

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240321001

钢筋混凝土结构抗火性能研究进展*

刘泽剑¹, 王玉镯¹, 徐天贵², 巩俊林³

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 随着建筑火灾的频繁发生, 钢筋混凝土结构发生火灾的情况也日益增多。在火灾中建筑材料的力学性能降低将导致钢筋混凝土结构发生破坏甚至倒塌。前期人们对钢筋混凝土梁、柱和节点的抗火性能进行了试验研究。由于试验条件不同, 其耐火极限计算公式在不同试验条件下的计算精度较低。因此, 文章综述了钢筋混凝土梁、柱、节点和框架抗火性能等方面的研究并进行了梳理, 考虑了混凝土保护层厚度、荷载比和配筋率等试验参数对耐火极限的影响, 回顾了杆系模型、Rankine方法和刚度法等理论分析方法的研究进展, 总结了有限元分析和耐火极限计算公式的研究进展。结果表明: 钢筋混凝土梁的耐火极限受荷载比、混凝土保护层厚度和配筋率等参数的影响较大, 钢筋混凝土柱的耐火极限受荷载比和荷载偏心率等参数的影响较大, 钢筋混凝土节点的耐火极限则取决于节点周边钢筋混凝土梁、柱的耐火极限。此外, 还收集了129篇文献的试验数据并归纳了荷载比、混凝土保护层厚度和配筋率等试验参数对耐火极限的影响规律, 对不同条件的试验结果进行了统一化规制并对其耐火极限进行了参数相关性分析, 选取了相关性大于0.1的参数作为影响耐火极限的重要参数。通过机器学习和非线性回归分析方法, 提出了钢筋混凝土梁和柱的耐火极限计算公式, 其 R^2 分别为0.935和0.895, 计算结果与实验结果吻合较好, 表现出较高的准确性, 为钢筋混凝土结构的抗火设计提供可靠参考。

关键词: 钢筋混凝土结构; 抗火性能; 机器学习; 耐火极限计算公式

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0976-21

Research Progress on Fire Resistance of Reinforced Concrete Structures

LIU Zejian¹, WANG Yuzhuo¹, XU Tiangu², GONG Junlin³

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 540641, China)

Abstract: With the increasing frequency of building fires, the occurrence of fire incidents in reinforced concrete (RC) structures has become more frequent. The deterioration of mechanical properties of building materials in fire incidents can lead to the failure or even collapse of RC structures. Previous studies have conducted tests on the fire resistance of RC beams, columns, and joints. Due to varying test conditions, the accuracy of the fire resistance limit calculation formulas is relatively low under different test scenarios. Therefore, this study reviews and summarizes research on the fire resistance of

* 收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878397)资助

作者简介: 刘泽剑(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事工程结构抗火研究。E-mail: zejianliu2023@163.com

通信作者: 王玉镯(1973—), 男, 教授, 硕士, 博士。主要从事工程结构抗火、木结构方面的研究。

E-mail: yuzhuowang@163.com

RC beams, columns, joints, and frames. It considers the influence of test parameters such as concrete cover thickness, load ratio, and reinforcement ratio on the fire resistance limit. Additionally, this study reviews the research progress on theoretical analysis methods such as the strut-and-tie model, Rankine method, and stiffness method, and summarizes recent advances in finite element analysis and fire resistance limit calculation formulas. The results show that the fire resistance limit of RC beams is significantly influenced by parameters such as load ratio, concrete cover thickness, and reinforcement ratio. The fire resistance limit of RC columns is significantly affected by parameters such as load ratio and load eccentricity ratio. The fire resistance limit of RC joints depends on that of the surrounding RC beams and columns. In addition, test data from 129 studies are collected, and the influence patterns of parameters such as load ratio, concrete cover thickness, and reinforcement ratio on the fire resistance limit are summarized. The test results under different conditions are standardized, and a parameter correlation analysis of the fire resistance limit is conducted. Parameters with a correlation greater than 0.1 are selected as key factors influencing the fire resistance limit. The fire resistance limit calculation formulas for RC beams and columns are proposed using machine learning and regression analysis, with R^2 of 0.935 and 0.895, respectively. The calculated results demonstrate strong agreement with test data, exhibiting high accuracy and providing reliable references for the fire-resistant design of RC structures.

Keywords: reinforced concrete structure; fire resistance; machine learning; fire resistance limit calculation formula

0 引言

钢筋混凝土结构由于其耐久性、整体性和经济性等优点在建筑中被广泛应用,但在火灾中,其力学性能会遭受严重损伤。当结构的受火温度达到 500 °C 时,钢筋的屈服强度会降低至室温强度的 40%~60%,当温度达到 800 °C 时,混凝土的抗压强度仅为室温强度的 20%^[1]。钢筋混凝土梁、柱和节点作为钢筋混凝土结构的主要承重构件,在火灾中其材料性能的显著下降可能导致建筑物局部甚至整体倒塌。因此,钢筋混凝土梁、柱和节点的耐火极限将决定整个结构的防火性能,由于建筑火灾的频繁发生,钢筋混凝土梁、柱和节点的防火性能备受关注。

文章首先对国内外钢筋混凝土梁、柱、节点和框架的防火性能研究进行了文献综述。随后,基于文献中的试验数据,提出了钢筋混凝土梁、柱的耐火极限计算公式。

1 钢筋混凝土梁防火性能研究进展

钢筋混凝土梁作为结构的主要承重构件,其耐火极限将决定整个结构的防火性能,在结构防火设

计的需求下,不少学者对其防火性能开展了研究。因此,文章共收集了 71 篇钢筋混凝土梁防火性能文献,根据钢筋混凝土梁端部约束条件不同,从简支梁和连续梁两个方面对其试验研究和理论研究进行了综述。

1.1 简支梁

1.1.1 简支梁的试验研究

(1) 混凝土保护层厚度

早期的试验研究均考虑了保护层厚度对耐火极限的影响,随着混凝土保护层厚度增加,钢筋混凝土梁的耐火极限显著提高^[2-10]。随后,部分研究考虑了侧面和底部不同保护层厚度的影响,相比于增加侧面保护层厚度,增加底部保护层厚度对耐火极限的提升更显著^[6,11]。还有不少研究考虑了过度增加保护层厚度对耐火极限的影响,发现过度增加混凝土保护层厚度对耐火极限的提升作用是有限的,因为钢筋混凝土梁在荷载作用下通常处于细微裂纹状态^[2,6,11]。

(2) 荷载比

对于普通强度混凝土(Normal Strength Concrete, NSC)梁,早期的试验研究均考虑了荷载比耐火极限的影响,随着荷载比增加,耐火极限显著降低,特别是当荷载比超过 0.5 时,荷载比对耐火极限

的影响更显著^[7-14]。对于高强混凝土(High Strength Concrete, HSC)梁,当荷载比小于0.5时,耐火极限取决于底部中间钢筋的受火时间,但随着荷载比的增加,耐火极限逐渐取决于底部角部钢筋的受火时间,特别是当荷载比大于0.5时,耐火极限完全由角部钢筋控制,此时耐火极限不再随着荷载比的增加而变化^[15]。

(3)受拉钢筋配筋率和配箍率

早期的试验研究均考虑了配筋率的影响,随着受拉钢筋配筋率增加,钢筋混凝土梁的耐火极限逐渐提高^[16-20]。随后,部分研究考虑了钢筋直径的影响,当采用大直径钢筋作为受拉钢筋时,配筋率对耐火极限的提升作用会被抵消^[21]。因此,在相同的配筋率下采用小直径钢筋以提高配筋率,可以显著提高耐火极限。此外,当纵向钢筋的搭接长度满足澳洲规范 AS3600^[22]等相关规范的要求时,可以忽略钢筋搭接长度对耐火极限的影响。

早期的试验研究发现,随着配箍率的增加,钢筋混凝土梁的耐火极限略微提高^[17,23-25]。随后,部分研究对比了增加箍筋直径和减小箍筋间距对耐火极限的提升作用,发现在相同配箍率下减小箍筋直径对耐火极限的影响更为显著^[23]。

(4)剪跨比

早期的试验研究发现,随着剪跨比增加,钢筋混凝土梁的耐火极限逐渐降低^[5,24,26]。随后,部分研究考虑了剪跨比对长梁和短梁的影响,发现在火灾下长梁和短梁的破坏模式不同,剪跨比对耐火极限的影响也不同。对于短梁,随着剪跨比增加,构件发生剪切破坏,导致耐火极限降低。特别是当剪跨比超过2.5时,短梁会发生剪拉破坏,导致耐火极限进一步降低^[13,27]。对于长梁,随着剪跨比的增加,构件的破坏模式会从弯曲破坏转变为弯剪破坏,脆性特征更明显,导致耐火极限降低。但当长梁发生弯曲破坏时,剪跨比对耐火极限的影响会减弱^[5,24]。

(5)跨高比和梁宽

随着跨高比增加,钢筋混凝土梁的耐火极限显著降低^[15,28-29]。随着梁宽增加,耐火极限略微提高,特别是当梁宽超过250 mm时,梁宽对耐火极限的影响会降低^[2]。

(6)混凝土类型

在不同混凝土类型下,钢筋混凝土梁在火灾中会发生不同程度的混凝土剥落现象,这会显著影响其耐火极限。HSC梁、活性粉末混凝土(Reactive

Powder Concrete, RPC)梁和超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)梁在火灾中表现出显著的剥落现象,而NSC梁未表现出明显的剥落^[30-31]。在相同条件下,NSC梁的耐火极限显著高于HSC梁、RPC梁和UHPC梁的耐火极限^[32-35]。

(7)混凝土含水率

随着混凝土含水率增加,钢筋混凝土发生爆裂的概率增加,钢筋混凝土梁的耐火极限降低。特别是当含水率超过2.5%时,剥落现象更严重,导致耐火极限进一步降低^[36-37]。相比于NSC梁,HSC梁在相同含水率下发生的剥落更严重,其耐火极限显著降低^[38]。

(8)混凝土骨料类型

钢筋混凝土梁的骨料类型主要包括碳酸盐骨料、钢渣骨料和硅酸盐骨料。当钢筋混凝土梁发生弯曲破坏时,碳酸盐骨料梁的耐火极限高于硅酸盐骨料梁的耐火极限,因为碳酸盐骨料中的白云石在高温下发生解离吸热反应,导致混凝土的热容量增加,从而提高了耐火极限^[39]。当钢筋混凝土梁发生剪切破坏时,混凝土骨料的耐磨性越好,梁的抗剪性能越强,其耐火极限也越高,因此,碳酸盐骨料、钢渣骨料和硅酸盐骨料梁的耐磨性依次降低,其耐火极限也依次减小^[40]。

(9)其他参数

除上述参数外,钢筋锈蚀、混凝土碳化、混凝土徐变等参数对耐火极限有明显影响。

钢筋在长期的酸性环境下会被锈蚀,随着钢筋锈蚀程度的加深,钢筋混凝土梁的耐火极限逐渐降低^[41-43]。锈蚀后钢筋混凝土梁的破坏模式与未锈蚀梁基本一致,但破坏过程中的脆性特征显著增加^[43]。

混凝土在长期使用中会发生碳化现象,随着碳化程度加深,钢筋混凝土梁的细裂缝增加,内部钢筋的温度升高,导致耐火极限降低^[36-37]。

在长期荷载作用下,混凝土的徐变增加,梁的跨中挠度逐渐增大,裂缝进一步开展,钢筋的温度升高,导致耐火极限降低^[44-49]。当挠度增大到使钢筋屈服、剪切裂缝超过2 mm或拉伸裂缝超过10 mm时,耐火极限显著降低。此外,构件的尺寸越大,混凝土徐变对耐火极限的影响越显著^[45]。

