

高强度铝合金构件腐蚀疲劳失效分析

张正贵¹ 周兆元¹ 刘长勇²

(1. 沈阳大学 沈阳 110044; 2. 沈阳新松机器人自动化股份有限公司 沈阳 110168)

摘要: 在应力作用下对带有涂层的高强度铝合金构件在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀疲劳断口进行了研究。结果表明: 在腐蚀条件下高强度铝合金构件断口上不仅出现疲劳辉纹, 还出现准解理、解理、沿晶等断裂特征, 腐蚀疲劳过程属于阳极溶解机制控制。失效形式为多裂纹断裂, 在各个铆孔处均有裂纹萌生, 其中有一处为主裂纹, 其位置不固定, 主裂纹扩展距离较长, 最后与其它裂纹汇合, 最终导致疲劳断裂。

关键词: 铝合金 构件 腐蚀疲劳 失效

中图分类号: O346.2, TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1005-4537 (2008) 01-0048-05

1 前言

金属材料在交变载荷和腐蚀环境共同作用下疲劳断裂能力明显下降, 金属材料常常在低应力、弱腐蚀介质下发生破坏, 具有突发性强、危害性大的特点。由于冶金、环境、环境的化学与电化学以及材料或构件的受力状态等因素彼此交织在一起, 互相影响、互相作用, 使得环境敏感断裂错综复杂。因而, 不可能找到一种包罗万象的开裂机制^[1]。通过分析断裂过程遗留下来的断裂形貌, 有助于研究具体体系的断裂机理。腐蚀疲劳断口记录了裂尖局部材料微观损伤和断裂的基本特征, 这些特征能反映材料本身和外加应力、腐蚀介质等因素相互作用的本质, 是研究腐蚀疲劳断裂机理最直接的依据。高强度铝合金是飞机结构中常用的主要结构材料, 国内外对该材料已展开大量研究, 但对有机涂层防护下的腐蚀疲劳的研究报导相对较少^[2-10]。本文通过分析比较涂层防护下的高强度铝合金构件的各种断口形貌, 从而探讨其腐蚀疲劳失效机制。

2 实验方法

本实验采用的试样结构图见文献^[7]。板材为 2A12-T4 铝合金, 铆钉材料选用 2A10。板材热处理工艺为: 淬火 + 自然时效处理。连接件先进行阳极氧化处理, 随后涂上一层底漆, 加工成型后进行铆接, 最后在外表面上涂一层面漆, 铆钉孔内则不进行任何防护。疲劳试验在 EHF-EB10-20L 岛津疲劳

试验机上进行, 采用载荷控制。最大应力分别取 30 MPa 和 50 MPa, 应力比 $R=0.1$, 频率为 6 Hz, 载荷波形为正弦波。腐蚀疲劳过程中, 试样试验段浸渍在腐蚀液中, 腐蚀液为 pH 6 的 3.5% NaCl 溶液, 试验温度分别为室温和 60 °C。

3 结果与讨论

3.1 疲劳断裂方式

疲劳试验表明, 构件在受轴向交变载荷作用时, 断裂发生在板材的铆孔处(图 1), 铆钉无一发生断裂。所有构件均从左侧第一排铆钉孔处断裂。裂纹从多个铆孔处萌生、长大并连接, 呈多裂纹结构。承受疲劳载荷的构件, 裂纹应萌生于最大应力集中点。因此, 从构件的断裂方式可知, 构件存在多个应力集中点。

3.2 疲劳断口形貌

3.2.1 在空气中的疲劳断口形貌 由构件在空气中的疲劳断口形貌(图 2)可明显看到, 裂纹从铆孔处萌生, 图中右侧箭头所指的白色光亮区为铆孔。

3.2.2 腐蚀疲劳断口形貌 由构件在 3.5% NaCl 腐蚀介质中的疲劳裂纹萌生处的形貌(图 3)可见, 腐蚀疲劳裂纹的萌生部位与空气中疲劳裂纹的萌生位置基本上一致, 均在结构本身的应力集中点附近^[8]。这说明在本试验条件下, 应力起了主要作用, 腐蚀只改变裂纹萌生的时间, 而引起疲劳寿命的改变, 但对应力集中点的改变却不明显, 腐蚀只能加剧这种应力集中效应。

