

PCCP 高强钢丝阴极保护准则的试验研究

朱雅仙^{1,2}, 蔡伟成^{1,2}, 吴 焯^{1,2}, 李森林^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部水工新材料工程技术研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 阴极保护逐渐被应用于预应力钢筒混凝土管(简称 PCCP), 以防止其中高强钢丝的腐蚀. 但对于具有氢脆敏感性的高强钢丝, 特别是新建 PCCP 中的高强钢丝, 目前还没有建立安全有效的保护电位准则. 通过检测含氯砂浆中的高强钢丝及混凝土中钢片的钝化破裂电位、修复电位和析氢电位, 初步确定了 PCCP 阴极保护的电位范围, 尚未发生腐蚀的 PCCP 的保护电位为 $-0.40 \sim -1.10$ V(vs SCE); 已发生腐蚀的 PCCP 为 $-0.75 \sim -1.10$ V(vs SCE). 在此保护电位范围内, PCCP 的保护度达到 90% 以上.

关键词: PCCP 预应力高强钢丝; 阴极保护; 保护准则

中图分类号: TV672.2:U177.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)02-0034-05

预应力钢筒混凝土管(简称 PCCP)作为一种新型的输水管材, 具有适用范围广、经济、寿命长、抗震性能好、安装方便、运行费用低、基本不漏水等优点, 近年来逐渐被应用于长距离输水、城市给水和电厂回水等. 虽然 PCCP 管道外层的水泥砂浆保护层对高强钢丝提供一定的保护作用, 但在土壤中氯离子等活性离子的作用下, 由于高强钢丝的腐蚀而导致 PCCP 爆管事故时有发生^[1-2]. 阴极保护能从根本上抑制高强钢丝的各类电化腐蚀. 近年来, 欧美一些国家已陆续采用阴极保护技术防止或修复 PCCP 的腐蚀^[3-5].

保护准则是判断阴极保护效果的依据. 对于已发生腐蚀的 PCCP 的阴极保护, 规程^[6]规定预应力钢筋的保护电位上限为 $-1\ 000$ mV(vs SCE), 也有报道^[7]认为, 在 pH 值为 12.4 的介质中高强钢丝最大析氢电位为 -900 mV(vs SCE), 保护电位应控制在 $-500 \sim -900$ mV(vs SCE) 范围内. 而对于混凝土尚未受污染、钢筋尚未腐蚀的新建结构的阴极保护, 还没有统一的保护电位准则^[8]. 如果保护电位太正, 保护不足; 保护电位太负, 会对钢混结构产生负面影响, 特别是对高强钢丝而言, 可能存在氢脆的危险. 因此, 研究新建 PCCP 阴极保护技术的保护电位准则, 对于 PCCP 阴极保护的安全有效实施具有重要意义.

1 试件制作和试验方法

1.1 试件制作

试件所用的原材料有 SWRH82B 高强钢丝; A3 钢片; 正通牌 PO42.5 水泥、细度模数为 2.5 的细砂; NaCl (分析纯) 和自来水. 其中钢丝、钢板和水泥等主要材料与南水北调中线工程的 PCCP 相同. 正通牌 PO42.5 水泥的氧化镁、三氧化硫和碱的质量分数分别为 4.22%、2.75%、0.53%; 烧失量为 2.98%, 0.08 mm 筛余量为 0.40%; 3 d 抗折强度为 5.5 MPa, 3 d 抗压强度为 27.8 MPa, 初凝 183 min, 终凝 243 min, 安定性合格.

由于 PCCP 是在带钢筒的混凝土管芯上缠环向预应力钢丝并覆盖水泥砂浆保护层的管子, 因此试验制作了表 1 所示配合比的钢丝砂浆试件和钢片混凝土试件. 按中华人民共和国行业标准《水运工程混凝土试验规程》(JTJ270-98) 制作试件, 采用人工拌和, 人工插捣密实, 钢丝砂浆保护层厚度 1 cm. 试件制作前将高强钢丝机械切割成一定尺寸, 用刚玉砂布打磨光亮, 一端引出导线, 两端用绝缘胶带封闭, 用无水乙醇或丙酮

收稿日期: 2009-08-19

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAB04A04-01)

作者简介: 朱雅仙(1962-), 女, 江苏武进人, 教授级高级工程师, 主要从事钢结构及钢筋混凝土结构腐蚀和保护的研究.

E-mail: zhuyx@nhri.cn

去污、去脂. 进行保护度试验用试件的钢丝用万分之一天平称取初始质量.

