

DOI:10.11918/202302025

LNG油罐车火灾下的大跨径悬索桥结构热力响应

杨明¹, 郭晓月¹, 刘志², 黄侨¹, 宋恒宇¹, 畅卫杰³, 林阳子⁴

(1. 东南大学 交通学院, 南京 211189; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 浙江舟山跨海大桥有限公司, 浙江 舟山 316053; 4. 广州市开博桥梁工程有限公司, 广州 511449)

摘要: 国内某跨海悬索桥作为连接当地岛屿的交通要道, 桥面上易燃物质 LNG(液化天然气)的大量运输给该桥运营带来了不可忽视的安全隐患。针对该桥主桥跨中处如果发生两辆 LNG 油罐车追尾燃烧的小概率火灾事故, 基于国内已有的油池燃烧实验, 结合使用火灾动力学模拟软件 FDS 与有限元分析软件 ABAQUS 进行桥面油罐车火灾模拟与火灾下的全桥力学分析, 以预测 LNG 油罐车火灾对桥梁结构产生的影响, 为防范与应对桥面发生油罐车火灾的突发事件提供参考。仿真计算结果表明: 当桥上发生 LNG 油罐车火灾时, 局部主缆和部分吊索直接受火作用, 受火主缆失去部分结构性能, 受火吊索遭到破坏而失效; 高温区域的桥面铺装也遭高温破坏, 铺装下层的主梁钢结构所受温度影响相对较小; 火灾下桥梁挠度增加 0.234 m, 桥梁东西两幅受力不再均衡。通过对火灾中高温区域关键构件的防火研究, ABAQUS 的传热分析显示, 外包双层 5 mm 厚的隔热气凝胶保护层设计在火灾中可有效保护桥梁主要构件。

关键词: 桥梁火灾; 悬索桥杆系模型; LNG 油罐车火灾模型; 传热分析; 力学响应

中图分类号: U447 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)03-0034-12

Thermal and mechanical response of long-span suspension bridge structure in LNG tanker fire

YANG Ming¹, GUO Xiaoyue¹, LIU Zhi², HUANG Qiao¹, SONG Hengyu¹, CHANG Weijie³, LIN Yangzi⁴

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Zhejiang Zhoushan Sea-crossing Bridge Limited Company, Zhoushan 316053, Zhejiang, China;
4. Guangzhou Kaibo Bridge Engineering Limited Company, Guangzhou 511449, China)

Abstract: A domestic sea-crossing suspension bridge is a vital traffic artery connecting local islands. The massive transportation of flammable substances like LNG (liquefied natural gas) on the bridge poses a significant safety hazard to the operation of the bridge. This paper is based on existing oil pool combustion experiments in China, using the fire dynamics simulation software FDS and finite element analysis software ABAQUS to simulate LNG tanker fire and conduct the whole bridge mechanical analysis in the fire, in order to predict the structural impact of the LNG tanker fire and to provide reference for preventing and responding to emergencies of fuel tanker fire on the bridge. The simulation is aiming at a small probability fire accident of two LNG tankers rear-end burning in the middle of the main span of the bridge. The simulation results show that when an LNG tanker fire occurs on the bridge, the main cable and some slings are directly affected by the fire; the main cable loses part of the structural performance and two slings are damaged by heat and fail. In addition, the bridge deck pavement in high temperature area is also damaged by high temperature and the main beam steel structure under the pavement is relatively less affected by heat. The deflection of the bridge increases 0.234 m in the fire, and the forces on the east and west sides of the bridge are no longer balanced. According to the fire prevention research on key components in the high temperature area in the fire, the heat transfer analysis of ABAQUS shows that main components of the bridge can be effectively protected in the fire by the design of a double-layer 5 mm thick thermal insulation aerogel protective layer.

Keywords: bridge fire; frame model of suspension bridge; LNG tanker fire model; heat transfer analysis; mechanical response

收稿日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-04-05; 网络首发日期: 2025-01-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250116.1601.002>

作者简介: 杨明(1980—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 杨明, mingyang@seu.edu.cn

目前,国内外的结构抗火研究涉及的火灾类型广泛,包括房屋建筑火灾、公路隧道火灾以及逐渐兴起的桥梁火灾等类型。由于房屋建筑与公路隧道的空间相对封闭,发生火灾时,结构内部空间升温迅速,且封闭空间火灾会产生大量的有毒气体为营救工作造成极大威胁,因此,早期的建筑结构抗火研究主要针对的是房屋建筑火灾和公路隧道内火灾的研究^[1]。然而与建筑火灾、隧道火灾有所不同,桥梁火灾属于室外火灾,火灾发展形势、火源类型皆与房屋建筑火灾有着较大差异,桥梁上火灾的发生多数是由车辆事故产生,火灾带来的威胁主要在于对结构力学性能造成的破坏,严重的会造成社会经济的巨大损失。近年来,由于道路的快速发展和危险材料(易燃材料、自燃材料、危险材料等)运输的增加,桥梁火灾事故引发结构损毁的事件逐渐进入大众的视线,桥梁火灾也逐渐成为研究热点。目前针对火灾下桥梁结构响应与结构抗火设计的相关研究方兴未艾,研究方法^[2]主要包括两种:一是采用有限元方法,以标准升温曲线为温度边界进行结构响应分析;另一种是采用计算流体力学(CFD)方法进行火灾场景分析,再结合有限元方法,以所得的火灾温度场作为温度边界条件进行结构响应计算。两种研究方法都属于热-结构间接耦合的方法,此种方法不需要特殊的单元类型,比直接耦合的计算方式更为高效^[3],是目前多数学者对结构抗火研究的主要方法。

由于钢材耐火性差,火灾下桥梁结构响应分析的研究对象主要涉及了各类包含钢材组成的桥型,包括钢梁桥、钢-混组合梁桥、斜拉桥以及悬索桥等。文献[4]采用纤维模型法和有限元软件ABAQUS计算了火灾下钢-混组合梁的变形以及耐火极限,初步给出了钢混凝土梁的力学性能。文献[2]通过对比采用了规范规定的烃类火灾曲线与CFD计算的罐车火灾升温曲线研究了钢-混组合梁桥在油罐车火灾下的结构响应,并发现实际火灾较规范火灾下结构升温更快、温度更高的结论,且给出了钢-混组合梁桥的抗火措施和设计思路。文献[5]以某简支钢-混组合箱梁为研究对象,使用ANSYS有限元软件分析HC火灾下桥梁的截面温度分布特征,通过建立强度分取等效计算方法研究了桥梁构件的强度衰变过程,揭示了火灾下正截面抗弯承载力的衰变机理。针对斜拉桥的抗火研究主要研究对象是斜拉索构件。文献[6]分别采用ISO 834升温曲线与CFD软件计算的火场温度对斜拉索的安全性能进行分析,研究结果表面,桥面火灾对斜拉桥整体的安全性能影响有限,但会削弱桥梁的使用

功能。文献[7]对钢结构桥梁火灾行为进行研究,其中对斜拉桥拉索在火灾中致断后产生的结构响应进行了实验研究,获取了高强钢丝在不同应力水平和升温速率下高温致断瞬间的轴力卸载方程,研究了不同钢丝直径、升温速率、持荷水平和截面损伤程度对高温致断特性的影响。悬索桥抗火研究中,重点关注的是悬索桥主缆与吊索构件的火灾性能响应。文献[3]基于Ingason的平方增长模型,运用ANSYS有限元程序对吊索与主缆施加特定的表面温度与热流密度对构件的温度场进行数值模拟,以保证结构的安全性和稳定性为目标,确定了公路火灾下悬索桥吊索和0.4~1.0 m不同直径主缆的安全距离。文献[8]基于HC_{inc}升温曲线,计算了武汉鹦鹉洲长江大桥主跨跨中主缆与吊索的热学响应,并通过间接耦合的方法,使用ANSYS软件研究了吊索与主缆在火灾过程中的力学响应并研究了主缆与吊索构件的防护范围。

