

重庆长江鹅公岩大桥主缆制作方法

魏 胜 新

(铁道部大桥局桥科院,湖北 武汉 430034)

摘 要: 介绍了鹅公岩大桥主缆索股预制钢丝束编缆(PPWS)制作方法和钢丝、索股、热铸锚的一些技术要求,对影响索股长度制作精度的各种因素进行了分析和计算,提出了索股制作、架设过程中尚需解决的一些技术问题。

关键词: 悬索桥;主缆;索股;制造工艺

中图分类号: U448.25;U443.83 文献标识码: A 文章编号: 1003-4722(2000)02-0029-03

1 概 述

重庆长江鹅公岩大桥位于重庆市区,为重庆市重点工程,其主桥为(210+600+210) m 三跨钢箱悬索桥。该桥主缆长 1 179 m,每根主缆由 110 束索股组成,每束索股由 91 丝镀锌钢丝组成,钢丝直径为 5.22 mm ± 0.06 mm,镀锌厚度 ≥ 100 μm,该桥主缆、索股形状及尺寸见图 1。

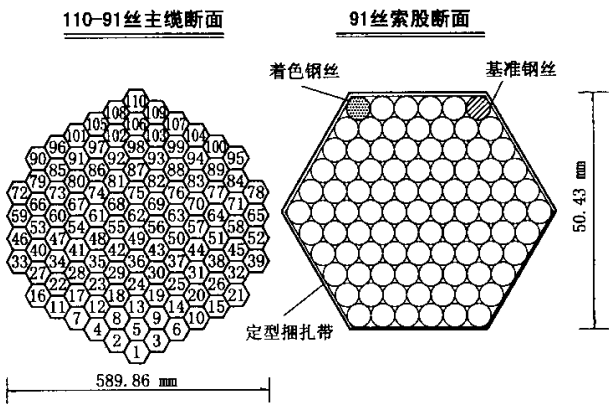


图 1 重庆长江鹅公岩大桥主缆断面

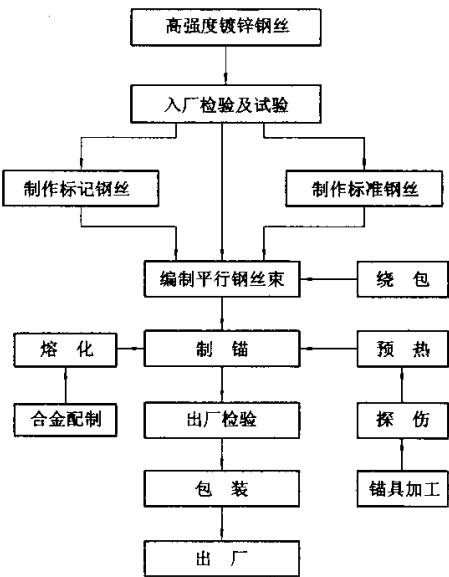
主缆为悬索桥最重要的受力结构,且不可更换,称其为“生命线”,因此主缆材质的优劣、制作质量的好坏直接关系到桥梁的线形和使用寿命。随着高强度金属制品材料的发展,国内大跨度悬索桥主缆均已采用了平行钢丝,按其制作和架设可分为预制钢丝束编缆(PPWS)方法和空中单丝编缆(AS)方法。目前我国已建和在建的悬索桥主缆均采用以日本为代表的工厂化预制钢丝束编缆制作方法即 PPWS 法。鹅公岩大桥即采用该法制作。

鹅公岩大桥主缆采用 φ5.22 mm 高强镀锌钢丝。其 PPWS 制作方法是采用工厂化制作,将主缆分成 110 股平行钢丝,每索股由 91 根钢丝组成,其中一根基

准钢丝或称标准钢丝(该钢丝在精确标定的工作台上制作)用来确定主缆长度并在索鞍、跨中处做上标记,另一根着色钢丝用于判断制作、架设时的扭转情况。索股制作时通过 6 个定型轮组成的滚压模做成六角形截面,然后用高强定型包扎带等间距(一般 1.5 m)绕包成型上盘。索股架设完后再用挤圆机将其挤成圆形。主缆由索股两端热铸锚与预埋在地锚内的连接锚通过劲性钢杆连接锚固。索股截面设计成六角形,编排紧凑,架设安装时几何稳定性好,且主缆挤圆后空隙率较索股采用其它截面低。

