

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240624004

# 车辆火灾下悬索桥桥面空间温度场分布特征研究\*

陈巍<sup>1,2</sup>, 沈锐利<sup>2</sup>, 郑植<sup>3</sup>, 冯帅兴<sup>1</sup>, 陈兴华<sup>1</sup>, 齐东春<sup>1</sup>

(1. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学),湖北宜昌,443002; 2. 西南交通大学智能与绿色建造全国重点实验室,四川成都,610031; 3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司,桥梁工程安全与韧性全国重点实验室,重庆400067)

**摘要:**为探明车辆火灾下悬索桥桥面空间温度场分布特征,并为悬索桥抗火分析提供热边界条件,采用FDS软件建立车辆燃烧CFD计算模型,分析了不同车辆燃烧特性及温度影响范围,明确了油罐车火灾下缆索体构件表面升温历程,讨论了标准火灾升温曲线作为桥梁火源模型的不足。结果表明,油罐车火灾下龙潭桥缆索体构件表面环境最高温度可达到1170℃,即油罐车火灾对缆索体构件安全威胁极大。无风条件下油罐车火灾沿高度方向、纵桥向及横桥向的温度影响范围分别约为30、20m及20m,且受桥面风速影响显著,随着纵桥向风速增大,沿高度方向温度影响范围减小,沿纵桥向温度影响范围增大。ISO834及ASTME119标准火灾的最高温度及升温速率均显著低于油罐车火灾,HC标准火灾无法模拟非火源中心处的升温规律,龙潭桥缆索体构件抗火分析的火源模型建议采用FDS计算结果确定。

**关键词:**悬索桥; 车辆火灾; 火源模型; 温度场分布; 温度影响范围; 抗火保护设计

**中图分类号:** U443.38; U445.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0369-10

## Study on Temperature Field Distribution Characteristics in Suspension Bridge Deck Space under Vehicle Fires

CHEN Wei<sup>1,2</sup>, SHEN Ruili<sup>2</sup>, ZHENG Zhi<sup>3</sup>, FENG Shuaixing<sup>1</sup>, CHEN Xinghua<sup>1</sup>, QI Dongchun<sup>1</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. National Key Laboratory of Safety and Resilience of Bridge Engineering, China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

**Abstract:** This study aims to investigate the distribution characteristics of the temperature field in the suspension bridge deck space under vehicle fires, thereby providing thermal boundary conditions for fire resistance analysis of suspension bridges. A computational fluid dynamics (CFD) model of vehicle combustion was established using FDS software. The combustion characteristics and temperature-affected ranges of different vehicles were analyzed, the surface temperature rise process of cable components under tanker truck fires was clarified, and the limitations of using standard fire temperature rise curves as bridge fire source models were discussed. The results showed that the maximum surface en-

\* 收稿日期:2024-06-24;修回日期:2024-07-29

基金项目:湖北省自然科学基金(2024AFB171)、桥梁工程安全与韧性全国重点实验室开放基金(2024SKLBSR-DW018)、防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2023KJZ21)资助

作者简介:陈巍(1991—),男,讲师,硕导,博士。主要从事缆索承重桥梁抗火研究。E-mail: wchen@my.swjtu.edu.cn

通信作者:冯帅兴(1999—),男,硕士。主要从事桥梁结构非线性理论研究。E-mail: fsx1999@qq.com

vironment temperature of cable components of Longtan Bridge reached 1 170 °C under tanker truck fires, indicating that tanker truck fires posed a severe threat to the safety of cable components. Under windless conditions, the temperature-affected ranges of tanker truck fires in the vertical, longitudinal, and transverse directions were approximately 30 m, 20 m, and 20 m, respectively, and were significantly influenced by wind speed on the bridge deck. As the longitudinal wind speed increased, the temperature-affected range decreased vertically and increased longitudinally. The maximum temperatures and heating rates of ISO 834 and ASTM E119 standard fires were significantly lower than those of tanker truck fires. The HC standard fire curve failed to simulate the temperature rise patterns at locations away from the fire source center. For fire resistance analysis of cable components of Longtan Bridge, the fire source model is recommended to be determined using FDS calculation results.

**Keywords:** suspension bridge; vehicle fire; fire source model; temperature field distribution; temperature-affected range; fire protection design

## 0 引 言

火灾作为桥梁极端荷载的一种,可造成桥梁构件损伤或整体垮塌,极大威胁到桥梁运营安全<sup>[1-2]</sup>。近年来桥梁火灾事故频发,如2017年3月30日美国I-85大桥发生火灾事故,致使桥梁发生整体垮塌,造成了严重经济损失<sup>[3]</sup>;2014年10月29日湖南赤石特大桥发生施工火灾事故,导致9根斜拉索发生火致断裂,斜拉索受火严重侧的主梁发生大面积开裂<sup>[4]</sup>。以上火灾事故的发生和产生的严重后果,敲响了桥梁抗火需求的警钟。火源是桥梁抗火分析的关键参数,采用合适的火源模型揭示桥面火灾空间温度场分布是进行桥梁抗火分析的前提。

目前桥梁抗火分析的火源模型主要采用结构抗火规范中的标准火灾升温曲线。如孙树华等<sup>[5]</sup>基于ISO834标准火灾升温曲线分析了钢索的传热特性;王莹等<sup>[6]</sup>采用HC标准火灾升温曲线分析了悬索桥吊索的火灾安全性;王翠娟<sup>[7]</sup>对比了不同标准火灾升温曲线的升温特点,并建议将HC标准火灾升温曲线作为桥梁结构抗火分析的火源模型;Y.Du等<sup>[8-9]</sup>采用ISO834标准火灾升温曲线研究了钢索构件的传热特性及锚杯填充料的高温连接强度。基于CFD模拟技术可获得桥梁抗火分析的可靠热边界条件。如Z.Liu等<sup>[10]</sup>,张岗等<sup>[11]</sup>及C.Cui等<sup>[12]</sup>首先建立CFD模型实现桥梁火灾场景模拟,得到桥梁构件的热边界条件,然后建立桥梁FEM模型,获得桥梁结构火灾下的力学响应及抗火性能。

