

# 高强钢丝钢绞线在海洋 环境中的腐蚀试验

刘文华 李文春 马全声

**摘要** 本文对作为预应力筋的高强钢丝、钢绞线及用其制作的预应力混凝土构件,在海洋环境中进行了部分试验工作。对暴露于海洋环境中应力状态下的钢绞线,裸露的和构件内的腐蚀机理、腐蚀情况进行了描述和分析。

**关键词** 高强钢丝 钢绞线 海洋环境 腐蚀试验

## 1. 前言

工程结构中的钢筋混凝土和预应力混凝土结构,与钢结构相比,价廉、节能且便于制造,在侵蚀环境中腐蚀轻,维修费用低,使用寿命长。因此,长期以来,钢筋混凝土和预应力混凝土结构广泛用于工业与民用建筑、水利、电力、水运工程建设中。

预应力混凝土结构中,采用高强钢丝和钢绞线作预应力筋,是近代发展的新趋势。用其制作的预应力构件,具有强度高、断面小、重量轻、跨度大等特点,对改革当前一些工程中的大跨度、高层数、深基重载的建筑结构和一些高压容器等均有显著的技术经济效益,故得到国内外工程界的普遍重视,并争相应用。水运工程中的预应力结构,因建筑物多处于海洋环境中,其工作在有氯化物环境或腐蚀严酷的条件下,国外有一些建筑物因腐蚀发生了破裂,造成一些结构物失事的后果。故各国都把应力腐蚀问题列为预应力混凝土的主要研究课题,以探讨应力腐蚀的因素和规律,寻求较优的防蚀方法,提高预应力混凝土结构的耐久性。国内港口工程中应用高强钢丝和钢绞线作预应力筋的时间较短,应用时又采用了加大预应力筋净保护层和提高孔道灌浆密实度等方面的措施,至今尚未发现破坏的构件。为了解高强钢丝和

钢绞线在应力状态下的腐蚀,有关部门利用预应力锚杆试验开展了一些工作。1977年,我所又专门对预应力筋构件中的钢绞线腐蚀问题,进行了一些试验研究工作。本文拟对我们在海港工程中应用高强钢丝和钢绞线作预应力构件的应力腐蚀问题,进行简要的介绍和分析,提出一点粗浅的看法。试验工作中得到本所郑世英、邝翠珠、付振杰等同志的帮助,在此表示谢意。

## 2. 国内外预应力钢丝和钢绞线应用概况

预应力混凝土是法国和比利时率先发展的,1928年法国的E·Freyssinet开始将极限强度为 $1725\text{N/mm}^2$ 的高强钢丝用于预应力混凝土结构<sup>[1]</sup>。自1965年以来,一些发达国家建造的各类桥梁、储罐、高层楼房和大跨度工业厂房,核电站的厂房和防护设施,一些大型水库和电站的坝基锚固等,多采用高强钢丝和钢绞线作预应力筋。一些海上的桩基码头和采油平台,多采用预应力混凝土。美国雷蒙德公司自1950年以来,利用离心、振动、辊压工艺制作管节,把几节同类型的管节用高强钢丝或钢绞线作预应力筋,用后张法连接在一起,用于一些海工建筑中。70年代起,在水深90~150m的北海油田开发中,用钢绞线作预应力筋,成功地建造了14座巨型贮油海洋平台,预应

力混凝土结构有了的新发展<sup>[2]</sup>。

60年代初,我国铁路桥梁已开始采用高强钢丝作预应力筋。如南京长江大桥的引桥,武汉江汉二桥、上海浦江大桥、九江和重庆的长江大桥等。丰台桥梁厂生产的32.0m跨的后张预应力混凝土梁,均采用Φ5高强钢丝作预应力筋。安徽梅山水库的坝基锚固,用高强钢丝束作预应力锚固<sup>[3]</sup>。70年代初,我局施工的秦皇岛原油输出码头的主梁;80年代中期,石臼港煤码头的码头主梁和转向平台梁,均可采用Φ5高强钢丝作预应力筋。交通部第三航务工程局研制生产的预应力管桩,用Φ5高强钢丝和公称直径15mm的钢绞线作预应力筋,并在镇海、连云港的一些码头工程中应用<sup>[4]</sup>。

