

预拉伸铝合金板 7075T7351 内部残余应力分布测试

王树宏^{1,2}, 马康民², 马俊¹

(1. 中国人民解放军驻五一一厂军事代表室, 江苏 南京 210016; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:因残余应力而引起加工变形是飞机整体结构件制造的难题之一。运用裂纹柔度法测量了铝合金预拉伸板 7075T7351 的内部残余应力, 分析了内部残余应力的分布规律, 并测出厚度为 40 mm 的板长度方向最大残余拉应力为 18.3 Mpa, 最大残余压应力为 17.9 Mpa。

关键词:整体结构件; 残余应力; 裂纹柔度法; 铝合金预拉伸板

中图分类号: V21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2004)03-0019-03

整体结构件在新机中被广泛采用, 它的特点是尺寸大、壁薄、结构复杂^[1]。残余应力引起的加工变形是整体结构件制造中技术难点, 已成为制约我国新型飞机研制的关键技术之一^[2]。要研究残余应力引起加工变形的规律, 必须首先测试出材料内部残余应力。目前残余应力的测试方法多达十余种^[3], 但其主要都是测量材料表面或浅表层残余应力, 而材料内部残余应力的测试研究则比较少^[4]。随着工程需要, 近几年先后提出了逐层钻孔法、剥层测试法、中子衍射法等测量材料内部残余应力的方法, 但这些方法都存在其局限性。本文介绍一种测试铝板内部残余应力分布的新方法——裂纹柔度法, 并用它测量了铝合金预拉伸板 7075T7351 内部残余应力分布。通过试验发现, 裂纹柔度法在测量厚板内部残余应力方面具有很多优点, 从而为预测整体结构件的加工变形提供了新的途径。

1 测量原理和试验方案

1.1 测量原理和方法

由于铝合金预拉伸板在热轧成型、淬火、拉伸和时效过程中, 长度和宽度比厚度大得多, 所以在板材长、宽(X, Y)方向的热应力和机械应力都与厚度(Z)方向的中性面对称, 故可假设试件的残余应力仅随板厚变化, 并在平行于中性面的任一平面内均匀分布, 对称于中性面的两平面残余应力分布相同^[3]。

裂纹柔度法的测量原理是在被测物体表面引入一条深度逐渐增加的裂纹来释放残余应力, 测定应变值, 用应变来计算残余应力。假设板材为均匀连续材料, 见图 1。其沿裂纹方向(板厚度方向)分布平行于 Y 方向的残余应力可用连续函数表示, 因连续函数可用多项式来逼近, 则残余应力可表示为^[5]

$$\sigma_y(z) = \sum_{i=0}^n A_i P_i(z) \quad (1)$$

式中: A_i 是待定系数; $P_i(z)$ 是线性无相关函数, 可以为幂级数、拉格朗日多项式、勒让德多项式等, 在本试验中选用 4 至 9 阶拉格朗日多项式, 保证拟合出的残余应力函数能满足力和力矩的平衡条件。这样铝合金板内部残余应力测量转化为通过测量的应变值来求解多项式系数 A_i 。

当引入裂纹时, 裂纹处残余应力的释放相当于在裂纹表面反向加载。设应力为 $-P_i(z)$ 单独作用在深为

收稿日期: 2004-02-14

基金项目: 总装“十五”预研项目

作者简介: 王树宏(1970-), 男, 江苏灌云人, 工程师, 博士生, 主要从事现代制造技术研究;
马康民(1970-), 男, 陕西蓝田人, 教授, 主要从事航空制造工程研究。

α_j 裂纹面上, 测量点(图1中的D点)的应变为 $C_i(\alpha_j)$, 总的释放应变为

$$\varepsilon_y(\alpha_j) = \sum_{i=0}^n A_i C_i(\alpha_j) \quad (2)$$

式中: $C_i(\alpha_j)$ 称为裂纹柔度系数。从理论上测量次数 m 等于 n 便可求出 n 个系数 A_i , 为了得到较精确的结果, 测量次数 m 一般大于 n , 采用式(3) 最小二乘法确定待定系数 A_i 。

$$\frac{\partial}{\partial A_k} \left[\sum_{j=1}^m [\varepsilon_y(\alpha_j) - \sum_{i=0}^n A_i C_i(\alpha_j)]^2 \right] = 0 \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (3)$$

