

火灾下钢筋混凝土梁结构高温力学性能数值模拟研究

张长青, 刘 猛, 朱恩泽

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年4月18日; 录用日期: 2026年5月9日; 发布日期: 2026年5月19日

摘 要

为探究火灾作用下钢筋混凝土(Reinforced Concrete beam, 简称RC梁)高温力学性能的演化规律, 为其防火设计与性能评估提供科学依据, 本文采用ABAQUS有限元软件, 基于顺序热力耦合方法建立RC梁数值模型, 通过与试验数据对比验证模型准确性。随后以受火方式、纵筋直径、升温时间及梁截面尺寸为关键变量, 系统开展火灾下RC梁跨中挠度数值模拟分析, 重点研究不同影响因素对RC梁跨中挠度的影响规律。研究表明, 受火面越多、纵筋直径越小、升温时间越短、截面尺寸越小, RC梁跨中挠度增长越快、后期挠度值越大; 而温度梯度引发的热胀差异及材料强度退化是挠度产生的主要原因。

关键词

火灾, 钢筋混凝土梁, 高温性能, 温度场, 参数分析

Numerical Simulation Study on the High-Temperature Mechanical Properties of Reinforced Concrete Beam Structures under Fire Conditions

Changqing Zhang, Meng Liu, Enze Zhu

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

Received: April 18, 2026; accepted: May 9, 2026; published: May 19, 2026

Abstract

To explore the evolution law of the high-temperature mechanical properties of reinforced concrete

(Reinforced Concrete beam, abbreviated as RC beam) beams under fire conditions, and to provide a scientific basis for their fire protection design and performance evaluation, this paper uses the ABAQUS finite element software to establish a numerical model of RC beams based on the sequential thermal coupling method. The accuracy of the model is verified by comparing with experimental data. Subsequently, taking the fire exposure mode, longitudinal reinforcement diameter, heating time, and beam cross-sectional size as key variables, a systematic numerical simulation analysis of the deflection at the mid-span of RC beams under fire conditions is carried out. The influence laws of different influencing factors on the mid-span deflection of RC beams are mainly studied. The research shows that the more fire-exposed surfaces, the smaller the longitudinal reinforcement diameter, the shorter the heating time, and the smaller the cross-sectional size, the faster the mid-span deflection of the RC beam increases and the larger the final deflection value. The main reasons for the deflection are the thermal expansion differences caused by the temperature gradient and the degradation of material strength.

Keywords

Fire, Reinforced Concrete Beam, High-Temperature Performance, Temperature Field, Parameter Analysis

Copyright © 2026 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

RC 梁是建筑结构中十分基础且最常用的承重构件，其由钢筋与混凝土两种材料共同构成，二者协同工作以承担建筑竖向荷载[1]。该构件广泛应用于住宅、办公楼、厂房、桥梁等各类建筑，作为主流承重构件，其结构性能优良，抗压、抗弯能力较强，可适配不同建筑的荷载需求；并且耐久性好，具备较强的抗腐蚀、抗风化能力，能够满足建筑长期使用要求。火灾是建筑工程中最常见、最具破坏性的灾害之一[2]，而 RC 梁作为建筑的核心承重构件，其在火灾中的性能直接决定了建筑的整体稳定性，一旦 RC 梁在火灾中损坏、断裂，极易导致整个建筑坍塌，造成严重的人员伤亡和财产损失[3]。RC 梁耐火性能不足会直接加剧火灾灾害破坏程度，给人们的生命财产安全带来了巨大威胁。研究 RC 梁的火灾下的力学性能，具有十分重要的现实意义和工程价值。

