

# 钛合金耳片快速设计方法初探

## A Simple Approach for Fast Designing the Titanium Alloy Lug

何翔 / He Xiang

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

为较快捷地得到以钛合金 Ti-6Al-4V 锻件为材料的耳片尺寸参数,同时获得合适的承载效率系数,依据相关文献中关于耳片的 3 种承载效率系数,并结合常规校核公式,将与耳片尺寸参数相关的关联参数由 3 种统一为 1 种,即统一为耳片最小径向截面宽度  $b$  与耳片内径  $D$  的比值,并拟合了对应的承载效率系数曲线。使用本文的 3 种拟合曲线,可快速、有效地得到耳片参数  $b/D$  与承载效率系数的对应关系,达到快速设计接头耳片的目的。

**关键词:**耳片;最小径向截面宽度;载荷效率系数;钛合金;快速设计

[Abstract] For obtaining size parameter of Ti-6Al-4V forging lug quickly and obtaining suitable load efficiency factor, based on 3 load efficiency factors about the lug with related literature and general calculated formula, 3 associated parameters are united into 1 associated parameter, that is a ratio of  $b$  (the minimum radial section width of lug) to  $D$  (the lug inner diameter). And 3 new curves are drew up. By using 3 curves of this paper, The relationship between the size parameter of  $b/D$  of lug and load efficiency factor can be obtained quickly and effectively. So we can achieve our purpose of fast designing a fitting lug.

[Key words] Lug; Minimum Radial Section Width; Load Efficiency Factor; Titanium Alloy; Fast Design

## 0 引言

在现代飞机结构设计中,对于传递集中载荷的地方,大多采用接头耳片/螺栓连接的双剪结构。比如起落架接头、操纵面(副翼、扰流板、升降舵和方向舵等)的铰链接头、各种作动器的操纵接头、水平尾翼与后机身连接的转轴接头以及舱门铰链接头等<sup>[1]</sup>。合理的接头耳片参数对于接头承载能力、飞机的可靠性、安全性以及制造成本皆有重要的影响。

耳片/螺栓结构承载时,耳片可能发生剪切-挤压破坏、拉伸破坏,此时螺栓可能发生剪切破坏、弯曲破坏。为避免发生这些失效形式,就要求耳片的尺寸设计合理,使耳片具备较高的许用承载能力。对于接头耳片的结构设计来说,耳片的轴向剪切-挤压效率系数  $K_{lr}$ 、轴向拉伸效率系数  $K_l$  和横向极限载荷效率系数  $K_{lm}$  是较为关键的要素,选择出合理的 3 种系数数值可有效保证接头耳片的承载能

力。目前,从 3 种系数曲线可以看出,与各承载系数对应的关联参数如表 1 所示。

表 1 载荷系数对照表

参数/载荷系数	剪切-挤压效率系数/ $K_{lr}$	拉伸效率系数/ $K_l$	横向极限载荷效率系数/ $K_{lm}$
常规关联参数	$e/D$	$W/D$	$A_{av}/A_{lr}$
本文目标关联参数	$b/D$	$b/D$	$b/D$

由表 1 可以看出,3 种效率系数对应的常规关联参数皆不相同,给耳片参数选择带来了不便。特别是当耳片同时承载轴向和横向载荷,且耳片为等效耳片(与基本耳片相比,存在角度  $\theta$ )时,则需要进行繁琐的计算来确定  $K_{lr}$ 、 $K_l$  和  $K_{lm}$ 。因此,为了较快捷地得到耳片参数与 3 种效率系数的对应关系,本文研究内容为将关联参数统一为  $b/D$ ,其中  $b$  为最小径向截面宽度、 $D$  为耳片内孔径。

## 1 理论推导

本文依据常规的钛合金锻件耳片的3种承载效率系数数据,并结合常规校核公式<sup>[1]</sup>,推导耳片参数  $b/D$  与3种载荷效率系数之间的曲线关系,包括耳片的承载方向为轴向或横向时的情形。

