

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-08

# 国产 7050 铝合金薄壁承力框车削残余应力变形控制研究

胡越<sup>1</sup>, 张晟玮<sup>2</sup>, 蒋睿嵩<sup>3</sup>, 黄崇湘<sup>1</sup>

(1. 四川大学 空天科学与工程学院, 成都 610065)

(2. 中国航发成都发动机有限公司 工程技术中心, 成都 610503)

(3. 四川大学 机械工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 研究国产 7050 铝合金航空薄壁承力框零件车削加工的变形控制, 在减小径向变形的情况下保证切削效率, 可显著提升零件的加工精度与使用性能。采用仿真结合实验论证的方法, 研究国产 7050 铝合金航空承力框车削残余应力变形优化方法。建立三维车削残余应力仿真模型, 通过实验验证国产 7050 铝合金薄壁承力框车削仿真模型的准确性; 基于三维车削仿真模型开展正交实验, 建立车削参数与车削残余应力的映射模型; 以车削效率和残余应力为优化目标, 基于遗传算法获得优化的国产 7050 铝合金航空薄壁承力框车削参数。结果表明: 优化后加工表面残余应力降低至 15.6 MPa, 承力框最大径向变形量为 1.59 mm, 相比原车削参数变形量减小了约 19%, 达到了控制和优化国产 7050 铝合金航空薄壁承力框加工变形的目的。

**关键词:** 国产 7050 铝合金; 航空薄壁件; 加工变形; 车削残余应力; 变形优化

**中图分类号:** V261

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Research on residual stress and deformation control of domestic 7050 aluminum alloy thin-wall bearing frame turning

HU Yue<sup>1</sup>, ZHANG Shengwei<sup>2</sup>, JIANG Ruisong<sup>3</sup>, HUANG Chongxiang<sup>1</sup>

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

(2. Engineering Technology Center, AECC Chengdu Aero-Engine Co., Ltd., Chengdu 610503, China)

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

**Abstract:** Researching the deformation control of domestic 7050 aluminum alloy aviation thin-walled bearing frame parts during turning processing is crucial for ensuring machining precision and performance while maintaining cutting efficiency with minimized radial deformation. This thesis employs a combination of experimental and simulation methods to investigate the optimization of turning residual stress deformation for domestic 7050 aluminum alloy aviation bearing frames. Initially, a three-dimensional turning residual stress simulation model was established and validated through experiments for the accuracy of the domestic 7050 aluminum alloy thin-walled bearing frame turning simulation model. Subsequently, an orthogonal experiment was conducted based on the three-dimensional turning simulation model to establish a mapping model between turning parameters and residual stress. Finally, with the objectives of turning efficiency and residual stress optimization, optimized turning parameters for the domestic 7050 aluminum alloy aviation thin-walled bearing frame were obtained using a genetic algorithm. The results show that the optimized machining surface residual stress was reduced to 15.6 MPa, and the maximum radial deformation of the bearing frame was 1.59 mm, which is about 19% less than the original turning parameters, achieving the goal of controlling and optimizing the processing deformation of the domestic 7050 aluminum alloy aviation thin-walled bearing frame.

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

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-12-22

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

引用格式: 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, XXXX, XX(XX): 1-8.  
HU Yue, ZHANG Shengwei, JIANG Ruisong, et al. Research on residual stress and deformation control of domestic 7050 aluminum alloy thin-wall bearing frame turning[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-8. (in Chinese)

## 0 引言

7050 铝合金具有高韧高强、较高的耐疲劳性和耐损伤性等诸多优异特性,在航空航天领域的薄壁承力框零件、飞机蒙皮、发动机中都有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。由于铝合金航空薄壁承力框加工精度要求高,材料去除率较大,导致零件刚性变差,同时,在车削过程中极易产生加工变形,难以保证薄壁零件的加工精度与尺寸稳定性<sup>[2]</sup>,严重的甚至会导致零件报废,增加生产成本,降低加工效率<sup>[3]</sup>。