现有研究已针对 RC 梁的防火性能开展了一定探索[4][5]。卢丽敏等[6]研究发现，火灾是影响 RC 梁性能的关键灾害，高温环境会显著改变整体结构的力学性能。混凝土在高温下会出现开裂、强度下降，甚至脱落；钢筋在高温下会软化，抗拉能力大幅降低，进而导致结构承载力下降、变形增大，严重时会发生断裂破坏。丁发兴等[7]通过数值模拟探索了不同影响因素对 RC 梁防火性能的影响，发现合理增加保护层厚度、优化钢筋配置，能在一定程度上提升 RC 梁的耐火性能。现有研究虽已有不少研究对 RC 梁的力学性能进行分析，但对火灾下 RC 梁性能退化的精细化规律探究依旧不够深入，难以全面支撑实际工程中的防火设计与灾害评估工作。

此外，随着建筑行业的发展，各类大型建筑、复杂建筑日益增多，对 RC 梁的防火性能提出了更高要求。当前现有研究的不足，导致工程设计中对钢筋混凝土梁的防火设计缺乏足够精准的理论 and 试验支撑，难以充分应对实际火灾的复杂场景。因此，深入研究 RC 梁在火灾下的力学性能变化规律，明确其损伤机制和影响因素，能够为建筑防火设计提供科学依据，优化防火保护措施，减少火灾带来的灾害损失，

保障建筑结构的火灾安全。

鉴于上述研究现状, 本文将利用 ABAQUS 有限元分析软件对 RC 梁进行数值模拟研究, 对受火方式、升温时间、配筋率和梁截面尺寸对性能的影响进行了分析。

2. 数值模拟

2.1. 有限元模型

基于顺序热力耦合方法, 采用通用有限元软件 ABAQUS 建立 RC 梁仿真模型, 对其进行高温力学性能分析。计算、配筋如图 1 所示。RC 梁采用全尺寸模型, 其尺寸在 x、y、z 方向分别为 200 mm、350 mm、3000 mm。传热分析与热力耦合分析采用统一的网格划分方案及单元族。混凝土采用实体单元, 纵筋与箍筋采用杆单元。经过网格收敛性分析, 考虑到模型计算效率与模拟精度, 混凝土网格尺寸采用 15 mm, 纵筋与箍筋采用 20 mm。筋与箍筋通过嵌入方式与混凝土梁体形成整体工作体系。RC 梁采用三面受火, 除 RC 梁顶面和两端不受火外, 其余三面设置为受火面。建立的 RC 梁模型、边界条件及配筋情况如图 1 所示。

