

铝锂合金自动铆接干涉量及残余应力分析

丁坤英, 杨翼飞, 王者

(天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 中国民航大学, 天津 300300)

摘要: 铝锂合金是航空制造中的新型合金材料, 其铆接技术是现代飞机制造重要研究方向。铆接后的铝锂合金板孔的干涉量影响到残余应力分布, 为了研究铆接过程与残余应力分布特征之间的关系, 利用自动钻铆装备对不同厚度的铝锂合金板进行铆接。使用 ABAQUS/Explicit 对铝锂合金自动压铆过程进行了仿真, 通过试验和仿真的方法分析不同压铆力、铆钉长度、壁板厚度和铆钉材料等组合条件下铝锂合金壁板内部所产生的干涉量, 进而推导出各工艺条件下铝锂合金壁板厚度方向上残余应力的分布规律。结果表明, 2060-T8 铝锂合金壁板孔壁产生的干涉量及沿板厚方向分布的残余应力随压铆力的增大而增大, 随铆钉长度的增大而减小, 随壁板厚度的增加呈现非单调增长的趋势。壁板总厚度为 4.2 mm 时, 平均干涉量及平均残余应力可以达到最大值。相比于 2117-T4 铝合金铆钉, 采用 7050-T3 铝合金铆钉压铆后 2060-T8 铝锂合金壁板产生的平均干涉量降低 6%~12%, 平均残余应力降低 8%~12%。

关键词: 铝锂合金; 铆接; 工艺参数; 干涉量; 残余应力

中图分类号: TG95

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)05-1717-08

铝锂合金是航空制造中的新型合金, 可以通过铆接的方法制成飞机的蒙皮^[1-3]。相比于传统的铆接技术, 采用干涉铆接技术可以在铆钉和铆孔之间形成一定的干涉量, 达到增强铝锂合金蒙皮疲劳性能的效果^[4-5]。铆接过程中产生的干涉量受到铝锂合金硬化性能和铆接工艺参数的影响^[6]。

近年来, 国内外一些研究学者对于干涉铆接过程中结构件内部的应力应变分布状态的影响因素进行了研究, 并取得了一定的成果。其中, W. Wronicz^[7]等人采用 X 射线衍射和应变片测量的方法对铝合金铆接结构连接孔附近区域的残余应力应变场进行了测量, 结果表明压铆力和铆钉类型对铆孔附近区域应力应变分布有显著影响。Fox^[8]等人使用同步辐射和中子衍射的方法测量了铆接后结构件内部的三轴残余应力, 研究结果表明环向残余应力在孔周附近区域达到最大值, 在沿着远离孔壁的方向逐渐减小。虽然 Fox 等人的实验所测得的残余应力结果比较理想, 然而使用中子衍射的方法存在着无法对钉头覆盖下的材料表面的应力状态进行测量的缺陷, 同时设备比较昂贵, 实验成本过高, 不适用于实际工程中大规模测量^[9]。随着计算机仿真技术的发展, 有限元分析方法被应用于铆接过程的研究当中, 并取得了良好的效果。刘平^[10]等人使用 ANSYS/LS-DTNA 建立了压铆过程的有限元模型, 通过有限元分析的方法获得压铆过

程中铆钉及壁板内部的应力应变分布情况, 但其在所建立的有限元模型中并没有将压铆过程中铝合金塑性硬化效应影响考虑在内, 对于实验结果的精准性会造成一定的影响。V. Blanchot^[11]等人使用 J-C 本构模型描述铝合金硬化行为, 针对铆接过程分别建立了切片、3D 和轴对称 3 种有限元模型, 对比 3 种有限元模型分析所获得的铆接件内部应力应变分布情况, 结果表明 3 种有限元模型对应力应变的计算结果精度相差不大, 但使用二维轴对称模型可以节省大量计算成本。Cheraghi^[12]和张洪双^[13-14]分别对铝合金沉头铆钉的压铆过程建立了二维轴对称有限元模型, 通过有限元分析探究了压铆力、铆钉长度、铆钉直径公差和铆钉钉孔间隙等工艺条件对铆接件内部残余应力分布的影响规律。研究结果表明, 压铆力和铆钉长度对于残余应力的数值水平影响最为显著。

目前有限元方法在薄壁结构铆接过程的应力应变计算方面已有比较广泛的应用基础, 但是以往的研究通常侧重于分析不同工艺条件对于平均干涉量和残余应力水平的影响, 对于孔壁尤其是新型铝锂合金孔壁干涉量和残余应力分布的研究较少。因此, 本研究建立铝锂合金壁板铆接过程的模型, 通过有限元方法获得不同压铆条件下铝锂合金壁板内部产生的干涉量和残余应力, 同时采用自动压铆试验进行结果验证, 探究压铆力、铆钉长度、壁板厚度和铆钉材料对于干涉量和沿板厚方向的残

收稿日期: 2022-07-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费重点项目 (3122019189)

作者简介: 丁坤英, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300, E-mail: kyding@cauc.edu.cn

