

## 近塔桥面火灾对三塔悬索桥 结构性能影响研究\*

马如进<sup>†</sup>, 崔传杰, 马明雷

(同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:**以某三塔悬索桥中间钢塔为例,研究了火灾对钢桥塔和桥梁结构性能的影响.首先,通过火灾场景数值模拟,得出桥面近塔区域不同类型火灾场景下的火焰温度分布规律,以及钢结构桥塔的温度分布特性.其次,通过非线性分析获得了三塔悬索桥在不同的近塔火灾场景下结构静力性能的变化.结果表明,在大型车辆火灾作用下,钢中塔有超过80 m<sup>2</sup>的区域温度超过800 °C,最高温度达到1 000 °C以上,中塔性能受到显著影响.钢中塔的应力、变形发生较为明显的变化:钢塔产生4.6 mm的竖向残余变形和53.8 mm的侧向残余变形,火灾区域应力折减达70 MPa,而主缆、主梁的应力和变形变化较小.

**关键词:**结构分析;三塔悬索桥;中间钢塔;火灾;管理养护

**中图分类号:**U445.7

**文献标志码:**A

## Structural Performance Analysis of a Three-pylons Suspension Bridge Considering Fire Accident in the Vicinity of Middle Steel Pylon

MA Rujin<sup>†</sup>, CUI Chuanjie, MA Minglei

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The yield strength of the steel component gradually decreases under high temperature. As a result, the structural performance of the steel component on the bridges will be greatly affected by the on-deck fire disaster. Taking the steel pylon of a three-pylon suspension bridge as an example, this paper mainly studied the influence of the fire disaster on the structural performance of the steel pylon and the entire bridge. First of all, the temperature distribution inside the fire and steel pylon was obtained by the numerical simulation of different on-deck fire scenarios near the middle steel pylon. Secondly, the change of the structural static performance of the bridge under different fire scenarios was obtained by a nonlinear analysis. The results showed that under the effect of a serious vehicle fire, larger than 80 m<sup>2</sup> area of the middle steel pylon was under the temperature up to 800 °C, and the maximum temperature would exceed 1 000 °C, which can greatly affect the structural performance of the steel pylon. Obvious changes of stress

\* 收稿日期:2016-03-19

基金项目:“十二五”交通运输部重大科技专项(2011318494160), Major Science and Technology Projects of Ministry of Transport (2011318494160)

作者简介:马如进(1978-),男,江苏南通人,同济大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: rjma@tongji.edu.cn

and formation of the middle steel pylon were discovered, which means 4.6 mm vertical residual deformation, 53.8 mm lateral residual deformation and 70 MPa stress reduction. However, the stress and deformation of the main cable and girder only showed minor changes.

**Key words:** structural analysis; three-pylons suspension bridge; middle steel pylon; fire accident; management and maintenance

桥梁火灾是桥梁结构在其寿命周期内常见的和严重的灾害之一。根据纽约交通局 2008 年对 1 746 起桥梁事故的调查结果,其中有 52 座桥梁因火灾事故遭到破坏,而由于地震导致破坏的仅有 19 座<sup>[1]</sup>。近年来桥梁火灾事故也呈现增加趋势,对桥梁的运营安全带来了很大的挑战。2007 年 4 月,连接美国旧金山和奥克兰两大城市的高速公路上发生油罐车火灾,造成旧金山地区一座钢梁桥熔化倒塌;2014 年 10 月在建的赤石特大桥塔内火灾引起 9 根斜拉索断裂导致桥面一侧下沉。可见针对桥梁抗火的研究应引起设计者与运营管理者的充分重视。

自 1957 年 Blinov 等<sup>[2]</sup>率先开展火灾实验研究以来,国内外很多学者对建筑火灾进行了相关方面的理论研究,且建筑火灾及抗火设计规范日益成熟。而相比于建筑领域,桥梁火灾事故的理论研究却是刚刚起步。近十年来针对桥梁火灾进行的研究有: Mendes 等<sup>[3]</sup>通过二维平面模型模拟了 Vasco da Gama 大桥船舶火灾事故的发生过程; Dotreppe 等<sup>[4]</sup>使用计算机程序 SAFIR 对比利时 Vivegnis 大桥火灾事故做了数值模拟; Kodur 等<sup>[5]</sup>使用计算机程序 SAFIR 针对钢-混凝土组合结构桥梁的加劲梁防火性能做了案例分析; IGNACIO 等<sup>[6]</sup>采用 LUSAS 软件研究了由美国联邦公路管理局设计的 12.20 m 简支梁桥的防火性能。长安大学李利军则尝试进行了公路火灾温度场的模拟,并对大跨缆索承重桥梁进行了火灾分析。但这些研究多着眼于主梁和缆索系统火灾场景下的分析,而对缆索承重桥梁关键承力构件的桥塔,还缺乏深入研究。

