

LY 12CZ 铝合金短裂纹行为的微观扩展机制研究

Study on Micro-Mechanism of Short Crack Propagation of LY12 Aluminium Alloy

闫海 陈鸢 丁传富 陶春虎 (北京航空材料研究院)

Yan Hai Chen Ying Ding Chuanfu Tao Chunhu (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

[摘要] 通过扫描电镜、透射电镜、光学金相等手段对 LY 12CZ 铝合金疲劳短裂纹的微观机制进行了分析研究, 结果表明, 材料的微观组织对短裂纹扩展行为有很大影响。

关键词 短裂纹 微观扩展机制 微观组织

[Abstract] The micro-mechanism of short crack and the influence of micro-structures on short crack propagation have been investigated by OM, SEM and TEM for a LY12CZ Aluminium alloy.

Keywords short crack micro-mechanism micro structure

损伤容限设计认为, 材料或构件在服役前带有预裂纹或缺陷, 由该裂纹或缺陷扩展达到临界裂纹的寿命称为总寿命。大量的研究表明, 在疲劳裂纹扩展的不同阶段, 其扩展机制不同。短裂纹阶段一般指疲劳裂纹在 1mm 以内的扩展阶段, 其寿命可占结构件全寿命的 60% 以上。由于短裂纹扩展行为有其特殊性且占疲劳寿命的绝大部分, 近年来人们对其扩展的宏、微观机制及力学行为进行了研究^[1~4], 但短裂纹扩展的微观机制尚不十分清楚。

本课题采用光学金相显微镜、扫描电镜 (SEM) 和透射电镜 (TEM) 对航空工业中常用的 LY12CZ 铝合金短裂纹扩展的微观机制以及材料微观组织对短裂纹行为的影响进行了研究。

1 试验材料及试验方法

试验材料选用 LY12CZ 铝合金, 其表面覆盖了一薄层包铝材料。采用 MTS 液压伺服疲劳试验机进行恒幅疲劳试验和谱载疲劳试验, 试验前对单边缺口试样 (SENT 试样) 的缺口表面进行化学抛光, 以使表面残余应力减至最小。

2 试验结果

将不同应力比以及不同载荷类型短裂纹疲劳试验后的断口用扫描电镜进行观察分析。断口均为多源断裂 (图1), 裂纹起源于缺口尖角处的包铝层和缺口内, 主

裂纹以角裂纹的形式扩展。将源于缺口尖角处的角裂纹放大后发现, 裂纹源于此处的包铝层与基体的交界面, 随后向基体内部扩展 (图2)。源于缺口内部的裂纹呈半椭圆形, 它的形核与第二相质点有关 (图3)。在缺口内部的其它地方还发现了一些源于第二相质点的二次裂纹。



图1 短裂纹断口低倍形貌 40×

Fig. 1 Fracture macro-appearance of short crack

用扫描电镜和透射电镜对断口及其复型进行观察发现, 在短裂纹扩展初期呈现结晶学小平面和准解理特征 (图4); 裂纹扩展接近晶界时扩展方向会发生偏转 (图5), 从而使断口变得粗糙不平, 第二相质点会导致裂纹扩展方向发生改变 (图6)。在离开源区一定距离后断口的微观形貌逐渐呈现细小的疲劳条带特征。

