

面向残余应力变形的铝合金薄壁圆盘结构优化

安 啸^{1,2}, 周于轲¹, 齐 琪², 赵超群², 蔡欣怡², 周金华²

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000; 2. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘要: 铝合金薄壁圆盘类零件作为某卫星探测器天线核心结构, 平面度要求极高, 当前的铣削水平往往难以满足设计要求。针对 7A04 铝合金薄壁圆盘在铣削加工中因残余应力耦合作用导致的变形超差问题, 提出了一种结构设计与工艺控制协同的变形抑制方法。首先, 获得 7A04 铝合金初始残余应力与铣削残余应力梯度分布规律。其次, 采用 Abaqus 有限元平台, 建立薄壁圆盘初始/铣削残余应力耦合作用下的变形仿真模型。然后, 进行 7A04 铝合金薄壁圆盘结构抗变形优化设计。最后, 通过薄壁圆盘加工实验, 验证了结构优化方案的有效性, 发现薄壁圆盘平面度达到 0.103 mm。由此, 形成了“应力分布检测-变形仿真建模-抗变形结构设计”的协同控制方法, 有效抑制了初始与铣削残余应力的耦合变形, 为航天薄壁零件的精密制造提供有效的技术解决方案。

关键词: 7A04 铝合金; 薄壁圆盘; 残余应力; 变形控制; 有限元仿真; 结构优化

中图分类号: V 261.2+3 **文献标志码:** A

Structural optimization of aluminum alloy thin-walled disk for residual stress deformation

AN Xiao^{1,2}, ZHOU Yuke¹, QI Qi², ZHAO Chaoqun², CAI Xinyi², ZHOU Jinhua²

(1. Xi'an Branch, China Academy of Space Technology, Xi'an 710000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aluminum alloy thin-walled disk components, as the core structure of a satellite detector antenna, require extremely high flatness, and the current milling level often fails to meet design requirements. To address the issue of excessive deformation of 7A04 aluminum alloy thin-walled disk during milling caused by residual stress coupling effects, a deformation suppression method integrating structural design and process control was proposed. First, the distribution patterns of initial internal stresses and milling residual stress gradients in 7A04 aluminum alloy were obtained. Second, using the

收稿日期: 2025-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52475488); 校企合作项目(5203240399)

第一作者: 安 啸(1986—), 男, 博士研究生。研究方向: 航天器结构设计及加工工艺研究。E-mail: nimazmx@126.com

通信作者: 周金华(1984—), 男, 副研究员。研究方向: 薄壁结构切削残余应力变形控制。E-mail: zhoujinhua@mail.nwpu.edu.cn

引文格式: 安啸, 周于轲, 齐琪, 等. 面向残余应力变形的铝合金薄壁圆盘结构优化[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(1): 22-31.

Citation: AN Xiao, ZHOU Yuke, QI Qi, et al. Structural optimization of aluminum alloy thin-walled disk for residual stress deformation[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(1): 22-31.

Abaqus finite element platform, a deformation simulation model for the thin-walled disk under the coupled effects of initial/milling residual stresses was established. Then, a deformation-resistant optimization design for the 7A04 aluminum alloy thin-walled disk structure was conducted. Finally, through thin-walled disk machining experiments, the effectiveness of the structural optimization scheme was verified, and it was found that the flatness of the thin-walled disk reached 0.103 mm. Consequently, a collaborative control methodology comprising “stress distribution detection-deformation simulation modelling-deformation-resistant structural design” was formed. This approach effectively suppresses coupled deformation arising from initial and residual milling stresses, providing an effective technical solution for the precision manufacturing of aerospace thin-walled components.

Keywords: 7A04 aluminum alloy; thin-walled disk; residual stress; deformation control; finite element simulation; structural optimization

7A04 铝合金因其高比强度、优异的耐腐蚀性能和良好的工艺适应性,已成为航天器天线结构中的关键材料,尤其在某卫星探测器天线核心结构中得到广泛应用。该类构件多呈现为大径厚比的薄壁圆盘结构,其底面通常具有极高的平面度精度要求,以满足天线在极端工况下的电性能与结构稳定性需求。然而,在铣削加工过程中,毛坯在前期轧制与热处理中形成的初始残余应力会随材料去除而逐步释放,同时切削过程中因热-力耦合效应又会引入新的铣削残余应力。二者的耦合叠加作用易在构件内部形成非对称应力场,引发难以预测的翘曲变形,尤其在刚性较弱的薄壁区域变形更为显著。该问题已成为制约此类高精度构件加工合格率与产品一致性的关键瓶颈。

对于薄壁结构而言,由于其自身结构刚度较低,在残余应力作用下极易发生显著变形,已成为精密制造中的关键挑战^[1]。薄壁构件加工过程中的残余应力变形主要来源于两个方面:毛坯初始残余应力与切削过程中引入的残余应力。研究表明,在不同结构形式与工艺路径下,二者对最终变形的贡献率存在差异^[2]。初始残余应力是由于轧制、锻造、淬火、铸造和挤压等加工工艺中施加在材料上的热载荷和机械载荷而导致毛坯产生的固有应力。胡越等^[3]在对航空薄壁承力框的研究中发现,初始残余应力的释放导致构件端口产生 1.68 mm 的径向收缩变形,有限元预测值为 1.89 mm,约占总体变形的 89%。Huang 等^[4]通过三框架整体梁实验进一步验证,毛坯初始残余应力对总变形的贡献高达 90%,而铣削残余应力仅占 10%,反映出前序制造工艺所引入的内应力在变形主导机制中