标准火灾升温曲线是基于试验数据建立的火源模型,可反映建筑物火灾的发展规律。然而,桥

梁结构火灾具有典型的开放式火灾燃烧特征,燃烧物类型、火灾发展时间及桥面风速等因素对桥梁火灾燃烧特性影响较大<sup>[13]</sup>。标准火灾升温曲线不能准确反映环境因素对桥梁火灾燃烧特性的影响,因此难以准确模拟实桥火灾场景。

研究表明,车辆火灾是桥梁火灾的主要类型<sup>[14]</sup>。因此,本文采用FDS软件建立桥面车辆火灾燃烧CFD计算模型。首先分析了不同车辆火灾燃烧规律及桥面风速对车辆火灾燃烧特性的影响。其次以龙潭长江大桥(后简称龙潭桥)为背景,分析了龙潭桥跨中油罐车火灾场景,明确了油罐车火灾下桥面空间温度场分布特征、缆索体构件表面环境升温历程及温度影响范围。本文研究结果可为悬索桥缆索体构件抗火分析提供可靠热边界条件,为确定悬索桥缆索体构件的防火保护范围提供依据。

## 1 车辆火灾热释放率

### 1.1 热释放率增长模型

描述火灾燃烧特性的关键参数为最大热释放率及热释放率增长模型。试验研究表明,燃料控制型热释放率指数增长模型可准确描述车辆火灾的发展过程<sup>[15]</sup>,该模型规定火灾热释放率以指数函数模型增长至最大热释放率,随后由于燃料消耗导致火灾热释放率逐渐衰减,其计算式如式(1)所示。

$$HRR = Q_{\max} \cdot n \cdot r \cdot (1 - e^{-kt})^{n-1} \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

式中, $HRR$ 为热释放率; $Q_{\max}$ 为最大热释放率; $t$ 为火灾时间; $n$ 、 $r$ 及 $k$ 为指数增长模型参数。

H.Ingason<sup>[16]</sup>通过对小汽车、公交车、货车及油罐

车燃烧试验结果归纳与总结,拟合得到不同车辆燃烧的热释放率指数增长函数及燃烧参数,见表1。

表1 指数增长模型函数及参数(燃料控制型)<sup>[16]</sup>

Table 1 Exponential growth model functions and parameters (fuel-controlled type)<sup>[16]</sup>

车辆类型	燃烧总热量 $E_{tot}/GJ$	最大热释放率 $Q_{max}/MW$	火源规模/m		指数增长模型参数		
			长度	宽度	$n$	$r$	$k(\times 10^{-5})$
小汽车	14.4	8	4	2	2.1	2.04	1.13
公交车	52.5	25	9	2.5	2.0	2.00	0.95
货车	225	150	10	2.5	3.2	2.28	1.52
油罐车	1 500	200	12	2.5	1.1	1.27	0.17

### 1.2 热释放率计算

采用FDS软件建立不同车辆燃烧CFD计算模型并输入燃烧参数,得到不同车辆火灾热释放率增长曲线,并与式(1)计算结果对比,如图1所示。FDS的计算原理为大涡模拟算法(LES),可大大减小计算量,FDS在火灾模拟方面的精确性已得到验证,并在桥梁结构抗火领域得到广泛应用<sup>[10-12]</sup>。

由图1可以看出,不同车辆火灾热释放率在500 s内迅速达到峰值,随后由于燃料消耗热释放率逐渐衰减。对比热释放率增长曲线的计算值及模拟值可知,由CFD计算得到的车辆火灾热释放率发展过程与试验测试结果基本一致。因此,FDS软件能准确模拟不同车辆火灾热释放率变化规律。

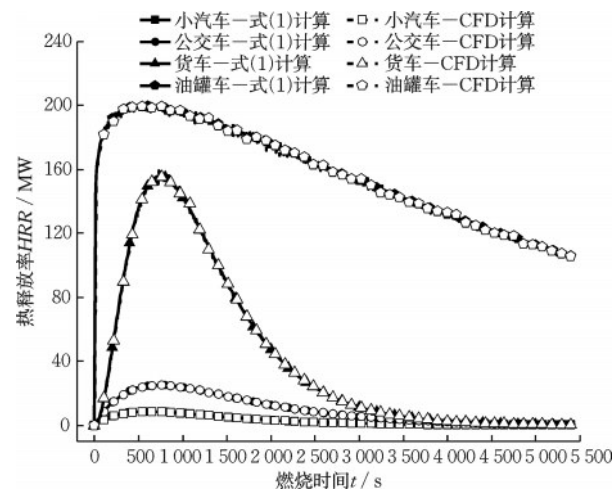


图1 不同车辆燃烧热释放率指数增长曲线

Fig.1 Exponential growth curves of heat release rates of different vehicles

## 2 车辆火灾燃烧特性分析

### 2.1 车辆火灾燃烧模拟

悬索桥上发生车辆火灾时,不同车辆火灾沿火源高度方向、纵桥向及横桥向的温度分布不同。采用FDS模拟小汽车、公交车、货车及油罐车火灾燃烧过程,以确定四种典型车辆火灾燃烧特性及温度场分布规律。模拟时作以下假定:①火灾燃烧面积固定,不考虑燃料泄露;②空气量充足,不考虑不充分燃烧情况;③火灾产生的烟气为理想气体,燃烧过程中不发生二次反应。火灾燃烧参数按表1确定,数值计算模型的燃烧反应(Reactions)选择“HEPTANE”。沿火源高度方向、纵向及横向布置若干温度探测器,用于监测不同位置的升温历程。沿火源中心位置设置温度切片(Temperature Slice),用于显示火源中心温度场分布云图。桥面风速会影响火灾烟气流动,先不考虑桥面空气流动,即假定桥面风速为零。图2显示了小汽车和油罐车火灾燃烧的温度分布云图,其它车辆火灾的温度分布云图与之类似。

