

筒形机匣连接凸耳疲劳寿命及其影响因素

谢明立 习年生 赵爱国

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 分析了筒形机匣连接凸耳疲劳寿命的主要影响因素。结果表明, 5个试验件凸耳组织的再结晶程度有很大的差别, 正是由于凸耳组织再结晶程度的分散性导致了其疲劳寿命的分散性。进一步的分析表明, 凸耳组织再结晶程度的分散性是由于模锻时材料原始晶粒大小和形变量不同造成的。此外, 凸耳孔壁表面的加工缺陷也是降低凸耳疲劳寿命的一个重要因素。

关键词: 凸耳; 疲劳断裂; 再结晶; 晶粒度

中图分类号: V275.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(1999)01-0045-06

筒形机匣用以连接直升机旋翼和机身, 是直升机的关键受力件, 其上有4对凸耳, 通过这4对凸耳传递旋翼的各种载荷。每个凸耳的内孔间隙配有一个带挡边的衬套(材料为1Cr17Ni3), 装配前, 在接合面涂乐泰680厌氧胶, 然后装配粘接并固化。工作时, 传动轴销插入成对凸耳的衬套内。为确定筒形机匣的使用寿命, 对其凸耳进行了疲劳试验。本文研究了筒形机匣连接凸耳的疲劳寿命, 分析了凸耳疲劳寿命的主要影响因素及疲劳寿命分散性大的原因。

1 试验与结果

1.1 材料及疲劳试验

共试验了4个国产件和1个国外件。国产件毛坯用LC9CS棒料(国外件用法产7075T73)模锻加工而成。筒形机匣的工艺过程为: 棒料 坯料 初锻 半精锻 精锻 热处理 粗加工 热处理 精加工 表面处理 组装成形。4个国产件成型于不同的批次, 其所用原材料规格有所不同: 1号试验件由150mm棒料直接模锻; 2号和3号试验件由130mm棒料锻粗为180mm棒料后再进行模锻; 4号试验件由180mm棒料直接模锻成型。试验在MTS810材料试验机上进行, 为拉-拉疲劳试验(应力比 $R = 0.1$), 采用多级加载, 最大应力幅值为28.0~54.0kN, 加载频率为15~30Hz。

各凸耳疲劳试验当量寿命详细结果如图1所示, 其中1号和2号凸耳试验加载角度为 35.65° ; 3号和4号凸耳试验加载角度为 42.91° 。从图中数据可以看出, 1号试验件疲劳性能较好且分散性小, 2号试验件和国外件疲劳性能最差, 3号和4号试验件凸耳疲劳寿命分散性较大。

收稿日期: 1998-09-28

作者简介: 谢明立(1967-), 男, 硕士, 工程师

1.2 断口宏观检查

该筒形机匣外观形貌如图 2, 成对凸耳中, 一般是一个凸耳开裂破坏。所有凸耳的开裂面都垂直于加载方向, 在离凸耳根部较远的小截面处首先开裂。凸耳衬套与转载销的接触痕主要分布在凸耳内侧的 1/2 宽度范围, 外侧 1/2 宽度范围无接触痕。

将各凸耳裂纹打开, 宏观观察各凸耳断口, 断口平坦、细密, 为典型的高周疲劳断裂。

1.3 断口微观观察

对上述试验件断裂凸耳各断口进行扫描电镜观察。各凸耳断口裂纹均起源于孔壁内侧顶角或沿孔壁稍往里 1~2mm 处。2 号试验件孔壁加工表面粗糙, 存在大量的孔洞, 其中大的孔洞尺寸超过 30 μm 。2 号试验件各凸耳断口均起源于孔壁孔洞处(图 3); 4 号试验件 2 号和 4 号耳断口也起源于表面损伤缺陷, 其他试验件各凸耳断口裂纹源区未发现大的孔洞和第二相颗粒, 也未发现损伤缺陷。