的关键作用。针对该问题,Guo 等^[5]提出了一种融合支持向量回归与遗传算法的集成优化方法,通过微调初始应力场实现了对工件变形的主动控制。切削残余应力是由于切削过程中材料经历高温、高压、高应变率及相变导致的严重非弹性变形所引发的应力。Zawada-Michałowska 等^[6]在 AW-2024 T351 铝合金薄壁件铣削实验中发现:当切削速度由 300 m/min 提升至 750 m/min 时,表层残余应力增加 47%;而当速度进一步提高至 900 m/min 时,残余应力反而下降 31%,表明铣削参数对残余应力分布具有非线性调控作用。马秀伟等^[7]在 7050 铝合金车削中也观察到高达 1.59 mm 的径向变形,经遗传算法优化工艺参数后,变形量成功降低 19%。Wang 等^[8]系统建立了加工参数与铣削残余应力之间的映射模型,揭示了工艺条件对表面应力状态的影响机制,为变形精准控制提供了理论依据与预测方法。

然而,仅通过工艺参数调整往往难以从根本上解决因结构刚度不足所引起的应力敏感型变形问题。近年来,融合结构设计的抗变形方法逐渐成为研究热点,显示出良好的应用潜力。Luo 等^[9]提出了一种面向薄壁结构的加强筋拓扑优化方法,该方法在优化过程中综合考虑了具有空间变异性的几何不确定性,并以最坏情况下的临界屈曲载荷作为约束条件,提升了结构在不确定性环境下的鲁棒性。刘磊等^[10]则针对曲面薄壁结构,提出了一种加筋布局与加筋高度协同优化的设计方法,通过拓扑优化技术实现了加筋分布与截面尺寸的一体化描述与优化,有效提升了结构的整体刚稳定性,并通过数值算例验证了该方法的有

效性。然而，上述方法在航天领域典型薄壁圆盘类零件中的应用尚未形成系统研究体系，尤其缺乏针对初始残余应力与铣削残余应力耦合作用下的结构优化设计探索，导致现有研究成果在应对复杂应力耦合变形时的适用性与有效性存疑。在相关结构优化实践中，苏英霞等^[11]对薄壁门板加强筋构型进行了多参数分析，从形状、宽度、高度及间距等多个维度开展仿真研究，结果表明，六边形蜂窝状加强筋相较于传统矩形筋条具有更高的稳定性与抗翘曲能力。张琪^[12]则针对薄壁板壳结构轻量化与高刚度的双重要求，构建了相应的数学规划模型与有限元参数化模型，结合序列二次规划算法，以某试验舱结构为例实现了多目标迭代优化，在控制质量的同时提升了结构刚度与强度性能。杨俊良等^[13]则以星载天线的力学响应需求为目标，进行了薄壁天线加强筋优化设计，在保证力学性能下，有效提升了结构的整体刚稳定性。

基于上述研究背景与现状分析，本文以航天领域广泛使用的 7A04 铝合金薄壁圆盘为对象，建立了一套涵盖“应力分布检测－变形仿真建模－

抗变形结构优化－工艺实验验证”的闭环研究方法。核心贡献在于提出一种面向铣削残余应力变形控制的结构优化方法。该方法重点通过创新性的构型设计，增强薄壁区域的局部刚度与应力适应能力，从而有效抑制加工过程中因残余应力耦合引起的非均匀变形，提升构件最终成形精度。本文旨在为解决航天领域高精度薄壁构件制造过程中的变形控制难题提供理论支持与工程可行的技术途径。

1 7A04 铝合金残余应力测试实验

1.1 毛坯初始残余应力测试

薄壁圆盘零件毛坯为 7A04 铝合金圆柱锻件，其化学成分及力学性能如表 1 和表 2 所示。毛坯在锻造过程中形成的初始残余应力仍存留于材料内部。为准确获取该初始残余应力的分布状态，采用加拿大 Proto X 射线残余应力分析仪(LXRD MG2000)，配合 STRUERS 电解抛光仪进行电解剥层测试。残余应力测试现场及电解剥层设备分别如图 1 与图 2 所示。

表 1 7A04 铝合金化学成分
Tab.1 7A04 aluminium alloy composition

锌	镁	铜	锰	铬	钛	铁	硅	Al
5.0 ~ 7.0	1.8 ~ 2.8	1.4 ~ 2.0	≤ 0.3	0.10 ~ 0.25	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 0.50	余量

表 2 7A04 铝合金力学性能
Tab.2 7A04 aluminium alloy mechanical properties

力学性能	数值
抗拉强度/MPa	≥ 530
屈服强度/MPa	≥ 400
布氏硬度	≥ 150
弹性模量/GPa	71
泊松比	0.33

X 射线残余应力分析仪采用以下测试参数：Cr-K-Alpha 靶材，管电压 30 kV，管电流 25 mA，特征波长 2.291 Å，单次曝光时间 1 s，累计曝光 10 次，β角摆动范围设定为±25°，布拉格角为 139°。残余应力测量基于 sin²ψ 法进行。由于 X 射线在 7A04 铝合金中的穿透深度通常小于 20 μm，为获取材料内部不同深度处的初始残余应力分

布，本文采用 STRUERS 电解抛光仪对试样进行逐层电化学腐蚀剥层，电解液为饱和氯化钠溶液。在剥层过程中力求剥层速率均匀、表面状态一致。每次剥层后，均清洁并重新定位样品，确保 X 射线照射的重复性。

为研究热处理工艺对毛坯初始残余应力的影响规律，本文选取 220 ℃时效制度开展实验。将毛坯试样置于热处理炉中，以 10 ℃/min 的升温速率加热至目标温度，控温精度为±3 ℃，保温 4 h 后随炉冷却至室温。经 220 ℃时效处理后，试样表层残余应力得到释放。电解剥层至 1500 μm 深度时，测得进给方向(x 方向)残余应力 σ_x 为 75.4 MPa，切宽方向(y 方向)残余应力 σ_y 为 54.6 MPa，结果表明，7A04 铝合金内部初始残余应力以拉应力为主，具体分布如图 3 所示。

