

文章编号:1673-2049(2019)03-0091-10

油罐车火灾下大跨径双层钢桁梁悬索桥高温力学性能

王莹,王盼

(湖北省城建设计院股份有限公司,湖北 武汉 430051)

摘要:为了确定大跨径双层钢桁梁公路悬索桥油罐车燃烧下的损伤破坏情况,以武汉杨泗港长江大桥为背景,利用火灾动力学软件FDS模拟桥梁上7种不同火灾燃烧场景,以此确定出桥梁最不利油罐车火灾热释放率函数增长模型及规模。建立双层公路悬索桥三维空间热分析模型,通过热分析确定油罐车在桥梁不同部位发生火灾时其三维空间瞬态温度场分布规律。通过热-结构耦合分析,掌握双层钢桁梁悬索桥吊索、加劲梁、桁架杆高温力学性能时变特征。结果表明:恒载+活载工况作用下,一辆油罐车在桥梁主跨跨中上层最外车道发生火灾36 min时,吊索温度达到900℃以上,吊索应力增大到362.4 MPa,达到高温下抗拉强度,此时吊索发生断裂破坏,吊索的破坏主要是由于高温下的抗拉强度退化造成,此场景下抗火救援的最佳时间在16 min内;一辆油罐车在桥梁主跨跨中下层非机动车道发生火灾43 min时,上层钢桁梁横梁腹板的临界屈曲应力系数降低到了1以下,上层钢桁梁火灾下率先会发生局部屈曲失稳而不是强度或位移破坏,此时抗火救援的最佳时间在20 min内。

关键词:双层公路悬索桥;油罐车火灾;热释放率;温度场;破坏时间;屈曲失稳;救援时间

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A

High Temperature Mechanical Properties of Long-span Double-deck Steel Truss Beam Suspension Bridge Under Tanker Fire

WANG Ying, WANG Pan

(Hubei Urban Construction Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, Hubei, China)

Abstract: In order to acquire the failure characteristics of long-span double-deck steel truss girder suspension bridge under tanker fire, Yangsigang Yangtze River Bridge in Wuhan was taken as an example, and the fire dynamics software FDS was used to simulate seven different fire burning scenarios on the bridge, so as to determine the most unfavorable growth model and scale of the bridge tanker fire heat release rate function. A three-dimensional spatial thermal analysis model of double-deck highway suspension bridge was established. The three-dimensional transient temperature field distribution laws when tanker fire occurred in different parts of bridge were confirmed though thermal analysis. Through thermal-structure coupling analysis, the time-varying characteristics of high temperature mechanical properties of suspension cables, stiffening beams and truss bars of double-deck steel truss suspension bridge were mastered. The results show that when a tanker fire happens in the upper outer lane of midspan of the main span under

收稿日期:2018-09-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51378405);武汉市科技攻关计划项目(2014010101010024)

作者简介:王莹(1987-),男,湖北襄阳人,工程师,工学博士,E-mail:wyisbest@163.com。

dead load and live load with 36 min, the temperature of sling reaches $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, and sling stress increases to 362.4 MPa which is equal to sling tensile strength at high temperature. At this time, the sling breaks, and the damage of the sling is mainly due to the degradation of tensile strength at high temperature. The best time for fire rescue in this scenario is within 16 min. When a tanker fire happens in the lower non-motorized lane of midspan of the main span with 43 min, the critical buckling stress coefficient of the upper beam web was reduces below 1, and the failure characteristics of the bridge was local buckling instability rather than strength or displacement failure. The best fire rescue time should be within 20 min under this scenario.

Key words: double-deck highway suspension bridge; tanker fire; heat release rate; temperature field; damage time; buckling instability; rescue time

0 引言

近年来中国桥梁建设事业得到了飞速发展,各地建立了很多跨越黄河、穿越长江的特大桥梁,缆索体系桥梁由于能够实现超大跨度且造型美观,被越来越多地运用到现代桥梁工程中。随着桥梁数目的日趋增多,桥梁上车辆发生火灾的次数和概率也呈现出上升趋势^[1]。车辆火灾一旦发生,将会对桥梁结构关键部位造成巨大的损害^[2-3],因此,对车辆火灾尤其是大型油罐车火灾作用下桥梁的高温力学性能进行分析具有重要的意义。

国外桥梁火灾的研究起步较早,取得了一系列成果。2014 年, Alos-Moya 等^[4]采用流体力学软件 CFD 分析油罐车火灾位于高架桥下时,钢桥随时间变化的高温温度场,并用有限元软件进行高温后的桥梁应力和挠度分析,最后得出桥梁的破坏时间,研究结果和实际桥梁的破坏时间和破坏形态较为接近。2015 年, Peris-Sayol 等^[5]采用火灾动力学软件 FDS,从桥梁的几何参数、建模方法、火灾发生的位置、周围环境影响等方面分析了火灾下钢桥的力学响应,得出桥梁最危险的火灾场景并指出有限元软件可以计算预测出桥梁的破坏时间。2015 年, Aziz 等^[6]采用试验和有限元对比的方法,对火灾下的钢-混组合梁桥力学行为进行了系统分析,研究了火灾下不同恒载和活载水平、不同钢梁腹板和加劲肋尺寸对桥梁破坏形态的影响,得出不同火灾条件下钢-混组合梁桥的破坏时间。

由于火灾试验花费较大,且影响试验结果的参数众多,试验结果离散性较大,因此多采用计算机进行数值模拟。目前桥梁抗火研究中大多采用一维或二维的等效方法^[7-9],将桥梁各构件离散为杆系单元。桥梁的抗火研究中存在以下问题:①目前的研究采用火灾软件模拟温度场时,将桥梁的受火面定

义为全程面积不变的升温面,而对流辐射作用是火灾中主要的传热方式,桥梁在火场中受火的对流和辐射区域面会随着火源的燃烧发生变化,因此该模拟方法不能准确模拟火源动态的辐射对流过程;②双层钢桁梁悬索桥为多次超静定结构,由于整体结构中的构件会受到相邻构件的约束,部分研究成果中提出的传统钢结构火灾整体破坏失效准则存在局限性,与实际情况不符,桥梁中某些部位可能在桥梁整体失效之前发生局部损伤破坏;③由于火源起火位置的影响,双层桥的抗火计算与现有的单层桥又有明显的不同,桥梁危险火灾场景、关键部位的失效时间与单层桥差异很大。

