

DOI:10.11784/tdxbz202506005

## 火灾爆炸耦合作用下悬索桥动力响应分析

田力<sup>1,2</sup>, 夏立鹏<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300350)

**摘要:** 为研究悬索桥在火灾爆炸耦合作用下的破坏倒塌机理, 利用显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 平台, 建立了包含钢桥塔等主要构件的悬索桥精细化三维有限元模型. 首先, 利用火灾分析软件 FDS 建立悬索桥上油罐车火灾热分析模型, 得到温度随空间的变化特征. 其次, 利用 LS-DYNA 有限元软件进行热-结构耦合分析, 研究悬索桥桥塔附近在火灾单独作用下的温度分布特征和结构响应. 再次, 采用对材料属性进行相应折减的方式来模拟高温对材料强度的折减, 探究了悬索桥桥塔附近火灾爆炸耦合作用下关键构件的损伤及其倒塌过程. 最后, 对悬索桥跨中火灾作用下的倒塌过程展开研究. 结果表明: 桥塔受火面的温度受火灾影响最大, 桥塔温度沿高度方向存在明显的温度梯度, 钢箱梁因桥面铺装的作用, 温度升高不明显; 桥塔及钢箱梁因热膨胀效应引起的应力增长较大, 不可忽略; 桥塔因受火面热膨胀效应影响产生偏离受火面的位移; 随着火灾持续时间延长或爆炸冲击强度增大, 桥塔结构的损伤程度呈现显著加剧, 在火灾初期损伤大小主要由爆炸当量控制; 桥塔附近损伤是高温及爆炸共同作用的结果, 单一作用对其影响较小; 跨中仅在火灾作用的工况下发生倒塌.

**关键词:** 火灾; 爆炸; 悬索桥; 有限元分析; 连续倒塌

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)03-0261-12

## Dynamic Response Analysis of Suspension Bridge Under Coupled Effects of Fire and Explosion

Tian Li<sup>1,2</sup>, Xia Lipeng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** To investigate the failure and collapse mechanisms of suspension bridges under the coupled effects of fire and explosion, a detailed three-dimensional finite element model of a suspension bridge including key components such as steel pylons was developed using the explicit dynamic analysis software ANSYS/LS-DYNA. First, the fire analysis software FDS was employed to establish a thermal analysis model of a tanker truck fire on the suspension bridge, thus obtaining the spatial variation characteristics of temperature. Second, the LS-DYNA finite element software was used to conduct a thermal-structural coupling analysis, so as to study the temperature distribution and structural response near the pylon under fire alone. Third, the reduction in material strength due to high temperatures was simulated by appropriately degrading material properties, and the damage to key components and the collapse process near the pylon under the combined effects of fire and explosion were explored. Finally, the collapse process of the suspension bridge under fire at the mid-span was analyzed. Results indicate that the temperature on the fire-exposed surface of the pylon is most significantly affected by fire, with a notable temperature gradient along the height of the pylon. Due to the influence of the bridge deck pavement, the temperature rise in the steel box girder is not significant. The stress increase in the pylon and steel box girder caused by thermal expansion effects is consider-

收稿日期: 2025-06-03; 修回日期: 2025-09-10.

作者简介: 田力(1970—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 田力, ltian@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51238007, 51178310).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51238007, No. 51178310).

able and cannot be ignored. The pylon exhibits displacement away from the fire-exposed surface due to thermal expansion effects. As the duration of fire or the intensity of the explosion impact increases, the damage to the pylon structure significantly worsens. At the early stage of fire, the extent of damage is primarily controlled by the explosion equivalent. The damage near the pylon results from the combined effects of high temperature and explosion, with each factor alone having a minor impact. The collapse at the mid-span only occurs under the scenario of fire alone.

**Keywords:** fire; explosion; suspension bridge; finite element analysis; progressive collapse

近年来,随着石油化工运输量激增,油罐车等易燃易爆车辆在悬索桥上的通行频率显著增加,一旦发生火灾爆炸事故,桥梁将面临高温燃烧与爆炸冲击的双重破坏,导致结构严重损伤甚至连续倒塌。由于悬索桥具有大跨度、柔性大、钢结构占比高等特点,其对高温及爆炸冲击荷载极为敏感,且灾后修复成本高、社会影响深远。因此,研究单一火灾或爆炸以及其耦合作用对悬索桥局部破坏与整体响应的影响,具有重要的工程意义。

在悬索桥抗火性能研究方面,国内外学者主要关注不同温度条件下悬索桥温度场分布,重点关注高温对悬索桥关键构件(例如主缆、钢箱梁、吊索等)的强度、刚度衰减影响。李利军<sup>[1]</sup>建立了大跨径缆索承重桥梁火灾物理模型,对结构在火灾条件下的温度场分布、内力与位移响应以及破坏形态进行了分析,得到了在不同火灾场景下结构的极限状态。王莹等<sup>[2]</sup>建立了武汉杨泗港长江大桥火灾热分析模型与力学分析模型,揭示了双层钢桁梁结构在火灾环境下的温度场时空演化特性,并评估了在高温条件下主要承重构件的力学性能退化规律。沈荣林等<sup>[3]</sup>利用 FDS 及 ABAQUS 软件构建了悬索桥主体结构的火灾数值模型,系统探究了大跨度悬索桥在火灾下的材料性能退化机制,揭示了钢箱梁、主缆等关键部件在热荷载作用下的强度、刚度衰减规律。李艳等<sup>[4]</sup>建立了三塔悬索桥空间精细化抗火分析模型,探明了油罐车在不同火灾场景下三塔悬索桥缆索体系随时间变化的温度场及高温力学性能。马如进等<sup>[5]</sup>提出了大跨径缆索承重桥梁抗火性能评估方法,并对多种车辆发生火灾时构件损伤及构件性能进行评估,发现在油罐车火灾下主缆截面最高温度可达 830 °C,对主缆产生不可逆损伤。Kim 等<sup>[6]</sup>提出了一种针对缆索桥梁的火灾风险评估方法,并基于火灾风险提出了安装消防栓和立管系统的标准,对韩国 70 座缆索桥梁进行了评估,结果表明 64% 的桥梁处于中高风险等级,因此对缆索桥梁进行火灾研究是有必要的。Robinson 等<sup>[7]</sup>利用在主缆的全尺寸模型上进行的热试验收集的数据和有限元模型,首次推导了悬索桥主缆有效体积热导率的经验区间估计。Robinson 等<sup>[8]</sup>对悬索桥用的 ASTM

A586 高强度钢丝主缆在高温下的应力、应变行为进行了全面的试验,推导出了在 22 ~ 724 °C 温度范围内弹性模量、屈服强度和极限强度的函数关系式。

悬索桥爆炸研究主要以数值模拟为主,其集中在爆炸荷载下的动力响应、局部损伤机理及整体稳定性。蒋志刚等<sup>[9]</sup>研究了悬索桥在爆炸冲击波作用下的动力响应演化规律,揭示了爆炸冲击波传播过程中桥梁结构的动态响应特征。王赟等<sup>[10]</sup>采用理论解析和数值仿真模拟相结合的方法,系统探究了悬索桥在常规武器空爆冲击波作用下的动力响应特性,发现加劲梁和吊索的动力响应具有显著的空间敏感性,位置改变对其影响很大,但对主缆影响不大。Atakhani 等<sup>[11]</sup>采用 LS-DYNA 软件,构建了三跨悬索桥精细化三维有限元模型,研究了悬索桥在爆炸荷载作用下的动力响应,发现近塔起爆时很高的 TNT 当量仅造成部分倒塌,跨中起爆引起的缆索松弛和桥面板损伤的严重程度超过了近塔起爆引起的严重程度。Ali 等<sup>[12]</sup>的研究结果表明:在中小爆破作用下,主缆和吊杆分别表现出足够和不足的结构冗余度,而大爆破作用对主缆和吊杆都是不利的。Farahmand-Tabar 等<sup>[13]</sup>对一座典型的悬索桥进行了在爆炸荷载作用下的建模分析,通过考察不同位置在不同荷载作用下的弯曲、扭转、轴力和节点位移的分布情况,发现在爆炸荷载及其作用下,竖向构件首先达到其极限塑性极限而发生破坏,导致该位置发生连续倒塌。

