

火灾下钢筋混凝土结构耐火性能研究综述

宋远哲

北京工业大学建筑工程学院, 北京

收稿日期: 2026年5月4日; 录用日期: 2026年5月26日; 发布日期: 2026年6月8日

摘要

钢筋混凝土结构因承载力高、整体性好和耐久性较好等特点, 被广泛应用于各类建筑工程中, 其火灾下的耐火性能直接关系到结构安全。高温作用会导致混凝土热工性能和力学性能发生变化, 并引起钢筋强度、刚度及钢筋-混凝土粘结性能退化, 从而影响构件承载力、变形能力和结构整体稳定性。本文围绕火灾下钢筋混凝土结构耐火性能的研究进展进行综述, 首先分析高温下钢筋和混凝土材料热工性能及力学性能的变化规律; 其次总结钢筋混凝土梁、柱、节点和框架结构在火灾作用下的受力响应、破坏特征及主要影响因素; 最后对现有研究成果进行归纳总结。研究表明, 钢筋混凝土结构耐火性能受材料性能退化、温度场分布、荷载水平、受火方式和结构约束条件等多因素共同影响。本文可为钢筋混凝土结构火灾破坏分析和耐火性能研究提供参考。

关键词

钢筋混凝土框架, 火灾, 热工性能, 耐火性能

Review on Fire Resistance of Reinforced Concrete Structures under Fire Conditions

Yuanzhe Song

College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Received: May 4, 2026; accepted: May 26, 2026; published: June 8, 2026

Abstract

Reinforced concrete structures are widely used in various building projects due to their high bearing capacity, good integrity, and favorable durability. Their fire resistance is directly related to structural safety under fire conditions. Elevated temperatures can change the thermal and mechanical properties of concrete and cause degradation in the strength and stiffness of steel reinforcement, as well as in the bond behavior between steel bars and concrete. These changes further affect the bearing

capacity, deformation capacity, and overall stability of structural members. This paper reviews research progress on the fire resistance of reinforced concrete structures under fire conditions. First, the variations in the thermal and mechanical properties of steel reinforcement and concrete at elevated temperatures are analyzed. Then, the mechanical response, failure characteristics, and main influencing factors of reinforced concrete beams, columns, beam-column joints, and frame structures under fire are summarized. Finally, existing research findings are summarized and discussed. The results show that the fire resistance of reinforced concrete structures is jointly affected by material degradation, temperature field distribution, load level, fire exposure mode, and structural restraint conditions. This paper can provide a reference for fire response analysis and fire resistance research of reinforced concrete structures.

Keywords

Reinforced Concrete Frame, Fire Conditions, Thermal Performance, Fire Resistance

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

钢筋混凝土结构因其承载力高、整体性好、耐久性较强以及经济性较优等特点，被广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、地下工程及大型公共建筑中。与钢结构相比，钢筋混凝土结构中的混凝土保护层能够在一定程度上延缓高温向内部钢筋传递，因此通常被认为具有较好的耐火性能。然而，近年来多起建筑火灾事故表明，在持续高温作用下，钢筋混凝土结构仍可能发生明显的材料性能退化、构件承载力下降、变形急剧发展，甚至引发局部破坏或整体倒塌，严重威胁人员生命安全和财产安全。因此，深入研究火灾下钢筋混凝土结构的耐火性能，对完善结构抗火设计理论、提高火灾安全水平以及开展灾后结构性能评估具有重要意义。

火灾作用下，钢筋混凝土结构的力学行为具有明显的复杂性。一方面，混凝土和钢筋在高温环境中的物理力学性能会发生显著变化。随着温度升高，混凝土内部水分蒸发、孔隙压力增大，可能出现开裂、剥落甚至高温爆裂现象；同时，混凝土抗压强度、弹性模量和热工参数也会发生不同程度的退化。另一方面，钢筋在高温下屈服强度和弹性模量不断降低，钢筋与混凝土之间的粘结性能也会受到削弱[1]。这些材料层面的退化最终会导致构件刚度下降、变形增大和承载能力降低，从而影响结构整体耐火性能。

为此，本文围绕火灾作用下钢筋混凝土结构耐火性能的研究进展展开综述。首先，分析高温环境下钢筋与混凝土材料性能退化机制；其次，总结钢筋混凝土梁、柱、板及结构体系在火灾下的受力响应和破坏特征；然后，归纳耐火性能评价与分析方法的发展现状；最后，结合现有研究不足，探讨钢筋混凝土结构抗火研究的发展趋势，以为后续结构抗火设计、火灾安全评估和性能化防火研究提供参考。

2. 高温下钢筋混凝土材料的热力学性能

2.1. 钢筋和混凝土的热工性能

火灾作用下，钢筋混凝土结构的温度场分布是影响其耐火性能的基础因素，而材料热工性能则直接决定了热量在结构内部的传递过程。钢筋和混凝土的导热系数、比热容、密度及热膨胀系数等参数均会随温度升高发生变化，从而影响构件截面温度梯度、热应力分布以及后续力学性能退化程度。

