

引文格式:岳彩旭,刘小淇,王乐,等. 框架类薄壁件加工变形敏感区域识别与预测研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(8): 25010152.

YUE Caixu, LIU Xiaoqi, WANG Le, et al. Research on identification and prediction of deformation sensitive region of frame type thin-walled parts based on finite element simulation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 25010152.

# 框架类薄壁件加工变形敏感区域识别与预测研究

岳彩旭,刘小淇,王乐,胡德生,刘献礼

(哈尔滨理工大学先进制造智能化技术教育部重点实验室,哈尔滨 150080)

[摘要] 为了解决大型框架类薄壁零件半精加工阶段发生的变形问题,本文采用 ABAQUS 有限元软件,以生死单元法模拟其切削加工变形过程,并对最大变形区域进行深入研究,实现加工过程中由整体到局部变形敏感区域的精准识别与预测。结果表明,变形沿高度方向呈“上大下小”规律且顶部变形最大。通过工艺参数仿真的正交试验及极差分析,得到优化后的参数组合为径向切深  $a_e=0.5$  mm,轴向切深  $a_p=6$  mm,每齿进给量  $f_z=0.06$  mm/z,局部最大变形量相较于传统铣削参数减少了 46.41%。该方法能够有效提升薄壁构件敏感区域识别的准确性,为大型框架类薄壁零件的高效性低损耗加工和工艺参数优化提供了重要的理论支持和指导。

关键词:薄壁零件;加工变形;敏感区域识别;残余应力;有限元仿真

中图分类号:V261; TH162; TG501.2

文献标志码:A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010152



岳彩旭

教授,博士生导师,研究方向为制造、切削过程建模及复杂刀具设计等。

大型框架类薄壁结构件作为航空领域的重要组成部分,通常采用高强度铝合金一体化加工而成,以实现轻量化和高承载性能<sup>[1]</sup>。机身框薄壁构件由预拉伸厚板经过大量材料去除(可高达初始体积的 90%)加工出复杂的筋板和薄壁结构<sup>[2]</sup>。然而,薄壁结构因其刚性弱的缺点使之在切削加工过程中极易发生形变,导致工件局部区域发生弹性变形或卸夹后整体翘曲<sup>[3]</sup>。加工变形常造成尺寸超差、装配困难,显著降低产品合格率并增加工业制造成本<sup>[4]</sup>。值得注意的是,变形并非均匀分布在零件,而是集中在某些薄弱部位,如受约束较少的长悬臂薄板、中部开口区域等处更易发生变形累积<sup>[5]</sup>。这些由加工变形引起的应力集中高风

险部位可被视为“敏感区域”,即在加工应力作用下最易发生变形失稳的区域,也是后续变形预测的重点关注区域。

针对上述挑战,近年来学者们从多种角度探究框架类薄壁零件变形敏感区域的成因,并提出预测方法来识别高风险敏感区域。现有研究表明,零件毛坯中的初始残余应力分布直接影响加工后的变形状态,残余应力梯度大的部位往往对应变形量较大的区域,因而残余应力被认为是诱发敏感区域变形的关键因素之一<sup>[6]</sup>。此外,零件几何结构的局部刚度差异同样决定了哪些区域更易变形:当结构存在壁厚突变或不对称布置时,刚性弱的部位在切削力和应力释放的共同作用下更易成为变形集中区,

收稿日期:2025-10-21;退修日期:2025-11-10;录用日期:2025-11-25

基金项目:国家自然科学基金(52175393);黑龙江省“春雁”团队支持项目(CYCX24001)

一些学者通过调整装夹支撑位置验证了这一点<sup>[7]</sup>。与此同时,加工工艺参数对敏感区域的形成有显著影响,刀路策略及切削顺序都会改变工件各部分区域的残余应力释放过程,从而影响变形分布<sup>[8]</sup>。为识别预测敏感区域,现有研究提出了多种方法,包括基于有限元仿真的数值分析法;基于解析理论预测法、试验测量法;基于统计学习与数据驱动法、几何特征分析法以及混合识别与多源融合法等。其中,有限元仿真模拟是应用较为广泛的方法,可将初始残余应力和切削加载过程离散建模,细致计算材料去除过程中工件的应力重分布和变形响应<sup>[9]</sup>。

在分析敏感区域的成因问题上,黄康华等<sup>[10]</sup>通过框梁多工序仿真表明,初始残余应力、材料去除导致的整体刚度削弱以及装夹释放方式共同驱动框梁在跨段和开口处形成典型敏感区域。Li等<sup>[11]</sup>建立了预弯铝合金板的畸变模拟框架,证明了几何结构对敏感区域的放大效应。Yang等<sup>[12]</sup>结合轮廓法与XRD测得加工残余应力,并利用解析弯曲模型揭示残余应力梯度与中性层迁移对薄壁构件敏感区域形成的主导作用。Zheng等<sup>[13]</sup>对初始残余应力与刀具轨迹进行了耦合效应,表明刀路交汇或刚度突变处更容易形成变形高风险区。Madariaga等<sup>[14]</sup>从工艺角度出发,通过调控加工诱发残余应力,对大尺寸零件敏感区域具有显著抑制效果。Zhang等<sup>[15]</sup>采用三维耦合热-力耦合仿真,揭示了温度场与局部残余应力峰值之间的关系,为敏感区域提供了热力学基础。Chen等<sup>[16]</sup>研究了尺寸效应(如壁厚及肋板高度)对变形的影响,给出厚度阈值与敏感度的关系,证明了薄壁结构可提升局部柔度并迁移敏感区。范志强<sup>[17]</sup>通过对回转体进行生死单元去除材料的仿真,指出腔壁与边界过渡区处去除材料阶段形成的应力集中,

是典型残余应力诱发的敏感区域,但缺乏对构件局部敏感区域的识别。罗宇等<sup>[18]</sup>基于整体结构的有限元仿真结果,揭示了装夹刚度不均导致边界敏感区域的形成机理。Fang等<sup>[19]</sup>通过构建薄壁件变形测量平台与变形场数据集,表明轴向切削力分布与构件低刚度特性共同决定了变形场空间非均匀性,并提出U-NET与物理模型融合的变形预测框架,通过理论轴向力变形近似解与实测变形场构建输入特征,实现了对薄壁腔体铣削变形场的相对变形分布的识别。

对于薄壁零件加工变形预测及敏感区域识别的问题, Madariaga等<sup>[20]</sup>提出简化数值模型,在加工后的零件上直接施加初始残余应力场并考虑自重及边界条件,快速预测局部敏感区域变形。薛迪<sup>[21]</sup>将有限元仿真与反向传播(BP)神经网络相结合,建立切削参数向敏感区域最大变形的映射模型,实现局部区域定量预测与参数优化。包亮亮<sup>[22]</sup>针对隔框铣削提出分区优化策略,通过优化装夹与对称去料显著降低了隔框与腔壁交界敏感区域变形。Liu等<sup>[23]</sup>引入机器视觉与迁移学习,对薄壁结构的局部区域状态进行识别,为敏感区域的在线识别与定位提供了可扩展的数据基础。Li等<sup>[24]</sup>融合物理建模与数据驱动方法,基于四阶张量与递归神经网络构建了高精度敏感区域预测框架,在复杂工况下展示出更强的鲁棒性,显著提升了预测精度。Gao等<sup>[25]</sup>进一步结合等效弯曲刚度和残余应力分布,建立了薄壁件尺寸稳定性预测模型,识别出弱刚度区域与残余应力叠加作用的区域,从而导致局部敏感区域产生显著变形。在工艺优化方面, Tian等<sup>[26]</sup>提出基于特征值灵敏度的非均匀余量优化方法,有效提升了薄壁件在加工过程中的局部刚度与模态频率,试验验证表明,该方法能显著改善肋板与腔壁等敏感区域的切削稳定性。Wang等<sup>[27]</sup>

