

500MPa超高疲劳性能拉索的试验研究

黄颖¹ 朱万旭² 于兆华³ 朱元¹ 雷欢¹ 苏韩¹

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005 2 桂林理工大学 广西桂林 541004

3 铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验站 北京 100015)

摘要:中国科学院国家天文台利用贵州喀斯特洼坑作台址,在洼坑内架设500m口径球形反射面,建成目前世界上最大、最灵敏的射电望远镜FAST。本文根据该工程工作要求,研制出可承受500MPa应力幅的超高疲劳性能钢绞线成品拉索,试验结果表明此类拉索体系具有静载性能好、疲劳寿命高等特点,极大提高了钢绞线拉索体系的可靠性和耐久性。

关键词:钢绞线 高应力幅 拉索 锚具 500MPa

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.01.003

引言

索在建筑结构中大量应用,各具特色的运动场馆、大型机场、火车站、停车场等美观建筑日新月异,索网作为主要承力构件形成的抛物面悬索结构,多用于建筑结构的采光顶^[1]。

FAST反射面支承结构是整个项目的重要部分,采用整体索网结构,主索网边缘连接于周边支承钢结构上,每个主索网节点连接一根径向控制索。FAST在不工作时,索网节点保持球面的位形,当FAST在对天体进行观测时,有寻源和跟踪2种工作方式,控制索下端与地面促动器相连以实现反射面基准态的形成和工作态的变位^[2]。基准态采用迭代法,工作态采用迭代法进行分析^[3],采用短程线五轴分型方法,使所有主索承受的应力幅控制在455MPa以下^[4]。要求如此之高的疲劳应力幅拉索,在我国,甚至世界工程领域都是首次提出,因此针对500MPa超高疲劳性能拉索进行相关试验研究,以证明产品结构满足FAST工程主索应力幅耐久性的要求。

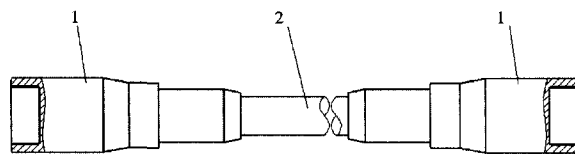
1 FAST工程拉索主要技术指标

FAST在工作状态下,由下拉索促动器控制,通过下拉索向节点施加径向位移,控制主索节点从基准面到工作面移动,索网形状长期在球面与抛物面之间进行切换,因此,研制出超高疲劳性能拉索成为本项目的重点、难点。FAST工程对成品拉索提出的技术要求如下^[5]。

(1) 静载性能:锚固效率系数大于95%,极限延伸率大于2%;

(2) 疲劳性能:上限应力 $0.4 f_{ptk}$,应力幅500MPa,疲劳寿命100万次无断丝,200万次断丝率小于5%;

(3) 拉索试验研究。拉索由两端锚具及索体组成,结构见图1。要实现整根拉索的疲劳应力幅能满足500MPa,锚具和索体结构都进行了研究并试验。



1.锚具 2.索体
图1 拉索结构示意图

1.1 锚具研究

根据FAST工程主索技术指标,结合索网结构特点,对现有拉索锚固技术特点进行分析,见表1。拉索两端的锚具能有效夹持高应力幅钢绞线并通过500MPa应力幅疲劳试验,是成品拉索研制成功的关键。

为了解现有锚固方式在上限应力 $0.4 f_{ptk}$,应力幅500MPa条件下疲劳性能,依据FAST项目中应用数量最多的规格,即由3根 $\phi 15.2\text{mm}$ 钢绞线组成的拉索作为试验索进行研制。试验数据见表2。

(1) 2根整束挤压式拉索的疲劳循环次数都较低,且钢绞线在锚具与拉索挤压接口处发生疲劳断裂;

(2) 拉索编号3夹片锚固式拉索的疲劳循环次数也未超过50万次,疲劳断口是在夹片夹持钢

表1 现有拉索锚固类型技术特点

拉索锚具	锚具特点	疲劳性能
夹片锚	锚具外形尺寸大, 夹片夹持钢绞线部份对预应力筋有损伤, 而且制成成品索后, 为减小筋材折角, 锚具与索间过渡段较长, 锚具整体尺寸与其他类型比都大, 重量偏重, 不利于索网的整体构造。	上限应力 $0.45 f_{pk}$, 应力幅 250MPa
挤压锚	锚具外形尺寸比其他类型都小, 通过挤压方式握裹钢绞线, 对预应力筋损伤小, 且锚具内预应力筋几乎没有折角。	上限应力 $0.45 f_{pk}$, 应力幅 250MPa ⁵
冷铸锚	采用环氧铁砂固化方式握裹钢丝, 锚具外形尺寸比挤压锚大, 钢丝到锚具间的折角比挤压锚大, 但比夹片锚小。	上限应力 $0.45 f_{pk}$, 应力幅 200MPa ⁶