混凝土是一种典型的非均质多孔材料,其热工性能受骨料类型、含水率、孔隙结构、配合比和温度水平等多种因素共同影响。与钢材相比,混凝土导热能力较弱,因此在火灾初期能够在一定程度上阻碍热量向截面内部传递,对内部钢筋起到隔热保护作用。然而,随着温度持续升高,混凝土内部自由水逐渐蒸发,部分结合水开始脱出,水泥石结构发生物理化学变化,孔隙和微裂缝不断扩展,使其传热性能发生明显变化。张仁波等[2]从微观尺度研究了混凝土温度相关热传导行为,将混凝土视为由骨料、砂浆和界面过渡区组成的三相复合材料,并考虑各相材料热工参数随温度变化的影响。研究表明,混凝土有效导热系数通常随温度升高而降低,且骨料类型对其导热性能具有重要影响。因此,在火灾温度场分析中,若忽略混凝土热工参数的温度相关性,可能会导致截面温度分布预测存在偏差。

已有试验研究也进一步表明,不同类型混凝土的热工性能存在明显差异。肖建庄等[3]通过试验研究了普通混凝土、高强混凝土、再生混凝土及配筋混凝土的导热系数,发现混凝土种类、组成材料和内部结构差异均会影响其传热能力。一般而言,高强混凝土由于内部结构较为致密,在高温下更容易产生较大的孔隙压力,从而影响其热传导过程;而再生混凝土由于再生骨料中含有旧砂浆和初始微裂缝,其导热性能也可能与普通混凝土存在差别。张冉等[4]针对温度对混凝土比热容的影响开展试验研究,指出混凝土比热容会随温度变化而改变,尤其在水分蒸发和材料相变阶段表现更为明显。上述研究说明,混凝土热工性能不仅与温度有关,还与材料组成和内部结构密切相关,因此在抗火分析中不宜简单采用常温参数进行计算。

与混凝土相比,钢筋属于金属材料,其导热能力明显较强,热量在钢筋中的传递速度远高于混凝土。在火灾作用下,当混凝土保护层厚度较大且未发生明显剥落时,钢筋升温速度相对较慢;但当保护层厚度不足、受火时间较长,或混凝土出现开裂、剥落甚至爆裂时,钢筋会更加直接地暴露于高温环境中,其温度将迅速升高。钱凯等[5]在高温下钢筋混凝土板抗冲击性能研究中,采用相关规范建议值定义钢筋热工参数,并结合热-力耦合作用分析了钢筋混凝土板的高温响应。由于钢筋热膨胀系数和导热性能均与混凝土存在差异,在升温过程中钢筋与周围混凝土之间容易产生变形不协调,进而引起界面附加应力,并可能削弱钢筋与混凝土之间的粘结性能。因此,钢筋热工性能不仅影响自身温度发展,也会间接影响钢筋混凝土构件的整体受力性能。

2.2. 高温下钢筋混凝土材料的力学性能

高温作用下,钢筋混凝土材料的力学性能会发生显著退化,这是导致构件承载力降低、刚度下降和变形加剧的主要原因。钢筋混凝土由钢筋和混凝土两种材料共同受力,其高温力学性能不仅取决于混凝土和钢筋各自的强度、弹性模量及应力-应变关系变化,还与两者之间的粘结性能密切相关。

对于混凝土而言,高温会引起其抗压强度、抗拉强度和弹性模量不同程度降低。一般情况下,温度较低时,混凝土内部水分蒸发和水泥石结构变化尚不明显,其强度退化相对有限;当温度进一步升高后,水泥水化产物分解、骨料与砂浆界面开裂、内部孔隙和微裂缝扩展,导致混凝土承载能力和变形协调能力明显下降。尤其在高温冷却后,混凝土内部损伤难以完全恢复,残余强度和刚度通常低于常温状态。何倍等[6]针对高温环境下超高性能混凝土力学性能及劣化机制进行了综述,指出高温火灾环境下混凝土宏观力学性能退化与微观结构劣化密切相关,解析二者之间的关系是提升混凝土耐高温性能的重要基础。

对于钢筋而言,高温会使其屈服强度、极限强度和弹性模量明显降低。当温度较低时,钢筋仍可保持较高的承载能力;但当温度超过一定范围后,钢筋强度和刚度迅速退化,塑性变形能力增强,导致受拉区钢筋难以继续提供有效抗力。Thongchom 等[7]对高温后钢筋力学性能进行了试验研究,结果表明,钢筋在经历超过 500℃的高温作用后,其力学性能会发生显著变化,既有计算模型在 700℃和 900℃条件下可能高估钢筋残余性能。因此,在火灾下钢筋混凝土结构分析中,应充分考虑钢筋强度和弹性模量随

