

# 国际预应力材料及体外索新进展

陶学康

## 1 预应力材料新进展

### 1.1 纤维增强塑料非金属预应力筋

在预应力混凝土中,为了解决钢筋腐蚀问题,自80年代中期以来,欧美及日本等国家开始使用纤维增强塑料(FRP)制作而成的非金属预应力筋,目前其研究开发在国外已达到相当高的水平,并进入实际应用阶段。

#### 1.1.1 品种、规格及性能特点

纤维增强塑料包括玻璃纤维增强塑料(GFRP)、碳纤维增强塑料(CFRP)和芳纶纤维增强塑料(AFRP)等。其由多股连续纤维以环氧树脂等作为基底材料胶合后,经过特制的模具

挤压、拉拔成型。

非金属预应力筋的规格很多,如CFRP线材的直径为 $\Phi 1.5\text{mm} \sim \Phi 5.0\text{mm}$ ,绞线有 $1 \times 7$ 、 $1 \times 19$ 及 $1 \times 37$ 几种,直径为 $\Phi 5.0\text{mm} \sim \Phi 40.0\text{mm}$ 不等;AFRP棒材的直径为 $\Phi 2.6\text{mm} \sim \Phi 14.7\text{mm}$ ,绞线直径为 $\Phi 9.0\text{mm} \sim \Phi 14.7\text{mm}$ 等。常见的几种纤维的力学性能见表1,纤维增强塑料筋的力学性能见表2。

纤维增强塑料筋与钢材相比性能特点如下:

- \* 强度—质量密度比高,比钢材大5倍。
- \* 碳纤维和芳纶纤维筋具有良好的疲劳性

表1 纤维的力学性能

纤维类型	抗拉强度 (MPa)	极限应变 (%)	弹性模量 (GPa)
芳纶纤维	2700~3400	2.5~4.0	73~165
E-玻璃纤维	3500	3~5	75
S-玻璃纤维	4500	4.5~5.5	87
碳纤维(PAN, 低弹模)	3200~3900	1.0~1.6	250
碳纤维(PAN, 高弹模)	2300~2700	0.6	400
高强钢丝	1800	4.0	200

表2 纤维增强塑料筋的力学性能

FRP类型	抗拉强度 (MPa)	极限应变 (%)	弹性模量 (MPa)	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
芳纶纤维	1610	2.5	$6.4 \times 10^4$	1300
玻璃纤维	1750	3.4	$5.1 \times 10^4$	2000
碳纤维	2400	1.6	$1.5 \times 10^5$	1500
高强钢丝	1800	4.0	$2.0 \times 10^5$	7850

能、应力幅约为钢材的3倍，但玻璃纤维筋的疲劳强度比钢材显著低。

\* 抗腐蚀性能好，且为非磁性材料；磁悬浮列车要求轨道结构无磁性，可用于建造无磁性预应力混凝土结构。

\* 热膨胀系数低，CFRP为 $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，约为钢材的1/20。

\* 能耗低，FRP采用化学合成法生产，能源消耗远低于钢材。

\* 弹性模量较低，约为预应力钢材的1/4~3/4。

\* 极限延伸率低，破坏形态呈脆性，没有屈服阶段。

\* 抗剪强度低，约为预应力钢材的1/5~1/4。

\* 静载长期强度与短期强度的比值低（特别是对玻璃纤维）。

\* 芳纶纤维吸水后容易损坏。

\* 价格高。

### 1.1.2 工程应用

在1978年 Strabag Ban-AG和 Bayer AG成立了一家合资公司，首次开发出含有68%玻纤和32%树脂的玻璃纤维增强塑料预应力筋（Polystal），其直径为7.5mm。采用这种非金属预应力筋的第一座公路桥建在德国杜塞尔多夫，于1986年正式通车。该桥为二跨后张预应力混凝土连续梁，跨度21.3m+25.6m，双车道桥宽15m，梁高1.75m，每跨配有59束纵向GFRP预应力筋，每束由19  $\Phi$  7.5mm组成，工作荷载为600kN（0.47Pu），并配有光纤传感器及其他埋入式传感器，进行长期监测。世界上最早用碳纤维增强塑料及芳纶纤维增强塑料预应力筋建造混凝土桥的在日本。现在纤维增强塑料预应力筋已在德国、日本、加拿大、英国、荷兰、挪威等国家的数十座人行桥和公路桥获得应用，品种有棒筋、棒筋

