

# FAST工程索网主索疲劳性能研究

雷欢 黄颖 苏韩 朱元 韦耀淋

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

**摘要:**为研制出能够满足FAST工程要求的高耐疲劳性能主索,对索网主索的疲劳性能进行创新性研究,并通过拉索疲劳试验验证主索原材料、锚具结构、索体结构及关键制造工艺的创新性设计与改进,实验结果证实,改进创新后的索网主索能够承受的最高疲劳应力幅可达500MPa,满足了FAST工程的高耐疲劳性能要求。

**关键词:**高应力幅 500MPa 拉索 疲劳 FAST

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2017.05.007

## 引言

500m口径球面射电望远镜工程(以下简称FAST工程)是我国“十一五”重大科学工程项目,是国家科教领导小组审议确定的国家九大科技基础设施之一,坐落于贵州省平塘县克度镇一片名叫大窝凼的喀斯特洼地中,建成后将成为国际上最大、最灵敏的单口径射电望远镜<sup>[1-2]</sup>,如图1所示,它的工作频率在70MHz-3GHz,分辨率可达到2.9',指向精度可达到8"<sup>[3-4]</sup>。FAST主动变位功能就是根据需要观察天体的角度,将索网面型由球面转变为抛物面<sup>[5]</sup>,在500m口径范围内形成直径300米的抛物面即有效照明区域<sup>[6-7]</sup>。而作为实现FAST主动变位功能的关键机构——索网,如图2所示,它由2225个主索、节点盘、下拉索、连接装置组成的主索网单元组成,如图3所示。通过最常用的耐疲劳应力谱分解方法——雨流计数法<sup>[8-9]</sup>对FAST索网工作应力幅进行分析可知,柔性索网作为FAST工程三大自主创新之一——“应用主动反射面技术在地面改正球差”的关键结构,索网工作状态下疲劳应力幅最高达到455MPa<sup>[10]</sup>,考虑到FAST工程结构、使用年限及工况的复杂性,要求索网主索满足500MPa疲劳应力幅,应力上限0.4F<sub>ptk</sub>,应力循环200万次。相比于目前国内外拉索最高疲劳应力幅250MPa来说,难度极高。

一般来说桥梁及大型建筑结构所采用的拉索主要结构形式有:冷铸锚钢丝拉索、热铸锚钢丝

拉索、夹片锚钢绞线拉索及钢绞线整束挤压成品拉索<sup>[11]</sup>。近年来,随着拉索母材性能的提高,锚固技术的深入研究,拉索的性能得到明显提升。现阶段钢丝拉索疲劳应力幅最高可以达到300MPa要求,钢绞线拉索疲劳应力幅最高可以达到250MPa的要求,拉索索长精度可以控制在±5mm以内,但这离FAST工程要求还有较远距离。本文借助FAST工程,将从主索原材料、锚具结构、索体结构及关键制造工艺这四个方面对拉索疲劳性能进行系统的研究,研制出一种可满足FAST工程要求的高耐疲劳性能主索。