本文以武汉杨泗港长江大桥为研究对象,利用火灾动力学软件 FDS 和有限元软件 ANSYS,建立悬索桥热分析模型和力学分析模型,确定油罐车燃烧下桥梁结构最危险火灾场景,计算关键部位三维瞬态温度场分布特征。通过热-结构耦合原理掌握油罐车燃烧下桥梁结构关键部位的弹性模量、强度、应力、挠度、屈曲模态等力学性能随时间的变化规律。明确高温下主缆和吊索的破坏特征及加劲梁钢材板件屈曲失稳规律,获得主缆和吊索的最短破坏时间、加劲梁钢材板件的最短屈曲失稳时间,提出桥梁最佳的抗火救援时间。

1 桥梁火灾热释放率增长模型确定

1.1 工程概况

武汉杨泗港长江大桥为城市中心一条重要的交通通道,主桁为华伦式桁架,由钢材 Q345qD 焊接而成,双层共高 10 m,单个钢桁梁焊接节段长度为 9 m。主桁的上弦杆、下弦杆横截面采用矩形加劲肋截面,弦杆的横向距离为 28 m,内设置加劲肋,上下弦杆之间的竖杆采用 I 形截面,斜向腹杆采用矩形加劲肋截面。主缆跨度布置为 $465\text{ m}+1\text{ }700\text{ m}+$

465 m,主缆矢跨比为 1/9,采用抗拉强度为 1 960 MPa 的锌-铝合金镀层钢丝。吊索采用公称抗拉强度为 1 870 MPa 的锌-铝合金镀层钢芯钢丝绳,吊索钢丝绳公称直径为 70 mm,上层为 6 车道城市快速路,下层为 4 车道城市主干路,在下层两侧设置非机动车道,主桥总体布置见图 1。

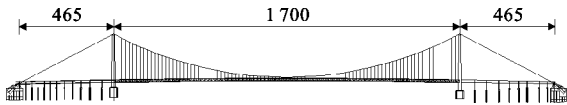


图 1 双层悬索桥主桥立面布置(单位:m)

Fig. 1 Vertical Layout of Double-deck Suspension Bridge (Unit:m)

1.2 油罐车热释放率增长模型确定

Ingason^[10]通过热能值为 144 GJ、火灾规模为 30 MW 燃烧 100 min 的货车试验,实测出了该货车实际随时间变化的热释放率增长曲线,然后与规模相同的线性、平方、指数(燃料控制)、指数(通风控制)4 种不同增长模式的热释放率曲线进行对比。结果表明,指数(燃料控制)增长模型的热释放率与实测值最为接近,误差较小。

桥梁火灾具有足够的氧气燃烧,且本研究中不考虑风速的作用,因此确定采用指数(燃料控制)热释放率增长模型。根据指数增长模型 7 种火灾规模,等效确定出火源的长度和宽度,给出单位面积的热释放率,见表 1,对比相应火源燃烧的火焰尺寸和温度特征。

表 1 火灾场景下的热源参数

Tab. 1 Heat Source Parameters of Fire Scenes

| 火灾规模 | 火源长度/m | 火源宽度/m | 热释放率/ (MW · m ⁻²) |
|--------------|--------|--------|----------------------------------|
| 场景 1(8 MW) | 4 | 2.0 | 0.89 |
| 场景 2(25 MW) | 9 | 2.5 | 1.33 |
| 场景 3(75 MW) | 10 | 2.5 | 3.00 |
| 场景 4(100 MW) | 10 | 2.5 | 4.00 |
| 场景 5(150 MW) | 10 | 2.5 | 6.00 |
| 场景 6(175 MW) | 12 | 2.5 | 5.83 |
| 场景 7(200 MW) | 12 | 2.5 | 6.67 |

采用 FDS 对表 1 给出的 7 种火灾场景进行燃烧模拟,燃烧模型网格边界在火源长度方向的尺寸为 20 m,宽度方向的尺寸为 20 m,高度方向的尺寸为 20 m,总共划分 19 800 个网格。每种场景的热释放率按照表 1 对应的热释放率进行定义。计算对比燃烧过程中火焰尺寸形状、火灾达到的最高温度,确定危害性最大的火灾场景,以此火灾场景作为悬索桥热分析火源。

由于篇幅限制,仅给出场景 7 中火源燃烧火焰形状及温度场云图,见图 2。不同场景下火源燃烧火焰的分布有很大不同,火源燃烧所能达到的最高温度差别很大,场景 1 达到的最高温度仅为 260 ℃,火焰高温区的高度仅为 6 m,场景 7 达到的最高温度为 1 200 ℃左右,且高温区域的火焰高度会达到 15 m。场景 7 中的火源为油罐车,油罐车火灾燃烧升温速率非常快,影响面积大,燃烧稳定后持续时间长,火焰温度高,对流辐射能力很强,危害性非常大。

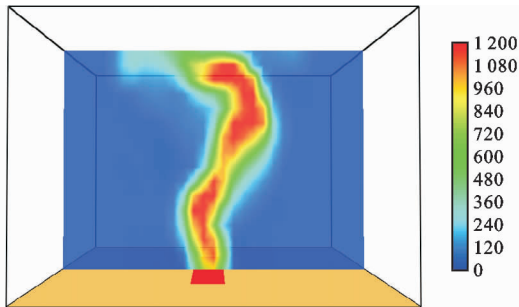


图 2 场景 7 中火源火焰形状及温度场分布(单位:℃)

Fig. 2 Flame Shape and Temperature Field Distribution of Fire Source in Scene 7 (Unit:℃)

桥梁的防火计算和设计应当以最不利火灾规模为原则,故本文将表 1 中场景 7(200 MW 的油罐车)的火源作为火灾的起火源,火源热释放率模型为指数(燃料控制)增长模型,其热释放率增长函数曲线见图 3,钢材随温度变化的热工参数和力学参数按照文献[11]~[16]取值,计算分析此火灾场景下桥梁结构的高温瞬态温度场及力学性能。

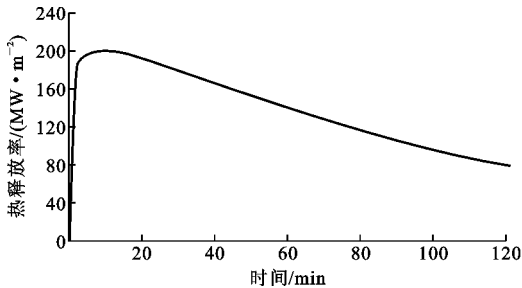


图 3 悬索桥油罐车热释放率指数增长曲线

Fig. 3 Heat Release Rate Exponential Growth Curve of Tanker on Suspension Bridge

2 双层公路悬索桥热分析模型及最危险火灾场景确定

2.1 双层公路悬索桥危险火灾场景

文献[2]通过对单层三塔四跨悬索桥的高温力学性能研究指出,其最危险火灾场景为:油罐车燃烧位置纵桥向位于桥梁的主跨跨中,横桥向位于主

吊索旁的最外侧车道。由于双层桥梁空间结构的特殊性,导致双层桥的抗火计算和单层桥会有明显的不同。油罐车在桥梁上层车道发生火灾时,主要危害桥梁缆索体系。油罐车在桥梁下层车道发生火灾时,对下层加劲梁的影响较小,但由于火焰的对流辐射作用,对桁架杆和上层加劲梁的影响很大。因此,双层悬索桥受火灾影响明显的构件为吊索、主缆、上层加劲梁端部横梁、桁架杆。

