

文章编号:1671-8879(2018)06-0020-11

# 混凝土结构抗火研究综述与建议

孙 鹏<sup>1,2</sup>, 侯晓萌<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 为了促进混凝土结构抗火研究的发展, 从火灾温度场发展过程、混凝土结构抗火性能与抗火设计、火灾后结构损伤评估与加固修复、混凝土结构抗火性能提高方法等 4 个方面出发, 总结混凝土结构抗火研究成果, 指出研究中存在的问题并展望了其发展趋势。从空气、结构温度场 2 个方面归纳了火灾温度场研究方法, 总结不同参数对混凝土材料、构件、结构高温性能的影响规律, 分析现有混凝土结构抗火设计方法的应用以及其优点和不足, 梳理火灾后结构损伤评估流程, 分析火灾后实际工程损伤评估与加固修复案例, 并对现有火灾后结构损伤检测和维修加固方法进行总结, 最后, 从材料及构造 2 个方面总结提高混凝土结构抗火性能的方法。研究表明: 高温下混凝土结构力学性能劣化严重, 掺加纤维、调整原材料配合比和应用合理构造措施可提高混凝土结构抗火性能, 掺聚丙烯纤维可有效避免高性能混凝土高温爆裂。后续应重点研究高温下大空间混凝土结构温度场分布, 材料高温性能随机性对混凝土构件力学性能的影响规律, 不同温度-荷载路径及反复升降温对结构和构件高温性能的影响, 科学的混凝土结构火灾损伤评估体系, 结构抗火可靠度设计理论研究和高性能混凝土结构抗火设计方法等方面。

**关键词:** 桥梁工程; 混凝土结构; 抗火性能; 抗火设计; 火灾损伤; 加固修复; 改善措施; 综述

**中图分类号:** U448.23; TU311.41

**文献标志码:** A

## Review and suggestion on fire resistance research of reinforced concrete structures

SUN Peng<sup>1,2</sup>, HOU Xiao-meng<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** To promote the development of research of fire resistance of concrete structures, the four aspects of the development process were systematically summarized. Accordingly, the development of the temperature field of fire, fire resistance performance and fire resistance design of concrete structures, damage assessment and repair reinforcement of structures after fires, improvement of the fire resistance of structures, and some issues for each aspect that still need to be investigated were discussed, and the development trend of the research was also prospected. Among them, the research methods of the fire temperature field were summarized from the

收稿日期: 2018-06-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578184, 51408167); 黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q15058)

作者简介: 孙 鹏(1992-), 男, 山东青州人, 工学博士研究生, E-mail: sunpeng@chd.edu.cn.

通讯作者: 侯晓萌(1982-), 男, 河南周口人, 副教授, 工学博士, E-mail: houxiaomeng\_hit@126.com.

perspectives of air and structural temperature fields. The effects of different parameters on the high-temperature resistance performance of concrete materials, members, and structures were also summarized. Further, the application, advantages, and disadvantages of existing fire-resistance designs for concrete structures were analyzed, and the general process of structural damage assessment after a fire was examined. Engineering damage assessment and reinforcement repair cases after fires were also analyzed, and existing detection and repair methods after fires were summarized. Finally, methods for improving the fire resistance of structures were listed in terms of materials and construction. The results show that the mechanical properties of concrete structures deteriorate seriously at high temperatures. Adding fibers, adjusting raw materials, and construction measures can improve structural fire resistance. Further, adding polypropylene fibers can effectively prevent spalling of high-performance concrete. The following main subjects need further study, such as the temperature field distribution of large concrete structures under high temperature, the influence of the randomness of a material's high-temperature performance on mechanical properties of members, the influence of different temperature-load paths, the effects of repeated lifting and lowering temperatures on the high-temperature performance of structures and members, the establishment of a scientific evaluation system for structures subjected to high temperatures, a theoretical study on structural fire resistance reliability design, and a high-performance concrete structure fire resistance design method. 3 tabs, 5 figs, 50 refs.

**Key words:** bridge engineering; concrete structure; fire resistance performance; fire resistance design; fire damage; strengthening and restoration; improvement measure; review

## 0 引言

火灾发生频度高、危害大<sup>[1]</sup>,全球平均每年发生360万起火灾。据世界火灾统计中心(WSFC)资料显示,美国平均每年发生的高速公路交通火灾事故达37 600起,造成至少570人死亡和1.28亿美元的财产损失<sup>[2]</sup>。混凝土结构在土木工程中应用广泛,火灾发生后,建筑室内温度在30 min内可达800℃~1 200℃,公路桥梁上发生的碳氢火灾,几分钟内就达到非常高的温度,在高温下结构往往因承载力和刚度降低而倒塌<sup>[3]</sup>。

有关火灾和混凝土结构抗火性能的研究始于19世纪<sup>[2]</sup>。美国于19世纪末成立了国家消防协会,20世纪90年代建立了建筑与火灾科学实验室,英国、加拿大、澳大利亚和日本等也先后成立了防火协会和火灾科学研究实验室。科技人员通过大量混凝土构件、结构抗火试验,研究了火灾温度场分布与烟气运动规律<sup>[3]</sup>,高温对各种材料热工参数与力学性能的影响,不同温度-荷载路径下构件力学性能和高温对不同体系结构变形与承载能力的影响等<sup>[1]</sup>;在试验数据的基础上,形成了混凝土结构、构件抗火设计与损伤评估方法,编制了混凝土抗火、防火设计规范,如美国的ACI 216.1-07<sup>[4]</sup>和欧洲的Eurocode 2<sup>[5]</sup>

等。20世纪60年代中国成立了公安部消防科学研究所,1989年建立了第1所火灾科学国家重点实验室。中国各火灾实验室和结构抗火协会通过大量火灾试验和抗火研究,形成了一系列混凝土结构抗火设计规范和火灾后结构损伤评估与加固设计标准,如《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)<sup>[6]</sup>和《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)<sup>[7]</sup>等。虽然国内外学者对混凝土结构进行了大量研究,但高温下混凝土结构内力重分布规律尚不明确,仍缺乏科学、合理的抗火设计与损伤评估方法,没有针对火损结构的加固修复标准以及系统的混凝土结构抗火性能提高方法。现行国内外规范存在较多不足:ASCE结构防火手册中钢筋高温本构关系没有下降段,Eurcode 2 Part 1-2中钢筋高温下极限拉应变与温度无关<sup>[1]</sup>;《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)仅通过调整构件截面尺寸及保护层厚度达到防火要求等。因此,本文总结了混凝土材料、构件和结构的高温性能,分析了结构抗火设计与火灾后损伤评估方法应用现状,归纳了修复加固与提高结构抗火性能的方法,指出研究中存在的问题并对今后发展趋势进行了展望,旨在推广混凝土结构抗火研究的成果,为相关规范的完善提供借鉴。

