

区域性海底沉积物腐蚀研究进展

段继周 马士德 黄彦良

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 综述了海底沉积物腐蚀研究的内容及其进展,尤其对海底沉积物腐蚀环境因子、海底沉积物腐蚀机制、金属在海底沉积物中的腐蚀速度测定方法及海底沉积物腐蚀性评价和预测作了重点介绍,探讨了海底沉积物腐蚀研究的发展趋势。

关键词 海底沉积物 腐蚀因子 腐蚀机理 腐蚀速度测定 腐蚀性评价和预测

中图分类号 TE980.41 **文献标识码** A **文章编号** 1002-6495(2001)01-0037-05

STUDY ON REGIONAL SEABED SEDIMENT INDUCED CORROSION

DUAN Jizhou, MA Shide, HUANG Yanliang

(Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT The progress of the study on the regional seabed sediment induced corrosion is reviewed in this paper. Seabed sediment(SBS) induced corrosion is an important part of marine corrosion science. SBS induced corrosion include corrosion factors and correlations between them and SBS corrosiveness, corrosion mechanisms, the methods of determination of metal corrosion rate in SBS and evaluation and anticipation of SBS corrosiveness, etc. The development trend in the future is also discussed.

KEY WORDS seabed sediment, corrosion factors, corrosion mechanisms, determination of corrosion rate, evaluation and anticipation

海底沉积物(seabed sediment)腐蚀是海洋环境腐蚀科学的重要组成部分。从腐蚀的角度,海洋环境被划分为5个腐蚀区带即海洋大气区、浪花飞溅区、潮差区、全浸区、海底泥土(海底沉积物)区,通常认为海洋钢结构物在海底沉积物中的腐蚀是最轻的区带^[1]。但也有研究^[2]表明,由于海底沉积物所特有的复杂腐蚀环境,在不同区域、不同腐蚀环境的海底沉积物中,钢铁的腐蚀速度会相差10倍以上,厌氧细菌存在下的腐蚀甚至使海底管线穿孔。特别是,随着海洋石油的开发和海洋工程的发展,海底油、气、水管道,海底电缆及打入海底的钢桩等海底设施日益增多,客观上要求对海底沉积物的腐蚀环境及钢材在其中的腐蚀行为作全面深入的调查研究,获取钢材在海底沉积物中的腐蚀数据,以便为采油平台、海底管线等的设计和防腐提供科学依据和对策。80年代以来,国内外对区域性海底沉积物作了比较系

统的调查研究^[3-5]。本文对区域性海底沉积物腐蚀研究内容和进展作简要的综述,并探讨海底沉积物腐蚀研究的发展趋势。

1 海底沉积物腐蚀因子

海底沉积物是为海水所覆盖并被海水不同程度浸湿或饱和的特殊土壤,是固、液两相体系,无单独气相存在(本文中的海底沉积物主要是指浅海大陆架区域的表层海底沉积物),它的物理、化学性质既有别于陆地土壤,也有别于岸边盐碱土和潮间带海土,因此,在研究方法上也与陆地土壤的研究方法有所不同。

海底沉积物的腐蚀性决定于其全部腐蚀因子。按其影响腐蚀的方式不同,可大致分为电化学腐蚀因子和微生物腐蚀因子。

1.1 电化学腐蚀因子

电化学腐蚀因子包括海底沉积物的温度、类型(粒度)、电阻率、含盐量、溶解氧、pH等直接与电化学腐蚀有关的腐蚀因子。

温度 影响电化学电极反应动力学过程的重要

国家自然科学基金(49906005)和山东省自然科学基金(97No15)资助项目

收到初稿:1999-09-25;收到修改稿:2000-01-24

作者简介:段继周,男,1972年生,博士生

参数. 温度升高, 加快电极表面和溶液中物质的扩散. 有研究^[6]表明, 海底沉积物的温度变化对钢的腐蚀性有较大的影响. 在实验温度范围内(5~50℃), 腐蚀速率随温度升高而增大, 最大相差近4倍. 另外, 在海底沉积物环境下, 温度对微生物腐蚀也有较大影响.

