

# OVM体外预应力材料及体系

强 壮 关炳良 谢正元 张升华

## 一、前言

### 1、体外预应力的发展

近年来,随着斜拉桥的复兴,斜拉索的防护问题在不断得以解决和完善,其相关技术也大量应用于解决体外预应力束的防腐,从而使制约体外预应力结构发展几十年的关键因素-钢索防腐问题得到了很大程度的解决,这无疑大大促进了因腐蚀问题而停滞不前的体外预应力桥梁的发展。体内布筋建造的预应力混凝土建筑由于对摩擦造成的预应力损失及混凝土徐变、温度影响估计不足,破损严重,致使多数需要补强,荷载等级的提高也需要对原有建筑进行加固。加固的方法通常都不得不在原结构外部进行,即必须把预应力束布置在混凝土截面以外,使体外索补强措施成为一种主要的也是最积极的桥梁加固方法。体外预应力体系的优点得到了越来越多人的认可,特别是在发达国家,体外预应力技术得到广泛运用。

### 2、体外预应力结构的特点

体外预应力结构有以下特点:

- (1) 能够控制及调校钢绞线束的应力。检查腐蚀性情况保证在必要时能够替换钢绞线束。
- (2) 在箱梁的壁内不存在预应力管道,使得混凝土容易浇注,不会因为预留孔的存在而减低承压能力,因此可以将箱梁壁厚减至最小。
- (3) 体外索通过转向装置的作用将变想力传递到结构中。
- (4) 对于某类型的结构,例如预制箱梁结

构,使用体外索可以简化及加速桥梁的建设速度以及将建造成本降低。

(5) 体外索可用于加固或修复已修建的混凝土结构。

(6) 体外索可使用在结构中无法放置预应力钢筋束的结构截面中。例如应用在钢结构或复合结构中。

## 二、OVM体外预应力材料及体系的研制

鉴于对体外预应力结构发展方向及其市场前景的认识,柳州市建筑机械总厂与同济大学桥梁工程系自九十年代初开始联合对体外预应力结构性能及其锚固体系进行系统的研究,研究课题主要是体外预应力结构的力学性能、体外预应力钢索的防腐问题、锚具的锚固性能及抗疲劳性能。1997年柳州市建筑机械总厂与同济大学桥梁工程系合作以体外预应力混凝土结构的预应力体系为课题展开全面的研究工作,并取得了部分成果。

### 1、OVM体外预应力材料及体系的技术经济指标

(1) OVM体外预应力锚具性能满足国际后张预应力协会FIP《后张预应力体系的验收和应用建议》及《体外预应力材料及体系》的要求;交通部标准《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、连接器试验方法及检验规则》JT 329.2-1997要求。

(2) OVM体外预应力材料及体系有永久式、可换索式两种结构形式。

(3) 有良好的防腐性能,便于检测、维修。

(4) OVM体外预应力体系中的转向装置不

强 壮: 柳州市建筑机械总厂技术中心工程师  
关炳良: 柳州市建筑机械总厂技术中心助理工程师

**体外预应力**

但能保持体外索的配置形状，把变向力传给主梁，且与主梁不发生变形和分离，同时转向装置对钢索产生较小的附加力。

**2. 体外预应力结构中预应力体系的基本组成形式**

图1所示的体外预应力体系的基本组成包括以下内容：体外预应力钢索，包括管道和灌浆材料；体外预应力钢索的锚固系统；体外预应力钢索的转向装置；体外预应力钢索的防腐系统。



图1 体外预应力体系示意图

**2.1 OVM体外预应力钢索的基本类型**

OVM体外预应力钢索分为OVM-SI、OVM-SII及OVM-SIII等三种基本类型，其构造组成分别如图2所示。所采用的光面钢绞线均符合美国ASTMA416-90A标准的高强度、低松弛钢绞线形式，其标准抗拉强度为1860Mpa。表1为三种钢索的基本构造组成。

