

拉索劣化性能研究

刘元泉¹, 陈惟珍², 徐俊², 唐涛², 杜宪亭²

(1. 路桥集团第一公路工程局 北京市 100024; 2. 同济大学 上海市 200092)

摘 要: 通过对斜拉桥拉索劣化或失效案例的剖析, 介绍了拉索劣化性能以及最新研究成果。分析归纳了当前拉索腐蚀失效的研究现状以及相关试验方法。最后提出了目前在拉索性能研究中存在的局限以及迫切需要解决的问题。

关键词: 斜拉桥; 拉索; 疲劳; 锈蚀

斜拉桥由于线形优美、施工便捷、跨越能力强, 是跨越大江大河的首选结构形式之一。迄今为止, 世界上已建成了超过 300 座的斜拉桥。

拉索是斜拉桥的主要受力结构, 但同时, 由于拉索布置在梁体外部、并长期处在高应力作用下, 其截面尺寸又小, 故对腐蚀非常敏感。近 30 年来, 已有多座斜拉桥出现了事故, 这些桥梁包括委内瑞拉的 Maracaibo 桥, 德国的 Köhlbrand Estuary 桥, 美国的 P-K 桥以及国内的海印大桥和新五桥^[1,2]等。这些出现病患的拉索寿命均未超过 20 年, 相对全桥 100 年的设计寿命, 拉索的寿命显得太短。

最早期的斜拉桥拉索外部没有护套, 拉索为链杆或粗钢筋, 防护和普通钢结构桥梁一样采用油漆防护。这些斜拉桥由于设计理论缺陷而不断出现事故。在 20 世纪中期, 斜拉桥建设又再度兴起, 从 20 世纪 70 年代后期开始, 大多数斜拉桥都采用了护套作为最外部的防护体系, 而同时普遍采用高强钢丝和钢绞线作为承拉构件, 并在钢丝和护套间灌注各种防锈材料作进一步的防锈。其中灌注材料多为波特兰水泥。近 10 年, 由于发现水泥浆防锈蚀效果不佳, 修建的斜拉桥多采用镀锌钢丝或钢绞线、外部热挤双层 PE 护套作为拉索防护体系。

拉索防护层的作用是隔绝受载的钢丝(钢绞线)与外界腐蚀性环境间的接触, 避免钢丝锈蚀和断裂。拉索的防护措施包括: 镀锌、水泥浆、防锈油、环氧树脂水泥浆、环氧树脂外套、包裹单根钢丝或钢绞线的塑料外套、缠包带、阴极防护、惰性气体系统的高密度

聚乙烯(PE)护套等。其中镀锌、水泥浆、热挤 PE 护套、缠包带等是最为常用的防护型式。

1 拉索劣化案例及原因剖析

Maracaibo 桥位于委内瑞拉的 Maracaibo 湖, 建成于 1962 年, 是世界著名的预应力混凝土斜拉桥。该桥最初采用的拉索未镀锌, 以亚麻油、铅底漆以及铁云母甲板漆作为防锈措施。在使用中, 拉索的涂漆层经受不住风雨袭击而剥离, 钢索在上横梁上锚头处的遮罩也被损坏, 导致该处最先出现锈蚀, 此后锈蚀向下蔓延, 在总共 192 根钢索中, 有 24 根存在严重锈蚀, 部分锈蚀钢丝断裂。1978 年的检查发现有 500 余根钢丝断裂。1979 年 2 月, 一根拉索由于腐蚀而突然断裂。最后被迫更换全桥拉索^[3]。换索 18 年后, 发现拉索镀锌钢绞线又出现了锈蚀。

德国汉保的 Köhlbrand 桥全长为 4 km, 于 1974 年建成。主桥跨度为 97.5 m+325 m+97.5 m。拉索直径为 54~104 mm 不等, 强度为 1 200~1 600 MPa, 锁口钢索按传统工艺制造而成, 里面是圆钢丝芯, 中间是楔形钢丝, 外面是 Z 型钢丝。桥梁在交付运营约两年后, 在定期巡查时, 在下锚固区内的拉索上发现钢丝断裂, 看到一根断裂的钢丝从成束的拉索中向外蹦出, 图 1 为钢丝的断裂情况。调查结论认为钢丝断裂的原因包括: 锚头未对准, 导致拉索受到弯曲应力; 拉索与锚头的接合部位防腐不够; 用铅防腐, 但是铅的电位比钢低, 导致接触锈蚀; 没有考虑疲劳因素; 拉索振动; 恒载轻, 使 Z 型钢丝松弛, 加剧钢丝摩

