

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.004

基于裂纹柔度法的 2050-T84 铝合金厚板内部残余应力测试研究

樊龙欣¹, 马红菊¹, 任健², 张治中², 李勇²

(1. 河南通达电缆股份有限公司, 河南 洛阳 471922;

2. 成都航飞航空机械设备制造有限公司, 四川 成都 610073)

摘要:采用裂纹柔度法,对 90 mm 厚国产新型 2050-T84 铝合金板内部残余应力分布进行首次测试研究。结果表明:应力呈对称“W”型曲线,表层压应力峰值位于距表面 10 mm 处(-31 MPa),内部拉应力峰值距中面 3 mm(28 MPa)。当插值函数分别优化至 5 阶和 6 阶时,两个试样应力计算总不确定度分别最低。该文的研究为航空领域材料性能评估及工艺优化提供关键数据支撑。

关键词:残余应力;测试;裂纹柔度法;国产 2050-T84 铝合金厚板

中图分类号:TH123.4⁺ **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0016-04

Research on Internal Residual Stress Test of 2050-T84 Aluminum Alloy Thick Plate Based on Crack Flexibility Method

FAN Longxin¹, MA Hongju¹, REN Jian², ZHANG Zhizhong², LI Yong²

(1. Henan Tongda Cable Co., Ltd., Luoyang 471922, China;

2. Chengdu Hangfei Aviation Machinery Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 610073, China)

Abstract: This article uses the crack flexibility method to apply the premiere test on the internal residual stress distribution inside a 90 mm-thick domestically-produced new 2050-T84 aluminum alloy plate. The results show that the stress exhibits a symmetrical "W"-shaped curve, with the peak compressive stress at a distance of 10 mm from the surface (-31 MPa) and the peak tensile stress at a distance of 3 mm from the middle surface (28 MPa). When the interpolation functions are optimized to 5th and 6th order respectively, the total uncertainty of stress calculation for the two samples is at the minimum. This article provides key data support for material performance evaluation and process optimization in the aviation field.

Keywords: residual stress; test; crack compliance method; domestically-produced 2050-T84 aluminum alloy thick plate

0 引言

航空整体结构件作为现代飞行器关键承力部件,其广泛采用高强度铝合金板经整体铣削加工而成。然而在材料去除量达 90% 以上的精密加工过程中,毛坯内部残余应力的释放与重分布会引发构件翘曲、扭曲等显著加工变形问题,这不仅导致大量的构件因尺寸超差报废,更严重影响结构的疲劳寿命与服役可靠性^[1]。随着国产大飞机项目对高性能轻量化构件的迫切需求,2050-T84 铝合金作为具有自主知识产权的新型 Al-Cu-Li 系合金,凭借其高比强度、优异耐蚀性及良好的焊接性能,正逐步替代进口材料应用于关键结构件制造^[2-3]。但该材料在淬火-拉伸工艺下形成的复

杂残余应力分布特征尚未见系统研究,这严重制约着加工工艺优化与变形控制策略的制定。

在残余应力测试领域,裂纹柔度法凭借其高灵敏度、低成本及对厚板全厚度应力的表征能力,被公认为适用于航空铝合金板材的优选方法^[4-11]。PRIME 等^[12]最早将裂纹柔度法用于铝合金厚板中残余应力的测试。文献[13-19]分别采用该方法对不同牌号铝合金板中的残余应力进行了检测。这些研究成为实现加工变形主动调控的首要前提,对推动航空整体结构件制造工艺优化具有重要意义。

本文针对 90 mm 厚国产新型 2050-T84 铝合金预拉伸厚板,采用裂纹柔度法获得该新型铝合金厚板沿厚度方向的残余应力分布规律。研究成

基金项目:国家自然科学基金项目(52075251)

第一作者简介:樊龙欣(1989—),男,河南南阳人,河南通达电缆股份有限公司技术顾问,博士,研究方向为整体结构部件精密切割技术、难加工材料加工等方面的基础和应用,460240929@qq.com。主持、参与多项国家自然科学基金、航空横向课题项目。

