

文章编号: 1674-8190(2025)01-108-09

国产7050铝合金薄壁承力框车削变形预测研究

马秀伟¹, 胡越², 姚雯莉³, 蒋睿嵩³

(1. 上海航天技术研究院 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

(2. 四川大学 空天科学与工程学院, 成都 610065)

(3. 四川大学 机械工程学院, 成都 610065)

摘要: 研究国产7050铝合金航空薄壁零件车削加工的变形预测, 建立能够准确预测车削变形的有限元模型, 对保证航空薄壁零件的加工精度与尺寸稳定性, 提高飞机的结构强度和可靠性具有重要意义。采用仿真结合实验论证的方法, 研究国产7050铝合金初始残余应力与车削残余应力耦合作用对薄壁承力框加工变形的影响规律。根据航空薄壁承力框加工工艺, 采用生死单元法建立承力框车削变形仿真模型, 通过盲孔法及车削实验, 分别获得承力框毛坯初始残余应力场及车削表层残余应力; 基于车削变形仿真模型, 预测初始残余应力场及车削残余应力耦合作用下的承力框加工变形, 并进行实验验证。结果表明: 承力框变形仿真预测模型的误差小于15%。

关键词: 国产7050铝合金; 航空薄壁件; 加工变形; 残余应力; 车削

中图分类号: V261.2⁺1; TG51

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.01.13

Research on prediction of turning deformation of domestic 7050 aluminum alloy thin-wall bearing frame

MA Xiuwei¹, HU Yue², YAO Wenli³, JIANG Ruisong³

(1. Shanghai Institute of Aerospace Systems Engineering, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

(2. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Researching the deformation prediction of domestic 7050 aluminum alloy aviation thin-walled parts during turning processing and establishing an accurate finite element model for predicting turning deformation are of great significance for ensuring the machining precision and dimensional stability of aviation thin-walled parts, as well as improving the structural strength and reliability of aircraft. This thesis employs simulation and experimental demonstration methods to study the influence of the coupling effect between the initial residual stress of domestic 7050 aluminum alloy and the turning residual stress on the deformation of thin-walled bearing frames during processing. Firstly, based on the machining process of aviation thin-walled bearing frames, a turning deformation simulation model of the bearing frame is established using the birth and death element method. Next, the initial residual stress field of the bearing frame blank and the turning surface residual stress are obtained through the blind hole method and turning experiments, respectively. Finally, based on the turning deformation simulation model, the deformation of the bearing frame under the coupling effect of the initial residual stress field and turning residual stress is predicted and experimentally verified. The results show that the error of the bearing frame deformation simulation prediction model is less than 15%.

Key words: domestic 7050 aluminum alloy; aviation thin-walled parts; processing deformation; residual stress; turning

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-12-22

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-VII-0013-0153); 四川省科技计划资助(2021ZDZX0001, 2021ZDZX0002)

通信作者: 蒋睿嵩(1984-), 男, 博士, 副教授。E-mail: jiangrs@scu.edu.cn

引用格式: 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.

MA Xiuwei, HU Yue, YAO Wenli, et al. Research on prediction of turning deformation of domestic 7050 aluminum alloy thin-wall bearing frame[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(1): 108-116. (in Chinese)

0 引言

7050铝合金是可热处理强化的高强度变形铝合金,具有高强度、高耐疲劳性能、高韧性、高耐损伤性能等特点^[1],在军工装备、航空航天制造领域应用广泛^[2],在飞机蒙皮、承力框和发动机等结构上都有应用。在我国航空材料国产化的大背景下,西南铝业(集团)有限责任公司成功研制的7050铝合金厚板^[3],有望打破国外技术垄断并解决国家重大项目关键材料的需求问题^[4]。随着航空工业的快速发展,飞行器结构件朝着轻量化、高强度的方向发展,航空发动机承力框零件普遍采用薄壁整体式结构,然而,铝合金航空薄壁承力框结构复杂、尺寸大、材料去除率大^[5],由于毛坯初始残余应力的重分布以及因加工而产生的车削残余应力而导致的加工变形过大^[6],使得其加工精度和尺寸稳定性难以得到保障^[7]。为了研究和控制航空薄壁零件的加工变形,需要对零件加工所产生的变形大小及变形趋势进行预测^[8],以保证航空薄壁零件的加工精度与尺寸稳定性,提高飞机的结构强度和可靠性^[9-10]。