构建了多工序残余应力演化模型,实现了大型薄壁件迭代变形的敏感区域预测。综上所述,现有研究在对敏感区域成因机理揭示与预测方法构建方面已取得诸多进展,但对复杂框架类薄壁结构件的整体-局部耦合变形行为仍缺乏系统性的分析。

鉴于此,本文基于生死单元技术构建整体框架类结构件半精加工过程的有限元仿真模型。首先,通过仿真模拟确定敏感区域的识别与局部变形量最大区域;其次,对局部区域进行特征提取,并进行局部切削有限元模拟,获得变形及残余应力等关键物理量的分布规律;最后,通过不同工艺参数条件下的局部铣削有限元模拟,对比分析参数变化对变形演化的影响机理,进而结合正交试验与极差分析,筛选并确定最优工艺参数组合。该研究不仅为敏感区域识别提供了工艺指导,也为框架类薄壁件加工变形预测与参数优化设计提供了理论与方法支撑。

## 1 基于生死单元法的整体式机身框薄壁构件敏感区域识别

框架类薄壁零件因其轻量化和高强度的特点被广泛应用,然而此类零件结构刚度低、加工易变形,尤其在多工序复合加工中,切削力、装夹约束与残余应力的耦合作用可能导致显著的加工变形与尺寸误差。为了识别加工敏感区域并优化工艺参数,构建了框架薄壁构件有限元模型,其中,敏感区域识别流程图如图1所示。

本节描述了有限元模型从毛坯到工件的整个材料去除过程模拟,在建立整体式机身框薄壁构件的有限元模型时,初始残余应力由SIGINI用户子程序导入仿真模型以实现大型整体构件的铣削模拟仿真(SIGINI是ABAQUS中的用户子程序,用于定义模型初始应力状态)。本研究采用Fortran语言编写SIGINI用户子程

序,并通过 Python 程序将测量的载荷数据离散地应用到构件上,在建立薄壁构件铣削模型时,利用生死单元技术对粗加工进行模拟,从而实现对构件整体敏感区域的识别。

### 1.1 机身框薄壁构件

本文以大型薄壁机身框作为研究对象,工件结构及尺寸如图2所示,结构件选用整体尺寸为 600 mm × 210 mm × 30 mm,腔深为 25 mm,壁厚为 5 mm 的 Al7075-T6 铝合金机身框架薄壁零件。由于多维度建模困难、材料去除机制缺失及热-力耦合非线性强等因素,在预测大型零件的整体变形敏感区域时,很难在材料去除过程中使用模拟切削时刀具-工件相互作用产生切屑的成形方法,因此,本文采用生死单元技术模拟机身框构件的材料去除。粗加工和半精加工的切削参数如表1所示,工件的材料参数如表2所示<sup>[28]</sup>。

表2所列 Al7075-T6 的铝合金热学与力学性能参数参考了文献[28]中的数据,其原始来源为 MatWeb 材料数据库,属于航空用 Al7075-T6 铝合金在室温附近的标准工程常数。其研究基于此组参数建立三维薄壁铣削有限元模型,所得壁厚形貌与挠曲变形与试验结果吻合较好。本文试验材料与文献[28]中所使用材料在牌号、化学成分及 T6 热处理状态上保持一致,故可将该组参数用作本研究有限元仿真中的材料物性输入。

### 1.2 初始残余应力获取

本文采用了低速、轻载的剥层铣削参数以避免剥层过程引入新的切削残余应力,使用直径 8 mm 的硬质合金铣刀,主轴转速为 5000 r/min,每齿进给量为 0.08 mm/z,径向切深为 0.5 mm,轴向切深为 5 mm 的铣削参数,由于引起的切削热较低,因此不会明显改变工件原有残余应力场。在试验开始前,将型号为 BF350-3AA 型的应变片沿 X 方向和 Y 方向贴附在工件底部,并从工件顶部逐层铣削。

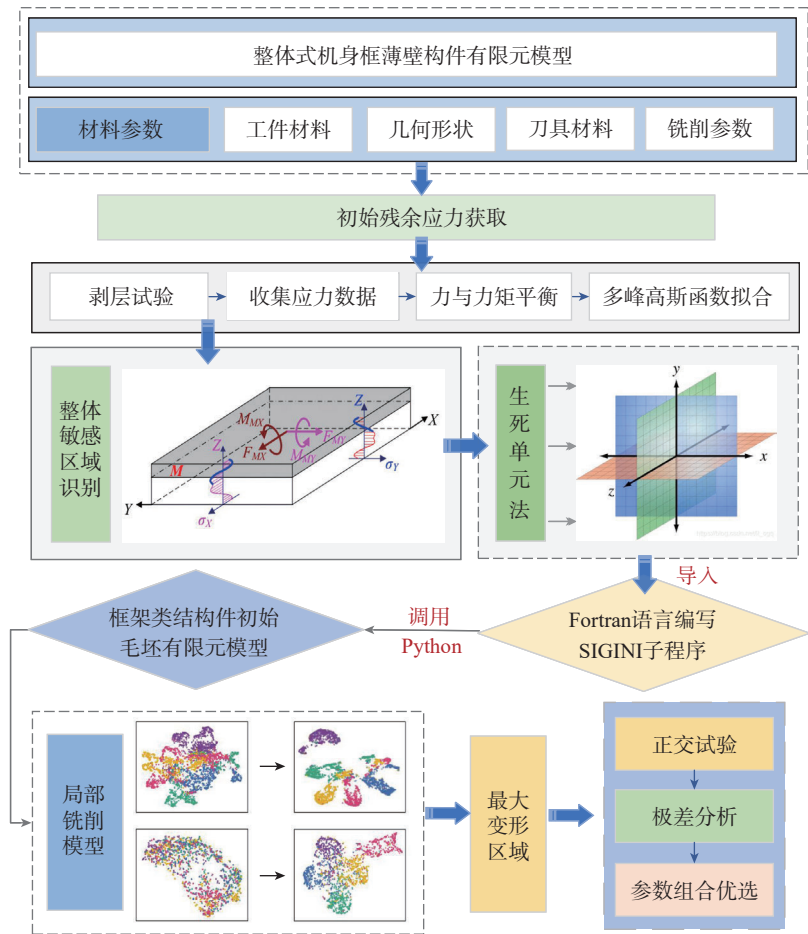


图1 敏感区域识别流程图

Fig.1 Flow diagram of sensitive region recognition

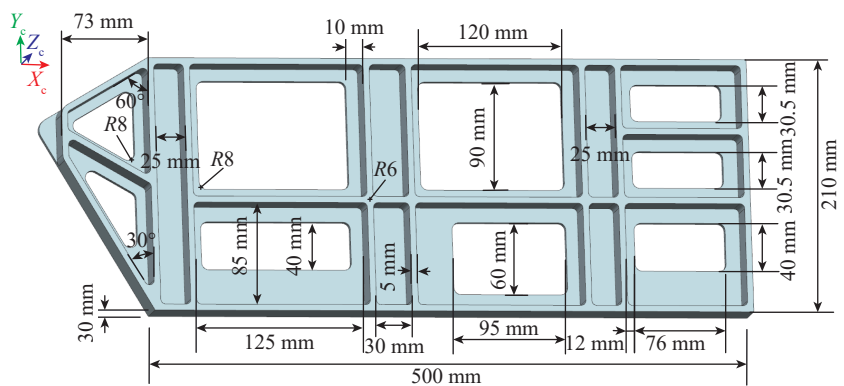


图2 机身框薄壁件模型

Fig.2 Fuselage frame thin-walled part model

表1 切削参数表

Table 1 Parameter table of cutting

参数	主轴转速 $n$ / (r/min)	进给速度 $v_f$ / (mm/min)	径向切削深度 $a_e$ / mm	轴向切削深度 $a_p$ / mm
粗加工	4000	2500	10	2
半精加工	5000	1200	0.5	5