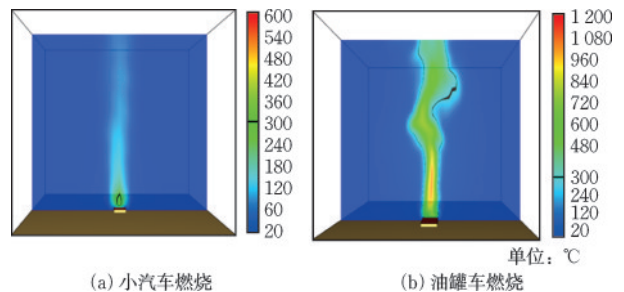


图2 不同车辆燃烧温度分布云图

Fig.2 Contour maps of combustion temperature distribution of different vehicles

由小汽车、公交车、货车及油罐车火灾温度场分布计算结果可知,不同车辆燃烧沿火焰高度方向的温度分布规律一致,即随着高度的增加、火焰温度先升高后降低。由图2还可以看出,在无风条件下车辆火灾烟气主要沿火源高度方向流动,即无风条件下车辆火灾对桥梁结构的影响范围主要沿高度方向分布。

### 2.2 车辆火灾升温历程及温度影响范围

通过温度探测器监测四种车辆火灾沿火源高度方向、纵向及横向不同位置的升温历程,其中沿高度方向距火源中心30 m范围内的测点升温历程

如图3所示。PTI DC45.1-18规范中规定火灾对缆索体构件安全造成影响的临界温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[17]</sup>,以此确定四种车辆火灾的温度影响范围。

由图3可以看出,四种车辆火灾的最高温度分别可达到 $550$ 、 $990$ 、 $1\ 110$ 、 $1\ 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比不同车辆火灾升温历程可知,小汽车、公交车及货车火灾温度随着燃烧时间的增加最终会逐渐降低,而油罐车火灾在整个燃烧过程中基本维持最高温度。由此

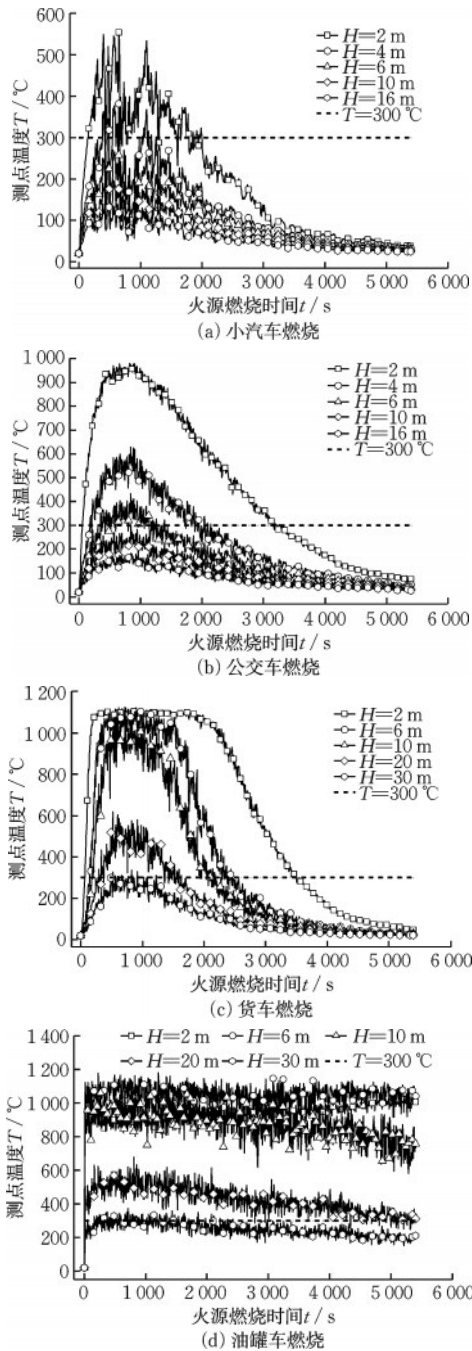


图3 不同车辆火灾升温历程

Fig.3 Temperature rise processes of fires of different vehicles

表明,油罐车火灾无论是温度影响范围还是高温持续时间均最大,即油罐车火灾对悬索桥缆索体构件的威胁最大。沿纵向及横向不同位置的升温历程与图3类似,本文不再详细展示。四种车辆火灾沿火源纵向(纵桥向)、横向(横桥向)及高度方向的温度分布梯度曲线,如图4所示。

由图4可以看出,小汽车火灾高度达到 $6\text{ m}$ 时温度低于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而公交车、货车及油罐车火灾高度分别达到 $10$ 、 $30\text{ m}$ 及 $30\text{ m}$ 时温度低于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,四种车辆火灾沿高度方向的温度影响范围分别为 $6$ 、 $10$ 、 $30\text{ m}$ 及 $30\text{ m}$ 。同理可得到四种车辆火灾沿纵桥向温度影响范围分别为 $4$ 、 $10$ 、 $17$ 、 $20\text{ m}$ ,沿横

