

# 钛合金耳片的静载失效分析与结构优化研究<sup>\*</sup>

李 辉<sup>1</sup>, 陈 蓬<sup>1</sup>, 姚泽坤<sup>2</sup>, 宁永权<sup>2</sup>

(1. 中国航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089;

2. 西北工业大学材料学院, 西安 710072)

[摘要] 钛合金因比强度高、耐蚀性好、耐热性高等特点被广泛应用于航空、航天、舰船等领域。飞机在襟翼滑轮架侧板、铰链接头、基座等结构部位采用钛合金零件, 其中部分零件涉及耳片连接结构。为了对钛合金耳片进行强度分析和结构优化, 开展了不同尺寸钛合金耳片的静载试验研究。揭示了钛合金耳片几何尺寸与加载角度对破坏载荷的影响规律; 计算获得轴向加载效率系数  $K_0$  与角度加载效率系数  $K_{con1}$ ; 对典型断口进行了形貌观察, 探讨了钛合金耳片在室温静载荷作用下的破坏机制。

关键词: 钛合金; 耳片; 失效分析; 结构优化

## Failure Analysis and Structure Optimization of Titanium Alloy Lug

LI Hui<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>1</sup>, YAO Zekun<sup>2</sup>, NING Yongquan<sup>2</sup>

(1. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Titanium alloy is widely used in aviation, aerospace, marine and other fields for its high strength, good corrosion resistance and high heat resistance. Lots of aircraft structures were manufactured by titanium alloys, such as the pulley frame, hinge joint and the base structure, which relate to lug connection parts. In order to investigate the failure behavior and optimize the geometric shape, the static-load tests were carried out on the titanium alloy lugs. The effect of lug shape and loading method on the failure behavior has been studied, and  $K_0$  and  $K_{con1}$  have been calculated. Meanwhile, typical fracture mechanisms of the titanium alloy lugs were given in present research.

Keywords: Titanium alloy; Lug; Failure analysis; Structure optimization

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.05.096

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属。钛合金因比强度高、耐蚀性好、耐热性高等特点而被广泛用于航空、航天、舰船、核能、电力、交通等领域<sup>[1-6]</sup>。飞机在襟翼滑轮架侧板、铰链接头、基座等结构部位采用钛合金零件, 其中部分零件涉及到耳片连接结构<sup>[7-9]</sup>。目前, 钛合金耳片的效率系数曲线不全。为了对钛合金耳片进行强度分析和结构优化, 开展本试验研究, 以获得直耳片且耳片尺寸的比值  $b/d$  分别为 1.5、2.0、2.5、3.0s,  $c$  分别为 1.0、1.2、1.4、1.6 时, 不同加载角度( $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ ) 的拉伸破坏载荷数据; 探索耳片尺寸对效率系数  $K_0$  及折算系数  $K_{con1}$  的影响规律; 通过断口观察、成分分析、组织检验等理化测试, 确定耳片的断裂性质及失效原因。

## 1 试验及方法

### 1.1 耳片结构设计

采用 ABAQUS 软件对钛合金耳片静载荷拉伸进行了有限元模拟, 以优化耳片结构。为保证组合耳片经过 3 次加载而不变形, 对中间进行增厚设计。中部采用试样厚度  $t=9\text{mm}$ , 3 个测试耳片采用  $t=6\text{mm}$ 。对设计方案进行有限元分析验证,  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  加载的验证结果如图 1 所示。本模型中, 耳片采用带厚度参数的平面单元, 销钉采用解析刚体。在左上角公共加载孔销钉处施加位移边界条件, 在左下角耳孔销钉处施加载荷, 载荷方向沿公共加载孔和耳孔中心连线向外。销钉与孔之间通过无摩擦接触面传递载荷。计算时采用基于合金弹塑性分析的计算方法。

加载角分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ , 耳片部位应力接近

\* 基金项目: 中央高校基本科研业务费(3102016ZY012)。

母材强度极限时,承力主板部位的应力水平均低于其屈服极限。这说明耳片发生破坏时,承力主板并未发生塑性变形。另外,可以看到在耳片与承力主板连接处有较高水平的应力集中,这是由于在有限元模拟过程中采用的是带厚度的平面单元,耳根处在厚度方向并没有引入圆弧过渡所致。在实际加工时,需要在耳根部位在各方向增加过渡圆弧,以减小此处应力集中,确保试验的有效性。