通过应变采集仪(型号 DH3818Y, 江苏东华测试技术股份有限公司)采集应变。工件厚度为 50 mm,分为 50 层,每层铣削 1 mm,应变片并非铣削完一层后再贴,而是在试验前一次性贴附,相较于盲孔法只能获得局部表面应力,剥层法能够沿厚度方向得到连续的残余应力分布,适合厚度不均、局部几何复杂的框架类薄壁构件。由于工件内残余应力对称分布,因此铣削到工件厚度的一半即可。对于每一铣削层,可松开夹具测量应变,通过公式转换可以计算出残余应力。初始残余应力的试验测量现场如图 3 所示。

本文采用的铣削剥层法源于文献 [29] 对传统剥层法的改进,将改进剥层法测得的初始残余应力引入粗加工模型,所使用的铣削参数径向切深和每齿切屑厚度均较小时,单齿瞬时切削力和切削热均受限,可视为准静态材料去除过程。在粗加工过程中只考虑初始残余应力对加工变形的影响,此时初始残余应力是薄壁零件加工变形的主要原因,并且粗加工过程中含有加工残余应力的被加工表面被后续加工工艺去除。由于切削热主要影响切削区域其余附近的局部应力分布,因此在有限元分析中将热-力耦合转换为力学分析。

根据剥层法得到的应变数据,并非完全由去除层材料应力的释放产生的,推导剥除层材料的残余应力值  $\sigma_{xi}$ 、 $\sigma_{yi}$  与底部应变  $\varepsilon_{xi}$ 、 $\varepsilon_{yi}$  之间的数学关系可表示为式(1)。

$$\begin{cases} \sigma_{xi} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{xi} + \mu\varepsilon_{yi}) \\ \sigma_{yi} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{yi} + \mu\varepsilon_{xi}) \\ i = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{xi}$  为第  $i$  剥除层  $x$  方向残余应力;  $\sigma_{yi}$  为第  $i$  剥除层  $y$  方向残余应力;  $\varepsilon_{xi}$  为第  $i$  剥除层  $x$  方向释放的应变;  $\varepsilon_{yi}$  为第  $i$  剥除层  $y$  方向释放的应变;  $E$  为材料弹性模量;  $\mu$  为泊松比。

表 2 Al7075-T6 铝合金的热学与力学性能 [28]

Table 2 Thermal and mechanical properties of Al7075-T6 aluminum alloy [28]

参数	密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	杨氏模量 / GPa	泊松比	比热容 / (J/(kg·°C))	热传导 / (W/(m·°C))
参数值	2810	71.7	0.3	960	130

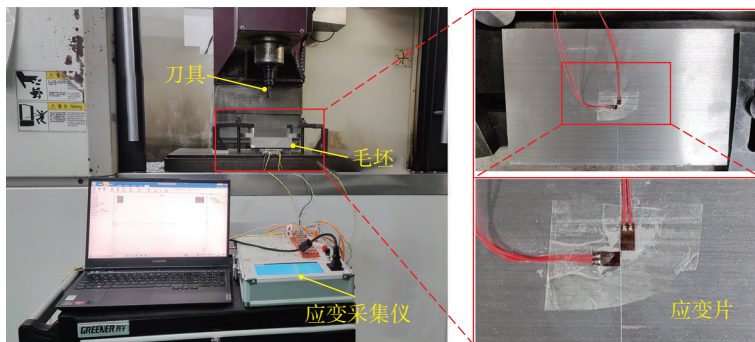


图 3 初始残余应力测量设备图

Fig.3 Diagram of initial residual stress measuring equipment

根据力平衡和力矩平衡原理,得到材料剥除后剩余材料的初始残余应力的厚度方向的分布函数(式(2))。

$$\begin{cases} F_x = \int_{-\frac{h-t}{2}}^{\frac{h-t}{2}} \sigma_x(z) dz = 0 \\ F_y = \int_{-\frac{h-t}{2}}^{\frac{h-t}{2}} \sigma_y(z) dz = 0 \\ M_x = \int_{-\frac{h-t}{2}}^{\frac{h-t}{2}} z \sigma_x(z) dz = 0 \\ M_y = \int_{-\frac{h-t}{2}}^{\frac{h-t}{2}} z \sigma_y(z) dz = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $h$  为毛坯厚度;  $t$  为去除层厚度。第 1 层材料被剥离后,会在剩余材料顶层产生额外应力为式(3)。

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{x1-2} = \left(1 + \frac{3h}{h-t}\right) \cdot \frac{t\sigma_{x1}}{h-t} \\ \Delta\sigma_{y1-2} = \left(1 + \frac{3h}{h-t}\right) \cdot \frac{t\sigma_{y1}}{h-t} \end{cases} \quad (3)$$

第 2 层初始残余应力为式(4)。

$$\begin{cases} \sigma_{x2} = \sigma_{x2} - \Delta\sigma_{x1-2} \\ \sigma_{y2} = \sigma_{y2} - \Delta\sigma_{y1-2} \end{cases} \quad (4)$$

则连续去除毛坯内部第  $i+1$  层的初始残余应力为式(5)。

$$\begin{cases} \sigma_{x(i+1)} = \sigma_{xi} - \Delta\sigma_{xi-(i+1)} \\ \sigma_{y(i+1)} = \sigma_{yi} - \Delta\sigma_{yi-(i+1)} \end{cases} \quad (5)$$

将剥层试验法测得的初始残余应力数据进行力平衡和力矩平衡处理,得到的坯料初始残余应力沿  $X$ 、 $Y$  方向分布曲线如图 4 所示。利用 Origin 软件对初始残余应力数据进行多峰高斯函数拟合,再用 Fortran 语言将应力函数编入 SIGINI 子程序中,并且在 ABAQUS 中调用此 SIGINI 子程序对工件施加初始残余应力,为实现整体框架薄壁零件敏感区域识别做准备。

### 1.3 整体敏感区域有限元模拟

由于有限元仿真难以实现对大型整体构件的铣削模拟,因此采用生死单元法对零件进行粗加工模拟毛坯去除的过程。尺寸和边界条件如图 5 所示。加工前初始毛坯采用完全约束固定,去除中间部分区域时采用两端固定;去除两侧部分材料时,

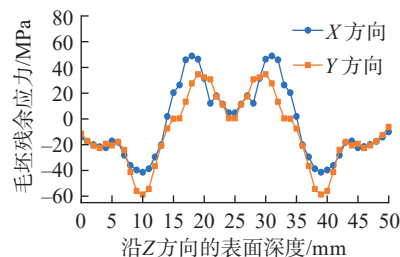


图 4 初始残余应力分布

Fig.4 Initial residual stress distribution

在中间已加工部分进行固定,最后在粗加工完成后采用三点约束法作为边界条件,这种方式完全约束了图5中被约束曲面的6个自由度,在约束刚体的运动同时,工件可以自由变形至新的应力平衡状态。

采用 C3D8R (即六面体线性简化积分)单元类型进行网格划分,对加工区域分别局部细化,共有 732923 个单元和 162054 个节点,全局种子的尺寸为 4 mm,在模型中模拟粗加工过程产生的加工诱发残余应力和各层毛坯初始残余应力的释放。

首先,将剥层试验测得的初始残余应力引入粗加工模型,采用生死单元法对粗加工过程进行模拟,在建模过程中,将模型定义 26 个分析步,每一个分析步对应相应工步所需去除材料的过程。在仿真过程中,上下两层 10 mm 的薄板、上侧的空腔部分以及框架镂空的部分作为去除材料被“杀死”,模拟实际切削时的材料去除过程,构件进行冷却回弹,实现对机身框薄壁构件整体变形敏感区域的预测。

