

# 环氧涂层钢绞线拉索在斜拉桥中的应用

孙长军 汪孝龙 文庆辉 陆绍辉

**【摘要】**桥梁建设对索体防腐性能及强度要求不断提高,环氧涂层钢绞线因符合上述要求而被广泛应用,斜拉索体系应用环氧涂层钢绞线更有其优越性。宜宾中坝大桥采用前支点挂篮及钢绞线斜拉索,本文介绍其施工过程,详述环氧涂层钢绞线拉索在斜拉桥中的具体应用。

**【关键词】**环氧涂层钢绞线 牵索式前支点挂篮 PE 圆管

## 1、前言

随着国民经济的不断增长,国家的基础建设特别是公路桥梁建设方面得到了长足的发展,斜拉桥因其造型美观、结构合理、跨越能力大而在桥梁建设中得到广泛应用,作为斜拉桥生命线的斜拉索受到普遍的关注。国际上流行的平行钢绞线拉索体系自 1994 年在国内首次应用以来,其独特的优点已逐渐得到人们的认可,近年已在二十余座斜拉桥中得以应用。

钢绞线拉索制作快速、施工简便、受力合理、防护效果好,其结构及特点已在我公司多次发表的论文中详细论述,本文不再赘叙。近年来,随着多座斜拉桥的换索、或重新进行索体外防护,斜拉索的防护效果引起桥梁建设者们越来越多的重视。钢绞线拉索具有四层防护体系是受到青睐的重要原因,但还有没有更好的防护体系,也是人们普遍关注的问题。

柳州 OVM 公司经过多年的实践与交流,引进国外技术,并结合我国实际情况,在公司原研制的钢绞线拉索基础上,又开发出了环氧涂层钢绞线拉索体系,经过大量试验并通过技术鉴定,相关专家推荐在桥梁建设中推广应用。

## 2、环氧涂层钢绞线拉索体系特点及应用

### 2.1 环氧涂层钢绞线拉索体系及防腐结构

a. 索体:第一层为光面钢绞线,每根组成钢绞丝外表面静电喷涂环氧树脂层,不降低原钢绞线强度等级;第二层为高熔点建筑油脂包裹;第三层为单根钢绞线热挤高密度 PE 层;第四层为索体外整圆包高密度 PE 管。

b. 锚固段: OVM250 钢绞线拉索专用可调式锚具,含锚板、支承筒、密封筒、工作螺母和防松装置,锚具内腔可根据防护要求注高熔点建筑油脂或砂浆。

c. 过渡段:含可调式减振装置、钢质索箍、防水罩及热缩 PE 套。

### 2.2 环氧涂层钢绞线拉索体系的特点

a. 拉索第一层环氧树脂防护层为有机材料,不与一般腐蚀介质反应,也不会参与电化反应,性能稳定;

b. 拉索材料钢绞线经喷涂环氧涂层后,不降低本身强度,易满足斜拉索高强度要求;

c. 拉索锚具、PE 管、索体钢绞线单独安装,锚具与环氧涂层钢绞线配套设计制作,易保证安装质量。

d. 作为钢绞线拉索体系的一种,与钢绞线拉索具有相同的其他特点,因已在多篇文章中论述过,本文不再重述。

### 2.3 环氧涂层钢绞线拉索体系的应用

孙长军:柳州欧维姆工程有限公司 工程师

《OVM 通讯》

2

2003 年第 3 期

环氧涂层钢绞线目前国内已大量应用于体外索及拱桥系杆中, 已有十余座梁式桥采用环氧涂层钢绞线体外索, 有十余座拱桥采用了环氧涂层钢绞线系杆索。在斜拉桥方面, 曾于 1998 年用于江苏宝应县的一座小型斜拉桥上, 现正应用于四川宜宾中坝金沙江大桥上, 特别是与前支点挂篮的配合应用, 在国内尚属首例。

