综 述

低合金钢焊接接头腐蚀性能研究进展

赵兵兵^{1,2}, 张慧霞², 贾瑞灵¹, 侯健²

- (1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051;
2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所青岛分部 海洋腐蚀与防护实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 详细介绍了低合金钢焊接接头的主要腐蚀破坏形式, 包括应力腐蚀、氢致开裂、腐蚀疲劳和电偶腐蚀等, 并探讨了焊后热处理和焊接热输入2项工艺参数对焊接接头耐蚀性的影响, 提出了提高其耐蚀性能的措施。同时还对焊接接头腐蚀行为的研究方法作了简要概述, 并提出了今后的发展方向。

关键词: 低合金钢; 焊接接头; 腐蚀; 电化学

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.014

中图分类号: TG171 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)06-0060-05

Research Progress on the Corrosion Behavior of Low Alloy Steel Weldments

ZHAO Bing-bing^{1,2}, ZHANG Hui-xia¹, JIA Rui-ling¹, HOU Jian²

- (1. College of Material Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT: In this paper, the corrosion types of the low alloy steel weld joint including stress corrosion cracking, hydrogen induced cracking, corrosion fatigue and galvanic corrosion, were introduced in detail. The effects of post-weld heat treatment and weld heat input on the corrosion of weld joint were discussed. Some measures were proposed to improve the corrosion resistance of the weld joint. Furthermore, the study methods of weld joint corrosion and the future prospects were also presented.

KEY WORDS: low alloy steel; weld joint; corrosion; electrochemistry

低合金钢中合金元素含量低于5%左右, 在本增加很少的情况下通过添加1种或几种元素可以使其具有强度高、韧性好、比重小和易焊接等优异的性能^[1-2]。近年来, 随着我国制造业的迅速发展,

收稿日期: 2013-07-13; 修订日期: 2013-08-22

Received: 2013-07-13; Revised: 2013-08-22

作者简介: 赵兵兵(1989—), 男, 辽宁铁岭人, 硕士, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: ZHAO Bing-bing(1989—), Male, from Tieling, Liaoning, Master, Research focus: corrosion and protection.

低合金钢在船舶、桥梁、石油管道、化工、汽车等行业的应用越来越广泛^[3]。焊接结构是低合金钢主要的应用形式,在焊接时接头容易出现气孔、夹杂、咬边、未熔合和未焊透等缺陷和残余应力。在使用过程中,由于缺陷和残余应力的存在,低合金钢焊接接头容易产生应力腐蚀、氢致开裂、腐蚀疲劳和电偶腐蚀等局部破坏,可能导致整个构件失效,从而造成人身及财产的巨大损失。文中针对低合金钢焊接接头腐蚀问题详细介绍了低合金钢焊接接头的腐蚀类型、影响因素、腐蚀研究方法及其研究现状。

1 低合金钢焊接接头的腐蚀类型

低合金钢焊接接头的缺陷和残余应力是不可避免的,尤其是残余应力。残余应力增加将促进焊接接头的应力腐蚀开裂、氢致开裂和腐蚀疲劳,同时气孔、咬边等缺陷在有外力或残余应力存在时会产生应力集中,也会促进焊接接头的应力腐蚀开裂、氢致开裂和腐蚀疲劳。由于低合金钢焊接接头受冶金因素和焊接工艺的影响,因此各个区域(母材、焊缝和热影响区)的电化学性质有所不同。随着差异性的增加,电偶腐蚀的倾向会随之增加。

1.1 应力腐蚀

应力腐蚀是指金属材料在固定拉应力和腐蚀介质的共同作用下发生破裂,拉应力包括外力、热应力或残余应力^[4]。应力腐蚀开裂的产生与冶金、环境和应力状态等因素有关^[5]。B. Lu^[6]等人用慢应变速率拉伸(SSRT)试验研究了经过塑性预应变的X70管线钢焊缝在近中性溶液中应力腐蚀敏感性,其应力腐蚀敏感性顺序为:热影响区>焊缝>母材。塑性预应变会增加X70管线钢在近中性环境下应力腐蚀裂纹敏感性,预应变引起的应力腐蚀可能与屈服强度的增加有关。Q. Peng^[7]等人采用预制裂纹的双悬臂梁来研究镍基合金182与低合金钢A533B异种金属焊接接头熔合区的应力腐蚀开裂行为,结果表明:裂纹扩展被熔合区的点蚀中断,裂纹的再扩展是点蚀前端沿着晶界优先氧化的结果。由上述可知,在焊接过程中,通过改善构件的应力状态和接头的冶金因素可以提高其抗应

