

复合材料单搭接头的剪切强度对比实验研究

Experimental Investigation on Shear Strength of Composite Single-lap Joints

陈 列, 熊峻江, 程泽林

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

CHEN Lie, XIONG Jun-jiang, CHENG Ze-lin

(School of Aeronautical Science and Engineering,

Beihang University, Beijing 100083, China)

摘要: 在常温和湿热高温的环境下, 分别进行了三种不同的成型工艺(RTM、引入缝纫的 RTM 和胶接)制备的单搭接头的剪切强度实验, 研究了成型工艺对单搭接头的剪切强度的影响, 并根据实验现象分析了单搭接头的剪切破坏机理。实验结果表明: 引入缝纫的 RTM 成型试样的剪切强度性能最高, 而胶接成型试样的剪切强度最低; 环境温度对 RTM 和引入缝纫 RTM 成型试样的剪切强度影响不大, 而对胶接成型试样的剪切强度有较大影响。

关键词: 复合材料; 树脂转移模塑(RTM); 缝纫; 胶接; 单搭接头; 剪切强度

中图分类号: V258; TG497 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2009)11-0031-05

Abstract: Shear experiments of three types of single-lap composite joints, processed respectively by using RTM, stitched RTM and adhesively bonded techniques, are carried out to investigate the influences of process on mechanical properties of composite single-lap joint and failure mechanism is discussed from experimental observation. It is shown from experimental results that the composite single-lap joints, processed by stitched RTM and adhesively bonded techniques, respectively, have the greatest and least shear strengths in three types of joint. And there is a slight influence of hygrothermal and high temperature environment on shear strength of composite single-lap joints, processed by means of RTM and stitched RTM techniques, whereas a significant effect on that by using adhesively bonded technique.

Key words: composite; resin transfer molding (RTM); stitching; adhesive bonding; single-lap joint; shear strength

工程结构中广泛应用的连接形式中较常见的有焊接、铆接和机械连接等, 这些连接结构有强度高、可靠性好等优点, 但由于应力集中的存在, 会降低结构的静强度和疲劳强度。相比之下, 单搭接头应力分布均匀, 缓解了应力集中, 从而使结构具有优良的疲劳特性; 另外, 单搭接头质量轻、成本低、表面光滑, 同时, 还具有其他接头所没有的密封特点, 因而, 在航空及民用工业中得到了广泛的应用。为减轻质量, 提高飞机性能, 飞机的蒙皮、副翼与肋条整体构件、机身大梁和机翼翼梁突缘等部件, 越来越多地采用高性能复合材料搭接制件来取代金属搭接制件, 因此, 复合材料单搭接头的强度性能, 特别是单搭接头工艺对强度性能的影响, 得到日益广泛研究。Jain 等^[1]采用高阶大变形理论和线性失效准则, 预测了 RTM 单搭接头的破坏载荷, 与实验结果吻合良好; Shin 和 Lee 等^[2-4]通过一系

列的试验, 研究了 RTM 单面和双面搭接接头的几何尺寸参数, 对拉伸与剪切强度, 及疲劳寿命的影响; 曾竟成、尹昌平等^[5]研究发现复杂形状的 RTM 舱段构件的拉伸强度和弯曲强度, 分别比同种材料分步成型的制件提高 45% 和 42%; Sawyer^[6]提出了能提高复合材料单搭接头强度的引入缝纫 RTM 方法; Tong^[7], Glaessgen^[8], Aymerich^[9-10]和 Chang 等^[11]采用试验与数值模拟相结合方法, 研究了引入缝纫工艺对搭接接头静强度和疲劳性能的影响, 发现缝纫工艺对疲劳强度影响较大, 而对静强度的影响较小; Hart-Smith^[12-13]通过考虑胶层剪应力作用, 分析了几种典型的胶接工艺对制件强度影响。

当前, RTM、引入缝纫的 RTM 和胶接成型工艺, 常用于复合材料单搭接头制备, 三种工艺制备的接头力学性能存在差异。因此, 需要对此进行对比实验研

究, 评估其制件力学性能的差异性。迄今为止, 很少见此方面研究工作报道。为此, 本工作进行此三种工艺制备的复合材料搭接接头进行对比实验, 研究成型工艺对接头破坏模式和强度性能的影响。