本文在总结既有桥梁火灾研究工作的基础上,以泰州长江大桥为工程实例,对桥梁的常见火灾场景进行了基于 FDS(Fire Dynamics Simulator)的数值模拟,在此基础上求解了中间钢桥塔受到火灾影响时的温度场分布,研究了各类火灾场景对全桥结构静力性能的影响。泰州长江大桥为三塔特大跨悬索桥,中塔的力学性能对全桥结构至关重要,本文研究结果对了解钢塔结构在火灾作用下的性能变化以及对全桥受力行为的影响有较好的参考意义。

## 1 桥梁火灾数值模拟

### 1.1 火源模型和火灾场景

桥梁火灾多由车辆事故引起,属于非稳态模型,相应火灾发展过程大致要经历 3 个阶段:初始增长阶段、稳定燃烧阶段和减弱阶段。目前国际上常用的非稳态火源模型有 3 种<sup>[7]</sup>。本次研究中采用 Heskestad 所提出的  $t^2$  火源模型(图 1)<sup>[8]</sup>。设火灾持续时间为  $t_{\max}$ ,热释放速率在  $t_d$  时刻达到最大值  $Q_d$ ,由于实际分析中往往只需关心初始增长和稳定燃烧两个阶段,该火源模型可表述为:

$$Q = \begin{cases} \alpha t^2, & 0 < t \leq t_d \\ Q_d, & t_d < t \leq t_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为热释放速率, kW;  $\alpha$  为增长系数, kW/s<sup>2</sup>;  $t$  为时间, s。由于桥梁火灾的相关试验研究和统计资料仍处在起步阶段,而桥梁火灾与隧道火灾在火源类型和火灾场景等诸多方面具有相似之处,本文借鉴了隧道火灾在火源模型和火灾场景等方面的研究成果。根据车辆的类型与燃烧生成的热量分类,将火灾分为小汽车火灾、客车火灾、载重卡车和油罐车火灾 4 类<sup>[9]</sup>。Cafaro 等人<sup>[10]</sup>通过大量隧道火灾试验发现小汽车火灾热释放速率为 4~8 MW,增长系数可取为 0.010~0.012 kW/s<sup>2</sup>;客车火灾热释放速率为 15~30 MW,增长系数可取 0.10~0.15 kW/s<sup>2</sup>;载重卡车火灾热释放速率为 15~150 MW,增长系数取 0.50 kW/s<sup>2</sup>。而油罐车火灾由于火源庞大,相关试验研究较少,但一般认为在 5~10 min 内即可达到最高热释放速率 100~300 MW<sup>[11]</sup>。对于火灾持续时间,法国 CETU(隧道研究中心)<sup>[12]</sup>对小汽车、客车、载重卡车、油罐车的建议取值分别为 2 700 s, 5 400 s, 6 000 s 和 6 000 s, Haack 在一项隧道火灾的专题研究中则建议对油罐车火灾取 7 200 s 的燃烧时间<sup>[13]</sup>。对于火源尺寸, Heselden<sup>[14]</sup>研究认为小汽车、客车、载重卡车、油罐车的尺寸可分别取为 1.5 m×4 m, 2 m×6 m~2.5 m×10 m, 4 m×6 m, 4 m×12 m;世界道路协会常设协会(PIARC)<sup>[15]</sup>规定小

汽车、客车和油罐车的火焰尺寸分别为 1.5 m×4 m, 2 m×6 m, 2.5 m×10 m. 结合上述研究成果, 4 类火灾的参数取值如表 1 所示, 其中场景 A, B, C 和 D 分别对应一辆普通小汽车、一辆公共汽车、一辆大型载重卡车以及一辆油罐车的燃烧场景.

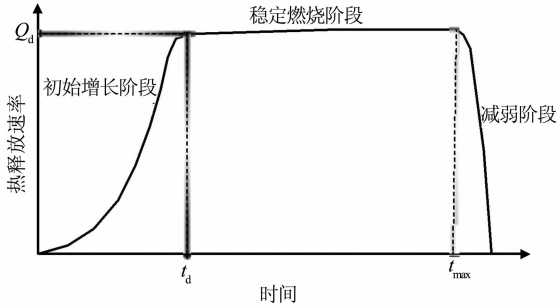


图 1 非稳态火源火灾场景的发展过程

Fig. 1 Development process of instable fire scenario

表 1 火灾基本类型及参数取值  
Tab. 1 Fire types and parameters

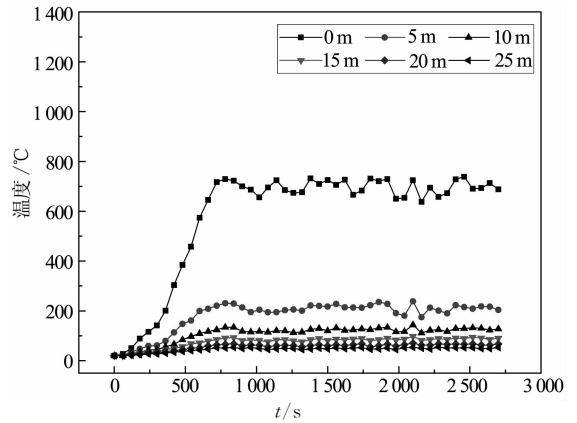
火灾场景	增长系数 / (kW · s <sup>-2</sup> )	持续时间 / s	热释放速率 / MW	火源尺寸 / (m×m)
A	0.011	2 700	5	1.5×4
B	0.123	5 400	30	2×6
C	0.5	6 000	80	4×6
D	1	7 200	200	4×12

