

桥梁失火拉索性能的试验研究

李德兴 龙跃 赵劼 方树 廖恒 华剑平

(柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

摘要: 试验研究了桥梁钢丝拉索失火后整体拉索及其组成钢丝的各项力学性能, 得出了拉索失火对拉索各项力学性能的影响的结论, 给出了对失火拉索的养护建议。为评估失火后的拉索性能提供了依据, 可为评判同类工程事故提供参考。

关键词: 桥梁 拉索 失火 温度 试验 力学性能

1 引言

国内外已建及在建的大型缆索支承类桥梁越来越多, 这类桥梁包括斜拉桥、悬索桥以及吊杆拱桥等。缆索支承桥梁中, 拉索是关键承力部件, 桥梁结构的重量和桥上的活载, 绝大部分或全部通过拉索传递到塔柱或拱肋上, 拉索性能的好坏关系着桥梁使用的安全性和耐久性。在桥梁的施工或运营阶段, 因各种原因时常发生拉索PE保护层着火事故, 这类事故我们称为拉索过火事故。如何评估拉索过火后的性能变化, 为事故采取有效、合理、经济的应对处置措施是桥梁工程界亟需解决的问题。本文结合广东省某桥拉索失火的实际情况, 为了解失火拉索技术性能变化以及这些变化对拉索结构使用安全性、耐久性的影响, 通过制作试验索进行失火模拟试验, 并对试验结果进行定性、定量的分析和研究, 得出了拉索过火对拉索静载强度、弹性模量、疲劳强度、断裂伸长率等力学性能以及拉索防腐性能的影响的结论, 为采取合理的事故应对处置措施提供了科学的依据, 也可以给其他同类事故的处置提供参考。

2 试验过程及内容

根据试验目的及相关规范[1][2]要求, 制定以下试验项目:

(1) 制作一根M7-127镀锌钢丝成品拉索, 钢丝母材强度1670MPa, 在拉索中部埋设温度传感器;

(2) 在 $0.4P_b$ 恒载状态下使试验索燃烧, 控制燃烧时间及着火范围, 使失火的效果尽可能接近事故的实际情况, 燃烧过程中对着火点温度进

行检测;

(3) 失火试验结束后, 对试验索进行承载力试验;

(4) 从试验索中对不同烧伤程度的钢丝进行取样, 进行硬度检测及拉伸试验, 并对严重烧伤的钢丝进行动载试验。

(5) 对试验情况及试验数据进行分析研究, 撰写试验报告。

3 试验结果分析

3.1 失火模拟试验结果

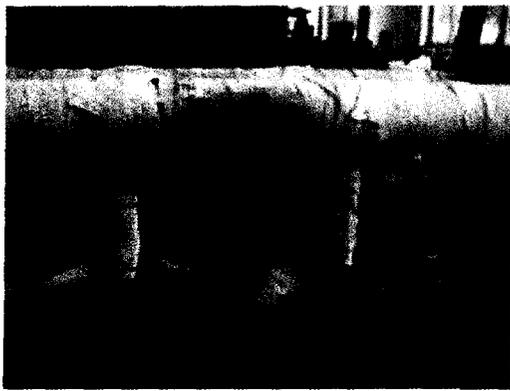
试验索安装在试验台架上, 张拉至0.4倍公称破断索力($0.4P_b$)并锁定。从安装在拉索中部的LED装饰灯(原桥拉索亮化用灯)处引燃拉索, 装饰灯迅速着火。引燃约10分钟后拉索HDPE层开始着火, 火焰缓慢燃烧, 燃烧1小时后索体开始有钢丝层外露, 当索体钢丝整圆外露达到一定长度后用水把火扑灭。拉索燃烧全部过程为4个小时。拉索安装及燃烧过程见图1。