假定耳片内外径的圆心同心,且耳片厚度为等厚。

在耳片设计时,钛合金耳片首先需满足的设计要求为耳片厚度  $t$  与耳片孔径  $D$  的比值满足  $t/D > 0.3$ <sup>[1]</sup>。

### 1.1 耳片承受轴向载荷

当耳片承受轴向载荷时,常见的破坏形式有剪切撕裂破坏、挤压破坏、拉伸破坏和屈服破坏等<sup>[1]</sup>。主要从耳片的剪切-挤压破坏限制和拉伸破坏限制方面约束耳片参数。其余破坏形式则由耳片尺寸确定后校核具体承载能力。

如图1所示,耳片孔径为  $D$ 、耳片厚度为  $t$ 、最小径向截面宽度为  $b$ ,耳片承受轴向载荷  $F$ 。

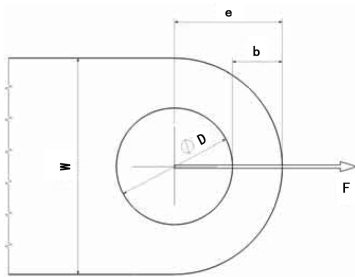


图1 耳片承受轴向载荷示意图

#### (1) 耳片剪切-挤压破坏要求

已知,钛合金耳片的剪切-挤压效率系数  $K_{br}$  与  $e/D$  相关联。由图1可见,  $e = b + D/2$ , 则  $e/D = (b + D/2) / D = b/D + 0.5$ , 得到:

$$b/D = e/D - 0.5 \quad (1)$$

(1)式表明,经过换算后,  $b/D$  与  $K_{br}$  亦相关联。

#### (2) 耳片拉伸破坏要求

已知,钛合金耳片的拉伸效率系数  $K_t$  与  $W/D$  相关联。由图1可见,  $W = D + 2b$ , 则  $W/D = (D + 2b) / D = 1 + 2 \times b/D$ , 得到:

$$b/D = (W/D - 1) / 2 \quad (2)$$

(2)式表明,经过换算后,  $b/D$  与  $K_t$  亦相关联。

综上,钛合金耳片的剪切-挤压效率系数  $K_{br}$  曲线和拉伸效率系数  $K_t$  曲线,通过式(1)和式(2)进行转换计算,并进行数据拟合,得到了如图2所示的钛合金耳片参数  $b/D$  与  $K_{br}$ 、 $K_t$  的关系曲线。

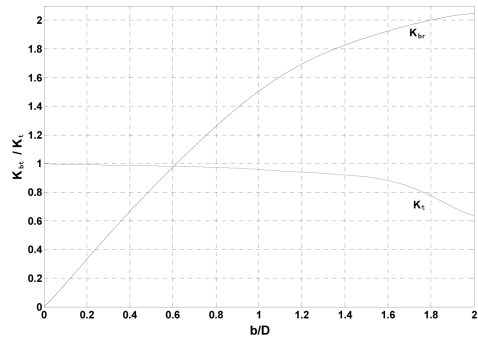


图2 耳片承受轴向载荷时的  $K_{br}-b/D$ 、 $K_t-b/D$  曲线

### 1.2 耳片承受横向载荷

当耳片承受横向载荷时,常见的破坏形式有剪切撕裂破坏、挤压破坏、拉伸破坏和屈服破坏等。此时,耳片的参数需按照经验曲线进行设计确定<sup>[1]</sup>。

如图3所示,该耳片为基本形式的耳片;而图4所示耳片为特殊形状时的等效耳片。等效耳片存在角度  $\theta$ ,若  $\theta = 0^\circ$ ,则图4的耳片形式等同于图3的基本耳片形式。因此,当耳片承受横向载荷时,其极限载荷和屈服载荷必须考虑耳片的形状,亦即需考虑耳片的形状参数  $A_{av}/A_{br}$ 。