### 3、环氧涂层钢绞线斜拉索体系工程实践

下文以宜宾中坝金沙江大桥为例, 介绍环氧涂层钢绞线拉索体系用于斜拉索中的施工情况。

#### 3.1 工程概况

中坝大桥位于四川省宜宾市金沙江上, 是一座单塔双索面混凝土斜拉桥, 大桥全长 965 米, 中跨 252 米, 边跨 175 米, 塔高 154 米。大桥采用塔墩固结、主梁漂浮体系, 索塔采用 H 型, 其中桥面以上高 117 米, 正交异性混凝土桥面板, 桥面宽 30 米。

斜拉索索体采用环氧涂层钢绞线, 强度为 1860MPa, 锚具采用 OVM—250 体系。全桥共有 41 层 (164 根) 索, 有 22、27、34、37、43、50、55 孔七种规格, 斜拉索两端均为夹片锚, 索体自由段外包黑色 PE 圆管, 密索、扇形索面。桥面标准节段每段长 6 米, 自重约 310 吨, 采用牵索式前支点挂篮进行砼梁悬臂浇筑, 可极大的节约挂篮用材, 也可减小砼梁截面, 降低桥的建设成本。但该工艺对斜拉索安装提出了更高要求, 需设置专用转换装置, 砼达到设计强度后进行索力转换, 并且对索力张拉也需详细计算分级。

#### 3.2 施工流程 (如图 1)

### 4、斜拉索施工工艺

#### 4.1 锚具及转换装置安装定位 (如图 2)

要求锚具安装时锚具的工作螺母必须旋在合适的位置, 以满足张拉及调索的需求。挂篮前移到位后, 对模板标高及轴线进行测量定位, 然后进行梁下锚具及转换装置的安装与定位工作。先

定出两个点的位置, 其一是锚点的位置, 另一个点是圆弧形垫板处圆心的位置 (即在索力转换前斜拉索索力在挂篮上的作用点)。

先联接各部件, 将锚具及转换装置组装好, 初步调整到位, 待挂好外 PE 管, 锚具及转换装置受力后, 再按锚点位置进行精确定位并锁定。至此, 梁下锚具及转换装置的定位工作完成。至于塔内锚具的安装则比较简单, 只需将锚具螺母调好, 再将锚具放入预埋管并使轴线对中, 然后将锚具固定即可。

#### 4.2 外 PE 圆管安装

用于索体外防护的 PE 圆管均按每节 8 米在工厂生产, 运输到工地后, 再用专用的 PE 管焊机进行焊接接长。PE 圆管按不同的拉索规格分为  $\phi 180$ 、 $\phi 200$ 、 $\phi 240$  三种。