图 4 是沿晶开裂形貌, 它也是材料脆性断裂的微观形貌特征。由于晶界是隔开两个不同结晶学取向晶粒的区域, 它是金属原子排列的紊乱区, 晶界是材料中薄弱的, 裂纹容易穿过的区域。在腐蚀溶

定稿日期: 2007-08-20

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究计划资助(20040235)

作者简介: 张正贵, 1964 年生, 男, 主要从事材料的疲劳及结构表征研究

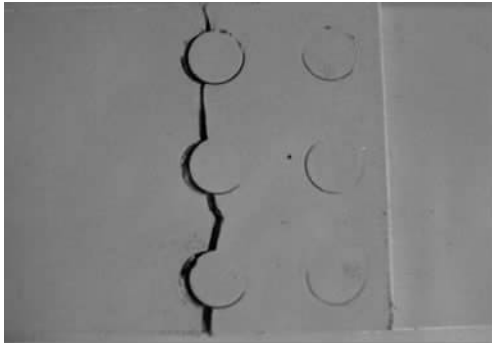


Fig.1 The fatigue fracture site of riveted specimen

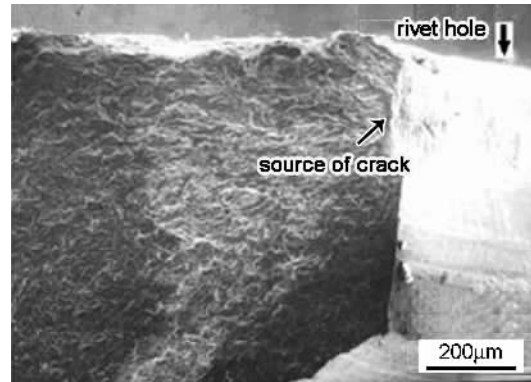


Fig.2 The fracture macrograph of crack initiation in air condition

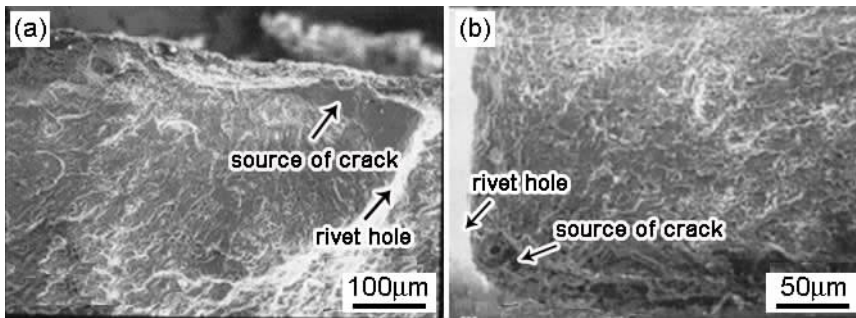


Fig.3 The macrograph of corrosion fatigue crack initiation in 3.5% NaCl (pH 6) solution (a)50 MPa, 60 °C ; (b)30 MPa, pre-corrosion for 33 days at 20 °C

液中腐蚀因素使晶界弱化,因此可以看到大量沿晶开裂断口特征。

铝合金在 3.5% NaCl 水溶液中腐蚀疲劳开裂属于阳极溶解机制控制,但其裂纹扩展微观断口仍然显示出脆性特征,可以观察到解理、准解理形貌(图 5)。

阳极溶解能降低原子间的结合力及断裂应力,使腐蚀疲劳断口出现脆性特征。阳极溶解过程只能促进表面材料的变形硬化溶解,对远离变形区的材料力学性能过程没有直接的影响,因此在裂纹尖端受阳极溶解过程影响而发生软化的区域非常小。这一小部分软材料被硬材料包围时,软材中塑性滑移受到抑制,产生较大的三向应力,在这种情况下即使延性材料也发生脆性断裂。疲劳裂纹沿晶扩展过程可能是“表面晶界弱化—受一个循环应力作用破坏—新表面的晶界再弱化、再破坏。”