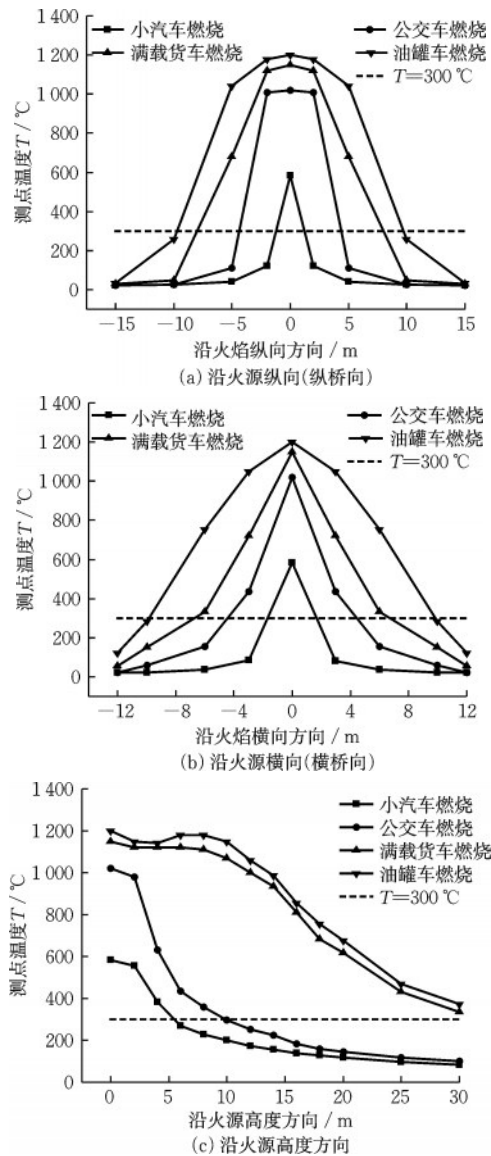


图4 不同车辆火灾温度影响范围

Fig.4 Temperature-affected ranges of fires of different vehicles

桥向的温度影响范围分别为4、8、14、20 m。计算结果表明,车辆火灾沿横桥向的温度影响范围不超过20 m。大跨度悬索桥两侧缆索体构件的间距一般超过30 m,即靠近一侧缆索体构件发生车辆火灾对另一侧缆索体构件无影响。因此,后续计算只考虑车辆火灾对悬索桥单侧缆索体构件的影响。

### 2.3 桥面风速影响

悬索桥桥面无障碍物遮挡、空气流动性好。因此,需考虑风速对车辆火灾的影响。悬索桥桥面风包括横桥向风和纵桥向风,横桥向风会将火焰吹向缆索体构件,主要影响受火缆索体构件的温度。本计算已经考虑车辆充分燃烧,即火灾温度能达到最高。缆索体构件抗火设计更关注沿纵桥向和高度方向的防护范围。因此,本计算主要讨论纵桥向风速对车辆火灾温度场分布的影响。计算了0、3、5、10、15 m/s五种风速下的油罐车火灾温度场分布。沿纵桥向设置一对通风口边界(Vent Boundary)和开放边界(Open Boundary),用于模拟沿纵桥向的不同风速,其余边界条件与无风计算工况一致。设置温度切片(Temperature Slice)显示火源中心温度场分布。其中,0、15 m/s计算工况的温度场分布云图如图5所示,其它风速下的温度场分布云图与之类似。

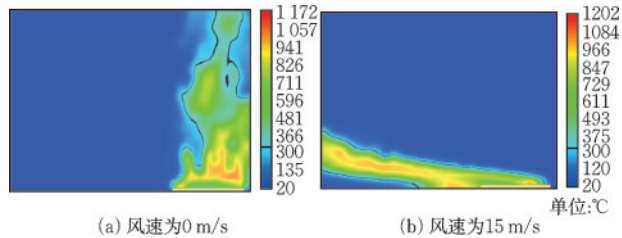


图5 不同风速影响的油罐车火灾温度场分布云图

Fig.5 Temperature field contour maps of tanker truck fires under different wind speeds

由图5可以看出,桥面风速对火灾烟气流动具有显著影响,烟气流动方向与风速方向一致。在无风状态下烟气主要沿高度方向流动,当桥面具有一定纵桥向风速影响时,火灾烟气主要沿风速方向流动。为直观反映桥面风速对油罐车火灾温度场分布的影响,绘制了0、3、5、10、15 m/s五种风速工况下沿火源高度方向及纵桥向(顺风向)的温度分布梯度曲线,如图6所示。

由图6可看出,五种风速工况下,沿火源高度方向的温度影响范围分别为30、24、18、12、10 m,沿火源纵向的温度影响范围分别为10、12、20、30 m及>30 m。即随着风速的增大沿火源高度方向的温度

影响范围逐渐减小,而沿纵桥向的温度影响范围逐渐增大。因此,在进行悬索桥缆索体构件防火保护设计时,防火保护范围应根据有风条件下的油罐车火灾温度影响范围确定。

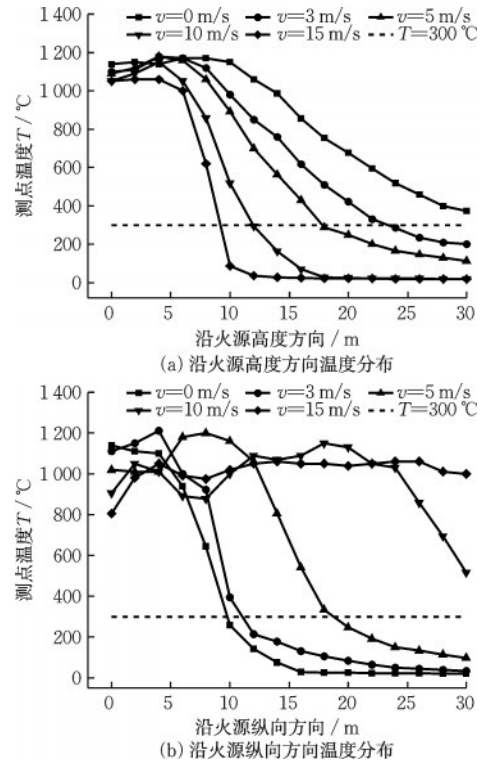


图6 不同风速影响下油罐车火灾温度影响范围

Fig.6 Temperature-affected ranges of tanker truck fires under different wind speeds

