

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.12.010

# 预应力混凝土空心板梁火灾仿真分析与评估

刘其伟<sup>1</sup>, 王成明<sup>2</sup>, 罗文林<sup>3</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096;

2. 上海林同炎李国豪土建工程咨询有限公司南京分公司, 江苏 南京 210016;

3. 东南大学 建筑设计研究院交通分院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 以江苏省内某高速公路预应力混凝土空心板桥的突发性火灾为研究对象, 阐述了火灾高温对混凝土、钢筋和钢绞线力学指标的影响, 总结了火灾现场温度的判定方法, 提出了桥梁火灾仿真分析与评估的实施步骤。通过火灾燃烧物性质分析, 选择了Eurocode 烃类火灾升温曲线, 论述了火灾下混凝土爆裂机理, 在此基础上建立了空心板混凝土与内腔封闭孔洞内空气的流固耦合传热模型, 并进行了火灾温度场有限元仿真分析。根据有限元计算结果, 比较了火灾作用下底板混凝土爆裂对空心板温度场的影响, 最后结合火灾后材料性能的变化对板梁火损状况进行了综合评估。

**关键词:** 桥梁工程; 预应力混凝土空心板梁; 仿真分析; 评估; 火灾温度场; 苯乙烯; 爆裂

中图分类号: U446.21<sup>+2</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2013) 12-0059-10

## Simulation Analysis and Evaluation of Prestressed Concrete Hollow Slab Girder Subjected to Fire Disaster

LIU Qi-wei<sup>1</sup>, WANG Cheng-ming<sup>2</sup>, LUO Wen-lin<sup>3</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. Nanjing Branch, Lin Tung-Yen & Li Guo-Hao Consultants Shanghai Ltd., Nanjing Jiangsu 210016, China;

3. Transportation Branch of Architectural Design and Research Institute, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Taking a sudden fire which happened at a PC hollow slab bridge of an expressway in Jiangsu Province as the research object, we expounded the influences of high temperature of fire on mechanical performance of concrete, steel and strand, summarized the temperature estimating method for fire site, and proposed the implementation steps of simulation analysis and evaluation for bridge fire disaster. Through analysing the property of fire comburent, we selected the hydrocarbon temperature-time curve (Eurocode) and discussed the mechanism of concrete explosive spalling under fire disaster. On this basis, we built a fluid-solid coupling heat transferring model of hollow slab concrete and air in its closed cavity to simulate the fire temperature field. According to the result of finite element calculation, we compared the influence of bottom concrete explosive spalling subjected to fire on hollow slab temperature field. Finally, we comprehensively evaluated the fire damage situation of hollow slab by analyzing the changes of the material properties after fire disaster.

**Key words:** bridge engineering; prestressed concrete hollow slab girder; simulation analysis; evaluation; fire temperature field; styrene; explosive spalling

收稿日期: 2013-03-06

作者简介: 刘其伟 (1961-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士. (liuqiwei@seu.edu.cn)

## 0 引言

预应力混凝土空心板桥因具有结构简单、受力明确、自重较轻、用材经济、施工方便快捷和可大批量工厂化集中预制等诸多优点而被广泛应用<sup>[1]</sup>。该类桥梁量大面广,是我国高速公路、城市道路和地方道路路网建设的主要桥型之一。

笔者在江苏省内某高速公路桥梁定期检查过程中发现,由于桥梁下方净空有限,大多数桥孔下方堆积易燃的垃圾、柴草和杂物等,这些易燃物在高温干燥季节极易引发桥下火灾。与一般建筑物火灾不同的是桥梁火灾具有受火面广、难以被及时发现和扑灭、受火持续时间长等显著特点,一旦发生火灾将会严重危及桥梁结构的受力安全和耐久性。

## 1 桥梁概况和火灾背景

### 1.1 桥梁概况

某桥为省内某高速公路主线桥梁,南北两幅双向

8车道,上部结构采用 $3 \times 13$  m 预应力混凝土空心板,结构简支桥面连续,下部结构采用单排桩(柱)式墩和单排桩(柱)式桥台。该桥于1996年投入运营,设计荷载为汽-超20级,验算荷载为挂-120。后因交通流量增加,该桥于2005年在原桥两侧采用同跨径预应力混凝土空心板进行拓宽改造。拓宽后的桥梁单幅全宽为20.75 m,设计荷载为公路I级。

### 1.2 火灾背景

2012年5月7日凌晨,桥位附近突发交通事故,导致1辆运输危险化学品车辆槽罐内的液态苯乙烯大量泄露,并顺边沟流淌至桥下河流,后遇明火而急速燃烧。虽经当地消防部门全力扑救,但该桥仍受到不同程度的烧伤和熏黑。据调查,火灾持续时间约为30 min。

火灾后经现场检测发现,该桥1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>孔的板梁底板、盖梁和墩柱存在不同程度灼烧,致使多处混凝土受火剥落,钢筋、钢绞线裸露,支座橡胶受火碳化、龟裂和鼓泡等,如图1~图2所示。



图1 混凝土剥落、钢筋外露

Fig. 1 Concrete spalling and steel reinforcement exposure

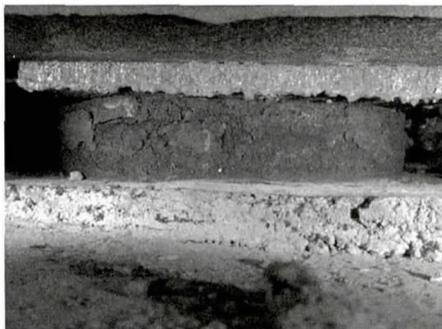


图2 板式橡胶支座碳化、龟裂

Fig. 2 Carbonization and crack of laminated rubber bearing

本文着重对位于核心受火区域、底板混凝土存在爆裂现象、剥落深度大、钢筋和钢绞线裸露的预应力混凝土空心板梁进行火灾仿真分析与评估。

## 2 火灾对预应力混凝土结构的影响

火灾对预应力混凝土结构的影响主要表现为:在火灾高温灼烧下,混凝土、钢筋和钢绞线的强度、弹性模量等力学指标随着火灾温度不断升高而持续衰减,构件内钢筋、钢绞线与混凝土的粘结性能也随之降低,这势必会对结构的受力安全和耐久性造成影响。