现有的针对初始残余应力变形的研究大多通过残余应力测量并结合有限元仿真^[11],主要针对零件中的初始残余应力在加工过程中得到释放、初始残余应力重新分布,所造成的零件变形对零件质量的影响。Sebastian^[12]建立了铝板加工变形的数学预测模型,通过考虑毛坯初始残余应力状态和零件加工后的形状、位置来预测零件的变形;Schulze等^[13]通过将有限元模拟与实验相结合的方法,将铝合金T形件弯曲以产生不同的初始应力状态,根据零件经过开槽车削后的变形量差异,表明初始残余应力对加工变形有着显著影响,是铝合金结构件产生加工变形的主要原因。

车削残余应力是由车削过程中工件加工塑性变形及相变作用下产生的,残余拉应力会使工件的疲劳强度降低,导致零件的使用寿命降低;此外,残余压应力会导致加工后的零件变形。El-Axir^[14]将304不锈钢、37钢、7001铝合金、2024铝合金和黄铜这5种材料的抗拉强度、车削速度和进给速度作为输入参数,进行车削实验并检测车削表层残余应力,建立了基于实验的车削残余应力经验预测模型,能够确定最大残余应力的大小和深度;Bi Y B等^[15]建立了综合考虑初始残余应力、

车削载荷、夹具布局、车削顺序和刀具路径的模拟铣削过程的三维有限元模型,预测了7050-T7451铝合金材料翼梁的加工变形,并加以实验验证,预测结果与实验相符;申运锋等^[16]提出了一种新的铣削加工过程的数值分析方法,利用多种工艺参数组合实验获得切削回归方程,将此作为数值分析过程中切削力加载的重要依据。

以上研究表明,由于材料的去除,零件内部应力会相应的释放和重分布,通过变形来达到新的平衡;对于航空薄壁件,车削残余应力对其加工变形也有着重要影响,在车削加工中,由于车削加工过程中产生的残余应力,将直接影响工件的外形与尺寸的准确性,从而影响工件的使用性能。目前,航空制造企业针对薄壁零件的加工变形预测主要通过测量加工出实际零件,分析变形情况,具有局限性且对变形机理理解不够充分。

国产7050薄壁承力框发生切削加工变形的影响因素众多,包括工件的材料及结构、刀具、机床、装夹、工艺参数、温度等,而影响零件最终变形的主要因素为残余应力。由于国产7050铝合金薄壁承力框具有直径大、壁厚薄、高度高、型腔内壁狭小、刚度较差等结构特点,在车削加工时特别是精车时由于壁厚变薄,零件刚性进一步变差,容易出现让刀、震颤、过切和欠切现象,初始残余应力的释放重分布与切削残余应力的引入会致使零件整体变形更为严重。

为此,本文针对国产7050铝合金,对其初始残余应力和车削残余应力耦合作用下的薄壁零件进行加工变形预测。首先,通过生死单元法建立国产7050铝合金承力框残余应力变形的有限元分析预测模型,通过盲孔法及车削实验,分别获得承力框毛坯初始残余应力场及车削表层残余应力;然后,基于车削变形仿真模型,将得到的毛坯初始残余应力场及车削表层残余应力导入仿真模型进行变形预测;最后,通过实验验证模型的准确性。

1 承力框变形预测模型建立

1.1 初始残余应力有限元模型的建立

铝合金厚板或锻件毛坯内部存在较大的残余应力,即为车削加工前的初始残余应力场,在加工过程中随着材料的去除,毛坯初始残余应力会相应的释放和重分布,导致零件产生加工变形。为了对国产7050铝合金承力框初始残余应力引起的

变形进行预测,考虑采用有限元软件模拟材料去除过程,建立初始残余应力变形有限元预测模型。

将建立的车削加工中各个工序的三维几何模型导入 ABAQUS 中装配合并,生成用于仿真分析的实体模型,部件装配体如图 1 所示。根据 8 个车削工序,分别建立 8 个分析步,模拟每个工序的车削加工过程,航空薄壁承力框加工工艺流程如图 2 所示。