1.2 火源模型数值模拟

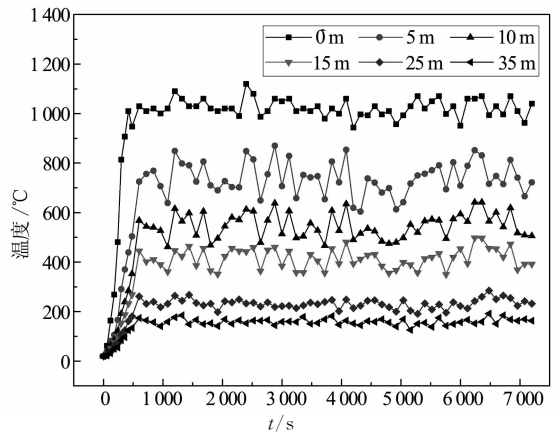
本研究对火源模型和火灾场景的模拟采用基于 CFD 理论的 FDS 软件进行. FDS 基于大涡模拟理论, 以火灾中的流体运动为主要模拟对象, 通过满足火灾场景下的质量守恒、动量守恒、能量守恒和组分守恒, 结合相关状态方程和压力方程, 可较好地用于开放环境下的桥梁火灾模拟<sup>[16]</sup>. FDS 在火灾动力模拟中的可靠性已经得到许多证实<sup>[16-17]</sup>. 将火灾源设置在泰州大桥钢中塔附近, 在模拟过程中假定周边边界氧气供应充足且周围不存在绝热障碍物. 通过 4 类火灾场景的模拟, 可以得到焰心不同高度处的温度分布, 图 2 给出了场景 A 和 D 的火焰中心温度分布. 图 3 给出了场景 D 的火灾场景的模拟效果.

从分析可知, 场景 A 火焰根部温度约为 700 °C, 随着火焰高度增加, 温度迅速降低, 5 m 处火焰温度已经降低到 200 °C 左右. 场景 B, C, D 火焰最高温度相仿, 均为 1 000~1 100 °C 左右. 但随着火焰高度增加, 其温度降低幅度存在较大差异, 5 m 高度时场景 B 已低于 600 °C, 场景 C, D 为 800 °C 左右. 场景 D 与场景 C 各高度处火焰温度均相差不大, 但场景 D 火焰尺寸(4×12 m)远大于场景 C(4×6 m),

可以预见火灾场景 D 对结构可能造成的破坏最大.



(a) 场景 A



(b) 场景 D

图 2 不同高度处火焰中心温度

Fig. 2 Fire temperature in different highth

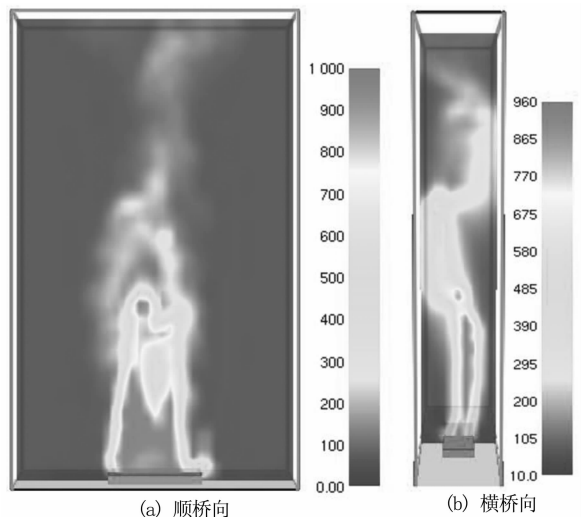


图 3 火灾场景 D 模拟展示

Fig. 3 Display of fire scenario D

### 1.3 FDS 数值模拟可靠性验证

目前国际上广泛采用的火灾升温曲线有 ISO834 曲线<sup>[18]</sup>、ASEM-EI19 曲线<sup>[19]</sup>、HC 曲线<sup>[20]</sup>等. 本文将数值模拟的最高温度与 3 种升温曲线的计算结果进行了比较, 图 4 给出了场景 A 与场景 D 的比较结果. 通过比较可以发现, 数值模拟整体上具有较高的吻合度. 但由于 ISO834 曲线和 ASEM-EI19 曲线主要是针对建筑火灾制定的, 相比较处在开放环境下、氧气供应充足的桥梁火灾, 在大型火灾场景下的温度计算结果偏低; HC 曲线主要应用在石油化工领域, 计算曲线考虑了火灾初期的爆炸和热冲击效应, 对场景 A 这类小型火灾, 计算结果明显偏高. 总体看来模拟结果可以较合理地反映类似桥面特征的开放式空间在火灾作用下的温度场特征.