2 索股制作工艺

索股制作程序为:放线→分丝→聚并→矫直→绕包→颜色标记→牵引→成盘,其工艺流程见下框图。



3 主缆和锚具主要技术指标及分析

- (1) 钢丝主要性能指标为 $\sigma_0 \geq 1\,670\text{ MPa}$, $\sigma_s \geq 1\,280\text{ MPa}$;弹性模量 $E = (1.90 \sim 2.05) \times 10^5\text{ MPa}$;疲劳应力:上限 $0.45\sigma_b$,应力幅 360 MPa ;松弛:松弛率 $\leq 7\%$ ($20\text{ }^\circ\text{C}$, $1\,000\text{ h}$);伸直性:每米矢高不能大于 50 mm ;反复弯曲 ≥ 4 次;转绕 (3 d):8 圈;硫酸铜 ≥ 4 次;镀锌层厚度 $\geq 100\text{ }\mu\text{m}$ 。
- (2) 根据国外经验,索股内钢丝容许长度误差相当于抗拉强度 1.0% 的应力伸长。设计图纸中标注的索长尺寸为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 无应力状况下的索长,而钢丝在无应力状况下不可能成直线状况,因此在测量时需在钢丝测量段施加一定的力(采用标定过的砝码)。基准钢丝按下式进行换算修正:
- $$L = L_0[1 + P/(E \times F) + \alpha(t - 20)]$$

- 式中, L 为测量长度(m), L_0 为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 无应力设计长度(m); P 为张紧力(kN); E 为钢丝弹性模量(MPa); F 为钢丝截面积(m^2); α 为钢丝线膨胀系数; t 为制作时环境温度($^\circ\text{C}$)。
- 基准丝在采用(分段)基线测长时,其设计技术标准要求在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 无应力状况下的精度在 $1/15\,000$ 以上,索股制作精度在 $1/10\,000$ 以上。在基准丝制作之前需先利用精密磁化仪对台座长度进行标定、定位。现对鹅公岩大桥基准丝和索股制作精度及误差进行分析,见表 1、表 2。从表 1 分析计算可知基准钢丝制作精度为 $1/31\,822 < 1/15\,000$,从表 2 可知,成品索股制作精度为 $1/30\,638 < 1/10\,000$,因此基准丝和索股的误差满足设计技术标准的精度要求。
- (3) 单根钢丝的线径公差规定为 $\pm 0.06\text{ mm}$,索股

表 1 重庆鹅公岩大桥基准钢丝精度及误差分析

序号	项 目	公 式	最大误差绝对值 Δ_i/mm	备 注
1	桩距测定误差	$(1+l \times 10^{-6})n$	12.21	每根索股长度 L 约为 $1\,179\text{ m}$,桩基总长 l 为 110 m ,需 $n=11$ 次测量,测量精度为 $1+l \times 10^{-6}$
2	标记及刻度误差	$\Delta L1 \times n$	22.00	每个标记点的误差 $\Delta L1 = \pm 1.0\text{ mm}$,每根标准丝共有 $n=22$ 个标记点
3	温度误差	$L \times \alpha \times \Delta t$	12.26	膨胀系数 $\alpha = 10.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,温度差 $\Delta t = \pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$, $L=1\,179\text{ m}$
4	张紧力误差	$L/(A \times E) \times \Delta F1$	0.137 7	张紧力误差 $\Delta F1 = 510\text{ N}$, $A = (5.22\text{ mm})^2 \times \pi/4$, $E = 2.0 \times 10^5\text{ MPa}$
5	滚筒摩擦误差	$L/(A \times E) \times \Delta F2$	1.38	滚筒摩擦拉力损失 $\Delta F2 = 5\text{ N}$
6	钢丝直径误差	$8 \times 9.8F \times L/(\pi \times E \times d^3) \times \Delta d$	10.97	钢丝直径为 $5.22\text{ mm} \pm 0.06\text{ mm}$, $F = 176\text{ N}$
7	钢丝弹模误差	$4 \times 9.8F \times L/(\pi \times d^2 \times E^2) \times \Delta E$	18.12	钢丝弹性模量 $E = (1.90 \sim 2.05) \times 10^5\text{ MPa}$, $\Delta E = 7.5 \times 10^3\text{ MPa}$
8	钢丝膨胀误差	$L \times (t - 20) \times \Delta \alpha$	11.79	膨胀系数 $\alpha = (10.4 \pm 1) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\Delta \alpha = \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, t 取 $10\text{ }^\circ\text{C}$

注:① 总误差 $\eta_1 = (\Delta_1^2 + \dots + \Delta_8^2)^{1/2}$;② 制作精度为 $1/31\,822 < 1/15\,000$ 。

表 2 重庆鹅公岩大桥索股长度精度及误差分析

序号	项 目	最大误差绝对值 Δ_i/mm
1	两端切割	2.0
2	制锚	2.0
3	反顶	10.0

注:① 总误差 $\eta_2 = (\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2)^{1/2}$;
② 制作精度为 $1/113\,365$;
③ 成品 PPWS 索股长度制作精度 $\eta = (\eta_1^2 + \eta_2^2)^{1/2} = 1/30\,638 < 1/10\,000$,其中, η_1 为表 1 总精度。

