

真空环境下自然时效态 2A12 合金的疲劳行为

Fatigue Behavior of Nature-aged 2A12 Alloy in Vacuum

金晓鸥¹, 赵慧杰², 何世禹²

(1 黑龙江大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150086;

2 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

JIN Xiao-ou¹, ZHAO Hui-jie², HE Shi-yu²

(1 School of Architecture and Engineering, Heilongjiang

University, Harbin 150086, China; 2 School of Materials Science

and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 在真空拉-压疲劳实验机上对真空和室温大气环境下自然时效态 2A12 合金的疲劳行为进行了研究, 并采用扫描电镜 (SEM) 分析了真空和室温大气环境对疲劳断口形貌的影响。对比两种环境下的结果表明, 真空环境使疲劳寿命提高, 疲劳曲线右移。在低循环应力时, 真空环境中的疲劳断裂次数可比室温大气环境中的高近 4 倍。真空和室温大气环境下的疲劳断口均出现疲劳条纹、台阶和韧窝, 且在低循环应力时出现韧窝的区域增多。真空环境下疲劳断口中台阶高度较低, 疲劳条纹与韧窝较细小。本研究对真空环境影响自然时效态 2A12 合金疲劳行为的原因进行了讨论。

关键词: 2A12 合金; 疲劳; 真空

中图分类号: TG113 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006) 03-0048-04

Abstract: The fatigue behavior of nature-aged 2A12 alloy in air and vacuum at room temperature was investigated using a vacuum tension-compression fatigue testing machine. The effect of air and vacuum on the fatigue fractures was studied by means of Scanning Electron Microscopy (SEM). The results show that the fatigue life can be noticeably improved in vacuum than that in air, and the S-N curve shifts to the right in vacuum. Under lower cyclic stresses, the fatigue cycles to failure in vacuum is increased approximately 4 times than in air. Both the fractures in air and vacuum, in which fatigue striations, steps and dimples are observed and more areas with the dimples exist under lower cyclic stresses. In vacuum, the height of the steps is smaller, and the fatigue striations and dimples are finer. The reason for the effect of vacuum on the fatigue behavior of nature-aged 2A12 alloy was discussed.

Key words: 2A12 alloy; fatigue; vacuum

2A12 合金是目前最成熟、最典型的硬铝合金之一, 该合金具有比强度高、导热性和抗蚀性好、可热处理强化等诸多优异性能, 在国防和民用工业领域具有广泛的应用。适于制造卫星和飞机上要求承受高循环载荷的结构件。尤其是卫星等航天器在轨运行期间要长期经受高真空等空间环境因素作用, 深入研究高真空环境下 2A12 合金的疲劳行为具有十分重要意义, 可为航天器型号设计选材提供重要的理论依据。已有工作^[1-7]表明, 许多金属材料在真空环境下疲劳寿命与在大气中相比均有不同程度的提高, 但其影响机制尚有待于进一步探讨和研究。本工作主要以自然时效态 2A12 合金为典型材料, 研究真空环境对合金疲劳行为的影响, 以期加深对真空环境与材料疲劳

性能关系的认识。

1 实验材料及方法

实验用材料为 $\phi 25\text{mm}$ 的 2A12 合金纵向棒材。固溶处理在盐浴炉中进行, 其固溶处理工艺为 $495^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 保温 1.5h 水淬后, 在室温大气环境中进行 260h 的自然时效。以深入研究自然时效态 2A12 合金的疲劳行为。疲劳实验执行 GB/T3075-1982《金属轴向疲劳实验方法》, 在真空拉-压疲劳实验机上进行, 采用经过处理的柱状试样 ($\phi 5\text{mm}$), 实验频率为 25Hz, 正弦波形, 循环应力对称系数 $R = -1$ 。真空度为 $(2.7 \sim 2.8) \times 10^{-5} \text{Pa}$, 循环应力分别选为 200, 250, 300,

350MPa。疲劳实验后绘制 S-N 曲线, 并采用 CAM-SCAN-4 型扫描电镜观察疲劳断口形貌。

2 实验结果

2.1 宏观疲劳断口分析

图 1 为自然时效态 2A12 合金宏观疲劳断口扫描电镜(SEM) 照片。室温大气和真空中疲劳断口起伏很大。断口的疲劳源、疲劳裂纹扩展区和瞬断区三个区域组成不很明显, 且在瞬断区内有较大的深坑。在同一循环应力下, 真空环境中断口表面比大气环境中更均匀、细密、整齐, 疲劳裂纹扩展区所占比例增加, 同时粗糙的瞬断区所占比例相应减少。