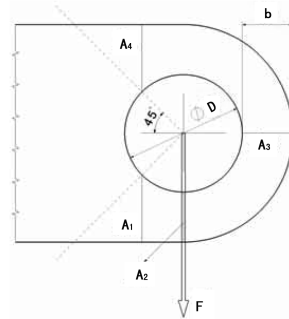


图3 基本耳片形式—承受横向载荷示意图

如图4所示,已知耳片的厚度为  $t$ ,耳片承受横向载荷  $F$ 。假定该等效耳片上、下半部关于  $A_3$  截面对称。

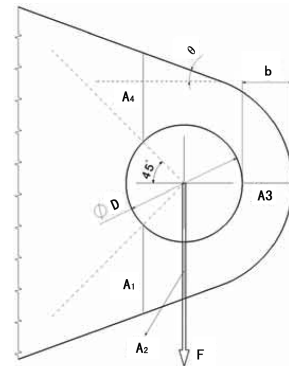


图4 等效耳片形式—角度  $\theta$ —承受横向载荷示意图

耳片的形状参数  $A_{av}/A_{br}-K_{lim}$  关系转换至  $b/D-K_{lim}$  关系的过程如下:

$$\text{定义 } \frac{A_{av}}{A_{br}} = a \quad (3)$$

$$\text{其中, 挤压面投影面积 } A_{br} = D \cdot t \quad (4)$$

$$\text{截面加权平均值 } A_{av} = \frac{6}{\frac{3}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_3} + \frac{1}{A_4}} \quad (5)$$

如图 4 所示, 耳片的 4 处截面面积分别为:

$$A_1 = A_4 = \left[ \frac{\sqrt{2}}{4} D \operatorname{tg} \theta + \left( \frac{D}{2} + b \right) \sin \theta \operatorname{tg} \theta + \left( \frac{D}{2} + b \right) \cos \theta - \frac{\sqrt{2}}{4} D \right] \cdot t \quad (6)$$

$$A_2 = \left[ \left( \frac{D}{2} + b \right) \sin \theta \operatorname{tg} \theta + \left( \frac{D}{2} + b \right) \cos \theta - \frac{D}{2} \right] \cdot t \quad (7)$$

$$A_3 = b \cdot t \quad (8)$$

将式(4)和式(5)代入式(3)可得:

$$a = \frac{\frac{6}{\frac{3}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_3} + \frac{1}{A_4}}}{D t} \quad (9)$$

$$\frac{4}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_3} = \frac{6}{a D t} \quad (10)$$

将式(6)、(7)和式(8)代入式(9), 得到:

$$\frac{4}{\frac{\sqrt{2}}{4} D \operatorname{tg} \theta + \left( \frac{D}{2} + b \right) \sin \theta \operatorname{tg} \theta + \left( \frac{D}{2} + b \right) \cos \theta - \frac{\sqrt{2}}{4} D} + \frac{1}{\left( \frac{D}{2} + b \right) \sin \theta \operatorname{tg} \theta + \left( \frac{D}{2} + b \right) \cos \theta - \frac{D}{2}} + \frac{1}{b} = \frac{6}{a D} \quad (11)$$

将式(11)中分母按  $D$  和  $b$  分别合并系数后, 得到:

$$\frac{4}{\left( \frac{\sqrt{2}}{4} \operatorname{tg} \theta + \frac{\sin \theta \operatorname{tg} \theta}{2} + \frac{\cos \theta}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \right) D + (\sin \theta \operatorname{tg} \theta + \cos \theta) b} + \frac{1}{\left( \frac{\sin \theta \operatorname{tg} \theta}{2} + \frac{\cos \theta}{2} - \frac{1}{2} \right) D + (\sin \theta \operatorname{tg} \theta + \cos \theta) b} + \frac{1}{b} = \frac{6}{a D} \quad (12)$$

