

基于OTC/PTC 技术的悬索桥主缆系统防腐及耐久性探讨

龙跃¹ 马秀敏² 管方² 李文献¹
麻福斌² 彭春阳¹ 李启富¹ 侯保荣²

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006 2 中国科学院海洋研究所 山东青岛 266071)

摘要:由于传统悬索桥主缆系统的结构缺陷和防腐措施不当,全世界几乎所有的悬索桥主缆系统都普遍存在主缆钢丝不同程度腐蚀的问题。本文首次提出改变原有开放式主缆结构为封闭式主缆结构,应用中国科学院海洋研究所国家海洋腐蚀防护技术工程研究中心成熟的OTC(氧化聚合型包覆防腐技术)和PTC(复层矿脂包覆防腐技术)技术,有效地阻断悬索桥主缆系统的腐蚀途径,提高悬索桥主缆系统的防腐性能,并且降低悬索桥主缆系统管养的技术难度,达到了悬索桥主缆系统的设计寿命要求。

关键词:悬索桥 开放式主缆 封闭式主缆 OTC PTC 腐蚀 耐久性

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.01.001

引言

悬索桥主缆系统是悬索桥的最重要承载构件,由于它的不可更换性,必须与桥梁结构同寿命。然而,悬索桥主缆系统的使用现状不容乐观。据了解,我国几乎所有的悬索桥主缆系统都存在腐蚀病害。国外悬索桥主缆也普遍存在主缆钢丝腐蚀的问题^[1]。

桥梁缆索的使用寿命与其所经受的腐蚀密切相关^[2]。研究表明,预应力筋的腐蚀与预应力筋的工作应力密切相关,工作应力越高,腐蚀速度越快。当预应力筋发生腐蚀时其静载性能明显下降,抗疲劳性能严重退化^[3]。美国纽约市运输局的一份关于悬索桥缆索状况的报告得出结论:由于腐蚀,纽约市区几乎所有的大型悬索桥都存在强度损失的问题,主缆强度损失的范围从微乎其

微到35%^[1]。因此,主缆钢丝腐蚀将造成悬索桥的承载能力下降。显而易见,其耐久性与可靠性直接关系桥梁的使用寿命与运行安全。

悬索桥主缆系统的腐蚀病害主要原因是悬索桥主缆系统的结构缺陷和防腐措施不当造成。经过我们的研究,我们认为,应用OTC/PTC防腐技术,改变原有开放式主缆结构为封闭式主缆结构,可有效地阻断悬索桥主缆系统的腐蚀途径,提高悬索桥主缆系统的防腐性能,并且降低悬索桥主缆系统管养的技术难度,实现悬索桥主缆系统的设计寿命。