余应力分布状态的影响规律，为铝锂合金在航空制造中的应用提供支持。

1 实验

1.1 实验材料

所使用的铆钉为 NAS1097AD 型号和 NAS1097KE 型号的铝合金沉头铆钉。其中 NAS1097AD 型号铆钉的材料为 2117-T4 铝合金，NAS1097KE 型号铆钉的材料为 7050-T73 铝合金。壁板材料为 2060-T8 铝锂合金材料。图 1 所示为铆钉及壁板结构尺寸示意图，其中， l 为铆钉长度， h 为壁板厚度。

采用 J-C 模型描述压铆过程中铝合金铆钉和铝锂合金壁板的本构关系^[15]。由于铆钉成型过程的时间非常短暂，不考虑压铆过程中材料的高温软化效应。简化后的用以描述自动压铆过程中材料流变行为规律的 J-C 本构模型如式 (1) 所示：

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (1)$$

其中， σ 为材料的真实应力， ε 为材料的真实应变， A 为材料的屈服强度， B 为材料的应变强化系数， n 为材料的应变强化指数。表 1 为使用的 2 种材料的铝合金铆钉和铝锂合金壁板力学性能参数，其中， ρ 为密度， E 为弹性模量^[16-18]。

1.2 压铆过程

图 2 为压铆过程连接板与铆钉组装示意图，在 MPAC 自动压铆平台上完成不同压铆力条件下的压铆实验。压铆速率 v_c 为 2000 mm/min，铆模抬起速率 v_s 为 330 mm/min，压铆力依次为 28.5、32.5、38.5、42、46 kN。

1.3 干涉量测量

使用线切割的方法将铆接壁板切割成单独的铆接试样。将所得到的铆接试样镶嵌并抛光，得到用于测量铆接变形干涉量的试样（如图 3 所示）。为了保证测量结果的可靠性，每组铆接工艺参数制备 3 个试样进行分析。

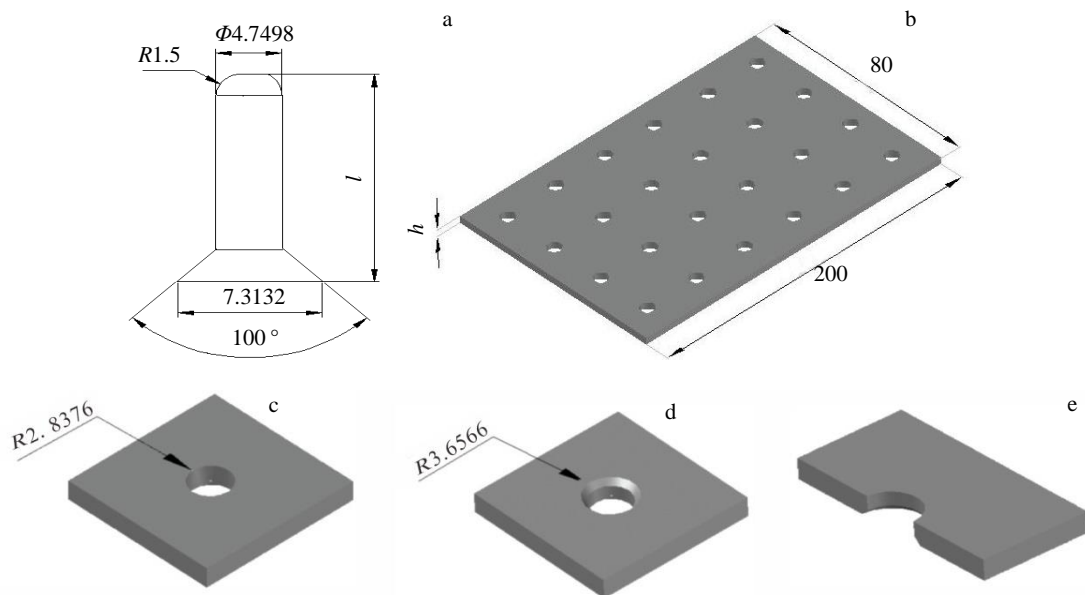


图 1 实验所用铆钉及连接板结构示意图

Fig.1 Schematic of rivet and connecting sheet used in experiment: (a) structure size of rivet, (b) connecting sheet, (c) drilling face, (d) cong nest face, and (e) section of sheet with cong nest

表 1 材料力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of materials

Material	$\rho/\times 10^{-9} \text{ t mm}^{-3}$	E/MPa	A/MPa	B/MPa	n
2117-T4	2.75	71700	165	598	0.222
7050-T73	2.80	71700	435	550	0.35
2060-T8	2.80	72600	485	714	0.0694