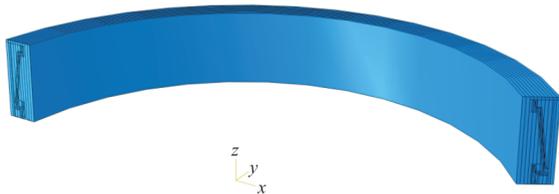


图 1 部件装配图

Fig. 1 Component assembly diagram

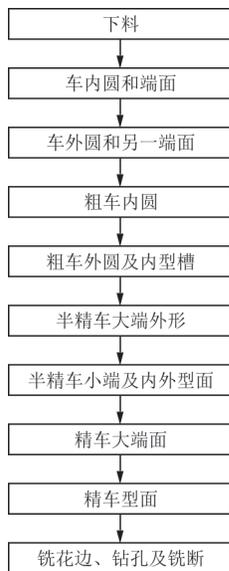


图 2 航空薄壁承力框加工工艺示意图
Fig. 2 Aerospace thin-wall bearing frame machining process schematic diagram

工件材料为国产 7050-T7452 铝合金,其具有良好的力学性能,该材料的相关参数如表 1 所示,将材料的本构模型参数输入到 ABAQUS 中,完成材料参数的定义。

表 1 7050 铝合金材料性能参数^[17]
Table 1 7050 aluminum alloy material performance parameters^[17]

参数	数值	参数	数值
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.82	杨氏模量/GPa	71
泊松比	0.33		

通过对实体模型沿径向进行拆分,便于将毛坯的初始残余应力数据离散化分层加载到模型中,如图 3 所示。边界条件采用“3-2-1”三点约束方法,以避免零件在材料去除过程中发生刚体位移,并保证初始应力释放与重新分布使得工件发生自由变形。

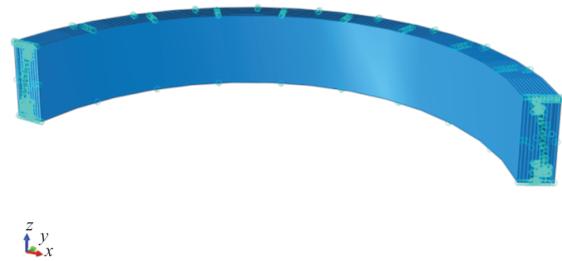


图 3 毛坯初始应力场离散化分层示意图

Fig. 3 Schematic diagram of discretization and layering of blank initial stress field

随着车削加工过程的进行,材料会从模型中去除,通过生死单元法可以激活或停用选定单元来模拟车削加工中材料去除的过程^[18],从而形象地得到加工后材料去除引起的残余应力分布及变形。

由于承力框零件尺寸较大,结构复杂,属于薄壁结构件,本模型中单元形状整体上选择楔形网格,楔形的单元类型为六节点线性三棱柱单元 C3D6,单元数为 301 万个。楔形网格有利于提高计算精度与计算效率,将薄壁承力框模型进行划分网格后如图 4 所示。

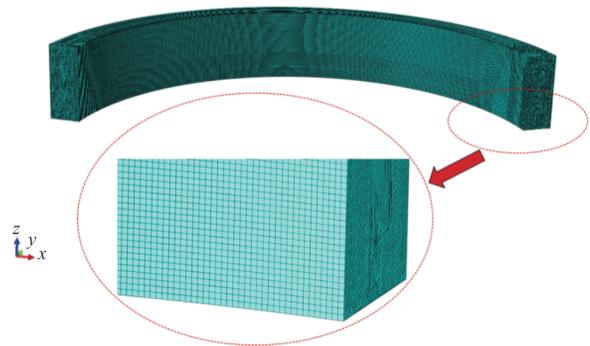


图 4 薄壁承力框模型网格的划分

Fig. 4 Meshing of thin-walled load-bearing frame model

1.2 耦合残余应力有限元模型的建立

薄壁承力框车削过程中,车削加工会在 200~400 μm 的亚表层引入车削残余应力,在精加工阶段,零件壁厚较小,车削残余应力的影响较大。采

用薄壳单元应力贴合技术,在承力框零件的各个表面建立多层带厚度的薄壳^[19],多层薄壳组成了车削残余应力的影响表层;再将建立的薄壳与承力框零件精车的表面进行绑定和约束,实现单元的应力贴合,如图 5 所示。

