

基于残余应力与能量场分布匹配的航空异形件加工变形控制方法

何方舟¹, 范轩闻², 黄凯强², 江小辉², 郭淼现², 黄之文²

(1. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324; 2. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对航空薄壁件因残余应力分布失配引发无序二次变形的关键问题, 选取典型薄壁航空异形件, 提出基于残余应力能量场模型与特征匹配度评价指标协同控制的变形抑制方法。利用铣削仿真提取各参数残余应力, 进行残余应力重分布, 通过各特征残余应力赋予匹配发现: 相邻和对立的特征间会有耦合叠加与抵消特性, 各特征在单一残余应力场作用下, 工件最大变形显著; 采用高特征匹配度下的多残余应力场协同匹配后, 最大变形量减少近 28.6%。实验数据表明, 优化后的加工参数体系可实现特征间动态平衡, 异形件实际变形最大降低 27.2%, 圆度最大减小了 49.5%, 验证了该方法的有效性。研究证实, 基于残余应力能量场与特征匹配度协同调控的应力分布优化策略对航空薄壁件整体形变控制具有显著工程价值。

关键词: 航空薄壁件; 异形件; 能量场; 残余应力匹配; 变形控制

中图分类号: TH 161+5 文献标志码: A

Machining deformation control method for aerospace special-shaped parts based on residual stress and energy field distribution matching

HE Fangzhou¹, FAN Xuanwen², HUANG Kaiqiang², JIANG Xiaohui², GUO Miaoxian², HUANG Zhiwen²

(1. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For the key issue of disordered secondary deformation caused by mismatched residual stress distribution in thin-walled aerospace parts, the typical thin-walled aerospace special-shaped parts were selected and a deformation suppression method based on the residual stress energy field model and the evaluation index of feature matching degree was proposed. By using milling simulation to extract

收稿日期: 2025-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52575520)

第一作者: 何方舟(1992—), 男, 高级工程师。研究方向: 先进制造技术。E-mail: hefangzhou@comac.cc

通信作者: 江小辉(1986—), 男, 教授。研究方向: 航空航天先进制造技术。E-mail: jiangxh@usst.edu.cn

引文格式: 何方舟, 范轩闻, 黄凯强, 等. 基于残余应力与能量场分布匹配的航空异形件加工变形控制方法[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(1): 1-13.

Citation: HE Fangzhou, FAN Xuanwen, HUANG Kaiqiang, et al. Machining deformation control method for aerospace special-shaped parts based on residual stress and energy field distribution matching[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(1): 1-13.

residual stresses of each parameter, the residual stresses were redistributed, and match through the residual stresses of each feature were matched. It was found that there will be coupling superposition and cancellation characteristics between adjacent and opposite features. Under the action of a single residual stress field, the maximum deformation of the workpiece was significant. After using the multi-residual stress field co-matching under high feature matching degree, the maximum deformation was reduced by nearly 28.6%. Experimental data show that the optimized processing parameter system can achieve dynamic balance between features, the actual deformation of the special-shaped parts is reduced by the maximum 27.2%, and the roundness is reduced by the maximum 49.5%, which verifies the effectiveness of this method. The research confirms that the stress distribution optimization strategy based on the coordinated regulation of residual stress energy field and feature matching degree has significant engineering value for the overall deformation control of aerospace thin-walled parts.

Keywords: *aerospace thin-walled parts; special-shaped parts; energy field; residual stress matching; deformation control*

随着航空装备性能要求的持续升级,薄壁结构件零件成为飞行器承力框架、推进系统等关键功能单元^[1]。薄壁零件的加工是一个相当复杂的过程,涉及许多需要考虑的因素。控制薄壁零件加工变形所需的技术一直受到高度重视^[2]。薄壁结构件的高精度加工在制造过程中面临尺寸大、壁薄且材料去除率高的挑战^[3],导致加工后的零件刚性较弱,这种状态使得零件在加工残余应力的作用下,容易发生弯曲、扭曲等复杂变形^[4],这些变形不仅影响零件的装配精度,还可能严重影响飞机的安全性和服役寿命^[5-6],已成为航空制造业关键技术难点之一。因此,针对零件加工过程中的变形与服役性能受到的影响,残余应力的调控尤为重要。

研究表明,加工过程中残余应力的动态演化是薄壁件变形的核心诱因^[7],学界围绕残余应力调控展开了系统性研究。Wang等^[8]引入初始体残余应力和加工引起的残余应力,进行了残余应力和变形预测并进行调控。Zhang等^[9]建立由不同加工参数增量引起的残余应力增量线性方程,提供了定量计算所需加工参数以实现所需残余应力分布的新方法。周益星等^[10]采用有限元仿真研究毛坯初始残余应力与零件变形量的相关性,优化加工过程材料去除策略,有效控制整体壁板的加工变形。郭建焯等^[11]研究了主轴转速、每齿进给量、轴向切深对残余应力的影响规律,以减小残余应力和同时增大材料去除率为优化目标,获取了一组最优解集。Jiang等^[12]通过研究高速切削加工中

产生的残余应力对工件变形的影响,发现通过切削速度可以在一定程度上降低薄壁件的残余应力,进而减小残余冲击应力并控制薄壁件变形。

除了改变工艺过程等较为传统的方法之外,Yang等^[13]在薄板加工过程中通过多次深度冷却处理,采用复合超声振动时效方法,使残余应力降低了25.1%,并对工件的整体变形进行了全面表征,降低了表面平面度;Wang等^[14]考虑超声冲击参数和工件内部残余应力的影响,构建了双信息神经网络代理模型进行快速变形预测,并通过遗传算法进一步用于优化超声冲击参数,从而使变形最小化;Guo等^[15]还基于支持向量机(SVR)和遗传算法(GA),提出了通过略微修正初始残余应力来预测并控制工件变形的新方法;刘学杰^[16]构建了一个完全热力耦合的激光辅助铣削模型,分析了激光辅助铣削与普通铣削的残余应力分布规律,以最小残余应力为目标,优化了激光辅助铣削的加工参数。以上研究者通过各类方法有效地调控了残余应力并改善了加工变形,但对于复杂薄壁件的多特征结构容易导致残余应力分布对称性差等问题并未解决。

一些研究者关注到残余应力分布协调性的重要性,以求达到残余应力的平衡或趋于平衡,从而控制加工变形。Gamerós等^[17]通过工件预变形装夹,改变其内应力分布并使其与加工残余应力趋于平衡,进而减小工件变形;Jin等^[18]采用高能声束处理,使得圆柱体毛坯残余应力均匀化率大幅提升,显著减小了圆柱变形;Zhang等^[19]针对

风机叶片的研究表明, 其叶背与叶盆间的残余应力差异是导致工件变形的主要原因; Wu 等^[20]通过消除热应力, 有效降低并均匀化了航空滚压环的残余应力; Ma 等^[21]基于预拉伸板原理采用膨胀法, 均匀化航空薄壁环初始残余应力分布, 使最大残余应力降低 75.47%。现有研究虽围绕残余应力平衡控制等问题展开, 但尚未形成统一方法界定残余应力分布状态。因此, 亟需建立可匹配多特征加工残余应力的方法, 以实现高性能航空薄壁件加工变形的最优化控制。

