

中国公路学会关于发布《公路桥梁缆索系统抗火设计指南》
的公告

中国公路学会文件

公学字〔2025〕160号

中国公路学会关于发布《公路桥梁缆索系统 抗火设计指南》的公告

现发布中国公路学会标准《公路桥梁缆索系统抗火设计
指南》（T/CHTS 10262-2025），自2025年12月3日起实
施。

《公路桥梁缆索系统抗火设计指南》（T/CHTS
10262-2025）的版权和解释权归中国公路学会所有，并委托
主编单位南京市公共工程建设中心负责日常解释和管理工作。



公众号·中国公路学会标准

ICS 93.040
CCS P 66

CHTS

团 标 准

T/CHTS 10262—2025

公路桥梁缆索系统抗火设计指南

Guidelines for Fire Resistance Design of Cable Systems for
Highway Bridges

2025-11-18 发布

2025-12-03 实施



中国公路学会发布

公路号·路桥隧视界

团 体 标 准

公路桥梁缆索系统抗火设计指南

**Guidelines for Fire Resistance Design of Cable Systems for
Highway Bridges**

T/CHTS 10262—2025

主编单位:南京市公共工程建设中心

发布单位:中国公路学会

实施日期:2025年12月3日

人民交通出版社

北京

公众号 · 路桥隧视界

标准类型：团体标准
标准名称：公路桥梁缆索系统抗火设计指南
标准编号：T/CHTS 10262—2025
主编单位：南京市公共工程建设中心
责任编辑：郭晓旭 韩亚楠
责任校对：赵媛媛 刘璇
责任印制：张凯
出版发行：人民交通出版社
地 址：(100011)北京市朝阳区安定门外馆斜街3号
网 址：<http://www.ccpcn.com.cn>
销售电话：(010)85285857
总 经 销：人民交通出版社发行部
经 销：各地新华书店
印 刷：北京交通印务有限公司
开 本：880×1230 1/16
印 张：2.75
字 数：千
版 次：2025年月第1版
印 次：2025年月第1次印刷
统一书号：15114·5630
定 价：44.00元
(有印刷、装订质量问题的图书，由本社负责调换)

 公众号 · 路桥隧视界

前　　言

根据《关于公布 2023 年第二批中国公路学会标准立项评审结果的通知》(公学字〔2023〕112 号)的要求,由南京市公共工程建设中心牵头承担《公路桥梁缆索系统抗火设计指南》(以下简称“本指南”的制定工作)。

本指南在广泛调研、系统总结公路桥梁缆索系统抗火性能分析及防护设计研究成果和实践经验的基础上,遵循“切实可行、指标合理科学规范、安全实施、绿色环保”的原则,积极吸收先进可靠的新技术成果,严格遵守国家现行有关法律法规和强制性标准的相关要求,对公路桥梁缆索系统抗火设计与防护进行了规定。已在南京新生圩长江大桥、常泰长江大桥、宁扬长江大桥等项目中得以应用。

本指南按照《中国公路学会标准编写规则》(T/CHTS 10001—2018)编写,包括 5 章、2 个附录,分别是:1 总则、2 术语和符号、3 基本规定、4 材料、5 抗火设计、附录 A 抗火防护方案隔热性能试验方法、附录 B 缆索系统抗火设计案例。本指南由章登精、冯斌负责起草第 1 章,周畅、李枝军负责起草第 2 章,李雪红、丁鸿志、董学智负责起草第 3 章,赵军、程昕、闵亮负责起草第 4 章,肖海珠、周祝兵、陈平负责起草第 5 章,徐秀丽、康壮苏、许可负责起草附录 A,唐贺强、原帅、江焕宏、陈会振负责起草附录 B。

本指南的某些内容可能涉及专利,本指南的发布机构不承担识别专利的责任。

本指南由中国公路学会提出并归口管理。

受中国公路学会委托,由南京市公共工程建设中心负责日常管理。请将实施过程中发现的问题和对标准的意见建议,反馈至南京市公共工程建设中心(地址:江苏省南京市建邺区江心洲街道梅子洲路 69 号,联系电话:025-85659269,电子邮箱:hy090125@qq.com),供修订时参考。

主编单位:南京市公共工程建设中心

参编单位:南京工业大学、江苏法尔胜缆索有限公司、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、江苏中矿大正表面工程技术有限公司、庞贝捷涂料(昆山)有限公司。

主要起草人:章登精、李雪红、周畅、徐秀丽、赵军、肖海珠、丁鸿志、周祝兵、唐贺强、冯斌、李枝军、董学智、闵亮、陈平、程昕、江焕宏、原帅、陈会振、许可、康壮苏。

主要审查人:李彦武、赵君黎、黄侨、钟建驰、黄健、鲍卫刚、朱国庆、李松、彭元诚、田克平。

目 次

1 总则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 基本规定	3
3.1 抗火目标	3
3.2 抗火计算	7
4 材料	9
4.1 桥梁结构钢高温性能	9
4.2 高强度钢丝高温性能	10
4.3 钢构件防火涂料性能	11
4.4 缆索抗火带性能	12
5 抗火设计	14
5.1 一般规定	14
5.2 抗火验算	16
5.3 抗火防护	16
附录 A 抗火防护方案隔热性能试验方法	21
A.1 试件	21
A.2 试验条件	21
A.3 测点布置	22
A.4 试件安装	23
A.5 高温试验	23
A.6 试验数据分析	23
附录 B 缆索系统抗火设计案例	24
B.1 工程概况	24
B.2 抗火目标	25
B.3 设计火灾工况	25
B.4 火灾响应及抗火验算	26
B.5 抗火防护设计	29
用词说明	33

公路桥梁缆索系统抗火设计指南

1 总则

1.0.1 为了规范和指导公路悬索桥、斜拉桥、斜拉悬索协作体系桥梁缆索系统抗火设计,制定本指南。

条文说明

本指南主要针对车辆火灾,不包括电力设施火灾、施工过程中由于焊接导致的火灾等其他火灾。以下火灾均指车辆火灾。

1.0.2 本指南适用于公路桥梁主缆、吊索、索夹、斜拉索及索梁连接件等构件的抗火设计及抗火防护。

1.0.3 缆索系统的抗火设计除应符合本指南的规定外,尚应符合有关法律、法规及国家、行业现行有关标准规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 缆索系统 cable system

主缆、吊索、索夹、斜拉索、索梁连接件等统称为缆索系统。

2.1.2 抗火设计 fire resistance design

为使缆索系统中各构件满足抗火目标而进行的设计。

2.1.3 设计火灾工况 design fire scenario

对缆索系统造成较大威胁或引发严重后果的火灾工况，包括火灾类型、火灾强度、火灾位置、风速、风向、燃烧模式和持续时间。

2.1.4 抗火承载能力极限状态 fire resistance ultimate limit state

缆索系统受火灾高温作用达到最大承载力或不适用于继续承载的变形状态。

2.1.5 抗火性能 fire resistance performance

缆索系统抵抗火灾高温作用的能力。

2.1.6 设计耐火时间 design fire resistance period

根据缆索系统各构件抗火目标，并考虑消防救援条件确定的需要达到的最短耐火时间。

2.1.7 设计临界温度 design critical temperature

根据缆索系统各构件抗火目标确定的能够承受的最高温度。

2.1.8 抗火带 fire resistance wrapping system

能形成抗火隔热保护层以提高结构耐火时间的可缠绕施工的带状复合抗火产品。

2.2 符号

Q_{\max} ——最大热释放速率；

$S_n(t)$ ——火灾荷载(作用)效应组合设计值；

$R_d(t)$ ——构件的抗力设计值；

$T(t)$ ——设计火灾工况下结构的温度作用；

T_s ——钢材的温度；

Q ——热释放速率；

t ——燃烧时间；

t_1 ——火灾达到最大热释放速率的时间；

t_m ——构件计算耐火时间；

t_d ——火灾持续时间；

α ——火灾增长系数；

T_m ——构件计算临界温度；

T_d ——构件设计临界温度。

3 基本规定

3.1 抗火目标

3.1.1 缆索系统宜采用基于性能的抗火设计方法,抗火与防护结合,在桥梁遭遇火灾时,可在设计耐火时间内保持构件承载能力和桥梁整体稳定性。

条文说明

桥梁抗火性能化设计是一种基于火灾场景和结构响应分析的先进设计方法,其核心是通过量化火灾对桥梁的破坏效应,结合材料性能、结构形式和抗火措施,确保桥梁在火灾中满足预定的安全性和功能性目标。本指南基于性能化设计理念,秉持“多级抗火目标确定—主要参数量化—火灾分析—火灾响应计算—抗火验算—方案优化及防护”设计思路制定。

3.1.2 缆索系统抗火目标应根据桥梁抗火类别和火灾强度类别确定,通过设计耐火时间和设计临界温度定量表征。

3.1.3 桥梁抗火类别可根据公路等级按表 3.1.3 分为 A、B 两类。

表 3.1.3 桥梁抗火类别

桥梁抗火类别	适用范围
A	高速公路、一级公路悬索桥、斜拉桥、斜拉悬索协作体系桥梁的缆索系统
B	其他公路悬索桥、斜拉桥、斜拉悬索协作体系桥梁的缆索系统

条文说明

为保证重点和节约投资,将桥梁分为 A 类、B 类两种抗火类别。

3.1.4 火灾强度类别可根据最大热释放速率,按表 3.1.4 分为 F1、F2、F3 三级。

表 3.1.4 火灾强度类别

火灾强度类别	最大热释放速率 Q_{max} (MW)	标准车尺寸(mm×mm×mm) (长×宽×高)
F1	30	10000×2550×4000 (长×宽×高)
F2	100	
F3	200	

条文说明

通过对《南京市城市交通隧道防火设计指南(试行)》、《城市地下道路工程设计规范》(CJJ 221—2015)、《美国公路隧道、桥梁和其他封闭式高速公路标准》(NFPA 502—2020)等规范以及相关机构(赫塞拉登、瑞士及挪威、荷兰、法国 CETU)和研究成果的调研,不同车辆的最大热释放速率如表 3-1 所示。其中,一般小型汽车(含电动车)火灾的最大热释放速率小于 10MW,大型客车(含电动车)的最大热释放速率一般在 20MW~30MW 之间,货车的最大热释放速率与运输货物有关,变化范围较大,大多在 20MW~150MW 之间;油罐车的最大热释放速率基本在 50MW~300MW 之间。

公众号 · 路桥隧视界

表 3-1 车辆火灾最大热释放速率调研结果

车辆类型	Q_{max} (MW)
小型汽车	2.5~10
大型客车	20~30
货车	20~150
油罐车	50~300

根据《城市道路交通工程项目建设规范》(GB 55011—2021)、《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值》(GB 1589—2016)等规范，并结合调研，统计得到各类代表车辆尺寸如表 3-2 所示。