我国航空用高端铝合金长期依赖进口,而国产 7050 铝合金的成功研制,有望打破国外技术垄断。目前,国产 7050 铝合金毛坯初始残余应力水平高且分布不均,后续加工精度难以保证,由毛坯初始残余应力及加工引入的切削残余应力耦合作用引起的变形量较大,严重影响了航空薄壁承力框的加工精度和使用性能<sup>[4]</sup>,阻碍了国产 7050 铝合金在航空薄壁承力框中的快速工程化应用<sup>[5]</sup>,但目前针对国产 7050 铝合金材料的研究还不充分,有必要针对国产 7050 铝合金材料开展面向车削残余应力控制的工艺参数优化方法研究。

承力框在车削加工过程中会引入车削残余应力,从而导致薄壁零件变形<sup>[6]</sup>,因此,需要控制承力框车削加工残余应力<sup>[7]</sup>,从而达到控制其车削变形的目的<sup>[8]</sup>。国内外针对控制残余应力引起变形的的方法已有一些研究,Masoudi 等<sup>[9]</sup>通过铝合金薄壁零件车削实验研究了车削残余应力对加工变形的影响,表明切削力的增加会导致残余应力增加,并且探讨了车削温度与残余应力之间的关系,通过优化车削参数改善车削残余应力以减少变形;Li B 等<sup>[10]</sup>通过实验和有限元模拟相结合的方法研究车削深度对 Al2024-T3 材料的薄壁零件加工变形的影响,结果表明,通过控制粗加工和精加工的车削深度,可以降低残余应力的大小并且减少零件变形;Jiang X 等<sup>[11]</sup>研究了 7050-T7451 铝合金材料的薄壁件在高速车削加工中产生的残余应力对承力框变形的影响,通过进行不同工艺参数下的铣削实验和仿真,表明控制车削速度、进给速度与车削深度能够减小残余冲击应力并减少零件的变形量;丁悦等<sup>[12]</sup>建立了针对初始残余应力的 T7451 铝合金薄壁结构件铣削加工的有限元仿真模型,研究发现优化工艺流程可以减小薄壁结构件的加工变形,仿真结果与实验结果具有良好的一致性。

以上研究表明,残余应力是影响零件变形的

关键因素<sup>[13]</sup>,切削参数对形成残余应力的机械作用和热作用均有着重要影响,是影响切削残余应力的关键因素,也是加工工艺中可以主动控制的变量,实际加工时对残余应力的控制主要以调节切削工艺参数最为方便有效。控制车削参数是控制残余应力大小的一种有效便捷的方法<sup>[14]</sup>,在加工中,除了要确保零件残余应力较小<sup>[15]</sup>,还要提高车削效率,保证低残余应力的情况下尽可能增大 7050 铝合金材料的去除率<sup>[16]</sup>。零件的加工表面质量包括表面残余应力,表面粗糙度等,研究发现,减小切削产生的表面残余应力,表面粗糙度也会随之减小。因此,通过以表面残余应力作为优化目标,能同时对表面粗糙度产生优化效果。

基于此,本文通过对国产 7050 铝合金航空薄壁承力框的加工工艺参数进行优化以实现车削残余应力的控制,进一步优化 7050 铝合金薄壁承力框的加工变形。首先,建立车削残余应力仿真模型并通过实验证明仿真模型的准确性,确定车削参数优化对象;然后,通过正交试验拟合车削表面残余应力经验回归模型,建立多目标优化模型;最后,利用遗传算法对目标函数进行优化,并结合仿真与实验加以验证。

## 1 车削残余应力仿真模型及验证

### 1.1 车削残余应力仿真模型建立

为了真实反映车削过程,首先在 UG 中建立实际精车加工时所用刀具的三维模型,为了提高模拟加工效率,刀具选用原模型的四分之一,工件选取原模型的 0.1° 弧形部分。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,有限元模型所建立的刀具参数与后续车削实验所使用的刀具参数一致,刀具的几何模型如图 1 所示,刀具的几何参数如表 1 所示。