外 PE 圆管由于自重产生很大的挠度, 无法直接进行钢绞线挂索, 这里采用加长辅助索挂外 PE

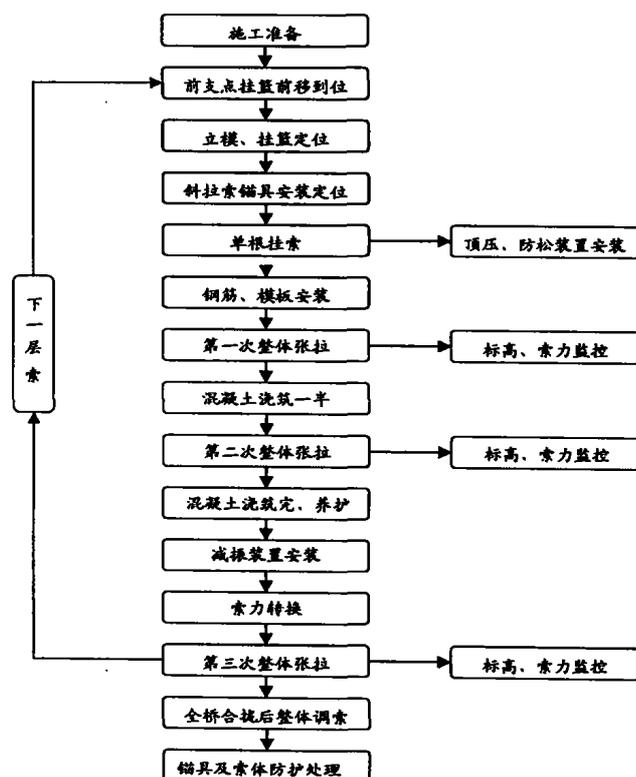


图 1 斜拉索施工工艺流程图

圆管的方案。辅助索采用不带 PE 的环氧涂层钢绞线，为减少浪费，按最长索的长度下料四根，外 PE 圆管挂好后即拆除，用于下一根索的施工。

外 PE 圆管按每索计算长度焊接好后，将其平放于桥面上事先安装好的一列滚轴上。在挂外 PE 圆管前，先将辅助索穿入，用塔顶卷扬机起吊 PE 圆管及辅助索，分别将辅助索穿入上、下端锚具拉紧并锚固。在塔内安装单根张拉装置，用 YDCS160—150 型千斤顶对辅助索进行张拉，直到将 PE 圆管挺直到位。

#### 4.3 单根挂索

下料好的钢绞线存盘运输至施工现场，挂索时用专用放线架进行放索，放线架与预埋管之间应设铺垫及导向垫，以防钢绞线 PE 损伤。挂索前在已挂好的外 PE 管内安装循环牵引系统，将钢绞线放盘并打开张拉端，与循环系统上的专用牵引装置连接，启动循环系统将钢绞线顺着外 PE 管牵引至上端管口，然后将钢绞线和从锚具孔穿过的牵引索连接，解除循环系统上的牵引装置，通过塔柱内的手动牵引装置将钢绞线拉出锚板孔至满足单根张拉所需的工作长度，临时锚固，拆除牵引索。接着将已牵引出的钢绞线从盘上全部放出，

与穿过下端锚具的牵引索连接，人工穿过锚孔并锚固。用循环牵引系统可同步一次牵引两根钢绞线。

#### 4.4 单根张拉

每挂一对钢绞线，随即用 YDCS160—150 型千斤顶进行单根张拉。为避免外 PE 圆管对钢绞线索力的控制的不利影响，将辅助索张拉力加大，使 PE 圆管挂好后的挠度与单根钢绞线挂索时的挠度相同，从而使钢绞线在单根张拉时不被 PE 圆管压住。第一排索张拉后将辅助索拆除。

为确保单根钢绞线索力均匀性，采用等张拉力法对索力进行控制。在第一根钢绞线（挂外 PE 圆管的辅助索除外）上利用单孔工具锚锚住一个单孔传感器，监测这根钢绞线的张拉力，并按设计索力的平均值乘以超张系数所得的索力进行张拉，以后每根钢绞线的张拉力根据压力传感器变化情况进行控制。单根索力的张拉以千斤顶油压控制为主，张拉伸长值进行校核。

#### 4.5 整体张拉

整体张拉为相对单根张拉而言，即将斜拉索锚具整体拉出，通过调节锚具上的工作螺母位置，来满足张拉伸长量要求。单根挂索完成后其整体索力与理论预测值存在一定的偏差，在浇筑混凝土前，需进行第一次整体张拉，以调节整束索的索力使之达到设计要求。在混凝土浇筑到一半的时候，需要对斜拉索进行第二次整体张拉，以分担混凝土的重量。混凝土达到强度并完成体内预应力索张拉后，进行索力转换。为将索力及标高调整至设计要求，需要对斜拉索进行第三次整体张拉。全桥合拢后，依据各点的索力及标高情况还需进行一次整体调索。