采用三点约束边界条件,建立了框架工件变形预测的分析模型。在框架工件从毛坯到加工成形的过程中,随着材料的大量去除,工件的几何形状和结构刚度也会发生变化。每去除一部分区域,板材内部残余应力场的平衡就会受到影响,此时构件会通过变形来达到新的平衡,因此,使用有限元仿真的方法可以得到敏感区域整体的识别结果。

根据有限元仿真得到的变形结果如图 6 所示,该机身框在粗加工后的敏感区域分布具有明显的规律性。整体变形云图如图 6 (a) 所示,该机身框在材料去除后出现明显的面内与面外的综合变形,最大位移约为 0.245 mm,主要集中在中部 4 个刚度较弱的矩形腔体区域,边缘筋板及装夹区变形较小。由于中部材料去除量大、局部刚度急剧下降,该区域在切削载荷与残余应力释放的共

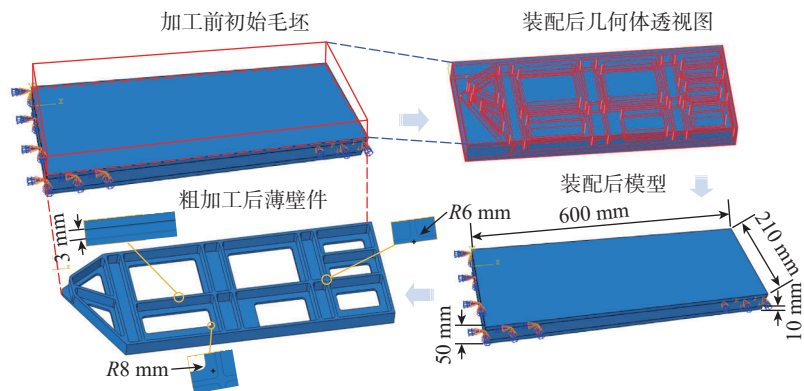


图 5 多工序铣削中不同工序工件的尺寸和边界条件  
Fig.5 Dimensions and boundary conditions of workpieces in different processes during multi-process milling

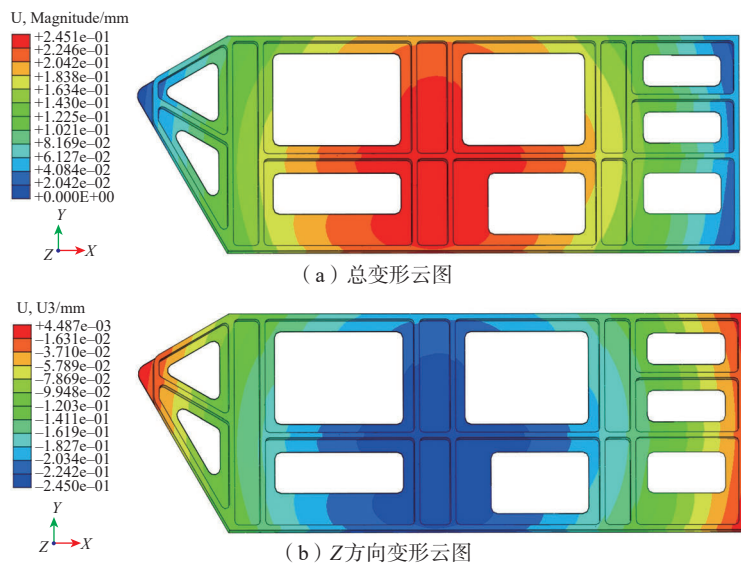


图 6 加工后变形结果  
Fig.6 Deformation result after processing

同作用下形成了位移集中区。Z 方向位移分布 (U3) 如图 6 (b) 所示,变形范围从 -0.245 mm (下凹) 到 0.00449 mm (上凸),揭示了零件在厚度方向发生“中部下凹、两侧上翘”的典型翘曲特征总体趋势。中部最大下凹值为 -0.245 mm,两端略呈上翘变形趋势。其形成机理主要包括 2 个方面:中部结构等效弯曲刚度减小,导致在相同残余应力作用下产生更大 Z 方向位移;装夹约束的非对称分布使残余应力再分布,从而在两端产生反向翘曲。综上所述,零件的主要变形来源于中部刚度减弱、残余应力释放不均,导致加工后整体下凹

和两端翘曲,已超过常规航空框架类构件装配公差范围。为抑制此类变形,可在中部区域采用分区装夹与对称加工策略,并通过优化刀具路径与热传导条件以均化应力分布,从而提高加工尺寸稳定性。

## 2 局部薄壁构件变形敏感区域识别

### 2.1 材料模型

#### 2.1.1 本构模型

在铣削仿真中,Al7075-T6 铝合金材料的高应变率塑性变形、切削热积累以及切屑分离行为对加工变形的影响至关重要。同时高速切削涉

及惯性冲击、材料的温升和断裂失效等多物理场问题。为表征 Al7075-T6 铝合金材料在高应变率、大变形及温度敏感条件下的材料动态力学行为,可采用 Johnson-Cook 本构模型。该模型通过将材料流动应力分解为应变硬化、应变率强化和热软化 3 个独立效应相乘的形式来描述材料的弹塑性响应。

$$\sigma = \sigma_h \cdot \sigma_e \cdot \sigma_t \quad (6)$$

式中,  $\sigma_h$  为对应材料的应变硬化;  $\sigma_e$  为应变率强化;  $\sigma_t$  为热软化效应。应变硬化项通常通过准静态拉伸试验标定,反映材料在塑性变形中的硬化行为,应变率强化项描述了材料对应变速率的敏感性,其系数需通过动态试验确定,热软化项量化了温度升高导致材料软化效应,参数  $m$  通过高温压缩或拉伸试验拟合<sup>[29]</sup>。

$$\sigma_h = (A + B\varepsilon^n) \quad (7)$$

$$\sigma_e = \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (8)$$

$$\sigma_t = \left(1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m \quad (9)$$

式中,  $A$  为准静态初始屈服应力;  $B$ 、 $n$  分别为应变硬化模量与指数;  $C$  为应变强化系数;  $m$  为温度软化指数;  $\varepsilon$  为等效塑性应变;  $\dot{\varepsilon}$  为应变率;  $T_m$  为熔点;  $T_r$  为室温。该模型能够反映热力耦合下的应力应变及损伤分布等问题,综合考虑了材料的应变硬化、应变率强化和热软化效应的耦合作用,其本构方程<sup>[29]</sup>可表示为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \left[1 - (T^*)\right]^m \quad (10)$$

$$T^* = \begin{cases} 0 & T < T_r \\ \frac{T - T_r}{T_m - T_r} & T_r \leq T \leq T_m \\ 1 & T \geq T_m \end{cases} \quad (11)$$

### 2.1.2 损伤模型

对于切屑的分离准则有物理分

离和几何分离准则(损伤破坏),尤其是金属材料,Johnson-Cook 损伤模型可以准确反映金属切削时的残余应力情况,考虑了损伤演化过程中的应力状态、应变状态及温度可表示为式(12)<sup>[30]</sup>。

$$\varepsilon_f = \left[ d_1 + d_2 \exp(d_3 \eta) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 + d_5 \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (12)$$

式中,  $d_1$ - $d_5$  为损伤常数。

此外, Johnson-Cook 损伤模型还引入失效准则,以描述材料在切削过程中的断裂行为<sup>[30]</sup>。

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (13)$$

式中,  $D$  为损伤变量;  $\Delta \varepsilon$  是单位积分点等效塑性应变的增量;  $\varepsilon_f$  为临界断裂应变。当单元应变达到损伤起始点,单元发生失效并删除,单元标量损伤参数  $D=1$ 。在损伤失效阶段,标量损伤参数  $D>1$ 。

