

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.003

# 压合衬套冷挤压对耳片孔残余应力分布的影响

陶梅生<sup>1</sup>, 黄海鸿<sup>1</sup>, 刘儒军<sup>2</sup>, 殷超超<sup>1</sup>, 任勇<sup>1</sup>, 刘志峰<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007)

**摘要:**文章利用压合衬套冷挤压工艺对7050铝合金耳片孔进行挤压强化,并采用X射线应力测定仪对残余应力进行检测,研究冷挤压强化对耳片孔残余应力分布的影响。实验结果表明:压合衬套冷挤压工艺使耳片孔产生了明显的残余压应力,并沿孔壁径向形成了一定深度的残余压应力层;相同相对挤压量下,挤出端残余压应力明显高于挤入端,且残余压应力值随着相对挤压量增大而变大;在相对挤压量为2.5%时,挤出端残余压应力最大值为-384.2 MPa,并形成了约14 mm残余压应力层。通过显微硬度计对强化后的试样进行检测,检测结果表明,强化后的试样沿孔壁径向形成了约4.5 mm的组织硬化层,最大显微硬度提升达到了18.1%。冷挤压强化后孔壁沿径向形成了残余压应力层和组织硬化层,提高了耳片孔抗疲劳性能。

**关键词:**冷挤压;压合衬套;相对挤压量;残余应力;显微硬度

**中图分类号:**TG376.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1003-5060(2025)01-0019-06

## Effect of cold extrusion of press-fit bushing on residual stress distribution of lug hole

TAO Meisheng<sup>1</sup>, HUANG Haihong<sup>1</sup>, LIU Rujun<sup>2</sup>, YIN Chaochao<sup>1</sup>, REN Yong<sup>1</sup>, LIU Zhifeng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China)

**Abstract:** The 7050 aluminum alloy lug hole was subjected to extrusion strengthening through the press-fit bushing cold extrusion process, and the residual stress was detected by the X-ray stress analyzer. The influence of cold extrusion strengthening on the residual stress distribution of the lug hole was studied. The results showed that the press-fit bushing cold extrusion process generated significant residual compressive stress in the lug hole and formed a residual compressive stress layer of a certain depth along the hole wall radius. Under the same relative extrusion amount, the residual compressive stress at the outlet end was significantly higher than that at the inlet end, and the residual compressive stress increased with the increase of the relative extrusion amount. At a relative extrusion amount of 2.5%, the maximum residual compressive stress at the outlet end was -384.2 MPa, and the residual compressive stress layer was about 14 mm. The strengthened specimens were tested by microhardness tester, and the results showed that the strengthened specimens formed a microstructure hardening layer of about 4.5 mm along the hole wall radius, and the maximum microhardness increased 18.1%. After cold extrusion strengthening, the hole wall formed residual compressive stress layer and microstructure hardening layer, thereby improving the fatigue resistance performance of the lug hole.

**Key words:** cold extrusion; press-fit bushing; relative extrusion amount; residual stress; microhardness

**收稿日期:**2023-02-23; **修回日期:**2023-03-20

**基金项目:**国家自然科学基金重点资助项目(U20A20295)

**作者简介:**陶梅生(1997—),男,安徽铜陵人,合肥工业大学硕士生;

黄海鸿(1980—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: huanghaihong@hfut.edu.cn;

刘志峰(1963—),男,陕西宝鸡人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

7050 铝合金属于轻质高强度铝合金<sup>[1]</sup>,可满足轻量化设计要求,因此被广泛地用于机体以及机身结构孔等重要部件制造中。但飞机机身和机翼大孔径连接耳片孔在服役过程中受到交变载荷的作用,易在孔壁及周围出现应力集中,导致耳片孔出现裂纹、疲劳断裂等破坏形式<sup>[2]</sup>。之前的研究表明,疲劳裂纹引起的断裂是飞机结构件的主要失效形式,有 70%~90% 的机体事故是因孔结构失效导致<sup>[3]</sup>,因此提高耳片孔结构件周边残余压应力来增强抗疲劳性能具有重大意义。

近年来,冷挤压强化工艺由于其操作简单、可控性好且强化效果明显等优点,成为提高飞机连接孔疲劳强度的主要强化手段<sup>[4-5]</sup>。其工艺核心在于利用一定过盈量的芯棒穿过待强化孔,迫使孔壁发生弹塑性变形,从而引入大深度、高幅值可控残余压应力层和组织强化层<sup>[6]</sup>。研究发现该技术可以改善孔周围应力分布情况,提高耳片孔的抗疲劳强度,在航空航天领域得到广泛应用<sup>[7]</sup>。