综合上述原则,本文设置 2 个危险火灾场景:①油罐车燃烧纵桥向位于桥梁上层主跨跨中,横桥向位于最外侧车道主缆吊索旁,此场景下重点研究吊索的高温力学性能;②油罐车燃烧纵桥向位于桥梁下层主跨跨中,横桥向位于防撞护栏外的非机动车道,该场景下重点研究桁架杆和上层加劲梁钢梁板件的高温力学性能,危险火灾场景的位置见图 4。

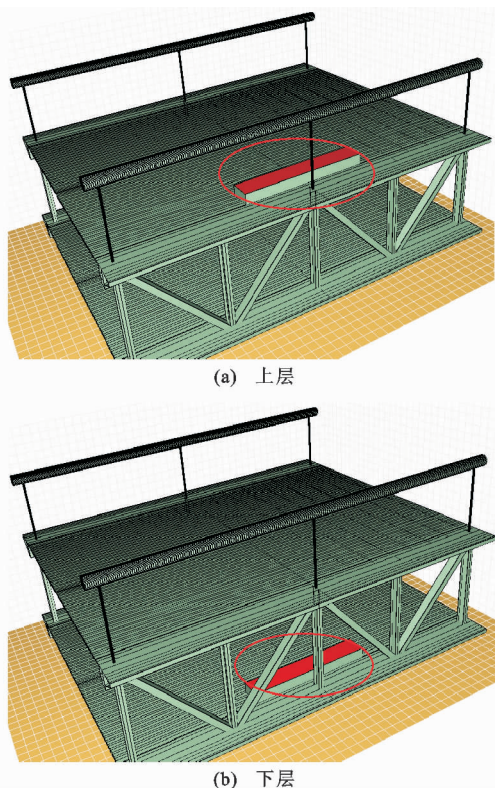


图 4 悬索桥危险火灾场景示意

Fig. 4 Dangerous Fire Field Diagram of Suspension Bridge

2.2 双层公路悬索桥热分析模型

采用 FDS 软件建立双层悬索桥跨中节段热分析模型,以油罐车火源尺寸和位置定义计算坐标系,火源长度方向为 x 轴,宽度方向为 y 轴,竖向为 z 轴,坐标原点定义在火源中心。油罐车火源在桥梁长度方向上的尺寸为 12 m,宽度为 2.5 m。桥梁横断面尺寸为 32.5 m,桥梁跨中节段模型在 y 方向(横桥向)的尺寸为 32.5 m,见图 5。

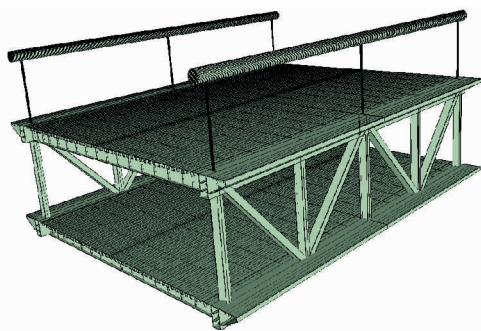


图 5 双层公路悬索桥热分析模型

Fig. 5 Thermal Analysis Model of Double-deck Highway Suspension Bridge

模型网格边界尺寸在纵桥向上为 52 m,网格划分为 52 段,宽度方向为 40 m,网格划分为 40 段,高度方向为 24 m,网格划分为 24 段。在吊索、主缆、桁架竖杆、斜杆、上下弦杆、钢梁顶板底板、腹板、加劲肋处按照构件细部尺寸加密网格,模型总共 364 820 个网格。模型在吊索、主缆、桁架竖杆、斜杆、上下弦杆、钢梁顶板底板、腹板、加劲肋处布置热电偶测点,测量相应部位瞬态温度场。

3 油罐车火灾下双层公路悬索桥瞬态温度场研究

3.1 油罐车上层最外车道燃烧瞬态温度场分析

火源燃烧过程中火焰烟气及火源的升温曲线如图 6 所示,火源燃烧时温度在 22 min 之前上升迅速,22 min 时达到 1 200 °C 以上并且趋于稳定,随后在 1 250 °C 左右波动。

由于火焰对流和辐射作用,吊索温度会迅速升高,由于吊索截面尺寸较小,吊索中心点和吊索最外层的温度变化趋势基本一致,吊索温度场云图及吊索随时间变化的温度曲线见图 7。吊索温度在火灾发生后 32 min 时达到 900 °C 以上,随后趋于稳定。

高温会使吊索弹性模量和抗拉强度发生大幅度下降。火灾前 16 min,由于吊索温度上升速率较慢,弹性模量和抗拉强度小幅度下降。16 min 后,吊索钢丝的温度迅速升高,弹性模量和抗拉强度下降速率显著增大,弹性模量在 36 min 时下降到常温下的 1%,此时弹性模量基本丧失,抗拉强度在 36 min 时下降到常温下的 19%。

在油罐车燃烧的高温作用下,桥面铺装的温度会迅速升高,进而将温度传给加劲梁顶板和上弦杆。桥面铺装上层温度在 12~26 min 之间上升速率最大,在 32 min 时温度达到 900 °C 以上,随后趋于稳