图1 FAST完工现场

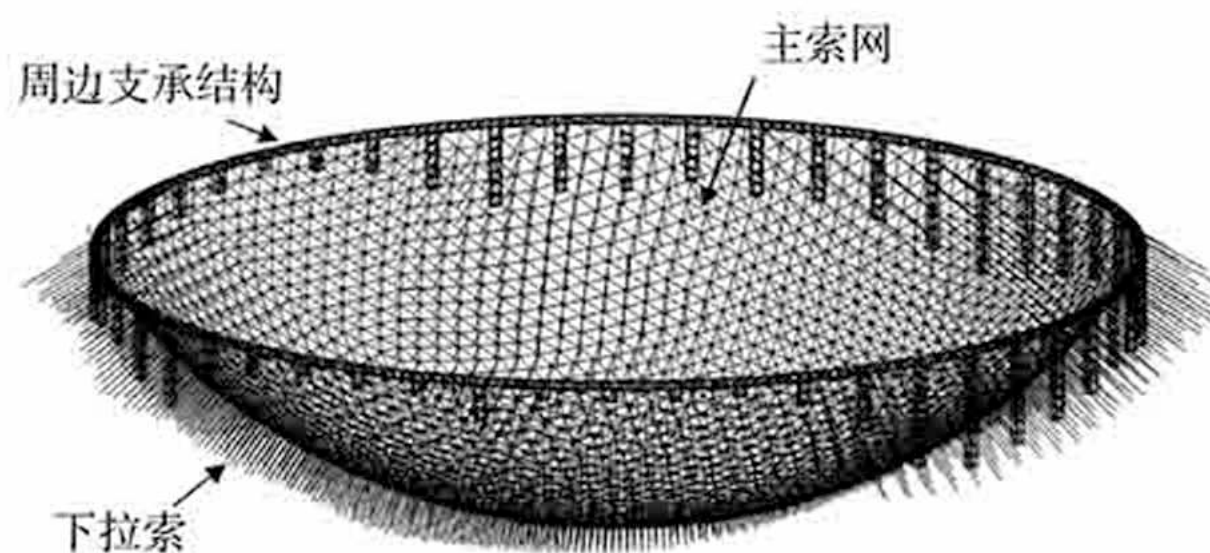


图2 索网结构示意图

转自《装备制造技术》2016年第11期

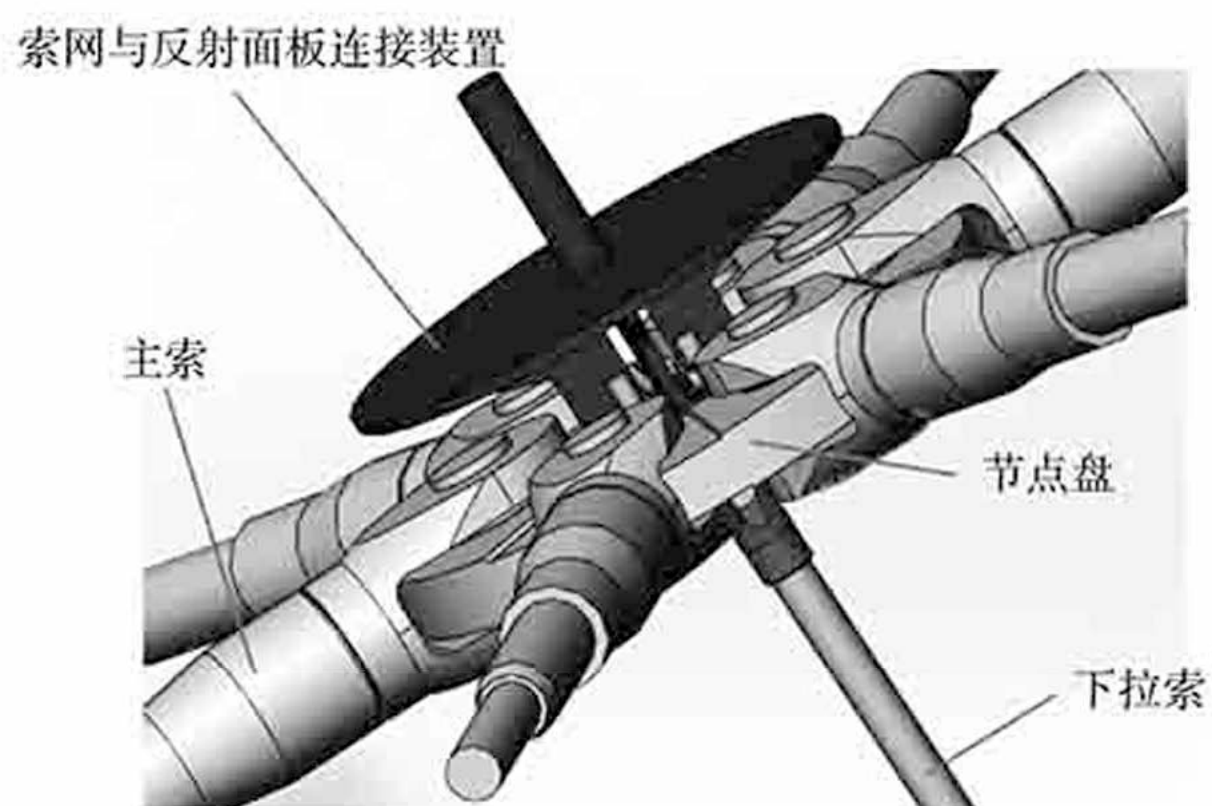


图3 主索网单元示意图

### 1 母材疲劳性能研究

由于制成拉索后，钢绞线与钢绞线之间，钢绞线与锚具之间，钢绞线与填充料之间均存在摩擦腐蚀，将对拉索疲劳性能产生一定的影响。根据疲劳实验经验，原材料相对于拉索至少需要具备约500MPa疲劳强度储备，即拉索要满足500MPa应力幅要求，则钢绞线至少需要满足550MPa应力幅要求。结合钢绞线厂家的意见，本文分别选择A、B两种强度级别为1860MPa的钢绞线，其中A为普通钢绞线，B为特殊材料钢绞线，取每种钢绞线在光面、镀锌及单丝环氧喷涂表面状态下各三根。试验样品标距为1m，按照应力上限 $0.4F_{ptk}$ ，应力幅550MPa，加载频率10Hz的要求在50tMTS液压试验机上进行疲劳实验。试验图片如图4所示，试验结果如表1所示：

