飞机铝合金结构件数控加工变形分析与控制

梅中义 高 红

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (成都飞机工业(集团)有限责任公司 制造工程部, 成都 610092)

王运巧

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 以飞机机翼翼肋铝合金结构件这一典型易变形的零件为例,研究数控加工变形情况及其影响因素,主要研究残余应力对加工变形的影响. 采用理论建模、有限元分析和实验验证相结合的方法分析和对比数控加工中零件变形情况;分析了工件内残余应力分布,用有限元软件提供的热机耦合功能,以温度场模拟施加铝合金的残余应力分布;分析和模拟了去除材料对工件变形的影响;用经过改进的顺序静态单元生死方法进行切削过程的仿真和改进,并对仿真所得的零件变形量与实际加工测量结果进行了比较,验证了分析方法和所建立模型的有效性;最后提出了控制数控加工变形的解决方案.

关 键 词: 数控加工; 变形; 残余应力; 模拟; 有限元

中图分类号: V 260; TP 391. 7

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0146-05

Analyzing and controlling distortion of aircraft aluminium alloy structural part in NC machining

Mei Zhongyi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Gao Hong

(Manufacture Engineering Department, Chengdu Aircraft Industrial Co. Ltd, Chengdu 610092, China)

Wang Yunqiao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: NC machining distortion and the reason which leads to machining distortion were studied by analyzing the typical aircraft wing rib aluminium alloy structural part on which distortion often occurs. The part NC machining distortion was analyzed and compared by using the methods of theoretical model, finite element analysis and milling experiment. Residual stress distribution was analyzed in the part. Temperature simulation was added to the residual stress distribution of aluminium alloy by using thermal-mechanical coupling analysis of the FEM (finite element method) software. The influence on part distortion by cutting material was analyzed and simulated. The cutting process was simulated and improved through using the improving static elements deactivation method. Simulation distortion result of machining process was compared with the milling experiments and practical experience data. The validity of the analysis method and the finite element analysis model was verified. Several methods which can be used to predict and control machining distortion were proposed.

Key words: numerical control machining; distortion; residual stress; simulation; finite element method

收稿日期: 2008-07-20

作者简介: 梅中义 (1968 -),男,江西南昌人,副教授, meizhongyi@buaa.edu.cn.

1　问题提出

随着现代飞机性能要求的不断提高,许多骨架零件尤其是主承力结构件 (如飞机的大梁、隔框、壁板、翼肋等)普遍采用由大型整块毛坯直接“挖空”而加工成复杂槽腔、筋条、凸台和减轻孔等整体结构件,材料切除量可达 90% ～95%.目前某航空厂民机转包加工的飞机结构件,主要包括翼肋和端头类型的飞机骨架零件,这些零件通常包括薄的腹板和由垂直于腹板的薄壁筋板包围的开放格槽,一般具有单边特征,如图 1所示,主要采取高强铝合金预拉伸厚板加高速铣削的加工方式.在实际加工中,因材料性质、工件毛坯的初始应力状态、加工工艺及零件几何特征导致加工时容易产生明显的残余应力释放引起变形,目前因控制变形而采取的保守切削措施又降低了加工效率,导致加工成本提高.

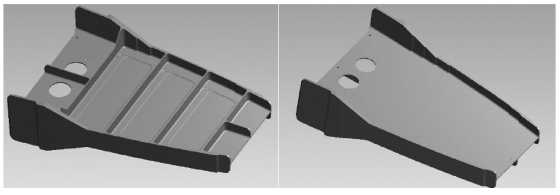


图 1　具有单边筋板格槽的翼肋零件

从典型结构件数控加工过程看,变形主要有 3个直接来源:

1) 刀具对工件的作用;

2) 装夹具对工件的作用;

3) 已切除材料残余应力的释放[1].

对典型单边结构件来说,不对称去除材料导致的工件内残余应力的不对称释放对变形的影响远大于其它 2种因素的影响[2],因此本文也主要研究残余应力对加工变形的影响.

2　变形分析方法和流程

本文建立了准确描述加工系统的模型,通过计算机辅助仿真模拟制造过程,预测工件的加工变形、表面质量、残余应力状态,进一步总结变形原因及变形规律,提出减小变形的预防措施.

有限元结构分析可用于确定结构的变形、应变、应力及反作用力等,可以考虑静态载荷下结构的线性和非线性行为,也可以对结构作瞬态动力学分析,确定结构对随时间任意变化的载荷的响应.热分析可以模拟工件内的温度场分布,热机械耦合技术分析热应力引起的变形情况等.结构件加工变形控制研究将围绕对加工过程进行数字化建模与仿真分析展开,采用理论建模和有限元分析与实验验证相结合的方法,具体研究对象和流程如图 2所示,根据具体加工情况和问题,研究对象材料确定为铝合金 7075-T7451预拉伸板材.