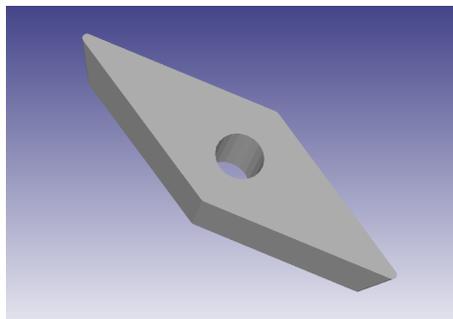


图 1 刀具模型

Fig. 1 Tool geometry

表 1 刀具几何参数  
Table 1 Tool Geometry

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

仿真中,将刀具设为刚体,选择工件材料模型为弹塑性,以便对产生的残余应力进行分析。国产 7050 铝合金工件的几何模型如图 2 所示,工件的材料为 7050 铝合金,其基本材料性能参数如表 2 所示,Johnson-Cook 本构模型的常数如表 3 所示。接着利用有限元软件 DEFORM-3D,对国产 7050 铝合金车削过程进行有限元分析,并对结果进行预测。

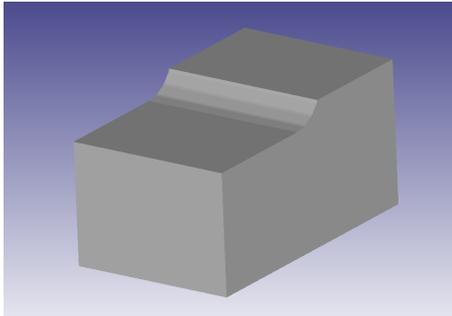


图 2 工件几何模型

Fig. 2 Workpiece geometry

表 2 7050 铝合金材料性能参数  
Table 2 7050 aluminum alloy material performance parameters

参数	数值	参数	数值
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.82	热传导系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	157
泊松比	0.33	比热容/(J·g <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	860
杨氏模量/GPa	71	熔点/°C	490
热膨胀系数/K <sup>-1</sup>	2.3×10 <sup>-6</sup>		

表 3 Johnson-Cook 模型常数  
Table 3 Johnson-Cook model constant

参数	数值	参数	数值
A/MPa	490	<i>m</i>	0.344
B/MPa	206.9	<i>n</i>	1.8
C	0.005	A/MPa	490

在仿真模型中,约束工件底部的 X、Y、Z 三个方向的平移自由度,刀具沿工件的圆心作回转运

动模拟车削运动,向 Z 方向平移运动模拟进给运动。刀具和工件的初始温度及环境温度设定为 20 °C。对流换热系数为 32 800 W/(m<sup>2</sup>·°C);车削刀具与国产 7050 铝合金工件的接触换热系数为 10e7W/(m<sup>2</sup>·°C);刀具与工件库伦摩擦系数设定为 0.3,国产 7050 航空承力框零件在实际精车加工时所用的车削参数如表 4 所示。

表 4 精车所用车削参数  
Table 4 Turning parameters for finish turning

参数	数值	参数	数值
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	12	车削深度/mm	0.2
进给量/(mm·r <sup>-1</sup> )	0.2		

本模型中选取与实际精车加工相同的车削参数来模拟仿真,考虑到工件的直径约为 1 900 mm,换算后的车削速度为 1 200 mm/s,进给速度为 0.04 mm/s,车削深度为 0.2 mm。刀具采用绝对方式划分网格,最小单元尺寸为 0.025 mm,网格数为 10 000;工件同样采用绝对方式划分网格,最小单元尺寸为 0.02 mm,网格数为 80 000。在刀具与工件的加工接触区域进行局部网格细化,以提高仿真精度,如图 3 所示。

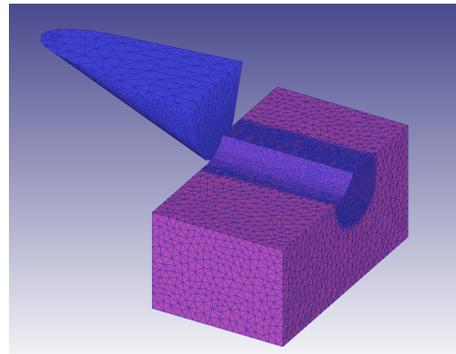


图 3 车削有限元模型

Fig. 3 Turning finite element model

仿真计算结束后,在软件的后处理程序中进行数据点的提取,如图 4 所示,在刀尖圆弧车削的路径上选择车削稳定的区域沿深度进行选点,得到两点之间的残余应力分布。分别对车削方向及进给方向的残余应力进行提取,每 5 μm 取一点,各提取三组点数据并求平均值。