式(3)为 n 个方程组成的方程组, 可求出 n 个系数 A_i , 从而得到铝板沿厚度方向残余应力分布表达式。裂纹柔度系数 $C_i(\alpha_j)$ 可以基于线弹性断裂力学的原理来计算, 但很烦琐。本实验采用有限元法分析计算裂纹柔度系数 $C_i(\alpha_j)$ 。有限元计算步骤为: 第一步建模, 建立与试验实物一致的几何模型, 输入材料性能参数, 选取合适的有限元单元, 划分网格, 给模型加以约束; 第二步加载, 在沿模型厚度方向加上大小为 $-P_i(h)$ 初始应力; 第三步计算, 在模型上模拟裂纹的逐步扩展来获得测量点D点处一系列应变值, 得出柔度系数 $C_i(\alpha_j)$ 。建模时根据试样的对称性, 仅需以线切割的槽缝为对称轴将半个试样进行网格化, 采用4节点平面应力单元 PLANE42, 单元为边长 $l = 1 \text{ mm}$ 的正方形, 材料弹性模量为 71.7 Gpa , 帕松比 0.33 。有限元法通过逐渐地去除切割平面上的边界约束条件来模拟裂纹产生过程。

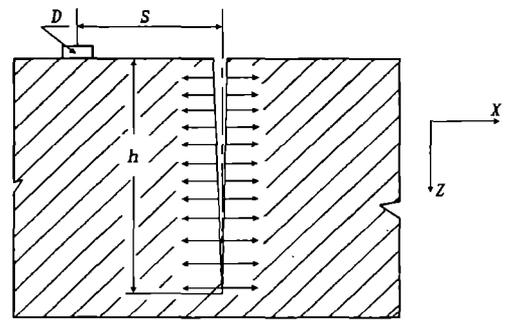


图1 裂纹柔度测量原理图

1.2 试验方案

测试试样由625所提供美国生产的铝合金板7075T7351, T7351表示材料状态, 即铝合金板热轧后进行固溶处理, 然后在规定的时间内进行预拉伸, 再进行时效处理。试样从规格 $3000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 板材长宽面的中间分别沿板长度方向和宽度方向切取尺寸为 $160 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的矩形试样, 分别用于测试铝合金板长度和宽度方向沿板厚的残余应力分布。

试验选用BE120-3AA应变片和YJ-4501A型静态应变测量仪, 两者组成的应变测量系统精度为 10^{-6} , 采用瑞士生产的BAE-800W数控线切割机床, 电极丝为 $\Phi 0.25 \text{ mm}$ 钼丝。切割位置为在试样长度方向的中间, 在宽度方向产生贯穿性切割裂纹, 应变片粘贴在(见图1D点)宽度方向的中间, 距切割槽 32 mm (图1中的S), 应变片方向与裂纹方向垂直。切割深度每增加 2 mm 时记录一次应变仪的读数, 直到板的厚度方向的中间, 得到10个应变值。两块试样分两次进行, 试验条件相同。

2 试验结果与讨论

两块试样所测量的应变值分别代表铝合金预拉伸板7075T7351长度方向和宽度方向所得应变值见图2。根据实验得出的应变利用式(3)计算出多项式系数 A_i , 根据残余应力多项式画出试样沿厚度方向分布残余应力曲线图, 如图3所示, 得到了铝板沿厚度方向残余应力的分布规律。从图3中看出, 预拉伸铝板7075T7351残余压应力沿厚度方向分布总体上呈M形分布, 在板的中间存在残余拉应力, 在外层存在残余压应力, 这符合铝合金板材淬火后的残余应力分布规律。宽度方向比长度方向上的残余应力要小, 说明预拉伸铝板残余应力分布的各向异性。最大残余拉应力离板的中心约 $1/8$ 板厚, 最大压应力距板表层约 $1/5$ 板厚, 这种分布形式可归结于固溶处理时的芯部材料溶质贫化与表层材料的溶质富集所致^[4]。经计算可知, 长度方向最大残余拉应力为 18.3 MPa , 最大残余压应力为 17.9 MPa , 而相同铝合金固溶处理后未进行预拉伸, 其板内最大残余拉应力为 192 MPa , 最大残余压应力为 220 MPa , 可见预拉伸工艺对铝板内部残余应力的抑制效果非常明显, 是减小加工变形的有效措施。