类型(粒度) 从研究腐蚀的角度, 按海底沉积物的粒度大小不同, 可把海底沉积物分为砂(>0.1 mm)、砂泥混合体(0.1~0.01 mm)、泥(<0.01 mm)3种类型. 海底沉积物类型与钢的腐蚀速率有明显的相关性^[7]. 粒度大, 透水性就强, 与海水(含溶解氧)交换比较容易, 其腐蚀性也较强, 这是氧扩散控制的电学腐蚀特征. 对于钢桩和海底管线, 如果是穿越不同类型的海底沉积物, 还能够产生电偶腐蚀^[8].

电阻率 海底沉积物导电能力的反映. 表层海底沉积物的电阻率一般在几十到几百欧姆·平方厘米范围内变动, 在垂直深度分布上是随海底沉积物深度增加而增大^[4]. 实验测试表明, 电阻率与海底沉积物粒度有关. 粒度越大, 电阻率越大. 电阻率对宏电池腐蚀起着重要作用.

含盐量 指海底沉积物及其间隙水的总盐量及一些对腐蚀作用比较大的离子, 如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等. 含盐量愈高, 电阻率愈小, 腐蚀速率越大. Cl^- 、 SO_4^{2-} 对土壤腐蚀具有显著意义^[9,10]. Cl^- 含量的提高能加快金属的阳极反应速度, 使土壤腐蚀性增大. 在供氧差异引起的腐蚀破坏中, Cl^- 使阳极溶解加速. 在有机质存在和渍水(缺氧)条件下, 通过微生物作用, SO_4^{2-} 能参与阴极去极化反应而加速钢铁的腐蚀.

溶解氧 溶于海水中的氧是重要的去极化剂. 在浅海和大陆架区, 由于浮游植物的光合作用, 表层和底层海水的溶解氧相差不大, 常处于饱和甚至过饱和状态. 虽然如此, 由于无单独气相存在, 仅靠表层海底沉积物与底层海水进行缓慢的物质和能量的交换, 海底沉积物中的氧含量仍是相当有限的. 海底沉积物腐蚀是在贫氧或缺氧状态下进行的. 该状态下的金属腐蚀速度为氧去极化的扩散步骤所控制. 如果不考虑微生物腐蚀的影响, 腐蚀速度是较低的^[7].

pH 值 海水是一复杂的络合体系, 具有相当稳定的 pH 值^[11](大洋海水为 8.0~8.2), 大陆架区和污染海域的 pH 值稍微偏离此值. 海底沉积物的 pH 值与海水趋向一致, 辽东湾、渤海、东海、北部湾表层海底沉积物 pH 值^[4,5] 约在 6.0~10.0 变化范围之间. 在此范围内, pH 值对海底沉积物的腐蚀性

影响是较小的. 但在这种条件下, 有利于厌氧细菌的繁殖和细菌腐蚀的发生.

1.2 微生物腐蚀因子

微生物腐蚀因子主要包括硫酸盐还原细菌(SRB)含量(个/克湿泥)、氢标氧化还原电位(E_{h_7}), 硫电位(E_s), $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 及有机物含量等与微生物腐蚀有密切关系的腐蚀环境因子.

SRB 含量 在海底沉积物环境下, 微生物腐蚀主要是 SRB 的腐蚀. 海底沉积物中一般都含有 SRB, 不同海区的 SRB 含量是有差异的. 辽东湾表层海底沉积物 SRB 含量为 $0\sim 4.6 \times 10^2$ 个/克湿泥, 南海珠江口东部其含量为 $0\sim 9.3$ 个/克湿泥^[4,5]. 关于海底沉积物中 SRB 含量对金属腐蚀的影响有不少研究报告^[12~14]. 研究结果均表明, SRB 能够加快金属的腐蚀. Fischer 认为, 在 SRB 大量繁殖下, 腐蚀速率可增加 6~7 倍, 甚至 15 倍以上. 叶德赞的研究表明, 埋置于海泥中的 4 种金属, 其腐蚀速率和 SRB 含量成正比. 张经磊的研究结果表明, 有菌海泥中 A3 钢、16Mn 钢和 20# 钢的腐蚀速率分别是无菌海泥中的 5.5、4.0 和 4.5 倍.