对于式(12)中  $D$  和  $b$  的分母系数, 现令

$$P = \frac{\sqrt{2}}{4} \operatorname{tg} \theta + \frac{\sin \theta \operatorname{tg} \theta}{2} + \frac{\cos \theta}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \quad (13)$$

$$R = \sin \theta \operatorname{tg} \theta + \cos \theta \quad (14)$$

$$T = \frac{\sin \theta \operatorname{tg} \theta}{2} + \frac{\cos \theta}{2} - \frac{1}{2} \quad (15)$$

$$W = \sin \theta \operatorname{tg} \theta + \cos \theta \quad (16)$$

则式(12)转换如下:

$$\frac{4}{P \cdot D + R \cdot b} + \frac{1}{T \cdot D + W \cdot b} + \frac{1}{b} = \frac{6}{a D} \quad (17)$$

以  $b/D$  为变量, 转换得到关于  $b/D$  的如下方程:

$$6RW \left( \frac{b}{D} \right)^3 + (6PW + 6RT - 4Wa - Ra - RWa) \left( \frac{b}{D} \right)^2 + (6PT - 4Ta - Pa - PWa - RTa) \frac{b}{D} - PTa = 0 \quad (18)$$

对于等效耳片上下缘角度  $\theta$ , 现选取 8 种角度, 得到  $P$ 、 $R$ 、 $T$  和  $W$  的值, 如表 2 所示。此时, 对于式(18), 若选定某一角度  $\theta$ , 则  $b/D$  与  $a = \frac{A_{av}}{A_{br}}$  存在对应

关系。已知,  $\frac{A_{av}}{A_{br}}$  与横向极限载荷效率系数  $K_{lim}$  存在对应关系, 因此, 任意角度  $\theta$  情况下, 耳片参数  $b/D$  与  $K_{lim}$  亦相关联。

综上, 以钛合金耳片的横向极限载荷效率系数  $K_{lim}$  为基础, 通过等式(18)和表 2 进行转换计算, 并进行数据拟合, 得到了如图 5 所示的钛合金耳片参数  $b/D$  与  $K_{lim}$  的关系曲线。

表 2  $P$ 、 $R$ 、 $T$  和  $W$  的系数表

角度/ $\theta$	$P$	$R$	$T$	$W$
$0^\circ$	0.146 4	1.000 0	0.000 0	1.000 0
$10^\circ$	0.216 5	1.015 4	0.007 7	1.015 4
$20^\circ$	0.307 2	1.064 2	0.032 1	1.064 2
$30^\circ$	0.427 9	1.154 7	0.077 4	1.154 7
$40^\circ$	0.595 8	1.305 4	0.152 7	1.305 4
$50^\circ$	0.845 7	1.555 7	0.277 9	1.555 7
$60^\circ$	1.258 9	2.000 0	0.500 0	2.000 0
$70^\circ$	2.079 8	2.923 8	0.961 9	2.923 8

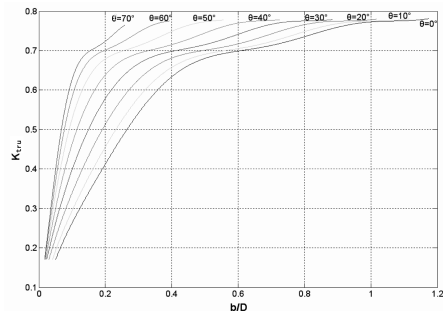


图 5 耳片承受横向载荷时的  $K_{lim}-b/D$  曲线(8 种角度情况)

## 2 耳片设计示例

设计一钛合金耳片,已知耳片内孔径  $D = 70\text{mm}$ 、厚度  $t = 40\text{mm}$ ,  $t/D = 0.57 > 0.25$ 。

### 2.1 耳片承受轴向载荷

(1) 使用文中系数曲线:采用图 1 的耳片形式,此时要求耳片具有较高的抗剪切-挤压和抗拉伸性能,因此,结构设计时需选择较高的承载效率系数。按照图 2 的曲线,选择  $b/D = 0.6$ ,得到相应的承载效率系数数值,系数数值详见表 3。

(2) 使用常规接头耳片系数曲线:以(1)条中确定的耳片尺寸为基础,可计算出耳片的关联参数  $e/D$  和  $W/D$ ;按照常规接头耳片系数曲线,可分别得到耳片承载效率系数数值,系数数值详见表 3。