3.3 疲劳失效分析

2A12-T4 铝合金自然失效处理后,主要强化相是 S 相 (Al₂CuMg)、θ 相 (CuAl₂) 和少量 MnAl₆ 将在晶界析出,晶界周围出现无沉积带(贫 Cu 区),合金暴露在腐蚀性介质中时,有可能发生晶间腐蚀和剥蚀,其中晶内基体和正电性的相,如 CuAl₂ 可能作为阴极;而负电性的相,如晶界贫 Cu 区,可能作

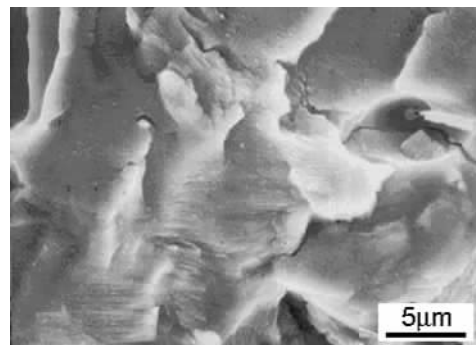


Fig.4 The micrograph of intergranular corrosion fatigue fracture in 3.5% NaCl solution

为阳极,组成腐蚀微电池,形成沿晶界的阳极溶解通道而发生晶间腐蚀^[11]。

试验所采用的铝合金构件,外表面涂刷两层涂料。但在腐蚀介质温度升高到 60 °C 时,腐蚀疲劳寿命大幅度降低。经过预腐蚀的构件,其疲劳寿命也随着预腐蚀时间的延长而不断降低。改变腐蚀介质的温度后,涂层的防腐性能发生改变,溶液更容易进入铆孔内;而在预腐蚀条件下,随着腐蚀时间的增加,腐蚀介质慢慢地渗入到铆孔内,随着腐蚀介质进入的增多,铆孔内腐蚀越来越严重(图 6)。扫描电镜下观察裂纹源区,发现疲劳裂纹起源于点蚀或剥蚀坑底部^[9](图 7)。

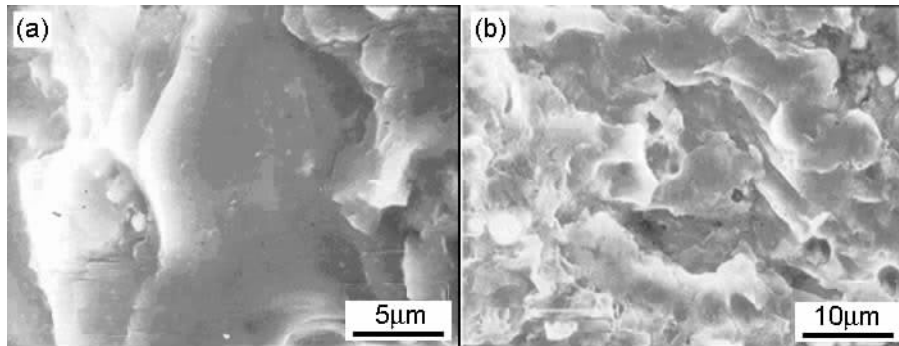


Fig.5 The micrograph of corrosion fatigue fractures in 3.5% NaCl solution (a) maximum stress 50 MPa, 20 °C, pH 6; (b) maximum stress 30 MPa, 60 °C, pH 6

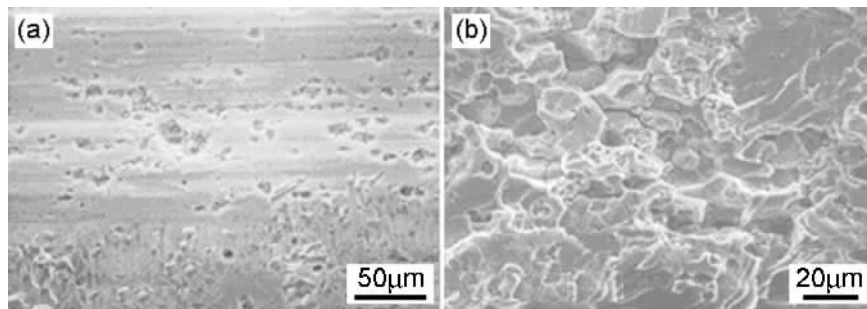


Fig.6 The topography of rivet holes corrosion (a) pre-corrosion for 30 days at 20 °C, pH 6; (b) pre-corrosion for 150 days at 20 °C, pH 6