目前,国内学者针对连接孔挤压强化工艺研究多数采用直接芯棒挤压。文献[8]针对 FGH95 镍基合金,采用芯棒直接挤压强化,发现强化后的孔壁径向形成一定深度的残余压应力层和组织硬化层,有效减缓疲劳裂纹扩展速率;文献[9]利用芯棒孔挤压的方式对铝合金耳片进行强化实验,结果表明强化后内壁表层形成残余应力层,抑制裂纹萌生和扩展速率,提升耳片抗疲劳性能。上述研究表明,经过冷挤压工艺强化后疲劳强度都得到显著提升,孔壁及周围残余压应力层被认为是抗疲劳强度提升的主要因素<sup>[10]</sup>。

在冷挤压研究中发现芯棒直接挤压强化易造成孔边缘突起和孔壁擦伤,这将对孔结构试样的疲劳性能产生影响,为克服上述困难,学者提出开缝衬套冷挤压强化技术<sup>[11-12]</sup>。文献[13]对开缝衬套冷挤压强化工艺进行研究,提出目前研究的不足之处。其主要在于孔壁在挤压过程中由于塑性流动性导致在衬套开缝处形成“凸脊”<sup>[14]</sup>,在疲劳载荷下极易发生应力集中,从而影响孔的精度和服役性能。为解决上述问题,研究者又提出干涉配合衬套<sup>[15]</sup>,即压合衬套,是通过芯棒挤压安装的高干涉量衬套,挤压完成后衬套保留在耳片孔中进一步提升孔结构的疲劳性能<sup>[16]</sup>。文献[17]研究高干涉量压合衬套从单侧和两侧强化对 7050 铝合金疲劳性能的影响,发现压合衬套强化技术能够有效提高孔结构的疲劳强度。

上述研究均指出了衬套挤压强化能够改善应

力集中现象,从而提高孔结构的疲劳性能。但未充分研究相对挤压量对于残余应力分布的影响,同时对冷挤压强化机理并未给出具体的分析。因此本文以 7050 铝合金耳片孔为研究对象,采用压合衬套冷挤压工艺对耳片孔进行冷挤压强化实验。研究了相对挤压量对耳片孔残余应力分布的影响,通过显微硬度计对强化后耳片孔进行检测,从显微硬度方面对结果进行进一步分析。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

耳片孔试样材料为 7050 铝合金,其热处理状态为 T7451,压合衬套试样材料为马氏体沉淀硬化不锈钢 0Cr13Ni8Mo2A1。耳片孔与压合衬套在常温下的基本力学性能见表 1 所列。耳片孔试样几何尺寸如图 1 所示。压合衬套试样长度为 58 mm,外径为 49 mm,内径由相对挤压量决定。

表 1 7050 铝合金及压合衬套力学性能

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
7050 铝合金	510	441	70	0.32
0Cr13Ni8Mo2A1	1 515	1 415	210	0.30

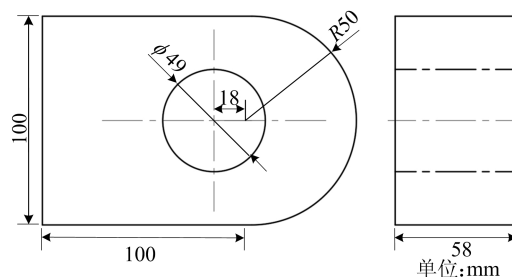


图 1 耳片孔试样形状与尺寸

### 1.2 实验方法

实验采用压合衬套冷挤压强化工艺对耳片孔试样进行强化处理,工艺示意图如图 2 所示。挤压强化实验的相对挤压量分别为 1.7%、2.0%、2.3%、2.5%。 $\eta$  计算公式为:

$$\eta = (D_i - D_n) / D_m \times 100\% \quad (1)$$

其中: $D_i$  为挤压芯棒工作区域直径; $D_n$  为压合衬套内径; $D_m$  为耳片孔初始内径。

压合衬套冷挤压实验前,将二氧化钼干膜润滑剂均匀涂覆于压合衬套内孔孔壁,并进行干燥;然后对待强化耳片孔和芯棒采用无水乙醇和超声波辅助清洗,完成后进行冷挤压实验。实验设备采用美国 FTI 公司生产的 FT-200D 型气液增压