E_{h_7} , E_s , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 及有机物含量 这几个因子均与 SRB 腐蚀密切相关. SRB 的适宜生长需要一定的条件, 即 $\text{pH}=6\sim 9$, $t=25\sim 35^\circ\text{C}$ 及一定量的水、硫酸盐、有机物和 Fe^{2+} 的缺氧条件下. 海底沉积物通常能满足这样的条件. 这些条件可由海底沉积物的氧化还原状态反映出来. 还原状态下的 SRB 腐蚀是相当的严重的, 一般以 E_{h_7} 来表示土壤的氧化还原状态. 通常认为 -200 mV 以下缺氧条件下腐蚀严重(美国 ANSI 标准). 最近又提出一个综合评价海底沉积物氧化还原性的函数—氧化还原度(ROD)^[15], 定义 $\text{ROD} = E_{h_7} \cdot E_s (\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})^{1/3} / (Q \cdot \text{Corg.})$ ($Q \cdot \text{Corg.}$ 指沉积物粒度, 用含水率 Q 和有机碳 Corg. 表示).

除上述电学和微生物腐蚀因子影响海底沉积物的腐蚀性外, 由海底流等引起的表层海底沉积物的运动也是不可忽视的因素. 沉积物的运动能够引起钢桩和海底管线的磨蚀, 还可能由于泥沙的冲击使其产生应力腐蚀.

这些因素与海底沉积物腐蚀性之间的相关性, 以及它们彼此之间的相关性及其作用大小因海域、材料而异, 除了用统计方法研究其相互关系外, 进行腐蚀机制方面的研究, 可以更明确其关系, 这也是准确、快速、简便评价海底沉积物腐蚀性所必需的.

2 海底沉积物腐蚀机制

根据海底沉积物腐蚀环境的特点, 结合陆地土

壤腐蚀机制,可把海底沉积物腐蚀分为电化学腐蚀和微生物腐蚀(MIC)来探讨其腐蚀机制。

2.1 电化学腐蚀

在海底沉积物腐蚀中,若不考虑 MIC 腐蚀的影响,则氧的扩散控制作用是决定钢铁腐蚀速度的主要因素。由于海底沉积物中溶解氧的有限及交换的缓慢,钢铁在其中的腐蚀速度几乎完全决定于氧的阴极去极化作用,钢铁的腐蚀速度是相当低的。由电化学作用引起的腐蚀有两种类型是需要引起注意的,即电偶腐蚀和局部腐蚀。

电偶腐蚀 对于大尺寸的海底设施如海底管线等,当其穿越不同类型的海底沉积物时,由于海底沉积物中溶解氧含量不均,造成钢铁在不同类型的海底沉积物间产生较大的电位差,产生腐蚀电流,形成电偶腐蚀。有研究表明^[8],长期埋设于海土中的钢结构,处于较小粒径土质中的部分是阳极,受到一定程度的加速腐蚀作用(腐蚀速度为对照试样的 3 倍),处于较大粒径土质中的部分作为阴极受到一定程度的保护。

局部腐蚀 主要是由于供氧差异引起的自催化效应腐蚀^[10],如孔蚀,缝隙腐蚀等。其根本原因是在富氧区和缺氧区各金属表面上阳极电流密度与阴极电流密度不平衡,由于电极反应产物和电迁的影响,引起局部腐蚀的自催化过程。

要弄清海底沉积物腐蚀的机制,对其腐蚀产物作进一步的分析研究是有必要的。钢在海泥中的腐蚀产物(锈层)经穆斯堡尔谱和 X-射线衍射分析^[16,17]后结论为:(1)海泥腐蚀初期氧的扩散作用对腐蚀速度影响不大,而当有锈层存在时,氧的扩散控制作用明显增大。(2)碳钢及低合金钢在海泥中的锈层相组成不同于在海水中形成的锈层,只有一层锈,并粘结有海泥。碳钢的海泥锈层中 α -FeOOH 的含量明显少于海水锈层中的含量,而低合金钢的海泥锈层中几乎没有 α -FeOOH。