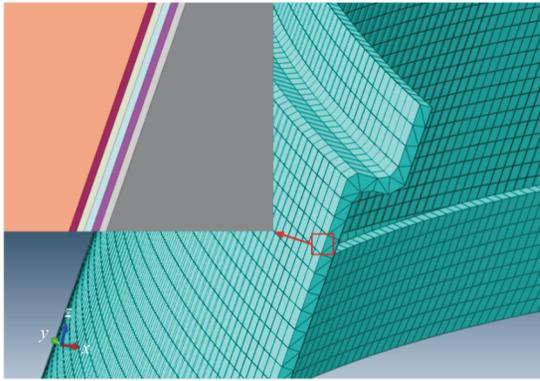


图 5 薄壳单元贴合工件表面

Fig. 5 Thin shell elements conform to the workpiece surface

本文模拟国产 7050 铝合金薄壁承力框切削残余应力对工件变形的影响,研究对象是精车后的几何模型,与初始残余应力模型的几何模型不同,单元布种的密度也不同,故采用单元形状函数法进行单元信息映射,以得到真实反映残余应力对加工变形的影响结果。形状函数任意节点 M 的映射数据为

$$D_M = \sum_{i=1}^n a_i D_i \quad (1)$$

式中: a_i 为节点 i 的形状函数; D_i 为节点 i 位置的数据变量(应力、应变、温度、位移等); D_M 为节点 M 位置的数据变量。

通过网格单元信息映射技术准确获取承力框零件精车前的材料内部应力场,考虑材料去除残余应力的释放与重分布及切削残余应力的影响,精车型面应力场映射结果云图如图 6~图 7 所示,可以看出:网格单元信息映射后的应力场与原始初始残余应力仿真计算结果具有几乎相同的应力分布特征;映射计算后,最大应力误差控制在 7% 以内。表明采用单元形状函数法映射后的应力场具有较高的计算精度,通过将单元形状函数法映射的初始残余应力场施加到工件内,并通过薄壳单元贴合的切削残余应力施加到工件表层,至此耦合残余应力变形有限元模型建模完成,可用于计算承力框精车后耦合残余应力引起的变形。

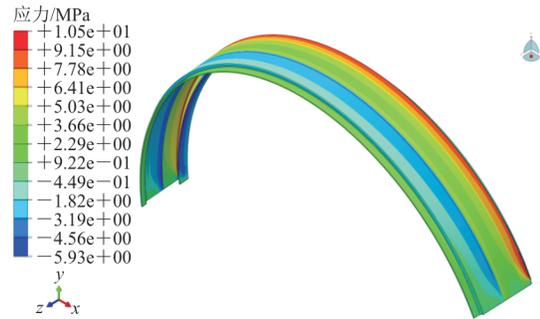


图 6 用于映射的初始残余应力仿真中的应力场

Fig. 6 Stress fields in initial residual stress simulations for mapping purposes

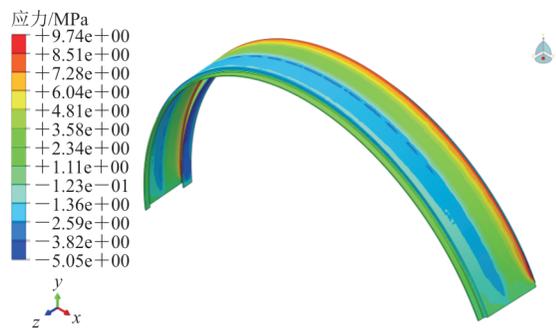


图 7 网格单元信息映射后的应力场

Fig. 7 Stress field after mapping of grid cell information

2 残余应力测试实验

2.1 初始残余应力的测量

采用盲孔法测量 7050 薄壁承力框的初始残余应力^[20]。残余应力测量实验的对象为西南铝业(集团)有限责任公司试制的国产 7050-T7452 承力框锻件毛坯(如图 8 所示),直径为 1 746~1 978 mm,轴向高度为 283 mm,径向厚度为 116 mm,半环锻件夹角为 150°。在被测工件表面上选取一点钻一个直径为 d 、孔深为 h 的小孔,小孔周围应力场的平衡被打破,残余应力释放并重新分布,产生相应的应变,通过测量出释放的应变,计算出被测工件点处的残余应力^[21]。