### 3. 预应力钢绞线在海洋大气中的腐蚀

用高强钢丝和钢绞线作预应力筋的港工建筑物,因海水和大气对预应力筋的耐久性有一定的危害,直至70年代初,我国才在海港码头上应用。为探索高强钢丝和钢绞线在应力状态下,置于海洋大气环境中的腐蚀,利用预应力锚杆中的钢绞线,裸露于上述条件下,于1974年6月至1976年12月,进行了一些试验工作。

试验用天津钢丝厂生产的钢绞线,公称直径12mm,其规格和力学性能如表1所示。钢绞线应力的施加,系采用一端锚入地下,另一端用JM12-6型锚具锚固在张拉墩台上,钢绞线穿入聚氯乙烯硬塑料管内,通过锚具夹片上的灌浆孔和夹片间的缝隙与大气相通,其结构如图1所示。钢绞线的张拉控制应力,按 $\sigma_k=0.65\sigma_b$ 计,其张拉控制应力的大小为 $\sigma_k=1105\text{Mpa}$ ,在整个张拉过程和实际应用中,所有锚杆的预应力损失经实测为100~120Mpa,故张拉锁锚后的钢绞线,扣除各种预应力损失后,工作状态的应力为985~1005Mpa<sup>[5]</sup>。钢绞线在工作状态应力下,暴露于青岛地区海洋大气中,该地区年平均气温为12.2℃,最高气温为36.2℃,最低气温为-16.9℃,雾期在4~7月,其海水成份如表2所示。钢绞线在工作状态应力下,暴露于海洋大气中,历时1年和2.5年后,将锚杆挖出,截取距地表1.0~2.1m的这一段,进行力学性能试验。

将取回的试样,两端各截去30cm左右,取出

中间45cm的一段作试件。因当时试验设备的限制,不能进行整根钢绞线的破断试验,故将其破股,用木槌轻轻敲直,把外层的6根钢丝和中心钢丝分别在材料试验机上进行破断试验,然后把各根钢丝的应力值平均,作为钢绞线锈蚀后的综合抗拉强度。该试验,在天津市钢丝厂进行,其结果如表3和表4所示。

表1 钢绞线规格及力学性能表

力学性能 钢绞线规格	强度级别 (Mpa)	弹性模量 (Mpa)	延伸率 (%)	弯曲次数 (次)	综合抗拉强度 (Mpa)
12(7Φ4)	1600	18×10 <sup>4</sup>	≥5	≥4	1700
12(7Φ4)	1600	18×10 <sup>4</sup>	≥5	≥4	1700

表2 青岛地区海水成份表

SO <sub>4</sub> <sup>—</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Ca <sup>++</sup> (mg/l)	Mg <sup>++</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	游离CO <sub>2</sub> (mg/l)	PH值	总含盐量 (‰)
2474.51	16895.48	430.13	1089.02	143.67	22.09	8.0	32.46

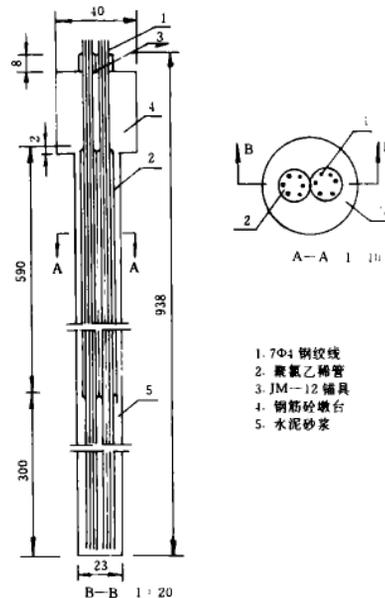


图1

钢绞线的7根钢丝,外层6根是按一定的捻角绕在中心钢丝周围的。钢绞线在张拉和使用过程中,外层6根钢丝受到拉、扭组合应力的作用,中心钢丝为一直丝,仅受到拉应力的作用。外层钢丝的表面,均直接和海洋大气接触,中心钢丝在外层钢丝的的围绕下,受到了一些保护,故在裸露条件下,外层钢丝较中心钢丝腐蚀的重些。力学性能试验中,外层钢丝在拉力作用下锈层剥落后,每根