力腐蚀的能力。

1.2 氢致开裂

氢致开裂是指含氢材料在内压或外加载荷作用下引起的脆性开裂。氢致开裂敏感性与材料所处环境和冶金参量(如缺陷分布等)关系密切^[8]。H. W. Lee^[9]通过测量焊缝中扩散氢的含量研究了不同预热及层间温度对船用E32钢厚板焊接接头氢致开裂的影响,结果表明:预热及层间温度控制在100~120℃时有益于焊缝中扩散氢的逸出和焊接接头残余应力的降低,并且可以获得大量的针状铁素体,提高焊接接头的力学性能,从而降低氢致开裂的敏感性。J. Kittel^[10]等人研究了管线钢在酸性环境中的氢致开裂,发现在硫化氢偏压和pH较高的情况下,氢的扩散系数较低,使得焊缝中的氢含量增加,促进了氢致开裂的萌生。研究表明,控制材料所处的环境和冶金参量是降低氢致开裂敏感性的有效方法。

1.3 腐蚀疲劳

腐蚀疲劳是指金属材料在循环载荷或脉动载荷和腐蚀介质共同作用下产生的断裂或破坏。对于焊接接头而言,在焊接过程中产生的应力和缺陷是疲劳裂纹萌生和扩展的主要原因。当构件处于腐蚀环境中,裂纹的扩展速率更高,最终导致构件失效^[11-12]。苗伟^[13]研究了X70管线钢焊接接头在H₂S环境中、固定加载频率、不同应力比条件下腐蚀疲劳裂纹的扩展速率,结果表明:在相同试验条件下,热影响区的腐蚀疲劳裂纹扩展速率比母材高。随着应力比的增加,热影响区与母材的疲劳裂纹扩展速率增大,这是由于应力比增加使得裂纹尖端累积塑性应变增大,加速了裂纹尖端新鲜表面的生成和钝化膜破裂,加速了阳极溶解,进而加速了腐蚀疲劳裂纹的扩展。有研究表明,焊缝咬边缺陷会缩短低合金钢A36对接接头在3.5% NaCl溶液中的疲劳寿命^[14],加快焊接接头的失效。这是因为在缺陷处易产生应力集中,从而在缺陷周围产生微裂纹,腐蚀介质进入裂纹中,促进了疲劳裂纹的扩展。因此,为了增加构件的疲劳寿命可以通过改善焊接工艺来减少焊接接头的缺陷和降低残余应力。

1.4 电偶腐蚀

在腐蚀介质中,如果焊接接头各区的电极电位存在差异,就可能造成接头各区之间的电偶腐蚀,电位差越大,越容易发生电偶腐蚀^[14]。范舟^[15]等人研究了X70管线钢焊接接头在3.5%(质量分数)NaCl溶液中的腐蚀行为,结果发现热影响区的电位最低,在热影响区与母材和焊缝组成的偶对中热影响区均作为阳极腐蚀得到加速。T. Hemmingsen^[16]等人研究了碳钢焊接接头母材、热影响区和焊缝之间的电偶腐蚀行为,发现电解质溶液的pH值会改变其电偶偶对的极性,随着pH值的降低,电偶偶对的阳极由热影响区变为母材。刘成虎^[17]等人研究了X70管线钢焊接接头不同阴/阳极面积比对电偶腐蚀效应的影响,发现当焊缝作为阴极时会形成小阴极大阳极的电偶对。由于焊缝面积较小,电偶腐蚀并不明显,因此,可以通过改善焊接工艺来提高焊缝、热影响区、母材的电化学均一性,减小焊缝、热影响区和母材间的电位差,可降低电偶腐蚀敏感性。