1 火灾温度场与结构高温性能

1.1 火灾温度场

火灾的发展阶段一般为:开始燃烧、逐渐发展、剧烈燃烧、下降和熄灭等,其具体过程与环境状况、热解系数及材料性能等有关。在火灾过程中,一般认为结构最不利状态出现在温度最高时,但在不同降温情景中,结构最不利状态也可能出现在降温阶段。混凝土结构与燃烧源、烟气之间进行热对流与热辐射,内部发生热传导<sup>[8]</sup>。

火灾环境温度的相关研究较多,火灾试验和数值模拟是主要的研究方法。通过火灾试验,不仅可以得到各种经验性的计算模型,还可为理论与数值模型的检验提供大量可靠数据。目前,国内外学者尝试通过引入新的试验仪器提高试验结果准确性,例如:用新型再生光纤布拉格光栅高温传感器代替高温热电偶,避免电磁效应对高温热电偶的干扰<sup>[9]</sup>;通过高温光纤传感器代替高温热电偶减少响应时间<sup>[10]</sup>等。火灾计算机模拟可以预测多种环境中火灾蔓延、烟气运动等,在研究火灾发展过程中被广泛采用。现阶段火灾环境温度的研究主要集中在 2 个方面:①火灾过程基本现象的理论模型;②对不同火灾场景进行计算机模拟分析和火灾试验,并回归得到火灾空气升温公式。

结构温度场主要通过热传导方程进行计算。国内外研究机构编制了适用于结构温度场分析的有限元软件,软件计算结果与实际情况较为吻合<sup>[11]</sup>。一些国家和机构为了方便不同抗火试验结果相互比较,规范了不同场景火灾升温曲线<sup>[12]</sup>(图 1),常见场景中火灾燃烧模型有以下 2 种。

(1)室内模型

- ①ISO 834 标准曲线,  $T=T_0+345\times\lg(8t+1)$
- ②HC 标准火灾曲线,  $T=T_0+1\,080\times(1-0.325e^{-0.167t}-0.675e^{-2.5t})$
- ③ASTM-E119 标准火灾曲线,  $T=1\,166-532e^{-0.01t}+186e^{-0.05t}-820e^{-0.2t}$

式中:  $T_0$  为环境初始温度;  $t$  为火灾持续时间;  $T$  为燃烧开始后的环境温度。

(2)隧道内模型

- ①RWS 火灾曲线,相关系数见表 1。
- ②HC<sub>inc</sub> 火灾曲线,  $T=1.18T_0+1\,276(1-0.325e^{-0.167t}-0.675e^{-2.5t})$ ,
- ③RABT-ZTW 火灾曲线,

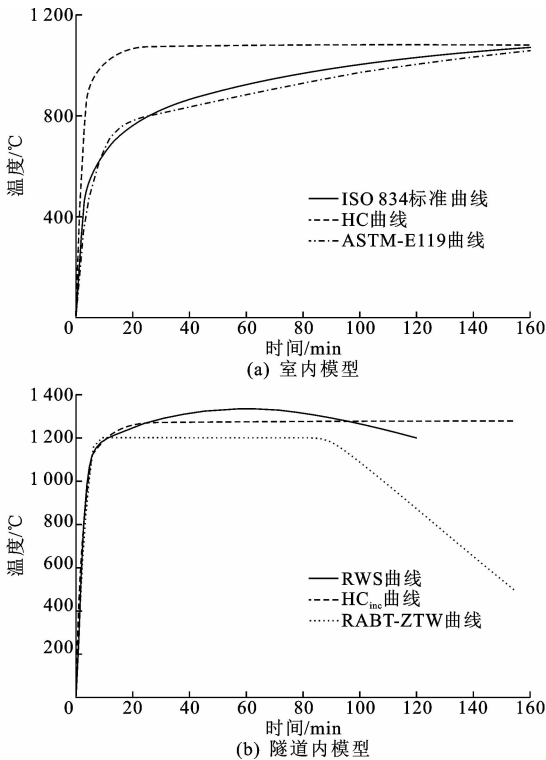


图 1 不同环境中火灾升温曲线数学模型  
Fig. 1 Mathematical models of temperature rise curves in different environments

表 1 RWS 火灾曲线参数

Table 1 Parameters of RWS fire curves							
$t/\text{min}$	3	5	10	30	60	90	120
$T/^\circ\text{C}$	890	1 140	1 200	1 300	1 350	1 300	1 200

$$\begin{cases} T=T_0+(1\,200-T_0)t/5 & 0<t\leqslant 5 \\ T=1\,200 & 5<t\leqslant N \\ T=1\,200 & N<t\leqslant N+110 \end{cases}$$

式中:  $N$  为燃烧持续时间,图 1(b)RABT-ZTW 火灾曲线中,  $N$  为 90 min。

1.2 结构高温性能

混凝土结构高温下和高温后的破坏特征、耐火极限和承载力及变形衰减规律研究,是进行抗火设计和火灾后结构损伤评估及加固修复的必要条件。本文从材料、构件和结构 3 个层面出发,对混凝土结构高温性能的研究进展及成果进行总结,并指出研究中尚存在的问题。

1.2.1 材料层面

国内外学者在大量火灾试验的基础上,得到了材料不同温度下热工参数,但是由于试验条件不确定性,研究结果存在较大差异<sup>[13]</sup>,其中,混凝土热膨胀系数与导热系数随温度的变化规律如图 2 所示。