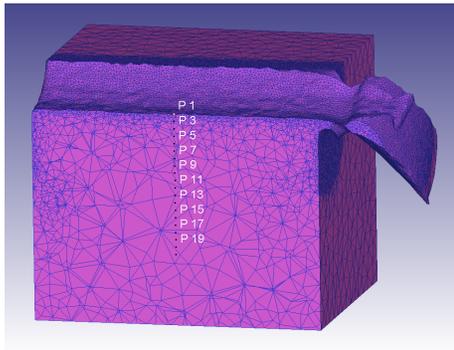


图4 残余应力数据提取

Fig. 4 Residual Stress Data Extraction

### 1.2 实验验证分析

为了验证有限元模型的准确性,进行了车削实验,此次实验中,精车的表面粗糙度控制都满足了零件设计要求,车削试验完成后的零件图如图5所示,对工件加工表面及表层中的残余应力进行测量,首先,对电解抛光仪的每次剥层深度进行标定,对铝合试件进行电解抛光,采用过饱和的食盐水作为电解液,通过调节电解液的流量、输入电压及电解抛光的时间来控制剥层的深度,电解抛光仪如图6所示;接着使用千分尺(如图7所示)来测量剥层深度,通过相应的调节组合,得到每次剥层深度为5、10及20  $\mu\text{m}$ 的参数设置;最后采用Proto LXR D MG2000应力仪对残余应力进行测量,测得车削方向及进给方向的残余应力,如图8所示,分别得到车削方向和进给方向在不同深度的残余应力测量结果,获得四组数据取平均值,得到国产7050铝合金航空薄壁承力框车削表层残余应力分布。



图5 切削试验后承力框零件图

Fig. 5 Part drawing of bearing frame after cutting test



图6 电解抛光仪

Fig. 6 Electrolytic Polishing Instrument



图7 千分尺

Fig. 7 Micrometer



图8 Proto LXR D MG2000应力仪

Fig. 8 Proto LXR D MG2000 stress gauge

### 1.3 结果对比分析

将测量的得到的车削残余应力数据与有限元仿真得到的残余应力结果处理后进行对比分析。车削方向上的残余应力沿深度分布如图9所示,进给方向上的残余应力沿深度分布如图10所示。

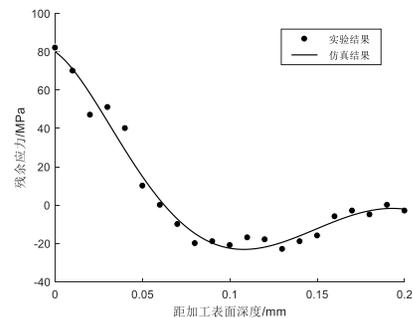


图9 车削方向的表层及亚表层残余应力分布

Fig. 9 Surface and subsurface residual stress distribution in the turning direction

从图 9 可以看出:在车削方向上,加工表面表现为较大的拉应力,在距加工表面深度大约  $50\ \mu\text{m}$  时逐渐减少至 0 并开始转化为残余压应力,压应力在距加工表面深度大约  $100\ \mu\text{m}$  时达到一个较小的峰值后逐渐减小为 0。车削方向上的车削表层残余应力曲线呈勺形,影响层深度大约为  $200\ \mu\text{m}$ 。

在车削方向,加工表面受热作用的影响比机械作用更大,并且“塑性凸出效应”在车削方向上会对加工表面造成压缩塑性变形<sup>[17]</sup>,加工表面会产生较大的残余拉应力。随着切削深度的增大,切削时的热力学作用逐渐降低,但切削时“挤光效应”的作用逐渐加强,并产生了挤压应力,而随着切削深度的增大,热力学作用和力学作用逐渐降低,直至完全消失。

