

腹板嵌入式钢 - 混凝土组合梁的抗火性能参数分析

王海旭, 刘 猛

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年5月11日; 录用日期: 2025年6月4日; 发布日期: 2025年6月12日

摘 要

为深入研究腹板嵌入式钢 - 混凝土组合梁的抗火性能, 本研究构建了ABAQUS有限元分析模型, 该模型在火灾高温环境下, 通过实验数据验证可靠性。在此基础上, 再对组合梁的载荷比、跨高比、钢筋直径、腹板厚度、受火面数等方面的影响进行了详细的考察。研究表明: 荷载比随着荷载比的增加而逐渐降低组合梁的临界温度, 对腹板内嵌钢混凝土组合梁的抗火性能有显著影响; 在高温条件下, 波纹腹板组合梁在临界状态下的挠度值随跨高比的增大而相应增大; 另外, 组合梁的临界温度也随着配筋率的增加, 受火面数的增加, 腹板厚度的增加而提高, 使组合梁的抗火性能进一步增强。

关键词

腹板嵌入, 钢 - 混凝土组合梁, 抗火性能, 参数分析

Analysis of Fire Resistance Parameters of Web-Embedded Steel-Concrete Composite Beams

Haixu Wang, Meng Liu

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: May 11th, 2025; accepted: Jun. 4th, 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

In order to further study the fire resistance of web-embedded steel-concrete composite beams, the

ABAQUS finite element analysis model was constructed, which verified the reliability through experimental data in the high-temperature fire environment. On this basis, the influence of load ratio, span height ratio, steel bar diameter, web thickness, and number of fire surfaces of the composite beam was investigated in detail. The results show that the load ratio gradually decreases the critical temperature of the composite beam with the increase of the load ratio, which has a significant impact on the fire resistance of the composite beam with steel embedded in the web. Under the condition of high temperature, the deflection value of the corrugated web composite beam in the critical state increases with the increase of the span-height ratio. In addition, the critical temperature of the composite beam also increases with the increase of reinforcement ratio, the increase of the number of fire surfaces, and the increase of web thickness, so that the fire resistance of the composite beam is further enhanced.

Keywords

Web Embedding, Steel-Concrete Composite Beams, Fire Resistance, Parametric Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高强度、优良的混凝土抗压性能将钢-混凝土组合梁结合在一起,使结构的承重能力得到明显提高。在大跨径桥梁和高层结构中占有特别突出的优越性。高温火灾会导致钢材和混凝土材料性能的退化,进而可能引发火灾的发生。尤其是钢材,在达到 500℃到 600℃时钢材强度开始发生骤降。混凝土在高温下也会出现强度降低、裂缝增多等问题,进而影响其承载能力。因此,火灾发生后,钢-混凝土组合梁的安全性变得极为关键。

目前国内已有多位学者高度关注钢混凝土组合梁的防火性能。周焕廷等[1]通过有限元模型对钢梁残余应力进行分析,探讨其对预应力连续组合梁防火性能的影响。研究结果显示,残余应力可以影响组合梁在火灾中的跨中挠度等关键参数。张山等[2]人开展了试验研究,深入探讨了嵌入式钢-混凝土组合梁的防火性能。王卫永等[3]人对钢混凝土组合梁耐火性能研究内容涉及高温下的试验和理论研究,以及螺栓的防火性能。他们指出了目前研究的不足,分析总结了国内外消防设计常用规范中的方法与理论。张鑫等[4]对火灾全过程中圆孔蜂窝组合梁温度分布、位移变化、破坏形态、耐火极限等进行恒载升温试验和铰接约束圆孔蜂窝组合梁数值模拟分析。杨远龙等[5]进行了正弯矩区腹板嵌入式 U 形钢-混凝土组合梁的受弯性能试验,探讨了 U 形钢板厚度、连接件间距以及混凝土翼缘板宽度等因素对组合梁性能的影响。

通过对现有文献的全面梳理可以发现,目前关于钢-混凝土组合梁耐火性能的研究主要集中在工程中广泛使用的普通钢-混凝土组合梁上,且普通的平腹板钢-混凝土组合梁仅通过剪力连接件将钢腹板与混凝土板连接,导致受火面较大。然而,关于本文所述高温条件下嵌入式钢混凝土组合梁的热特性研究相对较少。腹板嵌入式钢混凝土组合梁表现出较优越的防火性能,因为混凝土对钢梁的包裹性可以有效延缓钢梁的升温速度。