温度升高的退化规律。

除钢筋和混凝土自身性能退化外，钢筋与混凝土之间的粘结性能也是影响钢筋混凝土材料协同受力的重要因素。高温作用会削弱钢筋肋与混凝土之间的机械咬合作用，同时混凝土开裂、界面损伤和热膨胀不协调也会导致粘结强度降低。Asghari Ghajari 等[8]研究了高温后钢筋混凝土构件的残余粘结-滑移行为，指出高温后粘结性能对火灾后钢筋混凝土结构安全评估具有重要意义。Albero 等[9]的研究也表明，钢筋与混凝土之间的粘结强度总体上随温度升高而降低，并且这种退化与混凝土抗压强度降低具有一定相关性。

总体来看，高温下钢筋混凝土材料力学性能退化具有明显的多因素耦合特征。混凝土强度、弹性模量和变形能力的降低，钢筋强度和刚度的退化，以及钢筋-混凝土粘结性能的削弱，会共同改变钢筋混凝土构件的受力机制。随着温度升高，构件内部材料性能退化程度不均匀，截面受力和变形协调关系也更加复杂。因此，在钢筋混凝土结构耐火性能评价中，应同时考虑混凝土、钢筋及其界面粘结性能的高温退化规律，为后续构件承载力分析、有限元模拟和火灾后安全评估提供可靠依据。

3. 钢筋混凝土构件的耐火性能

3.1. 钢筋混凝土梁耐火性能

钢筋混凝土梁是结构体系中的主要受弯构件，其耐火性能直接影响楼盖体系和框架结构的整体安全。火灾作用下，梁截面温度分布具有明显的不均匀性，受火面混凝土和受拉钢筋升温较快，而截面内部升温相对滞后。随着温度升高，混凝土强度和弹性模量逐渐降低，钢筋屈服强度和刚度不断退化，导致梁的抗弯刚度下降、裂缝扩展和跨中挠度增大。当材料性能退化较为严重时，梁可能出现挠度快速发展、受拉钢筋强度不足、混凝土压区损伤加剧或弯剪破坏等现象，最终达到耐火极限状态。

在试验研究方面，已有研究主要围绕受火时间、荷载水平、保护层厚度、配筋形式、边界约束和冷却方式等因素展开。丁发兴等[10]对钢筋混凝土简支梁开展高温试验，结果表明，荷载水平越高，梁的耐火极限越低；混凝土保护层越厚，受拉钢筋升温越慢，梁的耐火性能越好。王广勇等[11]对 SRC-RC 框架结构中钢筋混凝土梁开展耐火试验，发现框架梁的火灾响应不仅受梁自身截面和荷载影响，还受到柱、节点和整体框架约束作用影响，其变形发展和破坏特征与普通简支梁存在差异。刘才玮等[12]研究了受火钢筋混凝土梁冷却后的抗弯性能，指出受火时间延长会显著降低梁的承载力和初始刚度，喷水冷却还可能加剧混凝土剥落和裂缝发展。Liu 等[13]进一步研究了锈蚀钢筋混凝土梁火灾后的残余受弯性能，结果表明，钢筋锈蚀、受火时间和冷却方式会共同影响梁的剩余承载能力。

在有限元研究方面，由于火灾试验成本较高且参数组合有限，数值模拟已成为钢筋混凝土梁耐火性能研究的重要补充。有限元分析通常采用顺序热-力耦合方法，先计算梁截面温度场，再将温度场引入力学模型，分析梁的应力、变形和承载力退化过程。Gao 等[14]建立了钢筋混凝土梁火灾下有限元模型，模拟了梁在火灾中的温度分布和变形响应，并与试验结果进行了对比。近年来，有限元研究逐渐从普通梁拓展到框架梁、锈蚀梁和火灾后梁等复杂对象，并进一步考虑保护层剥落、钢筋锈蚀、粘结退化和既有裂缝等损伤因素。Longhi Bolina [15]基于有限元方法对普通强度钢筋和高强钢筋混凝土梁在标准火灾作用下的热-力性能进行了对比分析，研究了钢筋强度等级、配筋数量及布置方式对梁高温承载性能的影响，指出配筋形式和热-力耦合作用会显著影响钢筋混凝土梁的耐火性能。

总体来看，钢筋混凝土梁的耐火性能受温度场、材料退化、荷载水平、保护层厚度、配筋率、边界约束和冷却方式等多因素影响。试验研究能够直接揭示梁在火灾下的温度发展、挠度变化和破坏模式，有限元研究则可在试验验证基础上开展参数分析。现有研究已较好揭示了梁构件的火灾响应规律，但对真实火灾条件、非均匀受火、梁板协同作用以及整体结构约束效应的研究仍需进一步加强。

3.2. 钢筋混凝土柱耐火性能

钢筋混凝土柱是结构体系中的主要竖向承重构件，其火灾下的耐火性能直接关系到结构整体稳定和倒塌风险。与梁构件相比，柱通常承受较大的轴向压力，并可能同时受到弯矩、侧向变形和二阶效应影响。火灾作用下，柱截面温度分布不均匀，受火侧混凝土和纵筋性能逐渐退化，使柱的轴压承载力、抗弯刚度和稳定承载能力不断降低。当轴压比、偏心距或长细比较大时，材料性能退化更容易引起侧向变形放大和稳定失效。

