作者简介 孙杰，男，1967年3月出生，博士，教授。2006～2007在美国阿拉巴马大学做访问学者，主要从事先进制造工艺理论、加工过程动态物理仿真分析、刀具结构设计与参数优化、钛合金等难加工材料的加工等研究。作者撰写本文引用了大量参考文献中的内容，部分略，特此说明。

航空整体结构件高效高精度加工关键技术研究（下）

山东大学机械工程学院 （济南 250061） 孙 杰 李剑峰 杨 勇

（2）薄壁结构件加工变形的预测与控制 针对薄壁型结构件产生的局部加工变形问题，武凯等人采用有限元仿真技术研究了薄壁腹板、侧壁加工变形规律及其变形控制方案，指出大切深法以及分步环切法可以充分利用薄壁件自身刚性，减小加工变形，提高加工精度；王志刚等人基于材料始终处于弹性范围的假设，分析了薄壁零件的加工变形，数值模拟时考虑了切削力作用下侧壁的弹性变形，但没有考虑初始残余应力和切削热对变形影响；Wan等人基于三维非规则网格的刀具/工件变形的耦合迭代以及恒定网格下材料去除效应的变刚度处理方法，研究了零件铣削加工中的变形，并预测了加工表面误差；王兆峻等人研究了毛坯初始残余应力对薄壁件加工变形的影响而没有考虑切削载荷的影响。

尽管采用有限元仿真技术能够对航空整体结构件加工变形进行预测，但是，由于模拟中材料模型与实际工件材料的物理属性不能很好地吻合，而且建模过程进行了一定的简化，没有考虑到周围环境的影响，如温度的影响导致的热变形，以及机床振动、刀具磨损等因素产生的影响，因此，有限元模拟结果和实际变形情况仍有较大的差距。在仿真过程中，摩擦模型及材料断裂准则与实际情况也存在一定的差距。今后，随着切削加工物理建模环节的完善和计算机数值仿真技术的发展，有限元模拟加工变形的精度将会得到较大的提高，使有限元仿真分析对实际生产的指导进入应用阶段。

2. 面向高精度加工的装夹具优化

夹紧力是影响航空整体结构件变形的重要因素之一，工件在机床上的装夹精度是影响整个加工精度的重要因素，20%～60%的加工误差是由装夹引起的（参见由Shreyes B.L., Melkote N. 撰写的“Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization”一文）。夹具的刚度和稳定性直接影响工件的尺寸和形状误差，尤其对弱刚度结构件，夹紧力引起的变形更是不容忽视。通过调整夹具元件的位置或添加必要的夹具元件，能够达到减少变形的目的。然后，夹具设计未受到同工件结构设计一样的重视。随着对航空整体结构件加工精度要求的提高，对装夹方案优选研究逐渐受到重视。

董辉跃、柯映林撰写的《铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟》，贾新杰、贾春德、张志军撰写的《一种弱刚度薄壁结构件装夹方案优化的有限元模拟》，以及郭魂、左敦稳、王树宏撰写的《拉伸装夹对航空框类零件加工变形影响的有限元分析》等文章，分别建立了有限元仿真分析模型，对装夹部位与装夹顺序等对加工变形的影响进行了定量分析。

王运巧、梅中义、范玉清撰写的《薄壁弧形件装夹布局有限元优化》一文提出了夹具工件系统的准静态模型，基于有限元方法对夹紧元件的布局进行优化。Necmetin采用遗传算法，基于ANSYS有限元数值计算进行装夹位置优化。路冬撰写的《航空整体结构件加工

