 内部测点 U1, U2, U3, U4 处的木材的升温曲线如图 11 所示。各测点处的木材温度受再生粗骨料取代率的影响较小, 随着再生粗骨料取代率的增加, 不同测点处的木材最高温度呈下降趋势, 但降温幅度

不大。以图 11(a) 为例, 再生粗骨料取代率由 30% 增至 100% 时, 木材最高温度依次降低了约 15.57℃, 14.7℃, 20.04℃。主要原因是再生混凝土的导热性能随着再生粗骨料取代率的增加而降低。

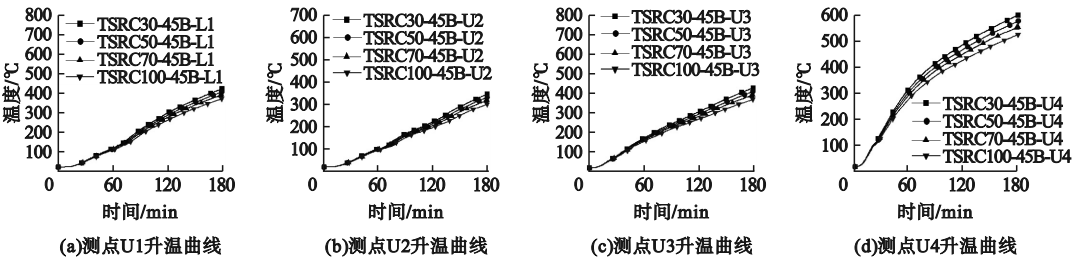


图 11 再生粗骨料取代率不同的柱内部木材升温曲线

Fig. 11 The temperature rising curves of wood inside columns with different recycled coarse aggregate substitution rates

4.3 螺栓

构件 TSC45B, TSC45, TSC55B, TSC55, TSC65B, TSC65, TSC75B, TSC75 在标准火灾下受火 3 h, 接触面 L1, L2, L3, L4 处的木

材炭化深度随时间的变化规律如图 12 所示。8 个构件接触面 L1 处的木材炭化深度有很大差别, 其余 3 个接触面 L2, L3, L4 处的木材炭化深度基本一致。以图 12(a)、(d) 为

例,构件受火 3 h 时,L1 处木材炭化深度差值:TSC45B, TSC45 差值约为 20 mm,TSC55B,TSC55 差值约为 14 mm,TSC65B,TSC65 差值约为 13 mm,TSC75B,TSC75 内部 L1 差值约为 9 mm。且 TSC45B,TSC55B,TSC65B,TSC75B 内部 L1 处的木材炭化速度均大于 TSC45,TSC55,TSC65,TSC75 内部 L1 处的木材炭化速度。L4 处木材炭化深度差值:TSC45B,TSC45 差值约为 0.33 mm,TSC55B,TSC55 差值约为 1 mm,TSC65B,TSC65 差值约为 0 mm,TSC75B,

TSC75 差值约为 1 mm。但 TSC45B,TSC55B,TSC65B,TSC75B 内部 L4 处的木材炭化速度与 TSC45,TSC55,TSC65,TSC75 内部 L4 处的木材炭化速度基本一致。主要原因是钢材的导热性能较强,由于螺栓的存在,随着受火时间的增加,热量从钢管表面更快地传递至 TSC45B,TSC55B,TSC65B,TSC75B 内部 L1 处的木材,导致此处木材的升温更快,温度更高,加剧了此处木材的炭化。

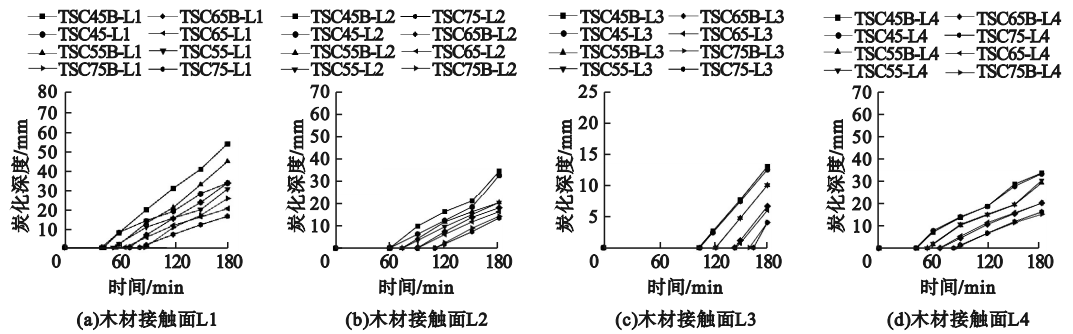


图 12 柱内部木材炭化深度-时间曲线

Fig. 12 Depth-time curves of wood charring inside the columns

5 结 论

- (1)四面受火状态下木材的温度场呈双向对称分布;随着受火时间的增加,螺栓孔处木材的炭化线向内凹陷,其炭化速度更快于非螺栓孔处的木材。
- (2)混凝土厚度对木材的炭化深度和初始炭化时间影响很大;混凝土厚度每增加 10 mm,木材的炭化深度平均减少 25.43%,初始炭化时间平均延后 22.82%。
- (3)再生粗骨料取代率对木材炭化深度影响较小;再生粗骨料取代率每增加 20%,木材炭化深度平均减小 6.34%,初始炭化时间平均延后 5.60%;在再生粗骨料取代率不变的条件下,木材炭化深度随时间大致呈线性增长。
- (4)螺栓的存在会加剧木材的炭化,螺栓孔处的木材的炭化深度比非螺栓孔处的木

材多出 57.13%。

参考文献

[1] NABATI A, GHANBARI-GHAZIJAANI T, NG C. CFRP-reinforced concrete-filled steel tubes with timber core under axial loading [J]. Composite structures, 2019, 217 (36): 37 - 49.