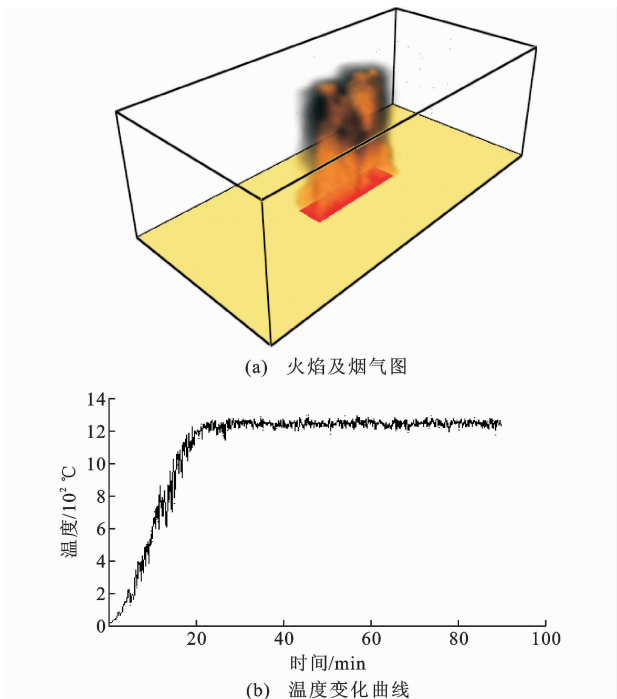


图 6 火源烟气尺寸及温度变化曲线

Fig. 6 Fire Source Flue Gas Dimensions and Temperature Variation Curve

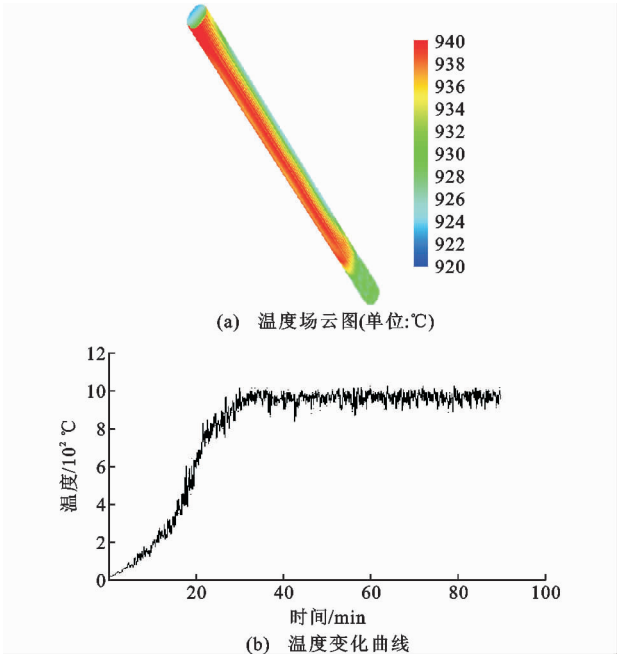


图 7 吊索温度场云图与温度变化曲线

Fig. 7 Nephogram of Sling Temperature Field and Temperature Variation Curve

定。桥面铺装下层温度在前 18 min 时上升速率较小,18 min 后上升速率增大,在 44 min 时温度达到 600 °C 以上,随后趋于稳定。上层加劲梁顶板温度由于桥面铺装的热传导作用会升高,升温速率的变化规律和桥面铺装类似,且温度的升高滞后于桥面

铺装,在 40 min 时温度达到 450 °C 以上,随后趋于稳定,如图 8 所示。

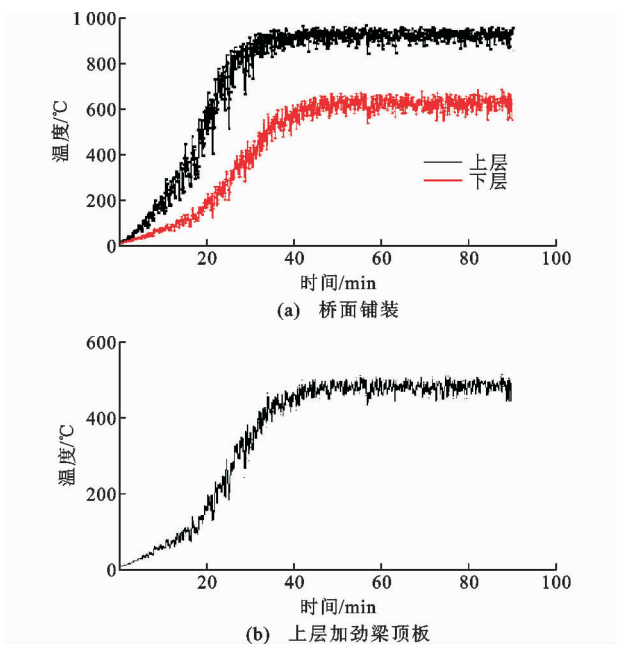


图 8 桥面铺装与上层加劲梁顶板温度变化曲线

Fig. 8 Temperature Variation Curves of Bridge Deck Pavement and Top Stiffening Beam Roof

上层加劲梁顶板的弹性模量和强度将随温度发生变化,但由于所达到的最高温度低于 500 °C,故降低幅度相对较小,弹性模量在 58 min 时降低到常温下的 60%,强度的下降速率略小于弹性模量。上层横梁腹板竖向加劲肋在油罐车燃烧期间达到的最高温度在 220 °C 左右,温度较低,力学性能基本保持不变。上弦杆温度在油罐车燃烧期间达到的最高温度在 330 °C 左右,升温速率较慢,达到的最高温度较低。

计算结果表明,油罐车在桥梁上层最外侧车道燃烧时,对桥梁的吊索影响特别大,吊索的弹性模量和抗拉强度会随着吊索的温度急剧上升而大幅度降低。上层加劲梁钢材板件的温度由于桥面铺装层的隔热作用上升幅度较低,弹性模量和强度下降程度较低,安全储备较大。

3.2 油罐车下层非机动车道燃烧瞬态温度场分析

由于桥梁下层为双向 4 车道,外侧为非机动车道。本文研究在计算时考虑最不利极端情况,即油罐车撞破非机动车道的护栏,进入非机动车道燃烧起火。上层钢梁底板直接承受油罐车燃烧导致温度迅速升高,在前 18 min 上升速率相对较低,18 min 后上升速率增大,在 48 min 时温度达到 900 °C 以上,随后趋于稳定,并在 940 °C 左右上下波动,温度

场云图与变化曲线见图 9。

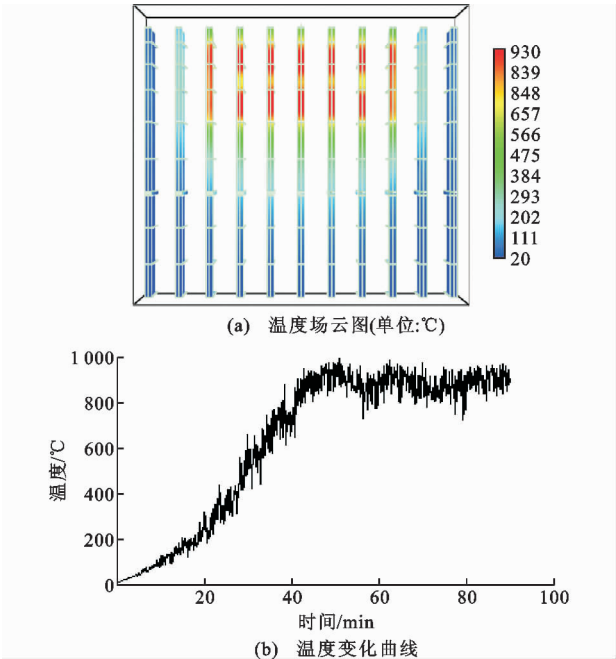


图 9 上层钢梁底板温度场与温度变化曲线
Fig. 9 Temperature Field and Temperature Variation Curve of Upper Steel Girder Bottom Plate