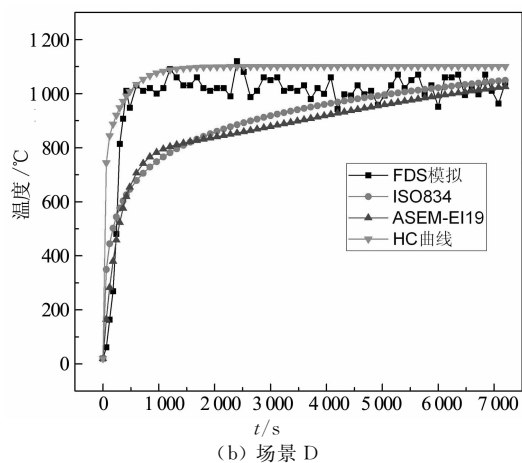
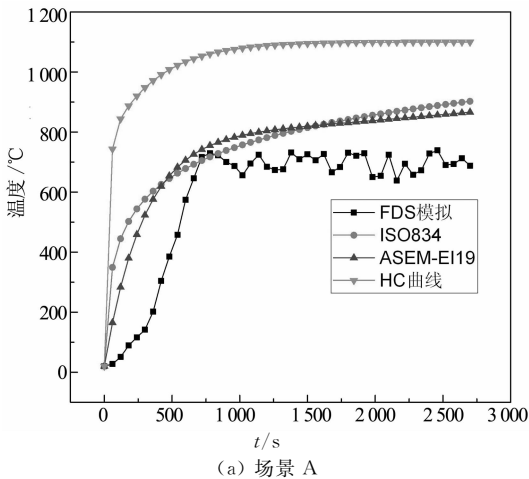


图 4 FDS 模拟结果与国际常用升温曲线对比  
Fig. 4 Comparing FDS simulation results with the international common temperature curve

## 2 火灾下中塔温度场分布

对处于开放环境下的桥梁火灾而言, 近塔桥面火灾主要通过热对流和热辐射的形式对桥塔产生影

响<sup>[16]</sup>. 热对流是由于流体的运动而传递的热量, 对流可分自然对流和强迫对流两种, 桥梁火灾对流形式为自然对流, 是由于温度不均匀而引起的. 其传热满足<sup>[21]</sup>:

$$\dot{q}'' = h\Delta T \quad (2)$$

式中:  $\dot{q}''$  为单位面积的热流量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $h$  为热对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\Delta T$  为温差,  $\text{K}$ .

热辐射是由于物体内部微观粒子的热运动(或者说由于物体自身的温度)而使物体向外发射辐射能的现象. 桥梁火灾处在开放环境中, 烟气容易扩散, 受热辐射影响较大, 其净热量传递可以用斯蒂芬-波尔兹曼方程计算:

$$Q = \varepsilon\sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中:  $Q$  为热流率;  $\varepsilon$  为吸收率(黑度);  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $A_1$  为辐射面 1 的面积,  $\text{m}^2$ ;  $F_{12}$  为从辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数;  $T_1, T_2$  分别为辐射面 1, 2 的表面温度,  $\text{K}$ .

由式(2), 式(3)可以看出, 热对流与热辐射的热量传递均与当前时刻的表面温度有关, 因此火源-结构传热模型的建立是一个复杂的时程分析, 目前国内多采用数值模拟的手段, 尚无针对火灾-结构传热模型的简化或经验公式研究. 本文借助 Ansys 有限元分析软件的热力学模块, 选取受火灾影响的钢中塔节段以 shell131 单元进行温度场模拟. 分析中假设火灾作用于桥塔顺桥向中心处, 火焰外侧边缘距离桥塔 0.5 m. 钢结构在高温下的导热系数和比热按照欧洲规范 EC3<sup>[22]</sup> 及 EC4<sup>[23]</sup> 的规定取值, 如式(4), 式(5)所示:

$$\lambda_s = \begin{cases} 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_s, & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 800^\circ\text{C} \\ 27.3, & 800^\circ\text{C} < T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_s = \begin{cases} 425 + 7.73 \times 10^{-1} T_s - 1.69 \times 10^{-3} T_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} T_s^3, & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 600^\circ\text{C} \\ C_s = 666 - \frac{13002}{T_s - 738}, & 600^\circ\text{C} < T_s \leq 735^\circ\text{C} \\ C_s = 545 + \frac{17820}{T_s - 731}, & 735^\circ\text{C} < T_s \leq 900^\circ\text{C} \\ C_s = 650, & 900^\circ\text{C} < T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_s, C_s$  和  $T_s$  分别表示钢材的导热系数、比热和温度.

