

# 对我国岩土预应力锚索防腐措施和标准的探讨

杨启贵<sup>1</sup> 高大水<sup>1</sup> 吴海斌<sup>2</sup>

(1 长江勘测规划设计研究院·湖北武汉 430010 2 中国三峡工程开发总公司 湖北宜昌 443002)

**摘要:**岩土预应力锚索的防腐至关重要,一旦发生应力腐蚀将有可能产生致命破坏。我国很多工程对施加锚固力较为重视,对锚索的腐蚀破坏与防腐缺乏认识。本文论述了岩土预应力锚索的腐蚀机理和特点,比较了国内外岩土锚固规范防腐要求的差别,在此基础上,提出了适用我国锚固工程特点的岩土预应力锚索防腐建议。

**关键词:**岩土 预应力锚索 腐蚀破坏 防腐 建议

## 前言

岩土预应力锚固技术产生于20世纪初,最早用于矿山的开采,30年代阿尔及利亚的阿尔舍坝首次采用预应力锚索加固大坝取得成功<sup>[1]</sup>。我国岩土预应力锚固技术起步较晚,应用最早的是安徽梅山水库大坝基础处理加固(1964年)。近20年来,岩土锚固技术在我国发展迅猛,已广泛应用于水工大坝加固、边坡及滑坡支挡、大型地下洞室支护及深基坑支护等诸多领域<sup>[1]</sup>。三峡船闸高边坡工程使用了4200余根1000~3000kN预应力锚索和近10万根400kN的高强结构锚杆进行支护,已成为当代最大的岩土锚固工程。由于锚索在船闸边坡加固中的重要作用,其耐久性引起有关方面的高度关注,为此,长江水利委员会开展了“岩土预应力锚固技术应用及研究”和“国内预应力锚索耐久性调研”等专题的研究工作<sup>[1-2]</sup>。

高拉应力作用下预应力筋的腐蚀破坏,不同于普通受力状态钢材。普通受力状态钢材的腐蚀破坏是随着钢材表面腐蚀的加深,钢材截面积减小,最终钢材达到极限受力状态而破坏,其过程相对较慢。而高拉应力作用的预应力筋,一旦发生钢材腐蚀,钢材表面的腐蚀坑导致钢材表面产生微裂纹,随着腐蚀的发展,裂纹继续扩展,使钢材在远低于极限强度的情况下产生脆性断裂破坏,即发生应力腐蚀。这一过程可能在很短的时

间里产生,且无任何征兆,破坏的后果更为严重。因此,预应力筋的防腐更为重要<sup>[1-2]</sup>。

我国岩土预应力锚索的防腐技术,与发达国家相比较存在较大差距。发达国家对岩土预应力锚索防腐开展了大量研究工作,提出了较为细致的防腐措施和相当完备的技术规范。其防腐已经历了单一水泥(砂)浆防腐、加单层波纹套管防腐、加双层波纹套管防腐等发展历程。对重要锚索,要求从内锚段到锚头的全长各个部位均要达到双重防腐,并且要求锚索安装好后检测其绝缘电阻值,以确定其防腐性能的可靠性<sup>[3]</sup>。

我国岩土锚固工程,多数对施加锚固力较为重视,对锚索的腐蚀破坏与防腐缺乏认识,致使许多锚固工程防腐措施存在不足。笔者在调查某大型水电站的锚索工作状态时发现,法国公司施工的左坝肩上部边坡锚索的混凝土外锚墩尺寸和形状规矩,表面光滑美观;而导流洞出口边坡国内单位施工的锚索,其混凝土外锚墩表面十分粗糙,保护锚头的仅有一层较薄,容易发生龟裂的小圆帽形混凝土保护层,甚至监测锚索的锚头及测力计根本未作保护。调查中还发现,我国对岩土锚索的防腐研究开展工作甚少,仅发现最早应用锚索的安徽梅山水电站和20世纪70年代的湖南双牌水库的锚索在防腐方面有系统的研究成果。如文献[14]的石灰水防腐和水泥浆防腐,均来自上述两个工程的研究成果<sup>[4-5]</sup>。交通、铁路、矿山和建筑等行业未见到有这方面研究成果的文献