**2.2 环氧喷涂钢绞线**

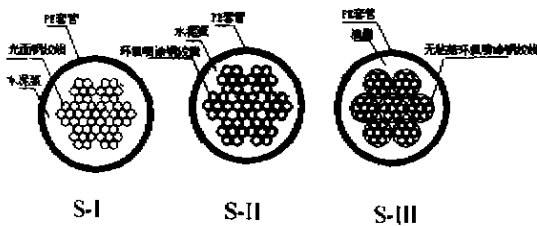


图2

表1 三种体外预应力钢索的基本构造组成

	OVM-SI型	OVM-SII型	OVM-SIII型
钢绞线	普通光面钢绞线	环氧喷涂层钢绞线	外包PE的单根无粘结环氧喷涂层钢绞线
管道	HDPE	HDPE	HDPE
灌浆材料	水泥浆	水泥浆	油脂

**2.2.1 环氧喷涂钢绞线的制作和技术特点**

环氧喷涂钢绞线是柳州市建筑机械总厂研制的具有优异防腐性能的一种全新的防腐钢绞线，其全称为高压静电喷涂环氧粉末防腐钢绞线。环氧喷涂钢绞线的形状如图3所示，钢绞线的芯线和侧线各根钢丝的表面都有一层致密的厚度均匀的环氧被膜，因此又被称为全涂装钢绞线。

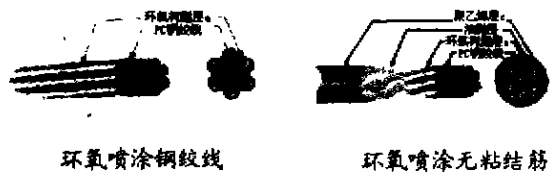


图3

环氧喷涂钢绞线是引进日本高环保无污染高压静电喷涂技术，将环氧树脂粉末喷射于钢绞线上，然后加热熔融、固化、冷却，从而在钢丝表面形成一层致密的环氧涂膜。为了实现这一过程，喷涂前必须先将钢绞线各钢丝暂时打散，喷涂好后再将其复扭成形。

目前应用得较多的其它钢绞线主要有镀锌钢绞线和外表环氧涂装钢绞线。镀锌钢绞线与环氧喷涂钢绞线的主要区别是所用防腐材料与工艺不同，因而防腐效果及钢绞线的机械性能有所差别，PC钢绞线经过镀锌处理后，机械性能均有所下降（如1860MPa级的钢绞线镀锌后降为1770MPa），镀锌钢绞线被刮伤后，在受伤处产生阴极反应，会使腐蚀速度加快。而用此方法生产的环氧喷涂钢绞线不会对其机械性能有任何影响。环氧喷涂钢绞线的工艺不象镀锌钢绞线工艺对环境造成污染，它是一种高环保的表面防腐工

## 体外预应力

艺。

除具有优异的防腐蚀能力外,环氧喷层钢绞线还具有以下特点:

(1) 对构成钢绞线的各根钢丝都进行了充分地表面材质调整,各钢丝一边旋转一边进行涂装,因此与其它涂装法相比,膜厚较薄,(平均150~180um)且均匀,致密性好,可靠性高;

(2) 与涂装前的钢绞线相比,环氧喷层钢绞线的柔软性基本上没有降低;涂膜无气泡、剥落、龟裂等现象;

(3) PC钢绞线涂装后外径变化较小,以往所用的锚具、夹片仍可使用,无需改用专用的锚具、夹片,施工方便,费用低;

(4) 涂料用量少,价格比较便宜。

### 2.2.2 主要材料的质量标准

(1) PC钢绞线:用于制作环氧喷层钢绞线的光面PC钢绞线,应符合国内标准GB/5224-95,国外标准:ASTMA416-90A;BS5896-80;JISG3536。

(2) 环氧粉末:采用熔融键结型环氧树脂粉末。其优点:化学稳定性优良;温度稳定性优良;对金属材质的附着性好;抗阴极分解好;

耐曲折度优良;抗冲击性优良;耐磨性好;低氧渗透性好。

### 2.2.3 环氧喷层钢绞线的性能

由于环氧喷层钢绞线目前在国内刚刚研制成功,尚无这方面的国家标准,因此参照日本环氧树脂涂装钢筋及其它有关资料,制定了柳州市建筑机械总厂企业标准《环氧树脂涂层预应力钢绞线》Q/OVM011-1999,其主要内容如表2所示:

对试制出来的环氧喷涂钢绞线按厂标的要求进行试验,其防腐性能、可弯曲性、柔软性、涂膜耐冲击性、混凝土的附着性,锚固性能、疲劳强度均达到设计要求。同时,环氧喷涂钢绞线与OVM15锚具有良好的适配性,测试组件符合GB/T14370-93 I类锚具标准。

### 2.3 体外预应力钢索的管道

除在转向及锚固位置采用预埋钢管外,OVM体外预应力钢索的管道均采用HDPE管,其材料性能见表3。在选择体外预应力钢索管道的壁厚与管径时必须考虑其强度、耐久性、水密性、作业性和加工性,保护管道在使用或向其内注入防锈材时必须不易变形且对于外部的冲击也要具有一定的强度。同时,在任何环境条件下,

表2 环氧喷涂钢绞线的质量标准(厂标)

项目	试验方法及条件	标准要求
外观	生产过程中成盘前用目视检查	涂膜均匀、表面光滑平整、无凸起、裂开、气孔、气泡或有其它附着物
耐冲击性	耐冲击试验法(JIS K54008.3.2中的社邦试验法)	冲锤直接冲击的部位以外涂膜无损伤
可弯曲性	用油压千斤顶进行弯曲加工,弯曲半径为钢绞线直径的2倍,弯曲角度有90度和180度两种	涂膜无损伤
涂膜硬度	按JISK5400.8.4.2用H型铅笔手划	涂膜无破损、划伤
涂膜硬化度	用试剂来回抹拭	涂膜无软化和粘着
耐腐蚀性	按JIS Z 2371的方法进行2000小时盐水喷雾试验	钢绞线表面及内部发锈率在0.5%以下
耐化学药品性	分别用CaCl <sub>2</sub> 、Ca(OH) <sub>2</sub> 、NaOH溶液进行浸渍试验1000小时	钢绞线内部及表面均无发锈
柔软性	用与无涂装PC钢绞线比较的方法进行	挠度差在4%以下
疲劳强度	用与无涂装PC钢绞线比较的方法进行	疲劳试验结束后再分别对两种钢绞线进行拉伸试验,然后将抗拉强度进行比较,基本上无差别

**体外预应力**

都不能与灌浆材料发生化学反应。

OVM体外预应力钢索相应管道内径及壁厚的规格(见表4)：

**2.4 对OVM体外预应力钢索选择的标准**

依据环境条件可以把周围环境及与结构的关系分为四类：

(1) 适度：结构构件通常处于干燥的情况

(2) 中等：结构构件通常处于潮湿的环境中。

(3) 严重：结构构件处于长期湿润或干湿交替的环境中。

(4) 侵蚀性：结构构件处于严重侵蚀性的恶劣环境中。

OVM-SI和OVM-SII型体外预应力钢索可用于前三类的环境，具有最强防护能力的OVM-SIII型体外预应力钢索适用于第四类环境。

**3 转向装置**

转向装置是依赖于结构设计的，主要用于承受体外预应力钢索转向产生的对结构的作用力，其基本类型主要是图4所示的横肋式和图5所示的鞍座式。两者的比较见表5。

体外索转向装置的弯曲半径：从钢绞线的受

**表4 管道的内径及壁厚**

钢绞线规格	管道内径 (mm)	壁厚e(mm)
7-Φ15	75 ( 80 )	1.5
12-Φ15	90 ( 100 )	2
19-Φ15	110 ( 120 )	2.5
27-Φ15	125 ( 140 )	2.5
37-Φ15	140 ( 155 )	3

注：括号里的数据为OVM-SIII型体外预应力钢索所采用的管道尺寸。

**表3 HDPE材料性能指标**

序号	项目	单位	指标	试验方法
1	密度	g/cm	0.942-0.988	GB1033-86
2	熔融指数	g/10min	0.20	GB3682-83
3	拉伸强度	MPa	> 20	GB1040-79
4	屈服强度	MPa	> 16	GB1040-79
5	断裂伸长率	%	> 650	GB1040-79
6	硬度	Shore D	> 60	GB2411-80
7	抗张弹性率	℃	> 50	GB1040-79
8	冲击强度	Kg-cm/cm	> 25	GB1040-79
9	软化温度	℃	> 115	GB1633-79
10	耐气候性能： (1)耐环境应力开裂性 (2)脆化温度	小时 ℃	> 1500 < -60	GB1842-80 GB5470-85
11	耐老化性能： (1)抗张强度保留率 (2)伸长保留率 (3)耐臭氧老化	% %	> 80 > 80 无异常变化	GB7141-85 GB7141-85