1.4 凸耳低倍流线分析

将未裂的 4-3 号耳和寿命较短的 4-2 号耳做低倍流线检查, 其流线形貌分布较好, 基本沿凸耳轮廓分布。

1.5 金相组织分析

在上述试验件各凸耳断口位置附近截取试块磨制金相试样, 检查其纵向和横向组织。各

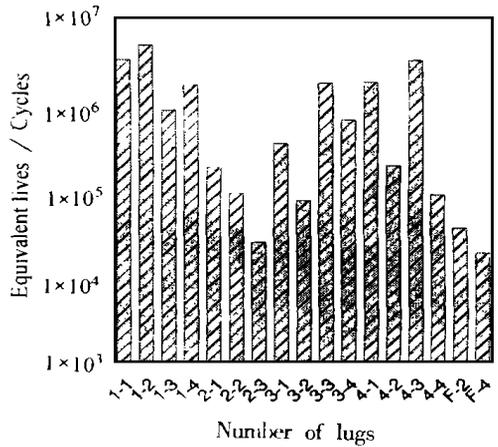


图 1 各试验件凸耳最大载荷 44kN 的当量寿命(应力比 $R=0.1$)

Fig. 1 Equivalent lives of lugs of tested cases under the maximum load of 44kN (Stress ratio $R=0.1$)

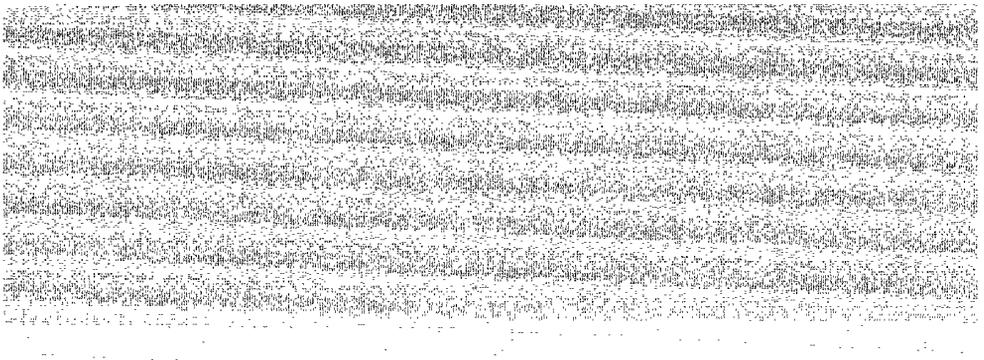


图 2 筒形机匣外观形貌

Fig. 2 Configuration of the tubeshaped case

图 3 2-2 耳断口源区孔洞形貌

Fig. 3 Appearance of the hole at the original area of the fracture surface of lug 2-2

试验件孔壁附近纵向金相组织如图 4 所示, 横向金相组织如图 5 所示。各试验件凸耳组织未见过热过烧特征, 未见有粗大第二相颗粒; 第二相带状分布程度各试验件凸耳组织虽有所差别, 但差别并不很大。各试验件组织差别主要在晶粒大小和再结晶程度上。1 号试验件各凸耳孔内壁附近组织晶粒较为细小、均匀, 分布有较多的细小再结晶晶粒, 即再结晶程度较高; 2 号、3 号试验件除 3-3 耳再结晶程度较高, 晶粒较为细小、均匀外, 其余各耳的组织均较为粗大, 再结晶程度较低。4 号试验件再结晶程度更低, 似乎刚开始再结晶, 基本还处于回复阶段, 晶粒中存在大量细小的亚晶粒(图 5d)。国外件纵向、横向组织均为粗大的等轴晶, 纵向组织未见方向性。这种粗大再结晶组织是在完全再结晶后, 由于保温加热时间过长, 再结晶晶粒发生长大而形成的。

1.6 硬度检查

对各试验件凸耳进行布氏硬度检查, 结果列于表 1。由表可见, 1 号件各凸耳布氏硬度值最低, 4 号件最高, 2 号和 3 号件居中, 这与它们的再结晶程度是相符的。

2 分析与讨论

每对凸耳承载横截面面积约为 1000mm^2 , 试验中施加的最大循环载荷为 54kN , 凸耳如果均匀受力, 所受最大应力为 54MPa , 远小于铝合金的疲劳极限 $\sigma_{-1} = 0.3 \sigma_b = 150.0\text{MPa}$, 凸耳应该具有很高的疲劳寿命。

