航空整体结构件加工变形有限元数值仿真

张以都 张洪伟

(北京航空航天大学 虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 加工变形是航空整体结构件数控加工领域普遍存在的问题. 选取典型航空整体结构件,基于有限元法研究了毛坯初始残余应力对于加工变形的影响,仿真结果与试验结果一致;对残余应力引起的加工变形特点进行了分析,基于不同加工路径对航空结构件加工变形进行了有限元数值仿真,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. 考虑铣削力与残余应力的耦合作用,建立了残余应力、铣削力的耦合力学模型,给出了具体仿真流程,针对不同加工路径进行有限元仿真,研究了铣削力对于残余应力分布及最终加工变形的影响.

关 键 词: 残余应力; 加工变形; 有限元; 铣削力; 加工路径

中图分类号: TP 391. 77

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0188-05

Finite element simulation of machining deformation for aeronautical monolithic component

Zhang Yidu Zhang Hongwei

(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Machining deformation has been a bottle-neck issue in aeronautical manufacturing field. Based on finite element simulation, the influence of original residual stresses on the deformation in the process of machining for aeronautical monolithic component was studied. The redistribution law of residual stresses during machining and the trend of deformation change were analyzed. The simulation conclusions agree with experimental results. The machining deformation characteristics due to residual stresses were analyzed and the simulation of different machining path was carried out. The results indicate that the research on deformation caused by residual stresses alone can neglect the effect of machining path. The coupling effect between residual stress and milling force was taken into account and the simulation was performed for different machining path.

Key words: residual stress; machining distortion; finite element method; milling force; machining path

在整体航空结构件的铣削加工过程中普遍存在有加工变形的问题,这是数控加工领域公认的难题. 针对加工变形问题,学者们在各个领域进行了广泛研究,如切削加工过程模拟、残余应力数值模拟等,其在一定程度上为优化工艺提供了理论依据. 这些文献主要集中在二维切削加工机理的研究或主要研究引起加工变形的某一因素上,这对于预测航空结构件的整体变形有一定局限性[1-3]. 研究表明,毛坯初始残余应力是引起加工变形的重要原因[4-5]. 在实际加工过程中,铣削力是影响加工变形的另一因素. 现有文献常常不计铣削力与初始残余应力的耦合作用,而且铣削加工是一个复杂的三维动态过程[6],在有限元数值模拟中有待对铣削加工过程的关键技术进行系统深入研究.

本文基于有限元仿真技术研究了初始残余应力对于整体结构件的加工变形的影响,仿真结果与试验结果一致,并对残余应力引起的加工变形

收稿日期: 2008-07-20

作者简介: 张以都(1959-),男,北京人,教授, ydzhang@buaa.edu.cn.

特点进行了分析;建立了包含初始残余应力、铣削力的耦合力学有限元模型,基于不同加工路径进行有限元仿真,对铣削力在加工变形中的影响作了深入研究,探索耦合条件下框类航空结构件加工变形规律.

1　残余应力对加工变形的影响分析

1.1　有限元模型及初始残余应力场构建

选取典型整体结构件按相似性原理设计比例件进行加工过程有限元仿真. 工件材料为 7075铝合金,经过淬火热处理. 毛坯尺寸: 300 mm × 84mm ×26 mm,工件壁厚为 2 mm. 弹性模量为 71 GPa,泊松比为 0.3,塑性模量为 250MPa,屈服应力为 455MPa,选用双线性强化模型来描述材料本构关系.

初始残余应力分布如图 1所示[7]包括长度方向 (*X*向)的残余应力及宽展方向 (*Y*向)的残余应力. 编写残余应力施加算法,对有限元模型添加初始残余应力[8]. 工件理想设计形状如图 2所示.

