

桥梁缆索防腐防火涂装技术研究与应用

郭伟成^{1,2}, 安娜¹, 曹辉^{1,2}, 李承宇^{1,2*}

(1.上海岐海防腐工程技术有限公司,上海 200949; 2.江苏卓奇新材料科技有限公司,江苏 徐州 221018)

摘要: 缆索是悬索桥、斜拉桥、拱桥等桥梁结构中重要的承重支撑结构,与整个桥梁工程的安全及使用寿命息息相关。随着社会经济发展,桥上海油罐车等易燃易爆化学品运输工具数量、桥上时间等不断增多,桥梁火灾风险隐患迅速攀升。通过分析国内外学者在缆索抗火领域的研究成果以及实际工程应用情况,对缆索力学性能高温时变、缆索火场、防火防腐涂装体系研究设计及应用进行了技术总结和分析,以期对相关技术研究与应用提供参考。

关键词: 缆索; 防腐; 防火; 涂装; 研究

中图分类号:TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2025)07-0037-04

Research and Application of Anti-corrosion and Fireproof Coating Technology for Bridge Cables

GUO Wei-cheng^{1,2}, AN Na¹, CAO Hui^{1,2}, LI Cheng-yu^{1,2*}

(1.Shanghai Qihai Anti-corrosion Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200949, China;

2.Jiangsu Zhuoqi New Material Technology Co., Ltd., Xuzhou 221018, Jiangsu, China)

Abstract: Cable is an important load-bearing support structure in suspension bridge, cable-stayed bridge, arch bridge and other bridge structures, which is closely related to the safety and service life of the entire bridge project. With the continuous development of social economy, the number of transport vehicles of inflammable and explosive chemicals such as oil tankers on the bridge and the time on the bridge are increasing. The fire risk and hidden danger of bridge are increasing rapidly. By analyzing the research results of domestic and foreign scholars in the field of cable fire resistance and the actual engineering application, the technical summary and analysis are made on the research design and application of cable mechanical properties with high temperature and time variation, cable fire site, fire prevention and anti-corrosion coating system, in order to provide references for related technical research and application.

Key words: cable; anti-corrosion; fire protection; painting; research.

悬索桥主缆是大桥寿命期内无法更换的永久构

件,其防腐技术一直受到行业内外的广泛重视,如JT/T 694《悬索桥主缆系统防腐涂装技术条件》采用的涂装密封防护体系、全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会橡胶杂品会制定的HG T 5600《桥梁缆索防腐缠包带》技术以及GB/T 32120《钢结构氧化聚合型包覆防腐控制技术等》,这些缆索密封防水防腐技术应用数十年来取得了良好的防腐效果^[1]。

上述腻子、硫化型密封胶、缠包带及PCT缠包等材料防腐性能较好,但不具有防火能力,因此如遇到火灾,缆索预应力钢丝因高温下弹性模量变化引起其承载力急剧下降,严重时将导致全桥坍塌,造成严重的事

收稿日期:2024-05-22

基金项目:2021年上海市高新技术成果转化项目202105496B;上海市2023年度“科技创新行动计划”科技小巨人工程项目230HX002700。

作者简介:郭伟成(1987—),男,本科,长期从事桥梁工程涂料涂装防腐防火新技术研发及工程施工应用工作。E-mail:383480909@qq.com。

*通信作者:李承宇(1986—),男,高级工程师,主要从事防腐工程施工及项目管理工作。E-mail:lichengyu6666@163.com。

故。美国纽约交通机构统计表明,桥梁损毁事故中火灾损毁占比达到 5.2%,而美国高速公路年平均火灾约 37.6 万次,导致 570 人死亡,经济损失近 13 亿美元^[2]。

