

锚索的锈蚀、防护及永久锚索的合理结构

刘玉堂 翟金明 张勇

(总参工程兵科研三所)

随着锚索在岩土工程加固中的普及,近期人们普遍关注的焦点是锚索的永久性问题。锚索的永久性与锚索的结构和锚索材料有关,也与锚索所处环境及人为因素有关。本文试图就锚索可能遭到的破坏因素及防护,提出永久锚索的合理结构,供同行参考。

1. 锚索技术及防护的发展

锚索是一门近20年获得迅速发展的前沿学科,它的发展与完善往往要借助于其它学科的最新研究成果,更依赖于岩土锚固工程实践的丰富。二十世纪七十年代之前,还没有钢绞线,锚索体几乎全是用高强钢丝,锚具是与之相应的弗氏锚、XM锚、墩头锚等,与钢绞线相比,相同承载力的锚索所用的受力筋根数多,不仅截长要求严(截长误差要求不大于1‰)、组装、运送繁琐,而且受力的均匀性及其防护也不如钢绞线。工程常用的钢绞线直径为 $\phi 12.0 \sim \phi 15.24$,近来又出现了 $\phi 19.3$ 、 $\phi 21.8$ 、 $\phi 25.4$ 及 $\phi 28.6$ 等大直径钢绞线,已在土木工程中应用,1000kN锚索用一根钢绞线即可,不久可望在锚索工程中应用,锚索的施工工艺、受力均匀性及防护将会更加简化。

最初,锚索的锚固和防护都是依赖于水泥浆或水泥砂浆,于1975年研制成功的锚索是先对锚固段注浆,张拉后再对张拉段注浆,称为“二次灌浆预应力锚索”,即现在统称的全长粘结锚索。在预应力钢筋砼中,受力筋有粘结型和非粘结型,与之相对应也称为粘结型锚索(全长粘结型锚索)和非粘结型锚索。虽然水泥浆防护比较原始,还不能认为不可靠,甚至有人提出粘结型锚索只能用于服务年限不大于两年的临时性工程,既没有理论根据,也得不到实践的证实。我

国最早的锚索是1964年用于梅山水库坝基的加固,1973年以后,机械锚固和注浆锚固都有了定型化的工艺,才得以在军工、市政、水电、煤炭等工程领域中得到推广,到目前为止,已服务30~40年的几十个工程并未出现粘结型锚索破坏的事例。梅山水库锚索技术的负责人、我国锚索界的鼻祖、安徽水电设计院的王冲教授提到,在梅山水库坝基加固中安装了三根非粘结型锚索,专门用之与粘结型锚索的比较,全长粘结型锚索至今仍安全服役,而非粘结型锚索已经破坏。因此,没有理由否认全长粘结型锚索的永久性。“水泥浆防护靠不住”一说,在土建中的钢筋砼或预应力钢筋砼工程中可找到依据。美国俄亥俄河上有座“银桥”是钢筋砼结构,建成后使用40年于1967年12月15日因钢筋严重锈蚀桥面突然断裂^[5],造成46人丧生。1年后找到了原因,这还不是一座“豆腐渣”工程,罪魁祸首是附近工厂里的一座烟囱,它常年冒出的废烟中含有大量的 SO_2 和 CO_2 ,遇到雨水后变成酸,落到砼桥面上,中和了砼中的碱性成份,引起砼的碳化,破坏了钢筋的钝化膜而锈蚀。我国也有相似的砼碳化的例子,西安冶金机械厂两个热处理车间、兰州一个工厂的电镀锌车间^[7],都是由于工作中常年放出的 CO_2 不断渗入砼,与砼中的碱性物质起化学反应降低了砼的碱度,使吊车梁及屋架中的钢筋失去钝化膜,产生锈蚀。钢铁锈蚀后的体积可增大2.0~2.5倍,足以将钢筋的保护层胀裂,使钢筋直接与有害气体接触,加快了锈蚀速度。所以有人提出受力筋的隔离防护是有道理的。

隔离防护是把受力筋先涂上一层专门的防锈脂(非黄油),外套一层厚约0.5mm的PE管,受力筋完全与外界隔绝。锚索注浆后钢绞线不与注

浆接触,当然不会粘结,因此称无粘结筋。防锈脂可以防锈,在设计上并不考虑它的防锈作用,主要靠它在钢绞线与PE管间提供良好的滑动条件,摩擦系数大约为0.04~0.06。无粘结受力筋很快在预应力砼工程中推广应用还有一个理由:在预应力钢筋砼中若是有粘结筋,要按受力筋的位置预先在构件中埋设波纹管—配筋—配模—浇砼—穿预应力筋—张拉—向波纹管注浆,不仅工序多,而且注浆的饱满程度和泌水收缩都将影响预应力筋的永久性,采用非粘结筋就可省去很多工序。因此近来非粘结预应力钢筋砼在桥梁等建筑物中得到了广泛应用,小浪底水利枢纽的排沙洞还成功地把无粘结钢绞线用于环锚工程。

非粘结预应力筋用于锚索开始于上世纪80年代,当时立题研究的目的是有两个,一是用于观测锚索,因为把测力计安放在全长粘结型锚索上不会观测到锚索拉力的变化;二是用于需要调整锚索预应力的工程,例如高边坡工程是分台阶开挖和锚固的,由于应力解除效应,开挖下台阶时上部边坡将产生位移,已安装的锚索拉力将增大,增大到一定限度就要调整锚索拉力,天生桥二级水电站厂房边坡就曾进行过锚索预应力的调整。李家峡左岸边坡的锚索初期是全长粘结型的,由于不能调整锚索拉力,曾出现过锚索拉断现象。如果围岩位移不大,如洞室的收敛,也可不进行预应力的调整,因为非粘结型锚索是张拉段全长调节应力,可以允许较大的变形。例如,黄河小浪底水利枢纽厂房锚索是非粘结型锚索,而地下厂房最大跨度达26.2m,高58m,预计收敛值较大,但是,厂房投入使用后又不可能去调整预应力,黄委会设计院采用了一个巧妙的处理方法:锚索安装拉力为设计值2000kN,厂房竣工前把拉力调低,为洞室收敛留下自调空间。由于非粘结锚索的张拉段可自由伸缩,锚索拉力可自由调整,非粘结型锚索也称为自由锚索。

