

薄壁零件加工残余应力变形预测及控制技术 研究现状

段士伟¹, 李 萍¹, 康敬波¹, 崔敏超², 池亚达²

¹中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西 西安

²西北工业大学机电学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年11月21日; 录用日期: 2022年12月17日; 发布日期: 2022年12月22日

摘 要

薄壁零件的加工质量直接影响航空、兵器等国防工业高端装备的服役性能。然而, 作为典型的弱刚度零件, 在整个制造流程中因残余应力引入会导致的严重加工变形, 难以满足制造精度及质量的要求。本文在分析残余应力诱导变形产生机理的基础上, 对现有的残余应力变形预测方法进行了分类总结, 阐述了相关方法的特点。同时, 根据变形的主要来源, 从初始残余应力及切削残余应力两个方面对现有的残余应力变形控制方法进行了归纳总结。最后, 对复杂薄壁零件加工残余应力变形及其控制技术的未来研究进行了展望。

关键词

薄壁零件, 残余应力, 变形预测, 变形控制

Research Status of Residual Stress Deformation Prediction and Control Technology for Thin-Walled Parts Processing

Shiwei Duan¹, Ping Li¹, Jingbo Kang¹, Minchao Cui², Yada Chi²

¹AECC Xi'an Power Control Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 21st, 2022; accepted: Dec. 17th, 2022; published: Dec. 22nd, 2022

文章引用: 段士伟, 李萍, 康敬波, 崔敏超, 池亚达. 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. DOI: 10.12677/met.2022.116074

Abstract

The processing quality of thin-walled parts directly affects the service performance of high-end equipment in the defense industry such as aviation and weapons. However, as a typical weak stiffness part, the serious machining deformation caused by the introduction of residual stress in the entire manufacturing process is difficult to meet the requirements of manufacturing accuracy and quality. Based on the analysis of the residual stress-induced deformation mechanism, the existing residual stress deformation prediction methods are classified and summarized in this paper, and the characteristics of the related methods are expounded. At the same time, according to the main sources of deformation, the existing residual stress deformation control methods are summarized from two aspects: initial residual stress and cutting residual stress. Finally, the future research on residual stress deformation and control technology of complex thin-walled parts is prospected.

Keywords

Thin-Walled Parts, Residual Stress, Deformation Prediction, Deformation Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

因切削加工导致的结构变形一直是制造业所面临的一项共性技术难题。由于航空航天、兵器等行业的特殊性,轻质、结构紧凑的薄壁零件被大量应用以实现其产品减重增效的技术目标。在实际应用中,薄壁零件需要很精确的装配定位基准,就意味着薄壁零件需要极高的制造精度。目前,数控加工技术是金属薄壁零件的主要制造技术,是决定其加工质量和效率的关键因素之一,薄壁零件由于形状结构复杂、自身结构刚度弱且分布不均匀,在加工过程中极易发生加工变形,无法保证控制加工精度和加工效率[1]。

加工变形主要由夹紧载荷、切削载荷、及毛残余应力等因素引起[2],作为加工变形的主要原因之一,由残余应力诱导的加工变形是相关领域研究的重点。薄壁零件的残余应力变形主要来源于两个方面,即初始残余应力变形和切削残余应力变形。初始残余应力变形主要是由于自身的初始平衡应力状态被破坏,材料为维持新的平衡应力状态而产生的变形,一般而言初始残余应力的值由上一阶段的加工方式或热处理制度决定,与切削过程无关。切削残余应力变形主要是由于材料去除过程中内部产生内力和内力矩,材料为恢复平衡状态克服内力做功而产生变形。

切削加工中残余应力引起的变形给制造业带来了巨大损失,据统计,欧盟每年在航空制造业中为避免或修复加工变形造成的花费高达数十亿欧元[3]。为了控制薄壁零件的加工变形问题,国内外学者从残余应力的预测、消除以及切削工艺与残余应力的关系等方面展开了大量研究,提出了残余应力预测方法和控制加工变形的相关工艺方法。本文归纳了现阶段残余应力变形预测的主要研究方法,从初始残余应力、加工残余应力及装夹方式三个方面阐述残余应力变形的控制方法,为薄壁零件的高质量加工工艺方法提供一定的参考。

2. 加工残余应力变形预测

零件的加工变形是复杂的耦合问题，需要充分了解加工变形的基本规律，才能提出有效抑制加工变形的措施。根据变形机理，薄壁零件的残余应力变形由始残余应力变形和切削残余应力变形两个部分构成，现有的基于残余应力变形预测的研究中一般将整个加工过程集成考虑，主要的研究围绕解析建模及有限元仿真两类方法展开。

2.1. 基于解析建模方法的残余应力变形预测

通过解析建模的方式对残余应力变形问题进行预测是最为经济、有效的方法，但受限于薄壁零件的复杂的外形特征，直接建立基于残余应力的零件变形预测模型难度较大。Nervi [4]以材料的线弹性理论为基础，提出了如图 1 所示的残余应力变形示意图，建立了基于毛坯初始残余应力的变形预测模型并在 7050 铝合金的薄壁构件上进行了试验验证。指出毛坯初始残余应力对薄壁零件的变形影响并不显著，薄壁零件变形的主要原因是由于机械加工过程引入的切削残余应力，并提出通过机械或化学方法降低切削残余应力以减小零件变形量的薄壁零件加工变形控制思路。

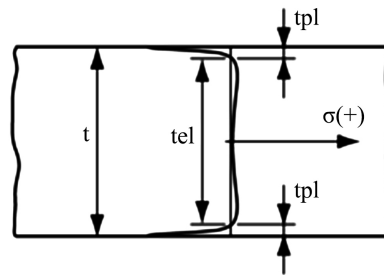


Figure 1. Schematic diagram of residual stress deformation caused by machining [4]
图 1. 加工引起的残余应力变形示意图[4]