表3 钢绞线腐蚀一年后的抗拉强度

试件编号	腐蚀后钢绞线的综合抗拉强度 (Mpa)		钢绞线原综合抗拉强度 (Mpa)	腐蚀后与原始强度的比(%)	
	外层6根边线平均值	整根绞线平均值		外层6根边线平均值	整根绞线平均值
3-2	936.3	1016.3	1700	55.1	59.8
3-3	903.6	989.9	1700	53.1	58.2
3-4	915.3	992.3	1700	53.8	58.4
3-5	934.4	1015.4	1700	55.0	59.7
3-6	895.3	982.4	1700	52.7	57.8
3-7	913.8	1013.5	1700	53.8	59.6
3-8	927.1	1005.0	1700	54.5	59.1
3-9	880.7	964.4	1700	51.8	56.7
3-10	915.2	997.9	1700	53.8	58.7
3-11	892.6	977.0	1700	52.5	57.5
3-12	771.9	873.1	1700	45.4	51.4
4-1	949.6	1023.4	1700	55.9	60.2
4-2	892.7	978.7	1700	52.5	57.6
4-3	912.5	1075.0	1700	53.7	63.2
4-4	935.1	1013.4	1700	55.0	59.6
4-5	924.5	1006.5	1700	54.4	59.2
4-6	916.5	993.5	1700	53.9	58.4
4-7	909.9	985.1	1700	53.5	57.9
4-8	939.1	1009.6	1700	55.2	59.4
4-9	932.4	1009.3	1700	54.8	59.4
4-10	917.8	996.1	1700	54.0	58.6
4-11	961.6	1009.5	1700	56.6	59.4
4-12	937.7	1009.5	1700	55.2	59.4

钢丝在各个部位均有深浅不一的锈坑,有的较深,钢丝多在这些部位断裂。中心钢丝也有锈坑,其深度较外层的浅且数量少,故外层钢丝的强度降低比中心钢丝大一些。在海洋大气环境中裸露1年的钢绞线,外层钢丝锈蚀后的综合抗拉强度为原钢绞线综合抗拉强度的45.4%~56.6%,整根钢绞线锈蚀后的综合抗拉强度为钢绞线原综合抗拉强度的51.4%~63.2%。从钢丝破断的断口来看,外层钢丝多为杯口状断口,断口处有轻微的颈缩;只有5根钢丝为斜向断口,无颈缩,断口附近有鱼鳞状裂纹。中心钢丝破断后,均为杯口状断口,且颈缩较外层钢丝明显得多。在海洋大气环境中裸露2年半的钢绞线,外层钢丝锈蚀后的综合抗拉强度为原钢绞线综合抗拉强度的22.6%~27.8%,整根钢绞线锈蚀后的综合抗拉强度为钢绞线原综合抗拉强度的25.2%~29.8%。从钢绞线的断口来看,外层钢丝大部分为杯口状断口,有较轻微的颈缩,其中有28根钢丝为斜向断口,无颈缩,断口附近有鱼鳞状的裂纹。中心钢丝的断口均为杯口状,颈缩较外层钢丝明显。