前边已提到,自由锚索是隔离防护,20世纪90年代后期,随着土建工程非粘结预应力钢筋砼

的产生与发展,不少工厂开始生产无粘结型钢绞线,不再用人工涂油和套塑料管,大大提高了自由锚索的质量。但是隔离防护的最大隐患是一旦隔离层破损,哪怕是局部的,后果是灾难性的。锚索与土建工程不同,向钻孔内送索时看不到孔内情况,磨破了也得不到及时修补,于是出现了与土木建筑中非粘结预应力钢筋砼不同的双层防护,即双保险,磨破一层还有一层。有些锚索规范明确规定,对于非粘结型锚索,只有双层防护才能作为永久锚索使用。值得注意的有两点,第一,所谓双层防护是指锚索全长,包括锚固段和张拉段都必须是双层隔离防护;第二,在隔离防护中无论是水泥砂浆或者是水泥净浆以及防锈脂涂层均不能列入防护层的范畴,后面还要阐述。有些文章^[3]把图1a的防护层定为3层(防锈脂、PE管和注浆)或2层(PE管和注浆),把图1b的防护层认为是5层(防锈脂、PE管、注浆、波纹管、注浆)或4层(不计防锈脂的其余4层),都是不适当的。在隔离防护概念中,图1a是单层(PE)防护,图1b才是双层(PE、波纹管)防护。

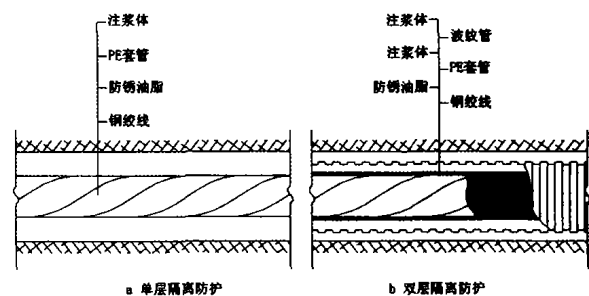


图1 隔离防护的保护层

2. 锚索的腐蚀与防护

金属的腐蚀造成的损失和后果非常严重,上海市在80年代对20个化工企业的统计^[11],一年的损失达1亿2千万元,损失钢材75000t,有色金属13000t,木材11000m³,还不包括停工停产、人员伤亡、环保等间接损失,因种种腐蚀造成的反应塔和锅炉爆炸、有害物质跑冒滴漏给人的健康和环境的污染造成的危害,更难以用数字统计。锚索锈蚀破坏的后果更加严重,它直接关系到用其

加固的整个结构物的安全。瑞士有一座用锚索加固的管线桥台，因锚索锈蚀破坏而倒塌。“锚固与注浆技术手册”中还引用了一个有趣的例子，美国有个用单排锚索加固的挡土墙，工作两年后有数根锚索断裂，锚头像标枪一样飞越了工地。巴基斯坦的塔贝拉水电站消能池的锚索也出现过类似的破坏。随着锚索在我国岩土工程界的普及，锚索的腐蚀与防护已成为岩土工程师关注的焦点。

2.1 锚索的锈蚀

锈蚀就是通常说的生锈或氧化，仅发生在钢铁的表面，属于电化学腐蚀的一种。从锈蚀的观点出发，海洋环境分为4个区：大气区、飞溅区、全浸区和泥下区，对于裸露的金属，锈蚀最严重的发生在飞溅区，因为该区氧气扩散的路径最短，泥下区因缺氧锈蚀的最慢。不加保护的钢绞线在潮湿的坑道里放一昼夜便产生明显的锈斑，放3昼夜便可产生连续的锈层。正由于氧的普遍存在又是良好的还原剂，不少研究腐蚀的专著都把金属的氧化单列。

铁是多价元素，依氧化条件的不同可生成三种氧化物： FeO （魏氏体）、 Fe_3O_4 （磁铁矿）和 Fe_2O_3 （赤铁矿）。氧化铁和其它氧化物一样，导电率都比金属低，因此，如果氧化铁是均匀而连续的，氧化铁对钢铁还是有一定保护作用的。然而，一般情况钢铁表面的氧化速度是不均匀的，氧化铁中存在自应力，有压应力，也有拉应力，压应力过大时可使氧化铁与母材剥离而鼓起，拉应力过大又会使氧化铁断裂，裸露的钢铁将继续氧化。铁变成氧化铁后，体积增加2.0~2.5倍。

铁在大气中的氧化速度取决于大气的湿度和成份。在大气中钢铁表面常覆盖一层很薄的湿气，当相对湿度为60%时，可形成一个分子厚度的水膜，当相对湿度为90%时，水膜的厚度可达到2个分子厚^[2]，如果钢铁表面有灰尘等吸湿性物质，水膜还将更厚，足以成为水溶液状态。氧是溶于水的，于是发生了氧化反应($2\text{Fe}+\text{O}_2=2\text{FeO}$)，