燃烧初期测点温度上升较慢, 测点温度最高为 247.6°C (最高点), 测点 150°C 以上高温时间约为40min。测点温度的变化见图2。

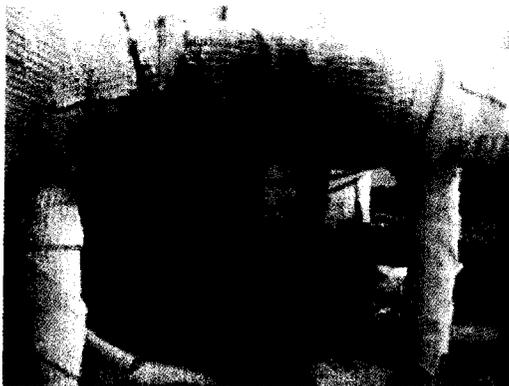
因油泵、千斤顶持续保压性能的局限, 无法完全实现理论恒载, 但根据拉力—相对伸长量数据, 还是能反映着火过程中拉索在恒载作用下伸长量趋势性的变化。在索体燃烧前一阶段, 火苗较高, 燃烧烈度较重, 索体恒载伸长量有增大现象。索体燃烧后一阶段, 火苗较小, 燃烧烈度较轻, 索体恒载伸长量增量减少并趋于恢复。燃烧过程拉索荷载—相对伸长量关系见图3。



拉索安装



拉索PE燃烧



拉索过火段

图1 拉索安装及燃烧图

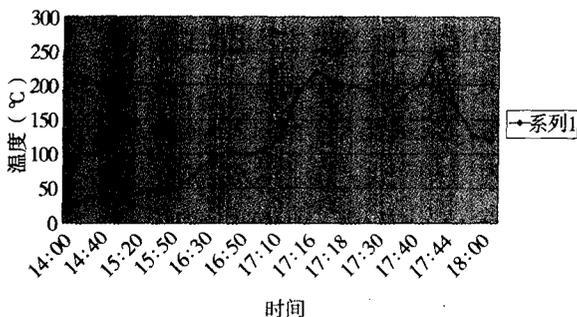


图2 燃烧过程索体温度变化图

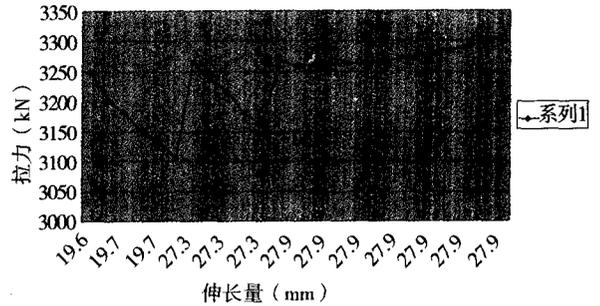


图3 燃烧过程拉索荷载—相对伸长量变化图

2 过火拉索整体承载力试验结果

2.1 拉索荷载—伸长量关系

为了对比拉索过火前与过火后在等张力状态下伸长量的变化以及名义弹性模量的变化,在拉索过火前、后均需检测各级荷载下的伸长量,绘制拉索荷载—伸长量曲线,计算拉索过火前、后的名义弹性模量。考虑桥梁拉索的实际使用情况以及试验室模拟的科学性与可行性,在拉索弹性变形范围内,选取拉索设计索力的2倍安全系数索力区间,对拉索荷载—伸长量关系进行分析研究。即考察区间在0.1Pb到0.8Pb之间[3]。

拉索过火前与过火后等张力伸长量数据见表1。

拉索过火前与过火后的荷载—伸长量曲线见图4。

表1 拉索过火前、后等张力伸长量表

拉索荷载 (kN)	500	1632	2500	3265	4000	5000	6000	6530
过火前拉索伸长量 (mm)	2.1	8.9	14.1	18.6	23.2	29.5	35.9	40.3
过火后拉索伸长量 (mm)	2.2	9.1	14.3	19.0	23.6	29.7	36.1	39.6
过火前拉索基准长度 (mm)	5545							
过火后拉索基准长度 (mm)	5546							

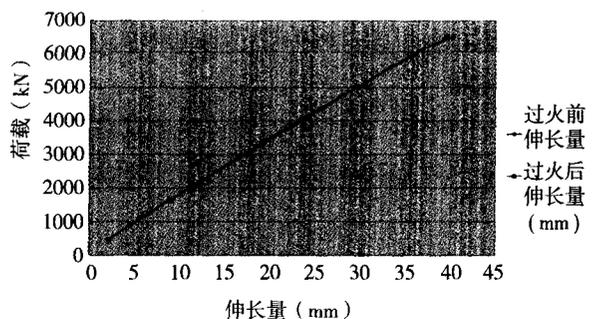


图4 拉索过火前、后荷载—伸长量曲线

从试验记录表1及图4可以看出,在拉索弹性变形范围内,拉索在过火前、后的等张力伸长量基本一致,没有明显的趋势性变化。

2.2 拉索弹性模量变化

参考相关规范^[4]中的拉索弹模试验方法,测得拉索伸长量和荷载的对应关系(荷载应在拉索 $0.1-0.4P_b$ 范围内),按下式计算拉索的弹性模量:

$$E = \frac{P_2 - P_1}{\Delta L} \times \frac{L_0}{F}$$

式中 P_1 、 P_2 —起始、终了测量载荷(N)