果为后续加工变形预测模型的构建及工艺参数优化提供了关键实验依据,对提升国产大飞机结构件的制造质量具有重要工程价值。

1 裂纹柔度法实验

裂纹柔度法(crack compliance method, CCM)是一种通过测量裂纹扩展引起的位移或应变变化来反推残余应力分布的无损/微损测试方法。其核心流程包含试样制备、裂纹引入及应变测量、数据建模与应力反演 3 个关键环节^[20-23]。

1.1 试样制备

本研究采用国产新型 2050-T84 铝合金厚板,板材厚度为 90 mm。2050-T84 铝合金是一种新型高强度铝-锂合金,具有优异的比强度和抗疲劳性能,适用于航空航天领域,部分材料性能如表 1 所示。采用裂纹柔度法时,试样的长度和宽度尺寸应控制在板厚的 2.3~2.5 倍的范围内。从一块规格为 3 000 mm×1 550 mm×90 mm 的板材上截取 2 块尺寸为 300 mm×210 mm×90 mm 的试样,均用于测量铝合金板沿轧制方向残余应力的分布。试样如图 1 所示。

表 1 2050-T84 材料性能

密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
2 693	75 000	0.33	500

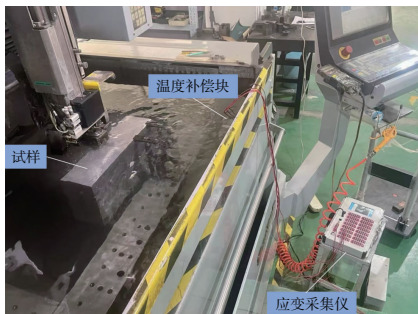


图 1 线切割实验现场图

1.2 裂纹引入及应变测量

试样裂纹的引入采用电火花线切割的方法,采用 Sodick ALN600Qs 慢走丝线切割机床,切割电流 3A,走丝速度 3 m/s,进给速度 5 mm/min,采用去离子水冷却。电极丝为 $\phi 0.25$ mm 铜丝,切割后的裂缝宽度约为 0.35 mm。应变片选择 BF120-3AA 箔式改性酚醛类电阻应变片,敏感栅长度为 3.0 mm,灵敏系数 $2.0 \pm 1\%$ 。

线切割实验现场如图 1 所示。为防止工作乳液对应变片的破坏,在应变片表面涂上一层 704 硅橡胶防护。在应变测量点上同时粘贴有 2 片应变片,用 JM3816D 型静态应变测量仪读取 2 个测量值并进行算数平均。沿板厚方向切割深度每次增加 1 mm,暂停,待应变稳定时读数,重复切割读数过程直至切除至 75 mm 处停止,采用 1/4 桥接线法进行组桥,应变仪连接与试样同材质规格的补偿块进行温度补偿。测得的两块试样的所有应变值如图 2 所示。

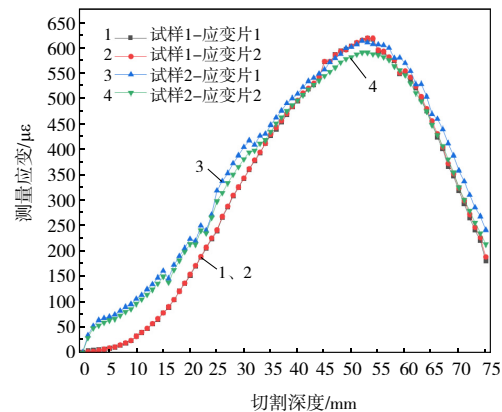


图 2 实验测量应变值

1.3 数据建模与应力反演

1) 模型建立

本文选用 ABAQUS 2021 有限元软件进行建模和计算裂纹柔度函数矩阵 C 。基于试样的对称性,以线切割裂纹为对称轴,仅对试样的半侧进行建模和网格划分,如图 3 所示。采用八节点平面应变单元 CPE8 进行离散化,试样左侧的网格尺寸设置为裂缝宽度 0.35 mm 的一半,其余区域的网格尺寸从左至右逐渐过渡至 2 mm。在边界条件设置中,试样左侧的 x 方向位移以及左下角端点的 x 方向和 z 方向位移均被约束。采用表 1 中的材料参数进行仿真分析。