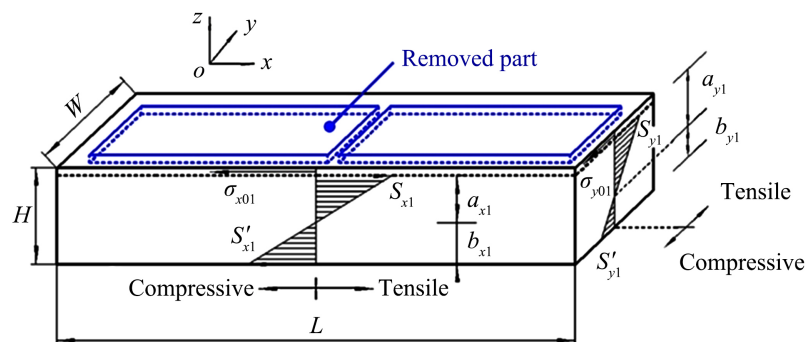


Figure 2. Schematic diagram of stress redistribution after machining [7]
图 2. 加工完成后的应力再分布示意图[7]

Yang [5]通过拟合方法建立了初始残余应力和变形的分析模型，描述了初始残余应力波动程度对加工变形的影响，提出应选择初始残余应力波动幅度较小的毛坯，工件应远离初始残余应力波动幅度较大的初始残余应力区。Gao [6]提出了一种考虑双轴残余应力的板材加工变形分析预测模型，并基于预测模型确定了三种典型加工策略下变形与初始残余应力之间的定量关系。在此基础上，Gao [7]继续发展了基于等效厚度的矩形板料薄壁件加工变形的半解析预测模型，如图 2 所示，但该模型仅适用于单层去除率大于 60% 矩形板坯料加工而成的薄壁零件。王树宏[8]应用弹性力学理论，推导出了基于初始残余应力的

加工变形计算迭代公式和残余应力再分布计算迭代公式,但相关研究结果不适用于薄壁结构件加工。Fergani [9] [10]基于机械力预测和弹塑性松弛过程,通过弹塑性本构行为预测了因残余应力引起的薄板挠度变化,实现了铝合金板材从切削力中卸载时弹性挠度的量化。随后,进一步提出了一种以初始残余应力为输入的铝合金薄壁板状构件的多步加工残余应力变形的预测模型[11]。

2.2. 基于有限元方法的残余应力变形预测

通过解析建模的方法虽然可以更快捷、高效地实现变形预测,但现阶段只适用于板材、环类等简单零件的求解,且模型多基于很多简化假设,不具备一定的工程实用性。实际加工过程为了充分考虑零件的具体结构特点,有限元方法是目前研究残余应力变形预测的主要方式。Wang [12]采用“生死单元法”建立了材料的去除过程的有限元模型,指出材料的变形是材料去除过程中初始残余应力的重新平衡所导致的,该结论与Wei [13]的研究结果相同。Tang [14]建立了考虑毛坯残余应力、切削载荷、夹紧力和加工诱导残余应力等多因素耦合效应的加工变形有限元预测模型,并通过实验证实了模型的可靠性。Bi [15]提出了一种基于物理的材料加工仿真模型,用于预测航空航天整体构件的加工变形。将初始残余应力、切削载荷、夹具、切削顺序和刀具轨迹等关键因素综合引入铣削过程的有限元模型中。基于所建立的有限元模型,对翼梁的铣削过程进行了仿真,成功地实现了翼梁的变形。变形趋势包括弯曲和扭转。在与仿真相同的切削条件下进行了铣削实验,并对弯曲和扭转变形进行了产生和测量。对于畸变,模拟与实验之间的最大差异为19.0%。结果表明,所建立的模型是有效的,可以用来预测加工变形。

为了有效提高加工变形预测的计算效率,降低计算资源和时间成本。Cerutti [16] [17]基于Forge平台自主开发了根据布尔差集运算实现材料的去除的有限元工具来模拟考虑装夹因素的工件随着材料移除的变形行为,布尔运算的原理如图3所示。工具较好的预测了初始残余应力场、装夹方案对工件形位精度和尺寸精度的影响。D'Alvise [18]通过X-FEM和level-set方法模拟了残余应力导致的加工变形,有效提升了模型的计算效率。Ma [19]结合了有限元和理论计算,提出了一种大型薄壁零件加工变形的分析方法,在线弹性范围内实现良好的计算效率和精度。同时指出,虽然材料去除导致的毛坯内初始应力的演变是薄壁部件加工变形的主要原因,但为实现加工变形的准确预测,必须考虑材料去除过程和切削载荷。周金华[20]基于切削残余应力分布的机理分析,建立了工艺参数-表征模型系数-切削残余应力分布的关联模型,采用子程序加载切削残余应力至薄壁件表面,建立了薄壁结构扭曲变形的有限元分析模型。王骏腾[21]针对薄壁件加工残余应力变形,提出了如图4所示的基于工况映射与加工应力场贴合的残余应力变形预测方法,将工件表面按照加工工况不同划分为不同的区域,建立相应的表层薄壳,将加工应力场施加其上,实现了曲面薄壁件铣削残余应力变形的有效预测;在此基础上,设计了标准件,仿真获得了标准件应力场与变形之间的映射关系,基于标准件的加工,进一步提出了基于标准件修正的残余应力变形预测方法,实现了薄壁件铣削残余应力变形的高精度预测。

以上的研究侧重于单一类型残余应力所导致的加工变形,关于两类残余应力对整体加工变形的影响。Huang [22]采用了有限元的方法研究了初始残余应力、切削残余应力及二者耦合作用对三框架整体梁结构变形的影响,其中框架肋骨和底板的厚度为3毫米。变形模拟结果如图5所示,结果表明毛坯初始残余应力是三框架整体梁变形的主要因素,占部件总形变的90%,初始残余应力和加工诱导残余应力的耦合作用加剧了变形。但其[23]对厚度小于1.25 mm的板材进行研究时发现,加工引起的残余应力是导致板材变形的主要原因。Young [24]的研究也指出当零件厚度小于2 mm时,由切削加工引入的加工残余应力是引起加工变形的主要因素。美国的MAI计划和欧盟COMPACT计划中均对这个问题也进行了研究,MAI计划[25]研究认为当工件厚度在3 mm以下时,加工残余应力变形占据主导因素,COMPACT计划[26]则将这个厚度值设定为4 mm。

综上所述，现有的关于残余应力变形预测问题的研究主要围绕加工过程毛坯初始残余应力释放导致的变形及材料去除过程引入的加工残余应力导致的变形两类变形方式展开。在粗加工阶段，毛坯材料被大量去除，加工变形以初始残余应力释放及再分布导致的变形为主；在半精加工、精加工阶段，由于材料的去除量较小，加工变形以加工残余应力引入导致的变形为主。对于薄壁零件而言，加工残余应力层深在零件厚度方向占比较大，此时因材料去除引入的加工残余应力导致的加工变形问题更为突出。