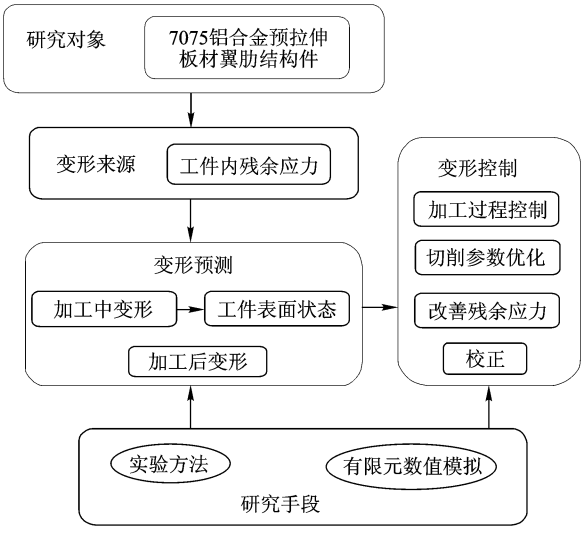


图 2　加工变形研究流程

具体研究选择典型翼肋类结构件对其加工过程、材料特性、实际加工变形情况进行了深入了解和研究,并将仿真预测结果与实际对比,验证模型的有效性,总结研究方法,有针对性的提出加工改进措施.

3　残余应力分析及模拟施加

3.1　工件内残余应力分析

工件产生变形的根本原因是内部的残余应力,残余应力的产生根本上是由于材料内各部分产生不均匀的形状和体积变化.在具体加工应用中,成形制造、热处理、机械加工等工艺都会形成不均匀残余应力.热处理引起的残余应力场在整个毛坯内分布,变化趋势较光滑[3].而切削加工过程引起的应力可以与此在同一数量级上,但是只限于工件表面很薄的一层内.加工后零件内的残余应力释放导致变形,残余应力可能加速结构的腐蚀和疲劳,使结构有可能在比设计载荷低的情况下失效.

铝合金热处理并时效后的残余应力主要是淬火热应力残留,即中心为拉表面为压的情况.经过预拉伸应力释放,则应力降低,分布会更复杂,在整个厚度内从压到拉反复变化几次,图 3为 7075预拉伸板材厚度界面内残余应力分布.

3.2　材料热处理过程引起的应力

采用 ANSYS软件提供的热机耦合功能,以温度场模拟施加铝合金的残余应力分布,ANSYS的

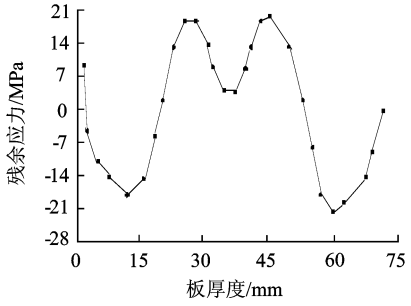


图 3 铝合金预拉伸后残余应力分布

热传导与应力的耦合分析提供了顺序(间接)耦合和直接耦合2种不同的处理方法.其中顺序耦合要求在每个增量步中依次求解热传导问题与变形问题.直接耦合分析中,有限单元的节点变量中同时包含了位移和温度,更适用于高度非线性的分析.热处理过程温度变化幅值大,非线性程度高,因此采用直接耦合场分析,如图4所示.用热力场拟合方法可利用任何已知的残余应力分布,将其施加到相应的模型上.

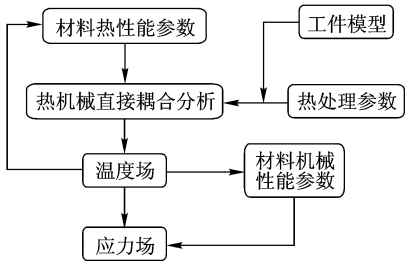


图 4 直接耦合法模拟热处理温度与应力场

4 去除材料对工件变形的影响模拟

去除材料改变了工件内残余应力释放和重新分布,从而引起变形.首先分析简单结构长方形截面梁.梁的残余应力在截面内通常是随梁截面厚度(x)方向和宽度(y)方向的位置变化,这一部分模拟采用ANSYS有限元计算软件实现.

切除上层材料后,残余应力导致工件变形为两端向下弯曲,如图5所示.在板厚度取50 mm时,去除1/10厚度即5mm材料后变形显著,达到mm级,同时工件内残余应力大幅度降低并趋于均匀化.针对飞机机翼翼肋典型结构件去除材料对工件变形的影响模拟加工过程流程图如图6所示.