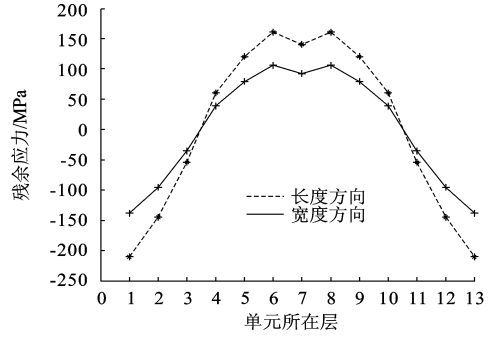


图 1　初始残余应力分布规律

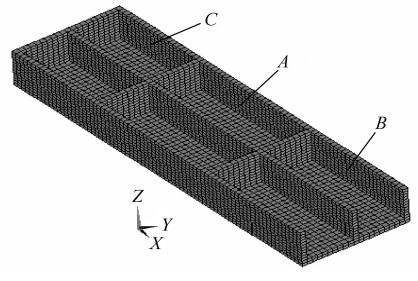


图 2　工件理想形状

1.2　仿真过程

仿真边界条件是在工件的非加工部分选择 3个点,分别约束 $\overline{XYZ}$, $\overline{YZ}$及 $\overline{Z}$平移自由度. 3点选择原则是:完全约束工件的刚体运动,而不影响工件的任意变形.

按照加工过程,将要去除的单元按加工顺序排列,一层一层的去掉,每铣掉一层单元,将其作为一个载荷步计算一次. 模拟过程中,将铣削去除部分分成 11层,分 11次去除,共经过 11个载荷步计算,完成该整体结构件的模拟加工.

1.3　结果分析

分别施加如图 1所示的单向 (*X*向)残余应力及双向 (*X*向、*Y*向)残余应力,进行仿真计算. 结果表明,在残余应力作用下,工件发生明显的变形,中部鼓起,两端上翘,整个工件向着被去除材料的一侧弯曲. 试件侧壁高度较小,变形量相对较小,以底面的变形最为严重,底面的翘曲变形导致侧壁的弯曲变形.

从工件选取如图 2所示 *A*, *B*, *C* 3个变形关键点,其中 *A*点是中部框中部的点,也是底面长度方向的中点,*B*点是开口端部框的中部的点,*C*点是另一端框上部的一个点. 在单向残余应力作用下,随材料去除过程,3点变形量的变化趋势如图 3所示.

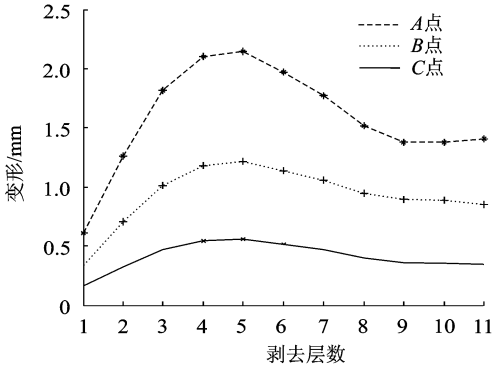


图 3　单向残余应力作用下剥层过程中各点变形变化趋势

在双向残余应力作用下,选择同样的 3点,绘制其变形量随材料的去除变化曲线,如图 4所示.

无论是单向残余应力还是双向残余应力作用,在材料去除过程中,都会在去除量达 50%左右时变形量达到最大值,然后逐步减小,并趋向稳定,但施加双向残余应力引起的加工变形值比只

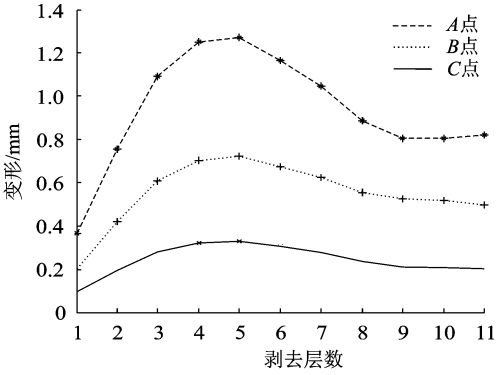


图 4　双向残余应力作用下剥层过程中各点变形变化趋势

施加沿长度方向的残余应力所引起的变形值要小,这是由于宽展方向的残余应力会在一定程度上牵制变形.

在变形量变化较大的前几次,残余应力变化都较大,去除层均为压应力层.而去除拉应力层过程中,由于拉应力层的反向变形,使得变形减小,同时由于拉应力层变化梯度较小,所以变形变化量也较小.仿真结果的变化规律得到文献[9]中的试验结论的支持.