2.2 微生物腐蚀(MIC)

海底沉积物中微生物腐蚀主要是厌氧细菌 SRB 的腐蚀。海底沉积物处于贫氧或缺氧状态下,由 SRB 引起的腐蚀通常是不可忽视的^[18],SRB 所造成的腐蚀一般是各种局部腐蚀(其结果甚至使管线穿孔),腐蚀产物通常是黑色的带有奇臭的硫化物。人们对 SRB 腐蚀的机制进行了大量的研究,并不仅局限于 SRB 在土壤中的腐蚀。

荷兰人库尔(Kühr)等^[19]首先认识到 SRB 在土壤腐蚀中的重要性。他们认为,在缺氧条件下,SRB 利用氢把硫酸盐还原成硫化氢(H_2S),其产物再与

铁离子(Fe^{2+})反应生成 FeS 。以后更仔细的研究基本认同了以上结论,但并不认为氢是必需的电子传递者。R. A. King 指出,硫化物与铁离子反应生成 FeS_x , FeS_x 紧附于钢铁表面构成原电池。在 SRB 作用下,这种原电池能够产生并继续下去。 FeS_x 运送电子的能力类似于半导体。1971 年 R. A. King^[20]在《自然》杂志上发表了上述 SRB 腐蚀的机理及其图解。在 SRB 作用下,钢铁的均匀腐蚀速率大于或等于 0.1 mm/a,而孔蚀速率还要高得多,可达 0.7 mm/a,这决定于生成的 FeS_x 的密度。M. Mollica 等的观察结果表明,厌氧区氧气的进入能够使钢铁的腐蚀速率大大增加。T. R. Jack 仔细研究^[21]了这种情况。通过室内含 SRB 的土壤模拟埋片,应用 X-射线衍射和分析技术,证明在 SRB 存在下缺氧和充气条件的交替进行,能够大大加快钢铁的腐蚀,原因是 FeS_x 被氧化生成了元素 S, S 的存在使钢铁的腐蚀速率达到 1 mm/a。他还认为,在微生物腐蚀的过程中,同时也包含了电化学腐蚀过程。国内林海潮等对元素 S 的腐蚀电化学行为的研究结果表明^[22],元素 S 作为阴极去极化剂与裸露金属构成电偶发生严重的局部腐蚀,能够迅速导致油管等腐蚀穿孔。H. Tributsch 等从硫化物能量循环的角度研究^[23]了微生物腐蚀的机制,并应用高分辨率电子显微镜(TEM)等手段进行了观察分析。结果认为,SRB 把 SO_4^{2-} 还原成 H_2S , H_2S 与铁离子生成 FeS_x ,而硫化物氧化细菌又把 FeS_x 氧化成单质 S 甚至 SO_4^{2-} ,从而造成腐蚀的不断进行和钢铁的腐蚀破坏。

微生物腐蚀所造成的危害是十分严重的。SRB 腐蚀不仅使 Fe 转变为 FeS_x ,使其产生均匀腐蚀和点蚀,而且其产生的 H_2S 气体能造成高强度钢铁材料的硫化物应力腐蚀开裂。另外, H_2S 气体的强毒性还可能危及人身安全,这在海底管线及海上油田腐蚀中最为明显。

3 海底沉积物中金属腐蚀速度测定方法

海底沉积物中金属的腐蚀速度及其测定方法可能是人们最关心的问题。因为金属的腐蚀速度及其测定方法与海底工程设计直接相关联,是一个非常具有实际意义的问题。目前,海底沉积物中金属腐蚀速度测定方法可分为室外实海测定和室内测定(包括室内模拟埋片及电化学加速测定)方法。

