

超长大规格高强悬索桥主缆单元索股制造技术研究

张海良¹, 沈旺², 李刚¹, 郭健²

(1. 上海浦江缆索股份有限公司, 上海 201314; 2. 浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江舟山 316000)

[摘要] 以西墩门大桥国产 1 770 MPa 主缆索股制作技术为基础, 进一步研究超长 ($\geq 4\ 250\ \text{m}$) 大规格 (≥ 169 丝) 高强度 (1 860 MPa 等级) 主缆单元索股制造技术, 同时对主缆索股的水平收放索技术和装置进行进一步的研究, 为特大跨径悬索桥主缆单元索股的制造提供技术研究基础。

[关键词] 特大跨径; 大规格; 1 860 MPa 等级; 4 250 m; 疲劳试验; 放索试验

[中图分类号] U447.27 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)07-0008-04

1 前言

文章是以主跨 1 650 m 的西墩门大桥主缆索股制造技术为基础, 进一步研究超长大规格更高强度主缆索股制造技术, 同时对主缆索股的水平收放索技术和装置进行进一步的研究, 为特大跨径悬索桥使用 PPWS 法 (预制平行钢丝索股法) 编制主缆单元索股提供技术研究基础。

编制的单元索股规格突破了传统最大 127 丝, 达到了 169, 217 丝等以上, 有效地减小了锚碇空间, 并结合使用自主知识产权产品仿悬索桥线性单元索股, 提高了索股内钢丝受力均匀性, 有效地解决了索股由于主缆线形、索鞍曲率的存在产生的需要索股内钢丝长度不一的问题。试制的单元索股长度达到了 4 250 m, 单根索股重量达到 120 t, 这为建设超过 2 500 m 跨径的特大跨径悬索桥使用 PPWS 法进行主缆索股编制提供了研究基础。研究使单元索股钢丝抗拉强度达到了 1 860 MPa 等级, 开发了适用 PPWS 法单元索股水平成圈放索技术的智能放索装置, 实现了智能化放索控制。

2 研究内容

超长大规格高强度单元索股规格为 $\phi 5.1\ \text{mm}$

$\times 169$ 丝, 长度 4 250 m, 单根索股重量达到 120 t, 为目前已知悬索主缆单元索股中规格最大, 长度最长, 强度等级最高, 重量最重。针对这种超大超强的单元索股, 它所需要的编制设备、精度控制技术、锚固工艺、试验验证、水平收放技术应用智能放索装置也必须满足要求。

2.1 单元索股编制设备研究

单元索股的编制, 包括钢丝从多层放线架出线, 经过线架, 进入分丝板、成型机、牵引机, 定距缠带成型, 最后在成圈机上成圈, 针对研究单元索股的特点进行了如下重新设计和改造。

1) 放线架的重新设计。重新设计的放线架为 2 层 (并预留 3 层改造能力和空间), 单盘放线架的存放能力超过 2 t, 增加了有效联动制动装置, 可使所有放线盘同时制动, 并确保所有放线盘的同步性, 为保证索股编制精度的第一步。重新设计的多层放线架见图 1。

2) 单元索股形状的控制。设计了 3 组六角整形压轮装置 (见图 2), 使索股成型更加紧密, 提高索股钢丝之间的平行度, 同时在经过多次编索和放索试验后发现将绕包间距由 1 500 mm 调整为 1 800 mm, 层数也由 8 层调整为 10 层 (见图 3), 保证索股形状和合适的绕包张紧力, 从而将 169 根钢

[收稿日期] 2010-04-20

[基金项目] 国家科技支撑计划项目 (2008BAG07B03)

[作者简介] 张海良 (1979-), 男, 安徽合肥市人, 电气工程师, 研究方向为桥梁用缆索结构、建筑结构用缆索、预应力结构等;

E-mail: zhl_126@126.com

丝长度差减到最低,为保证索股精度要求的第二步。



图1 改制放线架结构相片

Fig.1 Reconstructed cable reeling frame

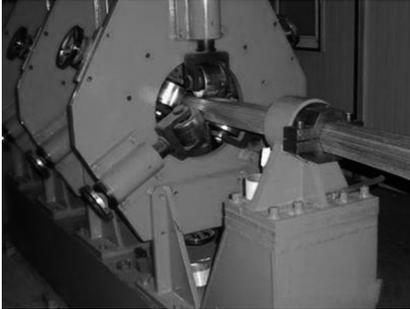


图2 六角整形压轮装置相片

Fig.2 Hexagonal pressing wheel devices

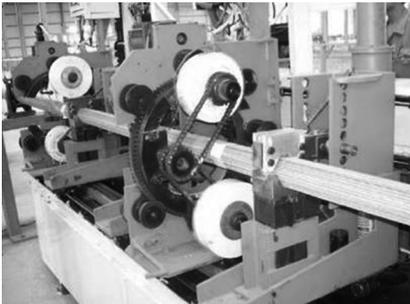


图3 循环自动绕包机

Fig.3 Circular automatic winding machines

3) 索股牵引力与编制精度的优化。针对编制索股的特点,通过试验得出合适的牵引设备结构和牵引力数据,同时牵引装置(见图4)由不损坏镀锌钢丝镀锌层的高硬度钨钢制成,为保证索股编制精度控制的第三步。