在试验研究方面，早期研究主要围绕荷载水平、截面尺寸、受火面数量和边界条件等因素展开。Lie 等[16]基于钢筋混凝土柱火灾试验和计算研究，提出了矩形截面钢筋混凝土柱耐火极限计算方法，为后续柱构件抗火设计提供了基础。Tan 等[17]研究了四面受火钢筋混凝土柱的耐火性能，指出荷载水平、截面尺寸和材料性能退化会共同影响柱的耐火极限。Wu 等[18]进一步对方形截面钢筋混凝土柱进行了耐火试验，分析了不同受火条件下柱的温度场、轴向变形和破坏特征，说明受火面数量和温度梯度对柱的失效过程具有重要影响。

近年试验研究则更加关注非标准火灾、火灾后剩余承载力以及既有损伤对柱耐火性能的影响。Cao 等[19]对 30 根钢筋混凝土柱开展标准火灾和非标准火灾后的轴压试验，结果表明，标准火灾作用 30 min 和 45 min 后，柱残余轴压强度分别降低 11.6%和 17.4%；对于非标准火灾，最高温度对残余轴压强度退化的控制作用比受火持续时间更加明显。该研究说明，在火灾后安全评估中，仅以受火时间判断柱损伤程度并不充分，还应结合实际火灾温度发展过程进行分析。

在有限元研究方面，数值模拟通常采用热-力耦合分析方法，先计算柱截面温度场，再将温度场引入力学模型，分析柱的轴向变形、侧向变形和承载力退化过程。Bratina 等[20]建立了钢筋混凝土柱火灾行为的两步有限元分析方法，并与试验结果和 Eurocode 2 计算结果进行对比，表明该方法能够较好预测柱的耐火极限。国内研究中，蔡新江等[21]基于有限元分析了高温下不同缩尺比例钢筋混凝土柱的力学性能相似性，结果表明，在合理调整结构相似关系、时间相似关系和温度场相似关系后，缩尺模型在截面温度分布、柱顶轴向位移和耐火极限方面能够较好反映足尺柱的耐火性能。

总体来看，钢筋混凝土柱的耐火性能受轴压比、偏心距、长细比、截面尺寸、保护层厚度、受火面数量、边界约束和既有损伤等因素共同影响。试验研究能够直接揭示柱在火灾下的温度发展、变形过程和破坏模式，有限元研究则可在试验验证基础上开展多参数分析。现有研究已较好揭示了普通钢筋混凝土柱的耐火规律，但对于真实火灾、局部受火、震后火灾和锈蚀损伤耦合作用下柱构件失效机制的研究仍需进一步加强。

4. 钢筋混凝土结构的耐火性能

4.1. 钢筋混凝土节点耐火性能

钢筋混凝土节点是梁、柱构件之间传递内力和协调变形的关键部位，其受力状态较梁、柱单一构件更为复杂。火灾作用下，节点核心区不仅受到高温导致材料性能退化影响，还受到梁端弯矩、柱轴力、节点剪力以及边界约束共同作用。当节点区域混凝土开裂、剥落或钢筋锚固性能下降时，梁柱之间的传力路径可能发生改变，进而影响框架结构的整体稳定性。因此，节点耐火性能是理解钢筋混凝土框架火灾响应的重要环节。

在试验研究方面，Wang 等[22]较早开展了钢筋混凝土梁柱节点火灾试验，试件在标准升温曲线下受火，主要考虑梁端荷载比和柱轴压比的影响，并观测节点变形、混凝土爆裂、耐火极限及破坏机制。结果表明，节点在火灾中会同时表现出梁端转角增大、柱端变形发展和核心区损伤加剧等特征，其破坏并

非单一构件失效,而是梁、柱和核心区共同作用的结果。该研究也指出,相比梁、柱等单一构件,节点和整体框架的火灾性能研究仍相对不足,需要进一步开展系统分析。卢丽敏等[23]研究了高温下钢筋混凝土梁-柱节点的力学性能演化机制,重点关注升温和降温过程中节点转角、约束弯矩及其随温度发展的变化规律。研究表明,随着温度升高,梁端转角和约束弯矩会经历增长和衰减过程,节点转角峰值相对于约束弯矩峰值具有一定滞后性。Zhou 等[24]也基于热-力耦合试验方法研究了钢筋混凝土梁柱节点火灾响应,发现当梁柱同时受火时,结构承载能力退化比单独梁受火更为明显。