在桥梁火灾爆炸耦合作用研究方面,学者们对其研究较少,主要以数值模拟为主。田力等<sup>[14]</sup>利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,建立了一座斜拉桥的空间有限元模型,通过模拟研究,揭示了桥塔区域在高温及爆炸共同作用下的局部损伤特性以及桥梁整体的位移变化规律。在研究方法层面,本文采用了文献[14]中经过验证的油罐车火灾-爆炸耦合数值模拟框架;在研究对象层面,则将重点延伸至悬索桥体系,着重分析其大变形特性、缆索系统失效机制及整体力学行为,构建更为系统的大跨缆索承重桥梁抗灾研究体系。

综上所述,当前桥梁抗灾研究在单一火灾或爆炸作用方面已取得显著进展,但在火灾爆炸耦合作用机

制研究方面仍存在明显不足,且对于悬索桥的研究多集中于跨中主缆及吊索处。为此,本文以文献[11]中的三跨双塔钢悬索桥为研究对象,重点研究悬索桥在桥塔附近及跨中遭受火灾爆炸作用时的损伤及动力响应,综合对比两工况下的倒塌过程,分析温度及爆炸荷载对悬索桥结构的影响。

## 1 悬索桥有限元模型及数值分析方法

### 1.1 悬索桥有限元模型

本文以文献[11]中的三跨双塔钢悬索桥为研究对象,该桥采用主跨 500 m、边跨 150 m 的对称布置,桥梁总长 800 m;桥面系采用宽 20.5 m、高 3 m 的正交异性钢箱梁,设置双向四车道;主梁采用梯形闭口加劲肋(纵向间距 560 mm)和实腹式横隔板(间距 5 m)的加劲体系,箱梁顶底板采用 12 mm 厚度设计;桥塔高 80 m,桥面以上高度为 60 m,桥面上部桥塔和桥面下部桥塔均采用箱型截面,桥塔钢板及腹板厚度为 50 mm,内部肋板和腹板厚度为 40 mm;跨中主缆垂度为 50 m,中跨和边跨截面积分别为  $0.16 \text{ m}^2$  和  $0.13 \text{ m}^2$ ,吊索间距为 5 m,截面积为  $0.001 \text{ m}^2$ 。钢箱梁及桥塔钢材屈服强度为 470 MPa,主缆采用高强度镀锌钢丝绳,屈服强度为 1 285 MPa,该桥梁其他参数参见文献[11]。

采用 LS-DYNA 模拟悬索桥在火灾作用下的响应,建立悬索桥整体有限元模型,如图 1 所示。桥塔和桥面梁采用 SHELL163 单元进行模拟,主缆采用 Hughes-Liu 梁单元进行模拟,吊索采用杆单元进行建模。在整体模型中,由于没有给锚固区的实际细节,将主缆直接与桥塔连接,主缆和桥塔及吊索和钢箱梁之间均以铰接的方式连接,即耦合桥塔与主梁节点同钢索之间的  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_z$  共 3 个方向的自由度。钢箱梁和桥塔之间的相互作用通过定义接触关键字来实现,在桥塔底部采用固定端约束,约束 3 个方向上的位移,桥面两端限制横桥向和竖向位移,边跨主缆两端限制  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_z$  共 3 个方向上的位移。



图 1 悬索桥有限元模型

Fig.1 Finite element model of suspension bridge

### 1.2 数值分析方法

本研究采用多阶段耦合分析方法,对悬索桥上发生油罐车火灾和爆炸共同作用下的动力响应进行系统模拟,具体实施流程如下。

(1) 初始静力分析阶段:采用隐式算法求解结构在多重荷载作用下的平衡状态。

(2) 火灾分析阶段:利用 FDS 模拟油罐车火灾温度场,得到悬索桥关键部件的温度场分布,将此温度场导入 LS-DYNA 中进行热分析,将仿真获得的温度时程曲线作为热荷载,导入至悬索桥有限元模型中,以模拟实际火灾下的结构热力学响应,获得不同火灾持续时间下的力学特征。

(3) 爆炸瞬态分析阶段:通过 dynian 文件法继承第 1 阶段的应力、应变状态,实现隐式分析向显示分析的转换,同时依据构件实时温度对材料参数进行折减,以考虑高温导致材料性能退化。采用显式动力学 ALE 流固耦合算法模拟爆炸过程,鉴于爆炸冲击波作用时间极短(毫秒量级),本阶段计算时长设定为 0.05 s。

(4) 爆炸后静力分析阶段:为捕捉爆炸能量在桥梁结构中的时空传递效应,通过小型重启技术延续计算进程,删除空气域与炸药单元以提升计算效率,观察爆炸结束后 5 s 内的结构整体动力响应。该方法通过分阶段耦合计算,既保证了爆炸瞬态冲击的精确模拟,又有效解决了大规模模型长时间动力分析的计算效率问题。

## 2 桥塔附近在油罐车火灾单独作用时悬索桥结构数值分析

### 2.1 悬索桥温度场分析

#### 2.1.1 温度场分布及火灾场景确定

油罐车火灾作为典型的大规模烃类火灾,其试验研究难度大、成本高,现有实测数据相对有限,但一般认为其热释放速率通常在 5 ~ 15 min 即可达到峰值,最大热释放速率范围约为  $100 \sim 300 \text{ MW}^{[1,15]}$ 。本研究热释放速率设定为 200 MW,火池尺寸为  $12 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ,采用平方增长  $t^2$  火源模型进行模拟,即在火灾初期其热释放率与时间  $t$  的平方成正比,设置在 15 min 时达到最大热释放速率。桥塔是悬索桥的主要承重构件,其力学性能直接影响全桥稳定性,火灾高温致使桥塔钢材软化,进而引起灾难性后果。桥塔区域通常也是车辆变速或交汇区,事故概率较高,油罐车等危险品运输车辆在此发生事故的风险更大。因此本研究将火灾位置设置在桥塔处,火池被设置在距离桥塔表面 1.25 m 处,同时将油罐车火灾的中心沿纵桥向对齐于桥塔中心线位置。在 FDS 中建立桥塔简化模型,计算得到桥塔不同高度处温度时程曲线如图 2 所示。