研究火灾高温下材料性能变化是准确评估灾后结构损伤程度和残余承载能力的理论前提。

### 2.1 火灾高温下混凝土性能

众所周知,混凝土是以水泥为主要胶结材料的非匀质复合材料。随着火灾高温的持续作用,由于水分蒸发、骨料与水泥浆体的热工性能差异和骨料颗粒的高温膨胀、破裂等原因,造成混凝土内部的

结构性损伤不断积累, 从而导致物理力学性能恶化。

### 2. 1. 1 火灾高温作用对混凝土强度的影响

高温作用下混凝土强度下降, 变形性能恶化, 还伴随有表面疏松、开裂、边角崩落等现象。试验研究和火灾现场调查表明: 混凝土强度的衰减程度与众多因素如混凝土等级、骨料类型、配合比、养护条件、加热参数和冷却方式等有关; 以上各参数不同, 得出的结果也会有差异。但高温下混凝土的强度衰减是不可避免的。混凝土抗压强度、抗拉强度随温度升高的降低系数见表 1。

表 1 高温下混凝土强度降低系数<sup>[2]</sup>

Tab. 1 Reduction factors of concrete strength at high temperature

温度/°C	20	100	300	500	700	900
抗压强度降低系数	1.00	0.95	1.10	0.85	0.40	0.10
抗拉强度降低系数	1.00	0.70	0.45	0.30	0.20	0

混凝土在火灾后终将恢复至常温, 火损后的混凝土残余强度是评估结构损伤程度的主要依据。混凝土立方体试件在降温后的残余抗压强度随温度的变化规律可用式 (1) 描述<sup>[3]</sup>:

$$\frac{f_{cu}^{TR}}{f_{cu}} = \frac{1}{1 + 26 \times \left(\frac{T}{1000}\right)^{6.5}}, \quad (1)$$

式中,  $f_{cu}^{TR}$  为温度  $T$  °C 作用后降至常温时混凝土的抗压强度;  $f_{cu}$  为常温下混凝土的抗压强度。

### 2. 1. 2 火灾高温作用对混凝土弹性模量的影响

高温时, 混凝土初始弹性模量  $E_{oi}$  和峰值变形模量  $E_{pi}$  随温度的变化趋势如表 2 所示。可以看出, 高温作用下混凝土的弹性模量随温度呈持续衰减趋势,  $T \geq 300$  °C 后, 混凝土的弹性模量显著衰减。

表 2 高温下混凝土弹性模量降低系数<sup>[4]</sup>

Tab. 2 Reduction factors of concrete elastic modulus at high temperature

温度/°C	20	100	300	500	700	900
$E_{oi}$ 降低系数	1.00	0.80	0.45	0.25	0.10	0
$E_{pi}$ 降低系数	1.00	0.75	0.50	0.25	0.10	0

高温自然冷却后, 混凝土弹性模量随着温度的升高而不断降低, 如表 3 所示。与混凝土强度指标相比, 其弹性模量的降低对高温更为敏感, 受火温度在 300 °C 时弹性模量降低 25%; 当温度达到 500 °C 时, 弹性模量降低 60%; 当受火温度高于 600 °C 时, 弹性模量几乎丧失殆尽, 基本丧失抗压变形能力。因此, 火灾后混凝土结构容易产生较大的残余变形。

表 3 高温自然冷却后混凝土弹性模量的折减系数<sup>[5]</sup>

Tab. 3 Reduction factors of concrete elastic modulus after natural cooling from high temperature

温度/°C	常温	300	400	500	600	700	800
折减系数	1.00	0.75	0.46	0.39	0.11	0.05	0.03

综上所述, 在火灾高温作用下, 混凝土强度损失和变形性能逐渐衰减和恶化, 原因是:

- (1) 各种水分蒸发, 在混凝土内部形成了孔隙和裂缝;
- (2) 粗骨料和其周围的水泥浆体热工性能不协调, 产生变形差和热应力;
- (3) 骨料本身的受热膨胀破裂, 这种内部损伤的发展和积累随温度升高而更趋严重。

## 2. 2 火灾高温下钢筋力学性能

### 2. 2. 1 火灾高温作用对钢筋强度的影响

普通低碳钢、低合金钢和冷加工钢筋随着温度的提高, 抗拉强度均有不同程度的衰减。以普通低碳钢为例<sup>[6]</sup>: 300 °C 时, 抗拉强度下降不明显; 超过 400 °C 后, 抗拉强度明显下降; 到 600 °C 时, 螺纹钢和光圆钢筋的强度下降 60% ~ 70%, 而冷拔钢丝和冷轧钢筋的抗拉强度仅余 19% 左右; 超过 800 °C 后, 强度指标已很低了, 具体如图 3 所示。