使用 OLYMPUS OLS4100 型号激光共聚焦显微镜对干涉量进行测量。

2 有限元建模

2.1 模型尺寸

铆钉尺寸与图 1 中的尺寸相同，连接板长度为 20 mm。为了提高计算效率，采用二维轴对称的方式进行建模，图 4 为铆钉和连接板的有限元模型装配示意图。

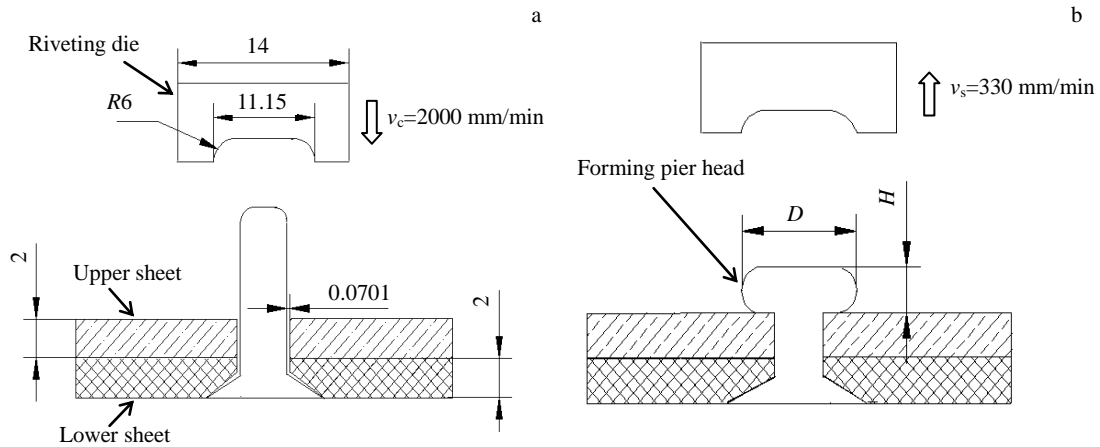


图 2 铆接组合示意图

Fig.2 Schematic of riveting assembly: (a) before riveting and (b) after riveting

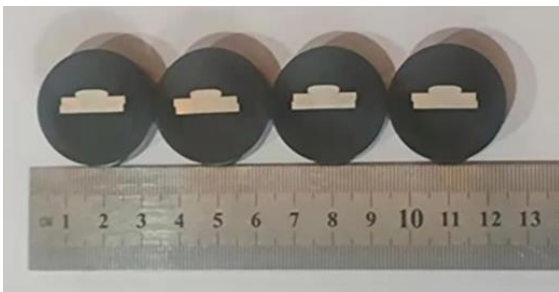


图 3 干涉量观测试样

Fig.3 Sample for interference observing

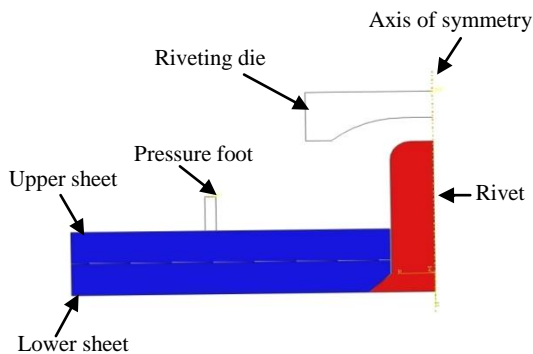


图 4 二维轴对称模型

Fig.4 2D axisymmetric model

2.2 分析步设置

压铆过程中铆钉材料发生大量的塑性形变, 属于典型的非线性问题, 因此建立分析步时选择 ABAQUS 里的显式动态分析模块^[19-21]。将压铆过程划分为 3 个阶段, 分别是铆模下压阶段、保压阶段和铆模抬起阶段。

2.3 接触、载荷与边界条件

采用面-面接触的方式进行接触的设置, 除两块连接

板之间接触的部分之外, 其它可能发生接触的位置的摩擦系数全部设置为 0.1, 连接板接触面之间的摩擦系数设置为 0.3。为了防止压铆过程中两块连接板发生互相移动, 对壁板的右侧设置绑定约束。固定铆钉头部及连接板右侧的除 X 轴方向所有自由度 (U_2 、 $UR_3=0$) ; 固定铆模沿 X 轴方向的移动及绕 Z 轴的转动 (U_1 、 $UR_3=0$) , 在铆钉轴线上施加 X 方向的对称约束。除此之外, 对压头和压脚施加 X 方向及绕 Z 轴转动的约束, 确保其只能沿 Y 轴方向发生位移。边界条件设置完毕后, 需要在压头的参考点处设置压铆力 F_N , 除此之外, 还需在压脚的参考点处施加一个名为 F_J 的载荷, 该载荷的作用是压紧连接板, 防止在压铆力的作用下壁板发生翘曲的现象。图 5 为边界条件及载荷设置的示意图。

2.4 网格划分

在 ABAQUS 显式动力学模块中, 考虑到接触等问题, 轴对称结构采用线性的 4 节点单元 CAX4R, 该单元为双线性二次轴对称四边形减缩积分单元, 采用沙漏控制。铆钉使用 1117 个网格单元, 上下两块壁板共使用 559 个网格单元。