3.1 室外实海测定方法

室外实海测定方法类似于陆地土壤的实地埋片法。五、六十年代,美国人在太平洋、大西洋的一些海域,把由 Fe 等金属及它们的合金制成的长尺或钢桩

打入海底并延伸到海洋大气区,通过腐蚀失重测定获得了多种金属在所试验海域各个腐蚀区带(包括海底沉积物)的基础腐蚀数据^[11]。德、日、前苏联等国家也做过类似工作。另外,“移植埋片”法^[4]较传统的腐蚀失重测定方法简便些,能获得金属在海底沉积物中较准确的腐蚀速度。人们已发展了很多室内电化学加速测定方法,并制造出了有关测试仪器,有的可用于现场原位测定^[5]。

3.2 室内测定方法

包括室内模拟实验方法及电化学加速测定方法。室内模拟实验方法是运用一个实验装置,模拟海底沉积物腐蚀环境的方法。它和已建立的海洋腐蚀实验站相结合,利用经典的腐蚀科学研究方法,可以开展对近海海底沉积物的系统研究工作,能够获得金属腐蚀速度的近似数据。电化学加速测定方法能够迅速、有效的测定金属的瞬时腐蚀速度,有多种电化学方法用于陆地土壤中金属腐蚀速度的测定^[24-26]。已用于海底沉积物金属腐蚀速度测定的有线性极化电阻法、动电位极化曲线法^[27,28]等。另外,弱极化曲线技术和电化学交流阻抗谱(EIS)技术,具有测量时间短、对体系干扰小、并能获取被测体系的多个电化学动力学参数等优点,有望在海底沉积物腐蚀研究中获得应用。

已有的电化学方法多可用于海底沉积物中金属腐蚀速度的加速测定。但仍有许多方面需要改进和完善,如海底沉积物是介质电阻较大的体系,如何消除介质电阻(ohmic drop)的影响是一个很实际的技术问题,关于这个问题已有探讨^[29,30]。另外,由于海底沉积物腐蚀环境的复杂性,海底沉积物中一般都含有SRB等微生物,因此室内短期的电化学加速测定实验还不能与实际环境下的钢铁腐蚀速度完全相吻合,还应该配合理片法进行实验。

4 海底沉积物腐蚀性评价和预测

海底沉积物腐蚀性评价和预测是在腐蚀失重法的基础上,试图通过测定某海域海底沉积物的单项或多项腐蚀因子来判定和预测该海域海底沉积物腐蚀性的强弱,而不必去直接测定金属在该海域海底沉积物中的腐蚀速度。

近年来,国内外对陆地土壤的腐蚀性调查与评价研究相继增加。从单项评价指标(土壤电阻率、含水量、含盐量、氧化还原电位)发展到多项综合评价指标(德国DVGW标准、美国ANSI标准等)^[9]。1988年以来,国外对陆地土壤腐蚀性的调查评价已利用数学模型预测陆地埋设管道的使用寿命^[31]。国

内许多学者也提出了多种数学模型来评价和预测土壤的腐蚀性,如模式识别方法、模糊聚类分析方法、模糊灰色理论、人工神经网络方法等^[32-35]。

海底沉积物作为一种特殊的土壤,对区域性海底沉积物进行有目的的腐蚀性调查、评价和预测,对于预防海底设施的灾害性腐蚀破坏的发生具有战略性意义。国外关于海底沉积物腐蚀性调查与评价的公开文献较少,King利用英国北海(North Sea)有关水文、地质因子资料,通过因子加权分析对北海海底沉积物腐蚀性进行了区域性评估^[3]。Fischer报道了钢铁在表层沉积物中腐蚀速率的调查结果和SRB对腐蚀的影响^[36]。随着我国海洋石油事业的发展,有关我国大陆架海域海底沉积物腐蚀性调查与评价的报道相继出现。通过对辽东湾海底沉积物的腐蚀环境因子调查分析,采用因子加权法对辽东湾海底沉积物的腐蚀性进行了评价与区划,并绘制了辽东湾表层沉积物腐蚀性图谱^[4]。通过对北部湾石油开发区海底沉积物腐蚀环境因子的调查分析,提出了具有定量性质的海底沉积物腐蚀性的二元评价法^[37],并绘制了北部湾海域的腐蚀性图谱。通过对南海珠江口东部海底沉积物腐蚀环境因子的调查分析,李祥云等采用多变量统计分析方法对该海域海底沉积物腐蚀性进行了评价与区划^[5]。