**表5 两种转向结构的优缺点比较**

	鞍座式转向结构	横肋式转向结构
优点	附加重量轻、构造简单。	将转向力直接传递至截面上缘，单点提供的转向力大，这样可以集中体外预应力钢索的转向位置，从而简化体外预应力钢索的索型，适用的跨径相对较大。
缺点	单点所能承受的转向力小，体外预应力钢索的转向力必须分散，导致索型设计复杂。故适用的跨径相对较小。	附加重量较大，构造较复杂

## 体外预应力

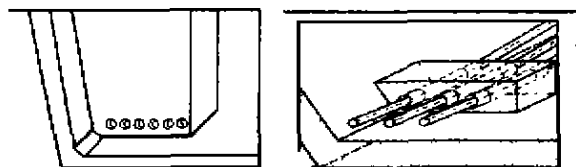


图4 横肋式转向结构

图5 鞍座式转向结构

力状态而言越大越好,但如果弯曲半径设定过大,弯向部的构件尺寸就变大,从而使桥梁自重增加,因此在确保安全的情况下,转向装置的弯曲半径可以做小一些。

被弯曲配置的PC钢材上因有附加弯曲应力,其疲劳强度有所下降,因此在设计过程中,要对加上弯曲应力值的钢绞线应力值进行校核,要计算受拉钢绞线的弯曲应力值较困难,但假定钢丝之间无摩擦力作用时,可按下式求出弯曲应力值。

$$V_m = \frac{d}{2R} E$$

d——钢丝直径

R——弯曲半径

E——钢绞线弹性模量

根据弯曲应力及施工工艺要求,转向装置的最小弯曲半径可参照表6选取:

表6

钢绞线规格	最小半径(m)
7-Φ15.2	2.0
12-Φ15.2	2.5
19-Φ15.2	3.0
27-Φ15.2	3.5
37-Φ15.2	4

## 4. OVM体外预应力锚具

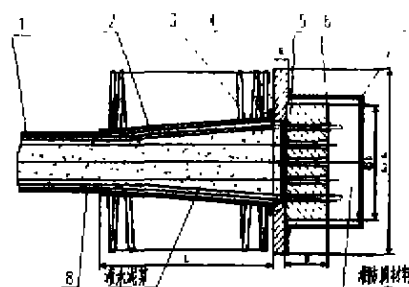
## 4.1 OVM体外预应力锚具的类型

OVM体外预应力锚具主要有永久式和可换索两大类型,根据结构的不同又分为五种形式,可根据不同工程的要求选择不同的锚具。考虑到锚固体系所受的动载荷,为提高锚固单元在低应力状态下自锁的可靠性、完全性,防止张拉完毕

后,夹片相对锚板而产生松动,专门设计了夹片的防松装置。

## (1)OVM.A型

OVM.A型体外预应力锚具属于永久型,不能进行换索,适用OVM-SI和OVM-SII体外预应力钢索。其示意图如下图6所示。OVM.A型锚具的规格及几何尺寸见下表7。



1.钢管 2.套管 3.螺栓 4.锚垫板 5.工作锚板

图6 OVM.A型体外预应力锚具

表7 OVM.A型体外预应力锚具尺寸表

型号	ΦD	H	AXAXB	L
OVM.A15-7	Φ135	60	210X210X45	265
OVM.A15-12	Φ175	70	280X280X45	301
OVM.A15-19	Φ217	110	370X370X60	555
OVM.A15-27	Φ275	120	420X420X60	630
OVM.A15-31	Φ310	140	465X465X80	765