鉴于上述研究现状,本文将利用 ABAQUS 有限元分析软件对腹板嵌入式钢-混凝土组合梁进行数值模拟研究,对荷载比、跨高比、钢筋直径、腹板厚度和火面数量等关键因素进行了分析。

2. 有限元模型简述

2.1. 材料的热工参数取值

在 ABAQUS 中, 混凝土的本构模型是根据 GB50010-2010《混凝土结构设计规范》[6]确定其受压和拉的应力 - 应变关系曲线的自带塑性损伤模型。在文献[7][8]中提供的应力 - 应变关系式用于常用结构钢的本构模型。采用理想弹性与塑性钢筋关系的本构模型, 其高温下的屈服强度和弹性模量可参考普通结构钢取值。参考有关文献[9]取值高温下普通钢材和混凝土的热工参数, 如比热容, 热膨胀系数, 导热系数和密度等均可取值。

2.2. 边界条件

热辐射、热传导和热对流构成了温度场分析的三种中心边界状态类型。其中, 玻尔兹曼常数取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, 综合辐射系数为 0.7, 而受火面热对流系数为 $25 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$ 。

具有简支端部的钢 - 混凝土组合梁两点受压, 边界条件如图 1 所示, P 表示受压荷载。横梁的左端约束垂直和纵向位移, 形成固定铰链支座; 横梁的右端仅限制垂直位移, 形成滑动铰链支撑。组合梁三面受火, 除混凝土顶面和梁两端不受火外, 其余三面均受火。

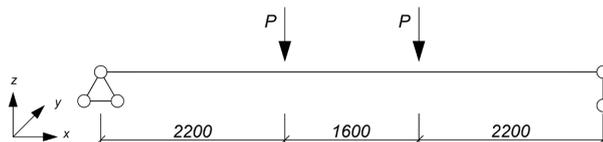


Figure 1. Combined beam force diagram

图 1. 组合梁受力图

2.3. 单元类型及模型参数

在 ABAQUS 有限元仿真中, 顺序耦合方法用于复合梁的分析。这种方法首先对组合梁进行热分析, 然后在热分析的基础上进行静力学分析。对于热分析和结构分析, DS4 和 S4R 单元分别用于钢板腹板; DC3D8 单元和 C3D8R 单元分别用于混凝土、顶板和底板; 螺纹钢分别使用 DC1D2 单元和 T3D2 单元。

2.4. 模型尺寸确定

组合梁的跨度为 6 m, 图 2 为它的立面图。混凝土板尺寸为 $1850 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 强度等级为 C30; 钢板采用 Q235, 腹板高度为 500 mm, 厚度为 3 mm; 钢梁翼缘为 $150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$; 钢筋采用双层双向加固, 型号为 HPB235, 横筋为 $\phi 10@100$, 纵筋为 $\phi 8@120$; 组合梁截面的形状如图 3 所示。为了提高组合梁的耐火性, 可以实施以下策略: 发生火灾时, 降低下钢梁的可见高度, 将钢梁的上翼驱动到混凝土板中, 直到它接触到上钢筋网的下边缘。当遇到下层钢筋网与钢梁相交时, 可将其截断并焊接至型钢腹板的两侧。在本文的实验样本中, 钢梁嵌入上部混凝土板的深度为 110 毫米。