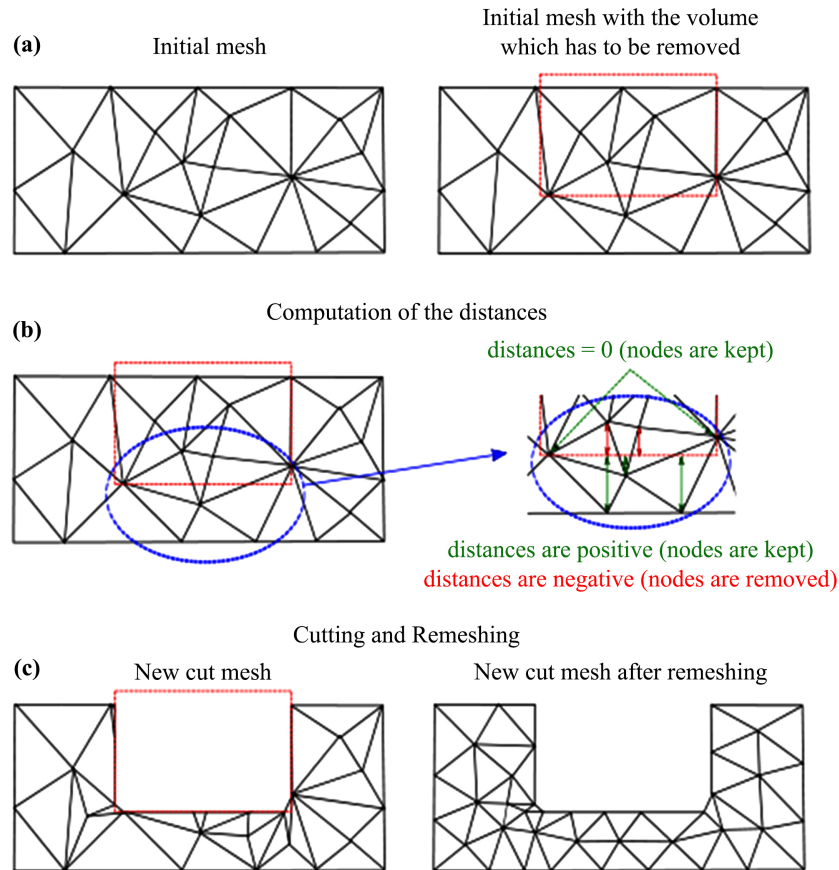


Figure 3. Boolean operation to remove material principle [16]

图 3. 布尔操作去除材料原理[16]

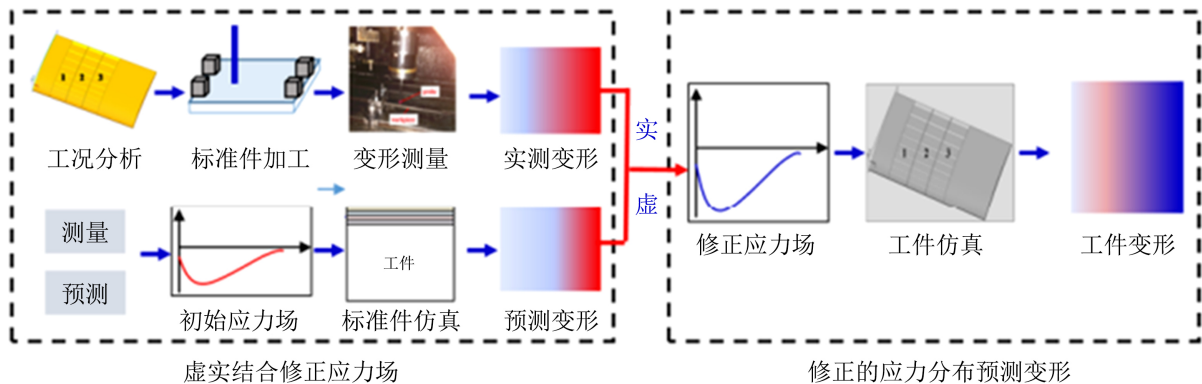


Figure 4. Implementation steps of residual stress deformation prediction method based on standard part correction [21]

图 4. 基于标准件修正的残余应力变形预测方法的实现步骤[21]

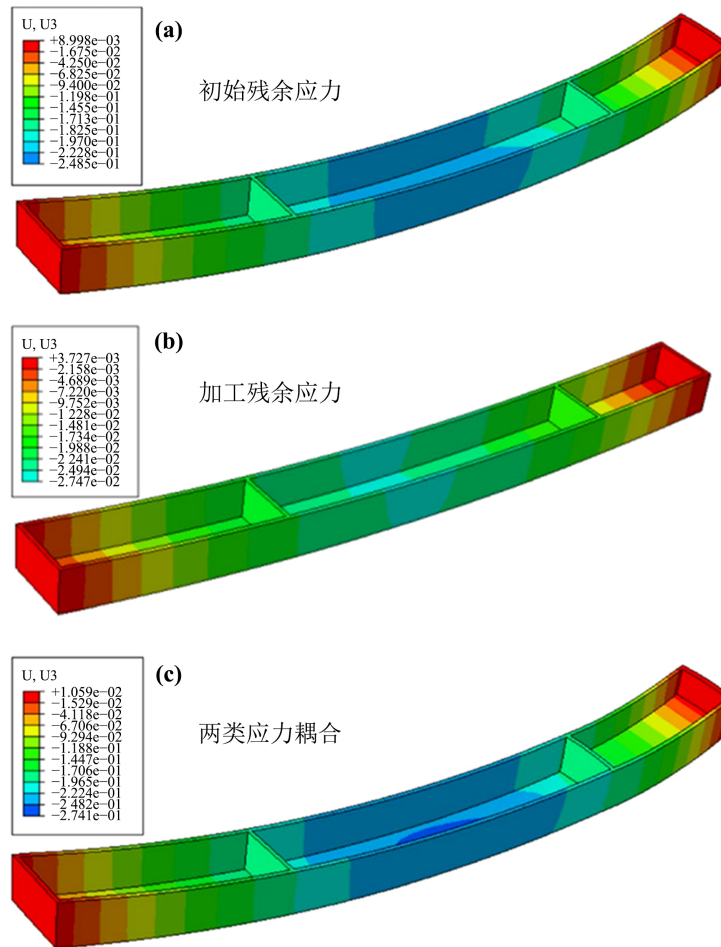


Figure 5. Machining deformation simulation results in different states [22]
图 5. 不同状态的加工变形模拟结果[22]