## 1.2 试验方法

试验开始前,首先对不同规格的耳片试验件的表面质量进行详细检查,并记录缺陷位置、缺陷尺寸等。对于不符合要求的试验件应剔除并重新加工,以保证试验的顺利进行。

为了试验程序更具条理化和试验数据记录、整理和分析方便,对所有的试验件进行了分类和编号。用计量检定合格的游标卡尺及内测千分尺测量耳片的几何尺寸,包括耳片宽度  $b$ 、厚度  $t$ 、耳孔直径  $d$  以及耳高  $H$ ; 测量过程中不得损伤试样表面。钛合金耳片拉伸测试严格执行 HB5143-1996《金属室温拉伸试验方法》,拉伸速率为 3mm/min,加载角度  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 。记录耳片的破坏载荷  $P_b$ 。选取典型耳片断口,超声波清洗后,利用扫描电子显微镜观察断口形貌并进行失效分析。

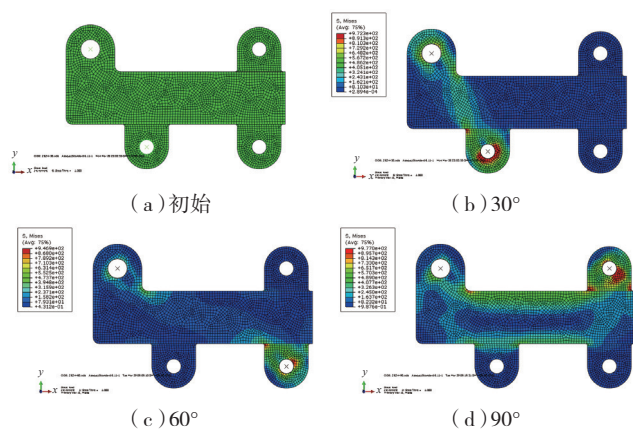


图1 直耳组合耳片有限元模拟  
Fig.1 Finite element analysis of the titanium alloy lugs processed after static-load tests

## 2 结果与讨论

### 2.1 耳片尺寸对破坏载荷的影响

加载角度  $\alpha = 0^\circ$  时,耳片尺寸对轴向加载破坏载荷的影响如图 2 所示。可见,耳宽  $b$  一定时,破坏载荷随着耳高的增加而增大,且破坏载荷与耳高近似呈线性相关。随着耳宽的增大,直线斜率增大,表明耳高对提升直耳片轴向加载破坏载荷的作用随着耳宽的增加而

增大。耳宽的增加会直接增加耳片的承力面积,从而提升耳片的承载能力,故此耳片破坏载荷随着耳宽的增加有较大幅度的增加。

角度加载破坏载荷与耳片几何尺寸和加载角度的关系如图 3 所示。破坏载荷随着耳宽  $b$  的增加有明显的增加,且破坏载荷和耳宽同样呈近似的线性关系。直线的斜率随着加载角度的增加有所降低,这表明在试验范围内,耳片宽度对直耳片斜向加载破坏载荷的提升作用随着加载角度的增加略微有所下降。此外,直耳片角度加载时,破坏载荷随着加载角度的增加有所下降,且下降的幅度随着耳宽的增加而增大。