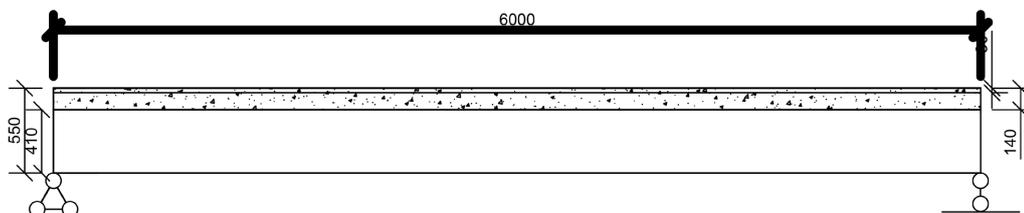


Figure 2. Elevation drawing of composite beam

图 2. 组合梁立面图

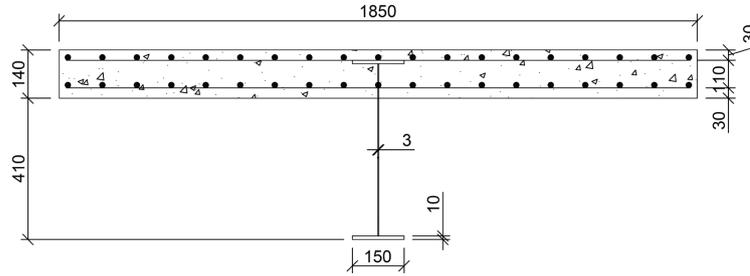


Figure 3. composite beam cross-section
图 3. 组合梁横截面

3. 有限元模型验证

鉴于腹板嵌入式钢-混凝土组合梁在火灾高温条件下的试验数据相对匮乏, 本文采用文献资料[10]平腹板简支组合梁在火灾下的试验结果, 对本文高温下设置的有限元模型的准确性进行了验证。其相关尺寸及材料性能等信息见文献[10], 如图 4 所示的梁截面尺寸及测点位置, 如图 5 所示的试验炉内实测温度及 ISO-834 曲线[11]。

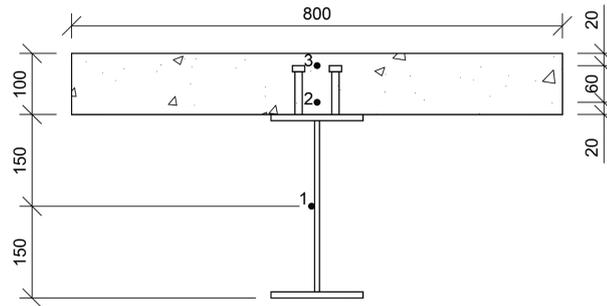


Figure 4. Beam section temperature measurement point location
图 4. 梁截面温度测点位置

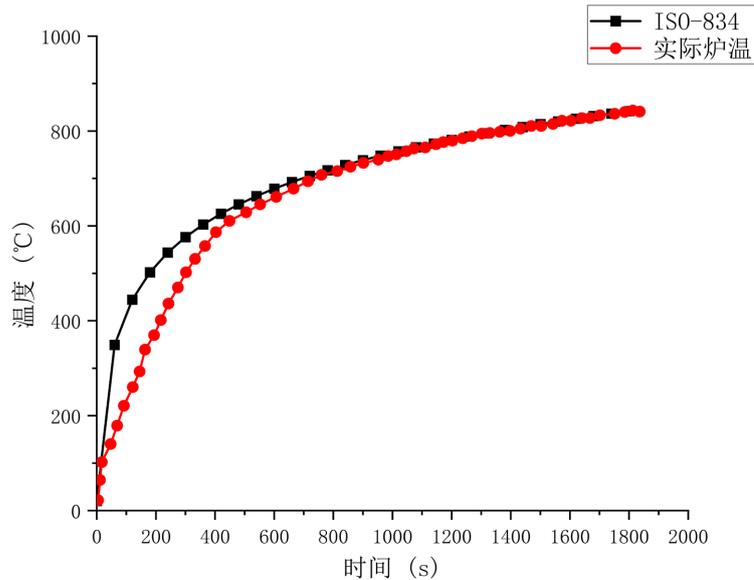


Figure 5. Comparison of measured temperature curve and simulated curve
图 5. 实测温度曲线与模拟曲线的对比

由图6可知, 模拟结果与文献中的平腹板简支组合梁在[10]中的升温试验结果大体相当, 但还是有区别的。在进行有限元温度场模拟时, 对于测点2和测点3, 并未考虑混凝土的初始含水量。然而, 在实际情况下, 水分蒸发吸热会显著影响升温速率, 且混凝土内部的含水量也存在微小差异, 这些因素共同导致模拟升温曲线比试验更陡。但有限元仿真结果与测试数据的差异仍处于可接受范围内, 说明仿真结果准确合理。