变形预测及装夹布局优化》以加工过程中航空框类整体结构件的最大变形最小为目标函数，采用遗传算法和有限元法相结合的方法，建立了航空框类整体结构件夹紧点位置及夹紧点数目递推优化模型，根据该优化模型对航空整体结构件进行装夹布局优化。Haiyan Deng和Shreyes N. Melkote在文章“Determination of minimum clamping forces for dynamically stable fixturing”中建立了确定加工过程中所需最小夹紧力的分析模型。S. Satyanarayana 等人基于理论和实验研究，对夹紧元件的接触和摩擦问题进行了分析（参见“Finite element modeling of fixture-workpiece contacts: single contact modeling and experimental verification”），为装夹方案优化有限元分析建模边界条件的确定提供依据。

装夹方案的优选在航空整体结构件加工中的地位尤为突出，需要进一步开展薄壁件跟踪刀具轨迹的智能装夹系统和基于应力均布的装夹系统研究，这些工作理论和实践均需加强。

航空整体结构件数控加工变形是切削加工过程中毛坯初始残余应力、切削过程中的热应力和机械应力、装夹应力等耦合作用的结果，尽管开展了切削加工过程变形预测与控制、基于变形最小装夹方案优化研究，但所进行的研究工作大都是独立进行的，需要开展综合考虑加工应力与装夹应力在切削加工过程中的变化特点与对加工变形影响的研究。另外，工艺规划和数控编程技术在航空整体结构件加工变形控制中也发挥了重要作用。

四、整体结构件的数控加工变形校正技术研究

目前，对航空整体结构件加工变形问题的研究主要包括两个方面：加工变形的控制和已产生加工变形零件的校正。航空整体结构件数控加工变形控制已经取得一定成果，但对某些结构复杂、刚性差，特别是非对称薄壁结构件，加工变形仍然无法得到有效控制，短时间内还很难将所有整体结构件的加工变形都控制在设计精度范围之内。为了获得工件的最终制造精度，必须对变形零件进行校正。可以说变形校正是保证整体结构件最终制造精度不可缺少的重要手段和工艺环节。

由航空整体结构件的结构形式，决定了其加工变形也有其独特特点，目前，航空整体结构件的主要变形形式、校正方式及校正难点如下表所示。

整体结构件变形特点及校正方式

序号	变形特点	校正方式	技术难点
1	弯曲变形	反弯校正	变形区域的确定及精确校正载荷的计算
2	扭曲变形	反扭校正	控制扭转变形时引入的附加弯曲变形
3	弯扭组合变形	分步校正或拉扭校正	受工件结构及截面形状等多因素影响，实施较困难
4	失稳校正	冷作校正	校正精度与操作者经验有关，波动较大

针对不同航空整体结构件的结构特点和变形特点，需要采取与之相适应的校正理论和方法，国外对航空整体结构件的变形校正非常重视，如波音公司已经建立了热校正、应力松弛校正等的相应技术规范和操作标准；空客公司开发了滚压校正的专用装置。我国目前对变形校正的研究主要集中在航空整体结构件机械校正理论和方法的研究，重点研究反变形校正的压下位移量和极限校正载荷。孙杰、柯映林、吴群、许德撰写的《大型整体结构件数控加工变形校正的关键技术研究》一文，以及孙杰、柯映林、康小明撰写的《大型整体结构件数控加工变形的安全校形理论研究》对U形截面工件反变形校正压下位移量和安全校正参数进行了系统分析；建立有限元模型分析复杂结构航空整体结构件的变形校正载荷，将变形校正载荷的确定建立在定量计算的基础上。进一步建立了基于二倍斜率法确定极限校正载荷的方法。极限安全校正载荷的计算和确定非常关键，确定不当将引起昂贵整体结构件的报废。《航空整体结构件数控加工变形校正理论和方法研究》一文研究了采用二倍斜率法确定校正极限载荷的方法，所谓二倍斜率法是基于工件的载荷－位移关系曲线分为弹性变形区和塑性变形区，求出线弹性部分直线相对于纵轴的斜率，然后作一条斜率为该斜率2倍的直线，与原载荷－位移关系曲

