



# 锚索波纹管与环氧涂层钢绞线组装件 粘结性能的试验研究

甘国荣 李海峰

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

**摘要:** 预应力锚索钢绞线及波纹管组装件的锚固性能是影响锚索可靠性的重要参数, 本文通过对多根环氧涂层钢绞线波纹管组装件和多根光面钢绞线波纹管组装件进行了粘结性能的对比试验研究, 研究表明单丝环氧涂层钢绞线与水泥砂浆的平均粘结强度与光面钢绞线基本一致, 锚索波纹管组装件的平均粘结强度小于6.2MPa时, 锚索不会发生拔出破坏。

**关键词:** 岩土锚固 预应力锚索 波纹管 环氧涂层钢绞线 粘结性能

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2017.02.004

## 1 概述

预应力锚索采用波纹管进行整体防护是提高锚索耐久性的重要手段, 因此, 研究钢绞线与波纹管组装件的粘结性能是很重要的。特别对于拉力型锚索来说, 其索体一般采用普通光面钢绞线, PTI建议采用波纹管进行索体防护来确保其使用安全性。二十多年前, BS8081也建议采用波纹管或双层波纹管进行永久防护。由于波纹管的重要性, 欧美均对锚索波纹管的材质、壁厚和波长等相关参数做了规定。

国内对钢绞线的粘结性能也做了相关研究, 从有关文献资料来看, 多数研究基于后张预应力混凝土体系的应用。预应力锚索的应用与普通桥梁后张体系是有区别的, 其锚索的拔出破坏除了钢绞线拔出等形式外, 也包含钢绞线与波纹管组装件的整体拔出破坏形式。

## 2 锚索波纹管 and 环氧涂层钢绞线的结构特征

### 2.1 锚索波纹管

预应力岩土锚索使用的锚索波纹管与一般桥梁后张预应力系统使用的塑料波纹管作用不同, 锚索波纹管除防腐防护的功能外, 还要求其能自由弯曲和进行锚索应力传递的作用。通过研究分析, 锚索波纹管的波型采用专项设计, 该波型可有效减少浆体在波纹处的气泡生成, 使荷载传递更加有效, 如图1所示。



图1 锚索波纹管

### 2.2 单丝环氧涂层钢绞线

采用满足GB/T 25823《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》的环氧涂层钢绞线, 单丝环氧涂层钢绞线的环氧涂层厚度大于0.13mm, 如图2所示。与其它涂装法相比, 在具有优良的防腐性能的同时, 仍可保证钢绞线与水泥浆体的粘结性能, 有利于钢绞线长期工作性能。钢绞线涂装后仍可使用以往配套的锚具、夹片, 具有良好的适配性。

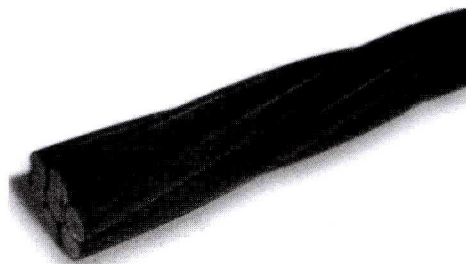


图2 单丝环氧涂层钢绞线示意图

## 3 单丝环氧涂层钢绞线的粘结性能试验研究

环氧涂层钢绞线与水泥砂浆的粘结性能, 是

工程应用中的一个重要参数。美国预应力混凝土学会环氧涂层钢绞线专业委员会在环氧涂层钢绞线使用指南中建议后张法中单根环氧涂层钢绞线的传力长度  $l_0$  为  $65d$  ( $d$  为钢绞线直径)。

将准备好的三根单丝环氧涂层钢绞线分别放入三根内径大于75mm长约1m的无缝钢管，配制高流动度水泥砂浆料，并用高速搅拌机进行充分搅拌，将搅拌后的水泥砂浆灌入安放好钢绞线的三根无缝钢管内。及时取样制作水泥砂浆试块，按普通混凝土进行同步养护。在浆体试块强度大于40MPa时按图3安装张拉装置进行拉拔力试验。

拉拔力按  $0.05f_{ptk}$ 、 $0.2f_{ptk}$ 、 $0.4f_{ptk}$ 、 $0.6f_{ptk}$ 、 $0.8f_{ptk}$  分级进行张拉，试验结果如图4所示：