图 8 国产 7050 铝合金锻件毛坯

Fig. 8 Domestic 7050 aluminum alloy forging rough

由于零件毛坯为国产 7050 铝合金环锻件,其径向上的初始残余应力变化远大于其他方向,并且分布均匀,将毛坯整体初始残余应力看作沿厚度呈中心对称的多层分布。将零件毛坯沿厚度方向划分为 10 层^[22],每层厚度 11.6 mm,根据划分的厚度计算出测量点在不同深度下残余应力的平均值。工件沿厚度方向的初始残余应力分布曲线如图 9 所示。

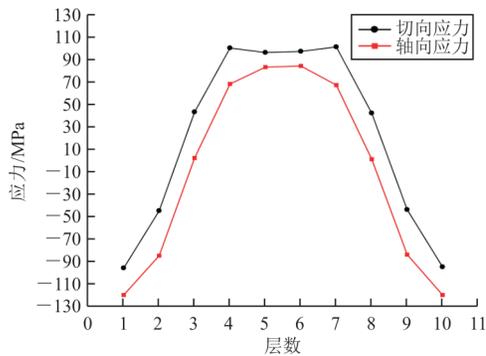


图 9 国产 7050 铝合金锻件毛坯初始残余应力的分布

Fig. 9 Distribution of initial residual stresses in domestic 7050 aluminum alloy forging blanks

从图 9 可以看出:国产 7050 铝合金锻件毛坯外部表现为残余压应力,内部表现为残余拉应力,沿径向呈压—拉—压应力状态,切向残余应力与轴向残余应力均沿厚度方向中心对称,呈“几”字形分布;残余应力的数值范围在 $-120\sim 100$ MPa,毛坯中存在着较大的残余应力。

2.2 车削残余应力的测量

在精车后,承力框零件的壁厚减小到 4 mm,由车削作用引入的车削表层残余应力对加工后零件的尺寸精度具有重要影响,同样会造成零件产生车削变形。车削实验采用的材料为国产 7050 铝合金锻件线切割所得的圆柱棒料,并在实验前对毛坯进行退火去应力处理。圆柱试件高为 283 mm,直径为 78 mm,如图 10 所示。



图 10 国产 7050 铝合金圆柱棒料

Fig. 10 Domestic 7050 aluminum alloy cylindrical bar

国产 7050 铝合金圆柱棒料材料质量分数如表 2 所示。

表 2 国产 7050 铝合金圆柱棒料材料质量分数

Table 2 Domestic 7050 aluminum alloy cylindrical bar material mass fraction

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
Zn	5.90~6.90	Fe	0.15
Mg	2.00~2.70	Si	0.12
Cu	1.90~2.50	Mn	0.10
Zr	0.08~0.15	Al	余量

车削实验采用的刀具是 TaeguTec 车削加工铝合金专用刀片 VCGT 160404 FL K10,如图 11 所示,其为硬质合金材料,相关结构参数如表 3 所示。



图 11 实验刀具

Fig. 11 Experimental tools

表 3 刀具相关几何参数

Table 3 Tool related geometric parameters

参数	数值	参数	数值
前角/(°)	20	顶角/(°)	35
后角/(°)	7	刀尖半径/mm	0.4

在 BJ HK63 卧式数控车床进行车削实验,选用与承力框零件加工现场精车相同的车削参数,如表 4 所示。在车削过程中相应的添加冷却液,还原精车时的加工条件,如图 12 所示。

表 4 车削参数

Table 4 Turning parameters

参数	数值
主轴转速/($r\cdot\min^{-1}$)	292
进给速度/($\text{mm}\cdot\min^{-1}$)	2.4
切深/mm	0.2



图 12 车削实验
Fig. 12 Turning experiment

车削实验完成后,采用 X 射线衍射法针对国产 7050 铝合金承力框的加工表面及表层中的残余应力进行测量(如图 13 所示)。通过 X 射线应力仪测量工件表面及通过电解抛光仪剥层后不同深度的周向和轴向残余应力,多次剥层直至测量的残余应力达到稳定值为止。记录两个方向不同深度的残余应力测量结果,按圆周方向每 90° 取点测量,获得 4 组数据取平均值,即可得到国产 7050 铝合金承力框表层残余应力分布。