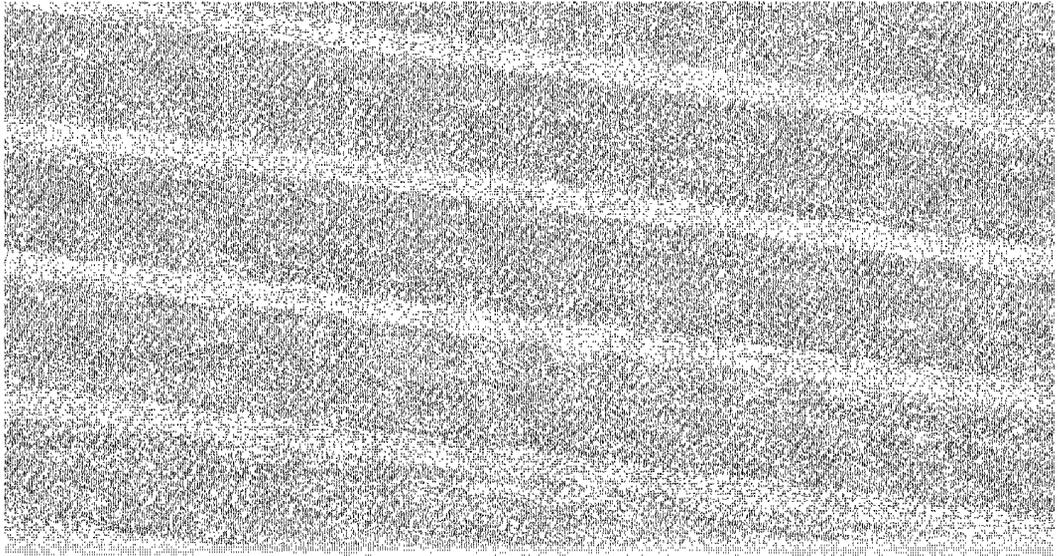


图 4 各试验件凸耳纵向金相组织

(a) 1-1 耳; (b) 2-2 耳; (c) 3-1 耳; (d) 4-3 耳; (e) F-1 耳

Fig. 4 Longitudinal metallographic microstructure of lugs of tested cases

(a) lug 1-1; (b) lug 2-2; (c) lug 3-1; (d) lug 4-3; (e) lug F-1

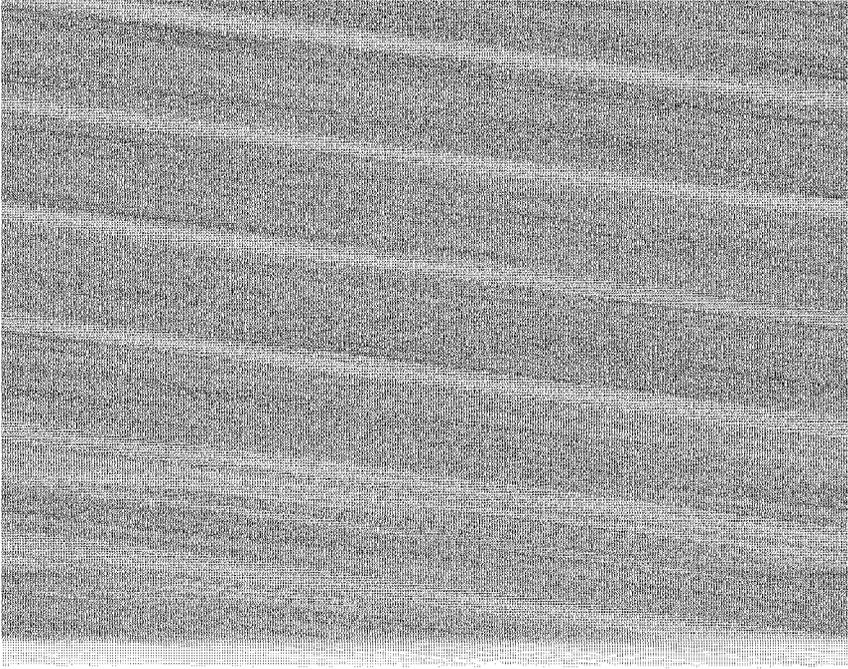


图5 各试验件凸耳横向金相组织

(a) 1-1 耳; (b) 3-1 耳; (c) 3-3 耳; (d) 4-3 耳

Fig. 5 Transverse metallographic microstructure of lugs of tested cases

(a) lug 1-1; (b) lug 3-1; (c) lug 3-3; (d) lug 4-3

表1 各试验件凸耳布氏硬度检测结果, kgf/mm^2

Table 1 Brinell hardness of lugs, kgf/mm^2

Number of tested cases	Lug 1		Lug 2		Lug 3		Lug 4	
	Tested number	Average value						
1	148, 149, 150	149	146, 148, 151	148.3			148, 147, 150	148.3
2	148, 149, 157	151.3	157, 156, 154	155.6	147, 150, 152	149.7		
3	154, 154, 156	154.7	151, 152, 148	150.3	151, 151, 150	150.7		
4	155, 155, 155	155	152, 155, 159	155.3	160, 158, 157	158.3	155, 157, 157	156.3
F (foreign case)	151, 151, 152	151.3						