## (2)OVM.AT型

OVM.AT型体外预应力锚具属于可更换型,可以进行换索,适用OVM-SI和OVM-SII型体外预应力钢索。OVM.AT型体外预应力锚具在OVM.A型的基础上增加了与喇叭管的隔离装置,当需要换索时,烧断预应力钢索后从后面整体取出即可。其示意图如下图7所示。OVM.AT型锚具的规格及几何尺寸同OVM.A型体外预应力锚具。

## (3)OVM.T型

OVM.T型体外预应力锚具属于永久型,不能进行换索,适用OVM-SI和OVM-SII型体外预应力钢索。其示意图如下图8所示。OVM.T型

**体外预应力**

锚具的规格及几何尺寸见下表8。

**(4)OVM.TT型**

OVM.TT型体外预应力锚具属可换型，可以进行换索适用OVM-SI和OVM-SII型体外预应力钢索。其示意图如下图9所示。OVM.TT型锚具的规格及几何尺寸与OVM.TT型体外预应力锚具相同。

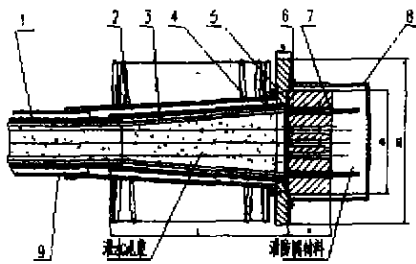
**(5)OVM.TS型**

OVM.TS型体外预应力锚具属于可更换型，适用OVM-SIII型体外预应力钢索。OVM.TS型体外预应力锚具预留了钢索的张拉工作长度，在锚

具中用油脂防腐。当需要换索时，直接张拉钢索并放松夹片。这种锚具也可用作在顶推施工时的临时钢索。其示意图如下图10所示。OVM.TS型锚具的规格及几何尺寸见下表9。

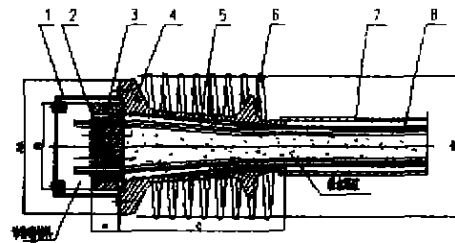
**(6)OVM.TSK型**

OVM.TSK型体外预应力锚具可以进行换索、可以调整索力，属于可换可调型，适用OVM-SIII型体外预应力钢索。OVM.TSK型体外预应力锚具在OVM.TS基础上增加了螺母及锚杯，不但预留了钢索的张拉工作长度以在需要时换索，而且在锚杯上加工有螺纹，从而可以在体外



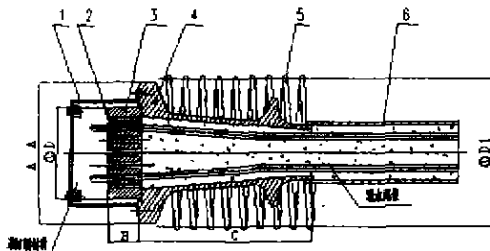
1. PE套管 2.外套筒 3.内套筒 4.螺旋筋 5.锚垫板  
6.工作锚板 7.工作夹片 8.保护罩 9.预埋钢管

图7 OVM.TT型体外预应力锚具



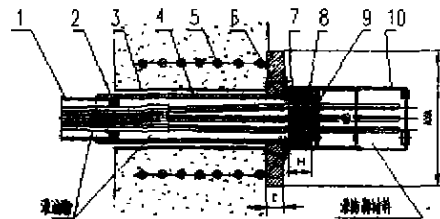
1.保护罩 2.夹片 3.工作锚板 4.锚垫板 5.隔离套  
6.螺旋筋 7.钢管 8.PE管