1.4 试验结果与仿真结果对比

针对一框类试件进行铣削加工试验及仿真计算.图5为加工完成后的工件,其变形为:两端向上翘起,中间向下凹陷.最大变形量发生在试件长度方向的端部,数值大约为0.45mm.

图6为试件底面长度方向的一组节点试验结果与仿真结果的变形曲线对比.结果均表明试件底面变形为两端上翘,中间部分下陷.工件最大翘曲变形发生在工件的端部;向下的最大凹陷发生在长度方向左右腔型的中间,这是因为该位置是整个工件中刚度最薄弱的地方.

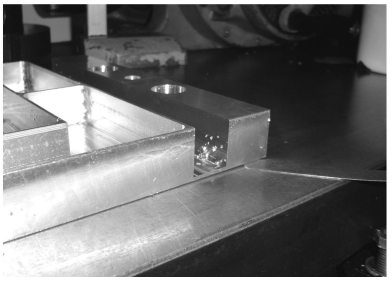
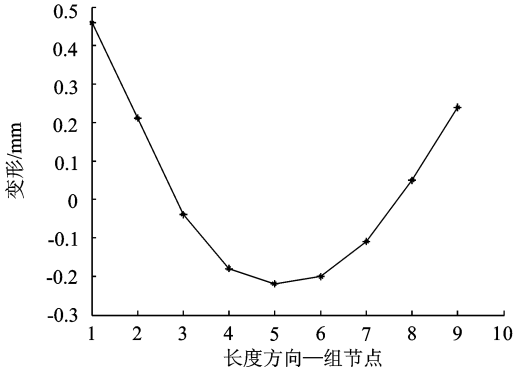
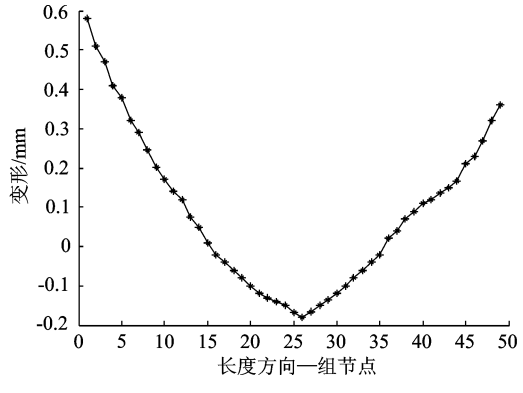


图5 试验结果端部翘曲变形



a 试验结果



b 仿真结果

图6 底部沿长度方向的一组节点的变形比较

仿真结果大于试验结果,原因在于试验所用的板材一般是经过时效处理的,初始应力有部分释放,而仿真方法无法模拟时效处理中的应力松弛现象,所以仿真时板内初始残余应力是按理想情况添加的,会高于试验所用板内初始残余应力.

2 残余应力引起加工变形特点分析

初始残余应力引起的加工变形主要包括两部分:一是工件整体的翘曲变形;另一部分是由于残余应力的不断释放与重分布,造成局部的"过切"或"欠切"铣削误差变形.真实的加工变形是两种变形的综合.

研究表明,残余应力引起的加工变形与工件材料的加工顺序及刀具走刀路径等有关.对某单框类结构件选用4种常用的走刀加工路径进行有限元仿真研究:①由外向内"回"字型走刀;②由内向外"回"字型走刀;③沿轧制方向"之"字型走刀;④沿横向"之"字型走刀.

在残余应力作用下,仿真结果表明4种不同走刀路径对工件整体宏观变形没有任何影响.这是由于残余应力是弹性应力,以弹性势能的形式储存在工件体内,随材料去除,工件能量不断变化,由弹性力学理论可知,这种弹性能量的变化只与最终的工件形状有关.也就是说,初始残余应力引起的工件整体变形与具体的铣削过程无关.

另外,随残余应力的释放,造成了局部的铣削误差变形.这种铣削误差变形幅值较小,属于弹性变形.所以研究整体工件变形时,铣削误差变形影响是很小的.根据这一结论,如果单一考虑初始残余应力对于工件整体变形的影响,则不必逐步进行铣削过程仿真,而可以将要去除的材料单元一次完全"杀死",这样可以大大提高计算效率.