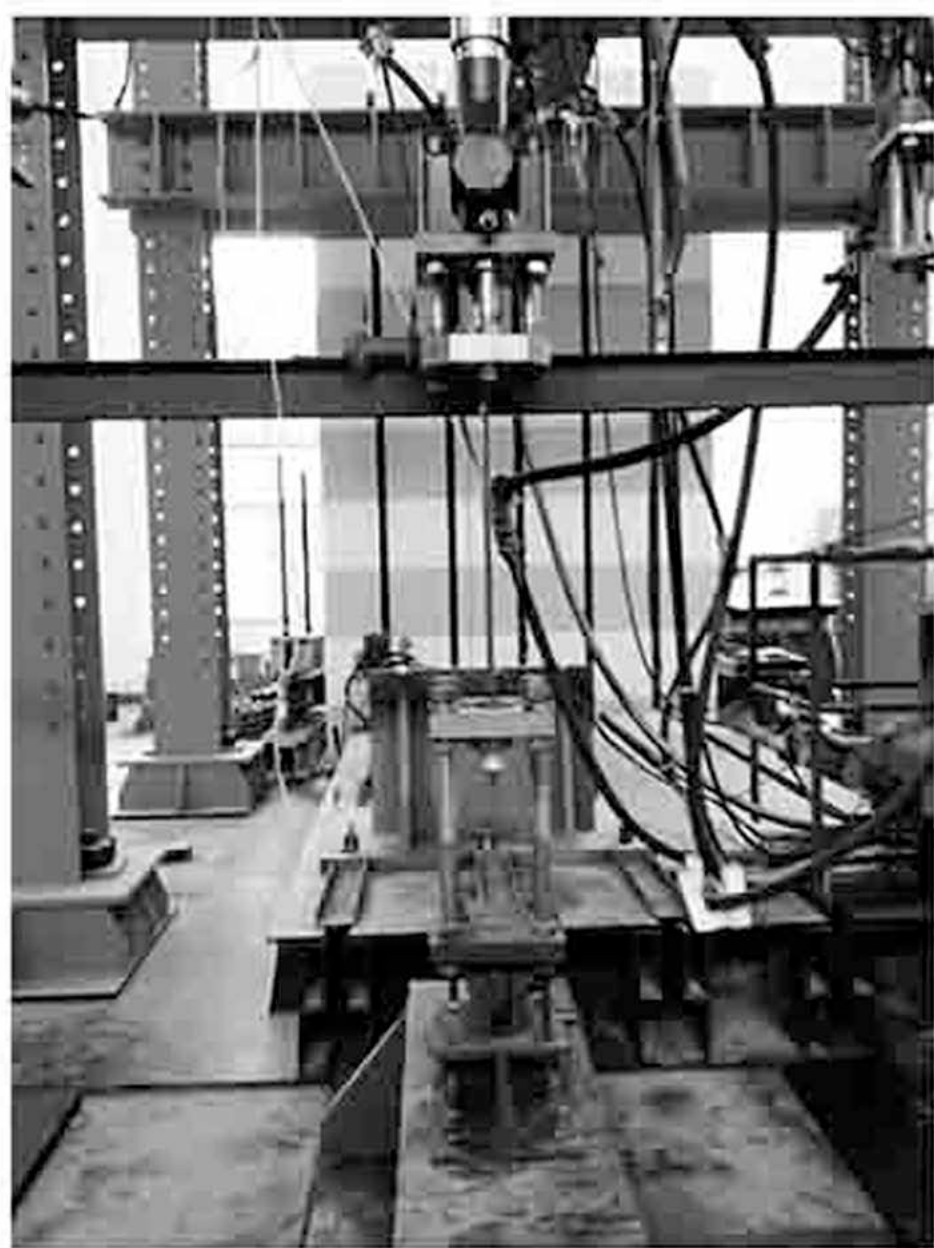


图4 单丝环氧喷涂钢绞线疲劳试验

表1 原材料疲劳试验结果

材料	表面状态	编号	实验疲劳次数	
钢绞线A	光面	A-1	18万次	
		A-2	28万次	
		A-3	49万次	
	镀锌	A-4	38万次	
		A-5	81万次	
		A-6	31万次	
		单丝环氧喷涂	A-7	94万次
			A-8	51万次
			A-9	40万次
钢绞线B	光面	B-1	94万次	
		B-2	110万次	
		B-3	135万次	
	镀锌	B-4	105万次	
		B-5	118万次	
		B-6	200万次	
		单丝环氧喷涂	B-7	200万次
			B-8	200万次
			B-9	200万次