1.2 端铣表层残余应力测试

实验材料为 7A04 铝合金，由于铣削加工会使

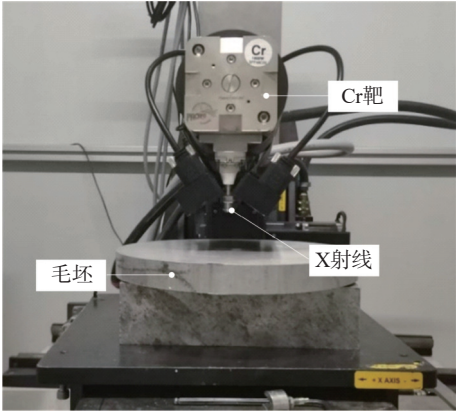


图 1 毛坯初始残余应力测试现场

Fig.1 On-site testing of initial residual stress in blank

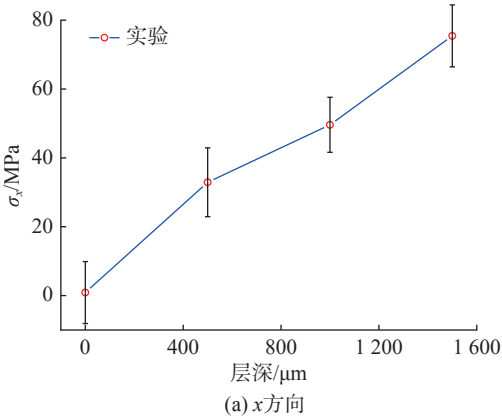


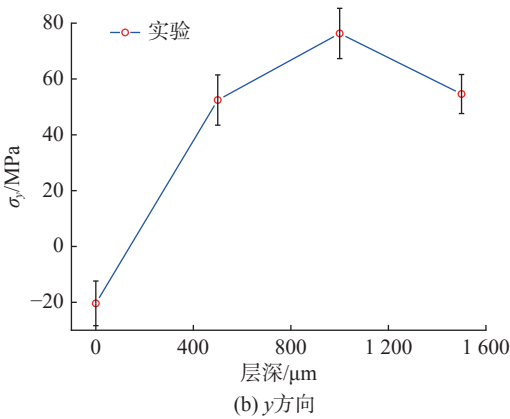
图 3 7A04 铝合金毛坯初始残余应力

Fig.3 Initial residual stress in 7A04 aluminum alloy blank



图 2 STRUERS 电解剥层设备

Fig.2 STRUERS electrolytic decapsulation equipment



薄壁圆盘变形比较明显，在变形的影响下，铣削残余应力会发生重分布，最终影响残余应力分布。因此，为了获得实际加工参数对铣削残余应力的影响，采用相同加工参数铣削 7A04 铝合金块。这是因为铝合金块多轴加工后难发生变形，可以获得准确的残余应力分布情况。铣削实验参数设置如下：轴向切深 $a_p=0.15$ mm；径向切宽 $a_e=1.5$ mm；主轴转速 $n=7500$ r/min；每齿进给量 $f_z=0.05$ mm/齿。

端铣 7A04 铝合金块实验在立式三坐标数控机床上进行，机床最高转速为 12000 r/min。实验刀具选用 $\Phi 4$ 涂层硬质合金 3 刃立铣刀；铝合金试件尺寸为 40 mm×40 mm×30 mm；铣削方式为顺铣，加工过程中加切削液进行冷却与润滑。图 4 展示了 7A04 铝合金端铣实验加工现场、所用立铣刀。铣削完成后，采用 X 射线衍射法对试块已加工表面的残余应力进行测试。基于前期端铣实验获取的加工表面状态，进一步开展残余应力梯度分布的分析。采用残余应力分析仪配合电解抛光仪进

行剥层测试，残余应力测试现场及剥层位置如图 4 所示。

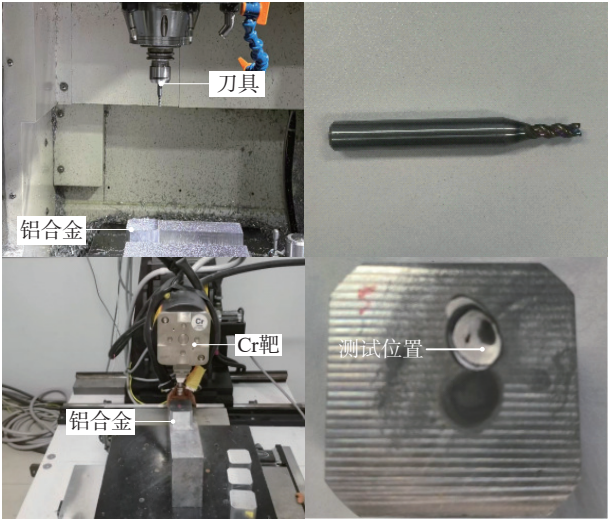


图 4 7A04 铝合金端铣实验及残余应力测试

Fig.4 7A04 aluminum alloy end milling experiment and residual stress testing

图 5 残余应力测试结果表明，7A04 铝合金端铣表层在进给方向的残余应力为-124.21 MPa，切

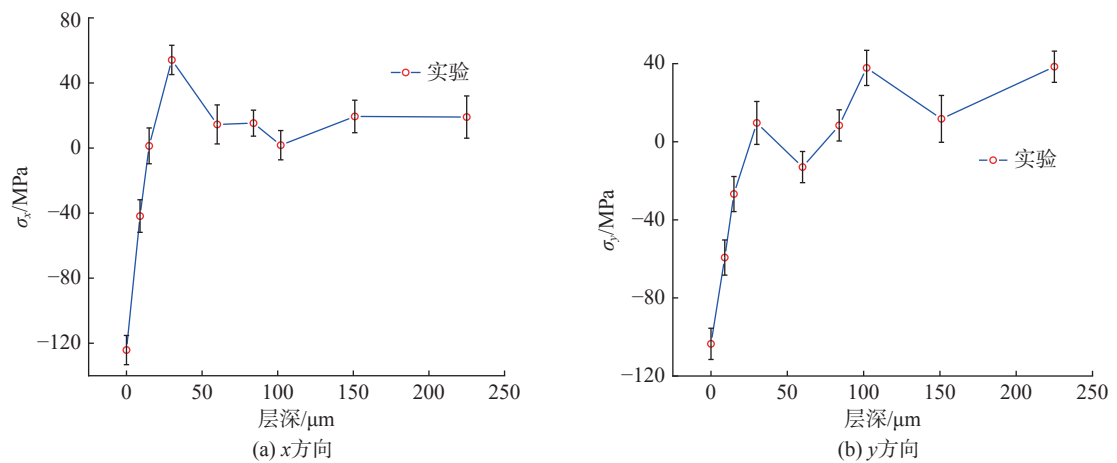


图 5 铝合金端铣残余应力梯度分布
Fig.5 Gradient distribution of residual stress in aluminum alloy end milling