1 缆索力学性能高温时变研究

桥梁的缆(拉)索、锚固拉力构件、提升和固定用拉力构件主要为 1670、1770、1860 和 1960 级预应力钢丝,因桥梁缆索全生命周期必然存在火灾威胁,其防火性能对火灾下及灾后缆索承重桥梁的结构安全性能影响巨大。国内外相关研究表明^[3-6],火灾高温下钢丝温度在 30 min 内可达到 800 °C,而超过 400 °C 时钢丝的强度迅速下降,超过 600 °C 时钢丝弹性模量下降 60%,其抗拉强度则下降 80%。

厉萱^[7]研究表明,主缆安全系数为 2.5 时,外层钢丝 400 °C 时也不会高温断裂,各层钢丝应力均小于其抗拉强度,建议以不超过 400 °C 为其温度控制指标。

李艳等^[8]研究发现,火灾发生后初期主缆内层升温较慢,当火灾发生 58 min 时,最外层钢丝温度达到 587 °C,最内层钢丝温度达到 291 °C,其中在燃烧 34 min 时主缆的安全系数为 2.19,已小于 2.2,综合判定火灾 58 min 时主缆破坏。

2014 年 10 月 29 日某在建斜拉桥因塔顶违规电焊作业,斜拉索钢绞线表面 HDPE 被高处溅落的熔渣点燃,HDPE 燃烧形成的燃烧熔滴继而引起其下的斜拉索表面燃烧,事故共造成 9 根斜拉索断裂,直接经济损失 1 058.57 万元(见图 1)^[9]。该工程斜拉索共采用 43、55、61、73 束共 4 种类型的斜拉索,塔身索距为 1.53 m^[10]。事故调查报告表明^[9],第一根斜拉索仅在燃烧发生 10 min 左右即断裂,此后 60 min 内其余 8 根陆续断裂,试验分析每根钢索的燃烧时间不超过 35 min,火焰最高温度为 718 °C,由于桥面剩余 2 m 没有合龙,斜拉索存在初始应力,斜拉索内钢绞线逐根拉断,并引起应力重分布,拉断临界温度迅速降低到 400 °C 以下,导致事故扩大。

鉴于模拟桥梁实际工况开展缆索防火研究的局限性,目前针对缆索防火性能研究基本以数值模拟为主且结构分析过程比较简化,结合上述实际桥梁工程缆索火灾事故情况,迫切需要研究模型创新,形成可真实反映缆索防火性能模型,以满足桥梁缆索防火工程急切需求。

2 缆索火场研究

火场环境下缆索可靠的温度-时间关系是缆索防腐防火涂装体系设计的重要依据。典型桥梁火灾事故分析^[11]认为桥梁火灾危害最大的是危险品运输车辆火灾,最典型的则是油罐车燃烧或爆炸事故,其火场温度可超过 1 000 °C 并产生强烈的热辐射。

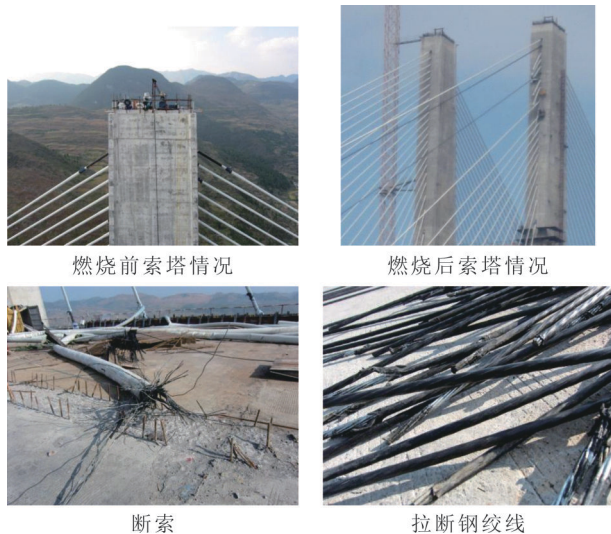


图 1 某桥斜拉索火灾事故现场情况

李利军等^[12-13]基于 Ingason H 平方增长模型,通过热-结构耦合分析,确定火灾各工况作用下不同直径主缆、吊索、斜拉索的安全距离,其中悬索桥主缆可排除小轿车、装有塑料的小轿车、大客车和大卡车辆火灾的安全影响,得出中心温度不超过 100 °C 的吊索、安全距离之内的构件均不需要考虑防火设计。王莹等^[14]研究确定武汉鹦鹉洲长江大桥吊索防火区域为桥面以上 8 m 高度,主缆为跨中 30 m 区域和边墩 15 m 区域。

