

# Research Review on the Performance Degradation of Burnt Prestressed Concrete Bridges

Shu Peng<sup>1</sup>, Wenya Ye<sup>2</sup>, Yuxiang Wang<sup>3</sup>, Fangyuan Li<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Bridge Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

<sup>2</sup>Ningbo Highway Administration Bureau, Ningbo Zhejiang

<sup>3</sup>Shanghai Municipal Engineering Design Institute (GROUP) Co., Ltd., Shanghai

Email: \*fyli@tongji.edu.cn

Received: Jul. 9<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2016; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

---

## Abstract

This article summarized the mechanical properties of concrete, steel bar and tendon after burned with prestressed concrete beams. The calculation method of remaining bearing capacity of burnt beams was presented. The properties of burnt bridges were analyzed with the difference between experimental researches and the actual fire disasters of bridges, and then discussed the still existing problems about burnt bridges in current research.

## Keywords

Prestressed Concrete Bridge, Burnt Structure, Bearing Capacity, Performance Degradation

---

# 预应力混凝土桥梁过火后性能退化研究综述

彭 澍<sup>1</sup>, 叶文亚<sup>2</sup>, 王玉祥<sup>1</sup>, 李方元<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>同济大学土木工程学院桥梁工程系, 上海

<sup>2</sup>宁波公路管理局, 浙江 宁波

<sup>3</sup>上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海

Email: \*fyli@tongji.edu.cn

---

\*通讯作者。

收稿日期：2016年7月9日；录用日期：2016年7月23日；发布日期：2016年7月28日

## 摘要

本文总结了混凝土、普通钢筋及预应力钢筋高温后的材料力学性能，以及基于预应力混凝土模型梁受火试验的结构力学性能和相应的残余承载力计算方法，分析了桥梁火灾的特点，分析了试验研究与实际桥梁火灾的差异性，并据此讨论了针对桥梁火灾目前试验研究尚存在的问题。

## 关键词

预应力混凝土桥梁，过火结构，承载力，性能退化

## 1. 引言

近年来，随着我国经济的飞速发展，交通量日益增大，桥梁遭遇火灾的情况日益增多。本文总结了近几年桥梁火灾相关报道，大致可分为以下三种情况：

1) 桥梁施工过程中发生火灾，多源于施工过程中操作不当，如 2010 年哈尔滨松花江大桥在建桥墩起火、2012 年四川渠江二桥施工期间系杆保护层起火。此类情况一般通过及时局部修补或部分拆除重建，基本可恢复至设计状态。

2) 桥梁使用过程中上部火灾，多源于上部车辆着火，大部分此类火灾燃烧时间较短，仅对桥梁铺装层造成影响，可局部修补恢复使用。但也不乏油罐车或烟花爆竹运输车等易燃、易爆车辆火灾造成桥梁严重损坏，甚至倒塌的情况，如 2011 年榆林草沟大桥因油罐车追尾发生火灾导致主梁严重受损，2013 年连霍高速义昌大桥因烟花爆竹车辆爆炸导致桥梁垮塌、车辆坠落。

3) 桥梁使用过程中下部火灾，此类型是最常见也是影响普遍较严重的情况，多发生在中小跨径桥梁，源于下部废物、停车场、商铺等燃烧。如 2013 年余姚市姚洲大桥 2 号匝道桥因下部商铺起火造成整垮桥梁更换，2014 年南昌生米大桥因桥下报废公交车停车场发生火灾，导致桥梁严重烧损。

上述案例基本均发生在高速公路、城市高架的中小型跨径桥梁，以混凝土桥梁为主。预应力混凝土桥梁在我国中小跨径桥梁中占比最大，面对桥梁火灾，预应力混凝土桥梁首当其冲。当火灾发生时，过火梁体混凝土保护层爆裂、露筋、材料力学性能退化、结构强度及刚度减弱，将会直接造成生命财产损失，毁坏社会声誉和影响经济运营。因此，过火预应力混凝土桥梁结构其承载力水平如何、能否继续使用、如何进行加固改造使其恢复使用都是迫切需要解决的问题。