通过分析得到 4 类火灾场景下在中塔部分节段最大温度场分布如图 5 所示.

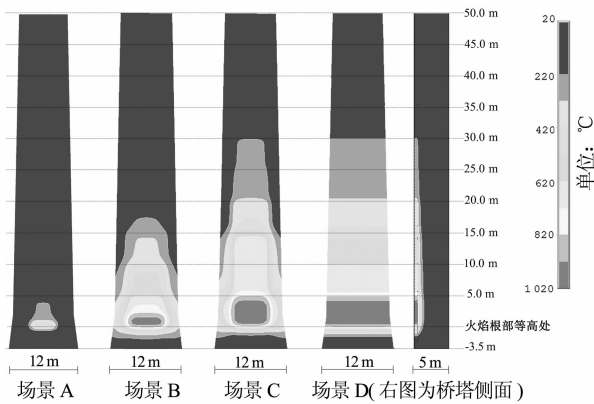


图5 4类火灾场景下中塔温度场分布对比图  
Fig. 5 Temperature distribution of middle pylon under four types of fire scenario

从图5可以看出,4类火灾场景下中塔的温度场分布规律基本与火源模型的模拟结果相一致.相比之下,场景A,B的温度场受影响程度远小于场景C,D.场景C,D在桥塔中心处沿高度方向的分布规律基本一致,但场景D在顺桥向的影响范围远大于场景C.场景D的影响范围会波及到桥塔侧表面,中塔有超过80 m<sup>2</sup>范围内温度超过800 ℃.

### 3 火灾作用前后结构静力分析

#### 3.1 高温下钢结构性能

目前,欧洲 EC3<sup>[22]</sup>, EC4<sup>[23]</sup>、美国 AISC(American Institute of Steel Construction)<sup>[24]</sup>、英国 BS5950 等<sup>[25]</sup> 国家规范都对高温作用下钢结构的材料特性作出了规定.其中 EC3 和 EC4 的方法计算简单、适用性强,本研究对钢结构材料特性的计算以此规范为参考进行.

EC3 和 EC4 中定义的屈服强度和弹性模量随温度变化结果如图6所示.

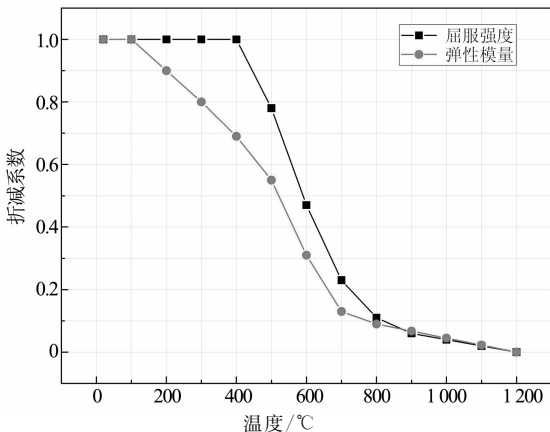


图6 钢材屈服强度及弹性模量随温度变化图  
Fig. 6 Yield strength and elastic modulus of steel with temperature variation

由图6可以看出,当温度达到800 ℃时,钢结构的弹性模量与屈服强度几乎只剩10%.结合图5所示的温度场分析结果,可以预见车辆火灾发生时,特别是场景C,D这类大型火灾,会对结构产生较强烈的影响.

#### 3.2 结构静力性能分析

针对三塔两跨悬索桥,钢中塔是结构的关键.在考虑火灾影响下,传统的梁式模型不能考虑其局部影响效应.为此,本文将钢中塔采用板壳单元模拟,如图7所示.考虑到火灾发生时,一般桥梁管理中严控车辆通行,因此本文重点比较了火灾影响时恒载下结构行为的变化.

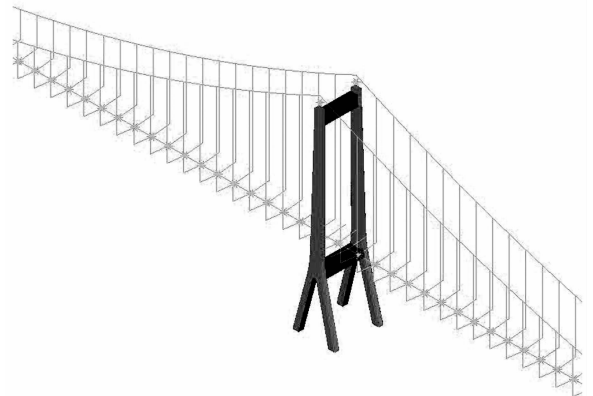


图7 泰州长江大桥有限元模型图  
Fig. 7 Finite element model of Tizhou Bridge

图8和表2给出了4类火灾场景下,中塔的变形趋势以及各关键位置的位移增量数值,其中  $v_a, h_a$  代表远离火灾一侧的塔顶竖向和侧向位移,  $v_b, h_b$  代表火灾发生一侧的塔顶竖向和侧向位移.