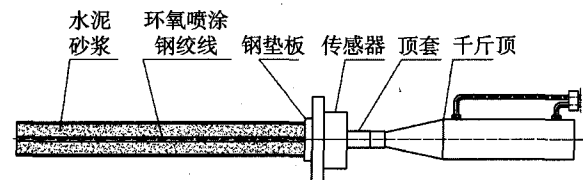


图3 单根单丝环氧涂层钢绞线粘结性能试验

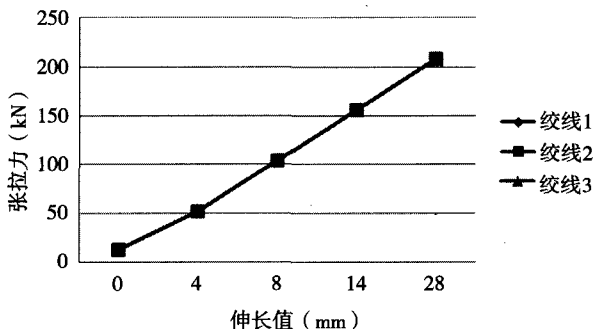


图4 单根单丝环氧涂层钢绞线张拉曲线图

单丝环氧涂层钢绞线在张拉至  $0.8f_{ptk}$  (208kN) 过程中均与水泥浆体粘结牢固，计算其粘结强度  $\xi$  为： $\xi = \xi = N_l / \pi d L = 208 / (3.14 \times 15.24 \times 0.99) = 4.4 \text{MPa}$ 。

#### 4 锚索波纹管 and 单丝环氧涂层钢绞线组装件的粘结性能

在岩土锚索使用中，美国PTI和欧盟EN1537均要求采用塑料波纹管对索体钢绞线进行永久防护，而锚索波纹管内外浆体的应力传递要通过锚索波纹管来实现，因此，除环氧涂层钢绞线从浆体中拔出破坏外，环氧涂层钢绞线和波纹管组装件的粘结性能制约了整束锚索极限拉拔力的大

小，而且，波纹管内钢绞线束与浆体之间的粘结强度会随着钢绞线根数的增加而降低。

参考文献2指出，预应力锚索内锚固段的应力传递长度主要集中在2.5m的范围内，因此，本对比试验制作长度为2m，截面尺寸分别为  $300 \text{mm} \times 300 \text{mm}$  及  $400 \text{mm} \times 400 \text{mm}$  的模拟注浆体的两种模板架，绑扎好骨架钢筋，依次放入锚索波纹管，定位绑扎好。编制和安装  $8 \times \phi 15$  和  $12 \times \phi 15$  光面钢绞线索各一束、单丝环氧涂层钢绞线索各一束。配制高流动度水泥砂浆，并用高速搅拌机进行充分搅拌。将高流动度水泥砂浆倒入模板架内，让水泥砂浆自动充满锚索波纹管以至充满整个模板架。浇筑过程中及时取样制作水泥砂浆试块。在浆体强度为45MPa时按图5所示进行循环加卸载试验。

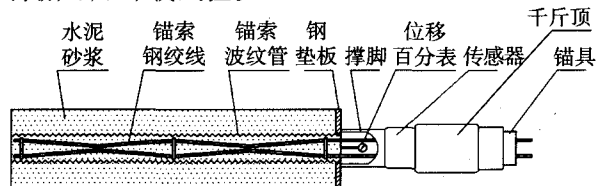
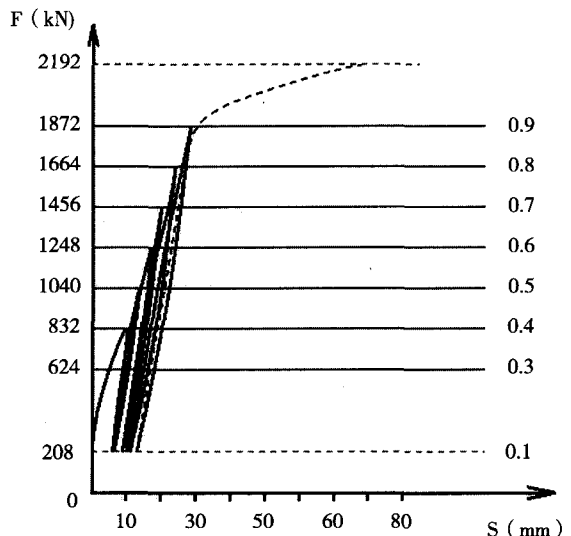