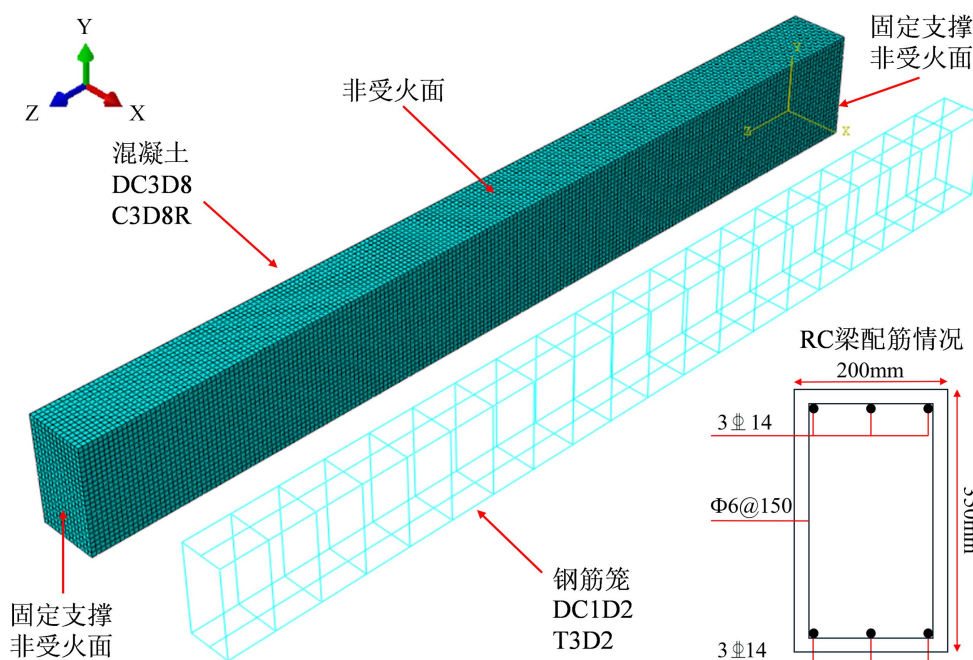


Figure 1. Model schematic diagram

图 1. 模型示意图

火灾场景下, 外界通过热对流和热传导 2 种方式与建筑结构表面进行热量交换。按照欧洲规范的推荐值, 受火面的对流换热系数取 $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 综合辐射系数取 0.7; 非受火面的对流换热系数取 $9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。假定内置钢筋与对应位置混凝土的温度一致, 通过绑定约束定义二者的接触属性。

2.2. 模型热工参数与材料本构模型

在高温环境下钢材与混凝土的热工参数选取中, 欧洲规范 EC4 (EN1994-1-2-2005) 以及 Lie 等人提出的相关模型应用最为广泛。本文在进行温度场计算过程中, 采用 Lie 模型进行传热分析工作。对于混凝土内部水分蒸发所产生的影响, 通过对 $100^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ 温度区间内混凝土的比热进行修正的方式进行考虑。

在热力耦合分析过程中,纵筋采用 HRB400,箍筋采用 HRB335,其本构关系均采用欧洲规范所推荐的模型进行确定。混凝土采用 C40 强度等级的预拌商品混凝土,其在高温条件下的力学响应,则借助混凝土塑性损伤模型(CDP 模型)进行模拟。其中混凝土的受压行为及压缩损伤采用 Lie 等人提出的相关模型,拉伸行为及拉伸损伤则选用 Hong 等人推荐的模型。其余模型参数设置如下:膨胀角 30,偏心率 0.1,拉伸与压缩子午线的第 2 应力不变量之比 2/3,黏性系数 0.0005。

2.3. 模型验证

采用仇培云等人[8]的试验结果,对本文的有限元模型的准确性进行了验证。其设置了 2 根根内置矩形螺旋箍筋约束的矩形钢管混凝土柱,试件截面长边和短边尺寸分别为 400 mm 和 250 mm,总长度为 3810 mm。

图 2 为模拟结果与仇培云等人的升温试验结果的对比情况。从图中可以看出,当受火时间相同时,有限元模型的计算结果与试验实测值之间存在一定程度的偏差。考虑到在标准火灾与荷载耦合作用下开展明火试验时,矩形钢管混凝土柱内部的实际含水量难以实现精准测定。同时,在实际工况中水分蒸发过程中吸收的热量会对构件的升温速率产生显著抑制作用,且不同试件内部混凝土的含水量本身存在细微差异,上述因素的共同作用,使得仿真模拟得到的升温曲线相较于试验实测曲线更为平滑。尽管存在上述偏差,但模型计算的结果与试验测试数据之间的差值仍处于合理可接受范围之内。这表明所建立的数值模型能较好的评估 RC 梁的抗火性能,有效反映结构的实际受火响应特征。