2 焊接工艺对腐蚀的影响

2.1 焊后热处理的影响

由于焊接使得工件的温度分布不均匀,焊后容易产生残余应力,残余应力对构件耐应力腐蚀、氢致开裂和疲劳腐蚀性能有很大影响。同时焊后热影响区、焊缝和母材之间存在一定的电位差,容易发生电偶腐蚀,因此根据母材选取适当温度进行焊后热处理是必要的。K. Moon^[18]等人研究了RE36钢在焊后未经热处理和选取550,600,650℃热处理后焊接接头的耐蚀性,结果发现,经过550℃热处理后焊缝、母材和热影响区之间的电位差最小,母材和焊缝的电位比热处理前略有负移。S. Ravi^[19]等人对比研究了低合金高强度钢HLSA-80经过不同热处理工艺与未经热处理的焊接接头的疲劳性能,结果表明:焊后热处理会降低焊接接头的残余拉伸应力,这对提高焊接接头的疲劳性能有很大的帮助,同时经过热处理后材料伸长率增加会降低氢脆敏感性。这说明焊后热处理不但可以降低焊接接头残余应力,还可以提高焊缝、热影响区和母材的电化学均一性,有效降低了应力腐蚀、氢致

开裂、腐蚀疲劳和电偶腐蚀的敏感性。

2.2 焊接热输入的影响

焊接热输入是指焊接单位长度焊缝所需的能量。适当地增加焊接热输入不但可以提高生产效率,还可以降低焊缝和热影响区的腐蚀速率。S. P. Kumaresh Babu^[20]等人用埋弧焊在4种不同热输入条件下对碳钢进行焊接,浸入100℃的盐酸介质中研究其焊缝及热影响区的腐蚀特性,结果发现随着焊接热输入的增加,焊缝和热影响区的腐蚀速率降低。黄安国^[21]等人用埋弧焊研究了焊接热输入为2.79 kJ/mm和4.96 kJ/mm时16Mn钢焊接接头在3.5% NaCl溶液中的腐蚀行为,发现在热输入为2.79 kJ/mm时焊接接头的耐蚀性较好。上述研究者选取的焊接热输入仅适用于其选用的试验材料和焊接方法,在实际应用中可根据母材和焊接方法选择焊接热输入,以提高焊接接头的耐蚀性。

3 焊接接头的腐蚀研究方法

3.1 表面分析及形貌观察方法

目前,对焊接接头进行表面分析及形貌观察主要采用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、激光拉曼光谱(LRS)、能谱分析(EDS)、傅里叶红外光谱分析仪(FTIR)等^[17,22-24],以上表面分析方法能够对试样表面的微观结构、微观腐蚀形貌进行观察和腐蚀产物分析,通过微观结构特征变化、腐蚀形貌特征和腐蚀产物组成来评定焊接接头的耐蚀性。Q. Peng等人^[7]用扫描电子显微镜、透射电子显微镜和能谱分析方法研究了镍基合金182与低合金钢A533B异种金属焊接接头熔合区的应力腐蚀开裂行为,发现镍的氧化物主要分布在裂纹壁上,使裂纹壁的腐蚀电位正移,从而形成了裂纹壁大阴极裂纹尖端小阳极的偶对,使裂纹尖端的金属溶解加速。胡丽华^[23]等人采用扫描电子显微镜和能谱分析方法对X65和3Cr管线钢在CO₂环境中焊接接头腐蚀产物的微观形貌和成分进行分析,得出3Cr钢的产物膜中Cr元素富集,生成的Cr(OH)₃稳定性较好,结构较致密,对基体的保护性较好,而X65钢的腐蚀产物膜主要由FeCO₃组成,结构疏松,腐蚀严重。依靠表面分

析方法研究焊接接头腐蚀行为可以评定接头的耐蚀性,但是进一步研究焊接接头腐蚀机理,仍然需要结合电化学等其他手段。

3.2 传统电化学方法

目前,传统的电化学方法主要包括自腐蚀电位、线性极化、动电位极化和交流阻抗技术等^[22-23,25],可用于快速测定材料的瞬时腐蚀速率,研究材料腐蚀的过程及规律,评定材料的耐蚀性和腐蚀敏感性,测定环境介质的腐蚀性,探索材料的腐蚀机理^[26]。

K.M. Deen^[22]等人用动电位极化、线性极化技术研究了低合金钢焊缝各部分(母材、焊缝和热影响区)的电化学腐蚀行为,结果表明:在充气和含盐的水溶液环境中,针状铁素体的存在,有效地促进了焊缝的局部腐蚀。胡丽华^[23]等人用动电位极化和电化学阻抗谱方法研究了3Cr钢母材、焊缝和热影响区的腐蚀电流密度和极化电阻,结果发现母材腐蚀电流密度最大,极化电阻最小;焊缝腐蚀电流密度最小,极化电阻最大。传统的电化学方法可以测得金属材料的腐蚀机理与过程,但局部腐蚀的产生和发展都是在一个极小的区域里进行的,所以采用微区电化学方法是必要的。