由图 2 可知:随着温度逐渐升高,混凝土导热系数不断减小,温度上升到 800 °C 后,导热系数基本不

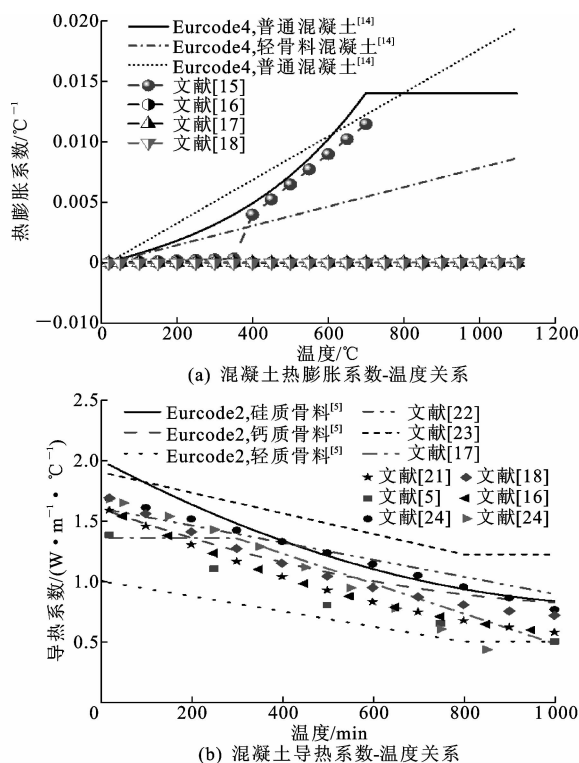


图 2 混凝土热膨胀系数、导热系数随温度变化规律

Fig. 2 Variations of concrete thermal expansion coefficients and thermal conductivity with temperatures

再变化<sup>[19]</sup>;混凝土热膨胀系数增大,重度变化不大,现有研究一般将其视为常数;混凝土含水率、骨料种类、强度等级、配合比等对混凝土导热系数和热膨胀系数均有一定影响。随着温度升高,结构钢导热系数逐渐减小,比热容增长幅度较大,重度基本不发生变化,部分规范中建议取为常数。

混凝土抗压强度随温度升高略微增大后大幅减小,抗压强度受骨料种类、应力状态、配合比、温度-荷载路径和混凝土强度等的影响,混凝土遭受反复升降温后强度降低,但强度损失主要发生在第 1 次升降温后,不同冷却方式影响混凝土高温弹性模量和抗压、抗拉及抗折强度<sup>[20]</sup>。混凝土高温应变中瞬态热应变和自由膨胀应变数值较大,但方向相反;高温徐变受骨料种类、混凝土级配、试件构造等影响;瞬态热应变受混凝土强度、应力状态等影响<sup>[15]</sup>。混凝土抗压强度、弹性模量随温度变化规律如图 3 所示。图 3 中,  $f_T$ 、 $f$  分别为混凝土高温抗压强度和常温抗压强度;  $E_T^c$ 、 $E_c$  分别为混凝土高温弹性模量和常温弹性模量。

高温下钢筋的屈服强度、极限强度和弹性模量下降明显。高温后钢筋弹性模量下降不明显,不同灭火方式对高温后钢筋强度有一定影响。当温度超

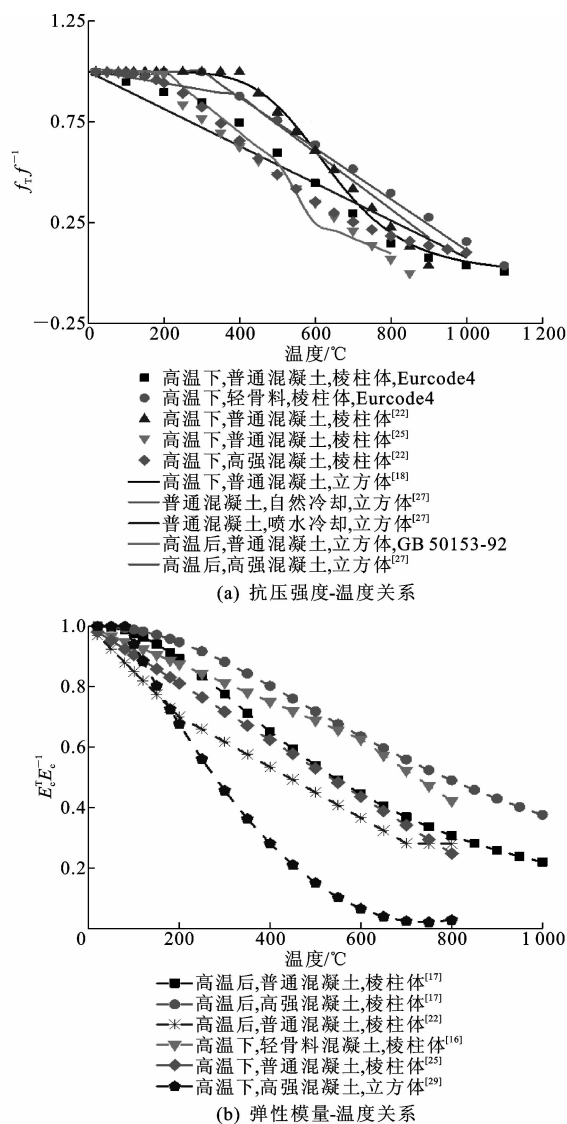


图 3 高温下和高温后混凝土抗压强度、弹性模量退化规律

Fig. 3 Degradation of compressive strength and elasticity modulus of concrete under and after high temperature

过  $400^{\circ}\text{C}$  时,钢筋高温应变中的高温蠕变不可忽略。预应力钢筋的应力比一般在  $0.3 \sim 0.7$  之间,应力水平越高,预应力钢筋高温下屈服、极限强度退化越快<sup>[15]</sup>。温度在  $300^{\circ}\text{C}$  以内时,高温后预应力筋的条件屈服强度与极限强度变化相对较小,温度高于  $300^{\circ}\text{C}$  时,强度退化加快;温度未达到  $700^{\circ}\text{C}$  时,高温后预应力钢绞线弹性模量变化不大<sup>[26-28]</sup>。初应力和高温蠕变对预应力钢丝、钢绞线的抗火性能有影响;恒载升温路径下,应力水平为  $0.6$ ,温度为  $400^{\circ}\text{C}$  时,钢丝即被拉断<sup>[29]</sup>。

### 1.2.2 构件层面

从 20 世纪 60 年代开始,国内外对板、梁、柱等混凝土构件进行了大量抗火试验研究,发现影响其耐火极限和受力性能的主要因素有受火方式、配筋

率、约束条件、材料性能、构造特点与荷载特性等<sup>[30]</sup>,在大量抗火试验数据基础上,基于构件材料高温性能与破坏形式,提出了混凝土构件高温剩余承载能力、变形与耐火极限的理论计算方法<sup>[31]</sup>。21世纪初,研究者开始编制混凝土结构火灾反应非线性分析软件,研究不同参数影响下的构件抗火性能<sup>[32]</sup>。张岗等建立了混凝土箱梁水化热温效剪力滞耦合模型,模拟了剪力滞随水化热温度荷载变化的过程,得到了水化热温效剪力滞时变效应规律<sup>[33]</sup>。张岗等还采用非线性有限元分析软件建立了 T 梁模型,研究了不同受火方式下预应力混凝土 T 梁的破坏模式,分析了不同火灾模式下梁肋与翼缘板的变形路径及其耐火时间<sup>[18]</sup>。Wang 等提出了双轴应力状态下钢筋混凝土板瞬态热应变分析模型,开发了计算高温下双向板响应模式和耐火性的程序,明确了混凝土的热应变和钢的蠕变应变对板抗火性能的影响<sup>[16]</sup>。