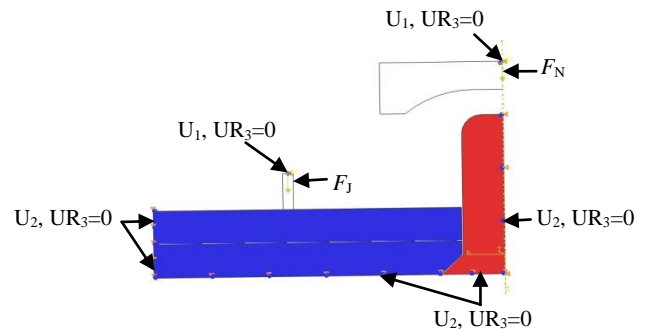


图 5 载荷及边界条件设置

Fig.5 Load and boundary condition setting

3 结果与分析

3.1 干涉量分析

图 6 所示为不同压铆力条件下所获得的铆接试件。式

(2) 为干涉量 ΔX 的表达式:

$$\Delta X = X' - X_0 \quad (2)$$

其中, X' 为压铆后测量的铆孔直径, X_0 为压铆前铆孔直径。从图 6 中可以发现, 随着压铆力的增大, 各铆孔相同位置的干涉量逐渐增大。

图 7 所示为有限元测量压铆过程中铆孔干涉量的取点位置示意图。其中, X_1 为距离铆头 1/4 板厚位置的干

涉量, X_3 为距离铆头处 1/4 板厚位置的干涉量, X_2 为 X_1 与 X_3 连线中点位置的干涉量。

图 8 所示分别为通过实验测量得到 2117-T4 铝合金铆钉和 7050-T73 铝合金铆钉压铆过程中产生的干涉量随压铆力增大的变化趋势, 以及通过有限元计算获得的干涉量在图 7 中所选取的 3 个位置的对比。从图 8 中可以发现通过有限元方法测得的各测量点的干涉量值与实验测得的干涉量值平均误差在 10% 左右, 误差在可接受的范围之内, 并且有限元测量数据与实验测量数据整体变化规律大致相同。

取有限元分析所获得的 X_1 、 X_2 、 X_3 的平均值 \bar{X} 作为

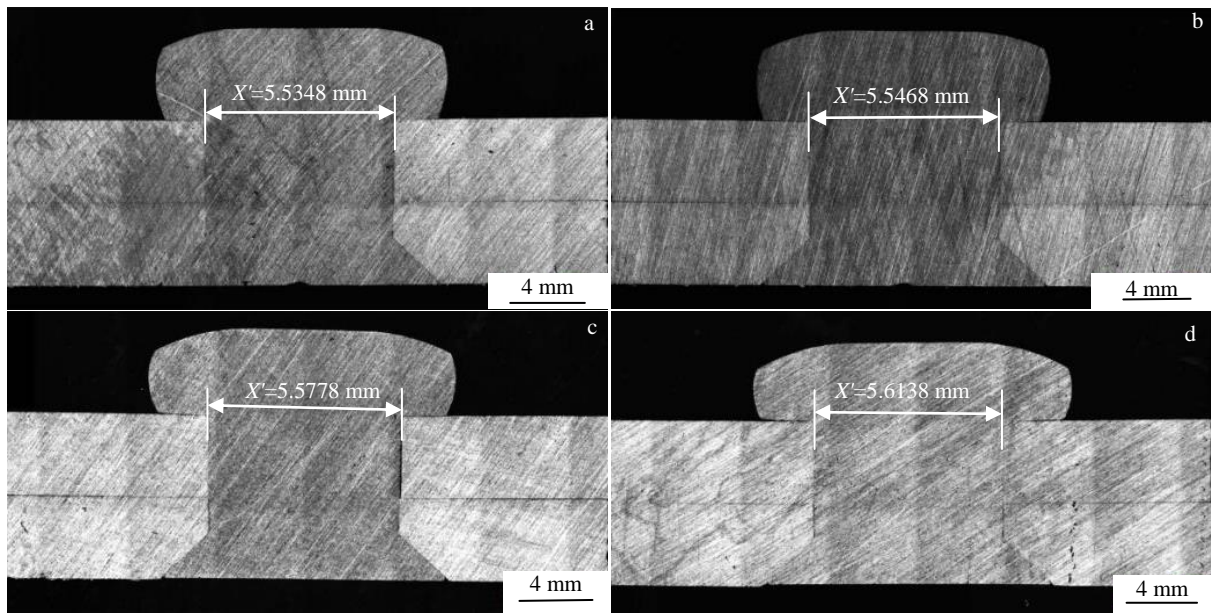


图 6 不同压铆力条件下所获得的干涉量测量结果

Fig.6 Interference measurement results under different riveting force conditions: (a) $F_N=28.5$ kN, (b) $F_N=32.5$ kN, (c) $F_N=38.5$ kN, and (d) $F_N=42$ kN

