维普资讯 http://www.cqvip.com

环氧粉末涂料涂覆的碳钢在海水中的保护电流密度的测定与分析

上海港湾工程设计研究院　张　羿

[摘　要] 本文讨论了普通熔融结合环氧粉末涂料涂覆的普通碳钢在海水中的腐蚀情况，采用塔菲尔直线外推法测量了各种破损率条件下试件的腐蚀电流密度，最后结合实验结果以及工程中的实际情况，认为：在海港工程钢结构阴极保护的工程设计、计算中，涂覆普通熔融结合环氧粉末涂料的普通碳钢在海水中的初期保护电流密度的取值应在 15~20mA/m² 之间较为科学合理。

[关键字] 钢结构阴极保护　熔融结合环氧粉末涂料　保护电流密度

1　背景介绍

1.1　熔融结合环氧粉末涂层的性能简介

熔融结合环氧粉末于六十年代初在美国开发成功，至今已有近四十年、十多万公里的管道防腐历史。由于其优良的机械性能、抗腐蚀耐老化性能，被广泛应用于陆上、水下、海底等管线的涂装防腐。熔融结合环氧防腐涂料的每个粉末颗粒，都均匀地包含所有组成成份，使涂覆的操作过程以及涂料成膜后的涂层都具有连续、稳定的均匀性。熔融结合环氧防腐涂料经熔融结合涂装，充分熔化流动，并且流平覆盖整个钢管表面，与基体间没有空隙，完全紧密结合。更重要的是，在此过程中发生化学反应，环氧粉末树脂受热固化交联而形成连续的热固性聚合物，并且与钢管形成某种程度的化学结合。熔融结合环氧防腐涂层的这种热固性交联分子结构特点及其与钢管的某种程度的化学键结合特性，决定了它作为防腐涂层体系的优良性能。

近年来在港口、码头、桥梁等大型海洋工程的钢管桩的水中区防腐蚀工程中大量采用了这一新兴的防腐蚀涂料。例如杭州湾某跨海大桥和上海某连岛大桥的钢管桩就采用了这种涂料。普通型环氧粉末涂料：涂层厚度最小为 300μm，参考厚度在 300~600μm 范围的环氧粉末涂层；加强型环氧粉末涂料：涂层厚度最小为 600μm，参考厚度在 600~1000μm 范围的环氧粉末涂层。

1.2　保护电流密度的取值原则

保护电流密度是指被保护结构单位面积上所需的保护电流。它的数值受到多种因素的影响。保护电流密度的大小与金属的种类及金属的表面状态（有无保护膜、漆膜的损坏程度、海生物的附着情况）、介质条件（组成、浓度、温度、流速等）等有关。在海港工程钢结构这类长期浸泡在海水中的阴极保护工程设计中，必须选取适当的保护电流密度值。偏低则钢结构得不到应有的保护；偏高则设计电量增大，增加了设备容量及施工费用。

而且，阴极极化电流密度与阴极极化电位的关系是非线性的，钢材在海水中的自腐蚀电位刚开始极化时所需的电流密度较大，持续阴极极化下，阴极电位逐渐变负，当它维持保护电位时所需的保护电流较小，设计时选择的保护电流密度应按照阴极保护初期所需的电流密度选取，才能在较短的时间内达到保护电位。

对于长期浸泡在海水中的钢管桩而言，普遍采用的防腐蚀方法为：涂层加阴极保护的联合保护法，因此是否有涂层保护、涂层的性能及其破损情况都对保护电流密度的取值有非常重要的影响。例如：对于流动海水，裸

维普资讯 http://www.cqvip.com

钢的保护电流密度取值为 100~150mA/m²；有涂层(破损)取值为 30~50mA/m²；有涂层(完好)取值为 15~30mA/m²。但是对于采用熔融结合环氧粉末这一新兴涂层的普通 Q345 碳钢在海水中的保护电流密度的取值，在交通部 JTJ230—89《海港工程钢结构防腐蚀技术规定》中并没有给出明确的规定，而以前一直将普通涂料的取值沿用到该类涂料上，这样就可能造成极大的浪费。因此，测定普通熔融结合环氧防腐涂层覆涂的普通碳钢在海水中的腐蚀电流密度进而确定其保护电流密度是一项必要的工作，而且腐蚀电流密度的测定结果能进一步精确地规定阴极保护设计初期保护电流密度的取值。

2 实验部分

2.1 实验目的

测定采用普通熔融结合环氧粉末涂料(400μm)覆涂的普通碳钢(Q345)在不同表面破损度的情况下在模拟淡海水中的腐蚀电流密度。

2.2 理论依据

在腐蚀体系的局部阳极反应和局部阴极反应均处于活化极化控制下，极化电流和极化电位之间存在着以下关系式：

$$i=i_k\left[\exp\left(\frac{2.303\Delta E}{\beta_a}\right)-\exp\left(\frac{-2.303\Delta E}{\beta_c}\right)\right] \quad (1)$$