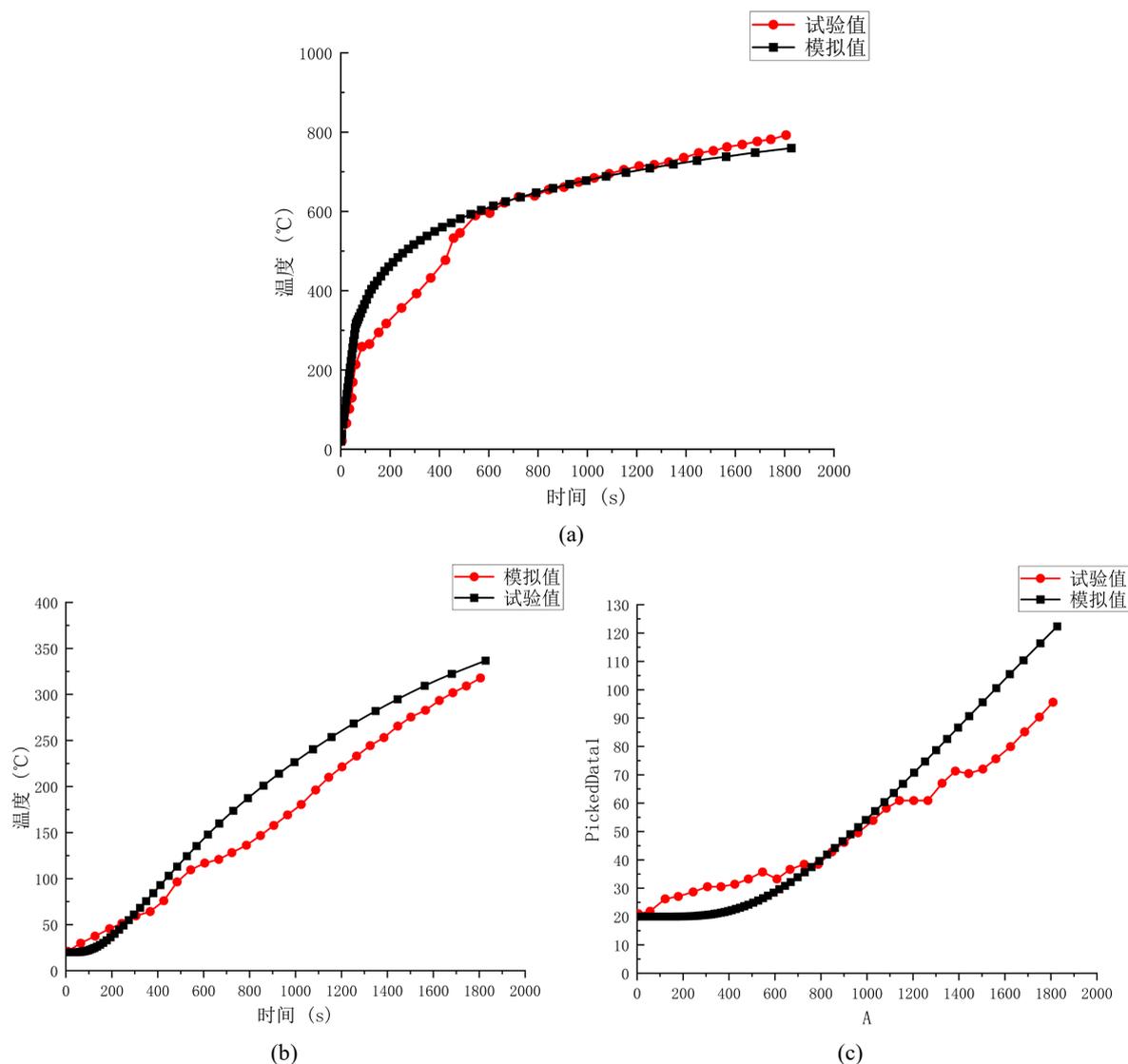


Figure 6. Comparison of measured temperature and simulated temperature. (a) Measurement point at the beam cross-section 1, (b) Measurement points at the second section of the beam, (c) Measurement points at the three section of the beam
图 6. 实测温度与模拟温度的比较。(a) 梁截面 1 处的测点, (b) 梁截面 2 处的测点, (c) 梁截面 3 处的测点