## 3 悬索桥桥面空间温度场分布特征

### 3.1 工程背景

以南京龙潭桥为工程背景,该桥是南京重要过江通道,桥面日常交通量大,发生车辆火灾概率较高。龙潭桥跨径布置为(615+1 560+552) m,为单跨悬吊钢箱梁悬索桥,总体布置如图7所示。加劲梁采用流线型扁平钢箱梁,如图8所示,标准梁段长度为15 m。主缆采用1 960 MPa平行高强钢丝制作,单根主缆长度为2 891 m,紧缆后主缆截面直径约为841 mm、截面空隙率约为17%,主缆截面尺寸

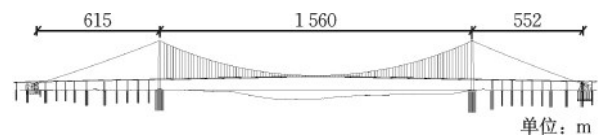


图7 龙潭桥总体布置

Fig.7 Overall layout of Longtan Bridge

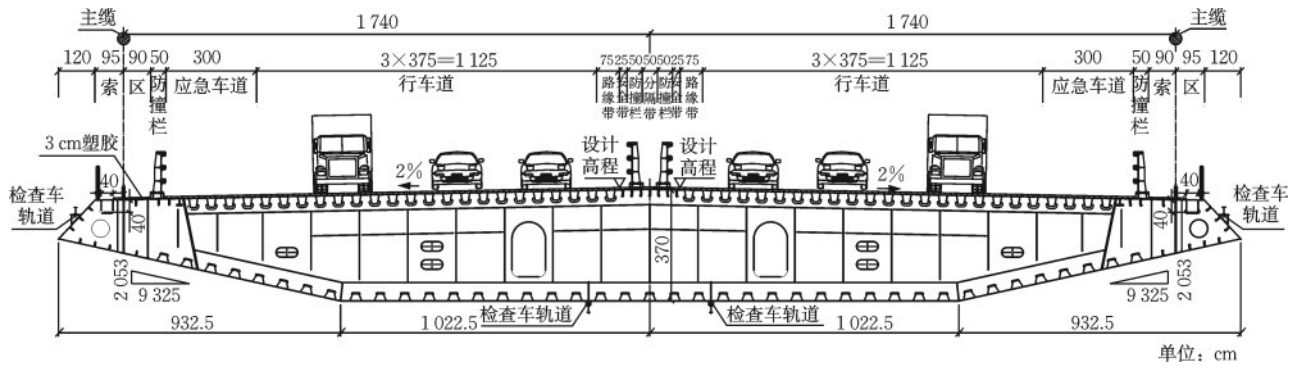


图8 加劲梁横断面

Fig.8 Cross-sectional view of stiffening beam

如图9(a)所示。吊索采用1 770 MPa平行高强钢丝制作,全桥吊索长度范围为3.7~178.5 m、直径为60 mm,表面采用10 mm的PE防腐层包裹,吊索截面尺寸如图9(b)所示。

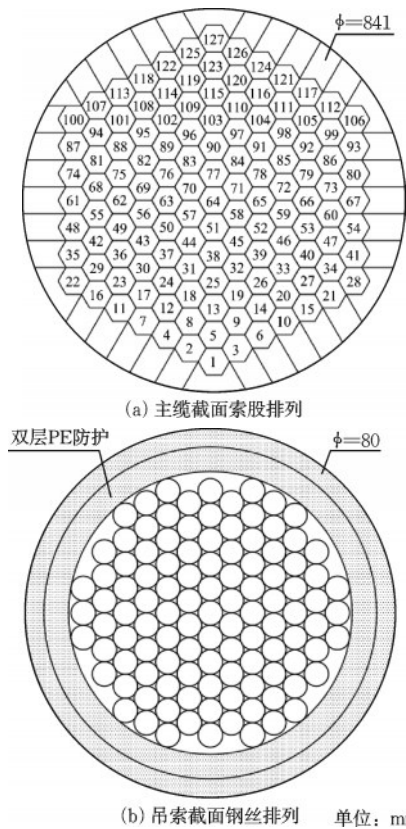


图9 主缆及吊索截面尺寸

Fig.9 Cross-sectional dimensions of main cable and suspender

### 3.2 跨中油罐车火灾场景及温度场分布特征

计算结果表明,油罐车火灾温度最高、影响范围最广,对桥梁结构威胁最大。因此,选择油罐车火灾作为龙潭桥火灾分析的火源模型。此外,悬索桥跨中主缆高度最低、吊索最短,距火源最近,受火

灾影响最大。因此,起火油罐车沿纵桥向布置在龙潭桥跨中位置,沿横桥向布置在应急车道上、距缆索体构件横向距离为2.9 m。以桥面中心为坐标原点,以X、Y及Z轴分别为横桥向、纵桥向及高度方向建立龙潭桥节段热分析CFD计算模型,计算模型边界尺寸取为40×50×15 m,如图10所示。