擦;大量使用消冰盐等。

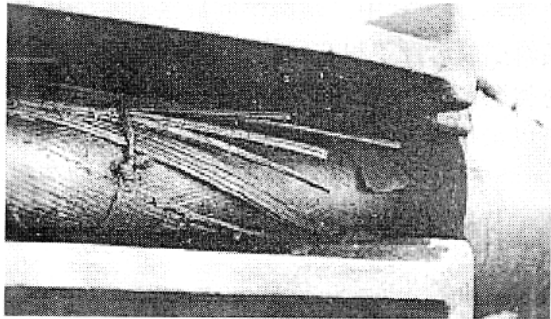
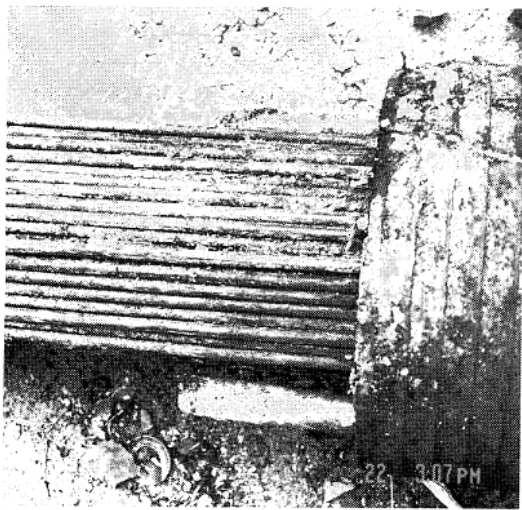


图 1 Köhlbrand 桥的拉索断丝

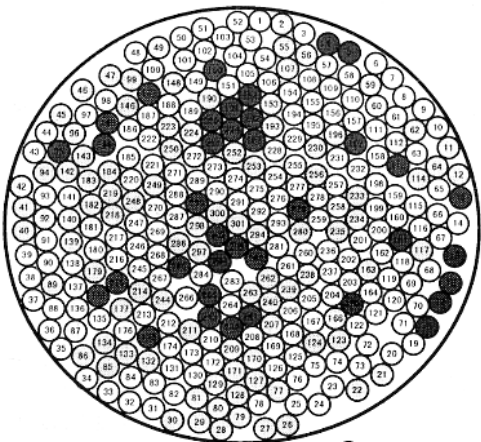
海印大桥建于 1988 年,该桥拉索体系采用进口镀锌高强钢丝、黑色低密度聚乙烯套管、环氧玻璃钢、水泥浆四重防护体系。1995 年其 9 号索发生断裂事故,从距上锚头 1/3 索长处断裂,并且发现第 15 号索也存在松断现象。调查发现管道压浆工艺未能保证拉索顶部的饱满,所以拉索上部并未受到保护,造

成拉索锈断。

恒丰路立交桥为一座独塔斜拉桥,建于 1987 年,其拉索的设计寿命为 20 年。防护体系采用外包 PE 护套,内部灌注水泥浆。海印大桥发生事故后,有关部门采用搭脚手架的方法对恒丰路立交桥的每一根拉索都进行了检测,将索的上部锚头打开,用细铁丝往下探,结果发现索内均存在空穴,量严重的空穴长达 7 m。研究认为这些空穴是由于灌浆不饱满造成的。该桥设计要求灌浆达到拉索上部冒浆 5 min 才能停止灌浆。然而,在实际施工中,由于拉索的护套较为脆弱,为防止护套爆裂,在拉索顶部开始冒浆时就停止灌浆。此外水泥浆收缩也是造成空穴的部分原因。2003 年对恒丰路立交桥进行了换索,检查发现拉索的锈蚀非常普遍,且拉索上部的锈蚀最为严重。对换下的拉索进行力学试验,发现钢丝的抗拉强度平均下降了 15% 左右,见图 2。