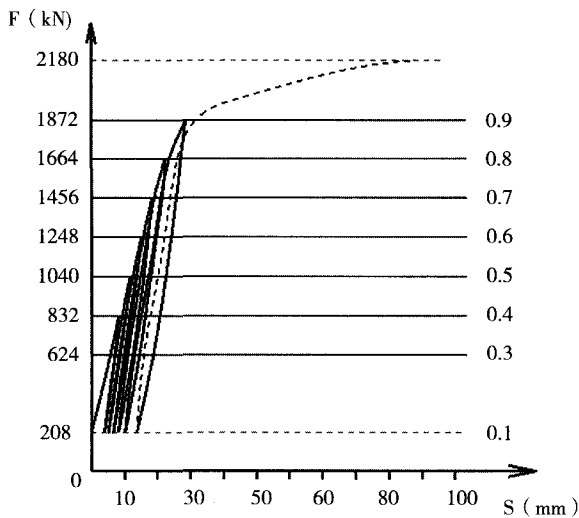
图5 锚索波纹管和钢绞线组装件粘结性能试验

在锚索每一级持荷期间，钢绞线整体变形稳定后，测量其位移值，并施加下一级循环载荷。加载曲线对比数据如图6、图7所示：

锚索进行循环加载过程中，各锚索均未发生钢绞线或波纹管的拔出破坏，最终得到锚索组装件的弹、塑性位移对比曲线图如图8所示：

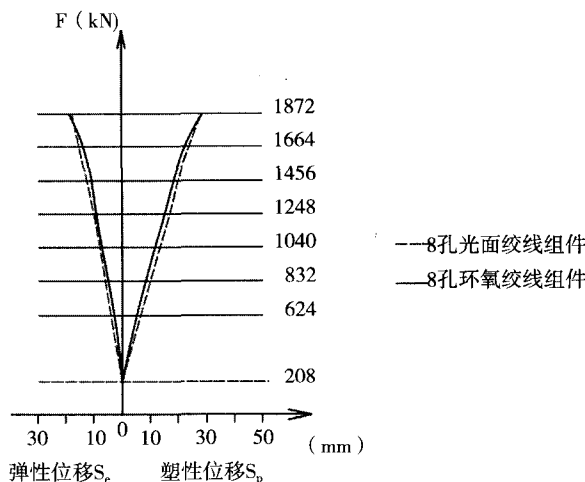


(a)  $\phi 15$  普通光面钢绞线锚索

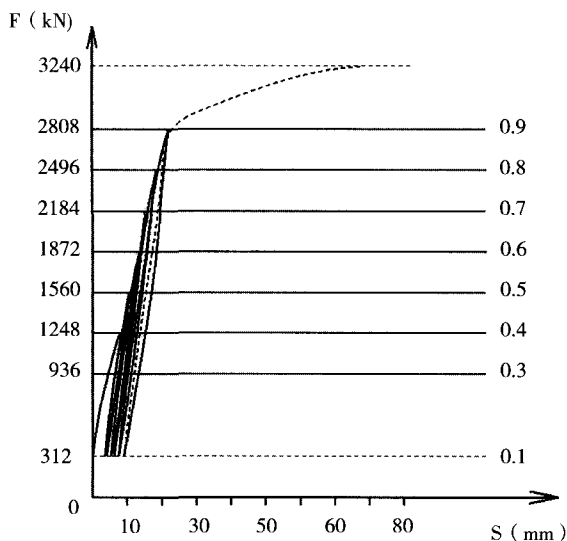


b  $\phi 15$ 单丝环氧涂层钢绞线锚索

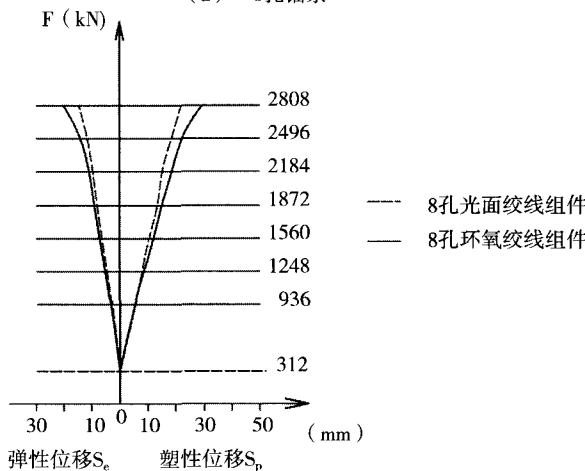
图6 8孔锚索荷载-位移曲线图



(a) 8孔锚索

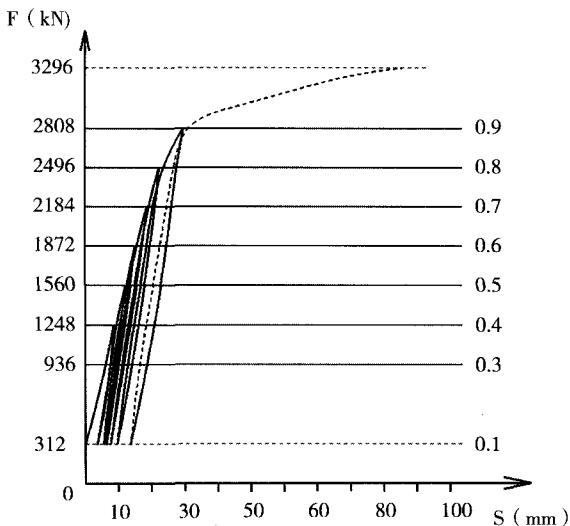


(a)  $\phi 15$ 普通光面钢绞线锚索



(b) 12孔锚索

图8 锚索荷载-弹、塑性位移曲线对比图



(b)  $\phi 15$ 单丝环氧涂层钢绞线锚索

图7 12孔锚索荷载-位移曲线图

根据试验结果,以 $0.8f_{ptk}$ 的钢绞线弹性力值对比分析,8孔锚索在试验索力为1664kN时,单丝环氧涂层钢绞线锚索组装件的塑性位移比普通光面钢绞线锚索组装件小1.6mm;12孔锚索在试验索力为2496kN时,单丝环氧涂层钢绞线锚索组装件的塑性位移比普通光面钢绞线锚索组装件大3.8mm。以 $0.6f_{ptk}$ 的钢绞线使用力值对比分析,8孔锚索在试验索力为1248kN时,单丝环氧涂层钢绞线锚索组装件的塑性位移比普通光面钢绞线锚索组装件小1.8mm;12孔锚索在试验索力为1872kN时,单丝环氧涂层钢绞线锚索组装件的塑性位移比普通光面钢绞线锚索组装件大1.6mm。

锚索接着加载到钢绞线破断,检查整束锚索的静载锚固性能。从静载试验结果来看,单丝环氧涂层钢绞线锚索和普通光面钢绞线锚索的静载锚固效率一致,均满足GB/T14370的要求。试验结果见表1。



