

DOI:10.11918/201905018

火灾下大跨度钢桁架拱桥结构性能分析

康俊涛, 王 伟

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘 要: 为研究汽车火灾对大跨度钢桁架拱桥结构受力性能的影响,以主跨为 240 m 的某下承式钢桁架拱桥为研究对象进行受火分析计算. 首先利用火灾模拟软件 FDS 对两种典型火灾场景进行数值模拟获得火灾温度场分布,然后通过有限元瞬态热分析确定火灾区域构件的温度分布,再通过 ABAQUS 热-结构耦合分析桥梁在不同火灾场景下结构性能的变化. 结果表明:钢桁架拱肋在油罐车火灾作用下受火构件的最高温度达 540 ℃;主要传力构件在温度为 430 ℃ 时屈服,达到承载能力极限状态,热膨胀效应与内力重分布导致附近构件的应力增幅达 60~180 MPa;桥面竖向位移变化最大为 115 mm,最大横向高差为 108 mm. 油罐车火灾主要对火源附近 3 根吊索的温度场产生影响,受火吊索索力减小使得桥面下挠 33 mm,主梁应力增大 35 MPa.

关键词: 桁架拱桥; 火灾; 温度场; 有限元; 结构分析

中图分类号: U448.22+4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)09-0077-08

Analysis of structural performance of long-span steel trussed arch bridge exposed to fire

KANG Juntao, WANG Wei

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To study the effect of vehicle fire on the structural performance of long-span steel trussed arch bridge, a down-supported steel trussed arch bridge with main span of 240 m was taken as the research object for analysis and calculation. First, fire dynamic simulation (FDS) was utilized to simulate the fire temperature field distribution of two typical fire scenarios. Then, the temperature distribution inside the steel member was obtained by finite element instantaneous heat analysis. Finally, the ABAQUS thermal-structural coupling was used to analyze the structural performance variation of the bridge in different fire scenarios. Results show that the highest temperature of the steel arch rib members under the effect of tanker fire was up to 540 ℃. The main load transmitting member yielded at the temperature of 430 ℃, which reached the ultimate limit state, and thermal expansion and internal force redistribution led to the stress increase of the member in the fire area up to 60–180 MPa. The maximum variation of the vertical displacement of the bridge deck was 115 mm, and the maximum lateral height difference of the deck was 108 mm. The oil tanker fire mainly affected the temperature field of the three hanger rods near the fire area. Due to the reduction of the hanger rod force in the fire, the down deflection of the bridge deck was 33 mm and the stress of the main girder increased by 35 MPa.

Keywords: trussed arch bridge; fire accident; temperature field; finite element; structural analysis

近年来桥梁火灾事故呈增加趋势,对桥梁的正常运营造成很大威胁. 为保证桥梁运营期间的安全,对桥梁进行火灾下的性能分析非常必要.

大跨度桥梁作为重要的交通枢纽,一旦发生火灾将会造成严重的损失. 目前已有较多学者对大跨度桥梁火灾进行了研究,文献[1]采用油罐车火焰升温曲线,通过 ANAYS 热-结构耦合分析斜拉桥钢

索极限承载力,得到油罐车火灾下有、无保护层的斜拉索极限承载力的变化情况;文献[2]利用 FDS 对公路火灾温度场进行数值模拟,建立了缆索承重桥梁构件的瞬态温度场,并通过热-结构耦合分析得到悬索桥主缆、悬索桥吊索及斜拉桥斜拉索在多种汽车火灾下的安全距离;文献[3]利用 FDS 模拟不同汽车火灾下的火灾温度场,分析各汽车火灾下斜拉索的极限承载力;文献[4]采用油罐车 HC_{inc} 升温曲线,利用 ANAYS 建立三塔悬索桥的热-结构耦合有限元模型,确定油罐车火灾下悬索桥吊索的防火高度及防火保护层厚度;文献[5]分析三塔悬索桥的钢中塔在不同汽车火灾场景下全桥结构静力性能

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51608408);

湖北省自然科学基金(2015CFB393)

作者简介: 康俊涛(1978—),男,博士,教授

通信作者: 康俊涛, jtkang@163.com

的变化。但目前关于大跨度桥梁火灾的研究主要集中在缆索承重体系桥梁,对于大跨度钢桁架拱桥受火分析研究较少。

缆索承重体系桥梁与拱桥在传力方式上的不同决定了结构受火时性能变化的差异性。且对缆索承载体系桥梁行火灾模拟分析中多是针对斜拉索或吊索受火研究,这些构件在火灾高温下破坏对桥梁整体性能的影响有限^[3,5]。而大跨度钢桁架拱桥的拱肋为最主要的传力构件,一旦拱肋处构件在火灾作用下削弱或破坏将会对结构整体安全造成很大威胁,因此有必要研究大跨度钢桁架拱桥受火状态下结构性能的变化。本文在总结既有大跨度桥梁火灾研究的基础上,以某下承式钢桁架拱桥为工程依托,采用火灾模拟软件 FDS 对大空间桥梁火灾温度场进行数值模拟,分析下承式钢桁架拱桥在两种典型火灾场景中结构性能的变化。