对短裂纹疲劳试验初期的裂纹进行金相分析。发现晶界及第二相质点明显阻碍裂纹的扩展, 裂纹在穿过晶界时会发生偏转 (图7), 图8为裂纹扩展接近第二相时

其扩展方向发生改变。

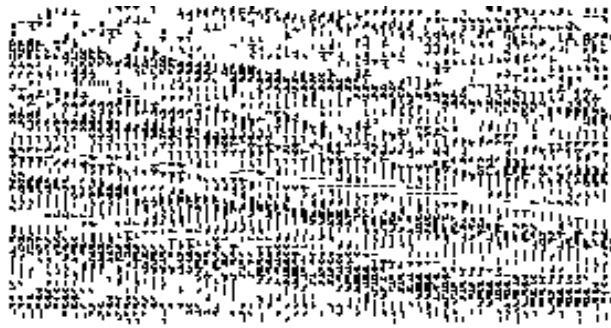


图2 角裂纹源于包铝层内 1500 ×

Fig. 2 Corner crack initiates from the alded layer

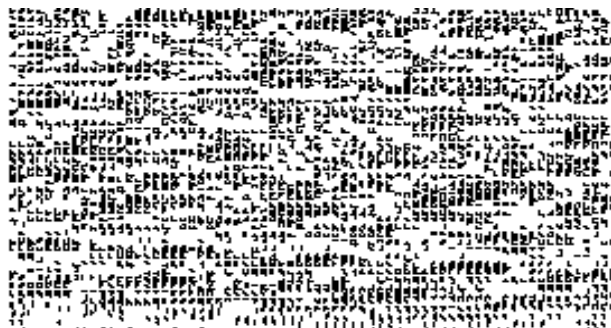


图3 短裂纹源于第二相质点 400 ×

Fig. 3 Short crack initiates from the second phase particle



图4 靠近源区的短裂纹扩展形貌 1500 ×

Fig. 4 Short crack fracture appearance

near the initiation region

3 结果分析及讨论

3.1 包铝层对裂纹形核的影响

包铝是航空工业中常用的提高铝合金板材耐腐蚀性的方法,但由于包铝的强度大大低于心部材料,使得包铝试样的裂纹很容易从包铝层起始和扩展,一旦穿透包铝层与心部材料相接触时,对心部材料来说相当于一个尖锐的缺口,由此引起的应力集中促使了心部材料的早期开裂,从而明显地缩短裂纹的萌生寿命,并导致构

件疲劳寿命的下降。

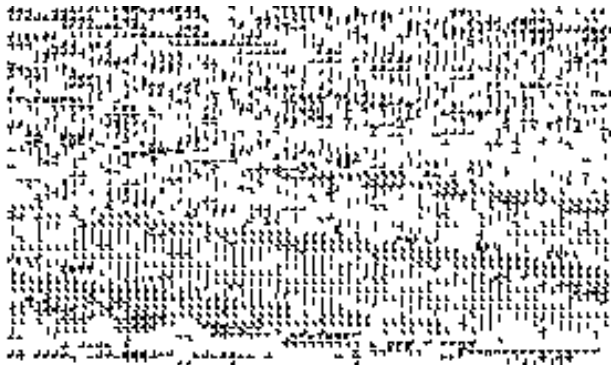


图5 裂纹在晶界附近扩展 3500 ×

Fig. 5 Crack propagation direction changes near the grain boundary



图6 裂纹在第二相质点附近扩展 5000 ×

Fig. 6 Fracture appearance near the second phase



图7 裂纹扩展接近晶界时的走向 500 ×

Fig. 7 Crack propagations through the grain boundary

3.2 第二相及夹杂物对短裂纹扩展的影响

铝合金中含有的第二相及夹杂物破坏了材料本身的连续性,相当于在材料上预制了一个缺口,使材料在承受交变载荷时优先在该处形核,继而扩展,从而导致断裂。

3.3 短裂纹扩展的微观机制

从表面起始的疲劳裂纹初期扩展时往往是沿一定

结晶学位向, 因为此时裂纹尖端处于平面应力状态, 最大剪应力比较大 ($\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1}{2}$), 因而促进了裂纹前端的反复滑移, 裂纹扩展时或由于 $\{111\}$ 相邻滑移面的原子键结合强度减弱而脱开 (对于低层错能、不滑移材料), 或由于裂纹尖端两个 $\{111\}$ 滑移面交滑移造成沿应力面 (001) 脱开 (对高层错能、波纹状滑移的材料), 所以断口上呈现结晶学小平面。由于相邻晶粒之间无一定的取向关系, 因而裂纹扩展通过晶界时会发生方向的转变, 致使晶界对裂纹扩展形成阻碍, 裂纹扩展速率降低。