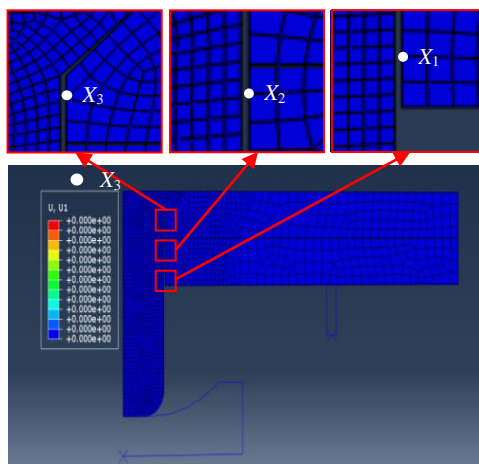


图 7 测量干涉量取点位置

Fig.7 Positions used for measuring interference

评价铆孔干涉量数值水平的标准, 式 (3) 为 \bar{X} 的计算公式:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (3)$$

式 (4) 所示为壁板总厚度 h 的表达式:

$$h = h_1 + h_2 \quad (4)$$

其中, h_1 为靠近墩头一侧的连接板厚度, h_2 为靠近钉头一侧的连接板厚度。图 9 所示分别为 2117-T4 铝合金铆钉和 7050-T73 铝合金材料铆钉压铆过程中产生的平均干涉量随压铆力、铆钉长度及壁板厚度的变化趋势。从图中可以看出, 压铆过程中产生的平均干涉量呈现随着压铆力的增大而增大 (图 9a), 随着铆钉长度的增大而减小 (图 9b), 随着壁板总厚度的增大而呈现非单调递增的趋势。且在壁板总厚度为 4.2 mm

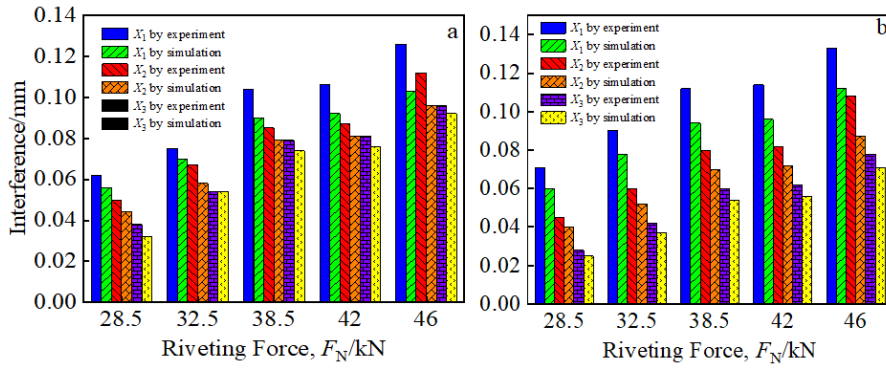


图 8 2 种材料铆钉压铆时铆孔干涉量随压铆力变化趋势

Fig.8 Variation trend of the rivet hole interference with the riveting force of two kinds of materials: (a) 2117-T4 aluminium alloy rivet and (b) 7050-T73 aluminium alloy rivet

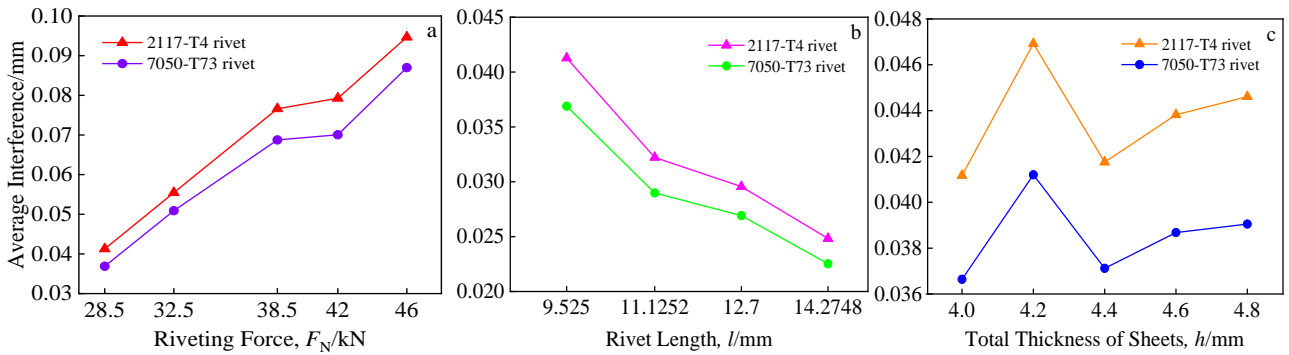


图 9 2 种材料的平均干涉量随工艺参数变化趋势

Fig.9 Variation trend of average interference with process parameters for two kinds of materials: (a) variation trend of average interference with riveting force, (b) variation trend of average interference with rivet length, and (c) variation trend of average interference with thickness of sheets

时, 平均干涉量达到极大值 (图 9c)。相比于 2117-T4 铝合金铆钉, 7050-T73 铝合金材料铆钉压铆后孔壁产生的平均干涉量降低 6%~8%, 具体的差值取决于压铆工艺参数。