1.1.2 简支梁的理论分析

对于长梁和短梁,分别采用有限拆分法(Finite

Difference Method, FDM) 和 杆 模 型 (Strut-and-Tie-Model, STM) 以研究其抗火性能。对于长梁, B.A. Gedam^[50]提出了一种结合 FDM 和材料强度折减法的计算方法以评估其耐火极限。该方法通过 FDM 计算温度场分布,同时结合材料强度折减法,确定不同温度下各材料的折减系数,并将其代入力学性能计算公式中,从而得出构件的耐火极限。对于短梁,火灾引发的热梯度和混凝土膨胀可能会引起不连续应力和热应力的出现,特别是在非对称荷载作用下,钢筋混凝土梁会表现出更复杂的剪切机制。在这种情况下,STM被认为是模拟构件内部复杂剪切机制的有效方法,它可以准确地反映构件内部应力流动的传递路径。S. Fan等^[51]采取 STM 对钢筋混凝土梁在非对称荷载作用下的抗火性能进行了分析,该方法同时考虑了非对称荷载、热梯度和钢筋对承载力的影响,能够更全面地评估钢筋混凝土梁在剪切破坏下的耐火极限。

1.1.3 简支梁的有限元分析

钢筋混凝土梁在火灾中的有限元分析主要包括以下两个方面:温度场模拟和耐火极限分析。对于温度场模拟,早期的有限元分析采用二维温度场模型,并使用 Newton-Raphson 程序分析抗火性能^[52-53]。随着抗火研究的发展,H. Ohashi等^[54]提出采用三维模型以模拟钢筋混凝土梁在火灾中的温度场分布,该三维模型能够更真实地反映构件内部的温度分布情况,有助于准确地评估构件在火灾中的耐火极限。

对于耐火极限分析,V. Kodur等^[39,55-56]提出采取有限元分析以计算钢筋混凝土梁的耐火极限,并综合考虑不同施加荷载、火灾场景和破坏标准的影响。该方法基于火灾情景分析、传热分析和强度分析这三个阶段建立了有限元模型。数值计算依次为:温度场的计算、弯矩-曲率关系的生成、构件变形和强度的计算,并采取承载力、钢筋温度、变形和变形率四个破坏准则以确定耐火极限。随后,为了准确计算易发生混凝土剥落梁的耐火极限,开始将剥落分析纳入耐火极限分析中。M.B. Dwaikat等^[57]建立了基于水热分析的有限元模型以研究剥落对耐火极限的影响。该模型采用水热分析方法以估算混凝土截面上的孔隙压力,当孔隙压力超过其抗拉强度时,混凝土就会发生剥落,特别是 HSC 梁。由于其低渗透性,易受混凝土剥落的影响,当渗透性低于 10^{-19} m^2 时,孔隙压力迅速增加,导致混凝土

剥落,从而显著降低耐火极限。随着抗火研究的发展,V. Kodur等^[58]、P. Ren等^[59]提出了同时考虑热梯度、孔隙压力和结构荷载影响的剥落模型。特别是对于 RPC 和 UHPC 梁,耐火极限的计算精度明显提高。随后,C. Liu等^[60]、C. Guergah等^[61]对剥落深度和剥落面积比进行了研究。随着剥落深度的增加,耐火极限显著降低,但随着剥落面积比的增加,耐火极限的降低速率变缓。

1.2 连续梁

1.2.1 连续梁的试验研究

在不同的端部约束条件下,连续梁的耐火极限和破坏机理比简支梁更复杂^[24,62]。相比于简支梁,连续梁需要进一步研究单跨或多跨受火条件对耐火极限的影响。在相同条件下,连续梁在多跨受火下的耐火极限明显低于单跨受火^[63-65]。在受火过程中,连续梁会经历内力重分布现象,该现象可分为两个阶段:混凝土膨胀阶段和塑性铰阶段^[65]。随着荷载比的增加,连续梁会从混凝土膨胀阶段加速进入塑性铰阶段^[66]。在塑性铰阶段,应力从跨中传递到中间支座,形成塑性铰机构^[62]。此外,在内力重分布的影响下,连续梁的耐火极限普遍高于简支梁^[63]。

随着梁的轴向约束和转动约束的刚度增加,其耐火极限逐渐提高,但当梁的转动约束刚度增加到一定程度时,转动约束对梁耐火极限的提升作用降低^[28,67-70]。受约束的连续梁在火灾中会发生以下三种弯曲破坏现象:当梁的转动约束刚度小于 0.022 kN/m 时,其破坏现象为跨中弯曲破坏;当梁的转动约束刚度在 $0.022 \sim 0.045 \text{ kN/m}$ 时,其破坏模式仍为弯曲破坏,但破坏从跨中向端部转移,破坏现象为受拉钢筋断裂引起的端部破坏;当梁的转动约束刚度在 $0.045 \sim 0.064 \text{ kN/m}$ 时,其破坏现象变为混凝土压碎和端部顶部钢筋断裂,梁在破坏过程中的脆性显著增加。当梁的转动约束刚度超过 0.064 kN/m 时,具有较大挠度的梁中会产生悬链线作用,在梁顶部的钢筋中形成连续的拉伸路径,从而提高耐火极限^[68]。

1.2.2 连续梁的理论分析和有限元分析

在理论分析方面,S. Fan等^[27]通过 STM 对轴约束影响下连续梁的抗火性能进行了分析。通过温度场分析、构件划分、热约束力估算、承载力计算 4 个步骤建立了理论模型,并通过对比极限承载力

以确定耐火极限。在有限元分析方面,F. Ding等^[4]通过传热分析和力学分析研究连续梁的抗火性能。为了考虑水分损失对传热分析的影响,该模型适当增大了混凝土的比热系数,特别是当放大系数为1.3时,可以忽略水分损失的影响。此外,M. B. Dwaikat等^[71-72]建立了考虑混凝土剥落的有限元模型。该模型通过温度场分析、传热分析和强度分析三个步骤建立,并通过考虑影响剥落的参数和材料,将混凝土剥落纳入强度分析中,从而可以准确计算连续梁在发生混凝土剥落后的耐火极限。

综上所述,本文从梁端的约束条件和参数两个方面进行了总结。钢筋混凝土梁的简支、连续约束条件对其抗火性能有显著影响,荷载比、混凝土保护层厚度和配筋率等参数对耐火极限影响较大,而箍筋间距等参数对耐火极限影响较小。目前,各试验的升温曲线和约束条件等存在差异,导致各试件耐火极限的精确度和适用范围不同,因此,本文后续将采取机器学习方法对收集的钢筋混凝土梁试验数据进行参数分析,以准确研究各参数对试件耐火极限的影响程度,并对其耐火极限进行预测。

2 钢筋混凝土柱抗火性能研究进展

钢筋混凝土柱主要承受结构的竖向荷载,当其达到耐火极限时结构的竖向承载能力显著降低,这将严重影响结构安全,在结构抗火设计的需求下,不少学者对其抗火性能开展了研究。因此,文章共收集了58篇钢筋混凝土柱抗火性能的文献,根据研究方法不同,分别从试验研究、理论研究两个方面对钢筋混凝土柱的抗火性能进行了综述。

2.1 试验研究

2.1.1 荷载比

随着荷载比增加,钢筋混凝土柱的耐火极限显著降低^[73-78]。当荷载比从0.2增加到0.6时,耐火极限降低9%~65%^[79],当荷载比从0.6增加到0.8时,耐火极限降低20%~40%^[80]。此外,随着荷载比的增加,混凝土剥落的程度显著增加,导致耐火极限进一步降低^[75]。

2.1.2 荷载偏心距和偏心角

早期的研究考虑了荷载偏心距对单向和双向弯曲钢筋混凝土柱耐火极限的影响。对于单向弯曲的钢筋混凝土柱,当荷载偏心距从0 mm增加到

25 mm时,耐火极限降低20%^[77,81-82]。对于双向弯曲的钢筋混凝土柱,当荷载偏心距从0 mm增加到25 mm时(偏心角为45°),耐火极限降低30%^[81,83-85]。随后,部分研究考虑了荷载偏心距对不同骨料类型柱耐火极限的影响,发现碳酸盐骨料柱的耐火极限受荷载偏心距的影响较大,而硅酸盐骨料柱的耐火极限受荷载偏心距的影响较小^[86]。

偏心角对双轴对称截面柱和单轴对称截面柱的影响是不同的。对于双轴对称截面柱(如矩形柱和方形柱),在相同荷载偏心率下,随着偏心角增加(0°~45°),耐火极限略微提高^[80]。对于单轴对称截面柱(如L形柱和T形柱),由于沿不同偏心角的截面惯性矩不同,偏心角对耐火极限的影响较复杂^[85,87]。

2.1.3 混凝土保护层厚度

随着混凝土保护层厚度增加,钢筋所受温度降低,耐火极限显著提高^[73,75]。此外,混凝土保护层在高温下容易开裂,特别是当混凝土保护层沿纵向钢筋开裂破坏时,耐火极限进一步降低^[88]。

2.1.4 纵筋配筋率和配箍率

早期的研究考虑了纵筋配筋率的影响,发现随着纵筋配筋率增加,耐火极限逐渐提高^[75,85-86]。当纵筋配筋率从1.23%增加到3.14%时,耐火极限可提高35.6%^[75]。随后,部分研究考虑了纵向钢筋直径对其耐火极限的影响,发现小直径钢筋在混凝土内部的传热系数相对较低,而大直径钢筋由于其高导热系数,使得纵筋配筋率对耐火极限的影响降低。当纵向钢筋直径大于25 mm时,增加配筋率对耐火极限的影响不明显^[73,75]。因此,通过均匀配置小直径钢筋以增加纵筋配筋率,可以显著提高耐火极限^[75]。

早期的研究考虑了配箍率的影响,发现随着配箍率增加,耐火极限略微提高^[89-90]。当配箍率从0.17%增加到0.67%,耐火极限可提高9%^[89]。随后,将配箍率对耐火极限的影响进一步细化,研究了不同箍筋配置的影响,发现在相同条件下,配置斜拉箍筋的构件比未配置斜拉箍筋的构件具有更高的耐火极限^[91];在相同条件下,箍筋弯折135°的构件比箍筋弯折90°的构件具有更高的耐火极限^[92],因为135°弯折箍筋限制了钢筋混凝土柱的应力松弛,增加了箍筋对混凝土核心的约束应力,从而提高了耐火极限。

2.1.5 柱宽和截面高宽比

随着柱宽增加,耐火极限显著提高^[73]。因为混凝土核心的温度随着柱宽的增加而降低,从而提高了耐火极限。在相同条件下,柱宽每增加 100 mm,钢筋混凝土柱的耐火极限约提高 40%^[78]。

随着截面高宽比增加,耐火极限逐渐提高^[85-87]。当高宽比从 2 增加到 3 时,耐火极限提高 31%,当高宽比从 3 增加到 4 时,耐火极限仅提高 14%^[87]。当高宽比增加到一定程度时,高宽比对耐火极限的影响降低。

2.1.6 有效长度

早期的试验研究了有效长度对钢筋混凝土长柱耐火极限的影响,发现随着钢筋混凝土长柱的有效长度增加,耐火极限逐渐降低^[86]。后续研究对钢筋混凝土短柱的有效长度也开展了抗火试验,发现短柱的耐火极限随着有效长度的增加而保持不变,因为短柱在高温下的破坏模式仍为受压破坏,耐火极限保持不变;此外,当短柱的有效长度增加到接近于长柱时,短柱在火灾作用下的有效截面减小,从而,柱由短柱变为长柱,导致其破坏模式由压缩破坏变为屈曲破坏,从而降低了耐火极限^[73]。目前,对于导致短柱在火灾下变化为长柱的有效长度临界值还有待于进一步研究。

2.1.7 截面形状

在相同截面面积下,方形截面柱的耐火极限高于矩形截面柱^[93],方形截面柱和圆形截面柱之间耐火极限的差异可以忽略^[86]。对于异形柱,相同截面面积下,方形、十形、T形和 L形截面柱的耐火极限依次下降^[94]。总体上,在相同截面面积下,柱的截面形状越规则,其耐火极限越高。

