

基于镜像铣削加工的飞机蒙皮残余应力与诱导变形分析

高秋阁^{1,2} 张立强¹ 钱 栊¹ 杨 杰¹ 辜 茂³

(1 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

(2 商丘工学院机械工程学院, 商丘 476000)

(3 成都永峰科技有限公司, 成都 610511)

摘 要 主要针对残余应力诱导工件变形进行研究分析,建立三维有限元铣削模型,考虑进给量与背吃刀量导致的残余应力对变形的影响,将仿真残余应力融入模型,研究其与变形的关系,并通过实验验证仿真可靠性。结果表明,随着每齿进给量的增大,工件表面($d=0$)在 X 和 Y 方向上的残余压应力均相应随之增大,当测试点与表面距离 $d>10\ \mu\text{m}$ 时,残余应力基本保持不变;随着背吃刀量的增加,工件表面在 X 和 Y 方向的残余应力均相应随着增大;蒙皮变形量随着每齿进给量的增加而增加,随背吃刀量的增大而增大。仿真与测试结果对比表明,加工变形趋势基本一致,佐证了建模的可靠性。

关键词 蒙皮, 镜像铣, 残余应力, 钛合金, 变形分析, 本构模型

中图分类号: V19

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.018

Analysis of Residual Stress and Induced Deformation of Aircraft Skin Based on Mirror Milling

GAO Qiuge^{1,2} ZHANG Liqiang¹ QIAN Long¹ YANG Jie¹ GU Mao³

(1 School of mechanical and automotive engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

(2 School of Mechanical Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000)

(3 Chengdu Useful Technology Company Limited, Chengdu 610511)

Abstract The research focuses on analyzing the deformation of workpieces induced by residual stresses, the three-dimensional finite element milling model is established, taking into account the influence of residual stress caused by the rate of the back-cutting amount on the deformation, the simulated residual stress is integrated into the model, the relationship between the simulated residual stress and deformation is examined, and the simulation reliability is verified through experiments. The results indicate that as the tooth increases, the residual compressive stress on the surface of the workpiece ($d=0$) in the X and Y directions correspondingly increases, and the residual stress remains relatively unchanged when the distance between the test point and the surface exceeds $10\ \mu\text{m}$. With the increase in the number of back-cutting tools, the residual stress on the surface of the workpiece in the X and Y directions increases accordingly. The deformation of the surface layer escalates with the rise in the feed rate of each tooth and also increases with the amount of back-cutting. A comparison of simulation and test results indicates that the machining deformation trends are fundamentally similar, thereby confirming the reliability of the modeling.

Key words Skin, Mirror milling, Residual stress, Titanium alloy, Deformation analysis, Constitutive model

0 引言

飞机独特的性能要求零件质量轻、寿命长、耐高温和抗腐蚀等^[1-3]。航空结构件大多为薄壁件,厚度小,刚度差,在加工时极易变形^[4-7]。其中,蒙皮结构

件的厚度通常在2~5 mm之间,Y. F. YANG等研究指出在加工厚度为2 mm左右的零件时,切削加工引入的残余应力是工件变形的主要因素^[8-9]。

航空结构件在加工过程当中,切削力直接影响

收稿日期:2022-10-10

第一作者简介:高秋阁,1995年出生,硕士,研究方向为智能制造与数控技术。E-mail:15836421741@163.com

通信作者:张立强,1979年出生,教授。E-mail:zhanglq@sues.edu.cn

零件的变形与表面加工质量^[10]。在加工原理和算法方面,向兵飞等^[11]进行深入分析研究,提出更为合适的加工路线和铣削加工方法。祝小军等^[12]采用镜像五轴结构对镜像铣削加工的仿真和结构进行分析研究。薄壁零件在加工时颤振问题是一大难题^[13],王昌瑞^[14]通过有限元铣削仿真,对其加工稳定性变化作出了准确的预测。吴嘉俊等^[15]使用FGH95为实验材料,设计正交实验并通过人工神经网络算法实现对残余应力的预测。唱佳林^[16]对42CrMo合金钢进行车削实验,实验结果表明可适当调整切削速度来提高表面完整性。V. SCHULZE^[17]通过T形攻击弯曲隐去初始残余应力的方法,通过CAE-ABAQUS有限元软件对T形零件开槽的切削加工的整个过程进行了仿真运行,研究了存在于毛坯内部里的初始残余应力会有可能对工件产生变形的影响。CHEN等^[18]通过对切削参数、切削力和热相关性进行分析,结果表明切削热是引起残余应力的主要原因。镜像铣技术的引进吸引大批学者在加工路径优化、加工工艺数模设计、误差实时补偿和在机测量技术等多个方向进行研究^[19-21]。