1 桥梁火灾温度场模拟

1.1 火灾模型

桥梁火灾事故多数由于车辆着火引起,其中油罐车燃烧火灾规模最大,对桥梁结构造成的危害最为严重^[6],本研究主要考虑桥梁火灾中油罐车着火情况。车辆火灾主要经历 3 个阶段:火灾增长阶段、稳定燃烧阶段、火灾衰弱阶段。依据 Ingason H 的火灾平方增长模型^[7],火灾过程可表示为

$$Q = \begin{cases} at^2, 0 < t < t_{\max}; \\ at_{\max}^2 = Q_{\max}, t_{\max} \leq t \leq t_d; \\ Q_{\max} e^{a(t-t_d)}, t_d < t. \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为火灾热释放率; a 为火灾增长系数; t 为火灾发生时间; $t_{\max}$ 为火灾达到最大热释放率的时间; t_d 为维持最大热释放率的时间; $Q_{\max}$ 为火灾最大热释放率。

国内外在研究车辆火灾过程中给出了不同车辆燃烧规模的建议值。参考其中与油罐车火灾有关的数据:赫塞尔登火灾规模表^[2]建议泄漏汽油的油罐车产生热量为 50~100 MW;法国 CETU^[8]建议热释放率为 100~200 MW 的火灾,火灾增长时间为 10 min,稳定燃烧时间为 60 min,衰弱时间为 20~30 min;国际道路学会 PIARC^[9]建议油罐车热释放速率为 100 MW,造成的火焰的面积为 2.5 m×10 m。文献[5]在研究悬索桥桥面火灾时建议油罐车热释放率为 200 MW,火源面积为 4 m×12 m,火灾增长系数为 1 kW·s⁻²;文献[3]在研究三塔悬索桥近塔桥面火灾时建议油罐车热释放率峰值为 100 MW,火源面积为 4 m×6 m;文献[2]研究公路桥梁火灾瞬

态空间温度场时推荐爆燃油罐车火灾热释放率峰值为 300 MW,火源面积取为 15 m×2.5 m,火灾增长系数为 0.37 kW·s⁻²。综合以上研究成果,以火灾平方增长模型为基础,火灾增长时间取为 15 min,火灾持续时间取为 60 min,火灾中最大热释放率取为 300 MW。在对桥梁受火分析时暂不考虑火灾衰弱阶段对桥梁结构造成的影响,油罐车火灾热释放率数学模型为

$$Q = \begin{cases} 1.333t^2, t < 15 \text{ min}, \\ 300 = Q_{\max}, 15 \leq t \leq 60 \text{ min}. \end{cases} \quad (2)$$

式中 $Q_{\max}$ 为油罐车火灾最大热释放率。

1.2 火灾场景设置

某下承式钢桁架拱桥跨径布置为 70 m+240 m+70 m。其中拱肋由两片拱肋桁架和 8 道横联组成。每片拱肋桁架由上弦杆、下弦杆和腹杆组成。下弦杆采用抛物线,矢高为 54 m,矢跨比为 1/4.444,上弦杆采用二次抛物线和圆曲线相结合,全桥共计 33 对吊索。桥梁的总体布置和横断面如图 1、2 所示。

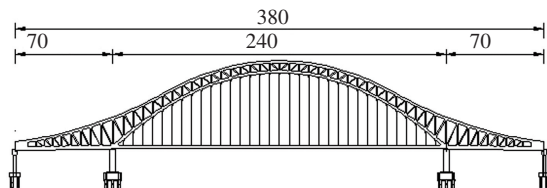


图 1 桥梁总体布置 (m)

Fig.1 General layout of the bridge (m)

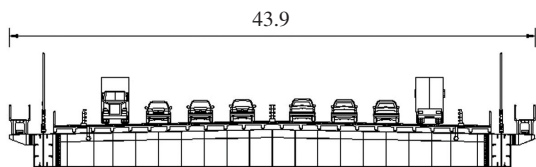


图 2 桥梁横断面 (m)

Fig.2 Cross section of the bridge (m)

桥面发生车辆火灾时,由于桥面铺装和混凝土板对板下钢纵、横梁起到隔热保护作用^[10],本文重点考虑火灾对下承式钢桁架拱桥的拱肋及吊索的影响。考虑火灾实际发生的可能性,选取以下两种典型的火灾场景来对桥梁进行受火分析:1) 火灾场景 A. 下弦杆拱脚处发生油罐车火灾,火灾发生在最外侧车道。2) 火灾场景 B. 主跨跨中处发生油罐车火灾,火灾发生在最外侧车道。

1.3 火灾温度场模拟

利用 FDS 对桥梁火灾温度场进行数值模拟, FDS 对油罐车火灾温度场模拟的可靠性方面得到许多试验证实^[2,11]。

桥梁发生汽车火灾后火源影响范围有限^[2],为简化 FDS 火灾温度场计算模型,同时保证模拟的火

灾温度场能反映出不同构件处的温度变化,本文分别模拟下弦杆拱脚区域及主跨跨中区域的温度场分布. 通过固定面积的热源模拟油罐车火灾,热源热释放率设置为 300 MW,按 t^2 火增长^[12],增长时间为 15 min,火源尺寸为 15 m×2.5 m,设置为无风环境,桥面板设置为混凝土表面,其他部件设置为钢表面,除底面外其他模拟区域边界设置为开放边界. 其中火灾场景 A 模拟如图 3 所示.