图 2 为自然时效态 2A12 合金在室温大气和真空环境下疲劳断口疲劳源形貌扫描电镜(SEM) 照片。可见, 疲劳源区靠近试样表面, 但均不明显。

2.2 微观疲劳断口分析

对比自然时效态 2A12 合金真空和室温大气环境下微观疲劳断口扩展区形貌, 两者有所不同, 如图 3 所示。在疲劳裂纹扩展区均出现疲劳条纹、台阶和韧

窝。台阶的形成是由于疲劳条纹在同一个小平面上相互平行, 而在相邻的小平面上方向不一定一致, 两个相交小平面对在相交处就形成了台阶。

在 250MPa 和 300MPa 应力下, 室温大气环境下扩展区呈现大量的台阶形貌, 而真空环境下却以大量的细小韧窝为主。在同一循环应力下真空环境下的疲劳条纹和台阶的高度要比室温大气中的小得多。

图 4 为自然时效态 2A12 合金真空和室温大气环境下微观疲劳断口瞬断区形貌。在两种疲劳断口的瞬断区均呈现撕裂棱与韧窝。循环应力越低, 韧窝所占比例越大。

2.3 S-N 疲劳曲线

自然时效态 2A12 合金在室温大气和真空环境下的 S-N 曲线对比如图 5 所示。可见, 真空环境下的疲劳曲线明显右移。且在较高循环应力水平下, 真空环境下疲劳断裂循环次数与大气中的相差较小, 疲劳寿命提高不明显。随着循环应力的逐渐减小, 两者相差逐渐增大。当 $\sigma = 200\text{MPa}$ 时, 前者可比后者高达近 4 倍。总体来说, 真空环境下的疲劳寿命较长, 随着循环应力的降低, 疲劳断裂循环次数增加明显, 说明真

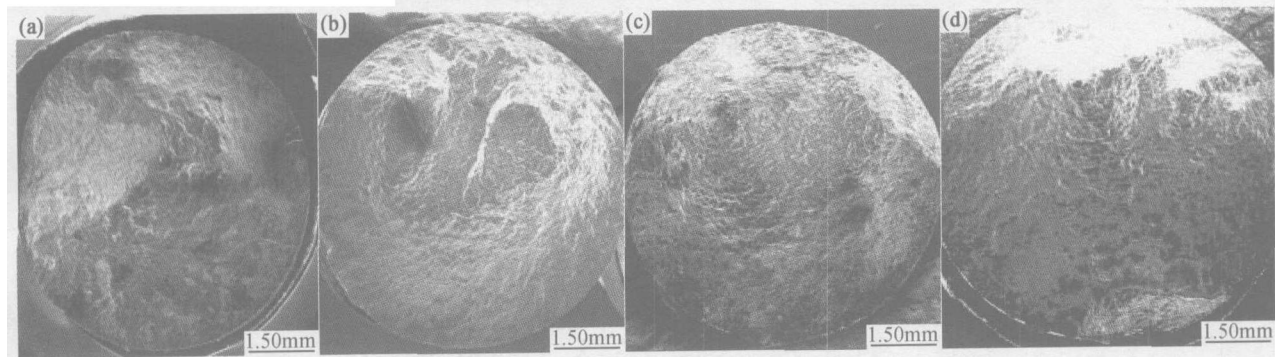


图 1 自然时效态 2A12 合金疲劳断口宏观照片(SEM)

(a) $\sigma = 250\text{MPa}$, 空气中; (b) $\sigma = 250\text{MPa}$, 真空中; (c) $\sigma = 300\text{MPa}$, 空气中; (d) $\sigma = 300\text{MPa}$, 真空中

Fig. 1 SEM micrographs showing macroscopic morphologies of fatigue fractures in air and vacuum for 2A12 alloy nature-aged

(a) in air, $\sigma = 250\text{MPa}$; (b) in vacuum, $\sigma = 250\text{MPa}$; (c) in air, $\sigma = 300\text{MPa}$; (d) in vacuum, $\sigma = 300\text{MPa}$