ΔL —对应于 P_1 、 P_2 载荷下的长度变化值(mm)

L_0 —原始长度(mm)

F —试验索股中钢丝标称总面积(mm^2)

在拉索燃烧过程中,取整根实验拉索的长度为计算原始长度,计算出过火前、后的拉索名义弹性模量以作对比。

过火前拉索名义弹性模量

$$E_1 = [(3265 - 1632) \times 10^3 / (18.6 - 8.9)] \times 5545 / 4888 \\ = 1.920 \times 10^5 \text{ (MPa)}$$

过火后拉索名义弹性模量

$$E_2 = [(3265 - 1632) \times 10^3 / (19.0 - 9.1)] \times 5546 / 4888 \\ = 1.882 \times 10^5 \text{ (MPa)}$$

从以上计算可见,过火后拉索名义弹性模量较过火前约有2%的下降,但考虑试验允许测量误差的因素,可以认为PE燃烧对拉索弹性模量基本没有影响。

3 过火拉索钢丝试验结果

3.1 过火钢丝硬度变化

硬度是影响钢丝强度的表现因素。拉索着火对钢丝力学性能的影响,一定程度上可以通过钢丝的硬度变化反映出来。

在索体着火段取烧伤程度严重的钢丝试样3件作红色标记,取烧伤程度中等的钢丝试样3件作黄色标记,取烧伤程度轻微的钢丝试样3件作绿色标记,取未过火的钢丝母材试样3件(本色)。分别将以上各类试样做硬度检测,检测值偏离均值10%之内为有效,检测结果见表2。

从表2可以看出,过火程度不同的钢丝硬度并没有趋势性的变化。

表2 过火钢丝硬度值

钢丝状态	硬度值(HRC)			有效均值
	1	2	3	
红色	45.5	47.0	45.0	45.8
黄色	45.0	45.0	44.0	44.7
兰色	47.0	46.0	41.0	46.5
母材(本色)	47.0	47.0	45.0	45.7

3.2 过火钢丝强度变化

检测过火钢丝强度可以在微观层面对拉索强度变化进行考察研究。和硬度检测的取样方法相同,取烧伤程度严重、中等、轻微的钢丝试样以及钢丝母材试样各3件。分别将以上各类试样按相关规范^[5]做拉伸试验,检测结果见表3。

表3 钢丝试样主要力学性能平均值表

	抗拉强度 (MPa)	Rp0.2 (MPa)	弹性模量 (10^5 MPa)	破断伸长率 (%)
烧伤程度严重1	1749	1629	1.97	5.28
烧伤程度中等2	1723	1599	2.01	5.04
烧伤程度轻微3	1749	1598	2.01	5.41
钢丝母材4	1734	1588	1.99	4.75

对以上试验数据进行统计计算,过火程度不同的钢丝抗拉强度 σ_b 最大偏差值在1.5%之内,Rp0.2最大偏差值在2.5%之内,弹性模量E最大偏差值在2.0%之内,破断伸长率最大偏差值在12%之内但均大于4%的国际要求。钢丝力学性能本身具有一定的离散性,过火后各类钢丝试样的各项力学性能没有趋势性的变化。

3.3 过火钢丝疲劳性能的变化

过火试验后取拉索着火处烧伤程度严重的三根钢丝作为试样按相关规范^[5]做钢丝的疲劳试验,试验结果见表4,检验结果为全部合格,可见拉索PE燃烧对钢丝疲劳性能基本没有影响。

表4 拉索过火烧伤后疲劳试验结果

试样编号	9W1035-1	9W1035-2	9W1035-3
试验结果	200万次,未断 (试验频率102Hz)	200万次,未断 (试验频率102Hz)	200万次,未断 (试验频率102Hz)