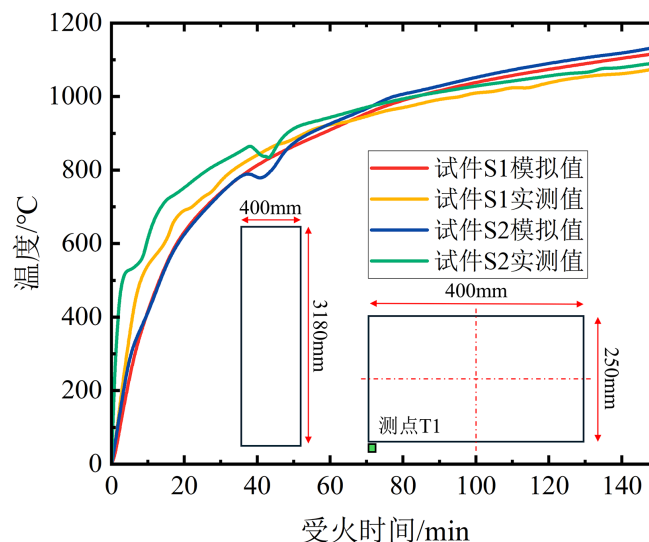


Figure 2. Temperature time series comparison chart
图 2. 温度时程曲线对比图

3. 高温下钢筋混凝土梁响应分析

3.1. 温度场分析

建立的有限元模型所研究的 RC 采用三面受火工况,除顶面及两端截面外,其余表面均直接受火。图 3 为 RC 梁的温度变化情况,由图可知,温度变化呈现明显的均匀分布特征。在火灾发生的初期,RC 梁受火面温度快速上升,与环境温度差值逐渐增大,而顶面及两端因未受火,温度上升缓慢,此时仅梁表面受到高温影响。随着受火时间延长,热量逐渐向 RC 梁内部传导,产生了明显的温度梯度,但受火面

与非受火面的温差仍维持在较高水平。火灾后期，梁体截面温度趋于稳定，受火面温度接近火场环境温度，该温度变化规律与邱源等人的研究[9]一致，为后续梁体力学性能分析提供了温度场基础。

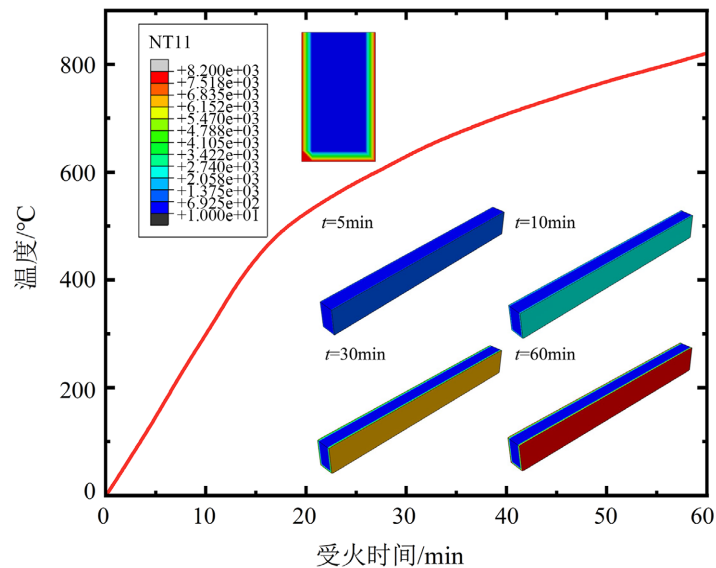


Figure 3. The time-history curve of the surface temperature of the beam
图 3. 梁表面温度历程曲线

3.2. 响应分析

由前文分析可知，在火灾作用下，RC 梁受火面与非受火面会产生温度梯度。而在实际情况中，温度梯度会引发热胀差异及约束变形，进而产生应力[10]。同时高温还会降低材料强度，进一步改变应力分布情况，故应力变化与温度分布特征密切相关，整体呈现阶段性演化规律。响应情况如图 4 所示。