Al7075-T6 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型参数如表 3 所示<sup>[31]</sup>。

Al7075-T6 铝合金的热学与力学性能材料参数见表 4 所示<sup>[31]</sup>。

表 3 和 4 中的 Johnson-Cook 强度模型及损伤模型参数来源于文献 [31] 中材料开展准静态及高应变率拉伸/压缩试验,并结合不同温度和应力三轴度条件下的断裂行为,回归标定了 Johnson-Cook 本构常数

$A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$  及损伤常数  $d_1$ - $d_5$ , 已被多项相关研究用于 7075-T6 合金的冲击与切削数值模拟,验证了其精度与可靠性。本文所用 7075-T6 铝合金在牌号、化学成分及 T6 热处理制度上与文献 [31] 中所使用材料一致,且半精加工切削工况处于其参数标定的适用范围内,因此采用该组 Johnson-Cook 参数作为本研究材料模型的输入。

### 2.2 局部敏感区域切削有限元模拟

在完成整体粗加工阶段的变形敏感区域识别后,本研究进一步对半精加工阶段典型特征区域建立局部有限元仿真模型。由于框架类的薄壁构件尺寸较大及存在框架类薄壁构件结构复杂特点,若按原尺寸进行仿真,需要生成大量的网格,不仅计算庞大且难以兼顾仿真精度。因此,为了建立从整体到局部敏感区域的耦合关系,在整体敏感区域粗加工结束后,通过后处理导出工件的节点编号、位移及应力等信息,随后用 Python 读取这些节点数据,其中包括单元的节点号、 $X$  方向、 $Y$  方向和  $Z$  方向的位移和应力信息。并将其与局部模型的部件名、分析步及节点集相对应,施加相应的位移载荷与应力,实现从整体模型到局部模型的场变量映射。对侧壁区域进行半精加工条件下的局部切削模拟。

图 7 所示为局部特征提取出的精加工切削装配体。由于边界条件定义对反映真实工况十分关键,而大型

表 3 Al7075-T6 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型参数<sup>[31]</sup>

Table 3 Johnson-Cook constitutive model parameters for Al7075-T6 aluminum alloy<sup>[31]</sup>

参数	$A$ /MPa	$B$ /MPa	$C$	$n$	$m$	$T^*$
参数值	546	678	0.036	0.71	1.56	600

表 4 Al7075-T6 铝合金的 Johnson-Cook 本构剪切失效准则<sup>[31]</sup>

Table 4 Johnson-Cook constitutive shear failure criterion for Al7075-T6 aluminum alloy<sup>[31]</sup>

参数	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
参数值	-0.068	0.451	-0.952	0.036	0.697

零部件的仿真计算量巨大,且难以调试模型,故截取部分工件,工件约束采用对称约束,底面限制工件的6个自由度。划分单元后的网格划分薄壁结构如图8所示,工件单元类型采用C3D8RT,共有304830个单元和293246个节点,使用减缩积分。

切削刀具采用直径为8 mm的三刃硬质合金立铣刀,螺旋角为45°,前角为10°。铣刀定义为离散刚体,由R3D3网格元素划分,共有4383个单元和2538个节点。铣削为高速旋转运动,刀具与工件之间产生摩擦生热,故分析类型采用Abaqus中的Explicit模块。

基于上述半精加工阶段的局部仿真,本文进一步通过正交试验与极差分析,对切削参数进行优化,以实现变形敏感区域的局部特征识别。

### 2.3 试验验证

为了验证基于有限元仿真的加工变形敏感区域识别预测模型,设计了一项铣削试验。铣削加工试验现场如图9所示,使用数控立式铣床(型号VMC850Q,沈阳机床股份有限公司),毛坯尺寸为30 mm × 125 mm × 160 mm的Al7075-T6铝合金,粗加工半精加工的切削参数如表1所示。刀具选用直径为8 mm的三刃硬质合金立铣刀。

为了验证薄壁件铣削加工有限元模型对薄壁件敏感区域的预测效果,取薄壁腔体底面左下角点为坐标原点O(0,0,0),采用如图10所示的三坐标测量仪器(型号EXPLORER CLASSIC,海克斯康制造智能事业部)对薄壁件侧壁处的变形进行测量。其中,加工后各测量点坐标的实测值与3个方向的设计坐标的标准值之差即为构件在各个方向上的变形值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 工艺参数优化

为进一步降低框架薄壁构件在

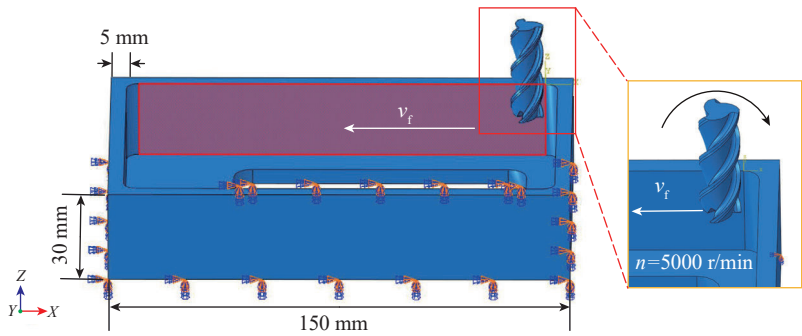


图7 工件侧铣装配模型

Fig.7 Workpiece side milling assembly model

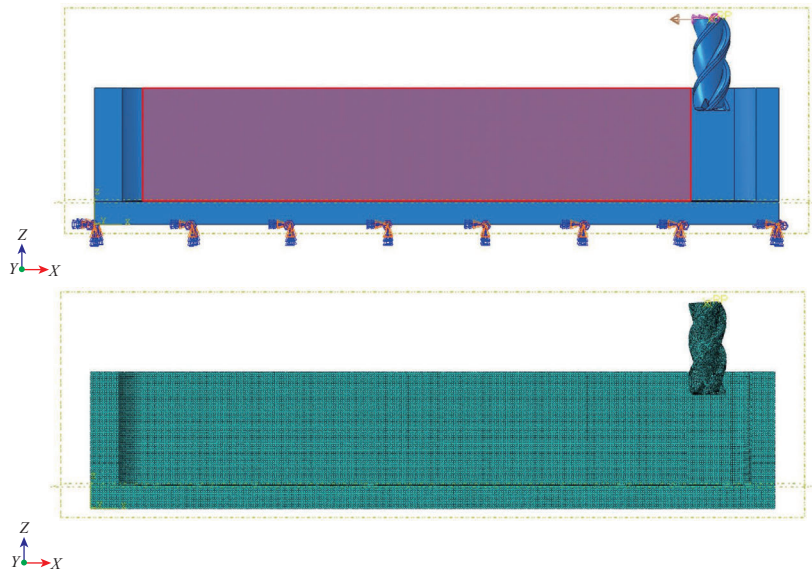


图8 薄壁件和铣刀装配与网格划分

Fig.8 Assembly and mesh generation of thin-walled parts and milling cutters

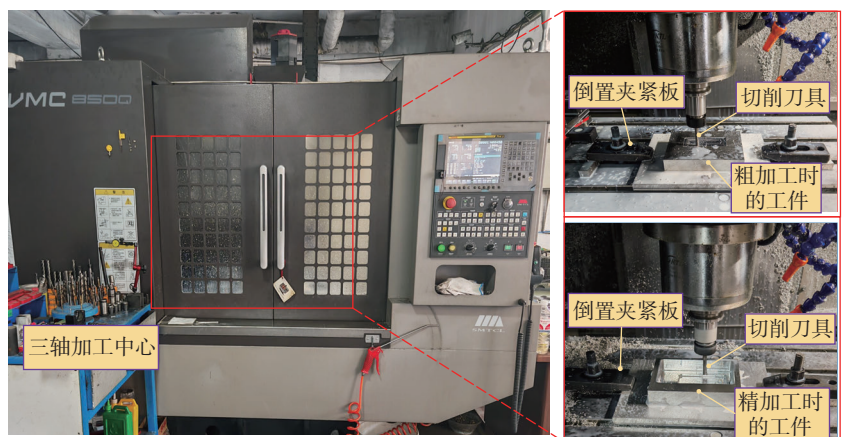


图9 试验加工现场图

Fig.9 Diagram of test processing field

半精加工阶段的变形量,本文在前文描述的局部有限元仿真结果的基础上进行了铣削参数优化设计,优化方

法为确定优化参数、约束条件以及目标变量,并进行正交试验表设计,通过有限元仿真获取数据,将正交试验

数据进行极差分析,实现单目标参数组合优化。

将薄壁件加工铣削参数中的径向切深,轴向切深以及每齿进给量作为优化参数,研究切削参数与薄壁件加工变形之间的关系,设计了三因素三水平的正交试验 $L_9(3^3)$ 对铣削参数进行仿真分析,正交试验各参数如表5所示。