(a)



(b)

● 锈蚀严重
◐ 锈蚀中等
○ 锈蚀轻微

图 2 恒丰路立交桥的锈蚀情况(a)和截面锈蚀分布(b)

海印大桥和恒丰路立交桥面临的问题都是由于水泥浆灌浆不饱满造成的,此外国外学者的研究成果也表明拉索在灌浆过程中容易产生气泡^[4],留下锈蚀漏洞,同时不论水泥浆中采用何种添加剂增加水泥的延性,都不可能避免在拉索使用中产生裂纹。

PE 套管是拉索的最外层防护。路易斯安那州 DoT 桥梁设计工程师 Louis A. Oarrldo 发表了一篇文章,专门论述桥梁建成后发生的聚乙烯管的破裂问题。他发现,在 5 根索股上存在 13 条裂缝,有些裂缝长达 4~5 m。主要原因是灌浆时的气温太高,而在炎热气温条件下出现暂时的低温时,管子破裂。

只有拉索背面的裂缝可归因于索力。阿根廷布宜诺斯艾利斯附近有 2 座斜拉桥,两桥相距约 32 km,分别建于 1976 年和 1977 年,主跨均为 330 m。2 年内,其聚乙烯管出现巨大型缝,经分析,为养护不善及在高温下灌浆压力过大所致。修复时,工人们在套筒外缠绕了二层聚乙烯条带后,再在外面缠绕一层 Tedlar 条带,但这只是短期的解决办法。

2 拉索的抗疲劳性能研究现状

鉴于拉索的重要性,对其抗疲劳性能有着严格要求。规范要求拉索在 $0.45\sigma_{UTS}$ (σ_{UTS} 为极限抗拉强

度)的应力范围作用下,承受 200 万次应力循环而断裂钢丝数少于拉索钢丝总数的 5%。

拉索疲劳试验包括以下几个步骤:拉索试件的制作,疲劳荷载的加载,数据的检测与分析。

拉索试件可以采用实际拉索也可以采用缩小比例的拉索,但实际拉索的试验结果更加符合实桥状况。

加载时索的摆放分为水平摆放,垂直摆放和倾斜摆放。三种方式中以倾斜摆放最接近实桥状况,但是倾斜摆放对设备和空间的要求较高。加载疲劳荷载的类型包括:轴向荷载和弯曲荷载。加载轴向荷载时可以采用千斤顶直接加载,但是在加载弯曲荷载时,通常采用在索的中部加载垂直索轴向的荷载(参见图 3)。

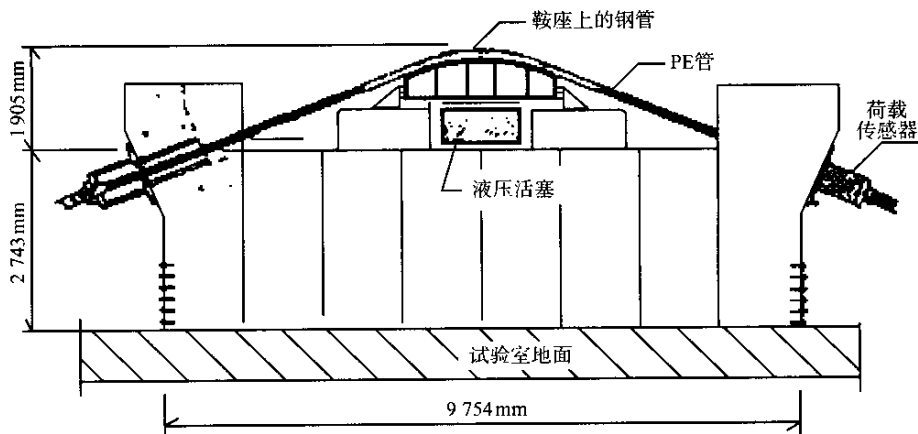


图 3 弯曲荷载施加方法^[5]

拉索疲劳试验通常测试以下几种指标:拉索疲劳寿命,拉索首次断丝时间,拉索达到指定寿命时的断丝数目,拉索断丝位置。拉索的疲劳寿命和拉索达到指定寿命时的断丝数较易测定,而拉索的首次断丝时间和拉索断丝位置则可以根据声发射技术进行量测。由于钢丝在断裂时会发出声响,通过在拉索不同位置布置传感器,记录发出声响的时间,就可以根据距离判断出钢丝断裂的位置与时间。