束和CFRP绞线，用为先张法预应力筋，后张法预应力筋，体内无粘结预应力筋，体外预应力筋，先张与后张混合应用的部分预应力；结构形式有简支梁、连续梁等。但是，到1997年多数仍用在中小跨度桥梁，公路桥最大跨度做到32.5m。为了获得采用CFRP预应力筋建造大跨桥梁的经验，由荷兰运输部、公共工程和水管理部发起，荷兰的“Dintelhaven”桥已于1998年立项施工。该桥为体外预应力箱梁节段桥，中央跨度192m，采用平衡悬臂法施工。按计划将其中4束预应力筋由4束各为CFRP 91  $\Phi$  5筋代替，体外束长70m设置在箱梁内。锚具为BBR和EMPA开发的类型，且已在瑞士Winterthur桥梁工程中使用过。并安排对两根10m长短束进行荷载试验，以观察其短期和长期性能。

尽管国际上对纤维增强塑料已获得大量科研成果和工程实践经验，但目前尚无统一的设计指南或规范，在欧洲这方面的标准尚在制定过程中。现在，日本的几大钢制品厂都已将纤维增强塑料非金属预应力筋列为生产产品之一，制定了企业标准，可以向用户供货，欧洲的研究起步较早，也有生产厂家及自己的产品。

正在开展的科研工作：

\* 材料试验及特性（范围含纤维及基材，短期性能试验，长期性能试验，粘结，疲劳，物理性能，耐久性，特性的评价与安全）。

\* 配置非金属筋混凝土（市场，基于概率的安全评价，受弯、挠度和裂缝，梁板受剪及扭转，耐火，最低配筋率，受压，长期变形，冲击）

\* 体外粘贴FRP加固技术（FRP加固材料及技术，抗弯加固及材料模型，抗弯加固及失去粘结，刚度和延性，剪切和扭转，约束，施工应用等）

\* 锚具系统及体外束应用技术。

## 1.2 环氧涂层钢绞线

### 1.2.1 环氧涂层钢绞线及性能

环氧涂层钢绞线为七股钢丝预应力钢绞线，有 0.64mm~1.14mm 厚有机涂层。实际应用有两种涂层：一种是光滑型，另一种为表面沉砂型。光滑型具有较低的粘结特性，用于无粘结后张体系、外部后张体系和斜拉索。表面沉砂型用于有粘结先张法和后张法体系。

生产过程为解束、涂装、重新扭绞等，此生产过程不会对钢绞线强度产生影响。除钢绞线外部包有涂层，在钢丝间隙中充满环氧材料很有利，它可以防止化学腐蚀通过毛细作用或其他液体静力学方法侵入。因此，对恶劣的环境条件，采用环氧涂层预应力钢绞线，可以提供所需的额外耐腐蚀措施。

性能特点如下：

- \* 松弛应力损失约为普通钢绞线的2倍。
- \* 温度要求  $\leq 65^{\circ}\text{C}$ 。
- \* 单根涂层钢绞线的传递长度和锚固长度分别为预应力筋直径的50倍、155倍。
- \* 在传递长度内徐变随时间增长远小于非涂层钢绞线 ( $t \leq 65^{\circ}\text{C}$ )。
- \* 锚具回缩量张拉端25mm，固定端10mm。

### 1.2.2 应用

使用环氧涂层钢绞线时，应采用专门设计和制造的锚具、夹具及顶压器等，并实现长束的多次锚固。

制造厂应为环氧涂层钢绞线设计专用的张拉程序。初始拉力通常为 7~10kN；第二次张拉时，夹片一定要替换或在重新使用前仔细清洗过；张拉力小于  $0.4f_p$  时的专门张拉程序等。

对体内后张法预应力体系，不得使用镀锌金属管，应采用聚乙烯(PE)管，表面有砂粒的环

氧涂层钢绞线与聚乙烯管之间的摩擦系数  $\mu$  为 0.205。

环氧涂层钢绞线可用于桥梁及其他结构中的拉索，由该钢绞线、护套管、灌浆材料及锚具组成。在护套内使用螺旋隔离层处，隔离金属线应涂环氧涂层以防微振磨损。

## 1.3 塑料管

### 1.3.1 背景

1985年在英国曾发生因预应力筋腐蚀而引起的桥梁倒塌事故。此后，英国运输部决定从1992至1996年暂停使用压浆的后张预应力混凝土结构。该决定引起了国际上对预应力混凝土耐久性的广泛重视，使从管道成型、管道压浆、防护体系和质量管理等各方面予以审查。此后，在英国作出一项技术规定，即必须将后张预应力筋密封在耐磨和防渗漏的塑料管中，以形成多层防护，在其他国家也得到了响应。