1 实验

1.1 原材料及其性能

分别采用 RTM、引入缝纫的 RTM 和胶接成型工艺制备复合材料单搭接头试样, 为保证对比试验的有效性, 全部试样选用完全相同的材料和几何形状与尺寸(如图 1 所示, 单位: mm)。试样选用北京航空材料研究院提供的 EW220 平纹玻璃纤维布为增强体, 其经向密度 18 束/cm, 纬向密度 14 束/cm, 经向强度 1000N/25mm 100mm, 纬向强度 500N/25mm 100mm, 单层原始厚度 0.22mm, 单位面积质量 220g/m²; 选用双马 6421 树脂作为基体, 双马 6421 树脂抗弯强度为 130MPa, 抗弯模量为 4.25GPa, 拉伸强度为 79MPa, 拉伸模量为 3.97GPa, 断裂应变为 2.25%; 采用 10% 定型剂(溶剂为丙酮溶液)作为胶接成型的中温固化胶膜。

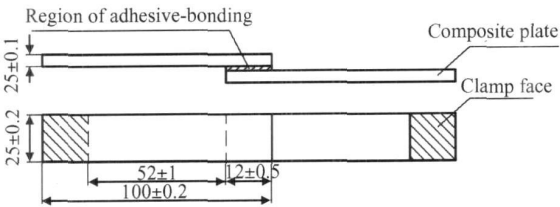


图 1 复合材料单搭接头试样

Fig 1 Geometry and dimension of composite single-lap joints

1.2 试样制备

在 RTM 工艺成型过程, 首先将接头的纤维布一起铺放进模具中, 然后合模, 并恒温注射树脂(树脂的注射温度 110~120℃, 黏度 0.02~0.08Pa·s, 注射压力 0.1MPa), 再升温固化(150℃ 恒温 1h, 160℃ 恒温 1h, 180℃ 恒温 2h, 200℃ 恒温 8h)和降温启模, 最后得到制件成品。

引入缝纫 RTM 工艺, 需要先将接头纤维布定型, 然后, 在定型的纤维布的交接处进行缝纫, 接着将缝纫好的纤维布放进模具中, 此后工艺过程与 RTM 相同。缝纫所用的单向纤维纱是芳纶, 缝纫的针孔直径 2mm, 针距 8mm, 行距 8mm。