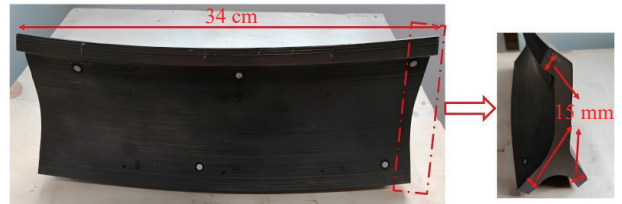
综上所述, 本文提出一种基于残余应力能量场模型, 通过赋予残余应力至薄壁航空异形件各个特征面, 获取特征面能量场大小, 将残余应力场与各结构特征进行能量场匹配, 从而进行残余应力重分布取得最优组合以控制薄壁件变形, 旨在为航空复杂薄壁件残余应力及加工变形的主动控制提供新方法与新思路。

1 模型构建与研究方法

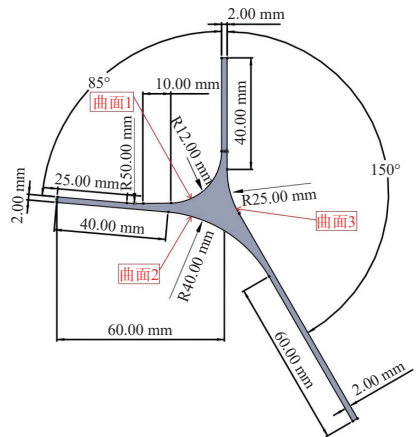
1.1 航空异形件模型构建与特征分析

本节以航空领域复杂异形结构件为研究对象, 基于三维建模软件构建其几何模型, 选用 TC4 钛合金, 构件的初始毛坯形态、最终加工目

标几何特征及对应的加工工艺流程分别如图 1、图 2 所示。为简化计算复杂度, 同时保证模型的代表性与计算精度, 本次研究采用构件的 1/4 对称简化模型开展后续分析。加工路径如图 3 所示。



(a) 异形结构件毛坯



(b) 航空异形件加工目标截面图

图 1 航空异形件毛坯及加工目标

Fig.1 Blank and processing target of aerospace special-shaped parts

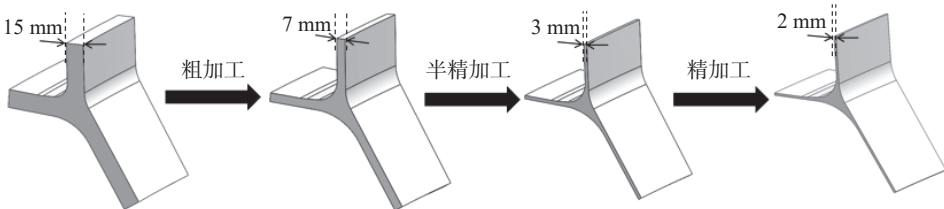


图 2 航空异形件结构及加工顺序

Fig.2 Structure and processing sequence of aerospace special-shaped parts

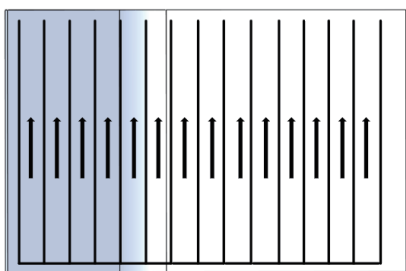


图 3 加工路径

Fig.3 Machining path

聚焦该工件的 3 个特定曲面, 重点探究其精加工后残余应力场的分布特征, 并分析不同残余

应力场分布模式对工件变形行为的作用机制。

在仿真软件中构建上述分析对象, 工件主要结构特征为曲面 1(1、2、3)、曲面 2(4、5、6)、曲面 3(7、8、9), 各特征面如图 4 所示。

对所构建的工件进行网格和各个面的层数划分, 其中主要分析位置的网格采用六面体单元划分, 工件总体单元总数为 (418356), 节点总数为 (468396), 如图 4 所示。铣削加工过程中, 表面与亚表面区域残余应力值相对较高, 随后沿着深度方向急剧减小, 在大约 1 mm 深度处已经衰减到接近零的水平。因此, 残余应力影响深度均设置

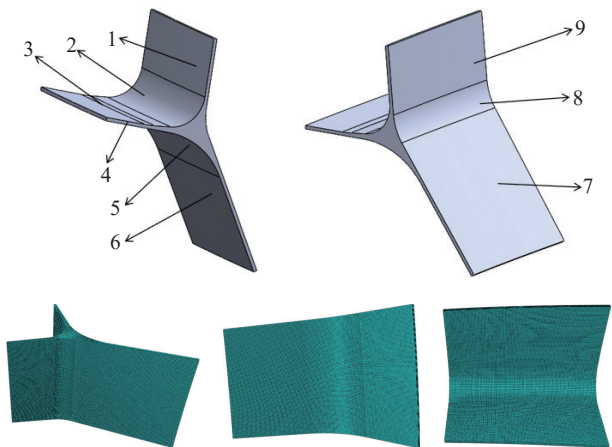


图4 航空异形件各特征面有限元模型

Fig.4 Finite element model of each feature surface of aerospace special-shaped parts

为1 mm(每个面均划分了10层,每0.1 mm划分一层),在软件中,通过建立集合施加应力场的方式,分别向各面、各层施加残余应力。

1.2 铣削仿真模型设置

对铣削过程进行仿真,工件材料选取TC4钛合金,刀具材料选取钨钢(刀具默认为刚体)。TC4钛合金主要化学成分和物理力学性能如表1和表2所示。

本构方程选用Power Law材料本构模型:

$$\sigma(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T) = g(\varepsilon^p) \Gamma(\dot{\varepsilon}) \theta(T) \quad (1)$$

式中: $\sigma(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T)$ 为工件材料的流动应力; $g(\varepsilon^p)$ 为

应变强化函数; $\Gamma(\dot{\varepsilon})$ 为应变率效应函数, $\theta(T)$ 为热软化函数; ε^p 为材料变形过程的塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; T 为材料变形过程的温度。

$$g(\varepsilon^p) = \begin{cases} \sigma_0 \left(1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p}\right)^{1/n}, & \varepsilon^p < \varepsilon_c^p \\ \sigma_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_c^p}{\varepsilon_0^p}\right)^{1/n}, & \varepsilon^p \geq \varepsilon_c^p \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_0 为初始屈服应力; ε_0^p 为参考塑性应变; ε_c^p 为截止塑性应变; n 为塑性变形系数。

$$\Gamma(\dot{\varepsilon}) = \begin{cases} \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{1/m_1}, & \dot{\varepsilon} \leq \dot{\varepsilon}_t \\ \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{1/m_2} \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{(1/m_1 - 1/m_2)}, & \dot{\varepsilon} > \dot{\varepsilon}_t \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_t$ 为高、低应变率敏感系数之间发生转变的临界应变率; m_1 为低应变率敏感系数; m_2 为高应变率敏感系数。

$$\theta(T) = \begin{cases} c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5, & T < T_c \\ \theta(T_c) \left(1 - \frac{T - T_c}{T_m - T_c}\right), & T \geq T_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: $c_0 \sim c_5$ 为多项式拟合系数; T_c 为线性截止温度; T_m 为熔化温度。

在仿真软件中可以对工件的几何尺寸、刀具的几何尺寸、工艺参数等加工要素进行定义,使用仿真软件对不同参数进行仿真。

表1 TC4钛合金的主要化学成分

Tab.1 Main chemical compositions of TC4

								%
Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H	其他
90.345	5.5	3.5	0.3	0.2	0.08	0.05	0.015	0.01