3.3 微区电化学方法

微区电化学测量方法包括扫描振动电极技术(SVET)、扫描电化学显微镜(SECM)、扫描开尔文探针(SKPF)和局部电化学交流阻抗谱(LEIS)等。采用微区电化学方法能够区分材料不同区域电化学特性差异,并能够探测材料/溶液界面的电化学反应过程^[27]。近年来,微区电化学测量在腐蚀研究领域得到了广泛的应用。赵卫民^[28]等人用自制的扫描参比电极测试装置研究了低碳钢焊接接头表面微区的电位分布,测得熔合线部位的电极电位最低,母材与焊缝存在较大电位差。G. A. Zhang^[29]等人用扫描振动电极和局部电化学阻抗图谱技术研究了在碳酸盐溶液中应力对X70管线钢焊接接头的焊缝、热影响区和基材的腐蚀行为影响。电流密度随着应力的增加而变大,但热影响区的电流密度始终最大,有外加应力时焊缝附近的电流密度最大,无外加应力时靠近母材区域的电流密度最大。随着外加应力的变化,母材、焊缝和热影响区的局部阻

抗特征不变,且热影响区的局部阻抗值最小。因此,今后在研究低合金钢焊接接头腐蚀行为时,可以采用一种或多种微区电化学技术来研究焊接接头局部腐蚀的机理与过程。

4 结语

从腐蚀类型、焊接工艺影响和腐蚀研究方法等3个方面对低合金钢焊接接头腐蚀领域国内外目前开展的研究工作进行了概述,分析了焊后热处理和焊接热输入对焊缝微观组织及腐蚀行为的影响,提出了开展相关研究应综合运用表面分析、形貌观察、传统电化学以及微区电化学等多种手段,以获取更多信息揭示腐蚀机理。焊接是低合金钢最主要的应用方式,但由于受技术工艺限制,残余应力和各种缺陷不可避免,开展低合金钢焊接接头腐蚀行为和机理的研究,可为低合金钢焊接工艺的改进及有针对性的开展腐蚀防护设计提供理论指导,有效保障低合金钢焊接结构的使用安全。

参考文献:

- [1] 温东辉,宋凤明,钱余海,等.高韧性耐候钢厚板的开发[J].世界钢铁,2009,9(5):7—10.
WEN Dong-hui, SONG Feng-ming, QIAN Yu-hai, et al. Development of Weathering Steel Plates with High Toughness[J]. World Iron & Steel, 2009, 9(5): 7—10.
- [2] 张慧霞,程文华,邓春龙,等.疲劳裂纹扩展对高强钢电化学性能的影响[J].装备环境工程,2011,8(1):57—60.
ZHANG Hui-xia, CHENG Wen-hua, DENG Chun-long, et al. Study of Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of High-strength Steel by Electrochemical Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 57—60.
- [3] 翁宇庆,杨才福,尚成嘉.低合金钢在中国的发展现状与趋势[J].钢铁,2011,46(9):1—10.
WENG Yu-qing, YANG Cai-fu, SHANG Cheng-jia. State-of-the-art and Development Trends of HSLA Steels in China[J]. Iron & Steel, 2011, 46(9): 1—10.
- [4] 李晓刚.材料腐蚀与防护[M].长沙:中南大学出版社,2009:107—124.
LI Xiao-gang. Corrosion and protection of Materials[M]. Changsha: Central South University Press, 2009: 107—124.
- [5] ELIZA N, SHACHAR A, TAL B, et al. Characteristics of