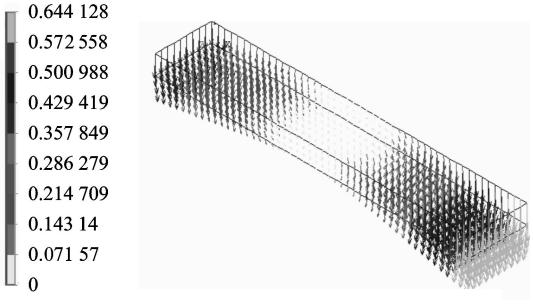


图 5 简单梁切除材料后弯曲情况(mm)

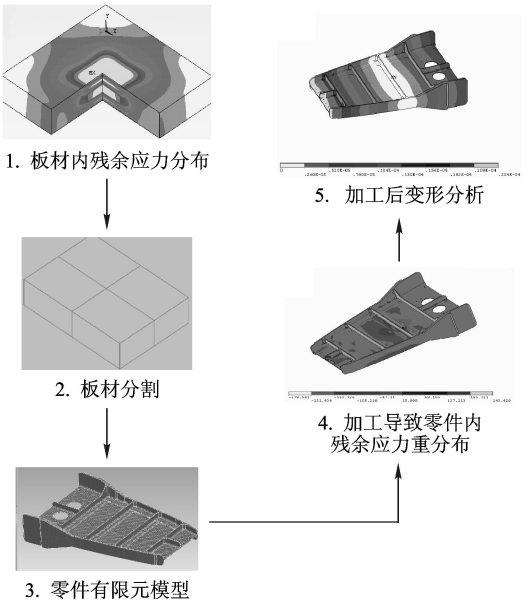
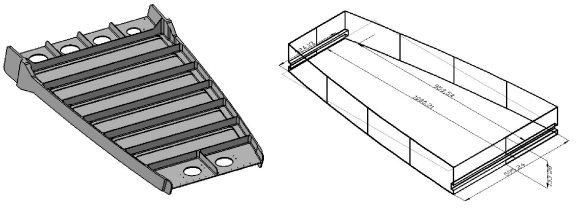


图 6 典型翼肋零件加工变形模拟流程图

5 实际加工仿真模拟

实际变形仿真模拟加工零件选择了转包生产的垂尾翼肋零件,其三维模型见图7a,零件中包括8个主要格槽,零件材料毛坯为129.5 mm × 558.8 mm ×952.5 mm,如图7b所示.



a 翼肋零件 b 毛坯材料

图 7 翼肋零件及其毛坯材料

为使模型更具可计算性,仿真对上述翼肋零件进行了简化.首先建立加工前零件模型,并对需切除部分材料分块建模.为模拟零件毛坯内的残余应力,以ANSYS的热机械耦合方法采用温度场近似加载.热机耦合过程中的残余应力见图8.

根据实际加工装夹和切削顺序,以ANSYS的单元生死技术模拟切削的去除材料过程,并记录每步骤加工变形和最终去除装夹约束后的残留变形,切第1面去除装夹约束后的变形情况见图9,零件加工完第2面后最终变形情况见图10,模拟过程及获得的结果数据见表1,表1中数据均为变形极值.

表 1　模拟加工过程变形值　　mm

加工步骤	平均总和	x			y			z		
		max	min	总变形	max	min	总变形	max	min	总变形
顶层	2.019	1.850	-0.330	2.180	0.71	-0.379	1.093	0.907	-1.420	2.327
槽 1	2.023	1.840	-0.307	2.147	0.71	-0.379	1.093	0.868	-0.874	1.742
槽 2	1.672	1.433	-0.307	1.740	0.71	-0.379	1.093	0.862	-0.863	1.725
槽 3	1.568	1.312	-0.307	1.619	0.71	-0.379	1.093	0.853	-0.861	1.714
槽 4	1.490	1.221	-0.307	1.528	0.71	-0.379	1.093	0.854	-0.858	1.712
槽 5	1.387	1.113	-0.307	1.420	0.71	-0.379	1.093	0.826	-0.820	1.646
槽 6	1.155	0.890	-0.307	1.197	0.71	-0.379	1.093	0.723	-0.720	1.443
槽 7	0.716	0.577	-0.307	0.884	0.71	-0.379	1.093	0.549	-0.490	1.039
槽 8	0.716	0.191	-0.307	0.498	0.71	-0.379	1.093	0.549	-0.490	1.039
卸载	4.506	2.620	-2.950	5.570	1.90	-3.450	5.351	1.442	-1.430	2.872
反面第 1层	4.330	4.162	-0.357	4.519	0.18	-1.630	1.810	1.315	-1.273	2.588
反面第 2层	3.826	3.809	-0.162	3.971	0.51	-0.554	1.068	1.560	-1.538	3.098
最终	2.308	1.900	-2.177	4.077	0.38	-0.533	0.917	1.650	-1.635	3.285