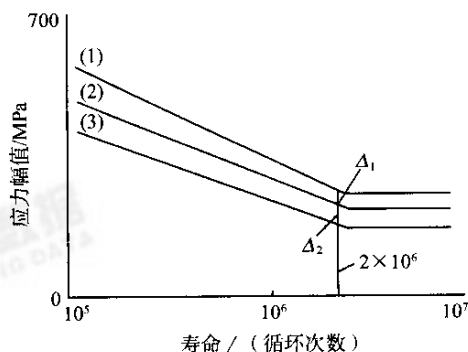
一般在恒载和基本可变荷载组合下,可用 $0.4\sigma_{UTS}$ 作为索的容许应力;如果再加上其他可变荷载的组合,索的容许应力可用到 $0.5\sigma_{UTS}$;而在施工阶段,应力值可能达到 $0.56\sigma_{UTS}$ 。在我国进行的设计中,最大应力值一般在 $0.4\sim 0.42\sigma_{UTS}$ 。

由于荷载的随机性,斜拉桥承受的疲劳荷载一般达不到最不利荷载,仅为 $0.5\sim 0.6$ 的活载应力幅值。对于公路活载,一般实测活载强度仅为设计活载的 13%。

此外,尚应计入其他作用下拉索的弯曲附加应力的影响。这种附加的变曲应力可能由拉索的垂度变化、梁的挠曲以及风致振动产生。

美国后张法学会斜拉桥委员会给出的斜拉索疲劳设计时的疲劳安全度准则如图 4 所示。

Koei 等人^[7]对采用 HiAm 锚的拉索进行了疲劳



注:(1)为单根构件验收标准;(2)为拉索试验标准值;(3)为设计限值; Δ_1 为质量保证数; Δ_2 为长度影响。

图 4 拉索设计准则^[6]

试验研究,发现断裂发生在索的锚固段,至少 5% 的断裂只发生在最外排钢丝中,而内排完全没有断裂钢丝。如图 5 所示。最外排的每一根钢丝具有相同的断裂概率,达到 5% 断裂钢丝的应力幅的变化是非常微小的,因此,如果不考虑这些变化,断裂钢丝的累计数和最外排钢丝数的比值,即可看作是最外排钢丝的破坏概率。

同时,他们还得出结论:在沿索轴线方向,随着索的轴力增大,在索的自由段出现钢丝断裂的可能

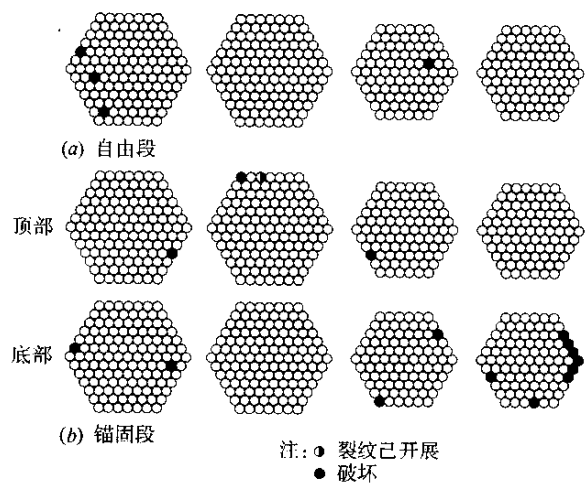
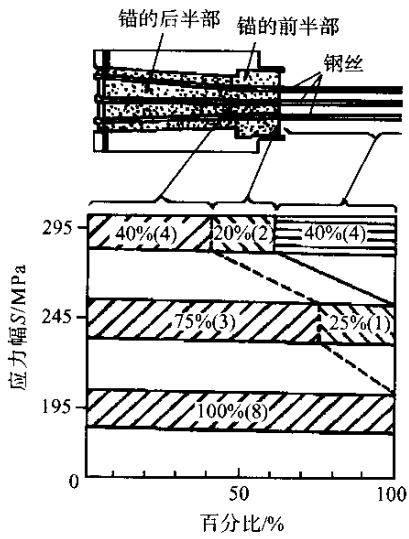