1 悬索桥主缆系统防腐缺陷分析

悬索桥主缆系统的基本构造如图1所示。它由主缆段、散索段与锚碇3部分组成。

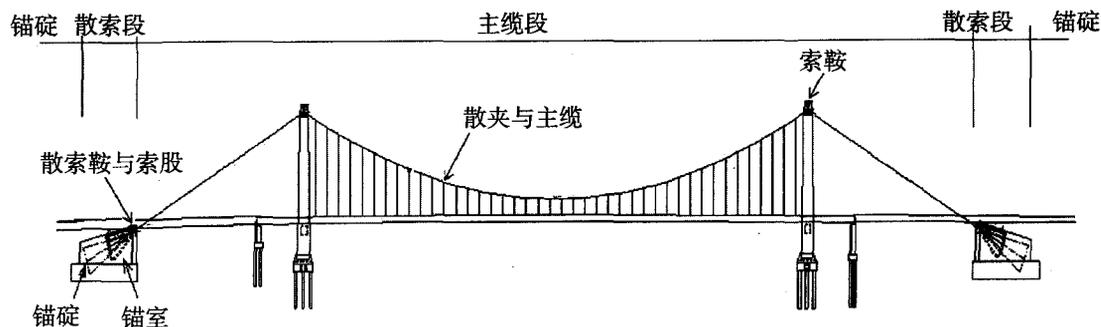


图1 悬索桥主缆系统的基本构造示意图

1.1 主缆段的构造与防腐缺陷分析

主缆段的基本构造如图2所示。悬索桥的主缆一般采用强度1670MPa以上级别的 $\phi 5$ 高强镀锌钢丝组成，紧缆后安装索夹，涂防腐腻子，缠丝后涂外防护层。

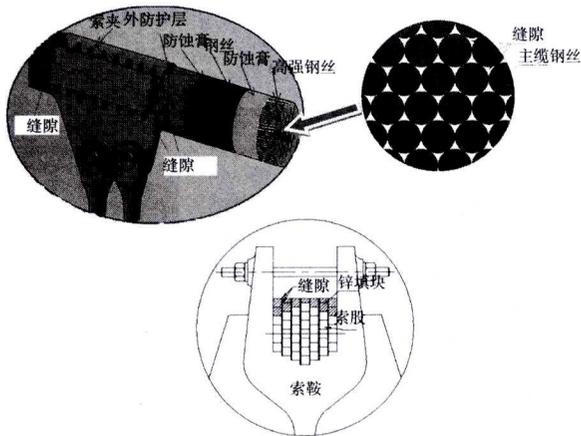


图2 主缆段基本构造图

主缆段防腐缺陷主要有以下几方面：

(1) 由于主缆钢丝缝隙、索夹缝隙、索鞍缝隙的存在，悬索桥主缆已经是实际意义上的开放式主缆。水和氧气可畅通无阻地进入主缆钢丝内部，实现交换。

(2) 外层防护腻子易于老化，开裂，脆化失效^[4]。水和氧气也可进入主缆钢丝内部。实桥外层防护腻子老化后剥落、裂缝，以及因外层防护腻子老化后不能随索夹正常变形而产生不可恢复的缝隙如图3所示。

1.2 散索段的构造与防腐缺陷分析

散索段的基本构造如图4所示。悬索桥主缆钢丝经散索鞍（套）分成单元索股，通过连接件与锚碇连接。

散索段防腐缺陷主要有以下几方面：

(1) 悬索桥主缆钢丝经散索鞍（套）分成单元索股后，散索鞍（套）处钢丝间存在较大的缝隙，并贯通整个主缆。因此，主缆内部极易产生水气交换。之前所述，索夹、索鞍处也存在缝隙。所以，主缆钢丝容易发生腐蚀。

(2) 单元索股只有外表面刷漆的简单防腐措施，索股内部钢丝与水气直接接触。

(3) 锚室空间庞大，尤其是隧道锚，水患

严重。锚室干风除湿系统几乎无法把锚室整个空间的潮湿度长期控制在60%以下。特别是自锚式悬索桥，锚室基本都没有干风除湿系统。所以，锚室索股钢丝长期处在潮湿度90%以上的环境下工作。