目前,混凝土构件高温承载力研究主要集中在常见构件抗弯及抗压方向,剩余承载力与耐火极限的理论计算方法适用范围有限;混凝土构件抗火性能影响因素认识尚不全面,已知影响因素不能规范、统一、定量描述。此外,火灾下构件、结构的热振动特性与结构破坏相关,应开展结构火灾动力响应试验研究。

1.2.3 结构层面

火灾试验和数值分析是现阶段研究混凝土结构抗火性能的主要手段,国内外学者根据已有的混凝土结构抗火试验对结构耐火极限、高温下变形速率和内力变化过程进行了研究,基于混凝土结构在荷载及高温共同作用下的变形、内力重分布、损伤特征和破坏形式,提出了其抗火设计理论方法<sup>[21,24]</sup>。郑文忠等完成了一系列预应力混凝土(Precast concrete,PC)连续梁板抗火试验,基于热力耦合作用下材料性能、结构体系特点及等效截面模型,提出了

PC 连续梁板高温下承载能力、裂缝宽度和刚度的计算方法;研究表明,综合配筋指标、结构体系特点和温度-荷载路径等参数影响 PC 连续梁板抗火性能<sup>[26]</sup>。Jiang 等建立了 8 层钢框架混凝土板三维有限元模型,研究了受火方式与荷载水平对框架结构内力重分布与连续倒塌过程的影响,研究表明:初始缺陷与荷载水平对结构高温承载力有显著影响,内力重分布过程与柱的刚度及约束方式和板的跨度及边界条件有关;单柱受火工况下,柱的荷载比增加到 0.5 时,框架结构发生倒塌;四柱同时受火工况下,框架结构耐火极限与倒塌的临界温度高于单柱受火<sup>[25]</sup>。王广勇等通过有限元建模,研究了受火方式、荷载水平和构造形式等对平面框架抗火性能的影响规律,研究表明:整体结构中钢梁、钢管混凝土柱的抗火性能优于构件单独受火时,高温下结构内力重分布严重;荷载水平与受火方式对框架结构抗火性能有显著影响<sup>[27]</sup>。

目前,国内外关于混凝土结构整体抗火性能的研究多以案例分析形式出现,缺乏对结构抗火性能的规律性研究。研究中一般将标准火灾升温曲线作为高温荷载施加到结构上,且缩尺结构抗火试验中荷载、构造比例往往难以确定,导致研究结果与实际情况存在较大差异。因此,应深入、系统研究实际火灾场景下的结构抗火性能,进行足尺结构抗火试验,确定影响结构抗火性能参数,并根据参数定量描述结构抗火性能。

2 结构抗火设计方法

合理的结构抗火设计方法需要大量混凝土结构高温性能试验数据与理论研究成果。现阶段混凝土结构抗火设计要求和如图 4 所示。

基于试验的抗火方法一般通过具体火灾试验确定构件抗火能力,根据构件重要性、火灾特点和结构功能等参数对照规范以查表方式确定抗火需求。目

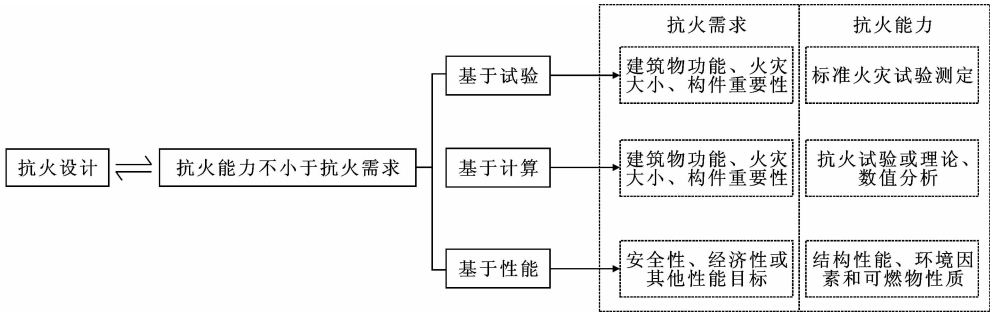


图 4 抗火设计要求和方法

Fig. 4 Fire resistance design requirements and methods

前,基于试验的抗火设计规范有:美国的 ACI 216.1-07 规范、澳大利亚的 AS—3600 规范和中国的《建筑设计防火规范》(GB 50016—2004)等。基于试验的抗火设计方法虽然容易掌握,便于工程人员使用,但其未考虑火灾下构件的承载能力,且划分耐火等级时考虑因素不全面,试验费用高<sup>[33-34]</sup>。

基于计算的抗火设计方法中结构抗火需求确定方法与基于试验的抗火设计方法相同;结构抗火能力一般通过理论或数值分析计算确定,也可通过结构抗火试验得到。基于试验的抗火设计规范有英国的 BS 5950-8 和欧洲的 Eurcode 2 等。目前,已有学者提出了基于计算的混凝土及预应力混凝土结构抗火设计方法<sup>[26]</sup>。基于计算的抗火设计方法虽然考虑了高温下构件的力学性能,但其研究对象一般为混凝土梁、板、柱等构件,缺乏涉及结构体系的研究。

由于抗火需求和抗火能力的确定方法比较合理,如图 4 所示,基于其性能的抗火设计更加科学。20 世纪 80 年代,英国根据基于性能的抗火设计方法对抗火规范进行了完善,但目前尚未有国家完全使用基于性能的抗火设计规范。李引擎介绍了针对建筑结构的性能抗火设计方法,指出基于性能的抗火设计方法仍需进一步研究完善<sup>[35]</sup>。

### 3 火灾后结构损伤评估与加固

准确评估火灾后结构损伤程度,并根据损伤等级确定合理加固方案,使修复后结构能满足正常使用条件,并可以带来较大的经济和社会效益<sup>[36]</sup>。本节总结了火灾后结构损伤评估与维修加固的研究成果,列出了具体案例损伤评估与修复加固方法,见表 2。目前,国内外火灾后结构损伤评估的一般流程如图 5 所示。