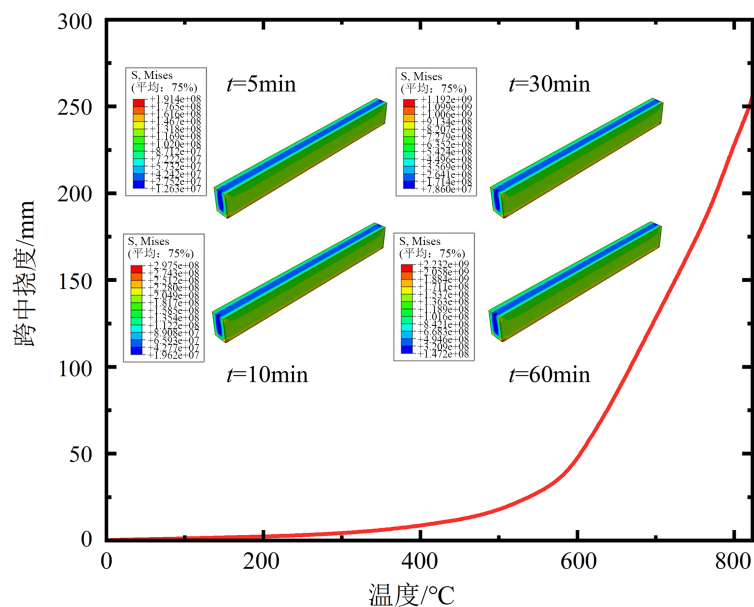


Figure 4. Deflection-temperature curve
图 4. 挠度 - 温度曲线

由图4可知,火灾初期,由于RC梁受火面温度快速升高,发生热胀变形进而产生压应力,非受火面因温度较低,产生拉应力。这直接导致了RC梁产生位移,其跨中挠度随时间不断增大。随受火时间延长,混凝土强度随温度升高逐渐退化,拉应力向梁体内部传导,棱角处产生的应力集中现象趋于明显。火灾后期,RC梁整体强度被削弱,其抗弯能力大幅下降,跨中挠度增长速度较初期变快。

4. 钢筋混凝土梁参数分析

4.1. 受火方式

由于实际情况中,火灾发生位置的不确定性,RC梁的受火方式可分为单面受火、两面受火、三面受火和四面受火。受火方式如图5所示。

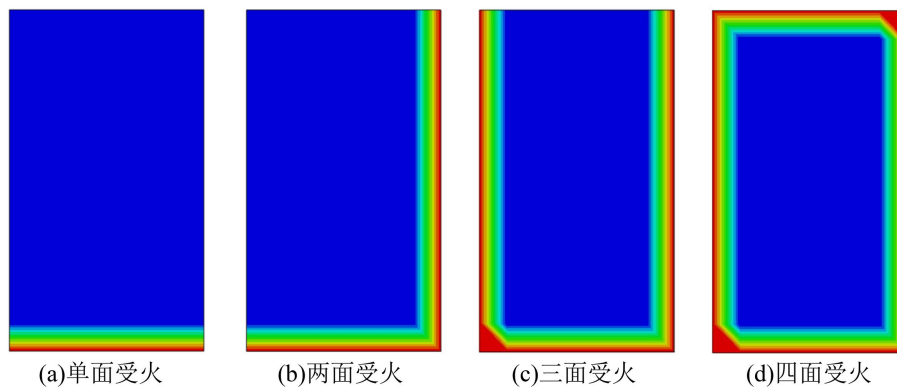


Figure 5. Temperature field distribution under different fire scenarios
图5. 不同火灾模式下的温度场

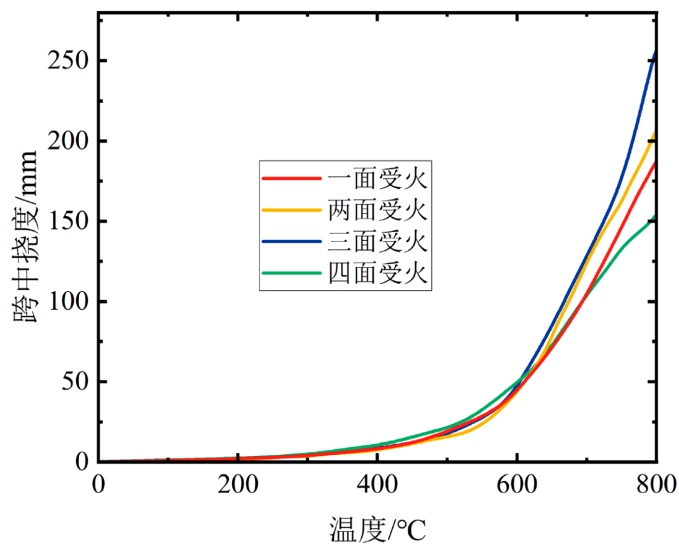


Figure 6. The influence of different fire exposure forms on deflection
图6. 不同受火形式对挠度的影响