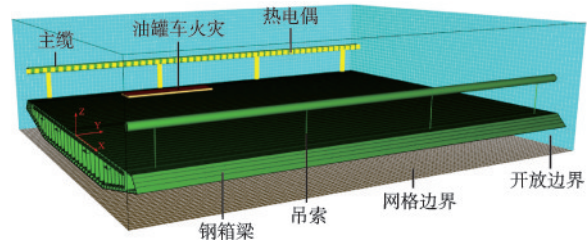


图10 龙潭桥节段热分析CFD计算模型

Fig.10 CFD model for thermal analysis of Longtan Bridge segments

模型网格尺寸经网格参数敏感性分析后取0.3 m能满足计算精度要求,模型共计1 032 750个单元。将 $X_{max}$ 、 $X_{min}$ 、 $Y_{max}$ 、 $Y_{min}$ 及 $Z_{max}$ 网格设置为开放边界(Open Boundary),以模拟桥面开放式燃烧环境。在主缆及吊索表面设置若干个热电偶,用于监测主缆及吊索构件表面环境的升温历程。油罐车燃烧参数按1.1节确定,主缆及吊索构件的主要材料为高强钢丝,钢丝的热传导系数及比热容按Eurocode 3规范确定,表达式分别如式(2)~(3)所示<sup>[18]</sup>。式中, $\lambda(T)$ 为钢丝的热传导系数, $C(T)$ 为钢丝的比热容, $T$ 为钢丝的温度。

CFD计算得到1 000 s时刻桥面空间及缆索体表面温度场分布云图,如图11~12所示。由图11可以看出,油罐车火灾下缆索体构件表面环境温度可达到1 000 °C,桥面温度相对较低、最高温度约为700 °C。此外,油罐车火灾沿横桥向的温度影响范围不超过30 m,即左幅应急车道上发生油罐车火灾

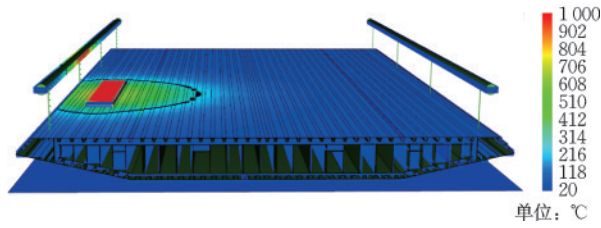


图 11 龙潭桥跨中桥面空间温度场分布云图

Fig.11 Contour maps of spatial temperature field distribution on mid-span bridge deck of Longtan Bridge

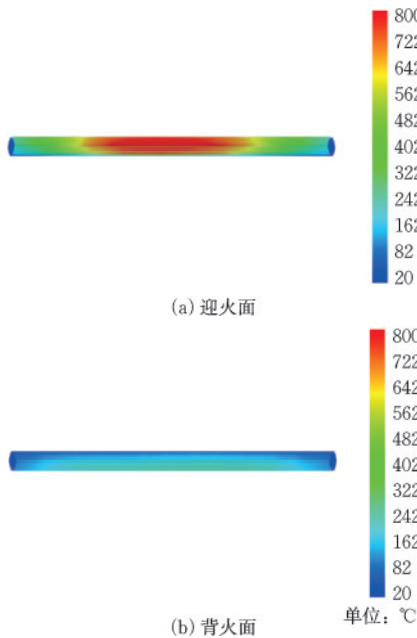


图 12 主缆表面温度云图

Fig.12 Contour maps of surface temperature of main cable

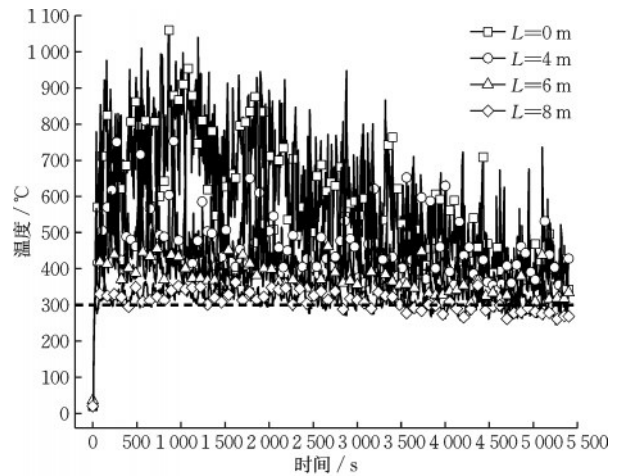
对右幅缆索体构件基本无影响。由图 12 可以看出,油罐车火灾下主缆构件由于直径大,故主缆迎火面与背火面具有显著温度差异。迎火面受火源对流及辐射作用影响,升温快、温度高,最高温度可达到 800 °C 以上。背火面受主缆遮挡作用,升温慢、温度低,最高温度不超过 300 °C。此外,主缆构件较长,油罐车火灾下主缆仅局部区域受火作用,吊索构件长度短,油罐车火灾下整根吊索构件均受火作用。

$$\lambda(T) = \begin{cases} 54 - 3.33 \times 10^{-2} T & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \\ 27.3 & T > 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