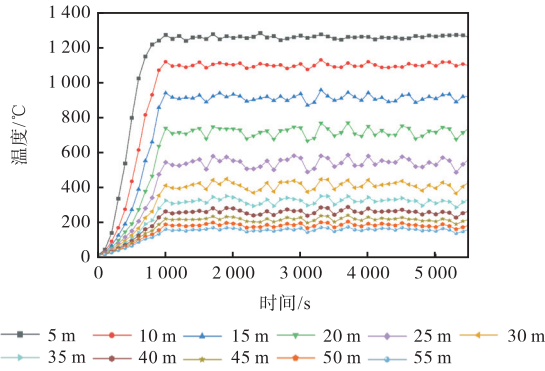


图 2 桥塔不同高度处的升温曲线

Fig.2 Temperature rise curves at different elevations of pylon

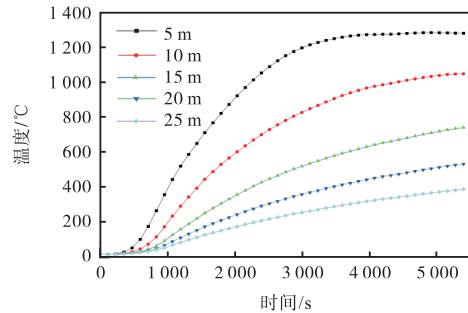
2.1.2 桥塔及钢箱梁局部热分析模型建立

在模拟桥塔附近油罐车火灾场景时,本研究基于最不利原则建立了 3 面受火的精细化模型. 考虑在实际火灾中火池宽度大于桥塔截面尺寸且在风的作用下火焰可能发生倾斜,将桥塔划分为 3 个受火区域:迎火面直接承受火焰冲击,两个侧面受倾斜火焰作用,背火面不受火焰影响. 考虑到桥面铺装材料导热系数不高,具有良好的隔热性能,在热分析模型中不可忽略. 本研究中设置悬索桥桥面铺装,其主要成分为沥青混凝土,磨耗层为 35 mm 改性沥青混合料,保护层为 30 mm 环氧沥青混合料,采用 SOLID164 单元进行建模.

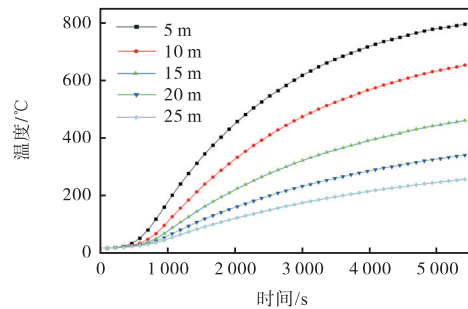
在 LS-DYNA 中,热边界条件可用关键字 \*BOUNDARY\_CONVECTION\_SET 和 \*BOUNDARY\_RADIATION\_SET 来设置,对于桥塔受火面和钢箱梁油池覆盖区域施加取  $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{[16]}$  的对流传热系数和  $0.62^{[17]}$  的综合辐射系数,背火面施加自然对流条件,对流传热系数取  $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{[16]}$ . 建立桥塔及钢箱梁局部热分析模型,将上述图 2 中通过 FDS 得到的桥塔不同高度处的温度曲线作为桥塔受火面表面温度,导入 LS-DYNA 中进行热分析. 考虑到钢材屈服强度只有在  $400 \text{ C}$  以上才会发生折减,因此取  $0 \sim 25 \text{ m}$  范围内温度曲线进行计算,得到热分析时桥塔不同高度处的温度时程曲线如图 3 所示.

从图 3 可以看出,桥塔受火面的升温特性呈现出显著的高度相关性,具体表现为:距离火源越近的区域升温速率最快, $0 \sim 5 \text{ m}$  区域内在  $1000 \text{ s}$  时即达到  $400 \text{ C}$  (钢材强度显著下降的临界温度),并在  $3600 \text{ s}$  时达到温度峰值,随后趋于稳定; $5 \sim 10 \text{ m}$  高度区域在  $1500 \text{ s}$  达到  $400 \text{ C}$  后持续快速升温,在  $4000 \text{ s}$  时突破  $1000 \text{ C}$  后增速明显放缓; $10 \text{ m}$  以上区域在整个受火过程 ( $5400 \text{ s}$ ) 中均保持持续升温状态,最终温度

随高度增加呈梯度下降,其中  $10 \sim 15 \text{ m}$ 、 $15 \sim 20 \text{ m}$  和  $20 \sim 25 \text{ m}$  高度处的稳定温度分别为  $744 \text{ C}$ 、 $536 \text{ C}$  和  $400 \text{ C}$ .



(a) 迎火面



(b) 横桥向立面

图 3 桥塔不同高度处的温度时程曲线

Fig.3 Temperature time-history curves at different elevations of pylon

基于 FDS 软件模拟获得的火池处温度时程曲线,将其作为热边界条件应用于桥面铺装层和钢箱梁的温度场分析. 计算火灾作用下桥面铺装和钢箱梁温度分布特征,得到的桥面铺装及钢箱梁温度时程曲线如图 4 所示,可见桥面铺装导热性较差,对钢箱梁表面有保护作用,温度对钢箱梁影响较小.

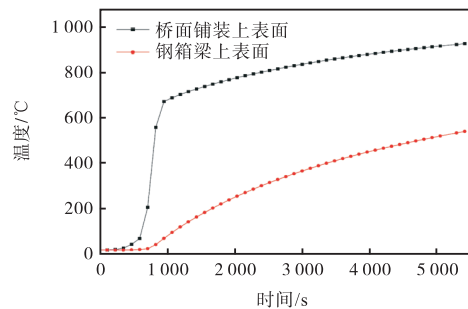


图 4 桥面铺装及钢箱梁温度时程曲线

Fig.4 Temperature time-history curves of deck pavement and steel box girder

2.2 火灾作用下悬索桥力学性能

通过间接耦合法对悬索桥在火灾环境下的力学响应进行分析,基于第 2.1 节中获得的温度场数据,

将其作为温度荷载施加到结构模型中,采用\**MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_THERMAL* 材料模型,并参照欧洲规范 Eurocode 3<sup>[18]</sup>定义钢材高温性能参数,对钢材弹性模量及屈服强度进行折减,以分析悬索桥结构在火灾作用下的动力响应.

### 2.2.1 悬索桥桥塔力学性能分析

图 5 详细展示了桥塔迎火面不同高度处的 Mises 应力时程演变规律,揭示了在火灾作用下钢结构的热力耦合响应特征:在火灾初期(0~1000 s),由于钢材热膨胀效应占主导地位,各高度位置的迎火面应力均呈现急剧上升趋势;随着温度持续升高,1000 s 后距离桥面火池 5 m 范围内的钢材因温度过高导致强度快速衰减,该区域应力峰值逐渐上移至 5~10 m 高度范围;与此同时,5~10 m 范围内的钢材在 1500~2000 s 期间也相继进入强度显著退化阶段,应力承载能力明显下降.距桥面火源 10 m 范围外因升温较慢,钢材强度衰减较慢,应力下降较平缓.距桥面火源 25 m 范围外,在 5400 s 时间内钢材强度没出现明显衰减,所受应力在逐渐增加.

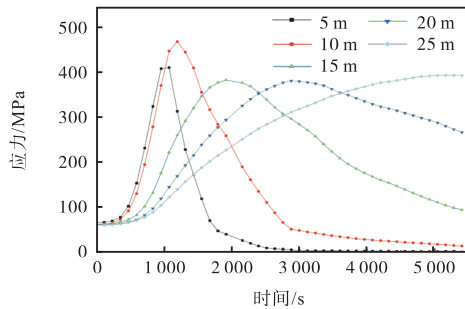


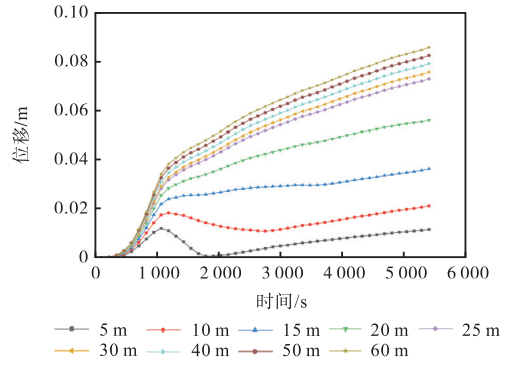
图 5 桥塔迎火面不同高度处应力时程曲线

Fig.5 Stress time-history curves at different elevations on fire-exposed surface of pylon