在该反应中，铁失去电子被氧化，氧获得电子被还原。这就是钢铁在潮湿环境中更易于锈蚀的原因。

前面已提到，氧化铁的电导率很低，如果是均匀而连续的对钢铁将起一定的保护作用，研究还指出^[2]，当钢铁在 $\text{PH}>11$ 的碱性环境中铁氧化后将在钢铁表面形成均匀而连续的 Fe_2O_3 薄膜，它的厚度大约是100纳米，结晶形式是 $\text{r-Fe}_2\text{O}_3$ ，属于尖晶石结构，就是我们常说的钝化膜，只要钝化膜不被破坏，钢铁就不会锈蚀。这就是为什么很多钢筋砼中的钢筋几十年后仍保持新鲜的金属光泽而不被锈蚀的道理。其实，只要满足一定条件，很多金属都可以钝化而不锈蚀，比如铝是一种多见的而且比较活泼的金属，但是，生活中常见的纯铝或合金铝用品非常耐用，就是因为钝化膜的保护作用。铝只要暴露在空气中，表面可以立即氧化一层 Al_2O_3 ， Al_2O_3 就是铝的钝化膜，它保护铝不再继续氧化。在铁中加入不少于5%的铝形成的铁铝合金，也可在表面形成连续的 Al_2O_3 钝化膜，但是铁铝合金加工性太差，一般不用。用铝保护钢铁的工业方法是在表面喷涂铝粉，然后加热到850~950℃，使铝扩散到钢铁面层，这种工艺叫做渗铝。铝在碱和稀酸中可以迅速腐蚀，但在浓硝酸中也可以形成钝化膜。所以，浓硝酸可以直接盛放于不加任何防护的铝制容器。

“不锈钢在空气中不会生锈”的说法也不够严格。当钢中加入的铬不小于12%时，不锈钢的表面可以形成 Cr_2O_3 钝化膜，是钝化膜保护了钢材不锈蚀。这种钝化膜与 $\text{r-Fe}_2\text{O}_3$ 钝化膜不同， $\text{r-Fe}_2\text{O}_3$ 钝化膜破坏后钢铁就失去了保护层，仍然会生锈，而 Cr_2O_3 钝化膜有“自愈性”，一旦不锈钢受到机械擦伤，甚至机加工削去了 Cr_2O_3 保护层，不锈钢会立即在表面形成新的钝化膜。

锚索的防锈蚀完全可以利用钝化膜，但是必须满足两个条件，首先锚索所处环境能生成钝化膜。用硅酸盐水泥拌制的砼和浆液 $\text{PH}\geq 12$ ，恰巧满足 $\text{r-Fe}_2\text{O}_3$ 的生成条件；其次是保护钝化膜长期

不被破坏。研究指出^[2]，氯离子和硫酸根离子的存在，将破坏形成的钝化膜，氯离子和硫酸根离子可以浸入钝化膜，造成晶格缺陷，这些缺陷逐步扩大连成一片，使钢失去了钝化膜并形成锈斑。依据条件的不同，一个氯离子或一个硫酸根离子可以引起15~40个锈分子的形成，因此，锚索规范都限定了它们在锚索工程中的含量。破坏 γ -Fe₂O₃钝化膜的另一个因素是酸性地层以及大气中的酸性物质，如CO₂等，它们能中和锚索的碱性环境，逐渐使已形成的钝化膜消失，锚索失去保护就会锈蚀。

把有隔离防护层的锚索注浆也计入保护层数是不对的，只有PH>11的注浆直接与钢绞线接触，锚索才会得到钝化膜的保护，碱度和直接接触两个条件缺一不可都不行。

2.2 锚索的腐蚀

“注浆与锚固技术手册”中引用的锚索破坏的例子，就是锚索腐蚀造成的。该锚索加固的边坡是铁路边坡，火车的动力是烧煤的蒸汽机车，煤烟中的很多成份都对锚索有腐蚀性，CO₂可使砼保护层碳化，SO₂中的硫被氧化成6价时遇到雨水就是硫酸。如果锚索在近海地区，氯离子将构成锚索的最大威胁。金属的腐蚀还多发生在化工厂、冶炼厂等，这些工厂的很多设备或部件都以各种优质不锈钢为原材料，即使如此，由于腐蚀性元素和腐蚀形式的多样化，仍然防不胜防。因此，凡是在化工厂附近及污水污染区的锚索都要精心设计和精心施工。

金属的腐蚀是一种电化学反应。金属元素失去电子变成金属离子（被氧化），它失去的电子被另一种元素俘获（被还原），变成阴离子，金属离子便溶解并游向阴离子，与阴离子结合成为中性化合物；金属元素继续失去电子，变成阳离子而溶解。所以金属的腐蚀过程在电化学上叫做阳极溶解。在腐蚀动力学中有一个重要的结论就是：

(阳极)总的氧化速度 = (阴极)总的还原速度

欲防止金属的腐蚀，不是抑制氧化反应，就是抑制还原反应，于是在电化学中产生了两种金属防护方法：阴极防护和阳极防护。工程中常用的是阴极防护，如结构的基础、地下自来水管、煤气管道、桥墩、码头、船舰等；阳极防护主要用于工厂的设备。

阴极防护的原理很简单，用非专业术语就是给被保护的金属提供多余的电子，于是也有两种阴极防护方法，一种是外加电流（直流）法，利用废旧钢铁接阳极，被保护的金属接阴极，阳极（废钢铁）源源不断地向阴极（被保护的金属）输送电子，最终废钢铁被耗尽，重新更换。也有用惰性阳极的，如铂、不锈钢、碳等，阳极虽然不损耗，但供电不能停。第二种阴极防护方法是利用金属的原电池原理的“牺牲阳极”法，就是用更活泼的金属贴在被保护的金属上。镁作为一种牺牲阳极在全世界广泛使用。通常在镁中还加入6%的铝、3%的锌和0.2%的锰组成合金形式。我国在船舰上常用锌铝镉合金做牺牲阳极，称为三元锌阳极。不管用什么金属做阳极都要考虑以下条件：