但是目前国内外对运输不同燃料的车辆火灾的研究相对较少,CFD方法中采用的油罐车火源模型较为单一,针对指定燃料类型的油罐车发生火灾后的悬索桥结构响应研究甚少,复杂火灾环境下钢结构桥梁截面的温度场分布是目前亟待解决的问题之一^[9]。基于此,本文采用CFD与有限元结合的热-结构间接耦合的研究手段,以国内某跨海悬索大桥上通行的LNG油罐车发生最不利火灾的情形为研究场景,对大跨径悬索桥发生特定火灾情况进行结构响应分析。

1 油池燃烧火灾模型

1.1 油池燃烧理论

Babrauskas^[10]根据能量守恒公式以及火灾试验给出了估算大型池火稳定燃烧时的燃烧速率的相应经验公式:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D})$$

式中: \dot{m}'' 为表示燃料的质量燃烧速率,kg/(m²·s); \dot{m}''_{∞} 为燃料的最大质量燃烧速率,kg/(m²·s); k 为火焰的吸收衰减系数,m⁻¹; β 为平均光线长度校正系数; D 为油池直径,m; A 为油池面积,m²。

在实际情况中,油罐车在开放空间起火所形成的燃烧油池,其燃料会随燃烧过程不断减少,池火燃烧时的总热释放率也会随之变化。瑞典学者Ingason^[11]通过对于所有大型车辆火灾试验系列中测得的燃烧热释放率和气体温度变化的信息,提出了燃料控制的指数增长型热释放率随时间 t (s)的

变化公式:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t} (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1}$$

式中: \dot{Q}_{\max} 为池火燃烧时的总热释放率; r 为振幅系数,

$$r = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n}; k \text{ 为时间宽度系数, } k = \frac{\dot{Q}_{\max}}{E_{\text{tot}}} \cdot r; n \text{ 为延迟}$$

系数, n 对火灾初始阶段燃烧热释放率曲线的斜率影响显著, n 值越低,初始阶段的热释放率增速越快。

1.2 LNG 油罐车火灾燃烧模型与计算方法

液化天然气 LNG (liquefied natural gas) 主要成分为甲烷。LNG 储罐发生破裂时,在不同的条件下

会出现喷射火、闪火、蒸气云爆炸等多种情况^[12]。本文讨论 LNG 在泄漏情况中持续燃烧的情况。采用热释放率曲线,建立 LNG 油罐车火灾的瞬态温度场模型。

根据 3.1 节的油池燃烧理论,并结合图 1 所示的 50 m³ LNG 油罐车尺寸(12 m × 2.5 m × 2.25 m),通过计算 LNG 油罐车的参数 E_{tot} 、 \dot{Q}_{\max} ,确定燃料控制的火灾热释放率曲线。LNG 油罐车火灾模型的参数中, n 取 1.1^[11],其余参数计算值如下: \dot{Q}_{\max} 为 120 MW, E_{tot} 为 1 013 GJ, k 为 $0.130 4 \times 10^{-3}$, r 为 1.271。

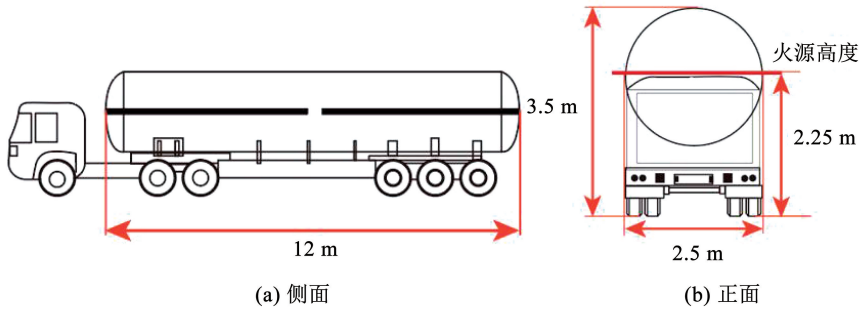


图 1 50 m³ 油罐车尺寸与火源高度示意

Fig. 1 50 m³ fuel tanker size and fire source height

计算得到的 LNG 油罐车燃料控制的指数增长型热释放率曲线如图 2 所示。LNG 油罐车火灾在 12 min 内迅速达到燃烧热释放率峰值,随后热释放率持续降低,符合实际燃烧过程。

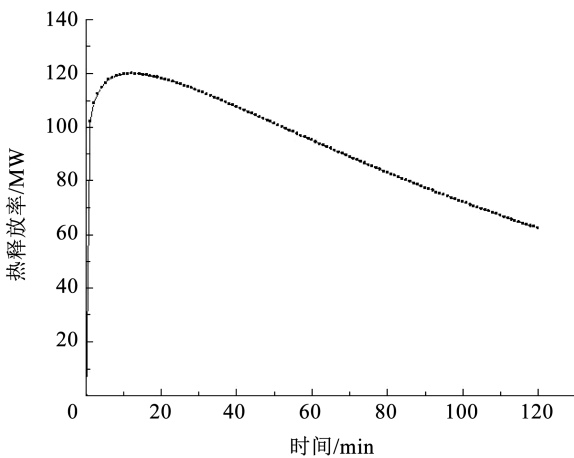


图 2 LNG 油罐车燃料控制的指数增长型热释放率曲线

Fig. 2 Exponential growth type heat release rate curve for fuel control of LNG tanker burning

1.3 油池火灾模型有效性验证

使用 FDS 软件应用 3.2 节的油池火灾模型对国内已有实验^[13]进行仿真计算,以验证模型有效性。

1.3.1 实验概况

为了论证桥梁缆索在油池火灾下的安全性能影

响,国内相关研究单位展开了室外油池燃烧缩尺实验,实验燃烧油池尺寸采用 1 m × 3 m,缩尺比例为 0.25。油池、缆索与测点等现场布置如图 3 所示。

1.3.2 实验的仿真结果对比

采用 FDS 火灾模拟软件对实验工况进行模拟,实验中的风向以东北、东北偏北风为主,两者的频率百分数和在 90% 以上,风速主要集中在 3 ~ 8 m/s 之间,其频率百分数和在 90% 以上^[13]。模型区域空间为 7.4 m × 6.2 m × 11 m,火源与缆索构件按照实验设计参数搭建仿真模型,如图 4 所示。将计算结果与实测结果进行对比,验证仿真计算方法的可行性。FDS 是专为火灾模拟开发的计算流体动力学软件,它将固体的导热简化为径向一维导热,即温度场仅在一个坐标方向上变化,其方程^[14]为

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \dot{q}''_s$$

固体表面的边界条件^[14]为

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(0, t) = \dot{q}''_c + \dot{q}''_r$$

式中: ρ_s 为受热固体的密度, c_s 为受热固体的比热容, k_s 为受热固体的导热系数,源项 \dot{q}''_s 包括化学反应生成的热量及吸收外界的热辐射, \dot{q}''_c 为对流热通量, \dot{q}''_r 为辐射热通量。