泵和 BB-30 型拉枪。实验过程中依据相对挤压力选择相应的压合衬套和芯棒规格,先将压合衬套置于耳片孔中,利用专用夹具固定耳片孔试样。芯棒非工作端穿过压合衬套内孔与拉枪设备连接;通过鼻顶帽限制压合衬套在轴向方向的自由度,启动泵站使芯棒匀速的通过耳片孔;直至挤压芯棒工作端完全离开耳片孔内壁为止,冷挤压实验结束。

不同表征指标的提取位置及检测方向如图 3 所示。

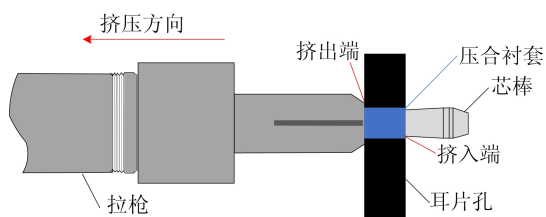


图 2 压合衬套冷挤压强化工艺示意图

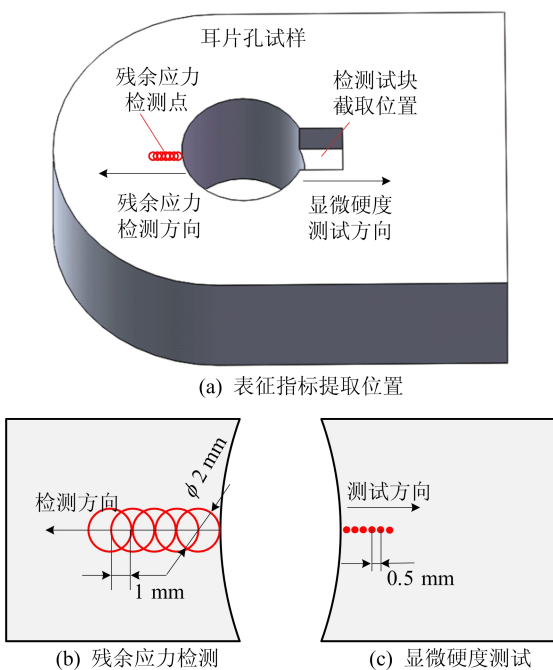


图 3 不同表征指标的提取位置及检测方向

为研究压合衬套冷挤压工艺强化的耳片孔试样沿孔壁径向残余应力分布情况,采用 XL-640 型 X 射线应力测定仪检测耳片孔试样端面残余应力,如图 3a 所示。测试条件为 CrK $\alpha$  靶,衍射晶面为 (311),光斑直径为 2 mm,管电压为 20 kV,管电流为 5 mA。检测点分布如图 3b 所示,检测间距为 1 mm,检测结果中正值代表拉应力,负值代表压应力,检测方向为孔壁径向;另外运用 ABAQUS 有限元模拟分析软件对压合衬套

冷挤压试样进行有限元仿真。为方便研究压合衬套冷挤压强化的耳片孔试样沿孔壁径向显微硬度的变化,先采用线切割从耳片孔壁沿径向方向截取尺寸为 20 mm $\times$ 15 mm $\times$ 15 mm 试块,检测试块截取位置如图 3a 所示。经镶嵌、打磨和抛光处理后,使用 HMV-2T 型显微硬度计测量表面硬度。沿试样孔壁径向等间距测试,间距为 0.5 mm,测试点分布如图 3c 所示,加载压力为 500 g(HV $_{0.5}$ ),保压时间为 10 s。

## 2 实验结果分析

### 2.1 残余应力分析

冷挤压强化工艺通过改变相对挤压力等参数来提高孔结构残余压应力值,从而增强孔结构的抗疲劳性能。在挤压过程中孔壁及周围引入高幅值的残余压应力<sup>[18]</sup>,如图 4 所示。图 4 中: $\sigma_m$  为外载荷作用应力; $\sigma_R$  为冷挤压产生的残余应力值; $S$  为  $\sigma_m$  与  $\sigma_R$  叠加后孔边缘残余应力分布。