表1 试件配合比

Tab. 1 Specimens mixture

试件	水灰比	材料用量/(kg·m ⁻³)				28 d 抗压强度/MPa
		水泥	水	砂	石	
混凝土	0.45	392	176	633	1 266	52.6
砂浆	0.40	710	284	1 480	-	49.1
	0.50	710	355	1 480	-	39.7

1.2 试验方法

1.2.1 保护电位范围研究 PCCP的腐蚀破坏,具有因土壤或地下水中氯离子侵入引起的点蚀特征,因而点蚀电位 E_b 和修复电位 E_p 是表征其孔蚀敏感性的2个基本电化学参数,它们把阳极极化曲线划分为3个区段(见图1).当 $E \geq E_b$ (点蚀电位)时,已有蚀孔将继续发展,并形成新的孔蚀;当 $E_b > E > E_p$ (修复电位)时,不会形成新的蚀孔,但原有蚀孔将继续发展;当 $E \leq E_p$ 时,不会形成新的蚀孔,原有蚀孔会再次钝化而不再发展^[9].因此,对于尚未发生腐蚀的PCCP, E_b 应是阴极保护电位的下限;而对于已发生腐蚀的PCCP,保护电位必须负于 E_p .

试验成型了具有不同氯离子含量的钢丝砂浆和钢片混凝土试件,采用三电极体系控制电位法测定其阳极极化曲线,在极化曲线上获得 E_b 和 E_p .参比电极为饱和甘汞电极,铂电极为辅助电极,室温(25℃±2℃)下测试,测试仪器为美国Princeton 263A恒电位仪.试验前先将钢丝或钢片电极于砂浆或混凝土中埋设一定时间,待其腐蚀电位基本稳定后开始测试.动电位扫描初始电位设定为-0.1 V(相对于开路电位),正向扫描达到一定电位或电流时,开始反向扫描,扫描速率20 mV/30s.

由于预应力混凝土中高强钢丝对氢脆较为敏感,因此其保护电位必须正于析氢电位.试验成型了具有不同氯离子含量的钢丝砂浆,通过测量高强钢丝的阴极极化曲线获得析氢电位.采用恒电位扫描,初始电位设定为0(相对于开路电位),终止电位为-1.2 V(vs SCE),扫描速率为20 mV/180s.

1.2.2 各级保护电位下高强钢丝保护度研究 将钢丝砂浆和钢片混凝土试件置于土壤中,采用恒电位仪将试件阴极极化至钢丝的保护电位分别为-0.45, -0.65和-0.85 V(vs SCE).每天用3% NaCl水溶液对土壤进行干湿交替,一定时间后取出钢丝,进行酸洗处理,干燥、称重,计算腐蚀失重量,与无阴极保护试件进行比较,计算不同保护电位下的保护度.

2 结果与分析

2.1 高强钢丝保护电位范围

高强钢丝在不同氯离子含量新鲜砂浆中的动电位扫描阳极极化曲线见图2.

由图2可见,在不含氯离子的砂浆中,钢丝直接进入钝化状态,其钝化区平稳,且范围较大,维钝电流密度很小,直至钢丝电位约为0.55 V(vs SCE),电流密度才明显升高,此时向负方向回扫,极化曲线开始沿原路返回,而后进一步降低至低于维钝电流并接近于0,说明钢丝没有破坏.在电位为0.55 V时,发生了氧气析出的阳极反应,电流明显增加.当砂浆中氯离子加入量大于水泥质量的0.1%时,从相应的阳极极化曲线可见,电位扫描至小于0.55 V的析氧电位时,钝化膜发生破裂,电流密度显著增加,电位向负方向回扫时,电流密度均大于正向电流密度,直至电位负于约-0.5 V,钢丝电流密度才接近于0.

