

# 铝合金 CCT 试样裂纹扩展三维尺寸效应金相分析

何宇廷<sup>1</sup>, 傅祥炯<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 西北工业大学 飞机结构强度研究所, 陕西 西安 710072)

**摘要:**在三种厚度 7075 铝合金 CCT 试样随机谱裂纹扩展实验的基础上,对试样断口进行了精细的扫描电子显微镜分析。通过比较不同厚度试样在相同长度裂纹部位上同等放大倍数的金相照片,可以发现,试样的三维几何尺寸对裂纹扩展速率有着严重的影响,厚度越厚,则疲劳条带越稀,裂纹扩展越快。最后对机理进行了分析。

**关键词:**铝合金;CCT 试样;随机谱;裂纹扩展;金相分析

**中图分类号:**TH140.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)02-0005-04

随着断裂力学的发展,损伤容限耐久性设计与评定技术得到了长足的发展,并已广泛应用于航空、航天、船航、机械、化工等领域。然而,成熟的断裂力学是建立在平面问题的基础上,可实际结构又大都是具有不同三维尺寸的空间结构,这就使得已有的成熟平面断裂力学理论在应用时不可避免地出现了误差。工程应用的需要一方面使得工程师们采用不同的修正方法对已有的研究成果及理论进行修正后用于工程实践,另一方面,三维断裂力学不论是在理论上还是在实验上也开始了蓬勃的发展之势。本文从断口金相的实验分析角度对 7075 铝合金 CCT 试样在随机载荷谱(具有相同的限制应力水平)下的裂纹扩展行为的三维尺寸效应进行一些初步研究。

## 1 裂纹扩展实验分析

### 1.1 实验件

由 7075 铝合金制成 CCT 试样 12 件,分三种厚度,每种厚度 4 件(实验中 3 件有效即可)。试件如图 1 所示,厚度为 2 mm、6 mm、12 mm。用钼丝切割的方法在试件中间(1 孔两边各切约 1.5 mm 的槽,即  $2a = 4$  mm。试件槽两边各预制约 1 mm 长的裂纹。

### 1.2 实验设备、环境、载荷、实验方法及实验结果

实验在 MTS810.13 型  $\pm 250$  kN 电液伺服实验机上进行。该机经检查,载荷误差  $< 1\%$ 。实验在室温、空气环境中进行。预制裂纹时加载频率为 20 Hz,正式实验时加载频率为 15 Hz。

裂纹测量借助于分辨率为 0.1 mm 的读数显微镜和在试件上贴参照标记进行目测获得裂纹尺寸  $a$  值。在实验过程中,明显观察到 2 mm 厚度试件裂纹扩展速度明显较慢,而 12 mm 厚度试件裂纹扩展速度较快,实验结果宏观断口形貌如图 2。其中对  $t = 2$  mm、6 mm、12 mm 三种厚度 CCT 试样断口各取一侧进行分析。

从图 2 可初步看出,在裂纹厚度均为 25 mm 处(应力水平相同,故可认为有相同的应力强度因子及幅值),2 mm 厚度试样上疲劳破坏痕迹—瓦纹线最密,12 mm 厚度试样断口上相应部位的瓦纹线最稀,6 mm 厚度试样介于其间。由此可以初步看出,在相同的外载荷条件下,试样越薄,其疲劳裂纹扩展越慢,而试样越