图 5 断裂钢丝在拉索中的位置

性越大,但是,始终是拉索锚头后半部分出现钢丝断裂的概率最大,这是由于该部分应力集中效应较高所致,如图 6 所示。



6 拉索轴向断裂位置和应力幅的关系

3 拉索腐蚀研究现状

对拉索事故的调查显示,拉索断裂事故或多或少地受到腐蚀的影响。腐蚀可以使高强钢丝表面出现凹坑,产生应力集中,同时还缩小钢丝截面并降低钢丝韧性。

现在,研究者普遍接受了 Hopwood 和 Haven 对高强镀锌钢丝的锈蚀分级(图 7)。

阶段 1: 钢丝表面有轻微的金属光泽,但可能在局部位置出现肉眼可见的白色锌锈点。

阶段 2: 钢丝表面光泽由于锌锈而黯淡,甚至覆盖了一层锌的锈蚀产物(白色氧化皮)。但是这一阶段没有铁的锈蚀出现。

阶段 3: 铁锈出现在钢丝表面,镀锌层基本被消耗完,在这一阶段可能出现随机裂纹。

阶段 4: 铁锈替换白色的锌锈覆盖了钢丝表面,钢丝表面粗糙,出现蚀坑。裂纹在这个阶段出现。

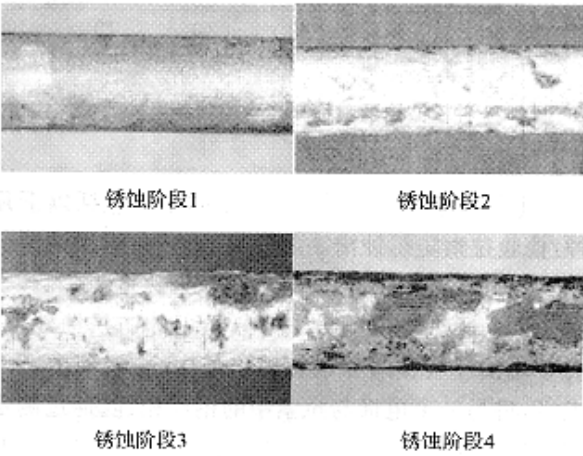


图 7 镀锌钢丝的锈蚀阶段

3.1 高强钢丝的锈蚀速度

Scott 等人对高强钢丝在不同腐蚀环境中的腐蚀进行了研究,对不同腐蚀环境中的高强钢丝腐蚀速度进行了测量,绘于图 8 中,其中 ASTM G85 为美国的加速腐蚀试验标准。腐蚀速度最低的是 Eiselstein 和 Caligiuri 用纽约大气降雨试验的结果,其高强钢丝的腐蚀速度约为 $5.4 \mu\text{m/a}^{[8]}$ 。

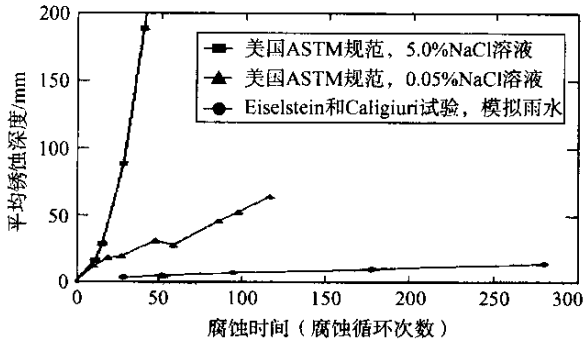


图 8 不同加速腐蚀环境下高强钢丝腐蚀速度

Keita 和 Shun-ichi 将镀锌高强钢丝所处的可能环境划分为 4 类^[9]:

U——夜晚浸湿,白天逐渐干燥;

S——整天都浸湿;