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖三等奖(原载《岩土工程学报》2007年NO.10)

[2]。从今天国外先进的锚索防腐技术来看,仅用石灰水或水泥浆做岩土锚索的防腐材料存在明显缺陷,石灰水很难保证全锚索孔长期充满并起到可靠的防腐作用;而水泥浆体属脆性材料,很难保证其在锚固体发生变形时不开裂。

本文在总结国内外锚索防腐研究成果的基础上,提出了适用我国岩土锚固技术发展水平和特点的岩土锚索防腐建议,供有关行业岩土锚固工程的设计与施工参考,以促进我国岩土锚固技术的发展。

### 1 锚索腐蚀机理及特点

岩土锚索主要由钢材制成的预应力筋承受锚固力。自然界中钢材产生腐蚀的现象随处可见,钢材的腐蚀是一种与周围介质产生氧化还原反应的过程,在阳极区,铁释放电子,以水化离子的形式溶解于水中,其中自由电子沿钢材流向阴极区;在阴极区,溶解于水中的氧得到电子后与水作用生成氢氧根离子,氢氧根离子再与阳极释放出来的亚铁离子结合为氢氧化亚铁,又进而被氧化为氢氧化铁(即铁锈)。只要有水和氧与钢材接触,钢材就有可能产生腐蚀<sup>[6]</sup>。

国际后张预应力协会(FIP)的35例预应力锚索腐蚀破坏实例的分析及我国近30a预应力锚索应用情况的调查显示,预应力筋(钢材)在高拉应力作用下,会出现应力腐蚀,可能在很短的时间里产生破坏,且无任何征兆,即破坏的后果更为严重。如:法国米克斯坝,有几根13000kN承载力的锚索仅使用了几个月就发生断裂。美国的一个由单排预应力锚索加固的挡土墙(Feld和White 1974年提供),在2a左右的时间内,先后有数根锚索断裂并像标枪一样越过工地飞走了。瑞士一座由锚索加固的管线桥台在锚固5a后倒塌。阿尔及利亚有一座大坝加固锚索,单束工作荷载1000kN,有4束锚索工作31a后在锚头下破坏。我国梅山水电站的无黏结监测锚索在运行4~6a,先后有3束锚索因应力腐蚀兼氢脆而导致钢丝断裂<sup>[5,7]</sup>。

岩土预应力锚索周围介质多为岩体和土体,环境条件比较复杂,防腐措施更为复杂。岩土锚索一般采用水泥(砂)浆或水泥(砂)浆加隔离

套管及树脂类材料进行防腐<sup>[8-16]</sup>。但我国多数岩土锚固工程采用全长水泥(砂)浆防腐的全黏结锚索,即使有少数工程采用带隔套管的无黏结锚索,其内锚段和锚头部分也采用水泥(砂)浆防腐。水泥(砂)浆防腐的锚索,其水泥(砂)浆形成的碱性环境使锚索预应力筋表面形成钝化膜,钝化膜使预应力筋得到较好防腐保护<sup>[6]</sup>。

如遇以下情况,锚索水泥(砂)浆的防腐作用可能会遭受破坏,并导致腐蚀破坏发生<sup>[8]</sup>:①强腐蚀性地层中,水泥(砂)浆的碱性环境被破坏,水泥(砂)浆对钢材的保护作用丧失;②在锚索张拉过程中,内锚段水泥(砂)浆体产生裂缝;或者锚索工作期间,由于锚固体产生变形引起保护锚索的水泥(砂)浆开裂,当裂缝张开达一定宽度,水泥(砂)浆的保护作用丧失;③锚索防腐措施不当,防腐物质中包含的腐蚀性离子超量,锚索产生腐蚀破坏;④地层存在杂散电流,引起锚索发生腐蚀破坏;⑤防腐的水泥(砂)浆发生碳化,引起锚索发生腐蚀破坏。