切削力是影响工件变形的主要且直接因素,残余应力是影响工件变形的主要且间接因素,本文主要针对残余应力诱导工件变形进行研究分析。蒙皮加工属于典型的减材制造,本文通过建立有限元三维仿真镜像铣削模型,综合考虑进给量和背吃刀量因素产生的残余应力对工件变形的影响,将仿真得到加工残余应力施加到模型之中,实现加工残余应力与变形的研究,并通过加工实验数据验证仿真结果的可靠性。

1 有限元建模

1.1 材料属性与切屑分离准则

蒙皮工件材料采用TC4合金,物理属性见表1,刀具采用PCD硬质合金立铣刀。

表1 TC4物理属性

Tab. 1 TC4 physical properties

密度/kg·m ⁻³	弹性模/GPa	泊松比	熔点/°C
4430	113	0.34	1650

钛合金蒙皮切削过程是复杂的热力耦合过程,存在着大变形、高应变率现象,仿真模型中选择合适的本构模型能对实际加工较为准确地描述,因此材料本构模型的选择最常用的Johnson-Cook本构模型,模型参数见表2,表3为Johnson-Cook失效参数。

表2 Johnson-Cook本构参数

Tab. 2 Johnson-Cook constitutive parameters

A/MPa	B/MPa	n	C	m
875	793	0.386	0.01	0.71

表3 Johnson-Cook切屑分离失效参数

Tab. 3 Johnson-Cook chip separation failure parameters

D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

1.2 切削方程

在切削过程中材料会受到塑性屈服等因素的影响,需要借助材料力学中的行为描述模拟结构的瞬时响应参数。Johnson-Cook本构模型是在材料和温度二者之间建立起来的一种满足Mises塑性变形准则的模型^[22]。Johnson和Cook建立了屈服函数的失效应变函数方程(1)^[23]:

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] \cdot [1 + D_4 \ln \bar{\varepsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad (1)$$

式中, ε^f 是失效塑性应变, $D_1 \sim D_5$ 是材料失效模型参数, σ^* 是静水压力与等效应力的比值, $[D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*]$ 是表达材料的破坏应变与应力关系, $[1 + D_4 \ln \bar{\varepsilon}^*]$ 是表达材料应变率对破坏应变的影响, $[1 + D_5 T^*]$ 是表达温度的热软化效应对材料韧性的影响。

Johnson-Cook材料模型本构方程(2)^[24]:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon})^n] \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_0} \right) \right] \cdot (1 - T_h^m) \quad (2)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 是von Mises流动应力; $\bar{\varepsilon}$ 是等效塑性应变; $\bar{\varepsilon}$ 是等效塑性应变率; $\bar{\varepsilon}_0$ 是参考应变率, $\bar{\varepsilon}_0 = \frac{0.001}{s}$; T_h

$= \frac{T + T_r}{T_m - T_r}$ 是无量纲温度; T_m 是熔点, $T_m = 1680^\circ\text{C}$; T_r 是

室温, $T_r = 20^\circ\text{C}$; $\left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_0} \right) \right]$ 是材料的应变率强化

效应; $(1 - T_h^m)$ 是材料的热软化效应; A, B, C, m, n 是材料的本构方程参数。

模型仿真与本构模型之间的关系方程(3)^[25]:

$$\sigma = f(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad (3)$$

式中,材料内部流动应力 σ ,应变力 $\bar{\varepsilon}$,等效塑性应变率 $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 和温度 T 。