表 3 耳片承受轴向载荷时的参数表

方法	关联参数		$K_{lm}$	关联参数		$K_t$
(1)使用本文系数曲线	$b/D$	0.6	0.974 5	$b/D$	0.6	0.981 1
(2)使用常规系数曲线	$e/D$	1.1	0.98	$W/D$	2.2	0.98
系数相对误差			0.005 5			0.001 1

由表 3 可以看出,上述两种方法得到的耳片承载效率系数较为接近。因此,使用图 2 的承载效率系数进行耳片设计,可以保证耳片具有足够的抗剪切-挤压和抗拉伸性能。

### 2.2 耳片承受横向载荷

(1) 使用文中系数曲线:当耳片受到横向载荷时,一般采用图 4 的等效耳片的结构,从图 5 的曲线可以看出,在相同耳片参数  $b/D$  的情况下,等效耳片随角度  $\theta$  的增大,耳片的承载效率系数也增大。因此,文中选择耳片参数为  $b/D = 0.6$ 、 $\theta = 30^\circ$ ,由图 5 对应曲线可得到耳片横向承载效率系数数值,系数数值详见表 4。

(2) 使用常规接头耳片系数曲线:依据耳片的设计要求和(1)条中选定的耳片参数,耳片三维模型如图 6 所示,其中耳片的 4 处截面面积分别为  $A_1 = A_4 = 3\ 138.075\ 8\text{mm}^2$ 、 $A_2 = 2\ 156.477\ 7\text{mm}^2$  和  $A_3 = 1\ 680\text{mm}^2$ ;耳片的挤压面投影面积  $A_{br} = 2\ 800\text{mm}^2$ 。按照文献 1 的计算步骤,得到耳片的形状参数  $\frac{A_{av}}{A_{br}} = 0.918$ ,按照常规接头耳片系数曲线,可得到耳片的承载效率系数数值,系数数值详见表 4。

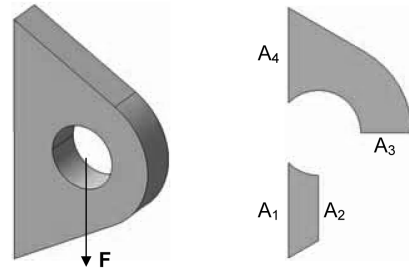


图 6 承受横向载荷的耳片三维示意图

表 4 耳片承受横向载荷时的参数表

方法	关联参数		$K_{lm}$
(1)使用本文系数曲线	$b/D$	0.6	0.741 4
(2)使用常规系数曲线	$A_{av}/A_{br}$	0.918	0.743
系数相对误差			0.001 6

如表 4 所示,上述 2 种方法得到的耳片承载效率系数较为接近。因此,使用图 5 的承载效率系数进行耳片设计,可以保证耳片具有足够的横向承载能力。

## 3 结论

从设计示例的耳片承载效率系数结果比较,可以看出:利用本文推导出的耳片参数  $b/D$  与 3 种承载效率系数之间的关联曲线,可快速得到耳片参数  $b/D$  与承载效率系数的对应关系,减少设计耳片时繁琐的计算过程;同时,文中的耳片承载效率系数曲线的精度较高,可满足工程设计的需要。

需要说明的是:

(1) 当耳片承受横向承载时,若等效耳片的角度  $\theta$  不在表 2 的 8 种角度中,可在表 2 中选择比  $\theta$  略小的角度,并在图 5 中选择对应角度的载荷效率系数曲线,或使用式(13)~式(18)计算指定角度  $\theta$  情况下载荷效率系数与耳片参数  $b/D$  的对应关系。

(2) 当耳片零件同时承载轴向载荷和横向载荷时,需要综合考虑 3 种承载效率系数的重要程度,合理选择耳片参数  $b/D$  的数值,并按文献 1 的设计步骤进行综合的计算校核。

### 参考文献:

[1]牛春匀.实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M].北京:航空工业出版社,2009:283-294.