表2 TC4钛合金的物理力学性能

Tab.2 Physical and mechanical properties of TC4

密度/(kg·m ⁻³)	热膨胀系数/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	泊松比	杨氏模量/Gpa
4430	9.1	546	7	0.342	113

1.3 实验方案设置

为了验证仿真结果的有效性,使用表3的3组加工参数,分别进行仿真与实验加工对比表面残余应力。并且基于仿真工艺参数表3,制定两组铣削加工实验方案,各结构特征与所采用的加工参数匹配如表4所示,其中A组为基于残余应力能量场模型优化的多参数组合铣削,B组为单一参数铣削。实验使用机器人进行加工,刀具使用钨

钢4刃铣刀,由于工件较薄,实验使用与工件表面吻合的仿形块放置工件下方以稳定装夹。根据工件加工要求与不同结构特征对其进行装夹,并使用X-350A型X射线衍射仪与三坐标测量仪分别测量加工完成件的表面残余应力与精度,见图5。

1.4 残余应力能量场W模型化构建

工件变形不仅受残余应力大小的影响,还与残余应力作用面积等多种因素有关。同时,在同

表3 加工仿真工艺参数

Tab.3 Process parameters of machining simulation

加工类型- 结构特征	组别	主轴转速 /(r·min ⁻¹)	切削深度 /mm	每齿进给量 /mm·z ⁻¹	切削宽度 /mm	刀具直径 /mm
2、5、8	A	7000	0.5	0.05	0.8	6
	B	8000	0.5	0.03	0.5	6
1、3、4、6、7、9	B	8000	0.5	0.03	0.5	6
	C	10000	0.5	0.02	0.3	4

表4 A、B组实验方案

Tab.4 Experimental program for group A and B

A组实验特征结构-加工参数组	B组实验特征结构-加工参数组
1C 2B 3B 4C 5B 6C 7B 8A 9B	B

一加工表面上, 不同位置的残余应力分布也存在差异。因此, 仅依据残余应力的数值大小构建评判指标, 其精度和可靠性存在明显不足。鉴于

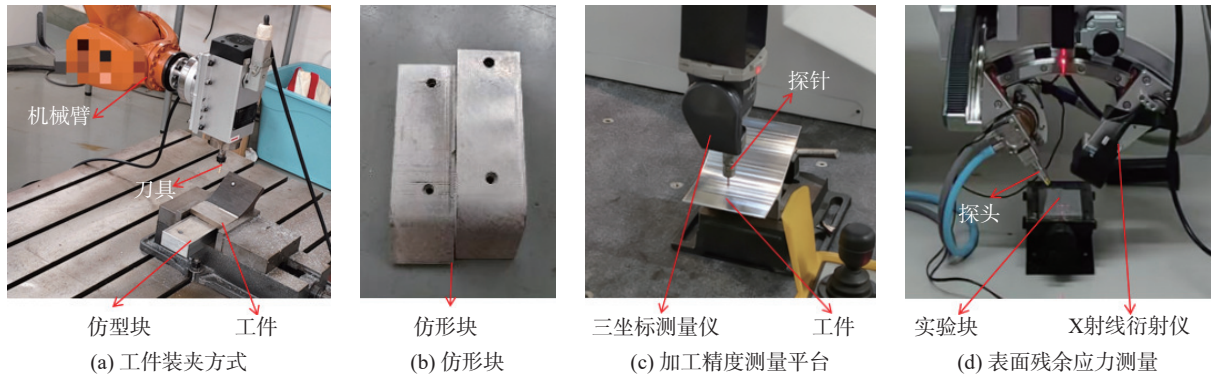


图5 加工及测试平台

Fig.5 Machining and test platform

如图6所示, 在加工表面选取16个特征点采集残余应力, 生成应力云图及对应曲面棱柱模型。其中, X 、 Y 轴代表特征点相对坐标, Z 轴对应残余应力值, 该曲面棱柱体积定义为特征面残余应力体积。基于残余应力仿真结果, 计算得该特征面残余应力体积为 $4.03 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^2$, 且残余应力体积符号与应力类型对应: 拉应力为正, 压应力为负。

基于残余应力场体积理论框架, 本研究提出构建工件几何形变与残余应力场的多场耦合关联, 建立可体现能量密度分布的能量场模型。能量场指工件内部残余应力导致的能量分布形态, 其数学表达式定义为

$$W = V_{\sigma} U \quad (6)$$

式中: W 为任一特征面残余应力能量表征值; U 为

此, 本节首先依据残余应力体积的定义, 并由此构建能量场, 对其定义和计算方法进行系统阐述。

1.4.1 能量场定义

本节将残余应力体积定义为曲面棱柱的体积, 将残余应力在工件某一层的分布状态云图作为该曲面棱柱的上表面, 该层表面为曲面棱柱的下表面。采用三重积分几何意义将残余应力体积 V_{σ} 定义为

$$V_{\sigma} = \iiint_{\Omega} f(x, y, z) dv \quad (5)$$

式中: Ω 表示所选取的残余应力区域; $f(x, y, z)$ 为工件目标面上若干采集点的残余应力形成的曲面表达式; dv 为残余应力体积的体积微元。在实际计算中, 很难获得可积函数 $f(x, y, z)$, 因此, 对残余应力体积的计算进行简化, 通过绘制残余应力的曲面棱柱三维图, 并利用三维建模软件计算棱柱体积, 从而得到残余应力体积。

工件所对应特征变形量。因此, 可将式(6)改写为

$$W = \iiint_V f(x, y, z) \cdot U dv \quad (7)$$

其中, 经过标准化单位换算及量纲分析, 确定所得的量化参数的计量单位为 mJ , 基于此, 将这一量化表征体系定义为能量场。

1.4.2 能量场计算方法流程

以特征1为例, 进行能量场的计算。如图7对各特征表面均做了分层处理, 该分层处理方法基于工件深度坐标的连续离散化原则, 用以实现残余应力沿深度方向的梯度分布特征匹配。首先, 针对特征1沿深度方向进行残余应力匹配, 分析残余应力对特征1引起的变形。随后, 对特征1进行逐层构建节点集合, 并提取每一层节点的变形值, 并将结果写入文本文件进行后处理, 进一步计算每一层节点变形的平均值, 以此作为该层