## 2. 研究现状

国外关于混凝土结构抗火性能的研究始于上个世纪初，并成立了许多抗火研究组织，国内关于建筑结构抗火性能研究始于上世纪 80 年代，后期随着预应力混凝土结构的广泛应用，其抗火性能研究也逐渐开始。总结国内外研究，主要包括三个方面：火灾模型(升温曲线)、材料在高温下及高温后的性能、结构过火性能。

### 2.1. 火灾模型

对于结构过火性能研究，首先应关注火灾升温过程，选取适当的火灾模型。目前关于桥梁结构火灾数据统计缺乏，国内外进行火灾试验或数值模拟研究常用火灾升温曲线一般均来自建筑结构火灾数据统

计。其中，常用的有欧洲规范标准曲线[1]、ASTM E119 曲线、国际标准 ISO-834 曲线[2]、我国《建筑构件耐火试验可供选择和附加的试验程序》(GB/T26784-2011) [3]建议曲线等。统计各标准曲线绘与图 1，其中环境温度取 20℃，《程序》中隧道火灾曲线的升温 and 恒温阶段时间和取 120 min。

由图 1 可看出，不同的火灾情景，火灾升温曲线差异较大；隧道火灾温度峰值最大，室外火灾温度峰值最低；除缓慢升温曲线外，其余曲线均在火灾发生后瞬时达到峰值，进入充分燃烧状态。

标准火灾模型曲线虽便于国内外统一进行结构抗火研究，但同时也限于固定的火灾情景。文献[2]搜集了国外考虑通风系数、可燃物材料、边界材料温度性能、形状系数、温度峰值等参数的参数化火灾模型曲线(欧洲规范曲线、BFD 曲线、CE534 曲线等)，主要由火灾数据加入参数进行回归统计得到，但这些曲线均因参数与桥梁火灾情景不符而无法直接用于桥梁火灾情景模拟。桥梁火灾虽属于室外火灾情形，但并非完全开放空间，特别是使用过程中桥下火灾情况，可燃物充分燃烧需要较长时间，且温度峰值应较上述欧洲规范 External Fire Curve (对应《程序》室外火灾曲线)高很多。因此，为便于桥梁结构过火性能研究，可能需进行桥梁结构火灾场景模拟，寻求更加适合的模型曲线。

## 2.2. 高温下/高温后材料力学性能

### 2.2.1. 混凝土

混凝土经受高温其内部结构及其含水率会随温度升高而变化，这会导致混凝土力学性能的变化。文献[4]-[11]进行了混凝土在高温下以及冷却后的抗压强度及弹模试验研究，并对试验数据回归得到经验公式，统一汇总于图 2、图 3。

由上述文献研究结果可以得出比较统一的结论是：过火混凝土抗压强度随其经历的最高温度的升高而降低，受火温度高于 800℃则基本丧失强度，经喷水(浇水)冷却的混凝土，其抗压强度随受火温度升高而降低的幅度更为明显。高温后混凝土弹模随其受火温度的升高而显著降低；混凝土强度等级、冷却方式、静置时间对弹模随温度变化基本没有影响。