图9 OVM.TS型体外预应力锚具



1.保护罩 2.夹片 3.工作锚板 4.锚垫板 5.螺旋筋 6.钢管

图8 OVM.TSK型体外预应力锚具



1.钢管 2.约束圈 3.预埋管 4.钢护管 5.螺旋筋 6.锚垫板  
7.工作锚板 8.夹片 9.防松装置 10.保护罩

图10 OVM.TS型体外预应力锚具

表8 OVM.T型体外预应力锚具尺寸表

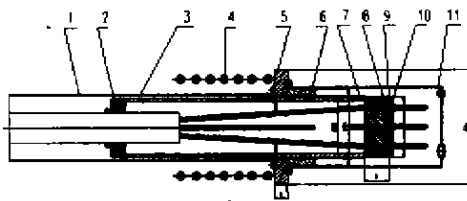
型号	ΦD	H	A×A×C	ΦD1
OVM.T15-7	Φ135	60	210×210×160	Φ240
OVM.T15-12	Φ175	70	270×270×210	Φ330
OVM.T15-19	Φ217	90	310×310×250	Φ400
OVM.T15-27	Φ260	120	350×350×295	Φ470
OVM.T15-31	Φ310	140	465×465×390	Φ570

表9 OVM.TS型体外预应力锚具尺寸表

规格	ΦD	H	A×A×C
OVM.TS15-7	Φ170	70	210×210×50
OVM.TS15-12	Φ218	80	270×270×55
OVM.TS15-19	Φ270	100	310×310×60
OVM.TS15-27	Φ270	100	350×350×60
OVM.TS15-31	Φ330	130	465×465×80

**体外预应力**

索张拉后使用螺母调节预应力,通过调节螺母,可实现整体换索。其示意图如下图11所示。OVM.TSK型锚具的规格及几何尺寸见下表10。



1.预埋管 2.密封装置 3.密封筒 4.螺旋筋 5.锚垫板 6.螺母 7.锚杯 8.工作锚板 9.夹片 10.防松装置 11.防护罩

图11 OVM.TSK型体外预应力锚具

5. 根据设计要求选用OVM体外预应力材料及体系的配置

表11为OVM体外预应力体系推荐的配置。

**三、试验**

依据国际预应力混凝土协会FIP《后张预应力体系验收和应用建议》;国家标准GB/T14370-93《预应力筋用锚具、夹具和连接器》;交通部标准《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、连接器试验方法及检验规则》JT 329.2-1997要求。

**1、静载试验**

在OVM体外预应力材料及体系研制的过程中,我们在国家建筑工程质量监督检验中心、厂内都做了大量的静载试验。

主要验证环氧喷涂钢绞线与锚具的适配性能,试验数据见表12。其中计算锚具效率系数时取消国家标准GB/T 14370-93中的束效率系数 $\eta_p$ 。从试验结果可看出,锚具的锚固效率系数和延伸率都达到了FIP93建议的要求,在破断时受瞬间震动和相对位移的影响,环氧喷涂钢绞线中心丝和断丝的环氧涂层有明显脱落,其余部分均完好,拆出夹片观察,夹片齿形完好,基本没积涂层粉。

**2、疲劳性能试验**

在同济大学,按FIP93、JT 329.2-1997要求,我们做了OVM.T15-7体外索锚具组件及PC全喷涂钢绞线锚具组件抗疲劳性能试验。OVM.T15-7体外索锚具组件抗疲劳性能试验采用强度为1860MPa  $\phi$  15.2无粘结筋,PC全喷涂钢绞线锚具组件抗疲劳性能试验采用OVM15-4锚具及环氧喷涂绞线。两组试验应力上限 $0.65\sigma_b$ ,应力幅度 $\Delta\sigma_p=80\text{MPa}$ ,试验结果均达到标准。

表10 OVM.TSK型体外预应力锚具尺寸表

规格	$\Phi D$	H	A×A×C	$\Phi D1$	$\Phi D2$
OVM.TSK15-7	$\Phi 170$	70	210×210×50	$\Phi 240$	$\Phi 180$
OVM.TSK15-12	$\Phi 218$	80	270×270×55	$\Phi 290$	$\Phi 230$
OVM.TSK15-19	$\Phi 270$	100	310×310×60	$\Phi 340$	$\Phi 285$
OVM.TSK15-27	$\Phi 270$	100	350×350×60	$\Phi 340$	$\Phi 285$
OVM.TSK15-31	$\Phi 330$	130	465×465×80	$\Phi 420$	$\Phi 350$