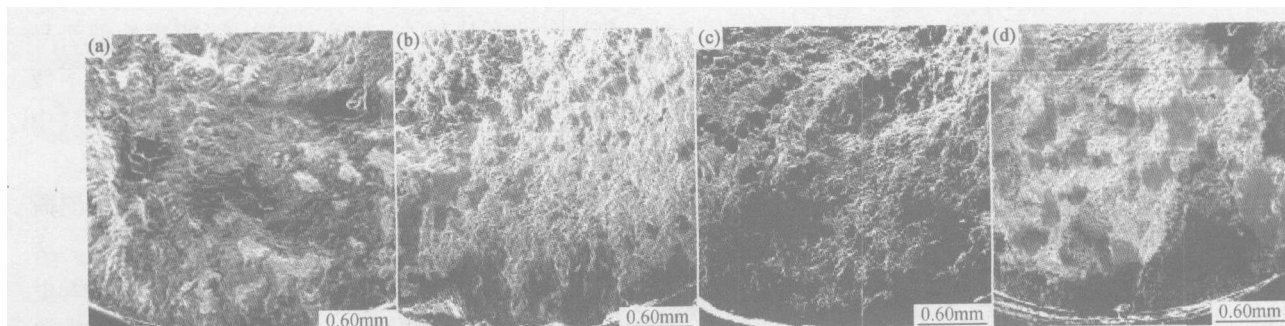


图 2 自然时效态 2A12 合金室温大气和真空环境下疲劳断口疲劳源形貌 (SEM)

(a) $\sigma = 250\text{MPa}$, 空气中; (b) $\sigma = 250\text{MPa}$, 真空中; (c) $\sigma = 350\text{MPa}$, 空气中; (d) $\sigma = 350\text{MPa}$, 真空中

Fig. 2 SEM micrographs showing macroscopic morphologies of fatigue fractures fatigue origins in air and vacuum for 2A12 alloy nature-aged (a) in air, $\sigma = 250\text{MPa}$; (b) in vacuum, $\sigma = 250\text{MPa}$; (c) in air, $\sigma = 350\text{MPa}$; (d) in vacuum, $\sigma = 350\text{MPa}$

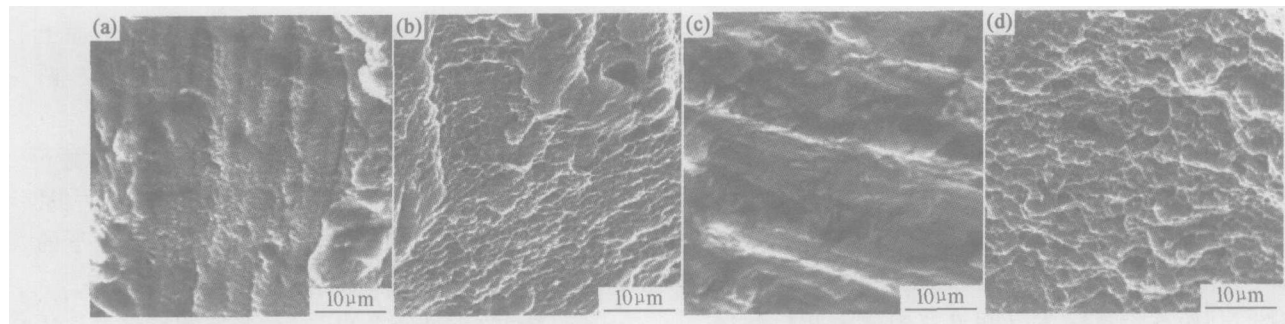


图 3 自然时效态 2A12 合金在室温大气和真空环境下疲劳断口扩展区形貌(SEM)

(a) $\sigma= 250\text{MPa}$, 空气中; (b) $\sigma= 250\text{MPa}$, 真空中; (c) $\sigma= 300\text{MPa}$, 空气中 (d) $\sigma= 350\text{MPa}$, 真空中

Fig. 3 SEM micrographs showing on the fatigue fractures propagation zone in fatigue fracture in air and vacuum for 2A12 alloy nature-aged (a) in air, $\sigma= 250\text{MPa}$; (b) in vacuum, $\sigma= 250\text{MPa}$; (c) in air, $\sigma= 300\text{MPa}$; (d) in vacuum, $\sigma= 350\text{MPa}$