图6为不同受火形式下梁的挠度-温度曲线。由图6可知,不同受火方式下,RC梁跨中挠度演化规律存在显著差异,这是由于受火面与截面温度分布不同。一面受火时,梁体底面温度快速升高,顶面温度较低,截面温度梯度大,热胀差异引发的弯曲变形明显,跨中挠度随受火时间缓慢增大,变形以弯曲

为主。两面受火时，受火面积增加，热量传导加快，但整体温度升高更为显著，材料强度退化加快，跨中挠度增长速率高于一面受火。三面受火时，梁体三面受热，热量向内部传导更充分，截面温度分布更均匀，热胀变形增加，跨中挠度增长速率进一步提升。四面受火时，梁体周身受热，截面温度均匀性最优。但是由于 RC 梁顶面受火，跨中挠度增长减小，后期挠度值最最小。

4.2. 钢筋配筋率

不同纵筋直径对 RC 梁跨中挠度演化规律影响显著，取决于纵筋对梁体抗拉承载力的增强作用及对变形的约束能力。通过调整钢筋直径来改变组合梁内的钢筋配筋率，取纵筋直径分别为 0 mm、10 mm、14 mm、20 mm。

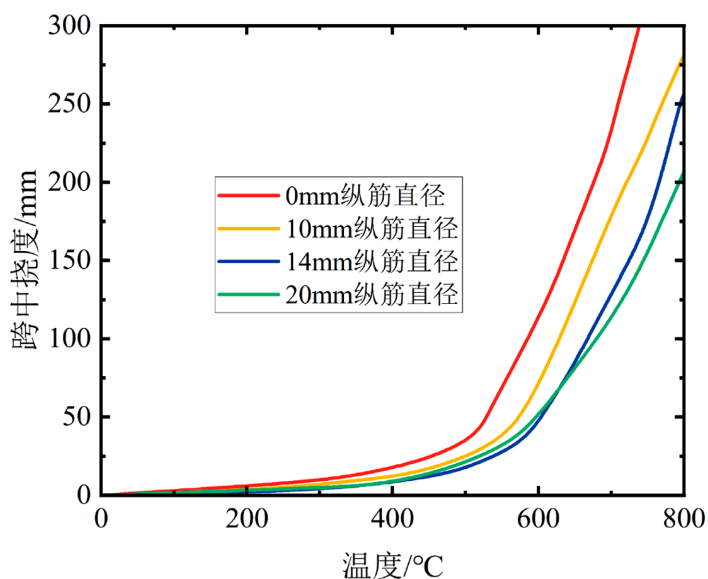


Figure 7. The influence of different reinforcement ratios on deflection

图 7. 不同配筋率对挠度的影响

如图 7 所示，纵筋直径为 0 mm 时，梁体无纵筋约束，抗拉性能极差，跨中挠度增长最快，后期挠度值最大，易发生脆性破坏。纵筋直径为 10 mm 时，梁体具备基础抗拉能力，对挠度的约束作用较弱，跨中挠度增长速率较快，后期因纵筋强度退化，挠度仍有明显上升。纵筋直径增至 14 mm 时，抗拉承载力显著提升，对梁体变形的约束作用增强，跨中挠度增长速率放缓，挠度值明显小于纵筋直径为 0 mm 时。纵筋直径为 20 mm 时，纵筋抗拉性能最优，对梁体变形的约束作用最强，跨中挠度增长最慢，后期挠度值最小，梁体抗变形能力最优。

4.3. 升温时间

不同升温时间对 RC 梁跨中挠度的影响显著，设定最终温度与初始温度一致，分析 30 分钟、45 分钟、60 分钟、75 分钟四种升温时间下的挠度演化规律，升温速率直接影响了梁体材料强度退化程度。