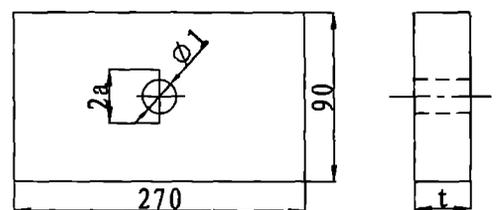


图1 试件形状及几何参数

收稿日期:2001-06-07

基金项目:航空基础科学基金资助项目(97B530011)。

作者简介:何宇廷(1966-),男,四川阆中人,教授,博士,主要从事结构使用寿命、可靠性及优化设计研究。

厚,其疲劳裂纹扩展越快。

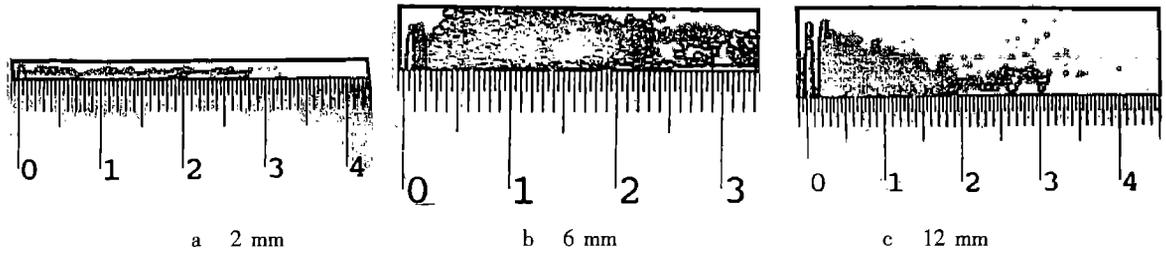
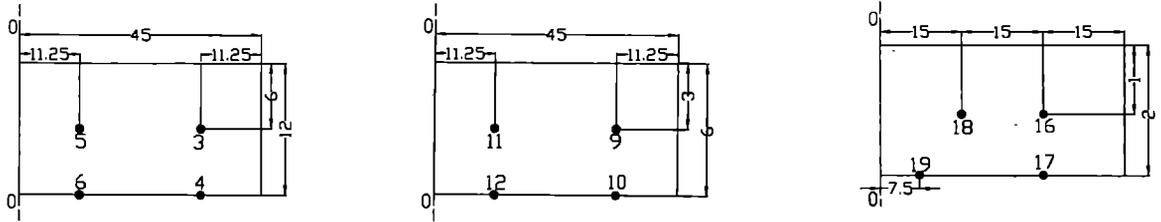