3 铣削力与残余应力耦合作用分析

建立包含初始残余应力、铣削力和装夹条件的框类结构件耦合力学模型,探索多因素耦合条件下框类结构件加工变形规律.铣削加工过程是铣削力不断加载和卸载的过程.通过动态给拟去除材料单元进行加载、卸载分析来获得残余应力及加工变形.加载过程是指在铣削过程中,由于铣削力的作用,而在工件局部发生塑性变形产生残

余应力的过程,3向铣削力以单元面载荷形式作用在指定单元上,并沿着一定的走刀路径进行.卸载过程是指切屑层被去除、刀具离开当前工件位置,工件内部残余应力重新分布这一过程,即对所加载单元施加 3向零载荷进行求解.由于载荷是一个动态变化的过程,采用 APDL 语言编制运行程序,实现铣削过程.其算法流程如图 7所示.

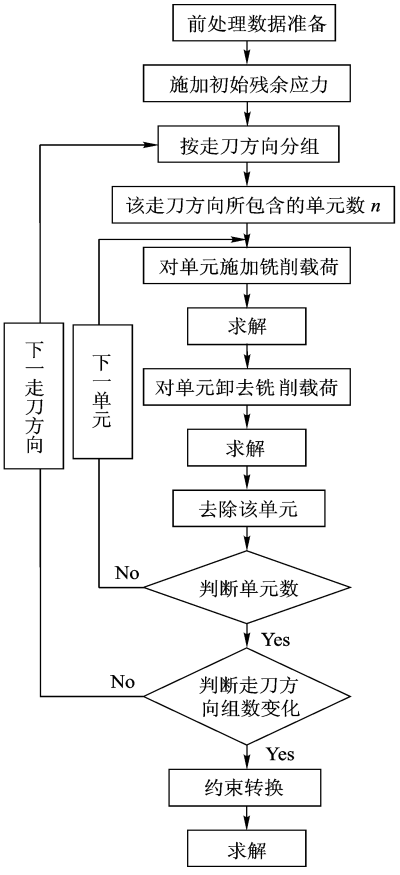


图 7　铣削力、残余应力耦合作用仿真流程

基于上述流程,进行不同加工路径有限元加工仿真.选取某典型节点长度方向残余应力随动态铣削力的变化的响应曲线,如图 8所示.

仿真结果表明,4种加工路径下的最终残余应力差别较小,但铣削过程中会有较大的波动.其中路径 1所引起的变形波动最小,铣削过程较平稳,这个结论得到了文献[10]的支持.加工过程的波动会引起局部的铣削误差变形.这种变形是由于铣削力的作用,造成局部的"让刀"变形,表现为"多切"或"欠切".

图 9是不考虑初始残余应力影响,在铣削力作用下不同加工路径典型节点的应力变化情况,相比考虑残余应力影响,这种情况下,应力幅值小得多.

对于整体宏观变形而言,铣削力的影响相对

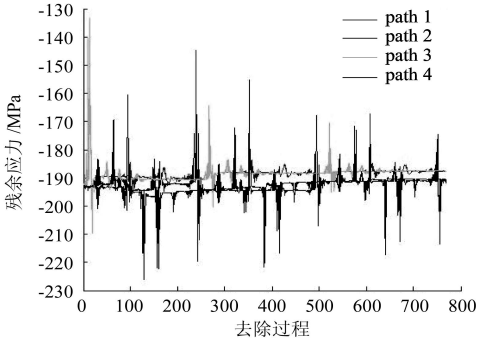


图 8　不同走刀路径典型节点应力变化

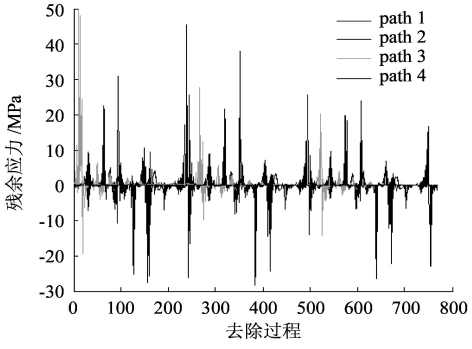


图 9　仅考虑铣削力不同走刀路径节点应力变化

于毛坯体的初始残余应力是很小的.从根本上来说,高速加工铣削力难以影响到最终的工件宏观变形,是由于铣削力的作用不足以改变残余应力分布状态,或者说铣削力产生的应力场在与原始的残余应力场发生相互作用后已经被覆盖了,即铣削力要起到较大的作用,必须首先产生较大的应力场与初始残余应力场进行耦合作用后,仍然保持相当的数值,才有可能影响到最终的应力场及最终的变形.