表 3-2 代表车辆尺寸

车辆类型	长×宽×高(mm×mm×mm)	备注
汽车	4785×1890×1660	电动驱动
	4948×1836×1469	燃油驱动
客车	12000×2550×3300	电动驱动
	13100×2550×3695	燃油驱动
货车	9000×2550×4000	二轴，总质量 18t
	8600×2550×4000	三轴，总质量 27t
	10000×2550×4000	四轴，总质量 36t
	13000×2550×4000	五轴，总质量 43t
	13000×2550×4000	六轴，总质量 49t
油罐车	8475×2500×3250	油罐容积 12.6m ³
	10110×2550×3490	油罐容积 21m ³
	11750×2550×3500	油罐容积 31.1m ³
	11300×2500×3750	油罐容积 42m ³
	14440×2550×3800	油罐容积 50m ³

注：三轴~六轴货车的尺寸为半挂车尺寸，其他车辆尺寸为整车外轮廓尺寸，油罐车罐体长度大多在 6.0m~9.0m 之间。

为了方便设计，同时考虑性能化设计需求，根据调研得到的最大热释放速率分布范围将火灾强度分为 F1、F2、F3 三级，最大热释放速率分别设定为 30MW、100MW、200MW。由于车辆类型众多、尺寸多变，严格按照实际车辆尺寸进行火灾计算较为复杂，本指南综合考虑各类车辆的箱体尺寸、车辆高度、火灾燃烧模式、主要物质的单位面积热释放速率等多种因素，同时参考《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)，提出采用标准车对车辆尺寸进行统一，标准车的长、宽、高分别取为 10000mm、2550mm、4000mm。工程有特殊要求时，可根据实际情况和需求开展设计阶段专项研究。

3.1.5 缆索系统抗火目标可按表 3.1.5 分为 I、II、III 三级。

表 3.1.5 缆索系统抗火目标

桥梁抗火类别	火灾强度类别		
	F1	F2	F3
A	I 级	II 级	III 级
B	I 级	II 级	III 级

条文说明

抗火目标是性能化设计的基础,本指南考虑桥梁的重要程度和火灾强度,将抗火目标分为 I、II、III 三级。

3.1.6 缆索系统各构件在不同抗火目标下的抗火性能应符合表 3.1.6 的规定。

表 3.1.6 缆索系统各构件抗火性能

抗火目标	主缆	吊索	索夹	斜拉索	索梁连接件
I 级	处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 10%	处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 25%	处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 10%	处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 25%	处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 10%
II 级	处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 15%	可失效,但不应造成桥梁结构“解扣式”连续破坏	可局部损伤*,且安全度减小幅度小于 40%	可失效,但不应造成桥梁结构“解扣式”连续破坏	可局部损伤*,且安全度减小幅度小于 40%
III 级	处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 20%	可失效,但不应造成桥梁结构“解扣式”连续破坏	可失效*,但不应造成桥梁结构“解扣式”连续破坏	可失效,但不应造成桥梁结构“解扣式”连续破坏	可失效*,但不应造成桥梁结构“解扣式”连续破坏

注*:“局部损伤”是指构件局部能力/需求比可小于 1,但发生应力重分布后,构件依然可满足承载力要求;“失效”是指构件达到了抗火承载能力极限状态。

条文说明

本指南主要针对缆索系统,因此重点给出了主缆、吊索、索夹、斜拉索、索梁连接件在不同抗火目标时的抗火性能要求。由于主缆是悬索桥最重要的承重构件且无法更换,因此要求其在各级抗火目标下均处于弹性,且满足一定的安全余度要求;吊索和斜拉索是可更换构件,且更换起来相对较为方便,因此对其抗火性能要求进行了适当放宽,只要求在抗火目标为 I 级时处于弹性,安全度容许降低 25%,其他抗火目标下可失效,但不能造成桥梁结构连续破坏;索夹和索梁连接件发生损坏后可更换或维修,但相对较为困难,因此对其性能要求较吊索和斜拉索高。

3.1.7 缆索系统设计耐火时间可根据工程实际情况及消防救援条件确定,可取 45min、60min 或 90min,且不应小于 45min。

条文说明

桥梁所处地理位置及周边环境有较大差异,如山区等偏远地区消防救援力量到达时间较难控制。

周围环境复杂等影响施救速度,或工程具有特殊意义及要求,可根据工程实际条件和要求确定设计耐火时间。

3.1.8 缆索系统各构件设计临界温度可按表 3.1.8 确定。

表 3.1.8 设计临界温度

抗火目标	主缆	吊索	索夹	斜拉索	索梁连接件
I 级	截面平均温度≤200℃,且最外侧钢丝温度≤300℃	截面最外侧钢丝温度≤300℃	紧箍主缆部分截面内表面温度≤300℃;索夹耳板≤400℃,索夹螺杆根据试验确定*	截面最外侧钢丝温度≤300℃	加劲梁耳板、锚拉板、主梁耳板、叉形耳板(结构钢)温度≤400℃,销轴和叉形耳板(高强度钢)根据试验确定*
II 级	截面平均温度≤225℃,且最外侧钢丝温度≤300℃	—	紧箍主缆部分截面内表面温度≤300℃; 索夹耳板≤550℃,索夹螺杆根据试验确定*	—	加劲梁耳板、锚拉板、主梁耳板、叉形耳板(结构钢)温度≤550℃,销轴和叉形耳板(高强度钢)根据试验确定*
III 级	截面平均温度≤275℃,且最外侧钢丝温度≤300℃	—	紧箍主缆部分截面内表面温度≤300℃	—	—

注*:索夹螺杆、销轴和叉形耳板(高强度钢)一般采用合金结构钢,属于高强度钢,在火灾高温作用下的力学性能与结构钢有所不同,设计临界温度应根据试验确定。

条文说明

温度直接影响钢材的物理、力学性能,也决定着各构件的损伤程度。不同等级抗火目标性能要求不同,结合表 3.1.6 的性能要求及本指南第 4.1 节和第 4.2 节材料高温性能给出了各构件的设计临界温度。

主缆直径一般较大,存在明显的温度梯度,严格按照温度梯度分析主缆的力学响应实施起来较为复杂,另外,考虑到主缆直径较小时,温度梯度较小,控制外侧钢丝温度不超过 300℃,截面平均温度可能较高,导致主缆承载能力降低幅度较大,因此为方便设计,对主缆同时控制外侧钢丝温度和截面平均温度两个参数,各温度值可通过计算得到,具体计算方法见本指南第 5.1.4 条。对吊索和斜拉索只控制截面外侧钢丝温度。

索夹主要有两种形式:销接式索夹和骑跨式索夹,其中销接式索夹包括紧箍主缆的区域和索夹耳板区域,两部分的温度场分布差异较大,紧箍主缆区域的温度应满足主缆的设计临界温度,因此索夹与主缆接触区域的设计临界温度与主缆一致,耳板区域的温度分布存在一定的不均匀性,首先失效的区域一般在应力较大的区域,因此设计时可控制应力较大区域的温度;骑跨式索夹全部与主缆接触,其设计临界温度与主缆一致即可。根据试验,索梁连接件的失效部位可能发生在加劲梁耳板上,也可能使销轴发生弯曲变形或者叉耳断裂,因此应对各构件的温度进行控制,各构件温度可通过计算得到,具体

计算方法见 5.1.4 条。

由于索夹螺杆、销轴和叉形耳板(高强度钢)为合金结构钢,属于高强度钢,在高温作用下强度衰减幅度大于结构钢,设计临界温度应根据试验得到的强度折减系数与温度的关系曲线确定,若缺乏试验数据,可偏安全参考高强度钢丝的屈服强度折减系数与温度的关系。

3.2 抗火计算

3.2.1 缆索系统各构件应按抗火承载能力极限状态进行设计火灾工况下的抗火计算。

3.2.2 缆索系统各构件抗火承载能力极限状态应按式(3.2.2)要求进行验算:

$$S_m(t) \leq R_d(t) \quad (3.2.2)$$

式中: $S_m(t)$ ——火灾荷载(作用)效应组合设计值;

$R_d(t)$ ——构件的抗力设计值。

3.2.3 缆索系统抗火承载能力极限状态的荷载(作用)效应组合设计值应考虑火灾时可能同时出现的荷载(作用),按式(3.2.3)计算。作用系数的取值应符合现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)的有关规定。

$$S_m(t) = S\left(\sum_{i=1}^n G_{ik}, T(t), (\psi_0 \text{ 或 } \psi_1) Q_{ik}, \sum_{j=2}^n \psi_j Q_{jk}\right) \quad (3.2.3)$$

式中: $S(\cdot)$ ——作用组合的效应函数;

G_{ik} ——第 i 个永久作用的标准值;

$T(t)$ ——设计火灾工况下的温度作用($^{\circ}\text{C}$);

ψ_0 ——汽车荷载的频遇值系数;

$\psi_0 Q_{ik}$ ——汽车荷载的频遇值;

ψ_1 ——第 j 个可变作用的准永久值系数;

$\psi_1 Q_{jk}$ ——第 j 个可变作用的准永久值。

条文说明

《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)第 2.1.3 条指出“当发生可能遭遇的爆炸、撞击、罕遇地震等偶然事件及人为失误时,结构应保持整体稳固性,不应出现于起因不相称的破坏后果。当发生火灾时,结构应能在规定的时间内保持承载力和整体稳固性。”从该条文可知,火灾属于偶然事件。该规范第 3.1.4 条第 3 款规定“偶然设计状况,适用于结构遭受火灾、爆炸、非正常撞击等罕见情况”;第 3.1.7 条规定“进行承载能力极限状态设计时采用的作用组合,偶然设计状况应采用作用的偶然组合”。因此,构件抗火承载能力极限状态的荷载(作用)效应组合主要参考《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)和《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)的偶然组合表达形式,其中偶然作用为火灾下结构的温度作用,火灾效应组合具有明显的时间累计效果,因此用 $S_m(t)$ 表示,其中 t 为时间效应。

3.2.4 缆索系统设计火灾工况应包括火灾类型、火灾强度、火灾位置、风速风向、燃烧模式和持续时间,并应符合下列规定:

1 火灾类型为车辆火灾,且 1 辆车发生火灾,2 辆及以上车辆同时发生火灾以及桥面渠火灾应进行专项研究;

2 火灾强度可根据本指南第 3.1.4 条确定;

3 主缆和索夹顺桥向火灾位置可取中跨跨中和边跨端部等与桥面垂直距离较小的位置,吊索和

公众号·路桥隧道界

索梁连接件顺桥向可取吊索和索梁连接件所在位置,斜拉索应根据其布置形式取受火灾影响数量最多的区域;

4 火灾横桥向位置可取贴近构件表面或根据工程实际情况设置一定间距,贴近构件表面时风速可取为0,设置一定间距时需通过计算确定不利风速和风向;

5 当火灾位置贴近构件表面时,火灾燃烧模式可设为车辆顶面和近构件侧面同时燃烧,与构件有一定间距时,燃烧模式需考虑风速通过计算确定,索梁连接件的火灾燃烧面可设为桥面处;

6 火灾持续时间应不小于本指南第3.1.7条的设计耐火时间;

7 工程有特殊要求时,可开展抗火专项研究。

条文说明

设计火灾工况需考虑多种影响因素,火灾类型、火灾强度、火灾位置、风速风向、燃烧模式和持续时间均会对火灾温度场造成影响,继而影响各构件的温度场分布和力学响应。通过研究可知,当发生火灾的车辆贴近缆索系统构件时,顶面和近侧面燃烧且风速为0m/s时较为不利且高温影响高度较高,若火灾发生位置与缆索系统有一定距离,则需考虑不同燃烧模式和风速、风向通过计算确定设计火灾位置。对于索梁连接件,桥面池火更为不利,尤其当池火蔓延至连接件位置时温度会更高,根据索梁连接件布置位置、桥面排水措施等确定池火分布位置和范围。