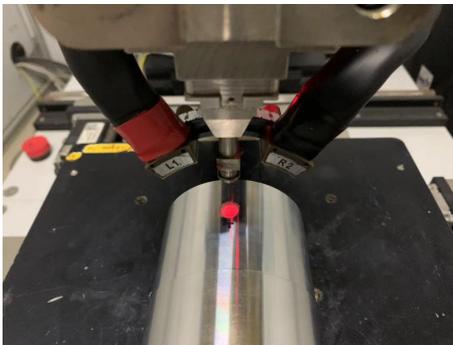


图 13 国产 7050 铝合金薄壁承力框残余应力检测
Fig. 13 Residual stress test of domestic 7050 aluminum alloy thin-walled bearing frame

国产 7050 铝合金承力框表面车削残余应力测量结果如图 14 所示,进行 3 组实验取其平均值。在车削方向上,因为加工表面受热作用的影响要比机械作用的影响大,所以加工表面会存在拉伸残余应力。随着距加工表面深度的增大,热作用的影响会降低,加工表面会转化为压缩残余应力,而随着深度的增大,热作用和机械作用的影响都会逐渐减弱,直到完全消失。在进给方向,切削面受到的力效应比热力学效应更多,切削面受到的残余压应力更大;随着切削深度的增大,力学效应逐渐降低,而表层材料对内层材料的约束作用逐

渐降低,使其在切削深度增大时,力学效应和热力学效应逐渐减弱,直至完全消失。

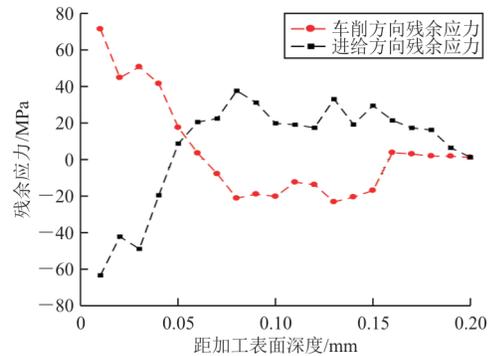


图 14 承力框表面车削残余应力测量结果
Fig. 14 Measurement results of turning residual stresses on bearing frame surfaces

3 有限元结果分析及讨论

3.1 残余应力变形仿真结果分析

将所测得的国产 7050 铝合金锻件毛坯初始残余应力数值和车削残余应力数值导入所创建的初始残余应力变形的有限元仿真模型后,得到工件加工过程中经过粗车内外圆和端面后的仿真结果云图如图 15 所示,可以看出:随着工件的表层材料被去除,表层的残余应力释放,承力框零件两端表现为向外张开的变形并关于中性面对称,承力框零件的最大变形位于工件的两端,最大变形量为 3.05 mm。

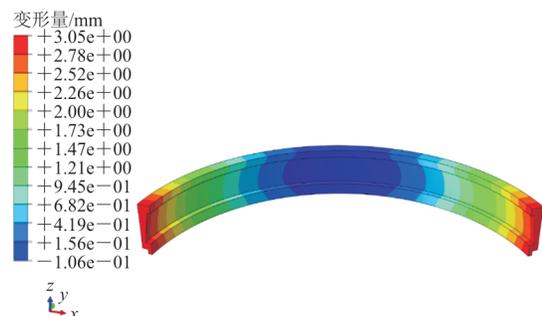


图 15 粗车内圆工序零件的变形
Fig. 15 Deformation of parts in the rough turning process

半精车大端外形后的仿真结果云图如图 16 所示,可以看出:工件具有两端向外张开的变形表现,最大变形量减少到 1.47 mm,变形量减少的原因是毛坯中的初始残余应力以拉应力为主,材料去除残余应力重分布使得工件有向内收缩的趋势,导致变形量减少。