在仿真过程中,随着刀具的前进,工件材料发生塑性流动,网格单元产生畸变,最终导致运算精度下降甚至提前终止计算,因此运算重需要不断地调整网格,故采用网格自适应划分技术,能够比较好地实现网格优化。采用塑性变形功率作为重画准则,具体表现为方程(4)^[26]:

$$\int_{\Omega_h^e} W_p d\Omega > TOL \quad (4)$$

式中, Ω_h^e 为单元的域; W_p 为塑性功率密度, $W_p = \bar{\sigma} \dot{\bar{\varepsilon}}$ 。

在黏性区域与滑动区域中刀具和工件之间满足的库伦摩擦定律,具体表现为方程(5)^[27]:

$$\tau_f \begin{cases} \mu\sigma_n, \mu\sigma_n < \tau_s & (\text{滑动摩擦区域}) \\ \tau_s, \mu\sigma_n \geq \tau_s & (\text{粘性摩擦区域}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, τ_f 为摩擦应力, μ 为摩擦系数, σ_n 为接触正应力, τ_s 为剪切流动应力。

1.3 仿真建模

蒙皮采用1 000 mm×800 mm×2 mm的TC4钛合金蒙皮,为了减少仿真运算时间,仿真工件为50 mm×50 mm×2 mm;仿真刀具D16R3,刀柄长度为30 mm;支撑头是直径为16 mm,倒角半径为3 mm,长度为30 mm的圆柱体。参考现场装夹方式,对模型进行四周边界施加约束。通过ABAQUS仿真软件的预应力进行施加仿真后的残余应力,最后通过仿真实实现加工残余应力对TC4薄壁件的加工变形仿真。

用有限元软件ABAQUS完成仿真建模。设置:模型的边界条件及原始状态(刀具与工件表面距离0.5 mm),刀具为刚体,工件为弹性材料,环境温度为26℃,接触为面-面接触,且工件选择点集、刀具选择面集、网格划分选择自适应划分技术。

图1是蒙皮镜像铣削在CATIA软件中仿真加工示意图。工件、刀具建模图及进给量为0.2 mm/z、背吃刀量为0.2 mm时的仿真结果示意图见图2。

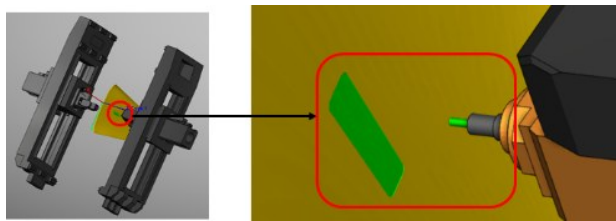
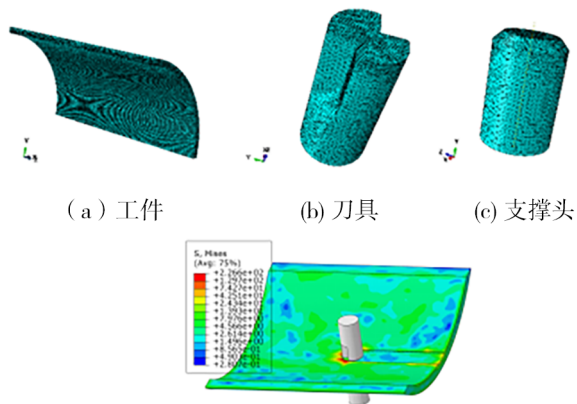


图1 三维镜像铣削示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D mirror milling



(a) 工件

(b) 刀具

(c) 支撑头

(d) 进给量为0.2mm/z、背吃刀量为0.2mm时的仿真结果

图2 工件、刀具建模图及仿真结果示意图

Fig. 2 Workpiece and tool modeling diagram

2 实验

2.1 试验设计

实验采用单因素测试法。第I组:1~3号实验为了说明背吃刀量较小时,每齿进给量对残余应力及变形的影响;第II组:2、4号实验为了说明中等进给量和中等背吃刀量对残余应力及变形的影响;第III组:3、5、6号实验为了说明每齿进给量较大时,背吃刀量对残余应力及变形的影响。具体实验设计参数及分组见表4。

表4 实验设计分组

Tab. 4 Experimental design and grouping

组别	序号	a_p /mm	f_z /mm·z ⁻¹
I	1	0.2	0.2
	2	0.2	0.3
	3	0.2	0.5
II	2	0.2	0.3
	4	0.3	0.3
	3	0.2	0.5
III	5	0.3	0.5
	6	0.4	0.5