表4 钢绞线腐蚀2年半后的抗拉强度

试件编号	腐蚀后钢绞线的综合抗拉强度 (Mpa)		钢绞线原综合抗拉强度 (Mpa)	腐蚀后与原始强度的比(%)	
	外层6根边线平均值	整根绞线平均值		外层6根边线平均值	整根绞线平均值
1-2	450	471	1700	26.5	27.7
1-3	440	477	1700	25.9	28.1
1-4	442	473	1700	26.0	27.8
1-5	412	448	1700	24.2	26.4
1-6	427	471	1700	25.1	27.7
1-7	467	496	1700	27.5	29.2
1-8	414	453	1700	24.4	26.6
1-9	461	495	1700	27.1	29.1
1-10	451	486	1700	26.5	28.6
1-11	442	475	1700	26.0	27.9
1-12	465	497	1700	27.4	29.2
2-1	439	481	1700	25.8	28.3
2-2	440	477	1700	25.9	28.1
2-3	444	477	1700	26.1	28.1
2-4	473	507	1700	27.8	29.8
2-5	423	459	1700	24.9	27.0
2-6	456	489	1700	26.8	28.8
2-7	411	449	1700	24.2	26.4
2-8	385	428	1700	22.6	25.2
2-9	444	477	1700	26.1	28.1
2-10	431	467	1700	25.4	27.5
2-11	403	444	1700	23.7	26.1
2-12	449	485	1700	26.4	28.5

#### 4. 预应力混凝土梁中的钢绞线暴露试验

为了解海洋环境中用高强钢丝、钢绞线作预应力筋的混凝土构件的耐久性及如何保证其耐久性,1977年,我所进行了钢绞线预应力混凝土小梁在海洋环境中的暴露试验<sup>[6]</sup>。小梁为先张法预制,其规格为  $b \times h \times l = 200 \times 300 \times 3000\text{mm}$ ,受拉区布置有3根公称直径12mm的钢绞线。其结构示意图如图2所示。钢绞线的张拉控制应力为  $\sigma_k = 0.7\sigma_b = 1120\text{Mpa}$ ,在张拉和成型过程中,其预应力损失在120Mpa左右,故小梁中钢绞线的应力为1000Mpa左右。主筋保护层为30mm的小梁为29根,50mm的小梁59根。1977年12月,将保护层为30mm的小梁23根,50mm的小梁44根置于青岛暴露试验区,在水位变动区进行试验;余下的小梁放在塘沽新港暴露试验站,在海洋大气条件下进行试验。历时3年半后,于1981年6月取回部分小梁,进行梁的力学性能试验和破型检查。力学性能试验后的小梁破型后,检查钢绞线的腐蚀,小梁混凝土的碳化深度和钢绞线周围的砂浆中氯离子的含量。破型后取出的钢绞线腐蚀检查得知,其外观完好如初,未发现腐蚀;力学性能

试验测定综合抗拉强度,并与原综合抗拉强度进行比较,其结果如表5所示。暴露在水位变动区和海洋大气区的试验梁,破型检查混凝土表面的碳化深度分别为1mm和2mm。在试验小梁两侧钢绞线周围,取出砂浆试样,测定氯离子的含量,其结果如表6所示。

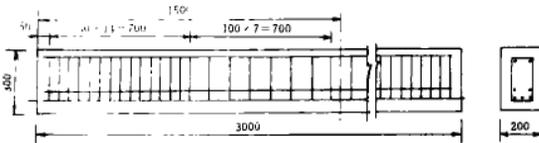


图2 预应力小梁配筋示意图

表5 钢绞线试验前后力学性能

力学性能 编号	综合抗拉强度 (Mpa)		延伸率 (%)		断口状态	
	暴露试验前	暴露试验后	暴露试验前	暴露试验后	暴露试验前	暴露试验后
	钢绞线-1	1600	1600	≥4	≥4	塑性
钢绞线-2	1620	1610	≥4	≥4	塑性	塑性
钢绞线-3	1600	1650	≥4	≥4	塑性	塑性

表6 小梁钢绞线周围砂浆氯离子含量

钢绞线保护层厚度 (cm)	暴露试验区的自然条件	氯离子含量(砂浆重量的%)		
		试样个数	平均数	最大值
5	海边大气区	12	0.048	0.048
3	水位变动区	36	0.089	0.106
5	水位变动区	36	0.080	0.103