对正交试验的9组参数进行薄壁件侧壁铣削仿真模拟后,正交试验方案及仿真模拟结果得到的薄壁件Y方向侧壁最大变形值如表6所示。

表7列出了正交试验数据的极差分析表。每齿进给量 $f_z$ 、径向切深 $a_e$ 和轴向切深 $a_p$ 分别用A、B和C表示, $K_1, K_2, K_3$ 为各因素在不同水平下响应值的平均值, $R$ 为极差。选取局部铣削加工侧壁变形云图如图11所示点5~8位置的变形量作为评价指标。这4个点均位于侧壁最大挠曲区域,是整体与局部仿真预测的敏感集中区域,能充分代表侧壁在切削载荷作用下的峰值变形特征。同时4个点沿高度方向呈连续分布,可反映侧壁变形从上部至中部的变化趋势。极差分析结果表明,各点的变形量随工艺参数变化的敏感性不同,其中轴向切深C的极差值普遍大于进给速率A和径向切深B,说明轴向切深对薄壁件加工变形的影响最显著;进给速率次之,而径向切深的影响相对较小。切削参数每齿进给量 $f_z$ ,轴向切深 $a_p$ ,径向切深 $a_e$ 对Al7075-T6薄壁件加工变形量影响程度的顺序为 $a_p > f_z > a_e$ 。

进一步比较各因素水平的K值可以得到,进给速率在 $A_1$ 水平时,薄壁件的平均变形量最小;径向切深在 $B_2$ 水平时变形量较小,适中的切宽可在保证去除效率的同时减轻局部载荷集中;而轴向切深在 $C_2$ 水平时平均变形量最低,适中的切深既能降低切削热积累又能避免残余应力过度集中。因此,综合分析得到一组

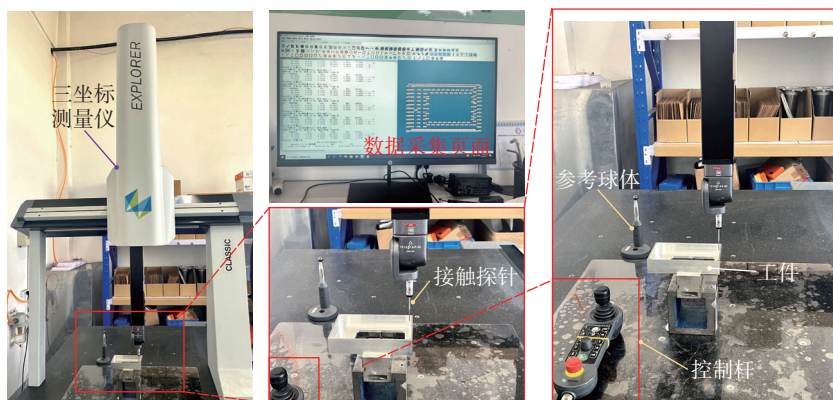


图10 变形测量图  
Fig.10 Chart of deformation measurement

表5 薄壁件铣削参数正交试验表

Table 5 Orthogonal test table for milling parameters of thin-walled parts

水平	主轴转速 $n$ / (r/min)	每齿进给量 $f_z$ / (mm/z)	径向切削深度 $a_e$ / mm	轴向切削深度 $a_p$ / mm
1	5000	0.06	0.3	5
2	5000	0.07	0.5	6
3	5000	0.08	0.7	7

表6 正交试验设计方案及仿真结果

Table 6 Orthogonal test design scheme and simulation results

水平	主轴转速 $n$ / (r/min)	每齿进给量 $f_z$ / (mm/z)	切削宽度 $a_e$ / mm	切削深度 $a_p$ / mm	Y方向最大变形量 / mm
1	5000	0.06	0.3	5	0.056
2	5000	0.06	0.5	7	0.087
3	5000	0.06	0.7	6	0.063
4	5000	0.07	0.3	7	0.105
5	5000	0.07	0.5	6	0.0198
6	5000	0.07	0.7	5	0.069
7	5000	0.08	0.3	6	0.053
8	5000	0.08	0.5	5	0.0987
9	5000	0.08	0.7	7	0.198

对变形量影响最小的工艺参数组合 $A_1 B_2 C_2$ 。

### 3.2 试验结果分析

本研究中,在零件侧壁纵坐标每隔6mm的位置取10个测量点,对比有限元仿真与试验测量的结果,以表征薄壁件铣削过程中的变形规律及其敏感区域特征。以主轴转速为5000 r/min,每齿进给量为0.08 mm/z,

径向切深为0.5 mm,轴向切深为5 mm的半精加工参数进行切削有限元模拟,对其变形情况进行分析。如图11所示,仿真结束后较大变形出现在沿X轴方向较长侧壁中部区域。从图11云图上可以看出,薄壁件侧壁在铣削加工后出现明显的弹性回弹与整体翘曲变形特征:在结构件顶部区域出现最大位移,越靠近腔体

表 7 极差分析表  
Table 7 Range analysis table

编号		A	B	C
1		A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>
2		A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>
3		A <sub>1</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>
4		A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
5		A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
6		A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>
7		A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>
8		A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>
9		A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>
点 1	K <sub>1</sub>	0.0532458	0.06611	0.057136
	K <sub>2</sub>	0.05619598	0.05743	0.050809
	K <sub>3</sub>	0.08606963	0.07198	0.087567
	R	0.0328238	0.0146	0.03676
点 2	K <sub>1</sub>	0.05313947	0.06368	0.055791
	K <sub>2</sub>	0.05958963	0.06098	0.050768
	K <sub>3</sub>	0.0817173	0.06979	0.087888
	R	0.0285778	0.0088	0.03712
点 3	K <sub>1</sub>	0.0542256	0.06795	0.05799
	K <sub>2</sub>	0.06085687	0.0631	0.053602
	K <sub>3</sub>	0.0926992	0.07673	0.096189
	R	0.0384736	0.0136	0.04259
点 4	K <sub>1</sub>	0.0566239	0.07158	0.074573
	K <sub>2</sub>	0.07088175	0.06544	0.054308
	K <sub>3</sub>	0.10642223	0.09691	0.105048
	R	0.0497983	0.0315	0.05074