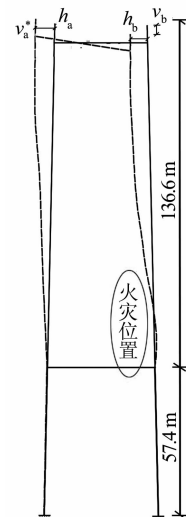


图8 火灾下中塔变形趋势图  
Fig. 8 Deformation trend diagram of middle pylon under the fire scenario

表 2 各类火灾场景下中塔变形增量统计表  
Tab. 2 Deformation increment of middle pylon under different fire scenario

位移增量 /mm	场景 A	场景 B	场景 C	场景 D
$v_a$	-0.1	-1.9	-3.7	-4.6
$v_b$	0.1	1.7	3.6	4.5
$h_a$	0.3	21.7	48.0	52.9
$h_b$	0.4	22.8	49.0	53.8

以火灾场景 D 为例,将中塔位移按照 150 倍比例放大,单独观察桥塔受火面附近的变形和应力变化,如图 9 所示。

可以看到,受火灾影响区域由于材料性能受损,其应力值相比周边单元大幅降低,受火灾影响区域的变形也比未受火灾的一侧桥塔显著得多,在火灾作用下,受火面横桥向变形明显呈现出外凸的趋势,而中塔整体上呈现向远离火灾一侧倾斜的变形趋势。火灾场景 D 作用下,中塔最大竖向位移增量 4.6 mm,

最大横桥向位移增量 53.8 mm。温度最高区域应力降低约 70 MPa,中塔静力行为受到较为明显的影响。

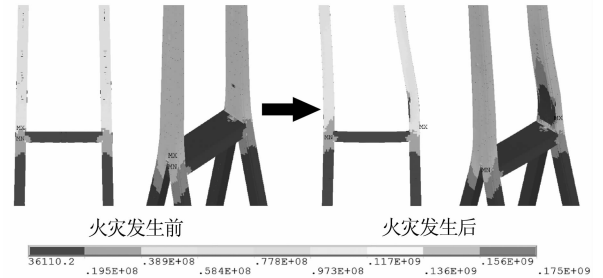


图 9 场景 D 中塔火灾区域应力云图及变形图  
Fig. 9 Stress nephogram and deformation figure of middle pylon near the fire under fire scenario D

分别提取不同火灾形式下加劲梁竖向挠度增量图,如图 10 和图 11 所示。图 12 给出了主缆不同位置处的应力增量变化图。

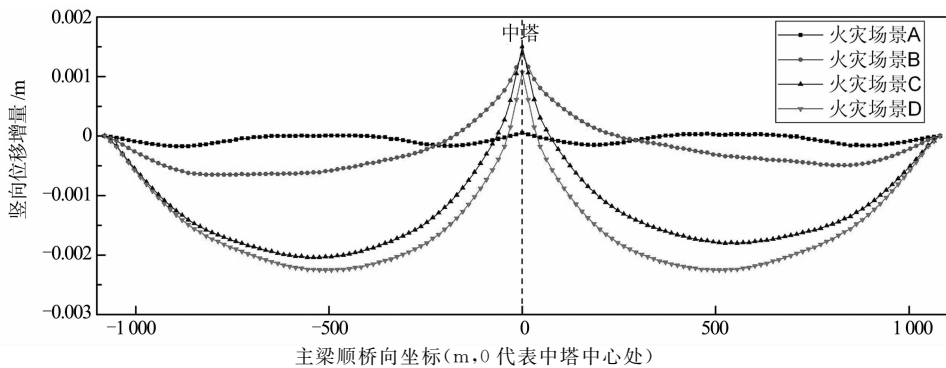


图 10 不同火灾场景下主梁近火侧竖向位移增量  
Fig. 10 Vertical displacement increment of girder near the fire under different fire scenario