(1) 电位要相对负，使产生的保护电流较大，以供应更多的电子；

(2) 阳极极块的表面要均匀溶解，不会结成高电阻硬壳，直到完全腐蚀；

(3) 阳极单位重量的电容要大，电流效率要高；

(4) 价格便宜，货源充足，易于加工。

阳极腐蚀完要及时更换。

锚索处于腐蚀性地层中有两种防护方法，或者采用阴极防护，锚固与注浆手册中给出了保护方法，或者不用全长粘结锚索，采用各种隔离防护锚索。

2.3 电腐蚀

两种不同的金属在水溶液中相接触引起的电化学腐蚀称为原电池腐蚀。这两种金属之间的电位差以一定速度引起金属腐蚀，腐蚀的快慢基本

上取决于两种金属的表面反应。实际上原电池的电位可以作为电池。例如，在单位活度的溶液中的铜和锌，铜离子的标准电位为+0.34伏，锌离子的标准电位为-0.77伏，因此可得到1.1伏的电位差。天然状态下的水溶液不会有单位活度的离子，情况简单得多，只依赖于金属的电化学次序，例如铝和锌相接触，由于铝的电化学次序低于锌，铝对锌是阳极，铝将被腐蚀。锚索施工规范规定组装锚索时不得用镀锌铁丝，就是为了防止不同金属相接触时产生原电池腐蚀。同样的理由，最近有专家进一步提出组装锚索时不要用金属材料，对中支架、隔离支架、捆扎索全部用塑料产品。

还有一种电腐蚀是由于地下杂散电流或电气设备漏电引起的电化学反应，这类电腐蚀比较普遍，如地下电话电缆、电力电缆、煤气管道、自来水管等，这些杂散电流可在金属与金属之间及金属与非金属之间产生电位差，使金属腐蚀。这类腐蚀的最大特点是它的“内部性”。例如有轨电车的轨道就是一个电极，轨道与大地一般绝缘不好，一部分电流泄漏给了大地和轨枕。某地下铁道^[4]，使用5-7年后对轨枕进行检查，表面看没有任何损伤。敲开砵保护层后发现位于紧固件附近的钢筋已全部腐蚀断裂。研究表明，轨枕的砵保护层中总是存在很多细小孔隙，铁的溶解物可以顺利地排出，砵保护层并不开裂，只在轨枕表面留下红色铁锈。在干燥的环境中铁锈不能顺利排出，沉积在钢筋表面。如某电解车间的钢筋砵梁、柱中的钢筋受到电腐蚀后的铁锈附着在钢筋表面，但体积增大2.0~2.5倍，保护层被铁锈胀裂，而不得不进行厂房的大修。

边坡锚索一般远离工业区，只要注意施工作业时不把锚索作地线，组装锚索时不使用与锚索体不同成份的金属做组件，无须作更多的防护；地下厂房及变电室的锚索，有可能受到电腐蚀的威胁，其防护可采用电化学中的阴极防护，也可安装“排流器”，把杂散电流定向排出。最好采

用各种隔离防护型锚索。

2.4 应力腐蚀

长期实践中人们发现机械及其零件的使用应力远小于材料的抗拉强度产生了裂纹甚至断裂，对这种现象解释为应力腐蚀。例如20世纪30年代发现了镁合金、40年代发现了奥氏体不锈钢、50年代发现了钛合金在特定介质中都会产生应力腐蚀而开裂。由于发现了航天设备零件的应力腐蚀开裂，使得美国原定于1973年11月10日~16日发射的“航天试验室3号”不得不延期^[5]。应力腐蚀在化学工业、石油勘探、冶金、炼油以及液化气的生产、储存和运输等领域都曾出现过，这种特殊的环境是各种设备破坏的主要原因，因而在我国是石化系统的重点研究对象。例如，液化石油气罐壁厚都很大，根据容积的大小一般厚度为22-40mm，仅1981-1982年两年开罐检查就发现了26个属于应力腐蚀而报废^[12]，由此可见应力腐蚀的普遍性和严重性。应力腐蚀破坏的发展是微观的，破坏前没有体积变化，也没有变形特征，破坏形式是突然断裂。应力腐蚀现象涉及到力学、电化学、冶金学等众多学科，长期以来人们一直试图了解和控制应力腐蚀开裂的过程，并作出了巨大的努力，然而，直到目前为止，尚未找到彻底解决的办法。能够看到的应力腐蚀的研究报告多是特定金属（主要是各种合金和不锈钢）相对特定介质的应力腐蚀试验，或者是对于具体设备因应力腐蚀破坏的解释，尚缺乏规律性的认识。研究认为，应力腐蚀主要与环境材料的应力有关。任何材料对活性物质都有吸附性，吸附有内吸附和外吸附，外吸附是指材料表面吸附了活性物质，降低了物质的表面能，使表面的分子结构产生位错而降低了强度；内吸附是物质内部的微裂隙吸附了活性物质，并沿晶界面或其它组织缺陷扩散，进入受拉材料裂隙的尖端，使原子键结合力显著削弱，促使材料脆化，裂隙进一步扩展而断裂。已经研究证明的活性物质，如熔化的锡可使锌和碳钢脆化，醇类物质也可使高碳钢