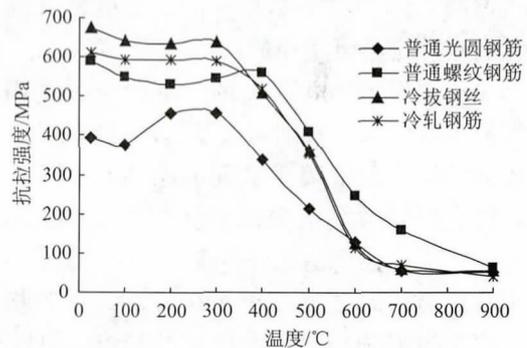


图 3 高温下钢筋抗拉强度变化情况

Fig. 3 Changes of tensile strengths of steel reinforcement at high temperature

### 2. 2. 2 火灾高温作用对钢筋弹性模量的影响

高温下, 钢筋的弹性模量随温度的升高而逐渐降低。以往对各级钢筋的高温性能的试验表明, 高温作用下钢筋弹性模量变化规律为<sup>[4]</sup>:

$$E_s(T) = \frac{E_s}{1.03 + 7 \times (T - 20)^6 \times 10^{-17}}, \quad (2)$$

式中,  $E_s(T)$  为  $T$  °C 时钢筋弹性模量;  $E_s$  为常温下钢筋弹性模量。

## 2.3 火灾高温下钢绞线力学性能

### 2.3.1 火灾高温作用对钢绞线强度的影响

预应力钢绞线在经历高温作用后,其强度会发生一定的变化。以空气冷却为例,钢绞线的极限强度在20~400℃范围内,随所经历温度的增加而缓慢下降,400℃以后下降的速度明显加快;至700℃时,极限强度下降到最低点;700℃以后,其极限强度有一定的回升。

预应力钢绞线经历不同高温后,极限强度值与正常极限强度值的比值如下:200℃时为97.38%;400℃时为90.15%;700℃时为27.70%;900℃时为47.29%<sup>[7]</sup>。

### 2.3.2 火灾高温作用对钢绞线弹性模量的影响

高温下,预应力钢绞线的弹性模量随温度的升高而逐渐降低,其变化规律为<sup>[8]</sup>:

$$E_p(T) = \frac{E_p}{1.03 + 32 \times (T + 108)^6 \times 10^{-18}}, \quad (3)$$

式中, $E_p(T)$ 为 $T$ ℃时钢绞线的弹性模量; $E_p$ 为常温下钢绞线的弹性模量。

### 2.3.3 火灾高温作用对钢筋(钢绞线)与混凝土黏结力的影响

钢筋(钢绞线)与混凝土的黏结强度由胶着力、摩擦力和咬合力3部分组成。3种力在不同温度条件下有所增减,但高温下黏结性能随温度的升高而逐渐降低的趋势是不可避免的。

当受火温度低于350℃时,混凝土强度损失较小,混凝土的脱水、收缩增大了其对钢筋(钢绞线)的挤压力,导致与混凝土之间的摩擦力和咬合力得到一定增大,此时黏结力几乎没有损失且混凝土不会劈裂;当受火温度达350~450℃时,黏结力下降20%左右;当受火温度高于450℃后,尽管挤压力的增大使摩擦力和咬合力有增大的趋势,但同时也增加了混凝土劈裂应力,造成混凝土强度大幅度下降,塑性变形增大,钢筋(钢绞线)与混凝土之间可能产生滑移,混凝土过早产生裂缝影响摩擦力和咬合力的发挥,因而黏结强度开始显著下降;当受火温度达到700℃后,黏结力下降近50%<sup>[9-10]</sup>。

高温自然冷却后,混凝土吸收空气中的水分产生膨胀,而钢筋收缩,使二者之间的挤压力减小,也减小了摩擦力和咬合力的作用,混凝土内部一系列的化学变化使其强度进一步降低,更加不利于黏结强度的提高。因而高温冷却后的黏结强度要比高温中的黏结强度更低。

## 3 火灾现场温度判定方法

火灾高温作用将导致结构出现损伤,火灾温度越高,火灾持续时间越长,则损伤程度越大。因此判定火损构件的受火温度是一项重要工作内容。常用的火灾温度判定方法主要包括物质熔点法、构件表面颜色法、损伤程度判定法等<sup>[11]</sup>。

### 3.1 物质熔点判定法

任何物质均有不同的熔点或燃点。火灾后应调查和收集可燃物的类别、数量和火灾特征残留物,从这些物质中可以分析判断该区域构件可能遭受的火灾最高温度。

### 3.2 表面颜色判定法

火灾后,可根据构件混凝土表面所呈现的颜色来推测受火温度的高低。具体为:(1)当混凝土表面黏附着黑色烟尘时,一般受火温度小于300℃(这种黑色烟尘是其他物质燃烧不完全的残留物,并不是混凝土受热所发生的颜色变化);(2)当火灾温度达到300~600℃时,其表面呈松红或浅红色;(3)当火灾温度达到600~900℃时,其表面显灰色;(4)当火灾温度达到900~1000℃时,其表面呈浅黄色。

### 3.3 损伤程度判定法

在火灾高温作用下,受火构件内形成温度场,并产生不同的物理和化学反应而造成损伤。从构件不同的烧损程度可估计火灾的温度。构件损伤程度可分为以下几种基本形态:

(1)轻度损伤。抹灰层、饰面砖或混凝土表面基本完好,构件无空鼓,无明显裂缝和缺边掉角现象,说明混凝土强度未降低。此时火灾温度一般在400℃以下。

(2)中度损伤。抹灰层或饰面砖基本剥落或有大面积空鼓,构件表面有裂缝或局部损伤,并伴有少量缺边掉角,说明混凝土强度有一定程度的降低。此时混凝土温度约在600℃以内。

(3)较严重损伤。构件外观裂缝较多,保护层爆裂脱落,钢筋外露,说明混凝土强度明显降低。此时混凝土经受温度约在800℃以下。

(4)严重损伤。构件外观烧损严重,混凝土疏松,强度已经全部丧失,钢筋外露扭曲、变形甚至氧化。此时混凝土经受温度至少在900℃以上。

### 3.4 混凝土中性化深度检测

混凝土中性化深度即碳化深度。水泥水化后的水泥石 $PH$ 值一般为12~13,呈碱性。当温度达

550 ℃ 左右时, 混凝土中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  分解, 混凝土呈中性, 可以用 1% ~ 2% 酚酞试剂检测出火灾中混凝土温度分布曲线中 550 ℃ 的分界线。但在实际操作中, 应注意区分混凝土一般正常碳化与火灾引起的