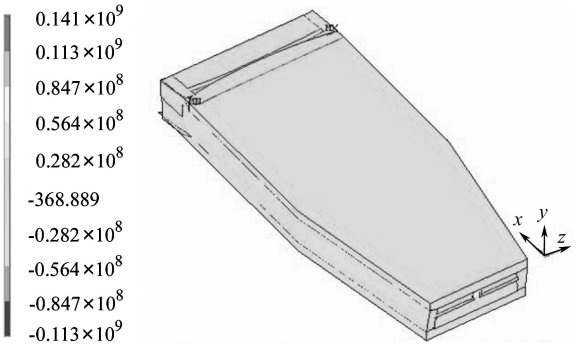


图 8　热机耦合残余应力发展 (Pa)

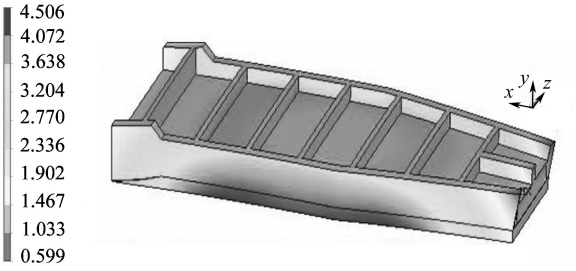


图 9　切第 1面去除装夹后的变形情况 (mm)

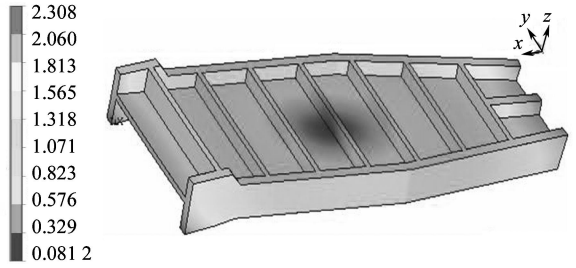


图 10　最终变形情况 (mm)

图 11显示了在切削过程 13个步骤中的工件的最大变形量,图中为 *x*, *y*, *z*三个方向变形量绝对值变化,显示出切除完成单面卸载后变形量最大,而双面加工完成后变形量减小. 在图 11中横坐标为切除步骤,第 1步为切除第 1层,第 2步为切除第 1个槽,第 3步为切除第 2个槽, ……,第 9步为切除第 8个槽,第 10步为卸除装夹约束,第 11步为切除反面第 1层,第 12步为切除反面第 2层,第 13步为最终状态.

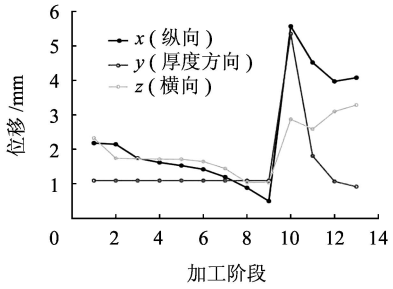


图 11　模拟加工中最大变形量

零件加工采用五坐标立式铣床 BF-80TTE37,主轴转速为 8000 r/m,进给量 0.125～0.15mm /齿,铣削深度为 1.5～2.5mm 之间,切削液为福斯切削液. 铣削第 1面时采用吸盘加工件重力装夹,加工第 2面时采用真空吸盘加压板固定装夹. 对所模拟的零件进行了加工后的实测,测得变形量与仿真结果比较,零件变形的趋势和分布情况比较一致,变形情况的对比证明分析方法和所建立模型的有效性,但具体量级有较大误差,究其原因,其一是因为模拟过程没有考虑单面完成后再次装夹时施加的力及其导致的残余应力及变形量的变化;另外是模型的精确性导致计算误差.

6　改进后的加工仿真

改进后的加工仿真对网格模型进行进一步细化,网格划分的更加细密,更准确施加残余应力和获得更精确的计算结果. 由于零件左右对称,有限元模拟 1/2简化模型. 划分网格采用了不同的密度,零件最终保留部分划分了较密的网格,被切除部分采用了较疏的网格划分. 图 12为加工完成后的最终有限元模型,由于零件最终筋板和腹板厚

度非常小,以及施加沿厚度变化的残余应力场的要求,总体网格划分仍十分巨大.有限元模拟加工仿真切除所有材料得到最终变形情况如图 13,最大变形量级约 10^{-1} mm,与加工获取的变形情况为同一量级和方向.