3.2 残余应力分析

压铆过程结束后, 钉杆与铆孔之间形成的残余应力对于结构件的疲劳性能有很大的影响^[22-23]。图 10 为压铆过程结束后铆钉及壁板内部的残余应力分布云图。从图中可以发现, 铆头和钉头挤压的位置应力集中现象最为明显, 且在沿板厚方向靠近钉头的位置残余应力出现了突然增大的现象。铆接后孔壁产生的周向残余应力可以降低裂纹扩展速率, 而径向残余应力则与干涉量的大小相关^[24-25], 本实验主要针对径向残余应力沿板厚方向上的分布规律进行研究。

图 11a 和图 11b 所示分别为不同压铆力条件下 2117-T4 铝合金铆钉和 7050-T73 铝合金铆钉压铆过程产生的径向残余应力 S_{11} 沿板厚方向分布的规律。从图中可以发现, 压铆过程中孔壁各点处的径向残余应力都呈

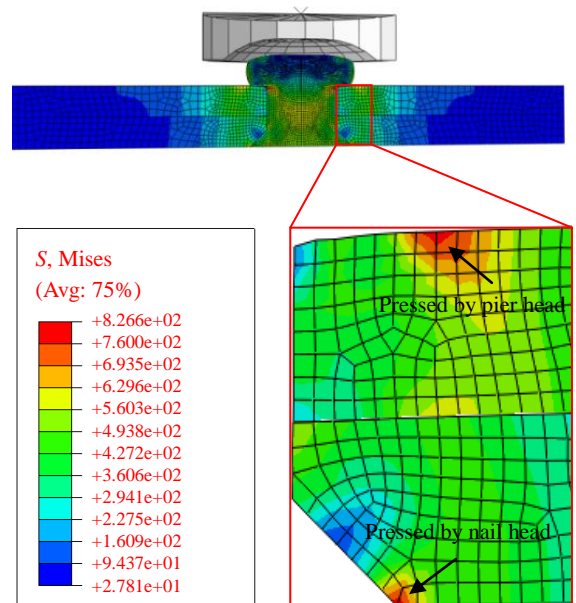


图 10 压铆过程结束后残余应力分布

Fig.10 Residual stress distribution after riveting process

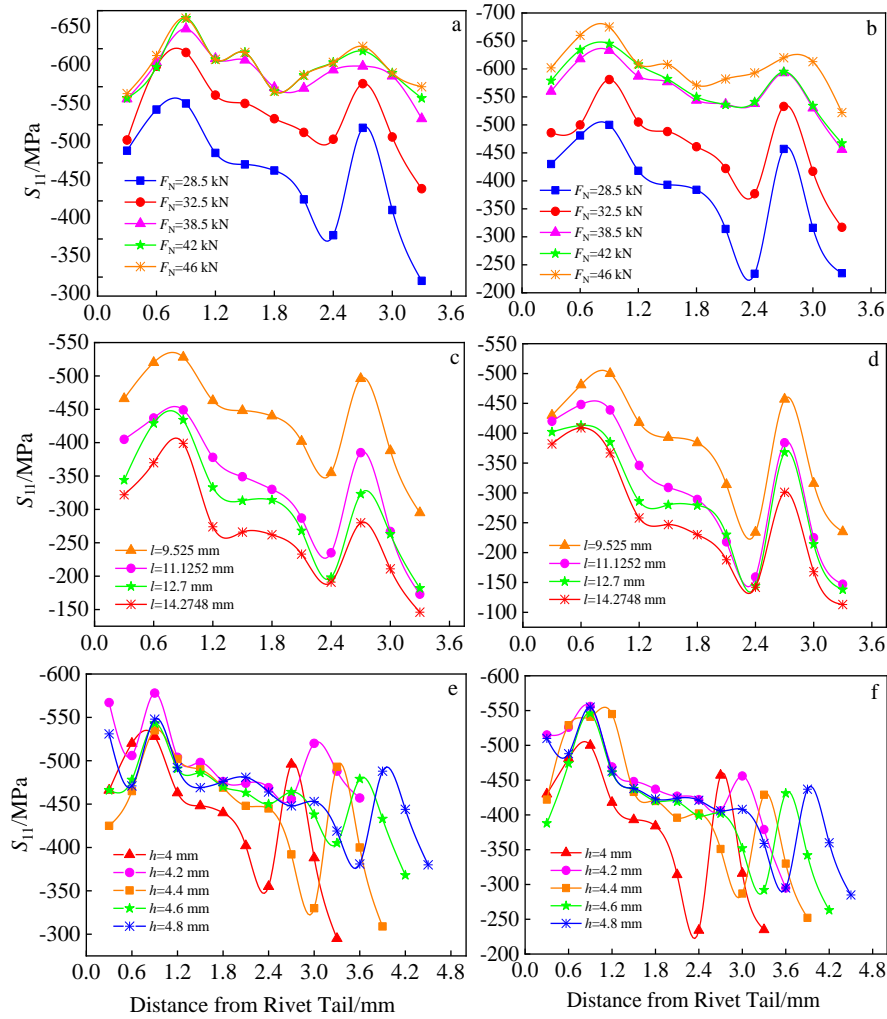


图 11 2 种材料铆钉压铆径向残余应力随各工艺参数变化趋势

Fig.11 Variation trend of radial residual stress with process parameters for two kinds of materials: (a, c, e) 2117-T4 aluminium alloy rivet; (b, d, f) 7050-T73 aluminium alloy rivet