式中：

i_k — 腐蚀电流(即金属的腐蚀速度)；

β_a、β_c — 阳极、阴极的塔菲尔常数；

ΔE — 极化电位($E-E_k$)，$\Delta E>0$ 阳极极化，$\Delta E<0$ 阴极极化。

当$|\Delta E|\geq\frac{100}{n}$mV 情况下，式 1 可以简化为：

$$\Delta E>0 \quad i_a=i_k\exp\left(\frac{2.303\Delta E}{\beta_a}\right) \quad (2)$$

$$\Delta E<0 \quad i_c=i_k\exp\left(\frac{-2.303\Delta E}{\beta_c}\right) \quad (3)$$

即极化处于强极化区。

将式 2、式 3 取对数可得：

$$\mathrm{Lg}i_a=\mathrm{Lg}i_k+\frac{\Delta E}{\beta_a} \quad (4)$$

$$\mathrm{Lg}i_c=\mathrm{Lg}i_k+\frac{-\Delta E}{\beta_c} \quad (5)$$

式 4 和式 5 表示，受活化极化控制的腐蚀体系在强极化区极化电位ΔE和外加电流密度的对数呈线性关系。若$\Delta E=0$(即将 E~Lgi 曲线的直线段外推到极化值等于零，$E\rightarrow E_k$)，就可以得出 $i=i_k$，获得该体系处于稳态时的腐蚀速度。

从理论上讲在半对数坐标上将阴阳极极化曲线的塔菲尔区外推的交点所对应的电位是 E_k(腐蚀电位)，所以该交点对应的横坐标值也等于腐蚀电流 i_k。由此可以得出采用塔菲尔直线外推法对完全由活化极化控制的腐蚀体系进行测量是有着非常严格的理论依据的，因此本实验也将采用将极化曲线中 Tafel 段直线外推到 $E=E_{corr}$ 处的方法来测定腐蚀电流密度。

2.3 实验准备

实验测定各破损度条件下普通碳钢阴极的腐蚀电化学特性。普通碳钢电极的规格为：5cm×5cm×0.1cm，双面，总面积为 50cm²，实验前先对普通碳钢电极进行稀盐酸初步除锈，并且使用砂纸 No.0(120)打磨，蒸馏水冲洗后待用。

实验在电化学工作站(AUTOLAB potentiostat galvanostat, model PGSTAT30)进行极化曲线测定。实验采用三电极体系，即：工作电极、参比电极、辅助电极，分别为：普通碳钢电极、饱和甘汞电极和标准铂电极。参比电极标准电极电位：0.2406V。电解液配比为 3%NaCl 溶液，pH 值为 7.0~7.5，溶液体积为 300ml。室温 28℃。电压扫描范围为-1.0~-0.5V，正向扫描速率为：20mV/s。扫描均重复 3 次，以考察数据的重复性，结果取算术平均值。

维普资讯 http://www.cqvip.com

2.4 实验过程及数据处理

实验采用环氧粉末作为电极绝缘材料。试样中，先将普通碳钢电极表面热喷环氧粉末涂料(400μm)后，凉干，测定 0%破碎度下的极化曲线；然后，取 0.5cm×0.5cm 试样，充分刮除电极表面环氧粉末涂料，使该区域普通碳钢电极板表面充分暴露，测定极化曲线。此时破损度为 0.5%。重复以上步骤，测定破损度分别为 0%、0.5%、1%、2%、4%、8%、16%、32%、50%、100%条件下的极化曲线，结果见图 1。

对所得极化曲线进行 Tafel 分析，曲线见图 2。

3 实验分析

根据上述实验数据可以看出：当试件表面环氧粉末涂料完好无损时，也就是破损度为 0%时，腐蚀电流密度非常小，几乎可以忽略不计；当试件表面环氧粉末涂料的破损度在 10%以下时腐蚀电流密度只要小于 10mA/m² 就可以保证腐蚀电位达到-0.80V；当破损度达到 16%时腐蚀电流密度为 13.179mA/