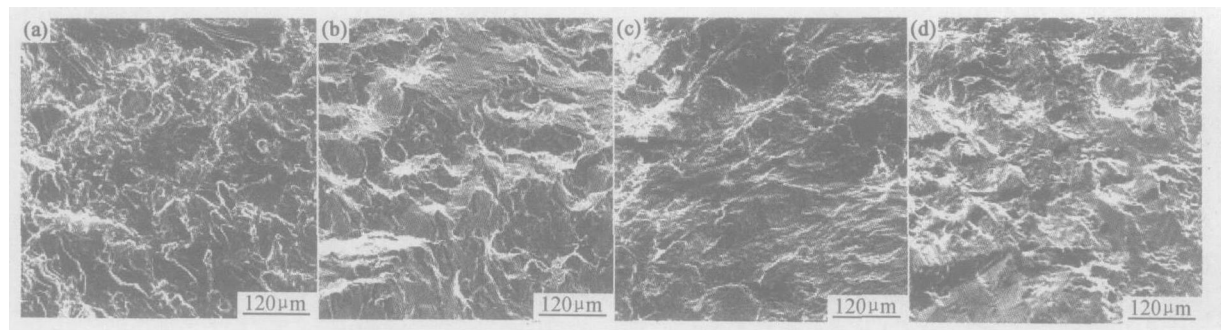


图 4 自然时效态 2A12 合金在室温大气和真空环境下疲劳断口瞬断区形貌(SEM)

(a) $\sigma= 200\text{MPa}$, 空气中; (b) $\sigma= 200\text{MPa}$, 真空中; (c) $\sigma= 300\text{MPa}$, 空气中 (d) $\sigma= 300\text{MPa}$, 真空中

Fig. 4 SEM micrographs showing on the fatigue fractures instantaneous failure zone in fatigue fracture in air and vacuum for 2A12 alloy nature-aged (a) in air, $\sigma= 200\text{MPa}$; (b) in vacuum, $\sigma= 200\text{MPa}$; (c) in air, $\sigma= 300\text{MPa}$; (d) in vacuum, $\sigma= 300\text{MPa}$

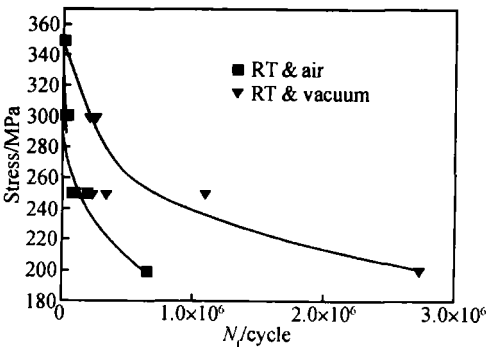


图 5 自然时效态 2A12 合金在室温大气和真空环境中的 S-N 曲线

Fig. 5 S-N fatigue curve of 2A12 alloy in air and vacuum for 2A12 alloy nature aged

空环境对疲劳性能的影响逐渐增大。

3 讨论

与室温大气环境相比, 真空环境下自然时效态 2A12 合金的疲劳断口表面比较细密, 疲劳裂纹扩展区所占比例增加, 粗糙的瞬断区所占比例相应减少。

本研究认为可能的原因是由于在真空环境下随着气体残余压力的下降, 局部化的滑移带向均匀化转变。

真空环境下自然时效态 2A12 合金的疲劳条纹比大气中的细小, 台阶的高度也较低。这可能由于在真空环境中, 在多次交变应力的反复作用下, 裂纹表面相对滑动和反复摩擦, 会使疲劳条纹和台阶的高度明显减小。且循环应力连续反复对试样做功, 易于使试样温度逐渐升高, 而真空环境下的热传导方式是辐射, 热传导速率比较小, 蓄于试样内部的热能便会导致疲劳裂纹尖端的应力场松弛, 也会使真空环境下疲劳条纹变得比大气中的细小, 台阶的高度也比大气中的低。

在真空和大气条件下, 疲劳断口瞬断区均呈现撕裂棱与韧窝。循环应力越低, 韧窝所占比例越大。这是在拉伸应力下形成的。韧窝大小、深浅及数量取决于材料断裂时夹杂物和第二相粒子的大小、间距、数量及材料的塑性和实验温度等因素。在同一循环应力下, 大气环境中韧窝比真空中的韧窝要大且深些。这可能是由于韧窝里面充有空气所致, 当处于压应力循环阶段时, 会阻碍韧窝表面破坏。

真空环境下自然时效态 2A12 合金的疲劳性能与室温大气相比有较大的改善。真空环境使疲劳曲线明显向右推移,并在较低循环应力时,疲劳寿命提高的幅度较大。但随着循环应力水平的逐渐提高,疲劳寿命提高的幅度逐渐降低,最终 S-N 曲线相交于一点。出现这种结果的原因可能与真空环境对疲劳裂纹扩展过程产生影响有关。疲劳裂纹的扩展是在拉压循环应力作用下裂纹前端反复张开与闭合的结果。呈现在疲劳断口上的疲劳条纹实际上是裂纹尖端张开与闭合留下的痕迹。一个条纹对应一次应力循环,条纹的间距是对每次应力循环时裂纹扩展长度的表征。在室温大气环境下,裂纹表面会形成氧化膜,阻碍了裂纹的充分闭合,从而使裂纹前沿容易张开与扩展,疲劳条纹的间距较大。而真空环境下,裂纹表面不会形成氧化膜。在压应力循环半周期里,裂纹很容易完全闭合,而在下一个拉应力循环半周期里,裂纹前沿又难于被拉开。所以真空环境下,裂纹扩展变得困难一些,疲劳条纹的间距较小,疲劳寿命得以提高,疲劳曲线向右推移。在低循环应力下,由于裂纹扩展速率慢,更有利于发挥真空对裂纹表面净化效应的作用,因此使疲劳循环断裂次数明显增加,使疲劳寿命得以较大幅度提高。