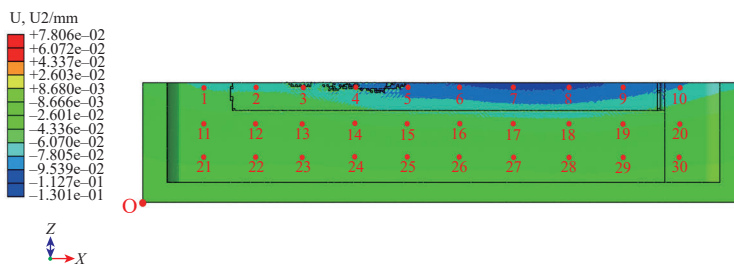


图 11 铣削加工侧壁变形仿真云图

Fig.11 Simulation cloud map of sidewall deformation during milling processing

底部位置及侧壁两端的变形量越小，这是因为薄壁件侧壁顶部中间位置的刚度较小，随着高度的增加，壁厚减小导致薄壁易发生挠曲变形，在侧壁两端由于圆角的支撑，刚度较小，从而越容易产生变形敏感区域，腔体

底部由于腹板和侧壁形成了拐角结构，因此刚度相对较大。

将仿真得到的变形结果按均匀分布的 30 个测量点位置进行变形量的路径提取，每行取 10 个点，并以图 12 进行定量对比分析得到：在坐标 Z=24 mm 截面，Y 向最大变形量达到 0.0987 mm；在坐标 Z=18 mm 截面，最大变形量为 0.046 mm；而在坐标 Z=12 mm 截面，最大变形量为 0.017 mm。变形沿高度方向呈现出“上大下小”的规律，顶部变形幅值显著高于中部与下部。这一趋势与仿真中敏感区域定位相吻合，说明有限元模型对薄壁件侧壁敏感区域具有较好的识别性。在空间分布特征和相对变化趋势上，不同位置的变形保持一致性，进一步验证了仿真结果在敏感区域识别方面的有效性。

优化后参数的铣削仿真结果如图 13 所示，综合极差分析结果表明，三因素对薄壁件变形得到的最优工艺参数组合为 A<sub>1</sub> B<sub>2</sub> C<sub>2</sub>，即适宜进给速率 - 中等切宽 - 浅切深，可以在降低切削力峰值的同时有效抑制切削热与残余应力的累积作用，从而有效减小薄壁件在铣削过程中的变形，提高加工稳定性和成形精度。其原因在于进给速率直接决定了刀齿与工件接触时的切削力与切削热耦合状态，过高的进给速率会导致切削力急剧上升，引起侧壁的弹性屈曲和塑性变形从而产生较大挠度；过低的进给速率则会延长切削时间，导致切削热在工件内部累积，诱发热残余应力。径向切深影响刀 - 工接触弧长和受力分布，过大切深会使局部载荷集中，导致侧壁刚度不足区域变形加剧，而适中的切宽可在保证材料去除效率的同时降低变形。轴向切深主要通过切削区热积累和残余应力传递影响挠度，较小的单次走刀切削深度有利于降低应力集中效应，避免侧壁因残余应力。

将薄壁件较长侧壁上 10 个测量

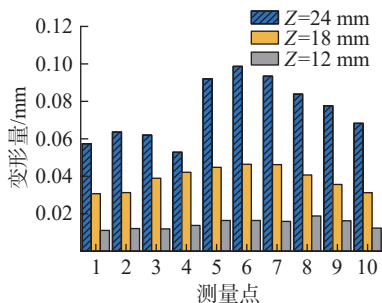


图 12 铣削加工侧壁不同位置变形仿真云图

Fig.12 Simulation cloud map of sidewall deformation in different positions during milling processing

点的仿真、试验和优化后的变形值分别进行数据提取得到如图 14 所示结果。根据工件结构和切削方向,可能发生最大变形的位置为点 5~8 的位置。图 14 中显示点 5~8 的变形预测值分别为 0.09205 mm、0.0987 mm、0.09347 mm 及 0.08388 mm。点 5~8 的试验测量值分别为 -0.094 mm、-0.095 mm、-0.078 mm 和 -0.067 mm。试验结果与仿真结果的变形趋势一致,验证了受薄壁结构影响时点 5~7 的刚度最弱,处于敏感区域分布位置。将 10 个测量点仿真结果与试验测量结果的变形误差进行计算并求平均值,仿真与试验测量值之间的变形误差为 22.42%。

优化后的铣削参数在仿真模拟结果数据中可以得到最大变形位置集中在点 5~7 的位置,其优化后仿真变形预测结果分别为 0.04645 mm、0.05289 mm 和 0.04503 mm,相较于优化前仿真结果的变形量分别减少了 49.53%、46.41% 和 51.82%,其中最大变形量减少了 46.41%,满足实际加工需求。综上所述,薄壁件在铣削过程中最显著的变形敏感区域位于腔体顶部,该部位不仅在仿真中表现为最大 U2 位移区,在试验中也对应着最高的  $\mu\text{m}$  级变形值。该区域应作为工艺规划与参数优化中的重点关注部位,通过改变装夹方式、优化切削顺序、减小径向切宽或引入多道次轻切削等方法,降低上缘的过度

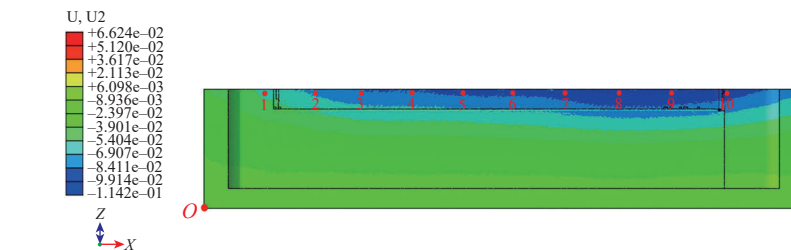


图 13 优化后铣削加工侧壁变形仿真云图

Fig.13 Optimized milling machining sidewall deformation simulation cloud map

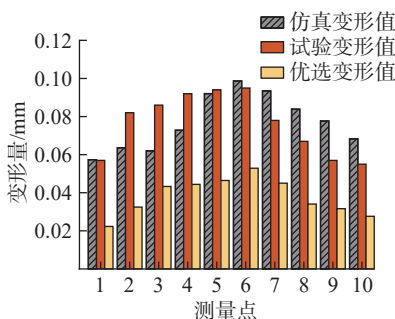


图 14 薄壁件较长侧壁 Y 方向仿真与试验变形值

Fig.14 Simulation and experimental deformation values in the Y direction of longer side wall of thin-walled components

变形风险,从而提升整体加工精度与稳定性。

#### 4 结论

本文针对大型框架类薄壁零件在铣削半精加工过程中发生的变形问题,基于有限元仿真技术,采用生死单元技术建立了从毛坯到工件的材料去除模型,提出了由整体到局部的变形敏感区域识别方法,并且结合正交试验实现了工艺参数优化,得出以下主要结论。

(1) 构建了基于生死单元技术的框架薄壁构件有限元模型,通过导入初始残余应力实现了整体式机身框薄壁零件的材料去除,并确定了整体框架的敏感区域主要分布在构件中央部位刚度较弱区域。

(2) 根据整体构件仿真结果提取出变形最大的区域,使模型获取局部特征与真实边界条件,进而准确识别局部敏感区域。局部铣削仿真结果表明,侧壁变形沿高度方向呈“上

大下小”趋势,与整体仿真和试验测量结果相吻合。

(3) 通过三因素三水平正交仿真试验与极差分析,定量揭示了各工艺参数对变形的影响顺序为轴向切深  $a_p >$  每齿进给量  $f_z >$  径向切深  $a_e$ 。得到薄壁件敏感区域最小的工艺参数组合: 径向切深  $a_e=0.5 \text{ mm}$ 、轴向切深  $a_p=6 \text{ mm}$ 、每齿进给量  $f_z=0.06 \text{ mm/z}$ ,最大变形量降低了 46.41%,为框架类薄壁构件的铣削工艺优化提供可靠的依据。

#### 参考文献

[1] GE S Y, ZENG J L, WANG K, et al. A force-induced deformation prediction method without iteration considering the instantaneous undeformed chip thickness update for thin-walled part in flank milling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 154: 134-149.