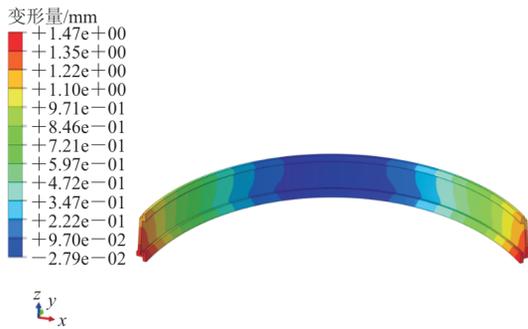


图 16 半精车大端外形工序零件的变形
Fig. 16 Deformation of parts in semi-finishing large-end profile process

由初始残余应力引起的最终变形(变形缩放系数为 100)如图 17 所示,可以看出:零件的变形主要发生在开口两端,呈向内收缩姿态,最大径向变形量为 1.68 mm。承力框零件几何对称,变形也关于周向中性面对称,初始残余应力变形与毛坯初始残余应力场的分布有很大关系,精车材料的去除位置大多位于原毛坯较大拉应力区域,随着材料的去除,拉应力被卸载,内部应力重分布使得零件两端产生向内收缩的变形。

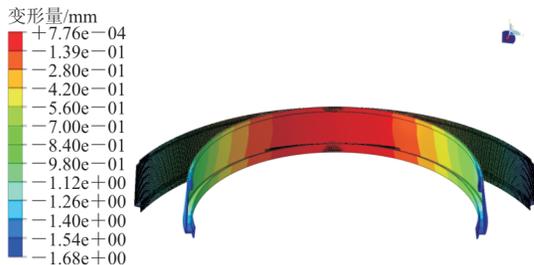


图 17 初始残余应力引起的径向变形
Fig. 17 Radial deformation due to initial residual stress

将所测得的承力框车削加工表面车削残余应力的数值导入所创建的耦合残余应力变形的有限元仿真模型后,得到由耦合残余应力引起的变形(变形缩放系数为 100)如图 18 所示,可以看出:引入车削残余应力后,在初始残余应力与车削残余应力的耦合作用下,工件的内部残余应力得到进一步释放,零件产生较大的径向变形;零件的变形主要发生在开口两端,呈向内收缩姿态,最大径向变形量为 1.89 mm;零件在初始残余应力与车削残余应力的耦合作用下发生变形,变形量与初始残余应力引起的变形接近,由此可知,初始残余应力的释放与重分布对承力框的残余应力变形作用占比达到 89%。

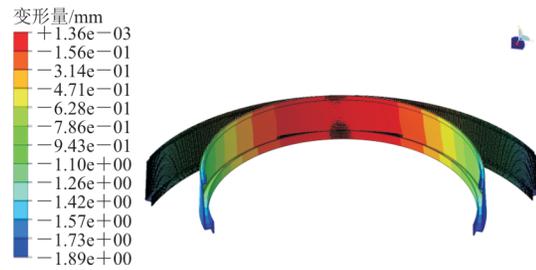


图 18 耦合残余应力引起的径向变形
Fig. 18 Radial deformation induced by coupled residual stress

3.2 承力框加工实验验证

为了保证国产 7050 铝合金承力框仿真结果的准确性,需对结果进行验证,开展承力框车削实验,并对加工中产生的变形问题进行预测,鉴于实际大型薄壁承力框加工周期长、成本高,因而只做了一组实验来验证仿真模型的准确性。精车加工完后的承力框零件如图 19 所示,使用三坐标测量仪对零件的变形进行检测,承力框变形主要出现在两端,端口向内收缩变形,与有限元仿真结果及加工表面残余应力重分布理论分析一致,最大径向变形为 1.64 mm。承力框薄壁零件加工后会因为初始残余应力与切削残余应力的耦合作用发生变形,由于国产 7050 铝合金毛坯内存在的初始残余应力水平高且分布不均导致初始残余应力变形占主要因素,而切削残余应力的引入则会加剧这一变形。



图 19 精车后的零件
Fig. 19 Finished parts

有限元仿真变形预测计算结果最大径向变形为 1.89 mm,与实际变形结果相比,最大变形误差约为 15%,表明残余应力变形有限元预测模型具有较高的准确性,可用于承力框的车削加工变形预测,为国产 7050 铝合金零件加工变形预测提供