胶接工艺属分步成型工艺, 即先采用 RTM 工艺制备接头的两块搭接板, 然后, 在搭接处涂抹胶膜, 并将接头的两块搭接板在搭接处搭接, 再按照胶膜的固

化工艺进行二次固化, 让胶膜将两边的层板粘接在一起。三种工艺制备的试样如图 2 所示。

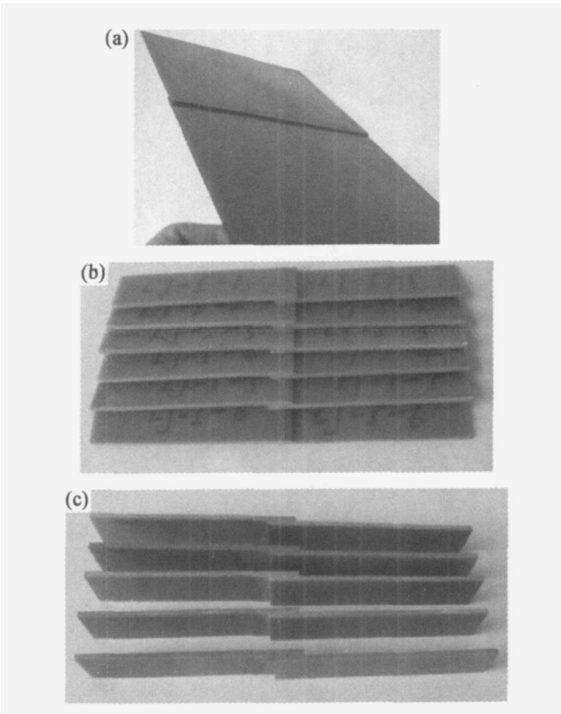


图 2 三种工艺制备的复合材料单搭接头试样

(a) RTM; (b) 引入缝纫 RTM; (c) 胶接

Fig 2 Three types of composite single lap joints

(a) RTM; (b) stitched RTM; (c) adhesive bonding

1.3 性能测试

目前尚未见有关复合材料单搭接头的试验标准, 因此, 参考国标 GB7124-86(胶粘剂拉伸剪切强度测定方法(金属对金属)), 设计复合材料搭接头的试验方案。所有试验在 MTS880-100kN 液压伺服材料试验机上完成, 加载方式如图 3 所示, 加载速率均为 2mm/min; 试验分别采用常温和湿热高温环境, 湿热高温试样先经过大约 15 天时间的湿环境处理, 达到饱和后, 再在 130℃ 高温下进行试验。在试验过程中, 记录试件剪切破坏过程、搭接处的破坏模式和破坏载荷等。

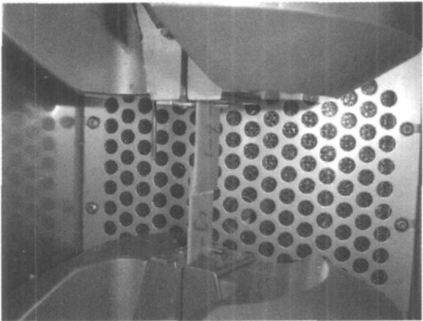


图 3 剪切试验

Fig. 3 Shear tests

2 结果与讨论

试验结果如表 1 和图 4 所示, 湿热高温环境试验测定的载荷 位移曲线如图 5 所示。

从表 1 和图 4 可以看出, 湿热高温环境对 RTM 和引入缝纫 RTM 两种工艺的单搭接头的剪切强度影响不大, 而对胶接工艺的单搭接头影响较大。这是因为湿热影响胶接单搭接头的胶黏剂强度, 吸湿率较高的试样将发生胶层破坏; 另外, 高温环境使胶层内产生大的气泡, 也会降低胶接强度, 所有试样都会发生胶层破坏。因此, 湿热高温环境对胶接工艺的单搭接头影

响显著。

表 1 剪切试验结果

Table 1 Results of shear test

Test environment	Forming process	Average of shear stress/ MPa	Dispersion coefficient/ %
Hygrothermal and high temperature	RTM	17. 61	6. 42
	Stitched RTM	18. 32	3. 88
	Adhesive bonding	10. 14	31. 9
Normal temperature	RTM	18. 85	13. 4
	Stitched RTM	18. 96	11. 0
	Adhesive bonding	16. 00	7. 06

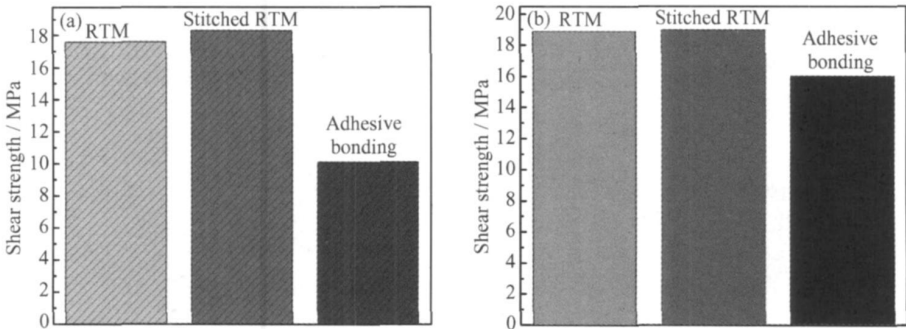


图 4 剪切强度的对比 (a)湿热高温环境;(b)常温环境
Fig. 4 Comparison between shear strengths (a)hygrothermal and high temperature;(b)normal temperature