国际后张预应力协会的地锚工作小组收集到了35例预应力锚索(杆)腐蚀破坏实例,并对其破坏的原因进行了统计分析,见表1<sup>[1]</sup>。分析显示:

(1)就地锚的使用年限而言,有9例破坏发生在6个月内,10例发生在6个月至2a之间,其余18例发生在2a至31a之间。锚索短期破坏是由于应力腐蚀或氢脆作用所致。其原因是锚索处在腐蚀性较强的环境中,锚索没有防护层或防护不当。

(2)内锚段问题:两例内锚段腐蚀破坏都是由于内锚段灌浆不足所致,其中一例是3m长的钢绞线受含硫酸盐和氯化物的地下水侵蚀,实例中3束锚固桥墩的岩土锚索,工作3a后发生破坏,致使瑞士一座管线桥墩倒塌。其破坏原因是:内锚段位于透水性较大的土层和岩层中,填土和砾石层的地下水含有硫酸盐和氯化物等腐蚀物质,施工缺少压水检查和劣质施工导致内锚段灌浆不足,在仅有部分灌浆的内锚段前端锚索发生严重腐蚀破坏。

(3)自由段问题:所记录到的自由段破坏多种多样,有单一型破坏,也有复合型破坏。破坏原因大致可分为以下几种:①地层变形造成拉

筋超应力,使其产生裂纹;②在有氯化物(工业废物或有机物)的情况下,水泥浆包裹不足或无水泥浆包裹;如阿尔及利亚有一座大坝加固锚索,单束工作荷载1000kN,有4束锚索工作31a后在锚头下破坏,后经检查发现:大坝洪水的重复荷载作用使锚头下保护的油布撕破,其内部保护锚筋的沥青覆盖层在外部高温条件下融化流失,造成局部腐蚀所致;③由于耐久性差导致沥青包裹破坏;④保护材料选择不当,如化学灌浆材料中含有硝酸根离子和吸湿玛碲脂;⑤预应力筋在无保护情况下存放了很长时间。

(4) 锚头问题:锚头或锚头附近的破坏原因也是各种各样的,既有缺乏防腐保护,又有工作期间防护剂充填不完全或塌落;在香港的一例中,从张拉到锚头防护时间耽搁了1到8个月,测到钢绞线直径损失达2.7%,当时间耽搁达16到36个月时,测到的直径最大损失为12%。

表1 35例地锚腐蚀破坏实例统计分析

	统计分类	件数
锚索(杆) 类型	永久锚索(杆)	24
	临时锚索(杆)	11
拉筋 品种	预应力钢丝	19
	预应力钢筋	9
	预应力钢绞线	7
锚索(杆) 工作时间*	6个月以内	9
	6个月~2a	10
	2~31a	18
破坏部位**	锚头附近(锚头下1m以内)	19
	自由段	21
	内锚段	2

注:\*时间有重叠;\*\*锚头下1m也为自由段,有7例与自由段重复

## 2 有关岩土锚索防腐的中国规范

### 2.1 水工预应力锚固设计规范(SL212-98)<sup>[14]</sup>

该规范为国家水利部发布的行业标准,其防腐要求主要有:①预应力锚固中的锚索(杆)体,可按表2的标准进行防腐、防锈处理;②锚索(杆)体防腐、防锈处理时,所使用的材料及其附剂中不得含有硝酸盐、亚硝酸盐、硫氰酸盐等,氯离子含量不得超过重量的0.02%;③张拉段也必须采用水泥浆或水泥砂浆进行全孔封闭防腐;封孔灌浆后,锚索应有大于20mm的浆体保护层厚度。

表2 预应力锚索(杆)的防腐、防锈标准

工作环境	预应力锚索(杆)的工作时间	
	临时	永久
无侵蚀性	按A级进行防护	张拉后15d内,按C级进行耐久性防护
中等侵蚀性	张拉前按A级或B级防护	张拉前按A级或B级防护。张拉后按C级进行耐久性防护
强侵蚀性	张拉前按B级进行防护。张拉后按C级进行耐久性防护	张拉前按B级进行防护。张拉后按C级进行耐久性防护