2.2 材料

蒙皮采用TC4钛合金材料,规格为1 000 mm×800 mm×2 mm。

2.3 设备及测量条件

实验加工机床采用镜像铣机床,刀具选D16R3PCD硬质合金立铣刀。试验及测量设备见图3。



(a) 实验加工零件图



(b) 零件装夹整体图



(c) PCD 刀具



(d) 变形测量三坐标工作台



(e) 加工总控状态



(f) PROTO X 射线衍射仪



(g) 电涡流分布

图3 试验及测量设备

Fig. 3 Experimental and measuring equipment

支撑头和加工头分布在蒙皮的两侧,加工时是协同运动,通过在机测量、支撑头和加工头控制蒙皮的厚度。在进行有限元仿真时是理想状态,实际加工中的尺寸与仿真工件的尺寸的大小并不影响,影响仿真可靠度的是仿真时工件材料属性以及加工头和支撑头运动参数的设定。

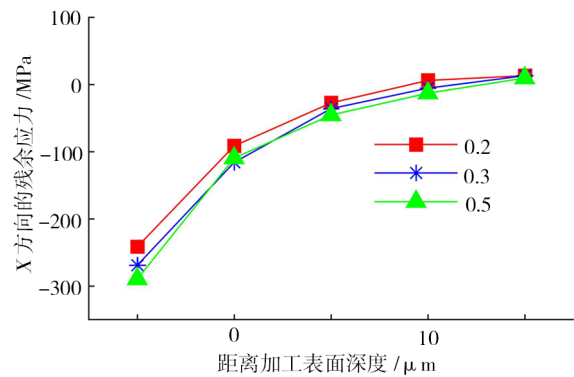
3 结果与分析

3.1 残余应力分析

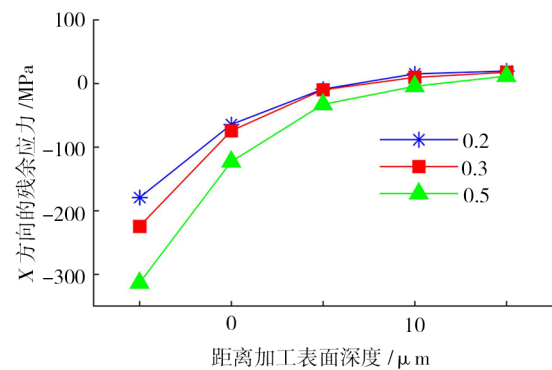
首先,进行三维建模仿真,分析每齿进给量,背吃刀量对 X 、 Y 方向产生的残余应力对蒙皮零件变形的影响;其次,整理数据后设计实验方案进行加工实验;最后,对实验数据与仿真数据进行分析对比(本文数据采用多次测量取其均值)。

3.1.1 进给量对残余应力的影响

分别以每齿进给量为 0.2 、 0.3 、 0.5 mm/z 进行切削实验,图4为在距离加工表面每隔 $10\ \mu\text{m}$ 距离的残余应力大小,随着每齿进给量的增加, X 与 Y 方向表面($d=0$)的残余压应力逐渐增大。



(a) X 方向残余应力



(b) Y 方向残余应力

图4 每齿进给量对表面残余应力的影响

Fig. 4 Effect of feed per tooth on surface residual stress

其中, $0.2\sim 0.3$ mm/z 时, X 方向上的表面残余应力增大 11.39% , Y 方向上的表面残余应力增大 25.07% ; $0.2\sim 0.5$ mm/z 时, X 方向上的表面残余应力增大 19.87% , Y 方向上的表面残余应力增大

74.47%;当数据点与表面的距离大于 $10\ \mu\text{m}$ 后, X 与 Y 方向上的残余应力变化幅度均相对平缓,不再急剧变化;这是犁沟效应^[29]的作用导致的,即增加的每齿进给量增大了刀具的后刀面与工件表面之间力的产生。