碳化, 予以修正。

火灾桥梁现场检测时, 可综合采用上述方法来确定火灾现场温度, 从而判定火损结构的破坏等级, 如表 4 所示。

表 4 桥梁结构构件火损等级评定表

Tab. 4 Evaluation table of fire damage levels of bridge structure members

材料类型	损伤形态	损伤等级			
		轻度损伤	中度损伤	较严重损伤	严重损伤
混凝土	表面颜色	熏黑	松红或浅红	灰白	白、浅黄
	表面裂缝	细微、少	细、较多	明显、多	宽、多
	表皮、边角	轻度疏松	少量掉皮	缺损较多	缺损大、剥落
	脱落面积 / %	≤ 20	≤ 50	≤ 90	> 90
	平均损伤深度 / mm	≤ 10	≤ 25	≤ 40	> 40
钢筋、钢绞线	保护层	完整	疏松	局部脱落	大面积脱落
	变形	无	无	小	大
$T_{\max} / \text{℃}$		300	600	900	> 900

#### 4 板梁火灾温度场分析与评估

##### 4.1 桥梁火灾仿真分析与评估实施步骤

为了客观准确地对桥梁火灾进行仿真分析并评估桥梁构件受损状况, 结合火灾现场处置经验, 总结主要实施步骤如下。

(1) 火灾现场调研: 分析火灾燃烧物性质, 向管理部门、消防部门和周边居民了解火灾发生过程、持续时间、火堆大小、火堆高度和灭火方式等信息;

(2) 推测火损温度: 根据火灾现场调研和现场检测结果, 综合采用物质熔点判定法、表面颜色判定法等方法, 推测桥梁构件不同受损区域的受火温度;

(3) 判断高温灼烧时间: 根据推测的火损温度, 判断不同损伤部位受高温灼烧的时间, 以便进行桥梁构件的火灾温度场分析;

(4) 火灾温度场仿真分析: 采用空间有限元软件模拟桥梁构件的受火状态, 进行受火温度场仿真分析;

(5) 火灾损伤评估: 根据火灾仿真分析结果, 分析火损构件的材料性能变化, 评估桥梁整体火损状况。

##### 4.2 火灾温度分析

###### 4.2.1 火灾燃烧物分析

该桥火灾燃烧物为苯乙烯, 为无色透明油状液体, 比水轻 (0.91) 且不溶于水, 易挥发、闪点低 (34.4 ℃), 燃烧热大 (4 376.9 kJ/mol), 属于易燃易爆化学品, 具有较强刺激性, 对人体和环境有一定危害, 如遇明火会引发爆炸。

在夏季高温作用下, 桥下河道中浮于水面的苯乙烯挥发速度加快, 挥发的气体聚集在梁体下方并与周围空气混合, 遇明火后急速燃烧从而引发桥下火灾。

据调查, 本次火灾持续时间约为 30 min。通过对该桥火损状况的现场调查, 综合采用表面颜色判定法、损伤程度判定法推测板梁底板表面最高受火温度已超过 900 ℃。

###### 4.2.2 火灾温度曲线

如前所述, 混凝土、钢筋和钢绞线的力学性能与温度密切相关。火灾高温作用下, 板梁桥结构发生显著变形, 导致结构体系发生剧烈的内力重分布。因此必须根据火灾现场调研情况和现场检测结果, 首先确定火灾升温曲线。

目前常用的火灾温度曲线包括 ISO834、Eurocode、ASTM-E119 和 CAN4-S101 等火灾升温曲线, 如图 4 所示。

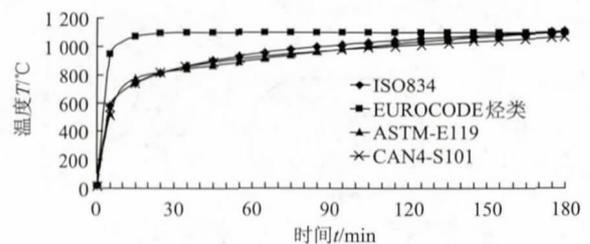


图 4 标准火灾温度曲线

Fig. 4 Standard temperature-time curves of fire disaster

本次火灾燃烧物苯乙烯属于芳香烃类化合物, 具有燃烧值大、燃烧速度快等特点, 因此本文采用欧洲规范 (Eurocode) 提供的烃类理论火灾升温曲

线, 如式(4)所示<sup>[12]</sup>。

$$T(t) = 1080 \times (1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20, \quad (4)$$

式中,  $t$  为火灾持续时间;  $T(t)$  为  $t$  时刻时的火灾标准温度。

### 4.3 板梁火灾温度场计算模型

#### 4.3.1 火灾下空心板梁传热模型

为了降低结构恒载, 空心板梁内腔会被不同程度地挖空, 最大挖空率甚至接近 50%。由于板梁截面被挖空, 在火灾高温作用下, 内腔封闭孔洞的内壁面温度分布呈现不均匀性, 内壁面间的空气自然对流与辐射传热同时存在且相互作用和影响。

在火灾高温作用下, 空心板与外界空气、内腔空气存在热辐射、传导和对流, 板梁自身内部温度场随火灾时间推移而不断变化, 板梁受火面处于非稳态升温环境, 同时混凝土等材料的热工参数也随温度或时间的变化而变化, 因此其温度场为非线性瞬态导热问题<sup>[13]</sup>。

有鉴于此, 为了能够真实模拟空心板梁火灾时的温度场分布情况, 本文建立了板梁混凝土固体导热、内腔封闭孔洞内空气对流和内腔内壁面间辐射传热的流固耦合传热模型。有限元仿真分析模型的边界条件情况如图 5 所示。