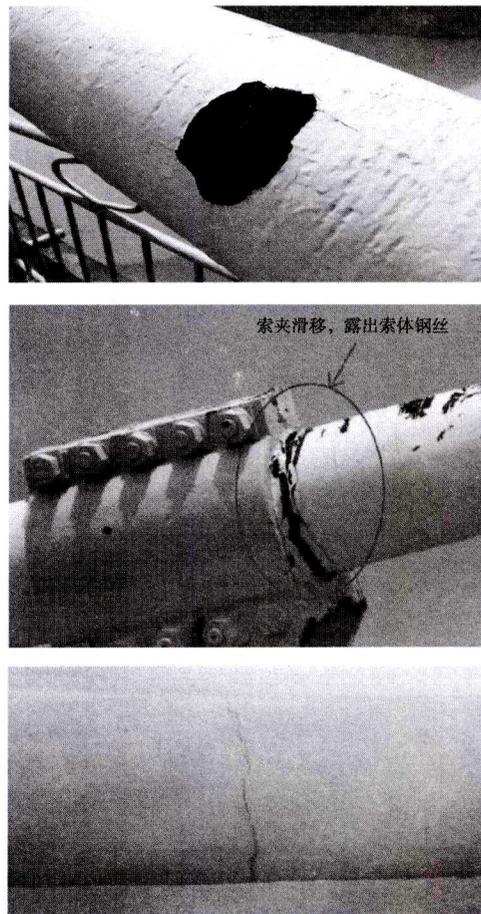


图3 主缆段外防护层老化

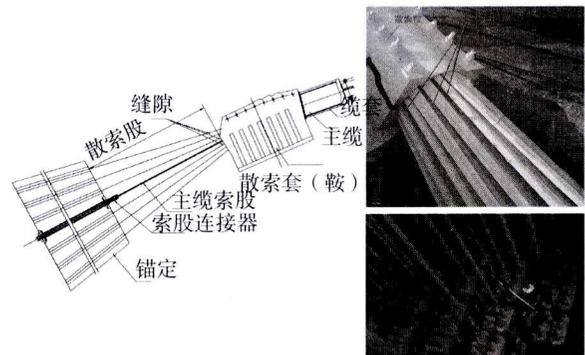


图4 散索段基本构造图

1.3 锚碇防腐分析

新型的预应力锚碇系统，由于采用全防腐可更换式结构，其防腐性能及可维护性较之前的不可更换系统其防腐性能及安全性能有了本质性的

变化。由于其采用全防腐可更换结构,基本上不存在因腐蚀造成的安全风险。

1.4 主缆干风除湿系统的缺陷分析

主缆干风除湿系统于1998年在日本明石海峡大桥首次使用。他把干风以 $2\text{m}^3/\text{min}$ 的风量送入主缆,在140m外设置排风口,主缆潮湿度可控制在40%以下。虽然,类似日本明石海峡大桥主缆干风系统能保持主缆潮湿度在60%以下,但经过这么多年这么多工程的使用,主缆干风除湿系统的致命缺陷已突显易见。

(1) 主缆干风除湿系统能效低。这是因为主缆缝隙小,风阻大。因此,需要大功率的设备才能保证主缆潮湿度达到要求。长期运行成本极高。在国内,主缆干风除湿系统(包括锚碇锚室干风除湿系统)几乎成为摆设。

(2) 因主缆构造的原因,干风除湿系统难以保证主缆全断面送风。据有关资料显示,日本某些设有干风除湿系统的主缆,仍然有积水和主缆钢丝锈蚀的现象。

(3) 干风系统设备费用昂贵,前期投入大,后期运营、维护费用更是高昂,中小跨径桥(自锚式悬索桥)几乎没有安装干风除湿系统。

2 OTC/PTC 防腐技术^[5-7]

OTC/PTC技术是一个多层封闭的主动防护修复体系,多年的测试和成功的工程案例证明,这两项技术对于桥梁主缆系统的腐蚀防护与修复将发挥重要的作用。

2.1 OTC防腐技术

OTC技术已经获得授权4项发明专利,并于2015年审批通过了国家标准GB/T 32120-2015《钢结构氧化聚合型包覆防腐技术》,于2016年5月1日开始正式实施。

(1) 防腐蚀机理

适用于大气区钢结构的OTC技术是一个三层的配套体系,可以形成一个完整封闭的环境,将外界的湿气、氧气、二氧化硫等腐蚀性介质隔绝在外。同时,防蚀膏中的锈转化成分,可将表面残余的铁锈转化为黑色的氧化亚铁膜,形成封闭性保护层,防止钢铁继续氧化、锈蚀,起到除锈、防锈的双重作用。外防护剂是可固化的防护

材料,与空气接触后,可较短时间内氧化聚合成一种坚韧的皮膜,具有耐候、密封、阻燃和耐候性能,有效防止紫外线照射老化和腐蚀介质的进入,形成完整的保护膜。该体系具有良好的密封性,可以将金属表面与水分、盐分、空气等腐蚀性因子隔离,从而达到最好的防护性能。