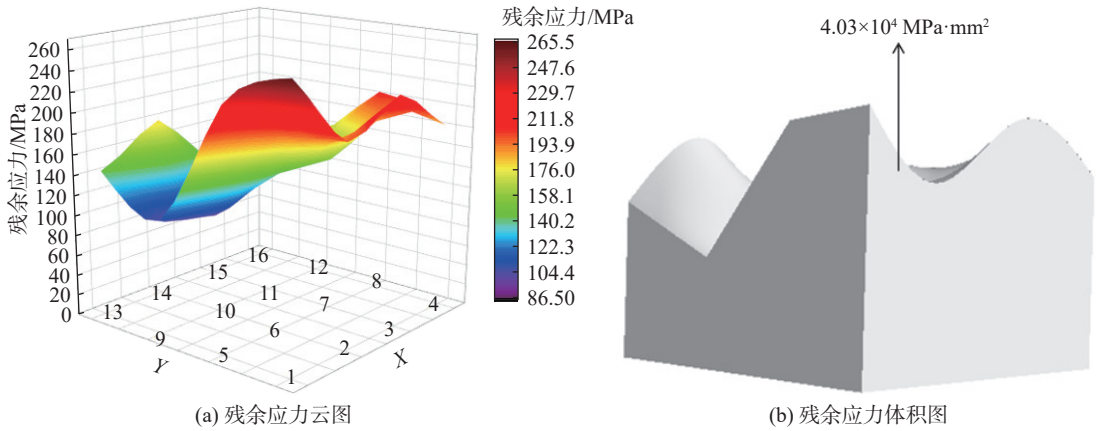


图6 残余应力云图与对应的残余应力体积

Fig.6 Residual stress cloud diagram and its residual stress volume

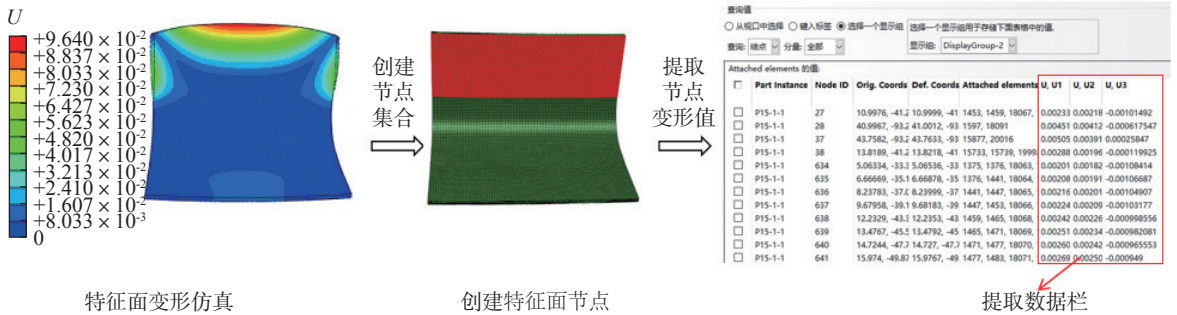


图7 能量计算流程图

Fig.7 Energy calculation flow chart

的平均变形结果。最终，将各层的应力、平均变形值、特征面积代入式(7)进行计算，从而计算出该特征各层的能量值。

力梯度呈现非线性分布特征，其沿深度方向存在拉应力、压应力交替转换的现象。同时，残余应力耦合作用会导致工件变形叠加或抵消。因此，采用传统的数值叠加法会受制于线性假设的局限性，难以表征残余应力场耦合作用下的能量传递机制。采用连续介质积分法，通过将各层能量表征值绘制成沿深度变化的曲线，运用 Origin 数学统计软件对曲线进行积分运算，如图 8 所示，从而获取特征区域的等效能量表征值。

能量为标量参数，图中所呈现的正负符号极性仅表示为了区分残余拉应力与残余压应力所引起的能量变化：残余压应力场引起的能量变化表示为负，残余拉应力引起的能量变化表示为正。积分运算所得到的面积参数 Area 负值表示在多层级能量耦合过程中压应力的能量贡献占据主导地位，反之则反映拉应力的能量累积占据主导地位。在后续分析中，若无拉应力主导与压应力主导的耦合状态出现，均对结果进行归一化处理，

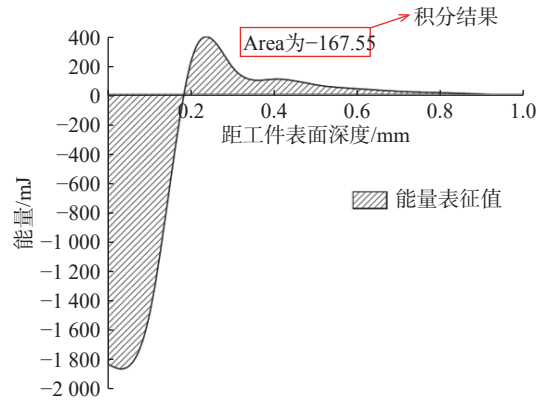


图8 能量曲线积分结果图

Fig.8 Integration result of energy curve

统一将等效能量表征值以绝对值形式呈现，从而消除符号极性对结果量化分析产生影响。

将等效能量表征值计算公式表示为

$$W_e = \int_0^h W dh \quad (8)$$

式中： h 为残余应力作用深度； W_e 为特征区域的等效能量表征值，在后续内容中，所表示的能量表征值 W 均为 W_e 。

该方法有效规避了离散数据处理的截断误差, 通过积分实现了等效能量表征值的量化, 显著提高了能量等效算法的收敛精度。

2 分析与讨论

2.1 铣削残余应力仿真预测模型验证

对表3所示工艺参数进行仿真, 与实验结果进行表面残余应力对比, 如图9所示。3组对比结果中, 实验与仿真值X方向最大误差为10.1%, Y方向最大误差为18.6%。实际加工过程中与仿真存在一定的差异, 误差均属于合理范围之内, 因此可以证明仿真结果的有效性。

对表3铣削加工仿真结果进行残余应力提取, 绘制A~C组残余应力沿深度变化曲线, 如图10所示。

根据残余应力仿真结果可知, 加工后残余应力在表层与亚表层中呈现压应力, 从表面至深层, 应力由压应力转为拉应力且幅值变化较大, 后逐渐减小并趋于零。

2.2 多特征异形件残余应力相互作用关系

在异形件的加工过程中, 不同的铣削加工工艺会导致各特征表面及其深层区域的残余应力分布状态存在显著差异。残余应力的作用并非局限于受力表面或某单一层级, 而是会通过结构的相互关联影响到其他部位, 从而引起变形。工件的整体变形是多应力场相互叠加、相互作用的结果。因此, 深入研究残余应力之间的相互作用机

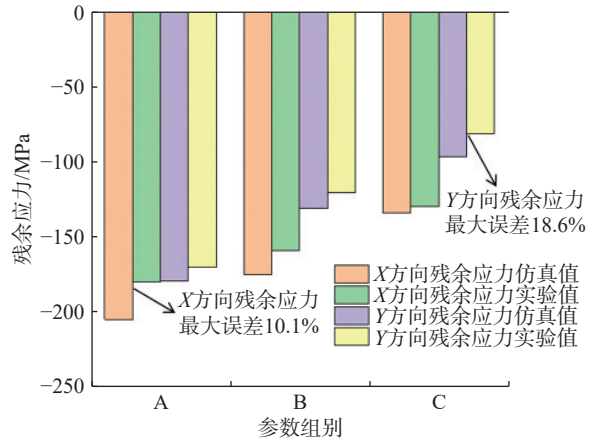


图9 表面残余应力仿真值与实验值对比

Fig.9 Comparison of simulated and experimental surface residual stress values

制对于研究工件变形具有重要意义。

本节针对图4中编号为1、2、8、9的关键特征进行仿真研究分析, 从表3、图10选取相应铣削加工参数与残余应力分布曲线, 各特征面加工参数组统一选取B组。所选取的4个典型特征涵盖了平面与曲面结构, 且这些特征结构在空间上相互邻近, 具有高度的代表性。对特征赋予残余应力进行匹配, 匹配残余应力的特征顺序为: 1→1、2→1、2、9→1、2、8、9。对每一次匹配后的工件变形的结果进行分析研究。