图 5 中,火灾调查主要通过查阅设计图纸与检测报告,工程周围水文与通风状况、运营记录、防火设施及设备等资料,预测结构破坏倒塌时间并判断是否需要采取紧急安全措施。初步评估主要通过调查起火原因、主要燃烧物、火灾持续时间、火灾燃烧残留物、起火位置和灭火方式等,了解火灾场景概况,初步划分火灾后结构构件损伤等级并鉴定结构安全性,根据初步评估结果做出相应工程决策<sup>[37]</sup>。针对火灾后损伤程度超过某等级的构件进行详细损伤评估。目前,灾后结构详细损伤评估的指标主要为结构承载力,结构承载力计算需要高温后材料性能,而各种材料高温性能和损伤状况可以通过精度较高的检测方法得到<sup>[19]</sup>,常用的火灾后结构检测方

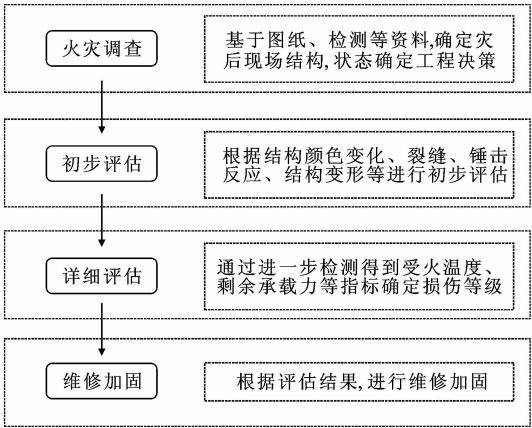


图 5 火灾后结构损伤评估与修复流程  
Fig. 5 Process of structural after fire damage  
assessment and repair

法及优缺点见表 3。维修加固方案根据火灾后结构损伤评估结果确定。

目前,国内外学者在混凝土结构火灾后损伤评估领域的研究主要集中在 2 个方面:①探寻新的检测技术或改善现有检测方法,如,基于多分辨率奇异值分解的图像融合方法、有限元模拟、取样试验和现有理论公式相互验证法、动力性能试验法等<sup>[38]</sup>;②探索完整、具体和科学的损伤评估体系,如,通过条带法或网格法计算火灾后结构承载力<sup>[32]</sup>,基于分形插值模型建立火灾后结构损伤评价方法,基于突变理论构建火灾后混凝土结构损伤综合评估模型等<sup>[39]</sup>。虽然目前火灾后结构损伤评价方法研究成果较多,但离散性较大,火灾后结构承载力的计算方法复杂,不便于工程应用;涉及结构体系的损伤指标较少,火灾后结构损伤评估模型缺乏科学理论体系的指导。

火灾后结构加固方法根据其损伤评价等级和损伤状况确定,维修加固策略需要保证修复方法经济性及修复后结构安全性。现有的混凝土结构加固规范有中国的《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)和美国的 ACI 546R-14 等,但规范中修复方法并不是针对火灾后受损的混凝土结构。预应力混凝土结构中混凝土一般处于受压状态,火灾后进行结构修复时应采取措施,使修补混凝土处于受压状态。火灾后损伤评估与修复实例见表 2。火灾后常用检测方法的优缺点见表 3。

虽然火灾后结构损伤评估与修复领域已经取得了一定研究成果,但仍有不足之处:国内外损伤评价方法较多,但未形成针对火灾后结构加固修复的规范;目前维修加固策略只考虑修复后结构安全性与耐久性,没有系统考虑修复方案经济性,且结构火损

表 2 火灾后结构损伤评估与修复案例研究

Tab. 2 Cases study on structural damage assessment and repair after fire

来源	工程案例	损伤描述	检测方法	损伤等级	修复方法	修复效果
文献 [40]	建筑面积约 24 000 m <sup>2</sup> 的商业楼意外发生火灾,持续时间约 5 h	混凝土爆裂,裂缝多,混凝土呈浅黄、白色	表观检测确定结构受火温度;钻芯-回弹法综合确定混凝土强度	定性划分了结构各构件损伤等级	Ⅲ,Ⅳ级损伤的梁柱采用增大截面法加固;Ⅲ,Ⅳ级损伤的楼面板更换处理	修复后结构各构件满足承载力要求
文献 [41]	建筑面积 6 231.69 m <sup>2</sup> 厂房聚乙烯材料(PE)与纸板燃烧;火灾持续时间约 11 h	火势较大区域压型钢 板 变 形 严 重,PE、聚碳酸酯(PC)塑胶材料燃烧残留物呈黑色凝胶状;玻璃有融化现象	表面特征观测,混凝土钻芯取样,截取钢筋性能试验等,确定火灾温度为 300 ℃~750 ℃	混凝土柱、框架梁初步鉴定为Ⅲ级,详细鉴定为 c 级;屋面板及维护墙体初步鉴定为Ⅳ级,详细鉴定为 d 级	凿除梁、柱疏松层,用聚合物砂浆喷抹恢复至原设计尺寸;屋面板及维护墙体拆除重建	厂房处于正常使用状态,后期调查无异常情况
文献 [36]	3×16 m 简支预应力空心板,桥下堆积的塑料波纹管燃烧,火灾持续时间约 35 min,喷水灭火	简支板无明显变形,受火面局部灰黄色,混凝土几乎无裂缝,锚固处局部脱落,局部大面积露筋	表面观测推测结构温度场分布,进而估算钢绞线等材料火灾后力学性能	距火源较远处板梁初步鉴定为Ⅱa 级;距火源较近处板梁详细鉴定为 d 级,较近处详细鉴定为 c 级	Ⅱa 级的板梁,自密实混凝土浇注平整;c 级的板梁,粘贴碳纤维布加固;更换详细鉴定为 d 级的板梁	修复后结构构件满足承载能力要求
文献 [42]	面积 1357.13 m <sup>2</sup> 钢筋混凝土建筑,火灾持续时间约 2 h。	柱、板混凝土剥落,局部大面积露筋,剪力墙火损不严重	通过回弹法与钻芯取样法,测量混凝土强度	对火灾后建筑进行了有限元模拟,发现柱承载能力不足,板的变形超出规范要求	增大混凝土柱截面	加固后梁抗弯承载力、变形符合规范要求,柱抗剪承载力满足规范要求
文献 [43]	高 74.5 m 空心薄壁墩,墩身侧面 PVC 塑料管燃烧,火灾持续时间约 20 min	部分混凝土保护层爆裂,部分主筋外露	钻芯取样法与回弹法得到混凝土强度,取样试验得到钢筋强度	没有对火灾后墩身进行初步鉴定;受火面详细鉴定等级均为 b	凿除墩身烧损混凝土、更换箍筋、增加主筋;凿除 3 区段受火面保护层	加固后桥墩满足正常使用极限状态下受力要求
文献 [44]	建筑面积 3 770 m <sup>2</sup> 钢筋混凝土框架结构,火灾持续时间约 110 min,过火面积约 170 m <sup>2</sup>	顶板被烧至灰白色;柱混凝土表面龟裂,梁表面混凝土酥松,箍筋、纵筋外露	表观检测确定火灾温度;裸露钢筋取样检测	火损严重处梁板和框架柱评为Ⅲ级,其余评为Ⅱb 级。详细鉴定,过火区域火损严重处梁板和框架柱评为 c 级	详细鉴定中评为 b、c 级的柱采用外包钢法加固,梁和板采用碳纤维加固,填充墙采用灌浆法修复	加固后结构的各项指标经检测均满足设计要求
文献 [45]	4×35 m 连续箱梁,边跨下工程材料燃烧	火损严重区混凝土呈黑色、剥落严重,构造钢筋外露	表观检测与超声波检测确定火灾温度与混凝土剥落深度;动态信号分析系统得到结构自振频率	桥梁整体刚度降低,承载能力下降	箱梁除顶板外均粘贴钢板并设体外预应力碳纤维板	加固后主梁的应力、位移和阻尼比等指标经检测均符合设计要求
文献 [46]	20 世纪 70 年代,比利 时 某 公 寓 楼 失 火,火灾持续时间 49~104 min	4 楼瓷砖裂缝 0.2~0.3 mm,火损严重处板竖向残余变形为 11.5 mm	通过概率分析方法,根据火灾持续时间确定火灾温度,根据火灾温度确定混凝土强度与残余应变	根据可靠度理论进行承载能力评估,板评估为安全	无需对板坯进行结构强化,可在板顶面添加其他材料调平楼面	