(2) 性能测试

电化学测试、盐雾试验、暴露试验站(三亚和青岛,见图5)的试验测试和工程应用效果表明,在海洋大气和化工大气环境中,OTC技术具有非常优异的防腐蚀性能。



(a) 对照组:未处理,腐蚀严重 (b) 实验组:OTC防护,螺栓光亮
图5 暴露试验站3年测试结果

(3) 工程应用

OTC技术已经成功应用于海洋和化工大气环境中,对于螺栓螺母、储罐边缘板、焊接部位、桥梁拉索、桥梁防水罩等关键部位(如图6所示)具有良好的防腐蚀效果,因此可以完美解决桥梁主缆的腐蚀问题。

2.2 PTC技术

PTC技术是中国科学院海洋研究所在承担“十一五”、“十二五”国家科技支撑计划项目期间自主研发的一套具有自主知识产权的新型防腐技术,已获得授权发明专利5项,已正式实施山东省地方标准3项,于2016年5月1日正式实国家标准GB/T32119-2015《海洋钢铁构筑物复层矿脂包覆防腐技术》1项。

2.2.1 防腐蚀机理

适用于浪花飞溅区最严重腐蚀环境的PTC技术是一个四层配套的防腐蚀技术体系。矿脂防蚀膏和矿脂防蚀带中添加有性能优良的缓蚀剂、复合稠化剂等能够强有力的粘附在钢铁表面,隔离



图6 OTC技术的应用

腐蚀性介质，对海水中的钢铁起到优良的、长效的保护作用。锈转化剂成分可以直接与铁锈反应，把厚度在 $80\mu\text{m}$ 以下的铁锈层转化成稳定的化合物，使铁锈转化为无害的且具有一定附着力的坚硬外壳，形成保护性封闭层，防止钢铁氧化锈蚀，起到除锈防锈双重作用。含有的不对称结构的表面活性物质，其分子极性比水分子极性更强，与金属的亲合力比水更大，可以将金属表面的水膜置换掉，以极性基团朝里，非极性基团朝外的逆型胶束状态溶存于功能性基料中，吸附和捕集腐蚀性物质，并将其封存于胶束之中，使之不与金属接触，从而起到防腐蚀作用。防蚀保护罩强度大，耐冲击能力强，具有良好的抗热胀冷缩，耐酸、耐碱性能，耐高温性能，能够抵抗海边昼夜温差大，空气湿度大，盐分大的恶劣腐蚀环境。同时可以有效地阻止海生物在被保护钢结构上繁殖，达到防止海生物污损的目的。