3.1.2 背吃刀量对残余应力的影响

分别以背吃刀量为 0.2 、 0.3 、 $0.4\ \text{mm}$ 进行切削实验,图5表示为背吃刀量对残余应力在 X 与 Y 方向上的影响。

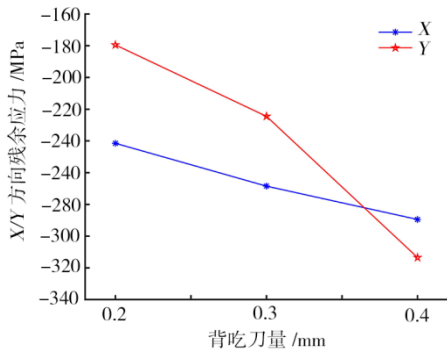


图5 背吃刀量对表面残余应力的影响
Fig. 5 Influence of the amount of back cut on the surface residual stress

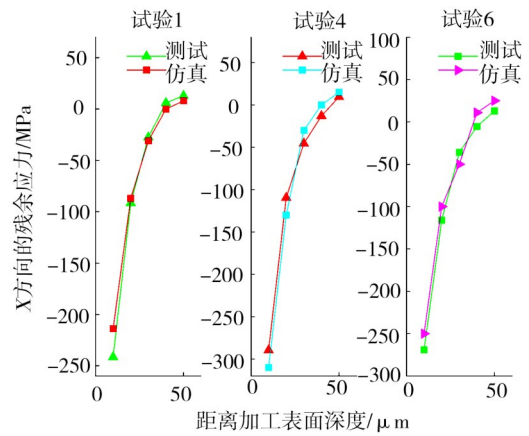
由图5可知,随着背吃刀量的增加, X 与 Y 方向表面($d=0$)的残余压应力均逐渐增大。 a_p 从 $0.2\sim 0.3\ \text{mm}$ 时 X 方向上的表面($d=0$)残余应力增大 11.2% , Y 方向上的表面残余应力增大 25.1% ; a_p 从 $0.2\sim 0.4\ \text{mm}$ 时 X 方向上的表面($d=0$)残余应力增大 19.9% , Y 方向上的表面($d=0$)残余应力增大 89.7% 。

蒙皮在实际加工时中刀具的背吃刀量不是依据程序一成不变的,而是根据在机测量反馈实时调整的。背吃刀量越大,切削层厚度越大,切屑变长(由断碎的弧形切屑变为相连的弧形切屑),切削力也随之而变大,将加大刀具和工件之间的碰撞,随着材料的大量移除,加工后工件冷却并伴随着残余应力的释放导致工件变形;对于蒙皮工件加工时是四周装夹,背吃刀量越大,越容易发生让刀现象,导致工件表面不光整,残余应力分布不均,工件变形不规律。

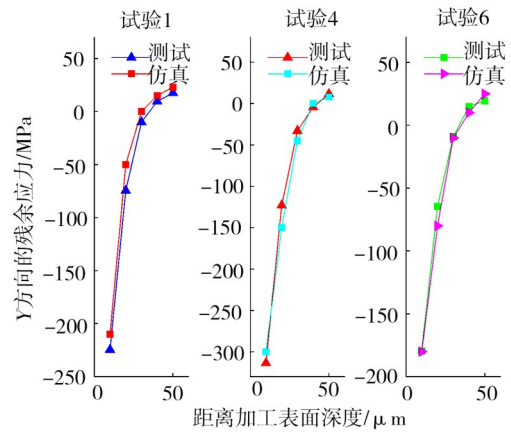
3.1.3 仿真与实验综合分析

结合实验实测数据,验证此次仿真建模所得仿真数值,其中图6(a)(b)中的各子图中的‘距离’表示测试点与加工表面的距离,三个子图依次是分别是第I组、第II组和第III组实验中的一组。对应的实验序号分别是1、4和6。

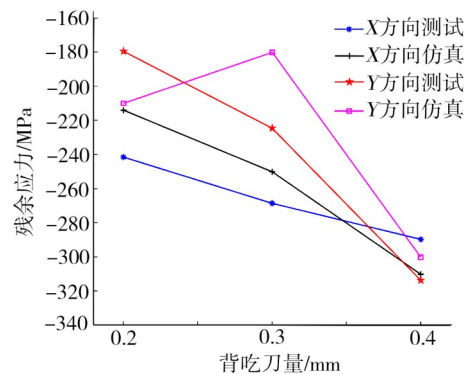
由于仿真分析是在理想的情况下进行的,而实际加工中,各种因素耦合作用以及测量运输等因素使得测得残余应力与仿真不是完全相同。