现随着压铆力的增大而增大的趋势。且径向残余应力由铆头到钉头方向逐渐降低，但残余应力在靠近两板接触面的区域会产生较大的波动性，这是由于两板之间较大的摩擦作用所导致的。随着铆钉长度的增加，干涉量整体上呈现逐渐降低的趋势，且 2 种材料的铆钉在不同长度的条件下产生的沿板厚方向分布的残余应力的分布规律大致相同（图 11c 与图 11d）。

图 11e 与图 11f 为 2 种材料的铝合金铆钉铆接过程壁板沿板厚方向的残余应力随壁板总厚度的变化趋势。从图中可以发现，随着壁板总厚度的增加，平均残余应力呈现逐渐增大的趋势。当壁板总厚度为 4.2 mm 时，径向残余应力整体数值水平达到最大值。

为了直观对比 2 种材料的铆钉在不同工艺条件下铆孔内壁所产生的径向残余应力的大小，取图 11 所获得的径向残余应力的平均值作对比分析。图 12 为不同压铆

力、铆钉长度和壁板总厚度条件下 2 种材料的铆钉压铆后所获得的平均径向残余应力。

由图 12 中可知，在压铆力为 28.5 kN 时，2117-T4 铝合金铆钉压铆后孔壁产生的平均径向残余应力比 7050-T73 铆钉高 12% 左右（图 12a）。当压铆力为 42 kN 时，2 种材料铆钉压铆产生的平均径向残余应力相同，当压铆力增长至 46 kN 时，7050-T73 铝合金铆钉压铆产生的平均径向残余应力大于 2117-T4 铆钉。随着铆钉长度的增加，2117-T4 铝合金铆钉压铆后孔壁产生的平均径向残余应力比 7050-T73 铆钉高 8% 左右（图 12b）。随着壁板厚度的增加，残余应力的差值稳定在 12% 左右（图 12c）。综上所述，7050-T73 铝合金材料铆钉压铆后孔壁产生的平均径向残余应力数值水平整体上比 2117-T4 铝合金材料铆钉降低 8%~12%，具体差值取决于压铆工艺参数。

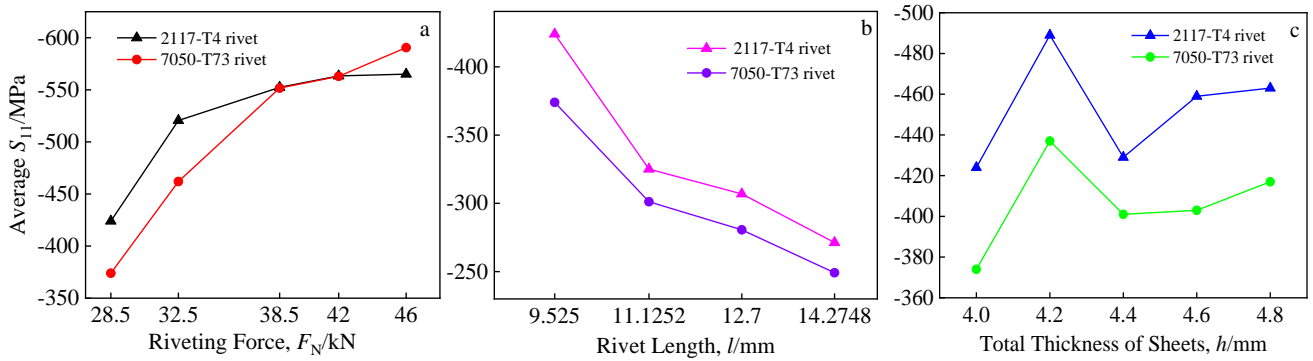


图 12 2 种材料铆钉压铆后孔壁平均径向残余应力随工艺参数变化趋势

Fig.12 Chang of average residual stress of hole with process parameters after riveting for two kinds of materials: (a) variation trend of average residual stress with riveting force, (b) variation trend of average residual stress with rivet length, (c) variation trend of average residual stress with total thickness of sheets

4 结 论

1) 铝锂合金壁板自动铆接过程中孔壁产生的干涉量和径向残余应力整体上呈现随压铆力的增大而增大; 随铆钉长度的增大而减小的趋势。其它条件一定时, 随着壁板总厚度的增加, 干涉量和径向残余应力呈现非单调增长的趋势, 在壁板总厚度为 4.2 mm 的时候平均干涉量及平均径向残余应力达到最大值。

2) 压铆后铝锂合金孔壁产生的径向残余应力沿板厚方向并非呈现单调分布规律, 而是由靠近铆头处到靠近钉头处的方向先逐渐减小, 到邻近钉头处的区域发生“突增”现象。

3) 相比于 2117-T4 铝合金铆钉, 采用 7050-T73 铝合金铆钉压铆后 2060-T8 铝锂合金壁板孔壁产生的平均干涉量降低 6%~12%, 平均径向残余应力降低 8%~12%, 具体差值取决于工艺参数。