在对航空结构件的整体变形研究中,在特定加工路径下,铣削力的作用是可以不考虑的.但在薄壁件的加工过程中,由于初始残余应力的释放,铣削力的作用需要得到关注.

4　结　论

1) 加工过程中,双向残余应力引起的加工变形量与单向残余应力引起的加工变形量有较大差异,但残余应力分布相似.加工变形过程中,存在着变形量临界值,在该临界值处,工件变形达到最大值,随后工件变形量逐渐减小并趋向稳定.

2) 加工路径不同对于工件的残余应力的释放与重分布有不同影响,但若只考虑残余应力单一因素,工件加工变形只与材料去除量的多少及工件最终结构形式有关,而与加工路径、加工顺序

等去除过程无关.在仿真运算过程中,为提高计算效率,可以一次全部去除掉.

3) 考虑残余应力与铣削力的耦合影响,仿真结果表明,铣削力的存在会影响残余应力的释放和重分布.但高速铣削力所产生的残余应力只存在于很薄的一层内,而且时间短暂,所以对初始残余应力的影响还是比较小的,从而对最终的加工变形影响也很小.在确定加工路径的基础上,可以忽略铣削力的影响,提高计算效率,而不会影响宏观整体变形研究.

4) 基于有限元仿真结果,通过采取某些工艺措施减小残余应力或均匀化残余应力,或在加工过程中,基于加工变形临界值预留一定加工余量,在材料去除达到变形量稳定值时,反向加工去除材料,以控制加工变形.

参考文献 (References)

[1] El-Axir M H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42: 1055 - 1063

[2] Fihri Fassi H, Bousshine L, Chaaba A, et al. Numerical simulation of orthogonal cutting by incremental elastoplastic analysis and finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 14: 181 - 188

[3] Martin Baker. Finite element simulation of high-speed cutting forces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176: 117 - 126

[4] Brinmsmeier E, Hannover J, Cammett T, et al. Residual stress-measurement and cause in machining process[J]. Annals of the CIRP, 1982, 31(2): 491 - 509

[5] Heiz A, Haszler A, Keidel C, et al. Recent development in aluminum alloy for aerospace application[J]. Mater Sci Eng A, 1999, A280: 102 - 107

[6] 黄志刚,柯映林. 飞机整体框类结构件铣削加工的模拟研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(11): 991 - 995
Huang Zhigang, Ke Yinglin. Study on key technologies of milling process simulation for aerospace monolithic components[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(11): 991 - 995 (in Chinese)

[7] 王秋成,柯映林,章巧芳. 7075铝合金板材残余应力深度梯度的评估[J]. 航空学报, 2003, 24(4): 336 - 338
Wang Qiucheng, Ke Yinglin, Zhang Qiaofang. Evaluation of residual stress depth profiling in 7075 aluminum alloy plates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 336 - 338 (in Chinese)

[8] 张洪伟,张以都,赵晓慈,等. 航空结构件加工变形仿真关键技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(2): 239 - 243
Zhang Hongwei, Zhang Yidu, Zhao Xiaoci, et al. Research on key techniques in the simulation of machining distortion for aeronautical monolithic component[J]. Journal of Beijing University of Aeronautical and Astronautics, 2008, 34(2): 239 - 243 (in Chinese)

[9] 董兆伟. 铝合金整体结构件铣削加工残余应力及变形研究[D]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 2006
Dong Zhaowei. Study on the milling residual stress and deformation of the aluminum alloy integrated framework[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006 (in Chinese)

[10] 王立涛. 关于航空框类结构件铣削加工残余应力和变形机理的研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院, 2003
Wang Litao. Study on residual stresses and distortion theory of aeronautical frame structure in the milling[D]. Hangzhou: College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, 2003 (in Chinese)