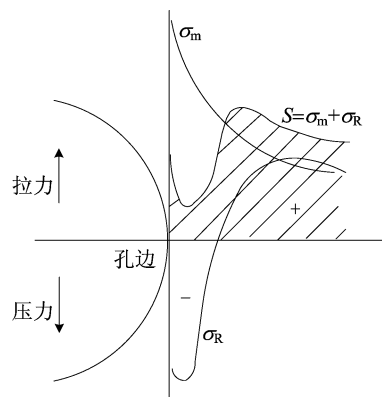


图 4 耳片孔强化后残余应力与外载荷叠加图

残余压应力可以抵消部分服役过程中的外加载荷,有效地改善孔结构的应力集中现象。残余压应力对裂纹损伤的抑制作用可利用修正的 Goodman<sup>[19]</sup>来表示,在忽略微观组织影响下,名义应力与应力幅呈线性关系,表达式为:

$$\sigma_a = \sigma_f \left( 1 - \frac{\sigma_m + \sigma_R}{\sigma_b} \right) \quad (2)$$

其中: $\sigma_a$  为疲劳强度; $\sigma_f$  为反向应力; $\sigma_b$  为抗拉强度。从式(2)可以看出,疲劳强度  $\sigma_a$  随着残余应力值  $\sigma_R$  变大而增大,从而提升试样的抗疲劳性能,降低了孔壁出现裂纹等损伤的风险。

#### 2.1.1 冷挤压工艺对残余应力分布的影响

冷挤压强化前、后孔壁沿径向方向的残余应力分布情况如图 5 所示。从图 5 可以看出:通过压合衬套冷挤压工艺强化后孔壁沿径向方向存在

明显的残余压应力,最大残余压应力出现在孔壁次表层位置;残余压应力值呈现先增大后减小最后趋于平稳状态,形成了一定深度的残余压应力层。在冷挤压实验中,随着相对挤压量的增大,孔内壁受到压合衬套挤压从而发生弹塑性变形并逐渐沿径向向外扩展,最终形成了一定深度的残余压应力层。冷挤压完成后孔壁表层材料会发生回弹现象,从而导致表层残余压应力下降。因此残余压应力峰值总是出现在孔壁次表层位置。

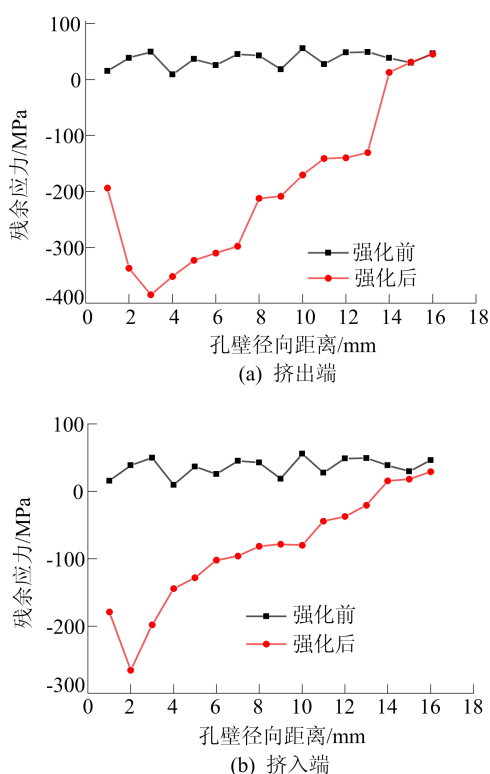


图 5 冷挤压强化前、后孔壁径向残余应力分布

### 2.1.2 相对挤压量对残余应力分布的影响

孔壁沿径向方向的残余应力随着相对挤压量的变化关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,挤压过程中残余应力大小及分布与相对挤压量密切相关。随着相对挤压量增大,残余压应力峰值和应力层深度都随之增加,所产生的残余压应力可以抵消服役过程中的外加载荷,从而有效提升了耳片孔的抗疲劳性能。

观察发现 4 种相对挤压量下挤出端残余压应力值都要高于挤入端,在相对挤压量为 1.7%、2.0% 时,试样挤出端和挤入端残余压应力的最大值均出现在孔壁径向约 2 mm 位置,其中挤出端的最大值分别为 -256.4、-313.6 MPa,挤入端的最大值分别为 -156.8、-187.9 MPa;当相对

挤压量增大到 2.3%、2.5% 时,试样挤出端和挤入端残余压应力的最大值分别出现在孔壁径向约 3、2 mm 的位置,其中挤出端的最大值分别为 -333.1、-384.2 MPa,挤入端的最大值分别为 -233.4、-265.6 MPa。相对挤压量从 1.7% 增大到 2.5% 的过程中,残余压应力层深度也从 8 mm 延伸至 14 mm。