后修复策略与加固结构抗火性能的研究较少,火损结构修复后需要满足的条件尚未有明文规定。

## 4 提高结构抗火性能的途径

在进行混凝土结构设计或火灾后修复时,应提

高结构火灾易受损位置处抗火性能,现从材料和构造 2 个方面总结提高结构抗火性能的方法。

### 4.1 材料

纤维的掺入可以改善普通混凝土和高强度混凝土抗火性能,例如:聚丙烯(PP)纤维可以提高混凝

表 3 火灾后常用检测方法优缺点

Tab. 3 Advantages and disadvantages of common detection methods after fire

序号	检测方法	有无损伤	检测量	检测目标	优点	缺点
1	超声法	无	超声波速	强度损失、火灾温度、损伤程度与深度	可重复,可测得结构内部缺陷	对混凝土表面平整性要求较高;影响检测结果的因素较多
2	回弹法	无	回弹值	强度损失、受火温度	简单易行,方便快捷	只能测试结构火损表层;影响检测结果的因素较多
3	超声回弹综合法	无	回弹值、超声波波速	强度损失、受火温度	精度较高,适用范围较广	影响检测结果的因素较多
4	表面特征观测法	无	锤、凿响应,观察	强度损失、受火温度	简单易行,方便快捷	检测结果可信度低,一般只作为参考
5	钻芯取样法	有	芯样强度	强度损失	直观简便,结果可信度高	芯样完整性难以保证;检测费时、成本高;结果离散性大
6	冲击钻入检测法	有	钻入时间、深度及阻力	强度损失	方便快捷,操作简单	检测结果离散性大;影响检测结果的因素较多
7	电镜分析法	有	材料显微特征	受火温度	方便快捷,可得到火灾温度范围	专业要求较高
8	烧损厚度检测法	无	烧酥层厚度	受火温度	方便快捷,操作简单	影响检测结果的因素较多
9	红外热像法	无	热像温升	强度损失、受火温度	方便快捷,检测结果较精确	影响检测结果的因素较多
10	钻芯切片法	有	吸水率和张拉应力	损伤程度与深度	直观简便,结果可信度高	构件损伤严重处无法获得芯样;获得的芯样无法代表整个构件

土抗爆裂性能,钢纤维可以提高混凝土结构高温后剩余承载能力,混掺 PP 纤维与钢纤维,可以防止混凝土高温爆裂并提高其高温后残余强度。文献[47]中通过 6 组掺钢纤维和聚丙烯(PP)纤维混凝土试件抗火试验,研究了不同纤维掺量下普通混凝土与高强混凝土高温性能,研究发现:混掺纤维掺量较小也可以有效防止高强混凝土爆裂,当钢纤维长度与直径比值较大时,高温下普通混凝土与高强混凝土延性均较低;当温度超过 800 ℃时,混掺纤维混凝土残余抗拉强度为 15%。文献[48]中研究了掺入不同纤维对普通混凝土高温性能的影响和高温后纤维混凝土抗压、抗弯性能随养护时间的变化规律;研究发现:掺 PP 长纤维降低了混凝土高温后残余抗压、抗弯强度;掺钢纤维和混掺纤维提高了混凝土高温后残余抗压强度,但钢纤维的掺入增加了混凝土的爆裂程度;纤维混凝土高温后浸水养护一段时间后,抗压和抗弯强度恢复效果比素混凝土好。由于各学者采用的试验方法和材料配合比不同,纤维混凝土高温性能研究结果存在一定差异,未来仍需要进行大量纤维混凝土结构抗火试验,研究其高温性能。

耐高温无机胶凝材料作为防护层可提高结构承载力和抗火性能<sup>[49]</sup>,国内外学者对耐高温无机胶凝材料作为防护层进行了探索,但对影响结构抗火性

能参数的研究不够系统,未能找到最佳的配合比;采用防火保护构造措施后混凝土结构高温性能的研究也较少。

4.2 构造

提高结构抗火性能的构造措施主要有适当增加保护层厚度,加大截面尺寸和涂抹防火涂层等。

现阶段提高结构耐火极限的主要方法为涂抹防火涂层。侯伟等为了研究防火涂层对混凝土结构抗火性能影响,完成了 126 个涂有不同厚度防火涂层立方体混凝土试件的抗火试验,得到了防火涂层厚度对高温后混凝土抗压强度的影响规律,研究表明:防火涂层可以明显降低混凝土试件火损程度,在一定范围内,防火涂层厚度与混凝土试件高温后抗压强度线性相关;防火涂料可以延缓有机胶层达到玻璃态转化温度的时间,使纤维加固混凝土结构耐火极限符合现有规范要求<sup>[50]</sup>。