### 5. 试验结果分析

在海洋环境中,锚杆中的钢绞线存在着张拉应力,当其受到氯盐的侵蚀时,则具有应力腐蚀的敏感性。青岛地区属于海洋性气候,试验场地就在海边,大气湿度常年较大,在钢绞线的表面,常覆盖有因毛细凝聚、吸附凝聚和化学凝聚生成的凝聚水膜。在潮湿的海洋大气中,含有一些卤素离子,其中以Cl<sup>-</sup>离子作用最强。钢绞线表面的钝化膜或氧化膜,与含有活性Cl<sup>-</sup>离子的大气接触时,活性Cl<sup>-</sup>离子首先吸附在钢绞线表面钝化膜或氧化膜的某些部位。因钢绞线表面水膜中含有Cl<sup>-</sup>离子,且Cl<sup>-</sup>离子吸水性强,可增加液膜的导电性,同时还可以破坏钝化膜和氧化膜,故可使腐蚀

加速。当钢绞线在张拉应力作用之下,其金属电位达孔蚀电位时,在钝化膜或氧化膜的薄弱部位就会被穿透,使其遭到局部破坏。此时,在钝化膜或氧化膜受到破坏的地方,金属呈现活化状态,成为阳极,而未遭受到破坏的地方,仍保持钝态,成为阴极,于是就组成了一个钝化—活化电池,或者说组成了一对腐蚀电偶。因最初破坏点面积很小,这就形成了大阴极小阳极的局面,阳极电流密度很大,很快就被腐蚀成蚀孔,这时流向蚀孔周围的腐蚀电流,又使周围地区受到了保护,从而继续维持钝态。随着腐蚀过程的进行,孔内带有正电荷的金属离子浓度升高,为维持孔内溶液的电中性,蚀孔外部溶液中的Cl<sup>-</sup>离子随着电流的流动而不断向孔内迁移,于是孔内就形成了高浓度的FeCl<sub>2</sub>,接着它又在孔内发生水解,则使金属发生局部阳极溶解,即开始形成蚀孔(锈坑)。海洋大气当中,存在着Cl<sup>-</sup>离子,在卤素离子存在时,Fe<sup>II</sup>金属离子可使孔蚀加速,使孔内金属加快腐蚀溶解,即在组成钢绞线的钢丝上,形成一些深浅不一的锈坑,从而降低了钢绞线的综合抗拉强度。

锚杆中的预应力钢绞线被张拉后,因其外层钢丝在拉、扭组合应力的作用下,部分钝化膜或氧化膜发生了破坏,形成了一些微细裂隙,潮湿的海洋大气凝聚成的水,进入裂隙内成为腐蚀介质,因在腐蚀介质中,含有活性的Cl<sup>-</sup>离子,则在开裂的缝隙内发生了氧化还原反应。由于缝隙内氧供应不足,氧很快被耗尽,于是还原反应只在氧供应比较充分的缝隙外进行,而缝隙内只进行氧化反应。随着缝内阳极反应的进行,缝内金属离子数量增多,为了使溶液保持电中性,缝隙外部的Cl<sup>-</sup>离子会很快地迁移进来,象孔蚀那样,在缝隙内形成了高浓度的氯化物,它们又水解,使缝内酸值升高,从而使缝内腐蚀加速,而流向缝外部的电流又使缝外部受阴极保护,因此,缝隙内的腐蚀过程也是一个自催化过程。由此可知,缝隙腐蚀与孔蚀的机理极为相似,但其发生在钢丝钝化膜或氧化膜已开裂的缝隙之中。整根钢绞线在应力状态之下,由于钢丝表面的钝化膜或氧化膜在拉、扭组合应力的作用下产生微细裂缝,这些裂缝内进入了含有Cl<sup>-</sup>离子的腐蚀介质,则使缝蚀越来越重,从而降低了钢绞线的综合抗拉强度。

从以上分析可知,在张拉应力作用下,暴露于

含有 $\text{Cl}^-$ 离子的海洋大气环境中的高强钢丝和钢绞线,使其强度降低的因素,初期以材料的坑蚀为主,随着时间的延续,坑蚀在加速进行,缝蚀也在逐渐开始并加速。与大气直接接触的钢绞线外层钢丝,其表面坑蚀和缝蚀都较重,强度降低也多。处于钢绞线中心的芯线钢丝,在外层钢丝起到一些保护作用,坑蚀和缝蚀均较外层钢丝轻。