对区域性海底沉积物腐蚀性的评价和预测,从定性的因子加权法、腐蚀图谱法,到具有定量性质的二元评价法和多变量统计分析方法,区域性海底沉积物腐蚀性的评价和预测有了很大发展。但目前由于实际调查的海域有限,人们所掌握的海底沉积物腐蚀数据样本有限,有的样本数据有缺漏。这就需要选择合适的数学模型,并在样本数据的预处理、训练集和学习集的选择、特征参数和关键参数的抽取上下功夫,以期建立合适的模型,对区域性海底沉积物的腐蚀性作出合理的评价和预测。这需要进一步探索。

5 结束语

海底沉积物腐蚀因子、腐蚀机制、金属在海底沉积物中的腐蚀速度测定方法及海底沉积物腐蚀性评价和预测研究有其内在统一性。除了具有各自理论上的意义外,实践上最终还是用于评价和预测区域性海底沉积物的腐蚀性,为海底工程设计提供依据。海底沉积物腐蚀研究仍在发展之中,有些问题尚需要深入研究,如腐蚀因子的原位(in-situ)测试技术,海底沉积物中微生物腐蚀机制及其对海底管线等的腐蚀影响的研究,海底沉积物腐蚀性评价和预

测的建模研究等等。另外,海底管线的阴极保护电位的遥测技术,平台、导管架的阳极保护技术,海底泥温的测试技术等都与海底沉积物腐蚀相联系,也需要其数据和知识。

随着我国海洋事业的发展,新的海域正在不断被开发,我们应积极行动起来,配合海洋工程调查,获取有关海洋环境腐蚀因子(含海底沉积物)的宝贵数据,积极建立海洋环境腐蚀数据库,为我国海洋科学事业的发展作出贡献。

参考文献:

- [1] 侯保荣. 海洋腐蚀环境理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1998. 6
- [2] Schmide R L. Pacific Northeast Tab. 1980, 45
- [3] King R A. Mater. Perf., 1980, 19(1): 39
- [4] 马士德, 郑国安. 海洋科学集刊, 1995, 36: 155
- [5] 李祥云, 季明棠, 王恒岐等. 热带海洋, 1997, 16(3): 90
- [6] 马士德, 朱素兰, 孙家瑞. 海洋科学, 1995, 4: 20
- [7] 李言涛, 侯保荣. 海洋与湖沼, 1997, 28(2): 179
- [8] Zhang Jinglei, Hou Beorong, Guo Gongyu. Chin. J. Oceanol. Limnol., 1993, 11(2): 172
- [9] 宋光铃. 腐蚀电化学若干体系的数学模型研究(博士论文). 沈阳: 中科院金属腐蚀与防护研究所, 1993, 190
- [10] 曹楚南. 腐蚀电化学原理. 北京: 化学工业出版社, 1985. 316
- [11] M. 舒马赫(李大超, 杨荫等译). 海水腐蚀手册. 北京: 国防工业出版社, 1985. 8
- [12] Fischer K P. Mater. Perf., 1981, 20(10): 41
- [13] 叶德赞, 梁子原, 姚瑞梅等. 海洋学报, 1985, 7(5): 650
- [14] 张经磊, 侯保荣, 刘玉珊等. 海洋与湖沼, 待发表
- [15] 宋金明, 李鹏程, 侯保荣等. 中国青年科学技术论文精选. 北