在一定范围内,增加构件截面尺寸和混凝土保护层厚度可以提高其耐火极限,但过大的截面尺寸与保护层厚度导致结构承载力降低,且容易造成混凝土高温下开裂,因此应结合实际情况确定混凝土构件构造形式。

此外,在混凝土板梁背火面设置防火措施,或增加板梁支座约束,可以提高板梁的耐火极限。减小



混凝土柱的长细比、钢筋直径或剪跨比,可以提高其耐火极限<sup>[27]</sup>。减小箍筋间距,将箍筋末端做成135°弯钩,在受力钢筋外侧,混凝土保护层内配置钢筋网片作为附加钢筋,可以减小混凝土爆裂程度。通过增配支座负弯矩钢筋,可以减小预应力板混凝土爆裂程度<sup>[29]</sup>。

## 5 结 语

(1)数值模拟能够预测火灾发展过程及混凝土结构在时变温度场中的非线性力学行为,但计算模型复杂,应在确保计算精度的同时,把握主要因素对模型进行简化。火灾温度场数学模型过于单一,应对不同火灾场景进行试验或模型分析,得到实用的不同火灾环境升温曲线。此外,结构最不利状态可能出现在降温阶段,有必要研究降温段的结构、构件力学性能。

(2)结合混凝土结构抗火研究成果,可知结构高温性能今后的研究内容包括:①材料高温性能随机性对构件力学性能的影响规律和多轴应力状态下材料的抗火性能;②不同温度-荷载路径及反复升降温对结构、构件高温特性的影响,特别是新型材料结构的探索性研究;③进一步研究混凝土结构材料、构件高温性能,由于影响材料、构件高温性能的参数较多,不同抗火试验给出的影响规律离散程度大,应进行大量混凝土构件抗火性能研究,建立材料、构件高温性能数据库,方便提炼具有实际可操作性的抗火设计方法;④混凝土结构整体抗火性能研究,通过进行足尺结构抗火性能试验,揭示结构中钢筋、混凝土应变和水蒸气发展规律,建立结构体系抗火性能参数化模型,亟需进行不同火灾情景下桥梁抗火试验,探索其结构破坏形式与内力重分布规律。

(3)火灾后结构损伤评估主要通过表观检测结果及剩余承载能力来表征结构受损程度,但目前尚缺乏准确判断结构火损程度的评估方法。建立完善、科学的结构损伤评估体系,探寻更多涉及结构的、易得到的、定量的结构损伤指标和研究火灾后混凝土结构无损检测方法,是未来火灾后结构损伤评估的研究方向。

(4)建议将防火构造与高性能材料有机结合,并研究能充分发挥材料性能优势的构造形式,延长混凝土结构耐火极限;探索大幅提高结构抗火性能的方法及相应施工、更换工艺及准则,将研究成果应用到实际工程中。

## 参考文献:

## References:

- [1] 郑文忠,侯晓萌,王 英. 混凝土及预应力混凝土结构抗火研究现状与展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016,48(12):1-18.  
ZHENG Wen-zhong, HOU Xiao-meng, WANG Ying. Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016,48(12):1-18.
- [2] 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(12):554-563.
- [3] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社,2011.  
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [4] ACI 216. 1-07, Standard method for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies[S].
- [5] EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design [S].
- [6] GB 50016—2014, 建筑设计防火规范[S].  
GB 50016—2014, Code for fire protection design of building[S].
- [7] CECS 252:2009, 火灾后建筑结构鉴定标准[S].  
CECS 252:2009, Standard for building structural assessment after fire[S].
- [8] 刘永军,李宏男. 建筑结构抗火性能研究回顾及展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2004,24(2):219-226.  
LIU Yong-jun, LI Hong-nan. Review and prospect of the study on behavior of structures in fire conditions [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004,24(2):219-226.
- [9] RINAUDO P, TORRES B, PAYA-ZAFORTEZA I, et al. Evaluation of new regenerated fiber Bragg grating high-temperature sensors in an ISO 834 fire test [J]. Fire Safety Journal, 2015,71:332-339.
- [10] RINAUDO P, PAYA-ZAFORTEZA I, CALDERON P. Experimental and analytical evaluation of the response time of high temperature fiber optic sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 243: 167-174.
- [11] 杨 帆,钱稼茹,张微敬,等. 大空间钢结构抗火性能

- 的简化计算方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2011, 51(2): 204-208.
- YANG Fan, QIAN Jia-ru, ZHANG Wei-jing, et al. Simplified model for fire behavior in large space steel structures[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(2): 204-208.
- [12] YANG H D, ZHANG S. Numerical simulation of temperature field and stress field in fused deposition modeling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7): 3337-3344.
- [13] 郑文忠, 侯晓萌, 闫 凯. 预应力混凝土高温性能及抗火设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2012.
- ZHENG Wen-zhong, HOU Xiao-meng, YAN Kai. Fire resistance of prestressed concrete and its fire safety design[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2012.
- [14] EN 1992-1-2: 2004, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design[S].
- [15] 吴 波, 梁悦欢. 高温后混凝土和钢筋强度的统计分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(12): 13-20.
- WU Bo, LIANG Yue-huan. Statistical analysis of strengths of concrete and steel bar after high-temperature treatment[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(12): 13-20.
- [16] WANG Y, DONG Y L, ZHOU G C. Nonlinear numerical modeling of two-way reinforced concrete slabs subjected to fire[J]. Computers & Structures, 2013, 119: 23-36.
- [17] LIE T T, ERWIN R J. Method to calculate the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross section[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(1): 52-60.
- [18] 张 岗, 朱美春, 贺拴海, 等. 火灾下预应力混凝土 T 形截面梁破坏模式研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 77-84.
- ZHANG Gang, ZHU Mei-chun, HE Shuan-hai, et al. Failure model analysis of prestressed concrete T girder exposed to fire[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 77-84.
- [19] 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.
- XIAO Jian-zhuang, SONG Zhi-wen, ZHANG Feng. An experimental study on thermal conductivity of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 17-21.
- [20] 南建林, 过镇海, 时旭东. 混凝土的温度-应力耦合本构关系[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(6): 87-90.
- NAN Jian-lin, GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Temperature-stress coupling constitutive relationship of concrete[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1997, 37(6): 87-90.
- [21] BALAJI A, NAGARAJAN P, PILLAI T M M. Studies on the behavior of reinforced concrete short column subjected to fire [J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55(1): 475-486.
- [22] 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 Zhou-dao, ZHU Bo-long, YAO Ya-xiong. Fire response analysis of reinforced concrete frames [J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(6): 18-27.
- [23] DWAIKATM B, KODUR V K. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(3): 425-434.
- [24] KODUR V K, AGRAWAL A. Effect of temperature induced bond degradation on fire response of reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2017, 142: 98-109.
- [25] JIANG J, LI G Q. Progressive collapse analysis of 3D steel frames with concrete slabs exposed to localized fire[J]. Engineering Structures, 2017, 149: 21-34.
- [26] 郑文忠, 侯晓萌. 混凝土及预应力混凝土结构抗火设计建议[J]. 建筑科学, 2013, 29(5): 67-71.
- ZHENG Wen-zhong, HOU Xiao-meng. Proposition for fire resistance design of concrete and prestressed concrete building structures [J]. Building Science, 2013, 29(5): 67-71.
- [27] 王广勇, 李玉梅. 局部火灾下钢管混凝土柱-钢梁平面框架耐火性能[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 236-243.
- WANG Guang-yong, LI Yu-mei. Performance of plane frames with concrete filled steel tube columns and steel beams subjected to local fire [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 236-243.
- [28] WEI Y, AU F T K, LI J, et al. Effects of transient creep strain on post-tensioned concrete slabs in fire [J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 69(7): 337-346.
- [29] 侯晓萌. 预应力混凝土梁板抗火性能与抗火设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- HOU Xiao-meng. Research on fire resistance and fire safety design method of prestressed concrete beam and slab[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,