宽方向为-103.52 MPa，进给方向的表层残余应力大于切宽方向。7A04 铝合金端铣表层为压应力场，其残余应力值随深度增加整体呈递减趋势。实验结果表明，7A04 铝合金端铣残余应力沿深度呈现梯度特征，可分为 3 个阶段：表面压应力区、拉应力过渡区及平衡区。端铣残余应力影响深度在 70 μm 左右。由表层压应力逐渐过渡为内部拉应力，该结果为后续工艺参数优化提供了实测数据支撑。

2 7A04 铝合金薄壁圆盘结构铣削残余应力变形仿真

2.1 薄壁圆盘结构残余应力变形有限元建模

薄壁圆盘零件材料为 7A04 铝合金，其最大外缘直径为 184.32 mm，结构中最薄处厚度仅为 1 mm。零件中心设计有一凸出圆台结构，直径为 75 mm，圆台区域厚度为 5 mm。该零件对底面厚度为 1 mm 区域的平面度要求极为严格，设计指标为不大于 0.1 mm。本文基于 NX 12.0 平台，建立了该薄壁圆盘零件的精确三维几何模型，结果如图 6 所示。

基于 Abaqus 有限元分析平台，建立薄壁圆盘在残余应力作用下的变形仿真模型。通过 Fortran 语言编写 SIGINI 子程序，采用蒙皮-实体应力贴合方式实现了残余应力梯度分布的精确加载。模型中设定的 7A04 铝合金材料参数如下：弹性模量为 71 GPa，密度为 2.83 g/cm^3 ，泊松比为 0.33。

建模过程中，首先将薄壁圆盘三维几何模型导入 Abaqus 仿真软件。其次，完成 7A04 铝合金

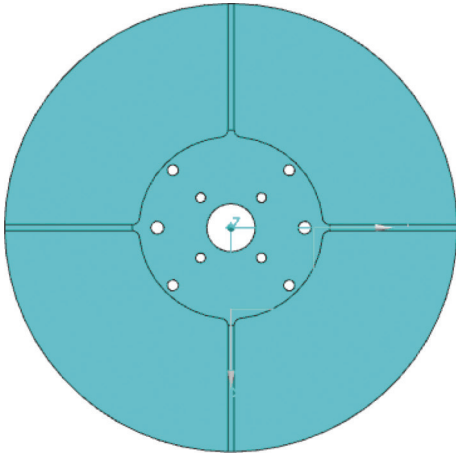


图 6 薄壁圆盘结构三维几何模型
Fig.6 Three-dimensional geometric model of a thin-walled disk structure

材料参数的定义并进行网格划分，网格质量对仿真结果的准确性具有重要影响。经多次收敛性分析，最终将单元全局尺寸确定为 0.5 mm。薄壁圆盘三维模型采用 C3D8R 单元进行网格划分。上表面蒙皮采用 S4 单元，下表面蒙皮采用 S4R 单元。网格生成都采用中性轴扫掠算法，有效保证了网格的规整性与计算稳定性。接下来进行装配，装配完成后，对薄壁圆盘实体部分进行绑定约束。通过 Abaqus 载荷模块中的预定义场，在实体上将初始残余应力值输入以实现基体内应力的施加。铣削残余应力通过 Fortran 子程序加载在蒙皮上。该仿真模型未模拟材料逐步去除过程中的应力动态重分布，而是将初始残余应力与铣削残余应力作为静态耦合载荷施加于最终几何体。薄壁圆盘在耦合残余应力下的变形云图如图 7 所示。图中， U_3 表示结构变形后轴向位移量。

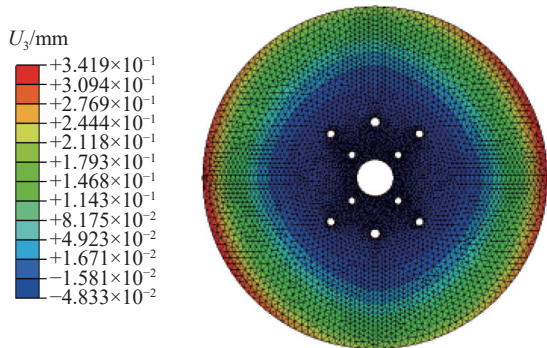


图7 薄壁圆盘仿真变形云图

Fig.7 Contour map of thin-walled disk simulation deformation

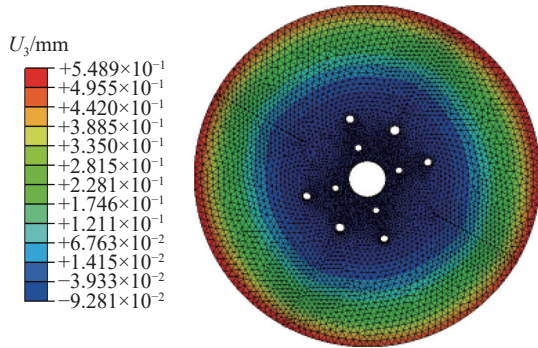


图8 残余应力变形云图

Fig.8 Contour map of residual stress deformation

2.2 薄壁圆盘零件残余应力变形仿真分析

薄壁圆盘结构因其自身刚度较低,在加工过程中易受内应力与铣削残余应力的耦合影响,变形控制难度显著。在铣削加工过程中,刀具与工件接触区域材料经历剧烈的弹塑性变形,同时伴随局部高温,导致已加工表层产生铣削残余应力,该应力场的形成本质上是切削力效应与切削热效应共同作用的结果。当毛坯中存在的初始残余应力与铣削引入的切削残余应力在结构中耦合叠加时,会形成非对称的残余应力分布,从而改变结构的变形行为与最终形状精度。