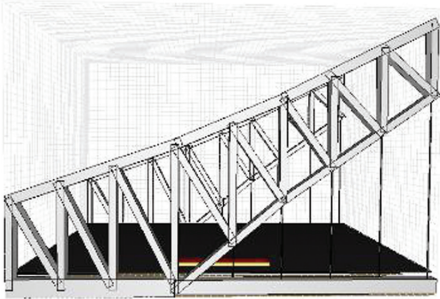


图 3 FDS 火灾模型图

Fig.3 The model of fire in mathematical simulation of FDS
FDS 模型中通过在构件周围布置热电偶来测量各构件附近火灾温度场分布^[12],受火区域附近主要构件的编号如图 4 所示,受火侧吊索编号依次为 1#~33#,跨中吊索编号为 17#.

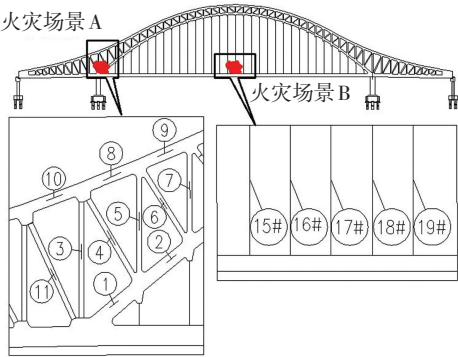


图 4 受火区域附近的主要构件编号

Fig.4 Numbering of members near the fire
通过 FDS 模拟结果可知:各构件附近温度场的升温趋势基本一致,0~300 s 时温度变化较慢,300~1 200 s 时温度快速升高,1 200 s 后各构件附近温度场升温趋于稳定,在最高温度附近波动. 火源附近构件的火灾温度场变化如图 5 所示.

火灾场景 A 中构件附近温度场的最高温度为 550 ℃. 火源中心处吊索温度场最高温度可达 533 ℃,随着距火源水平距离的增大以及吊索高度的增加,吊索温度场显著降低. 火源附近不同吊索沿吊索高度的温度变化见表 1. 可以发现火源附近的 3 根吊索温度场受火灾影响明显. 而拱肋及其他吊索处火灾场温度均小于 100 ℃,忽略火灾对其材

料性能影响.

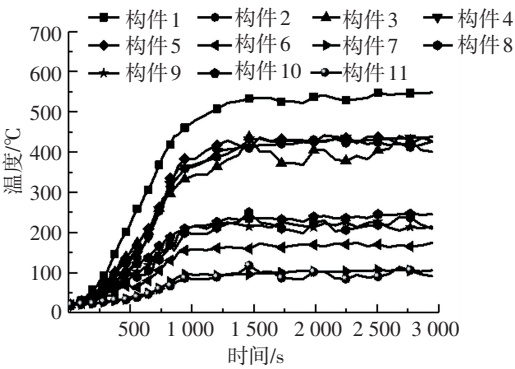


图 5 构件附近火灾温度场

Fig.5 Fire temperature field near members

表 1 吊索不同高度的温度分布

Tab.1 Temperature at different heights of hanger rods

吊索高度/m	温度/℃				
	15#	16#	17#	18#	19#
2	95	288	533	276	98
6	87	240	376	232	87
10	80	169	292	172	73
14	64	117	238	122	60
18	51	87	184	86	50

1.4 钢构件温度场模拟

汽车火灾对钢构件的温度影响主要是通过热辐射、热对流、热传导作用. 火灾发生时,汽车燃烧释放大量的热量使得周围空气升温,高温空气通过热对流作用向钢构件表面传递热量使得钢构件表面温度升高;同时火源通过热辐射作用向构件表面传递热量;当钢材内部不同区域存在温度梯度时,高温区域通过热传导向低温区域传递热量. 钢构件三维温度场瞬态热传导方程为^[13]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0.$$

(3)

式中: ρ 为密度,kg/m³; c 为比热容,J/(kg·℃); λ 为热传导系数,W/m²; T 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的温度,℃.

火灾发生前钢构件的温度场均匀,火灾发生时考虑对流、辐射传热. 对流边界条件与辐射边界条件分别为

$$-\lambda \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_r = h_c (T_b - T_q) \Big|_r,$$

(4)

$$-\lambda \frac{\partial T_b}{\partial n} \Big|_r = \varepsilon \sigma [(T_b + 273)^4 - (T_q + 273)^4].$$

(5)

式中: Γ 为火灾边界条件; T_q 为钢构件表面温度, $^{\circ}\text{C}$; T_b 为构件表面高温气体的温度, $^{\circ}\text{C}$; h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; n 为边界外法线方向; ε 为综合辐射系数; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 一般取 $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

为分析实际火灾中钢构件瞬态温度场, 采用 ABAQUS 瞬态热分析模拟构件受火升温过程. 有限元瞬态热分析是根据能量守恒原理建立热平衡方程, 通过将构件划分为微小单元, 计算构件中各节点的温度, 并据此推导出其他热物理参数. 钢材在进行瞬态热分析时, 钢材在高温下的热传导系数和比热容按欧洲 EC3^[2] 规范选取, 具体表达式为

$$\lambda_s = \begin{cases} 54 - 3.33 \times 10^{-2} T, & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 800\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 27.3, & 800\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$

(6)

$$C_s = \begin{cases} 425 + 0.773T - 1.69 \times 10^{-3} T^2 + 2.22 \times 10^{-6} T^3, & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 600\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 666 + 13\text{ }002/(738 - T), & 600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 735\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 545 + 17\text{ }820/(T - 731), & 735\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 900\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 650, & 900\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1\text{ }200\text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$