### 2.2.2. 钢筋及预应力钢筋

过火钢筋的力学性能同样会随受火温度而变化，文献[6] [12]-[19]总结了关于钢筋及预应力钢筋高温

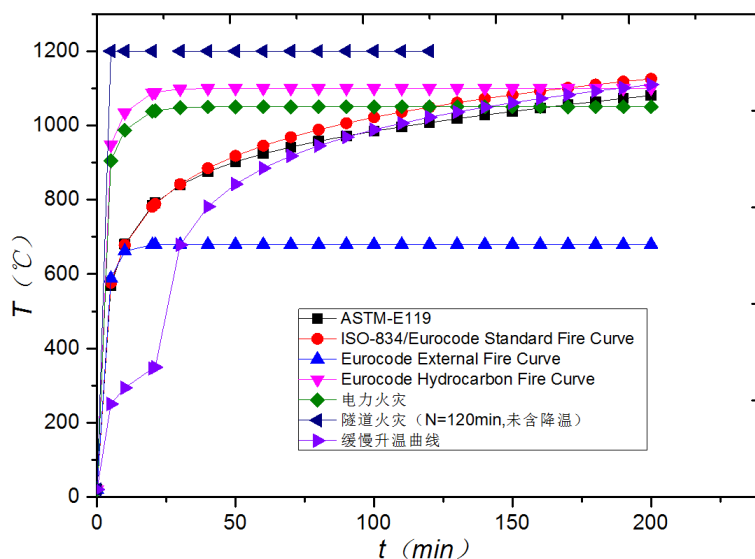


Figure 1. Fire model comparison

图 1. 火灾模型对比

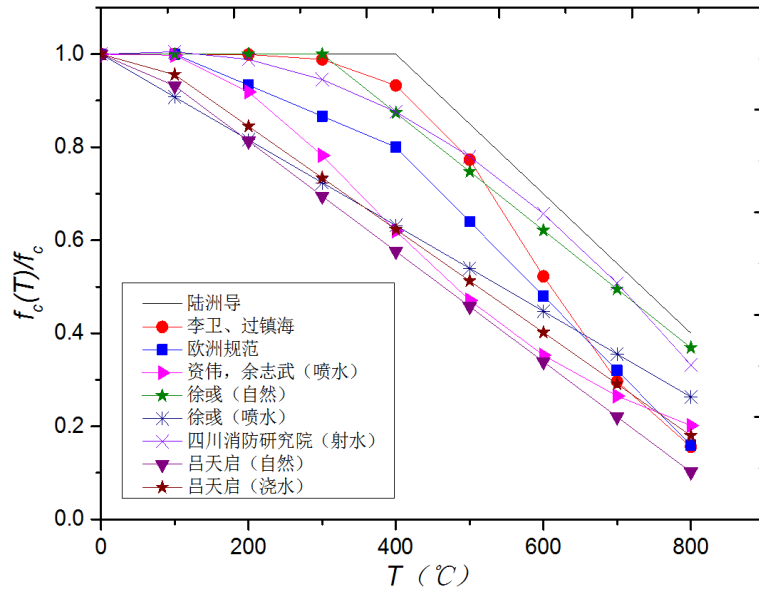


Figure 2. Strength of concrete after /under high temperature  
图 2. 高温下/高温后混凝土强度

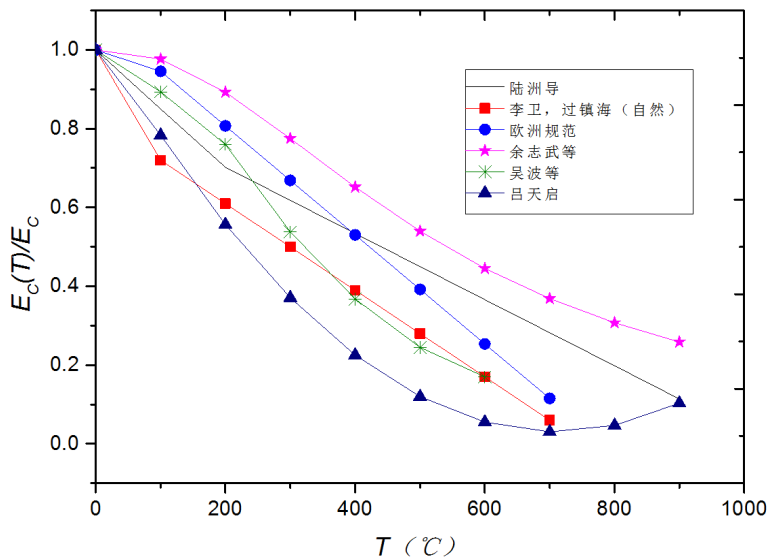


Figure 3. Elastic modulus of concrete after /under high temperature  
图 3. 高温下/高温后混凝土弹模

后强度随温度变化规律的试验研究结论，分别汇总与图 4 和图 5。

从图 4 可以看出，普通钢筋高温下与高温后屈服强度明显不同，温度达 800℃时，钢筋高温下强度基本完全丧失，但对于经受 800℃甚至较高温后冷却的钢筋其强度基本可恢复(损失程度低)。这表明，在火势较大，燃烧时间较长时，钢筋在火灾下温度升高逐步丧失强度，会引起结构承载力显著降低甚至出现倒塌。但一般桥梁火灾时间较短，数小时被扑灭，加之混凝土热惰性以及较大的钢筋保护层厚度，钢筋温度一般不会过高，故其高温后性能是主要关注因素。图 5 中可以看出，预应力钢筋与普通钢筋不同，其没有“冷却强化”的特性，随经历温度升高强度近似线性减小。钢筋弹模汇总结果未示出，多数研究表明，虽经历温度的升高，过火后钢筋及预应力钢筋弹模下降趋势并不明显，且冷却方式对过火钢