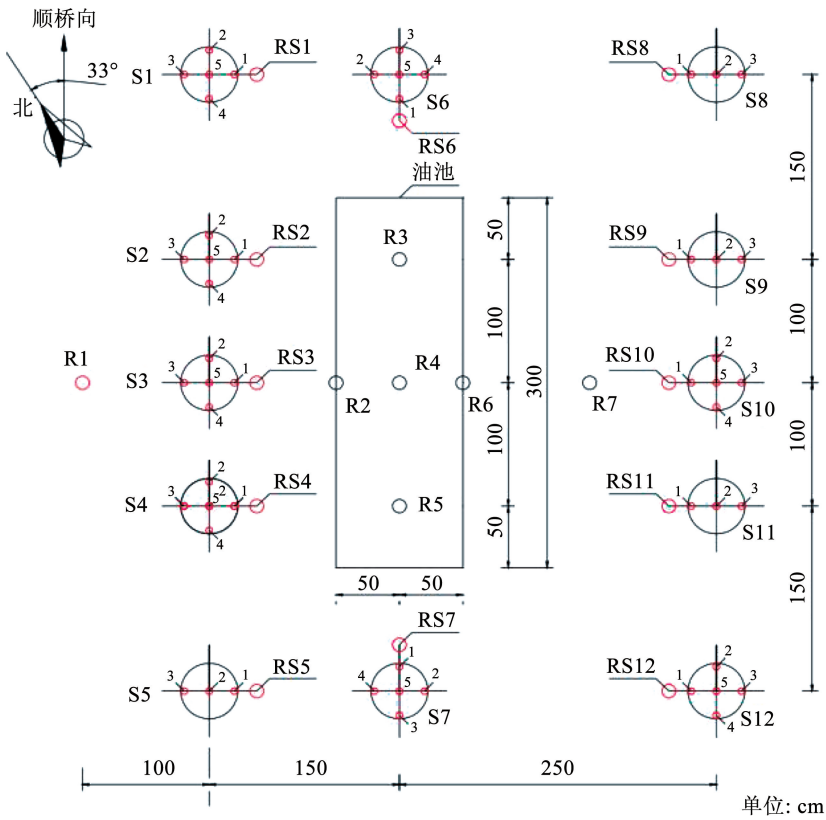


图3 实验现场平面布置图

Fig.3 Layout plan of experiment site

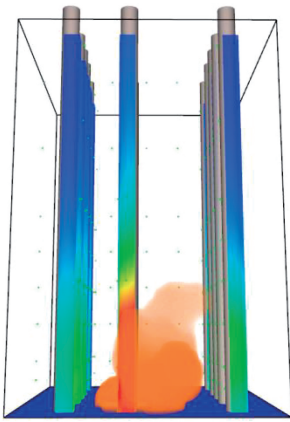


图4 FDS 仿真模型

Fig.4 FDS simulation model

对比受高温影响最大的7号缆索在油池燃烧1 h的不同高度位置(1 m、3 m、5 m)的表面实验温度与数值模拟温度,图5中 exp-1m、exp-3m、exp-5m 分别表示实验中对缆索1 m、3 m、5 m 高度位置的表面监测的温度值,SOLID 曲线为仿真计算结果。总体上,仿真计算的温度发展水平与实测水平接近。实际中的固体表面实测温度总体波动较大,实验中吊索1 m 位置固体表面温度在10 ~ 25 min 时温度上升较仿真结果更为迅速,分析主要原因为实验中风速和风向的测定结果为离散数据,无法完全还原实际情况中的连续变化,而风速和风向对区域短时

间的温度影响较为明显,会使得仿真结果与实际结果产生偏差。经过时长1 h 的油池燃烧,仿真与实测的固体表面温度皆达到400 ~ 450 °C 的温度水平,且温度的浮动规律接近。缆索3 m 位置处实际温度的波动大于仿真计算的温度波动,但是温度上升整体规律一致,最终保持在100 °C 的温度水平。缆索5 m 位置受火灾高温影响较小,温度上升不明显,1 h 仅上升至30 °C 的温度水平,仿真温度与实际温度相符合。根据以上对比,FDS 仿真可以较为准确地模拟火灾条件下研究对象的升温特性。

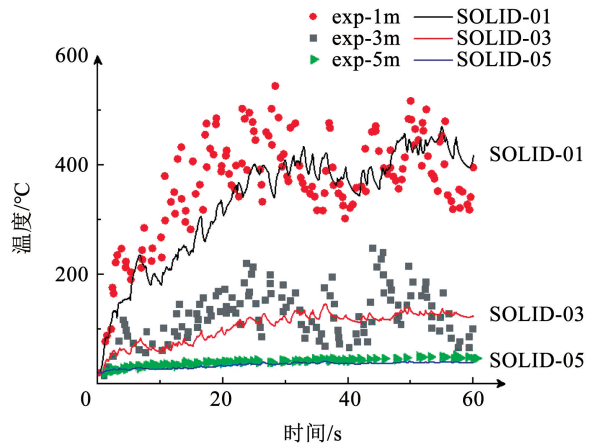


图5 S7 吊索垂直高度1 m、3 m、5 m 表面温度实测与仿真结果

Fig.5 1 m, 3 m, 5 m vertical height of S7 sling measured and simulated results

2 工程概况

2.1 桥梁结构

某跨海大桥桥型为特大跨径悬索桥,桥梁跨度布置为 578 m + 1 650 m + 485 m,矢跨比为 1/10。北跨、中跨、南跨的主缆钢丝均采用公称直径为 5.25 mm、公称抗拉强度为 1 770 MPa 的高强镀锌钢丝。吊索采用镀锌钢芯钢丝绳,吊索分为两类,一类

是受力较大和变形有特殊要求的北塔处长吊索和边跨短吊索,另一类为其余的一般吊索,公称抗拉强度分别为 1 770、1 860、1 960 MPa,钢丝宏观弹性模量不小于 1.10×10^5 MPa。

主梁采用双幅钢箱梁设计,主梁两幅之间采用箱型横梁与工字梁交替连接,主梁典型截面如图 6 所示。桥面铺装采用厚度为 5.5 cm 的环氧沥青材料铺成。

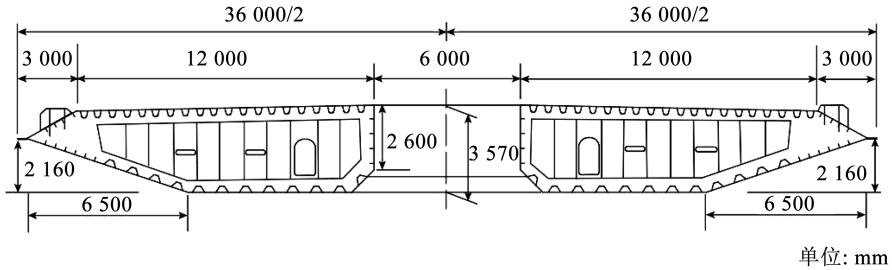


图 6 加劲箱梁标准横断面图 (mm)

Fig. 6 Standard cross section of stiffened box girder (mm)

2.2 桥梁环境

桥梁所处地区年平均气温为 16.7 °C,年平均相对湿度为 78.5%,大气压全年较稳定,为 101.98 kPa。该大桥现场监测数据显示主梁桥面的环境风速常年平均风速为 4.3 m/s。

2.3 LNG 运输情况

根据《液化天然气接收站能力核定方法》(SY/T 7434—2018)^[15],经测算当地 LNG 项目当前生产能力可达到 417 万吨/年,以后生产能力可达到 800 万吨/年,预计每年有 378 万吨液化天然气需通过此桥进行运输。本文针对该大桥实际通行特点,开展 LNG 油罐车起火的桥梁火灾分析。

缆内力、结构振动频率等与实测值、设计值的偏差见表 1~3。

表 1 成桥模型结构线形检验

Tab. 1 Inspection of the structural alignment of the bridge model

结构线形	有限元模型 计算值/m	实测值/m	有限元计算值与
			实测值的 相对偏差
初始力与恒载作用下主 梁跨中点高程	-67.057	-67.438	1/5 847(高差与 主梁跨度比值)
活载引起的主梁跨中位移	-2.540	-2.648	4.0%

表 2 成桥模型关键构件的内力检验

Tab. 2 Inspection of the internal forces of key components of the bridge model

内力	有限元模型 计算值/kN	实测值/ kN	有限元计算值	有限元计算
			与实测值的 相对偏差/%	值与设计值 的偏差/%
吊索内力	—	—	—	2.12 (标准差)
主缆南端内力	287 420	289 450	-0.70	1.7
主缆北端内力	263 290	266 700	-1.28	2.5

表 3 成桥模型结构振动频率检验

Tab. 3 Inspection of the structural vibration frequency of the bridge model

结构振动 频率	有限元模型 计算值/Hz	实测值/Hz	有限元计算值与实测值 的相对偏差/%
1 阶	0.059	0.054	8.5
2 阶	0.097	0.095	2.1