2.1.8 受火面

在相同条件下,三面受火的 HSC 柱比四面受火的 HSC 柱具有更高的耐火极限。因为在不同受火面下柱的高温损伤面积不同,混凝土在四面受火下的材料劣化更为严重,混凝土剥落程度增加,耐火极限显著降低。在相同条件下,相邻两面受火的 HSC 柱比相对两面受火的 HSC 柱具有更高的耐火极限。当受火面发生剥落时,相邻面的角部也可能发生剥落。相邻两面受火柱中有两个角部发生剥落,而相对两面受火柱有四个角部发生剥落,因此,相对两面受火柱的剥落程度显著增加,从而降低了耐火极限^[95]。

此外,部分研究^[81,96-98]从受力状态上分析了受火

面对耐火极限的影响,在相同条件下,单面或三面受火柱的耐火极限低于四面受火柱的耐火极限。因为混凝土在高温下的破坏导致柱截面质心位置的变化,从而使钢筋混凝土柱由轴心受压变为偏心受压,降低了耐火极限。在相同条件下,与单面或三面受火柱相比,相邻两面受火柱的耐火极限进一步降低^[81,97]。因为热梯度不沿轴线对称发展,钢筋混凝土柱受到双向弯曲,耐火极限进一步降低。在相同条件下,相对两面受火柱的耐火极限高于四面受火柱的耐火极限^[81]。因为热梯度沿双轴对称发展,混凝土截面的温度降低,耐火极限提高。总体上,具有相对两面、四面、三面、单面和相邻两面受火柱的耐火极限依次降低。

2.1.9 混凝土骨料类型

混凝土的骨料类型主要分为碳酸盐骨料、硅酸盐骨料和膨胀页岩骨料。碳酸盐骨料柱比硅酸盐骨料柱具有更高的耐火极限。因为当温度超过 600 °C 时,碳酸盐骨料中白云石离解的吸热反应增加了热容量^[77,86,99]。相比之下,硅酸盐骨料和膨胀页岩骨料在高温下表现出相似的热性能,因此硅酸盐骨料柱与膨胀页岩骨料柱具有相近的耐火极限^[86]。

不同类型的混凝土在高温下表现出不同程度的剥落,这导致了耐火极限的差异。NSC 柱的耐火极限高于 HSC、RPC 和 UHPC 柱^[99-102]。因为 HSC、RPC 和 HPC 柱的低渗透性,在升温过程中难以去除试件中的水分,导致混凝土发生剥落,从而显著降低耐火极限。

2.1.10 其他参数

除上述参数外,轴向约束、混凝土含水率、钢筋锈蚀对耐火极限的影响被总结如下。

早期的试验研究了不同轴向约束刚度对耐火极限的影响,对于配筋率和截面尺寸较小的钢筋混凝土柱,其在高轴向约束刚度(45 kN/mm)下的耐火极限相比于低轴向约束刚度(13 kN/mm)柱提高了 18.4%^[75]。对于配筋率和截面尺寸较大的钢筋混凝土柱,其在高轴向约束刚度(45 kN/mm)下的耐火极限相比于低轴向约束刚度(13 kN/mm)柱降低了 17.8%^[75]。随后,部分研究考虑了轴向约束对不同强度钢筋混凝土柱的混凝土剥落和耐火极限的影响,发现提高 NSC 柱的轴向约束刚度可以增加混凝土的剥落程度,从而降低耐火极限;增加 HSC 柱的轴向约束刚度会降低混凝土的剥落程度,从而提高耐火极限^[103-105]。

随着混凝土含水率的增加,钢筋混凝土柱在火灾下会经历更严重的混凝土剥落,从而降低了耐火极限。在相同含水率下,HSC柱的混凝土剥落比NSC柱更严重,导致HSC柱的耐火极限低于NSC柱^[106]。

随着钢筋锈蚀程度增加,钢筋混凝土柱的耐火极限降低。当锈蚀裂缝发展到0.2 mm时,耐火极限降低41.7%^[107]。

2.2 理论分析

钢筋混凝土柱在火灾下的理论分析方法包括Rankine方法、P-M曲线法和刚度法(Nominal Stiffness Method, NSM),总结如下:

(1) Rankine方法

K. H. Tan等^[108]采用传统的Rankine方法对钢筋混凝土柱的耐火极限进行了预测。该方法仅考虑了压缩破坏和屈曲破坏的单一作用,却忽略了这些破坏模式之间的耦合作用。随后,Y. Yao等^[109]提出了改进的Rankine方法以考虑不同破坏模式之间的耦合作用。通过公式推导将不同破坏模式之间的耦合作用引入Rankine公式中,从而可以准确预测构件的耐火极限。

(2) P-M曲线法

对于短柱,早期的P-M曲线通过计算截面切线刚度建立^[110]。然而,由于需要将柱划分为若干层,该方法的计算过程相对复杂。随后,S. F. El-Fitany等^[111]提出了一种简化的P-M曲线,将钢筋混凝土柱划分为几个区域进行应力分析,并推导出计算应力和力矩的数值方程,从而简化了P-M曲线的生成过程。考虑到不同截面形式,R. B. Caldas等^[112]提出了适用于不同截面形状的P-M曲线。基于混凝土和钢筋的极限应变值,通过逐步迭代不同截面形状以建立P-M曲线。随着抗火研究的发展,H. S. Kim^[113]采用序列二次规划(Sequential Quadratic Programming, SQP)算法计算不同截面形状的P-M曲线。该算法不需要考虑混凝土和钢筋的极限应变,将截面应变的计算转化为约束优化问题的求解,因此可以更快速地生成P-M曲线。

对于长柱,短柱的P-M曲线法并不适用,因为其未考虑二阶效应的影响。H. Kang等^[114]在早期研究中提出了考虑二阶效应的P-M曲线估算方法。然而,由于复杂的迭代过程,该方法难以用于实际设计。随后,D. H. Lee等^[115]提出了一种考虑二阶

效应的简化P-M曲线以用于实际设计。该方法将P-M曲线简化为折线仅需计算几个关键点,随后P-M关系由这些折线构成,因此该方法无需复杂的迭代计算即可进行耐火极限预测。

对于易发生混凝土剥落的钢筋混凝土柱,D. L. Pena等^[116]建立了考虑混凝土剥落的三维P-M曲线。该方法分析了混凝土保护层的剥落损失,并量化了混凝土剥落对耐火极限的不利影响,从而得到发生剥落后的耐火极限。

(3) 刚度法(NSM)

T. E. T. Buttignol等^[117]通过NSM将二阶效应产生的弯矩转换为等效轴向载荷,并将其与实际轴向载荷叠加,当叠加后的轴向荷载超过柱的极限荷载时,柱破坏从而获得其耐火极限。随后,M. Glowacki等^[118]通过NSM提出了一种简化的预测方法,将细长柱转换为偏心柱,并采取NSM计算了初始轴向力和二阶效应产生的偏心距,从而预测偏心柱的耐火极限。

2.3 有限元分析

钢筋混凝土柱在火灾下的有限元分析主要分为两个方面:温度场模拟和耐火极限分析。

(1) 温度场模拟

T. T. Lie^[93]、H. L. Zhu等^[119]、S. F. El-Fitany等^[120]采用有限差分法(Finite Difference Method, FDM)建立了早期的一维温度场模型,该模型考虑了水分的蒸发,但忽略了水分的迁移。随后,K. A. Mahmoud等^[121]、魏德敏等^[122]提出了二维温度场模型,该模型通过对瞬态温度、含水量和孔隙压力分布进行热计算以考虑水分迁移。随着抗火研究的发展,苗吉军等^[88]、项凯等^[123]建立了三维有限元模型以模拟温度场,三维模型可以很好地模拟柱表面的对流和辐射传热过程。

(2) 耐火极限分析

K. H. Tan等^[76,103]采用有限元模型以预测钢筋混凝土柱的耐火极限,并通过修正热边界条件以模拟实际温度分布。然而,这些研究没有考虑高温蠕变、单向弯曲、双向弯曲和混凝土剥落对耐火极限的影响,导致试验结果与模拟结果之间存在差异。随着抗火研究的发展,不少学者对高温蠕变、单向弯曲、双向弯曲和混凝土剥落对耐火极限的影响进行了研究,总结如下。

对于高温蠕变,J. Hwang等^[124]、V. Kodur等^[125]

采用分层纤维截面法考虑了混凝土和钢筋在高温下的瞬态蠕变应变,以预测钢筋混凝土柱的耐火极限。随后,针对不同的火灾场景、荷载比和受火面,S. Alogla等^[126]通过有限元模型量化了高温蠕变对耐火极限的影响。

对于单向和双向弯曲柱,T. T. Nguyen等^[127]基于等效分布温度和轴向刚度修正系数的概念建立了有限元模型。该模型仅适用于短柱的耐火极限预测,并不适用于细长柱。随后,K. A. Mahmoud^[128]提出了细长柱的有限元模型以预测其耐火极限。该模型通过应变和曲率的同时迭代以计算横向挠度,并通过横向挠度的变化率确定耐火极限。此外,K. A. Mahmoud^[129]还提出了Newton-Raphson方法以预测细长柱的耐火极限。Newton-Raphson方法因其收敛速度快、精度高,被用于计算受火截面上的应变分布,从而提高了耐火极限预测的准确性。

考虑到混凝土剥落的影响,当混凝土内部的孔隙压力大于混凝土抗拉强度时,钢筋混凝土柱会发生剥落现象,采用水热分析方法建立模型以估算截面孔隙压力^[79,100]。但这些模型的计算过程相对复杂,难以在实际中应用。随后,U. Bajc等^[130]提出了考虑剥落的简化模型以应用于实际设计,采用了各种经验模型以估算混凝土剥落,并将水热分析和力学分析同时进行,以提高简化模型的计算效率。

综上所述,本文对不同试验参数进行了总结。钢筋混凝土柱的荷载比和荷载偏心率等参数对其耐火极限的影响较大,而配筋率和箍筋间距等参数对其耐火极限的影响较小。其理论研究从对试件的温度场分析、力学分析和耐火极限预测发展到混凝土剥落、高温蠕变等研究,将各参数对耐火极限的影响逐渐细化。然而,在试验和理论研究中,均存在升温曲线、约束条件以及材料参数等存在差异,导致各试件耐火极限的精确度和适用范围不同,因此,本文后续将采取机器学习方法对收集的钢筋混凝土柱试验数据进行参数分析,以准确研究各参数对试件耐火极限的影响程度,并对其耐火极限进行预测。

3 钢筋混凝土节点抗火性能研究进展

钢筋混凝土节点作为结构的主要传力构件,其抗火性能是整体框架抗火性能研究的重要方面,目

前,对于钢筋混凝土节点的抗火性能研究已取得了初步进展。因此,文章共收集了7篇钢筋混凝土节点抗火性能的文献,从试验研究和理论研究两个方面对钢筋混凝土节点的抗火性能进行了综述。

3.1 试验研究

钢筋混凝土节点抗火性能的试验研究主要是从梁端荷载比、梁端配筋率、柱端荷载比和梁柱刚度比参数进行研究,具体总结如下:

随着梁端荷载比增加,钢筋混凝土节点的耐火极限显著降低,当柱端荷载比保持不变时,梁端荷载比从0.4增加到0.5时,耐火极限降低10%^[131]。随着梁端配筋率增加,钢筋混凝土节点的耐火极限逐渐增加^[132]。此外,随着受火温度升高,节点梁的端部会发生塑性铰外移,且多数节点由于梁端位移达到最大挠度从而达到耐火极限,因此,梁端荷载比和配筋率对钢筋混凝土节点的耐火极限有着显著影响^[131-134]。

随着柱端荷载比增加,钢筋混凝土节点的耐火极限略微降低,当梁端荷载比保持不变时,柱端荷载比从0.14增加到0.23时,耐火极限降低5%^[131,135]。

随着梁柱刚度比增加,钢筋混凝土节点的耐火极限略微降低,当梁柱刚度比从0.54增加到1.02时,耐火极限降低了6%^[136-137]。这是因为结构的破坏主要集中在梁构件上,结构的耐火极限也是由梁的破坏确定,从而二者的耐火极限差别不大^[136]。