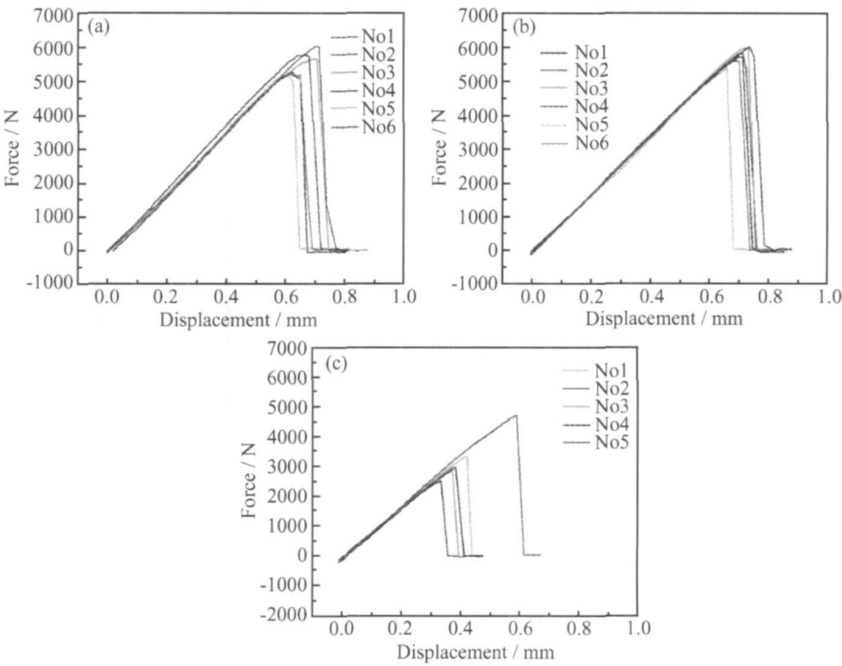


图 5 湿热高温环境下的载荷-位移曲线 (a) RTM;(b) 引入缝纫 RTM; (c) 胶接
Fig. 5 Load-displacement curves in hygrothermal and high temperature environment
(a) RTM;(b) stitched RTM;(c) adhesive bonding

另外, 还可以看出, 胶接工艺的单搭接头的剪切强度性能最差, 而引入缝纫 RTM 工艺单搭接头的剪切

强度性能最好。这是因为缝纫提高了单搭接头在搭接处的层间强度, 能阻止或延缓搭接处胶层的分层扩展;

而胶接工艺单搭接头的胶层易产生剪切分层扩展, 因此其剪切强度最低。

湿热高温环境下, 试验测定的载荷-位移曲线如图 5a~c 所示。从图中曲线可以看出, 采用 RTM 工艺和引入缝纫 RTM 工艺制备的单搭接头的剪切破坏载荷, 以及破坏位移的大小都很接近, 而胶接工艺制备的单搭接头与上面两种接头相比, 无论是剪切破坏载荷,

还是破坏位移都明显小很多。这也说明了湿热高温环境下, 胶接工艺的单搭接头的力学性能最差。另外, 从图 5c 还发现, 试验测定的胶接工艺的载荷-位移曲线的分散性比较大, 这是由于试样胶层厚度不均造成。

对试样的破坏断面(如图 6 所示, 试样工艺从左到右: RTM、引入缝纫 RTM、胶接)进行观察与分析, 发现:

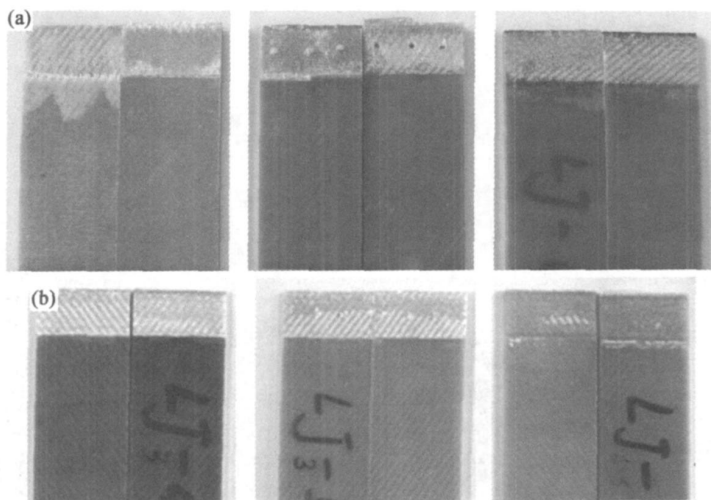


图 6 试样断面对比 (a) 常温; (b) 湿热高温

Fig. 6 Comparison between fracture faces of specimens (a) normal temperature; (b) hygrothermal and high temperature