产生断裂。设备和零件受到的拉应力除受到的外力作用之外，机加工如冷轧、铆接、焊接等也会产生残余应力。已经证明，应力腐蚀产生的条件是^[2]：

第一，一般只有在合金中才发现有应力腐蚀开裂。钢材当然属于合金，即使纯金属含有很少的杂质在某些介质中也同样会出现应力腐蚀开裂，它们在一定拉力作用下都会在晶界处引起晶界裂纹；

第二，合金仅在特定的腐蚀介质中才会产生应力腐蚀，例如黄铜在氨中，高强度钢在水中，低碳钢在硝酸盐溶液中，奥氏体不锈钢在氢氧化物溶液中等；

第三，应力腐蚀开裂的主体是拉应力，拉应力可以是外加应力，也可以是机加工的残余应力，去掉应力将防止裂纹的产生，即使已产生的裂纹也会终止扩散。研究指出，存在一个最低应力值，称为“阈值应力”，有的文献上叫做“门槛应力”，只要拉应力小于该值就不会发生应力腐蚀；

第四，应力腐蚀裂纹的扩展是由腐蚀性物质引起的，如果在裂纹的尖端浸入腐蚀性物质，或者电位的变化产生阳极极化，金属失去电子而溶解，裂纹都会不断扩展。也可能在裂纹的尖端吸附阴极释放出的氢原子，引起晶键力的削弱而突然断裂，这一种应力腐蚀称为氢脆或氢脆裂。有的文献这样解释氢脆：氢原子（不是氢分子）的体积很小，在220℃时可以渗入金属晶格。渗入碳钢的氢原子可与碳化铁反应生成甲烷，于是产生了双重破坏作用：一是使钢脱碳，降低了钢的强度；二是甲烷在晶格间形成压力，与原有结构中的拉力叠加使钢材突然断裂，严重时能使钢的抗拉强度降低60%。

对于锚索，虽然锚索体是拉力状态下的合金，其所处环境远没有化工工业那么复杂，因此还没看到过锚索因应力腐蚀而破坏的报道，但是，应当引起重视。第一，如果锚索所处地质环境复

杂，如化工厂附近或污水浸蚀区，应当采用双层隔离防护锚索；第二，拉应力是应力腐蚀开裂的主因之一，虽然存在“阈值应力”，然而目前还不知道钢绞线的、哪怕是不太精确的“阈值应力”，因此，设计锚索时使用应力不要太高总是有好处的，在目前状态下设计使用应力以不超过保证抗拉强度的60%为宜。

3. 永久锚索的设计

永久锚索的设计主要考虑两个问题，第一，经济因素，显然不是万不得已是不会选择各种价格昂贵的不锈蚀合金，那样会大大增加工程成本；第二，选用锚索结构前必须了解地层的性质，地层中的有害物质会不会破坏锚索的防腐措施。

3.1 选择各种不锈蚀材料做锚索体

说到不锈蚀材料，人们首先会想到不锈钢。不锈钢不仅造价高而且强度低，同样承载力的锚索将增大受力筋的横断面，是一种不成功的选择。最近几年出现了一些新材料，如碳纤维加强塑料（CFRP）、芳纶纤维加强塑料（AFRP）等已广泛用于钢筋砼梁、板、柱的加固，不仅不腐蚀、不导电、不导磁，而且自重轻—大约是钢材的1/4，强度高—可达4900MPa，是目前常用钢绞线强度的3倍。2001年某军事工程曾向我咨询锚索问题，该工程要求防磁，所用各种钢材都必须低导磁率的，我曾向他们推荐了这种材料。上海一家工厂已批量生产一种加强玻璃纤维锚杆，外形与精轧螺纹钢相同，全长都有螺纹，截长也任意，还供应同种材料的螺帽、垫板和联结套。南京一家工厂生产一种丙烯酸酯混合树脂锚杆，它们都具有高强度、耐酸碱、抗老化等特点。随着高新技术的不断发展，一定还会研究出一些高强度、耐腐蚀的高分子材料，可供选择的余地很大。显然，这些材料用于锚索时，传统锚具已不适用，必须研制新型锚具。据悉，解决方案已有，外形极似墩头锚，只要工程需要并不难

解决。

有些腐蚀性地层，能把混凝土和普通砂浆腐蚀成粉末，可采用一些特殊砂浆作为锚索和地层的粘结介质，如环氧砂浆、沥青砂浆等。

3.2 隔离防护锚索

在钢材上镀锌、镀铬、渗铝都是传统的隔离防护措施，不过，在锚索工程中很少采用。从上世纪90年代至今，一直沿用在钢绞线上用静电喷涂环氧树脂作防护层。有两种喷涂方法：一种是直接喷在钢绞线上，在钢绞线表面形成一层均匀而连续的环氧覆盖层，但是，在钢丝的内侧和中心钢丝上没有环氧；第二种方法是先把钢绞线打开，对7根钢丝分别喷涂，然后再复原成钢绞线。锚索工程应选用后者。目前，我国用于斜拉桥的钢绞线都是选用后者。由于制作工艺是在密封容器内用静电喷涂，环氧树脂与钢丝的附着力大，不会起皮，也不影响锚具的锚固，在砂浆中的锚固力比无涂层者略有降低。顺便指出，有些工程用人工刷涂环氧树脂，实践证明很难刷均匀，而且不连续，不宜推广。

前面已经提到，对于采用隔离防护的永久锚索，必须设置双层隔离层，典型的永久性隔离防护锚索如图2所示。值得注意的是，锚索全长都必须是双层防护，而且注浆体不得作为隔离防护层，因为注浆体不与锚索体直接接触，且易于开裂。图2中，张拉段是双层：第一层是波纹管，第二层是无粘结钢绞线上的PE套管；锚固段也是双层：第一层是波纹管，第二层是钢绞线上的环氧树脂涂层。如果锚索体选择的是普通无环氧涂层的无粘结钢绞线，锚固段的PE管已剥去，则必须在锚固段增设一层波纹管，即锚固段是双层波纹管，如图3所示。