3. 残余应力变形控制

初始毛坯材料的应力分布及材料的去除过程决定了最终零件的变形程度, 针对加工变形的产生原因, 现有的研究主要围绕毛坯应力状态、加工过程及工件的装夹方式等展开。

3.1. 基于初始残余应力的变形控制

由初始残余应力而诱发的零件变形是随着材料的去除逐渐出现的, 是材料内部平衡应力状态被破坏的结果。由初始残余应力导致的加工变形可归结于两方面, 一方面是初始坯料内部的初始残余应力大小及分布, 这主要取决于坯料加工前的处理工艺; 另一方面是坯料的去除过程, 这主要取决于加工工艺的规划。

改善毛坯内部残余应力状态是一种重要加工变形控制方法, 现阶段通过机械拉伸法及时效方法均可以有效的改善毛坯内部残余应力状态, 机械拉伸过程如图 6 所示。Zhang [27]及 Koc [28]分别基于数学建模及有限元的方法, 印证了通过机械拉伸法消除初始残余应力的有效性, 但机械拉伸法仅适用于板状等形状简单的毛坯。形状复杂的毛坯通常采用时效方法来消除初始残余应力, Husson [29]分析了初始残余应力对齿轮加工变形的影响, 研究表明通过热处理可有效改善半成品的残余应力, 减少了加工变形。Masoudi [30]认为铝合金的初始残余应力主要来源于淬火过程, 通过降低淬火过程中的残余应力是控制薄

壁零件加工变形的关键策略,并通过聚合物淬火的方法有效降低了始残余应力并减小了薄壁圆筒的加工变形。孙杰[31]的研究表明通过时效处理或机械加载的方法消除毛坯初始残余应力或均匀化初始残余应力可以减小零件加工的残余应力变形。Landwehr [32]对不同热处理状态下的 Ti-6Al-4V 合金的加工变形进行了研究,发现低初始残余应力水平所产生的加工变形较小,进一步印证了初始残余应力对加工变形起主导作用。一些其他的研究表明振动时效[33] [34]、冷压缩法[35]及深冷处理[36]均可以有效去除毛坯材料内部的初始残余应力。

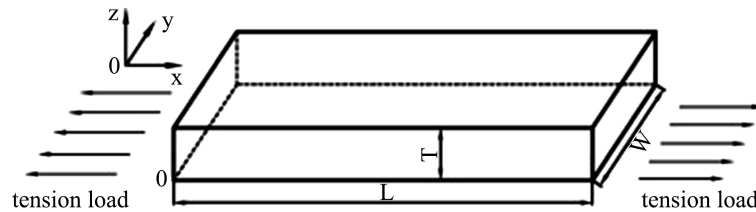


Figure 6. Schematic depiction of quenched aluminum plate to be stretched [27]
图 6. 淬火铝板机械拉伸过程示意图[27]

此外,通过优化材料去除策略是控制加工变形的里一个常用手段,现有的研究多基于加工方法、加工路径及工件位置展开。从加工方法的角度出发,吴红兵[37]、柯烈强[38]等证明了对称铣削加工的工艺方法能有效的减小航空框类整体结构件铣削加工形。武凯[39]在分层对称铣削得基础上提出了阶梯对称铣削加工,与单纯对称加工法相比不仅加工变形小加工效率也能成倍提高 Wu [40]在三级数控加工方法的基础上,利用残余应力的对称分布规律发展了准对称加工方法。结果表明采用准对称加工方法的最大变形值在传统单面加工方法的 20% 以内,有效地减少残余应力引起的变形。从加工路径的角度出发, Yang [41] 基于能量原理建立了加工变形的分析模型并出了一种新的材料去除顺序优化方法,以实现加工变形的最小波动。Fan [42]引入了加工变形稳定性和弯曲势能的概念,通过分析弯曲势能释放,提出了一种如图 7 所示的通过优化材料去除顺序来提高加工变形稳定性的新方法。但是,张以都[43]研究了初始残余应力导致的零件加工变形的特点,采用不同加工路径有限元模拟了航空结构件的初始残余应力变形,结果表明,对于单一残余应力引起的加工变形分析可以忽略加工路径的影响。

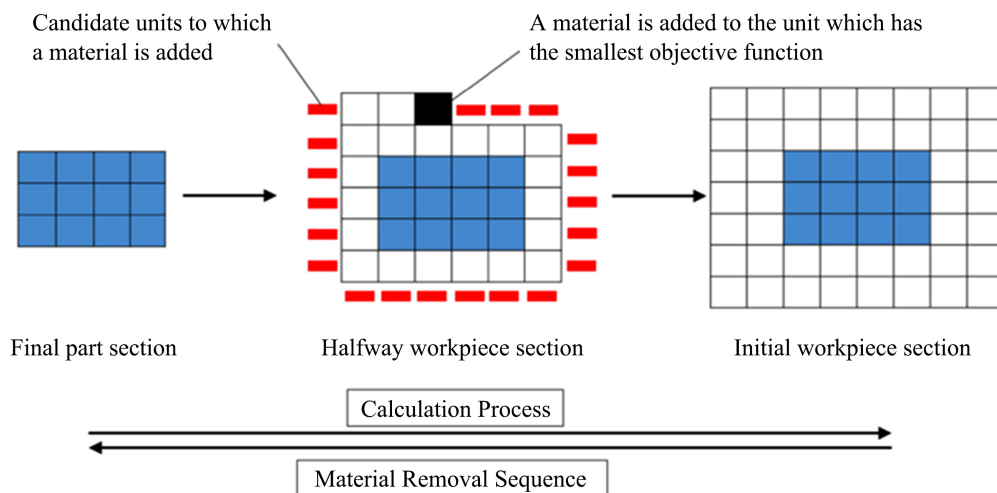


Figure 7. Generation of the optimized material removal sequence [42]
图 7. 生成优化的材料去除顺序[42]