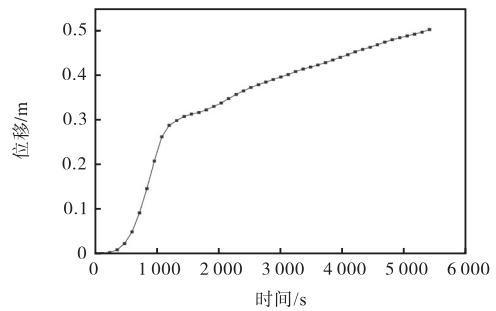
图 6(a)所示为桥塔受火时受火面在不同高度处竖向位移随时间的变化,图 6(b)所示为桥塔受火时塔顶横桥向水平位移随时间的变化.在 1000 s 内,桥塔钢材的弹性模量和屈服强度没有出现明显下降,这是因为此时主要受到热膨胀效应影响,桥塔竖向及横桥向水平位移显著增加.在燃烧 1000 s 后,距桥面火源 0~10 m 范围内钢材强度急剧衰减,竖向位移开始减小,但距桥面火源 10 m 外桥塔温度仍在增加,热应力持续增加,钢材受热膨胀,竖向位移继续增加,导致受火桥塔持续向远离受火方向偏移,但偏移速率小于火灾初期的偏移速率.受火 5400 s 时,塔顶水平偏移达到 0.5 m,温度对桥塔影响显著.

### 2.2.2 悬索桥钢箱梁力学性能分析

图 7 所示为钢箱梁上表面受火区域应力时程曲线,可以看出:在 2000 s 左右受火部分钢箱梁上表面



(a) 桥塔不同高度处竖向位移



(b) 塔顶水平位移

图 6 桥塔受火时的位移时程曲线

Fig.6 Displacement time-history curves of pylon under fire conditions

钢材达到屈服强度;随着受火时间延长,钢箱梁温度持续升高,受火 3500 s 左右钢箱梁温度达到 400 °C 以上,此时钢箱梁屈服强度出现明显下降,导致钢箱梁应力降低.因此,钢箱梁虽然因为桥面铺装的隔热作用,温度升高幅度较小,但由于热膨胀效应,应力仍出现显著增加.

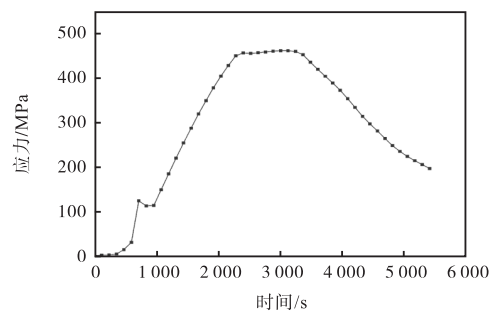
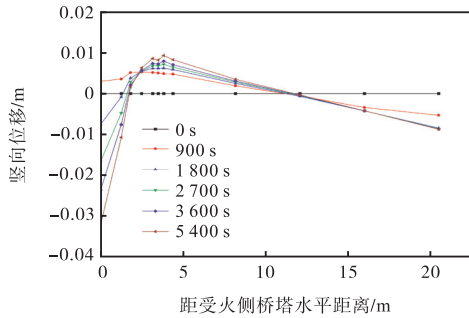


图 7 钢箱梁受火部位应力时程曲线

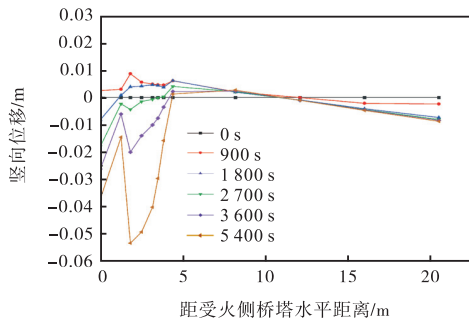
Fig.7 Stress time-history curves of fire-affected zone in steel box girder

图 8 详细记录了火池中部横桥向钢箱梁桥面以及受温度影响的钢箱梁两横隔板中部横桥向桥面竖向位移随时间的变化.由图 8(a)可以看出:火池中部钢箱梁表面竖向位移在温度作用下微微隆起,且在火灾初期位移增加最快,900 s 内增加 0.005 m;随后位移变化很小,到 5400 s 时竖向位移增大至 0.010 m.

这是因为火池中部正好位于钢箱梁横隔板附近,横隔板对桥面变形有明显的限制作用.由图 8(b)可以看出:两横隔板间桥面竖向位移在高温作用下发生明显变化,在火灾初期,火池区域钢箱梁表面在温度作用下膨胀变形,表现为微微凸起;随着受火时间增加,火池区域内钢箱梁表面因其他低温区域的限制而发生明显凹陷,且随着受火时间的增加,凹陷幅度增大.这说明虽然在桥面铺装的作用下钢箱梁温度相对较低,但钢箱梁也因热膨胀效应产生明显变形.



(a) 火池中部横桥向竖向位移



(b) 两横隔板间横桥向竖向位移

图 8 受火区域钢箱梁竖向位移对比

Fig.8 Comparison of vertical displacement of steel box girder within fire-affected zone

### 3 桥塔附近在油罐车火灾爆炸耦合作用下悬索桥结构数值分析

#### 3.1 有限元模型建立

本文采用 ALE 流固耦合方法,对高温环境下悬索桥桥塔区域的爆炸损伤效应进行了精细化数值模拟.基于第 1.1 节建立的悬索桥有限元模型,通过等效 TNT 方法模拟油罐车爆炸,并利用 dynain 文件继承火灾阶段的应力、应变历史.有限元模型主要由悬索桥、空气和炸药共 3 部分组成,考虑到油罐车高度及桥面车道布置,TNT 爆心取距离桥面和桥塔各 2 m 处布置,位置正对桥塔迎火面.TNT 炸药及空气采用实体单元进行建模,单元类型为 SOLID164,考虑到爆炸冲击波直接作用在钢箱梁表面和桥塔迎爆面,空

气域需将这些区域覆盖,因此将空气域大小设置为 10 m × 10 m × 12 m.建立比较精细的网格有助于提高计算精度,但同时会增加计算时间,降低计算效率.综合考虑悬索桥及 TNT 炸药尺寸,最终确定网格尺寸为 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m,空气域及炸药布置如图 9 所示.悬索桥桥塔及钢箱梁空气域覆盖区域进行网格加密,网格尺寸为 0.1 m,网络尺寸向其他区域逐渐扩大至 1 m.

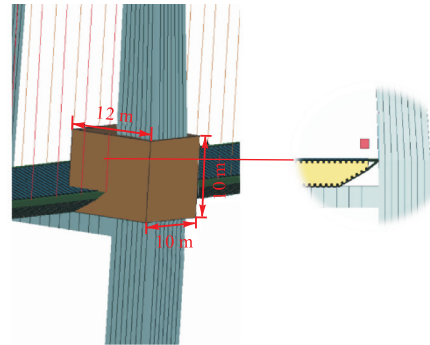


图 9 空气域及炸药示意

Fig.9 Schematic of air domain and explosive

#### 3.2 钢材本构模型及验证

##### 3.2.1 考虑高应变率的钢材本构模型

钢材采用\**MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC* 模型进行模拟,这是一种与应变率相关和带有失效准则的弹塑性材料模型,应变率效应用 Cowper-Symonds 模型来模拟,其屈服应力大小与塑性应变、应变率的关系为

$$\sigma_y = (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (1)$$

式中:  $\sigma_0$  为初始屈服应力大小;  $\dot{\epsilon}$  为应变率;  $\epsilon_p^{\text{eff}}$  为有效塑性应变;  $\beta$  为硬化参数;  $E_p$  为塑性硬化模量;  $C$  和  $P$  为应变率参数,本文中钢材的  $C$  和  $P$  分别取 3200 和 5. 塑性硬化模量  $E_p$  与弹性模量  $E$ 、切线模量  $E_t$  的关系为

$$E_p = \frac{EE_t}{E - E_t} \quad (2)$$

在考虑高温对钢材强度的影响时,可通过将常温下的钢材材料参数替换为经高温折减后的对应参数来实现.