其中：

第一次整体张拉，是利用梁下转换装置上安装的千斤顶进行张拉。

第二次整体张拉，是在混凝土浇筑一半时，利

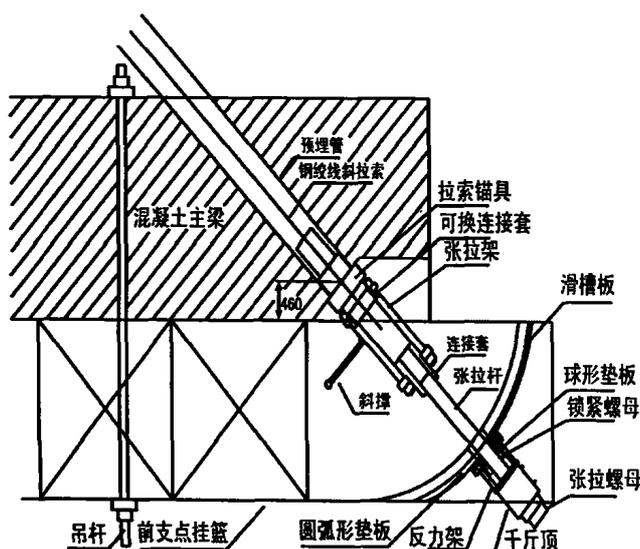


图 2 梁下锚具及转换装置安装示意图

用梁下千斤顶及塔内千斤顶共同完成。梁下千斤顶张拉至梁下锚具螺母的调节范围用完,对于长索,此时斜拉索索力还不能达到设计要求。梁下锚固卸压后,再用塔上千斤顶同步张拉到设计吨位。

第三次整体张拉,是在索力转换完后,利用塔内千斤顶进行的。

#### 4.6 索力转换

当混凝土强度达到设计强度的 85% 时即可进行索力转换(混凝土通常在养护三天以后即可达到这个强度)。索力转换是将施加在前支点挂篮上的索力转换至混凝土主梁上。转换时将梁下千斤顶张拉至活塞初动后,继续将千斤顶活塞打出约 5mm 后,旋紧下锚头的锚固螺母,上下游千斤顶同步缓慢卸压并回程,然后拆除转换装置。

#### 4.7 安装防松装置及减振装置

单根挂索完成后,安装夹片防松装置。用专用扳手将各空心螺栓旋紧,空心螺栓与夹片间垫有四片蝶簧,以随时保持对夹片的压紧力。

减振装置包括每束索上下预埋管处各有一个索箍、减振器。利用专用紧索器按正六边形截面将整束索紧固成形,对于 22、27、34、43、50 孔对应的索,需填充约 1 米长的钢绞线作为假索以使其形成正六边形截面。索箍和减振器按设计位置进行安装,拧紧索箍紧固螺栓。减振装置暂不作最后固定,待整体张拉、全桥调索结束后再进行固定。

#### 4.8 索体防护处理

斜拉索是斜拉桥的生命线,本工程斜拉索寿命按 30 年以上设计,索体、锚头防腐需高度重视。

a. 索体防腐:索体材料采用带 PE 环氧涂层钢绞线,PE 层与钢绞线间涂专用油脂,如果在下料、挂索使用过程中发现 PE 有破损之处,立即用焊枪修补。索体黑色外 PE 圆管防护,全桥调索结束,并将减振器固定后,固定已预先套在 PE 管外

的防水罩,与两端预埋管联接。

b. 锚头内防腐:锚头内钢绞线由于挂索、张拉需要,两端 PE 需剥除,剥除段钢绞线必须进行有效防护,一般在锚具内注浆或注建筑油脂防护。

c. 其它防腐:整体张拉后,支承筒外露部分、锚板、夹片等都涂上防腐油脂,而且支承筒外露部分锚板用封箱带缠绕密封。调索结束后,在锚具外安装保护罩,内注油脂对裸露钢绞线、夹片、锚板等进行防护。上、下锚箱内必须预设防水、防潮措施,下端锚垫板应设有排水槽。本工程为确保锚具防护效果,还将在全部预埋管内注满专用防护油脂。