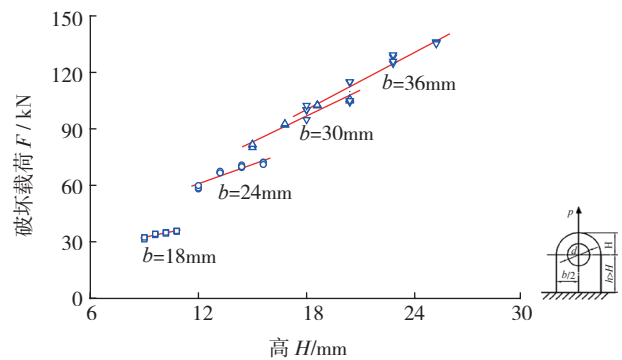


图2 耳片尺寸对轴向加载破坏载荷的影响  
Fig.2 Effect of lug shape on axial failure load

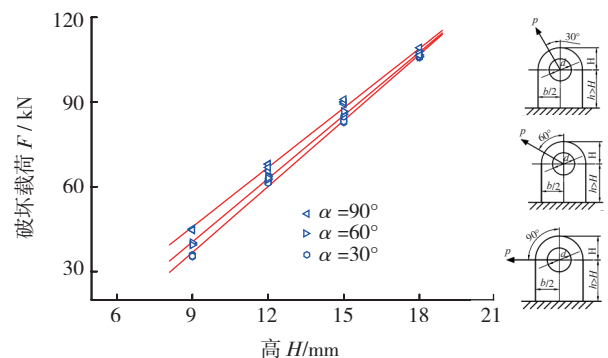


图3 耳片尺寸对角度加载破坏载荷的影响  
Fig.3 Effect of lug shape on failure load at different angles

### 2.2 耳片尺寸与加载角度对效率系数的影响

耳片轴向加载按照公式(1)计算效率系数<sup>[10]</sup>。

$$K_0 = \frac{\sigma_{bt}}{\sigma_b} = \frac{P_b / ((b-d)t)}{\sigma_b} \quad (1)$$

式中,  $K_0$  为耳片效率系数;  $\sigma_b$  为材料标准试样所测得的强度极限;  $P_b$  为耳片试验破坏载荷;  $b$  为耳片宽度;  $d$  为孔径;  $t$  为耳片厚度。

耳片效率系数曲线如图 4 所示,效率系数和  $b/d$  有较好的线性关系。图 5 为直耳片效率系数分布图,当剪切断裂  $c$  值和  $b/d$  的值位于图中阴影区域内时,耳片的效率系数大于 1,且分布非常规律,由此排除了材料组

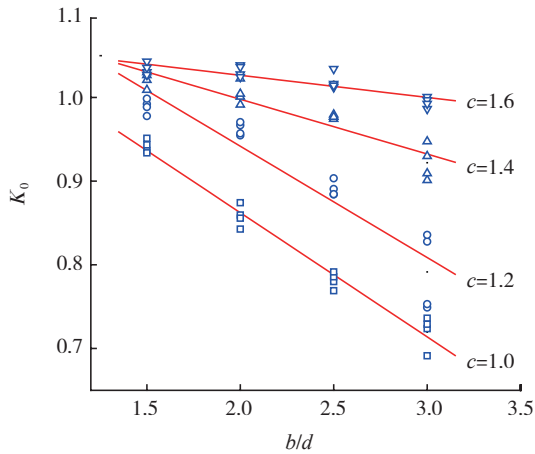


图4 钛合金耳片效率系数 $K_0$

Fig.4 Efficiency coefficient  $K_0$  of titanium alloy lugs

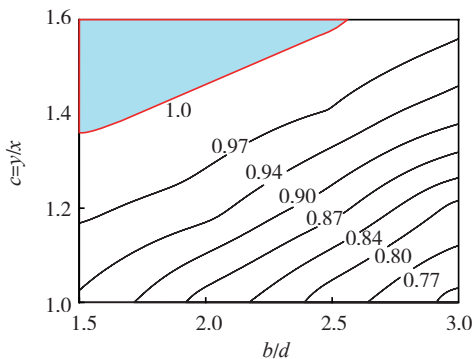


图5 效率系数 $K_0$ 分布图

Fig.5 Efficiency coefficient map

织性能不均匀的影响因素。缺口强化是指缺口试样的破坏载荷与截面积之比大于光滑试样的破坏载荷与截面积之比。缺口强化效应经常发生在具有缺口的塑性材料的试验件上。本试验中的耳片即属于缺口试样,其中的耳片可以认为是缺口。因此,由耳孔引起的缺口强化很可能就是造成直耳片效率系数大于1的原因。

直耳片  $\alpha$  角度加载按照公式(2)计算效率系数  $K_{con1}^{[10]}$ 。

$$K_{con1} = \frac{P_{f\alpha 0}}{P_{f00}} \quad (2)$$

式中,  $K_{con1}$  为加载角度  $\alpha$  的折算系数;  $P_{f\alpha 0}$  为加载角度  $\alpha$  的破坏载荷;  $P_{f00}$  为相同规格的耳片 00 方向加载时的破坏载荷。