图2 三种厚度 CCT 试样断口宏观形貌

### 3 试样断口微观金相分析

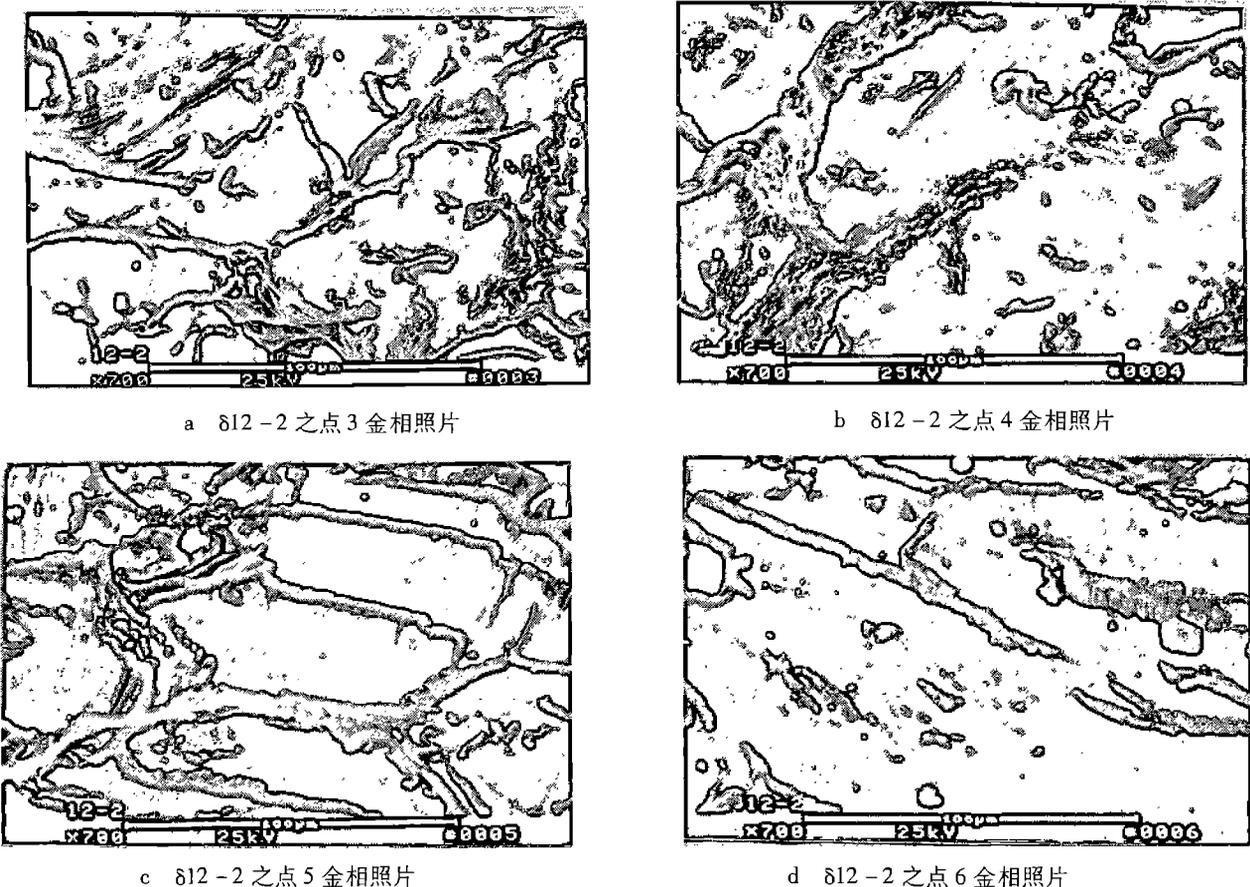
#### 3.1 试样断口金相照片分析

为便于比较分析,取断口一半(中心孔以右的半边)进行分析观察,且观察部位如图3所示。试验数据表明,观察部位均在 Paris 公式第二阶段的范围内。其中,点 3,5,9,11,16,18 为断口中间相应部位的点,点 4,6,10,12,17,19 为断口相应表面的点。以上各部位的金相照片以相同的照片序号与之对应(注:12 点为二次重拍照片,序号为 5<sup>#</sup>)实验所用设备为 AMRAY-10008 扫描电子显微镜。这里仅取有代表性的 3,4,5,6,9,10,11,12,16,17,18,19 点的照片进行分析,如图4所示。