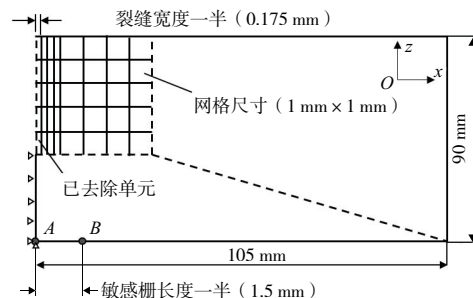


图 3 网格划分及边界条件示意图

2) 裂纹柔度函数计算

在模型构建完成后,通过“initial conditions, type=stress”方法,将 2~14 阶勒让德多项式作为初始应力载荷,沿板的厚度方向进行施加。利用“Model Change”功能,通过逐步移除裂纹区域的单元来模拟裂纹的扩展过程。在此过程中,记录应变片所在位置的位移值 U_B ,并根据式(1)计算相应的应变值,从而得到 2~14 阶裂纹柔度函数,如图 4 所示。

$$C_{ij} = 2U_B / L_{\text{gauge}} \quad (1)$$

式中 L_{gauge} 为应变片长度。

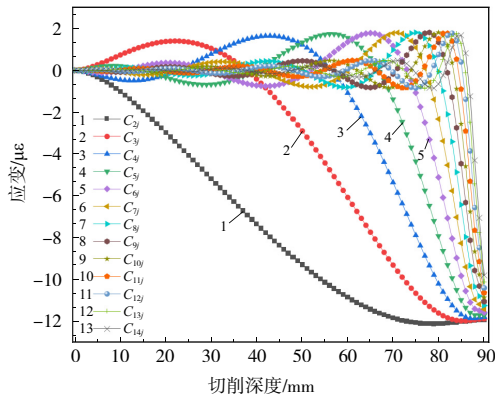


图 4 试样的裂纹柔度函数

3) 不确定度评定

在使用裂纹柔度法计算残余应力时,应力计算的不确定度主要来源于两个方面:应变测量误差和模型误差。应变测量误差 s_ϵ 是由于应变测量数据中的随机误差引起的,它表示通过最小二乘法拟合的应变结果与实际测量应变值之间的偏差。

$$s_\epsilon^2 = \text{diag}(\mathbf{PB} \text{diag}(\mathbf{u}_\epsilon^2) \mathbf{B}^T \mathbf{P}^T) \quad (2)$$

式中: \mathbf{P} 为插值函数; \mathbf{u}_ϵ 表示当裂纹深度 $z = a_j$ 时的应变测量误差; $\mathbf{B} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T$, \mathbf{C} 为柔度函数。

模型误差则是由于所选的插值函数无法准确拟合板材中的实际应力分布而产生的偏差。在插值函数确定的情况下,插值函数的阶数是影响模型误差的主要因素。模型误差引起的应力不确定度 $S_{\text{model},j}$ 可以通过以下近似公式计算

$$S_{\text{model},j}(n) \approx \frac{1}{N-1} \sum_{k=a}^b [\sigma_j(n=k) - \bar{\sigma}_j]^2 \quad (3)$$

式中: σ_j 为插值函数阶数; $n = a \sim b$ 范围内所求应力的平均值; N 为应力解的数量, $N = b - a + 1$ 。为了使模型误差成为阶数 n 的函数,应尽可能缩小范围。本文取 $a = n - 1, b = n + 1$ 。