- 京: 海洋出版社, 1994. 803
- [16] 于旋, 王元玺, 火时中. 海洋工程腐蚀与防护学术交流会议文集. 青岛, 1987, 6
- [17] 侯保荣, 李言涛, 李久青. 海洋科学集刊, 1998, 13: 119
- [18] Ma Shide, Huang Yanliang. Chin. J. Oceanol. Limnol., 1998, 16(3): 253
- [19] Von Wohlzogen Kühr, Van der vlugt. Water (The Hague), 1934, 18: 117
- [20] R A King, J D A Müller. Nature, 1971, 233: 491
- [21] Jack J R, Wilmott M, Stockdale J, et al, Corrosion, 1998, 54(3): 246
- [22] 林海潮, 赵吉翔, 李瑛等. 中国腐蚀与防护学会建会十五周年学术年会论文集. 北京: 化学工业出版社, 1994, 101
- [23] Tributsch H, Rojas - Chapana J A, Bartels C C, et al. Corrosion, 1998, 54(3): 216
- [24] Scully J R, Bundy K J. Mater. Perf., 1985, 24(4): 18
- [25] 常守文, 银耀德, 张莉华等. 中国腐蚀与防护学报, 1988, 8(1): 37
- [26] 磨红雁, 宋光铃, 曹楚南等. 腐蚀科学与防护技术, 1996, 8(3): 179
- [27] 季明棠, 陆长山, 杨芳英等. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 665
- [28] Ma Shide, Zheng Guoan, Li Yantao. Chin. J. Oceanol. Limnol., 1996, 14(2): 154
- [29] Diard J P, LE Gorrec B, Montella C. Corros. sci, 1998, 40(2-3): 495
- [30] 中国腐蚀与防护学会. 腐蚀科学与防腐蚀工程技术新进展. 北京: 化学工业出版社, 1999. 568
- [31] 片野幸雄, 西崎耕造, 岩松润吉. 防食技术, 1988, 37: 205
- [32] 翁水基, 李相怡. 腐蚀科学与防护技术, 1994, 6(2): 153
- [33] 宋光铃, 曹楚南. 中国腐蚀与防护学报, 1993, 13(4): 303
- [34] 郭稚孤, 金名惠, 桂修文. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(3): 258
- [35] 敬加强, 毛宏光. 天然气工业, 1998, 18(4): 77
- [36] Fischer K P. ASTM, 1989, 119 - 132 (ASTM - STP 1013)
- [37] 马士德, 黄彦良, 侯保荣等. 海洋科学集刊, 1999, 14: 60

(接第 48 页)

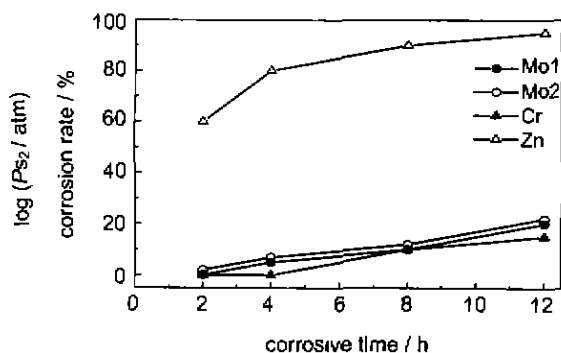


Fig.5 NSS results of conversion coatings under different treatment conditions and pure Zn coating

3 结论

(1) 钼酸盐钝化工艺最佳范围为: 钼酸钠 5~25

g/L, 适量磷酸盐及添加剂, pH 值 2~5, 钝化处理温度 30~70℃, 时间 10~60 s, 在该工艺范围内, 钼酸钠浓度越高, pH 值越大, 钝化处理温度越高, 则钝化成膜速度越快. 钝化处理时间越长, 则钝化膜越厚.

(2) 采用该工艺可获得适于热镀 Zn 颜色要求的较为均匀的淡黄或浅蓝色钝化膜, 其耐蚀性与铬酸盐钝化膜相当.

参考文献:

- [1] Bruce R W Hinton. Metal Finishing, 1991, 89(9): 55
- [2] WO Pat. 93/10278. 1993
- [3] US Pat. 4385940, 1983
- [4] 卢锦堂, 宋进兵, 陈锦虹等. 材料保护. 1999, 32(3): 48
- [5] Tang P T, Bech - Nielson G, Moller. Plating and Surface Finishing, 1994, 81(11): 20
- [6] Tang P T, Bech - Nielson G, Moller. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1997, 75(4): 144
- [7] 杨熙珍, 杨武. 金属腐蚀电化学热力学: 电位 - pH 图及其应用. 北京: 化学工业出版社, 1991. 231