如图11、表5所示, 选取特征1残余应力导致的工件变形结果作为对照组。单独匹配特征1时, 其对工件变形较大, 且变形主要集中于Z方向; 匹配特征1与2时, 残余应力在同一作用面产生耦合叠加, 然而工件总变形增幅仅为10.8%。

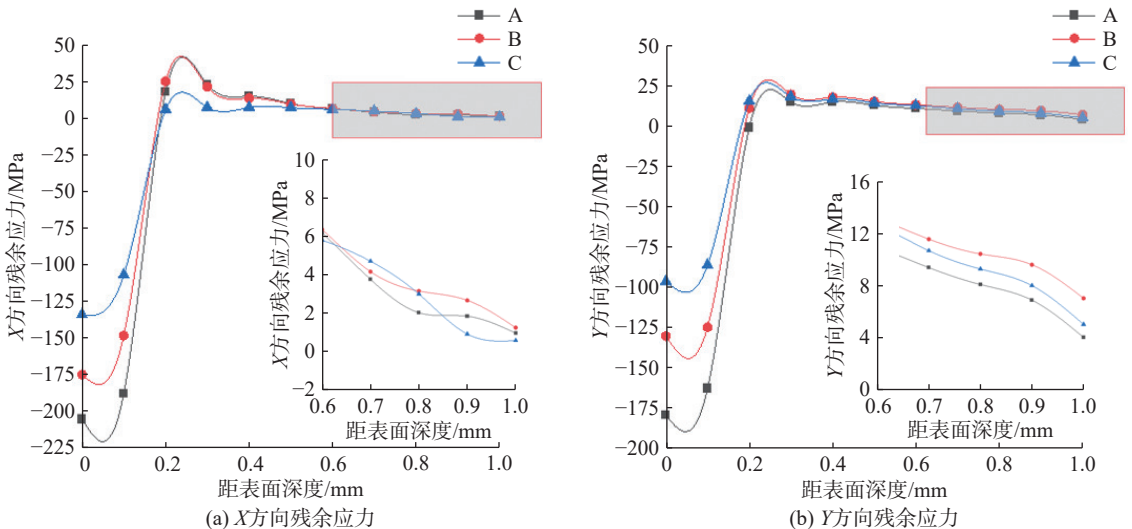


图10 A、B、C组仿真残余应力

Fig.10 Simulated residual stress in groups A, B and C

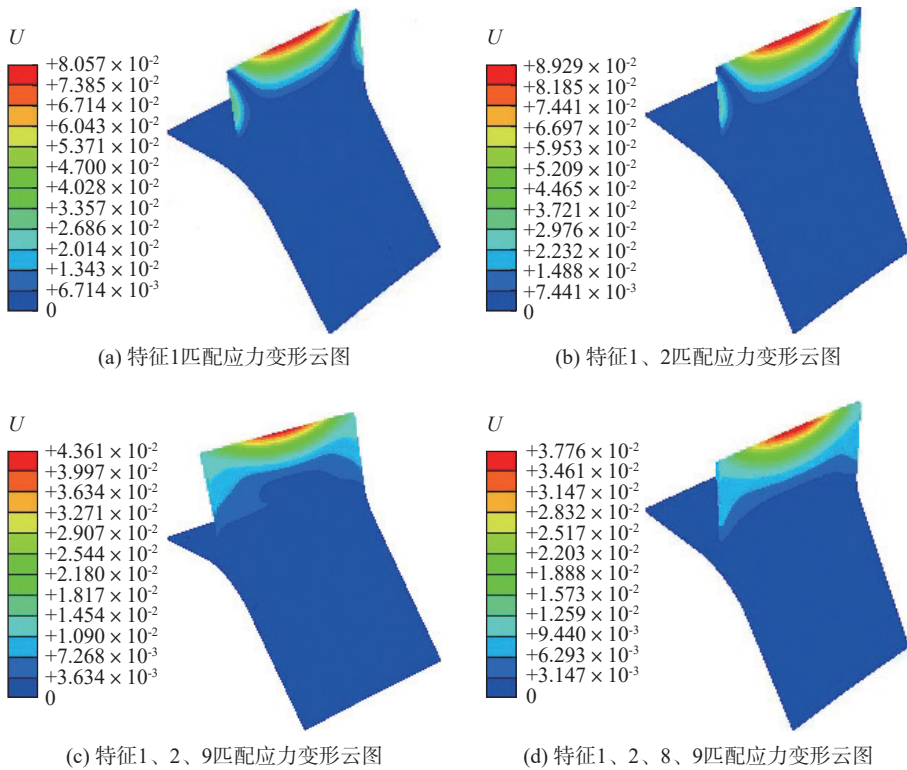


图 11 残余应力逐步匹配变形云图

Fig.11 Stepwise matching deformation results of residual stress

表 5 残余应力逐步匹配变形结果

Tab.5 The residual stress gradually matches the deformation results

匹配应力特征	整体最大变形量/mm	X方向最大变形量/mm	Y方向最大变形量/mm	Z方向最大变形量/mm
1	8.05×10^{-2}	2.06×10^{-2}	1.86×10^{-2}	7.04×10^{-2}
1 2	8.92×10^{-2}	2.13×10^{-2}	1.92×10^{-2}	7.11×10^{-2}
1 2 9	4.36×10^{-2}	1.85×10^{-2}	1.53×10^{-2}	3.86×10^{-2}
1 2 8 9	3.77×10^{-2}	1.58×10^{-2}	1.21×10^{-2}	3.13×10^{-2}

分析表明,特征 2 残余应力作用面积小,且其对应厚度更大,有更高刚度,特征 2 残余应力较大,但变形量仍较小。特征 9 残余应力匹配后,工件整体最大变形降低 51.12%,且 Z 方向变形量缩减尤为显著;进一步叠加特征 8,工件整体最大变形再降 10.29%。特征 1、2 与特征 8、9 存在空间对立分布关系,残余应力形成相互制衡效应,进而显著抑制工件整体变形,证实空间相对分布的结构残余应力可借助相互平衡机制实现工件变形的有效调控。

综合上述结果与分析,残余应力对工件变形的作用具有耦合叠加与抵消特性,其作用不仅依赖于残余应力,还与空间几何构型、应力作用面积等多因素相关。由此可见,构建量化指标以精准调控残余应力导致的变形,具备重要的研究意义。

2.3 航空异形构件多特征相互影响下的能量场分布匹配

相邻和对立的特征间会有耦合叠加与抵消特性,所以需要构建量化指标,从而精准调控残余应力导致的变形。本节基于 1.4 节构建的能量场指标,对异形件进行精准变形调控。

2.3.1 多结构特征能量计算结果

采用上节所述方法,对各结构特征在不同参数条件下的残余应力进行赋予,并计算对应结构特征与参数组合在 X、Y 方向上的能量表征值 W_x 、 W_y 。匹配与计算结果如表 6 所示。

由表 6 可知,能量表征值呈现显著的各向异性特征, W_y 有 2/3 低于 W_x ,这是因为 X 方向的残余应力均普遍大于 Y 方向的(见图 10),其在变形影响中占据主导地位。这些结果为后续能量场的

表 6 各结构特征对应各参数的残余应力能量场

Tab.6 Residual stress energy fields corresponding to each parameter for each structural characteristic