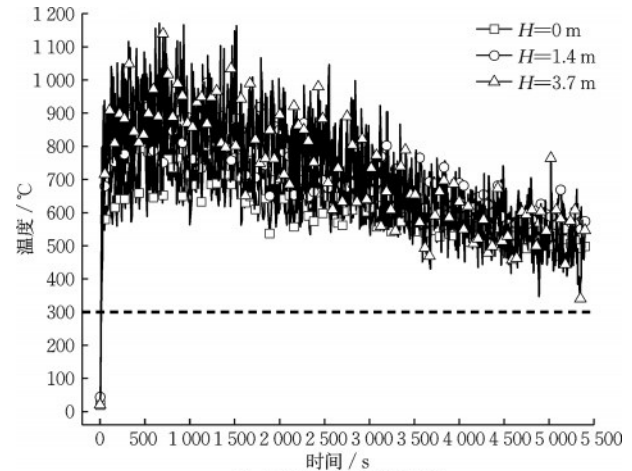
$$C(T) = \begin{cases} 2.22 \times 10^{-6} T^3 - 1.69 \times 10^{-3} T^2 + 0.773 T + 425 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \\ 13\,002 / (738 - T) + 666 & 600^\circ\text{C} < T \leq 735^\circ\text{C} \\ 17\,802 / (T - 731) + 545 & 735^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \\ 650 & 900^\circ\text{C} < T \leq 1\,200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

### 3.3 跨中缆索体构件表面环境升温历程

为明确油罐车火灾对缆索体构件的温度影响范围,计算得到纵桥向距火源中心 0、4、6 及 8 m 处的主缆表面环境升温历程,沿高度方向距火源中心 0、1.4、3.7 m 处的吊索表面环境升温历程,如图 13 所示。



(a) 主缆表面环境升温历程



(b) 吊索表面环境升温历程

图 13 主缆及吊索构件表面环境升温历程

Fig.13 Temperature rise processes of surface environment of main cable and suspender components

注:L表示纵桥向,H表示高度方向

由图 13 可以看出,油罐车火灾下主缆及吊索表面不同位置的环境升温规律基本一致,温度在 1 000 s 左右达到峰值,随后温度总体呈降低趋势。距火源中心 0、4、6、8 m 处的主缆表面环境最高温度分别为 1040、850、657、360 °C。距火源中心 0、1.4、3.7 m 处的吊索表面环境最高温度分别为 960、1 103、1 170 °C,即整根吊索表面环境最高温度均超过 950 °C,且 3.7 m 处的温度略高于 0 m 处的温度。

以 300 °C 作为缆索体构件的临界安全温度,则油罐车火灾对跨中主缆的温度影响范围为距火源中心 8 m 范围内,超出 8 m 范围的主缆不受油罐车火灾影响,对吊索的温度影响范围为 0~3.7 m 全长范围。

### 3.4 不同火源模型升温历程对比

桥梁结构抗火分析常用的火源模型有三种,即 ISO834、HC 及 ASTM E119 标准火灾升温曲线<sup>[19]</sup>。将通过 CFD 数值计算得到的油罐车火灾中心处及缆索体构件表面环境升温历程,与 ISO834、HC 及 ASTM E119 三种常用标准火灾的升温历程进行对比,如图 14 所示。

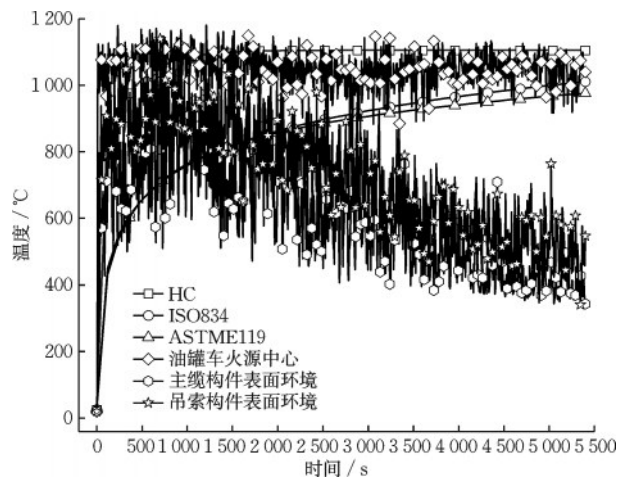


图 14 不同火源模型升温历程对比

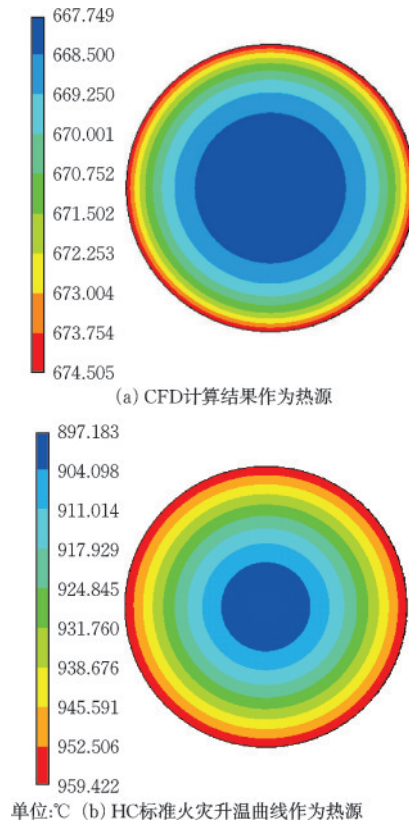
Fig.14 Comparison of temperature rise processes for different fire source models

由图 14 可以看出,油罐车火灾中心升温历程与 HC 标准火灾较为吻合,而 ISO834 及 ASTM E119 标准火灾的升温速率及最高温度均显著低于油罐车火灾中心及 HC 标准火灾。即 ISO834 及 ASTM E119 标准火灾升温曲线不能准确反映桥面油罐车火灾升温规律,不建议作为悬索桥抗火分析的火源模型。此外,基于 CFD 计算得到的主缆及吊索构件表面环境升温历程与 HC 标准火灾升温历程存在显著差异,其最高温度及升温速率显著低于 HC 标准火灾。