为研究该耦合作用对薄壁圆盘结构变形的影响机制,本文将测得的毛坯初始残余应力场与实验获得的端铣残余应力数据共同施加于薄壁圆盘有限元仿真模型中,进行耦合残余应力作用下的变形仿真分析。薄壁构件在铣削过程中的变形行为具有高度复杂性,由于几何突变导致的应力集中效应及材料本身的非均匀性,残余应力在结构中呈现梯度分布特征,进而对零件的最终变形形态产生决定性影响。基于上述实验参数所获得的耦合残余应力作用下薄壁圆盘的变形分布云图如图8所示,清晰反映了应力耦合导致的非均匀变形特征。

通过对薄壁圆盘零件的仿真结果进行分析发现,残余应力所引起的结构变形特征与构件厚度分布及几何构型设计密切相关。在厚度为5 mm的区域,由于结构刚度较高,材料有效分散了残余应力作用,该区域变形量极小,整体变形范围控制在0.01 mm以内;而在厚度仅为1 mm的薄壁边缘区域,则出现明显的变形集中现象,变形分布呈现明显的放射状扩展趋势,云图中颜色梯度变化剧烈,反映出该区域存在的应力集中效应,最

大变形量达到约0.549 mm。进一步观察云图可知,薄壁圆盘的最大变形区域主要集中在扇形结构的外缘部位,表现为深红色大变形区;相比之下,设置有加强筋的区域变形量降低。这一对比结果充分验证了加强筋结构在改善应力分布、提升局部刚度和抑制变形方面的有效作用。

3 面向残余应力变形的铝合金薄壁圆盘结构设计 with 优化

3.1 薄壁圆盘结构加强筋结构优化设计

针对原始构型在铣削加工后出现的变形问题,其平面度无法满足设计指标要求。为有效抑制加工变形,本文通过在薄壁圆盘的边缘及中间区域合理布置加强筋,以提升结构整体刚度。5个构型的具体几何形态如图9所示。

基于原始构型,首先在关键区域增设单一环形加强筋的改进型薄壁圆盘三维模型,记为1#薄壁圆盘结构。在此基础上,以加强筋材料体积恒定为核心约束条件,进行系列构型优化:在1#结构基础上引入双环形加强筋,形成2#薄壁圆盘结构;维持体积不变,通过减薄环向筋厚度并增设三角形径向加强筋,构建出3#薄壁圆盘结构;进一步增加三角形加强筋数量,但同时继续减薄环向筋厚度,发展出4#薄壁圆盘结构。为优化应力分布与质量配置,将主要加强筋材料向外缘迁移,于最大半径处设置外圈环形加强筋。为满足体积约束,在该环形筋中进行规律性孔洞设计,实现质量平衡。同时配置4条等厚度径向加强筋,最终形成5#薄壁圆盘结构,其结构中外圈环形加强筋的径向长度是5个模型中最大的。

3.2 薄壁圆盘零件残余应力变形分析

基于原始薄壁圆盘结构残余应力变形有限元

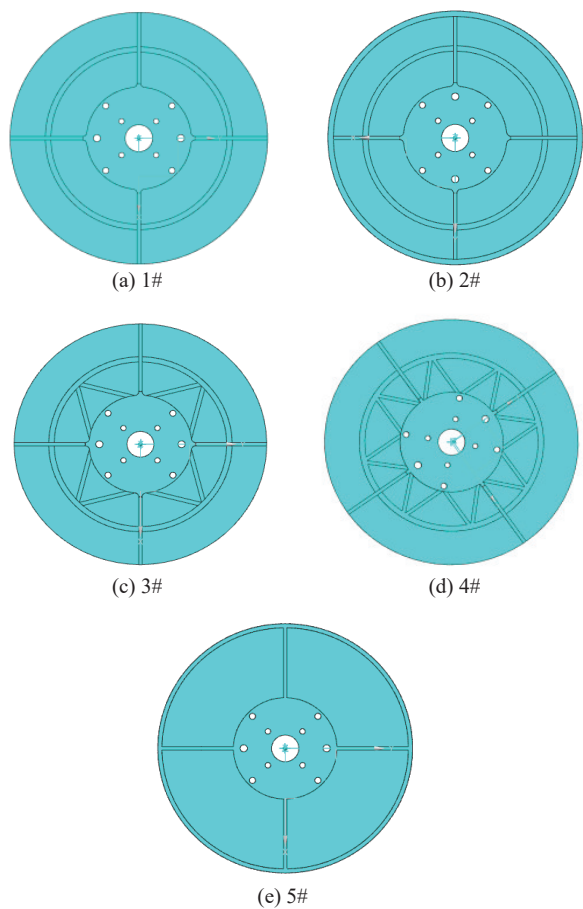


图9 1#~5#薄壁圆盘结构

Fig.9 1#~5# thin-walled disk structure

仿真模型，本文对提出的5种薄壁圆盘构型分别进行了耦合残余应力变形方向仿真。仿真过程中，初始残余应力与铣削残余应力的载荷条件保持一致：初始残余应力采用实测的毛坯内应力数据，铣削残余应力则依据实验所测得的铣削残余应力施加。在Abaqus中，初始残余应力通过预定义场模块加载，而铣削残余应力梯度分布通过Fortran用户子程序加载在蒙皮上，从而精确模拟初始残余应力与铣削残余应力的耦合效应。通过对5种构型在耦合残余应力作用下的变形进行仿真，得到了各结构的变形分布云图，具体结果如图10所示。