4. 腹板嵌入式钢 - 混凝土组合梁防火性能参数分析

4.1. 荷载比

荷载比定义为 α , 分别取值为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8。横坐标上指示的温度是下翼缘的温度。除非另有说明, 否则所提及的 x 轴温度是指下翼缘温度。

由图 7 可知, 载荷比越大, 随着载荷比的增加, 腹板内嵌钢混合梁的临界温度降低, 其曲线下降的趋势就越陡。这是因为, 当埋设在腹板中的钢-混凝土组合梁被烧制时, 随着温度的升高, 材料的机械性能下降, 材料的刚度和强度下降, 从而导致结合梁抗弯能力降低, 挠度温度曲线的斜率明显增大, 荷载比越高, 增加的幅度也就越明显, 其结果就是在受火时当负荷比越大时, 表示临界温度越低。荷载低, 临界温度高, 相应的变形值低, 但总变形相差不大, 因此钢混组合梁在高温下的变形性能较好。

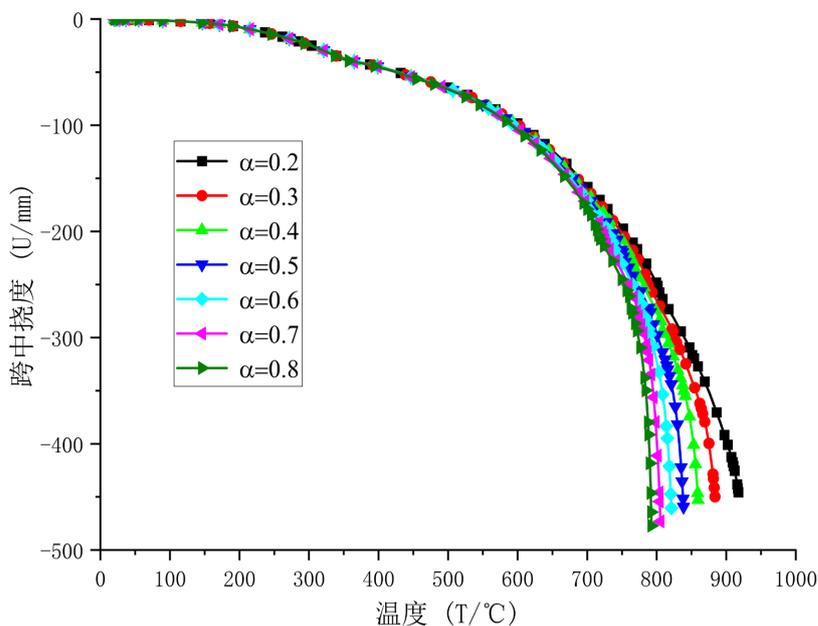


Figure 7. The effect of different load ratios on the deflection of composite beams
图 7. 不同荷载比对组合梁挠度的影响

4.2. 跨高比

在固定组合梁截面的情况下, 通过改变腹板的高度获得不同的跨度比, 有关详细信息, 请参阅表 1。

Table 1. Different span-to-height ratios of composite beams

表 1. 组合梁的不同跨高比

模型	梁跨/m	腹板高/mm	跨高比 λ
L-K-1	6	300	17.14
L-K-2	6	500	10.9
L-K-3	6	800	7.05

由图 8 可知, 组合梁的挠度变形随着跨高比的升高而相应增加。在火情相同的情况下, 体温场的分布大体相同。但截面高度越大, 热量从受火面传递到非受火面的路径越长(从下翼缘底面到混凝土板底面), 使截面内的温差较大, 温度梯度也较显著。这导致有效截面高度减小, 抗弯能力显著下降, 从而产生附加弯矩, 使得跨中挠度加速增长。