(7)

式中: T 为构件温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_s 为不同温度下的钢材热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; C_s 为不同温度下钢材的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; 钢材的密度随温度变化很小, 一般取常温时数值 $7\text{ }860 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

在对受火钢构件进行 ABAQUS 瞬态热分析时, 采用 DC2D4 单元, 对流换热系数按烃类火灾取为 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ^[3], 火灾综合辐射系数取为 0.94 ^[14]。

在火灾环境中, 钢材表面受到高温空气热对流作用以及火源热辐射作用快速升温, 内外表面形成温差, 通过热传导作用温度向内部传递, 内表面温度逐渐升高. 火灾到达稳定燃烧阶段后, 截面温度梯度效应逐渐减小。

在整个火灾过程中各类型受火构件的截面最大温差见表 2. 构件截面最大温差为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对于汽车火灾的高温温度场, 可认为构件截面均匀升温。

表 2 受火构件截面最大温差

Tab.2 Maximum temperature difference of member sections in fire

构件类型	上弦杆	下弦杆	腹杆	吊索
温差	12	6	8	18

基于此本文中钢构件忽略截面温度梯度效应. 各构件的温升情况如图 6 所示, 构件温度场的最高温度为 $98\sim 540\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 $1\text{ }500\text{ s}$ 后温度保持稳定。

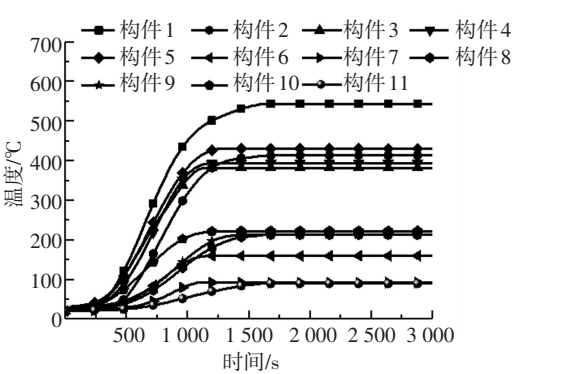


图 6 钢构件升温曲线

Fig.6 Temperature curve of each steel member

2 火灾下结构性能分析

为分析下承式钢桁架拱桥在不同火灾场景下结构性能的变化, 利用有限元软件 ABAQUS 建立全桥有限元模型, 通过热-结构耦合分析不同火灾场景下结构的受力和位移. 利用 ABAQUS 分析结构受火问题的可靠性得到了大量验证^[15-16]。

下承式钢桁架拱桥的上、下弦杆采用高强螺栓栓接的箱型截面, 腹杆采用工字型截面, 吊索规格为 PES7-109, 采用镀锌平行钢丝. 考虑到火灾的偶然性及结构抗火承载安全度可较正常情况低, 计算结构抗力时材料强度按标准值^[17] 选取. 各构件主要参数见表 3. 当构件应力达到屈服强度后, 构件达到承载能力极限状态。

表 3 常温下钢材力学性能指标

Tab.3 Mechanical properties of steel at normal temperature

构件类型	截面类型	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa
上弦杆	箱型截面	370	205
下弦杆拱脚段	箱型截面	390	205
下弦杆	箱型截面	370	205
腹杆	工字截面	370	205
吊索	圆截面	1 770	205

图 7 为全桥有限元模型, 在模型中拱肋、横梁、风撑采用 B31 单元, 吊索采用 T3D2 桁架单元, 全桥模型共计 $13\text{ }684$ 个单元, $40\text{ }475$ 个节点. 将构件的瞬态温度场作为温度荷载施加到模型, 桥梁铺装以均布荷载施加到各横梁, 考虑到火灾时可能造成桥梁大面积交通堵塞, 车辆荷载以静力均布荷载满布车道。

2.1 高温下钢材的性能

火灾中钢材性能的变化直接影响到桥梁受火分析的结果, 目前国内外对钢材在高温下力学性能作了大量研究, 其中欧洲规范 EC3^[2]、中国规范 CECS 2006^[17]、欧洲钢结构协会 ECCS^[18]、英国规范 BS 5950^[19]、美国 AISC 规范^[20] 均对钢材高温下的各种

性能参数提出相应的推荐值;本研究中钢材在高温下的热膨胀系数、弹性模量和屈服强度取值参考欧洲钢结构协会 ECCS 标准,热膨胀系数取为 1.4×10^{-5} ,钢材在高温下的应力应变本构模型参考欧洲规范 EC3,屈服强度和弹性模量变化如图 8 所示。