预应力混凝土构件中的高强钢丝、钢绞线的腐蚀和应力腐蚀,是结构耐久性和安全度的关键。在海洋环境中,因预应力结构中的高强钢丝、钢绞线存在着张拉应力,在氯盐的侵蚀下,具有应力腐蚀的敏感性。当介质中氯化钠的含量达到35%时,其敏感性最高。由于混凝土表面碳化向纵深发展,会使预应力筋周围的砂浆PH值变化,则 $\text{Cl}^-$ 离子渗透到预应力筋的表面破坏其钝化膜或氧化膜,激发其表面活性,导致其腐蚀或应力腐蚀。从梁的破坏试验后检查其混凝土表面碳化深度和钢绞线附近砂浆中 $\text{Cl}^-$ 离子的含量得知:在水位变动区和海洋大气区,混凝土表面的碳化深度分别为1mm和2mm,这远不足以影响钢绞线周围砂浆的碱度,处在这种条件下的钢绞线是难以腐蚀的。从钢绞周围砂浆取样测定其 $\text{Cl}^-$ 离子含量仅有0.048%~0.089%,最大值才达0.106%,它远远低于引起钢筋腐蚀的最低限值,则小梁中的预应力钢绞线,虽经过三年暴露试验,仍没有发现腐蚀,故其外观和力学性能没有明显的变化。

## 6. 结语

暴露于腐蚀环境中的高强钢丝、钢绞线,在有张拉应力时,是有较强的应力腐蚀敏感性的。在海洋大气环境中,活性强的 $\text{Cl}^-$ 离子,破坏了高强钢丝、钢绞线表面的钝化膜或氧化膜,破坏后的钝化膜和氧化膜与原来未破坏的部分组成了一对腐蚀电偶,使金属表面受到腐蚀。初期以坑蚀为主,随着时间的延续,坑蚀继续向纵深发展并加速进行,

缝蚀也相继出现并逐渐加快,这是高强钢丝、钢绞线强度降低的主要因素。

裸露于海洋大气环境中的高强钢丝、钢绞线,在有张拉应力的条件下,裸露1年后,其强度降低到原始强度的51.4%~63.2%;裸露2年半后,其强度降低到原始强度的25.2%~29.8%。由此可知,采用高强钢丝、钢绞线作预应力筋的混凝土结构,施工中要严格控制混凝土质量的均匀性和后张法孔道灌浆的密实度,以免因预应力筋的保护层局部破坏,引起预应力筋腐蚀,导致结构的破坏。预应力混凝土结构,如采用高强钢丝、钢绞线作预应力筋,一旦其保护层破坏,使预应力筋裸露,必须及时修复,以减少预应力筋的应力腐蚀,提高结构物使用的寿命。

由采用钢绞线作预应力筋的混凝土小梁,在海洋环境中经3年半的暴露试验结果得知,主筋保护层分别为30mm和50mm的小梁,保护层均起到良好的保护作用。从力学试验破断后的梁中取出钢绞线,进行外观检查和力学性能检验,并与原钢绞线比较,其外观和抗拉强度均无明显变化。故采用高强钢丝、钢绞线作预应力筋的构件,按“港口工程技术规范”中的有关规定进行设计和施工,其结构的力学性能和耐久性是有保证的。

## 参考文献

- [1]林同炎:预应力混凝土结构设计(第三版). 中国铁道出版社. 北京. 1983
- [2]洪定海:水工钢筋混凝土中的钢筋的腐蚀与保护. 水工钢筋混凝土耐久性专题讨论会论文选辑. 1985. 3
- [3]安徽省水利局勘察设计院:预应力钢丝断裂与防护. 1976. 7
- [4]李华:大直径预应力混凝土管桩制造与应用. 桩基会议论文集. 1988. 10
- [5]交通部一航局设计研究院:风化岩基中锚杆的试验研究. 港工技术通讯. 1976
- [6]付振杰:钢绞线预应力混凝土小梁临海暴露试验. 港口工程. 1988. 3