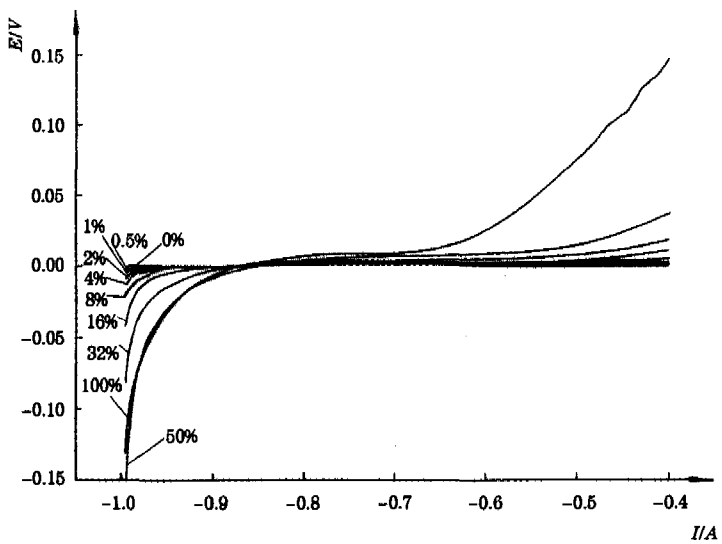


图 1 试块表面环氧粉末涂料在不同破损度条件下的极化曲线图

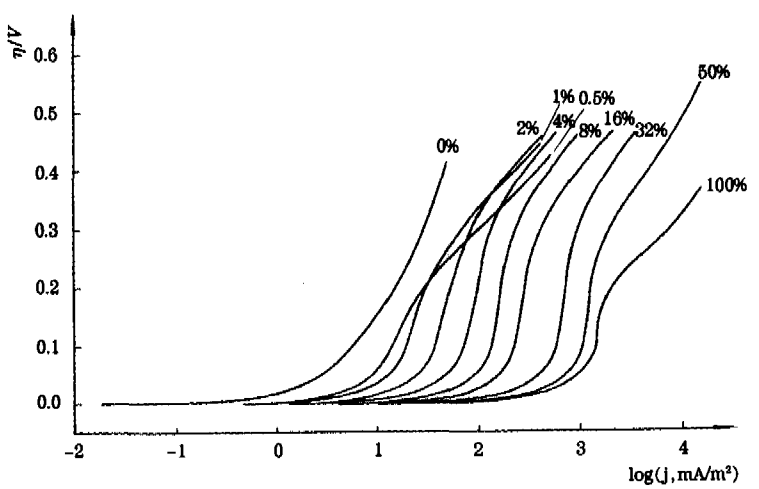


图 2 试块表面环氧粉末涂料在不同破损度条件下的 Tafel 曲线图

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 1　试块表面环氧粉末涂料在不同破损度条件下腐蚀电位与腐蚀电流密度关系表

破损度(%)	腐蚀电位 E_{corr}(V)	腐蚀电流密度 I_{corr}(mA/m²)
0	-0.608	1.437
0.5	-0.825	1.943
1	-0.845	2.899
2	-0.857	3.233
4	-0.857	5.299
8	-0.862	8.224
16	-0.866	13.179
32	-0.866	54.556
50	-0.849	119.105
100	-0.866	138.09

注：相对于饱和甘汞电极

m^2，腐蚀电位可以达到-0.866V；当破损度超过 30%时则需要超过 50mA/m^2 的腐蚀电流密度才能保证试件达到保护电位。注：根据《海港工程钢结构防腐蚀技术规定》当钢结构采用碳素钢或低合金钢时，其相对饱和甘汞电极的保护电位范围应为-1.05~-0.77V。

从以上的实验数据我们可以看出采用普通熔融环氧粉末涂料涂覆的普通碳钢在海水中的腐蚀电流密度比起一般涂料来说其数值要大大下降。但是钢管桩表面涂层的破损度还是对保护电流密度的取值起着非常重要的作用。一般而言，对于涂覆该类涂料的钢管桩可以认为其初期的平均破损率为 5%，末期的平均破损率为 15%。但是，还必须考虑钢管桩在现场实际所处的情况，比如：打桩时对涂层的破坏、泥沙的冲刷、海洋生物的侵蚀、海水 PH 值的变化、海水温度的变化、人为破坏等等，因此在最终选取初期保护电流密度时还必须对上述因素进行综合考虑，适当对其取值进行放大。

4　实验结论

熔融结合环氧粉末涂料作为一种新兴的涂料已经在海港工程钢结构的防腐蚀方面得到了大量的应用，其保护效果是显而易见的。但是不管什么涂料都是有一定的使用寿命，对于码头、桥梁这类使用期比较长的大型海工设施，目前还不可能完全取代传统的阴极保护这一最为安全有效的防腐蚀方法，因此将二者相结合，采用"涂料加阴极保护"的方法是一种比较科学经济的防腐蚀方法，即能大大降低阴极保护所需要的初期保护电流密度，减少牺牲阳极或外加电流的使用量，又能确保其在相当长的一段时间内的安全性。

结合上述实验结果以及工程中的实际情况认为：在海港工程钢结构阴极保护的设计、计算中，涂覆普通熔融结合环氧粉末涂料的普通碳钢在海水中的初期保护电流密度的取值应在 15~20mA/m^2 之间较为科学合理。

（上接第 33 页）

6 个点，大量节约了人工、机械的费用和时间，封底的质量一次性达到设计要求，加快了工程进度。

5　结论

水下不分散混凝土同常规水下混凝土相比，大大简化了了施工工艺，并很大程度上降低了施工风险，综合成本降低可达 30%，工期缩短 20%。该混凝土施工不受水深、施工面大小、混凝土量、生产运输条件等限制，不仅可以用于围堰、沉井的水下封底，同样可以用于围堰、沉井的水下浇筑，以及水下基础、承台等的浇筑，还可以用于码头、大坝、堤防等普通混凝土较难施工的水下工程施工。