结构特征-参数组合	W_x/mJ	W_y/mJ	结构特征-参数组合	W_x/mJ	W_y/mJ
1-B	159.917	102.386	5-B	42.584	148.205
1-C	112.746	45.695	6-B	335.18	161.023
2-A	45.171	126.063	6-C	209.359	92.841
2-B	33.602	79.543	7-B	120.407	170.321
3-B	167.551	128.542	7-C	98.425	123.776
3-C	106.646	83.894	8-A	52.636	41.501
4-B	88.387	60.540	8-B	34.0784	21.121
4-C	56.740	22.788	9-B	91.285	76.664
5-A	63.664	201.152	9-C	79.11	40.181

分析与建模提供了数据基础。

2.3.2 组合特征下能量场分布匹配对变形影响

基于各结构特征与参数组合的能量表征值计算结果, 本节进一步探讨能量匹配与工件变形之间的内在关系。根据 2.2 节中的研究结论, 将所研究的航天异形件按照相互影响的几何特征划分为两组: 第一组包括特征 1、2、8、9; 第二组包括特征 3、4、5、6、7。分析结果所呈现各特征组合的变形值均以最大变形值作为表征依据。

为更清晰地量化匹配情况, 定义匹配度 α 为

$$\alpha = \frac{W_1}{W_2} \quad (9)$$

式中: W_1 、 W_2 分别表示相对面的能量表征值。 α 越接近于 1, 表示匹配程度越高, 相对面的能量表征值越接近(由于相对面能量场大小关系不一定恒定, 所以 α 可能大于 1, 大于 1 则采用倒数处理)。通过这一量化指标, 可深入探究能量匹配与异形件变形之间的相关性。

a. 特征 1、2、8、9 能量场组合匹配

特征 1、9 均为平面, 特征 2、8 为曲面, 特征 1 与 2, 特征 8 与 9 存在共面分布特性, 因此将特征 1、2 与特征 8、9 作为相对面进行研究。2.2 节中残余应力逐步匹配结果证明等效叠加能有效反映“对立特征能量抵消”的非线性效应, 故对特征 1 与 2 的能量表征值进行线性叠加, 继而与特征 8 与 9 能量表征值进行匹配运算。该线性叠加是能量场等效表征值的综合叠加, 考虑了应变、应变率、温度的非线性耦合, 故本质为非线性过程后的等效能量合成。

如图 12 和表 7 分别为特征 1、2、8、9 匹配下

的变形云图与匹配结果。由分析结果可知, 工件最大变形集中出现在特征 1、9 的顶端中心区域。位移场分析显示, Z 方向变形值 U_z 在总变形值 U_t 中所占比重最高, 可归因在残余应力赋予时, 由于工件较薄, Z 方向易变形, X 、 Y 方向残余应力较大, Z 方向残余应力较小, X 、 Y 方向残余主要为残余压应力, 对工件挤压导致在 Z 方向上会有较大变形。随着 X 、 Y 方向的匹配度分别提升 12.2%、16.3%, 变形量极值下降了 18.9%。值得关注的是, 虽然组合 1C 2B 8B 9B X 方向匹配度小于 1C 2B 8A 9C、1C 2A 8A 9B, 但实际 1C 2B 8B 9B 组合变形小于另两组, 归因于 X 方向匹配度接近, 但 Y 方向匹配度远小于另两组。因此, 基于此方法进行实际匹配与选择最优组合时, 应当综合考量多方向匹配度的协同优化问题。量化分析表明, 随着 X 、 Y 方向能量匹配度的提升, 变形量呈现降低趋势, 该规律表明能量匹配度与变形抑制效果具有正相关性: 当相对特征面的能量特征值越趋近时, 工件变形量越小。此结果初步证明了基于能量场空间匹配的变形控制策略的有效性。

b. 特征 3、4、5、6、7 能量场组合匹配

特征 3、4、5、6、7 组合中, 特征 4、5、6 存在共面分布特性, 将特征 4、5、6 与特征 3、7 作为相对面进行研究, 计算方法与特征 1、2、8、9 组合类似。

分析图 13、表 8 中结果可知, 工件最大变形量集中在特征 6、7 顶端区域, 位移场分析显示, U_z 分量在总变形值 U_t 中所占比重最高, 原因与 1、2、8、9 匹配时相同。3B 7B 4C 5B 6C 匹配度实际

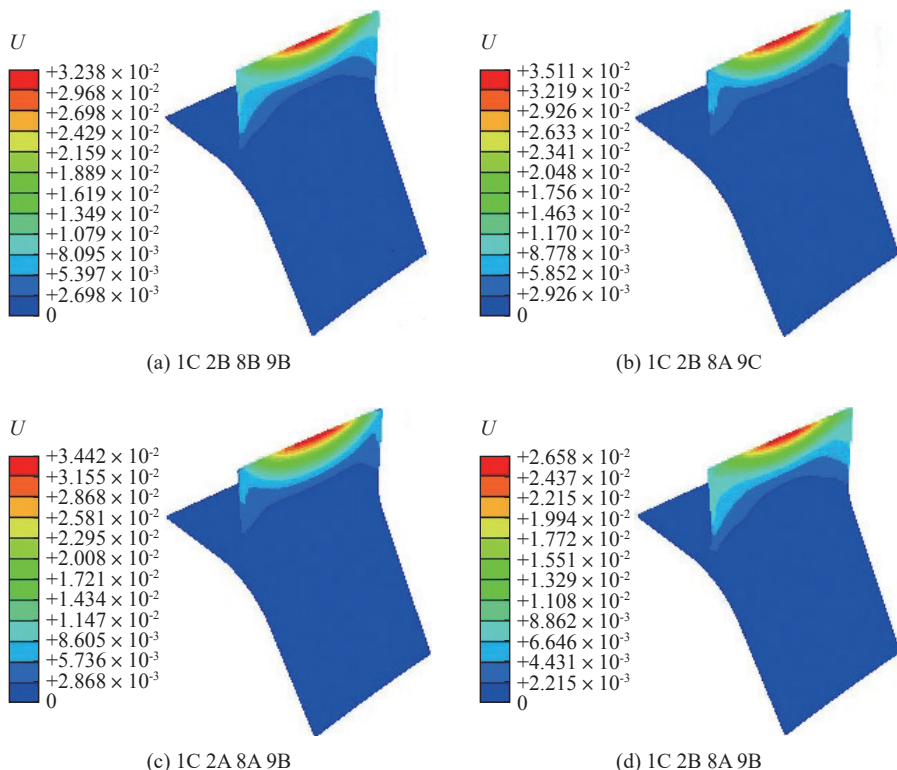


图 12 特征 1、2、8、9 匹配下的异形件变形云图

Fig.12 Deformation cloud diagrams of thin-walled parts matched by features 1, 2, 8, and 9

表 7 1、2、8、9 特征能量场匹配度与工件变形

Tab.7 Matching degrees of characteristic energy fields and workpiece deformation of 1, 2, 8, and 9

匹配组合	X方向匹配度	Y方向匹配度	$U_t/10^{-2}$ mm	$U_x/10^{-2}$ mm	$U_y/10^{-2}$ mm	$U_z/10^{-2}$ mm
1C 2B 8B 9B	86.1%	78.0%	3.23	1.45	1.12	2.82
1C 2B 8A 9C	90.0%	65.2%	3.51	1.29	1.02	3.06
1C 2A 8A 9B	91.1%	68.7%	3.44	1.19	1.08	2.97
1C 2B 8A 9B	98.3%	94.3%	2.65	1.32	1.08	2.47