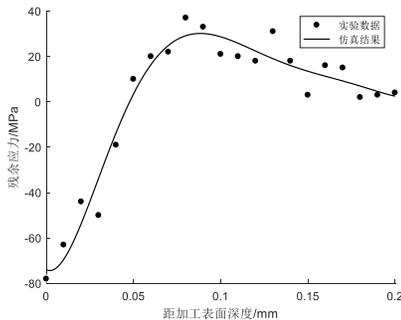


图 10 进给方向的表层及亚表层残余应力分布

Fig. 10 Surface and subsurface residual stress distribution in feed direction

从图 10 可以看出:在进给方向上,加工表面表现为较大的压应力,在距加工表面深度大约  $50\ \mu\text{m}$  时逐渐减少至 0 并开始转化为残余拉应力,拉应力在距加工表面深度大约  $100\ \mu\text{m}$  时达到一个较小的峰值后逐渐减小为 0。与车削方向相反,进给方向上的车削表层残余应力曲线呈反勺形,影响层深度大约为  $200\ \mu\text{m}$ 。

进给方向上,加工表面受机械作用的影响大于热作用,近表面材料受到“挤光效应”与“塑性凸出效应”产生拉伸塑性变形,加工表面产生较大的残余压应力;随着距加工表面深度的增加,受到刀具的机械作用影响减小,内层材料的弹性变形恢复受到外层材料的限制产生较小的残余拉应力,随着深度的进一步增加,机械作用和热作用的影响都开始减弱直至消失。

通过观察比较两个方向上的车削表层残余应力分布,发现三维车削仿真与实际车削残余应力的测量实验结果具有较好的符合程度。因此,三维车削有限元仿真模型具有较高的可靠性与准

确性。

## 2 车削残余应力变形优化方法

### 2.1 车削参数的优化

为了对车削工艺参数进行优化,采用目标函数来反映车削工艺参数与优化目标之间的定量关系,从而达到对车削工艺参数进行控制的目的<sup>[18]</sup>。考虑以车削表面残余应力  $S$  和材料去除率  $Q$  为目标函数对车削工艺参数进行优化,在满足减小车削残余应力大小从而优化车削变形的前提下,使得生产效率达到最大。

为了建立车削速度、进给速度和车削深度三个车削工艺参数与车削表面残余应力  $S$  之间的定量关系,采用正交实验设计探究多因素水平的影响,精确地反映车削工艺参数与表面残余应力之间的关系,三因素四水平如表 5 所示,正交实验设计及结果如表 6 所示。

表 5 正交参数水平表  
Table 5 Orthogonal parameter level table

工艺参数	水平			
车削速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	800	1 200	1 600	2 000
进给速度 $f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	0.01	0.02	0.03	0.04
车削深度 $a/\text{mm}$	0.1	0.15	0.2	0.25

表 6 正交实验仿真结果  
Table 6 Orthogonal experiment simulation results

实验序号	车削速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	进给速度 $f/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	车削深度 $a/\text{mm}$	表层残余应力 $S/\text{MPa}$
1	800	0.01	0.01	32
2	800	0.02	0.15	53.3
3	800	0.03	0.20	105
4	800	0.04	0.25	116
5	1200	0.01	0.15	22.8
6	1200	0.02	0.10	31.5
7	1200	0.03	0.25	54.2
8	1200	0.04	0.20	94.8
9	1600	0.01	0.20	50.3
10	1600	0.02	0.25	32.5
11	1600	0.03	0.10	27.4
12	1600	0.04	0.15	35.7
13	2000	0.01	0.25	10.4
14	2000	0.02	0.20	18.6
15	2000	0.03	0.15	29.2
16	2000	0.04	0.10	43.5