加载角度对直耳片折算系数  $K_{con1}$  的影响见图 6。可见,直耳片的折算系数  $K_{con1}$  基本小于 1。随着加载角度由  $30^\circ$  增大至  $90^\circ$ , 折算系数  $K_{con1}$  显著减小。因此,在结构设计时,需结合实际工作状态,设计耳片形状与尺寸,避免失效。

### 2.3 钛合金耳片的失效分析

#### 2.3.1 典型破坏方式

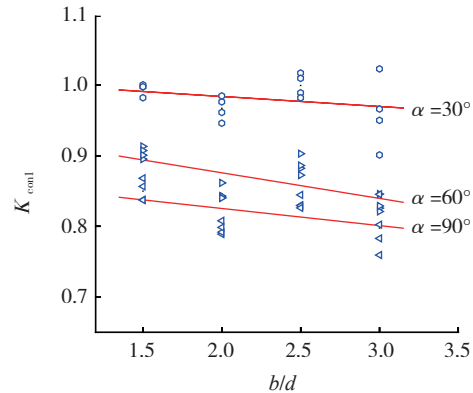


图6 加载角度对耳片折算系数 $K_{con1}$ 的影响

Fig.6 Effect of loading angle on  $K_{con1}$  of lug

耳片连接件结构简单,但耳孔周围的应力状态却非常复杂。在外力作用下,其头部处于拉伸、弯曲和剪切复合受力状态之下。因此,耳片在轴向载荷作用下,会出现如下 3 种典型的破坏形式。

拉伸破坏:耳片拉伸净断面远小于剪切面,耳片以拉断为主。

剪切破坏:耳片拉伸净断面远大于剪切面,耳片以剪断为主。

拉剪复合破坏:耳片拉伸净断面与剪切面差别不大,耳片呈拉剪复合破坏形式。

此次耳片静力拉伸试验中直耳片试验件破坏形式出现了 4 种,如图 7 所示。

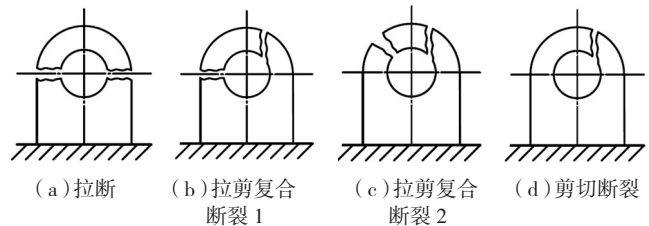


图7 耳片轴向受载破坏形式示意图

Fig.7 Diagrammatic failure mode of the titanium alloy lugs

不同尺寸直耳片的破坏形式见表 1,其规律归纳为:

- (1) 当  $b/d=1.5$ , 耳片断裂方式全部为拉断;
- (2) 当  $b/d=2.0$ ,  $c=1.0, 1.2$  时,耳片断裂方式为拉剪复合断裂;  $c=1.4, 1.6$  时,耳片断裂方式为拉断;
- (3) 当  $b/d=2.5$ ,  $c=1.0, 1.2, 1.4$  时,耳片的断裂方式主要为拉剪复合断裂;  $c=1.6$  时,耳片断裂方式为拉断。
- (4) 当  $b/d=3.0$ ,  $c=1.0, 1.2, 1.4, 1.6$ , 耳片的断裂方式主要为拉剪复合断裂,个别试验件为剪切断裂。

综上,随  $b/d$  和  $c$  的增大,耳片剪切面积增大,破坏形式由拉断为主逐渐转变为拉剪复合断裂,并个别试验件出现剪切断裂,基本符合耳片经典破坏规律。

表1 耳片受轴向载荷破坏形式统计表

组号	b/d	$c = \frac{H-d/2}{(b-d)/2}$	破坏形式
1~4	1.5	1.0	拉断
5~8		1.2	
9~12		1.4	
13~16		1.6	
17~20	2.0	1.0	拉剪复合断裂
21~24		1.2	
25~28		1.4	拉断
29~32		1.6	
33~36	2.5	1.0	剪切断裂
37~40		1.2	拉剪复合断裂 2
41~44		1.4	拉剪复合断裂
45~48		1.6	拉断
49~52	3.0	1.0	拉剪复合断裂 2/ 剪切断裂
53~56		1.2	
57~60		1.4	拉剪复合断裂 1/ 剪切断裂
61~64		1.6	