参考文献 References

- [1] Tolga Dursun, Costas Soutis. *Materials and Design*[J], 2014, 56: 826
- [2] Wang Yichang(王一唱), Tong Xin(童鑫), You Guoqiang(游国强) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(3): 1069
- [3] Feng Chaohui(冯朝辉), Yu Juan(于娟), Hao Min(郝敏) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2020, 40(1): 1
- [4] Junho Suh, Yeon-Sun Choi. *Tribology International*[J], 2016, 102: 580
- [5] Yang Yue(杨悦), Yu Lu(余路), Jiang Hongyu(蒋红宇) et al. *Machine Building & Automation*(机械制造与自动化)[J], 2021, 50(2): 87
- [6] Liu Dengwei(刘登伟). *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2021, 28(12): 74
- [7] Wronicz W, Kaniowski J. *Fatigue of Aircraft Structures*[J], 2011(3): 166
- [8] Fox M E, Withers P J. *Journal of Neutron Research*[J], 2007, 15(3): 215
- [9] Zeng Chao(曾超). *Interference Riveting Induced Residual Stress in Aircraft Lap Joints and Its Influence on Fatigue*(飞机结构干涉铆接应力特征及其疲劳特性)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017
- [10] Liu Ping(刘平), Zhang Kaifu(张开富), Li Yuan(李原). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2008, (22): 94
- [11] Blanchot V, Daidie A. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 180(1-3): 201
- [12] Cheraghi S H. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2008, 39(11-12): 1144
- [13] Zhang Hongshuang(张洪双). *Machinery Design & Manufacture*(机械设计与制造)[J], 2011(6): 241
- [14] Zhang Hongshuang(张洪双). *Machinery Design & Manufacture*(机械设计与制造)[J], 2011(4): 218
- [15] Xu Wenchao, Wang Defu. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2021, 31(8): 5541
- [16] Zheng Bin, Yu Haidong, Lai Xinmin. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2017, 92(5): 1955
- [17] Lei Changyi, Bi Yunbo, Li Jiangxiong et al. *Advances in Mechanical Engineering*[J], 2017, 9(11): 1
- [18] Liu Jintong, Li Heng, Bi Yunbo et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 102(9): 4137

- [19] Mou Weiqiang(牟伟强), Li Yuan(李 原), Zhang Kaifu(张开富) *et al. Journal of Northwestern Polytechnical University*(西北工业大学学报)[J], 2010, 28(5): 742
- [20] Yoon Tae Ho, Kim Seung Jo. *Journal of Aircraft*[J], 2011, 48(4): 1434
- [21] Aman F, Cheraghi S H, Krishnn K K. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 67(1-4): 545
- [22] Zhang Qiliang(张岐良), Cao Zhengqiang(曹增强), Qin Longgang(秦龙刚) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(9): 1832
- [23] Zhang Qing(张 青), Liu Yongsheng(刘永胜), Men Jing(门 静) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(2): 327
- [24] Li Heng(李 恒). *Head Deformation on Riveting Quality During Automatic Press Riveting*(自动压铆过程中铆接头变形对铆接质量的影响研究)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018
- [25] Yu Haidong, Zheng Bin, Xu Xun *et al. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*[J], 2019, 233(12): 2306

Interference and Residual Stress of Al-Li Alloy After Automatic Riveting

Ding Kunying, Yang Yifei, Wang Zhe

(Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Al-Li alloy is a new alloy material used in aviation manufacturing. The riveting technology of Al-Li alloy is an important research direction of modern aircraft manufacturing. The distribution of residual stress after riveting is affected by the amount of interference in the hole of Al-Li alloy sheets. The automatic drilling and riveting equipment was used to rivet Al-Li alloy sheets with different thicknesses for researching the relationship between riveting process and residual stress distribution. The automatic riveting process of Al-Li alloy was simulated by ABAQUS/Explicit, and the interference amount generated in Al-Li alloy wall under different riveting force, rivet length, the thickness of sheets and rivet material were analyzed by experiment and simulation. Then the residual stress distribution characteristics along the thickness direction of Al-Li alloy sheet under various conditions were deduced. The results indicate that the interference produced in the hole wall of Al-Li alloy sheets and the residual stress have a highly consistent tendency under various technological conditions, i.e. interference and residual stress increase with the argument of the riveting force. However, they will decrease with the increase in the rivet length. As the total thickness of the sheet increases, the average interference amount and the average residual stress increase at the beginning and then decrease. When the total thickness of the sheet is 4.2 mm, the interference and residual stress reach peak value. In addition, the average interference amount produced by 7050-T73 aluminum alloy rivets is reduced by 6%-12% compared to that produced by 2117-T4 aluminum alloy rivets. And the residual stress is reduced by 8%-12%.

Key words: Al-Li alloy; riveting; technological parameters; interference amount; residual stress

Corresponding author: Ding Kunying, Ph. D., Associate Professor, College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China, E-mail: dingkunying@126.com