4 结 论

- (1)在真空环境下自然时效态 2A12 合金的 S-N 曲线明显右移,且疲劳寿命随着循环应力水平的逐渐降低,提高幅度逐渐加大。
- (2)在低循环应力时,真空环境中的疲劳断裂次数可比室温大气环境中的高近 4 倍。
- (3)自然时效态 2A12 合金在真空和大气环境下

(上接第 47 页)

- (2)对数正态分布函数在本工作所研究两种轮盘材料低循环疲劳寿命范围内是合理的。
- (3)双参数 Weibull 分布函数用作国产轮盘材料寿命分布模型时必须进行假设检验。

参考文献

[1] DEF STAN 00-971-1993, 飞机燃气涡轮发动机通用规范[S].

[2] JSGS-87231A-2001, 航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范[S].

[3] HB/Z112-86-1986, 材料疲劳试验统计分析方法[S].

[4] 贺小帆,刘文琰.服从不同分布的疲劳寿命分散系数分析[J].北京航空航天大学学报,2002,28(1):47-49.

疲劳断口均为穿晶断口。疲劳断口扩展区均出现疲劳条纹、台阶和大量的等轴韧窝。在同一循环应力水平下,真空环境中的疲劳条纹比大气中的细小,台阶的高度也较低。疲劳断口瞬断区均呈现撕裂棱与韧窝。且循环应力越低,韧窝所占比例越大。

参考文献

[1] SLIVIK D C, BLANKENSHIP C P, STARKE JR E A. Intrinsic fatigue crack growth rates for Al-Li-Cu-Mg alloys in vacuum[J]. Metal Trans, 1993, 22(3): 1807-1817.

[2] ENDO KICHIRO, KOMAI KENJIRO. Fatigue crack propagation in an aluminum alloy in ultra-high vacuum[J]. J Soc Mater and Sci Japan, 1977, 26: 143-148.

[3] KHRIEDDINE D, KHRIEDDINE M H. Low cycle fatigue behavior of an aluminium alloy with small shearable precipitates[J]. Effect of Surface Coating, 2000, 22: 585-591.

[4] VERKIN B I and GRINBERG N M. The effect of vacuum on the fatigue behavior of metals and alloys[J]. Mater Sci Eng, 1979, 41: 149-181.

[5] WANG R, MUGHRABI H. Fatigue of copper single crystals in vacuum and in air[J]. Mater Sci Eng, 1984, 65: 219-243.

[6] GRINGER N M. The effect of vacuum on fatigue crack growth[J]. Int J Fatigue, 1982, (4): 83-95.

[7] VINOADOV A, HASHIMOTO S, MIURA S. Fatigue crack Initiation and propagation in [210] oriented copper single crystals in vacuum and in air[J]. Scripta Mat, 1996, 34: 775-779.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999065005)

收稿日期: 2005-09-08; 修订日期: 2005-12-30

作者简介: 金晓鸥(1962-),女,高级工程师,硕士,主要从事航天结构材料可靠性模拟研究,联系地址: 哈尔滨学府路 209 号黑龙江建筑工程学院(150086)。

[5] NELSON W. Applied life data analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982. 335-341.

[6] 蒋仁言.威布尔模型族特性、参数估计和应用[M].北京:科学出版社,1998. 26-27.

[7] 贺国芳,许海宝.可靠性数据的收集和分析[M].北京:国防工业出版社,1995. 153-169.

[8] 冯振宇,诸德培.威布尔的拟合优度检验[J].机械强度,1996, 18(4): 28-31.

[9] 苏彦江.构件随机疲劳可靠性分析方法与应用研究[D].成都:西南交通大学,2001.

收稿日期: 2005-10-13; 修订日期: 2005-12-20

作者简介: 王卫国(1966-),男,高级工程师,博士生,从事航空发动机强度寿命设计工作,联系地址: 成都市新都区新军路 6 号 11 室(610500)。