从纵向比较来看, 当组合梁的临界温度较低时, 当跨度高度相对较小时, 挠度量相对较小。相反, 当跨度高度相对较大时, 挠度量较高, 组合梁的变形能力较好。

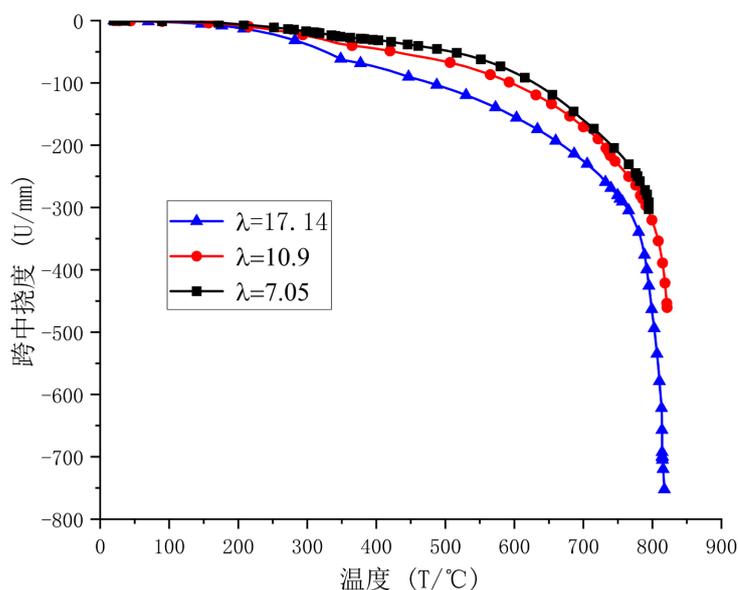


Figure 8. Deflection-Temperature curves of beams with different span-to-height ratios $\alpha = 0.6$
 图 8. 不同跨高比组合梁的挠度-温度曲线 $\alpha = 0.6$

4.3. 钢筋配筋率

通过调整钢筋直径来改变组合梁内的钢筋配筋率, 从而使得 L-P-1、L-P-2、L-P-3 的钢筋直径分别为 0 mm、12 mm、20 mm。

从图 9 可以看出, 在 0 到 700 摄氏度的温度区间内, 配筋率越小, 组合梁的挠度增长速率越低。这是因为在常温状态下, 配筋率较低时, 钢筋的屈服程度相对较高, 导致整体结构的刚度较小。此时, 荷载主要通过钢梁传递, 钢梁成为主要的抗弯构件, 而混凝土仅提供有限的刚度。当温度超过 700°C 时, 筋度增加率越小, 挠度增加率就越快。这主要是由于高温下钢梁弯曲, 造成挠度急剧升高所致。

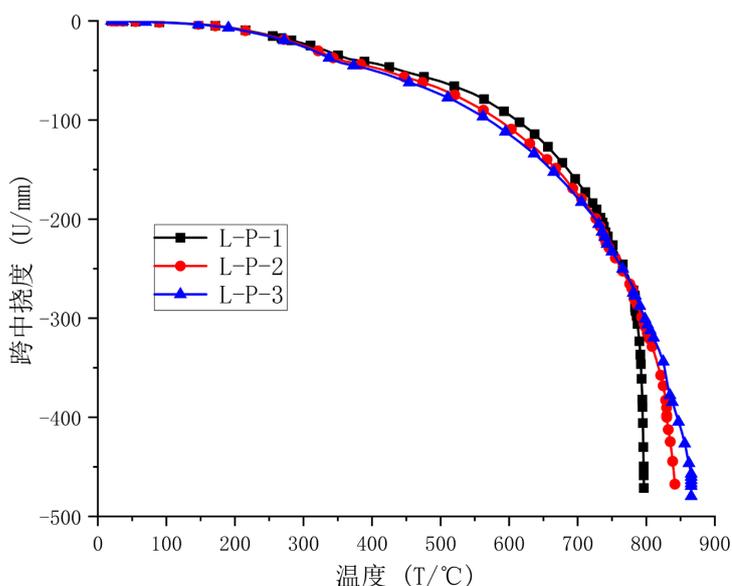


Figure 9. The effect of rebar diameter on the deflection of composite beams $\alpha = 0.6$
 图 9. 钢筋直径影响组合梁挠度 $\alpha = 0.6$