3 计算理论与全桥有限元模型

3.1 ABAQUS 全桥模型建立

本文采用有限元软件 ABAQUS 建立全桥杆系模型^[16],主缆、吊索采用 3 维 2 节点桁架单元 (T3D2),主梁采用 3 维 3 节点 2 次梁单元 (B32),主塔采用 3 维 3 节点 1 次梁单元 (B31),全桥模型共有 1 936 个单元。模型的约束条件分为外部约束和内部约束。外部约束为主塔塔底与大地的固结、主缆端锚位置与大地的固结约束和主梁北端的外部支座约束;内部约束主要为主梁与吊索的连接、主塔塔顶与主缆的连接以及加劲梁和南塔横梁的连接约束。

3.2 模型检验

通过将全桥模型的结构线形、吊索及主缆内力、结构振动频率与设计值和成桥试验实测结果值进行比较,以验证模型的准确性。结构线形、吊索以及主

其中吊索数量较多,内力数据篇幅较大,此处列出所有吊索内力与图纸设计值偏差的标准差。模型的吊索内力、主缆内力、结构频率与设计值或实测结果吻合较好,故可将此成桥有限元模型作为全桥力学分析的基本模型^[17]。

4 主跨跨中 LNG 油罐车燃烧对桥梁结构的影响

4.1 桥梁火灾工况

该大桥为悬索桥,主缆是其主要承重构件。悬索桥主跨跨中位置主缆与桥面的相对高差最小,易

受到油罐车火灾的高温影响。根据车道布置和油罐车通行方案^[18],考虑火灾发生的不利场景:运输车队行驶时,某一辆油罐车突发火灾后,后一辆油罐车发生追尾导致产生同样的火灾,两辆油罐车停至车道最外侧(紧靠护栏位置停车),其余的油罐车发现火情,紧急疏散^[19]。此时火灾为两辆 LNG 于桥上发生油罐车起火,在桥上形成油池火灾,油罐车位于跨中主缆最低位置,横桥向距离主缆 1.7 m,如图 7 所示。火灾环境为桥面开放空间,环境风的风速为 4.3 m/s,风向为横桥向吹向主缆,火灾持续燃烧时间设为 1.5 h。

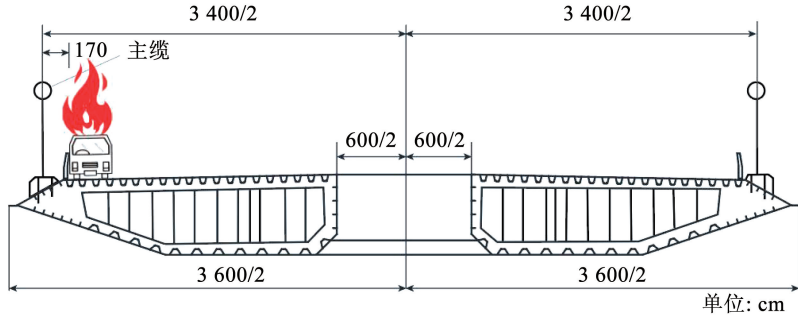


图7 LNG 油罐车火灾工况说明图

Fig. 7 Description of LNG tanker fire conditions

本文使用 FDS 建立上述火灾场景模型,如图 8 所示。模型定义为开放空间,油罐车简化为六面体结构,油池燃烧面积为两辆油罐车区域面积,尺寸为 $2 \times (12 \text{ m} \times 2.5 \text{ m})$,根据油罐车油罐的中心高度设置燃烧面的高度,距离桥面 2.25 m,如图 1(b) 所示。火灾燃烧方式以 3.2 节中所计算的热释放率曲线进行定义,设置燃烧时长为 1.5 h,运行计算得到火灾区域内桥梁受高温影响的主缆、吊索以及桥面铺装等构件的瞬态温度结果。

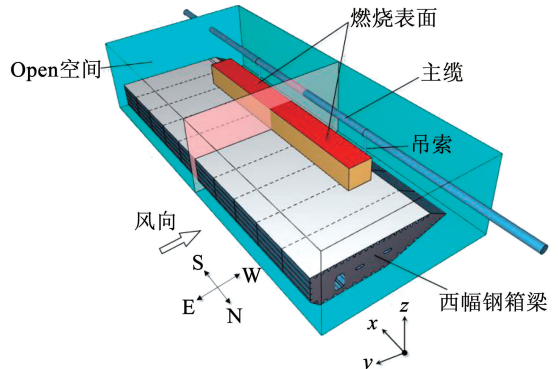


图8 LNG 桥上油罐车火灾 FDS 基本模型示意

Fig. 8 FDS basic model diagram of LNG tanker fire on the bridge

4.2 模型温度分布与各主要构件性能影响

全桥结构力学响应主要计算主梁跨中位移、吊索与主缆内力水平的变化。对于跨中桥面车辆起火的工况,同时关注桥面铺装与主梁上层钢梁的温度分布。

4.2.1 主缆温度分布与性能退化

根据计算域内空气温度场的分布规律,在火灾影响下温度显著升高的主缆节段长度为 26 ~ 28 m,图 9 给出了 FDS 软件中计算的受火主缆区域高温分布(桥面俯视图)。

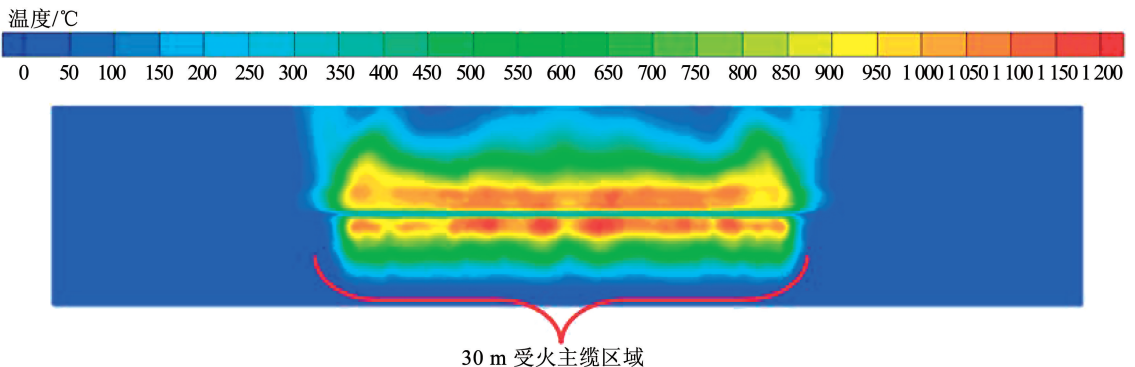


图9 受火主缆区域高温分布(桥面俯视图)

Fig. 9 High temperature distribution of main cable part burnt by fire (top view)

结合火源布设位置和有限元模型中缆索体系的建模方式,跨中受火主缆段涉及 3 个主缆单元,同时结合在结构分析时按照结构最小单元划分影响区域与安全冗余角度考虑,划定受火影响的主缆长度为 54 m,受火区域内构件范围如图 10 所示。

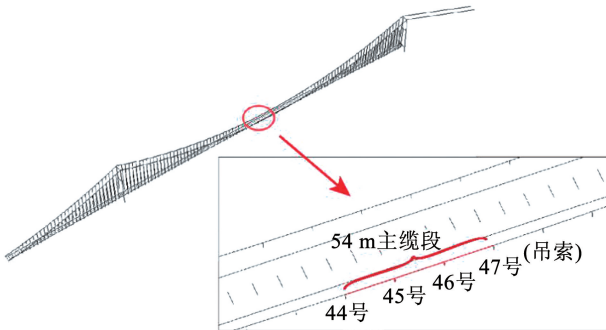


图 10 受火范围内的部分主缆和吊索构件

Fig. 10 Part of main cable and slings in the fire compact scope

采用 ABAQUS 软件建立主缆的二维传热模型。如图 11 所示,将主缆温度边界划分为 dev_1 ~ 4 四个区域以更为精确地计算火灾中主缆表面不同位置的温度变化,再将这 4 条升温曲线转换为温度边界定义在主缆传热模型中(图 12),对受火处主缆截面进行热传分析,经过 1.5 h 的升温过程后主缆温度分布云图如图 13 所示。