因此,残余应力计算的总不确定度 $S_{\text{total},j}$ 为

$$S_{\text{total},j} = \sqrt{S_{e,j}^2 + S_{\text{model},j}^2} \quad (4)$$

在 MATLAB R2022b 中进行编程计算,得到不同阶数下每一层深度 a_j 的 3 种应力计算不确定度,如图 5 所示。由图 5 可以看出,当勒让德多项式的阶数分别取 5 阶和 6 阶时,两个试样对应的应力计算总不确定度最小,分别为 0.91 MPa 和 2.37 MPa,表明 5 阶和 6 阶勒让德多项式分别是拟合试样 1 和试样 2 应力分布的一种理想插值函数。

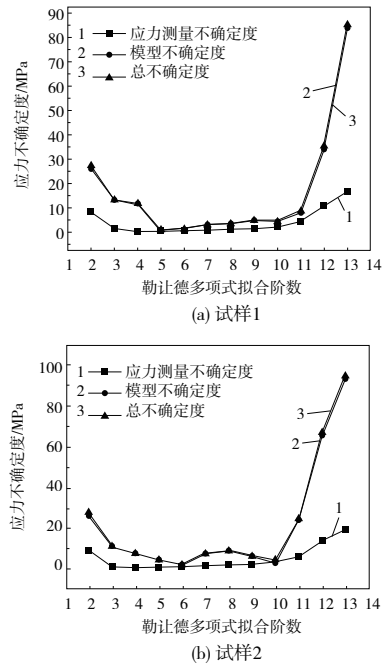


图 5 不同阶数 3 种应力不确定度的均方根值

2 实验结果与讨论

2.1 残余应力测量结果

在 MATLAB 2022b 软件中,基于上述残余应力计算公式和最优勒让德多项式的阶数进行编程求解,计算得到两种铝合金预拉伸板的残余应力分布及总不确定度,结果如图 6 所示。由图 6 可以看到,两种试样残余应力沿厚度方向的分布曲线规律相似,呈明显的 W 分布规律。残余应力沿板的中面对称分布。

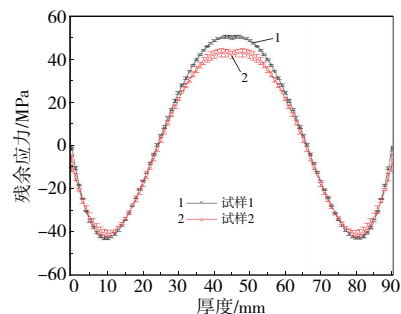


图 6 试样 1、2 的应力分布

2.2 基于应变能密度指标的残余应力评价

针对残余应力对加工变形的不利影响,应变能密度是一种评价全局应力分布的有效指标。应变能密度揭示了毛坯全局的应力水平,可以表征在加工后零件的变形风险。由于本文仅测量了轧制方向的残余应力分布,此时轧制方向应变能密度为

$$u = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{\sigma^2}{2E} dz \quad (5)$$

式中: t 为毛坯厚度; E 为弹性模量; σ 是轧制方向的应力分布; z 为沿厚度方向坐标。

在测量得到毛坯初始残余应力分布的基础上,对测得的两个试样的应力分布进行应变能密度分析,结果如表 2 所示。

表 2 试样的应变能密度

项目	试样 1	试样 2
应变能密度 $u/(kJ/m^3)$	1.26	1.31

根据文献[9]中的分析,毛坯应变能密度小于 $1 kJ/m^3$ 时零件无显著变形风险,大于 $2 kJ/m^3$ 则风险显著,介于 $1 \sim 2 kJ/m^3$ 间时存在风险,此时零件变形还与零件的几何结构有重要关联。本文测量试样均处于 $1 \sim 2 kJ/m^3$ 区间,因此工程运用时,需合理调控工艺参数以规避变形超差。

3 结语

1) 本研究中 2050-T84 合金的最大拉应力约 50 MPa,最大压应力接近 -40 MPa,显著高于常规预拉伸板;厚度方向存在较大应力梯度,易引发加工变形。

2) 两试样均呈表层压应力、内部拉应力的 W 型应力分布,压应力和拉应力峰值均分别位于距表面 10 mm 和中性面 3 mm 处,两试样应力在中性面区域存在约 10 MPa 差异,属实验误差,验证了裂纹柔度法在预拉伸板应力测试中的适用性。