4.4. 腹板厚度

通过调整腹板厚度, 使得 L-F-1、L-F-2、L-F-3 的腹板厚度分别为 3 mm、5 mm、7 mm。

从图 10 可以看出, 由于腹板厚度每增加 2 mm, 组合梁的临界温度就会有小幅上升。究其原因, 在波纹钢腹板的高度上, 弯曲应该是呈线状分布的。当腹板厚度增加时, 中和轴附近的低应力区域面积也随之增大, 这意味着更多的材料处于低应力状态, 从而提升了结构的整体刚度。另外, 腹板的厚度越大, 就说明它的抗屈曲能力越强。这是由于较大的厚度可以使腹板局部稳定性增强, 屈曲危险减小。腹板厚度越大, 在相同温度条件下, 越不容易出现跨中挠度骤增。这表明在高温环境下, 增加腹板厚度可以有效延缓屈曲, 进而提高结构的安全性。

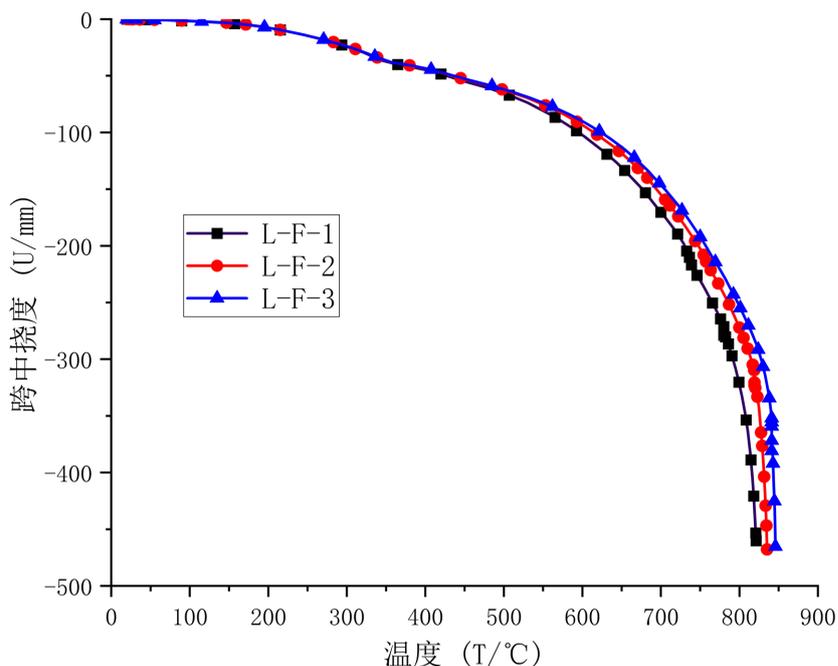


Figure 10. Shows the effect of web thickness on the deflection of the composite beam $\alpha = 0.6$

图 10. 腹板厚度对组合梁挠度的影响 $\alpha = 0.6$

4.5. 受火面数

通过改变组合梁的防火面数量, 三根组合梁分别在一侧受火(腹板一侧着火, 上翼缘和混凝土下表面着火), 其他面均为保温面, 三面着火, 全部着火。

图 11 显示, 受火面数量越少, 组合梁跨中挠度下降的速度越快。究其原因, 是由于受火面越少, 形成的温度梯度越大。这使得混凝土板出现非均匀收缩和开裂, 局部刚度迅速降低, 同时腹板更容易发生局部屈曲, 从而加速整体挠度的增加。相比之下, 当组合梁全面受火时, 混凝土板和钢梁同时被加热, 截面温度分布较为均匀, 材料性能的退化也更为同步。此时, 混凝土的受压区和受拉区同时软化, 结构内力重分布过程呈现平缓发展趋势, 整体刚度退化速度较慢。此外, 钢梁的腹板和翼缘均匀受热, 高温下的屈曲现象得以延迟。全面受火的组合梁, 在温度超过 700°C 时, 其跨中挠度急剧增加, 主要是由于断面各区域进入几乎完全丧失刚性的“全塑性状态”, 挠度呈指数级增长。而与一面受火和三面受火的情况相比, 组合梁的跨中挠度增长较为平缓, 这是因为高温区的材料已提前退化, 后续温度升高对整体刚度的边际影响减小, 导致挠度增速相对平缓。