美国^[15]有关工程研究表明,无应力索体要求 1 100 °C 下表面温度达到 300 °C 时防护时间不得小于 30 min。张海良等^[15]参考 PTIDC 45.1-18 相关规定,结合高速公路桥梁相关规定,确定桥梁工程领域火场危害距离限定在 8 m。李彦兵等^[16]利用主跨 2 180 m 的双层悬索桥火场建模,采用 ABAQUS 有限元软件分析悬索桥主要受火构件力学性能的高温时变特征,确定影响大桥温度分布的关键要素,分析确定位于横向非机动车道 30 MW 的火源不构成破坏风险。

3 缆索防腐防火涂层体系设计研究

国内外现行桥梁技术规范中还没有明确桥梁尤其是缆索的防火设计要求,主要问题可能在于缆索种类不同、桥梁上火灾环境复杂、不同火场下缆索衰变机理没有一致认可等。美国戴马特公司研发了 FIREWRAP 防火包覆系统,该包覆系统由最外层以二氧化硅为主料的纤维布包覆内芯组成的多层防火固体复合材料,通过加拿大国家研究理事会(National Research Council)的 UL1709 和 ASTM E 119(建筑物和建筑材料的防火检测)检测,3.5 h 达到 538 °C 的阈值,根据其中背温达到 300 °C 约 52 min、达到 400 °C 约 75 min^[17]。

鸚鵡洲长江大桥^[14]主缆、吊索在其常规防腐体系表面另外包裹 0.5 cm 或 1.0 cm 的硅酸铝防火材料,模拟火场下达到预期防护效果。张海良等^[15]根据国外缆索防火工程经验,结合国内高速公路桥梁相关规定,确定 8 m 范围主缆及吊索防护体系,其中缆索为 HDPE 缠包带+陶瓷缠包带、吊索为陶瓷缠包带,锚固则采用耐高温材料并涂装耐高温涂料;索夹及其接缝、高强螺栓同时予以耐高温防护,经测验该方案可行,满足了相关要求。广州珠江黄埔大桥建设有限公司等采用玄武岩纤维增强密封胶带(B-FRS 密封带)、纤维复合抗火带(FCFR 防火带)防火材料,确定桥梁缆索系统的抗火标准及分区防护方案^[18],如一级防护区域(距桥面垂直距离 11~20 m)、二级防护区域(距桥面垂直距离 11 m 以下),实现了桥梁斜拉索防火设计目标要求。

上海浦江等公司^[19]采用玄武岩纤维布、毡等材料研制缆索防护套、缆索防护系统,套设于缆索外,实现缆索防腐防火体系的耐候、耐久与可靠。杭州本创等公司优选耐高温且保温优异的气凝胶毡材料,与防火密封胶材料配套形成气凝胶防火复合层,防火体系经权威机构检测确认达到了 30 min 的耐火设计目标^[20]。

笔者将防腐层、防火层和外防护层整合形成桥梁缆索防腐防火复合结构体系,见表 1。集中利用并综合发挥玄武岩纤维布(毡)、气凝胶毡及膨胀型防火材料的各自优势,其防腐防火复合结构体系在模拟碳氢火灾场下,缆索钢丝表面达到 300 °C 时间超过 60 min,见图 2,基本满足缆索密封防护要求及缆索碳氢火灾场防护要求^[21]。

4 工程应用情况

1) 安格斯·麦克唐纳桥

安格斯·麦克唐纳桥位于哈利法克斯加拿大新斯科舍省,2015 年初全面翻修进行防火保护,主缆直径为 356 mm,挑高在路面上方 3.6 m,采用美国戴马特 FIREWRAP 防火包覆系统。