##### 3.2.2 本构模型验证

选取文献[19]中 GL-12 工况的钢箱梁爆炸试验进行对比分析.试验中钢箱梁梁段模型总长度为 1800 mm,梁宽为 480 mm,梁高为 100 mm,试件两端采用固结方式,顶板厚度为 2 mm,腹板厚度为 1.2 mm,横隔板厚度为 1.2 mm,间距为 250 mm,U 形

肋厚度为 1.2 mm, 间距为 60 mm. TNT 当量为 52 g, 炸药底部距顶板 70 mm. 钢箱梁、炸药及空气有限元模型见图 10, 钢箱梁采用壳单元 SHELL163 进行模拟, 两侧定义为固定约束. 空气和炸药采用 SOLID164 单元模拟, 炸药形状为圆柱形, 起爆点根据试验定在炸药顶部, 空气域各个面设置无反射边界条件. 为节约计算时间, 空气域只包围住钢箱梁部分区域. 炸药及主要影响区域的空气域单元尺寸设置为 1 mm, 网格尺寸向四周逐渐增大. 在爆炸主要影响区域钢箱梁采用 1 mm 单元尺寸, 在其他区域采用单元尺寸的范围为 2~5 mm.

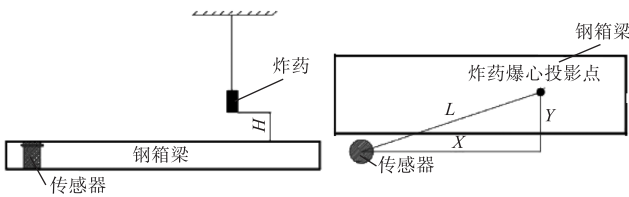


图 10 炸药位置示意

Fig.10 Schematic of explosive location

通过 LS-DYNA 进行钢箱梁构件的爆炸计算, 得到的结果如图 11 所示. 由图 11 可知, 工况 GL-12 试验与有限元模拟的破坏状态均为凹洞, 其中试验产生的凹洞深度为 9.00 mm, 有限元模拟结果为 8.52 mm, 试验数值与模拟值误差为 5.33%. 试验产生的凹洞的长和宽分别为 85 mm 和 63 mm, 有限元模拟结果的长和宽分别为 83 mm 和 60 mm, 误差分别为 2.35% 和 4.76%.

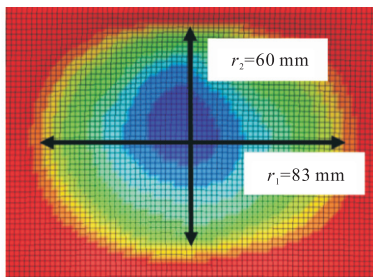


图 11 钢箱梁数值模拟结果

Fig.11 Numerical simulation results of steel box girder

### 3.3 火灾爆炸耦合作用下悬索桥局部损伤及整体位移

本文第 2.2 节中对桥塔附近火灾进行模拟, 得到了桥塔附近不同高度处的温度时空分布特征. 可以看出, 在距火源 25 m 高度以上, 5400 s 受火时间内桥塔温度低于 400 °C, 此时根据欧洲规范 Eurocode 3<sup>[18]</sup>可知, 钢材屈服强度不发生折减, 因此取火灾影响高度范围为距桥面 0~25 m, 沿高度方向分为 5 个区域, 分别为 0~5 m、5~10 m、10~15 m、15~20 m

和 20~25 m, 将各区域桥塔迎火面、加劲板等部件的最高温度作为该区域各部件的统一温度进行模拟.

油罐车起火后发生爆炸存在较高的不确定性, 其可能性主要取决于储油类型、泄漏情况、火势控制及时性以及周围环境的因素. 若罐体因撞击或高温导致破损, 内部油品(如汽油、柴油等挥发性易燃物质)大量泄漏并与空气混合达到爆炸极限, 遇到明火或高温即可能引发剧烈爆炸. 结合第 2 节的分析可知, 火灾对于桥塔特别是迎火面影响较大. 在第 1000 s 之前, 升温速度不快, 迎火面最高温度在 400 °C 左右, 根据欧洲规范 Eurocode 3<sup>[18]</sup>可知, 此时钢材折减不明显, 因此在第 1000 s 前不设置爆炸时刻. 在受火 1000~3000 s 过程中, 温度迅速上升. 受火第 3000 s 后, 距离火源 0~5 m 范围内温度变化幅度变小, 逐渐趋于平稳. 在第 3600 s 时温度达到最大值, 此时温度保持稳定. 因此, 在选择第 1200 s、1800 s、2700 s、3600 s 和 5400 s 作为油罐车的爆炸时刻. 此外, 油罐车爆炸威力同样与多种因素有关, 具有极大的不确定性, 不同的储油类型、泄漏量等因素对其影响较大, 目前对其研究较少. 考虑到悬索桥桥塔的尺寸, 本研究采用等效 TNT 当量法模拟油罐车爆炸, 选取 1000~5000 kg 范围内 5 种不同当量, 以 1000 kg 为梯度逐级递增, 系统模拟了不同爆炸规模下的工况.

图 12 和图 13 分别为不同受火时间下发生 1000 kg 当量 TNT 和 5000 kg 当量 TNT 爆炸时桥塔及钢箱梁的有效塑性应变云图. 当桥塔结构遭遇火灾爆炸耦合作用时, 其破坏程度由温度和爆炸冲击荷载共同决定. 随着火灾持续时间延长或爆炸冲击强度增大, 桥塔结构的损伤程度呈现显著加剧趋势. 在火灾初期(第 1800 s 前), 温度对其影响较小, 破坏形式主要由爆炸当量控制, 此时同一当量 TNT 在不同时刻爆炸后的损伤形式相同, 破口大小略有增大, 桥塔内肋板温度较低, 对破口范围起到了很好的限制作用. 在火灾中后期(第 1800 s 后), 由于迎火面温度较高, 钢材的高温软化作用明显, 小当量 TNT 炸药(1000 kg)就可以对迎爆面产生较大破坏, 此时桥塔的破坏形式主要由温度控制, 迎爆面基本被破坏. 到第 5400 s 时, 不同当量 TNT 炸药爆炸后距桥面 0~5 m 处的损伤基本一致, 此时炸药当量对其影响较小.