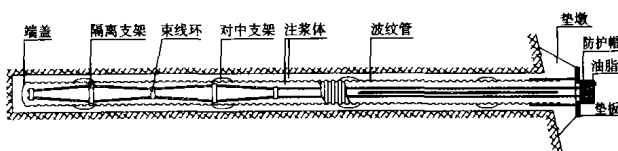


图2 双层隔离防护锚索结构

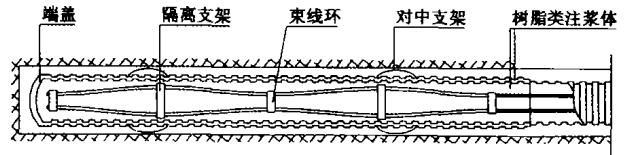


图3 锚固段双层波纹管

隔离防护锚索的优点是：

第一，由于张拉段全长不与砂浆接触，可自由伸缩，锚索的拉力可以根据需要随时调整其大小；由于在自由段全长调节应力，吸收岩体变形的能力强，特别适用于岩体产生大变形的工程加固；

第二，适用于强腐蚀地层及化学成份复杂的地层，例如氯化物、硫酸盐超标的地层，或有可能受到海水侵蚀的地层等。PE管及波纹管都是高分子聚合物，具有很强的抗腐、抗菌、抗老化性能；

第三，抗动载性能好。意大利有个互杨坝，是一座双曲拱砗坝，坝高276m，坝顶长165m，水库蓄水后岸坡失稳，大约有2.6亿 m^3 滑体滑向水库，使得4000万 m^3 的库水涌向坝体，形成的涌浪高达260m，这些水翻过大坝向下游冲去，下游的一个小镇只七分钟就荡然无存。这个悲惨的事故共造成1926人丧生。但是大水过后整个大坝却都完好无损，原因是大坝加固用了450根的自由锚索^[6]。自由锚索的大变形大大减弱了水力冲击作用。

隔离防护锚索的施工全过程都要特别注意，包括原材料的吊装、运输、储存以及随后的锚索下料、组装、运送、安装等，任何环节都不得伤及隔离层的完整程度，一旦发现某处产生损伤，要立即进行认真修补，并有足够的搭接长度。对于承受动载的锚索，要注意锚具的疲劳和松动。重庆的彩虹桥失事原因已有定论，原因之一是桥系杆的更换，原设计是钢杆，施工中换成了钢绞线。从桥的受力角度并无大错，问题出在钢绞线的锚具没有防松装置。桥梁在反复加载卸载的动荷作用下，一旦有几付锚片松脱，整座桥的受力

状态远远超出原设计的意图。我国是一个多地震国家,还有其它一些使用中有反复动荷作用的工程,都需要注意锚具的疲劳和防松问题,因为隔离防护锚索的全部拉力都由锚具永久承担。

3.3 营造不锈钢蚀环境的全长粘结型锚索

从钢材防腐原理得知,阴极保护、阳极保护及 $\text{PH} > 11$ 的强碱环境都可以防止钢材锈蚀。阳极保护多用于化学工厂,阴极保护常用于地下管道,例如,西气东送的地下钢管。对于锚索,最简单、最便宜、最有效的方法是硅酸盐水泥浆或水泥砂浆营造的强碱环境,用硅酸盐水泥拌制的水泥浆 $\text{PH} \geq 11$,足以使钢绞线表面钝化。当然,采用水泥浆做保护层时,要注意以下几个问题。

第一,确保水泥浆 $\text{PH} > 11$ 。锚索工程中为了改善水泥浆的性质常用外加剂,如早强剂、减水剂、膨胀剂、抗冻剂等,所用的外加剂(包括水)绝对不能降低水泥浆的碱度,并且氯离子、硫酸根离子的含量不得超过锚索规范的要求;

第二,水泥浆受力后不得开裂。对承载力大的拉力型锚索水泥浆要开裂是一个不争的事实。也有人认为,在地下封闭状态砂浆有些微裂隙(宽度不大于 0.5mm)不影响锚索的永久性。然而,这仅是一个美国人在一个核电站的实证,还不具备推广到锚索的价值。日本对钢筋砼中裂缝宽度与钢筋腐蚀的关系进行了长达20余年的研究,也认为砼的裂缝宽度 $< 0.5\text{mm}$ 时对结构的永久性影响不大。国际预应力协会也允许钢筋砼中有不大于 0.3mm 的裂缝,这些研究成果可否引入锚索还没有把握。也有人提出用压力型或压力分散型或拉力分散型或拉压复合型锚索都可以防止砂浆的开裂,确实如此,不过这些锚索的一部分是隔离防护,不是本节讨论的内容。如果一定要求全长粘结锚索的注浆体不出现裂缝,这里推荐一种1993年在漫湾水电站 6000kN 级锚索使用过的施工工艺:分段注浆分次张拉和锚固施工法。该方法要点是,比如 6000kN 级锚索分为三级,每级

2000kN ,总设计锚固段长 9.0m ,分为三段注浆,每段 3.0m ,第一次注 3.0m ,拉 2000kN ,锚固;再注 3.0m ,张拉至 4000kN ,锚固,余次类推。砂浆和锚索的受力情况示于图4。