(1) 常温试验

RTM 成型试样在搭接区边缘处出现了分层断裂现象, 搭接区边缘附近出现了 V 型破坏断口。这是因为 RTM 成型试样在搭接区边缘存在应力集中, 同时还存在不同轴试验加载而引起的剥离应力。另外, RTM 成型试样发生胶层分层时的剪切强度值, 普遍小于不发生分层的剪切强度, 这说明了层间性能对于复合材料搭接接头的整体力学性能有重要影响。

引入缝纫 RTM 成型试样的破坏断面非常粗糙, 并都存在分层, 但是在搭接区边缘处, 却没有出现类似 RTM 试样的分层断裂现象, 及 V 型破坏断口。这是因为引入缝纫 RTM 成型试样在搭接区边缘存在应力集中, 但在缝纫针孔处却存在更大的应力集中。引入缝纫后, 缝纫的增强纤维线纵向穿过试样, 限制了试样搭接区的弯曲变形, 从而在很大程度上限制了剥离应力的产生。另外, 缝纫纤维线被拔出断裂, 且断口不齐, 其原因是缝纫纤维线受到剪切作用后, 先发生拉伸变形, 当拉伸变形达到一定程度后, 才被剪切断裂。

胶接成型试样都是从搭接区边缘开始沿着胶层和层板的界面平行脱开的, 断口比较光滑。这是因为胶接成型试样的搭接区边缘存在着比较大的应力集中, 而胶层与层板间胶接的剪切强度性能相对较低, 因此,

试样发生了界面破坏。

(2) 湿热高温试验

RTM 成型试样在搭接区中面平行脱开, 在搭接区边缘处没有出现了分层断裂现象, 搭接区边缘附近也没有出现了 V 型破坏断口。这是由于湿热高温改变了 RTM 成型试样中的纤维和树脂的性能, 致使 RTM 成型试样的搭接板间的粘接剪切强度变低。

引入缝纫 RTM 成型试样在湿热高温环境下的破坏断面, 比常温环境下的光滑, 缝纫针孔处缝纫增强纤维线断口也很平整, 试样在搭接区中面平行脱开, 而且不存在分层。这是因为湿热高温环境下缝纫增强纤维线的剪切性能变差, 试样受剪切作用后缝纫增强纤维线没有发生拉伸变形就被剪切断裂了。

胶接成型试样也是从搭接区边缘开始, 沿着胶层和层板的界面平行脱开, 断口很光滑。湿热高温效应使胶层的力学性能变得更差, 导致试样的胶接强度变得更低, 胶接成型试样更容易沿着胶层和层板的界面平行脱开。

3 结论

(1) 引入缝纫 RTM 试样的剪切强度最高, 而胶接成型试样的剪切强度最低。

(2) 环境温度对 RTM 和引入缝纫 RTM 两种工艺的试样的剪切强度影响不大, 但对胶接成型试样的剪切强度影响较大。

参考文献

- [1] JAIN L K, MAI Y W. Analysis of resin-transfer-molded single lap joints [J]. Composites Sciences and Technology, 1999, 59: 1513– 1518.
- [2] LEE J J, SHIN K C, LEE D G. Study on the lap shear strength of a Co-cured single lap Joint [J]. Adhesion Sci Technol, 2000, 14(1): 123– 139.
- [3] SHIN K C, LEE J J. Tensile Load bearing capacity of Co-cured double lap joints [J]. Adhesion Sci Technol, 2000, 14(12): 1539– 1556.
- [4] SHIN K C, LEE J J. Fatigue characteristics of a Co-cured single lap joint subjected to cyclic tensile loads [J]. Adhesion Sci Technol, 2002, 16(4): 347– 359.
- [5] 曾竟成, 尹昌平, 刘钧, 等. 软模辅助 RTM 成型舱段构件及其性能研究[J]. 材料工程, 2006, (6): 28– 32.
- [6] SAWYER J W. Effect of stitching on the strength of bonded composite single lap joints [J]. AIAA J, 1985, 23(11): 1744– 1748.
- [7] TONG L, JAIN L K, LEONG K H, et al. Failure of transversely stitched RTM lap joints [J]. Composites Sciences and Technology, 1998, 58: 221– 227.
- [8] GLAESSGEN E H, RAJU I S, POE JR C C. Analytical and experimental studies of the debonding of stitched and unstitched composite joints [J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36

(23): 2599– 2622.