从图 8 可以看出，升温时间 30 分钟时，升温速率最快，梁体受火面与内部温度差显著，跨中挠度快速上升，后期降温至初始温度后，挠度虽有回弹但残余变形较大。45 分钟和 60 分钟升温组，升温速率放缓，温度传导更充分，截面温度分布更均匀，挠度增长速率依次降低。90 分钟升温组升温速率最慢，RC 梁材料强度退化更平缓，跨中挠度增长最缓，降温后残余变形最小。

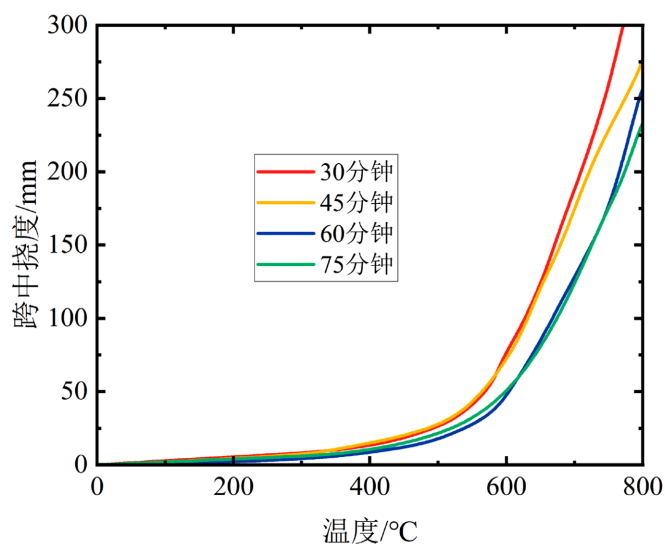


Figure 8. The influence of different heating times on deflection

图 8. 不同升温时间对挠度的影响

4.4. 梁截面尺寸

不同梁截面尺寸对 RC 梁跨中挠度的影响显著, 决定了截面惯性矩大小, 对抗弯承载力及对变形的约束能力有不可忽视的影响。研究 200×200 mm、 200×350 mm、 350×350 mm、 350×600 mm 四种截面尺寸下的跨中挠度演化规律。

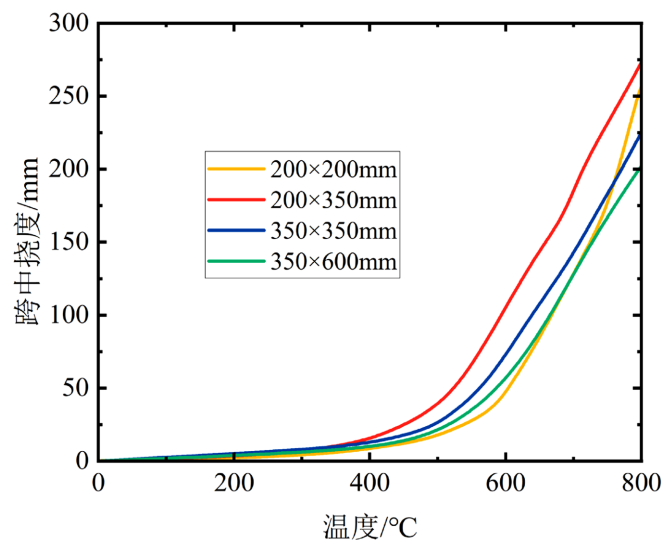


Figure 9. The influence of different beam cross-sectional dimensions on deflection

图 9. 不同梁截面尺寸对挠度的影响

如图 9 所示, 截面尺寸为 200×200 mm 时, 截面惯性矩最小, 抗弯刚度最弱, 跨中挠度增长最快, 受火后材料强度退化进一步削弱梁体刚度, 后期挠度值最大, 易因挠度过大发生变形破坏。 200×350 mm 截面相较于 200×200 mm 截面, 高度显著增加, 惯性矩大幅提升, 抗弯承载力增强, 跨中挠度增长速率