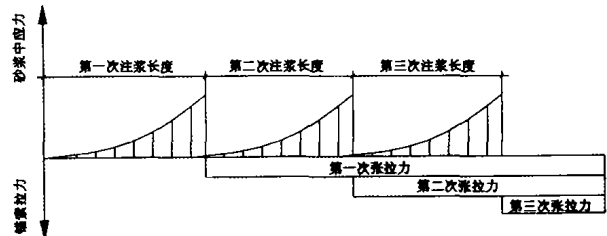


图4 分段注浆分级张拉锚固砂浆及锚索受力图

该方法的主要优点是每次张拉时的注浆体都是从零应力开始,而锚索的拉力是逐级叠加的。这种施工方法可以大大减少砂浆的拉应力。分级的多少,以不产生或产生很小的拉裂裂缝的最大拉力为准。

第三,围岩中不得含有腐蚀水泥砂浆的有害物质,围岩及地下水 $\text{PH} \geq 7$,否则,锚索在长期使用中会降低水泥浆的碱度,以致破坏钢绞线的钝化膜。

锚索是深埋地下的,不像暴露于大气中的钢筋砼结构经常受到大气和烟囱中的 CO_2 、 SO_2 等有害物质的侵蚀,只要注意以上三点,全长粘结型锚索完全可以作为永久锚索设计。到目前为止,看到的有关锚索锈蚀破坏的报道,以及国际预应力协会收集到的35例锚索破坏的实例,几乎没有全长粘结型锚索。当然,锚索的破坏原因是多样的,有地层原因,有施工质量原因,也有选材不当造成的,绝对不能因为隔离防护锚索锈蚀破坏的多就否认隔离防护的长期有效性。

下列情况下不宜将全长粘结锚索作为永久锚索:

- (1) 有海水侵入及含有氯化物和硫酸盐的地层;
- (2) 有腐蚀性废水侵入及受腐蚀性气体污染的工厂附近,如化学工厂、污水处理厂等
- (3) 杂散电流密集地区,如变电站、地下铁道附近等;

(4) 锚索应力受到循环波动的外界环境影响以及围岩有可能产生较大位移的地层。

全长粘型锚索结构简单, 施工速度快, 造价低, 条件允许时应优先用做永久锚索。有研究指出, 与有粘结筋相比, 无粘结筋的极限承载力将减少30%左右^[14], 这是一个不容忽视的数据。因此, 近期国内外都在研究缓凝粘结筋, 兼顾了有粘结筋和无粘结筋的优点。据报道, 国内有两种解决途径。其一是将普通钢绞线涂上一层缓凝树脂^[15], 外套PE套管。树脂中掺有特定外加剂, 硬化时间可由设计者自行设定, 硬化时无收缩, 并将钢绞线与PE管牢固地粘在一起, 典型结构如图5所示。对PE管也有特定要求: 强度高, 耐酸碱, 抗老化并有一定柔性。根据用途不同套管的表面可有不同的形状。第二种解决途径是兰州铁道学院和铁道部第一勘测设计院研制的^[14], 其受力筋仍为普通有粘型, 差别在于所注砂浆为缓凝型, 这种砂浆在5~40℃密封条件下30天之内不凝结, 30天后逐渐凝结、硬化, 最终抗压强度可达到30MPa以上。

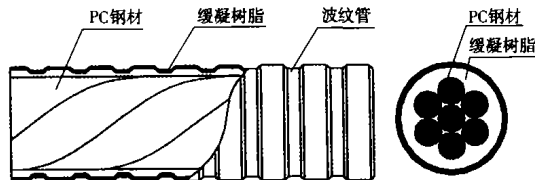


图5 缓凝钢绞线示意图

这里推荐了三种永久锚索结构, 应该说各有千秋, 只要选择的结构满足使用要求又适应地层的性质就是成功的选择, 轻易的、毫无根据的用一种结构否认另一种结构都不利于锚索的发展与完善。

3.4 外锚固段的防护

国际预应力协会收集到的35例锚索破坏的实例中, 有19例破坏的部位在锚头附近, 占破坏锚索的一半以上, 应当引起设计和施工单位的足够重视。

(1) 隔离防护外锚固段的防护

有不少锚索工程设计, 无论粘型锚索或者

无粘型锚索, 外锚固段的锚头(具)一律用注浆或砼封闭, 混淆了隔离防护和碱性环境防护的概念, 对于隔离防护锚索危害极大。这是因为外锚固段受大气影响大, 经常受到大气中成份复杂的有害气体和液体的侵蚀, 又不做两种防护的有效的搭接, 所以, 在两种防护的交界处易于腐蚀而破坏。1987年, 在“自由锚索的设计与施工”一文中曾指出过, 对于不要求调节锚索预应力的自由锚索, 锚头部份可以用硅酸盐水泥浆或砼封堵, 但是必须有至少500mm长的搭接长度, 在搭接长度内做成双重防护。这样做很繁琐, 也不规范, 对于自由锚索, 规范的做法如图6所示。在保护帽内及锚具以下的一段钻孔要充满防锈油脂, 保证整个锚索都是隔离防护, 并自由伸缩, 当需要调整锚索预应力时, 取去保护帽即可。要注意的是, 防锈油脂是专用类黄油油脂, 不能用黄油或其它油脂代替。保护帽与垫板接触面上设密封垫, 并有可靠的联接, 防油脂流失。保护帽上有油脂补给孔, 定期补充防锈油脂。通常, 保护帽由工厂模压聚脂塑料制成, 有时也用钢材现场加工。安装垫板前要除去垫板上的污物和锈斑, 再涂一层防腐材料。