- 2009.
- [30] 唐贵和, 吴波, 文波. 时变约束混凝土梁的升降温全过程内力分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(1): 39-44.
- TANG Gui-he, WU Bo, WEN Bo. Analysis of internal forces in inconstantly restrained reinforced concrete beams during heating and cooling phases[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2015, 43(1): 39-44.
- [31] YU X, TAO Z, SONG T. Effect of different types of aggregates on the performance of concrete-filled steel tubular stub columns[J]. Materials and Structures, 2016, 49(9): 3591-3605.
- [32] KODUR V K, RAUT N K, MAO X Y, et al. Simplified approach for evaluating residual strength of fire-exposed reinforced concrete columns[J]. Materials and Structures, 2013, 46(12): 2059-2075.
- [33] 张岗, 贺拴海. 混凝土箱梁热-力耦合模型及剪力滞时效效应[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2010, 11(2): 131-136.
- ZHANG Gang, HE Shuan-hai. Thermo-mechanics coupling model for concrete box girder and time-dependent effect of shear lags[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 11(2): 131-136.
- [34] HOU X M, KODUR V K, ZHENG W Z. Factors governing the fire response of bonded prestressed concrete continuous beams[J]. Materials and Structures, 2015, 48(9): 2885-2900.
- [35] 李引擎. 建筑防火性能化设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- LI Yin-qing. Performance-based fire protection design for building[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [36] 王国辉, 项凯. 某预应力混凝土桥梁火灾损伤评估[J]. 消防科学与技术, 2012, 31(3): 219-223.
- WANG Guo-hui, XIANG Kai. Assessment of one fire-damage prestressed concrete bridge[J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(3): 219-223.
- [37] 杜红秀. 基于承载力评估的混凝土结构火灾损伤的无损检测与评估方法[J]. 工程力学, 2008, 25(增1): 137-153.
- DU Hong-xiu. Non-destructive testing and evaluation method based on evaluation of load-carrying capacity for fire damage of concrete structure[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S1): 137-153.
- [38] 赵迪, 徐志胜. 基于 MRSVD 红外热像融合的混凝土结构火灾损伤检测方法[J]. 信息与控制, 2017, 46(1): 19-24.
- ZHAO Di, XU Zhi-sheng. Detection of fire damage to concrete structures with infrared thermal fusion based on multi-resolution singular value decomposition[J]. Information and Control, 2017, 46(1): 19-24.
- [39] 王子毅, 韩阳, 王威. 火灾后混凝土损伤综合评价的分形-插值模型[J]. 混凝土, 2012(2): 44-47.
- WANG Zi-yi, HAN Yang, WANG Wei. Fractal interpolation model for comprehensive evaluation on the degree of fire-damage concrete[J]. Concrete, 2012(2): 44-47.
- [40] 陈大川, 胡海波. 某商业楼重大火灾后检测鉴定与加固修复设计[J]. 建筑结构, 2010, 40(12): 105-109.
- CHEN Da-chuan, HU Hai-bo. Detection and reinforcement design for a business building after serious fire[J]. Journal of Building Structures, 2010, 40(12): 105-109.
- [41] 刘延廷, 王文广, 郝志杰. 某厂房火灾后的结构安全性鉴定及其加固方案[J]. 建筑技术, 2015, 46(增): 363-365.
- LIU Yan-ting, WANG Wen-guang, HAO Zhi-jie. Structural safety identification and reinforcement scheme of a factory building after fire[J]. Architecture Technology, 2015, 46(S): 363-365.
- [42] WASIM M, HUSSAIN R R. Three-dimensional computer-aided finite element method retrofitting modeling and non-destructive testing techniques for the assessment of actual existing high-rise fire-damaged reinforced concrete building[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2013, 22(12): 927-940.
- [43] 罗旋, 田军, 吴伟国. 某特大桥桥墩墩身火灾后安全性评定及修复[J]. 公路工程, 2013, 38(1): 158-162.
- LUO Xuan, TIAN Jun, WU Wei-guo. The fire evaluation and rehabilitation of highway bridge pier[J]. Highway Engineering, 2013, 38(1): 158-162.
- [44] 孟海, 李晓渊, 裴兴旺. 某综合办公楼火灾后结构安全检测鉴定与加固修复[J]. 施工技术, 2015, 44(16): 19-22.
- MENG Hai, LI Xiao-yuan, PEI Xing-wang. Structural safety appraisal and strengthening restoration of a comprehensive office building after fire[J]. Construction Technology, 2015, 44(16): 19-22.
- [45] 刘世忠, 马朝旭, 李丽园, 等. 火灾下 PC 箱梁的损伤评估与加固设计[J]. 桥梁建设, 2014, 44(6): 94-100.
- LIU Shi-zhong, MA Chao-xu, LI Li-yuan, et al. Assessment and strengthening design of PC box girder subjected to fire damage[J]. Bridge Construction, 2014, 44(6): 94-100.