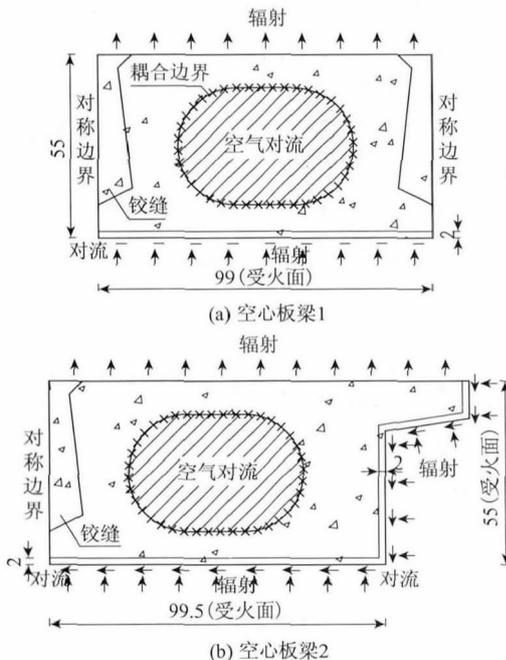


图 5 空心板梁受火边界条件及几何尺寸 (单位: cm)

Fig. 5 Boundary conditions and geometry dimensions of hollow slab under fire (unit: cm)

#### 4.3.2 火灾下混凝土爆裂机理

与木材和钢材相比, 混凝土材料的耐火性能较好, 主要体现在其不可燃性和良好隔热性能等方面。但在受火急热等高温环境下极易发生爆裂破坏现象是其致命缺陷。

混凝土爆裂是指构件在火灾下可能出现的一种灾变现象, 一般是突然的、剧烈的。在火灾高温环境下, 混凝土爆裂主要表现为表面局部或整体发生剥落破坏, 可分为爆炸式爆裂、表面爆裂、骨料开裂、棱角剥落、脱落式爆裂和延迟爆裂等 6 类<sup>[14]</sup>。

火灾下的混凝土爆裂机理十分复杂, 国内外研究尚未形成成熟理论。目前主要的 3 种混凝土爆裂理论为: (1) 热不相容理论; (2) 温度应力理论; (3) 蒸汽压理论或称孔压理论。

上述 3 种理论中, 蒸汽压理论已得到试验证实, 因此被大多数研究者所接受。该理论认为: 火灾作用下, 由于混凝土的热惰性, 局部受热的混凝土内部出现温度梯度, 同时混凝土自身水分受热蒸发形成水蒸汽, 产生蒸汽压而出现压力梯度。压力梯度的出现将导致一部分水蒸气扩散到构件表面后逸到外界, 另一部分水蒸汽在压力梯度作用下向较冷区域迁移而凝结成水并填满孔隙直至饱和。由于混凝土自身的低渗透性阻止了凝结水快速逸出, 因此在火灾较大升温速率下, 水蒸汽累计形成较大的孔隙压力, 同时饱和区中液体水的低压缩性在受热膨胀作用下将使周围骨架产生拉应力而导致开裂。在孔隙压力与热应力的共同作用下, 一旦裂缝贯通构件混凝土, 便会产生突发性爆裂现象<sup>[15]</sup>。

事实上, 影响火灾下构件混凝土爆裂的因素繁多。研究表明, 混凝土强度等级、混凝土含水率、骨料种类、迎火面预压区应力水平、升温速率等因素往往起主导作用。需要指出的是, 对于预应力构件, 由于其迎火面预压区的压应力水平较高或拉应力水平较低, 在火灾发生时较普通混凝土构件更容易发生爆裂<sup>[16]</sup>。

在火灾下, 构件混凝土的爆裂具有很大的危害性。研究表明: 构件混凝土保护层爆裂将直接导致构件截面面积减小, 截面温度场发生突变, 并致使全部或部分钢筋、钢绞线直接暴露于高温环境而迅速软化, 从而降低构件的耐火性能, 导致结构过早破坏<sup>[3]</sup>。混凝土爆裂是吸收能量和释放能量的过程。混凝土爆裂需要一定的受火持续时间以聚集足够的爆裂能量, 一般为过火后的 8~23 min, 平均

约为 15 min。混凝土爆裂的临界温度主要集中在 350 ~ 500 °C。

在有限元理论分析中, 假定板梁在受火 15 min 时板梁底板混凝土开始爆裂, 并根据现场调查结果确定底板混凝土爆裂深度为 2 cm。

#### 4.3.3 材料热工参数

混凝土的热工参数主要包括热传导系数、热容、质量密度。其中, 混凝土热传导系数  $\lambda_c$ 、热容  $c_c$  是温度的函数, 其表达式为:

$$\lambda_c = 2 - 0.24 \times \left(\frac{T}{120}\right) + 0.012 \times \left(\frac{T}{120}\right)^2. \quad (5)$$

混凝土质量密度  $\rho_c = 2\,500 \text{ kg/m}^3$ , 空气热传导系数  $\lambda_a = 0.0242 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$ , 比热容  $c_a = 1\,006.43 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$ , 质量密度  $\rho_a = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 。

#### 4.4 板梁火灾温度场分析与评估

混凝土材料具有热惰性。在火灾高温作用下, 随着板梁底板表面深度的增加, 混凝土内部受火温度逐渐降低, 从而在板梁内部形成一定的温度梯度。

采用空间有限元软件 ANSYS, 通过计算分析火灾高温作用下板梁截面的温度场分布情况, 判断板梁主材力学指标的劣化程度, 为评估板梁火损状况提供理论依据。

为了方便比较火灾作用下板梁底板混凝土爆裂对其温度场的影响, 分别建立底板未爆裂和在受火 15 min 时底板爆裂 2 种有限元模型进行温度场仿真分析。板梁底板爆裂后, 中板和边板受火 30 min 时截面温度场的分布如图 6 所示。