由表1可以看出，采用普通钢绞线，其疲劳性能远远无法满足项目要求。对比光面、镀锌、单丝环氧喷涂钢绞线可以发现，镀锌后对钢绞线疲劳性能没有明显影响，单丝环氧喷涂可以明显提高钢绞线的疲劳性能。原因分析，可能是组成钢绞线的钢丝环氧喷涂后，钢丝之间的摩擦系数减小，有效降低了钢丝之间的微动磨损，使接触应力趋于平均。根据实验结果，本文选择钢绞线B的单丝环氧喷涂钢绞线作为制作主索的原材料。

### 2 拉索结构

尽管由特殊材料制作的单丝环氧喷涂钢绞线通过了550MPa应力幅的疲劳试验，且相对于拉索具有50MPa的疲劳强度储备，但就拉索而言仍面临巨大的挑战。拉索结构形式决定了组成拉索的钢绞线应力集中大小、是否存在损伤、钢绞线受力是否均匀等因素，这些因素对拉索的疲劳性能具有重要的影响。

#### 2.1 锚具结构

要提高拉索疲劳性能，在保证锚固效率系数的前提下，锚具结构形式需要尽可能的减少钢绞线的应力集中、损伤以及受力均匀性的问题。目

前国内外主要的锚固结构形式有冷铸锚钢丝拉索、热铸锚钢丝拉索、夹片锚钢绞线拉索及钢绞线整束挤压成品拉索。FAST工程为保证索网的柔性选择弹性模量较小的钢绞线成品索，现有钢绞线成品索只有钢绞线整束挤压拉索此种形式，项目组采用夹片锚和钢绞线整束挤压锚进行500MPa应力幅疲劳试验，初步测试现有拉索锚固形式在500MPa应力幅下的疲劳性能，试验数据见表2，试验结果表明，现有技术中无论是夹片锚还是钢绞线整束挤压锚的疲劳性能，都不能满足超高应力幅的要求。图5为挤压拉索的失效形式，从图中可以看出，在超高应力幅条件下，钢绞线从锚具内滑脱出来。

表2 现有钢绞线拉索疲劳性能试验结果

序号	拉索类型	拉索规格	载荷 (kN)	疲劳次数 (万次)
1	夹片锚	3×φ15.2	102.5-312.5	48
2	夹片锚	3×φ15.2	102.5-312.5	41
3	整束挤压锚	3×φ15.2	102.5-312.5	19
4	整束挤压锚	3×φ15.2	102.5-312.5	26