本指南主要针对1辆车发生火灾的情况。实际火灾非常复杂,比如极端情况下可能发生多车连撞导致多辆车同时发生火灾、油罐车泄漏导致连续渠火等,或者工程有其他特殊要求,此时须开展专项研究。

3.2.5 缆索系统各构件的耐火时间和临界温度可采用抗火承载能力极限状态的荷载(作用)效应组合设计值,利用基于流体动力学及热力耦合的有限元方法计算,为设计火灾工况下各构件达到本指南第3.1.6规定的抗火性能时的时间和温度。

3.2.6 计算的耐火时间和临界温度不满足设计耐火时间和设计临界温度要求时,应对方案进行优化或对构件进行抗火防护,优化或防护后的构件应满足设计耐火时间和设计临界温度的要求。

条文说明

根据本指南第3.2.5条计算得到的耐火时间和临界温度若不满足第3.1.7条和第3.1.8条规定的设计耐火时间和设计临界温度要求,可对设计方案进行优化,可从以下几方面考虑:(1)增加护栏与缆索系统的距离、加强护栏的防护等级,将火灾车辆隔离在护栏外,增大火灾与缆索系统的水平距离,减小火灾影响;(2)优化缆索布置,增大火灾与缆索系统的间距;(3)优化车道布局,缩短消防响应时间;(4)优化纵横坡设置及排水系统设计,控制易燃液体或倾覆物质在桥面的蔓延与聚集;(5)减少可燃材料的使用,避免进一步助燃。若受各种因素影响无法进行方案优化或优化后依然无法满足抗火目标要求,则对缆索系统进行抗火防护。

4 材料

4.1 桥梁结构钢高温性能

4.1.1 在计算索夹和索梁连接件的火灾响应时,桥梁结构钢的热膨胀系数、热传导系数、比热容等物理参数可按公式(4.1.1-1)~公式(4.1.1-3)确定:

1 结构钢的热膨胀系数 α_s [m/(m·°C)]:

$$\alpha_s = \begin{cases} 0.8 \times 10^{-6} T_s + 1.2 \times 10^{-5} & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 750^\circ\text{C} \\ 0 & 750^\circ\text{C} < T_s \leq 860^\circ\text{C} \\ 2.0 \times 10^{-5} & 860^\circ\text{C} < T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.1.1-1)$$

式中: T_s ——钢材的温度(°C)。

2 结构钢的热传导系数 λ_s [W/(m·°C)]:

$$\lambda_s = \begin{cases} 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_s & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 800^\circ\text{C} \\ 27.3 & 800^\circ\text{C} < T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.1.1-2)$$

3 结构钢的比热容 C_s [J/(kg·°C)]:

$$C_s = \begin{cases} 425 + 7.73 \times 10^{-3} T_s - 1.69 \times 10^{-5} T_s^2 + 2.22 \times 10^{-8} T_s^3 & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 600^\circ\text{C} \\ 666 - \frac{13002}{T_s - 738} & 600^\circ\text{C} < T_s \leq 735^\circ\text{C} \\ 545 + \frac{17820}{T_s - 731} & 735^\circ\text{C} < T_s \leq 900^\circ\text{C} \\ 650 & 900^\circ\text{C} < T_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.1.1-3)$$

4.1.2 索夹和索梁连接件抗火验算时,桥梁结构钢在高温下的强度设计值可按公式(4.1.2-1)和公式(4.1.2-2)计算:

$$f_T = \eta_{cr} f \quad (4.1.2-1)$$

$$\eta_{cr} = \begin{cases} 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 300^\circ\text{C} \\ 1.24 \times 10^{-3} T_s^2 - 2.096 \times 10^{-5} T_s^3 + & \\ 9.228 \times 10^{-3} T_s - 0.2168 & 300^\circ\text{C} < T_s \leq 800^\circ\text{C} \\ 0.5 - T_s / 2000 & 800^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & T_s > 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.1.2-2)$$

式中: f_T ——高温下钢材的强度设计值(N/mm²);

f ——常温下钢材的强度设计值(N/mm²);

η_{cr} ——高温下钢材的屈服强度折减系数。

4.1.3 索夹和索梁连接件抗火验算时,桥梁结构钢在高温下的弹性模量可按公式(4.1.3-1)和公式(4.1.3-2)计算:

$$E_{cr} = \chi_{cr} E_s \quad (4.1.3-1)$$

$$\chi_{cr} = \begin{cases} \frac{7T_s - 4780}{6T_s - 4760} & 20^\circ\text{C} \leq T_s < 600^\circ\text{C} \\ \frac{1000 - T_s}{6T_s - 2800} & 600^\circ\text{C} \leq T_s \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & T_s > 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.1.3-2)$$

公众号 · 路桥隧道界

式中： E_a ——高温下钢材的弹性模量（N/mm²）；

E_s ——常温下钢材的弹性模量（N/mm²）；

χ_a ——钢材高温下的弹性模量折减系数。

条文说明

4.1.1~4.1.3条主要参考了《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)的相关规定。结构钢是指碳素结构钢和低合金结构钢，对于铸钢、合金结构钢，其高温物理性能及力学性能应通过试验确定。结构钢的高温折减系数可按式(4.1.2-2)和式(4.1.3-2)计算，也可按表4-1取值。常温下结构钢的强度设计值和弹性模量按现行《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)的规定取值。

表4-1 结构钢高温下屈服强度折减系数 η_{st} 和弹性模量折减系数 χ_{st}

温度(℃)		20	100	200	300	400	450	500	550
结构钢	η_{st}	1.000	1.000	1.000	1.000	0.914	0.821	0.707	0.581
	χ_{st}	1.000	0.981	0.949	0.905	0.839	0.791	0.727	0.637
耐火钢	η_{st}	1.000	0.980	0.949	0.909	0.853	0.815	0.769	0.711
	χ_{st}	1.000	0.968	0.929	0.889	0.849	0.829	0.810	0.790
温度(℃)		600	650	700	750	800	900	1000	—
结构钢	η_{st}	0.453	0.331	0.226	0.145	0.100	0.050	0.000	—
	χ_{st}	0.500	0.318	0.214	0.147	0.100	0.038	0.000	—
耐火钢	η_{st}	0.634	0.528	0.374	0.208	0.125	0.042	0.000	—
	χ_{st}	0.770	0.750	0.610	0.470	0.330	0.050	0.000	—

4.2 高强度钢丝高温性能

4.2.1 主缆、吊索、斜拉索在进行抗火验算时，高温下高强度钢丝的强度可按公式(4.1.2-1)确定。其中，屈服强度折减系数 η_{st} 宜通过试验确定，当缺少试验数据时，对于抗拉强度不超过 2100MPa 的高强度钢丝，可按公式(4.2.1)计算。

$$\eta_{st} = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{0.000128(T_s - 415)}} & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 800^\circ\text{C} \\ 0 & T_s > 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.2.1)$$

4.2.2 高温下的高强度钢丝的弹性模量可按公式(4.1.3-1)确定。其中，弹性模量折减系数 χ_{st} 宜通过试验确定，当缺少试验数据时，对于抗拉强度不超过 2100MPa 的高强度钢丝，可按公式(4.2.2)计算。

$$\chi_{st} = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{0.000128(T_s - 415)}} & 20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 800^\circ\text{C} \\ 0 & T_s > 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.2.2)$$

条文说明

4.2.1、4.2.2条为针对国内外学者及编制组试验数据拟合而成，试验的高强度钢丝最高抗拉强度为 2100MPa，当设计用高强度钢丝抗拉强度低于 2100MPa 且缺少高温材性试验数据时，高温折减系数

公众号·路桥隧道界

可按式(4.2.1)和式(4.2.2)计算,也可按表4-2取值。

表4-2 高强度钢丝高温下的屈服强度折减系数 η_{α} 和弹性模量折减系数 χ_{α}

温度(℃)	20	100	200	250	300	350	400	450
η_{α}	1.000	0.957	0.892	0.835	0.756	0.654	0.537	0.415
χ_{α}	1.000	0.970	0.925	0.885	0.827	0.749	0.650	0.536
温度(℃)	500	550	600	650	700	750	800	850
η_{α}	0.303	0.210	0.140	0.090	0.057	0.036	0.022	0.000
χ_{α}	0.418	0.308	0.217	0.147	0.097	0.062	0.040	0.000

4.3 钢构件防火涂料性能

4.3.1 桥梁缆索系统钢构件用防火涂料的性能应满足表4.3.1中规定的要求。

表4.3.1 防火涂料性能要求

序号	技术要求	技术指标
1	在容器中的状态	经搅拌后呈均匀细腻状态或厚液体状态,无结块
2	VOC	$\leq 100 \text{ g/L}$
3	pH值	≥ 7
4	无石棉	无石棉检出
5	干燥时间(表干)	$\leq 12 \text{ h}$
6	干膜密度	$\leq 1.4 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2$
7	初期干燥抗裂性	不应出现裂纹
8	黏结强度	$\geq 3.0 \text{ MPa}$
9	韧性	D638 延展性能 $\geq 2\%$
10	抗开裂性	T-Bar 冷热循环 ≥ 40 个循环后不开裂、不脱落
11	抗火性能	应满足 GB 14907 Ft1.00 等级以上
12	抗消防水冲击性能	在消防水冲击作用 30min 内防火涂层不发生剥落

条文说明

表4.3.1中,在容器中的状态、pH值、干燥时间(表干)、初期干燥抗裂性、黏结强度、抗火性能试验可按现行《钢结构防火涂料》(GB 14907)进行;VOC可按现行《工业防护涂料中有害物质限量》(GB 30981)对应涂料种类进行检测;无石棉可按现行《空气质量 散装材料 第1部分:商用散装材料中石棉的取样和定性测定》(ISO 22262—1)进行检测;干膜密度是指测量干燥成膜后的涂层的密度,可按现行《色漆和清漆不挥发物体积百分比的测定 第1部分:使用涂层试板测定不挥发物和根据阿基米德原理测定干膜密度的方法》(ISO 3233—1)进行检测;韧性可按现行《塑料拉伸性能的测定 第1部分:总则》(GB/T 1040.1)或《塑料拉伸性能的标准试验方法》(ASTM D638)等同等标准进行试验;抗开裂性试验可采用长400mm、高120mm、宽120mm、厚3.5mm的T型钢,按现行《钢结构防火涂料》(GB