## 2.2 多目标优化

车削表面残余应力模型的建立采用表面残余应力研究中普遍采用的指数型经验公式,通过正交实验方法获得,其模型表示为

$$S = f(v, f, a) = k v^x f^y a^z \quad (1)$$

式中: $S$ 为车削表面残余应力; $v$ 为车削速度; $f$ 为进给速度; $a$ 为车削深度; $k, x, y, z$ 为待定系数。

利用 origin 软件进行多元非线性拟合,得到的 7050 铝合金车削表面残余应力经验模型为

$$S = 10753200 v^{-1.2272} f^{0.8805} a^{0.23085} \quad (2)$$

采用方差分析法判断回归模型的显著性检验上述模型的准确性,车削表面残余应力预测模型方差分析结果如表 7 所示。拟合模型  $P$  值明显小于 0.05, 决定系数  $R^2$  为 0.874 > 0.85, 说明模型显著性较为明显, 该预测模型拟合精度较高。

表 7 切削表面残余应力预测模型方差分析表  
Table 7 Variance analysis table of residual stress prediction model of turning surface

	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
回归因子	4	45 957.861 49	11 489.465 3784	747 133.440	1E-8
残差误差	11	1 491.308 51	135.573 5		
$R^2=0.874$					

除了对工件要求变形优化,加工效率也是重点指标,材料去除率的目标函数来自其定义,即单位时间内的材料去除体积。以材料去除率为探究因素,建立数学模型来探究进给速度  $f$ 、车削深度  $a$  和车削速度  $v$  与材料去除率  $Q$  之间的关系,其模型可以表示为

$$Q = vfa \quad (3)$$

## 2.3 优化约束条件

在建立目标函数后,还需要确定优化变量及其约束条件来进一步对加工工艺参数优化。根据对正交实验数据的分析结果可知,当车削速度  $v$  在 800~2 000 mm/s 之间变化,进给速度  $f$  在 0.01~0.04 mm/s 之间变化,车削深度  $a$  在 0.1~0.25 mm 变化时,获得的车削表面残余应力较小。因此在保证车削表面残余应力的前提下对车削工艺参数进行优化,可将约束条件定为:车削速度  $v$  在 500~2 000 mm/s 的范围内,进给速度  $f$  在 0.01~0.05 mm/s 的范围内,车削深度  $a$  在 0.1~0.3 mm 范围内。综上所述,多目标优化的模型为

$$\begin{aligned} \min S &= 10753200 v^{-1.2272} f^{0.8805} a^{0.23085} \\ \max Q &= vfa \\ 500 \text{ mm/s} &< v < 2\,000 \text{ mm/s} \\ 0.01 \text{ mm/s} &< f < 0.05 \text{ mm/s} \\ 0.1 \text{ mm} &< a < 0.3 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4)$$

## 2.4 基于遗传算法的车削参数优化

在航空承力框零件的整体车削加工过程中,经过多个工序,由于从粗加工到精加工的加工周期长,因此精车的时间占比不大,所以主要考虑的是车削产生的变形<sup>[19]</sup>,为此,在确定优化目标侧重点时以车削表面残余应力为主,再综合考虑加工效率。根据实际工程经验,在权重设置时表面残余应力占比 0.9,材料去除率占比 0.1<sup>[20]</sup>。同时,为保证在优化过程中数据结果的有效性,将各优化目标通过归一化法变换在 0~1 之间。根据上述分析,优化目标函数可以表示为

$$y(x) = w_1 \frac{y_1(x) - y_1(x)_{\min}}{y_1(x)_{\max} - y_1(x)_{\min}} + w_2 \frac{y_2(x)_{\max} - y_2(x)}{y_2(x)_{\max} - y_2(x)_{\min}} \quad (5)$$

式中: $w_1$ 为车削表面残余应力所占权重; $w_2$ 为材料去除率所占权重; $y_i(x)_{\max}$ 为各目标在约束条件下的最大值; $y_i(x)_{\min}$ 为各目标在约束条件下的最小值。

综上,总目标函数为

$$y(x) = 0.9 \frac{10\,753\,200 v^{-1.2272} f^{0.8805} a^{0.23085} - 9.742\,3}{274.113\,8} + 0.1 \frac{30 - vfa}{29.5} \quad (6)$$

然后,借助 Matlab 对目标函数式(6)进行优化,优化工艺参数与参考工艺参数的对比结果如表 8 所示。

表 8 优化工艺与参考工艺对比结果  
Table 8 Comparison results of optimized process and reference process