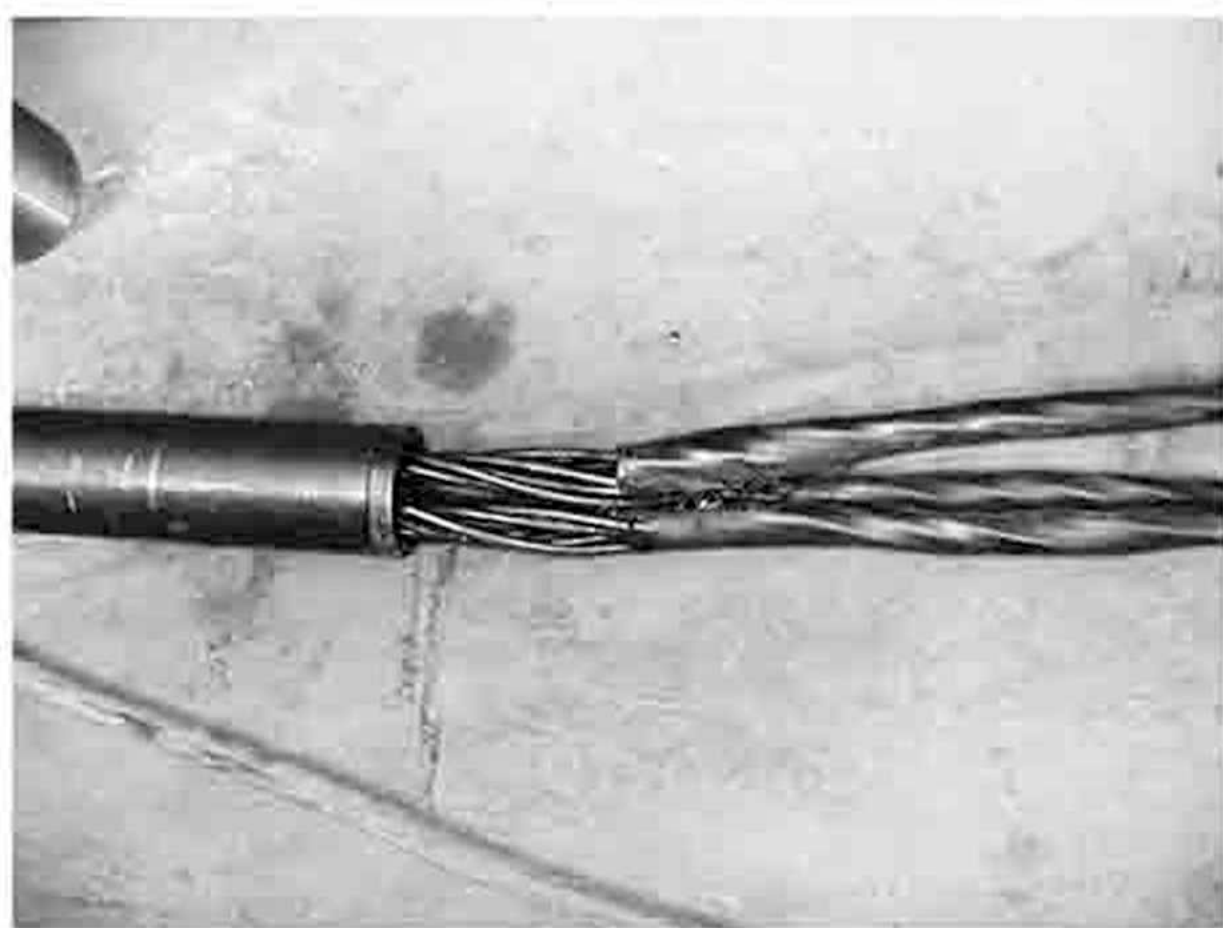
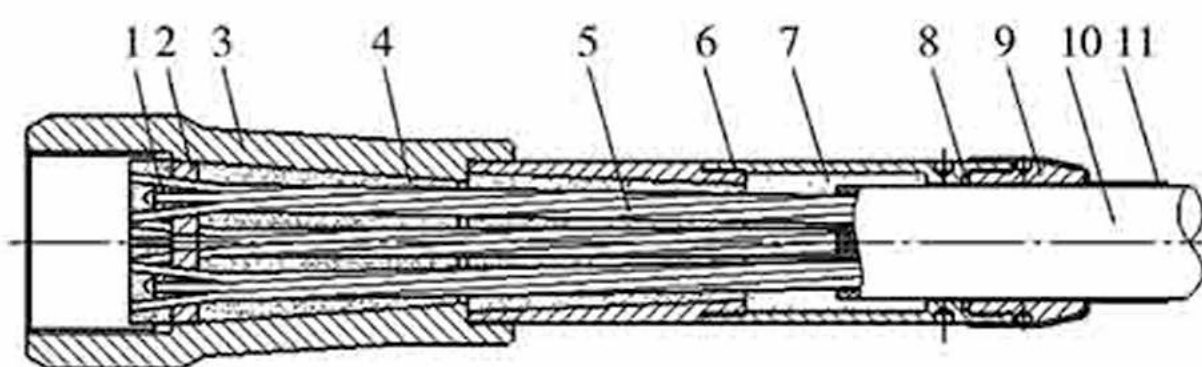


图5 挤压拉索疲劳失效形式

虽然现有拉索形式无法满足FAST工程索网超高应力幅疲劳性能的要求，但每种结构形式均有其各自的优缺点，综合冷铸锚无损伤握裹与整束挤压应力集中小的优点，研究出挤压冷铸相结合的复合锚固方式，即降低拉索锚具内部钢绞线发散角的同时使钢绞线无损伤锚固，使拉索疲劳性能与母材疲劳性能趋近。