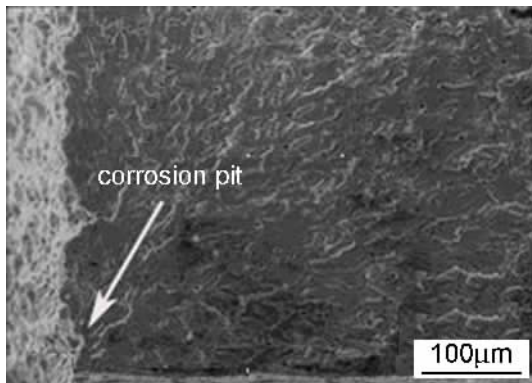


Fig.7 The crack initiated from the bottom of corrosion pit (maximum stress of 30 MPa, pre-corrosion for 150 days at 20 °C, pH 6)

2A12-T4高强度铝合金的晶粒间存在容易发生腐蚀的阳极相,因此,腐蚀优先沿晶扩展,晶界形成连续的腐蚀通道,发生晶间腐蚀。在晶间腐蚀过程中,由于腐蚀产物的体积膨胀,在晶界发生“楔入效应”而产生张应力,结果导致沿晶裂纹的形成和扩大。而试样板材在压延变形过程中,晶粒被拉长,具有平行于表面、有高度方向性的扁平晶粒结构^[12]。因此,铝合金在含有 Cl⁻的环境中易产生晶界腐蚀,并造成沿晶界的剥蚀。剥蚀坑可视为类裂纹,是“先天”的疲劳源。在有蚀坑或裂纹存在时,将产生闭塞电池效应,使溶液酸化,加速腐蚀。

腐蚀不仅损伤金属,同时还改变金属的力学性能。在电化学反应的影响下,金属会发生细微结构的变化,起增塑作用,在裂纹尖端,促进表面位错移出,而位错的移出结果又促进力学化学效应,即加速金属腐蚀,后者反过来又促进位错移出,从而导致裂纹尖端处化学力学损伤的自催化过程。

另外,在应力作用下,不但使金属变形,同时还促进腐蚀。形变金属的电极电位降低,使金属化学活性提高,电位的变化可表示为

$$\Delta E_0 = -\frac{\sigma V}{ZF} \quad (1)$$

式中, ΔE_0 为金属平衡电位的降低, σ 为应力, V 为金属的克分子体积, Z 、 F 分别为金属离子价数和法拉第常数。

应力导致金属溶解的腐蚀电流增量可表示为

$$\Delta I = I_a \left(\exp \frac{\sigma V}{RT} - 1 \right) \quad (2)$$

式中, I_a 为无应力时的阳极腐蚀电流, R 、 T 为气体常数和绝对温度。可知,应力增大时,电极电位降低,腐蚀电流增大^[13]。

动应力促进 2A12-T4 铝合金铆孔表面及板内侧产生点蚀或剥蚀。腐蚀疲劳过程使材料首先产生局部区域塑性变形,在此处产生应力集中,导致位错增殖和滑移。增殖的位错通过滑移在某些障碍处