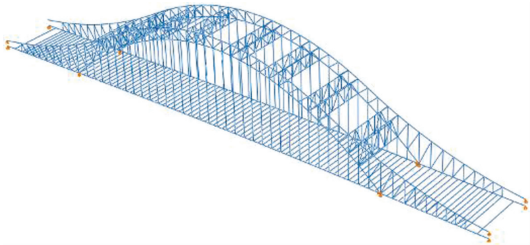


图 7 全桥有限元模型

Fig.7 Finite element model of full-bridge

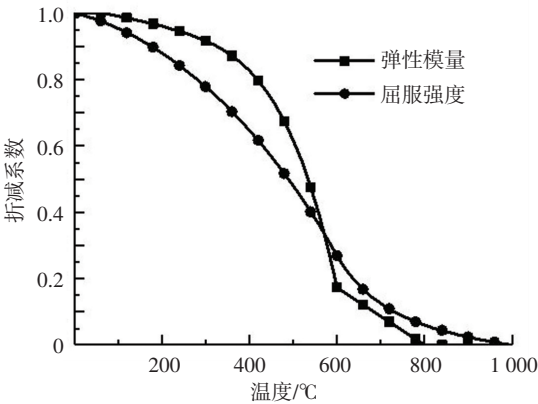


图 8 不同温度下钢材的屈服强度及弹性模量

Fig.8 Yield strength and elastic modulus of steel at different temperatures

2.2 火灾中结构性能分析

2.2.1 火灾场景 A(下弦杆拱脚处发生火灾)

受火前下弦杆拱脚处最大压应力为-180 MPa,为拱肋结构中应力最高部位.当拱脚处发生火灾,距离火源较近的下弦杆在没有防火保护措施时温度快速升至 540 ℃,下弦杆拱脚截面受火时的应力变化曲线如图 9 所示。

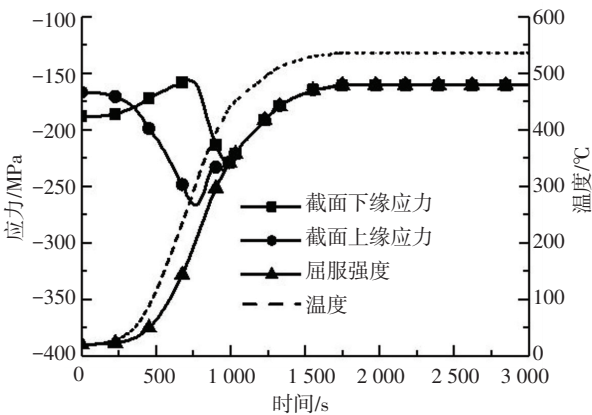


图 9 下弦杆拱脚截面应力变化

Fig.9 Stress variations of the arch of the lower chord

前期由于钢材的热膨胀效应,导致下弦杆快速升温膨胀,膨胀时受到周围杆件的限制,导致压应力逐步增加,同时随着温度的升高,钢材的屈服强度逐渐减小.当构件的应力达到该温度下的屈服强度时构件开始屈服.从图 10 可以看出,下弦杆拱脚处构件在 960 s,温度达到 430 ℃时构件屈服,达到承载能力极限状态,此后应力随着温度的升高逐渐减小,温度稳定在 540 ℃时,构件的屈服强度仅为 156 MPa.

下弦杆拱脚处构件屈服前后,结构的静力性能变化存在差异,以主要传力构件的轴力变化反映出火灾中结构传力路径的改变.受火区域主要构件的轴力变化见表 4,在汽车火灾前期由于热膨胀作用,温度越高构件膨胀越多,膨胀过程中会受到周围杆件的约束使得各受热构件的轴力有所增加,构件升温越快,轴力增加越快;温度继续升高,下弦杆拱脚处构件逐渐进入屈服状态,轴力增加趋势减小;到 1 100 s,温度到达 500 ℃时,下弦杆传递的轴力已小于受火前传递的轴力,上弦杆传递的轴力继续增加;到 1 700 s,构件温度场已经进入稳定阶段,此时高温对下弦杆承载力有明显削弱,由于拱肋上、下弦杆及腹杆的协同受力,下弦杆削弱的承载力能通过上弦杆传递,结构重新达到受力平衡状态。

表 4 受火区域构件的轴力变化

Tab.4 Stress variation of members in fire zone			
构件类型度	构件编号	轴力变化/kN	变化幅度/%
下弦杆	构件 1	-11 534	-21.8
上弦杆	构件 8	18 845	220.8
腹杆	构件 3	11 927	450.0
腹杆	构件 5	4 955	179.4
腹杆	构件 6	7 036	258.0

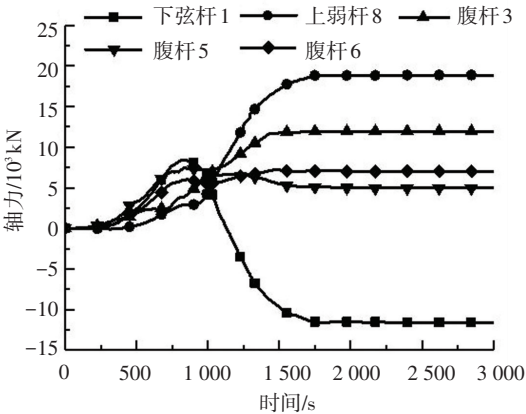


图 10 受火区域主要构件的轴力变化

Fig.10 Axial force variations of members

钢桁架拱肋在火灾作用下中,热膨胀效应及内力重分布作用对受火区域构件的应力影响明显.腹

杆应力增加 99 ~ 161 MPa,上弦杆应力增加 180 MPa,腹杆及上弦杆钢材屈服强度在火灾高温下折减系数为 0.63~0.96,构件仍具备一定的富余强度.表 5 为火灾后主要构件的应力值与火灾高温下的屈服强度.