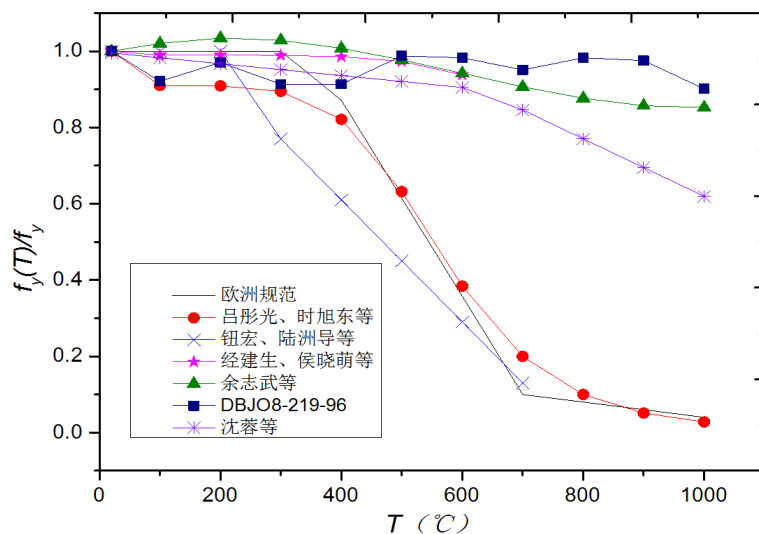


Figure 4. Steel yield strength after /under high temperature  
图 4. 高温下/高温后钢筋屈服强度

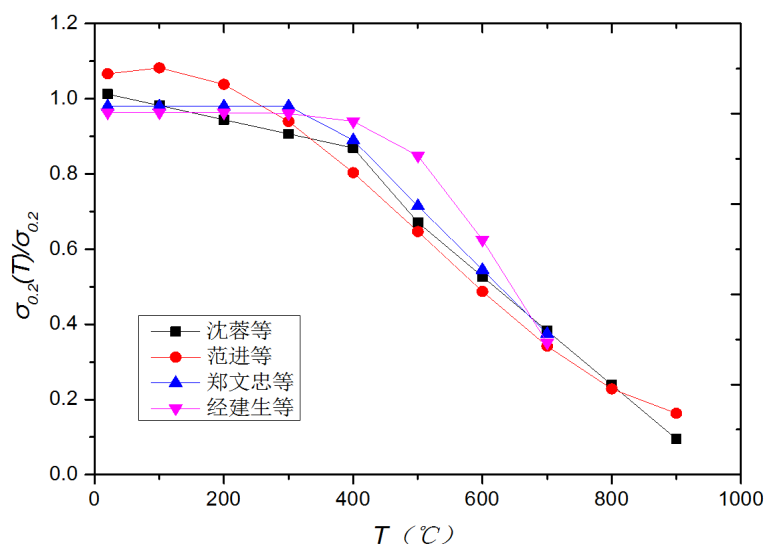


Figure 5. Prestressed nominal steel yield strength after exposed high temperature  
图 5. 高温后预应力钢筋名义屈服强度

筋及预应力筋弹模影响较小。

总结文献研究结果得到的材料高温下/高温后材料力学性能结论，可选择性用于过火桥梁结构性能分析研究，但是对实际过火桥梁结构，应取芯进行材料性能试验。

## 2.3. 高温后结构力学性能

### 2.3.1. 混凝土与钢筋粘结滑移、锚固性能

钢筋与混凝土之间的粘结力是二者共同工作的前提。钢筋与混凝土的粘结主要与混凝土抗压强度、振捣情况、钢筋的外形和尺寸等方面有关。高温作用对混凝土粘结强度的影响主要源于三个方面：高温作用后混凝土强度的降低；钢筋与混凝土热工性能的差异；混凝土冷却时内外温度不同形成裂缝造成的环箍力的损失[20]。