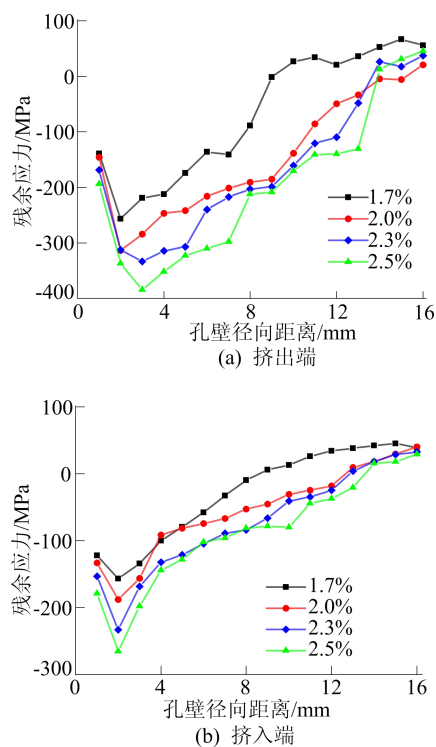


图 6 不同相对挤压量下沿孔壁径向方向残余应力分布

经研究分析得出,在压合衬套冷挤压强化过程中孔壁表面金属层发生塑性流动,导致残余应力分布不均匀;芯棒通过挤入端时发生塑性流动从而导致金属层堆积<sup>[20]</sup>。当金属层堆积越来越厚时,此部位的实际挤压量和挤压力也随之增大;在挤出端孔壁表面产生的金属堆积远远大于挤入端,实际挤压量也更大,也造成了挤出端残余压应力明显要高于挤入端。

### 2.1.3 残余应力分布仿真结果

仿真计算结束后,沿着耳片孔模型孔直径方向进行切片并获取仿真结果,得到 4 种相对挤压量对应的耳片孔切向残余应力分布云图,如图 7 所示,沿挤出端孔壁径向提取不同挤压量下的残余应力数值如图 8 所示。

从图 7、图 8 可以看出,经压合衬套冷挤压强化后孔壁及周围产生了关于孔轴对称分布的残余压应力,且残余压应力峰值均出现在挤出端孔边

区域。4 种相对挤压力量所对应的残余压应力数值和分布特征有一定差异,随着相对挤压力量增大,残余压应力峰值和分布范围都逐渐增加。在沿着耳片孔试样厚度方向存在残余压应力分布不均匀现象,总体表现出挤出端残余压应力大于挤入端。