注:A级防护材料,如石灰水、防腐油;B级防护材料,塑态防护,如凝胶、树脂或防锈油脂;C级防护材料,刚性防护,如水泥浆或水泥砂浆。

该规范主要针对水工大坝的锚固,兼顾地下洞室和边坡的锚固。其主要依据是我国早期梅山和双牌等大坝锚固工程经验和研究成果。我国各时期的大型岩土锚固工程也都出现在水利工程领域,因此,我国的岩土锚固技术也都以水工锚固为主流。该规范主要优点是,与国内锚固技术相一致;缺点是,仅对采用单一水泥浆防腐的全长黏结锚索作了要求,与发达国家的岩土锚固规范存在较大差别。

### 2.2 土层锚杆设计与施工规范(CECS 22:90)<sup>[15]</sup>

该规范由中国工程建设标准化协会批准,属协会标准,其防腐要求主要有:

(1) 塑料套管材料应具有足够的强度,保证其在加工和安装过程中不致损坏,具有抗水性和化学稳定性,且与水泥砂浆和防腐剂接触无不良反应。

(2) 隔离架应由钢、塑料或其他对杆体无害的材料组成,不得使用木质隔离架。

(3) 防腐材料应满足:在锚杆服务年限内,应保持其稳定性;在规定的工作温度内或张拉过程中不得开裂、变脆或成为流体;不得与相邻材料发生反应,应保持其化学稳定性和防水性;不得对锚杆自由段的变形产生任何限制。

(4) 水泥浆体材料应满足:水泥宜使用普通硅酸盐水泥,必要时可采用抗硫酸盐水泥;不得使用高铝水泥;细骨料应选用粒径小于2mm的中细砂,砂的含泥量按重量计不得大于3%,砂中所含云母、有机质、硫化物及硫酸盐等有害物质的含量,按重量计不宜大于1%。

(5) 混合水中不应含有影响水泥正常凝结与硬化的有害物质,不得使用污水,永久性锚杆不得使用pH值小于4.0的酸性水和硫酸盐含量按SO<sub>4</sub>计算不超过水重1%的水。

(6) 水泥浆中氯化物的总含量不得超过水泥重量的0.1%,一般不宜采用膨胀剂。

该规范要求对腐蚀环境进行充分的调查,防腐方法必须适应使用的目的,对锚头、自由段和内锚段应分别对待,规定永久性锚杆必须进行双层防腐,当腐蚀环境特别严重时,临时锚杆也应采用双重防腐。该规范编制时间虽然早于文献[14],但它是岩土锚固的专业规范,主要参照当时美国PTI地锚建议编制,规范中包涵了一些国外的锚固技术,如加塑料波纹管等双层防腐技术。由于许多要求只作了原则规定,实际应用也有一定难度,因属协会标准,对各行业指导作用不强。

### 2.3 锚杆喷射混凝土支护技术规范(GB50086-2001)<sup>[16]</sup>

该规范为国家标准,其防腐要求主要有:

(1) 预应力锚杆的内锚段灌浆体宜选用水泥浆或水泥砂浆,其抗压强度不宜低于30MPa。压力分散型锚杆内锚段灌浆体抗压强度不宜低于40MPa。

(2) 内锚段预应力筋每隔1.5~2.0m应设置隔离架。永久性的拉力型或拉力分散型锚杆内锚段的预应力筋宜外套波纹管,预应力筋的保护层厚度不应小于20mm。临时性锚杆预应力筋的保护层厚度不应小于10mm。