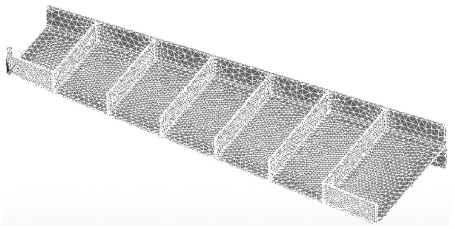


图 12 划分网格的有限元最终模型

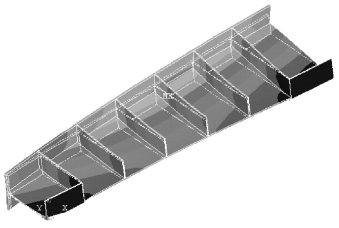


图 13 模拟加工完成后零件最终总体变形

对实际加工完成的零件进行了取样,并进行了三坐标测量,总结实际测量值与模拟结果得到的对比值见表 2.模拟结果总体比实际测量值稍大,其原因包括单面完成后再次装夹时施加的力等因素导致的误差,但模拟结果与实际测量值的变化趋势非常一致,进一步验证了所采用方法和建立模型的有效性.

表 2 模拟结果与实际测量值对比 mm

结果	总变形量	x		y		z	
		max	min	max	min	max	min
模拟值	0.51	0.24	-0.23	0.22	-0.71	0.46	-0.57
实测值	0.36	0.18	-0.144	0.12	-0.31	0.3	-0.33

7 针对变形控制的加工方案

以上对零件毛坯残余应力释放的模拟结果表明残余应力对零件变形的影响不可忽视,并且可以预测和采取相应措施进行改进.首先从材料本身考虑,改善原材料供应状态,获得理想应力分布是最简单直接的解决途径,但在材料给定的情况下基于以上研究结论,只考虑残余应力影响的前提下,可通过加工中尽量对称去除材料并合理安排切削顺序,使工件内残余应力得到合理释放,从而减少最终变形,具体可从零件定位、材料切除顺序和高速铣削参数优化 3个方面加以改善.

对于基本对称工件,一般工艺设计为工件置于毛坯中部,对称去除材料,主要是考虑制定工艺方便和使残余应力释放均匀.对于零件在毛坯中定位对变形的影响,研究表明工件在毛坯中的位置对控制残余应力导致变形的影响至关重要.

对于单面挖空的非对称零件,零件定位不同对变形的影响可能达到 5～10倍量级.减少变形的最佳定位应在介于毛坯底面和上下对称面之间的位置.由于翼肋类零件厚度方向所留余量极少,所以定位方案只能选居中附近的方案.

通过对切削参数的合理选择,使加工中工件的刚度始终保持最大值.充分利用高速切削的优势,加工薄壁零件正是高速铣削的长处,高速加工时切削带走了大量的热量,减少了热变形,尤其是径向切削力的大幅度减少,特别有利于薄壁件等刚性差零件的高速精密加工,残留在工件表面上的应力也很小,常可省去铣削后的精加工工序.

8 结束语

本文针对某航空企业转包生产的机翼翼肋零件数控加工中所出现的变形问题,研究了残余应力对加工变形的影响,采用经过改进的顺序静态单元生死方法实现切削过程的仿真,并对所模拟的零件变形量与实测测量结果进行了比较,变形的趋势和分布情况一致,变形情况的对比证明分析方法和所建立模型的有效性,研究为航空企业数控加工变形情况提供理论指导和建议,并提出了控制变形的加工方案.

参考文献 (References)

[1] 康小明,孙杰,苏财茂,等.飞机整体结构件加工变形的产生和对策[J].中国机械工程,2004,15(13):1140-1143
Kang Xiaoming, Sun Jie, Su Caimao, et al. Sources and control of machining distortions in large integral structures[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(13): 1140-1143 (in Chinese)

[2] 王运巧.飞机结构件加工变形分析及数值仿真研究[D].北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2007
Wang Yunqiao. Research on analytical and numerical simulation for machining distortion of aircraft structural parts[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007 (in Chinese)

[3] Jaroslav Mackerle. Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes [J]. Computational Materials Science, 2003, 27(3): 313-332

[4] Komanduri Ranga, Hou Zhen Bing. Thermal modeling of the metal cutting process-Part II: temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool-chip interface[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(1): 57-88

[5] Shet C, Deng X. Residual stresses and strains in orthogonal metal cutting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(6): 573-587