在有限元研究方面,节点火灾分析通常采用热-力耦合方法,先计算节点区及相邻梁柱截面的温度场,再分析高温下节点应力分布、变形发展和破坏模式。王广勇等[25]建立了火灾下钢筋混凝土梁-柱平面节点有限元模型,计算结果与试验结果基本吻合,并进一步分析了节点受火方式、柱荷载比、梁荷载比和梁纵筋配筋率对节点变形、破坏形式和耐火极限的影响。该研究表明,有限元方法能够弥补节点火灾试验数量有限的不足,有助于揭示不同参数对节点耐火性能的影响规律。

总体来看,钢筋混凝土节点的耐火性能受节点受火方式、梁端荷载、柱轴压比、核心区配箍、钢筋锚固、边界约束和相邻构件协同作用等多因素影响。与梁、柱单一构件相比,节点火灾响应更强调传力路径变化和整体约束效应。现有研究已从基本火灾试验和有限元分析逐渐扩展到高温全过程、震后火灾和火灾后修复等方面,但关于真实火灾下节点核心区剪切破坏、钢筋粘结锚固退化以及节点失效对框架整体倒塌风险的影响仍需进一步深入研究。

4.2. 钢筋混凝土框架耐火性能

钢筋混凝土框架是由梁、柱和节点共同组成的结构体系,其火灾响应不同于单个梁、柱构件。火灾作用下,受火区域构件材料性能退化会引起刚度下降和变形增大,同时框架结构的连续性和约束作用又会导致内力重分布,使未直接受火构件也参与整体受力。因此,框架结构的耐火性能不仅取决于受火梁、柱本身的承载能力,还与火灾位置、荷载水平、结构约束条件、节点传力能力以及整体冗余度密切相关。

在试验研究方面,Raouffard 等[26]对两个缩尺钢筋混凝土框架进行了标准火灾试验,研究了服役荷载作用下框架的整体耐火行为。结果表明,梁柱连续性会在火灾中产生明显的轴向约束和弯矩约束,这种约束一方面可能放大构件二阶效应,另一方面也可能提高受火梁的承载能力,说明框架结构的整体作用对耐火性能具有重要影响。Zhang 等[27]对9个钢筋混凝土框架进行了标准火灾试验和冷却后静力加载试验,结果表明,火灾温度对框架力学性能的影响大于外部火荷载影响;当温度分别达到600℃、800℃和1000℃时,框架极限承载力下降幅度分别约为36.9%、48.0%和57.3%,说明温度水平是控制火灾后框架剩余承载力的重要因素。

近年来,整体框架火灾试验逐渐由平面框架向空间框架发展。Wang 等[28]对大比例三层单跨钢筋混凝土空间框架开展火灾试验,并利用试验结果验证热-力耦合数值方法。研究表明,火灾会显著影响结构整体动力特性和变形响应,结构基本频率在受火后降低约38.8%;同时,火灾主要影响受火楼层的应力和变形,且随着荷载比由0.3增至0.9,结构达到耐火极限的时间明显缩短。该类研究说明,空间整体效应、楼层间协同作用和荷载水平是评价框架结构耐火性能时不可忽视的因素。

在有限元研究方面,钢筋混凝土框架耐火分析通常采用热-力耦合方法,先模拟火灾下梁、柱及节点的温度场,再进行整体结构受力分析。王广勇等[29]建立了局部火灾下钢筋混凝土平面框架有限元模型,分析了框架变形规律、破坏机制、塑性铰分布、受火梁内力和应力状态,并研究了柱轴压比和火灾位置对框架耐火性能的影响。结果表明,局部火灾会改变框架内力传递路径和塑性铰发展位置,框架整体耐火极限与单个构件耐火极限并不完全一致。刘猛等[30]进一步采用梁单元模型研究火灾下钢筋混凝土平面框架的受力机理,考虑火灾位置、柱轴压比和梁配筋率等参数,说明梁柱刚度退化和内力重分布是影

响框架失效过程的重要因素。

随着实际火灾模拟技术的发展,部分研究开始将火灾动力学模型与结构有限元模型结合。Zhang 等 [31]采用 FDS 模拟构件周围实际火灾温度场,并结合 ABAQUS 建立多尺度钢筋混凝土框架模型,其中受火区域采用实体单元,非受火区域采用梁单元,以兼顾计算精度和效率。该方法可用于分析实际火灾条件下梁、柱变形和内力变化,为框架结构整体耐火性能评价提供了新的思路。

总体来看,钢筋混凝土框架的耐火性能受火灾位置、受火范围、荷载水平、柱轴压比、梁柱刚度比、节点传力能力和结构空间约束等因素共同影响。试验研究能够揭示框架在火灾下的整体变形、内力重分布和破坏模式,有限元研究则可在试验验证基础上开展多参数分析。现有研究已从单一构件逐渐拓展到平面框架和空间框架,但对真实火灾、多层多跨结构、楼板协同作用以及局部构件失效后整体倒塌机制的研究仍需进一步加强。