3.2 有限元分析

傅传国等^[131]、王玉镯等^[132]等对钢筋混凝土节点进行了火灾下的温度场分析和力学分析。通过温度场分析发现,由于钢筋混凝土节点处于梁、柱的包围区域内,试件的温度分布从外围向核心区方向逐渐降低,导致节点核心区的温度普遍低于周围梁、柱端的截面温度。通过力学分析发现,由于钢筋混凝土节点中梁构件的受火温度显著高于节点核心区的受火温度,梁端在高温下发生材料劣化,其强度迅速降低,从而节点梁端先发生破坏,导致节点核心区达到耐火极限。

综上所述,钢筋混凝土节点的耐火极限主要取决于节点周边梁、柱的耐火极限,尤其是梁端荷载比和配筋率的影响较大。在理论研究中,通过对节点的温度场和力学分析,也证实了节点梁端的破坏导致节点核心区达到耐火极限。目前,在钢筋混凝

土节点抗火性能的研究中,其升温曲线和约束条件等存在差异,导致各试件耐火极限的精确度和适用范围不同。由于节点的耐火极限主要取决于其周边梁、柱的耐火极限,因此,本文后续将采取机器学习方法对收集的钢筋混凝土梁、柱试验数据进行参数分析,以准确研究各参数对试件耐火极限的影响程度,并对其耐火极限进行预测,从而确定节点的耐火极限。

4 钢筋混凝土框架抗火性能研究进展

钢筋混凝土框架结构由于其在建筑设计中具有很大灵活性,在实际工程中得到了广泛应用,在结构抗火设计的需求下,不少学者针对框架的整体抗火性能进行了研究。因此,文章共收集了12篇钢筋混凝土框架抗火性能的文献,从试验研究和理论研究两个方面对钢筋混凝土框架的抗火性能进行了综述。

4.1 试验研究

钢筋混凝土框架抗火性能的试验研究主要是从梁跨度长度、柱截面形状和受火方式参数进行研究,具体总结如下。

随着钢筋混凝土梁的跨度增加,当钢筋混凝土柱的高度保持不变时,钢筋混凝土框架的耐火极限逐渐降低,当柱高为3 m时,梁跨度从4 m增加到8 m时,框架的耐火极限降低35%^[136,138]。

异形柱框架的耐火极限显著高于矩形柱框架,因为异形柱的轴向刚度普遍高于矩形柱,且异形柱对梁的约束效应显著增加,使梁发生破坏的时间增加,从而提高了钢筋混凝土框架的耐火极限^[136]。

对于单层双跨钢筋混凝土框架结构,单跨受火比双跨受火有着更低的耐火极限。相比于双跨受火,单跨受火下框架结构的挠度变化更大,中柱的变形显著增加,从而耐火极限降低^[139-140]。对于单层多跨钢筋混凝土框架结构,当受火跨数超过总跨数一半时,受火边节点的水平位移将比全层受火时更大,其耐火极限也更低^[140-142]。

4.2 有限元分析

廖艳芬等^[143]、王剑锋等^[144]和毕然^[145]对钢筋混凝土框架的温度场和火灾下的力学性能进行了全过程多参数分析。随后,F. Biondini等^[146]采取有限

元模型与元胞自动机模型相结合的方法,以模拟结构的火灾行为。该方法通过热传导、热对流和热辐射以模拟传热过程,结合钢筋和混凝土的材料性能以考虑温度对结构性能的影响,从而建立了具有温度相关特性的钢筋混凝土元胞模型,并结合有限元模型进行结构的抗火分析。然而,上述有限元模型均未考虑热力和孔隙压力的耦合作用,随着抗火研究的发展,G. Srivastava等^[147]将刚度法与有限元分析相结合,从而使传热、力学变形和孔隙压力之间的耦合作用被考虑在有限元中。此外,为了提高有限元模型的计算效率,蔡新江等^[148]通过对比不同建模方式的计算效率发现,相比于全实体模型,多尺度混合钢筋混凝土框架的有限元模型能够有效提高计算效率。

5 耐火极限计算公式研究现状

5.1 钢筋混凝土梁

5.1.1 吴波等提出的计算公式

吴波等^[15]提出了NSC和HSC梁的耐火极限计算公式,如式(1)和式(2)所示:

$$R_T = \frac{136\ 124.9c + 3\ 094.4}{158.06(M/M_u)^2 - 10.17(M/M_u) + 19.33} \quad (1)$$

$$R_T = \frac{6\ 332.84c + 81.59}{-11.17(M/M_u)^2 + 15.21(M/M_u) + 0.98} \quad (2)$$

式中, R_T 为耐火极限,min; c 为混凝土保护层厚度,mm; M/M_u 为荷载比。

5.1.2 王全凤等提出的计算公式

王全凤等^[149]提出了高强钢筋混凝土梁的耐火极限计算公式,如式(3)所示:

$$R = \frac{(107.97\rho + 0.98)(2.12c + 70.02)}{10.89m^2 - 7.91m + 3.82} \quad (3)$$

式中, R 为耐火极限,min; ρ 为配筋率,%; m 为荷载比。

5.1.3 Kodur等提出的计算公式

V. Kodur等^[150]提出了钢筋混凝土梁的耐火极限计算公式,如式(4)所示:

$$R = \phi_{st}\phi_{ag}\phi_{cs}R_0 \quad (4)$$

式中, R_0 为初始预测的耐火极限,min,取自澳洲规范AS3600^[22]; ϕ_{st} 为结构修正系数; ϕ_{ag} 为骨料修正系

数; ϕ_{cs} 为强度修正系数。

5.1.4 Naser等提出的计算公式

M. Z. Naser^[151]采用机器学习的遗传规划算法提出了耐火极限计算公式,如式(5)所示:

$$t = 47.57 + 1.37C + rL + \frac{f_y}{f_c} + \frac{20.65(293.03f_y/f_c)}{f_y} - 66.47\cos(3.46 \times 10^3 P) \quad (5)$$

式中, t 为耐火极限, min; C 为混凝土保护层厚度, mm; r 为配筋率, %; L 为梁跨长度, m; f_c 为混凝土抗压强度, MPa; f_y 为钢筋屈服强度, MPa; P 为荷载比。

5.2 钢筋混凝土柱

5.2.1 Wu等提出的计算公式

B. Wu等^[152-153]提出了NSC和HSC柱的耐火极限计算公式,如式(6)和式(7)所示:

$$R_f = \frac{(312.6a^2 + 135a - 18.54)(14.1\rho + 273.2)}{294.8n^2 - 58.2n + 57.66} \quad (6)$$

$$R_f = \frac{(62.232a^2 + 28.781a - 7.101)(0.043\rho + 23.549)}{43.875n^2 - 20.523n + 3.31} \quad (7)$$

式中, R_f 为耐火极限, min; a 为保护层厚度, mm; n 为荷载比。

5.2.2 Kodur等提出的计算公式

V. Kodur等^[81,154]提出了钢筋混凝土柱的耐火极限计算公式,如式(8)所示:

$$R = C_1 [8k_{sh}k_{cp}(30 - (S_R + 5)(L_R - 0.2))]^{0.94} \quad (8)$$

式中, C_1 为基于骨料类型的常数; k_{sh} 为荷载偏心距和火灾暴露条件的影响; k_{cp} 为保护层厚度和配筋率的影响; S_R 为长细比; L_R 为荷载比。

5.2.3 徐玉野等提出的计算公式

徐玉野等^[80,85,87,98,155-156]提出了不同截面形式钢筋混凝土柱的耐火极限计算公式,其中T形柱的计算公式如式(9)^[155]:

$$R_f = \beta_\mu \beta_L \beta_b \beta_{hbd} \beta_e \beta_\rho \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (9)$$

式中, β_μ 、 β_L 、 β_b 、 β_{hbd} 、 β_e 和 β_ρ 分别代表荷载比、有效长度、柱宽、高宽比、荷载偏心距和配筋率的影响; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 代表多个参数的组合影响。

5.2.4 Shah等提出的计算公式

A. H. Shah等^[90]提出了钢筋混凝土柱的耐火极限计算公式,如式(10)所示:

$$FR = \frac{K_{cf}^{0.218} S_{pl}^{1.67} S_r^{4.09} L_r^{-0.87}}{831.76} \quad (10)$$

式中, FR 为耐火极限, min; K_{cf} 、 S_{pl} 、 S_r 和 L_r 代表箍筋配置、纵筋配筋率、长细比和荷载比的影响。

5.2.5 欧洲规范提出的计算公式

欧洲规范^[157]提出了钢筋混凝土柱耐火极限的经验公式,如式(11)所示:

$$R_f = 120 \left(\frac{R_{f,\eta} + R_{f,a} + R_{f,L} + R_{f,b} + R_{f,n}}{120} \right)^{1.8} \quad (11)$$

式中, $R_{f,\eta}$ 、 $R_{f,a}$ 、 $R_{f,L}$ 、 $R_{f,b}$ 和 $R_{f,n}$ 代表荷载比、保护层厚度、屈曲长度、柱宽和纵筋数量的影响。

5.2.6 Naser等提出的计算公式

M. Z. Naser等^[158]提出了耐火极限计算公式,如式(12)所示:

$$FR = -1.491 + 11.61bh + 0.01733f_c + 0.078C - 0.01745e_c - 0.000537P \quad (12)$$

式中, b 为截面宽度, mm; h 为截面高度, mm; e_c 为荷载偏心距, mm; P 为施加荷载。

同时, M. Z. Naser^[151]通过遗传规划算法提出了钢筋混凝土柱的耐火极限计算公式,如式(13)所示:

$$t = 79 + C + \tan(73.97 - f_c) + \cosh(4.72\tan(C)) + \tan\left(98.64 - \frac{1.04P}{r}\right) - C \tan(f_c) - \tan\left(3.57 \times 10^4 - \frac{1.1P}{r} - 103.3f_c\right) \quad (13)$$

6 参数分析

针对钢筋混凝土梁和钢筋混凝土柱,文章分别提出了通用的耐火极限计算公式,其建立过程可分为两步,先通过对216根梁和148根柱的试验数据进行参数分析,以选取影响耐火极限的重要参数。随后,基于机器学习算法和非线性回归分析,建立耐火极限计算公式,详细过程如下。

6.1 钢筋混凝土梁

文章共收集了216个钢筋混凝土梁的试验数据,该数据包括保护层厚度(c)、荷载比(μ)、梁宽

(b)、受拉钢筋配筋率(ρ_s)、箍筋间距(s)、混凝土抗压强度(f_c)、跨高比(L/h)、剪跨比(a/h)、骨料类型(α_{ag})和端部约束条件(α_{en})10个参数。采用Pearson相关系数对这些数据进行分析,具体的分析过程如下。

相关性分析可分为三步,先将10个参数划分为数值参数和分类参数,对分类参数的不同类别进行赋值,然后对各参数进行归一化处理,最后通过计算协和差和标准差的商以确定各参数与耐火极限的相关系数,并对相关性结果进行可视化处理,得到了10个参数与耐火极限的相关性图,如图1所示。其中,±表示两个参数之间的正相关和负相

关,越接近-1或1,两个参数间的相关性越强。从图1可以看出,梁宽、保护层厚度、受拉钢筋配筋率、骨料类型、箍筋间距和端部条件与耐火极限呈正相关,分别为0.2、0.14、0.11、0.085、0.055和0.02。而混凝土抗压强度、荷载比、跨高比和剪跨比与耐火极限呈负相关,分别为-0.54、-0.48、-0.12和-0.059。基于各参数与耐火极限的相关系数,对10个参数进行了相关性排序(表1)。因此,选取了相关性大于0.1的6个参数作为重要参数,包括混凝土抗压强度、荷载比、梁宽、混凝土保护层厚度、跨高比和受拉钢筋配筋率,这6个重要参数将用于建立钢筋混凝土梁的耐火极限计算公式。