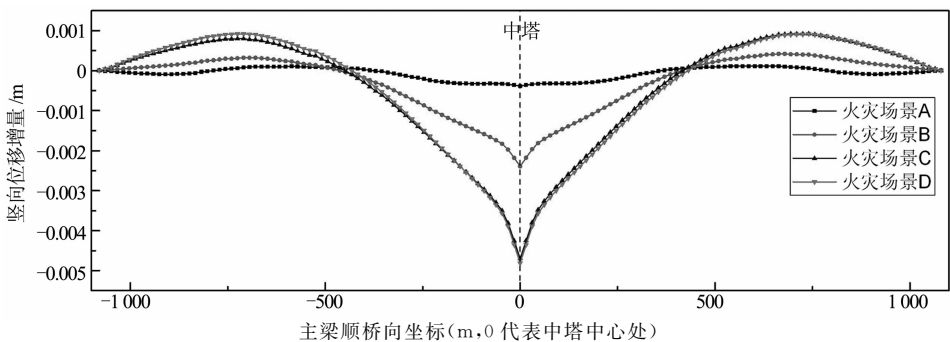


图 11 不同火灾场景下主梁远火侧竖向位移增量  
Fig. 11 Vertical displacement increment of girder away from the fire under different fire scenario

由分析结果可以看出,火灾作用对主梁竖向挠度以及主缆应力的影响很小,主梁最大竖向位移增

量仅为 5 mm,主缆最大应力增量 0.16 MPa。结合图 9 可以看出,即使在最严重的场景 D 作用下,火

灾主要造成直接受到辐射和对流影响的部分区段产生应力重分布,而对对流辐射区域外的区段应力分布影响很小.本桥主跨 1 080 m,垂跨比 1/9,仅考虑恒载作用下,由塔顶位移计算结果可知主缆最大竖

向和横桥向变形率分别为 1/26 087 和 1/20 074.因此仅考虑恒载作用下,火灾对主梁竖向挠度和主缆应力影响很小是合乎逻辑的.

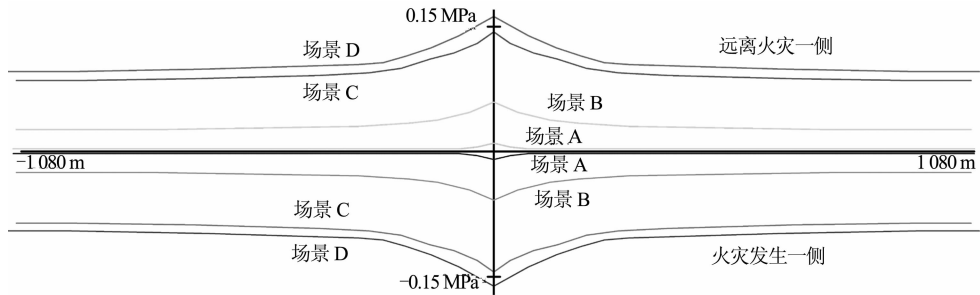


图 12 不同火灾场景下主缆应力增量图

Fig. 12 Stress increment of main cable under different fire scenario

#### 4 考虑中塔火灾影响的管养策略

根据以上分析结果,针对中塔位置所发生的车辆火灾,本文给出以下管养策略:

1)从  $t^2$  火源模型可以看出,火灾从发生到达到稳定燃烧要经过一定的时间(场景 A, B, C 和 D 达到稳定燃烧所需的时间分别为 11 min, 8 min, 7 min 和 7 min),因此,车辆火灾发生后保证消防救援的及时性极为重要,为此必须设立专门的消防应急通道,建议消防救援到达时间不得超过 15 min.

2)火灾场景 A(普通小汽车火灾)对桥梁的影响可基本忽略不计,因此无需采取专门针对性的后续加固措施;火灾场景 B, C 和 D 均会对中塔造成较为明显的损伤,必须采取合理的加固措施.中塔火灾对主缆和加劲梁的影响很小,无需专门处理.

#### 5 结论

本文结合对桥梁火灾的已有认识,分析确定了 4 类桥梁火灾场景的基本参数,通过 FDS 得到了具有通用价值的火灾数值模拟结果,并与现有火灾模型曲线进行对比,验证了数值模拟的可靠性.在此基础上,以泰州长江大桥为工程实例,对中间钢塔火灾作用下的全桥静力性能进行了系统分析,研究得到的主要结论如下:

1)近塔桥面火灾作用对中塔影响十分明显,火灾作用区域由于材料性能受损,应力值相比正常状

态下大幅降低;火灾作用下,受火区域横桥向变形明显呈现出外凸的趋势,中塔整体上呈现向远离火灾一侧倾斜的变形趋势,最大侧移超过 50 mm.

2)近塔桥面火灾作用对加劲梁竖向挠度以及主缆应力的影响很小,基本可忽略不计.

3)结合火灾作用下中塔温度场分布以及全桥静力行为的分析结果,提出了具有针对性的防火管养策略,以供有关部门参考借鉴.