表 5 受火后构件的最大应力值与屈服强度

Tab.5 Maximum stress and yield strength of members

构件类型	构件编号	应力/MPa	屈服强度/ MPa
下弦杆	构件 1	-156	156
上弦杆	构件 8	-240	340
腹杆	构件 3	-210	263
腹杆	构件 5	-140	234
腹杆	构件 6	177	355

从桥梁受火时吊索索力变化图 11 可以发现火灾对吊索索力的影响在靠近火源的 3 根吊索表现明显.其中 2#吊索的索力受火前为 1 800 kN,1 000 s 时增加至 4 300 kN,1500 s 后随着钢构件温度场的稳定,吊索索力稳定在 3 900 kN,吊索应力峰值为 1 025 MPa.

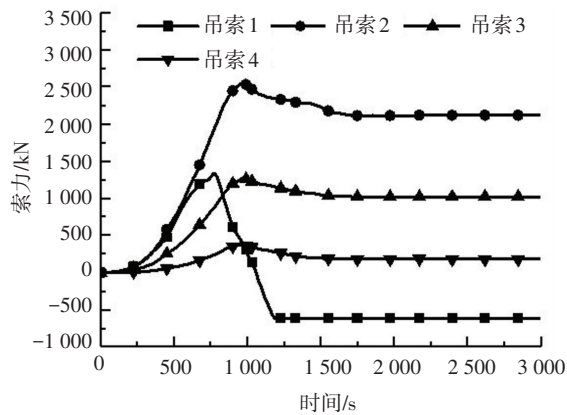


图 11 火源附近吊索索力变化

Fig.11 Force variations of hanger rods near fire area

当桥梁发生汽车火灾后,结构的位移会产生变化.图 12 为火灾下桥梁竖向位移变化,以中跨竖向位移分析为例,火灾前期由于拱脚处各受火构件的热膨胀作用导致中跨整体上升,随着温度升高,竖向位移逐渐增大.当时间到 900 s,温度为 420 ℃时,竖向位移到达最大,为 115 mm.此后随着温度升高,竖向位移逐渐减小,从上文分析可知,960 s 时拱脚下弦杆构件逐渐进入到屈服状态,这使得结构整体刚度逐渐减小,竖向位移下挠趋势增大.1 500 s 时,中跨部分区域的竖向位移为负,1 800 s 时当温度进入到稳定阶段后,火灾中桥梁重新达位移平衡状态.

桥梁受火后,火灾温度场的不均匀性导致桥面两侧竖向位移变化的差异,桥面产生较大的横向高差,最大高差达到 108 mm,最大高差位置为主跨靠

近火源的 $L/4$ 处,火灾下主跨桥面两侧高差的变化如图 13 所示.

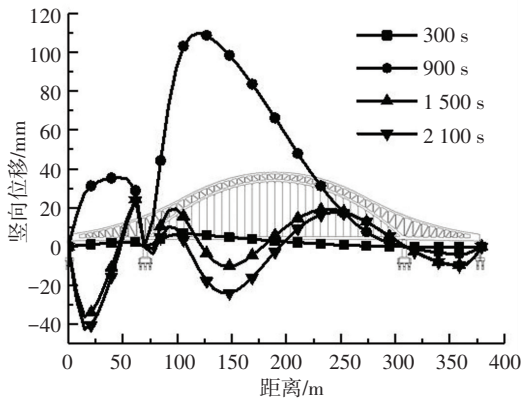


图 12 火灾中桥面竖向位移变化

Fig.12 Vertical displacement variations of bridge deck under fire effect

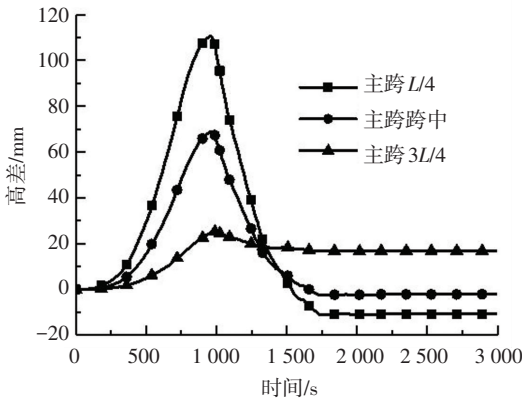


图 13 主跨桥面两侧高差

Fig.13 Height difference on both sides of the main span under fire effect

2.2.2 火灾场景 B(主跨跨中处发生火灾)

下承式钢桁架拱桥在主跨跨中处发生油罐车火灾时,火灾高温对材料性能的削弱导致受火吊索承载能力下降,同时内力重分布作用使得附近吊索索力发生变化.图 14 为受火侧对称一半吊索的索力变化,受火吊索及临近 3 根吊索索力变化明显.

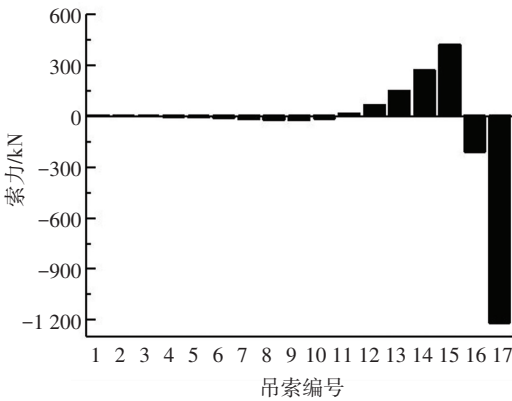


图 14 吊索索力变化

Fig.14 Hanger force variations of hanger rods

表 6 为吊索的最大应力与屈服强度,可以发现,火灾场景 B 中各吊索仍然具备较多的富余强度. 拱肋结构受火灾高温影响较小,应力变化不明显,主纵梁应力变化主要受到吊索索力变化影响. 受火吊索提供的竖向支承力降低,主纵梁竖向支承力由附近吊索提供,主纵梁应力在受火区域最大应力增幅为 21.4%. 主跨关键截面构件的应力变化见表 7.