4) 编制过程中对高强镀锌钢丝镀锌层的保护。放线架的摩擦环和滚轮表面是经过特殊处理的,它由无缝钢管卷制而成,表面进行喷砂,抛光处理,成型机压轮的材料改为尼龙。在分丝板穿丝孔中的衬套里安装拉丝模,此模的材质为钨钢,具有极高的光洁度和硬度,这些改进都为减少编制装置对镀锌钢丝的摩擦(见图5)。



图4 牵引装置

Fig.4 Traction devices



图5 过线架及分丝板

Fig.5 Thread take-up eyelet holder and wire dividing plate

2.2 索股精度的控制

对4 250 m 长度的单元索股,采用6 根标准丝的方法进行精度的控制,标准丝上每隔一段距离设置一个标记点,以其中一根标准丝为基准,其余5 根为参照,根据位移差来测量索股偏差,控制索股精度。通过放索试验验证达到了单元索股制作精度应达到1/15 000 以上(见图6)。同时从理论分析来看,束股制作工艺可以满足束股的制作精度要求,并且在长期的生产经验以及检验中证明,其精度也是满足要求的。

2.3 锚固工艺

研究表明通过提高钢丝与锌铜合金的粘结力是

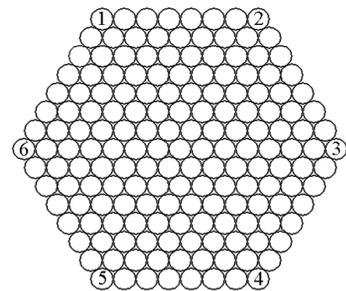


图6 标记钢丝示意图

Fig.6 Schematic figure of marking steel wires

提高锚固能力的关键。选用合适的清洗助镀液是很好的方法。研究人员进行单丝锚固性能试验时,选取了3根使用助镀液的锚固试件与2根未使用助镀液的锚固试件进行金相分析(见图7至图9)。

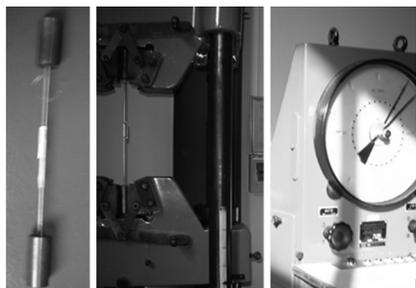


图7 丝锚固试验研究

Fig. 7 Single wire anchorage test

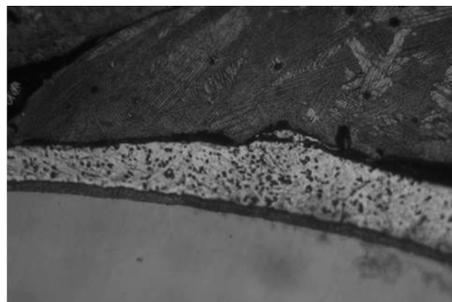


图8 过渡层 0.015 mm (未用清洗助镀液)

Fig. 8 0.015 mm transition layer (without cleaning plating assistant agent)

研究表明使用了清洗助镀液的样品钢丝与合金料接触均匀紧密,有着较清晰的结合面,扩散状况较均匀,过渡层厚度 ≥ 0.02 mm,未用清洗助镀液的样品钢丝则在与合金料接触处存在杂质,使扩散层较



图9 过渡层 0.02 mm (使用清洗助镀液)

Fig. 9 0.02 mm transition layer (with cleaning plating assistant agent)

薄,均匀性较差,过渡层厚度 ≤ 0.015 mm,可见使用助镀液的镀锌钢丝比未使用助镀液的镀锌钢丝过渡层厚,结合更紧密,粘结力更高。同时,清洗助镀液的浓度越高,钢丝表面镀锌层残留物质越少,纯锌层厚度越薄,钢丝与锌铜合金料接触更加紧密,锚固性能更好。

2.4 水平收放应用智能放索装置

西堠门大桥主缆单元索股架设上成功应用了彻底解决“呼啦圈”现象的水平成圈技术,降低了运输储存成本,提高了索股架设质量和效率。

研究研制大吨位智能水平放索装置,对原有人工控制方式进行再次开发,实现 PLC 控制,人机界面采用先进的 HMI 系统进行监控,系统中的所有设备状态和测量数据都能得到显示,并实现实时控制和调节,数据还可以保存和形成报表,操作更简单方便,整个过程进行自动化控制,提高了工作效率(见图 10)。