[2] XU Feiyang, XUAN Shiqing, LI Wei, et al. Compressive performance of steel-timber composite L-shaped columns under concentric loading [J]. Journal of building engineering, 2022, 48 (10): 39 - 67.

[3] YANG Ruyuan, WAN Jia, ZHANG Xiaofeng, et al. Modelling of steel-timber composite beams: validation of finite element model and parametric study [J]. Wood research, 2021, 66 (5): 806 - 820.

[4] DUAN Shaowei, ZHOU Wenzhao, LIU Xinglong, et al. Experimental study on the bending behavior of steel-wood composite beams [J]. Advances in civil engineering, 2021, 13 (6): 1 - 12.

[5] HU Qibin, GAO Ying, MENG Xinmiao, et al. Axial compression of steel - timber composite

- column consisting of H-shaped steel and glulam [J]. *Engineering structures*, 2020, 216 (8):50-61.
- [6] 李岷昌,夏秀斌,邱增美,等.方钢管-木-混凝土中长柱轴压性能有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(6):961-969.
(LI Guochang, XIA Xiubin, QIU Zengmei, et al. Finite element analysis of axial compression performance on square steel tube-timber-concrete medium long column [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2022, 38(6):961-969.)
- [7] 刘永军,庄喜弘,郭世庆.木-钢梁板组合结构耐火性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(4):633-641.
(LIU Yongjun, ZHUANG Xihong, GUO Shiqing. Research on fire resistance of wood-steel beam plate combination structure [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2023, 39(4):633-641.)
- [8] 李蒙杰.型钢再生混凝土组合框架结构抗火性能研究[D].锦州:辽宁工业大学,2021.
(LI Mengjie. Research on fire resistance performance of steel reinforced recycled concrete composite frame [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2021.)
- [9] 陈阳婷.L形多腔方钢管混凝土柱的抗火性能研究[J].建筑技术,2024,55(2):238-242.
(CHEN Yangting. Study on fire resistance of L-shaped multi-cavity concrete-filled square steel tubular column [J]. *Architecture technology*, 2024, 55(2):238-242.)
- [10] 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 charring rate and residual flexural capacity of timber beams after exposure to four-side fire [J]. *China civil engineering journal*, 2013, 46(2):24-33.)
- [11] 胡小锋,陈玲珠,许清风,等.胶合木梁三面受火后力学性能的试验研究[J].建筑结构,2020,50(16):87-93.
(HU Xiaofeng, CHEN Lingzhu, XU Qingfeng, et al. Experimental study of the mechanical behavior of glulam beams exposed to three-side fire [J]. *Building structure*, 2020, 50(16):87-93.)
- [12] 李岷昌,李龙,李晓.火灾作用下钢管煤矸石混凝土柱的温度场分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(4):577-584.
(LI Guochang, LI Long, LI Xiao. Temperature field analysis of coal gangue concrete-filled steel tubular column under fire [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2022, 38(4):577-584.)
- [13] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. *Journal of structural engineering*, 1994, 120(5):1489-1509.
- [14] 杨有福,张磊.钢管再生混凝土的耐火极限[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):419-431.
(YANG Youfu, ZHANG Lei. Fire resistance of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns [J]. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*, 2018, 38(3):419-431.)
- [15] European Committee for Standardization (CEN). BS EN 1995-1-2. Eurocode 5: design of timber structures, part 1-2: general structural fire design [S]. London: British Standard Institution, 2004.
- [16] 龙卫国.木结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
(LONG Weiguo. The design manual of wood structure [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2005.)
- [17] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 4-design of composite steel and concrete structures (part 1/2), general rules-structural fire design; BS EN 1994-1-2 [S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [18] 张宏涛,高明旭,于媛福.高温下钢管自密实混凝土界面接触热阻试验研究[J].实验力学,2016,31(5):584-592.
(ZHANG Hongtao, GAO Mingxu, YU Yuanfu. Experimental study of thermal contact resistance on the interface between steel tube and self-compacting concrete at high temperature [J]. *Journal of experimental mechanics*, 2016, 31(5):584-592.)
- [19] 田口孝,神谷隆,芳贺裕司,等. EWECS 柱的耐火性能[J].日本建筑学会技术报告集,2018,24(56):211-216.
(TAGUCHI T, KAMIYA T, HAGA H, et al. Fire resistance performance of engineering wood encased concrete-steel columns [J]. Technical report of the architectural institute of Japan, 2018, 24(56):211-216.)
- [20] 苏悦.火灾下复合支撑加固木梁承载力衰减规律研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2022.
(SU Yue. Study on attenuation law of bearing capacity of wooden beams strengthened with composite braces in fires [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2022.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)