表 6 吊索的最大应力与屈服强度

Tab.6 Maximum stress and yield strength of the hanger rods				
吊索	索力变化/kN	索力变幅/%	应力/MPa	屈服强度/MPa
13#	148	9.4	412	1 770
14#	268	16.9	440	1 770
15#	418	26.6	474	1 770
16#	-209	-13.2	323	1 398
17#	-1 211	-78.1	81	760

表 7 主跨关键截面应力变化

Tab.7 Stress variation at critical section of main span			
截面位置	应力变化/MPa		
	上弦杆	下弦杆	主纵梁
拱脚截面	0.1	0.1	0.1
L/8	0.1	- 0.1	- 0.3
L/4	0.5	- 2.3	- 10.5
跨中截面	- 0.5	- 9.2	34.6

火灾场景 B 中桥面竖向位移变化如图 15 所示,其中主跨跨中竖向挠度增加 34 mm,竖向位移变幅为 8.1%. 距火源中心 7、14、21 m 处竖向位移变幅分别为 7.3%、5.6%、3.8%.

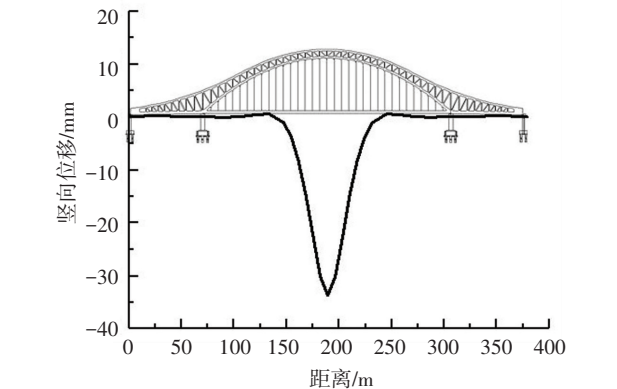


图 15 桥面竖向位移变化

Fig.15 Vertical displacement variations of bridge deck

3 结 论

- 1) 桥梁大空间火灾温度场分布不均,随着距火源距离增大,温度快速下降. 在油罐车火灾场景中,构件附近的温度场最高温度达 550 ℃.
- 2) 火灾场景 A (下弦杆拱脚处发生火灾) 中,热膨胀产生的附加内力及高温对钢材性能的削弱使得

- 下弦杆构件在温度达到 430 ℃ 时进入屈服状态,达到承载能力极限状态. 下弦杆削弱的承载力能通过上弦杆传递,内力重分布使得受火区域的腹杆应力增加 99~161 MPa,上弦杆应力增加 180 MPa. 钢桁架拱肋遭受火灾将导致结构整体位移的变化,在整个火灾过程中桥面竖向位移变化最大为 115 mm.
- 3) 火灾场景 B (主跨跨中发生火灾) 中,油罐车火灾主要对火源附近 3 根吊索的温度场产生影响,受火吊索索力减小使得受火吊索处桥面下挠增加 33 mm,主梁应力增大 35 MPa. 受火吊索削减的承载力可由临近吊索补充,使得结构性能改变主要发生在火灾区域附近.
- 4) 在对大跨度钢桁架拱桥进行防火管养时,应重点加强钢桁架拱肋的防火保护.

参考文献

[1] 宁波,刘永军,于保阳,等. 油罐车火灾场景下斜拉桥钢索极限承载力有限元分析[J]. 钢结构, 2012, 27(2): 68
NING Bo, LIU Yongjun, YU Baoyang, et al. Numerical simulation of ultimate bearing capacity of cables for a cable-stayed bridge under tanker fire[J]. Steel Construction, 2012, 27(2): 68

[2] 李利军. 公路火灾温度场数值模拟及大跨径缆索承重桥梁火灾分析[D]. 西安:长安大学, 2013
LI Lijun. Numerical simulation of highway firetemperature field and fire analysis of long-span cable support bridge fire [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013

[3] 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的安全性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 117
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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2014.10.019

[4] 王莹,刘沐宇. 大跨径悬索桥缆索抗火模拟方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 2091
WANG Ying, LIU Muyu. Fire resistance simulation of main cable and sling for long-span suspension bridge [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(6): 2091. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2016.06.037

[5] 马如进,崔传杰,马明雷. 近塔桥面火灾对三塔悬索桥结构性能影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 288
MA Rujin, CUI Chuanjie, MA Minglei. Structural performance analysis of a three-pylons suspension bridge considering fire accident in the vicinity of middle steel pylon[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5): 88. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzb-kb.2017.05.011

[6] 张岗,贺拴海,侯炜,等. 预应力混凝土桥梁抗火研究综述[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 1
ZHANG Gang, HE Shuanhai, HOU Wei, et al. Review on fire resistance of prestressed-concrete bridge[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(6): 1