对于板梁底板未爆裂和爆裂的 ANSYS 有限元模型, 分别提取如图 7 所示的底板路径 AB 在受火 30 min 时火灾温度的计算值和底板位置 C 点随火灾持续时间变化的温度计算值, 如图 8 ~ 图 9 所示。

预应力混凝土空心板梁火灾有限元仿真分析结果表明:

(1) 边、中板因受火面边界条件不同, 其自身火灾温度场分布存在明显差异。底板受火 30 min 时, 底板爆裂的 2 cm 区域呈现降温趋势 (此时火灾升温曲线对其不起作用)。与底板未爆裂情况相比, 一旦底板爆裂, 其火灾升温引起的温度梯度显著增大, 直接危及结构受力安全。

(2) 板梁底板爆裂后受火 30 min 时, 板梁底板表面温度接近 1 000 °C, 与火灾现场调查推断的最高受火温度基本相同。

(3) 2 cm 厚底板混凝土爆裂后, 底板自下而上 4.5 cm 厚度范围内 (含爆裂厚度) 混凝土的温度由

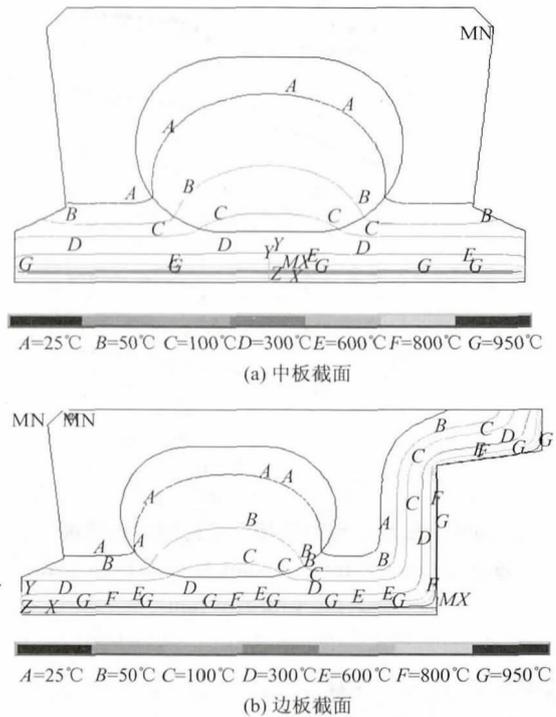


图 6 受火 30 min 时温度场分布  
Fig. 6 Distribution of temperature fields under fire at 30 min

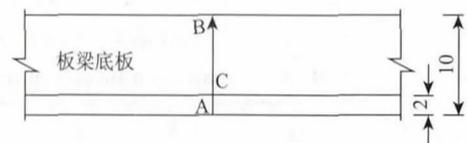


图 7 火灾温度计算值提取位置 (单位: cm)  
Fig. 7 Extracted position of calculated temperature of fire disaster (unit: cm)

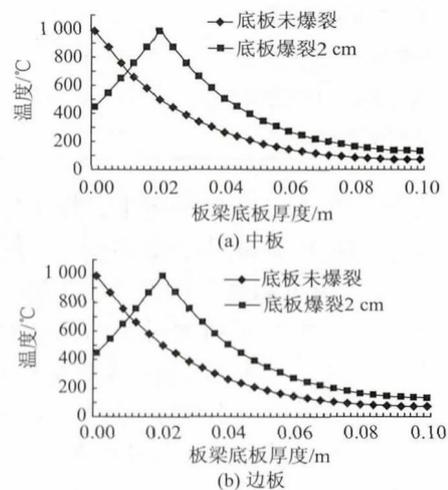


图 8 受火 30 min 时底板路径 AB 温度梯度  
Fig. 8 Temperature gradients of path AB in bottom plate under fire at 30 min

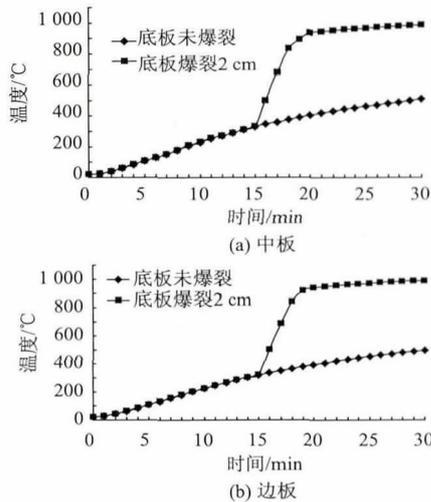


图9 底板C点温度随火灾时间变化情况

Fig. 9 Temperature of point C at bottom plate varying with fire time

1 000 °C 逐渐衰减至 400 °C 左右。该区域混凝土、钢筋、钢绞线强度，钢筋、钢绞线、混凝土黏结力等力学指标将会明显降低。由于混凝土热惰性较大，距离板梁底板表面深度超过 4.5 cm (含爆裂厚度) 的混凝土内部温度均小于 400 °C 且衰减较快，因此该区域混凝土等材料的力学指标受火灾的影响已显

著降低。

(4) 对比边、中板底板未爆裂与爆裂的有限元分析结果可以发现：板梁底板爆裂前 C 点温度随火灾持续时间线性增加，而底板爆裂后在短时间内底板爆裂位置处的温度突变且急速上升，表现为明显的非线性升温趋势。因此，考虑空心板梁火灾时底板爆裂的实际情况，更能体现火灾对板梁桥结构受力安全的不利影响。