实际上凸耳的受力是不均匀的。从凸耳衬套上与传载销的接触痕来看, 载荷主要分布于凸耳内侧的 $1/2$ 宽度范围, 外侧 $1/2$ 宽度范围无接触痕, 表明该部分不承载或承载很小。这是由凸耳的承载结构决定的。传载销相对于中间支点犹如一悬臂梁, 在凸耳的载荷作用下发生挠曲变形, 离支点越远, 挠曲变形越大。传载销的不均匀挠曲变形使得载荷重新分布, 挠曲变形大的末端载荷减小, 挠曲变形小的支点附近部位则载荷增大。因此, 紧靠支点的凸耳内侧附近具有最大的应力分布。据有限元分析计算^[1], 最大循环载荷为 44kN 时, 紧靠支点的凸耳内侧局部的最大应力可达 200MPa, 已超出铝合金的疲劳极限, 如再加上一些应力集中(如加工缺陷、夹杂物等)的影响, 局部应力将大大超过疲劳极限而导致疲劳断裂的发生。

如前所述, 5 个试验件凸耳组织的再结晶程度存在很大差异。由于材料的疲劳性能对材料组织晶粒大小较为敏感, 因而材料组织再结晶程度的差异可直接导致材料疲劳性能的不同。国内外的研究表明^[2~4], 再结晶组织对疲劳性能的影响一般可分为以下 4 种情况: (1) 再结晶程度高时(大于 60%), 其晶粒较为细小均匀, 疲劳性能较好; (2) 再结晶程度偏低时(10% ~ 20%), 晶粒极不均匀, 已再结晶的晶粒非常细小, 未再结晶的晶粒较为粗大, 细晶粒呈“项链”状围绕粗大的未再结晶晶粒, 其疲劳性能较差; (3) 未出现再结晶或再结晶程度很低, 基本上是变形组织, 由于保留有较高的纵向强度, 也具有较好的纵向疲劳性能; (4) 完全再结晶组织发生了晶粒长大, 形成粗大的等轴晶, 则疲劳性能又大大降低。这是因为高周疲劳寿命主要取决于疲劳裂纹形核萌生寿命。再结晶程度较高时, 晶粒较为细小, 晶界较多, 晶粒取向差较大, 能有效地阻碍疲劳裂纹形核阶段的晶面滑移, 延缓粗大滑移驻留带(挤入挤出)的形成, 从而提高疲劳裂纹形核萌生寿命; 而当晶粒粗大时, 由于晶界减少, 易于形成粗大的滑移驻留带, 促进疲劳裂纹形核萌生。本次试验的结果正好分属上述 4 种情况。1 号件再结晶程度较高, 接近于第一种情况, 其疲劳寿命较高; 2 号件和 3 号件再结晶程度较低, 属于第二种情况, 晶粒很不均匀, 其疲劳性能就较差, 但 3 号件中的 3-3 耳有较高的再结晶程度, 其疲劳性能相应大大提高(未裂); 4 号试验件再结晶程度很低, 属于第 3 种情况, 疲劳性能也较好, 其中 4-1 耳和 4-3 耳疲劳寿命较高, 而 4-2 耳和 4-4 耳疲劳寿命很低是由于疲劳源区存在损伤缺陷, 降低了疲劳裂纹形核寿命的缘故; 国外件为第 4 种情况, 具有粗大的等轴晶, 因而疲劳性能很差。