3) 当插值函数阶数分别优化至 5 阶和 6 阶时,两个试样应力计算总不确定度的均方根值分别降低至 0.91 MPa 和 2.37 MPa,显示该方法具备较高精度。

4) 本文测量试样应变能密度为 $1 \sim 2 kJ/m^3$,存在加工变形风险,实际加工中零件变形还与自身的几何结构有重要关联。

5) 本研究量化了国产新型 2050-T84 铝合金残余应力特征,支撑航空制造工艺优化,后续需探究复杂工况下的应力时效演变规律。

参考文献:

- [1] 张仲玺,王帅钦,赵慧娟,等.薄壁零件残余应力演化机理及变形控制方法[J].航空学报,2024,45(13):186-196.
- [2] ZHANG W, LIU L, MA Z X, et al. Spall strength and equation of states for 2050-T84 Al-Li alloy under shock compression up to 120 GPa[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2023, 174: 111138.
- [3] 徐建成,张晨,薛伟,等.2050-T84 铝锂合金压缩弹性模量应变测量技术研究[J].工程技术,2023(4):5.
- [4] 方玉.冷却模式对 DQ400 相变塑性行为及残余应力的影响[D].武汉:武汉科技大学,2022.
- [5] 叶海潮,秦国华,林锋,等.面向 7075 铝厚板加工变形的初始残余应力释放与再分布模型[J].稀有金属材料与工程,2019,48(1):123-132.
- [6] 廖凯,张箫笛,车兴飞,等.铝合金薄壁件加工变形的力学模型构建与分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(5):166-172.
- [7] 徐烽,欧阳林婷,王宏,等.基于电磁超声的焊接残余应力测量研究[J].压力容器,2018,35(4):17-24.
- [8] 赵智伟,刘长青,李迎光,等.基于变形力监测数据的残余应力场推断和表征方法[J].Engineering,2023(3):49-59.
- [9] 李亦森,葛宁,胡盛德,等.冷弯厚壁型钢中的残余应力测量与去除[J].力学研究,2018(3):105-113.
- [10] 徐飞飞,刘其广,吕杰,等.薄壁结构件毛坯去应力分析与铣削加工变形有限元模拟研究[J].机械科学与技术,2024,43(1):96-102.
- [11] 张仲玺,王帅钦,赵慧娟,等.薄壁零件残余应力演化机理及变形控制方法[J].航空学报,2024,45(13):186-196.
- [12] PRIME M B, HILL M R. Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate [J]. Scripta Materialia, 2002, 46(1): 77-82.
- [13] 周长安,孙杰,李卫东,等.航空铝合金 7050-T7451 毛坯初始残余应力测试[J].机械科学与技术,2014,33(8):1251-1254.
- [14] PRIME M B. On the cover: Measurement layout for residual stress mapping using slitting[J]. Experimental Mechanics, 2022, 62(3): 367.
- [15] OLSON M D, DEWALD A T, HILL M R. An uncertainty estimator for slitting method residual stress measurements including the influence of regularization[J]. Experimental Mechanics, 2020, 60(1): 65-79.
- [16] BEGHINI M, GROSSI T. Measuring residual stresses with crack compliance methods: An ill-posed inverse problem with a closed-form kernel [J]. Applied Mechanics, 2024, 5(3): 475-489.

(下转第 37 页)

削转矩相对变化值的薄壁零件加工变形预测模型,获得涡旋盘薄壁处的变形量数据。对薄壁相应位置进行镜像误差补偿,使用三维建模软件重构涡旋盘三维模型,并基于补偿后的三维模型生成新的数控加工程序。补偿后的涡旋盘加工结束后,使用三坐标测量仪对两个涡旋盘分别进行检测,并与零件的理论三维模型进行对比。