1998年浙江大学谢狄敏、钱在兹[20]进行了24个混凝土立方体试件(强度28 MPa)的粘结强度试验,试验温度为常温、300℃、500℃、700℃四个类别,高温后静置90天后进行钢筋拔出试验(钢筋锚固长度5 d)。结果表明300℃温度作用后,粘结强度已下降至常温时25%,极限滑移值约为常温时的3倍,根据试验结果提出了高温后粘结强度与常温粘结强度的线性关系计算式。

2005年大连理工大学徐泽晶[21]进行了6组光圆钢筋以及8组螺纹钢筋(锚固长度80 mm)在常温、100℃~500℃温度作用并冷却30天后的粘结锚固试验。试验结果表明,光圆钢筋与混凝土(强度等级C20)间的粘结力随受火温度升高近似线性下降;螺纹钢筋与混凝土间的粘结力在温度低于200℃时基本不变,超过200℃后则随温度升高近似线性下降。

2006年东南大学袁广林等[22]进行了不同受热温度、冷却方式和加载方式下高温后钢筋混凝土粘结性能的试验研究。结果表明,随温度的升高,试件的极限粘结应力逐渐减小,当温度达到650℃时,粘结性能会遭到明显破坏;此外破坏程度,水冷比自然冷却严重、往复加载比单向拉拔严重。

2014年哈工大的侯晓萌、郑文忠等[23]进行了火灾作用下锚具对预应力钢棒锚固性能退化规律研究。试件为JXM型夹片锚具、实测强度为48.8 Mpa的混凝土、抗拉强度标准值为970 Mpa的高强钢棒。研究表明,受火温度为100℃时,锚固效率系数在0.49~0.80之间,受火温度高于200℃时,锚固效率系数基本为0,即丧失锚固能力,建议高温后的锚具不得重复使用。

### 2.3.2. 预应力混凝土结构高温后力学性能

1994年西南交大的潘家鼎等[24]进行了12根先张法预应力混凝土简支梁在不同高温冷却后的静力加载试验。试验结果表明,高温冷却后预应力混凝土受弯构件的抗裂度明显降低,而且其剩余抗弯强度可按温度分布将截面分层,用高温后的材料性能进行剩余强度的计算。

2000年同济大学的华毅杰[25]进行了有粘结以及无粘结预应力混凝土框架结构的高温性能试验研究。结果表明,预应力度高、有效预应力大的结构受温度影响大,抗火性能差;火灾后的预应力混凝土结构刚度明显减小,但是仍然有一定的承载力,卸载后其变形能够较好地恢复。

2006年哈工大郑文忠等[26]完成了9块无粘结和1块有粘结预应力混凝土单向简支板抗火试验,结果表明混凝土爆裂发生在预应力度较高、荷载水平较低的试验板的邻近支座附近区域。提出了沿板厚将截面分条带计算等效截面,并结合常温刚度计算公式计算火灾下荷载作用引起变形的计算方法。

2010年哈工大的侯晓萌等[27]完成了7块火灾后两跨无粘结预应力混凝土单向连续板的受力性能试验。提出了火灾后预应力混凝土连续板正截面承载力计算公式,并进行了计算值与实测值的对比,相对误差低于12%。试验表明,预应力筋初始有效应力越高、受火时间越长,火灾后其应力损失越严重;保护层厚度越小,受火时间越长,板跨中截面承载力降幅越大。

2012年哈工大郑文忠等[28]进行了高温后足尺有粘结预应力混凝土梁板力学性能的非线性计算分析。通过计算分析得出大尺度梁高温后的力学性能优于小尺度梁的结论,并根据分析结果,建立了综合考虑预应力筋与非预应力筋合力点到梁底距离、预应力筋保护层厚度影响的 $MAU/M_u$ (有粘结预应力混凝土梁高温后极限弯矩与常温下极限弯矩比值)的计算式。

2014年长安大学侯炜[29]开展了桥梁常用的预应力箱形梁缩尺模型(包括有、无防火涂层)高温后力学性能研究,对高温后模型梁进行了静、动力试验。结果表明,无防火涂层梁在180 min受火期间,预应力损失45.5%,刚度减弱明显(高温下变形较无涂层大40%),承载力损失40%;有防火涂层梁预应力基本无损失,承载力降幅为7%。