通过对1#~5#薄壁圆盘结构的残余应力变形云图进行对比分析可知，各构型的变形分布模式总体相似，均表现出明显的径向非均匀特征。在中心厚度较大区域(圆台部位)，变形量小(均小于0.01 mm)，可视为刚性区域；随着半径增大，变形逐渐累积，至外圈薄壁边缘处达到最大值。量化分析结果表明，不同构型对变形抑制效果具有差异。1#~5#结构的最大变形量分别为0.347、

0.312、0.327、0.403、0.132 mm。其中，4#结构变形最为显著，而5#结构表现出最优的抗变形性能，其最大变形量较初始构型降低75.96%。各构型变形分布均呈现良好的中心对称特性，具体数值对比如图11所示。综合仿真结果可知，5#薄壁圆盘结构在保持轻量化特征的同时，有效提升了整体刚度与抗变形能力，因此，被选定为最优构型，并作为后续加工验证实验的基准方案。5#结构的优越性在于其协同作用：在最大变形区域形成一个封闭的、高刚度的环形加强筋，直接承受并限制了该区域因应力释放而产生的径向收缩或扩张趋势，将原本可能导致大面积屈曲的应力，转化为由环形筋主要承担的环向压应力；并且在该环形筋中进行规律性孔洞设计，同时释放一部分残余应力；径向筋将残余应力有效地传递至中心刚性圆台区域，中心圆台(厚5 mm)刚度远大于薄壁区，避免了残余应力在薄壁区域的局部集中和积累。

4 实验验证

4.1 加工工艺方案设计

为聚焦于底面加工变形分析，实验件简化了实际结构中的三级圆柱与法兰特征，重点研究主体薄壁区域在加工过程中残余应力对变形的影响。实验采用7A04铝合金坯料，通过线切割工艺制备直径184.32 mm、高度5 mm的圆柱形预加工件。在该工艺路径下，精加工过程中产生的铣削残余应力将保留于构件表层，并与毛坯初始残余应力相互耦合，共同诱发加工变形。因此，精加工阶段的切削参数控制尤为关键。本文通过优化切削用量以调控应力引入水平，具体工艺参数设置如表3所示。

在端铣加工7A04铝合金薄壁圆盘零件前，对线切割制备的零件进行了220℃去应力退火处理。该工艺旨在消除基体内应力与线切割过程中引入的局部残余应力，避免其对后续精加工变形产生影响。端铣实验在精密立式加工中心上完成，机床最高转速为12000 r/min。实验选用Φ4涂层硬质合金三刃铣刀，铣削方式为顺铣，加工过程中加切削液进行冷却与润滑。

4.2 加工实验

在7A04铝合金薄壁圆盘零件的背面铣削过程中，采用底面定位结合三爪卡盘侧向夹紧的装夹

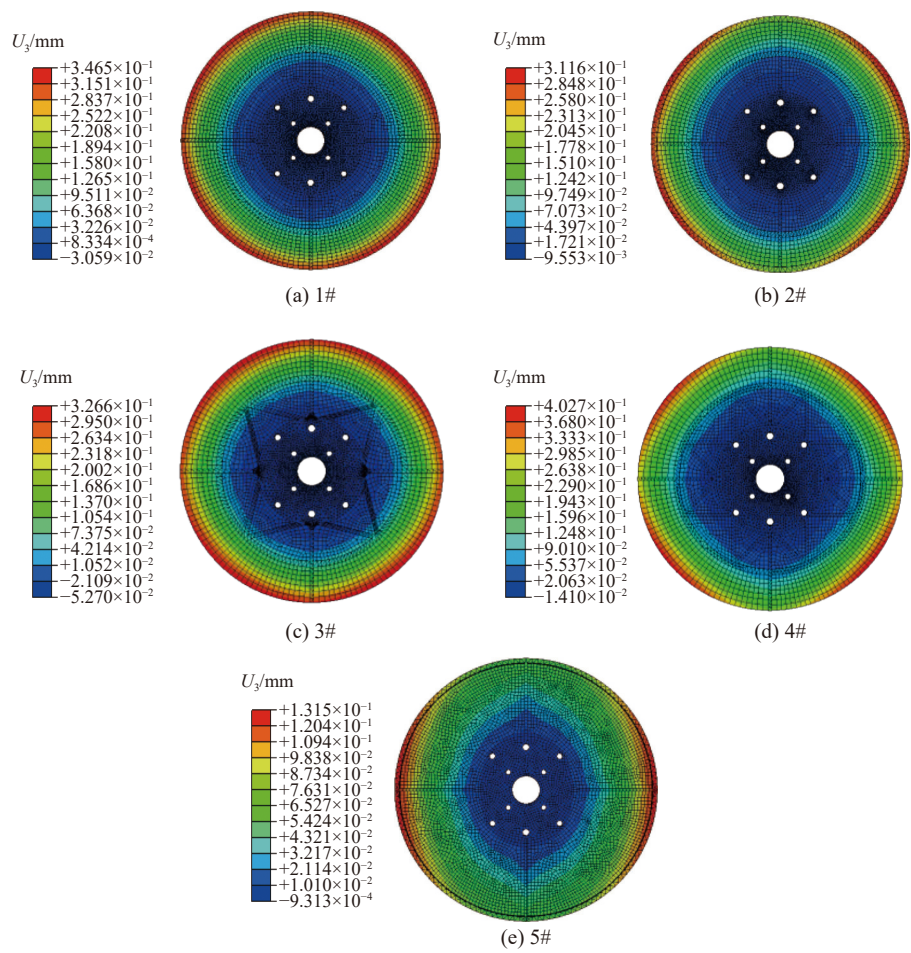


图 10 1#~5#薄壁圆盘结构残余应力变形云图

Fig.10 Residual stress deformation contour maps for #1~#5 thin-walled disk structure