在涡旋盘内侧曲率半径最大处的顶端,零件刚度最小,加工变形量最大。将测量点的加工变形数据导出,未补偿涡旋盘与补偿涡旋盘的绝对偏差量如图9所示。

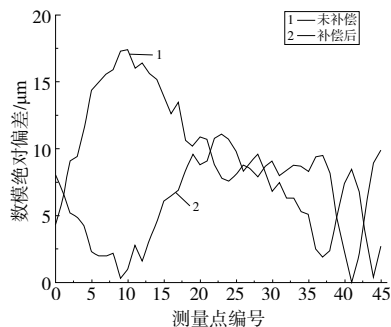


图9 涡旋盘绝对偏差对比图

如图9所示,在涡旋盘刚度最低处,未补偿的涡旋盘平均变形量为 $9.99\ \mu\text{m}$,最大变形量为 $17.4\ \mu\text{m}$;补偿后的涡旋盘平均变形量为 $5.70\ \mu\text{m}$,最大变形量为 $11.1\ \mu\text{m}$;补偿后的涡旋盘平均变形量减小42.9%,最大变形量减小36.2%,且补偿后的加工变形量均匀度较高。

5 结语

本文针对薄壁件铣削过程加工变形等问题,提出了以平均主轴切削转矩相对变化值为特征预测加工变形量的方法。经实验验证,该方法能够有效减少铣削过程薄壁件加工变形量。后续应优

化薄壁件加工铣削过程采集的信号种类和质量,提高信号的采样率和分辨率,有助于进一步提升预测结果的准确性。

参考文献:

- [1] LIU S M, SHAO X D, GE X B, et al. Simulation of the deformation caused by the machining cutting force on thin-walled deep cavity parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92 (9/10/11/12): 3503-3517.
- [2] WU G, LI G X, PAN W C, et al. A prediction model for the milling of thin-wall parts considering thermal-mechanical coupling and tool wear [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107 (11/12): 4645-4659.
- [3] 倪丽君. 计算机辅助夹具设计中的装夹优化技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [4] 张婷. 航空薄壁件装夹布局优化研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2017.
- [5] LIU C Q, LI Y G, SHEN W M. A real time machining error compensation method based on dynamic features for cutting force induced elastic deformation in flank milling [J]. Machining Science and Technology, 2018, 22 (5): 766-786.
- [6] 马鹏举, 廖志兵, 童赛赛, 等. 改善航空超薄壁零件加工刚性的方法[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49 (6): 13-17.
- [7] ALTINTAS Y, BER A A. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design [J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54 (5): B84.
- [8] 陈志涛. 基于切削厚度迭代计算的薄壁件加工误差建模[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2020.
- [9] 黄颖旭, 李波, 田锡天. 基于主轴电流的铣削力间接监测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (1): 93-101.
- [10] 杨博. 薄壁零件五轴铣削变形预测与误差补偿技术研究[D]. 太原:中北大学, 2021.

收稿日期:2024-03-04

(上接第19页)

- [17] 陈金龙, 尹承振, 孙翠茹. 用于二维分布残余应力场测量的渐进裂纹柔度法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51 (5): 475-482.
- [18] 雷晓娟, 徐永福, 崔凤奎. 基于裂纹柔度的冷滚轧花键残余应力研究[J]. 制造技术与机床, 2020 (1): 98-102.
- [19] 罗玉梅. 裂纹柔度法测喷丸残余应力的研究[J]. 内燃机与配件, 2018 (20): 53-55.
- [20] 李晨, 楼瑞祥, 王志刚, 等. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 材料导报(纳米与新材料专辑), 2014 (2):

153-158.

- [21] 董大林, 王刚, 王栋. 电化学剥层在齿轮钢残余应力测量中的应用[J]. 表面技术, 2018, 47 (10): 315-320.
- [22] 张娟, 巴发海, 李凯. 残余应力测试结果的定性分析与判断[J]. 无损检测, 2020, 42 (12): 1-3.
- [23] 姚晨光, 安志斌, 杨竹芳. Inconel718合金增材制造残余应力分布与数值模拟分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48 (4): 134-136, 179.

收稿日期:2025-04-11