5. 现有研究不足

现有研究表明,火灾下钢筋混凝土结构的耐火性能受材料高温性能退化、截面温度场分布、荷载水平、边界约束条件和受火方式等多因素共同影响。已有文献从试验研究和有限元模拟两个方面对梁、柱、节点及框架结构的耐火性能进行了较多探索,但总体来看,部分研究仍以现象描述和参数分析为主,对不同理论模型、规范取值和试验边界条件差异所引起的计算结果偏差讨论不足。因此,有必要进一步从材料模型、试验方法和数值模拟假设等方面进行综合分析。

5.1. 材料高温模型差异及其影响

在钢筋混凝土结构抗火分析中,材料高温本构模型是影响计算结果的重要因素。不同规范或设计方法对混凝土和钢筋在高温下的强度折减、弹性模量退化、热膨胀以及应力-应变关系的处理方式并不完全一致。以欧洲规范、美国规范及国内相关规范为例,其差异主要体现在材料性能折减系数、应力-应变曲线表达形式以及是否考虑瞬态热应变等方面,如表 1 所示。

Table 1. Comparison of material models at elevated temperatures in different design codes

表 1. 不同规范中钢筋混凝土材料高温模型的主要差异

材料模型参数	欧洲规范	美国规范	国内相关规范或研究方法	对计算结果的可能影响
混凝土抗压强度折减	通常给出随温度变化的折减系数,并区分硅质骨料和钙质骨料混凝土	多采用经验折减关系或基于试验结果的简化模型	多参考国内试验结果或欧洲规范取值进行修正	折减系数偏高可能高估高温承载力,导致耐火极限预测偏不安全
混凝土应力-应变关系	给出高温下非线性应力-应变曲线,可用于截面承载力和有限元分析	常采用简化本构关系或试验拟合曲线	多根据试验数据建立退化模型	峰值应变和下降段不同会影响构件变形能力和破坏模式判断
钢筋屈服强度折减	给出钢筋强度随温度升高的折减规律	一般采用高温强度保留系数	常结合国内钢筋高温试验结果确定	直接影响受拉钢筋抗力和梁、板构件耐火极限
弹性模量退化	考虑混凝土和钢筋弹性模量随温度退化	通常采用简化折减方式	多采用经验公式或有限元软件内置模型	影响构件刚度退化、挠度发展和二阶效应
热膨胀与热应变	对混凝土和钢筋热膨胀进行规定,部分模型考虑高温瞬态应变	处理相对简化	常根据有限元分析需求选取	对约束构件和整体框架内力重分布影响较大
适用范围	适用于标准火灾下构件抗火设计和非线性分析	更偏向工程简化设计和评估	需结合具体材料、构件类型和试验数据修正	不同模型适用范围不同,直接影响模拟精度和安全储备

由表 1 可知, 不同规范对材料高温性能的处理存在一定差异。对于梁、板等受弯构件, 钢筋屈服强度和弹性模量折减模型对耐火极限影响较为显著; 而对于柱和框架结构, 混凝土强度退化、热膨胀、瞬态热应变以及边界约束条件的处理则会显著影响轴向变形、侧向位移和整体稳定性。因此, 在有限元分析或抗火设计中, 若直接采用某一规范模型而不进行适用性验证, 可能导致承载力退化和耐火极限预测结果存在偏差。特别是对于高强混凝土、再生混凝土、纤维混凝土以及火灾后损伤混凝土等特殊材料, 规范模型通常不能完全反映其真实高温性能, 仍需结合试验结果进行修正。

5.2. 现有试验研究的局限性

从试验研究来看, 已有成果为揭示钢筋混凝土梁、柱、节点和框架在火灾下的温度发展、变形演化和破坏模式提供了重要依据。然而, 由于火灾试验成本高、设备要求高和安全风险大, 现有试验通常存在试件数量有限、参数组合不足和边界条件简化等问题。部分研究采用标准升温曲线进行加载, 但实际建筑火灾往往具有明显的局部性、非均匀性和降温阶段特征, 标准火灾难以完全反映真实火灾下结构受热过程。此外, 许多试验以单一构件为对象, 梁、柱或节点边界约束常被简化处理, 难以充分反映整体结构中的内力重分布和空间协同作用。

对于框架结构而言, 整体火灾试验数量相对较少, 尤其是多层多跨钢筋混凝土框架、空间框架以及考虑楼板协同作用的试验仍较为缺乏。因此, 现有试验结论在推广至实际工程结构时仍需谨慎。未来研究应进一步加强真实火灾条件、局部受火、多构件协同作用以及火灾后剩余承载力方面的试验研究, 从而提高研究成果对实际工程抗火设计和灾后评估的适用性。

5.3. 有限元分析中的理论假设及不足

有限元方法能够弥补火灾试验参数有限的不足, 并可用于分析钢筋混凝土结构在复杂火灾条件下的温度场、变形发展和破坏机制。但现有有限元研究中仍存在若干简化假设。例如, 许多模型假定钢筋与混凝土之间完全粘结, 未充分考虑高温下粘结-滑移退化; 部分模型忽略混凝土爆裂、保护层脱落以及高温裂缝扩展对温度场和承载力的影响; 还有一些模型采用标准火灾曲线代替真实火灾温度场, 导致受火边界与实际情况存在差异。