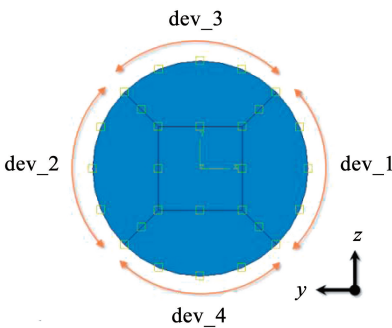


图 11 有限元主缆模型固体温度边界划分示意

Fig. 11 Schematic diagram of solid temperature boundary division of finite element model

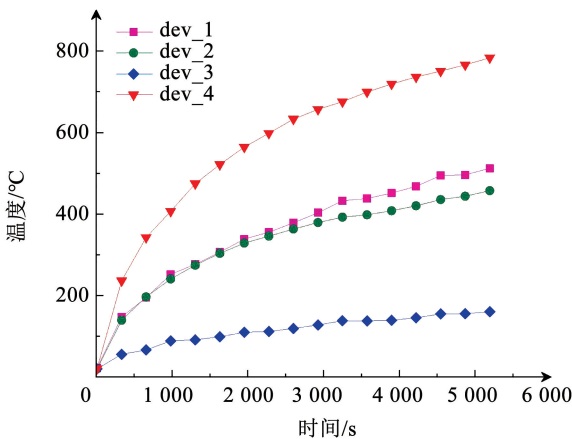


图 12 火源中心段主缆边界瞬态温度曲线

Fig. 12 Transient temperature curve of main cable boundary at the center of fire source

为了较为安全地反映受火主缆的性能变化,取位于火源中心处的主缆截面的加权平均温度为截面刚度折减参数,采用欧洲规范 BS EN 1993-1-2 中钢材的高温下物理性能数据^[20],经计算跨中处主缆在油罐车火灾下弹性模量下降至原模量的 0.53。

4.2.2 吊索温度分布与吊索性能退化

将 FDS 中计算的吊索区域瞬态温度变化结果作为有限元中的温度边界,通过 ABAQUS 对受火处吊索截面进行热传分析,主要受火区域内的 45 号、46 号吊索温度分布如图 14 所示。火灾过程中,吊索钢材温度上升至 1 160 °C,即其模量降低至原模量的 0.02,此温度下的吊索在火灾中基本失去承载能力。

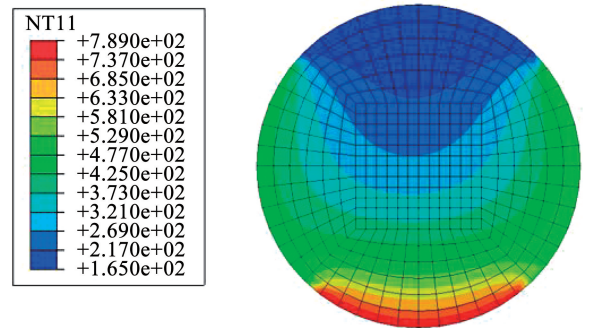


图 13 火源中心段主缆截面温度分布云图(°C)

Fig. 13 Temperature distribution nephogram of main cable section in the center section of fire source (°C)

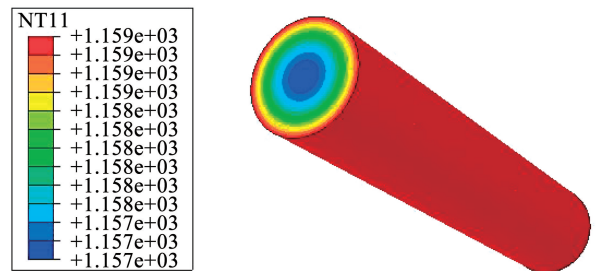


图 14 受火吊索温度分布云图(°C)

Fig. 14 Temperature distribution nephogram of the sling in the fire (°C)

4.2.3 桥面铺装温度分布

1) 钢桥面铺装温度。根据 LNG 油罐车 1.5 h 火灾的计算,桥面火灾对附近主梁上的铺装温度影响范围为发生火灾的该幅桥面,对另外一幅桥面的温度影响可忽略不计。在发生桥面火灾的路面上,最高路面温度围绕火源区域达到 690 ~ 720 °C,再向周围逐渐递减。按照施工要求,在环氧沥青的铺设过程中,沥青整体保持温度在 123 °C 附近,200 °C 时环氧沥青的稳定性降低到 60 °C 的 1/3。取 120 °C 为环氧沥青的毁坏温度,桥面的高温影响范围约为纵桥向 32 m,横桥向为一幅桥宽的区域,如图 15 所

示。因此,受火灾高温影响范围内的桥面铺装均应考虑刨去桥面面层,重新进行桥面铺装^[21]。

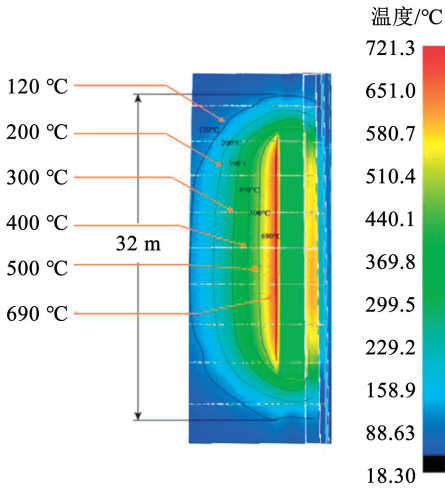


图 15 FDS 中火灾下铺装表面温度分布云图

Fig. 15 Nephogram of pavement surface temperature distribution in the fire in FDS

2) 钢梁温度。提取 FDS 中桥面铺装下的钢梁温度如图 16 所示,在油池周围的主梁经过 1.5 h 的高温燃烧,温度上升至 230 °C,因此当桥面发生油池火灾时,根据欧洲规范^[20],该区域主梁模量将降低至原模量的 0.93。与受火区域的主缆、吊索以及桥面铺装相比,桥面火灾对下部钢梁温度影响整体较低,不至引起钢箱梁的顶板破损。

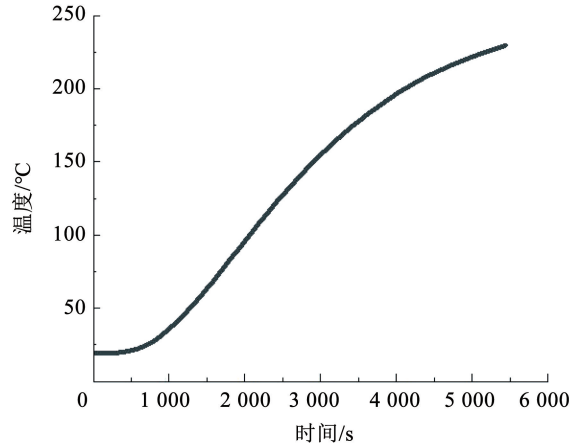


图 16 靠近油池的高温区域主梁钢材温度随时间的变化曲线
Fig. 16 Change curve of main beam steel temperature with time in high temperature area near oil pool

4.3 全桥静力计算与力学响应

全桥结构力学响应主要关注主梁跨中位移、吊索与主缆内力水平的改变。

4.3.1 主梁跨中位移

主梁竖向位移如图 17、18 所示。由活载引起的主梁变形增量为 2.540 m,由火灾引起的西幅主梁变形增量为 0.234 m,出现这一变形增量的梁段范围约为 468 m(26 m × 18)。与未直接受火影响的东幅主梁相比,西幅主梁约有 1 116 m(62 m × 18)梁段的竖向变形明显大于同位置东幅主梁梁段的竖向变形,最大竖向变形差约为 0.2 m。此范围以外,两幅主梁的竖向位移基本一致。