- Hydrogen Embrittlement, Stress Corrosion Cracking and Tempered Martensite Embrittlement in High-strength Steels [J]. *Engineering failure analysis*, 2002, 9(2): 167—184.
- [6] LU B, LUO J L, IVEY D G. Near-Neutral pH Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Plastically Prestrained X70 Steel Weldment[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41(10): 2538—2547.
- [7] PENG Q, XUE H, HOU J, et al. Role of Water Chemistry and Microstructure in Stress Corrosion Cracking in the Fusion Boundary Region of an Alloy 182-A533B Low Alloy Steel Dissimilar Weld Joint in High Temperature Water[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(12): 4309—4317.
- [8] KIM W K, KOH S U, YANG B Y, et al. Effect of Environmental and Metallurgical Factors on Hydrogen Induced Cracking of HSLA Steels[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(12): 3336—3342.
- [9] LEE H W. Weld Metal Hydrogen-assisted Cracking in Thick Steel Plate Weldments[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 445: 328—335.
- [10] KITTEL J, SMANIO V, FREGONESE M, et al. Hydrogen Induced Cracking (HIC) Testing of Low Alloy Steel in Sour Environment: Impact of Time of Exposure on the Extent of Damage[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(4): 1386—1392.
- [11] WAHAB M A, SAKANO M. Experimental Study of Corrosion Fatigue Behaviour of Welded Steel Structures[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 118(1): 116—121.
- [12] COSTA J D M, FERREIRA J A M, ABREU L P M. Fatigue Behaviour of Butt Welded Joints in a High Strength Steel [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 697—705.
- [13] 苗伟. X70管线钢的硫化氢腐蚀疲劳行为研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- MIAO Wei. Study of Hydrogen Sulfide Corrosion Fatigue Behavior of X70 Pipeline Steel[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
- [14] 孔小东, 杨明波, 朱梅五. 冶金因素对低合金钢焊接接头耐蚀性的影响[J]. *焊接学报*, 2009(7): 105—109.
- KONG Xiao-dong, YANG Ming-bo, ZHU Mei-wu. Effects of Metallurgical Factors on Corrosion Behaviors of Welded Joints of Low-alloy Steels[J]. *Transactions of the CHINA Welding Institution*, 2009(7): 105—109.
- [15] 范舟, 刘建仪, 李士伦, 等. X70 管线钢焊接接头组织及其海水腐蚀规律[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(5): 171—171.
- FAN Zhou, LIU Jian-yi, LI Shi-lun, et al. Microstructure and Seawater Corrosion to Welding Joint of X70 Pipeline Steel[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, 31(5): 171—171.
- [16] HEMMINGSEN T, HOVDAN H, SANNI P, et al. The Influence of Electrolyte Reduction Potential on Weld Corrosion[J]. *Electrochimica Acta*, 2002, 47(24): 3949—3955.
- [17] 刘成虎, 柳伟, 赵耀斌, 等. X70 异种钢焊接接头的电偶腐蚀行为[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(1): 25—29.
- LIU Cheng-hu, LIU Wei, ZHAO Yao-bin, et al. Galvanic Corrosion of X70 Dissimilar Weld Joints[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(1): 25—29.
- [18] MOON K M, LEE M H, KIM K J, et al. The Effect of Post-weld Heat Treatment Affecting Corrosion Resistance and Hydrogen Embrittlement of HAZ Part in FCAW[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 169: 675—678.
- [19] RAVI S, BALASUBRAMANIAN V, NEMAT N S. Influences of Post Weld Heat Treatment on Fatigue Life Prediction of Strength Mis-matched HSLA Steel Welds[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(5): 547—553.
- [20] KUMARESH B S P, NATARAJAN S. Influence of Heat Input on High Temperature Weldment Corrosion in Submerged Arc Welded Power Plant Carbon Steel[J]. *Materials & Design*, 2008, 29(5): 1036—1042.
- [21] 黄安国, 李志远, 余圣甫, 等. 低合金钢焊缝金属的腐蚀行为[J]. *焊接学报*, 2006, 26(11): 30—34.
- HUANG An-guo, LI Zhi-yuan, YU Sheng-fu, et al. Corrosion Behavior of Weld Metal of Low-alloy Steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 26(11): 30—34.
- [22] DEEN K M, AHMAD R, KHAN I H, et al. Microstructural Study and Electrochemical Behavior of Low Alloy Steel Weldment[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(6): 3051—3055.
- [23] 胡丽华, 张雷, 许立宁, 等. 3Cr 低合金管线钢及焊接接头的 CO₂ 腐蚀行为[J]. *北京科技大学学报*, 2010(3): 345—350.
- HU Li-hua, ZHANG Lei, XU Li-ning, et al. CO₂ Corrosion Behavior of 3Cr Low-alloy Pipeline Steel and Weld Joints [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010(3): 345—350.
- [24] 张慧霞, 戚霞, 邓春龙, 等. 不同腐蚀体系中低合金钢锈层的拉曼光谱研究[J]. *装备环境工程*, 2009, 6(1): 30—34.