- [7] INGASON H. Design fire curves for tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(2): 259
- [8] 杨涛. 公路隧道火灾热释放率及通风方式研究[D]. 西安: 长安大学, 2009
YANG Tao. Study on thermal release rate and ventilation method of highway tunnel fire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009
- [9] PIARC. Fire and smoke control in road tunnels[R]. Paris: PIARC Committee on Road Tunnels (C5), 1999
- [10] 李国强, 许炎彬, USMANI A. 油罐车火灾下钢-混凝土组合梁桥结构响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(3): 444
LI Guoqiang, XU Yanbin, USMANI A. Study on structures responses of steel-concrete composite highway bridge under fuel tank fire [J] Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(3): 444. DOI: 10.13409/j.cnki. jdpme.2016.03.020
- [11] 陈长坤, 王玮玉, 康恒, 等. 不同火源面积下隧道火灾温度场试验与数值模拟分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 235
CHEN Changkun, WANG Weiyu, KANG Heng, et al. Experimental and numerical simulation analysis of temperature field of tunnel fire with different fire source areas[J]. Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6): 235
- [12] 李庆功, 宋文华, 陈阵, 等. 基于 FDS 的大型原油储罐防火堤内池火灾的数值模拟[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2012, 45(1): 77
LI Qinggong, SONG Wenhua, CHEN Zhen, et al. Mathematical simulation of pool fire in fire bund of large oil tank zone based on FDS[J]. Journal of Acta Scientiarum Naturalism Universitatis Nankaiensis, 2012, 45(1): 77
- [13] 熊伟, 李耀庄, 严加宝. 火灾作用下钢筋混凝土梁温度场数值模拟及试验验证[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2838
XIONG Wei, LI Yaozhuang, YAN Jiabao. Numeral modeling and experimental verification on heat transfer of RC beams under elevated temperature[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(7): 2838
- [14] 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
ZHANG Gang, ZHU Meichun, HE Shuanhai, et al. Failure model analysis of prestressed concrete T girder exposed to fire[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 77. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3897.2017.02.010
- [15] 李国强, 王培军, 王永昌. 约束钢柱抗火性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 184
LI Guoqiang, WANG Peijun, WANG Yongchang. Experimental study on restrained steel column subjected to fire[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 184
- [16] 陈振龙, 韩重庆, 许清风, 等. 底面受火预应力混凝土空心板耐火性能的有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(3): 478
CHEN Zhenlong, HAN Chongqing, XU Qingfen, et al. Finite element analysis of PC hollow-core slab exposed to fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(3): 478. DOI: 10.13409/j.cnki. jdpme.2016.03.024
- [17] 建筑钢结构防火技术规范: CECS 200—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006
Technical code for fire safety of steel structures in buildings: CECS 200—2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006
- [18] ECCS. European recommendations for the fire safety of steel structure[S]. Croydon: European Convention for Constructional Steelwork, 1983
- [19] Structural use of steelwork in building. part 8: code of practice for fire resistance design: BS 5950[S]. London: British Standards Institution (BSI), 1990
- [20] Specification for steel building: ANSI/AISC 360-16[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016

(编辑 魏希柱)

(上接第 44 页)

- [5] 韦正华. 拉索减震支座开发及在桥梁抗震中的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2011:15
WEI Zhenghua. Development of cable-sliding friction aseismic bearing and its application in bridge seismic design[D]. Shanghai: Tongji University, 2011:15
- [6] 袁万城, 王斌斌. 拉索减震支座的抗震性能分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(8):1126
YUAN Wancheng, WANG Binbin. Numerical model and seismic performance of cable-sliding friction aseismic bearing[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(8): 1126. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2011.08.005
- [7] 党新志, 袁万城, 庞于涛, 等. 自复位拉索减震装置研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(12): 1537
DANG Xinzhi, YUAN Wancheng, PANG Yutao, et al. Development and application of the self-centering cable-sliding friction aseismic device[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(12): 1537. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201305006
- [8] 刘世佳. 拉索减震支座的标准化设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2015:29
LIU Shijia. Research on standardized design of cable-sliding friction aseismic bearing[D]. Shanghai: Tongji University, 2015:29
- [9] 袁万城, 曹新建, 荣肇骏. 拉索减震支座的开发与试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(12):1593
YUAN Wancheng, CAO Xinjian, RONG Zhaojun. Development and experimental study on cable-sliding friction aseismic bearing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(12): 1593. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.2010.12.006
- [10] YANG H, PANG Y, TIAN S, et al. Case study of the seismic response of an extra-dosed cable-stayed bridge with cable-sliding friction aseismic bearing using shake table tests[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017, 26(16): e1398. DOI: 10.1002/tal.1398
- [11] 王江波. 近场地震作用下采用拉索减震支座桥梁抗震性能分析[D]. 上海: 同济大学, 2013: 6
WANG Jiangbo. Seismic performance analysis of bridge using cable-sliding friction aseismic bearing under near-field ground motion[D]. Shanghai: Tongji University, 2013:6
- [12] 袁万城, 谷屹童, 党新志, 等. 缓冲型拉索减震支座脉冲地震下减震性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9):1511
YUAN Wancheng, GU Yitong, DANG Xinzhi, et al. Seismic performance of a buffer cable sliding friction aseismic bearing in pulse-type earthquakes[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(9):1511

(编辑 魏希柱)