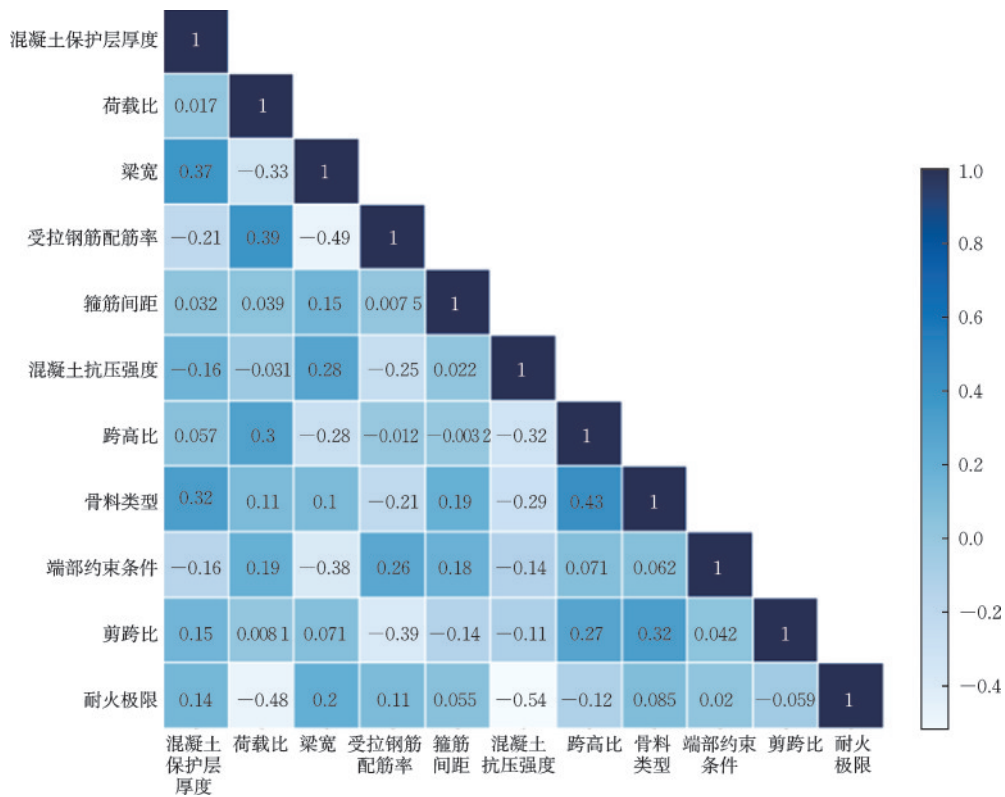


图1 钢筋混凝土梁各参数与耐火极限的相关性

Fig.1 Correlation between RC beam parameters and fire resistance limit

表1 钢筋混凝土梁各参数与耐火极限的相关性排序

Table 1 Ranking of correlation between RC beam parameters and fire resistance limit

序号	参数	相关性	序号	参数	相关性
1	f_c	-0.54	6	ρ_s	0.110
2	μ	-0.48	7	α_{ag}	0.085
3	b	0.20	8	a/h	-0.059
4	c	0.14	9	s	0.055
5	L/h	-0.12	10	α_{en}	0.020

6.2 钢筋混凝土柱

文章共收集了148个钢筋混凝土柱的试验数据,该数据包括混凝土保护层厚度(c)、荷载比(μ)、柱宽(b)、截面高宽比(h/b)、柱长(L)、配筋率(ρ_s)、箍筋间距(s)、混凝土抗压强度(f_c)、荷载偏心距(e)、偏心角(α)、截面形状(α_{se})和受火面(α_{fi})12个参数。采取Pearson相关系数进行参数分析,分析过程与梁一致,相关性结果如图2所示。

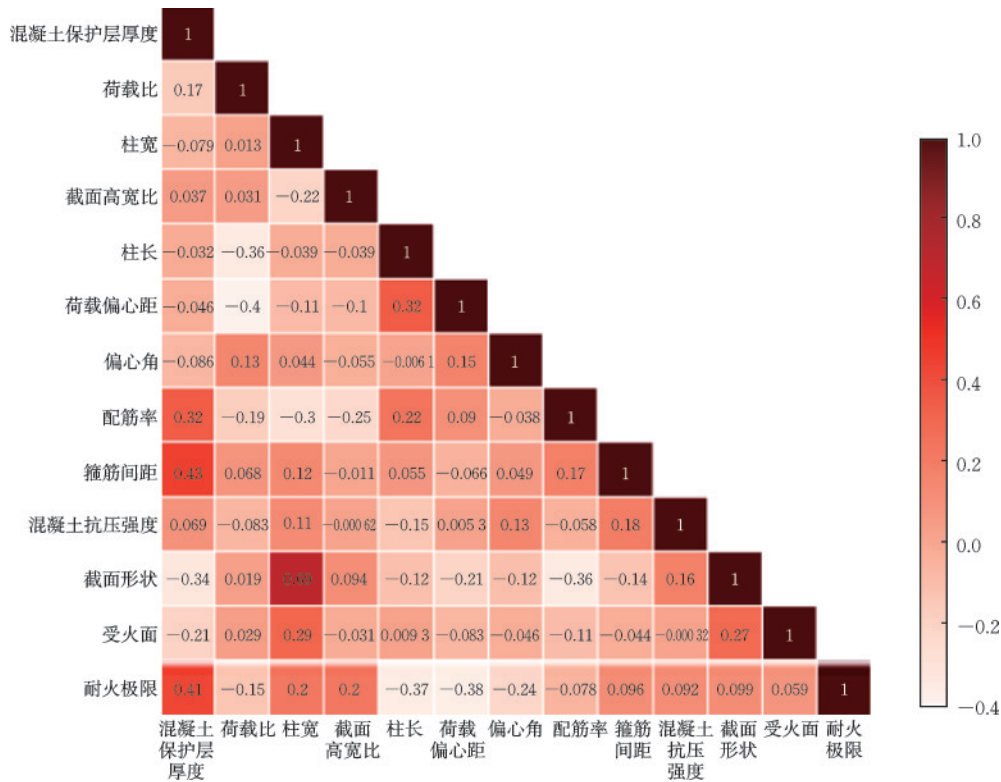


图2 钢筋混凝土柱各参数与耐火极限的相关性

Fig.2 Correlation between RC column parameters and fire resistance limit

结果表明,混凝土保护层厚度、截面高宽比、柱宽、箍筋间距、截面形状、混凝土抗压强度、受火面与耐火极限呈正相关,分别为0.41、0.20、0.20、0.099、0.096、0.092和0.059。而荷载偏心距、柱长、偏心角、荷载比和配筋率与耐火极限呈负相关,分别为-0.38、-0.37、-0.24、-0.15和-0.078。基于各参数与耐火极限的相关系数,对12个参数进行了相关性排序(表2)。因此,选取了相关性大于0.1的7个参数作为重要参数,包括混凝土保护层厚度、荷载偏心距、柱长、偏心角、截面高宽比、柱宽和荷载比,这7个重要参数将用于建立钢筋混凝土柱的耐火极限计算公式。

表2 钢筋混凝土柱各参数与耐火极限的相关性排序

Table 2 Ranking of correlation between RC column parameters and fire resistance limit

序号	参数	相关性	序号	参数	相关性
1	c	0.41	7	μ	-0.150
2	e	-0.38	8	α_{se}	0.099
3	L	0.37	9	s	0.096
4	α	-0.24	10	f_c	0.092
5	h/b	0.20	11	ρ_s	-0.078
6	b	0.20	12	α_{fi}	0.059

7 梁、柱耐火极限计算方法

7.1 钢筋混凝土梁

7.1.1 耐火极限计算方法

采取机器学习中的随机森林算法对216个试验数据进行分析以建立预测模型,并按照7:3的比例用于训练和测试模型,其确定系数(R^2)分别为0.99和0.96,表明随机森林算法对该试验数据具备较高的预测精度。基于参数分析中确定的6个重要参数,采取随机森林模型进行耐火极限预测,最终共预测了378个构件,该数值结果将用于回归耐火极限计算公式。

基于378个数值结果,进行单参数分析以拟合各参数与耐火极限的函数关系,采取参数连乘的形式,对各种函数组合进行非线性回归分析,选择确定系数(R^2)最高为0.915的组合形式作为钢筋混凝土梁的耐火极限计算公式,如式(14)所示。式中 θ_c 、 θ_μ 、 θ_b 、 θ_ρ 、 θ_{f_c} 和 $\theta_{L/h}$ 为修正系数,其计算过程如式(15)~(20)所示:

$$FR = \theta_c \theta_\mu \theta_b \theta_\rho \theta_{f_c} \theta_{L/h} \quad (14)$$

$$\theta_c = 0.00097c^2 + 0.011c + 4.84 \quad (15)$$

$$\theta_{\mu} = 0.218 - 0.643 \ln \mu \quad (16)$$

$$\theta_b = 0.012b^2 + 0.568b + 4657.02 \quad (17)$$

$$\theta_{\rho_s} = -0.0016/\rho_s^2 - 0.0008\rho_s + 0.025 \quad (18)$$

$$\theta_{f_c} = -174.781/f_c^2 - 0.0395f_c + 3.92 \quad (19)$$

$$\theta_{L/h} = 1.066/(L/h)^2 + 0.0004L/h + 0.094 \quad (20)$$

式中, FR 为耐火极限, min; c 为混凝土保护层厚度, mm; μ 为荷载比; b 为梁宽, mm; ρ_s 为受拉钢筋配筋率, %; f_c 为混凝土抗压强度, MPa; L/h 为跨高比。

7.1.2 验证

提出的计算公式通过 378 个数值结果进行了验证, 结果如图 3 所示。可以看出, 当耐火极限在 2~3 小时时, 计算值与模拟值高度一致, 所提出公式的最小和最大计算偏差分别为 -19.46% 和 17.8%, 而平均计算偏差仅为 0.19%。结果表明, 提出的计算公式在数据库的数值范围内具有较高的计算精度 (R^2 为 0.926 3)。

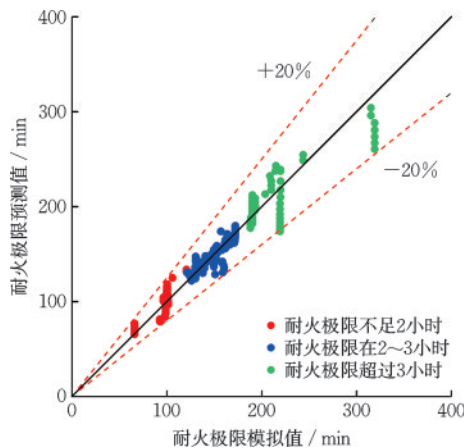


图 3 柱公式的计算结果与数据库的数值结果对比

Fig.3 Comparison between column formula calculated results and numerical results from database

7.2 钢筋混凝土柱

7.2.1 耐火极限计算方法

采取随机森林算法对 144 个试验数据以建立预测模型, 并按照 7:3 的比例用于训练和测试模型, 其确定系数 (R^2) 分别为 0.97 和 0.83, 表明随机森林算法对该试验数据具备较高的预测精度。基于参数分析中确定的 7 个重要参数, 采取随机森林模型进行耐火极限预测, 最终预测了 350 个构件, 该数值结果将用于回归耐火极限计算公式。

基于 350 个数值结果, 进行单参数分析以拟合各参数与耐火极限的函数关系, 采取参数连乘的形

式, 对各种函数组合进行非线性回归分析, 选择确定系数 (R^2) 最高为 0.914 的组合形式作为钢筋混凝土柱的耐火极限计算公式, 如式 (23) 所示。式中 θ_c 、 θ_{μ} 、 θ_b 、 $\theta_{h/b}$ 、 θ_L 、 θ_e 和 θ_a 为修正系数, 其计算过程如式 (24)~(30) 所示:

$$FR = \theta_c \theta_{\mu} \theta_b \theta_{h/b} \theta_L \theta_e \theta_a \quad (21)$$

$$\theta_c = 1.534 \ln c - 2.635 \quad (22)$$

$$\theta_{\mu} = 0.012\mu^2 - 0.017\mu + 0.012 \quad (23)$$

$$\theta_b = 0.058b^2 - 18.334b + 21305.674 \quad (24)$$

$$\theta_{h/b} = \frac{0.004}{h/b} - 0.016 \quad (25)$$

$$\theta_L = -395453000/L^2 - 0.041L + 732.609 \quad (26)$$

$$\theta_e = -0.01e^3 + 2.78e^2 - 227.398e + 14439.684 \quad (27)$$

$$\theta_a = 0.0000000428\alpha - 0.00000432 \quad (28)$$

式中, b 为柱宽, mm; h/b 为截面高宽比; L 为柱长, mm; e 为荷载偏心距, mm; α 为偏心角, ($^{\circ}$)。

7.2.2 验证

提出的计算公式通过 350 个数值结果进行了验证, 结果如图 4 所示。可以看出, 当耐火极限低于 2 小时时, 计算值与模拟值高度一致, 所提出公式的最小和最大计算偏差分别为 -21.67% 和 19.63%, 而平均计算偏差仅为 3.43%。验证结果表明, 提出的计算公式在数据库的数值范围内表现出较高的计算精度 (R^2 为 0.895 2)。