	参考工艺	优化工艺
车削速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	1200	2000
进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.04	0.015
车削深度 $a/\text{mm}$	0.2	0.3
表面残余应力 $S/\text{MPa}$	94.8	12.9
材料去除率 $Q/(\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	9.6	9

从图 8 可以看出:采用优化的工艺后,车削表面残余应力从 94.8 降低为 12.9 MPa,优化后工艺的材料去除率与参考工艺只是略有减少,优化工艺参数效果明显。

## 2.5 车削试验验证

采用优化后的车削参数(车削速度  $v=2\ 000$  mm/s,进给速度  $f=0.015$  mm/s,车削速度  $a=0.3$  mm)进行车削试验,将航空承力框零件在精车加工完(如图 11 所示)后对其表面残余应力进行测量,测得加工表面车削方向残余应力为 15.6 MPa,与仿真结果的 12.9 MPa 相符,证明了采用优化后的车削参数能够大幅降低车削残余应力。



图 11 精车后的零件  
Fig. 11 Finished parts

利用耦合残余应力变形仿真模型,将车削表层残余应力离散加载模型中,优化参数后耦合残余应力变形量如图 12 所示。

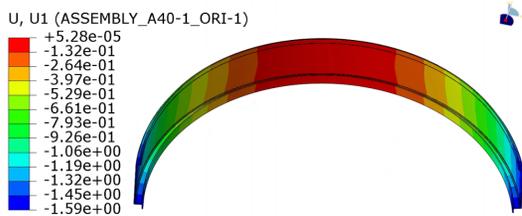


图 12 优化后的变形量  
Fig. 12 Optimized deformation

最大径向变形量为 1.59 mm,相比原始工艺的 1.89 mm,变形减少了 19%。在航空承力框零件的车削变形中,由于车削残余应力占比本身不大,因此优化后的车削参数减小的变形较为可观。同时发现,考虑到初始残余应力的变形量为 1.68 mm,优化后的车削残余应力与初始残余应力的耦合作

用下的变形量相较初始残余应力单独作用下的变形量更小,说明此时引入的车削残余应力有使得整体变形减小的趋势。

## 3 结 论

1) 建立了车削残余应力仿真模型,并通过车削实验验证了模型的准确性,便于进行车削参数多目标优化。

2) 利用遗传算法对国产 7050 铝合金车削工艺参数进行了优化,在  $v=2\ 000$  mm/s,  $f=0.015$  mm/s,  $a=0.3$  mm 时,可以获得较低的车削残余应力及较高的材料去除率。

3) 优化后车削残余应力明显降低,最大径向变形量为 1.59 mm,相比原车削参数变形量减小了约 19%。

## 参 考 文 献

- [1] 邓运来,张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2115-2141.  
DENG Yunlai, ZHANG Xinming. Progress in aluminum and aluminum alloy materials[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2115-2141. (in Chinese)
- [2] 刘牧东. 航空铝合金材料低温裂纹扩展研究现状与展望[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 10-19.  
LIU Mudong. Research status and prospect on cryogenic crack propagation of aeronautic aluminium-alloys[J]. Advances In Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 10-19. (in Chinese)
- [3] 路冬. 航空整体结构件加工变形预测及装夹布局优化[D]. 济南: 山东大学, 2007.  
LU Dong. Machining deformation prediction and clamping layout optimization of aviation overall structural parts [D]. Jinan: Shandong University, 2007. (in Chinese)
- [4] 申运锋,赵妍,杨生国,等. 2124 铝合金曲边薄壁结构加工变形仿真分析[J]. 航空工程进展, 2016, 7(2): 191-197.  
SHEN Yunfeng, ZHAO Yan, YANG Guosheng, et al. Simulation analysis of machining deformation of 2124 aluminum curved thin-walled structures[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(2): 191-197. (in Chinese)
- [5] 姜建堂,范丁歌,赵熊熾,等. 大型铝合金构件制造全过程残余应力预测与控制[J]. 中国材料进展, 2022, 41(11): 899-908.  
JIANG Jiantang, FAN Dingge, ZHAO Xiongxi, et al. Whole process prediction-control of residual stress during the manufacturing of large aluminum alloy components[J].