### 1.3.2 塑料管类型和性能特点：

塑料管应由高密度聚乙烯(HDPE)或聚丙烯(PP)制成，厚度至少为2mm。

控制制造工艺分类：

- \* 挤压成型管。
- \* 模压成型管。
- \* 沿螺旋线或纵向焊接管。

按外形分类：

- \* 单根钢绞线护套管。
- \* 光面塑料管。
- \* 塑料波纹管。

配套部件：

- \* 管道连接件。
- \* 管道灌浆孔、排气孔。
- \* 管道与锚具连接件。
- \* 锚具保护罩。
- \* 密封零件。

\* 锚具电缆线用特殊构造细节。

基本性能特点：

\* 耐腐蚀性能好（表现为防水性能好、耐候性好、抗氧化和化学侵蚀）。

\* 强度高。

\* 不导电，能保护预应力筋抗杂散电流。

\* 磨擦系数低

7丝钢绞线  $\mu=0.10\sim 0.14$

钢丝  $\mu=0.08\sim 0.12$

\* 提高预应力筋抗疲劳应力幅。

\* 塑料波纹管粘结性能好。

\* 线膨胀系数较高  $140 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

\* 弹性模量较低800MPa。

### 1.3.3 应用

塑料管可广泛用于后张法预应力体系、体外预应力、斜拉索、地锚等。我国在长江二桥等工程已使用VSL提供的塑料波纹管。

目前塑料波纹管的设计在各国尚不统一，随供应厂家不同变化较大，使用经验也有限，尚未达到标准化的程度。

### 1.3.4 智能预应力筋

采用CFRP预应力筋，配有光纤传感器对应力进行长期监测，这标志着发展智能结构迈出了

第一步。

## 2 体外预应力技术及拉索

### 2.1 概述

体外预应力技术的概念及方法起源于法国，目前已成为加固钢筋混凝土结构的一种有效方法。最近10多年来，特别是在法国体外预应力已愈来愈多地获得认可，从1982年至1996年在法国已建造这类桥梁50余座。体外预应力桥梁在美国等其它国家也处于方兴未艾。

体外预应力筋按布置方式为单纯型和混合型两类。单纯型是将全部预应力筋布置在混凝土结构构件截面之外；混合型除了将预应力筋布置在截面外面，还将一部分预应力筋布置在体内。混合配置体内预应力和体外预应力，可获得更好的结构延性和抗震性能。体外预应力筋作为一种后张预应力方法，又可分为有粘结与无粘结两种。

体外预应力筋的优点：

\* 无需拆除结构可更换预应力筋。

\* 能在使用期内检测和维护预应力筋。

\* 简化预应力筋曲线和减小摩阻损失。

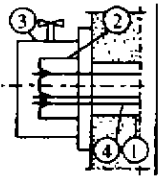
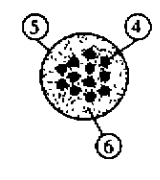
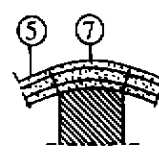
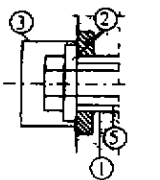
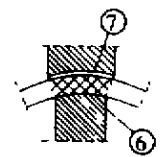
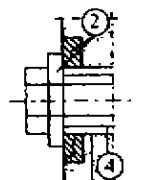
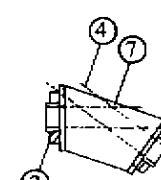
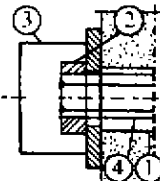
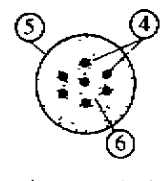
\* 减小混凝土构件截面尺寸，减轻结构自

重。

表3 体外预应力材料

预应力筋	管道	防腐材料	锚具外套管	转向块或鞍座
(1) 无涂层钢丝、钢绞线	(1) 刚性的或波纹钢管	(1) 水泥浆 (2) 油脂或组合物	(1) 钢管或HDPE管，或两者的组合	(1) 钢或HDPE管或两者的组合
(2) 镀锌钢丝、钢绞线	(2) 高密度聚乙烯(HDPE)或聚丙烯(PP)	(3) 石蜡 (4) 沥青-环氧树脂		(2) 钢、铸铁或预制混凝土制“定位梳”或“定位耙”
(3) 带油脂、腊或其它柔性涂层或带塑料套管单根钢绞线	(3) 由薄金属管加劲的HDPE管	(5) 沥青产品 (6) 聚氨酯水泥配料		(3) 带弹性垫层及滑动部件的鞍座
(4) 环氧涂层钢丝、钢绞线或钢筋				