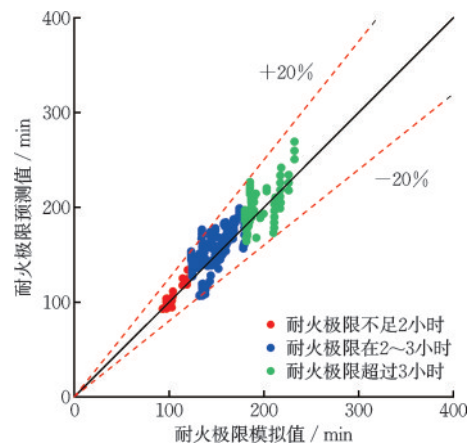


图 4 梁公式的计算结果与数据库的数值结果对比

Fig.4 Comparison between beam formula calculated results and numerical results from database

8 总结与展望

文章总结了钢筋混凝土梁、柱、节点和框架抗火性能的试验和理论研究。基于试验数据进行了

参数相关性分析,选取了对耐火极限影响较大的重要参数。采取机器学习和非线性回归分析的方法,分别提出钢筋混凝土梁和柱的耐火极限计算公式,总结与展望如下:

(1)对于钢筋混凝土梁,从梁端的约束条件和试验参数两个方面进行了总结,钢筋混凝土梁的简支、连续约束条件对其抗火性能有显著影响,荷载比和混凝土保护层厚度等参数对耐火极限影响较大,而箍筋间距等参数对耐火极限影响较小。

(2)对于钢筋混凝土柱,荷载比和荷载偏心率等参数对耐火极限的影响较大,而配筋率和箍筋间距等参数对耐火极限的影响较小。

(3)对于钢筋混凝土节点,其耐火极限主要取决于节点周边梁、柱的耐火极限,尤其是受梁端荷载比和配筋率的影响较大。

(4)采取机器学习的随机森林算法建立了钢筋混凝土梁、柱的预测模型,其 R^2 分别为0.99和0.97,表现出较高的预测精度,为建立耐火极限计算公式提供了可靠的数据基础。

(5)提出了钢筋混凝土梁、柱的耐火极限计算公式,其 R^2 分别为0.926和0.895,表现出较高的精度,可以为钢筋混凝土梁、柱的耐火设计提供参考。

目前,对钢筋混凝土梁、柱和节点的研究大多集中在标准火灾上,而实际火灾对其破坏机理的影响更为复杂,耐火极限也会受到不同火灾场景的影响。因此,有必要考虑不同火灾场景对抗火性能的影响,并进一步研究考虑不同火灾场景的耐火极限计算公式。此外,目前对于钢筋混凝土结构的研究主要集中在构件上,相对于钢筋混凝土框架整体结构的抗火研究较少,由于框架在火灾中可能会发生内力重分布或悬链线效应,因此,需要进一步研究钢筋混凝土框架结构的抗火性能。

参考文献:

[1] Arioz O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42: 516-522.

[2] Reddy D V, Sobhan K, Liu L, et al. Size effect on fire resistance of structural concrete [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 468-478.

[3] Zhao D, You Z, Liu D. Experimental investigation on temperature distribution of reinforced concrete beam [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166-169:

1379-1382.

- [4] Ding F, Li Z, Cheng S, et al. Stress redistribution of simply supported reinforced concrete beams under fire conditions [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(9): 2093-2106.
- [5] 杨志年,齐建全,段开达,等.钢筋混凝土梁火灾下抗剪性能的试验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2019,44(6):1520-1530.
- Yang Z N, Qi J Q, Duan K D, et al. Experimental research on shear behavior of reinforced concrete beams in fire [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(6): 1520-1530. (in Chinese)
- [6] 时旭东,过镇海.不同混凝土保护层厚度钢筋混凝土梁的耐火性能[J].工业建筑,1996(9):11-13,18.
- Shi X D, Guo Z H. Experimental studies on fire resistance of reinforced concrete beams with different thickness concrete cover [J]. Industrial Construction, 1996 (9): 11-13, 18. (in Chinese)
- [7] 陆洲导,朱伯龙,周跃华.钢筋混凝土简支梁对火灾反应的试验研究[J].土木工程学报,1993,26(3):47-54.
- Lu Z D, Zhu B L, Zhou Y H. Experimental study on fire response of reinforced concrete simply supported beams [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26 (3): 47-54. (in Chinese)
- [8] 王全凤,霍喆赟,徐玉野,等.HRBF500级钢筋混凝土简支梁抗火性能试验[J].建筑结构,2013,43(1):76-80.
- Wang Q F, Huo Z Y, Xu Y Y, et al. Experimental research on fire-resistant performance of HRBF500 reinforced concrete simple beams [J]. Building Structure, 2013, 43(1): 76-80. (in Chinese)
- [9] 丁兴发,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.
- Ding X F, Yao F, Li Z, et al. Fire resistance of simple supported reinforced concrete beams under high temperature [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(10): 1476-1481. (in Chinese)
- [10] Ellingwood B, Lin T D. Flexure and shear behavior of concrete beams during fires [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(2): 440-458.
- [11] Shi X, Tan T, Tan K, et al. Influence of concrete cover on fire resistance of reinforced concrete flexural members [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(8): 1225-1232.
- [12] Ryu E, Shin Y, Kim H. Effect of loading and beam sizes on the structural behaviors of reinforced concrete

- beams under and after fire[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018, 12(1): 54.
- [13] 傅传国, 宋亚敏, 尹安康, 等. 热力耦合作用下钢筋混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2018, 33(5): 1-10, 23.
- Fu C G, Song Y M, Yi A K, et al. Experimental study on shear bearing capacity of reinforced concrete beams under thermodynamic coupling[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2018, 33(5): 1-10, 23. (in Chinese)
- [14] 韩重庆, 许清风, 刘桥, 等. 钢筋混凝土T形截面连续梁耐火性能试验研究及有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(2): 142-150.
- Han C Q, Xu Q F, Liu Q, et al. Experimental research and FEA of fire resistance of RC continuous T-beam [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(2): 142-150. (in Chinese)
- [15] 吴波, 洪洲. 钢筋混凝土简支梁的耐火极限[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(7): 82-87.
- Wu B, Hong Z. Fire resistance limit of reinforced concrete simply supported beams [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(7): 82-87. (in Chinese)
- [16] 张威振. 足尺钢筋混凝土简支梁高温力学性能的试验研究[J]. *工业建筑*, 2007, 37(4): 37-41, 76.
- Zhang W Z. Experimental investigation on the mechanical performance of full-scale simple reinforced concrete beams under and after elevated temperature [J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(4): 37-41, 76. (in Chinese)
- [17] Song Y, Fu C, Liang S, et al. Fire resistance investigation of simple supported RC beams with varying reinforcement configurations [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 8625360.
- [18] Tian J, Zhu P, Qu W. Study on fire resistance time of hybrid reinforced concrete beams [J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(2): 1-14.
- [19] Rafi M M, Nadjai A. Behavior of hybrid (steel-CFRP) and CFRP bar-reinforced concrete beams in fire [J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45(15): 1573-1584.
- [20] Hou X, Ren P, Rong Q, et al. Effect of fire insulation on fire resistance of hybrid-fiber reinforced reactive powder concrete beams [J]. *Composite Structures*, 2019, 209: 219-232.
- [21] Rehman A, Masood A, Akhtar S, et al. Experimental and numerical investigation into flexural bond strength of RC beams exposed to elevated temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 282: 122630.
- [22] Concrete structures: AS 3600 [S]. Australia: Australia Committee BD-002, 2001.
- [23] 毛震, 杨志年. 高强混凝土简支梁高温下抗剪性能[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(4): 40-45.
- Mao Z, Yang Z N. Shear performance of high-strength concrete simply supported beams under high temperature [J]. *Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 44(4): 40-45. (in Chinese)
- [24] 杨志年, 齐建全, 段开达, 等. 钢筋混凝土梁高温下抗剪性能的试验研究[J]. *工业建筑*, 2020, 50(10): 57-62.
- Yang Z N, Qi J Q, Duan K D, et al. Experiment study on shear properties of RC beams under high temperature [J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(10): 57-62. (in Chinese)
- [25] Youssef M A, El-Fitany S F, Diab M A. Shear capacity of RC beams at elevated temperatures[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67(22): 1-14.
- [26] 翟春媛, 张丽, 杨志年. 钢筋混凝土梁高温下的抗剪性能[J]. *华北理工大学(自然科学版)*, 2018, 40(1): 29-34.
- Zhai C Y, Zhang L, Yang Z N. Shear performance of reinforced concrete beams under high temperature [J]. *Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 40(1): 29-34. (in Chinese)
- [27] Fan S, Zhang Y, Tan K H. Experimental and analytical studies of reinforced concrete short beams at elevated temperatures [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110445.
- [28] 卢锦钟, 黄晓吉. 梁端约束对钢筋混凝土梁耐火性能的影响[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(4): 593-599.
- Lu J Z, Huang X J. The influence of beam end constraints on the fire resistance performance of reinforced concrete beams[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2008, 29(4): 593-599. (in Chinese)
- [29] Eamon C D, Jensen E. Reliability analysis of RC beams exposed to fire [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(2): 212-220.
- [30] Choi E G, Shin Y S. The structural behavior and simplified thermal analysis of normal-strength and high-strength concrete beams under fire [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(4): 1123-1132.
- [31] Thanaraj D P, Anand N, Arulraj P, et al. Investigation