(3) 自由段预应力筋宜采用带塑料套管的双重防腐,套管与孔壁间应灌满水泥砂浆或水泥浆。

(4) 预应力锚杆体内的绑扎材料不宜采用镀锌材料。

(5) 灌浆材料可采用水灰比0.45~0.50的纯水泥浆,也可采用灰砂比为1:1,水灰比为0.45~0.50的水泥砂浆。

(6) 当自由段采用带套管的预应力筋时,宜在内锚段和自由段采取同步灌浆。

(7) 当自由段采用无套管的预应力筋时,应进行两次灌浆。第一次灌浆时,必须保证内锚段灌满,但浆液不得流入自由段。预应力筋张拉

锚固后,应对自由段进行第二次灌浆。

(8) 永久性预应力锚杆应采用封孔灌浆,应用浆体灌满自由段顶部的空隙。

该规范是国内与岩土锚固有关的最新规范,但它不是专业的岩土预应力锚固规范,许多要求只作了原则规定,实际应用也有一定难度。另外,该规范未考虑对地层腐蚀性进行检测,根据地层腐蚀性的差别,采用不同的防腐措施。

### 3 有关岩土锚索防腐的国外规范

发达国家的岩土锚固规范,对岩土锚索防腐规定十分完备<sup>[3]</sup>,其主要特点归纳如下:①首先应对地层的侵蚀性进行检测,并确定其侵蚀级别;②根据地层的侵蚀性确定锚索的防腐级别和方法,如防护灌浆材料和锚筋材料的要求等;③要求锚索在各种复杂环境下不发生腐蚀破坏,而且锚索的防护体在施工过程中不能被损坏,同时还要求锚索的锚固体在受力与变形过程中其防护体不能被损坏。其制作工艺和防护结构十分精细和完备。

如:美国PTI建议地锚分为1级和2级,其中1级使用波纹管及环氧树脂等材料保护。且建议,尤其是水坝工程,应使用树脂包裹钢绞线及灌树脂浆。

国际后张预应力协会(FIP)规范规定,永久性地锚应采用单层波纹管灌树脂浆或双层波纹管灌水泥浆保护。

英国地锚规范(BS8081:1989)规定,永久锚索(杆)必须进行防护;对侵蚀性渗透土层,应采用双层防护。单层防护意味着在锚索(杆)安装前提供一层物质性防护层。双层防护则是提供2层防护,其中外层的作用是防止预应力锚索(杆)内防护层在运输和安装时发生损坏。对已安装的预应力锚索防护程度来说,则外防护层仅提供附加保护。对于低渗透性和无侵蚀性岩体( $k_w < 10^{-8}$  cm/s)可采用单层防护。

荷兰、南非等规范均规定使用树脂浆防腐。英国BSI规范、德国DSI工法、日本SEEE工法等规范规定使用单一PE波纹管灌树脂浆。树脂浆的种类大体分为3类:

(1) 不饱和聚酯树脂,可加水泥、炉石粉、细砂、石粉。

(2) 环氧树脂。

(3) 多元聚乙烯树脂, 可加水泥、炉石粉、细砂、石粉。

钢绞线安装灌浆后, FIP、欧盟中19个国家均采用欧洲标准EN1537:1999规范, 要求所有工作锚索施工前后均采用数字电阻计进行绝缘电阻检测, 测定已安装好的锚索防腐性能, 以确保其防腐功能。

#### 4 建议

根据岩土预应力锚索(杆)的腐蚀机理和发达国家先进的岩土锚固经验, 结合我国的岩土锚固施工水平和特点, 对我国岩土预应力锚索(杆)的防腐提出如下建议:

(1) 制订专门的岩土预应力锚固技术国家标准, 对岩土预应力锚索(杆)的设计与施工进行系统指导。

(2) 对于每个锚固工程, 首先对其地层的侵蚀性进行检测, 确定其侵蚀性级别。地层对锚索的侵蚀性可通过环境介质的氧化还原势正常氧电极、地下水的导电率、地层电流密度、地下水的pH值、地层及地下水中腐蚀性离子的含量等指标将其分为很强、强、中等和弱4个等级, 其具体方法详见文献[3, 17]。

(3) 锚索(杆)的防腐级别应根据其重要性和地层对锚索(杆)的侵蚀性等级确定, 并由防腐级别确定其防护方法。如: 无防护、临时单层防护、临时双层防护、永久单层防护及永久双层防护等。防腐级别越高, 其防护使用的水泥浆水灰比越小, 防腐级别较高的锚索(杆), 采用高抗硫酸盐水泥更为有效, 详见文献[3, 17]。