2.2.2 性能测试

通过暴露试验站实际效果（图7A。阀门PTC防护）测试和码头钢桩工程防护效果（图7B。钢桩PTC打开效果）分析表明，该技术在潮湿和浪

花飞溅区环境中对钢结构具有非常优异的保护效果，防腐蚀性能优异。

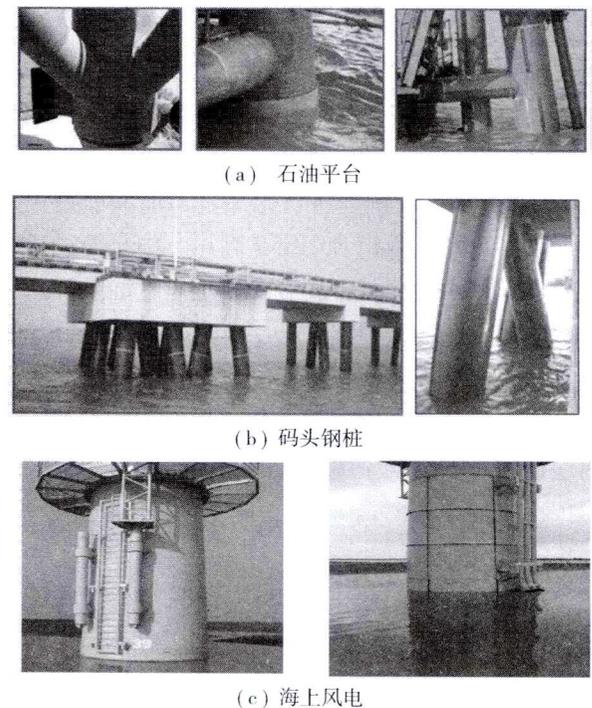


(a) 阀门PTC防护 (b) 钢桩PTC打开效果

图7 PTC性能测试

2.2.3 工程应用

PTC技术已成功应用在潮湿和浪花飞溅区的严重腐蚀环境如石油平台、码头钢桩、海上风电等设施的腐蚀防护与修复中（见图8），因此可以应用于悬索桥主缆系统的防腐，可以取得优异的保护效果。



(a) 石油平台

(b) 码头钢桩

(c) 海上风电

图8 PTC技术应用

3 封闭式主缆系统及防腐措施

封闭式主缆系统是利用OTC/PTC防腐技术，对主缆全段、索股连接件以及索夹、索鞍缝隙进行封闭全防腐处理，尤其是散索段增强了有效的防腐措施。由于OTC/PTC具有良好的防腐性能和采用封闭式主缆结构，彻底阻断主缆的腐蚀途径，解决锚碇尤其是隧道锚的水患问题，一次性永久防腐，简单维护可使主缆实现与结构同等寿