注:加载最大应力 $0.45F_m$,应力幅为360MPa

4 试验研究结论

(1) 拉索附着物的火灾往往是拉索失火的起因。

从失火模拟试验过程可以看出, 拉索本身的HDPE层并不易燃烧, 而引燃拉索的LED装饰灯却是易燃物, 故做好挂在拉索上的电路、电器等附着物的安全防火显得尤为重要。

(2) 失火温度及燃烧时间是影响拉索技术性能的关键因素。

拉索PE燃烧相当于对拉索的钢丝进行了热处理, 热处理的温度和时间对钢丝的力学性能产生重要的影响。按国家规范[3]生产的拉索高强钢丝是高碳钢盘条经冷作硬化后的产物, 根据钢材热处理的规律^[6], 淬火或冷作硬化后高碳钢硬度及屈服强度 σ_s 发生改变的回火温度在300℃左右, 破断强度 σ_b 发生改变的回火温度在400℃左右。准确检测拉索失火温度及时间对评判拉索性能的改变至关重要。

(3) 拉索PE燃烧失火对索体钢丝的力学性能基本没有影响, 也不会导致拉索伸长值异常。

拉索PE燃烧情况下钢丝最高温度在250℃左右, 且高温持续时间短, 按照试验结果并结合钢材热处理的规律^[6], 可以认为因拉索PE燃烧造成的钢丝热处理工况不足以改变拉索钢丝的硬度、强度、弹性模量、疲劳强度、断裂伸长率等力学性能。恒载作用下的拉索在失火过程中有少量伸长, 但燃烧过后拉索基本恢复到原来的长度。

(4) 失火对钢丝防腐性能产生破坏作用。

拉索着火后PE烧坏、外露钢丝灼伤痕迹明显, 钢丝镀锌层有明显发灰氧化现象, 即着火拉索钢丝的保护层已经严重破坏, 防腐性能已基本丧失。需要在拉索烧伤处全面有效地修复其多层防护体系。

(5) 综合各项试验结果, 失火对拉索在短期内使用的安全性基本没有影响, 但长期使用的耐久性主要取决于拉索失火处防腐修复的质量以及桥梁运营过程中对拉索的有效管养。

5 拉索体系维修养护建议

拉索是缆索支承类桥梁的核心构件之一, 是

桥梁安全使用的生命线。拉索体系的科学养护是桥梁使用安全性和耐久性的重要保障。桥梁失火拉索体系除了要按现有的国家及行业规范[7][8]进行例行检查、养护之外, 还应重点加强如下养护内容:

(1) 由于拉索着火处的PE护套已被烧毁, 该处拉索的防水和防腐功能已失效, 过火钢丝的防腐性能已有所下降, 全面有效地修复拉索着火处的多层防护体系是保证拉索使用耐久性的关键。

(2) 如果用溶焊法修复拉索PE护套, 由于二次加热会加速PE的老化, 需要定期重点监控修复处的PE开裂情况。

(3) 拉索失火事故容易导致拉索防水体系失效从而造成拉索导管积水、拉索锚头锈蚀, 进而导致拉索体系疲劳抗力的降低, 对拉索的使用寿命带来重要影响。建议对失火拉索索体、锚头的防水、防腐体系做一次全面检查维护。

(4) 拉索在失火过程中的少量伸长会影响到桥梁上部结构的标高并可能引起桥梁的次生灾害, 建议在一定的时期内跟踪监控桥面高程的变化, 直至监控点的高程保持稳定。

(5) 桥梁在投入运营一定的时间后, 由于拉索失火或其他多种因素的影响会导致索力重新分配, 这种变化会给桥梁带来一系列的不利影响。因此进行索力检测及调整是一项重要的桥梁养护工作。

(6) 缆索支承类桥梁拉索索力正常与否是衡量桥梁是否处于健康状态的一个重要指标, 建议对索力进行长期有效监测, 为总体评价桥梁的安全性及耐久性提供科学依据。

参考文献

- [1] 《斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》(GB/T 18365-2001)
- [2] 《公路斜拉桥设计规范(试行)》(JTJ027-96)
- [3] 《桥梁缆索用热镀锌钢丝》(GB/T 17101-1997)
- [4] 《公路悬索桥吊索》(JT/T 449-2001)
- [5] 《金属材料 室温拉伸试验方法》(GB/T 228-2002)
- [6] 《热处理手册》第三版第四卷
- [7] 《城市桥梁养护技术规范》(CJJ99-2003)
- [8] 《公路桥涵养护规范》(JTG H11-2004)