(a) 每齿进给量在 X 向实测值与仿真值



(b) 每齿进给量在 Y 向实测值与仿真值



(c) 背吃刀量在 X/Y 向实测值与仿真值

图6 表面残余应力实测值与仿真值对比

Fig. 6 Comparison of measured and simulated values of surface residual stress

3.2 变形分析

通过迭代优化加工方案,从而减小加工残余应力,并用工件的变形作为判断标准研究残余应力对工件变形的影响。测试实验在三坐标工作台上完成。

图7分别为每齿进给量为主因素产生的残余应力对工件变形的影响和背吃刀量为主因素产生的残余应力对工件变形的影响。图8为分别取每齿进给量为 $0.2\ \text{mm/z}$ 和背吃刀量为 $0.2\ \text{mm}$ 做变形测试对比试验进行与仿真实验数据对比分析图。

由图7(a)可知,每齿进给量由0.2 mm/z 增到0.5 mm/z,最大变形量由25 μm 增到47 μm ,增加幅度约88%,这是由于每齿进给量的增加,铣削力随之增加,表面残余应力也随之增加,导致零件变形严重,遂在加工蒙皮时根据加工材料严格遵守蒙皮标准化工艺指导书。

由图7(b)可知,随着背吃刀量的增加,最大变形

量由26 μm 增加到33 μm ,增加幅度约为27%;由图5可知,随着背吃刀量增大,表面残余应力逐渐增大,遂导致变形量增大。

通过飞机蒙皮镜像铣削的试验与仿真可知,加工变形趋势基本一致,据图8可知,最大变形量在中间位置,试验与仿真变形量的最大误差约19.3%。

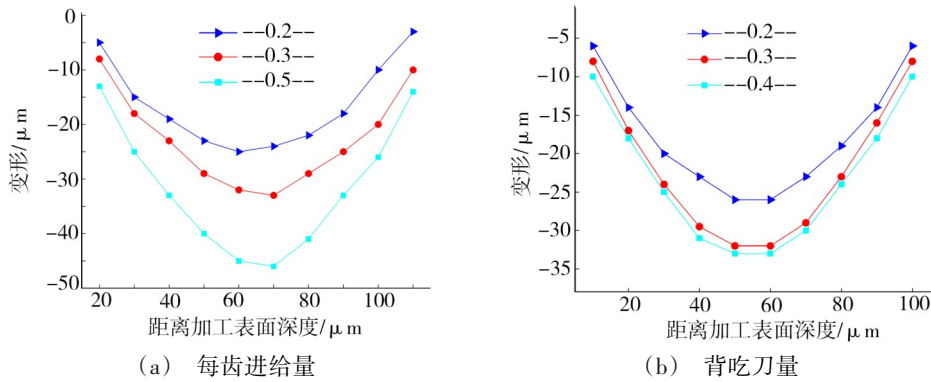


图7 每齿进给量/背吃刀量对变形的影响

Fig. 7 Influence of the feed per tooth/the amount of back engagement on the deformation

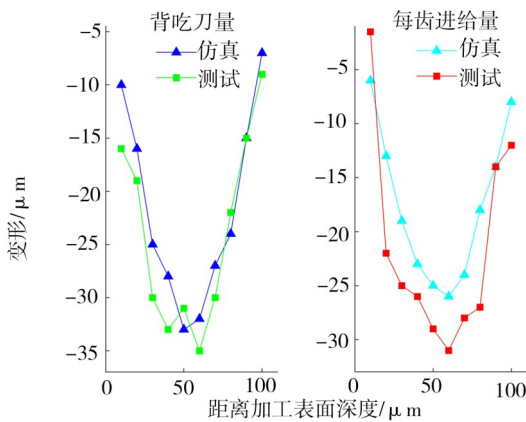


图8 变形量实测值与仿真值对比

Fig. 8 Comparison of measured and simulated deformation values

实际测量的数据与仿真的数据有些许偏差,原因一:在实际加工过程中镜像铣削支撑测是由4个电涡流组成的[图3(f)],而并非似仿真是一个质量块;原因二:激光扫描所得实际面与理论面拟合存在偏差;原因三:加工时的在机实时测量,刀具调整背吃刀量。综上原因使得仿真值与实测值出现偏差。