命。同时，取消主缆及锚室干风除湿系统，大大减少昂贵的设备投入及长期运行费用。

3.1 主缆段防腐方案

主缆段防腐以OTC防腐技术为主。防腐方案如图9所示。

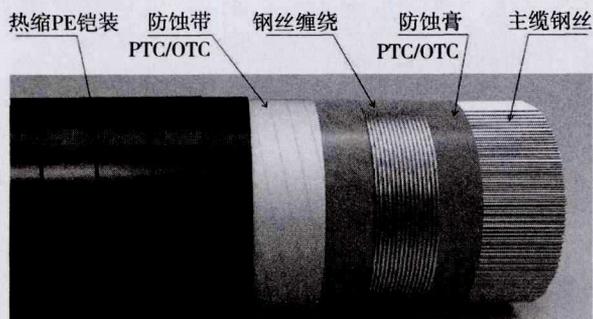


图9 主缆段防腐示意图

3.2 散索段防腐方案

散索段防腐以OTC防腐技术为主。如果是隧道锚，水患严重时，采用PTC防腐技术。散索段防腐策略为：

(1) 散索鞍处利用

OTC/PTC防腐技术封闭钢丝间的缝隙，使得主缆由开放式主缆变为封闭式主缆。

(2) 散索段索股及索股连接件利用OTC/PTC防腐技术全断面包覆。当锚室水患严重时（隧道锚），采用可带水工作的PTC防腐技术。

散索段防腐方案如图10所示。索股连接件防腐如图11所示。

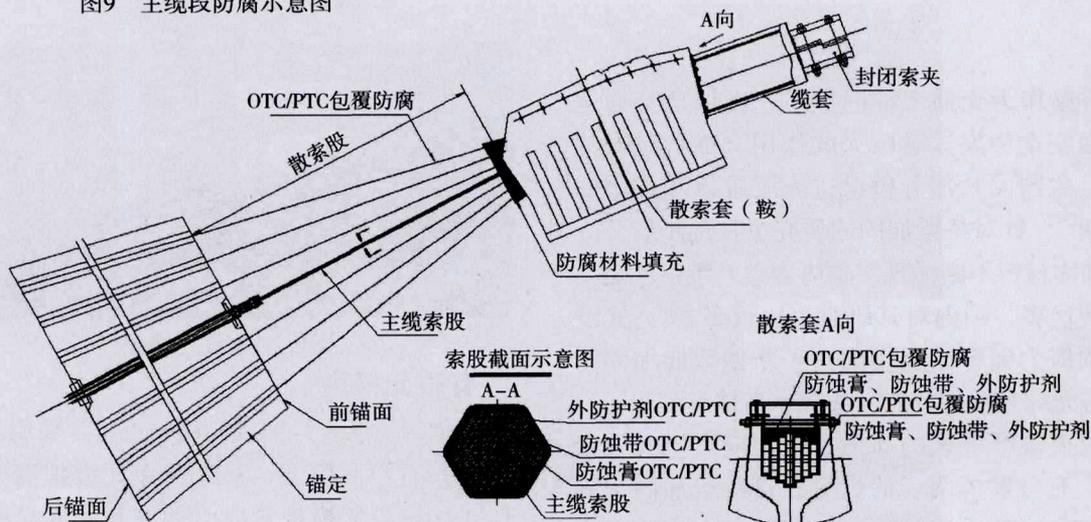


图10 散索段防腐示意图

3.3 索鞍、索夹防腐方案

索鞍、索夹防腐以OTC防腐技术为主。防腐策略主要是利用OTC防腐技术良好的延性及结构位移追随性，封闭索鞍、索夹的各种缝隙。尤其是各种异型缝隙。

索鞍、索夹防腐示意图如图12所示。

4 结束语

腐蚀是影响悬索桥主缆耐久性的最关键的因素之一。由于悬索桥主缆一直采用开放式主缆结构和简单的防腐措施，主缆钢丝长期处于高湿环境下工作，因主缆钢丝工作应力较高，所以，主缆钢丝极易发生应力腐蚀，因而影响主缆的耐久性。

(下转第15页)

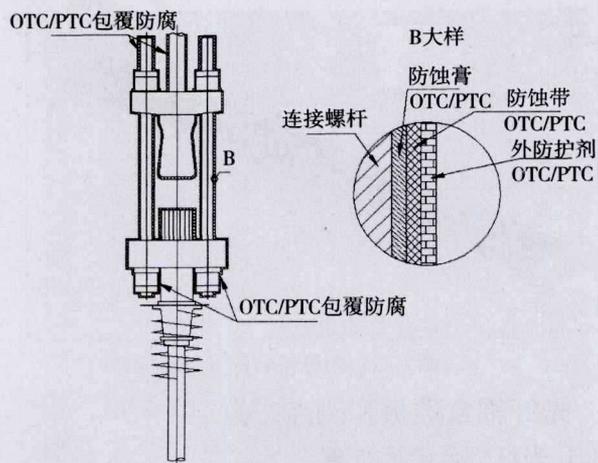


图11 索股连接件防腐示意图

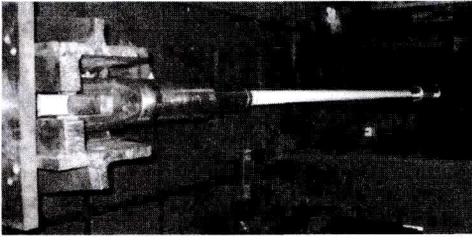


图5 15-3拉索正在进行疲劳试验

表4 挤压压铸复合锚固式拉索疲劳循环数据表

	拉索编号			疲劳次数 (万次)
	1-1	1-2	1-3	
$\Delta l/mm$	13.330	12.112	11.935	0
弹性模量/GPa	196.71	195.80	196.16	
$\Delta l/mm$	13.069	11.874	11.887	100
弹性模量/GPa	197.67	197.49	196.52	
$\Delta l/mm$	12.931	12.012	11.894	200
弹性模量/GPa	199.78	198.82	197.45	

2 结论

本文提出了一种挤压压铸复合锚固式拉索,通过分析及试验验证得出以下结论:

(1) 锚具采用双内锥结构,提高了锚具受力时预应力筋与锚具内壁楔紧力,通过挤压更保证了预应力筋受力充分。

(上接第7页)