## 3. 存在的问题

总结目前研究现状,结合在本文前言及2.1中介绍的桥梁火灾特点,针对预应力混凝土桥梁过火后

性能退化研究尚存在以下几点问题:

- 1) 模型梁火烧试验基本均采用 ISO-834 曲线, 受火方式为单面或三面均匀受火; 而实际桥梁火灾为室外受火, 需寻求更加真实火灾模型, 且多为局部受火;
- 2) 均针对单梁试验, 而桥梁结构特别是高速公路及城市高架多为空间多 T 梁或箱梁结构, 对此种情形的火灾空间温度场研究较少;
- 3) 忽略足尺效应, 均针对缩尺模型进行试验, 跨度一般不超过 5 m, 足尺结构的性能研究也仅停留在理论分析的层面, 针对实际过火桥梁进行的试验研究还未见报道;
- 4) 针对桥梁结构常用 OVM 锚具的锚固性能研究少见, 预应力锚固失效会大大降低桥梁结构抗弯及抗剪承载力;
- 5) 残余承载力计算考虑了温度场分布及材料过火后性能退化, 但忽略了混凝土与钢筋粘结锚固性能造成的变形协调关系减弱。

#### 4. 综合研究方法

针对上述问题, 可采用结合火灾后实桥试验、模型梁试验、数值模拟三种途径, 以受火时间和受火点为主要影响因素, 以抗弯和抗剪残余承载力为评估指标的综合研究方法开展预应力混凝土桥梁过火后性能退化研究。

桥梁火灾、特别是桥梁下部火灾为“半开放式”火灾情形, 其火灾模型尚缺少足够的统计数据。在有火灾后实桥可供试验的情况下, 可通过相似关系设计模型梁, 进行室外火灾模拟试验, 以期达到与实桥类似(混凝土爆裂及露筋的位置及范围类似)的火灾损伤状态, 可称之为“情景再现”模型试验。将现场实测的火场温度时程曲线与已有的标准火灾模型对比, 可分析桥梁火灾的特殊性, 并可将此实测曲线作为实桥及模型梁数值模拟的火灾模型曲线。此外, 因桥梁跨度较大且火灾区域有限, 其受火情况表现出明显的局部性: 跨中附近受火影响桥梁跨中承载力; 端部区域受火影响其抗剪承载力, 且若火势向外蔓延可能造成锚具升温, 影响锚固效果及预应力效应。故需进行着火点影响研究, 可通过模型梁布置实现, 若 OVM 锚具升温不明显, 可补充单独的锚具高温锚固性能试验。同时, 对受火断面布控热电偶, 可实现空间 T 梁温度场的量测, 为空间 T 梁温度场分布提供试验数据。综上所述, 此综合研究方法基本可解决上述经文献分析所总结的关于桥梁过火性能研究中的试验问题(问题(1)~(4))。

较多文献均进行了过火预应力混凝土模型结构残余承载力的简化计算并与破坏试验结果对比, 考虑了模型结构火后的温度场分布, 并据此考虑截面的折减和材料力学性能折减, 但基本均在混凝土与钢筋变形协调性完好的假定下。本文介绍的研究方法中, 对过火预应力混凝土实桥及模型梁的抗弯、剪残余承载力数值模拟中, 除考虑上述因素外, 可根据实际混凝土爆裂情况, 剔除露筋处混凝土(暴筋梁)来考虑钢筋与混凝土间变形协调性减弱的影响, 以期得到更加准确的数值模拟结果。

#### 5. 结论

- 1) 本文总结并对比了国内外火灾模型曲线, 介绍了桥梁火灾特别是桥梁下部火灾与已有火灾模型的不同。因此, 为便于桥梁结构过火性能研究, 需进行更加合理的桥梁结构火灾场景模拟, 寻求更加适合的模型曲线;
- 2) 本文总结了文献中关于过火混凝土、钢筋及预应力钢筋材料力学性能的试验研究成果, 归纳了较为统一的研究结论。可借鉴已有研究成果进行过火桥梁结构分析, 但对于实桥或模型梁试验研究时, 应根据实际结构取样测试其过火力学性能;
- 3) 本文总结了预应力混凝土结构高温后性能的已有研究成果, 据此总结出尚存在的问题, 提出“模型试验&实桥试验&数值模拟”的综合研究方法, 该方法可更加真实、贴近地模拟预应力混凝土桥梁火灾