图 14 绘制了各工况下受爆桥塔沿高度方向的最大横桥向侧移曲线, 设定桥塔朝向爆炸源移动时为正值, 反之则为负值. 由于在第 5400 s 时发生 5000 kg 当量 TNT 爆炸时桥塔发生了倒塌, 因此图中未展示此工况下的位移曲线. 从图 14 中可以看出, 火灾高

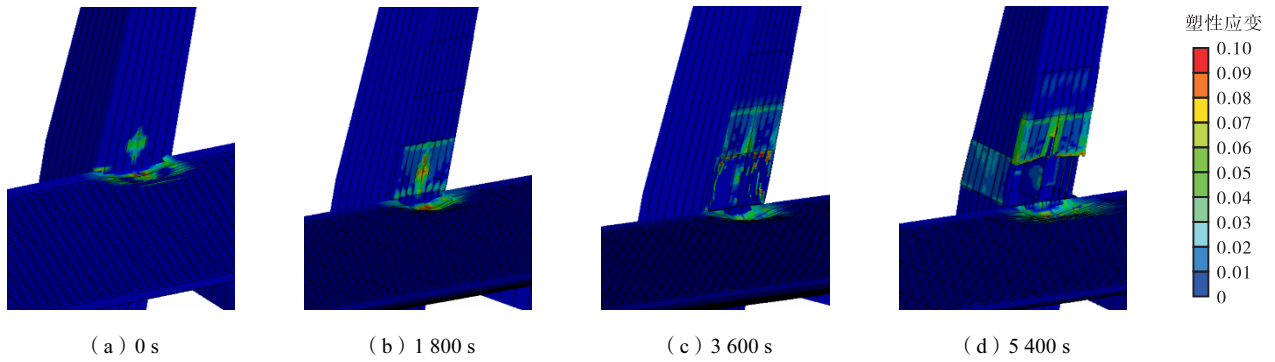


图 12 不同燃烧时间及 1 000 kg 当量 TNT 爆炸下桥塔附近有效塑性应变云图

Fig.12 Cloud diagrams of effective plastic strain near the pylon under varying combustion durations and 1 000 kg TNT equivalent explosion

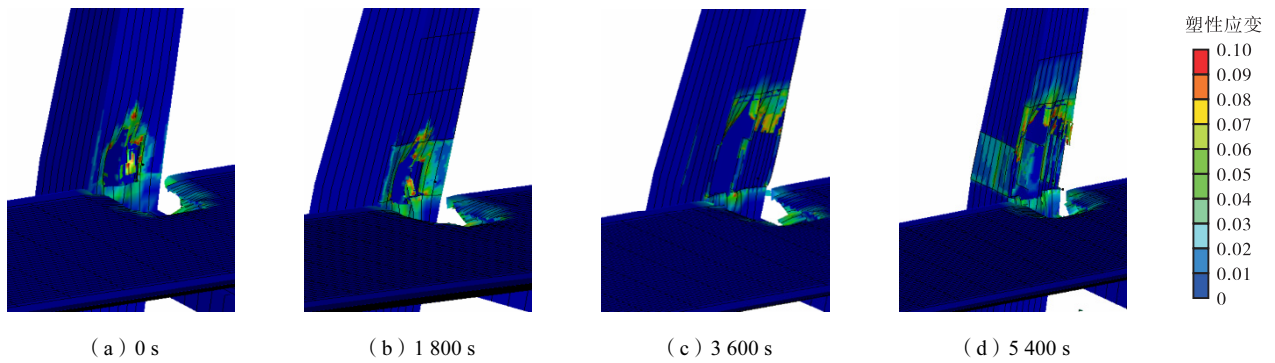


图 13 不同燃烧时间及 5 000 kg 当量 TNT 爆炸下桥塔附近有效塑性应变云图

Fig.13 Cloud diagrams of effective plastic strain near the pylon under varying combustion durations and 5 000 kg TNT equivalent explosion

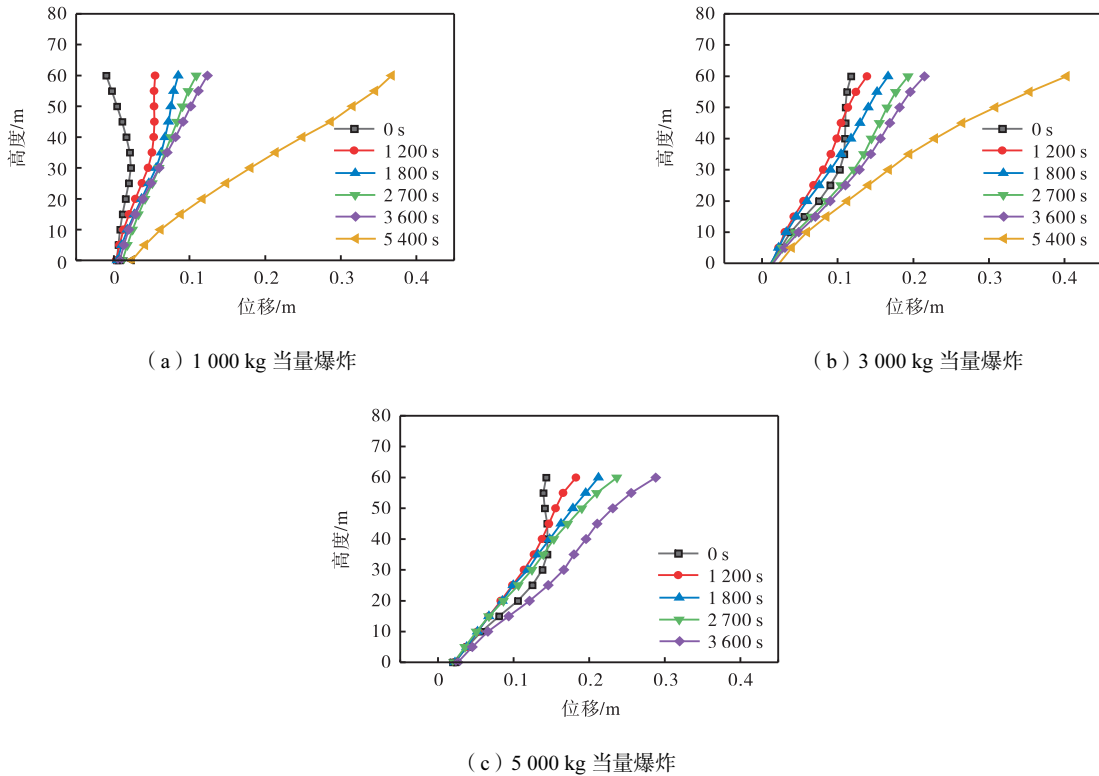


图 14 不同燃烧时间不同当量爆炸下桥塔侧移曲线

Fig.14 Lateral displacement curves of pylon under varying combustion durations and equivalent explosions

温与爆炸冲击的耦合作用显著加剧了桥塔的侧向位移. 当爆炸发生在桥塔时, 在受火 3 600 s 以内, 随着受火时间的延长, 受火侧钢材因高温导致弹性模量和屈服强度持续退化, 在爆炸冲击荷载的作用下迎爆面产生局部破坏, 使得截面刚度下降和应力重分布, 在塔顶竖向荷载的  $P-\Delta$  效应作用下, 初始侧移引发附加弯矩, 导致侧向位移持续增加. 当受火时间达到 5 400 s 时, 受火侧钢材强度急剧退化, 且高温区域从迎火面向横桥向立面扩展, 导致桥塔整体刚度急剧衰减, 此时在爆炸冲击荷载的作用下, 整个迎火面被破坏, 不同当量 TNT 爆炸产生的破坏形式近似, 因此桥塔侧向位移差别较小, 且远大于第 3 600 s 前桥塔的侧向位移.

### 3.4 火灾爆炸耦合作用下悬索桥连续倒塌

研究发现, 当桥塔在受火 5 400 s 时发生 5 000 kg 当量 TNT 炸药爆炸时, 桥塔最终发生了连续倒塌.

图 15 为爆炸后不同时刻桥塔底部塑性损伤云图, 从中可以得到桥塔连续倒塌的破坏机理如下.

(1) 在爆炸时, 由于迎爆面钢材在高温作用下强度急剧折减, 对于爆炸冲击波的阻挡作用很小, 导致

爆炸冲击波可以直接作用于桥塔内腹板, 造成腹板发生破损, 桥塔横桥向立面发生变形, 腹板与桥塔横桥向立面连接处发生破损.