公众号·路桥隧道界

14907)取样和涂层制备并养护后,以24h—25℃叠加24h 30℃环境下放置作为一个循环进行试验和评估。

4.3.2 防火涂料的设计使用寿命宜大于15年。

4.3.3 防火涂料的耐久性指标应满足表4.3.3中规定的要求。

表4.3.3 防火涂料耐久性能要求

序号	技术要求	技术指标
1	耐曝热性	720h试验后,涂层应无起层、脱落、空鼓、开裂现象,且隔热效率衰减量应≤10%
2	耐湿热性	504h试验后,涂层应无起层、脱落现象,且隔热效率衰减量应≤10%
3	耐冻融循环性	15次试验后,涂层应无开裂、脱落、起泡现象,且隔热效率衰减量应≤10%
4	耐碱性	360h试验后,涂层应无起层、脱落、开裂现象,且隔热效率衰减量应≤10%
5	耐盐雾腐蚀性	30次试验后,涂层应无起泡,明显的变质、软化现象,隔热效率衰减量应≤10%
6	耐紫外线辐照性	60次试验后,涂层应无起层、开裂、粉化现象,且隔热效率衰减量应≤10%
7*	耐老化性	ASTM D4587或同等标准无面漆保护下大于10000h以上的耐老化测试后 防火性能衰减15%以内
8*	耐水性	无面漆的吸水率在0.2%以内

注*:防火涂层若需达到15年以上的服务寿命,需要在前6项耐久试验项目的基础上满足第7和第8项的耐老化性和耐水性试验要求。

条文说明

表4.3.3中,耐曝热性、耐湿热性、耐冻融循环性、耐碱性、耐盐雾腐蚀性、耐紫外线辐照性等6项性能试验方法以及隔热效率衰减量测试和计算方法按现行《钢结构防火涂料》(GB 14907)标准进行;耐老化性能试验按现行《色漆和清漆 涂层的人工气候老化曝露 曝露于荧光紫外线和水》(GB/T 23987)、《色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射曝露 滤过的氙弧辐射》(GB/T 1865)和《色漆和清漆 涂层老化的评级方法》(GB/T 1766)或《涂料和相关涂层的荧光紫外线冷凝暴露的标准实施规程》(ASTM D4587)等标准在无面漆的情况下进行试验,防火性能衰减按现行《钢结构防火涂料》(GB 14907)标准的隔热效率衰减量测试和计算方法进行试验;耐水性按现行《漆膜吸水率测定法》(HG/T 3344)进行试验,必须在无面漆的情况下进行。

防火涂层和底漆以及面漆之间或其他材料复合使用时必须具备整体配套性和兼容性,包括和其他材料复合后,其整体耐久性应至少按表4.3.3中耐冻融循环和耐紫外线辐照性两项性能要求进行试验。

4.4 缆索抗火带性能

4.4.1 缆索抗火带性能应满足表4.4.1的要求。

表4.4.1 抗火带性能要求

序号	技术要求	技术指标
1	厚度(mm)	7±2
2	宽度(mm)	100~200

表 4.4.1 抗火带性能要求(续)

序号	技术要求	技术指标
3	拉伸荷载(N/25mm)	>500
4	热传导系数[W/(m·K),650℃]	<0.1
5	耐高温性能(℃)	>1100

条文说明

表 4.4.1 为缆索用抗火带基本性能参数,其中宽度为推荐值,具体可视实际工程施工缠带设备参数采用适合的尺寸,厚度 7mm 为建议的单层厚度,具体缠绕层数及单层厚度需结合抗火防护方案确定。耐高温性能是指抗火带主体抗火隔热材料(如高硅氧纤维、气凝胶等)在 1100℃灼烧 5min 后,材料外观无明显变化,用于确保选用的材料质量可靠。

4.4.2 抗火带应与被保护构件可靠结合,满足抗火防护要求。

4.4.3 在正常运行和维保条件下,抗火带设计使用寿命宜大于 20 年。

4.4.4 抗火带中的抗火隔热层应满足 1100℃灼烧 5min 后外观无明显变化的要求。

4.4.5 抗火带的比热容和等效热传导系数可通过试验确定,应符合现行《耐火材料 导热系数、比热容和热扩散系数试验方法(热线法)》(GB/T 5990)的有关规定。

5 抗火设计

5.1 一般规定

5.1.1 缆索系统抗火设计按照图 5.1.1 的设计流程进行,并应符合下列规定:

- 1 确定抗火类别和火灾强度类别;
- 2 确定设计耐火时间和设计临界温度;
- 3 确定缆索系统各构件的设计火灾工况;
- 4 确定热边界条件;
- 5 计算各构件火灾作用下的温度、应力、应变、变形等时程响应;
- 6 进行抗火验算;
- 7 进行方案优化或抗火防护;
- 8 再次计算直至满足抗火目标要求。

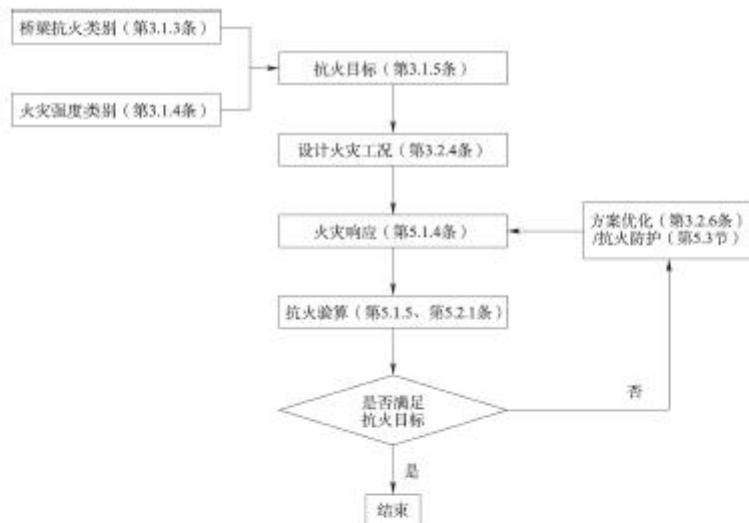


图 5.1.1 抗火设计流程

条文说明

缆索系统的抗火设计主要需解决 5 个问题:确定抗火目标、建立设计火灾工况、计算火灾响应、进行抗火验算、进行方案优化或设计抗火防护方案。首先根据 3.1 节的相关规定确定抗火目标,其次根据 3.2.4 条确定设计火灾工况,根据 5.1 节的相关规定计算设计火灾工况下的缆索系统的火灾响应,根据 5.1 节和 5.2 节的规定验算抗火性能,当抗火性能不满足要求时,根据 3.2.6 条对设计方案进行优化,或根据 5.3 节进行抗火防护设计,采取抗火防护措施,使优化或防护后的构件满足抗火目标要求。

5.1.2 车辆火灾最大热释放速率应符合 3.1.4 的规定,热释放速率曲线可采用公式(5.1.2)表示。

$$Q = \begin{cases} at^2 & 0 < t < t_1 \\ Q_{\max} & t_1 \leq t \leq t_d \end{cases} \quad (5.1.2)$$

式中:
 Q ——热释放速率(MW);
 a ——火灾增长系数(kW/s^2),可取 $0.1867 \text{ kW}/\text{s}^2$;
 t ——燃烧时间(s);
 t_1 ——火灾达到最大热释放速率的时间(s);
 Q_{\max} ——最大热释放速率(MW),根据 3.1.4 条确定;
 t_d ——火灾持续时间(s),根据 3.1.7 条确定。

条文说明

火灾的热释放速率曲线增长模型一般包括线型、平方型和指数型三种类型。其中,线型增长模型假设热释放速率呈线性均匀发展,与桥梁火灾差异较大;平方型增长模型假设热释放速率呈平方函数发展,与车辆火灾较吻合;指数增长模型假设热释放速率呈指数形式发展,忽略热释放速率稳定阶段,不适用于预测大型车辆火灾的发展过程。因此,采用平方型增长模型。

5.1.3 缆索系统热边界条件可采用火灾动力学软件按设计火灾工况计算确定。

条文说明

火灾模拟软件主要包括 FDS、CFAST、ANSYS Fluent、ANSYS CFX、Fire FOAM、FLACS 等计算流体动力学软件。FDS 基于大涡模拟(LES)方法,擅长模拟复杂几何空间内的火灾发展、烟气扩散和热传递,支持多种燃烧模型和热辐射模型,且由于其开源、拥有 PyroSim 前处理软件等优点,目前应用较为广泛。CFAST 基于区域模型,将空间划分为有限区域进行快速计算,输出简化温度曲线,适用于建筑结构的耐火验算。ANSYS Fluent 及 CFX 集成精确的 LES 端流模型和辐射传输算法,通过用户自定义函数实现火灾模拟,精度高但计算耗时,瞬态模拟收敛慢。Fire FOAM 基于有限体积法,支持多相流、燃烧和辐射的耦合求解,适合开发新型燃烧模型或化学反应机制。FLACS 主要为爆炸和可燃气体扩散设计,也支持火灾模拟。

5.1.4 缆索系统各构件火灾高温作用下的温度、应力、应变、变形,可采用有限元法利用专业软件按下列步骤计算:

- 1 建立缆索系统三维模型;
- 2 确定材料热工参数;
- 3 确定热边界条件;
- 4 计算构件温度时程曲线;
- 5 施加静力荷载及设置边界条件;
- 6 计算火灾下构件的应力、应变、变形时程曲线。

条文说明

有限元方法是目前结构火灾响应分析的主要方法,在火灾高温作用下,材料的热膨胀性能会在结构内部产生次应力,同时材料性能会发生变化,产生内力及应力重分布。在火灾响应分析时,热-力耦合分析方法是目前广泛采用的方法,可将绝热表面温度作为三维模型瞬态热分析的热边界条件,构件温度时程曲线可采用基于瞬态温度场分析方法计算,力学响应计算时需考虑材料非线性、几何非线性

和接触非线性及材料的热膨胀效应。

5.1.5 根据构件温度确定火灾高温作用下材料屈服强度折减系数，并满足下列要求：

1 主缆、吊索、斜拉索可根据截面平均温度按本指南第 4.2.1 条确定；

2 骑跨式索夹和销接式索夹可分别根据索夹和耳板常温下应力较大区域的温度按本指南第 4.1.2 条确定，索夹螺杆应根据试验确定。

3 索梁连接件中加劲梁耳板、锚拉板、主梁耳板、叉形耳板（结构钢）可根据常温下应力较大区域的温度按本指南第 4.1.2 条确定，销轴和叉形耳板（高强度钢）应根据试验确定。

条文说明

缆索系统各构件在火灾高温作用下存在明显的温度梯度，进行基于强度的构件承载能力验算时，需选择易损区域的温度进行验算。主缆、吊索、斜拉索沿径向存在温度梯度，可采用有限元方法进行精确模拟，在初步设计阶段，亦可近似取截面平均温度作为验算温度，按照本指南第 4.2.1 条确定强度折减系数；索夹及索梁连接件由于截面不规则，结构钢可取常温下应力较大区域的温度按本指南第 4.1.2 条确定强度折减系数，高强度钢则须通过试验确定。