从工件位置的角度出发, Dreier [44]提出通过定制铣削工艺及优化毛坯中零件位置两种最小化零件变形的基本策略来减少由机加工飞机部件的残余应力引起的零件变形, 通过试验获得了如图 8 所示的不同零件位置的残余应力变形量, 验证了其工业应用的潜力。王华敏[45]依据加工变形量最小原则, 建立了零件在毛坯内最佳位置的优化模型, 采用变向迭代法求解加工变形最小的加工策略。王骏腾[21]采用生死单元技术模拟了不同的毛坯余量分布下, 零件加工完成的初始残余应力变形, 提出可以采用毛坯余量优化的策略, 有效控制零件的初始残余应力变形。

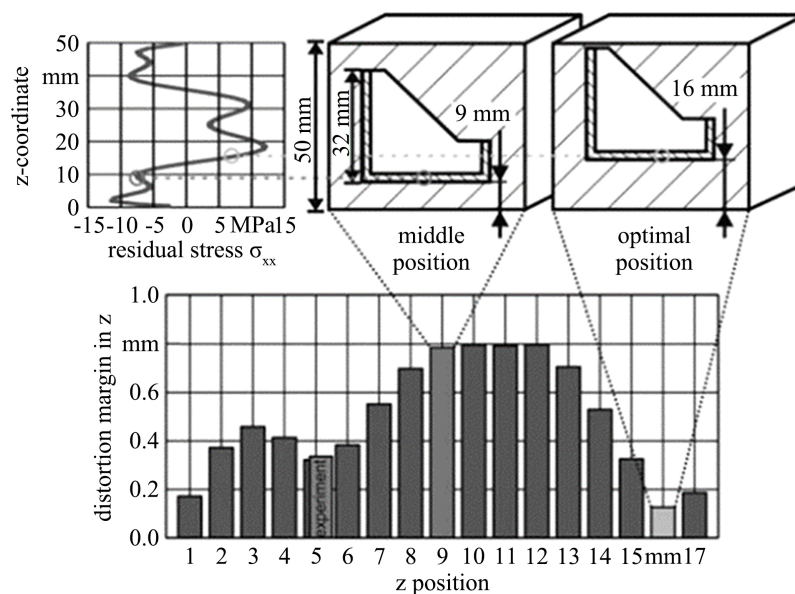


Figure 8. The result of part machining position optimization [44]

图 8. 零件加工位置优化结果[44]

3.2. 基于加工残余应力的变形控制

通过加工工艺参数优化来控制加工表面的残余应力大小及分布, 进而实现加工变形的控制是现阶段基于加工残余应力实现变形控制的主要研究手段。Li [46]通过分析切削深度对残余应力重新分布的影响, 提出了一种优化残余应力分布和大小的加工方法。即在粗加工过程中, 可以通过选择超过最大残余应力深度的切削深度来去除包含主要加工残余应力的材料; 在精加工过程中, 通过不同的切削阶段合理切削深度的规划, 可以获得均匀的残余应力分布, 以实现加工变形的控制。Masoudi [47]研究发现加工过程中切削力和温度的增加会导致加工变形的增加, 其中切削力对工件变形的影响更为显著, 与硬质合金刀具相比, PCD 刀具可以有效降低切削力及切削温度, 有助于减小薄壁工件的加工变形量。刘中海[11]根据有限元结果认为使用较高的切削速度、较小的切削深度和进给量有利于获得高的加工质量, 可对变形进行控制, 并通过试验验证了切削深度对加工变形影响较大。刘海涛[48]模拟了不同加工参数对薄壁回转体零件的加工变形的影响, 发现随着切削速度的增大零件加工变形减小; 随着背吃刀量的增加零件加工变形增大; 随着进给量的增加零件加工变形增大。并以加工效率为优化目标, 以切削加工表面残余应力为约束条件采用遗传算法对切削加工参数组合进行优化。丛靖梅[49]利用支持向量回归机建立了基于切削参数的残余应力变形响应预测模型并根据所建立的预测模型, 采用遗传算法, 以残余应力变形为约束、最大加工效率为目标对薄壁零件的加工工艺参数进行优化, 有效抑制了加工变形。类似的, Xue [50]基于遗传算法和有限元法, 提出了夹紧力和切削参数的同步优化方法。优化目标是最小化最大变形并提高加

工效率。采用遗传算法实现了切削参数的优化。

作为一种高效、高质量的加工方法，通过高速切削技术减少结构件加工变形的方法受到一些学者的关注。高速切削可以有效降低切削过程中的力-热耦合作用，减少加工时产生的弹性变形及热变形，有效保证构件的加工精度。Denkena [51]研究了高速切削加工参数和切削刃几何形状对铝合金工件残余应力的影响，认为切削力与残余应力分布存在一定的关联性，但其研究未考虑切削热的作用，也并未对加工变形进行解释。何宁[52]、付秀丽[53]等提出采用高速切削以协调切削力和零件剩余刚度之间的矛盾，通过降低切削力和切削温度来减少切削残余应力引起的加工变形。沈阳飞机工业集团[54] [55]将高速切削技术成功应用于机翼壁板、翼肋等薄壁构件的生产，与常规加工相比，可以大幅度提升加工效率并有效提升加工精度。

3.3. 基于装夹方式优化的变形控制

通过优化薄壁构件加工过程的装夹方式，间接提高薄壁部位的刚性，减少因局部外力作用导致的弹性变形是基于残余应力控制实现变形控制的另一主要研究手段。郭魂[56]通过有限元技术模拟了拉伸装夹方案对薄壁件加工变形的影响，并在保证已加工表面产生所需残余压应力的前提下，从控制薄壁件加工变形的角度出发，对拉伸装夹方案进行了优化。董辉越[57]提出通过较平均分布的装夹方案可获得比较均布的残余应力和较小的变形。Li [58]介绍了一种如图 9 所示的新的固定方法和柔性夹具的设计，通过控制加工过程中材料应力释放对工件变形的约束，将最终加工变形值可以控制在 0.1 mm 以内。王骏腾[21]利用变形协调方程实现了基于装夹力变化的残余应力变形等效求解，并将叶片简化为薄板模型进行了铣削残余应力变形感知预测试验，实现了零件整体变形的有效预测。于建华[59] [60]设计了一种如图 10 所示的双壁自适应夹具来控制叶片加工变形，该夹具能够达到无应力装夹和应力释放的目的，有效减小叶片轮廓度误差为传统工艺的 50%。