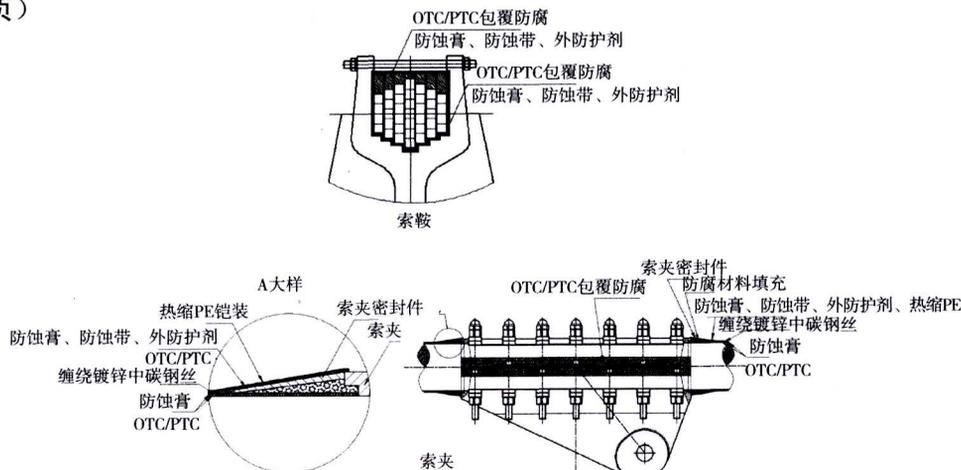


图12 索鞍、索夹防腐示意图

研究首次提出,采用封闭式主缆结构,利用海洋、化工等恶劣环境条件下成熟的OTC/PTC防腐技术,彻底阻断主缆的腐蚀途径,一次性永久防腐,在大大降低主缆维护难度与全生命周期成本的同时,可实现主缆的设计寿命。

参考文献

[1] 李闯,黎世彬,徐沼机. 悬索桥主缆防护系统的现状分析[J]. 公路交通技术, 2003(4):64-67.

(2) 成品拉索中的预应力筋平行无扭角,保证了预应力筋受力的等均匀性。

(3) 预应力筋间钢丝采用环氧隔离,避免疲劳状态下钢丝间的磨擦发热及磨损。

(4) 通过疲劳和静载试验,研究结构表明挤压压铸复合锚固技术,具有良好的静载及疲劳性能,可应用于疲劳性能有特殊要求的建筑、桥梁工程中。

参考文献

- [1] 张毅刚. 建筑索结构的类型及其应用[J]. 施工技术, 2010, 39(8): 8-12.
- [2] 姜鹏,王启明,赵清. 巨型射电望远镜索网结构的优化分析与设计[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 400-405.
- [3] 钱宏亮. FAST主动反射面支承结构理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] 姜鹏,朱万旭,刘飞等. FAST索网疲劳评估及高疲劳性能钢索研制[J]. 工程力学, 2014, 32(9): 243-249.
- [5] 南仁东,朱忠义. FAST工程索网制造和安装工程验收标准[S]. 上海: 同济大学, 上海建筑设计研究院有限公司, 2005.
- [6] 上海市工程建设规范. DG/TJ08-019-2005建筑结构用索应用技术规程[S].
- [7] 中华人民共和国国家标准. GB/T18365-2001斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [8] 钱宏亮,李玉刚,范峰等. 高应力幅作用下的索疲劳性能试验研究.
- [9] 庄苗,朱万旭,彭文轩等. 预应力结构锚固——接触力学与工程应用[M]. 北京: 科学出版社.

- [2] 李翠娟,石峰,舒亚军等. 悬索桥主缆中高强钢丝的腐蚀与脆化[J]. 中外公路, 2015(4):95-102.
- [3] 吴振,龙跃,章陈瀑等. 持荷状态下钢绞线腐蚀及性能退化研究[J]. 广西工学院学报, 2011(3):23-26.
- [4] 叶觉明,李荣庆. 现代悬索桥主缆防护现状与展望[J]. 桥梁建设, 2009(6):67-71.
- [5] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀控制技术[J]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 侯保荣. 大气区钢结构氧化聚合型覆盖防腐技术[J]. 中国材料进展, 2014(2):101-105.
- [7] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀防护技术[J]. 中国材料进展, 2014(1):26-31.