5.1.6 缆索系统的抗火设计文件应注明缆索系统的抗火类别、火灾强度、构件的设计耐火时间和设计临界温度、构件的抗火防护措施、抗火防护材料的性能要求等。

5.2 抗火验算

5.2.1 缆索系统各构件的抗火验算宜采用临界温度法进行验算。在设计耐火时间内，火灾下各构件的计算临界温度不应高于各级抗火目标下的设计临界温度，并按公式(5.2.1)验算。

$$T_m \leq T_a \quad (5.2.1)$$

式中： T_m ——构件计算临界温度(℃)，可按照本指南第 5.1.4 条计算构件的升温历程，与设计耐火时间对应的温度即为计算临界温度；

T_a ——构件设计临界温度(℃)，可按本指南第 3.1.8 条确定。

条文说明

基于构件的抗火验算方法主要有三种：耐火极限法、承载力法、临界温度法，这三种方法是等效的，对于缆索系统抗火设计，临界温度法应用较为方便，建议采用该方法进行验算。

5.2.2 多辆车同时发生火灾或桥面渠火火灾等极端工况可能造成桥梁整体损坏或倒塌，应进行专项研究。

条文说明

在桥梁运营过程中，可能发生多车追尾或碰撞导致多辆车发生火灾，或者油罐车发生突发事故时，危险化学品长距离泄漏产生纵桥向长条状的渠火火灾，这两类火灾均可能造成连续多根吊索、斜拉索或索梁连接件失效，致使桥梁整体损坏甚至倒塌，对此极端工况需进行专项研究。

5.3 抗火防护

5.3.1 缆索系统抗火防护宜采用抗火防腐一体化设计，且应考虑构件的类型、设计耐火时间、设计

临界温度及使用环境等因素，并满足以下要求：

- 1 综合考虑结构安全性和经济性要求；
- 2 施工方便且不影响前续已完工的施工及后续施工；
- 3 构件受火后发生允许的变形时，抗火防护层不发生结构性破坏与失效；
- 4 满足桥梁使用环境及绿色环保要求，具有良好的耐久性；
- 5 日常维护方便，火灾后易清理，防护层易修复。

条文说明

缆索系统各构件几何特征不同，适用的防护方法也不同，需结合构件的构造特点设计适宜的抗火防护方案。防护方案根据设计耐火时间和设计临界温度，同时考虑环境特点确定。防护后的构件须满足抗火目标。抗火防护是保证结构具有良好抗火性能的重要措施，同时也会影响桥梁的建设成本，在进行抗火防护设计时兼顾安全性与经济性要求，同时不影响结构的正常防腐性能，并且具备可施工性，能够很好地控制施工质量。火灾是偶发事件，抗火防护方法需具备可维护性，方便检查维修，能够长期保持良好的抗火性能；桥梁所处环境多样、复杂，抗火防护所选用的抗火材料须满足桥址处的耐久性要求，能够长期保持良好的抗火性能。

5.3.2 缆索系统抗火防护设计应考虑构件温度随高度的变化，包括防护范围、防护层厚度和构造细节，并应满足抗火目标要求。

5.3.3 缆索系统的抗火防护应采用下列措施：

- 1 喷涂(抹涂)防火涂料；
- 2 包覆抗火带；
- 3 喷涂(抹涂)防火涂料与包覆抗火带相结合。

5.3.4 抗火防护方案隔热性能应采用本指南附录 A 试验方法进行验证。

5.3.5 主缆抗火防护应满足下列要求：

- 1 根据主缆在设计火灾工况下的温度场分布和设计临界温度确定抗火防护高度；
- 2 可根据主缆温度随高度的变化分区采用不同厚度的抗火带；
- 3 应做好索夹和气孔与主缆连接处的防护过渡及构造细节设计，并做好密封处理；
- 4 不应影响主缆的密封构造及防腐构造。

条文说明

主缆是悬索桥的重要承重构件，且损坏后无法更换，因此需保证其在火灾下不损坏，且火灾后性能不劣化，需对主缆进行抗火防护，防护范围与设计火灾工况直接相关。编制组通过前期研究得到主缆最不利的设计工况为发生火灾的车辆靠近主缆，燃烧模式为车辆顶面与近主缆侧面燃烧且无风，在此工况下主缆的建议防护高度如表 5-1 工况 1 所示，从经济角度，防护高度考虑了不同主缆直径和不同设计耐火时间，F1 火灾下不同直径主缆防护高度差异较小，将其取值进行了统一。此外，为了说明风速的影响，亦给出了车辆侧面与主缆净距为 1.5m、风速为 1.0m/s 且为横桥向外向风、顶面和近主缆侧面燃烧工况下的建议防护高度，如表 5-1 工况 2 所示，F1 火灾作用下工况 2 和工况 1 的防护高度差异较小，将其取值进行了统一，供设计人员参考。其他设计火灾工况的防护高度需通过计算确定。



表 5-1 主缆防护高度(单位:m)

设计火灾工况	主缆直径	F1			F2			F3		
		45min	60min	90min	45min	60min	90min	45min	60min	90min
工况 1	0.4	8.5	9.0	9.5	17.5	18.5	20.5	27.5	28.5	30.0
	0.6				17.0	18.0	19.0	26.5	27.5	29.0
	≥0.8				16.5	17.5	18.5	26.0	27.0	28.5
工况 2	0.4	8.5	9.0	9.5	12.5	13.0	13.5	15.5	16.5	18.0
	0.6				12.0	12.5	13.0	15.0	16.0	17.0
	≥0.8				11.5	12.0	12.5	14.5	15.5	16.5

注:工况 1 车辆为标准车,车辆侧面靠近主缆(净距 0.25m),无风,顶面和近主缆侧面燃烧;工况 2 车辆为标准车,车辆侧面与主缆净距 1.5m,风速 1.0m/s,顶面和近主缆侧面燃烧。

5.3.6 吊索抗火防护应满足下列要求:

1 火灾强度类别为 F1 时,若吊索不满足抗火目标要求,应进行防护,火灾强度类别为 F2 和 F3 时,若吊索失效会造成桥梁结构“解扣式”连续破坏应进行抗火防护,防护高度根据吊索在设计火灾工况下的温度场分布和设计临界温度确定;

2 可根据吊索温度随高度的变化分区采用不同厚度的抗火带或喷涂不同厚度的防火涂料;

3 应做好吊索与加劲梁吊耳、索夹连接处的抗火防护过渡和构造细节设计,并做好密封处理;

4 抗火防护不应影响吊索的防腐构造和抗风要求。

条文说明

根据抗火目标,发生 F1 火灾时,吊索处于弹性状态,且安全度减小幅度小于 25%,此时,吊索外侧温度需满足不超过 300℃的要求,当不满足此要求时,需对吊索进行防护;火灾强度类别为 F2 和 F3 时,若吊索失效可能造成桥梁结构“解扣式”连续破坏,则需进行抗火防护,防护后的外侧温度不超过 300℃。表 5-2 给出了直径为 70mm 的吊索在两种设计火灾工况下的防护高度参考值,在各类火灾作用下,设计耐火时间不同,防护高度会有所差异,但变化量较小,为方便设计,将其防护高度进行了统一,可供设计人员参考。其他直径的吊索防护高度可参考此设计值进行适当调整,其他设计火灾工况的防护高度需通过计算确定。

表 5-2 吊索防护高度(单位:m)

设计火灾工况	F1	F2	F3
工况 1	10.5	24.5	34.5
工况 2	10.5	17.0	23.5

注:工况 1 车辆为标准车,车辆侧面靠近吊索(净距 0.25m),无风,顶面和近吊索侧面燃烧;工况 2 车辆为标准车,车辆侧面与吊索净距 1.5m,风速 1.0m/s,顶面和近吊索侧面燃烧。

5.3.7 索夹抗火防护应满足下列要求:

1 根据索夹在设计火灾工况下的温度场分布和设计临界温度确定抗火防护范围,且主缆防护范
18 公众号·路桥隧视界

圈内的索夹应全部进行防护；

- 2 索夹紧箍主缆部位的抗火防护应满足主缆的防护要求；
- 3 采用防火涂料方案，根据不同高度索夹的温度确定其防护层厚度；
- 4 做好索夹环缝、索夹与主缆和吊索连接处的抗火防护过渡和构造细节设计，并做好密封处理；
- 5 对防护范围内的气夹进行抗火防护，防护方法可参照索夹；
- 6 索夹螺杆定期紧固，运营过程中索夹滑移不应影响防护性能。

条文说明

索夹的抗火防护需考虑主缆的防护需求，与主缆接触部分的索夹除满足本身的需求外，还需满足主缆的抗火需求，索夹耳板只需满足自身的抗火需求，因此应分区采取防护措施。

5.3.8 斜拉索抗火防护应满足下列要求：

- 1 火灾强度类别为F1时，若斜拉索不满足抗火目标要求，应进行防护，火灾强度类别为F2和F3时，若斜拉索失效会造成桥梁结构“解扣式”连续破坏应进行抗火防护，防护高度根据斜拉索在设计火灾工况下的温度场分布和设计临界温度确定；
- 2 可根据斜拉索温度随高度的变化分区采用不同厚度的抗火带或喷涂不同厚度的防火涂料；
- 3 做好斜拉索与主梁锚固区的抗火防护过渡及构造细节设计，并做好密封处理；
- 4 做好斜拉索与减振装置之间的构造细节设计；
- 5 不影响斜拉索的防腐和由风雨等引起的振动控制要求。

条文说明

根据抗火目标，发生F1火灾时，斜拉索处于弹性状态，且安全度减小幅度小于25%，此时，斜拉索外侧温度需满足不超过300℃的要求，当不满足此要求时，需对斜拉索进行防护；火灾强度类别为F2和F3时，若斜拉索失效可能造成桥梁结构“解扣式”连续破坏，则需进行抗火防护，防护后的外侧温度不超过300℃。表5-3给出了直径为200mm的斜拉索在两种设计火灾工况下的防护高度参考值，F1火灾下不同设计耐火时间斜拉索的防护高度差异较小，将其取值进行了统一，可供设计人员参考；其他直径的斜拉索可参考此设计值进行适当调整；其他设计火灾工况的防护高度需通过计算确定。

表5-3 斜拉索防护高度(单位：m)

设计火灾工况	F1			F2			F3		
	45min	60min	90min	45min	60min	90min	45min	60min	90min
工况1	10.0			21.0	22.0	23.0	31.5	32.5	33.5
工况2	10.0			13.0	14.0	15.0	19.0	21.0	22.0

注：工况1车辆为标准车，车辆侧面靠近斜拉索（净距0.25m），无风，顶面和近斜拉索侧面燃烧；工况2车辆为标准车，车辆侧面与斜拉索净距1.5m，风速1.0m/s，顶面和近侧面燃烧。

5.3.9 索梁连接件抗火防护应满足下列要求：

- 1 对全桥范围内不满足抗火目标要求的索梁连接件进行防护；

- 2 采用防火涂料方案,根据设计火灾工况下的连接件温度确定防护层厚度;
- 3 做好吊耳与吊索叉耳、斜拉索与锚拉板、主梁耳板等连接处的构造细节设计;
- 4 叉耳及销轴的防护不影响正常运营中的转动功能。

条文说明

索梁连接件的防护方案需注意构造细节的处理,尤其是不能影响正常运营过程中的性能需求。

附录 A 抗火防护方案隔热性能试验方法

A.1 试件

A.1.1 缆索系统各构件抗火防护方案隔热性能试验宜采用足尺模型试验,当不具备足尺试验条件时,可按表 A.1.1 选择等效试件进行试验。

表 A.1.1 等效试件

防护构件的截面形状系数 $F/V(m^{-1})$	等效试件形式	等效试件尺寸 $L \times B \times h$ 或 $L \times r$ (mm)
>250	钢板型	300×300×6
200~250	钢板型	300×300×8
150~200	钢板型	300×300×10
100~150	钢板型	300×300×14
80~100	钢板型或钢索/钢棒型	300×300×20 或 2000×20
60~80	钢板型或钢索/钢棒型	300×300×25 或 2000×25
50~60	钢板型或钢索/钢棒型	300×300×32 或 2000×32
40~50	钢板型或钢索/钢棒型	300×300×40 或 2000×40
30~40	钢板型或钢索/钢棒型	300×300×65 或 2000×50
20~30	钢索/钢棒型	2000×65
10~20	钢索/钢棒型	2000×100
≤10	应进行专门研究	