- [9] AYMERICH F. Effect of Stitching on the static and fatigue performance of Co-cured composite single-lap joints [J]. Journal of Composite Materials, 2004, 38(3): 243– 257.
- [10] AYMERICH F, ONNIS R, PRIOLO P. Analysis of the fracture behaviour of a stitched single-lap joint [J]. Composites: Part A, 2005, 36: 603– 614.
- [11] CHANG P, MOURITZ A P, COX B N. Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension [J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 2163– 2176.
- [12] HART-SMITH L J. Adhesive bonded single lap joints [R]. NASA Report CR-112236, 1973.
- [13] HART-SMITH L J. Adhesive Bonded scarf and stepped lap joints [R]. NASA Report CR-112237, 1973.

基金项目: 航空基金资助项目(05A51011)

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2008-12-20

作者简介: 陈列(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为复合材料搭接修补, 联系地址: 北京航空航天大学 738 信箱(100191), E-mail: chen-lie199648@126.com

通讯作者: 熊峻江(1966), 男, 教授, 主要从事疲劳断裂可靠性及缺损结构复合材料修补设计的研究, 联系地址: 北京航空航天大学飞机系(100083), E-mail: jjxiong@buaa.edu.cn

(上接第 30 页)

除脱氧外, 钢中磷含量也会对点蚀扩展产生重大影响。张恒等人的研究发现, 当钢中磷含量小于 0.008% 左右时, 闭塞电池阳极溶解电流急剧增加^[10]。从模拟闭塞电池试验和室内间浸挂片试验结果可以看出, C 钢的点蚀扩展电流密度明显比同 D 钢大, 从化学成分来看, 该钢的磷含量仅为 0.007%。说明同是镇静钢, 过低的磷含量会导致蚀坑扩展速度增大。

3 结论

(1) 钢水的脱氧程度影响到钢中硫化物夹杂物的形态。沸腾钢 A, B 钢中的主要夹杂物分别为橄榄状硫化物和土豆状氧化锰夹杂, 镇静钢 C, D 钢的主要夹杂物为条片状硫化物夹杂和硅酸盐夹杂。

(2) 钢中的夹杂物是主要的点蚀诱发源。脱氧程度越高, 钢的点蚀电位越负, 点蚀诱发敏感性越强。

(3) 模拟闭塞腐蚀试验和室内挂片的结果表明, 典型沸腾钢的点蚀扩展速度小于典型的镇静钢。同是镇静钢, 过低的磷含量可显著促进蚀孔的扩展。

参考文献

- [1] 战东平, 张慧书, 李术川, 等. AlMnC 合金脱氧和非金属夹杂物控制技术[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(10): 1118

– 1121.

- [2] ZHAN J G, SONG B, LIU X H, et al. Morphology, chemical compositions and size distribution of rare earth oxides in pure iron [J]. J Univ Sci Technol Beijing, 2003, 10(2): 30– 33.
- [3] 薛正良, 李正邦, 张家文. 钢的脱氧与夹杂物的控制[J]. 特殊钢, 2001, 22(6): 24– 27.
- [4] 高明, 马颖澈, 赵秀娟, 等. 真空感应熔炼中的碳脱氧[J]. 材料研究学报, 2001, 15(3): 275– 278.
- [5] 杨武. 金属的局部腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.
- [6] 陈学群, 常万顺, 孔小东, 等. 碳钢中磷的偏析对坑孔腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(4): 193– 199.
- [7] 张春亚, 陈学群, 陈德斌, 等. 不同低碳钢的点蚀诱发敏感性及诱发机理研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(5): 265– 272.
- [8] 王建民, 陈学群, 常万顺, 等. 两类船用低合金钢耐点蚀性能的比较[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(11): 1944– 1947.
- [9] 托马晓夫. 金属腐蚀及其保护的理论与[M]. 华保定译. 北京: 中国工业出版社, 1964.
- [10] 张恒. 磷对低碳结构钢耐点蚀性能影响的研究[D]. 武汉: 海军工程大学硕士毕业论文, 2006. 81– 89.

收稿日期: 2008-07-14; 修订日期: 2008-12-20

作者简介: 曹国良(1981), 男, 博士生, 从事耐蚀金属材料研究, 联系地址: 湖北省武汉市解放大道 717 号海军工程大学理学院化学与材料系(430033), E-mail: mimi7689@163.com