(夹杂物、空位、晶界等)形成位错塞积。平面位错塞积群使位错能量激增,处于高电化学活性状态,从而使此处发生优先溶解,在形式上表现为促进产生点蚀源^[14]。在点蚀孔底部引发出晶间腐蚀,且晶界处腐蚀沟槽较深,由于此处显著的缺口效应而导致很大的应力集中,在动应力和点蚀孔内强腐蚀介质的联合作用下,首先在遭到腐蚀的晶界处孕育出了初始腐蚀疲劳裂纹。一方面经过点蚀孔后向两侧发展。另一方面在点蚀孔底从沿晶发展的初始裂纹进一步扩展成几条较大的穿晶裂纹,随着裂纹的扩展在裂纹尖端处应力继续增大和集中,裂纹不断发展,在主要受力学因素控制下,裂纹向点蚀孔两侧及孔底同时迅速扩展,但由于裂纹在厚度和长度方向受到的载荷不同,宏观上表现为椭圆形,直到与其它裂纹汇合,最终导致构件失稳断裂。

构件的腐蚀开裂伴随着多裂纹的出现,这些裂纹分布在各铆孔处。图8是在裂纹萌生处附近的裂纹扩展形貌,图9为裂纹的扩展与汇合的示意图。裂纹从角处产生,以椭圆弧线形式向两个方向扩展,在横向和厚度方向的扩展速度不同,在横向上扩展速度快,而沿板厚度方向上的扩展速度慢。角裂纹沿两个方向的扩展极不平衡,尤其在裂纹孔扩展后期,表现为疲劳弧线是椭圆弧线型。由于上述角裂纹扩展极不平衡使含多裂纹损伤的连接结构破坏寿命及破坏模式具有更大的分散性。角裂纹在扩展后期,在板内侧先连通,然后裂纹转而沿厚度方向向板外侧扩展,最终全部汇合。裂纹的交互作

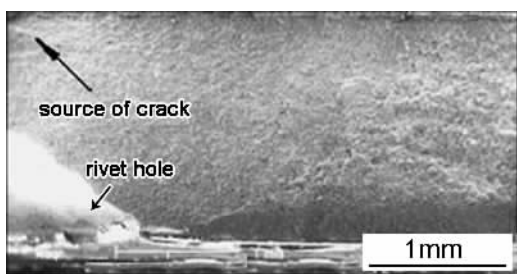


Fig.8 The macrograph of quarter ellipse shape crack fracture

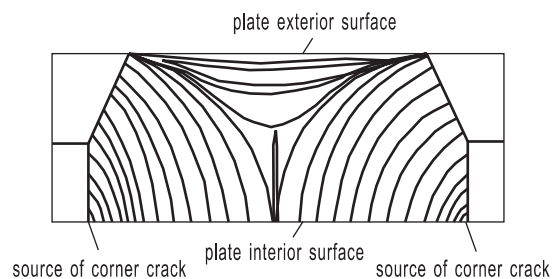


Fig.9 The schematic diagram of quarter ellipse shape crack connection

用和汇合对构件的寿命构成严重影响。

4 结论

(1) 涂层防护下的铝合金构件,在 3.5% NaCl 溶液中自腐蚀条件下,腐蚀疲劳过程属于阳极溶解机制控制,微观断口仍然以解理、准解理及沿晶开裂等脆性特征为主。