注 1:索夹耳板和索梁连接件可采用钢板型等效试件,吊索和主索可采用钢索/钢棒型等效试件。

注 2:L—等效试件长度;B—等效试件宽度;h—等效试件厚度;r—等效试件半径。

条文说明

本试验方法参考《钢结构防火涂料》(GB 14907—2018)第 6.5 节耐火性能要求进行设计。鉴于缆索系统与建筑钢结构在几何尺寸、截面特征及边界条件等方面存在显著差异,因此结合缆索系统构件的几何形状特征和实施的便利性,以防护构件截面形状系数(F/V 值)为主要指标,设计了等效试件,方便进行缆索系统各类构件防护方案隔热性能试验。

A.1.2 每组试件数量不宜少于 3 个。

A.2 试验条件

A.2.1 试验设备及装置应包括燃烧试验炉、热电偶、温度采集仪等。

A.2.2 火灾升温曲线宜与抗火设计所采用的升温曲线一致,当不能满足抗火设计的升温条件时,可采用烃类(HC)标准火灾升温曲线按公式(A.2.2)计算,并对试验结果进行等效曝火时间分析或进行专项研究。

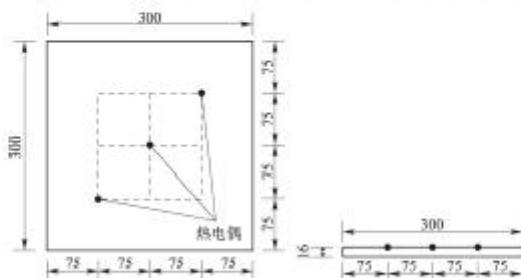
$$T = T_0 + 1280 \times (1 - 0.325 \times e^{-0.1667t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (A.2.2)$$

公众号 · 路桥隧视界

式中:
 T ——环境温度(℃);
 T_0 ——初始环境温度(℃);
 t ——燃烧时间(s)。

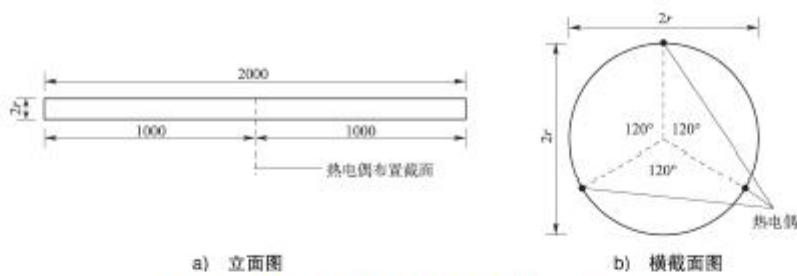
A.3 测点布置

A.3.1 钢板型试件可沿对角线在外表面布置3个热电偶,如图A.3.1所示。



图A.3.1 钢板型试件测点布置图(尺寸单位:mm)

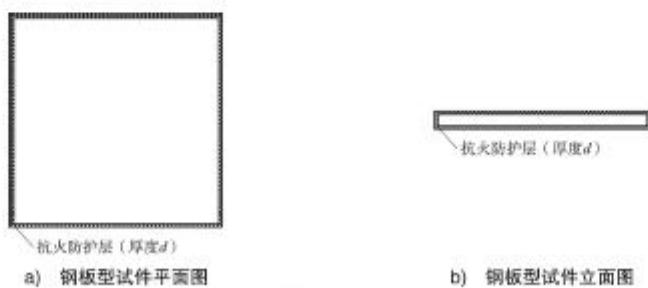
A.3.2 钢索/钢棒型试件可选择中间横截面布置测点,测点布置于钢索/钢棒型试件外表面,如图A.3.2所示。



图A.3.2 钢索/钢棒型试件测点布置图(尺寸单位:mm)

A.3.3 热电偶应牢固固定于试件上,在试件运输及安装过程中不应松动。

A.3.4 固定热电偶后,对试件进行抗火防护,钢板型试件六面全部防护,钢索/钢棒型试件对侧面进行防护,并采用防火棉对端部进行包裹。



图A.3.4

公众号·路桥隧视界

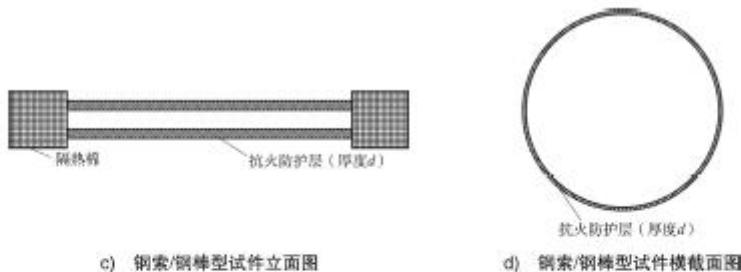


图 A.3.4 试件防护示意图

A.3.5 测点连接线应满足耐高温的要求，并应足够长，能引出试验炉与温度采集仪相连。

A.4 试件安装

A.4.1 钢板型试件可对边支撑于耐火砖上，采用六面受火的加热方式。

A.4.2 钢索/钢棒型试件两端支撑于耐火砖上，采用全侧面受火的加热方式。

A.4.3 试件与耐火砖的重合面积应小于搁置表面的 10%，其边缘与炉膛内壁之间的距离不应小于 250mm，当多个试件同时进行试验时，相邻试件边缘之间的间距不应小于 200mm。

A.5 高温试验

A.5.1 在试验过程中应密切关注炉温的变化，尤其是初始升温阶段，升温时间应满足设计要求。

A.5.2 高温持续时间应满足设计耐火时间的要求。

A.5.3 试验过程中应注意人身安全，远离高温炉。

A.5.4 试验结束后，应在试验炉内温度降至常温后打开炉门，观察试件高温后形态。

A.6 试验数据分析

A.6.1 绘制各试件各测点的温度时程曲线，并对同一试件不同测点及一组试件之间的温度进行对比分析，评判实测值的有效性。

A.6.2 对各测点的实测值进行分析，应满足以下要求：

1 若同一试件的最大值和最小值与中间值之差均未超过中间值的 15% 时，则取 3 个测点温度的算数平均值作为该组试件的温度代表值。

2 若同一试件的最大值或最小值与中间值之差高于中间值的 15% 时，取中间值作为该组试件的温度代表值。

3 若同一试件的最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15%，则该组试件实测值不应作为评定依据。

4 各组试件的温度实测值评判方法同单试件的评判要求。

A.6.3 以试件温度代表值作为防护后试件的表面温度，分析抗火防护方案的有效性。

公众号：路桥隧视界

附录 B 缆索系统抗火设计案例

以某悬索桥为例,对缆索系统抗火设计进行详细说明。

B.1 工程概况

某悬索桥为主跨 1760m 单跨钢箱梁悬索桥, 双向六车道。加劲梁采用扁平流线型封闭整体式钢箱梁, 钢箱梁总宽 31.5m, 桥梁中心线处梁高 4m; 主缆横向间距 27.7m, 由 169 股 127 \times 5.4mm 锌铝合金镀层钢丝索股组成, 标准抗拉强度 2100MPa; 吊索纵向标准间距 18.3m, 每个吊点设置 2 根吊索, 直径 75mm, 由 121 丝 ϕ 5mm 镀锌高强度钢丝构成, 采用销接式结构, 采用预制平行钢丝束, 标准抗拉强度 1770MPa; 主缆挤压后索夹内直径 868mm, 索夹外直径 879mm, 索夹壁厚 40mm, 采用 M48 高强度螺杆, 设计张拉力为 900kN。其立面及横断面布置如图 B.1 所示。

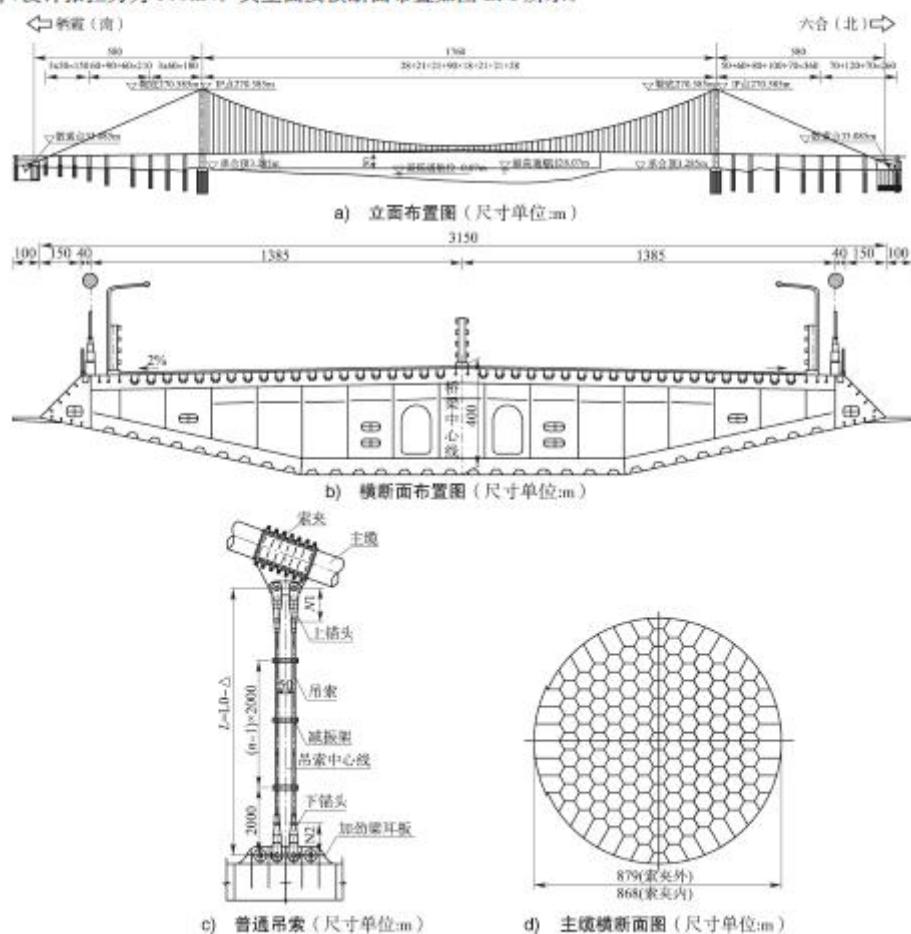


图 B.1 立面及横断面布置图 公众号：路桥隧道世界

B.2 抗火目标

B.2.1 桥梁抗火类别为A类,F1、F2、F3级火灾最大热释放速率分别为30MW、100MW、200MW。

B.2.2 抗火目标为Ⅰ级时的设计耐火时间取为60min,抗火目标为Ⅱ级和Ⅲ级时设计耐火时间取为45min。

B.2.3 根据3.1节的相关规定,本桥缆索系统抗火目标如表B.2.3所示。

表B.2.3 缆索系统抗火目标

火灾强度 类别	抗火 目标	设计耐火 时间	设计临界温度			
			主缆	吊索	索夹	索梁连接件
F1 (30MW)	Ⅰ级	60min	截面平均温度≤200℃,且最外侧钢丝温度≤300℃	截面最外侧钢丝温度≤300℃	紧箍主缆部分截面内表面温度≤300℃;其他部分温度≤400℃	温度≤400℃
F2 (100MW)	Ⅱ级	45min	截面平均温度≤225℃,且最外侧钢丝温度≤300℃	—	紧箍主缆部分截面内表面温度≤300℃;其他部分温度≤550℃	温度≤550℃
F3 (200MW)	Ⅲ级	45min	截面平均温度≤275℃,且最外侧钢丝温度≤300℃	—	紧箍主缆部分截面内表面温度≤300℃	—