如图6所示钢绞线在锚杯中与填料挤压握裹，组成环氧铁砂冷铸与挤压握裹的复合锚固方式。采用这样的锚固方式，无论拉索受力如何，

锚固单元的握裹力都是不变的，在拉索低应力，甚至受负应力状态下都锚固可靠，并在拉索加工完成后，对拉索进行超张拉检验，在保证拉索可靠性的同时，消减了拉索的松弛。



1. 锥套 2. 锚板 3. 锚杯 4. 握裹填料 5. 钢绞线 6. 延长筒  
7. 密封填料 8. 密封筒 9. 压盖 10. 索体 11. 热缩套

图6 锚具结构示意图

与现有锚具结构形式相比，优化后的锚具具有以下优点：

(1) 锚固连接可靠，安全性高。锚具内锚板处，每根钢绞线中心丝套有锥套，并镦头，将钢绞线端部发散为锥形，共同楔入锚板锥孔中，用冷铸环氧铁砂作为握裹填料，将锚板、钢绞线铸为一个整体；采用挤压工艺使冷铸环氧铁砂与预应力筋及锚具接合更紧密，锚具与预应力筋之间的握裹力更致密、更均匀有效，并且是无损锚固；

(2) 拉索锚固段采用双内锥结构，尽可能最大剪应力趋同，钢丝的咬合压紧力随着拉应力减少而反向加大；降低接触面应力集中，使得锚具可以达到很高的锚固性能，锚固效率系数接近于1.0；

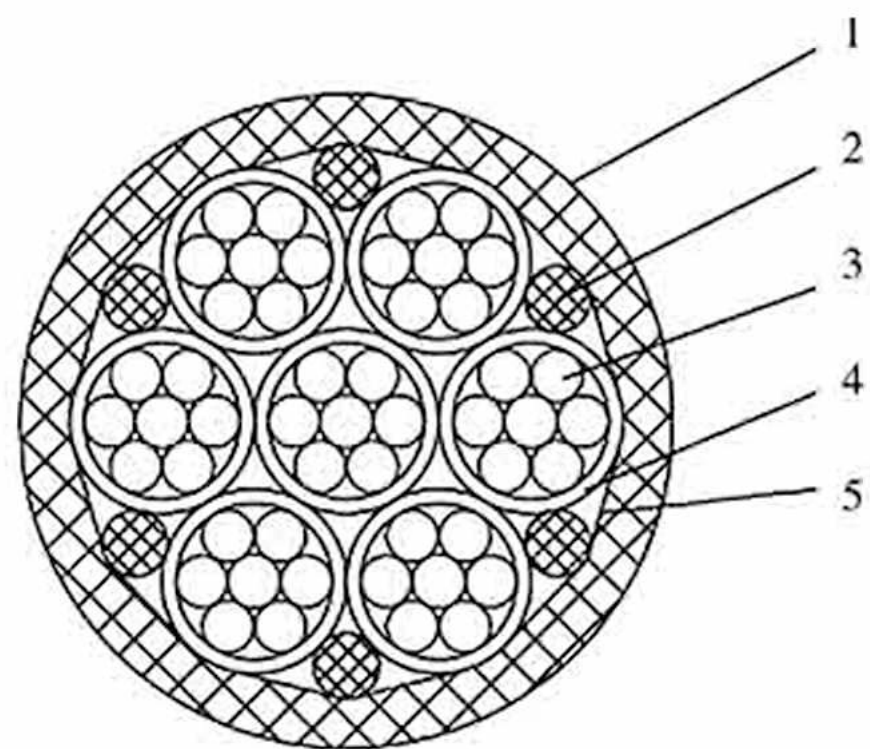
(3) 不管钢绞线受力如何，锚固套对其的握裹力都是不变的，在钢绞线低应力，甚至是负应力状态下都不会松脱；

(4) 锚具内钢绞线间有隔离物，使得其从自由段索体到锚具内均可处于相互隔离状态，有效降低索体内部的微动磨损。

## 2.2 索体结构

由多年的拉索疲劳性能研究经验可知，影响拉索疲劳性能的因素除了母材性能、锚具结构这2个主要因素外，索体的结构形式及生产工艺也将对拉索疲劳性能产生一定的影响。经过项目组深入的分析研究，认为拉索索体的扭角及微动磨损，将对拉索疲劳性能产生影响。为此索体设计

扭角小于 $0.8^\circ$ ，使索体内每根钢绞线等长锚固，消除因扭角造成的周边钢绞线略长于中心钢绞线而产生的受力不均；每根钢绞线有内层HDPE护套，使索体内各钢绞线间隔离避免微动磨损。成品索截面见图7。