为进一步说明 HC 标准火灾升温曲线与 CFD 计算结果的差异,采用 ANSYS 软件建立龙潭桥吊索构件传热分析三维有限元模型,单元类型采用 SOILD70 热单元,对流换热系数取 25 W/m<sup>2</sup>·°C,热辐射率取 0.7<sup>[20]</sup>,热传导系数及比热容按(2)~(3)式确定,热源分别采用 HC 标准火灾升温曲线及图 13(b)

中  $H=3.7$  m 处的升温曲线。传热数值计算时间为 90 min,计算得到 30 min 时吊索截面温度场分布云图,如图 15 所示。

由图 15 可以看出,两种热源作用下吊索截面的最大温度差异为 285 °C,温度梯度差异为 62 °C,即 HC 标准火灾作用下吊索截面温度更高、温度分布梯度更大。因此,在进行悬索桥缆索体构件抗火分析时,采用 HC 标准火灾升温曲线作为火源模型偏保守。HC 标准火灾升温曲线无法反映缆索体构件距火源不同距离处承受的热源强度差异。



单位:°C (b) HC 标准火灾升温曲线作为热源

图 15 吊索截面温度场分布云图

Fig.15 Contour maps of temperature field distribution of suspender cross-section

## 4 结论

基于 FDS 软件分析了不同车辆燃烧特性及温度场分布,并明确了不同车辆火灾温度影响范围。在此基础上建立了桥面油罐车燃烧 CFD 计算模型,得到油罐车火灾下龙潭桥桥面空间温度场分布特征及缆索体构件表面环境升温历程。通过与桥梁抗火常用标准火源模型对比,阐明了标准火源模型的局限性,主要结论如下:

(1)小汽车、公交车、货车及油罐车火灾温度分别可达到550、990、1 110、1 190 °C,不同车辆火灾沿高度方向的温度影响范围分别为6、10、30、30 m,沿纵桥向的温度影响范围分别为4、10、17、20 m,沿横桥向的温度影响范围分别为4、8、14、20 m。纵桥向风速会影响车辆火灾的温度影响范围,导致沿高度方向的温度影响范围减小,而沿纵桥向的温度影响范围增大。

(2)油罐车火灾下龙潭桥桥面呈空间温度场分布,缆索体构件表面环境温度可达到1 000 °C以上,桥面温度相对较低,最高温度约为700 °C。沿主缆及吊索构件长度方向的温度呈梯度分布模式,油罐车火灾对跨中主缆的温度影响范围为距火源中心8 m范围内,对吊索的温度影响范围为0~3.7 m全长范围。

(3)ISO834及ASTME119标准火灾升温曲线与油罐车火灾升温模式存在显著差异。以HC标准火灾升温曲线及CFD计算结果作为热源进行吊索传热分析,则吊索截面的温度差异和温度梯度分别为285 °C及62 °C。因此,采用HC标准火灾升温曲线作为悬索桥缆索体构件抗火分析的火源模型偏保守,建议采用CFD计算结果作为火源模型。

## 参考文献:

- [1] Liu Z, Li G, Paya-Zaforteza I, et al. Fire hazards in bridges: state of the art, recent progress, and current research gaps[J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28(7): 03123003.
- [2] Kotsovinos P, Judge R, Walker G, et al. Fire performance of structural cables: current understanding, knowledge gaps, and proposed research agenda [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146 (8) : 03120002.
- [3] 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): 1-10.  
Zhang G, He S H, Hou W, et al. Review on fire resistance of prestressed-concrete bridge [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(6): 1-10. (in Chinese)
- [4] Chen W, Shen R. Study of temperature field inhomogeneities in parallel wire strand sections under ISO834 fire [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25 (10): 3940-3952.
- [5] 孙树华,杜咏,李国强. 基于空腔辐射效应的钢索截面温度场分析[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 56-64.  
Sun S H, Du Y, Li G Q. Effects of cavity radiation on the temperature distribution in steel cable sections [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 56-64. (in Chinese)
- [6] 王莹,卢志芳. 大跨径悬索桥吊索高温力学性能研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(4): 73-78.  
Wang Y, Lu Z F. Study of mechanical properties of slings of long span suspension bridges under high temperatures [J]. Bridge Construction, 2016, 46 (4) : 73-78. (in Chinese)
- [7] 王翠娟. 火灾模式下多梁式混凝土T型梁桥结构性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
Wang C J. Study on structure performance for multi-beam concrete T-shaped section beam girder subjected to fire [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [8] Du Y, Sun Y, Jiang J, et al. Effect of cavity radiation on transient temperature distribution in steel cables under ISO834 fire [J]. Fire Safety Journal, 2019, 104: 79-89.
- [9] Du Y, Zhu Y, Jiang J, et al. Transient temperature distribution in pre-tensioned anchors of cable-supported structures under ISO834 fire [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 138: 231-242.
- [10] Liu Z, Silva J, Huang Q, et al. Coupled CFD - FEM simulation methodology for fire-exposed bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26 (10) : 04021074.
- [11] 张岗,陆泽磊,袁卓亚,等. 油轮爆火环境悬索桥安全性能预测与预警方法研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(9): 17-33.  
Zhang G, Lu Z L, Yuan Z Y, et al. Research on safety performance prediction and warning methods of suspension bridges exposed to oil tanker explosion environments [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(9): 17-33. (in Chinese)
- [12] Cui C, Chen A, Ma R. Stability assessment of a suspension bridge considering the tanker fire nearby steel-pylon [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172: 106186.
- [13] 张岗,宋超杰,李徐阳,等. 碳氢火灾下钢-混组合梁破坏试验研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35 (6) : 135-146.  
Zhang G, Song C J, Li X Y, et al. Experimental study on failure of steel-concrete composite bridge girders under hydrocarbon fire exposure conditions [J]. China