4 结论

首先,本文通过建立镜像铣削有限元仿真模型,模拟镜像铣削加工过程,主要研究了由每齿进给量和背吃刀量产生的残余应力对工件诱导变形的影响。其次,得到了在一定加工条件下的仿真结果,并根据模拟条件设计加工实验。最后,根据试验加工及测试得到的残余应力进行变形分析,结果表明:

(1)随着每齿进给量的增大,工件表面($d=0$)在X和Y方向上的残余压应力均相应随之增大;当测试点

与表面距离大于10 μm 时,残余应力基本保持不变。

(2)随着背吃刀量的增加,工件表面($d=0$)在X和Y方向的残余应力均相应随着增大。

(3)蒙皮变形量随着每齿进给量的增加而增加,随背吃刀量的增大而增大;通过仿真与测试结果对比,表明仿真的变形量趋势与实验加工后变形量的趋势基本一致。佐证了此次建模的可靠性。

参考文献

[1] 闫楚良. 中国飞机结构寿命可靠性评定技术的发展与展望[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 157-167.
 YAN C L. Development and prospect of life reliability assessment technology for aircraft structures in China [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 157-167.
 [2] 高长宝. 飞机结构使用寿命评定技术研究[J]. 中国设备工程, 2021(03): 200-201.
 GAO C B. Research on Service Life Assessment technology of aircraft structure [J]. China Equipment Engineering, 2021 (03): 200-201.
 [3] 闫楚良. 我国飞机结构寿命可靠性评定理论与试验方法及创新[J]. 中国发明与专利, 2018, 15(09): 6-11.
 YAN C L. Theory, test method and innovation of aircraft structural life reliability assessment [J]. China Invention and Patent, 2018, 15(09): 6-11.
 [4] 梁冰. 航空薄壁件装配中多尺度几何特征复合测量方法研究[D]. 大连理工大学, 2021.
 LIANG B. Research on composite measurement method of multi-scale geometric features in aviation thin-wall assembly [D]. Dalian University of Technology, 2021.
 [5] 平艳玲. 数控车床加工薄壁零件的工艺及参数选择[J]. 南方农机, 2023, 54(03): 145-147.
 PING Y L. Technology and parameter selection of NC lathe machining thin-walled parts [J]. Southern Agricultural
 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第6期

Machinery, 2023, 54(03): 145-147.

[6] 郭湘宇, 辛道银. 薄壁圆环零件加工过程中变形控制研究[J]. 内燃机与配件, 2022(24): 70-72.

GUO X Y, XIN D Y. Research on deformation control of thin-walled ring parts during machining[J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2022(24): 70-72.

[7] 岳彩旭, 张俊涛, 刘献礼, 等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(04): 106-131.

YUE C X, ZHANG J T, LIU X L, et al. Research progress on machining deformation during milling of thin-walled parts [J]. Journal of Aeronautics and Astronautics, 2022, 43(04): 106-131.

[8] YANG Yinfei, XIA Ling, ZHAO Guolong, et al. Investigation of the coupled distribution of initial and machining-induced residual stress on the surface of thin-walled parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1-4).

[9] SCHULZE V, ARRAZOLA P, ZANGER F, et al. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components[J]. Procedia CIRP 8, 2013, 45-50.

[10] 安虎平. 高锰钢高速切削机理及其影响因素研究[D]. 兰州理工大学, 2022.

AN H P. Research on high speed cutting mechanism and influencing factors of high manganese steel [D]. Lanzhou University of Technology, 2022.

[11] 祝小军, 向兵飞, 汪洋华, 等. 飞机蒙皮镜像铣切原理与算法分析[J]. 教练机, 2015(2): 23-27.

ZHU X J, XIANG B F, WANG Y H, et al. Principle and algorithm analysis of aircraft skin mirror milling [J]. Trainer, 2015 (2): 23-27.

[12] 祝小军, 向兵飞, 康晓军, 等. 双五轴镜像结构运动与仿真研究[J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(03): 1-5.