113.2%，采用倒数，为 88.3%。随着 X、Y 方向的匹配度分别提升 13.2%、9.2%，变形量极值下降了 20%。该组组合变化结果与趋势均与特征 1、2、8、9 组合表现出高度一致性，呈现出显著的相似性特征。这是因为这两组结构特征在几何形态与残余应力分布状态上较为相似。此结果进一步证明了能量匹配度与变形抑制效果具有正相关性，从而验证了基于能量场空间匹配的变形控制策略的有效性。

基于各特征匹配结果，最终选定组合参数为 1C 2B 3B 4C 5B 6C 7B 8A 9B，并与单一残余应力下的参数 B 组(见表 4)进行对比，匹配仿真结果如图 14 所示。对结果进行分析发现，组合优化匹配下的变形减小近 28.6%，两组工件在变形特征上

呈现显著相似性。两组仿真结果中，最大变形均发生在特征 6、7 顶端区域，且变形分布趋势具有空间一致性。

由匹配结果分析可知，通过提升异形件特征间的能量场匹配度，可有效抑制工件的整体变形，这种基于能量场分布匹配的加工变形控制方法为精密薄壁构件加工工艺优化提供了有效的方法支持。

2.3.3 加工实验验证

毛坯加工前，先进行自然时效处理，随后开展残余应力检测，结果显示残余应力值趋近于零。该时效与检测环节的核心作用在于，有效消除初始应力对后续加工过程中残余应力分布的干扰。以此为前提，开展后续加工实验验证，依据

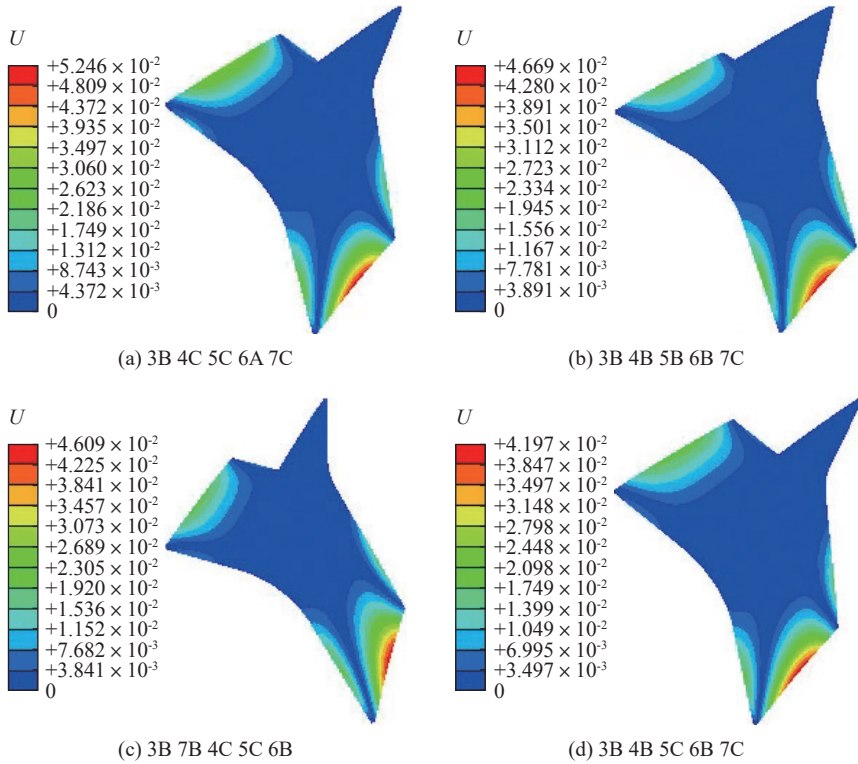


图 13 特征 3、4、5、6、7 匹配下的异形件变形云图

Fig.13 Deformation cloud diagram of thin-walled parts matched by features 3, 4, 5, 6, and 7

表 8 3、4、5、6、7 特征能量场匹配度与工件变形

Tab.8 Matching rates of characteristic energy fields of 3, 4, 5, 6, and 7 and deformation of the workpiece

匹配组合	X方向匹配度	Y方向匹配度	$U_x/10^{-2}$ mm	$U_y/10^{-2}$ mm	$U_z/10^{-2}$ mm	$U_2/10^{-2}$ mm
3B 7C 4C 5A 6C	80.6%	79.5%	5.24	2.22	1.26	4.02
3B 7B 4B 5B 6C	84.6%	99.0%	4.66	1.95	1.08	3.62
3B 7C 4C 5B 6C	86.1%	95.4%	4.60	1.76	1.28	3.51
3B 7B 4C 5B 6C	93.2%	88.3%	4.19	1.76	1.01	3.21

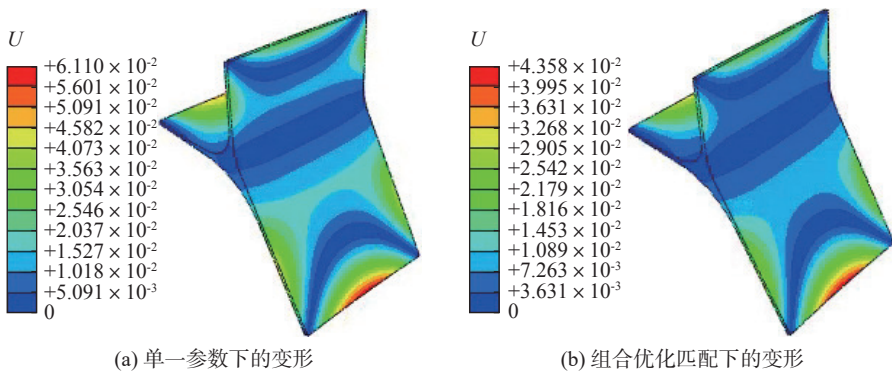


图 14 匹配组合与单一参数下的变形对比

Fig.14 Comparison of deformation under matching combination and single parameters