情景,实现空间 T 梁结构温度场分布量测,并结合“暴筋梁”的非线性有限元方法可实现较为精确的数值模拟结果。

## 基金项目

宁波市交通运输科技项目(项目编号:201435)。

## 参考文献 (References)

- [1] EN 1991-1-2 (2002) Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1-2: General Actions—Actions on Structures Exposed to Fire. British Standards Institution, London.
- [2] Collette, K.A. (2007) Comparisons of Structural Designs in Fire. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 33-50.
- [3] GB/T26784-2011. 建筑构件耐火试验可供选择和附加的试验程序[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [4] 陆洲导. 钢筋混凝土梁对火灾反应的研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 1989.
- [5] 过镇海, 李卫. 混凝土在不同应力-温度途径下的变形试验和本构关系[J]. 土木工程学报, 1993(5): 58-69.
- [6] EN 1992-1-2 (2003) Design of Concrete Structures, Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design. British Standards Institution, London.
- [7] 资伟, 余志武, 匡亚川, 等. 受火温度和时间对喷水冷却后混凝土剩余抗压强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1545-1550.
- [8] 徐彧, 徐志胜. 高温作用后混凝土强度试验研究[J]. 混凝土, 2000(2): 44-45.
- [9] 张泽江, 王珍, 祝杰. 消防射水对火灾后高性能混凝土剩余抗压强度的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(4): 414-418.
- [10] 吕天启. 高温后混凝土静置性能的试验研究及已有建筑物的防火安全评估[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [11] 吴波, 马忠诚, 欧进萍. 高温后混凝土变形特性及本构关系的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 42-49.
- [12] 吕彤光. 高温下钢筋的强度和变形试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1996.
- [13] 钮宏, 陆洲导, 陈磊. 高温下钢筋与混凝土本构关系的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1990, 18(3): 287-297.
- [14] 经建生, 侯晓萌, 郑文忠. 高温后预应力钢筋和非预应力钢筋的力学性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 441-446.
- [15] 余志武, 王中强, 史召锋. 高温后新III级钢筋力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 112-116.
- [16] 上海市建筑科学研究院. DBJ08-219-96 火灾后混凝土构件评定标准[S]. 上海: 上海市建筑科学研究所, 1996.
- [17] 沈蓉, 凤凌云, 戎凯. 高温(火灾)后钢筋力学性能的评估[J]. 四川建筑科学研究, 1991(2): 5-9.
- [18] 范进. 高温后预应力钢筋线性性能的试验研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 186-189.
- [19] 郑文忠, 胡琼, 张昊宇. 高温下及高温后 1770 级  $\Phi$ P5 低松弛预应力钢丝力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(2): 120-128.
- [20] 谢狄敏, 钱在兹. 高温作用后混凝土抗拉强度与粘结强度的试验研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998(5): 597-602.
- [21] 徐泽晶. 火灾后钢筋混凝土结构的材料特性, 寿命预估和加固研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [22] 袁广林, 郭操, 吕志涛. 高温后钢筋混凝土黏结性能试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 290-294.
- [23] 侯晓萌, 郑文忠, 孙洪宇. 火灾作用下锚具对预应力钢棒锚固性能退化规律研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 110-118.
- [24] 潘家鼎, 王春华, 李小红, 程超. 高温冷却后预应力混凝土受弯构件强度损伤的试验研究[C]//工程力学杂志社. 第三届全国结构工程学术会议论文集(上): 1994 年卷. 北京: 工程力学杂志社, 1994: 815-821.
- [25] 华毅杰. 预应力混凝土结构火灾反应及抗火性能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2000.
- [26] 郑文忠, 许名鑫, 杨杰, 等. 预应力混凝土筒支板抗火性能试验与分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 48-59.



- [27] 侯晓萌, 郑文忠. 火灾后预应力混凝土连续板力学性能试验与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 32(1): 6-13.
- [28] 郑文忠, 闫凯, 欧阳志为, 王英. 高温后足尺有粘结预应力混凝土梁板力学性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012(1): 8-17.
- [29] 侯炜. 预应力混凝土箱梁抗火性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.

**期刊投稿者将享受以下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>