B.3 设计火灾工况

根据3.2.4条,设计火灾工况应包括火灾类型、火灾强度、火灾位置、风速风向、燃烧模式、持续时间等。通过对多种火灾工况的对比,本桥设计火灾工况如下。

B.3.1 设计火灾工况相关参数

1 火灾类型为车辆火灾,仅考虑1辆车发生火灾。

2 主缆和索夹顺桥向不利位置取为跨中,火灾发生位置位于跨中吊索和索梁连接件旁,火灾车辆与吊索净距取为0.25m,风速为0。

3 主缆、吊索和索夹的火灾燃烧模式为车辆顶面和近缆索系统侧面同时燃烧,顶面燃烧面积为10000mm×2500mm,侧面燃烧面积为10000mm×4000mm。

4 索梁连接件的燃烧面取为桥面,燃烧面积取为10000mm×2500mm。

5 火灾持续时间为60min。

B.3.2 设计火灾工况空气升温曲线

1 根据5.1.2条规定,车辆火灾热释放速率曲线可采用平方型增长模型,火灾增长系数取为

 公众号·路桥隧道界

0.1867 kW/s^2 , Q_{\max} 分别取为 30MW、100MW、200MW。

2 计算软件:采用流体动力学软件 FDS,计算模型如图 B.3.2-1 所示。

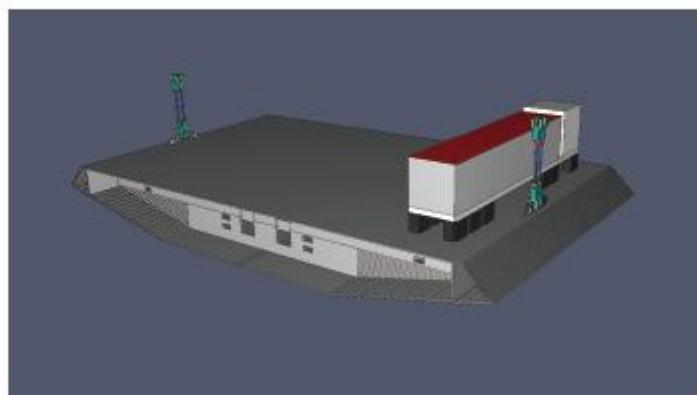


图 B.3.2-1 火灾数值模拟计算模型(以油罐车为例)

B.4 火灾响应及抗火验算

根据本指南第 3.2.3 条规定,采用缆索系统抗火承载能力极限状态下的最不利荷载(作用)效应组合设计值进行计算。

B.4.1 主缆

F1、F2、F3 级火灾下主缆温度时程曲线如图 B.4.1 所示。F1 级火灾作用下,60min 时,主缆表面温度未超过 300℃,截面平均温度未超过 200℃,满足 3.1.8 条关于 I 级抗火目标的要求,不需要进行抗火防护;F2 级火灾作用下,45min 时,主缆外表面温度为 800℃左右,截面平均温度 400℃左右,计算临界温度超过了 3.1.8 条 II 级抗火目标关于设计临界温度 300℃和 225℃的要求,此时主缆的强度折减系数为 0.537,不满足 3.1.6 条对于 II 级抗火目标安全度减小幅度小于 15% 的要求;F3 级火灾作用下,45min 时,主缆外表面温度为 900℃左右,截面平均温度 500℃左右,计算临界温度超过了 3.1.8 条 III 级抗火目标关于设计临界温度 300℃和 275℃的要求,此时主缆的强度折减系数为 0.303,不满足 3.1.6 条对于 III 级抗火目标安全度减小幅度小于 20% 的要求。根据 3.2.6 条规定,主缆不满足抗火性能要求,需进行抗火防护。

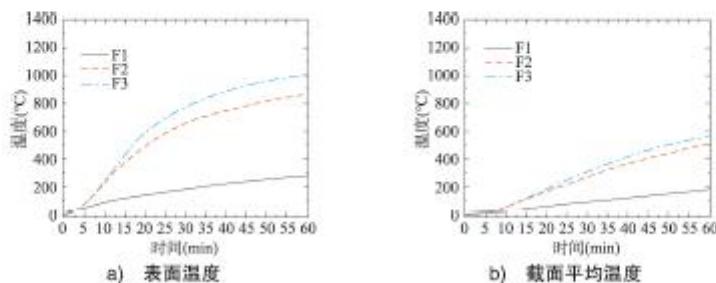


图 B.4.1

公众号 · 路桥隧视界

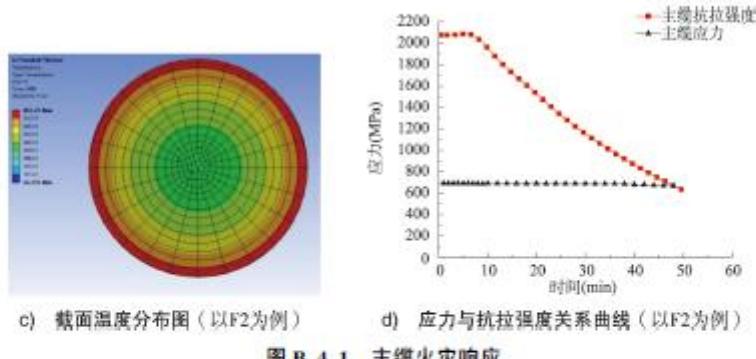


图 B.4.1 主缆火灾响应

B.4.2 吊索

F1、F2、F3 级火灾下吊索截面平均温度时程曲线如图 B.4.2 所示。F1 级火灾作用下, 60min 时, 吊索截面平均温度为 620℃ 左右, 不满足 3.1.8 条最外侧温度为 300℃ 的设计临界温度要求; F2 和 F3 级火灾作用下, 45min 时, 吊索截面平均温度分别为 1100℃ 左右和 1200℃ 左右; 考虑到吊索为可更换构件, 且更换起来较为方便, 本工程允许吊索在 F2 和 F3 级火灾作用下失效, 通过计算可知, 1 辆车发生火灾不会造成桥梁结构“解扣式”连续破坏, 因此只对吊索在 F1 火灾作用工况进行抗火防护。

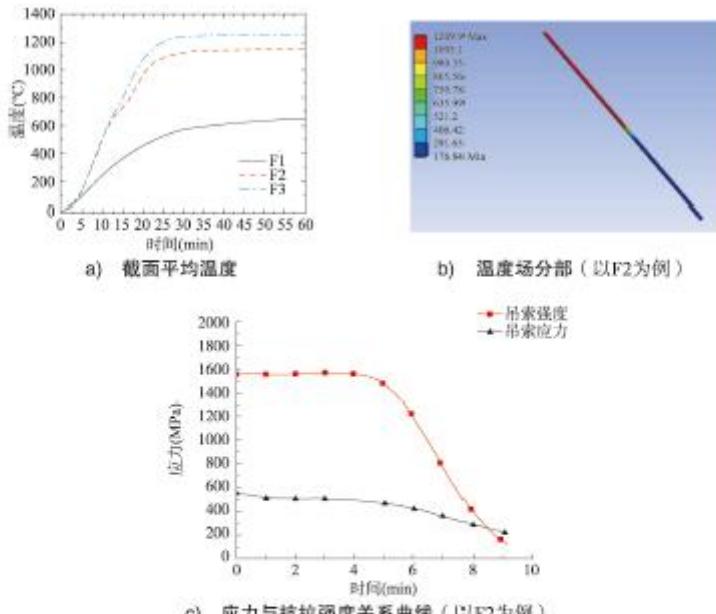


图 B.4.2 吊索火灾响应

B.4.3 索夹

F1、F2、F3 级火灾下索夹销孔处的温度时程曲线如图 B.4.3 所示, 索夹紧箍主缆处的温度与主缆

公众号 · 路桥隧视界

外表面温度相近,此处未绘出。F1 级火灾作用下,索夹紧箍主缆部分主缆温度满足 3.1.8 条关于 I 级抗火目标的要求,不需进行抗火防护,销孔处的温度 570°C 左右,下索夹耳板需进行防护;F2 级火灾作用下,45min 时,索夹紧箍主缆处的内表面温度为 800°C 左右,销孔处接近 1100°C,计算临界温度不满足 3.1.8 条 II 级抗火目标关于设计临界温度的要求,需进行抗火防护;F3 级火灾作用下,允许索夹失效,经分析 1 辆车发生火灾,不会造成结构连续破坏。

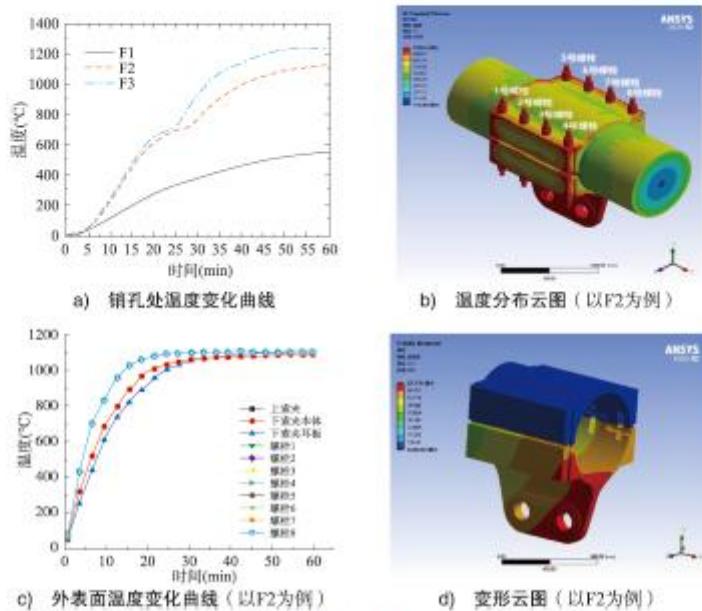


图 B.4.3 索夹火灾响应

B.4.4 索梁连接件

F1、F2、F3 级火灾下索梁连接件的温度时程曲线如图 B.4.4 所示。F1 级火灾作用下,60min 时,索梁连接件加劲梁吊耳与加劲梁连接区域应力较大,此区域的温度为 850°C 左右,计算临界温度不满足 3.1.8 条关于 I 级抗火目标不超过 400°C 的设计临界温度要求,需进行抗火防护;F2 级火灾作用下,45min 时,索梁连接件温度超过了 1000°C,计算临界温度不满足 3.1.8 条 II 级抗火目标关于设计临界温度的要求,需进行抗火防护;F3 级火灾作用下,允许索梁连接件失效,经分析 1 辆车发生火灾,不会造成结构连续破坏。