ZHU X J, XIANG B F, KANG X J, et al. Research on the movement and simulation of the dual five-axis mirror structure [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56(03): 1-5

[13] 鲍岩, 董志刚, 朱祥龙, 等. 蒙皮镜像铣削支撑技术的研究现状和发展趋势[J]. 航空学报, 2018, 39(04): 47-58.

BAO Y, DONG Z G, ZHU X L, et al. Research status and development trend of skin mirror milling support technology [J]. Journal of Aeronautics and Astronautics, 2018, 39(04): 47-58.

[14] 王昌瑞, 康仁科, 鲍岩, 等. 飞机蒙皮镜像铣加工稳定性分析[J]. 航空学报, 2018, 39(11): 209-221.

WANG C R, KANG R K, BAO Y, et al. Stability analysis of mirror milling of aircraft skin [J]. Journal of Aeronautics and Astronautics, 2018, 39(11): 209-221.

[15] 吴嘉俊, 黄钰, 乔红超, 等. 基于人工神经网络的多搭接激光冲击作用下材料残余应力与显微硬度预测方法(英文)[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(10): 3346-3360.

WU J J, HUANG J, QIAO H C, et al. Prediction method of residual stress and microhardness of materials under multiple lap laser shock based on artificial neural network [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(10): 3346-3360.

[16] 唱佳林, 李安海. 42CrMo 钢多工步车削加工表面完

整性研究[J]. 工具技术, 2021, 55(07): 49-53.

CHANG J L, LI A H. Study on Surface Integrity of 42CrMo steel in multi-step turning [J]. Journal of Tool Technology, 2021, 55(07): 49-53.

[17] SCHULZE V, ARRAZOLA P, ZANGER F, et al. Simulation of distortion due to machining of thin-walled components[J]. Procedia CIRP 8, 2013, 8 45-50.

[18] CHEN Zhijun, QIAN Lingyun, CUI Ruikang, et al. Machining-induced residual stress analysis and multi-objective optimization for milling process of Mg-Li alloy[J]. Measurement, 2022, 204.

[19] 罗和平. 飞机蒙皮加工工艺[J]. 机械制造, 2023, 61(02): 64-66.

LUO Heping. Aircraft Skin Fabrication Process [J]. Mechanical Manufacturing, 2023, 61(2): 64-66.

[20] 张盛桂, 高诚, 郑博森, 等. 镜像铣削系统的蒙皮零件在机测量技术研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(01): 19-22.

ZHANG S G, GAO C, ZHENG B S, et al. Research on on-machine measurement technology of skin parts for mirror milling system [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2020, 48 (01) : 19-22.

[21] 巩悦. 基于磁流变液的镜像加工可变刚度支撑技术研究[D]. 大连理工大学, 2021.

GONG Y. Research on variable stiffness support technology for mirror processing based on magnetorheological fluid [D]. Dalian University of Technology, 2021.

[22] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Eng. Fract. Mech, 1985, 21(1): 31-48.

[23] BRIDGMAN P W. Studies in large plastic flow and fracture [M]. Studies in large plastic flow and fracture: Harvard University Press, 1964.

[24] Hibbit K S I. ABAQUS Analysis User's Manual Help Online[S]. 1995

[25] SHI Jing, LIU C. Richard. The influence of material models on finite element simulation of machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4): 849-859.

[26] 李明阳. 7055 铝合金高速切削加工与残余应力的数值模拟研究[D]. 北京有色金属研究总院, 2022.

LI M Y. Numerical simulation of 7055 aluminum alloy high speed machining and residual stress [D]. Beijing General Research Institute of Nonferrous Metals, 2022.

[27] 贾云海, 权崇豪, 郭建梅, 等. 基于有限元分析的PCD立铣刀铣削紫铜工艺参数研究[J]. 超硬材料工程, 2019, 31(06): 6-11.

JIA Y H, QUAN C H, GUO J M, et al. Research on process parameters of PCD end mill milling copper based on finite element analysis [J]. Superhard Materials Engineering, 2019, 31(06): 6-11.

[28] 何光乾. 铝合金拐角铣削的犁耕效应研究[J]. 航天制造技术, 2018(06): 42-45, 57.

HE G Q. Research on ploughing effect of aluminum alloy corner milling [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018(06): 42-45, 57.