表 3 工艺参数完成工件加工操作, 最终加工效果如图 15 所示。

为了进一步探究工件各特征之间 α 的变化与工件变形量之间的关系, 对加工完成的工件各平面

的平面度、各圆弧的圆度进行测量并将测量结果进行对比, 如图 16 所示。

由图 16 实验结果可得, 对组合残余应力场参数铣削的工件与单一残余应力场参数铣削的工件

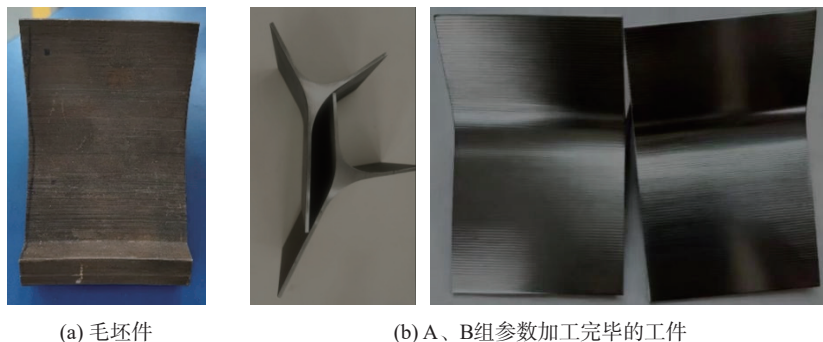


图 15 加工完毕的工件

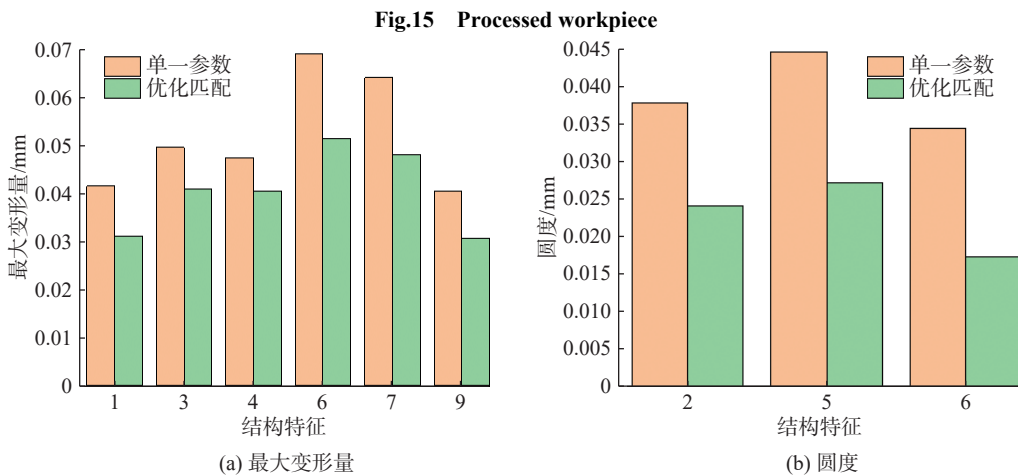


图 16 A组与B组实验加工精度对比

Fig.16 Comparison of experimental processing accuracy between groups A and B

进行对比,实际组合参数最大变形为 $50.1\ \mu\text{m}$,单一参数最大变形为 $68.9\ \mu\text{m}$,变形最大降低了 27.2%;其中,两组变形最大的特征均是特征 6、7,这是由于特征 6、7 为 2 mm 薄壁,并且长度较长,较易发生变形。组合参数圆度相较单一参数圆度各特征之间最大减小了 49.5%,圆度最大值均为特征 5。通过对比各特征之间的加工精度可以发现,两组参数最大变形位置均发生在特征 6、7 上,这与仿真结果趋势一致。

综上所述,实验证明基于 W 模型优化后的铣削加工参数组合有效减小了异形件变形、提高了加工精度,验证了基于 W 模型,通过控制工件 α 减小工件整体变形方法的合理性。

3 结论

对航空异形件在铣削加工过程中残余应力对工件变形的影响进行了深入探究,提出了基于残余应力能量场 W 及其特征间匹配度 α 的模型构建与优化方法。通过理论分析、仿真模拟与实验验证,得到以下主要结论:

a. 创新性地提出了残余应力能量场及其特征间匹配度,以 w_c 描绘工件表面残余应力的分布状态,为残余应力的量化分析提供了新思路。

b. 仿真分析表明,仅单一残余应力场作用下,工件变形较大,各特征间匹配度较低。而采用组合残余应力场匹配,显著地增加了特征间匹配度大小。与单一残余应力场相比,组合残余应力场匹配下的工件最大变形量减少了 28.6%。

c. 实验结果表明,基于能量场优化后的加工参数组合通过提升匹配度显著降低了异形件的变形,提高了加工精度。与单一参数铣削相比,优化参数匹配后有效降低了异形件变形,实际变形降低了 27.2%,圆度各特征之间最大减小了 49.5%。验证了基于残余应力能量场模型以及通过控制匹配度来控制工件整体变形方法的有效性和合理性。

由于仅利用部分参数验证了残余应力能量场的合理性,未来将进行最优参数的研究,以实现加工精度与加工效率的协同优化。

参考文献:

[1] WU G, LI G X, PAN W C, et al. A state-of-art review on

- chatter and geometric errors in thin-wall machining processes[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 454–480.
- [2] LEE T U, YANG X C, MA J Y, et al. Elastic buckling shape control of thin-walled cylinder using pre-embedded curved-crease origami patterns[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 151: 322–330.
- [3] ZHAO Y Y, MAO J, LIU G, et al. A review on error generation and control in efficient precision machining of thin-walled parts[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 133(5): 2083–2101.
- [4] 段士伟, 李萍, 康敬波, 等. 薄壁零件加工残余应力变形预测及控制技术研究现状 [J]. *机械工程与技术*, 2022, 11(6): 647–659.
- [5] CERUTTI X, ARSENE S, MOCELLIN K. Prediction of machining quality due to the initial residual stress redistribution of aerospace structural parts made of low-density aluminium alloy rolled plates[J]. *International Journal of Material Forming*, 2016, 9(5): 677–690.
- [6] SIM W M. Challenges of residual stress and part distortion in the civil airframe industry[J]. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2010, 5(4/5): 446–455.
- [7] WANG Z J, CHEN W Y, ZHANG Y D, et al. Study on the machining distortion of thin-walled Part Caused by redistribution of residual stress[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2005, 18(2): 175–179.
- [8] WANG L, YUE C X, MA W, et al. Prediction of residual stress and deflection in multi-process milling of large thin-walled components with initial bulk residual stress[J]. *Measurement*, 2025, 247: 116814.
- [9] ZHANG S F, SHI H R, QI J L, et al. Prediction of residual stress in milling large or medium-sized thin-walled parts based on equivalent loads[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 151: 282–297.
- [10] 周益星, 陈云, 邓枫, 等. 大型整体壁板加工变形控制技术研究 [J]. *工具技术*, 2024, 58(3): 102–106.
- [11] 郭建焯, 毛怡颖, 高诗诗, 等. 面向薄壁件变形控制的高速铣削残余应力分析与工艺优化 [J]. *航空制造技术*, 2025, 68(6): 86–95.
- [12] JIANG X H, ZHU Y H, ZHANG Z Y, 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): 877–892.
- [13] YANG Q W, KONG J X, DU D X, et al. An analytical machining deformation model of asymmetric structural thin-walled components[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131: 111–128.
- [14] WANG N K, LI Y G, LIU C Q, et al. Parameter optimization of ultrasonic impact for deformation control based on dual information neural network[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 137: 113–124.
- [15] 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.
- [16] 刘学杰. 激光辅助铣削钛合金仿真分析及参数优化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.
- [17] GAMEROS A, LOWTH S, AXINTE D, et al. State-of-the-art in fixture systems for the manufacture and assembly of rigid components: a review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 123: 1–21.
- [18] JIN C, XU C G, LI P L, et al. Study on residual stress and ultrasonic deformation control of titanium alloy cylinder components[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2023, 42(4): 88.
- [19] ZHANG J Y, YAO C F, TAN L, et al. Shot peening parameters optimization based on residual stress-induced deformation of large fan blades[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107467.
- [20] WU Q, WU J, ZHANG Y D, et al. Analysis and homogenization of residual stress in aerospace ring rolling process of 2219 aluminum alloy using thermal stress relief method[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 157–158: 111–118.
- [21] MA Y L, XUE N P, WU Q, et al. Residual stress analysis of a 2219 aluminum alloy ring using the indentation strain-gauge method[J]. *Metals*, 2020, 10(7): 979.

(编辑: 董伟)