2) 涛源金沙江大桥

涛源金沙江大桥为双塔双索悬索桥,8 m 范围主缆以及吊索防腐防火方案为:耐高温材料+耐高温涂料+陶瓷复合缠包带,于 2020 年 6 月 30 日全面建成通车,成为我国首座主缆防火技术应用工程。

3) 广东珠江黄埔大桥

黄埔大桥位于珠江南北干流、狮子洋以西水域之上,其中北汊桥为独塔斜拉桥,南汊桥为双塔悬索桥。斜拉桥缆索维修时采用大桥管理局主持研发的 B-FRS 密封带、FCFR 防火带复合防火结构体系,整个技术成果达到国际领先水平,见图 3。

表 1 桥梁缆索防腐防火复合涂层结构体系

防护部位	施工材料	技术指标	
主缆 缠丝段	磷化底漆	均匀着色,不计厚度	
	环氧底漆	≥80 μm	
	硫化型橡胶密封胶	≥1 mm	
	气凝胶毡	5 mm×2	
	玄武岩纤维布	1 层	
	耐高温密封胶	2 mm	
	玄武岩纤维布	1 层	
	膨胀防火密封胶	2 mm	
	硫化型橡胶密封胶	2 mm	
	丙烯酸聚氨酯面漆或氟碳面漆	2×40 μm	
	防滑层	顶部 300 mm 范围内均匀撒 20 目石英砂	
	索夹	原索夹涂装体系	工厂涂装
硫化型橡胶密封胶		间隙、缝隙等密封填平	
气凝胶毡+玄武岩纤维布马甲		2×5 mm 气凝胶毡+一层玄武岩布	
耐高温密封胶		2 mm	
玄武岩纤维布套		1 层	
膨胀防火密封胶		2 mm	
硫化型橡胶密封胶		2 mm	
丙烯酸聚氨酯面漆或氟碳面漆		2×40 μm	
防滑层		顶部 300 mm 范围内均匀撒 20 目石英砂	
吊索		磷化底漆	均匀着色,不计厚度
		硫化型橡胶密封胶	≥1 mm
		气凝胶毡	5 mm
	玄武岩纤维布	1 层	
	耐高温密封胶	2 mm	
	玄武岩纤维布	1 层	
	膨胀防火密封胶	2 mm	
	硫化型橡胶密封胶	2~5 mm	
	丙烯酸聚氨酯面漆或氟碳面漆	2×40 μm	

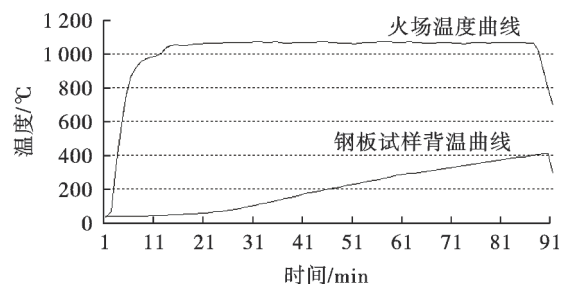


图 2 缆索防腐防火复合结构 HC 火场升温曲线



图3 黄埔大桥斜拉索防火施工

4) 连霍高速京杭运河特大桥

连霍高速京杭运河特大桥位于江苏省邳州市,主桥全长 350 m, 全桥吊杆共有 78 根,2002 年 11 月 20 日建成,因使用时间长,结构病害逐渐显现,2021 年 8 月起对吊杆全部更换,并采用江苏天龙玄武岩纤维毡抗火技术对位于火场高温区吊杆予以保护。

5) 温州北口大桥

北口大桥横跨温州瓯江之上,连接乐清市与龙湾区,是宁波—台州—温州高速公路复线(国家高速 G1523)跨越瓯江的控制性工程,于 2022 年 5 月 27 日通车运营。该项目在主跨缆梁相交区域,对主缆设计采用了气凝胶防火隔温胶粘带进行防火隔温,达到 1 100 ℃环境下,索体表面钢丝在 30 min 内升温不超过 300 ℃。