了理论指导,也是预测各类薄壁零件车削加工变形的适用方法。同时发现,在加工中,不同车削参数的选取对零件的加工变形会产生影响,可以通过现有的有限元模型结合数学模型来优化车削参数,从而进一步控制零件的变形,对提高加工效率具有很重要的现实意义。

4 结 论

1) 国产 7050 铝合金锻件毛坯外部表现为残余压应力,内部表现为残余拉应力,沿径向呈压一拉一压应力状态,通过仿真变形结果得知,工件两端表现为向外张开的变形,关于中性面对称。

2) 初始残余应力给零件带来的变形主要发生在开口两端,呈向内收缩变形姿态,最大径向变形量为 1.68 mm。

3) 仿真模型预测结果表明,承力框变形表现为两端端口向内收缩变形,最大径向变形为 1.89 mm,初始残余应力的释放与重分布对承力框的残余应力变形作用占比达到 89%。

4) 有限元仿真模型经过了车削加工实验验证,变形误差约为 15%,证明了有限元模型具有较高的准确性。

参考文献

- [1] 钟达智,焦海涛,徐颖珊,等. 航空 7050 铝合金孔挤压强化及其响应特征研究[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(9): 217-225.
ZHONG Dazhi, JIAO Haitao, XU Yingshan, et al. Study on hole expansion strengthening and response characteristics of aerospace 7050 aluminum alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(9): 217-225. (in Chinese)
- [2] 袁辉,赵作福,赵宇擎,等. 航空用 7050 铝合金热处理工艺的研究进展[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 223-227.
YUAN Hui, ZHAO Zuofu, ZHAO Yuqing, et al. Research progress of heat treatment process of 7050 aluminum alloy for aviation[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 42(4): 223-227. (in Chinese)
- [3] 李江,李付国,薛凤梅,等. 7050 高强铝合金断裂韧性及其影响因素研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 1921-1925.
LI Jiang, LI Fuguo, XUE Fengmei, et al. Fracture toughness and influencing factor for 7050 high strength aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(9): 1921-1925. (in Chinese)
- [4] 佚名. 国产大型飞机将采用国产 7050 铝合金厚板[J]. 机械制造, 2018, 56(5): 55.
Anon. Domestic large aircraft will use domestic 7050 aluminum alloy thick plates[J]. Machinery, 2018, 56(5): 55. (in Chinese)
- [5] 周杰,刘左发,屈志远,等. 大型航空关键构件整体精密模锻成形技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(5): 14-25.
ZHOU Jie, LIU Zuofa, QU Zhiyuan, et al. Research progress of integral precision die forging technology for large aviation key components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(5): 14-25. (in Chinese)
- [6] 高林. 大型航空模锻件整体精密成形工艺技术与试制[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
GAO Lin. Research and trial-manufacture of integral precision forming technology for large aviation die forgings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [7] 林锋,姚婉,秦国华,等. 飞机整体结构件加工变形的初始残余应力—初始几何误差耦合影响与控制[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2731-2742.
LIN Feng, YAO Wan, QIN Guohua, et al. Coupling effect of initial residual stress—initial geometric error on machining deformations of aeronautical monolithic components and its control[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(12): 2731-2742. (in Chinese)
- [8] ELSHEIKH A R, SHANMUGAN S, MUTHURAMALINGAM T, et al. A comprehensive review on residual stresses in turning[J]. Advances in Manufacturing, 2022, 10(2): 287-31.
- [9] 刘方. 航空薄壁机匣零件车削加工变形与补偿的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
LIU Fang. Research on deformation and compensation in turning of thin-walled aviation case parts[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 王江涛. 大型薄壁回转体加工变形研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
WANG Jiangtao. Study on machining deformation of large thin-walled rotary body [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016. (in Chinese)
- [11] LI Y, GAN W, ZHOU W, et al. Review on residual stress and its effects on manufacturing of aluminium alloy structural panels with typical multi-processes[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 36(5): 96-124.
- [12] SEBASTIAN N. A mathematical model for the estimation of the effects of residual stresses in aluminum plates [D]. Washington: Washington University in St. Louis., 2005.
- [13] SCHULZE V, ARRAZOLA P, ZANGER F, et al. Simulation of distortion due to machining of thin-walled components[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 45-50.
- [14] EL-AXIR M H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials [J]. International