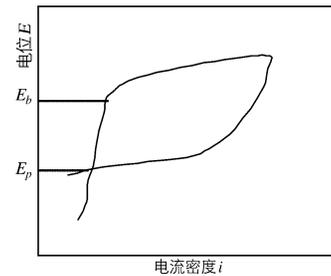


图1 具有活化-钝化行为阳极极化曲线
Fig. 1 Schematic of anode polarization curve with activation-passivation behavior

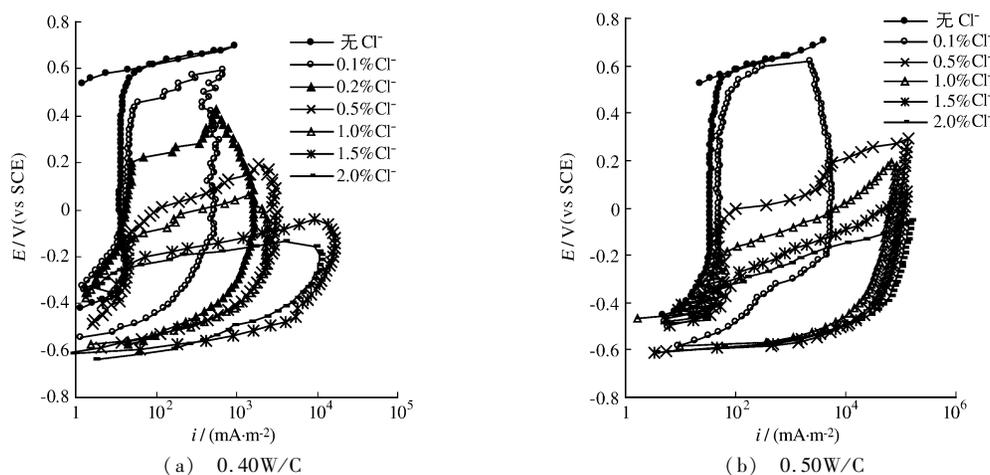


图2 砂浆中高强钢丝的阳极极化曲线

Fig.2 The anode polarization curves of prestressing wire in mortar

砂浆中氯离子含量越高,钝化膜破裂的点蚀电位和修复电位越负.混凝土中钢片的阳极极化曲线具有类似的特征(见图3).

由图2得到的高强钢丝在砂浆中点蚀电位和修复电位随氯离子含量的变化及由图3得到的钢片在混凝土中点蚀电位和修复电位随氯离子含量的变化见图4.

由图4(a)和(b)可见,上述2种水灰比砂浆中,钢丝的点蚀电位和修复电位均随砂浆中氯离子含量的增加而变负.点蚀电位在氯离子含量小于0.5%(相对于水泥质量)时变化较快,而后变化缓慢,并基本稳定,但砂浆水灰比不同,该稳定值略有不同,对0.4水灰比砂浆而言约为-0.25V,而0.5水灰比砂浆约为-0.35V;修复电位则在砂浆中氯离子含量大于0.1%时就基本稳定,该稳定值在两种水灰比砂浆中分别约为-0.64和-0.61V.

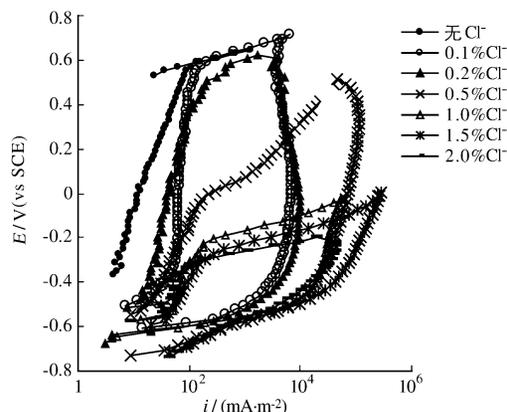


图3 混凝土中钢片的阳极极化曲线

Fig.3 The anode polarization curves of steel slice in concrete

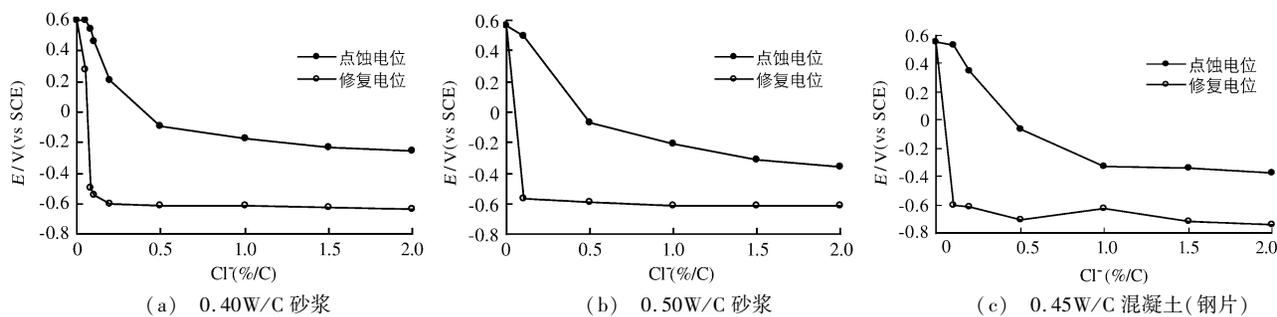


图4 砂浆中钢丝和混凝土中钢片点蚀电位和修复电位随氯离子含量的关系

Fig.4 Variation curves of breaking potential and rehabilitation potential with Cl⁻ content of prestressing wire in mortar and steel slice in concrete