### 5、斜拉索施工关键工序控制

#### 5.1 低应力锚固

在斜拉索施工中,挂索施工时索应力一般较低,而本工程,由于采用了前支点挂篮进行悬臂施工,挂索时混凝土尚未浇筑,斜拉索只承受挂篮重量,挂索时钢绞线的最初锚固应力在  $0.12 \sigma_b$  左右,成桥后工作应力为  $0.40 \sigma_b \sim 0.45 \sigma_b$ ,如何解决低应力状态下的锚固问题,特别是在带环氧涂层的钢绞线上锚固,是值得关注的问题。我们在工程中主要从以下几个方面采取了针对性措施:一方面对产品进行改进,对锚固单元进行专门设计,使之能更好的在低应力状态下锚固。另一方面,在施工工艺方面也采取了两项措施。其一是对锚具的夹片进行顶压,每挂上一根钢绞线,上锚头利用张拉顶压支座作反力架,而下锚头则利用张拉架作反力架,用专用顶压器对钢绞线的夹片进行顶压,顶压力以总应力不超过钢绞线破断力的 0.45 控制。其二是安装夹片防松装置,确保在桥梁运营的任何情况下,夹片都不会松动,安装步骤在前面已有介绍。

工程实践及试验结果表明,采取了以上措施后,OVM250 斜拉索锚具在低应力状态下的夹持是非常可靠的。

### 5.2 单根索力均匀性控制——等张拉力法

钢绞线斜拉索需要在施工现场逐根钢绞线挂索，因此单根钢绞线索力均匀性控制是斜拉索挂索施工的关键，本工程控制上采用等张拉力法。

在张拉端第 1 根钢绞线上安装压力传感器并将其张拉到位，在张拉第二根钢绞线即将到位时，由于桥面挂篮抬升及索塔偏移等影响，第一根钢绞线的索力会有所变化，传感器读数也会相应的变化，根据这个变化值调整第二根钢绞线的张油压，以使之与此时第一根钢绞线的索力相同，然后将其锚固，同理以后每根钢绞线的张拉力均按压力传感器变化情况进行控制，即每根钢绞线张拉力均与变化后的第一根拉力相同，因整束索不管是温度影响或结构影响，其变化是均匀的，因此最后挂索完成后，各根索力均匀。直到将所有钢绞线挂完，最后将传感拆除，按其最终显示张拉并锚固。

为验证单根钢绞线索力均匀性，本工程中多次对部分钢绞线抽检，进行了反拨测试，结果表明钢绞线的索力均匀性良好。（表 1 为例子一）

上述索力均匀性误差如与最终索力比较，则相对误差更小，完全满足工程的要求。

### 5.3 单根超张拉索力计算

在挂索过程中，随着索力不断加载，桥面挂篮标高将不断抬升，索塔也会有所偏移，因而索

力也将随着变化，通常情况下索力是逐渐降低，为使最终索力不至于太低，第一根钢绞线需要进行超张拉，这就要计算出一个超张拉系数。

通过计算挂篮在设计索力下的抬升总量及索塔偏位情况，计算出沿索的方向损失的伸长量，再通过这部分伸长量计算出损失的索力，从而计算出第一根钢绞线的超张拉系数。

$$T = K * N / n = N / n * (1 + g)^{n-1}$$

T、K —— 第一根钢绞线张拉力、超张拉系数

g —— 单位张拉力引起的单根钢绞线损失力

N —— 整索索力目标值

n —— 斜拉索钢绞线根数

### 5.4 斜拉索施工控制

在斜拉索施工过程中，施工控制是非常重要的一个环节，本工程的施工控制实行索力标高双控。第一次整体张拉至第三次整体张拉均以标高控制为主，以索力控制为辅，在合拢后的全桥调索过程中，则以索力控制为主。

在单根挂索时，要控制各点的挂索进度，同一塔柱江跨与岸跨之间的索力差值不超过 30T，对索塔同一侧，上下游索力相差不超过 20T。整体张拉时，各点同步张拉，江岸跨以及上下游之间的索力也同样要控制在这个范围。张拉完成后，索力与理论预测值相差不能超过 5%，标高相差不能超过 5mm，若因气温等外界环境影响，此范围可适