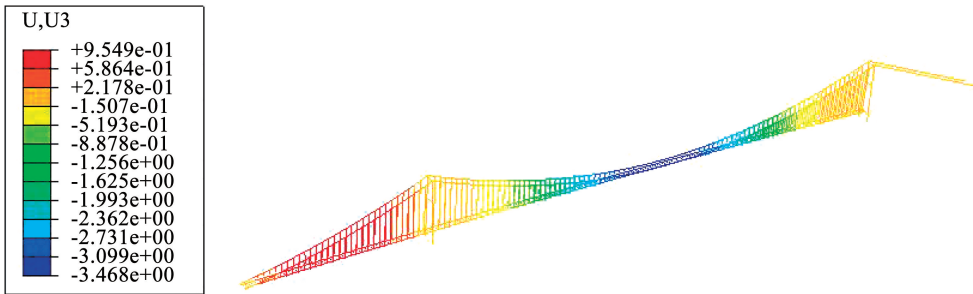


图 17 恒载与活载作用下主梁竖向位移 (m)

Fig. 17 Vertical displacement of the main beam under both dead load and live load (m)

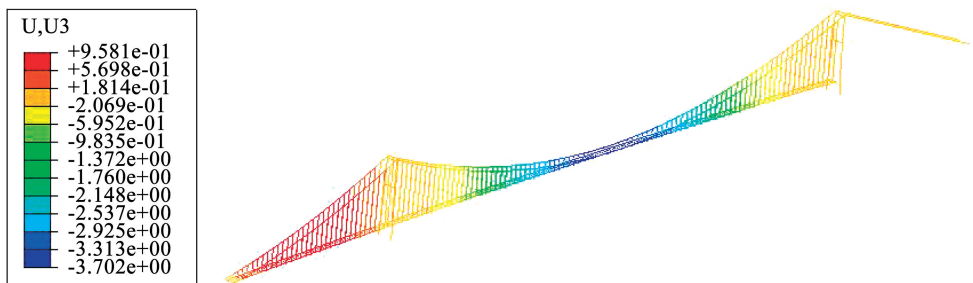


图 18 火灾作用下主梁竖向位移 (m)

Fig. 18 Vertical displacement of the main beam in the fire (m)

在活载作用与火灾影响下主梁的最大竖向位移为 -2.774 m, 小于《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[22]规定的限值 $\frac{l}{250} = \frac{1\ 650}{250} = 6.6\text{ m}$, 故主梁的变形验算满足规范要求。

4.3.2 受火后主缆应力分布

主缆跨中受火时因其局部刚度发生变化其内力

会发生重分布。图 19 为成桥运营时恒载与活载作用下主缆应力分布, 图 20 为火灾作用下主缆应力分布, 当跨中主缆受火后, 受火主缆丧失小部分承载力, 从 604.3 MPa 降低至 602.1 MPa, 减幅为 0.4%。主缆为悬索桥最为重要的受力构件, 火灾对全桥主缆内力影响不显著。

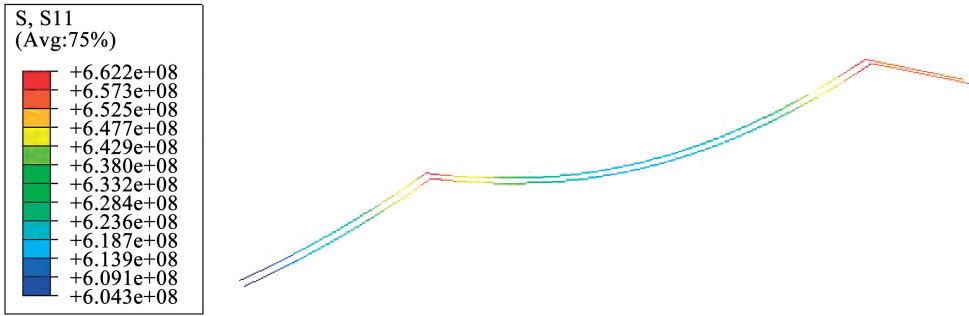


图 19 恒载与活载作用下主缆应力分布 (Pa)

Fig. 19 Stress distribution of the main cable under dead load and live load (Pa)

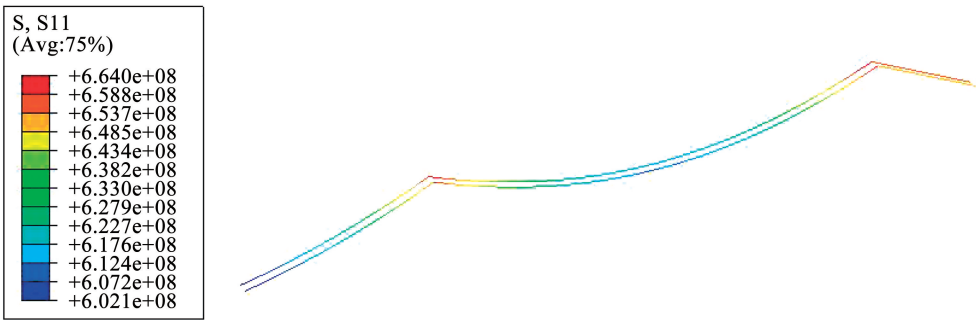


图 20 火灾作用下主缆应力分布 (Pa)

Fig. 20 Stress distribution of the main cable in the fire (Pa)

4.3.3 受火后吊索应力分布

全桥在正常运营时与受火灾作用时的吊索应力分布如图 21 和图 22 所示。受火灾高温影响, 跨中最短的两处吊索已经完全失效, 同时, 同侧相邻两根吊索内力大幅度提升, 44 号吊索应力由原 262.1 MPa

提升至 564.8 MPa, 提升了 115.5%, 47 号吊索应力由原 267.0 MPa 提升至 568.9 MPa, 提升了 113.1%。因此, 桥面发生火灾时, 失效吊索邻近的吊索受力大幅度增加。

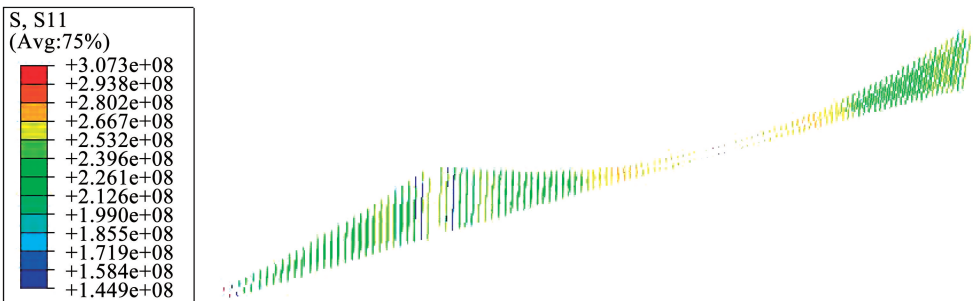


图 21 恒载与活载作用下吊索应力分布 (m)

Fig. 21 Stress distribution of the slings under dead load and live load (m)

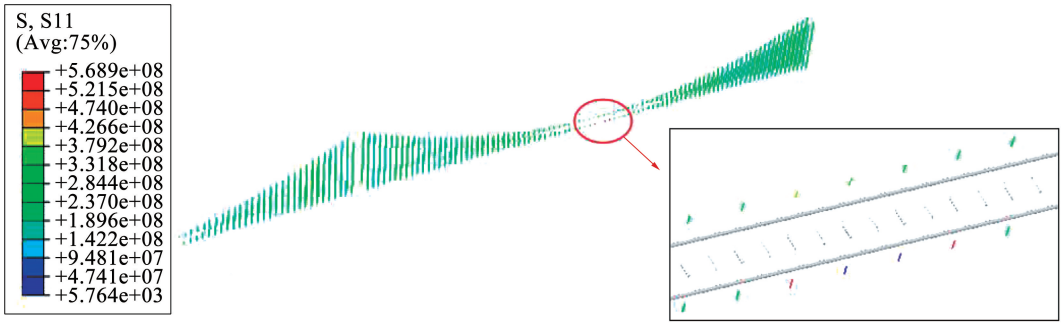


图 22 火灾作用下吊索应力分布 (Pa)

Fig. 22 Stress distribution of the slings in the fire (Pa)