表1 单丝环氧涂层钢绞线与锚索波纹管组装件静载试验数据对比表

项目	极限拉力 $N_t$ (kN)	锚具效率系数( $\eta_a$ )	备注
8× $\phi$ 15单丝环氧涂层钢绞线, 1860MPa	2180	0.98	$\phi$ 100/ $\phi$ 80锚索波纹管
8× $\phi$ 15普通光面钢绞线, 1860MPa	2192	0.99	$\phi$ 100/ $\phi$ 80锚索波纹管
12× $\phi$ 15单丝环氧涂层钢绞线, 1860MPa	3296	0.99	$\phi$ 120/ $\phi$ 100锚索波纹管
12× $\phi$ 15普通光面钢绞线, 1860MPa	3240	0.97	$\phi$ 120/ $\phi$ 100锚索波纹管

试验中, 光面钢绞线和单丝环氧涂层钢绞线均未与水泥砂浆脱离粘结, 直至钢绞线破断, 从中可得出锚索钢绞线与水泥砂浆的平均粘结强度:  $\xi_{\text{绞线}} = N_t / \pi d n L_1$  (式中:  $d$ 为钢绞线直径, 光面绞线取15.24mm, 单丝环氧绞线取16.02mm;  $n$ 为钢绞线数量;  $L_1$ 为钢绞线粘结长度, 取2m), 分别计算如下:

$$\xi_{\text{光面}8} = 2192 / (3.14 \times 15.24 \times 8 \times 2) = 2.86 \text{MPa}$$

$$\xi_{\text{光面}12} = 3240 / (3.14 \times 15.24 \times 12 \times 2) = 2.82 \text{MPa}$$

$$\xi_{\text{环氧}8} = 2180 / (3.14 \times 16.02 \times 8 \times 2) = 2.71 \text{MPa}$$

$$\xi_{\text{环氧}12} = 3296 / (3.14 \times 16.02 \times 12 \times 2) = 2.73 \text{MPa}$$