表4 典型的防腐体系

系统及类型	锚具布置	防腐蚀自由长度	转向块构造	说明
1. (B)	 <p>①外套管 ②锚具 ③护罩 ④预应力筋</p>	 <p>④预应力筋 ⑤⑦钢管或PE管 ⑥水泥浆</p>	 <p>考虑：最小半径R，转角块作为不动点、管道与钢绞线间微振磨损，钢鞍座出口处的尺寸偏差</p>	<p>PC钢材、水泥浆、钢管或PE管，钢绞线或钢丝安装在预置的孔道内，张拉后灌浆</p>
2. (A)	同1	同1 但⑥阻锈化合物代替水泥浆	同1	在钢管或PE管中的PC钢丝或钢绞线，有机阻锈化合物，安装在预制孔道中的钢绞线或钢丝，后续注入有机防腐化合物、预应力筋可替换
3. (A)	 <p>①外套管 ②锚具部件 ③护罩 ④预应力钢丝或钢绞线</p>	同1 ⑤钢管或PE管 ⑥水泥浆或阻锈化合物	 <p>⑥水泥浆 ⑦PE鞍座或钢管</p>	<p>在钢管或PE管中的PC钢材、双层外套管，有机阻锈化合物或水泥浆 PC钢材，水泥浆，钢管或PE管，安装在预置孔道内的钢绞线或钢丝，张拉后灌浆</p>
4. (A)	 <p>①外套管 ②锚具部件 ④镀锌钢丝或钢绞线</p>	④镀锌钢丝或钢绞线	 <p>②锚具 ⑦钢构造</p>	镀锌钢丝或钢绞线，锚具部件也镀锌，转角点由2个锚固组成，预应力筋可替换
5. (A)	 <p>④带油脂和塑料套管的单根钢绞线 ③PE管 ⑥水泥浆</p>	 <p>④带油脂和塑料套管的单根钢绞线 ③PE管 ⑥水泥浆</p>	<p>如果灌浆在张拉前完成，鞍座同3 如果采取特别措施，可以在张拉后灌水泥浆</p>	在钢管或PE管中的PC钢材，双层外套管，有机阻锈化合物

注：A无粘结，钢束可替换；B有粘结，钢束不可替换

\* 施工工艺较简便。

应用范围：

- \* 预应力混凝土桥梁。
- \* 预应力混凝土建筑结构及特种结构。
- \* 混凝土结构重建、维修和加固。

## 2.2 材料和体系

体外预应力的材料和防腐体系分别见表3、表4。

- \* 预应力钢结构。
- \* 临时性预应力混凝土结构。
- \* 悬挂结构的拉索（体外预应力的特殊应用）。

## 2.3 应用技术要点

- ① 体外预应力孔道管应满足的要求。
- ② 体外无粘结筋设计要求。
- ③ 转向块设计要求。
- ④ 在极限状态下，体外预应力筋设计计算及避免二次效应要求。
- ⑤ 体外预应力筋的防腐蚀措施。
- ⑥ 体外预应力筋替换设计要求。
- ⑦ 体外预应力筋防止交通、风等引起临界横向振动的装置。
- ⑧ 体外预应力筋锚固区设计要求等。

## 2.4 国际上研究动向

2.4.1 结合非金属预应力筋在体外预应力桥梁的应用，目前研究重点如下：

- \* 锚固系统和转向块设计与制造
- \* 预应力构件的锚固区设计
- \* 初始预应力水平
- \* 体外无粘结预应力体系

2.4.2 利用碳纤维、玻璃纤维等复合材料自重轻、强度高、刚度大以及耐疲劳、耐腐蚀、热膨胀系数低等优势，致力于研究开发新型复合材料

斜拉桥。

瑞士联邦材料实验室（EMPA）完成了碳纤维增强塑料（CFRP）拉索的室内静动力试验；美国加州大学用缠绕方法制造出混杂复合材料缆索，准备用其替换长滩Desmond桥上80根拉索中的4根，世界上还有在直布罗陀海峡最窄处建造碳纤维增强塑料斜拉桥的建议，分析认为使用目前的建筑材料桥梁上部结构只能达到1000m~1300m，采用新型复合材料可望在直布罗陀海峡实现建造3400m或更大的跨度桥梁的方案，从而发出了采用新型复合材料建造新一代斜拉桥的信号。

2.4.3 利用环氧涂层钢绞线，专门设计的夹片式群锚体系，制作无粘结可替换式的或在钢材和护套间隙充填防腐粘结材料制成有粘结的新型体外预应力束或拉索，提高体外预应力的耐腐蚀性能。

2.4.4 欧洲为制定拉索系统的设计与检验规定，特别关注拉索系统的耐久性设计和检验，疲劳性能以及极限承载力设计和检验等，有关欧洲标准正在制定中。

作者注：本文参考国际预应力混凝土协会（IFTP）第十三届大会文集及有关文献编写，重点放在预应力材料方面的新进展，有理解不准确之处以原文为准。

作者简介

陶学康：中国建筑科学研究院研究员