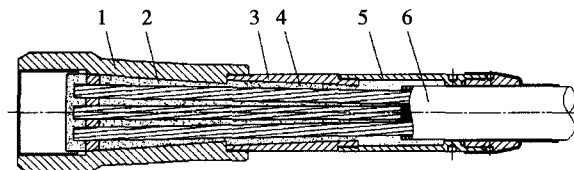
表2 现有锚固方式拉索疲劳循环数据表

拉索编号	加载要求	循环次数 (万次)	破坏形式	钢绞线表面	锚固形式
1	上限应力 $0.4 f_{pk}$, 应力幅 500MPa	18.6	锚具与拉索挤压接口处断6丝	光面	整束挤压式
2		30.1	锚具与拉索挤压接口处断4丝	光面	整束挤压式
3		48.8	夹片夹持处断4丝	光面	夹片式
4		110.9	夹片夹持处断4丝	环氧喷涂	夹片式
5		132.5	夹片夹持处断4丝	环氧喷涂	夹片式

绞线处; 单根钢绞线试验表明环氧喷涂钢绞线疲劳性能显著优于光面钢绞线^[4], 将光面钢绞线改为环氧喷涂钢绞线后, 夹片锚固式拉索的疲劳性能超过100万次, 但仍未能通过 500MPa 应力幅的疲劳试验;

(3) 文献[8]中对冷铸式拉索进行了疲劳试验, 未能通过试验要求。

现有成品拉索无法满足 500MPa 应力幅的疲劳要求, 必须重新研制开发出一种新型的锚固结构, 锚固方式应尽量减少对预应力筋材的损伤, 筋材在锚具中的折角尽量最小或无折角。为提高锚具中钢绞线的疲劳性能, 新研发的拉索锚固段为挤压与握裹相结合的锚固方式——即挤压冷铸复合锚固式; 制锚时先填入环氧类握裹填料再进行挤压。为使锚具结构尺寸更趋合理, 锚具内部采用双内锥结构见图2。此结构锚具对钢绞线无机械损伤, 挤压后双锥形设计为锚具提高了更可靠的握裹力。



1.锚具 2.第一内锥 3.锚具延长段
4.第二内锥 5.密封筒 6.拉索

图2 锚固段示意图

以3根钢绞线锚具为例计算两段锥面水平方向的平均压应力^[9], 第一段内锥平均压应力为 235.6MPa , 第二段内锥平均压应力为 378MPa , 有效的增加了钢绞线握裹力。

1.2 索体研制

拉索采用钢绞线成品索, 单根钢绞线要求满足上限应力 $0.4 f_{pk}$, 应力幅 550MPa ^[4], 挤压冷铸复合锚固式拉索锚具在进行疲劳试验过程中, 曾有4组试验的疲劳破坏在100万次左右, 钢绞线在自由段疲劳断裂, 且试验过程中预应力筋摩擦发热现象严重, 剥除外层HDPE后看到, 发热的温度将内部HDPE热融了, 见图3, 而HDPE的熔点是 135°C , 即钢丝间的摩擦发热至少接近 135°C 。结合表2中4、5组采用环氧喷涂钢绞线疲劳循环次数明显提升的情况, 发热现象明显改善, 每根钢丝单丝喷涂环氧层后, 减小了钢绞线中钢丝间的相互摩擦及磨损。

预应力筋集束索体截面如图4所示, 钢绞线表面涂覆油脂并单根挤包HDPE, 形成独立隔离防腐;

常规拉索集束后, 为方便卷盘运输, 通常会做 $2^\circ \sim 4^\circ$ 的扭角, 对于2根~6根钢绞线索来说, 即使带扭角, 所有钢绞线长度都是一样的, 但如图3所示7~9孔有中间钢绞线的结构来说, 带

扭角后,以7孔为例,周边的钢绞线比中心钢绞线每米长0.61mm~2.44mm,也就是说中心钢绞线在进行疲劳试验时受力最大。

为使成束预应力筋受力均匀,索体中钢绞线集成束,且使其处于平行状态,缠包高强聚酯带固定后挤包外层HDPE护套。由于组成索网的拉索长度不超过12m,运输及储运无需卷盘,为工程实际用索按平行状态制索,创造了前提条件。

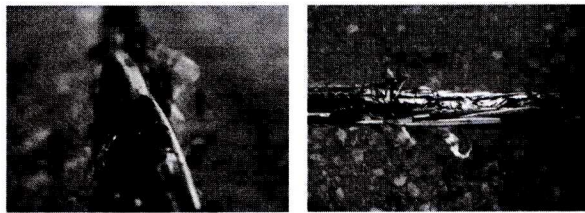
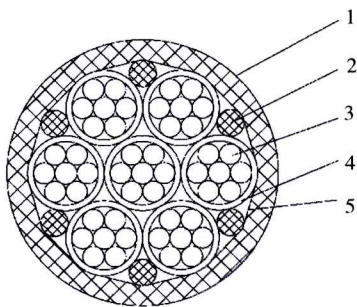