- on structural and thermal performance of reinforced concrete beams exposed to standard fire [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32(7): 101764.
- [32] Hou X, Ren P, Rong Q, et al. Comparative fire behavior of reinforced RPC and NSC simply supported beams [J]. *Engineering Structures*, 2019, 185: 122-140.
- [33] Singh D, Singh S, Bhattacharyya S K. Experimental study on fire performance of loaded reinforced concrete beams[J]. *Response of Structures under Extreme Loading*, 2015, 6(1): 738-746.
- [34] Kodur V, Banerji S. Comparative fire behavior of reinforced concrete beams made of different concrete strengths[J]. *Fire Technology*, 2023, 60(5): 1-30.
- [35] Qin H, Yang J, Yan K, et al. Experimental research on the spalling behaviour of ultra-high performance concrete under fire conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 303: 124464.
- [36] Wang M, Guo Z, Jia X, et al. Fire-induced failure of long-term service and fresh concrete beams subjected to fire[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(10): 3911-3924.
- [37] 郭震, 王萌, 宋隽, 等. 火灾作用下长期服役与新浇筑混凝土梁爆裂性能比较[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(8): 1102-1112.
- Guo Z, Wang M, Song J, et al. Comparison of performance between long-term service and fresh concrete beams subjected to fire [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(8): 1102-1112. (in Chinese)
- [38] Dwaikat M B, Kodur V. Fire induced spalling in high strength concrete beams[J]. *Fire Technology*, 2010, 46(1): 251-274.
- [39] Kodur V, Dwaikat M B. Flexural response of reinforced concrete beams exposed to fire [J]. *Structural Concrete*, 2008, 9(1): 45-54.
- [40] Alqarni A S, Albidah A S, Abadel A A. Shear performance of reinforced concrete deep beams using different coarse aggregates under the effect of elevated temperatures[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e01087.
- [41] Tariq F, Bhargava P. Flexural behavior of corroded RC beams exposed to fire [J]. *Structures*, 2021, 33(2): 1366-1375.
- [42] Tariq F, Gaikwad M, Bhargava P. Analysis of behavior of corroded RC beams exposed to elevated temperatures [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 42: 102508.
- [43] Ba G, Miao J, Zhang W, et al. Influence of reinforcement corrosion on fire performance of reinforced concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 738-747.
- [44] Destrebecq J F, Toussaint E, Ferrier E. Analysis of cracks and deformations in a full scale reinforced concrete beam using a digital image correlation technique [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(6): 879-890.
- [45] Zhang H, Li Q, Kodur V, et al. Effect of cracking and residual deformation on behavior of concrete beams with different scales under fire exposure [J]. *Engineering Structures*, 2021, 245(6): 112886.
- [46] Ervine A, Gillie M, Stratford T J, et al. Thermal propagation through tensile cracks in reinforced concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(5): 516-522.
- [47] Ba G, Miao J, Zhang W, et al. Influence of cracking on heat propagation in reinforced concrete structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142(7): 04016035.
- [48] 苗吉军, 陈娜, 侯晓燕, 等. 使用损伤与高温耦合作用下钢筋混凝土梁火灾试验研究与数值分析[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(3): 1-11.
- Miao J J, Chen N, Hou X Y, et al. Experimental research and numerical simulation on fire resistance performance of RC beams with damage caused by service loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(3): 1-11. (in Chinese)
- [49] Shah M C, Kothari S, Nainwal A, et al. Investigation of the pre-damage on fire resistance of RC beams [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46(20): 10356.
- [50] Gedam B A. Fire resistance design method for reinforced concrete beams to evaluate fire-resistance rating [J]. *Structures*, 2021, 33(11): 855-877.
- [51] Fan S, Yao Z, Tan K. Fire behavior of deep beams under unsymmetrical loading [J]. *Engineering Structures*, 2022, 250(1): 113419.
- [52] Dotreppe J C, Franssen J M. The use of numerical models for the fire analysis of reinforced concrete and composite structures[J]. *Engineering Analysis*, 1985, 2(2): 67-74.
- [53] Aziz Y H A, Zaher Y A, Wahab M A, et al. Predicting temperature rise in Jacketed concrete beams subjected to elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116460.
- [54] Ohashi H, Kodaira A. Calculation of load and deformation behavior of structure elements taking into account 3-dimensional heat flow [J]. *Fire Safety Science-Proceedings of the Fifth International Symposium*, 1997, 5:

- 1021-1032.
- [55] Kodur V, Dwaikat M D. Performance-based fire safety design of reinforced concrete beams[J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2007, 17(4): 293-320.
- [56] Kodur V, Dwaikat M B. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30:431-443.
- [57] Dwaikat M B, Kodur V. Fire-induced spalling in reinforced concrete beams [J]. *Structures and Buildings*, 2015, 165(7): 347-359.
- [58] Kodur V, Banerji S. Modeling the fire-induced spalling in concrete structures incorporating hydro-thermo-mechanical stresses [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 117(1): 2020. 103902.
- [59] Ren P, Hou X, Kodur V, et al. Modeling the fire response of reactive powder concrete beams with due consideration to explosive spalling [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124094.
- [60] Liu C, Zhou B, Liu Q, et al. Study on thermodynamic properties of RC beams considering elevated temperature [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Building*, 2022, 177(4): 330-346.
- [61] Guergah C, Dimia M S, Guenfoud M. Contribution to the numerical modelling of the spalling phenomenon: case of a reinforced concrete beams[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(4): 1747-1759.
- [62] Xu Q, Han C, Wang Y, et al. Experimental and numerical investigations of fire resistance of continuous high strength steel reinforced concrete T-beams [J]. *Fire Safety Journal*, 2015, 78: 142-154.
- [63] 杨志年, 韩旭, 舒升, 等. 钢筋混凝土连续梁火灾下抗剪性能的试验研究[J]. *结构工程师*, 2021, 37(3): 88-96.
- Yang Z N, Han X, Shu S, et al. Experimental research on shear behavior of continuous reinforced concrete beams in fire [J]. *Structural Engineers*, 2021, 37(3): 88-96. (in Chinese)
- [64] 齐建全, 白胤领, 杨志年, 等. 钢筋混凝土连续梁高温下的抗剪性能[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(2): 73-79.
- Qi J Q, Bai Y L, Yang Z N, et al. Shear performance of reinforced concrete continuous beams under high temperature [J]. *Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 42(2): 73-79. (in Chinese)
- [65] 时旭东, 过镇海. 高温下钢筋混凝土连续梁的受力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 1997(4): 26-34.
- Shi X D, Guo Z H. Experimental study on the mechanical performance of reinforced concrete continuous beams under high temperature [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1997(4): 26-34. (in Chinese)
- [66] 张毅奇, 阎奇武, 袁锦根. 连续梁高温下恒载抗火性能研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35(3): 33-34.
- Zhang Y Q, Yan Q W, Yuan J G. Fire-resistant performance of constant loads of reinforced concrete continuous beam at high temperature [J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(3): 33-34. (in Chinese)
- [67] Albuquerque G L, Silva A B, Rodrigues J C, et al. Behavior of thermally restrained RC beams in case of fire [J]. *Engineering Structures*, 2018, 174: 407-417.
- [68] Sa B, Yong C. Behavior of axially and rotationally restrained reinforced concrete beams in fire [J]. *Engineering Structures*, 2020, 213: 110572.
- [69] Dwaikat M B, Kodur V. Responses of restrained concrete beams under design fire exposure [J]. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 2009, 135(11): 1408-1417.
- [70] 霍静思, 郝柏青, 李智. 考虑轴向约束的钢筋混凝土梁高温下竖向推覆试验[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(1): 41-48.
- Huo J S, Hao B Q, Li Z. Vertical push-down tests of RC beams at high temperature considering axial restraint [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(1): 41-48. (in Chinese)
- [71] Dwaikat M B, Kodur V. A numerical approach for modeling the fire induced restraint effects in reinforced concrete beams [J]. *Fire Safety Journal*, 2008, 43(4): 291-307.
- [72] Kodur V, Dwaikat M B, Raut N. Macroscopic FE model for tracing the fire response of reinforced concrete structures [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(10): 2368-2379.
- [73] Dotreppe J C, Franssen J M, Bruls A, et al. Experimental research on the determination of the main parameters affecting the behaviour of reinforced concrete columns under fire conditions [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1996, 49: 117-127.
- [74] Franssen J M, Dotreppe J C. Fire tests and calculation methods for circular concrete columns [J]. *Fire Technology*, 2003, 39: 89-97.
- [75] Martins A M B, Rodrigues J P C. Fire resistance of reinforced concrete columns with elastically restrained thermal elongation [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32: 3330-3337.
- [76] Tan K H, Nguyen T T. Structural responses of reinforced concrete columns subjected to uniaxial bending

- and restraint at elevated temperatures [J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 60: 1-13.
- [77] Kodur V, Raut N. Design equation for predicting fire resistance of reinforced concrete columns [J]. *Structural Concrete*, 2009, 10: 73-86.
- [78] Raut N, Kodur V. Response of reinforced concrete columns under fire-induced biaxial bending [J]. *ACI Structural Journal*, 2011, 108: 610-619.
- [79] Ali F, Nadjai A, Choi S. Numerical and experimental investigation of the behavior of high strength concrete columns in fire [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32: 1236-1243.
- [80] 徐玉野, 王全凤, 罗漪. 混凝土矩形柱的耐火极限分析及实用计算 [J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(2): 284-288.
Xu Y Y, Wang Q F, Luo Y. Fire resistance limit analysis and practical calculation of concrete rectangular columns [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2008, 29(2): 284-288. (in Chinese)
- [81] Kodur V, Raut N. A simplified approach for predicting fire resistance of reinforced concrete columns under biaxial bending [J]. *Engineering Structures*, 2012, 41: 428-443.
- [82] Hass R. Practical rules for the design of reinforced concrete and composite columns submitted to fire [J]. *Technical Report*, 1986, 69(1): 1-10.
- [83] Buch S H, Sharma U K. Fire resistance of eccentrically loaded reinforced concrete columns [J]. *Fire Technology*, 2019, 55: 1517-1552.
- [84] Wu B, Hong Z, Tang G, et al. Fire resistance of reinforced concrete columns with square cross section [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2007, 10: 353-369.
- [85] 吴波, 徐玉野. 钢筋混凝土 T 形柱的耐火极限研究 [J]. *土木工程学报*, 2007, 40(3): 32-39.
Wu B, Xu Y Y. Fire resistance of reinforced concrete columns of T-shaped cross section [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(3): 32-39. (in Chinese)
- [86] Lie T T. Fire resistance of reinforced concrete columns: A parametric study [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1989, 1: 121-129.
- [87] 徐玉野, 吴波. 钢筋混凝土 L 形柱的耐火极限 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(7): 110-115, 130.
Xu Y Y, Wu B. Fire resistance limit of reinforced concrete L-shaped columns [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(7): 110-115, 130. (in Chinese)
- [88] 苗吉军, 刘才玮, 刘延春, 等. 轴压混凝土柱受火试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(2): 26-32.
Miao J J, Liu C W, Liu Y C, et al. Fire test on RC columns under axial load [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(2): 26-32. (in Chinese)
- [89] Buch S H, Sharma U K. Empirical model for determining fire resistance of reinforced concrete columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 838-852.
- [90] Shah A H, Sharma U K. Fire resistance and spalling performance of confined concrete columns [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 161-174.
- [91] Chinthapalli H K, Sharma S, Agarwal A. Fire behavior and modeling of short rc columns in pure axial compression: role of volume, configuration, and spacing of lateral reinforcement [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022(1): 148.
- [92] Kodur V, Khaliq W, Raut N. An approach to account for tie configuration in predicting fire resistance of reinforced concrete columns [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 1976-1985.
- [93] Lie T T. Method to calculate the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross section [J]. *ACI Structural Journal*, 1993, 90: 52-60.
- [94] Xu Y, Wu B. Fire resistance of reinforced concrete columns with L-, T-, and plus-shaped cross-sections [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44: 869-880.
- [95] 吴波, 唐贵和, 王超. 不同受火方式下混凝土柱耐火性能的试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2007, 40(4): 27-31, 72.
Wu B, Tang G H, Wang C. Experimental study on fire resistance of RC columns with different faces exposed to fire [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(4): 27-31, 72. (in Chinese)
- [96] Tan K H, Yao Y. Fire resistance of four-face heated reinforced concrete columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129: 1220-1229.
- [97] Tan K H, Yao Y. Fire Resistance of reinforced concrete columns subjected to 1-, 2-, and 3-face heating [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130: 1820-1828.
- [98] 徐玉野, 王全凤, 柴振岭. 相邻两面受火和三面受火混凝土矩形柱的耐火极限研究 [J]. *工程力学*, 2008, 25(11): 70-77.
Xu Y Y, Wang Q F, Chai Z L. Fire resistance of concrete columns with rectangular cross section subjected to 2-adjacent-face and 3-face heating [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(11): 70-77. (in Chinese)
- [99] Kodur V, Cheng F P, Wang T C, et al. Fire resistance