钢绞线拉破断后, 打掉波纹管内外水泥砂浆, 检查锚索波纹管和钢绞线环氧涂层, 发现波纹管无明显变形, 绞线环氧涂层无破损。从中可

得出锚索波纹管组件与水泥砂浆的平均粘结强度:

$\xi_{\text{波纹管}} = N_t / \pi D L_2$  (式中:  $D = (D_{\text{内}} + D_{\text{外}}) / 2$ ,  $D_{\text{内/外}}$ 分别为波纹管内外径, mm;  $L_2$ 为波纹管粘结长度, 取2m), 分别计算如下:

$$\xi_{\text{波纹管}100} = 2180 / [3.14 \times 2 \times (80 + 100) / 2] = 3.86 \text{MPa}$$

$$\xi_{\text{波纹管}120} = 3240 / [3.14 \times 2 \times (100 + 120) / 2] = 4.70 \text{MPa}$$

根据上述结果, 又进行了水泥砂浆抗压强度约为45MPa条件下, 19和27根 $\phi$ 15单丝环氧涂层钢绞线与锚索波纹管组装件的粘结性能试验, 环氧绞线和波纹管粘结长度均为2.5m, 整束锚索静载锚固性能试验结果见表2:

表2 单丝环氧涂层钢绞线与锚索波纹管组装件静载试验数据表

项目	极限拉力 $N_t$ (kN)	锚具效率系数( $\eta_a$ )	备注
19× $\phi$ 15单丝环氧涂层钢绞线, 1860MPa	4969.5	0.97	$\phi$ 140/ $\phi$ 115锚索波纹管
27× $\phi$ 15单丝环氧涂层钢绞线, 1860MPa	7062	0.98	$\phi$ 160/ $\phi$ 130锚索波纹管

据此计算单丝环氧涂层钢绞线和锚索波纹管组件与水泥砂浆的平均粘结强度如下:

$$\xi_{\text{环氧}19} = 4969.5 / (3.14 \times 16.02 \times 19 \times 2.5) = 2.06 \text{MPa}$$

$$\xi_{\text{环氧}27} = 7062 / (3.14 \times 16.02 \times 27 \times 2.5) = 2.08 \text{MPa}$$

$$\xi_{\text{波纹管}140} = 4969.5 / [3.14 \times 2.5 \times (140 + 115) / 2] = 4.97 \text{MPa}$$

$$\xi_{\text{波纹管}160} = 7062 / [3.14 \times 2.5 \times (160 + 130) / 2] = 6.20 \text{MPa}$$

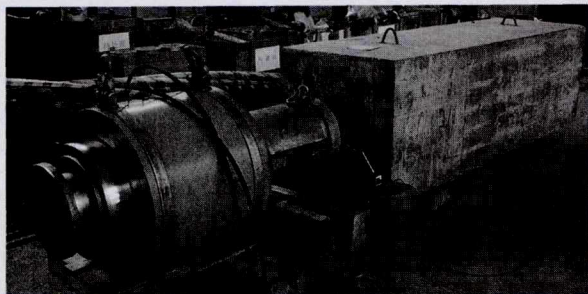


图9 27根环氧绞线与波纹管组装件静载试验



图10 水泥砂浆体裂缝分布

27根 $\phi$ 15单丝环氧涂层钢绞线与锚索波纹管组装件张拉至绞线破断时, 锚索波纹管外砂浆体出现明显多处裂纹, 波纹管组装件粘结强度已达极限。

## 5 结论

(1) 当水泥砂浆抗压强度大于40MPa时, 锚索组装件的多根单丝环氧涂层钢绞线与水泥砂浆的平均粘结强度和光面钢绞线与水泥砂浆的平均粘结强度基本一致。锚索组装件的多根钢绞线平均粘结强度较单根钢绞线有所降低, 在保证锚固长度的情况下, 锚索组装件环氧钢绞线与浆体之间仍能稳定握裹, 锚索组装件的整体锚固性能不变。