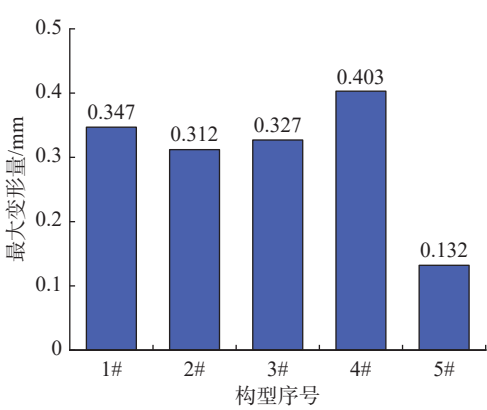


图 11 不同构型薄壁圆盘最大残余应力变形对比

Fig.11 Comparison of maximum residual stress deformation in thin-walled discs with different configurations

方案。该装夹策略通过底面全面支撑保障定位基准的一致性，最大限度抑制因夹紧力导致的初始变形。在夹紧操作前后，均使用百分表对工件表面平整度进行精确检测，确保装夹前后不变形。为了减小刀具磨损对铣削残余应力的影响，每加工一面更换一把刀具。在加工得到的薄壁圆盘零件

表 3 7A04 铝合金端铣实验参数

Tab.3 Experimental parameters for end milling of 7A04 aluminum alloy

切宽/mm	轴向切深/mm	主轴转速/(r·min ⁻¹)	进给速率/(mm·min ⁻¹)
2.0	0.2	8 000	1 200

的底面上均匀选取一些点，使用三坐标设备对薄壁圆盘零件底面上选取的点进行三坐标测量。图 12 显示了 7A04 铝合金薄壁圆盘端铣的实验加工现场，以及加工完成的成品件和平面度测试现场。

根据薄壁圆盘结构的设计要求，其底面平面度需保证不超过 0.1 mm。为精确评估加工后零件的平面度状态，在成品圆盘底面沿径向均匀布设 7~8 个测点，并沿周向以 45°为间隔均布 8 组测量路径。采用三坐标测量机对各测点进行高精度坐标数据采集，获取底面实际测量数据。将测量数据导入 NX 软件，与圆盘零件的理论三维模型进行拟合比对，通过偏差分析定量表征实际加工表面与设计模型之间的几何差异。三坐标测量所得的底面偏差分布结果如图 13 所示。

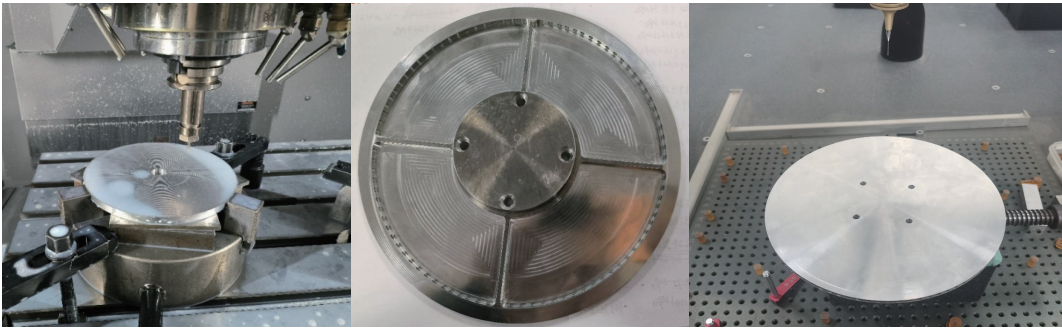


图 12 加工现场、成品件及三坐标测试现场

Fig.12 Processing site, finished product and three coordinate testing site

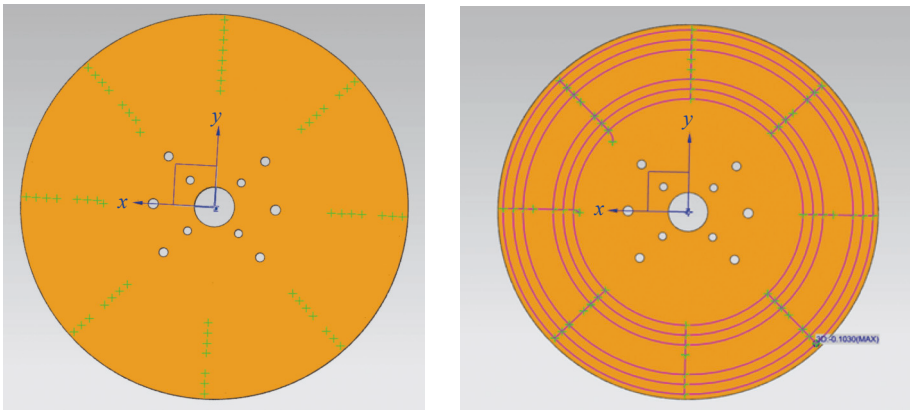


图 13 三坐标偏差测量结果

Fig.13 Three coordinate deviation measurement results

将三坐标测量数据导入NX软件后，首先沿径向将各组测量点拟合成样条曲线，形成8条径向评价路径；随后沿周向将对应测点连接为6条环向样条曲线。通过测量这14条样条曲线与圆盘零件理论底面之间的法向偏差，系统评估实际加工表面的几何精度。NX软件的偏差分析结果显示，14条曲线中最大偏差值为0.103 mm，虽略高于设计要求的0.1 mm，但相较于原始薄壁圆盘天线构型的变形量已实现明显改善。该结果表明，通过结构优化设计，零件平面度精度得到有效提升，为后续工艺进一步优化提供了明确方向。

以NX软件中的工作坐标系(WCS)为基准，在薄壁圆盘零件底面建立平面直角坐标系，设定x轴正方向为测量起始基准。在该坐标系下，前述8条径向样条曲线与x轴正方向的夹角分别为45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°和360°(即0°)，覆盖整个圆周的测量方向。基于几何理想化假设，将6条环向样条曲线视为标准圆形路径，分别提取每条环向路径上8个均匀分布测点的实际坐标，并计算各测点相对于理论底面的法向偏差。通过该分析方法，可系统获取底面在不