a 812-2 厚试样金相照片分析部位图 b 86-4 厚试样金相照片分析部位图 c 82-4 厚试样金相照片分析部位图

图3 断口金相观察部位分布图

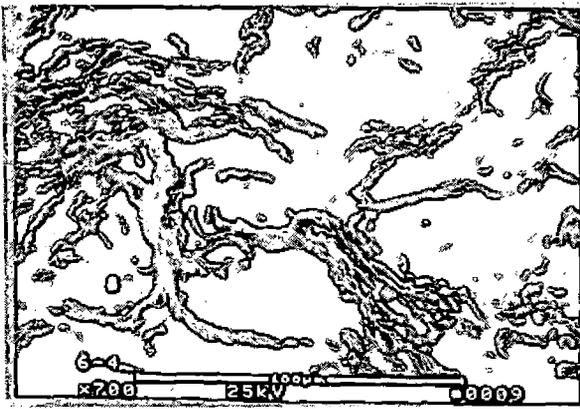


a 812-2 之点3 金相照片

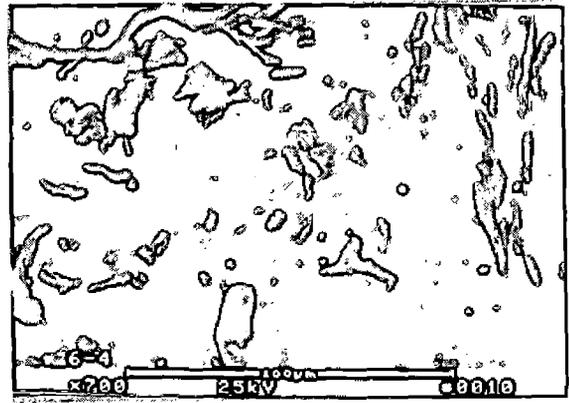
b 812-2 之点4 金相照片

c 812-2 之点5 金相照片

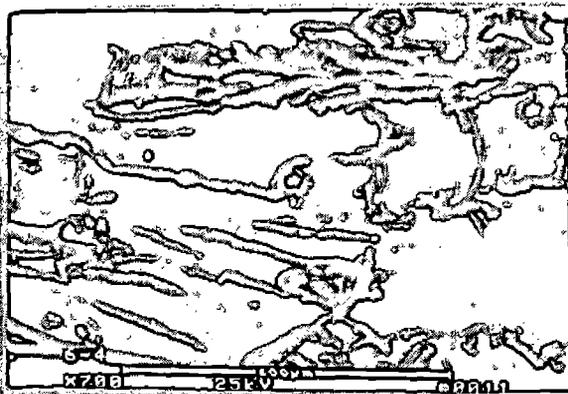
d 812-2 之点6 金相照片



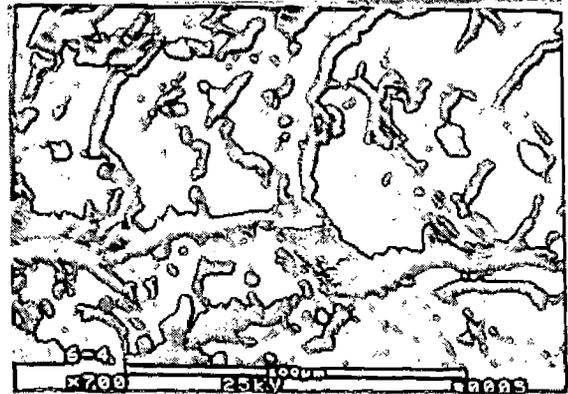
e 86-4 之点9金相照片



f 86-4 之点10金相照片



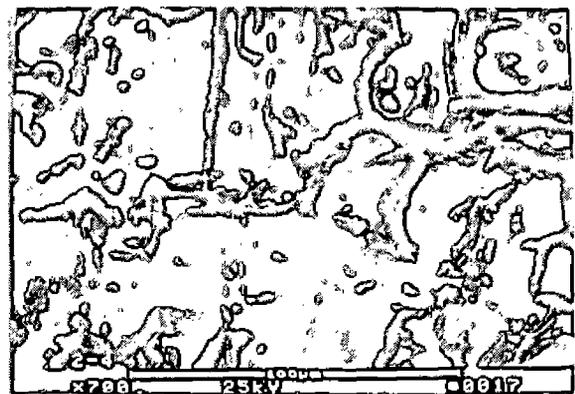
g 86-4 之点11金相照片



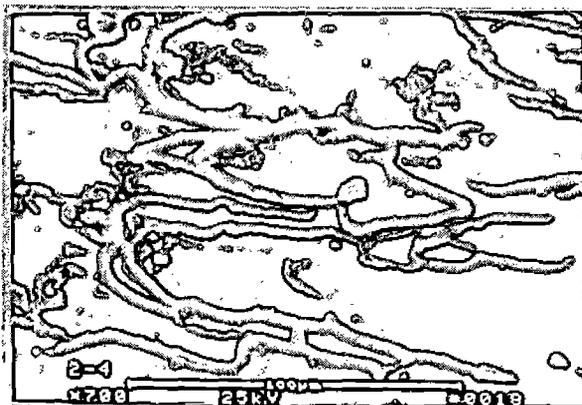
h 86-4 之点12金相照片



i 82-4 之点16金相照片



j 82-4 之点17金相照片



k 82-4 之点18金相照片



l 82-4 之点19金相照片

图4 试样断口典型部位金相照片

在放大倍数均700倍的情况下对以上照片进行综合分析后,可得知,点3与点9位置完全一致;点16位置与之接近。可以看出其疲劳条带分布为点3处稍稀;而点16处稍密;点9处居中;点4与点10位置一致;点17与之接近;点4、点10处疲劳条带分布基本一致;点17分布较密;点5、点11位置一致,点18与之接近;

点5处疲劳条带分布明显较稀;点18处明显较密;点11处居中。且大致可看出一个谱块内裂纹扩展距离5点处约为11点处的1.5倍左右;为18点处的2.5-3倍。点6与点12位置一致,点19与之接近,但可以看出疲劳条带分布基本一致,少数部位疲劳条带中夹有少量的滑移条带)。

### 3.2 金相照片的影响机理分析

从以上金相照片可以看出,虽然裂纹在各对应部位有着相同的应力强度因子 $K$ 及幅值( $\Delta K$ ),但由于试样厚度不同,其裂纹扩展速度明显不同,薄试件裂纹扩展速度比厚试件慢,因而裂纹扩展寿命长。其主要原因是厚试件大部分处于平面应变状态,裂纹扩展受三向应力作用支配,从而使得材料裂纹扩展抗力率降低,裂纹扩展速度加快。相应地处于试样表面附近相对应位置各点的裂纹扩展速度基本一致,其主要是因为试样表面各点均处于平面应力状态,只要应力强度因子及幅值 $\Delta K$ 一致,其扩展速度即相同。

## 4 结论

本文在三种厚度7075铝合金CCT试样随机谱裂纹扩展实验基础上,对试样断口进行金相分析,得到以下几点结论:1)不同厚度尺寸的试样其微观金相照片反映了明显的三维尺寸效应影响。2)由于大部分厚试样处于平面应变状态,在相同应力强度因子及幅值作用下(或一个标准谱块作用下),其中心部位金相照片上疲劳条带分布明显稀疏(在相同放大倍数下观察);反之薄试样由于大部分处于平面应力状态,其对应的疲劳条带分布明显稠密。3)厚试样与薄试样在试样表面附近对应位置(即应力强度因子及幅值 $\Delta K$ 一致)金相照片上疲劳条带分布基本相同,其原因是均处于平面应力状态之故。4)根据金相照片,可以初步估算 $\delta_2$ 试样裂纹寿命约为 $\delta_6$ 的1.5倍,是 $\delta_{12}$ 试样的2.5~3倍。

### 参考文献:

- [1] 何宇廷. 三维断口准则及疲劳裂纹扩展研究[D]. 西安:西北工业大学, 1997.
- [2] 郭万林. 三维断裂和疲劳裂纹扩展[D]. 西安:西北工业大学, 1991.
- [3] 陈世朴. 王永瑞. 金属电子显微镜分析[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.

(编辑:姚树峰)

## Study of Three - Dimensional Effect on Crack of CCT Aluminum Alloy Specimens by Fractograph Analysis

HE Yu - ting<sup>1</sup>, FU Xiang - jiong<sup>2</sup>

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Based on the crack extension testing of 7075 Aluminum - Alloy CCT specimens in three kinds of thickness under random spectra, the fractures of the specimens are carefully analyzed by virtue of election scanning microscope in this paper. Through the comparison of the photomicrographs with the same magnification factor and at the same length of corresponding crack positions of specimens different in thickness, it is found that the three - dimensional geometry of specimen has a great effect on the crack growth rate; and the thicker the specimen, the wider the fatigue strap, and the faster the crack extends. By the end of this paper, the mechanism is analyzed.

**Keywords:** aluminum alloy; CCT specimen; random spectra; crack growth; fractograph analysis