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

图7 钢绞线成品索索体截面图

### 2.3 工艺保证

良好的产品结构，还需完备的工艺保证。试制拉索的制锚过程中，对冷铸工艺采用原有固定方式，拉索与锚具间存在一定角度，如图8所示，导致填充料在锚具内不均匀、预应力筋在锚具内不对中等情况，从而使得钢绞线受力不均匀。针对以上不足之处，项目组对制索工艺进行了改进，设计完全垂直的专用装备，保证锚具内部钢绞线分布均匀、对中，如图9所示的垂直固化装置，可以有效保证填充料在锚具内的均匀性。



图8 原有制锚装置



图9 现有制锚装置

### 3 试验验证

通过对拉索从原材料、锚具结构、索体结构及关键制造工艺进行相应的优化后，本文按照挤压冷铸复合式锚固拉索的要求，制造了 $4 \times \phi 15.2$ 与 $6 \times \phi 15.2$ 这2种规格拉索各3根用于疲劳试验，试验在国家建筑工程质量监督检验中心进行，使用设备为电液式脉动疲劳试验机PMW800-4000，按照FAST工程索网疲劳性能要求进行试验。拉索疲劳应力幅设置为500MPa，应力上限按照 $0.4F_{ptk}$ ，试验频率2HZ。试验图片如图10所示，试验结果见表3所示。

表3 拉索疲劳试验结果

序号	拉索类型	拉索规格	载荷 (kN)	疲劳次数 (万次)
1	复合式	$4 \times \phi 15.2$	136.6-416.6	200
2	复合式	$4 \times \phi 15.2$	136.6-416.6	200
3	复合式	$4 \times \phi 15.2$	136.6-416.6	200
4	复合式	$6 \times \phi 15.2$	205-625	200
5	复合式	$6 \times \phi 15.2$	205-625	200
6	复合式	$6 \times \phi 15.2$	205-625	200

由表3可以看出，2种规格形式的复合式拉索能够稳定的通过超高应力幅疲劳试验，证明该结构形式能够满足FAST工程的要求。

### 4 结论

实验表明，从拉索原材料与锚具结构这两个方面进行优化设计，可以有效提高拉索疲劳性能。通过对实验结果进行分析，可以得到以下结论：

(1) 单丝环氧喷涂后，钢丝之间的摩擦系数减小，降低了钢丝间的摩擦腐蚀，能够有效提

高钢绞线的疲劳性;

(2) 当拉索需要满足 $0.4F_{ptk}$ 应力上限, 应力幅 $500\text{MPa}$ , 应力循环 $500$ 万次时, 拉索母材具备 $50\text{MPa}$ 的疲劳强度储备是合适的;

(3) 采用环氧铁砂冷铸与挤压握裹的复合锚固方式可以有效提高拉索疲劳性能, 其疲劳性能远优于其它锚固方式;

(4) 挤压冷铸复合锚固式拉索, 可以满足应力上限 $0.4F_{ptk}$ ,  $500\text{MPa}$ 应力幅,  $200$ 万次应力循环的要求。

本文研制的挤压冷铸复合式锚固拉索目前已在FAST工程上得到应用, 整个安装及调节过程均具有高的适应性, 说明此种结构形式能够满足FAST工程的要求, 本项目拉索在FAST工程的应用情况见图11。