同径向位置及周向角度下的变形分布特性，具体偏差测量结果如图14所示。

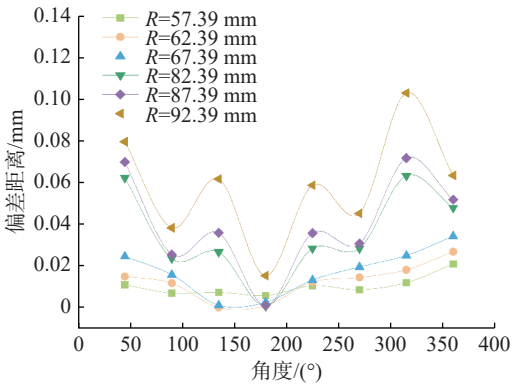


图 14 实测点与平面偏差

Fig.14 Deviation between the measured point and the plane

图14反映了不同径向距离 R 下，周向角度与加工偏差之间的关联规律。分析表明，当测量点距离底面圆心较近时(如 $R=57.39$ 、 62.39 、 67.39 mm)，其法向偏差值普遍较小，且随角度变化波动平缓，说明该区域内零件翘曲变形较小，平面度保持良好，加工质量较为稳定。随着径向距离的增大，测量点与底面的偏差加剧。在 $R=82.39$ 、 87.39 、 92.39 mm等外围区域，偏差值随角度变化

呈现剧烈波动,反映出该区域存在明显的非对称翘曲变形。该现象表明,薄壁圆盘在加工过程中边缘区域的变形敏感性高于中心区域,进一步验证了结构刚度分布对加工精度的重要影响。

从周向分布来看,最小偏差出现在 180° 方位,而最大偏差集中于 $315^\circ\sim 360^\circ$ 范围内,反映出零件呈现非对称形态。值得注意的是,在 135° 与 225° 方位处的偏差值较为接近,结合整体分布模式可判断,薄壁圆盘零件的变形形态总体上具备近似轴对称的特征,表明加工过程中的应力释放与变形响应具有一定的规律。

5 结 论

本文通过“应力分布检测-变形仿真建模-抗变形结构优化-工艺实验验证”相结合的研究方法,深入探究了7A04铝合金薄壁圆盘在耦合残余应力作用下的变形情况与控制方法,获得以下主要结论:

a. 分析了7A04铝合金毛坯内应力与端铣残余应力的分布规律。通过X射线衍射检测与端铣工艺实验,明确了毛坯初始残余应力的梯度分布特征,揭示了铣削参数对表层残余应力状态的影响。

b. 构建了初始残余应力与铣削残余应力耦合作用下的薄壁圆盘变形仿真模型。基于Abaqus平台建立了反映残余应力耦合效应的有限元模型,实现了对初始残余应力与铣削残余应力叠加所引发变形的分析。

c. 完成了7A04铝合金薄壁圆盘结构的抗变形优化设计。提出了以环形加强筋为核心的结构强化方法,通过5种构型的对比分析,确定外圈环形加强筋结构为最优抗变形方案。优化后的结构最大变形量由原始模型的0.549 mm降低至0.132 mm,降幅达75.96%,结构刚度得到显著提升。

d. 验证了结构优化方案的工艺可行性。采用数控机床对优化构型进行精密加工,经三坐标测量仪检测,零件底面平面度达到0.103 mm,基本满足高精度使用要求。

本文通过薄壁圆盘结构设计与工艺控制,实现了对薄壁圆盘残余应力变形的有效控制。后续工作将重点研究切削力、结构刚度等多因素耦合作用下的变形机理,以及刀具磨损对残余应力的影响等方面。该研究为解决7A04铝合金薄壁圆盘

在加工过程中的变形控制难题提供了有效途径,为航天领域高精度薄壁构件的制造工艺提供了理论依据与技术支持。

参考文献:

- [1] 李忠群,丁鹏,杨雨,等.航空薄壁零件切削加工技术研究进展[J].航空制造技术,2024,67(7):38-53.
- [2] LI J G, WANG S Q. Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(1/4): 997-1012.
- [3] 胡越,张晟玮,蒋睿嵩,等.国产7050铝合金薄壁承力框车削残余应力变形控制研究[J].航空工程进展,2025,16(2):134-141.
- [4] HUANG X M, SUN J, LI J F. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(5/8): 1035-1041.
- [5] GUO J, WANG B, HE Z X, et al. A novel method for workpiece deformation prediction by amending initial residual stress based on SVR-GA[J]. *Advances in Manufacturing*, 2021, 9(4): 483-495.
- [6] ZAWADA-MICHAŁOWSKA M, PIEŚKO P, MRÓWKA-NOWOTNIK G, et al. Effect of the technological parameters of milling on residual stress in the surface layer of thin-walled plates[J]. *Materials*, 2024, 17(5): 1193.
- [7] 马秀伟,胡越,姚雯莉,等.国产7050铝合金薄壁承力框车削变形预测研究[J].航空工程进展,2025,16(1):108-116.
- [8] WANG Z Y, ZHOU J H, REN J X, et al. Hybrid prediction model for residual stress profile induced by multi-axis milling Ti-6Al-4 V titanium alloy combined finite element with experiment[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(9/10): 4495-4511.
- [9] LUO Y J, ZHAN J J. Linear buckling topology optimization of reinforced thin-walled structures considering uncertain geometrical imperfections[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62(6): 3367-3382.
- [10] 刘磊,刘杨,刘书田.基于拓扑优化的曲面薄壁结构加筋布局与高度协同优化设计方法[J].计算力学学报,2025,42(4):523-528.
- [11] 苏英霞,乔蒙,欧相麟.汽车薄壁门板结构优化[J].中国塑料,2024,38(10):67-69.
- [12] 张琪.基于有限元的薄壁结构建模及尺寸优化[J].强度与环境,2015,42(3):42-46.
- [13] 杨俊良,艾永强,钟亦阳.星载薄壁结构天线结构优化设计与试验验证[J].空间电子技术,2019,16(3):7-14.