C——整天都在高湿度的空气中；

L——整天泡在水中。

4 种情况下的腐蚀速度如图 9 所示。

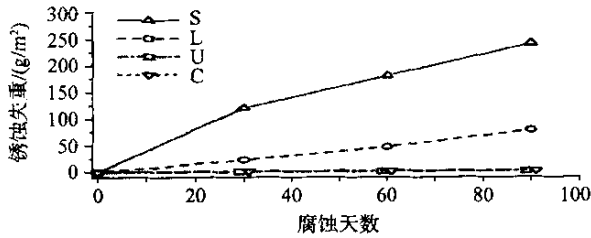


图 9 4 种模拟拉索腐蚀环境中高强钢丝的腐蚀速度

3.2 拉索锈蚀试验

进行拉索锈蚀试验^[8,10]的目的主要包括以下几种：检验拉索防锈蚀措施的效果；确定拉索锈蚀情况下的力学性能指标；判断拉索的锈蚀速度。

可以通过电位测量来判断拉索的防锈蚀效果。将参比试件放在同种电解质溶液中，在溶液中通入电极，将另一个电极与拉索中的钢丝相连。通过测定拉索内电极电位的变化可以确定拉索防锈蚀措施的有效性。当拉索电位突然变化，说明防锈蚀措施开始失效。记录失效时的时间，则可以用于确定该种措施的有效时间。

要确定拉索在不同锈蚀情况下的力学性能通常采用加速锈蚀试验，这是因为加速锈蚀试验能够有效地减少试验时间。但是加速锈蚀试验的设计必须确保锈蚀的规律与实际情况相符，否则测量结果没有实际意义。此外，加速锈蚀试验也包括很多种，近来考虑腐蚀循环的加速锈蚀试验较多，这类试验不但锈蚀速度更快，也更接近真实的腐蚀环境。

4 进一步研究的方法与设想

目前对拉索的研究都还不能应用于斜拉桥拉索的寿命评估工作。对拉索疲劳寿命的研究集中于检验拉索设计时的疲劳可靠性，关于拉索长度效应的部分研究成果甚至是矛盾的^[1,2]。而对拉索腐蚀的研究主要集中在对单根钢丝的研究以及对防锈蚀材料效果的比较。现在迫切需要解决以下几个方面的问题：

- (1) 经试验证明有效的拉索疲劳寿命估算方法；
- (2) 拉索锈蚀程度以及断裂钢丝的无损检测方法

(nondestructive evaluation method)；

万方数据

(3) 钢丝(钢绞线)在不同锈蚀程度下抗力的变化规律和计算方法；

(4) 拉索在锈蚀和疲劳联合作用下的结构状态评定和剩余使用寿命分析方法；

(5) 研究成果的工程应用。

参考文献：

- [1] Albrecht G. Zum Austausch von Tragseilen bei Schragseil- und Hängebrücken. Japanese-Deutsches Kolloquium über stahl- und stahl Verbunddecken. Tu München, 1994.
- [2] Roik K, Albrecht G, Weyer U. Schragseilbrücken. Berlin. W. Ernst & Sohn(1986).
- [3] Hamilton III H R, Breen J E, Frank K H. Investigation of Corrosion Protection Systems for Bridge Stay Cables [R]. Research Report No. 1264-3F. Texas Department of Transportation, 1995.
- [4] Hamilton III H R, Breen J E, Frank K H. Bridge Stay Cable Corrosion Protection I: Grout Injection and Load Testing [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126.
- [5] 龚志刚, 党志杰. 奥尔顿克拉克大桥斜拉索的疲劳强度[J]. 国外桥梁, 1997, (1).
- [6] 党志杰. 斜拉索的疲劳抗力[J]. 桥梁建设, 1999, (4)
- [7] Takena K, Miki C, Shimokawa H, Sakamoto K. Fatigue Resistance of Large-Diameter Cable [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118.
- [8] Barton S C, Vermaas G W, Duby P F, West A C, Betti R. Accelerated Corrosion and Embrittlement of High-Strength Bridge Wire [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 16.
- [9] Suzumura K, Nakamura S. Environmental Factors Affecting Corrosion of Galvanized Steel Wires [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16.
- [10] Hamilton III H R, Breen J E, Frank K H. Bridge Stay Cable Corrosion Protection II: Accelerated Corrosion tests [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126.
- [11] Stallings J M, Frank K H. Stay-Cable Fatigue Behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117.
- [12] Suh J I, Chang S P. Experiment Study on Fatigue Behavior of Wire Ropes [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22.