图3 钢丝发热后热融HDPE



1.外层HDPE 2.环氧涂层钢绞线 3.内层HDPE
4.填充绳 5.高强聚酯带

图4 索体截面图

1.3 拉索静载试验

挤压压铸复合锚固式拉索,选规格15-3,15-4,15-6并进行了静载试验,试验结果见表3。

表3 挤压压铸复合锚固式拉索静载试验表

序号	拉索规格	锚固效率系数/%	极限延伸率/%	破坏情况
1-1	15-3	97	2.5	断4丝
1-2	15-3	98	2.2	断3丝
1-3	15-3	98	2.3	断3丝
2-1	15-4	98	4.3	断7丝
2-2	15-4	98	4.1	断7丝
2-3	15-4	98	4.4	断7丝
3-1	15-6	97	3.5	断4丝
3-2	15-6	99	3.5	未拉断
3-3	15-6	99	3.4	断3丝

从试验结果看,锚固效率系数和极限延伸率都较高,很好达到GB/T14370-93《预应力筋用锚具、夹具和连接器》标准要求的锚固效率系数 $\eta_A \geq 0.95$ 和极限延伸率 $\varepsilon_{apu} > 2\%$,而且破坏情况除1根索因千斤顶行程不够未拉断外,其余均为钢丝破断,预应力筋没有滑移,锚具无破坏,连接螺纹旋合正常。极限延伸率的差异在于不同规格拉索的钢绞线进入锚具的发散角度,即便是 0.2° 微小的角度差异也在试验中表现出来。

1.4 疲劳试验

挤压压铸复合锚固式拉索,选工程用量最多的规格15-3进行验证试验。在上限应力 $0.4f_{pk}$,应力幅500MPa条件下进行循环,由于拉索外有PE包裹,不能直接观察到钢丝的断丝情况,在拉索初始进行疲劳试验前测量了拉索的初始长度,并在循环次数在100万次、200万次时,测量了拉索伸长量,通过与初始拉索伸长量的变化量,计算出拉索的弹性模量。拉索在初始状态下,由于钢绞线与锚具间的锚固配合,以及钢绞线之间的相互影响,导致弹性模量偏离实际值,在循环荷载作用下,弹性模量更趋向实际值,因此未断丝情况下弹性模量逐渐变大。如果发生断丝,索体受力面积减小,同等力条件下,拉索伸长量必然增长,弹性模量值则越来越小。试验在铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验站进行,试验现场见图5,从试验数据表4中的弹性模数值逐渐变大可知,试验索在200次循环过程中无断丝,完成试验后剥开拉索外PE后再次确定无断丝情况。

$$E = \frac{\Delta F}{S \times \Delta l} \times L_0$$

式中:

E —弹性模量;

S —索体预应力筋面积,对于3根钢绞线拉索 $S=3 \times 140\text{mm}^2$;

ΔF —索力变化量,350kN;

Δl —张拉伸长量mm;

L_0 —测量拉索伸长变化量的初始长度,3100mm。

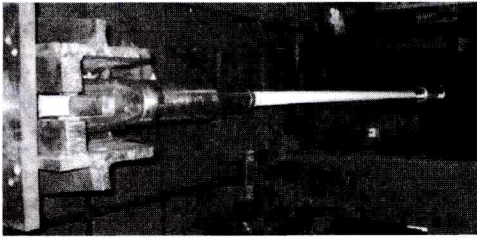


图5 15-3拉索正在进行疲劳试验

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)

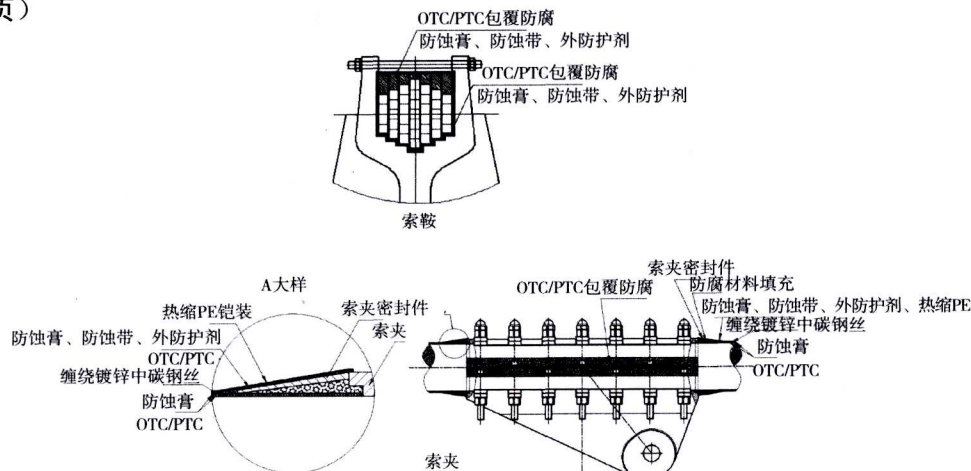


图12 索鞍、索夹防腐示意图

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.