(5) 板梁底板混凝土爆裂可分为若干阶段。随着火灾时间的推移，火灾温度持续上升。第 1 阶段板梁底板 2 cm 厚的表层混凝土爆裂后，火灾温度进一步升高，混凝土大约在 4.5 cm 处发生第 2 次爆裂 (400 °C)，理论爆裂深度与部分火损板梁底板混凝土的实际最大剥落深度和破坏情况基本一致。随着时间的推移，燃烧物苯乙烯的总量越来越少，其燃烧释放的热量逐步减少，火源也被逐渐扑灭，因而不会造成第 3 次爆裂。这与本次火灾并未造成板梁底板混凝土大面积深度剥落，仅个别板梁出现少量主筋暴露的实际情况较为吻合。

#### 4.5 火灾后板梁材料性能的变化

根据板梁火灾温度场仿真分析结果，火灾高温作用下，火损区域的板梁材料性能劣化情况如表 5 所示。

表 5 火灾高温作用后板梁材料力学指标折减系数

Tab. 5 Reduction factors of plate girder's material mechanical properties after fire

距离底板表面深度/cm	0	2	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
经历最高温度/°C	—	994.7	715.9	611.6	510.2	434.9	364.5	311.3	262.7	226.2	193.2
混凝土											
抗压强度折减系数	—	0.04	0.25	0.48	0.70	0.85	0.93	0.99	1.00	1.00	1.00
钢筋											
抗拉强度折减系数	—	≥0.9	≥0.9	≥0.9	≥0.9	≥0.9	≥0.9	≥0.9	≥0.9	≥0.9	≥0.9
弹性模量折减系数	—	0.75	0.82	0.85	0.87	0.89	0.91	0.92	0.94	0.94	0.95
极限强度折减系数	—	0.54	0.33	0.43	0.56	0.68	0.78	0.85	0.91	0.94	0.97
预应力筋											
名义屈服强度折减系数	—	0.16	0.32	0.47	0.63	0.75	0.86	0.93	0.98	1.02	1.04
弹性模量折减系数	—	0.74	0.99	1.02	1.03	1.02	1.02	1.01	1.00	1.00	1.00

可以看出，在火灾高温作用下，板梁底板火损区表面混凝土的抗压强度几乎全部丧失。距离板梁底板表面超过 4.5 cm 以后，混凝土、钢筋、钢绞线的强度损失较小，主要是因为过火时间较短，并且混凝土热惰性较强，对其自身有一定的保护作用。

根据板梁火灾温度场和灾后材料性能变化的分析结果，板梁底板混凝土的最大过火温度接近 1 000 °C，最大剥落深度达 4.5 cm，导致梁底压应力大幅削弱，部分钢筋、钢绞线裸露，致使与混凝土黏结力完全丧失，但其他力学指标未见显著降低。

在火灾高温作用下，板梁底板混凝土剥落、材

料力学性能劣化致使其承载力下降而存在安全隐患，已不能满足桥梁的正常使用要求。但灾后桥梁的跟踪观测结果表明，该桥灾后未出现受力裂缝，也未出现显著下挠情形，因此可认为该桥总体安全。但从桥梁结构受力安全的角度考虑，建议及时采取有效措施对该桥进行维修加固。

## 5 结论

(1) 火灾高温作用下，随着火灾温度的不断升高，预应力混凝土空心板梁底板混凝土、钢筋、钢绞线的强度、弹性模量等力学指标持续衰减，钢筋、

钢绞线与混凝土的黏结性能也随之降低, 从而造成梁底预压应力降低, 预应力钢绞线松弛、预应力损失增加, 对结构安全性和耐久性造成严重影响。

(2) 综合采用本文提出的物质熔点判定法、表面颜色判定法等方法, 可以有效地推测板梁不同受损区域的火损温度, 并在此基础上判断火灾高温灼烧时间, 为火灾温度场仿真分析提供有效的实际参数。

(3) 通过燃烧物性质分析, 选择了合适的烃类理论火灾升温曲线, 所建立的有限元计算模型考虑了板梁自身与外界空气、内腔空气之间的热辐射、传导和对流, 同时考虑了板梁底板混凝土爆裂的不利影响, 温度场仿真分析结果与实际火损情况十分接近。

(4) 火灾作用下, 空心板梁底板未爆裂与爆裂模型的温度场计算结果存在显著差异。考虑火灾时底板爆裂的实际情况后, 底板爆裂位置处温度在短时间内发生突变且形成较大温度梯度。因此考虑板梁底板爆裂的有限元计算模型更能反应火灾对板梁桥结构受力安全的不利影响。

(5) 火灾高温作用下, 板梁底板混凝土爆裂是吸收能量和释放能量的过程。受火 30 min 时, 底板混凝土的最大剥落深度为 4.5 cm, 与实际情况较为吻合。