图10 高应力幅拉索疲劳试验

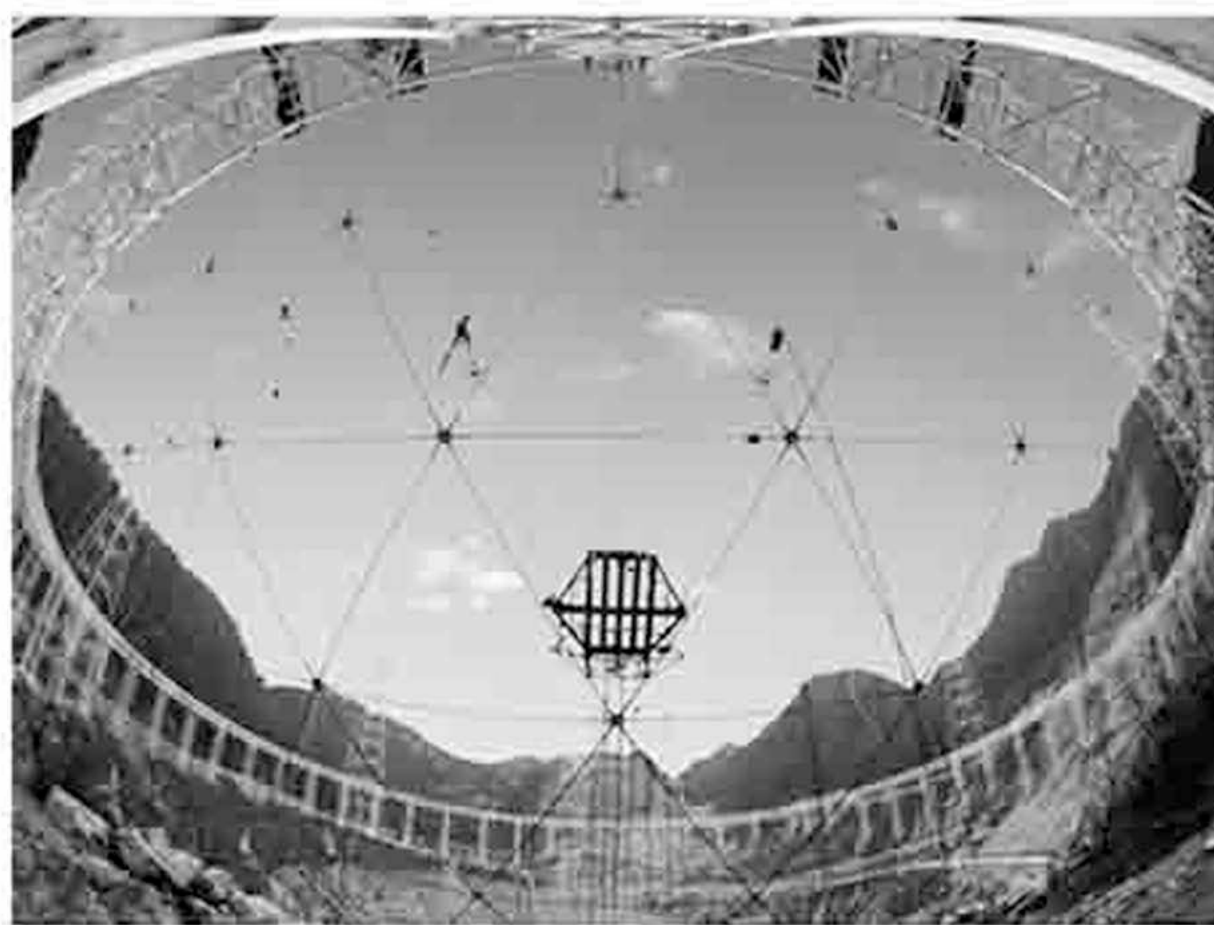


图11 索网安装竣工图

#### 参考文献

- [1] NAN R D. Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST) [J]. Science in China: Series G Physics, Mechanics & Astronomy, 2006, 49 (2): 129-148.
- [2] 宋立强, 王启明, 郭永卫. 太阳辐照 $500\text{m}$ 口径球面射电望远镜的温度分布[J]. 光学精密工程, 2011, 19 (5): 951-958.  
SONG L Q, WANG Q M, GUO Y W. Temperature distribution of FAST under solar radiation [J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19 (5): 951-958. (in Chinese)
- [3] Nan Rendong, Ren Gexue, Zhu Wenbai, et al. Adaptive cable mesh reflector for the FAST [J]. Acta Astronomica Sinica 2003, 44: 13-18.
- [4] Qiu Yuhai. A novel design for giant radio telescopes with a active spherical main reflector [J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 1998, 22(3): 361-368.
- [5] 孔旭, 姜鹏, 王启明. FAST索网高应力幅变位疲劳问题的优化分析[J]. 工程力学, 2013, 30: 169-174.
- [6] 钱宏亮, 范峰, 沈世钊, 王启明. FAST反射面支承结构整体索网分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (6): 750-752.  
Qian Hongliang, Fan Feng, Shen Shizhao, Wang Qiming. Analysis on cable-net structure supporting the reflector of FAST [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37 (6): 750-752. (in Chinese)
- [7] 钱宏亮, 范峰, 沈世钊等. FAST反射面支承结构整体索网方案研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38 (12): 18-23.  
Qian Hongliang, Fan Feng, Shen Shizhao, et al. The cable-net structure supporting the reflector of FAST [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (12): 18-23.
- [8] 范峰, 金晓飞, 钱宏亮. 长期主动变位下FAST索网支承结构疲劳寿命分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31 (12): 17-23.
- [9] 阎楚良, 卓宁生, 高镇同. 雨流法实时计数模型[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24 (5): 425-426.
- [10] 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, 2015, 32 (9): 243-249
- [11] 黄颖, 朱万旭, 于兆华等.  $500\text{MPa}$ 超高疲劳性能拉索的试验研究[J]. 广西科技大学学报, 2016, 27: 7-11.