火灾发生后前 18 min, 由于上层钢梁底板温度上升速率较慢, 弹性模量小幅度下降。18 min 后, 上层钢梁底板的温度迅速升高, 弹性模量下降速率显著增大; 强度在前 24 min 下降速率稍慢, 随后增大。

上层横梁腹板由于底板热传导作用温度会升高, 温度变化规律和底板相似, 且温度的升高稍滞后于底板, 在前 22 min 上升速率较低, 22 min 后上升速率增大, 50 min 时温度达到 800 °C 以上, 随后趋于稳定, 并在 830 °C 上下波动, 见图 10。

上层钢梁顶板在火焰对流辐射作用下温度会升高, 但由于顶板吸收的热量一部分传递给混凝土桥面板和桥面铺装, 故温度升高速率稍滞后于腹板, 在前 24 min 上升缓慢, 24~42 min 上升迅速, 在 52 min 温度达到 700 °C 以上, 随后趋于稳定。除了上层钢梁底板直接承受火焰温度较高外, 外侧的竖杆和斜杆也受了较大影响。离油罐车燃烧最近的竖杆 1 温度上升迅速, 在前 16 min 上升速率较低, 16 min 后上升速率增大, 在 34 min 时达到 800 °C 以上, 随后趋于稳定。邻近竖杆 1 的竖杆 2 由于离火源较远, 温度达不到竖杆 1 的温度, 但仍受火源影响, 在前 18 min 上升速率较低, 18 min 后上升速率增大, 在 52 min 时达到 600 °C 以上, 随后趋于稳定, 并在 600 °C 以上波动, 见图 11。

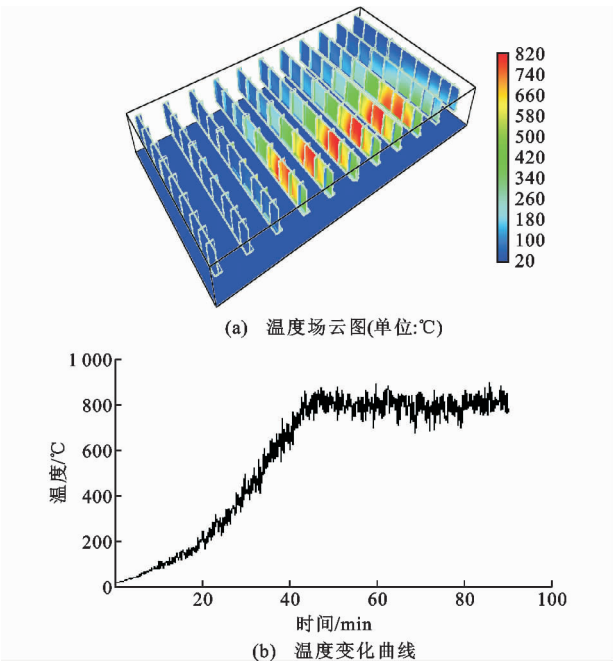


图 10 上层横梁腹板温度场与温度变化曲线
Fig. 10 Temperature Field and Temperature Variation Curve of Upper Beam Web

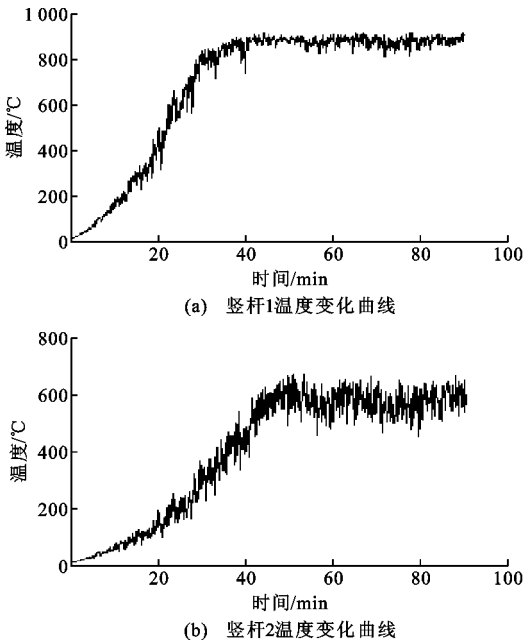


图 11 竖杆 1、竖杆 2 温度变化曲线
Fig. 11 Temperature Variation Curves of Vertical Bar 1 and Vertical Bar 2

斜杆在油罐车燃烧作用下温度也上升较快, 最高温度略小于竖杆 1。斜杆温度在前 16 min 上升速率较低, 16 min 后上升速率增大, 在 44 min 时达到 800 °C 以上, 随后趋于稳定, 并在 850 °C 左右波动。上弦杆在火焰燃烧下也达到了较高的温度, 在前 18 min 上升速率较低, 18 min 后上升速率增大,

在 46 min 时达到 600 ℃ 以上,随后趋于稳定。由于桥面铺装的隔热作用,下弦杆在油罐车燃烧期间达到的最高温度在 330 ℃ 左右,上升速率缓慢,受火源影响较小。

计算结果表明,油罐车在桥梁下层非机动车道燃烧时,对上层加劲梁钢材板件和桁架杆的影响很大,上层加劲梁顶板、底板、腹板、桁架杆竖杆、斜杆的温度会随着火焰的对流辐射作用大幅度上升,相应的弹性模量和强度下降程度很大。

4 油罐车火灾下双层公路悬索桥高温力学性能分析

4.1 双层悬索桥三维空间力学有限元模型建立

采用有限元法建立双层悬索桥全桥有限元模型,跨中油罐车燃烧影响区域主桁杆件由 Shell63 单元建模,混凝土桥面板由 Solid45 模拟,缆索体系由 Solid45 模拟。其他部位加劲梁钢梁和混凝土桥面板由 Beam188 单元模拟,缆索体系由 Link10 模拟,主塔由 Beam188 模拟,跨中精细化节段与桥梁其他部位通过耦合边界自由度方法连接,全桥共 361 248 个节点和 322 514 个单元,见图 12。模型首先将油罐车热释放率函数定义的热荷载施加到火灾区域,计算出相应部位的瞬态温度场,然后将温度场当作荷载,施加到力学分析模型中,力学有限元模型中通过温度荷载定义变化的钢材弹性模量与强度,而油罐车火灾下温度为时间的函数,故力学有限元模型中通过间接耦合法计算得出随时间变化的钢材弹性模量与强度,再结合桥梁恒载和活载分析火灾下悬索桥随时间变化的高温力学性能。