- Equipment Impact Test[S].
- [23] GJB 150 军用设备环境试验方法 冲击试验[S].
GJB 150 Military Equipment Environmental Test Methods Impact Test[S].
- [24] MIL-S-901D, High-impact Shipboard Machinery Equipment, and Systems, Requirements for Shock Tests[S].
- [25] BV 043-85. Germany Defense Naval Ship Construction Specification for Shock and Safety[S].
- [26] 冯麟涵. 舰船系统抗冲击性能全局优化方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.
FENG Lin-han. Research on Global Optimum Design Method for Shock Resistance of Ship Systems[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [27] 肖泽,李亚政,张军涛. 国外海军舰船装备环境试验军用标准分析[J]. 装备环境工程,2010,7(6):46—48,52.
XIAO Ze, LI Ya-zheng, ZHANG Jun-tao. Analysis of Foreign Military Environmental Test Standards for Warship Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010,7(6):46—48,52.
- [28] RAJENDRAN R. Linear Elastic Shock Response of Plane Plates Subjected to Underwater Explosion[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25:493—506.
- [29] YOUNG S. Shin Ship Shock Modeling and Simulation for Far-field under Water Explosion[J]. Computers and Structures, 2004,82:2211—2219.
- [30] 王贡献,褚德英,张磊,等. 舰船设备冲击试验机研究进展[J]. 振动与冲击,2007,26(2):152—159,183.
WANG Gong-xian, ZHU De-ying, ZHANG Lei, et al. Advances in Shock Test Facilities for Shipboard Equipments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(2): 152—159, 183.
- [31] 王雁涛. 仿真技术在舰船电子设备抗强冲击设计中的应用[J]. 装备环境工程,2008,5(2):51—56.
WANG Yan-tao. Application of Simulation Technology in High Anti-Shock Design of Naval Vessel's Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008,5(2):51—56.
- [32] 贾宪振,胡毅婷,董明荣,等. 水下爆炸冲击波作用下平板塑性动力响应的数值模拟[J]. 舰船科学技术,2007,29(6):41—44.
JIA Xian-zhen, HU Yi-ting, DONG Ming-rong, et al. Numerical Simulation of Dynamic Plastic Response of Flat Plates Subjected to Underwater Explosion Shock Waves[J]. Ship Science and Technology, 2007,29(6):41—44.

(上接第64页)

- ZHANG Hui-xia, QI Xia, DENG Chun-long, et al. Study on Corrosion Rust Layers of Low Alloy Steel in Different Simulated Seawater Environment Using Raman Spectroscopy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(1): 30—34.
- [25] 安闻迅,邓春龙,杜敏,等. 低合金钢实海腐蚀电化学阻抗谱研究[J]. 装备环境工程,2009,6(1):17—20.
AN Wen-xun, DENG Chun-long, DU Min, et al. Study of Marine Corrosion of Low Alloy Steel with Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009,6(1):17—20.
- [26] 吴荫顺. 金属腐蚀研究方法[M]. 冶金工业出版社,1993:40.
WU Yin-shun. Metal Corrosion Research Methods[M]. Metallurgical Industry Press, 1993:40.
- [27] 王力伟,李晓刚,杜翠薇,等. 微区电化学测量技术进展及在腐蚀领域的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报,2011,30(6):498—503.
- WANG Li-wei, LI Xiao-gang, DU Cui-wei, et al. Recent Advances in Local Electrochemical Measurement Techniques and Applications in Corrosion Research[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and protection, 2010, 30(6):498—503.
- [28] 赵卫民,薛锦. 焊接接头微区电位测试装置的研制[J]. 腐蚀科学与防护技术,2002,14(3):182—184.
ZHAO Wei-min, XUE Jin. AN Apparatus for Eval Uating Corrosion Tendency of Welded Joints[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(3): 182—184.
- [29] ZHANG G A, CHENG Y F. Micro-electrochemical Characterization and Mott-Schottky Analysis of Corrosion of Welded X70 Pipeline Steel in Carbonate/bicarbonate Solution[J]. Electrochimica Acta, 2009,55(1):316—324.