5 结语

截至 2021 年底,全国公路桥梁 96.11 万座,比上年末增加 4.84 万座,其中特大桥梁 7 417 座、大桥 13.45 万座,预期未来每年还将新增 2 万~3 万座,我国已成为世界桥梁工程建设的大国与强国。而随着国民经济的快速发展,石油化工行业前景向好,储油罐车发展趋势稳定向好,这给桥梁防火管控提出了愈加急迫的要求,也为缆索防火技术的科学研究与工程应用带来了更多机遇。

参考文献:

[1] 常绍艳,晁兵.悬索桥主缆涂装防护技术的研究进展[J].现代涂料与涂装,2012(11):49-51.
 [2] RAOUFFARD M M, NISHIYAMA M. Fire resistance of reinforced concrete frames subjected to service load:part1. experimental study[J]. Journal of Advanced Concrete Technology,2015,13(12):554-563.
 [3] GALVEZ F, ATIENZA J M, ELICES M. Behaviour of steel prestressing wires under extreme conditions of strain rate

and mperature [J]. Structural concrete: Journal of the FIB, 2011,12(4):255-261.

[4] 宗钟凌,张晋,蒋德稳,等.高温后 1860 级钢绞线力学性能试验研究[J].消防科学与技术,2015(3):311-314.
 [5] 宁波,刘永军,于保阳,等.油罐车火灾场景下斜拉桥钢索极限承载力有限元分析[J].钢结构,2012(2):68-72.
 [6] LU J, LIU H, CHEN Z. Post-fire mechanical properties of low-relaxation hot-dip galvanized prestressed steel wires [J]. Journal of Constructional Steel Research,2017,136:110-127.
 [7] 历莹.火灾下悬索桥主缆温度场及抗火设计研究[D].成都:西南交通大学,2022.
 [8] 李艳,周国华,王盼.车辆燃烧下大跨径悬索桥主缆高温力学性能研究[J].西部交通科技,2018(1):157-161.
 [9] 湖南省政府汝郴高速赤石特大桥“10·29”较大施工火灾事故调查组.汝郴高速赤石特大桥“10·29”较大施工火灾事故调查报告[R].长沙:2015-12-9.
 [10] 吴国光.赤石大桥关键技术研究及对策[J].公路工程,2013(6):1-5.
 [11] GONG X.Behavior of bridges during fire [D]. New York:The City College of New York,2015.
 [12] 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,2013.
 [13] 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(4):886-893.
 [14] 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(6):2091-2099.
 [15] 张海良,张存华,汤亮,等.桥梁缆索耐高温防护体系开发及应用[J].金属制品,2021(4):54-58.
 [16] 李彦兵,李卫,倪雅,等.车辆火灾下大跨径悬索桥抗火性能研究[J].消防科学与技术,2022(7):877-883.
 [17] NASER M Z, KODUR V K.A. Probabilistic assessment for classification of bridges against fire hazard [J].Fire Safety Journal,2015,76:65-73.
 [18] 广州珠江黄埔大桥建设有限公司.桥梁承重缆索防火防腐关键技术研究及应用[J].工程科技 II 辑,2021.
 [19] 江苏天龙玄武岩连续纤维股份有限公司,上海浦江缆索股份有限公司.缆索防护套、缆索防护系统及缆索防护套的制作方法:CN202110925688.4[P].2021-10-08.
 [20] 杭州本创科技有限公司,浙江数智交院科技股份有限公司.桥梁主缆防火涂层结构、桥梁主缆和桥梁主缆的制造方法:CN202110492575.X[P].2021-06-18.
 [21] 上海岐海防腐工程技术有限公司.一种防腐防火的桥梁缆索:CN202210799257.2[P].2022-08-19.