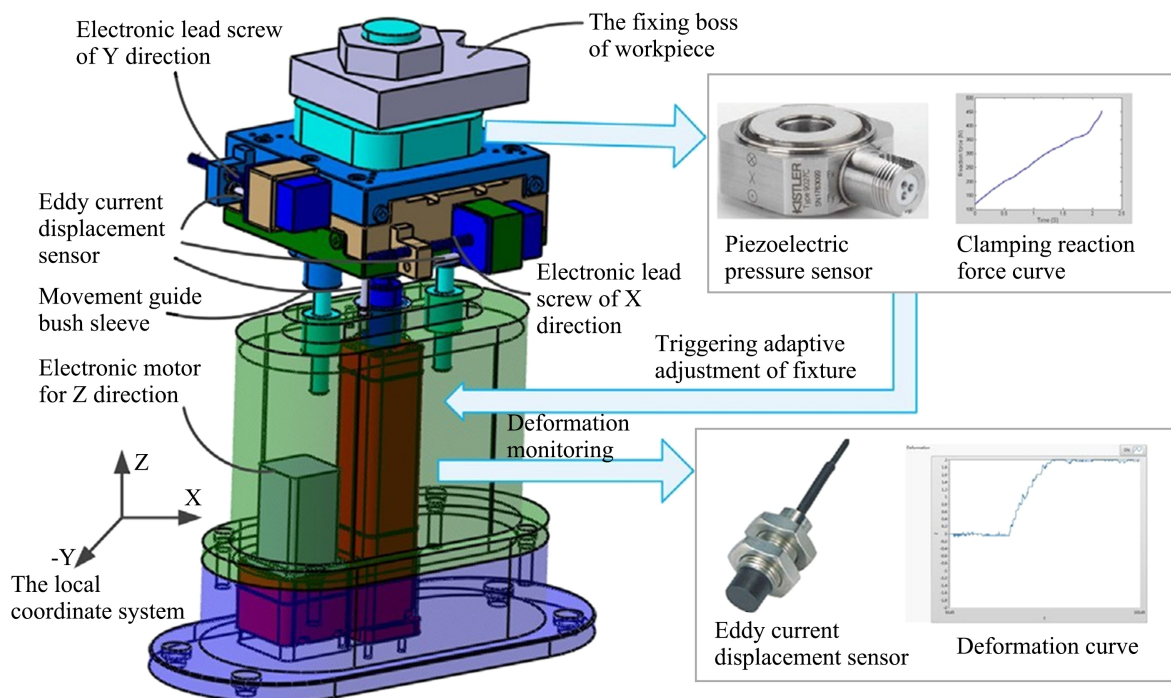


Figure 9. The responsive fixture instrumentation and working principle [58]

图 9. 柔性响应式夹具及其工作原理[58]

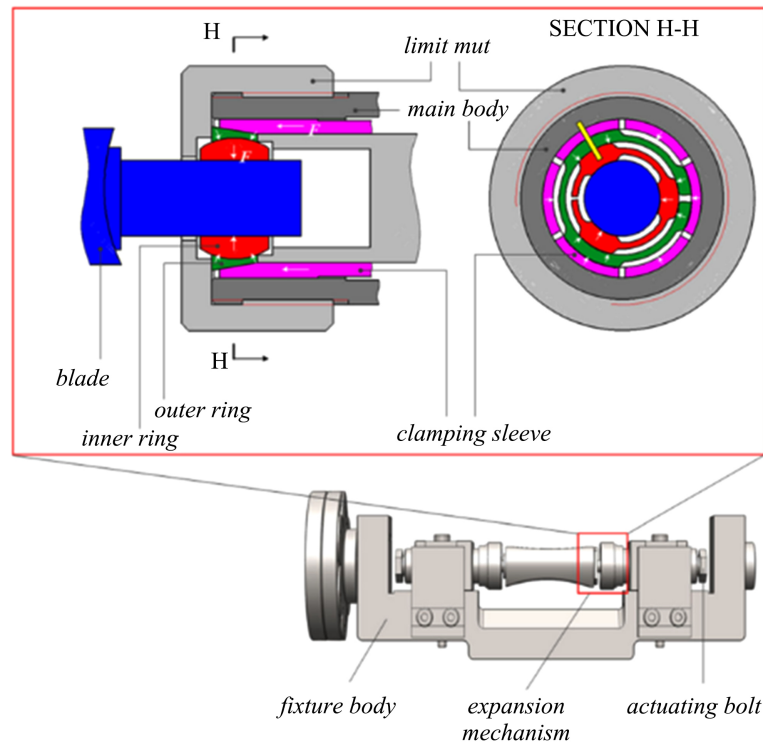


Figure 10. Design concept of adaptive clamping [59]

图 10. 自适应夹紧设计理念[59]

综上所述，现阶段针对残余应力变形控制问题相关学者开展了大量的研究。针对初始残余应力导致的变形，研究多围绕初始残余应力消除与切削方式优化展开；针对加工残余应力导致的变形，研究多围绕切削工艺参数优化展开。此外，通过合理的装夹方案，也可以有效实现加工变形的控制。

4. 结语

随着高端制造业的快速发展，加工残余应力变形的问题愈发突出。国内外学者根据加工残余应力的成因及来源，对因残余应力而导致的加工变形进行了合理预测并提出了相应的变形控制方法。但现有的研究结果还尚不能普遍适用于薄壁零件，后续的研究可重点关注以下几个方面：

1) 现有的加工变形预测方法可以较为准确的实现板、环类简单的结构件的加工变形预测，但对于具有复杂曲面结构的薄壁零件仍不具有通用性，应进一步发展适用于曲面结构零件残余应力变形的预测方法。

2) 半精加工和精加工过程引入的加工残余应力变形是薄壁零件主要的变形形式，后续针对薄壁零件加工变形的预测及控制研究可基于此过程展开。

3) 现有的研究多基于参数优化实现变形量的控制，且对控制加工变形的主要手段，尚存在一定的争议。后续应进一步明确残余应力与加工变形之间的映射关系，定量化的实现加工变形的控制。