- of high-performance concrete columns[J]. National Research Council of Canada (NRCC), 2001, 12(1): 1-19.
- [100] Rant N, Kodur V. Response of high-strength concrete columns under design fire exposure[J]. Journal of Structural Engineering-ASCE, 2011, 137: 69-79.
- [101] Khaliq W, Kodur V. Effectiveness of polypropylene and steel fibers in enhancing fire resistance of high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144: 04017224.
- [102] Abdulraheem M S, Kadhum M M. Experimental investigation of fire effects on ductility and stiffness of reinforced reactive powder concrete columns under axial compression[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 20: 750-761.
- [103] Tan K H, Nguyen T T. Experimental behaviour of restrained reinforced concrete columns subjected to equal biaxial bending at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 823-836.
- [104] Wu B, Li Y. Experimental study on fire performance of axially-restrained NSC and HSC columns[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2009, 32: 211-235.
- [105] Ali F, Nadjai A, Silcock G, et al. Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns[J]. Fire Safety Journal, 2004, 39: 433-445.
- [106] 杨志年, 郭洪晔, 付秀艳, 等. 不同含水率下钢筋混凝土柱的抗火性能研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(1): 68-73.
Yang Z N, Guo H Y, Fu X Y, et al. Research on fire resistance of reinforced concrete columns with different moisture contents [J]. Industrial Construction, 2018, 48(1): 68-73. (in Chinese)
- [107] 苗吉军, 姜宏兴, 刘延春, 等. 考虑海洋环境钢筋锈蚀的混凝土轴压柱受火性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 137-144, 157.
Miao J J, Jiang H X, Liu Y C, et al. Experimental research on fire resistance performance for RC columns under axial compression with rebar corrosion damages caused by marine environment [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 137-144, 157. (in Chinese)
- [108] Tan K H, Tang C Y. Interaction formula for reinforced concrete columns in fire conditions [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101: 19-28.
- [109] Yao Y, Tan K H, Tang C Y. The effect of a shear bond in the Rankine method for the fire resistance of RC columns [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 3595-3602.
- [110] Law A, Gillie M. Interaction diagrams for ambient and heated concrete sections[J]. Engineering Structures, 2010, 32: 1641-1649.
- [111] El-Fitiany S F, Youssef M A. Interaction diagrams for fire-exposed reinforced concrete sections [J]. Engineering Structures, 2014, 70: 246-259.
- [112] Caldas R B, Sousa J B M, Fakury R H. Interaction diagrams for reinforced concrete sections subjected to fire [J]. Engineering Structures, 2010, 32: 2832-2838.
- [113] Kim H S. Obtaining interaction diagram of concrete section exposed to fire by mathematical optimization [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102993.
- [114] Kang H, Cheon N, Lee D H, et al. P-M interaction curve for reinforced concrete columns exposed to elevated temperature [J]. Computers and Concrete, 2017, 18: 807-826.
- [115] Lee D H, Cheon N, Kim M, et al. Simplified P-M interaction curve model for reinforced concrete columns exposed to standard fire [J]. Computers and Concrete, 2017, 18: 721-739.
- [116] Pena D L, Lbanez C, Albero V, et al. Additional fire exposure time for the effect of spalling in reinforced concrete columns [J]. Fire Technology, 2023, 4(1): 1-28.
- [117] Buttignol T E T, Bittencourt T N. Simplified design procedures for the structural analysis of reinforced concrete columns in fire [J]. Engineering Structures, 2021, 246: 113076.
- [118] Glowacki M, Kowalski R. Simple consideration of second-order effects in the calculation of RC column fire resistance [J]. Fire Safety Journal, 2022, 183: 103650.
- [119] Zhu H L, Lie T T. Fire resistance evaluation of reinforced concrete columns [J]. Magazine of Concrete Research, 1993, 639(1): 1-42.
- [120] El-Fitiany S F, Youssef M A. Assessing the flexural and axial behaviour of reinforced concrete members at elevated temperatures using sectional analysis [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44: 691-703.
- [121] Mahmoud K A, Abdel-Rahman A K. Two-dimensional thermal and structural modelling of HSC columns exposed to fire [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38: 2009-2022.
- [122] 魏德敏, 高晓楠, 张海燕. 受火钢筋混凝土柱三维温度场的数值模拟 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(增1): 55-58.
Wei D M, Gao X N, Zhang H Y. Numerical simulation of three-dimensional temperature field in reinforced concrete columns under fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(Sup1): 55-58. (in Chinese)

- [123]项凯, 潘雁翀, 王国辉. 钢筋混凝土柱温度场试验研究[J]. 火灾科学, 2017, 26(3): 183-190.
Xiang K, Pan Y C, Wang G H. Experimental study on temperature field of reinforced concrete columns[J]. Fire Safety Science, 2017, 26(3): 183-190. (in Chinese)
- [124]Hwang J, Kwak H, Hwang J, et al. Fire-resistant capacity of RC structures considering time-dependent creep strain at elevated temperature [J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68: 1-16.
- [125]Kodur V, Alogla S. Effect of high-temperature transient creep on response of reinforced concrete columns in fire[J]. Materials and Structures, 2017, 50: 27.
- [126]Alogla S, Kodur V. Quantifying transient creep effects on fire response of reinforced concrete columns[J]. Engineering Structures, 2018, 174: 885-895.
- [127]Nguyen T T, Tan K H. Thermal-induced restraint forces in reinforced concrete columns subjected to eccentric loads[J]. Fire Safety Journal, 2014, 69: 136-146.
- [128]Mahmoud K A. Behavior of slender RC columns bent in single and double curvature at elevated temperatures [J]. Fire Technology, 2021, 57: 1313-1363.
- [129]Mahmoud K A. Fire resistance-effective parameters relationships of slender rectangular and circular RC columns[J]. Fire Safety Journal, 2021, 125: 103442.
- [130]Bajc U, Kolsek J C, Planinc L, et al. Fire resistance of RC columns with regard to spalling of concrete[J]. Fire Safety Journal, 2022, 130: 103568.
- [131]傅传国, 王广勇, 王玉镯. 钢筋混凝土框架节点抗火性能试验研究及理论分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(4): 822-828.
Fu C G, Wang G Y, Wang Y Z. Experimental and theoretical research on fire resistance behaviour of reinforced concrete joints[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(4): 822-828. (in Chinese)
- [132]王玉镯, 傅传国, 邱洪兴. 火灾中钢筋混凝土框架节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增2): 115-120.
Wang Y Z, Fu C G, Qiu H X. Experimental study on behaviour of reinforced concrete frame joints in fire[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(Sup2): 115-120. (in Chinese)
- [133]张璇. 足尺钢筋混凝土门式框架结构抗火能力试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
Zhang X. Experimental research on the fire-resistance of full scale reinforced concrete portal frame structure[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015. (in Chinese)
- [134]Raouffard M M, Nishiyama M. Fire resistance of reinforced concrete frames subjected to service load: part 1. experimental study [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2015, 13: 554-563.
- [135]施涵远, 蔡新江, 毛小勇, 等. 考虑约束作用的混凝土柱耐火试验加载方式研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(1): 202-209.
Shi H Y, Cai X J, Mao X Y, et al. Study on loading method of fire test for reinforced concrete frame column considering constraint [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1): 202-209. (in Chinese)
- [136]荆亚涛. 钢筋混凝土异形柱框架的抗火性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
Jing Y T. Behaviour of reinforced concrete frame with special-shaped columns at elevated temperature[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [137]吴波, 卢锦钟. 约束钢筋混凝土框架的耐火性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2009, 26(1): 12-18.
Wu B, Lu J Z. Experimental study on fire resistance performance of constrained reinforced concrete frames [J]. Journal of HUST (Urban Science Edition), 2009, 26(1): 12-18. (in Chinese)
- [138]Behnam B. On the interaction between span length and opening ratio of RC frames under natural fires [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2018, 171(SB6): 472-486.
- [139]陆洲导, 朱伯龙, 姚亚雄. 钢筋混凝土框架火灾反应分析[J]. 土木工程学报, 1995, 28(6): 18-27.
Lu Z D, Zhu B L, Yao Y X. Fire response analysis of reinforced concrete frames [J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(6): 18-27. (in Chinese)
- [140]姚亚雄, 朱伯龙. 钢筋混凝土框架结构抗火试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(6): 619-624.
Yao Y X, Zhu B L. Research on fire resistance test of reinforced concrete frame structures [J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(6): 619-624. (in Chinese)
- [141]荆亚涛, 吴波. 不同受火方式下混凝土框架结构的变形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(4): 392-398.
Jing Y T, Wu B. Research on deformation of concrete frame structures under different fire exposure modes [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(4): 392-398.

- neering, 2009, 29(4): 392-398. (in Chinese)
- [142]孔维一,傅传国,褚飞,等.钢筋混凝土叠层空腹桁架转换结构热力耦合反应分析[J].防灾减灾工程学报, 2016, 36(3): 386-393.
- Kong W Y, Fu C G, Chu F, et al. Thermal mechanical coupling analysis of reinforced concrete transfer structure with superimposed Vierendeel truss[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(3): 386-393. (in Chinese)
- [143]廖艳芬,漆雅庆,马晓茜.钢筋混凝土框架抗火性能的有限元分析[J].消防科学与技术, 2011, 30(12): 1100-1105.
- Liao Y F, Qi Y Q, Ma X Q. Finite element analysis of fire resistance performance of reinforced concrete frames [J]. Fire Science and Technology, 2011, 30 (12) : 1100-1105. (in Chinese)
- [144]王剑锋,李永振,朱伟平.火灾下钢筋混凝土框架结构的全过程分析[J].山西建筑, 2012, 38(16): 39-41.
- Wang J F, Li Y Z, Zhu W P. Full process analysis of reinforced concrete frame structures under fire [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38 (16) : 39-41. (in Chinese)
- [145]毕然.钢筋混凝土框架结构耐火性能全过程数值模拟[D].沈阳:沈阳建筑大学, 2013.
- Bi R. Numerical simulation of the whole process of the fire resistance of reinforced concrete frame structure[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013. (in Chinese)
- [146]Biondini F, Nero A. Cellular finite beam element for nonlinear analysis of concrete structures under fire[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137 (5) : 543-558.
- [147]Srivastava G, Prakash P P. An integrated framework for nonlinear analysis of plane frames exposed to fire using the direct stiffness method [J]. Computers and Structures, 2017, 190: 173-185.
- [148]蔡新江,戚晨望,毛小勇,等.钢筋混凝土框架的多尺度抗火混合模拟[J].防灾减灾工程学报, 2022, 42 (2): 383-390,410.
- Cai X J, Qi C W, Mao X Y, et al. Multi-scale hybrid simulation of fire resistance of reinforced concrete frame [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 383-390,410. (in Chinese)
- [149]王全凤,霍喆赞,徐玉野,等.HRBF500级细晶粒钢筋混凝土筒支梁的耐火极限[J].华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 76-81.
- Wang Q F, Huo Z Y, Xu Y Y, et al. Fire resistance of HRBF500 grade fine-grained reinforced concrete simply supported beams [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2014, 35(1): 76-81. (in Chinese)
- [150]Kodur V, Dwaikat M B. Design equation for predicting fire resistance of reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2011, 33(2): 602-614.
- [151]Naser M Z. Autonomous fire resistance evaluation[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146 (6) : 04020103.
- [152]Wu B, Hong Z, Tang G, et al. Fire resistance of reinforced concrete columns with square cross section [J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10: 353-369.
- [153]吴波,洪洲.高强混凝土柱的耐火极限[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(11): 64-69.
- Wu B, Hong Z. Fire resistance of high-strength concrete columns [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(11): 64-69. (in Chinese)
- [154]Kodur V, Raut N. Design formula for predicting fire resistance of reinforced concrete columns[J]. Structural Concrete, 2009, 10: 73-86.
- [155]徐玉野,王全凤,邱政和.典型受火方式下等肢T形柱的耐火性能[J].华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 218-223.
- Xu Y Y, Wang Q F, Qiu Z H. Fire resistance performance of equal limb T-shaped columns under typical fire conditions[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2010, 31(2): 218-223. (in Chinese)
- [156]吴波,徐玉野.钢筋混凝土十字形柱的耐火极限研究[J].工程力学, 2008, 25(3): 167-173.
- Wu B, Xu Y Y. Fire resistance of reinforced concrete columns with +-shaped cross section [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 167-173. (in Chinese)
- [157]Design of Concrete Structures, vols. 1-2, General Rules-Structural Fire Design: EN 1992-1-2 Eurocode 2 [S]. Europe: [s.n.], 2004.
- [158]Naser M Z, Seitllari A. Concrete under fire: an assessment through intelligent pattern recognition [J]. Engineering with Computers, 2020, 36: 1915-1928.

(本文编辑:赵霞)