明显放缓, 挠度值显著减小。 350×350 mm 正方形截面, 宽度与高度均有所增加, 刚度进一步提升, 对变形的约束作用更强, 跨中挠度增长更缓, 挠度值小于 200×350 mm 截面。 350×600 mm 截面高度最大, 截面惯性矩和抗弯刚度最优, 对梁体变形的约束作用最强, 跨中挠度增长最慢, 后期挠度值最小, 梁体抗变形性能最优。发现截面尺寸直接决定抗变形能力越强, 跨中挠度越小, 且截面高度对挠度的影响相较于截面宽度更为显著。

5. 结论

本文采用 ABAQUS 有限元软件, 基于顺序热力耦合方法建立 RC 梁数值模型, 通过与试验数据对比验证了模型的准确性, 围绕受火方式、纵筋直径、升温时间及梁截面尺寸四种关键参数, 系统分析了火灾下 RC 梁跨中挠度演化规律, 得出以下主要结论:

(1) 所建立的 RC 梁有限元模型可有效模拟火灾下构件的温度场及力学响应, 模拟结果与试验实测值偏差在可接受范围内, 能够准确反映 RC 梁的实际受火性能。

(2) 不同参数对 RC 梁跨中挠度影响显著: 受火方式上, 三面受火时挠度增长最快, 四面受火最慢, 受火面越多、温度分布越均匀; 纵筋直径越大, RC 梁抗拉能力及变形约束越强, 挠度越小, 无纵筋时梁体易发生脆性破坏; 升温时间越长, 升温速率越慢, 挠度增长越缓, 变形越小; 截面尺寸越大, 梁体刚度及抗弯承载力越强, 挠度越小, 且截面高度对挠度的影响大于宽度。

(3) 火灾下 RC 梁跨中挠度演化与温度场、材料强度退化密切相关, 温度梯度引发的热胀差异及约束变形是产生挠度的主要原因, 材料强度随温度升高的退化进一步加剧挠度增长。本文研究结论可为火灾下 RC 梁的防火设计、性能评估及优化提供科学依据, 弥补现有研究中精细化规律探究的不足。

参考文献

- [1] 刘泽剑, 王玉镯, 徐天贵, 等. 钢筋混凝土结构抗火性能研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(4): 976-996.
- [2] 郑玺铭, 刘召伟, 张秀彦, 等. 火灾后钢筋混凝土叠合梁残余抗弯性能研究[J]. 建筑科学, 2026, 42(1): 75-85.
- [3] 姜超, 戈雨晴, 顾祥林, 等. 碳化和锈蚀混凝土结构的抗火性能[J]. 土木工程学报, 2025, 58(11): 1-12.
- [4] 巴光忠, 薛高擎, 杨蒙, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁受火后抗剪性能研究[J/OL]. 工程力学, 2025: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250303.1705.027>, 2026-04-27.
- [5] 刘才玮, 杨蒙, 李康, 等. 不同冷却方式下受火钢筋混凝土梁抗弯性能研究[J/OL]. 工程科学与技术, 2024: 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20241008.1545.006>, 2026-04-27.
- [6] 卢丽敏, 王守兴, 吴少华, 等. 高温下钢筋混凝土梁-柱节点的力学性能演化机制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 571-577.
- [7] 丁发兴, 姚飞, 李喆, 等. 高温下钢筋混凝土简支梁的抗火性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(10): 1476-1481.
- [8] 仇培云, 臧建波, 王新祥. 矩形螺旋箍筋对矩形钢管混凝土柱抗火性能的提升作用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2026, 54(2): 123-132.
- [9] 邱源, 刘猛, 初磊. 火灾下钢筋混凝土梁温度场的数值模拟[J]. 建筑科学, 2016, 32(1): 17-21.
- [10] 王振清, 朱大雷, 韩玉来, 等. 火灾下钢筋混凝土结构热弹塑性变形分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 78-83.