(6) 本次火灾并未造成该桥板梁底板混凝土大面积剥落, 仅部分板梁底板出现钢筋、钢绞线外露, 未见受力裂缝和显著下挠, 从受力角度分析表明总体安全。但应及时采取维修加固措施, 以确保结构受力安全、恢复正常运营功能。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 姚玲森. 桥梁工程 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
YAO Ling-sen. Bridge Engineering [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] 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, 2003.  
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. High Temperature Performance of Reinforced Concrete and Its Calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [3] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
WU Bo. Mechanical Property of Reinforced Concrete Structures after Fire [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] 刘其伟, 邓祖华, 赵佳军. 火灾下混凝土桥墩仿真分析 [J]. 桥梁建设, 2009 (1): 70-73.  
LIU Qi-wei, DENG Zu-hua, ZHAO Jia-jun. Simulation Analysis of Concrete Bridge Piers Subjected to Fire Disaster [J]. Bridge Construction, 2009 (1): 70-73.
- [5] 王孔藩, 许清风, 刘挺林. 高温下及高温冷却后混凝土力学性能的试验研究 [J]. 施工技术, 2005, 34 (8): 1-2.  
WANG Kong-fan, XU Qing-feng, LIU Ting-lin. Experimental Research on Mechanics Performance of Concrete after High Temperature and Cooled Down from High Temperature [J]. Construction Technology, 2005, 34 (8): 1-2.
- [6] 王孔藩, 许清风, 刘挺林. 高温下及高温冷却后钢筋力学性能的试验研究 [J]. 施工技术, 2005, 34 (8): 3-5.  
WANG Kong-fan, XU Qing-feng, LIU Ting-lin. Experimental Research on Mechanics Performance of Steel Bar after High Temperature and Cooled Down from High Temperature [J]. Construction Technology, 2005, 34 (8): 3-5.
- [7] 范进. 高温后预应力钢绞线性能的试验研究 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2004, 28 (2): 186-189.  
FAN Jin. Experimental Study on Material Properties of Pre-stressed Steel Strand Post High Temperatures [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2004, 28 (2): 186-189.
- [8] 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. Design of Prestressed Concrete High Temperature Performance and Fire Resistance [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2012.
- [9] 刘其伟, 王峰, 徐开顺, 等. 火灾受损桥梁检测评估与加固处理 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (2): 71-74.  
LIU Qi-wei, WANG Feng, XU Kai-shun, et al. Detection Evaluation and Repairing of Fire Damaged Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (2): 71-74.
- [10] 袁广林, 郭操, 吕志涛. 高温下钢筋混凝土黏结性能的试验与分析 [J]. 工业建筑, 2006, 36 (2): 57-60.  
YUAN Guang-lin, GUO Cao, LÜ Zhi-tao. Experimental

- Study on Bond Property of Reinforced Concrete at High Temperatures [J]. *Industrial Construction*, 2006, 36 (2): 57-60.
- [11] 童浩, 季晓燕, 赵佳军, 等. 先张法预应力空心板火损评定方法及处治对策 [J]. *公路交通科技*, 2012, 29 (3): 98-103.  
TONG Hao, JI Xiao-yan, ZHAO Jia-jun, et al. Fire-damage Evaluation Method of Pretensioned Hollow Plates and Countermeasures [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29 (3): 98-103.
- [12] CEN ENV 1991-1-2. Eurocode 1. Actions on Structures—Part 1-2: General Actions—Actions on Structures Exposed to Fire [S].
- [13] 俞博, 叶见曙, 温天宇. 火灾下混凝土空心板的温度场 [J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2009, 39 (3): 536-540.  
YU Bo, YE Jian-shu, WEN Tian-yu. Temperature Field in Concrete Hollow Slab Exposed to Fire [J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2009, 39 (3): 536-540.
- [14] 李荣涛. 混凝土结构火灾爆裂危险性评估研究 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21 (1): 204-210.  
LI Rong-tao. Research on Fire Spalling Risk Assessment of Concrete Structures [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21 (1): 204-210.
- [15] 李敏. 高强混凝土受火损伤及其综合评价研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005.  
LI Min. Fire Damage of High Strength Concrete and Its Comprehensive Evaluation [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [16] 郑文忠, 许名鑫, 石东升, 等. 火灾下预应力板混凝土爆裂规律试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2006, 39 (10): 48-53.  
ZHENG Wen-zhong, XU Ming-xin, SHI Dong-sheng, et al. Experimental Study on Spalling of Concrete of Prestressed Slabs in Fire [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39 (10): 48-53.

(上接第38页)

- [6] 李亮, 杨小礼. 圆形浅基础地基承载力极限分析的上限解析解 [J]. *铁道学报*, 2001, 23 (1): 94-97.  
LI Liang, YANG Xiao-li. Analytical Solution of Bearing Capacity of Circular Shallow Foundations Using Upper-bound Theorem of Limit Analysis [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2001, 23 (1): 94-97.
- [7] 张国祥, 付江山. 基于极限分析的圆形浅基础地基承载力上限解 [J]. *岩土力学*, 2010, 31 (12): 3849-3854.  
ZHANG Guo-xiang, FU Jiang-shan. Upper Bound Solution for Bearing Capacity of Circular Shallow Foundation Based on Limit Analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31 (12): 3849-3854.
- [8] 蒋益平, 熊巨华. 方形和圆形基础地基极限承载力分析 [J]. *岩土力学*, 2005, 26 (12): 1991-1995.  
JIANG Yi-ping, XIONG Ju-hua. Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Square and Circular Foundations [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26 (12): 1991-1995.
- [9] 周中, 傅鹤林, 李亮. 圆形浅基础地基承载力的理论解 [J]. *长沙铁道学院学报*, 2002, 20 (3): 1-4.  
ZHOU Zhong, FU He-lin, LI Liang. Theoretical Solution of Bearing Capacity of Shallow Circular Foundation [J]. *Journal of Changsha Railway University*, 2002, 23 (3): 1-4.
- [10] 韩长玉, 夏小和, 王建华. 底面为曲面基础地基极限承载力上限解 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34 (2): 230-236.  
HAN Chang-yu, XIA Xiao-he, WANG Jian-hua. Upper Bound Solutions of Ultimate Bearing Capacity of Curved Footing [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (2): 230-236.
- [11] 陈昌富, 周志军. 路堤下水平加筋体与散体材料桩复合地基极限承载力 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23 (3): 1-9.  
CHEN Chang-fu, ZHOU Zhi-jun. Limit Bearing Capacity of Composite Foundation Reinforced with Geosynthetic and Granular Pile under Embankment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23 (3): 1-9.
- [12] 王雯璐, 赵大军, 王磊. 侧填荷载对涵洞地基承载力的影响 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23 (6): 1-6.  
WANG Wen-lu, ZHAO Da-jun, WANG Lei. Influence of Lateral Fill Load on Foundation Bearing Capacity of Culvert [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23 (6): 1-6.