(2) 爆炸后 6.00 s 时, 在荷载作用下爆炸产生的初始损伤迅速积累, 桥塔横桥向前侧被压屈服, 最终被压溃失效, 原本由该区域承担的荷载向结构其他部位转移, 同时侧向位移的发展使得塔顶竖向压力产生的弯矩迅速增大, 这直接导致侧立面后侧钢板承受了过大的应力, 其塑性应变迅速增加.

(3) 爆炸后 7.00 s 时, 整个桥塔侧立面迅速失效, 失效区域与前期形成的破坏带完全贯通, 导致桥塔迎爆面与横桥向立面三面贯通破坏.

(4) 爆炸后 8.00 s 时, 桥塔底部迎爆面和背爆面均出现严重的塑性破坏. 背爆面的断裂带与之前形成的破坏路径完全贯通, 在桥塔底部形成一道环向连续的破坏面, 此时桥塔底部截面已经完全断裂.

综上所述, 桥塔连续倒塌过程可概括为: 在爆炸作用下产生初始局部损伤, 随后在自重及桥面荷载作用下, 损伤不断积累扩展, 最终形成整体断裂倒塌.

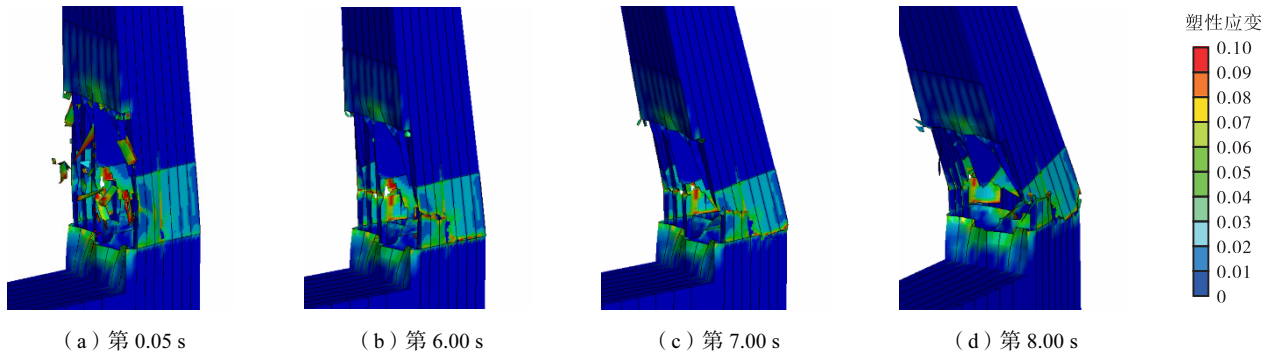


图 15 爆炸后不同时刻桥塔底部塑性损伤云图

Fig.15 Plastic damage contour plots at the bottom of pylon at different moments after explosion

## 4 跨中附近在油罐车火灾作用下悬索桥结构数值分析

### 4.1 悬索桥缆索温度场分析

采用 FDS 软件建立悬索桥跨中三维燃烧模型, 得到主缆及吊索处的温度曲线, 并对主缆及吊索进行精细化建模, 将 FDS 软件中得到的温度场导入进行热分析, 得到主缆及吊索中心处的温度时程曲线, 将此温度曲线作为温度荷载施加到悬索桥力学模型中进行热-力耦合计算.

### 4.2 悬索桥跨中受火时的力学性能分析

由于设定的火池宽度为 12 m, 而吊索间距为 5 m, 因此当油罐车在跨中发生泄漏起火时, 有 3 根

吊索和主缆被火焰包围. 设定跨中 3 根吊索及主缆温度荷载如图 16 所示.

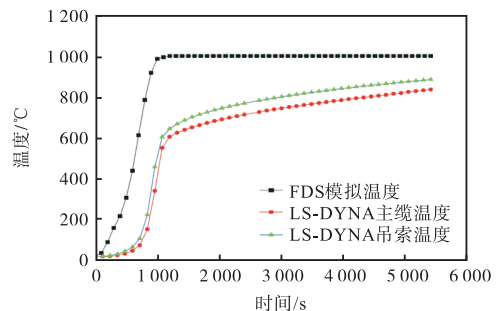


图 16 FDS 与 LS-DYNA 模拟温度时程曲线

Fig.16 Temperature time-history curves from FDS and LS-DYNA simulations

图 17 所示为悬索桥受火侧主缆应力与屈服强度对比,悬索桥主缆在火灾下的屈服强度演变呈现 3 阶段特征:在初始阶段(0~900 s),强度保持稳定;在快速下降阶段(900~1500 s),因钢材高温软化,强度急剧降低;在后期(1500 s 后),强度衰减趋缓.屈服强度变化与温度时程高度一致,当火灾持续至 2560 s 时,主缆应力超过屈服强度,结构达到临界失效状态.

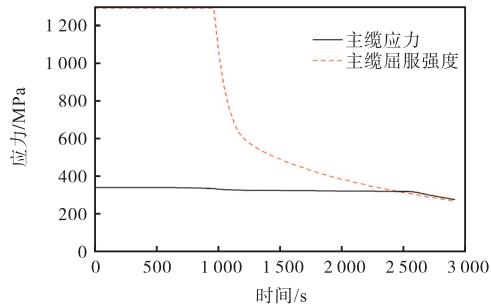


图 17 悬索桥受火侧主缆应力与屈服强度对比

Fig.17 Comparison between stress of fire-exposed main cable and its yield strength in suspension bridge

为便于分析悬索桥吊索在火灾作用下的索力变化,对悬索桥吊索进行编号.考虑到火灾发生于悬索桥跨中区域,且桥梁结构本身具有严格的几何对称性,故采用双侧对称编号,取悬索桥受火侧跨中吊索为 A1,沿顺桥向向右依次为 A2、A3、A4 等编号,取非受火侧跨中吊索为 B1,沿顺桥向向右依次为 B2、B3、B4 等编号.

图 18 所示为悬索桥跨中吊索在火灾作用下的动态响应过程:在初始阶段(0~750 s),应力波动范围不超过 ± 5%;进入应力重分布阶段(750~1000 s)后,受火吊索 A1 和 A2 的应力骤降了 250 MPa,而相邻吊索 A3 的应力激增至 600 MPa,应力变化值随距离递减;1000 s 后,应力进入相对稳定期.

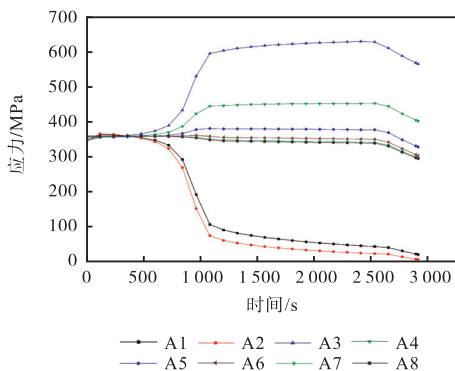


图 18 悬索桥受火侧吊索应力变化

Fig.18 Stress variation of fire-exposed hangers in suspension bridge

### 4.3 悬索桥跨中受火时的倒塌分析

为便于观察悬索桥结构在火灾作用下的倒塌过

程,利用 dynain 文件法将悬索桥跨中受火第 2560 s 时的应力、应变状态继承至显示分析模块,实现从热力耦合分析到动态破坏过程模拟的无缝衔接,研究悬索桥跨中受火时悬索桥的整体破坏过程.研究结果表明:跨中受火后如果主缆应力超过屈服强度,那么主缆将先发生破坏;一旦主缆发生破坏,悬索桥立刻进入失效状态.