#### 参考文献

- [1] MARIA G, IGNACIO P Z, VENKATESH K, *et al.* Fire hazard in bridges: review, assessment and repair strategies [J]. *Engineering Structures*, 2012 (35): 89—98.
- [2] BLINOV V I, KHUDYAKOV G. On certain regularities of diffusion burning of liquids [J]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1957(113): 241—244.
- [3] MENDES P A, VALENTE J C, BRANCO F A. Simulation of ship fire under Vasco da Gama Bridge [J]. *ACI Struct J*, 2000, 97 (2): 285—290.
- [4] DOTREPPE J C, MAJKUT S, FRANSSSEN J M. Failure of a tied-arch bridge submitted to a severe localized fire [C]//IABSE Symposium. Lisbon: Structures and Extreme Events, 2006: 15—22.
- [5] KODUR V R, GU L, GARLOCK M E. Review and assessment of fire hazard in bridges [C]//Journal of the Transportation Research Board No. 2172. Washington DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2010: 23—29.
- [6] IGNACIO P Z, GARLOCK M E M. A 3D numerical analysis of a typical steel highway overpass bridge under a hydrocarbon fire [C]//Proceedings of the Fifth International Conference for

- Structures in Fire. East Lansing(USA) ;2010;11-18.
- [7] 程远平,陈亮,张孟君. 火灾过程中火源热释放速率模型及其实验测试方法[J]. 火灾科学,2002,11(2):70-74.  
CHENG Yuanping, CHEN Liang, ZHANG Mengjun. The models and experimental testing method of heat release rate of fuel during the development of fire[J]. Fire Safety Science, 2002, 11(2):70-74. (In Chinese)
- [8] LI G Q, WANG P J. Advanced analysis and design for fire safety of steel structures[M]. Hangzhou:Zhejiang University Press, 2012:15-17.
- [9] HAACK A. Fire protection in traffic tunnels; general aspects and results of the eureka project [C] //Tunnellingand Underground Space Technology. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 1998: 377-381.
- [10] CAFARO E, BERTOLA V. Fires in tunnels; experiments and modelling[J]. The Open Thermodynamics Journal, 2010 (4) :156-166.
- [11] 倪照鹏,陈海云. 国内外隧道防火技术现状及发展趋势[J]. 交通世界,2003,3(2):28-31.  
NI Zhaopeng, CHEN Haiyun. Present situation and development trend for tunnel fireproof technique at home and abroad [J]. Transpo World,2003,3(2):28-31. (In Chinese)
- [12] LACROIX D. New French recommendations for fire ventilation in road tunnels[C]//Conf. on Aerodynamics and Ventilaion of Road Tunnels. Aosta(Italy):Mechanical Engineering Publications,1997:103-124.
- [13] HAACK A. Thematic network on fires in tunnels-Technical report part1-design fire scenarios[M]. Brussels(Belgium) : WTCB,2001:61-72.
- [14] HESELDEN A. Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels[M]. East Acton :Building Research Establishment, Fire Research Station, 1978:66-78.
- [15] LACROIX D. The new piarc report on fire and smoke control in road tunnel[C]//Third International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels. Nice: Comité Technique 5 Tunnels Routiers, 1999:185-197.
- [16] 马明雷,马如进,陈艾荣. 桥面火灾条件下斜拉桥拉索及全桥结构安全性能研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2014,42(10):117-124.  
MA Minglei, MA Rujin, CHEN Airong. Safety of cables and full structure of a cable-stayed bridge exposed to fires on deck[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(10): 117-124. (In Chinese)
- [17] 李念平,肖书博,关军. 风管中聚集物燃烧时极限温度的分析研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2009,36(6): 18-21.  
LI Nianping, XIAO Shubo, GUAN Jun. Analysis and study of the limit temperature of the burning sediment in ventilation ducts[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(6): 18-21. (In Chinese)
- [18] ISO 834-11:2014 Fire-resistance tests elements of building construction, amendment 1, amendment 2[S]. Geneva: ISO, 2014:11-23.
- [19] BABRAUSKAS V, ASCE manuals and reports on engineering practice no. 78: structural fire protection[C]// LIE T T. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. New York: American Society of Civil Engineers, 1992: 96-122.
- [20] OLST D V, BOSCH R V D. Behaviour of electrical cables during fire in tunnels[C]// SAVEUR J. Proceedings of ITA World Tunnel Congress 2003. Amsterdam: ITA, 2003: 991-992.
- [21] 汪剑,方志. 混凝土箱梁桥的温度场分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(4): 23-28.  
WANG Jian, FANG Zhi. Temperature variation of concrete box girder bridge[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(4): 23-28. (In Chinese)
- [22] ENV 1993-1-2 Eurocode 3, Design of steel structures, part 1.2: structural fire design[S]. Brussels; European Committee for Standardization, 2005:18-23.
- [23] ENV 1994-1-2 Eurocode 4, Design of composite and concrete structures, part 1.2: structural fire design[S]. Brussels; European Committee for Standardization, 2005:29-32.
- [24] AISC 360-05 Specification for steel building [S]. Chicago: AISC-American Institute of Steel Construction Inc,2005:238-241.
- [25] BS 5950-8:2003 The structural use of steelwork in buildings, part 8: code of practice for fire resistant design [S]. British; British Standards Institution (BSI), 2003:3-13.