(4) 锚索安装前, 宜对锚索孔内锚段的渗透性进行压水试验检测, 当0.1MPa压力压水10min漏量超过5L/min时, 应对内锚段进行预灌浆处理, 并在扫孔及检查合格后方可安装锚索。

(5) 永久性全长黏结锚索宜全长加塑料波纹管保护, 以防锚固体变形和内锚段张拉裂缝带来的不利影响。对重要的永久锚索, 宜采用无黏结结构, 全长黏结锚索不能适应锚固体的变形, 存在许多难以弄清的安全隐患。

(6) 锚索配件, 如隔离架、居中器、锚垫

板、锚头防腐罩等, 宜采用专业工厂生产的定型产品。

(7) 工作在下列地层环境中的锚索, 应特别注意其防腐问题: ①出露于海水、含有氯化物和硫酸盐环境中的锚索; ②氧含量低而硫含量高的饱和黏土; ③含有氯化物蒸发盐的环境中; ④在有腐蚀性废水或受腐蚀性气体污染的化工厂附近; ⑤穿过地下水起伏变化区的锚索; ⑥穿过部分饱和土的锚索; ⑦穿过化学组成特征不同, 水或气体含量差异较大地层中的锚索; ⑧锚索应力受到循环波动的环境。

#### 参考文献

- [1] 刘宁, 高大水, 戴润泉, 等. 岩土预应力锚固技术应用及研究[M]. 武汉: 湖北省科学技术出版社, 2002. (LIU Ning, GAO Da-shui, DAI Run-quan, et al. Application and research of prestressed anchoring technology in rock and earth engineering[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 高大水, 徐年丰, 万艳山. 国内预应力锚索耐久性调研[R]. 三峡工程施工科研专题报告, 2003. (GAO Da-shui, XU Nian-feng, WAN Yan-shan. Investigation on durability of domestic prestressed anchorage cable[R]. Special Report of Construction Scientific Research in Three Gorges Project, 2003. (in Chinese))
- [3] 高大水, 徐年丰, 万艳山. 国外岩土预应力锚固规范汇编[R]. 三峡工程施工科研专题附件, 2003. (GAO Da-shui, XU Nian-feng, WAN Yan-shan. Norm compilation of geotechnical prestressed anchor abroad[R]. Special Supplement of Construction Scientific Research in Three Gorges Project, 2003. (in Chinese))
- [4] 余知生. 水工预锚中高强钢丝的腐蚀与防护[J]. 岩土锚固工程, 1989(3): 13-20. (YU Zhi-sheng. Erosion and prevention of high-strength steel wire with prestressed anchor in hydraulic engineering[J]. Geotechnical Anchor Engineering, 1989(3): 13-20. (in Chinese))
- [5] 安徽水利局勘测设计院. 预应力钢丝断裂与防护[R]. 合肥: 安徽水利局勘测设计院, 1976. (Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy. Rupture and prevention of prestressed steel wire[R]. Hefei: Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy, 1976. (in Chinese))
- [6] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998. (HONG Ding-hai. Erosion and protection of reinforcement in concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [7] 高大水, 吴海斌, 王莉. 三峡船闸高边坡预应力锚索耐久性研究[J]. 岩土力学, 2005(增): 126-130. (GAO Da-shui, WU Hai-bin, WANG Li. Durability research on prestressed anchorage cables of high side slope in Three Gorges Shiplock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(5): 126-130. (in Chinese))
- [8] 庄军生. 国外预应力混凝土工程实践指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998. (ZHUANG Jun-sheng. Guide to engineering practice of abroad prestressed concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [9] JUNGWIRTH D. Corrosion protection systems for high-strength

(下转第27页)