### 2.3.2 典型断口形貌

按照断裂应变分类,断裂可分为脆性断裂和韧性断裂。材料或构件断裂前没有宏观塑性变形或塑性变形很小,称之为脆性断裂,其断裂前应变很小;材料或构件断裂前有明显的塑性变形,称之为韧性断裂,其断裂应变较大。从宏观形貌来看,韧性断口一般分为杯锥状或双杯锥状、凿峰状、纯剪切断口等。

图8是直耳片受轴向载荷时,拉伸破坏及拉剪复合破坏拉伸侧的断口形貌。根据断口的低倍照片,可以发现其断口形貌呈现出“杯锥”状形貌,且断口附近有明显的塑性变形。由此可以确定直耳片轴向受载时,拉伸破坏及拉剪复合破坏拉伸侧的断裂均属于韧性断裂。

直耳片轴向加载时,拉伸破坏及拉剪复合破坏拉伸侧的微观断口形貌主要是等轴韧窝。韧窝的形状主要取决于应力状态,与构成韧窝源的第二相质点或母材的塑性变形特征几乎没有关系。等轴韧窝是在正应力作用下形成的。如前所述,直耳片轴向受载类似于单轴拉伸,此时耳片试样中产生的微孔沿空间3个方向的长大速率相同,由此形成等轴韧窝。

图9是剪切破坏断口及拉剪复合破坏剪切侧断口形貌。纯剪切断口也是一种常见的韧性断口,其色泽比较光亮,且断口附近也能观察到明显的塑性变形痕迹。由图9可知,耳片剪切破坏断口的微观形貌主要为剪切韧窝,又称为拉长韧窝。它是在剪切应力作用下形成的,呈抛物线状,并且两个匹配断口表面上韧窝的拉长方向相反。

## 3 结论

(1)揭示了TC4钛合金耳片几何尺寸与加载角度对破坏载荷的影响规律。

(2)计算获得TC4钛合金轴向加载效率系数 $K_0$ 与角度加载效率系数 $K_{con1}$ 。

(3)对典型断口进行了形貌观察,探讨了钛合金耳片在室温静载荷作用下的断口形貌及其形成机制。

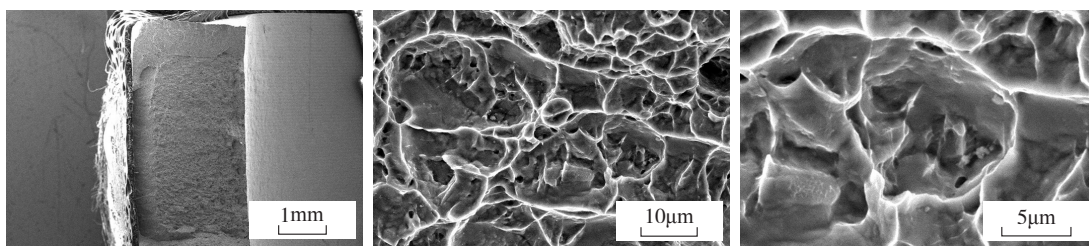


图8 钛合金耳片拉伸破坏断口形貌

Fig.8 Typical fracture morphology of the titanium alloy lugs processed after static-load tests

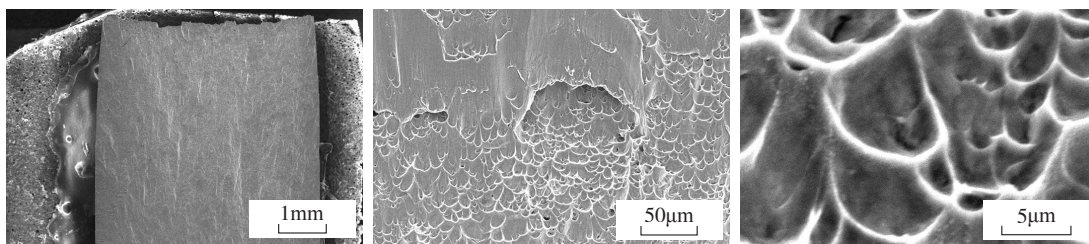


图9 钛合金耳片剪切破坏断口形貌

Fig.9 Shear failure fracture morphology of the titanium alloy lugs

(下转第104页)