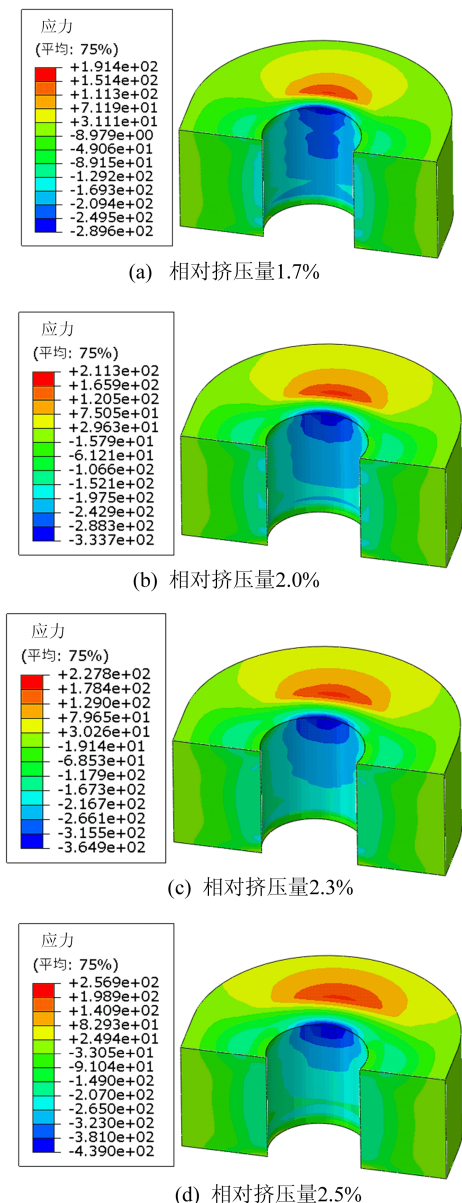


图 7 不同相对挤压力量下耳片孔切向残余应力分布云图

残余压应力上,相对挤压力量为 1.7%时,最大残余压应力为-289.6 MPa;当相对挤压力量增加到 2.5%,最大残余压应力增加到-439.0 MPa。综合结果发现,冷挤压强化能够有效提高孔壁及周围残余压应力数值,仿真获得的残余压应力分布规律与压合衬套冷挤压实验结果变化趋势具有较好的一致性,但在特定位置的具体数值上存在一定的差异。这与仿真过程中边界条件的简化以

及残余应力实验检测误差等有关。

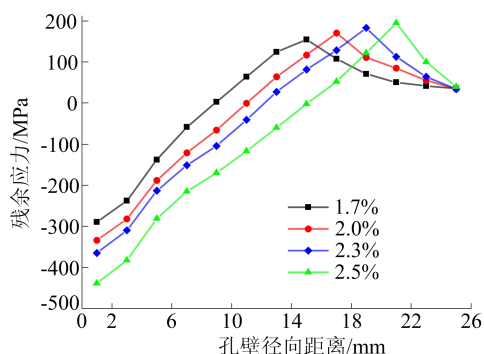


图 8 不同相对挤压力量下沿孔壁径向残余应力仿真值

### 2.2 显微硬度分析

冷挤压强化前、后孔壁沿径向显微硬度分布曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出,冷挤压强化后孔周围材料的显微硬度得到一定程度的提升。当相对挤压力量为 2.3%时,在孔壁沿径向方向形成深度约为 3.5 mm 的硬化层,最大显微硬度达到 180.3 kN/mm<sup>2</sup>;相较于未强化试样显微硬度平均增幅约为 9.9%,最大增幅为 12.3%。当相对挤压力量增加到 2.5%时,在孔壁沿径向方向形成深度约为 4.5 mm 的硬化层,最大显微硬度增加到 189.6 kN/mm<sup>2</sup>;相较于未强化试样显微硬度平均增幅约为 13.9%,最大增幅为 18.1%。可以看出压合衬套冷挤压强化后在试样孔壁形成了一定深度的组织硬化层;随着孔壁沿径向距离的增加,显微硬度整体呈现逐渐下降的趋势,直至降到与未挤压试样显微硬度保持一致。

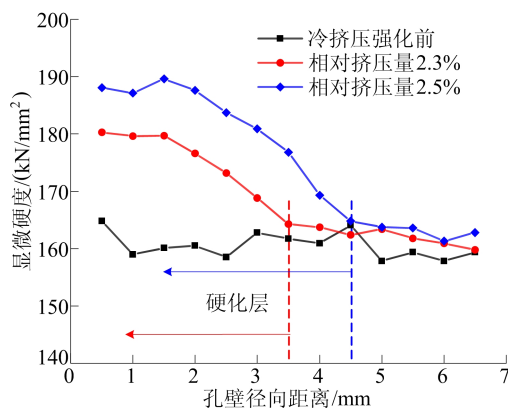


图 9 强化前、后孔壁沿径向显微硬度值

研究表明,压合衬套冷挤压工艺中芯棒和压合衬套硬度远高于 7050 铝合金耳片孔试样,在挤压过程中使孔壁表层材料发生塑性变形,且越靠近表层区域变形量越大。芯棒通过挤压压合衬套

对孔壁的冷作硬化作用有利于孔壁形成一定深度的残余压应力层和组织硬化层,有效降低了孔边应力集中现象,进而提高了耳片孔的抗疲劳性能。

### 3 结 论

1) 压合衬套冷挤压强化工艺使 7050 铝合金耳片孔产生了明显的残余压应力,沿孔壁径向形成了一定深度的残余压应力层,且残余压应力峰值总出现在孔壁次表层。

2) 随着相对挤压量的增大,压应力峰值和残余压应力层深度也逐渐增大。同一挤压量下,挤出端残余压应力较挤入端应力值更大,相对挤压量为 2.5%,挤出端残余压应力为-384.2 MPa,并形成了 14 mm 左右的残余压应力层。

3) 压合衬套冷挤压强化工艺有效提升了孔周围材料的显微硬度,形成一定深度的组织硬化层。相对挤压量为 2.5%时,形成深度约 4.5 mm 的硬化层,最大显微硬度约为 189.6 kN/mm<sup>2</sup>;相较于未强化试样显微硬度平均增幅约为 13.9%,最大增幅为 18.1%。