结的油脂擦干净。并把防漏杯拧到接头管上,如图10,完成该束施工。

注意事项:为保证管道内油脂的密实性,对同一管道灌油连续灌注,灌油时缓慢均匀地进行,中途不间断,以使管道内排气通顺,无气泡残留。

### 2.3.5 观测

长期观测锚束是否有漏油现象及油脂的热胀冷缩情况。



图9 前锚保护罩装观测管

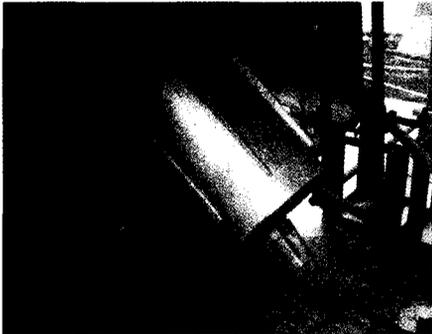


图10 后锚保护罩装防漏杯

## 3 试验结果与分析

(1) 通过水密封测试表明,所有的焊接管件,包括转向器与直管,必须严格按工艺进行焊

接,按设定的检验要求(如水压力试验)进行逐根检验,保证每件焊管不渗漏。对于在施工现场的焊接,如直管的接长焊接,必须确保所有焊缝光滑、平整、连续,不允许有气孔、夹渣、裂纹等缺陷。建议在焊接后在每条焊缝处涂刷环氧树脂作进一步密封。

(2) 通过穿束试验表明,采用支承架、钝头导向帽的方法能实现钢绞线不打绞。

(3) 通过换索试验表明,设定的换索工艺能满足单根换索需要。

(4) 通过灌注油脂试验表明,本试验的注油压力约0.4MPa,所使用的灌油设备满足灌注要求。

(5) 通过试验后长期观察发现,油脂的热胀冷缩现象明显:本试验是在夏天进行,当温差约20~30度时,管道内的油脂液面高度变化约10cm。所以在实际工程上,要求成桥后的锚室内安装抽湿设备,保持空气的干燥与温度的相对稳定。

(6) 为保证各接触面密封可靠,要严格按照设定的详细工艺进行安装操作。

(7) 通过本次模拟试验,达到试验目的:验证我们的施工工艺能满足施工要求,同时,从试验过程中总结了很多经验,为实际施工及以后相似的工程提供借鉴。

### 参考文献

- [1] 湖南省交通规划设计院.《矮寨桥特大悬索桥 第三册 锚碇》. 2006年
- [2] tendons in geotechnics[M]//Anchors in Theory and Practice[M]. [s.l.]: A. A. Balkema, 1995.
- [3] ISAO Sekine, MAKOTO Yuasa, TAKAOKA, QUYAGI Atsushi. Corrosion protective property of various covering materials of steels in soil: part 2, evaluation after embedding in soil for 15 years[J]. Nobuhiro Corrosion Engineering, 1997, 46(4): 251-255.
- [4] KINSTLER F L. Corrosion protection of dam prestressing cable[J]. Australian National Committee on Large Dams, 1981, 58(2): 20-25.
- [5] LITTLE JOHN G S. Ground anchorages. corrosion protection performance[C]//Proc Instn Civ Engrs, 1987(82): 645-662.
- [6] 高大水. 三峡船闸高边坡锚固及新型无黏结锚索开发[J]. 水力发电, 2003(1): 36-40. (GAO Da-shui. The anchorage of the high side slope of Three Gorges Ship Lock and the development of new non-bonded anchorage cable[J]. Waterpower, 2003(1): 36-40. (in Chinese))
- [7] SL212—98水工预应力锚固设计规范[S]. (SL212-98 Design code for hydraulic prestressed anchoring[S]. (in Chinese))
- [8] CES22: 90 土层锚杆设计与施工规范[S]. (CES22: 90 Design & construction code for earth anchor[S]. (in Chinese))
- [9] GB50086—2001锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. (GB50086—2001 Technique code for concrete support with anchor spray[S]. (in Chinese))
- [10] 梁炯□. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京:中国电力出版社, 1999. (LIANG Jiong-jun. Technical manual for anchoring and injection[M]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 1999. (in Chinese))

(上接第23页)