表面缺陷的存在会导致产生局部应力集中, 促进疲劳裂纹的萌生, 从而大大降低疲劳寿命。2 号试验件 4 个凸耳断口裂纹均起源于凸耳内孔表面孔洞, 这表明孔洞的存在促进了疲劳裂纹的萌生, 这是 2 号试验件 4 个凸耳疲劳寿命普遍偏低的另一个重要原因。

金属的再结晶过程比较复杂, 形变量、形变温度、原始晶粒大小, 以及退火温度、退火时间等均会影响到再结晶的发生程度和再结晶晶粒的大小。形变量越大, 形变温度越低, 原始晶粒越细小, 再结晶后的晶粒也越细小。这里尤其需要强调一下原始晶粒大小对再结晶的影响, 因为其影响往往容易被忽视。4 个国产试验件模锻工艺参数有如下的差别: 2 个材料状态——锻粗的和未锻粗的; 2 个形变量大小——由 150mm 棒料模锻和由 180mm 棒料模锻。上述锻造工艺参数的差别导致了 4 个试验件组织的再结晶程度不同: 4 号试验件由于棒料直接用于模锻, 原始晶粒较粗, 模锻形变量小, 因而具有最低的再结晶程度, 基本上还处于回复阶段; 2 号和 3 号试验件由于棒料经过锻粗, 材料原始晶粒有所减小, 但因模锻形变量小,

其再结晶程度仍较低; 1号试验件棒料虽未墩粗, 但因模锻变形量很大, 因而其再结晶程度较高。可见, 4个试验件组织再结晶程度不同是由于模锻时材料原始晶粒大小以及模锻变形量不同造成的。

3 结 论

(1) 5个试验件各凸耳组织的再结晶程度存在比较明显的差异, 这是导致其疲劳寿命分散性大的主要因素。

(2) 凸耳孔壁表面存在的损伤与缺陷是导致疲劳寿命降低的重要因素之一。

(3) 试验件组织再结晶程度不同是由于模锻时材料原始晶粒大小以及模锻形变量不同造成的。

(4) 应严格控制模锻工艺参数, 特别要注意对材料原始晶粒度的控制, 以避免获得不完全再结晶的不均匀粗大组织。

参考文献:

- [1] XIN S, Xi M L, et al. An investigation on fatigue life scatter of Al-5. 6Zn-2. 5Mg-1. 6Cu lugs in cases. *Engineering Failure Analysis*, 1999, Accepted
- [2] 阿列克山大 J D. 宇航材料的锻造和性能. 贺开运, 孙荣科等译. 北京: 国防工业出版社, 1985. 321 ~ 324
- [3] 多巴特金 . 铝合金半成品的组织与性能. 洪永先, 谢继三等译. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 287 ~ 288
- [4] 刘朗儒, 刘晖. 铝型材粗、细晶疲劳性能对比试验研究. *航空工艺技术*, 1997(6): 37 ~ 38

An analysis on effective factors to fatigue lives of pull rod linking lugs of tube-shaped cases

XIE Ming-li XI Nian-sheng ZHAO Ai-guo

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The cause of the diversity of fatigue lives of linking lugs of five tube-shaped cases was investigated by microfractography and metallography techniques. The recrystallization degrees of microstructure of lugs are much different. It is the diversity of recrystallization degrees that results in that of fatigue lives of lugs. The diversity of the recrystallization degrees may be resulted from the difference in deformation magnitude and original grain size of materials in die forging. In addition, another important factor of decreasing lives of lugs is machining defects in hole wall surfaces of lugs.

Key words: lug; fatigue fracture; recrystallization; grain size