4) 冷挤压强化工艺对耳片孔壁形成冷作硬化作用,使孔壁沿径向形成了一定深度的残余压应力层和组织硬化层,有效降低了孔边应力集中现象,进而提高了耳片孔的抗疲劳性能。

### [参 考 文 献]

- [1] 万里,邓运来,范世通.时效处理对 7050 铝合金厚板材料组织、性能及残余应力的影响[J].中国有色金属学报,2018,28(7):1277-1283.
- [2] KIM H K,CARLSON S S,STANFIELD M L,et al. Mitigating cutting-induced plasticity errors in the determination of residual stress at cold expanded holes using the contour method[J]. *Experimental Mechanics*,2022,62(1):3-18.
- [3] KUMAR S A,BABU N C M. Effect of proximity hole on induced residual stresses during cold expansion of adjacent holes[J]. *Materials Today (Proceedings)*,2018,5(2):5709-5715.
- [4] WARNER J J,CLARK P N,HOEPPNER D W. Cold expansion effects on cracked fastener holes under constant amplitude and spectrum loading in the 2024-T351 aluminum alloy [J]. *International Journal of Fatigue*,2014,68:209-216.
- [5] YAN W Z,WANG X S,GAO H S,et al. Effect of split sleeve cold expansion on cracking behaviors of titanium alloy TC4 holes[J]. *Engineering Fracture Mechanics*,2012,88:79-89.
- [6] EMAMI G Z,CHAKHERLOU T N. Investigating the effect of cold expansion process on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6 in double-lap shear joints[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part L: Journal of Materials (Design and Applications)*,2019,233(8):1645-1660.
- [7] FU Y,GE E,SU H,et al. Cold expansion technology of connection holes in aircraft structures: a review and prospect[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*,2015,28(4):961-973.
- [8] 于洋,罗学昆,刘勇军,等.孔挤压强化对 FGH95 合金室温及高温疲劳性能的影响[J]. *航空制造技术*,2019,62(18):76-82.
- [9] 刘莹莹,李洁洁,李嘉懿,等.孔挤压对 7050 合金耳片组织及疲劳性能的影响[J]. *材料热处理学报*,2021,42(5):19-25.
- [10] 王连庆,卞江,张晗,等.孔挤压强化对 2024 铝合金疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*,2020,40(6):45-51.
- [11] 黄宏,赵庆云,刘风雷.孔强化对 7050 铝合金残余应力分布的影响[J]. *航空制造技术*,2016,59(19):80-82.
- [12] 董志鹏,王燕礼,姚亮亮,等.异材夹层条件下不同工艺制备孔结构表面完整性和疲劳性能试验研究[J]. *航空制造技术*,2020,63(17):32-39,68.
- [13] 鲁世红,高越,李大川.开缝衬套冷挤压强化技术研究进展[J]. *锻压技术*,2021,46(1):1-9.
- [14] 王燕礼,朱有利,曹强,等.孔挤压强化技术研究进展与展望[J]. *航空学报*,2018,39(2):6-22.
- [15] 王燕礼,卞小芳,符彬,等.光整滚光和开缝衬套挤压孔结构表面完整性及疲劳行为研究[J]. *表面技术*,2019,48(9):336-345.
- [16] BOMBARDIER Y,LI G,RENAUD G. Fatigue life prediction at cold expanded fastener holes with formate bushings [C]//International Committee on Aeronautical Fatigue. Cham:Springer,2019:658-673.
- [17] 王强,赵勇,倪孟龙.高干涉量压合衬套强化铝合金孔结构的疲劳性能[J]. *机械工程材料*,2020,44(7):46-50.
- [18] SEIFI R,ZOLFAGHARI M H,SHIRAZI A. Experimental and numerical study of residual stresses caused by cold expansion of adjacent holes [J]. *Meccanica*,2014,49:687-706.
- [19] WANG Y,ZHU Y,HOU S,et al. Investigation on fatigue performance of cold expansion holes of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *International Journal of Fatigue*,2017,95:216-228.
- [20] 马世成,王欣,宋颖刚,等.孔挤压芯棒导端角对 TC17 钛合金孔结构表面完整性及疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*,2021,41(4):75-82.

(责任编辑 吴 亮)