(2) 锚索波纹管组装件的平均粘结强度不

(上接第5页)

(3) 反射系数和面积损失率实验数据曲线拟合

对激励频率为110kHz, 信号滤波后反射系数与面积损失率关系使用MATLAB进行多项式拟合如图6所示, 拟合曲线表达式(2):

$$y=0.009633x^2+0.2344x+0.4625 \quad (2)$$

可见钢丝缺陷回波反射系数和面积损失率的关系实验值与抛物线存在很好的拟合关系。对激励频率为70kHz和90kHz的反射系数的实验数据进行拟合, 发现其跟不同系数的抛物线表达式(3)同样有很好的拟合关系。系数A, B, C的确定跟磁致伸缩导波激励频率的选择、传感器安装的位置、钢丝本身的材料特性和受力状态、测量环境的干扰和信号处理的方法等多种因素相关, 通过后续多因素的实验研究分析有望实现对钢丝缺陷的定量判断。

$$y=Ax^2+Bx+C \quad (3)$$

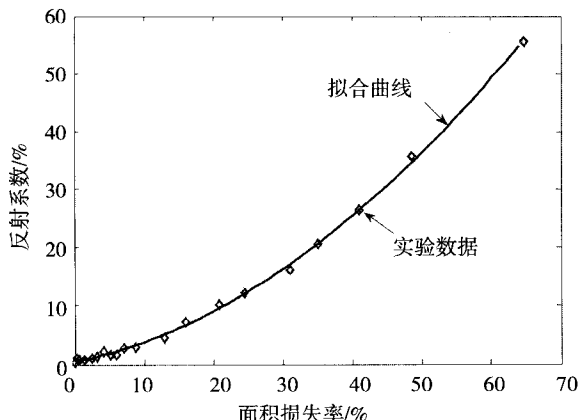


图6 滤波后110kHz反射系数与面积损失率关系拟合曲线和实验数据

超过6.2MPa的情况下, 锚索波纹管组装件不会发生整体拔出破坏。

### 参考文献

- [1] 环氧涂层钢绞线使用指南, 《国外桥梁》1997.第2期
- [2] 高大水. 三峡永久船闸高边坡预应力锚固技术的研究与应用. 水力发电学报水力发电学.2009.第6期
- [3] 沈小东. 环氧涂层钢绞线的粘结锚固性能试验研究. 第五届全国预应力结构理论与工程应用学术会议论文集, 2008
- [4] 刘宁、高大水等. 《岩土预应力锚固技术应用及研究》. 湖北科学技术出版社, 2002
- [5] GB/T 25823《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》

## 3 总结

近年来兴起的磁致伸缩导波无损检测技术在缆索损伤和腐蚀检测技术由于其各项优势将逐渐成为应用广泛的缆索新型无损检测方法。本文在钢丝损伤的定性判断基础上, 通过人工缺口的方法对钢丝缺陷的回波信号的反射规律进行了深入的实验研究和分析; 实验得到缺陷回波反射系数与钢丝缺陷截面损失率的关系, 使用二次抛物线对实验结果进行拟合发现其与二次抛物线有着很好的拟合关系, 这对钢丝及钢丝拉索的损伤和腐蚀磁致伸缩导波无损检测的定量评价起到了积极的推动作用。

实验中发现没有缺陷的钢丝也存在小幅值的本底信号, 以及在缺陷截面面积损失率 < 10% 时, 缺陷回波受各因素影响增加, 给缺陷的量化带来一定的难度。另外反射系数二次抛物线系数的确定仍然需要考虑多种因素的影响。为后续钢丝及钢丝拉索的损伤和腐蚀磁致伸缩导波无损检测的定量评价提出了明确的方向。

### 参考文献

- [1] 李平杰. 多支承索杆振动参数识别研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [2] 吴振, 龙跃, 章陈瀑. 持荷状态下钢绞线腐蚀及性能退化研究[J]. 广西科技大学学报, 2011, 22(1):23-26.
- [3] 邹易清, 武新军, 徐江等. 磁致伸缩导波技术在桥梁缆索腐蚀检测的研究进展[J]. 预应力技术, 2015(4):9-15.
- [4] 徐江. 磁致伸缩导波无损检测理论及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [5] 陈卫东. 杆状构件导波检测的有限元模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [6] 熊红芬. 钢绞线缺陷超声导波检测信号特性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.