图 19 所示为火灾 2560 s 后悬索桥两侧跨中的竖向位移时程曲线.由图 19 可知,主缆失效后受火侧跨中竖向位移迅速增加,在 2.0 s 的时间内跨中竖向位移就达到 15 m.然而,非受火侧因主缆及各吊索未失效,因此仍起到一定作用,短时间内非受火侧主缆索力激增,达到 650 MPa,导致非受火侧竖向位移变化相对较缓慢,在 2.0 s 时间内,跨中竖向位移达到 4 m.

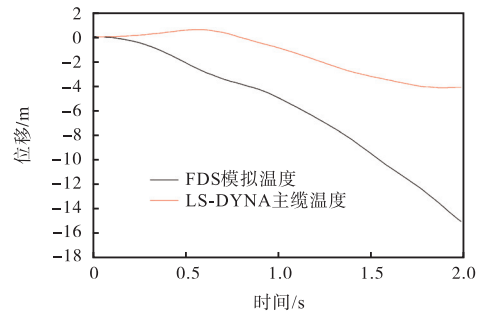


图 19 悬索桥两侧跨中竖向位移时程曲线

Fig.19 Time-history curves of vertical displacement at mid-span on both sides of suspension bridge

## 5 结 论

(1) 桥塔附近发生火灾时,桥塔区域温度分布呈现显著三维梯度特征,距离桥面火源越近,温度越高,升温越迅速.在火灾初期,桥塔钢材升温膨胀,迎火面应力激增;随后因高温软化,应力重分布至横桥向立面及背火面.箱梁由于热膨胀效应,应力仍然显著增加,因此在进行桥梁抗火性能设计时,必须充分考虑热膨胀效应导致的附加应力影响.

(2) 在高温爆炸耦合作用下,随着火灾持续时间的延长或爆炸冲击强度的增加,桥塔构件将出现更为严重的局部破坏现象.在火灾初期,破口大小主要受爆炸当量控制,桥塔内肋板对破口发展有限制作用.因此,合理增加肋板有助于减少火灾爆炸对桥梁的影响.

(3) 当桥塔附近发生火灾爆炸时,桥塔结构向爆心方向发生明显偏移,且该位移量随火灾持续时间延长或爆炸荷载增强而呈递增趋势.在火灾持续时间

长且爆炸荷载强度高的极端荷载组合作用下, 桥塔结构会发生坍塌破坏。

(4) 综合对比桥塔附近及跨中附近发生油罐车火灾爆炸事故时悬索桥的倒塌过程, 可知桥塔附近损伤是高温及爆炸共同作用的结果, 单一作用对其影响较小; 当火灾爆炸发生在跨中时, 仅在火灾作用下即可发生倒塌, 且跨中倒塌更迅速。因此, 在悬索桥结构设计中应增加对于缆索体系的防火设计, 降低灾害影响。

#### 参考文献:

- [1] 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: 长安大学公路学院, 2013.  
Li Lijun. Numerical Simulation of Highway Fire Temperature Field and Analysis of Long-Span Cable Support Bridge Fire[D]. Xi'an: School of Highway Engineering, Chang'an University, 2013 (in Chinese).
- [2] 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): 2091-2099.  
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): 2091-2099 (in Chinese).
- [3] 沈荣林, 李芬, 张宗星. 油罐车火灾下双层悬索桥抗火性能研究[J]. 交通与港航, 2023, 10(2): 21-24.  
Shen Ronglin, Li Fen, Zhang Zongxing. Study on fire resistance of double deck suspension bridge under fire of oil tank truck [J]. Communication & Shipping, 2023, 10(2): 21-24 (in Chinese).
- [4] 李艳, 刘政伟, 周国华. 油罐车火灾下三塔悬索桥缆索体系抗火性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 124-130.  
Li Yan, Liu Zhengwei, Zhou Guohua. Study on fire resistance performance of cable system of a suspension bridge with three-tower under tanker fire [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(5): 124-130 (in Chinese).
- [5] 马如进, 邹明明. 三塔自锚式悬索桥主缆抗火性能评估方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(12): 77-84.  
Ma Rujin, Zou Mingming. Evaluation method for fire resistance of main cable of three-tower self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(12): 77-84 (in Chinese).
- [6] Kim M O, Kim K, Yun J H, et al. Fire risk assessment of cable bridges for installation of firefighting facilities [J]. Fire Safety Journal, 2020, 115: 103146.
- [7] Robinson J, Brügger A, Sloane M, et al. Experimental-numerical determination of the effective bulk thermal conductivity of suspension bridge main cables [J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(12): 04022120.
- [8] Robinson J, Brügger A, Betti R. Experimental investigation of the high-temperature performance of high-strength steel suspension bridge wire [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(7): 04021034.
- [9] 蒋志刚, 王赞, 严波, 等. 爆炸荷载作用下悬索桥竖弯响应的数值模拟 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 123-128.  
Jiang Zhigang, Wang Yun, Yan Bo, et al. Numerical simulation for vertical bending response of a suspension bridge under air explosion loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 123-128 (in Chinese).
- [10] 王赞, 蒋志刚, 严波. 爆炸冲击波荷载作用下悬索桥的竖弯振动 [J]. 公路, 2011(3): 1-4.  
Wang Yun, Jiang Zhigang, Yan Bo. Vertical bending vibration of suspension bridge under air explosion loading [J]. Highway, 2011(3): 1-4 (in Chinese).
- [11] Atakhani M, Shekastehband B, Alaei A R. Numerical analysis of suspension bridges with box girders subjected to detonations [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 208: 107983.
- [12] Ali K, Javed A, Mustafa A E, et al. Blast-loading effects on structural redundancy of long-span suspension bridge using a simplified approach [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2022, 27(3): 04022024.
- [13] Farahmand-Tabar S, Barghian M, Vahabzadeh M. Investigation of the progressive collapse in a suspension bridge under the explosive load [J]. International Journal of Steel Structures, 2019, 19(6): 2039-2050.

- [14] 田力, 周建胜, 朱劲松, 等. 桥塔附近油罐车火灾和爆炸联合作用下斜拉桥动力响应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2257-2270.  
Tian Li, Zhou Jiansheng, Zhu Jinsong, et al. Dynamic response of cable-stayed bridge under combined effect of fire and explosion of tank truck nearby pylon[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2257-2270 (in Chinese).
- [15] 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(增1): 28-31.  
Ni Zhaopeng, Chen Haiyun. Current status and development trends of tunnel fire protection technologies in China and abroad[J]. TranspoWorld, 2003(Suppl 1): 28-31 (in Chinese).
- [16] ENV 1992-1-2 Eurocode 1—Actions on Structures—Part 1-2: Actions on Structures Exposed to Fire[S]. Brussels: CEN, 2002.
- [17] Kotsovinos P, Atalioti A, McSwiney N, et al. Analysis of the thermomechanical response of structural cables subject to fire[J]. Fire Technology, 2020, 56(2): 515-543.
- [18] ENV 1993-1-2 Eurocode 3—Design of Steel Structures—Part 1-2: Structural Fire Design[S]. Brussels: CEN, 2005.
- [19] 刘亚玲. 钢箱梁在近距离爆炸荷载作用下试验与破坏机理研究[D]. 太原: 中北大学环境与安全工程学院, 2019.  
Liu Yaling. Experiment and Mechanism Research of Steel Box Girder Under the Action of Near Explosion Load[D]. Taiyuan: School of Environment and Safety Engineering, North University of China, 2019 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)