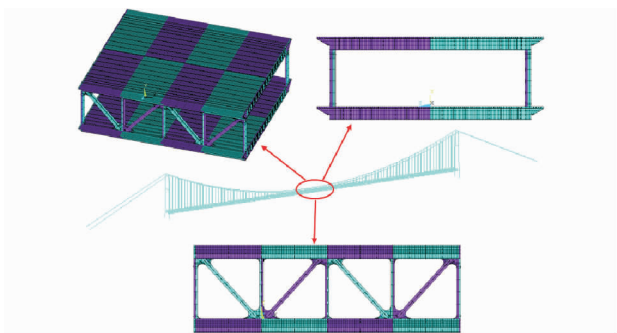


图 12 双层悬索桥三维有限元模型

Fig. 12 Three-dimensional Finite Element Model of Double-deck Suspension Bridge

4.2 吊索高温力学性能及破坏时间分析

桥梁的活载根据计算影响线进行施加,使主缆和吊索受到最不利荷载,常温时在恒载作用下跨中主缆轴力为 506 382 kN,应力为 689.2 MPa,跨中

吊索的轴力为 3 790 kN,应力为 233.5 MPa,。恒载+车辆荷载+非机动车道荷载作用下跨中主缆最大轴力为 586 316 kN,应力为 797.9 MPa,最小轴力为 506 584 kN,应力为 692.5 MPa,吊索最大轴力为 4 582 kN,应力为 282.3 MPa,最小轴力为 3 845 kN,应力为 236.9 MPa,悬索桥跨中在恒载+活载作用下最大挠度为 3.677 m,见图 13。

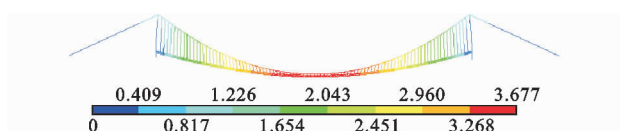


图 13 恒载+活载下全桥挠度(单位:m)

Fig. 13 Bridge Deflection Under Constant Load and Live Load (Unit:m)

随着火灾时间的推移,吊索所受到的应力会逐渐增大。吊索应力在火灾前 12 min 增大较慢,随后上升幅度较大,在 36 min 时,吊索应力增大到 362.4 MPa,达到抗拉强度,即吊索在 36 min 时断裂,见图 14。

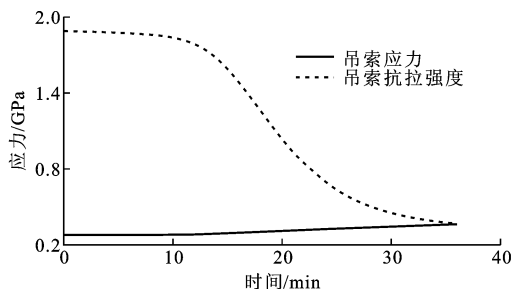


图 14 跨中吊索应力与抗拉强度随时间变化

Fig. 14 Stress and Tensile Strength of Mid-span Sling Variations with Time

主梁跨中挠度会随着桥梁的高温力学性能发生变化,在 58 min 时,悬索桥的挠度由常温下的 3.677 m 增加到 3.854 m。挠度在前 36 min 上升速率较大,由于 36 min 时跨中吊索会发生破坏从而退出工作,致使桥梁发生应力重分布,36 min 后挠度上升速率变慢,见图 15。

计算结果表明,油罐车在桥梁上层最外侧车道发生火灾时,对桥梁的主缆和吊索力学特性影响非常大,随着燃烧的持续进行,吊索由于抗拉强度的大幅度降低,最终将发生破坏。由图 14 可知,吊索的抗拉强度在火灾发生后的前 16 min 下降幅度较小,而在 20 min 后下降速率急剧增大,最终在 36 min 时等于吊索高温下的应力,发生破坏。在 36 min 内吊索的应力增大速率较慢,上升幅度较小,吊索的破坏主要是由于高温下的抗拉强度退化造成。桥梁抗

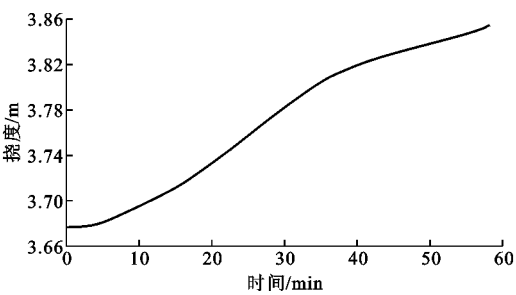


图 15 火灾下悬索桥竖向挠度变化曲线
Fig. 15 Vertical Deflection Variation Curve of Suspension Bridge Under Fire

火救援时间要以桥梁结构关键部位的最短损失破坏时间、救援过程耗费时间及灭火后桥梁结构具有足够的安全储备为原则,故油罐车在悬索桥上层车道燃烧时,双层公路悬索桥的最佳抗火救援时间应为火灾发生后的 16 min 内,此时间段内吊索抗拉强度的折减程度较低,安全储备较大,且留有富余的时间,以免火势继续增长危及主缆。

4.3 加劲梁钢材板件高温屈曲失稳研究

根据油罐车火灾下桥梁各部位实际的升温情况对加劲梁各部位进行弹性模量折减替换。由温度场的计算云图可知,加劲梁各部位的温度场分布沿桥梁纵向和横向均有变化,本文将加劲梁温度场分为 3 个区域,对应 3 种不同变化的弹性模量,温度场计算云图中,红色区域定义为着火部位核心区,黄色区

域定义为着火部位次核心区,绿色和蓝色区域定义为着火部位外围区,根据温度场的实际三维空间分布赋予构件不同区域不同的弹性模量,使火灾后加劲梁弹性模量的分布变化最大程度符合实际情况,进行加劲梁的高温力学性能计算。

火灾发生前,计算分析桥梁跨中节段静力与屈曲特性,由于上层钢桁梁横梁端部腹板的受力状态为弯剪复合^[17-19],临界屈曲系数^[20]最小,最易失稳破坏。因此,活载按照横梁端部腹板的最不利受力状态施加。计算结果表明,常温下上层钢桁梁横梁端部腹板的上缘拉应力值为 49.6 MPa,下缘压应力值为 84.4 MPa,平均剪应力值为 34.9 MPa。底板平均压应力值为 85.7 MPa;临界屈曲系数为 3.831;桁架杆上弦杆应力为 92.8 MPa,下弦杆压应力为 98.5 MPa,竖杆压应力为 61.6 MPa,斜杆压应力为 54.7 MPa,常温下加劲梁挠度、应力、屈曲位置见图 16。