4.3.4 主缆与吊索强度验算

根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05—2015)与《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中的规定,悬索桥主缆钢丝的抗拉强度分项系数为 1.85, 骑跨式吊索抗拉强度分项系数为 2.95^[22-23], 工程应用中大跨径悬索桥主缆钢丝的安全系数不低于 2.3^[24]。根据主缆内力验算, 如表 4 所示, 发生火灾后全桥主缆受力验算符合工程安全要求。吊索的安全系数如图 23、24 所示, 除 45、46 号吊索破断之外, 44、47 号危险吊索的安全系数已不满足规范要求, 在制定桥梁防火方案中需要引起重视。安全系数低于规范值的吊索列于表 5。

表 4 受火后主缆验算结果

Tab. 4 Checking results of main cable after fire

项目	主缆内力/kN	破断力/kN	安全系数
西幅主缆(北)	289 654.4	851 547	2.67
西幅主缆(南)	306 086.8	832 077	2.47
东幅主缆(北)	291 314.2	851 547	2.66
东幅主缆(南)	308 234.7	832 077	2.45

表 5 受火后不满足规范要求的吊索

Tab. 5 Slings that dissatisfy the standard requirements in the fire

设计编号	索力/kN	破断力/kN	安全系数
45		9 600	
46		9 600	
47	4 129.9	9 600	2.11
44	4 100.3	9 600	2.13

4.4 外包防火材料设计

对受火影响较大范围的主缆和吊索采用包装防火材料的措施, 以降低油罐车火灾对桥梁结构中重要构件的影响。采用增强复合气凝胶防火材料, 对主缆和吊索的外包设计增设两层 5 mm 的增强复合气凝胶绝热层, 再次计算火灾中构件温度变化。气凝胶绝热层的相关物理参数: 厚度为 (5 ± 1) mm, 密度 300 g/m³, 25 °C 时导热系数为 0.023 W/(m·K), 540 °C 时导热系数为 0.080 W/(m·K), 700 °C 时导热系数为 0.136 W/(m·K), 1 000 °C 时导热系数为 0.218 W/(m·K), 比热容为 1.050 J/(g·K)。

采用 ABAQUS 计算主缆和吊索外包双层 5 mm (共 1 cm 厚) 的复合气凝胶绝热层后火灾中温度分布, 依照前文工况设置模型温度边界, 持续升温 1.5 h。通过图 25 和图 26 的温度云图看出, 内部主缆自身温度在包裹防护材料后显著降低, 主缆部分的温度最高仅为 52 °C, 未达到刚度发生明显变化的最低温度(200 °C)。通过图 27 和图 28 可以看出, 吊索内部钢丝温度处于 450 ~ 460 °C 之间, 高温区域主要集中在外保护层, 绝热层对内部的吊索材料起到了有效的隔热作用。因此防火材料可以在火灾中有效地保护悬索桥的主缆和吊索。

绘制火灾中吊索内部钢丝的升温曲线, 如图 29 所示。经过 1.5 h 火灾影响, 吊索最终温度未超过 460 °C, 依据欧洲规范 BS EN 1993-1-2 中对钢材高温下弹性模量的规定, 外包防火材料的吊索的弹性模量降低至原模量的 0.65, 而根据 4.2.2 节中的内容, 未做防火措施的受火吊索将在火灾中失效, 因此, 外包两层复合气凝胶隔热层可有效降低火灾对吊索的温度影响, 使得内部钢丝在火灾中保留一半以上的力学性能。

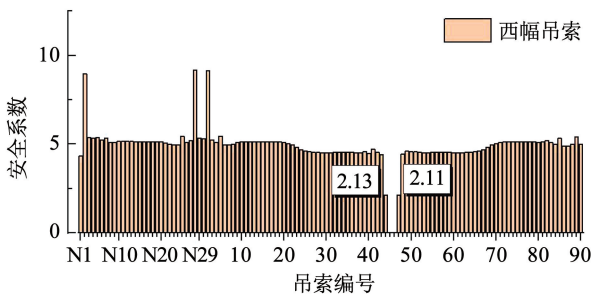


图 23 西幅吊索安全系数

Fig. 23 Safety factor of west slings

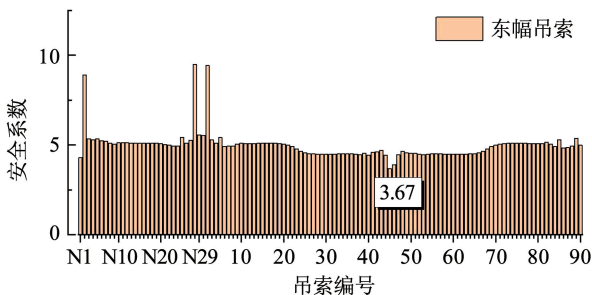


图 24 东幅吊索安全系数

Fig. 24 Safety factor of east slings

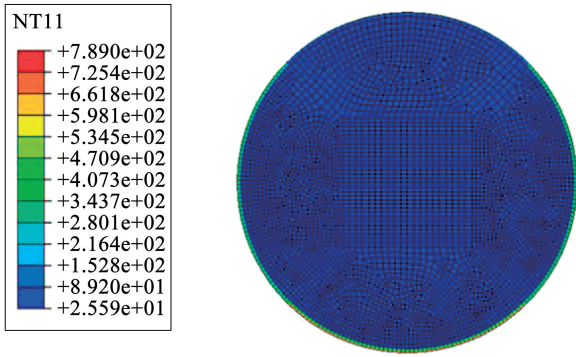


图 25 火灾下外包隔热材料的主缆温度云图(°C)

Fig. 25 Temperature nephogram of the cable wrapped with thermal insulation material in the fire(°C)

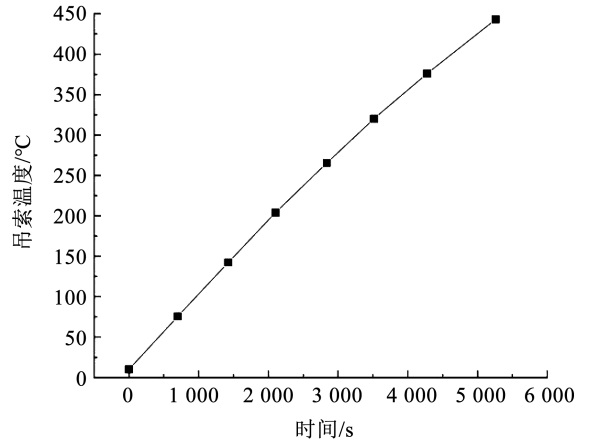


图 29 外包防护材料的吊索在高温下的升温曲线

Fig. 29 Temperature rise curve of sling wrapped with thermal insulation material under high temperature

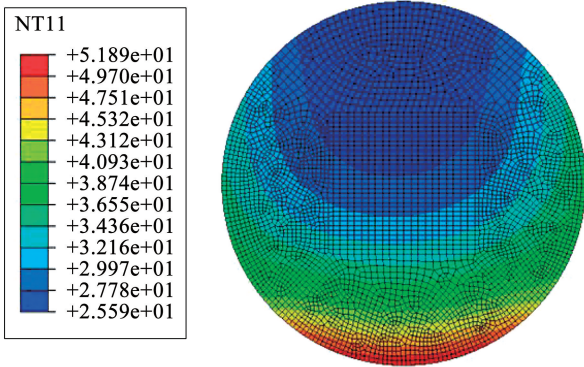


图 26 内部主缆的温度云图(°C)

Fig. 26 Temperature nephogram of the internal main cable(°C)

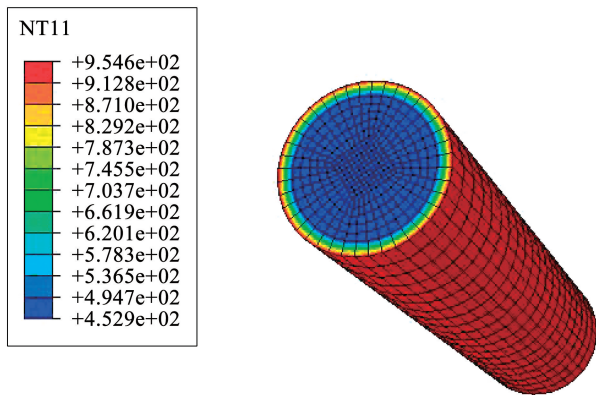


图 27 火灾下外包隔热材料吊索的温度云图(°C)