(2) 构件在不同的 3.5% NaCl 溶液中都有不同程度的腐蚀,裂纹产生于点蚀坑处。

(3) 构件失效形式,为多裂纹断裂,在各个铆孔处均有裂纹萌生,其中一处扩展距离较长,最后与其它裂纹汇合,最终导致疲劳断裂。

致谢:感谢中国科学院金属研究所韩恩厚研究员对本文试验及论文的完成所给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] Parkings R N, Gangloff R P, Ives M B, ed. Environment-Induced Cracking of Metals[M]. Houston,Tx:NACE, 1990, 1
- [2] Zhang B, Zhang Z G, Han E H, Ke W, et al. Study of corrosion fatigue for LY12CZ aluminum alloy riveted lap-splice joints [J]. Acta Metal. Sin., 2000, 36(8):842-846
(张波,张正贵,韩恩厚,柯伟等.LY12CZ 铝合金铆连接件在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀疲劳失效行为研究 [J]. 金属学报, 2000, 36(8): 842-846)
- [3] Segerfrojld G, Blom A F. Fatigue behavior of mechanical joints:A state of the art overview [A]. Proceedings of the Seventh International Fatigue Congress[C]. Beijing, 1999, 1:41
- [4] Newman J C, Jr, Harris C E, Piascik R S, Dawicke D S. Methodology for predicting the onset of widespread fatiguedamage in lap-splice joints and structure[A]. Proceedings of the Seventh International Fatigue Congress[C]. Beijing, 1999, 1:81
- [5] Zhang B. The corrosion fatigue study on LY12CZ aluminum alloy and its rivet joint in sodium chloride solution [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2001
(张波.LY12CZ 铝合金及其铆连接件在氯化钠溶液中的腐蚀疲劳研究[D].沈阳:中国科学院金属研究所, 2001)
- [6] Liu Y M, Jiang J L, Shan Y S. Some effects on fatigue properties under protection/unprotection coating systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(4):481-485
(刘一鸣,蒋军亮,山永寿.环境对有/无防护涂层结构疲劳性能的影响[J].航空学报.1998, 19(4):481-485)
- [7] Zhang Z G, Zhang B, Han E H, et al. Influence of stress amplitude and corrosive factors on corrosion fatigue life of riveted joints[J]. J. Mechanical Strength, 2001, 23(2): 243-245
(张正贵,张波,韩恩厚等.应力与腐蚀因素对连接件腐蚀疲劳寿命交互作用的研究[J].机械强度, 2001, 23(2):243-245)
- [8] Zhang Z G. The investigation of corrosion fatigue on riveted joints [D]. Shenyang: Northeastern University, 2000
(张正贵. 连接件腐蚀疲劳性能的研究 [D]. 沈阳: 东北大学,

- 2000)
- [9] Liu Z M, Zeng F Y, Lu L J, et al. An effect of corrosion environment on fatigue properties of LY12CZ Al-Alloy typical bolted lap joints[J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2004, 24(5): 267-271
(刘祖铭, 曾凡阳, 鲁礼菊等. 环境对 LY12CZ 铝合金典型螺接件疲劳性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(5): 267-271)
- [10] Chang H, Han E H, Wang J Q, et al. Influence of coating of covering airplane on corrosion fatigue life of aluminum alloy LY12CZ[J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2006, 25(1): 34-36
(常红, 韩恩厚, 王俭秋等. 飞机蒙皮涂层对 LY12CZ 铝合金腐蚀疲劳寿命的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 25(1): 34-36)
- [11] Li D, Zhang Q, Wang D Z, et al. Study of the simulated test for the intergranular corrosion of LY12CZ Al alloy [J]. J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(1): 1-3
(李荻, 张琦, 王弟珍等. LY12CZ 铝合金晶间腐蚀模拟试验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(1): 1-3)
- [12] Zhang D. The trace Analysis of Mechanical Failure[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1996
(张栋. 机械失效的痕迹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996)
- [13] Jiang Z G. Corrosion Fatigue of Airplane Structure[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992
(蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992)
- [14] Wu Y S, Xie J H, Wang X Y, et al. Initiation mechanism of corrosion fatigue crack for stainless steel in chloride solution [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 1999, 11(1): 24-31
(吴荫顺, 谢建辉, 汪轩义等. 氯化物溶液中不锈钢腐蚀疲劳裂纹初始萌生的过程机理 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 11(1): 24-31)

CORROSION FATIGUE FRACTURE FAILURE ANALYSIS OF HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOY

ZHANG Zhenggui¹, ZHOU Zhaoyuan¹, LIU Changyong²

(1. Shenyang University, Shenyang 110044;

2. Shenyang Siasun Robot & Automation Co. Ltd., Shenyang 110168)

Abstract: The fractography of high strength aluminum alloy LY12CZ riveted specimen with coating was investigated after corrosion fatigue tests under stress in 3.5% NaCl solution. Fracture features like fatigue striation, dimple, cleavage, and intergranular fracture were observed. The corrosion fatigue mechanism was controlled by anodic dissolution. The failure mode was multi-crack fracture. Cracks were initiated from every rivet holes. The principal crack with longer propagation length and varying positions finally converged with other cracks and led to fatigue fracture.

Key Words: aluminum alloy, specimen, corrosion fatigue, failure