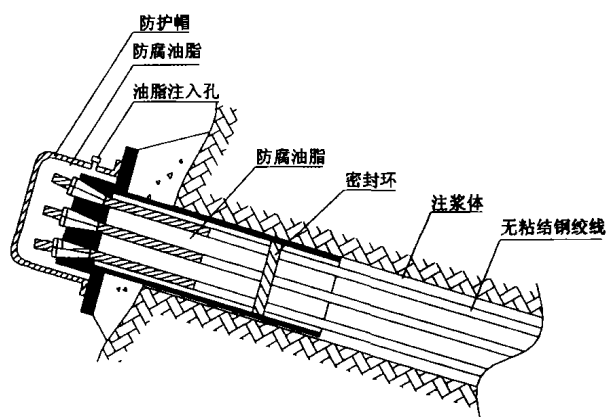


图6 锚头防腐示意图

(2) 全长粘型锚索外锚固段的防护

锚索张拉锚定并回填灌浆后, 切去多余的钢绞线, 用砼或注浆盒注浆封堵锚具即可。从旧建筑物的拆除发现, 砼对钢材的保护不如注浆, 可能注浆的密实度比砼好, 永久锚索的锚头最好采

用注浆防护。还有一个理由,对张拉段回填灌浆后由于浆体的泌水收缩,致使锚具下的小空间及夹片间的缝隙得不到有效防护,这里推荐图7的封堵方法:在浇砼垫墩前,在钢垫板下安一根钢管,通过导向钢管进入钻孔。封堵锚头时,浆体由该钢管注入,浆液注满锚具下的所有空洞后,通过夹片的缝隙流入保护帽,当浆体从保护帽上的溢浆管出浆,即预示封堵完成。当然,封堵完的次日再检查一下溢浆管是否仍然饱满,否则还可以从溢浆管补浆。

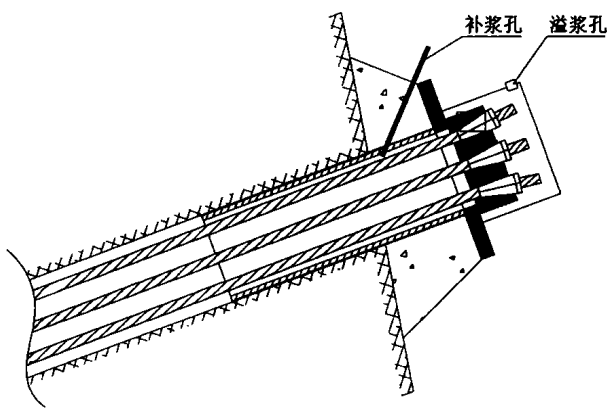


图7 粘结型锚索锚头防护

锚索在我国的应用历史不长,无法用它的实践本身去验证它的永久性,只能由其它学科的研究成果外推。永久性的含义本身也比较模糊,不能理解为永远不破坏。只要锚索的有效使用时间与使用它的工程的寿命相当就可以认为是永久性锚索。即使如此,由于受各种因素的影响,也不要轻易下结论某种锚索不能做为永久锚索,正如我们目前知道的已破坏的锚索大多是隔离防护锚索,并不能说它不能作为永久锚索一样。锚索的破坏与选择的锚索结构有关,也与地层有关,还与人为因素(施工质量)和锚索材料有关。因此,设计院在选定锚索结构时务必选用技术成熟并经过多个工程多年实践证明可行的锚索结构,且勿受某些承包商商业宣传的影响。如果仔细分析一下国际预应力协会收集到的锚索破坏的详细情况,至少有一半属于施工问题,该注浆不注浆或注浆不饱满,该防护的又不认真执行规范。因此,要

保证锚索的永久性,选择信誉好、有锚索施工经验的专业化队伍也是不可忽视的环节。

参考文献

1. 梁炯崑主编. 锚固与注浆技术手册. 中国电力出版社. 1999. 9
2. (英)J·C. 斯库里著, 李启中译. 腐蚀原理(第二版). 水利电力出版社. 1984. 11
3. 燕立群等. 压力分散型锚索与拉力型锚索的比较——再论新型锚索结构系列及工程应用《岩土锚固技术与西部开发》人民交通出版社. 2002. 9
4. (苏)A·A. 斯塔罗谢尔斯基. 中译本. 钢筋砼的电腐蚀. 冶金建筑研究部院情报室. 1983. 9
5. Environmentaltes Assistend Fracturing. 《Research and Standards-Standardization News》.No 5.1975.3.
6. 缪勒教授来华学术报告集. 中国地质学工程地质专业委员会. 中国科学院地质研究所地质力学室. 1981. 4
7. 孙泽世, 王乔. 提高钢筋砼耐久性能的几点措施. 《西部探矿工程》. 2003年第2期
8. (美国) Harry Schnabel Jr. Teiback in Foundation Engineering and Consruction. 1984年
9. 腐蚀与防护手册. 化工部化工机械研究院. 化工出版社. 1987年
10. (苏)N·N. 瓦西连科, P. L. 麦列霍夫著. 陈石卿, 焦明山译. 钢的应力腐蚀开裂. 国防工业出版社. 1983. 6
11. 吴恂岸. 上海化工设备腐蚀与防护现状. 上海化工装备研究所. 《腐蚀与防护》. 1983年2期. 上海市腐蚀科学技术学会
12. 应道安. 液化石油球罐的硫化物应力腐蚀破裂. 《腐蚀与防护》1983年2期
13. 易圣涛. 日本预应力砼桥梁新技术——缓粘结的PC钢材. 交通部重庆公路科学研究所. 《海威姆预应力技术》. 2003. 1
14. 章建庆 王起才. 缓粘结预应力筋的研究与应用. 铁道部第一勘测设计院. 兰州铁道学院. 李中秀.
15. 刘中华等. 缓粘结预应力钢绞线的试验研究. 天津港湾工程研究所. 天津钢绞线钢缆集团有限公司. 朱龙等.