4) 现有的研究致力于通过降低加工残余应力来抑制加工变形，但忽略了加工表面质量，特别是加工表面完整性。后续应进一步关注零件加工表面形-性协同控制方法。

参考文献

[1] 王志刚, 何宁, 武凯, 赵威. 薄壁件加工变形因素综合分析[C]//第四次江苏科技论坛机械装备制造分论坛论文

- 汇编. 南京: 江苏科技论坛机械装备制造分论坛, 2003: 37-41.
- [2] 张云峰, 曹岩. 薄壁件加工变形分析与控制[J]. 科技信息(科学教研), 2008(8): 200+245.
- [3] Bowden, D.M. and Halley, J.E. (2001) Aluminium Reliability Improvement Program—Final Report 60606. The Boeing Company, Chicago.
- [4] Nervi, S., Szabó, B.A. and Young, K.A. (2009) Prediction of Distortion of Airframe Components Made from Aluminium Plates. *AIAA Journal*, **47**, 1635-1641. <https://doi.org/10.2514/1.37233>
- [5] Yang, Y., Li, X., Li, L., He, N., Zhao, G., Chen, N., Hui, L. and Zhou, Z. (2019) Investigation on Deformation of Single-Sided Stringer Parts Based on Fluctuant Initial Residual Stress. *Journal of Materials Processing Technology*, **271**, 623-633. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.031>
- [6] Gao, H., Zhang, Y., Wu, Q., and Song, J. (2017) An Analytical Model for Predicting the Machining Deformation of a Plate Blank Considers Biaxial Initial Residual Stresses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **93**, 1473-1486. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0528-2>
- [7] Gao, H., Zhang, Y., Wu, Q. and Li, B. (2018) Investigation on Influences of Initial Residual Stress on Thin-Walled Part Machining Deformation Based on a Semi-Analytical Model. *Journal of Materials Processing Technology*, **262**, 437-448. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.009>
- [8] 王树宏. 航空铝合金厚板初始残余应力及其对铣削变形影响的基础研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [9] Fergani, O., Lazoglu, I., Mkaddem, A., El Mansori, M. and Liang, S.Y. (2014) Analytical Modeling of Residual Stress and the Induced Deflection of a Milled Thin Plate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **75**, 455-463. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6146-3>
- [10] Fergani, O., Mamedov, A., Lazoglu, I., Yang, J.G. and Liang, S.Y. (2014) Prediction of Residual Stress Induced Distortions in Micro-Milling of Al7050 Thin Plate. In: *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 472, Trans Tech Publications Ltd., Bâch, 677-681. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.472.677>
- [11] Fergani, O., Jiang, X. and Welo, T. (2016) Analysis of Residual Stress-Induced Distortions of Thin Sheet Structures in Multi-Step Milling. *AIP Conference Proceedings*, **1769**, Article ID: 080014. <https://doi.org/10.1063/1.4963489>
- [12] Wang, S.P. and Padmanaban, S. (2004) A New Approach for FEM Simulation of NC Machining Processes. *AIP Conference Proceedings*, **712**, 1371-1376. <https://doi.org/10.1063/1.1766720>
- [13] Wei, Y. and Wang, X.W. (2007) Computer Simulation and Experimental Study of Machining Deflection Due to Original Residual Stress of Aerospace Thin-Walled Parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **33**, 260-265. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0470-1>
- [14] Tang, Z.T., Yu, T., Xu, L.Q. and Liu, Z.Q. (2013) Machining Deformation Prediction for Frame Components Considering Multifactor Coupling Effects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **68**, 187-196. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4718-7>
- [15] Bi, Y.B., Cheng, Q.L., Dong, H.Y. and Ke, Y.L. (2009) Machining Distortion Prediction of Aerospace Monolithic Components. *Journal of Zhejiang University—SCIENCE A*, **10**, 661-668. <https://doi.org/10.1631/jzus.A0820392>
- [16] Cerutti, X. and Mocellin, K. (2015) Parallel Finite Element Tool to Predict Distortion Induced by Initial Residual Stresses during Machining of Aeronautical Parts. *International Journal of Material Forming*, **8**, 255-268. <https://doi.org/10.1007/s12289-014-1164-0>
- [17] Cerutti, X., Arsene, S. and Mocellin, K. (2016) Prediction of Machining Quality Due to the Initial Residual Stress Redistribution of Aerospace Structural Parts Made of Low-Density Aluminium Alloy Rolled Plates. *International Journal of Material Forming*, **9**, 677-690. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1254-7>
- [18] Cerutti, X. and Mocellin, K. (2016) Influence of the Machining Sequence on the Residual Stress Redistribution and Machining Quality: Analysis and Improvement Using Numerical Simulations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **83**, 489-503. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7521-4>
- [19] Ma, Y., Zhang, J., Yu, D., Feng, P. and Xu, C. (2019) Modeling of Machining Distortion for Thin-Walled Components Based on the Internal Stress Field Evolution. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **103**, 3597-3612. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03736-9>
- [20] 周金华. 薄壁结构切削残余应力建模及变形预测[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [21] 王骏腾. 薄壁件铣削残余应力变形的感知预测与工艺优化方法[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [22] Huang, X., Sun, J. and Li, J. (2015) Finite Element Simulation and Experimental Investigation on the Residual Stress-Related Monolithic Component Deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **77**, 1035-1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>
- [23] Huang, X., Sun, J. and Li, J. (2015) Effect of Initial Residual Stress and Machining-Induced Residual Stress on the