线相交，交点对应的载荷即为所求的校形时的极限载荷。图4和图5分别是山东大学试验和有限元仿真分析获得铝合金梁比例件的压力－挠度曲线及二倍斜率法确定极限载荷的方法。实验数值与有限元仿真分析结果是吻合的。实际生产中，可对有限元计算获得的极限校正载荷增加一个安全余度，即对通过二倍斜率法获得的极限校正载荷乘以一个小于1的系数，作为实际生产中的控制载荷。

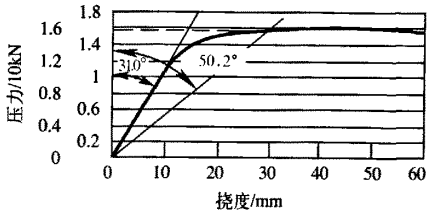

图4 三点压弯应力－挠度实验曲线

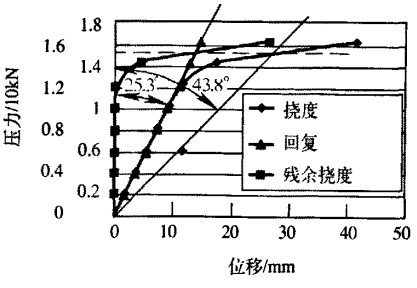

图5 压力－挠度－残余挠度有限元数值计算曲线

对于结构复杂特别是薄壁零件，当无法采用反变形校正时，可采基于应力再分布的滚压校正方法进行校正，山东大学在该领域做了较系统的研究工作，图6是滚压校正有限元分析模型，图7是滚压引起工件尺寸改变有限元技术结果图。

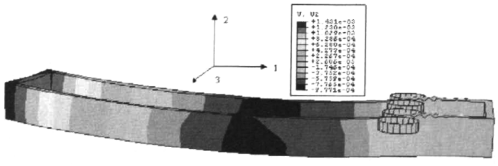

图6 双隔框零件在应力作用下产生弯曲变形

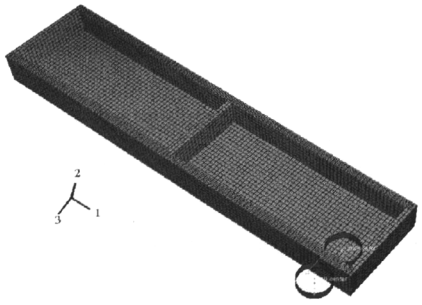

图7 滚压后工件变形有限元仿真分析结果

五、结语

（1）针对航空结构件材料的物理力学特性，开发和选用相应的刀具材料、刀具结构是实现航空整体结构件高效高精度加工的关键环节之一。

（2）钛合金等难加工材料在加工过程中功率消耗大、易产生振动，为实现难加工材料航空整体结构件的高效高精度加工，除了进行相应的工艺参数优化外，需要开发与其加工特性相适应的加工中心。

（3）变形控制是航空整体结构件加工中需要研究解决的重要课题，在充分利用有限元数值计算对加工过程进行仿真并进行变形预测的研究基础上，结合装夹技术、工艺规划、冷却方式、数控编程等多项技术的综合研究成果，实现航空整体结构件加工变形的有效控制。

（4）变形校正是航空整体结构件制造中不可缺少的重要环节，反变形校正的压下位移量的定量计算和极限校正载荷的确定直接关系到变形校正的生产效率和安全性。要进一步加强滚压校正、应力松弛校正等新型校正理论和方法的研究。

本文参考的文章还有：顾诵芬的《航空航天科学技术（航空卷）》；E.O. Ezugwu的“Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys”；维有成的《刀具涂层技术及其发展》；赵柄桢的《用新的涂层提高难加工材料的切削效率》；陈小明的《航空大型数控机床的设计特点》；张曙的《加工飞机结构件的加工中心》；Copper D.的“Machining Capacity, Expertise Must Grow”；金秋、刘少岗的《薄壁弧形件加工装夹方案的优化》等。**MW**（全文完）