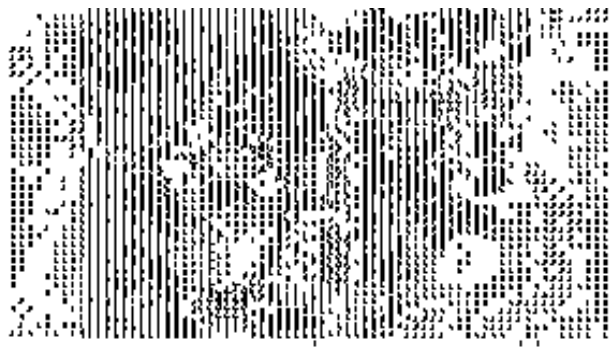


图8 裂纹扩展接近第二相时的走向 500 ×

Fig. 8 Crack propagates near the second phase particles

裂纹在晶界时发生转折, 可使断口变得粗糙, 由于短裂纹接近表面, 当裂纹持续扩展时, 处于平面应力状态, 因而剪切应力分量较大, 在正应力和剪切应力的共同作用下, 裂纹张开时断面错开, 再闭合, 从而导致闭合应力 σ_c 大大提高, 有效应力 $\Delta\sigma_{eff}$ 减小, 使得裂纹扩展变得缓慢, 也就是说, 粗糙度诱发闭合效应, 它可以解释短裂纹扩展的特殊性。短裂纹扩展初期晶界使扩展方向发生转折导致断口粗糙度的变化, 从而诱发闭合效应。由于短裂纹阶段, 裂纹扩展接触的晶粒比较少, 因而闭合效应不太明显。随着裂纹深度的增长, 裂纹扩展时遇到的晶界越来越多, 闭合效应越来越明显, 致使裂纹扩展速率呈下降的趋势。随着裂纹深度的增加, 遇到的晶粒越来越多, 断口越来越粗糙, 闭合效应越来越明显, 裂纹扩展速率更低。最后裂纹扩展到一定深度后应力剪切分量下降为0, 裂纹处于拉应力状态, 而拉应力诱发的闭合效应不明显, 裂纹扩展进入长裂纹阶段。因此 da/dN 也相应地表现为先上升、后延缓, 然后再上升。也就是说短裂纹扩展主要与微观结构有关。

如果短裂纹测量点比较致密, 再与断口金相分析相结合即可得到晶界与裂纹扩展速率的关系^[5,6]。

Morris 等人^[7]研究发现, 剪切分量的作用使裂纹前

端塑性变形所引起的粗糙度同样会诱发闭合效应。第二相质点对短裂纹扩展的影响在于它使裂纹前端应变均匀性不同, 裂纹扩展遇到第二相时发生转折, 从而断裂面上粗糙度不同, 诱发闭合效应, 阻碍裂纹的扩展。

夹杂物对短裂纹扩展也有所影响: 一方面较大的夹杂物对裂纹扩展通道形成阻碍; 另一方面, 当裂纹切过夹杂物时会引起断裂面上粗糙度的增加, 当裂纹绕过夹杂物时, 会出现基体不均匀的塑性变形, 因此也会诱发闭合效应, 使短裂纹扩展受到影响, 而且夹杂物越多, 其平均间距越小, 闭合效应也愈明显。

4 结论

(1) LY 12CZ 铝合金包铝试样的短裂纹萌生于包铝层, 以角裂纹的形式向基体扩展, 疲劳裂纹也会在第二相质点处萌生。

(2) 材料的微观组织是影响短裂纹扩展的主要因素, 晶界及第二相质点会导致断口粗糙, 从而诱发裂纹扩展的闭合效应, 而闭合效应是影响短裂纹与长裂纹扩展差别的重要因素。

参考文献

- 1 洪友士等. 疲劳裂纹萌生及扩展的细观过程和理论力. 力学进展, 1993, 23: 468 ~ 485
- 2 J. C. Newman, Jr. Fastran - A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program. NASA Technical Memorandum 104159, Feb. 1992 (revised copy)
- 3 J. Pearson. Initiation of fatigue crack in commercial aluminium alloys and the subsequent propagation of very short crack. Engng. Fract. Mech. 1975, 7 (2): 235 ~ 247
- 4 R. W. Hertberg, W. J. Hills. Character of fatigue fracture surface micromorphology in the ultra-low growth rate regime. ASTM SPT 600, 1976, 200 ~ 208
- 5 A. F. Blom, A. Hedlund, W. Zhao, A. Fathulla, B. Weiss, R. Stickler. Presented Symposium on the Behaviour of Short Fatigue Cracks, 1985, 871 ~ 879
- 6 A. Fathulla, B. Weiss, R. Stickler. Presented at the International Spring Meeting of the Societe Francaise de Metallurgie, 1984, 541 ~ 548
- 7 W. L. Morris. Metallurgical transactions, 1980, 11A: 1117 ~ 1124

收稿日期: 1998-12-05

闫海, 男, 1966年11月出生, 工程师, 主要从事金属材料及失效分析的研究工作。联系地址: 北京81信箱4分箱 (100095)