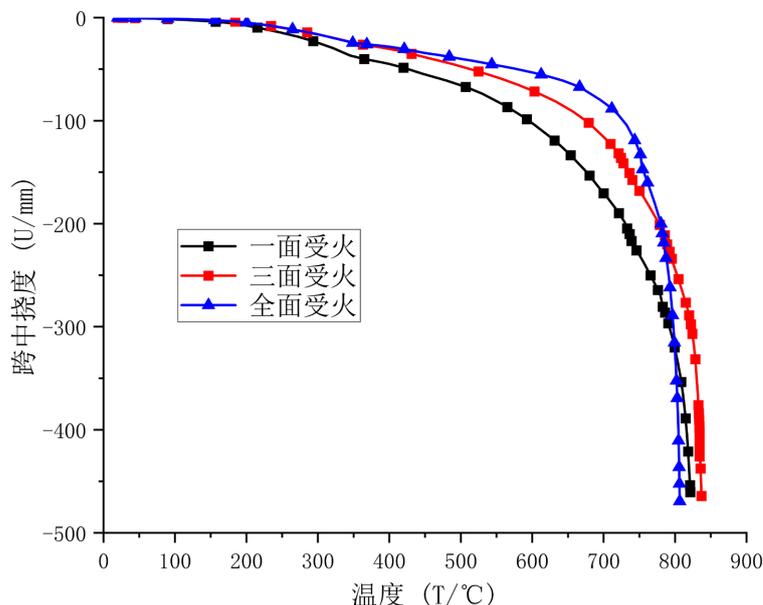


Figure 11. Shows the effect of the number of fire-exposed surfaces on the deflection of composite beams $\alpha = 0.6$

图 11. 受火面数对组合梁挠度的影响 $\alpha = 0.6$

5. 结论

参数分析腹板嵌入式钢混结合梁的抗火性能, 得出如下结论:

1) 载荷比是组合梁耐性的关键要素。随着载荷比的增大, 组合梁的临界温度逐渐降低, 但临界温度下挠度值的差异较小, 表明组合梁的变形能力较好。

2) 在温度较高的环境下, 截面内的温差和温度梯度越显著, 组合梁的跨高比越大。这使得有效截面高度减小, 抗弯能力显著下降, 进而产生附加弯矩, 导致跨中挠度变形增大。再加上腹板厚度的改变, 也大大影响了组合梁的抗火能力。腹板厚度越大, 越能增强组合梁腹板的稳定性, 使其更不容易发生屈曲, 从而延缓组合梁失去承载能力。

3) 在腹板嵌入式钢混结合梁中, 钢筋配筋率明显影响着它的抗火性能。整体来看, 临界温度更高、抗火性能优越的是钢筋直径更大的组合梁。

4) 组合梁的挠度变化在受火面越少时更为显著, 这主要是由于温度梯度引起的混凝土板非均匀收缩和开裂、腹板局部屈曲、材料性能的不均匀退化以及整体刚度的快速退化。当温度超过 700 摄氏度时, 全面受火会导致截面整体进入材料“崩溃区”, 从而使挠度急剧增大。

参考文献

- [1] 周焕廷, 郑志远, 陈志华. 初始残余应力对预应力钢筋混凝土连续组合梁抗火性能影响研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(5): 130-139+148.
- [2] 张大山, 王慧青, 张迎春, 等. 端部约束部分嵌入式钢-混凝土组合梁抗火性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 66-76.
- [3] 王卫永, 李国强. 钢-混凝土组合梁抗火性能研究综述[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(5): 1-8.
- [4] 张鑫, 李汝凯, 杨立华, 等. 铰接约束圆孔蜂窝组合梁抗火性能试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构, 2023, 53(19): 76-83.
- [5] 杨远龙, 刘阳, 杨庆杰, 等. 腹板嵌入式外包 U 形钢-混凝土组合梁正弯矩区受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(1): 161-181.

- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] European Committee for Standardization. (1993) Eurocode 3: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1. 2: General Rules-structural Fire Design: CEN1993-1-2. ECS.
- [8] European Committee for Standardization (2005) Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.2: General Rules-Structural Fire Design: Eurocode 4. ECS.
- [9] 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, 2008.
- [10] Zhou, H., Li, S., Chen, L. and Zhang, C. (2018) Fire Tests on Composite Steel-Concrete Beams Prestressed with External Tendons. *Journal of Constructional Steel Research*, **143**, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.008>
- [11] ISO 834 (2014) Fire Resistance Tests—Elements of Building Construction—Part 1: General Requirements. International Organization for Standardization.