此外, 不同研究中材料本构模型、热工参数、边界约束和失效判据的选取并不统一, 这也会导致计算结果之间存在差异。对于整体框架结构而言, 局部构件失效后内力重分布、节点传力能力退化以及楼板膜作用等因素均可能影响结构最终破坏模式。若模型未能合理考虑这些因素, 可能会低估或高估结构的整体耐火能力。因此, 未来有限元研究应在试验验证基础上, 进一步提高材料模型、界面模型和真实火灾边界条件的精细化程度, 并加强不同规范模型和不同失效准则对计算结果影响的对比分析。

6. 结论

本文围绕火灾下钢筋混凝土结构耐火性能的研究进展进行了综述, 主要结论如下:

1) 高温作用下材料性能退化是钢筋混凝土结构耐火性能下降的根本原因。混凝土在高温下会发生水分迁移、水化产物分解、孔隙扩展和微裂缝发展, 导致强度、刚度和变形性能劣化; 钢筋则表现为屈服强度、极限强度和弹性模量降低。同时, 高温会削弱钢筋与混凝土之间的粘结性能。未来应重点建立考虑混凝土热损伤、钢筋强度退化、钢筋-混凝土粘结滑移和混凝土爆裂耦合效应的高温材料本构模型, 提高材料层面分析的准确性。

2) 钢筋混凝土梁、柱、节点和框架在火灾下具有不同的受力机制和破坏特征。梁构件主要受受拉钢筋升温、跨中挠度发展和边界约束影响; 柱构件对轴压比、长细比、偏心距和受火面数量较为敏感; 节点区域受梁端弯矩、柱轴力、节点剪力和钢筋锚固退化共同作用; 框架结构则因连续性和整体约束产生

明显内力重分布。未来研究应由单一构件层面进一步拓展至节点、楼板和整体框架协同作用层面，重点分析局部构件失效后的内力重分布路径及整体倒塌机制。

3) 现有试验研究为揭示钢筋混凝土结构火灾响应提供了重要依据，但多数试验仍集中于标准火灾、单一构件和简化边界条件。实际建筑火灾通常具有局部性、非均匀性以及升温 - 降温全过程特征，结构受力状态也受到相邻构件、楼板、节点和整体约束的共同影响。未来应加强局部火灾下多层多跨钢筋混凝土框架试验、升温 - 降温全过程后的残余承载力试验，以及不同火源位置、通风条件和火灾持续时间对结构失效模式影响的试验研究。

4) 有限元模拟已成为钢筋混凝土结构耐火性能研究的重要手段，但模型精度仍受材料本构、界面关系、爆裂模拟和失效准则等因素制约。部分模型采用钢筋与混凝土完全粘结、忽略保护层剥落或采用标准火灾曲线等简化假设，可能导致耐火极限和破坏模式预测存在偏差。未来应发展精细化热 - 力耦合有限元模型，将高温下钢筋 - 混凝土粘结滑移、混凝土爆裂、保护层脱落、裂缝扩展和材料性能退化纳入统一分析框架，并建立适用于梁、柱、节点和框架不同层级的失效判据。