内钢丝的平均公差应为 $\pm 0.03\text{ mm}$ 。钢丝生产厂家在满足其各项技术性能指标前提下,为追求成材率,钢丝线径一般为负公差。对本桥钢丝线径统计表明,其负公差在 80% 以上,这样会导致主缆挤圆后在满足设计空隙率(20% 和 18%)的情况下,其直径偏小,需及时调整吊索索夹的设计尺寸。

- (4) 主缆受力后发生的变形包括材料的弹性变形和自重垂度发生的非线性几何变形。设计中主缆采用等效弹性模量(Ernst 公式计算)来反应主缆实际抵抗材料弹性变形与自重垂度的几何变形能力。鹅公岩大桥主缆钢丝由国内 2 个厂家各提供一半。为消除钢丝直径、弹性模量误差所产生的不利影响,同束索股 91 丝采用同一厂家钢丝,架设之时,每根主缆按其索股编号由 2 个厂家的钢丝制作的索股交替编缆,实践证明,主缆架设完后实测线形与设计修正弹模后线形相符。
- (5) 热铸锚杯锌铜合金密实度的注入率要求 $\geq 92\%$ (锌: $98\% \pm 0.2\%$,铜: $2\% \pm 0.2\%$,杂质含量不超过千分之一),锚杯容积用量杯注水法实测,以便于准确计算注入率。锌铜属低熔点合金,合金注入温度过高,对

钢丝氧化厉害,也容易夹杂;注入温度太低,其流动性差,不易密实。锚具需预热,否则容易产生冷隔。锌铜合金用自动温控电炉加热,温度控制在 $460\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,锚具预热用其形状相近的高电阻薄钢板加热,并用温度计控制温度在 $165\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(6) 热铸锚反顶力为索股设计荷载的 1.5 倍,设计载荷 ≤ 0.4 倍钢丝破断力。千斤顶反顶锌铜合金后,其索股外移量需 $\leq 5\text{ mm}$,而此时实际索长应加上两端反顶位移量。位移量的大小与灌入后的冷却方法有关,试验表明,空气中自然冷却或风冷效果较好,直接水冷较差。本桥采用自然冷却和风冷相结合方法。反顶实测位移量均满足设计技术标准要求。

(7) 索股中心与锚杯端面的垂直度要求为 $90^{\circ}\pm 0.5^{\circ}$ 。

(8) 索股组装件静载破断试验要求:试验索股长度 $\geq 3\text{ m}$;静载破断荷载 \geq 标称荷载的 95%;破断延伸率 $\geq 2\%$;索股抗拉弹性模量不小于钢丝弹性模量的 95%;试验后锚具无裂纹等异常情况。根据上述标准,在索股制作过程中随机抽取 3 组索股进行组装件试验,均满足设计要求。

(9) 锚具为 ZG310—570 铸造件,每套需进行超声

波和磁粉探伤,并达到二级合格。

4 结 语

鹅公岩大桥总计 220 根索股,架设工期用了 2 个多月,于 1999 年 12 月顺利架设完毕。架设过程中散股、扭转现象很少发生,实测主缆线性与设计相符,反映了主缆采用 PPWS 法编束及架设技术在我国已日臻成熟,但架设过程中仍发现有些问题还待探讨与研究。

(1) 基于索股高强钢丝与锚具所用的材质不同,材料的屈强比不一致,设计时应注意两者破断强度相匹配,否则索股断丝之前,锚具可能先已破坏。

(2) 架设索股时,索股有时会绕盘具转圈,笔者认为与索股上盘力和架设时放索力的大小匹配有关,选择多大的力值得探讨和研究。

(3) 由于索股钢丝由绕包带等间距硬性固定成型,消除高强钢丝弯曲内应力是减少架设时散股、扭转的重要环节之一,制作时需更进一步对钢丝矫直工艺进行完善,以便于索股架设。

(4) 主缆单根索股钢丝数量的设计,应综合考虑国内制作、架设水平和经济指标,认为不宜采用特大型索股,索股截面增大,会导致制作、架设时诸多弊端。

Fabrication Method for Main Cables of Egongyan Bridge
over Changjiang River in Chongqing

WEI Sheng-xin

(Bridge Science Research Institute, Major Bridge Engineering Bureau, the Ministry of Railways, Wuhan 430034, China)

Abstract: Method for fabrication of prefabricated parallel wire strands (PPWS) of main cables of Egongyan Bridge and technical requirements for steel wires, strands and hot-cast anchorage thereof are dealt with. Various factors that affect accuracy of strand length during fabrication are analyzed and calculated. Some technical problems remaining to be resolved during fabrication and erection of the strands are pointed out.

Key words: suspension bridge, main cable, strand, fabrication technology