[2] 岳启旭, 周天祥, 秦怡源, 等. 航空航天薄壁件铣削过程加工状态监测研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(3): 30-43.

YUE Caixu, ZHOU Tianxiang, QIN Yiyuan, et al. Research progress of machining condition monitoring in milling process of aerospace thin-walled parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(3): 30-43.

[3] 易守华. 航空铝合金弱刚性薄壁件切削变形预测及抑制方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.

YI Shouhua. Research on cutting deformation prediction and suppression methods of aviation aluminum alloy weak rigid thin-walled parts[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[4] 张瑞, 任军学, 张淑宁, 等. 薄壁结构加工误差预测与控制研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(7): 77-95.

- ZHANG Rui, REN Junxue, ZHANG Shuning, et al. Research progress on prediction and control of machining errors in thin-walled structures[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(7): 77–95.
- [5] 岳景龙, 孙兴伟, 赵泓荀, 等. 航空铝合金 7075 薄壁件铣削形变量与表面缺陷综合控制[J]. *制造技术与机床*, 2025(8): 163–171.
- YUE Jinglong, SUN Xingwei, ZHAO Hongxun, et al. Comprehensive control of deformation and surface quality in milling of aerospace aluminum alloy 7075 thin-walled parts[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2025(8): 163–171.
- [6] 刘述明, 扈博琴, 张春龙, 等. 基于浮动装夹自适应加工工艺的薄壁件加工变形控制技术[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(3): 70–77.
- LIU Shuming, HU Boqin, ZHANG Chunlong, et al. Research on deformation control technology of thin-walled parts based on floating clamping adaptive processing technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(3): 70–77.
- [7] 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.
- LI Zhongqun, DING Peng, YANG Yu, et al. Research progress on cutting technology of aviation thin-walled parts[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(7): 38–53.
- [8] 马伟. 航空铝合金薄壁件切削过程及加工变形仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- MA Wei. Simulation analysis of cutting process and machining deformation of aviation aluminum alloy thin-walled parts[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [9] 马嘉恒, 张生芳, 石鸿瑞, 等. 基于固有应变法的中空薄壁铝合金结构件焊接变形及残余应力预测[J]. *制造技术与机床*, 2024(5): 187–192.
- MA Jiaheng, ZHANG Shengfang, SHI Hongrui, et al. Welding deformation and residual stress prediction of hollow thin-walled aluminum alloy structural parts based on inherent strain method[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2024(5): 187–192.
- [10] 黄康华, 谢雨良, 徐志鹏, 等. 铝合金框梁零件加工变形仿真与预变形装夹技术[J]. *机械科学与技术*, 2025, 44(1): 92–99.
- HUANG Kanghua, XIE Yuliang, XU Zhipeng, et al. Simulation of machining deformation and pre-deformation clamping technology for aluminum alloy frame beam parts[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2025, 44(1): 92–99.
- [11] LI W D, MA L X, WAN M, et al. Modeling and simulation of machining distortion of pre-bent aluminum alloy plate[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 189–199.
- [12] 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.
- [13] ZHENG J Y, VOYLE R, TANG H P, et al. Study of distortion on milled thin-wall aluminum parts influenced by initial residual stress and toolpath strategy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(1): 237–251.
- [14] MADARIAGA A, PEREZ I, ARRAZOLA P J, et al. Reduction of distortions in large aluminium parts by controlling machining-induced residual stresses[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1): 967–978.
- [15] ZHANG Y B, BAI Q S, QING L B, et al. 3D coupled thermo-mechanical simulation of surface roughness and residual stress in end milling aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(11): 4489–4504.
- [16] CHEN Z L, WANG Q L, WANG X X, et al. Size sensitivity of residual stress and deformation in co-curing process of T-stiffened composite skin assembly[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(19–20): 947–956.
- [17] 范志强. 薄壁回转体零件加工变形仿真及控制技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- FAN Zhiqiang. Research on machining deformation simulation and control technology of thin-walled rotary parts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [18] 罗宇. 大型薄壁件加工变形预测及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- LUO Yu. Research on machining deformation prediction and influencing factors of large thin-walled parts[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [19] FANG Z, QIAN S Y, WANG C H, et al. Milling deformation prediction for thin-walled components based on fusion model[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 135(7): 3437–3449.
- [20] MADARIAGA A, ORTIZ-DE-ZARATE G, WARRAICH Z Y, et al. A simplified numerical model to predict geometrical distortions of thin-walled aluminum airframe components[J]. *Procedia CIRP*, 2025, 133: 543–548.
- [21] 薛迪. 大型回转体薄壁件加工变形仿真及切削参数优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- XUE Di. Research on machining deformation simulation and cutting parameter optimization of large rotary thin-walled parts [D]. Changchun: Jilin University, 2025.
- [22] 包亮亮. 飞机隔框铣削加工工艺与变形控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- BAO Liangliang. Research on milling process and deformation control of aircraft frame[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [23] LIU C H, CHEN S, HUANG J Q. Machine vision-based object detection strategy for weld area[J]. *Scientific Programming*, 2022, 2022: 1188974.
- [24] LI W F, REN J X, SHI K N, et al. Flexibility prediction of thin-walled parts based on finite element method and K–K–CNN hybrid model[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(11): 6131–6143.
- [25] GAO H J, LI X, WU Q, et al. Effects of residual stress and equivalent bending stiffness on the dimensional stability of the thin-walled parts[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(7): 4907–4924.
- [26] TIAN W J, REN J X, WANG D Z, et al. Optimization of non-uniform allowance process of thin-walled parts based on eigenvalue sensitivity[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5): 2101–2116.
- [27] 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.

[28] BOLAR G, JOSHI S N. 3D finite element modeling of thin-wall machining of aluminum 7075-T6 alloy[C]. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014). Guwahati: Engineering, Materials Science, 2014.

[29] 刘良宝, 孙剑飞, 陈五一, 等.

7075T651 铝合金板材内部初始残余应力分布研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(4): 537-543.

LIU Liangbao, SUN Jianfei, CHEN Wuyi, et al. Study on distribution of initial residual stress in 7075T651 aluminium alloy plate[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(4): 537-543.

[30] JOHNSON G R, COOK W H.

Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

[31] BRAR N S, JOSHI V S, HARRIS B W. Constitutive Model Constants for Al7075-T651 and Al7075-T6[J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1195(1): 945-948.

## Research on Identification and Prediction of Deformation Sensitive Region of Frame Type Thin-Walled Parts Based on Finite Element Simulation

YUE Caixu, LIU Xiaoqi, WANG Le, HU Desheng, LIU Xianli

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**[ABSTRACT]** To address the deformation problem that occurs in the semi-finishing stage of large-scale frame-type thin-walled parts, this study employs the ABAQUS finite element software and adopts the element birth and death method to simulate their cutting deformation process, conducts in-depth research on the maximum deformation area, and achieves accurate identification and prediction of deformation-sensitive areas from the overall to the local level during processing. Results show that the deformation follows a “larger at the top and smaller at the bottom” pattern along the height direction with the maximum deformation occurring at the top, and through orthogonal experiments and range analysis on the combinations of radial cutting width, axial cutting depth, and feed per tooth, the optimized parameter combination is obtained as follows: radial cutting depth  $a_e=0.5$  mm, axial cutting depth  $a_p=6$  mm, and feed per tooth  $f_z=0.06$  mm/z, which reduces the local maximum deformation by 46.41% compared with traditional milling parameters. This method can effectively improve the accuracy of identifying sensitive areas of thin-walled components, providing important theoretical support and guidance for the efficient and low-loss machining of large-scale frame-type thin-walled parts and the optimization of process parameters.

**Keywords:** Thin-walled parts; Processing deformation; Sensitive area identification; Residual stress; Finite element simulation

(责编 晓月)