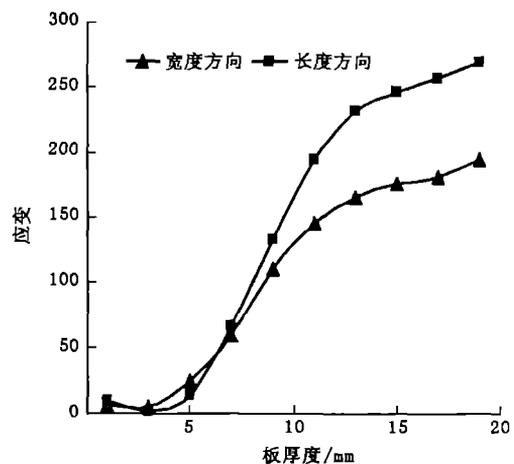


图2 试验测量的应变值

3 结论

本文采用裂纹柔度法测量了 7075T7351 铝合金板沿厚度方向残余应力分布规律。并得出下列结论:

1) 厚度为 40 mm 的 7075T7351 铝合金板内部残余应力的测量结果为长度方向最大残余拉应力为 18.3 MPa, 最大残余压应力为 17.9 MPa。

2) 与其它测试残余应力的方法相比, 裂纹柔度法简单易行且准确度高。

3) 裂纹柔度法作为一种测试残余应力的新技术, 在适用范围和测试误差方面有待进一步研究。

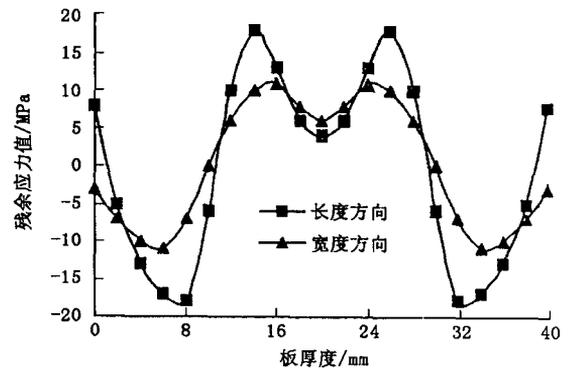


图3 铝板 7075T7351 内部残余应力分布

参考文献:

- [1] 陈一坚. 中国新一代超音速歼击轰炸机——“飞豹”[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(5): 1-3.
- [2] 王炎. 飞机整体结构件数控加工技术应用中的问题与对策[J]. 航空制造工程, 1998, 4: 28-30.
- [3] 郑鹏, 郑玉珍, 魏晖, 等. 2324 铝合金厚板内部残余应力分布特征及其影响[J]. 航空学报, 1996, 17(3): 330-336.
- [4] Kang Xiaoming, Ke Yinglin, Sun Jie, etc. Research on the Mechanism of Machining Distortion in Manufacturing Large Integrated Aircraft Parts[A]. Pro 6th ICMPT, Xi'an, 2002.
- [5] Niku-Lari A, Lu J, Flavenot J F. Measurement of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole Drilling Method[J]. Experimental Mechanics, 1985, 25(2): 175-185.

(编辑: 姚树峰)

Method of Measuring the Residual Stress Distribution in Pre-stretched Aluminum Alloy Plate 7075T7351

WANG Shu-hong^{1,2}, MA Kang-min², MA Jun¹

(1. Office of the Military Representatives from PLA to No. 511 Factory, Nanjing, Jiangsu 210016, China; 2. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: It has become one of the most difficult technical problems to solve the distortion of the integrated part caused by the residual stresses during the machining process. The residual stresses in the pre-stretched aluminum alloy plate 7075T7351 are measured by using the crack-compliance method, and the distribution regularity of the residual stresses is analyzed in detail. Furthermore, the measurement done shows that the maximum residual tensile stress of the aluminum alloy plate 40 mm thick is 18.3 Mpa in the direction of its length and its maximum residual compression stress is 17.9 Mpa.

Key words: integrated part; residual stress; the crack compliance method; pre-stretched aluminum alloy plate