当油罐车火灾在桥梁下层非机动车道发生后,计算该场景起火后上层加劲梁板件屈曲特性变化情况。油罐车燃烧前 10 min 加劲梁温度上升速率较慢,40~45 min 阶段加劲梁温度达到高温,油罐车燃烧 45 min 时加劲梁高温力学性能见图 17。

将油罐车燃烧 0~45 min 期间高温下加劲梁的弹性模量、临界屈曲应力、临界屈曲系数的变化值列

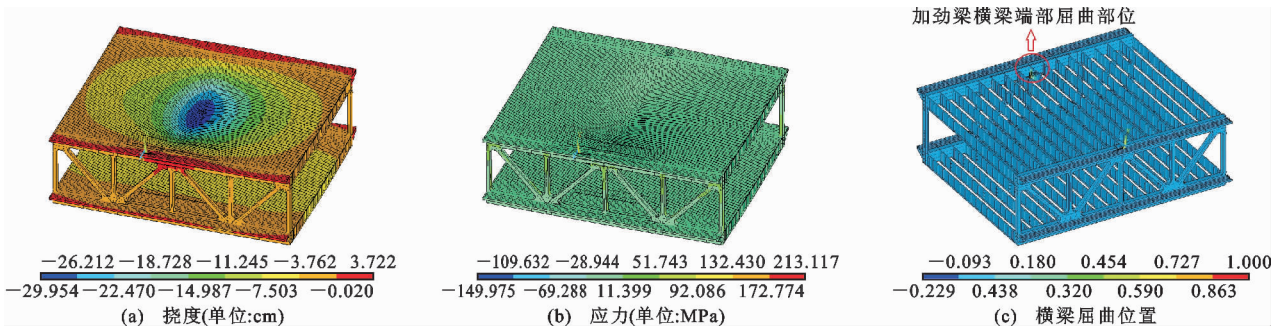


图 16 常温下上层加劲梁挠度与屈曲模式
Fig. 16 Deflection and Buckling Modes of Upper Stiffening Beams at Room Temperature

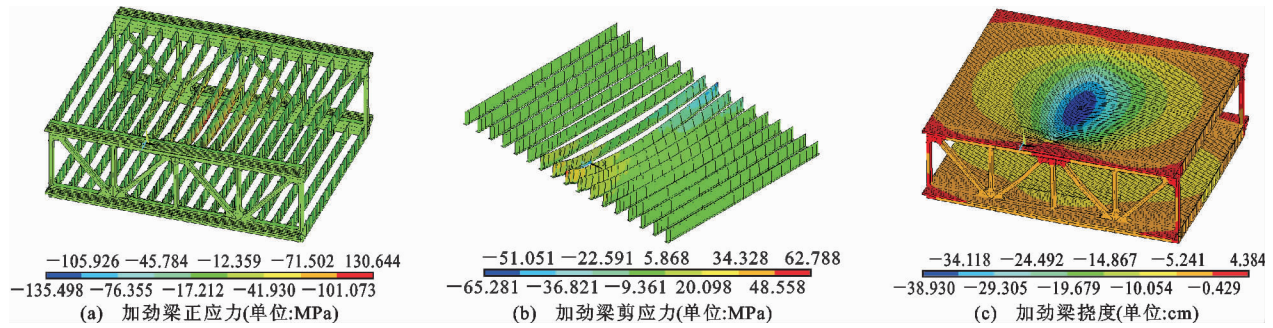


图 17 油罐车燃烧 45 min 上层加劲梁高温力学性能

Fig. 17 High Temperature Mechanical Properties of Upper Stiffening Beams with 45 min Combustion of Tanker Fire

于表 2,研究火灾下加劲梁弯剪屈曲特性。

表 2 计算结果表明,上层横梁腹板的临界屈曲应力系数在油罐车燃烧前 20 min 下降缓慢,20 min 后有较大幅度的下降。一辆油罐车在下层非机动车道燃烧 43 min 时,悬索桥钢桁梁火灾核心区的强度

下降到 107 MPa,但此时仍大于各关键部位实际应力值。上层加劲梁挠度从 29.954 mm 上升为 38.930 mm,下层加劲梁挠度变化较小,上下层加劲梁挠度均处于规范限值内。图 18 为上层加劲梁高温屈曲特性曲线。

表 2 上层加劲梁钢材板件屈曲特性

Tab. 2 Buckling Characteristics of Upper Stiffening Beam Steel Plate

| 板件位置 | 参数 | 0 min | 20 min | 30 min | 40 min | 45 min |
|------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 加劲梁 | 火灾核心区弹性模量/GPa | 210.00 | 191.58 | 140.08 | 53.56 | 16.48 |
| | 火灾次核心区弹性模量/GPa | 210.00 | 197.76 | 156.56 | 92.70 | 62.70 |
| | 火灾外围区弹性模量/GPa | 210.00 | 203.94 | 195.70 | 175.10 | 132.04 |
| 腹板 | 临界屈曲应力(弯曲)/MPa | 422.9 | 420.6 | 357.3 | 217.2 | 83.1 |
| | 临界屈曲应力(剪切)/MPa | 175.1 | 174.1 | 147.9 | 89.9 | 34.4 |
| 底板 | 临界屈曲应力/MPa | 499.6 | 496.8 | 422.0 | 256.5 | 98.2 |
| | 临界屈曲应力系数 | 3.831 | 3.810 | 3.236 | 1.967 | 0.753 |

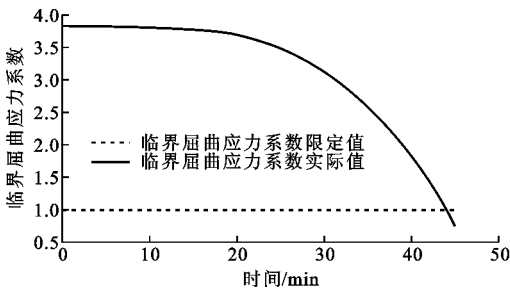


图 18 上层加劲梁高温屈曲特性曲线

Fig. 18 High Temperature Buckling Characteristic Curve of Upper Stiffening Beam

由图 18 可知,上层横梁腹板在火灾发生 43 min 时,临界屈曲应力系数降低到了 1 以下,腹板在此时出现屈曲失稳破坏。因此,油罐车下层最外侧车道燃烧时结构会先发生局部屈曲失稳破坏而非强度或位移破坏。