表11 推荐的配置

	OVM体外预应力钢索	OVM体外预应力锚具	灌浆材料	转向处的构造形式
永久式的体外预应力体系	OVM-SI	OVM.A、OVM.T	水泥浆	单层管连接
	OVM-SII	OVM.A、OVM.T	水泥浆	
可更换的体外预应力体系	OVM-SI	OVM.AT、OVM.TT	水泥浆	相互隔离的双层管道
	OVM-SII	OVM.AT、OVM.TT	水泥浆	
	OVM-SIII	OVM.TS	油脂	单层钢管道
可换可调的体外预应力体系	OVM-SIII OVM成品索	OVM.TSK	油脂	单层钢管道

## 体外预应力

### 3、环氧粉末全涂装钢绞线防腐性能试验

该试验主要检验环氧喷涂钢绞线的抗腐蚀性。检验项目包括盐雾试验、耐药品试验、耐溶试验、耐干湿试验。检验依据GB/T10125、GB1763-79、ASTMD1141-90、GB6461-86。送检的环氧化喷涂钢绞线有张拉后及无张拉两种样品。试验结果证明,我厂生产的环氧喷涂钢绞线具有良好的耐腐蚀性能。

### 4、体外预应力锚固体系体外索握裹力工艺试验

该试验主要检验OVM.TS15-12体外应力锚固体系体外索与水泥浆的最大握裹力。试验采用标号为525的水泥、强度为1860MPa  $\phi$  15.2无粘钢筋。试验结果:当水泥试件强度达到36.5Mpa时,最大握裹力为2269KN。

### 四、效益

在最近的十年中,体外索便于检测、可换索等优点得到了越来越多人的认可,特别是在发达国家,体外预应力技术得到广泛运用,在法国自

1992年就有数十座体外索桥梁建成,体外预应力体系有着广阔的市场前景。随着体外预应力体系的广泛应用,我们企业将为设计、施工单位提供全套完善的体外预应力材料及施工设备。在国内市场上,我们以完善的管理、优良的产品质量及售后服务,有着广阔的市场。在国际市场上,由于我们已获得ISO9000国际质量管理模式和BSI质量管理模式注册证书,境外办事处及代理机构的逐步建立和拓展,我厂的产品已远销日本及东南亚,OVM体外预应力材料及体系已成功运用在日本及新加坡一些工程中。

随着OVM体外预应力材料及体系成功开发,将引起我国桥梁建筑结构和施工方式的根本变革,大大地缩短了桥梁的建造周期,使成本大大地降低。我们引进日本生产线,开发环氧喷涂钢绞线,解决了生产镀锌钢绞线对环境污染问题,属高环保项目。预计在不久的将来体外预应力体系将会成为市场增长的一个亮点,并将有力地带动相关产业的发展。

表12

组号	锚具型号	计算极限拉力之和 (KN)	破断极限拉力 (KN)	组件初始长度 (mm)	破断时组件伸长量 (mm)	锚固效率系数 (%)	总应变 (%)	破断情况
1-1	OVM15-1	269	278.72	774	36.6	98.1	4.73	颈缩2丝
1-2	OVM15-1	269	280.62	752	37.3	98.8	4.96	颈缩5丝
1-3	OVM15-1	269	263.51	763	37.3	98.0	4.89	颈缩5丝
2-1	OVM15-3	807	783	3550	150.0	97	4.23	剪切2丝
2-2	OVM15-3	807	797	3550	154.0	98.8	4.34	颈缩3丝
2-3	OVM15-3	807	791	3550	154.3	98.0	4.35	颈缩3丝
3-1	OVM15-7	1883	1815.62	3503	159.3	96.4	4.54	剪切5丝
3-2	OVM15-7	1883	1822.07	3499	159.32	96.8	4.55	剪切1丝
3-3	OVM15-7	1883	1830.68	3498	167.56	97.2	4.79	颈缩2丝
4-1	OVM15-12	3228	3116.39	3660	153.16	96.5	4.18	剪切2丝
4-2	OVM15-12	3228	3101.83	3667	154.92	96.1	4.22	剪切5丝
4-3	OVM15-12	3228	3116.39	3658	150.94	96.5	4.13	剪切3丝

作者注:感谢同济大学桥梁系徐栋副教授、李国平教授对本项目的大力支持