- Deformation of Aluminium Alloy Plate. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, **61**, 131-137. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2014.1897>
- [24] Young, K.A. (2005) Machining-Induced Residual Stress and Distortion of Thin Parts. Ph.D. Thesis, Washington University, Saint Louis. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3317>
- [25] Ma, K., Goetz, R. and Srivatsa, S.K. (2010) Modeling of Residual Stress and Machining Distortion in Aerospace Components (Preprint). Air Force Research Lab Wright-Patterson AFB OH Materials and Manufacturing Directorate.
- [26] Sim, W.M. (2011) Residual Stress Engineering in Manufacture of Aerospace Structural Parts. *3rd International Conference on Distortion Engineering*, Bremen, 14-16 September 2011, 187-194.
- [27] Zhang, S., Wu, Y. and Gong, H. (2012) A Modeling of Residual Stress in Stretched Aluminum Alloy Plate. *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 2463-2473. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.019>
- [28] Koc, M., Culp, J. and Altan, T. (2006) Prediction of Residual Stresses in Quenched Aluminum Blocks and Their Reduction through Cold Working Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, **174**, 342-354. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.02.007>
- [29] Husson, R., Dantan, J.Y., Baudouin, C., Silvani, S., Scheer, T. and Bigot, R. (2012) Evaluation of Process Causes and Influences of Residual Stress on Gear Distortion. *CIRP Annals*, **61**, 551-554. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.106>
- [30] Masoudi, S., Amirian, G., Saeedi, E. and Ahmadi, M. (2015) The Effect of Quench-Induced Residual Stresses on the Distortion of Machined Thin-Walled Parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **24**, 3933-3941. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1695-7>
- [31] 孙杰. 航空整体结构件数控加工变形校正理论和方法研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [32] Landwehr, M., Oehler, F., Behnken, H., Holling, H., Sambathkumar, R., Ganser, P. and Bergs, T. (2021) Influence of Heat Treatment on the Residual Stress-Related Machining Distortion of Ti-6Al-4V Alloy Monolithic Parts. *Procedia CIRP*, **104**, 1328-1333. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.223>
- [33] Wang, J.S., Hsieh, C.C., Lin, C.M., Chen, E.C., Kuo, C.W. and Wu, W. (2014) The Effect of Residual Stress Relaxation by the Vibratory Stress Relief Technique on the Textures of Grains in AA 6061 Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, **605**, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.037>
- [34] 熊冠华. 振动时效对铝合金薄壁构件尺寸稳定性的影响[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [35] 刘嘉辰, 王金亮, 陈慧琴. 高强铝合金超厚板淬火残余应力及其冷压缩消除过程分析[J]. 轻合金加工技术, 2014, 42(9): 27-32+47.
- [36] 王秋成, 柯映林. 深冷处理消除 7050 铝合金残余应力的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003(6): 120-123.
- [37] 吴红兵. 航空框类整体结构件铣削加工变形的数值模拟与实验研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [38] 柯烈强. 航空框类结构件铣削加工残余应力抑制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 安徽工程大学, 2010.
- [39] 武凯, 何宁, 廖文和, 宋良煌, 陈雪梅. 阶梯对称铣削工艺在薄壁件精密加工中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2005(5): 46-47+50.
- [40] Wu, Q., Li, D.P. and Zhang, Y.D. (2016) Detecting Milling Deformation in 7075 Aluminum Alloy Aeronautical Monolithic Components Using the Quasi-Symmetric Machining Method. *Metals*, **6**, 80. <https://doi.org/10.3390/met6040080>
- [41] Yang, Y.F., Fan, L.X., Li, L., Zhao, G.L., Han, N., Li, X.Y., Tian, H. and He, N. (2020) Energy Principle and Material Removal Sequence Optimization Method in Machining of Aircraft Monolithic Parts. *Chinese Journal of Aeronautics*, **33**, 2770-2781. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.018>
- [42] Fan, L., Li, L., Yang, Y., Zhao, G., Han, N., Tian, H. and He, N. (2021) Control of Machining Distortion Stability in Machining of Monolithic Aircraft Parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **112**, 3189-3199. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06605-6>
- [43] 张以都, 张洪伟. 航空整体结构件加工变形有限元数值仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(2): 188-192.
- [44] Dreier, S., Brüning, J. and Denkena, B. (2016) Simulation Based Reduction of Residual Stress Related Part Distortion. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **47**, 710-717. <https://doi.org/10.1002/mawe.201600604>
- [45] 王华敏, 秦国华, 林锋, 左敦稳, 韩雄, 陈雪梅. 面向 7075-T7451 铝合金厚板加工变形控制的变向迭代优化方法[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1239-1248.
- [46] Li, B., Jiang, X., Yang, J. and Liang, S.Y. (2015) Effects of Depth of Cut on the Redistribution of Residual Stress and Distortion during the Milling of Thin-Walled Part. *Journal of Materials Processing Technology*, **216**, 223-233. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.016>
- [47] Masoudi, S., Amini, S., Saeidi, E. and Eslami-Chalander, H. (2015) Effect of Machining-Induced Residual Stress on the Distortion of Thin-Walled Parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **76**, 597-608.

- <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6281-x>
- [48] 刘海涛. 精密薄壁回转体零件加工残余应力及变形的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [49] 丛靖梅, 莫蓉, 吴宝海, 王骏腾. 薄壁件残余应力变形仿真预测与切削参数优化[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(2): 205-210.
- [50] Xue, L.F., Chen, W.F., Feng, T. and Ma, W.T. (2014) Synchronous Optimization of Clamping Force and Cutting Parameters for Thin-Walled Parts. In: *Advanced Materials Research*, Vol. 900, Trans Tech Publications Ltd., Bäch, 623-626. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.900.623>
- [51] Denkena, B., Boehnke, D. and de Leon, L. (2008) Machining Induced Residual Stress in Structural Aluminum Parts. *Production Engineering*, **2**, 247-253. <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0097-1>
- [52] 何宁, 杨吟飞, 李亮, 赵威. 航空结构件加工变形及其控制[J]. 航空制造技术, 2009, 52(6): 32-35.
- [53] 付秀丽, 艾兴, 张松, 潘永智. 航空整体结构件的高速切削加工[J]. 工具技术, 2006(3): 80-83.
- [54] 单英吉, 孙树强, 杨巍. 高速切削技术在飞机结构件加工中的应用研究[J]. 中国新技术新产品, 2016(8): 16-17.
- [55] 江宏志. 浅谈民用航空薄壁结构件加工方法与应用[J]. 山东工业技术, 2018(3): 8+127.
- [56] 郭魂, 左敦稳, 王树宏, 王焱, 王珉. 拉伸装夹对航空框类零件加工变形影响的有限元分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2005(S1): 72-76.
- [57] 董辉跃, 柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(1): 18-22.
- [58] Li, Y., Liu, C., Hao, X., Gao, J.X. and Maropoulos, P.G. (2015) Responsive Fixture Design Using Dynamic Product Inspection and Monitoring Technologies for the Precision Machining of Large-Scale Aerospace Parts. *CIRP Annals*, **64**, 173-176. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.025>
- [59] Yu, J.H., Chen, Z.T. and Jiang, Z.P. (2016) A Control Process for Machining Distortion by Using an Adaptive Dual-Sphere Fixture. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **86**, 3463-3470. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8470-2>
- [60] 于建华, 陈志同. 双臂自适应夹具加工变形控制方法[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1657-1665.