由图4(c)可见,钢片在0.45水灰比混凝土的点蚀电位和修复电位随混凝土中氯离子含量的变化与预应力钢丝在砂浆中相类似,即点蚀电位和修复电位随砂浆中氯离子含量的增加而变负,初期变化较快,而后变

化缓慢,并基本稳定.两者稳定值分别约为-0.38 V 和-0.74 V.

3 种体系中点蚀电位和修复电位有所不同.有关研究表明,钢材钝化膜的破裂,不仅与氯离子含量有关,还与介质的 pH 值有关^[10].为此测量了 3 种介质的 pH 值(见图 5).

从图 5 可见,钢丝/钢片的点蚀电位和修复电位的大小与所处介质的 pH 值有关,pH 值越低,钢丝/钢片点蚀电位和修复电位越负.考虑到混凝土和砂浆 pH 值的影响,将 PCCP 中预应力钢丝和钢板的点蚀电位和修复电位分别取为-0.4 V 和-0.75 V.

高强钢丝在 2 种水灰比砂浆中的阴极极化曲线见图 6.可见,2 种水灰比的砂浆中,不同氯离子含量的高强钢丝阴极极化曲线较为一致,氯离子含量对高强钢丝阴极反应基本没有影响.

高强钢丝在砂浆这种碱性环境中的阴极反应主要是氧的去极化反应,当电位达到约-1.1 V(vs SCE)时,开始发生析氢反应,电流密度增加.由此表明,当阴极保护电位负于-1.1 V 时,高强钢丝在试验条件下会发生析氢反应.因此将高强钢丝的保护电位控制在正于-1.1 V 的范围,就能避免阴极保护过程中高强钢丝的氢脆现象.

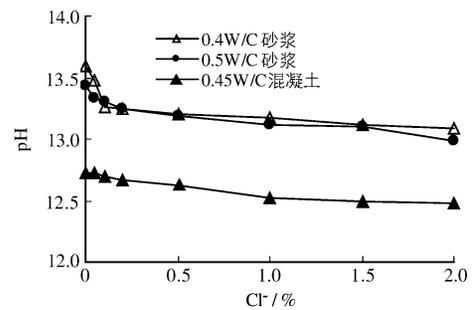


图 5 不同氯离子含量的砂浆/混凝土 pH 值
Fig. 5 The pH values of mortar/concrete with different Cl⁻ contents

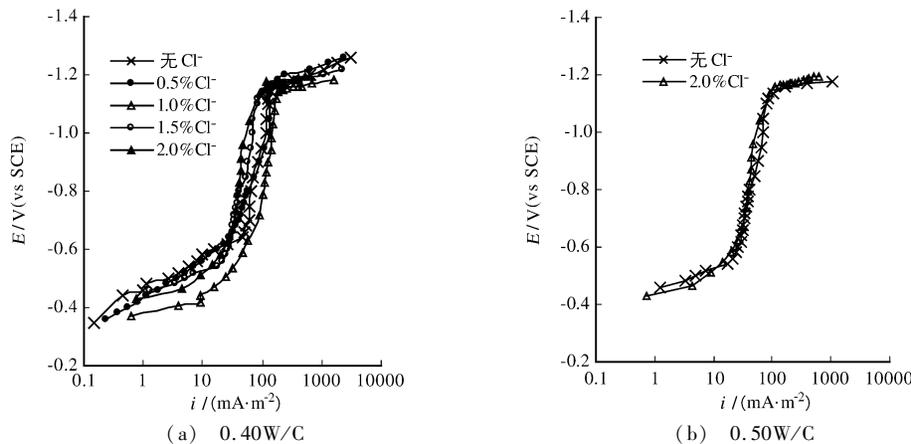


图 6 高强钢丝在不同氯含量砂浆中阴极极化曲线

Fig. 6 The cathode polarization curves of prestressing wire in mortar with different Cl⁻ contents

2.2 各级保护电位下高强钢丝保护度

试验 200 d 时钢丝失重量和各级保护电位下的保护度见表 2.由表 2 可见,钢丝阴极保护电位分别为-450,-650 和-850 mV(vs CSE)时,其保护度均达到 90% 以上,这表明对于尚未腐蚀的钢混结构而言,即使其处于含高氯盐的土壤环境中,保护电位负于-450 mV,就能有效防止砂浆中钢丝的腐蚀.