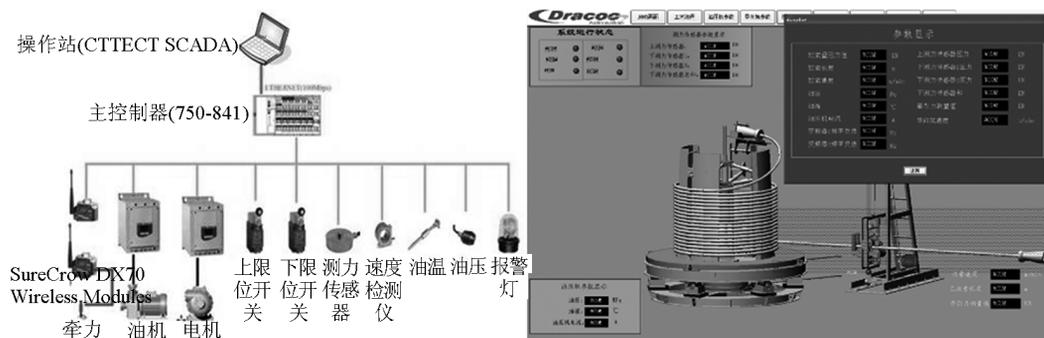


图10 智能放索装置实现智能控制示意图

Fig. 10 Schematic figure of realizing intelligent control of intelligent cable releasing device

2.5 试验验证

为对超长大规格高强度单元索股的各项研究指标进行验证,研究组进行了多规格静载试验、疲劳试验、放索验证试验,具体如下:

1) 静载试验。研究组试制了3根 1 860 MPa 等级 $\phi 5.1 \times 91$ 规格、3根 1 860 MPa 等级 $\phi 5.1 \times 127$ 规格、2根 1 860 MPa 等级 $\phi 5.1 \times 169$ 规格索股进行静载试验,试验结果均符合《悬索桥预制主缆丝

股技术条件》(JT/T395-1999)规范和研究指标要求,试验报告见:1 860 MPa 等级 $\phi 5.1 \times 91, \phi 5.1 \times 127, \phi 5.1 \times 169$ 规格静载试验报告见《检测报告(JG(2009)第32,33号)和(JG(2010)第03号)工程兵一所结构、传动、多波谱性能检测实验室》。

2)疲劳试验。为验证大规格高强度单元索股锚固工艺,研究组在国内外首次对主缆单元索股进行了200万次,250 MPa 应力幅的疲劳试验,试验要求如下:应力上限 $0.40 \sigma_b$,即上限拉力为2 568 kN,应力幅为250 MPa,200万次疲劳试验后断丝率不大于5%,锚具无明显变形。疲劳试验结果是:200万次后无断丝、锚具无变形,再进行静载试验,达到破断载荷95%后无断丝。见疲劳试验报告(《检测报告(JG(2010)第04号)工程兵一所结构、传动、多波谱性能检测实验室》)。静载、疲劳试验后对锚头

进行解剖检验,表明锌铜合金浇注密实(见图11)。

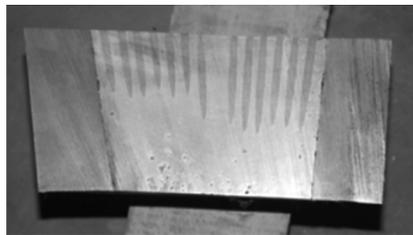


图11 试验后锚头浇注体解剖图

Fig. 11 Profile of cast anchor head after test

3)放索试验。为验证超长规格高强度主缆单元索股的编制工艺是否满足研究任务,研究组编制了一根1 860 MPa 等级 $\phi 5.1 \times 169$ 规格,长4 250 m,重量达120 t的试验索股,结合水平成圈技术,使用智能放索装置进行放索试验,以验证研究技术。放索场地布置图如图12所示。

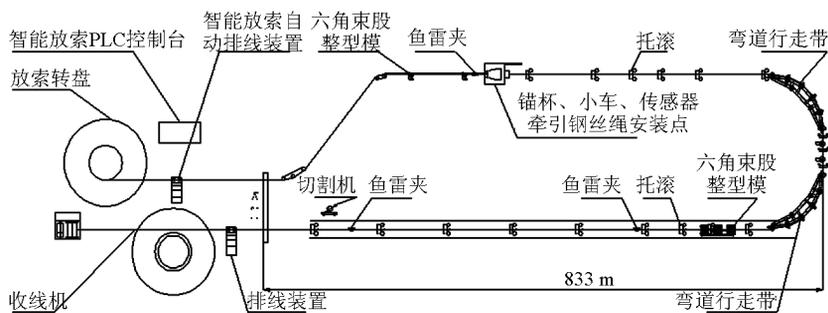


图12 放索试验工艺布置图

Fig. 12 Technical layout of cable releasing test

放索过程如图13至图16所示。第一阶段:试验索用卷扬机牵引。开启卷扬机,先以10 m/min启动。经过第1组导向辊转弯进入直线段后,在800 m直线段中,分别以20,40,60 m/min速度牵引,并分别测量牵引力和牵引速度。检验索股各项检验数据,同时检测智能放索装置各项功能是否可正常使用。第二阶段:索股进入弯道,增加六角索股滚压整