由油罐车下层非机动车道燃烧时加劲梁钢材板件的高温力学性能和屈曲失稳时间可知,下层横梁腹板由于受到弯剪复合作用,将会率先发生局部屈曲失稳,如果抗火救援不及时,火灾将会危及更多部位,造成更大的损失。由图 18 还可知,在火灾发生后的前 20 min,由于加劲梁所达到的温度较低,故其屈曲模态保持在一个较高的水平,略微下降,桥梁此时段内还具有较大的安全储备。20 min 后,在火源的对流辐射作用下加劲梁的升温速率显著增大,导致其弹性模量大幅度下降,最终在 43 min 时临界屈曲应力系数下降到 1,发生屈曲失稳破坏。综合考虑抗火救援的原则与本文的计算结果,油罐车下层非机动车道燃烧时,双层公路悬索桥的最佳抗火救援时间应为火灾发生后的 20 min 内,以免火势蔓

延造成桥梁结构其他形式的严重破坏。

5 结 语

(1)获得了油罐车燃烧分别位于双层钢桁梁悬索桥上层和下层时,各关键部位的三维瞬态温度场分布特征。通过热-结构耦合原理,掌握了吊索、加劲梁钢材板件、桁架杆高温下弹性模量、强度、应力、挠度随时间的变化规律。

(2)明确了高温下双层公路悬索桥缆索体系破坏失效规律及加劲梁钢材板件屈曲失稳特征,获得了油罐车火灾下吊索的最短破坏时间、加劲梁钢材板件屈曲失稳的最短时间以及相应的抗火救援时间。恒载+活载工况作用下,当油罐车在桥梁主跨跨中上层最外车道发生燃烧时,吊索的最短破坏时间为 36 min,此时抗火救援的最佳时间在 16 min 内;当油罐车在桥梁主跨跨中下层非机动车道发生燃烧时,钢材板件屈曲失稳的最短时间为 43 min,抗火救援的最佳时间在 20 min 内,此时桥梁结构先发生局部屈曲失稳破坏而不是强度或位移破坏。

参考文献:

References:

[1] KODUR V, GU L, GARLOCK M. Review and Assessment of Fire Hazard in Bridges[J]. Transportation Research Record, 2010, 2172: 23-29.

[2] 田 伟. 武汉鹦鹉洲长江大桥汽车燃烧下高温力学性能与风险防范措施研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.

TIAN Wei. Mechanical Properties Under High Temperature and Risk Prevention Measures for Wuhan Yingwuzhou Yangtze River Bridge Under Vehicle

- Fire[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [3] KODUR V, AZIZ E, DWAIKAT M. Evaluating Fire Resistance of Steel Girders in Bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(7): 633-643.
- [4] ALOS-MOYA J, PAYA-ZAFORTEZA I, GARLOCK M E M, et al. Analysis of a Bridge Failure Due to Fire Using Computational Fluid Dynamics and Finite Element Models[J]. *Engineering Structures*, 2014, 68: 96-110.
- [5] PERIS-SAYOL G, PAYA-ZAFORTEZA I, ALOS-MOYA J, et al. Analysis of the Influence of Geometric, Modeling and Environmental Parameters on the Fire Response of Steel Bridges Subjected to Realistic Fire Scenarios[J]. *Computers & Structures*, 2015, 158: 333-345.
- [6] AZIZ E M, KODUR V K, GLASSMAN J D, et al. Behavior of Steel Bridge Girders Under Fire Conditions[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 106: 11-22.
- [7] 刘世忠, 马朝旭, 李丽园, 等. 火灾下 PC 箱梁的损伤评估与加固设计[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(6): 94-100. LIU Shi-zhong, MA Chao-xu, LI Li-yuan, et al. Assessment and Strengthening Design of PC Box Girder Subjected to Fire Damage[J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(6): 94-100.
- [8] 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): 2838-2843. XIONG Wei, LI Yao-zhuang, YAN Jia-bao. Numerical 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): 2838-2843.
- [9] LIU F T, WU B, WEI D M. Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheet in Fire[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(7): 941-950.
- [10] INGASON H. Design Fires in Tunnels[C]//MO-LAG M. Proceedings of the Second International Symposium Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements. Lausanne: IEA, 2006: 1-11.
- [11] 闫治国, 朱合华. 火灾时隧道衬砌结构内温度场分布规律试验[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(2): 167-172. YAN Zhi-guo, ZHU He-hua. Experimental Study on Temperature Field Distribution of Tunnel Lining Structure in Fire Accidents[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(2): 167-172.
- [12] 张昊宇, 郑文忠. 1860 级低松弛钢绞线高温下力学性能[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(6): 861-865. ZHANG Hao-yu, ZHENG Wen-zhong. Mechanical Property of Steel Strand at High Temperature[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(6): 861-865.
- [13] 闫治国, 杨其新, 朱合华. 秦岭特长公路隧道火灾试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(11): 96-101. YAN Zhi-guo, YANG Qi-xin, ZHU He-hua. An Experimental Study of Fire Hazard at the Qinling Highway Tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(11): 96-101.
- [14] BENNETTS I, MOINUDDIN K. Evaluation of the Impact of Potential Fire Scenarios on Structural Elements of a Cable-stayed Bridge[J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2009, 19(2): 85-106.
- [15] 施键梅, 毛小勇, 刘鑫峰. 火灾高温下隧道衬砌结构的变形性能研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2015, 35(6): 785-791. SHI Jian-mei, MAO Xiao-yong, LIU Xin-feng. Research on Deformation Performance of Tunnel Lining Structures Under High Temperature of Fire[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2015, 35(6): 785-791.
- [16] 吕学涛, 杨华, 张素梅. 三面受火的方钢管混凝土柱耐火极限[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(3): 198-203. LU Xue-tao, YANG Hua, ZHANG Su-mei. Fire Resistance Limit of Concrete-filled Square Steel Tube Columns Exposed to Three-faced Fire[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(3): 198-203.
- [17] XU M C, SOARES C G. Assessment of Residual Ultimate Strength for Wide Dented Stiffened Panels Subjected to Compressive Loads[J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 316-328.
- [18] KHEDMATI M R, ZAREEI M K, RIGO P. Sensitivity Analysis on the Elastic Buckling and Ultimate Strength of Continuous Stiffened Aluminium Plates Under Combined In-plane Compression and Lateral Pressure[J]. *Thin-walled Structures*, 2009, 47(11): 1232-1245.
- [19] GALEA Y, MARTIN P O. Longitudinally Stiffened Plates in Eurocode 3: Calculation of the Global Critical Buckling Stress[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(11): 1345-1353.
- [20] RAHBAR-RANJI A. Elastic Buckling Analysis of Longitudinally Stiffened Plates with Flat-bar Stiffeners[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 58: 48-59.