Fig. 27 Temperature nephogram of the sling wrapped with thermal insulation material in the fire(°C)

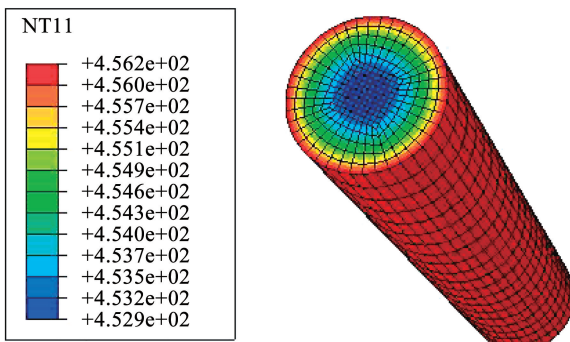


图 28 内部吊索的温度云图(°C)

Fig. 28 Temperature nephogram of the internal sling(°C)

5 结 论

1) 本文使用 ABAQUS 软件, 建立某跨海悬索桥全桥杆系模型, 并将模型参数与设计 and 实测数据进行对比检验, 验证了仿真模型的计算结果的准确性。

2) 依据 Babrauskas 的油池燃烧理论与 Ingason 的火灾热释放理论, 建立燃料控制的 LNG 油罐车火灾热释放率指数增长模型, 用于模拟桥面开放空间发生的 LNG 油罐车火灾。

3) 给出了 FDS 与有限元 ABAQUS 相结合的热力分析方法, 计算了桥梁构件在火灾中的温度变化, 得到受火构件在火灾中的退化性能。其中, 受火主缆弹性模量降低至原弹性模量的 0.53, 受火的 45、46 号吊索的性能失效; 桥面环氧沥青铺装遭到高温损坏, 需重新铺设; 钢箱梁受高温影响较轻。

4) 对受火后全桥结构进行力学分析, 给出火灾下全桥力学响应。在跨中发生 LNG 油罐车火灾的情况下, 全桥挠度增大但仍在规范安全值内, 受火区域的主缆与吊索均发生内力重分布, 主缆内力并未超出规范值, 跨中 45、46 号吊索受高温影响破断失效, 进而导致同一侧相邻的 44、47 号吊索的内力安全系数值低于规范值, 对全桥运营产生安全隐患, 建议进行有针对性的前期防护措施。

5) 通过对受火区域外包双层 5 mm 复合气凝胶绝热层的主缆和吊索进行热传分析, 发现此种外包绝热层的防护设计在火灾中可以有效降低高温对主缆与吊索的温度影响。

参 考 文 献

[1] 王莹. 基于热-结构耦合的双层悬索桥高温建模方法与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016
 WANG Ying. Heat modeling method and performance research for double suspension bridge based on thermal-structure coupling[D].

- Wuhan; Wuhan University of Technology, 2016
- [2] 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 tanker fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(3): 444
- [3] 李利军, 董晓明, 胡兆同. 大跨径悬索桥承重构件公路火灾安全距离研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(4): 886
LI Lijun, DONG Xiaoming, HU Zhaotong. Safety distance for bearing members of long-span suspension bridge in highway fire[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(4): 886
- [4] 郑永乾, 韩林海, 经建生. 火灾下型钢混凝土梁力学性能的研究[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 118
ZHENG Yongqian, HAN Linhai, JING Jiansheng. Research on behavior of steel reinforced concrete (SRC) beams in fire [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 118
- [5] 张岗, 宗如欢, 黄侨, 等. 油罐车火灾致简支钢-混组合箱梁抗弯承载力衰变机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(6): 31
ZHANG Gang, ZONG Ruhuan, HUANG Qiao, et al. Degradation mechanism of simply supported steel-concrete composite box girder under tanker fire condition [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(6): 31
- [6] 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[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
- [7] 刘志. 基于CFD-FEM的钢结构桥梁火灾响应研究[D]. 南京: 东南大学, 2021
LIU Zhi. Research on fire response of steel structure bridges based on CFD-FEM[D]. Nanjing: Southeast University, 2021
- [8] 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
- [9] 张岗, 贺拴海, 宋超杰, 等. 钢结构桥梁抗火研究综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 1
ZHANG Gang, HE Shuanhai, SONG Chaojie, et al. Review on fire resistance of steel structural bridge girders [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(1): 1
- [10] BABRAUSKAS V. Estimating large pool fire burning rates[J]. Fire Technology, 1983, 19(4): 251
- [11] INGASON H, BERGQVIST A, LÖNNERMARK A, et al. Räddningsinsatser i vägtunnlar [M]. Lund: Statens Räddningsverket, 2005
- [12] 张海红, 王凤琴, 毕明树. LNG储罐泄漏扩散火灾后果分析[J]. 化学工程与装备, 2010(2): 185
ZHANG Haihong, WANG Fengqin, BI Mingshu. Analysis of the consequences of LNG tank leakage and diffusion fire [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(2): 185
- [13] 广东省公路建设有限公司虎门二桥分公司. 桥梁缆索火灾防护对策及灾后检测评估技术研究[R]. 广州: 广东省公路建设有限公司虎门二桥分公司, 2022
Humen Second Bridge Branch of Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd.. Research on fire protection measures and post disaster detection and evaluation technology for bridge cable cables [R]. Guangzhou: Humen Second Bridge Branch of Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., 2022
- [14] 李胜利, 李孝斌. FDS火灾数值模拟[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019
LI Shengli, LI Xiaobin. FDS fire numerical simulation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019
- [15] 国家能源局. 液化天然气接收站能力核定方法: SY/T 7434—2018[S]. 北京: 国家能源局, 2018
National Energy Administration. Capacity verification method for liquefied natural gas receiving terminal: SY/T 7434—2018 [S]. Beijing: National Energy Administration, 2018
- [16] 周萌, 聂建国. 自锚式悬索桥主缆锚固区多尺度建模方法[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1): 11
ZHOU Meng, NIE Jianguo. Multi-scale modeling method for main cable anchorage zone of self-anchored suspension bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(1): 11
- [17] 黄侨, 单彧诗, 宋晓东, 等. 特大跨径地锚式悬索桥静力稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 140
HUANG Qiao, SHAN Yushi, SONG Xiaodong, et al. Static stability analysis of long-span earth-anchored suspension bridge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6): 140
- [18] 吴向阳, 黄侨, 杨明, 等. 火灾下大跨悬索桥的安全与防护研究[R]. 南京: 东南大学交通学院, 2023
WU Xiangyang, HUANG Qiao, YANG Ming, et al. Research on safety and protection of long span suspension bridges under fire [R]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2023
- [19] 郭晓月, 吴向阳, 黄侨, 等. LNG油罐车火灾下悬索桥主缆温度响应的模型与参数对比分析[C]//2022年全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2022: 8
GUO Xiaoyue, WU Xiangyang, HUANG Qiao, et al. Model and parameter comparative analysis of temperature response of suspension bridge main cable under oil tanker fire [C]// Proceedings of the 2022 National Bridge Academic Conference. Beijing: China Communication Press, 2022: 8
- [20] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design: BS EN 1993-1-2:2005[S]. London: British Standards Institution, 2005: 3
- [21] 陈露一, 朱治宝, 潘立泉, 等. 西堠门大桥环氧沥青桥面铺装施工工艺及质量控制[J]. 桥梁建设, 2009(增刊2): 114
CHEN Luyi, ZHU Zhibao, PAN Liqun, et al. Construction technology and quality control of epoxy asphalt deck surfacing of Xihoumen bridge [J]. Bridge Construction, 2009(Sup.2): 114
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway suspension bridge: JTG/T D65-05—2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communication Press, 2015
- [24] 徐军, 王晓冬, 唐茂林, 等. 大跨径悬索桥主缆安全系数的研究[J]. 桥梁建设, 2011(5): 50
XU Jun, WANG Xiaodong, TANG Maolin, et al. Research on the safety factor of main cables in long span suspension bridges [J]. Bridge Construction, 2011(5): 50