参考文献

- [1] Reddy, D.V., Sobhan, K., Liu, L. and Young, J.D. (2015) Size Effect on Fire Resistance of Structural Concrete. *Engineering Structures*, **99**, 468-478. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.015>
- [2] 张仁波, 金浏, 杜修力. 混凝土温度相关热传导行为微观分析[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(12): 1503-1512.
- [3] 肖建庄, 宋志文, 张枫. 混凝土导热系数试验与分析[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 17-21.
- [4] 张冉, 张秀崧, 童富果, 等. 温度对混凝土比热容的影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 203-207.
- [5] 钱凯, 谭鑫宇, 李治, 等. 高温下钢筋混凝土板抗冲击性能及其影响因素[J]. 工程力学, 2023, 40(1): 132-143+154.
- [6] 何倍, 张红恩, 朱新平, 等. 高温环境下超高性能混凝土力学性能及劣化机制研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(11): 3470-3481.
- [7] Thongchom, C., Kongwat, S., Jaitrong, J., Keawsawasvong, S., Bui, L.V.H., Stitmannathum, B., et al. (2023) Effect of Elevated Temperatures on Mechanical Properties of Spliced and Non-Spliced Steel Reinforcements: Experimental Study. *Buildings*, **13**, Article No. 1419. <https://doi.org/10.3390/buildings13061419>
- [8] Asghari Ghajari, F. and Yousefpour, H. (2022) Residual Bond-Slip Behavior in Reinforced Concrete Members Exposed to Elevated Temperatures. *Structural Concrete*, **24**, 3281-3298. <https://doi.org/10.1002/suco.202200927>
- [9] Albero, V., Hernández-Figueirido, D., Roig-Flores, M., Melchor-Eixea, A. and Piquer, A. (2024) High-Temperature Effects on Bond Behaviour between Concrete and Corrosion Resistant Steel Reinforcements. *Construction and Building Materials*, **447**, Article ID: 138086. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138086>
- [10] 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.
- [11] 王广勇, 崔兴晨, 方淳锟, 等. SRC-RC 框架结构钢筋混凝土梁耐火性能试验研究[J]. 工程力学, 2026(5): 210-220.
- [12] 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, 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20241008.1545.006>, 2026-05-27.
- [13] Liu, C., Yang, M., Wang, P., Li, K., Gao, X. and Miao, J. (2024) Experimental and Analytical Study on Post-Fire Residual Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams after Various Cooling Methods. *Engineering Structures*, **316**, Article ID: 118577. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118577>
- [14] Gao, W.Y., Dai, J., Teng, J.G. and Chen, G.M. (2013) Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire. *Engineering Structures*, **52**, 488-501. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.017>
- [15] Longhi Bolina, F. (2025) Thermomechanical Performance of Reinforced Concrete Beams with Normal and High Strength Steel Reinforcements under Fire Exposure: A FEA-Based Comparative Study. *Journal of Structural Fire Engineering*, **16**, 651-672. <https://doi.org/10.1108/jsfe-07-2025-0033>
- [16] Lie, T.T. and Irwin, R.J. (1993) Method to Calculate the Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Rectangular Cross Section. *ACI Structural Journal*, **90**, 52-60.
- [17] Tan, K.H. and Yao, Y. (2003) Fire Resistance of Four-Face Heated Reinforced Concrete Columns. *Journal of Structural Engineering*, **129**, 1220-1229. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2003\)129:9\(1220\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:9(1220))

- [18] Wu, B., Hong, Z., Tang, G. and Wang, C. (2007) Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Square Cross Section. *Advances in Structural Engineering*, **10**, 353-369. <https://doi.org/10.1260/136943307783239336>
- [19] Cao, V.V. and Ngo, S.T. (2024) Residual Axial Strength of Reinforced Concrete Columns after Exposure to Standard and Non-Standard Fires. *Advances in Structural Engineering*, **27**, 709-721. <https://doi.org/10.1177/13694332241232048>
- [20] Bratina, S., Čas, B., Saje, M. and Planinc, I. (2005) Numerical Modelling of Behaviour of Reinforced Concrete Columns in Fire and Comparison with Eurocode 2. *International Journal of Solids and Structures*, **42**, 5715-5733. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.03.015>
- [21] 蔡新江, 夏玮超, 毛小勇, 田石柱. 高温下不同比例钢筋混凝土柱力学性能相似性有限元分析[J]. 工程力学, 2022, 39(1): 129-138, 163.
- [22] Wang, G.Y. and Li, Y.M. (2011) Experimental Research on Fire Performance of Reinforced Concrete Beam-Column Joints. *Advanced Materials Research*, **250**, 2477-2480. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.250-253.2477>
- [23] 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.
- [24] Zhou, M. and Wang, Y. (2024) The Mechanical Properties of Reinforced Concrete Beam-Column Joints under the High-Temperature Effect of Fire. *Advances in Civil Engineering*, **2024**, Article ID: 2842791. <https://doi.org/10.1155/adce/2842791>
- [25] 王广勇, 韩林海, 余红霞. 钢筋混凝土梁-钢筋混凝土柱平面节点的耐火性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 164-173.
- [26] Raouffard, M.M. and Nishiyama, M. (2015) Fire Resistance of Reinforced Concrete Frames Subjected to Service Load: Part 1. Experimental Study. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **13**, 554-563. <https://doi.org/10.3151/jact.13.554>
- [27] Zhang, X., Shen, Q., Li, Z., Tang, S. and Luo, Y. (2014). Experimental Study on Fire Resistance of Reinforced Concrete Frame Structure. In: *Proceedings of the 2014 International Conference on Mechanics and Civil Engineering*, Atlantis Press, 1031-1037. <https://doi.org/10.2991/icmce-14.2014.186>
- [28] Wang, G., Zheng, Z., Wang, J., Jiang, J. and Lv, Y. (2025) Experimental Study on Fire Response of Large-Scale RC Space Frame Structures and Numerical Calculation Method. *Engineering Failure Analysis*, **171**, Article ID: 109362. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109362>
- [29] 王广勇, 韩林海. 局部火灾下钢筋混凝土平面框架结构的耐火性能研究[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 81-89.
- [30] 刘猛, 王广勇, 张东明. 火灾下钢筋混凝土平面框架结构受力机理分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(10): 94-101.
- [31] Zhang, C., Sun, G., Wang, G. and Xiao, S. (2024) The Performance Analysis of the Reinforced Concrete Frame Structure under Actual Fire Conditions Based on the Multi-Scale Model. *Results in Engineering*, **23**, Article ID: 102402. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102402>