表 1 14 井索单根钢绞线反拨测试

工程部位	绞线编号	挂索最终油压	反拨油压	挂索最终油压对应力	反拨油压对应力	比较值 (一)	比较值 (二)	备注
A 上	1	9.86	9.80	30.7	30.5	-0.65%	-0.65%	比较值 (一) 是反拨力相对于挂索最终张拉力的差值 比较值 (二) 是平均反拨力相对于挂索最终张拉力的差值
	2	9.86	9.80	30.7	30.5	-0.65%		
	3	9.86	9.80	30.7	30.5	-0.65%		
A 下	1	9.69	9.60	31.3	31.0	-0.96%	-0.64%	
	2	9.69	9.70	31.3	31.4	-0.32%		
	3	9.69	9.55	30.3	30.9	-1.28%		
J 上	1	9.26	9.25	28.7	28.7	0.00%	-0.35%	
	2	9.26	9.20	28.7	28.5	-0.70%		
J 下	1	9.31	9.20	28.3	27.9	-1.41%	-0.71%	
	2	9.31	9.25	28.3	28.1	-0.71%		
	3	9.31	9.30	28.3	28.3	0.00%		

当放宽。目前全桥即将合拢,各项控制指标完全符合设计及监控要求。

对于整索的索力,我们除了用千斤顶换算出张拉力,另外还采用了两种方法进行测量。一种是较为普遍的频率测量法,这种方法测量索力方便、快速,但它受索体两端约束情况的影响,在同样索力的情况下,若索体约束状态发生变化,如两端预埋管对侧向位移有所限制,那么测出了索力就有很大不同。因此,它适用于第三次整体张拉及全桥调索时进行测量。另一种方法是采用整体式压力传感器,将它安装于每根索张拉端的张拉螺母与千斤顶之间,在张拉时就能及时测出张拉力。

为确保整体式压力传感器测量的准确性,我们用千斤顶对其进行了现场验证,表2为其中一个传感器与千斤顶测量值的对比情况。

## 6、结语

在中坝大桥全体建设者的共同努力下,至6月中旬大桥已经完成了32号梁段的施工,现在岸跨已经合拢,江跨桥面正一节节稳健地伸向对岸。预计在8月份将完成江跨合拢,又一座雄伟的斜拉桥将横跨金沙江,将两岸紧紧相连。

钢绞线斜拉索体系在国内外桥梁建设中多次成功应用,其优越性已为有关专家及桥梁建设者们所熟知。大型斜拉桥上采用环氧涂层钢绞线斜

拉索在国内尚属首次,通过上述工程实践,证明是成功的。现已有多座待建斜拉桥已设计为环氧涂层钢绞线斜拉索,这将使该体系在更多的桥梁建设中得到推广应用。

在目前的国内桥梁建设中,索类桥如悬索桥、吊杆系杆拱桥、斜拉桥等所占比例越来越大,近几年日益增多的换索工程,引起桥梁建设者对索的防护更大程度的关注。环氧涂层钢绞线拉索四层有效防护体系给桥梁建设提供了一项更为可靠的保障,该体系的研制者柳州欧维姆机械有限责任公司及相关合作单位,诚邀广大专家和桥梁建设者共同探索新的技术,不断推进中国斜拉索体系技术的发展。

## 参考文献

- 1、《宜宾中坝金沙江大桥施工阶段设计图》,四川省交通厅公路规划设计研究院。
- 2、《平行钢绞线斜拉索》,柳州欧维姆机械有限责任公司。
- 3、《环氧树脂涂层预应力钢绞线》,柳州欧维姆机械有限责任公司

表2 传感器与千斤顶索力测量对比

传感器编号		300199		千斤顶编号		804
油压 (MPa)	千斤顶压力 (kN)	压力传感器显示力(kN)				与千斤顶 的差值
		第一次	第二次	第三次	平均值	
5	508	483	482	518	494	-2.69%
10	90	1049	1045	1081	1058	-2.91%
15	1672	1635	1649	1670	1651	-1.24%
20	2254	2229	2282	2251	2254	0.00%
25	2836	2824	2838	2859	2840	0.15%
30	3418	3433	3442	3437	3437	0.57%
35	400	4038	4023	4018	4026	0.66%
40	4582	4669	4626	4632	4642	1.32%
检测结果		整体式传感器测力准确、稳定,但在测量索力较低的情况,测量误差有所偏大。				