形模,继续用卷扬机牵引索股,进入下一个800 m直线段,实时用电脑控制智能放索装置,检测控制能力,并检测各项检验数据。第三阶段:放索到车间西尽头,试验索改由成圈机牵引,不用卷扬机。成圈机的牵引速度大约为10~30 m/min。

牵引阶段索股及智能放索装置的检验情况如表1所示。



图13 放索准备

Fig. 13 Cable releasing preparation



图14 放索过弯道

Fig. 14 Releasing cable around a curve



图 15 放索过程中索股形状

Fig. 15 Strand shape in releasing process



图 16 索股收卷

Fig. 16 Reeling strands

表 1 牵引阶段索股及智能放索装置的检验情况表

Table 1 Checking of strand and intelligent cable releasing device in traction process

检验内容	整个放索过程
钢丝情况	在放索开始有 3 处鼓丝, 不严重, 钢丝大约无明显弯折、打结、脱锌
索股截面保持情况	良好
包带情况	无散包
索股扭转情况	逆时针最大转了 90°, 顺时针最大转了 180°
索股成圈情况	正常, 放索架上索股未从放索架上脱落
放索装置刹车情况	各档放索速度下, 放索装置刹车都能正常工作
放索速度	放索在 20, 40, 60 m/min 速度下正常施放
导向架调节情况	索股在各速度下, 随着牵引速度和施放角度的变化, 索股随着导向轮上下自动调节
电脑控制情况	通过输入参数的变化, 有效地实现了放索速度、牵引力的调整, 能够实时显示检测数据, 可正常输出 (见图 17、图 18)
标记钢丝相对误差	5 根钢丝相对最大误差为: +169 mm (2 号), +91 mm (3 号), -77 mm (4 号), +61 mm (5 号), +109 mm (6 号)

注: 若按 1/15 000 索股内钢丝相对精度计算, 最大相对误差为 ±283 mm

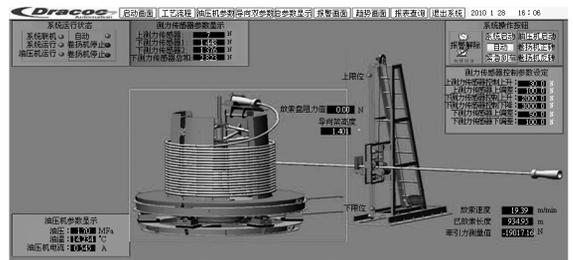


图 17 放索过程中电脑智能控制图

Fig. 17 Computer intelligent control in releasing process



图 18 放索过程中数据分析

Fig. 18 Data analysis in releasing process

3 结语

随着桥梁技术的发展, 悬索桥的跨径也不断增大, 从开始的几百米到现在的两千米乃至更大跨径, 采用 PPWS 法, 对主缆单元索股的长度要求、强度要求、规格要求也因此不断增加。针对特大跨径悬索桥 (跨径 2 000 m 以上) 的设计、建设要求, 对单元索股的强度、制作长度、规格及收放索工艺提出了挑战性的要求。

通过对主缆索股制作工艺、结构体系以及智能收放索装置中各个要素的技术进行了深入研究, 在此基础上, 通过技术攻关, 把单元索股的镀锌钢丝强度从以往的 1 770 MPa 级提高到 1 860 MPa 级, 制作长度从西堍门大桥的 2 881 m 提高到 4 250 m, 索股规格由西堍门大桥的 $\phi 5.25 \times 127$ 规格提高到 $\phi 5.1 \times 169$ 规格, 并在西堍门大桥应用拥有自主知识产权的水平收放索技术上改进, 放索装置添加智能化控制, 实现了超长大规模高强度主缆单元索股技术研究的技术突破, 成功应用于西堍门大桥的建设中, 为特大跨径悬索桥的建设提供了技术参考, 同时为我国桥梁建设水平的提高作出了贡献, 推动了社会经济的发展。

参考文献

[1] 张海良, 罗国强, 李刚. 大跨径悬索桥应用国产 1 770 MPa 主缆索股技术研究[J]. 公路, 2009, (1): 70-75

(下转 17 页)