表 2 不同阴极保护电位下钢丝的保护度

Tab.2 Protection degrees of prestressing wire with different cathode protection potential

水 灰 比	自然状态	保护电位/ mV (vs CSE)					
		-450		-650		-850	
		失重/ g	保护度/ %	失重/ g	保护度/ %	失重/ g	保护度/ %
0.4	0.148 4	0.010 5	92.9	0.008 0	94.6	0.009 5	93.6
0.5	0.148 7	0.012 8	91.4	0.009 3	93.7	0.012 0	91.9

3 结 语

通过在砂浆试件中阴极保护准则试验,初步确定 PCCP 阴极保护的电位准则:尚未发生腐蚀的

PCCP,保护电位在 $-0.40 \sim -1.10$ V(vs SCE);已发生腐蚀的 PCCP,保护电位在 $-0.75 \sim -1.10$ V(vs SCE);对未发生腐蚀 PCCP,保护电位分别为 -450 、 -650 和 -850 mV(vs SCE)时,其保护度达到90%以上.该保护电位准则的提出和采用,可以显著降低牺牲阳极的用量,节约工程造价,同时可避免高强钢丝的氢脆危险.

参 考 文 献:

- [1] BENEDICT R L. Analysis of a corrosion failure on a prestressed concrete cylinder pipe[C]//NACE International. Corrosion'99, San Antonio: 564.
- [2] BIANCHETTI R L. Corrosion and corrosion control of prestressed concrete cylinder pipelines-a review[J]. Materials Performance, 1993, 32(8): 62-66.
- [3] GUMMOW R A. Corrosion and cathodic protection of prestressed concrete cylinder pipe[J]. Materials Performance, 2005, 44(5): 32-33.
- [4] BENEDICT R L, OTT II J G, MARSHALL D H, et al. Cathodic protection of prestressed concrete cylinder pipe utilizing zinc anodes[J]. Materials Performance, 1997, 36, (5): 12-17.
- [5] PERIS M G, GUILLEN M A. Applying cathodic protection to existing prestressed concrete pipelines[J]. Materials Performance, 1995, 34(1): 25-28.
- [6] RP0100-2004, Cathodic protection of prestressed concrete cylinder pipelines[S].
- [7] KLISOWSKI S, HARTT W H. Qualification of cathodic protection for corrosion control of pretensioned tendons in concrete[C]//PAGE C L. Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996: 407-414.
- [8] HALL S C. Cathodic protection criteria for prestressed concrete cylinder pipe-an update[J]. Materials Performance, 1998(11): 14-20.
- [9] 宋诗哲. 腐蚀电化学研究方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988: 12. (SONG Shi-zhe. Corrosion electrochemistry research method[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988: 12. (in Chinese))
- [10] 翟海涛, 鲁道荣. 模拟混凝土孔隙液的 pH 值对钢筋腐蚀的 Cl^- 质量分数的影响[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(2): 186-189. (ZHAI Hai-tao, LU Dao-rong. Effect of pH value on the chloride ion concentration in the simulative concrete capillary solution as steel corrosion occurs[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2009, 32(2): 186-189. (in Chinese))

Research on cathodic protection criteria for prestressed concrete cylinder pipe

ZHU Ya-xian^{1,2}, CAI Wei-cheng^{1,2}, WU Ye^{1,2}, LI Shen-lin^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center on New Materials in Hydraulic Structures, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: The cathodic protection of prestressed concrete cylinder pipe is gradually applied to prevent prestressing wire from corrosion. But, for prestressing wire susceptible to hydrogen embrittlement, safe and effective cathodic protection criterion has not been established yet, particularly for that in new PCCP. In the paper, the protection potential range of prestressing wire is preliminary ascertained by measuring breaking potential and rehabilitation and hydrogen evolution potential of prestressing wire in mortar and steel in concrete with different Cl^- contents, protection potential range for uncorroded steel in PCCP is $-0.40 \sim -1.10$ (vs SCE), that for corroded steel is $-0.75 \sim -1.10$ (vs SCE), and its protection degree is over 90% within the protection potential range.

Key words: prestressing wire in PCCP; cathodic protection; protection criteria