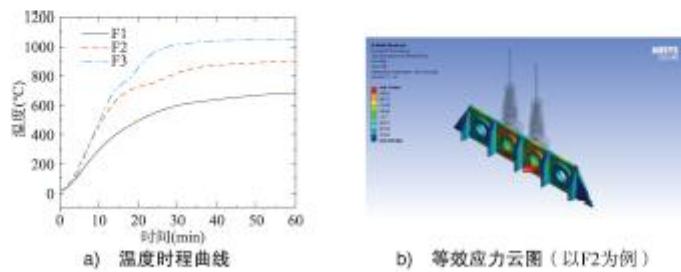


图 B.4.4 索梁连接件火灾响应

B.5 抗火防护设计

根据 5.3.2 条, 缆索系统抗火防护方案应包括防护范围、防护层厚度和构造细节等。以 F2 类火灾为例, 设计缆索系统的防护方案。

B.5.1 抗火防护范围

根据 5.3.5 条确定主缆防护范围。针对本工程的设计火灾工况, F2 火灾时, 主缆的防护高度为 16.5m, 索夹的防护高度为 16.5m, 索梁连接件全部防护。防护范围示意如图 B.5.1 所示。

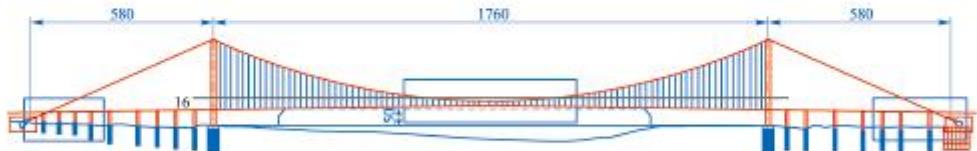


图 B.5.1 防护范围示意图(尺寸单位:m)

B.5.2 防护材料的确定

对主缆抗火防护材料进行了大量调研和对比分析, 对不同防护方案、主要影响因素进行了系列对比试验(表 B.5.2-1、图 B.5.2-1), 确定采用防护效果较优的高硅氧反射型隔热阻燃复合抗火带。

表 B.5.2-1 主缆抗火防护材料对比试验(单位:℃)

防护方案	时间		
	20min	40min	60min
高硅氧复合材料—12mm	133	363	484
镀铝玻纤布—9mm+陶瓷纤维布—3mm	293	548	622
镀铝玻纤布 3mm+高硅氧复合材料—6mm+镀铝玻纤布 3mm	171	441	558



图 B.5.2-1 不同抗火带防护方案试验后形态

对各类防火涂料进行了大量调研和对比试验(表 B.5.2-2), 综合考虑各类涂料的耐火性能、黏结性能、耐久性能等要求, 索夹和索梁连接件确定采用环氧类膨胀型防火涂料。

表 B.5.2-2 不同涂料对比试验结果(单位:℃)

防火涂料	时间		
	20min	40min	60min
水基性防火涂料—2mm	474	753	886

表 B. 5. 2-2 不同涂料对比试验结果(单位:℃)(续)

防火涂料	时间		
	20min	40min	60min
水基性防火涂料—4mm	345	652	758
溶剂性防火涂料—2mm	352	749	873
溶剂性防火涂料—4mm	268	575	750
环氧类防火涂料—2mm	225	432	643
环氧类防火涂料—4mm	159	273	551



图 B. 5. 2-2 不同涂料防护方案试验后形态

B. 5. 3 防护厚度的确定

1 主缆防护层厚度

对不同直径试件进行高硅氧反射型隔热阻燃复合抗火带防护效果对比试验(表 B. 5. 3-1、图 B. 5. 3-1),根据试验结果同时结合数值模拟确定主缆防护层厚度为 10mm,可满足主缆抗火防护目标要求。

表 B. 5. 3-1 高硅氧反射型隔热阻燃复合抗火带试验结果(单位:℃)

主缆直径	防护层厚度	时间		
		20min	40min	60min
201mm	10mm	353	407	471
159mm	10mm	212	612	737
70mm	10mm	543	706	883



图 B. 5. 3-1 不同直径试件抗火带防护效果对比试验

2 索梁连接件防护层厚度

对不同厚度环氧类防火涂料进行对比试验,结果如表 B. 5.3-2、图 B. 5.3-2 及图 B. 5.3-3 所示。根据试验结果,选取 6mm 厚环氧类防火涂料进行防护,可满足索梁连接件的抗火目标,并通过足尺索梁连接件模型进行了试验验证。

表 B. 5.3-2 不同厚度环氧类防火涂料试验结果(单位:℃)

环氧类防火涂料厚度 (mm)	时间		
	20min	40min	60min
4	243	466	668
5	216	397	648
6	191	341	592
7	174	333	588
8	160	285	465

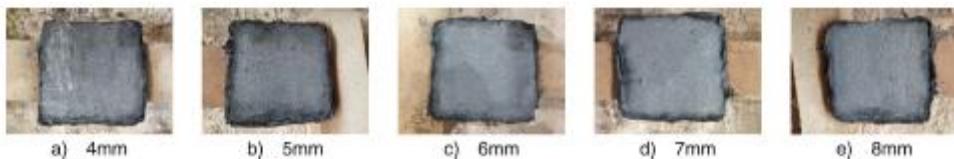


图 B. 5.3-2 不同涂层厚度试件试验后形态

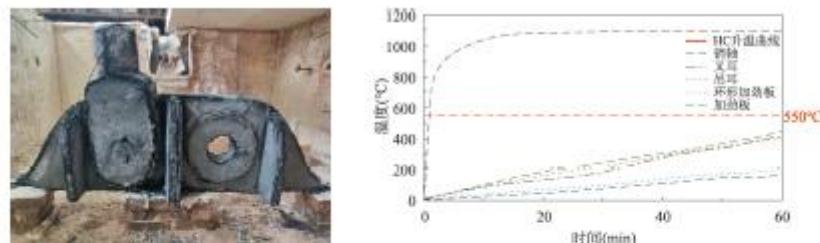


图 B. 5.3-3 足尺索梁连接件模型试验结果

3 索夹

索夹的防护需考虑保护主缆及索夹自身的两方面需求,采用 6mm 厚环氧类防火涂料可以满足索夹的抗火目标。

B. 5.4 防护方案

主缆采用 10mm 厚高硅氧反射型隔热阻燃复合抗火带进行抗火防护,索夹和索梁连接件采用 6mm 厚环氧类防火涂料进行抗火防护,可满足抗火目标如图 B. 5.4-1 所示。其中主缆抗火带设置在主缆防腐缠包带外侧,不影响主缆的防腐系统;索夹和索梁连接件采用抗火与防腐一体化防护体系,将防火涂层设于中间漆与面漆之间,既可满足抗火性能要求又可满足防腐要求。实际工程应用如图 B. 5.4-2 所示。

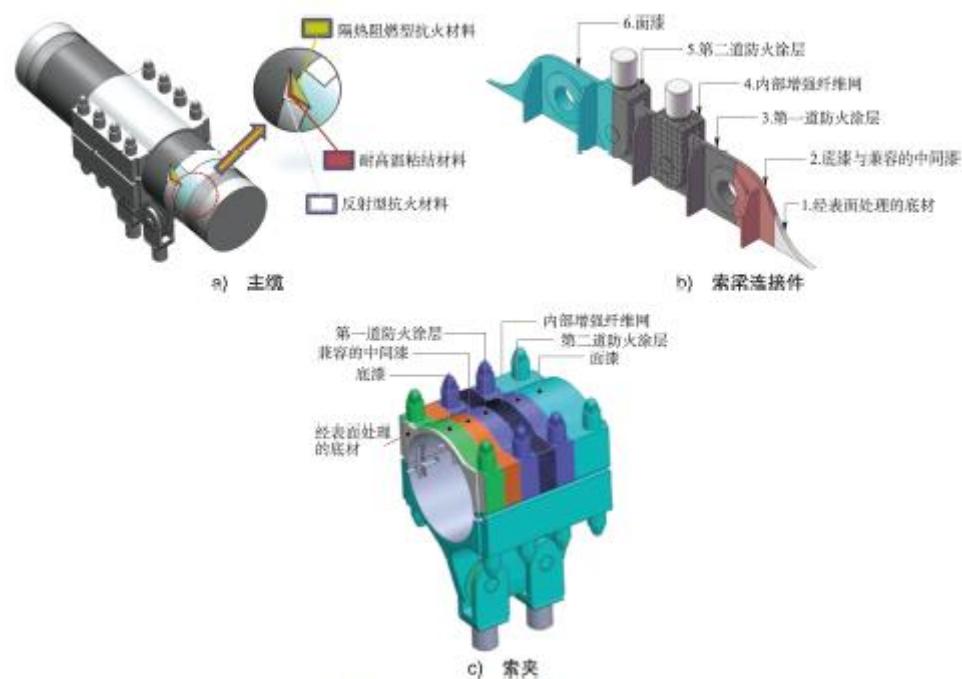


图 B.5.4-1 抗火防腐一体化防护体系

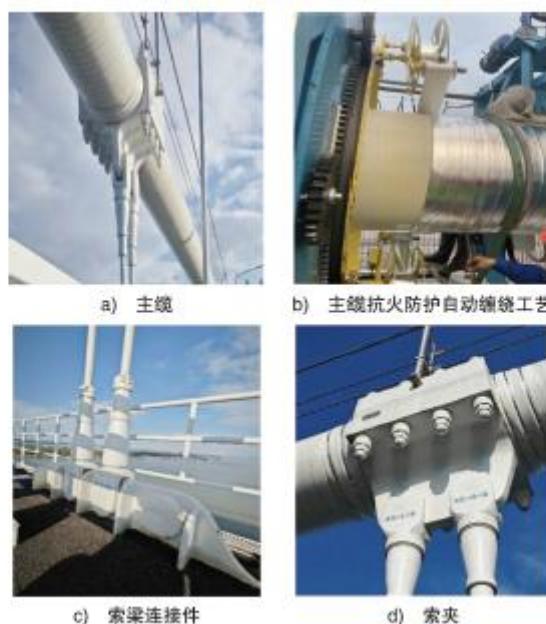


图 B.5.4-2 抗火防护工程应用

公众号 · 路桥隧道视界

用词说明

- 1 本指南执行严格程度的用词,采用下列写法:
 - 1) 表示严格,在正常情况下均应这样做的用词,正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。
 - 2) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的用词,正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”。
 - 3) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的用词,采用“可”。
 - 2 引用标准的用语采用下列写法:
 - 1) 当引用的标准为国家标准或行业标准时,表述为“应符合《×××××》(×××)的有关规定”。
 - 2) 当引用本指南中的其他规定时,表述为“应符合本指南第×章的有关规定”“应符合本指南第×.×节的有关规定”“应按本指南第×.×.×条的有关规定执行。”
-