- Materials China, 2022, 41(11): 899-908. (in Chinese)
- [6] 国凯, 武冲, 孙杰. 航空整体结构件数控加工变形预测及控制技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 112-127.
- GUO Kai, WU Chong, SUN Jie. Research progress on NC machining distortion prediction and control technology of aeronautical monolithic components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(21): 112-127. (in Chinese)
- [7] 熊瑞亮, 刘旭波, 熊智文, 等. 2024 铝合金超精密车削表面残余应力模拟及参数优化[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(2): 176-180.
- XIONG Ruiliang, LIU Xubo, XIONG Zhiwen, et al. Surface residual stress simulation and parameter optimization of 2024 aluminum alloy ultra-precision turning[J]. Journal of Nanchang University (Engineering Edition), 2020, 42(2): 176-180. (in Chinese)
- [8] COTO B, NAVAS V G, GONZALO O, et al. Influences of turning parameters in surface residual stresses in AISI 4340 steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(9/12): 911-919.
- [9] MASOUDI S, AMINI S, SAEIDI E, et al. Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(1/4): 597-608.
- [10] LI B, JIANG X, YANG J, et al. Effects of depth of cut on the redistribution of residual stress and distortion during the milling of thin-walled part[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 223-233.
- [11] JIANG X, ZHU Y, ZHANG Z, et al. Investigation of residual impact stress and its effects on the precision during milling of the thin-walled part[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1/4): 877-892.
- [12] 丁悦, 刘畅. 航空结构件铣削加工变形仿真技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 81-89.
- DING Yue, LIU Chang. Research and application of simulation technology for milling deformation of aeronautical structural parts[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2019, 62(3): 81-89. (in Chinese)
- [13] 孙要兵, 柏慧, 张俊, 等. 薄壁环形零件车削变形控制研究[J]. 机械制造, 2021, 59(2): 68-70.
- SUN Yaobing, BAI Hui, ZHANG Jun, et al. Research on deformation control of thin-walled ring part turning[J]. Machinery Manufacturing, 2021, 59(2): 68-70. (in Chinese)
- [14] LI X, LI L, YANG Y, et al. Machining deformation of single-sided component based on finishing allowance optimization [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(9): 2434-2444.
- [15] RITIN M, SUMAIR S, ARIF M, et al. Coupling between inherent and machining-induced residual stresses in aluminum components [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 213: 106865.
- [16] 曲中兴, 张立武. 薄壁件车削加工中残余应力的产生与控制[J]. 航空制造技术, 2009(19): 87-90, 95.
- QU Zhongxing, ZHANG Liwu. Generation and control of residual stress in thin-walled parts turning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(19): 87-90, 95. (in Chinese)
- [17] 周金华. 薄壁结构切削残余应力建模及变形预测[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- ZHOU Jinhua. Modeling and deformation prediction of thin-walled structure cutting residual stress [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [18] 赵明伟, 岳彩旭, 陈志涛, 等. 航空结构件铣削变形及其控制研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(3): 108-117.
- ZHAO Mingwei, YUE Caixu, CHEN Zhitao, et al. Research progress on milling deformation and control of aerospace structural parts[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2022, 65(3): 108-117. (in Chinese)
- [19] 宋国栋, 汪文虎, 蒋睿嵩, 等. 原位自生 TiB<sub>2</sub>/Al 复合材料车削参数多目标优化方法[J]. 航空制造技术, 2016(17): 62-66.
- SONG Guodong, WANG Wenhui, JIANG Ruisong, et al. Multi-objective optimization method for turning parameters of in-situ self-generated TiB<sub>2</sub>/Al composites[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016(17): 62-66. (in Chinese)
- [20] 薛林峰. 钛合金薄壁异形件切削加工仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- XUE Linfeng. Research on cutting simulation technology of titanium alloy thin-walled special-shaped parts [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

(编辑:马文静)