

文章编号: 1000-6893(2003)03-0286-03

航空结构件铣削残余应力分布规律的研究

王立涛¹, 柯映林¹, 黄志刚¹, 许德², 吴群²

(1. 浙江大学机械与能源工程学院制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

(2. 成都飞机工业集团公司数控加工中心, 四川 成都 610092)

Study on Residual Stress Produced in Milling of Aeronautic Structure

WANG Li-tao¹, KE Ying-lin¹, HUANG Zhi-gang¹, XU De², WU Qun²

(1. The College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2. NC Center of Cheng Du Aircraft Corporation, Chengdu 610092, China)

摘要: 采用三维有限元方法, 模拟计算航空铝合金 7050-T7451 材料在无内应力前提下数控铣削时产生的表层残余应力场。在综合考虑了现行的常规工艺方案基础上, 从中选定 4 种具有代表性的走刀路径分别进行分析计算, 进而优选出最为合适的走刀工艺规则。走刀过程采用动态载荷步模拟, 材料去除采用生死单元模拟, 从而使计算结果更加精确、可信。通过本文的研究工作, 可为提高该类材料数控铣削加工的尺寸稳定性确定合理的工艺策略。

关键词: 有限元方法; 走刀路径; 铣削残余应力; 载荷步; 尺寸稳定性

中图分类号: V261.2⁺3 **文献标识码:** A

Abstract: The residual stress field of the stress-free aeronautic aluminum alloy (7050-T7451) in the milling is studied with three-dimension FEM, and four typical tool-routes are simulated and analyzed respectively. According to the optimization goal of NC milling machining, a reasonable route is selected. In the course of this work, the cutting process is simulated using the dynamic loading step, and the removal of material is realized with the "birth and death" element technique. With this calculating model, the accuracy of simulation is improved greatly, and the research result can be used to support the selection of practical technology for guaranteeing the dimension stability of the workpiece during it in NC milling.

Key words: FEM; tool-route; milling residual stress; load step; dimension stability

由于工艺等方面的问题, 航空铝合金材料经铣削加工后都发生不同程度的变形, 严重影响产品的生产效率和生产成本。为此, 选择恰当的工具、合理的手段来准确分析计算影响零件变形的主要因素——残余应力分布规律具有重要的学术意义和工程价值。

金属在切削加工过程中, 已加工表面会产生残余应力, 对零件尺寸稳定性起破坏作用。目前这方面研究大多侧重于以正交直角切削为前提条件的稳态切削过程中的物理现象, 没有考虑零件的几何形状及其装夹系统等因素的影响。因此, 基于二维有限元方法的金属切削模拟在实际生产中具有一定的局限性^[1]。随着材料科学技术的发展, 为二维有限元模拟基础上的三维切削加工残余应力的理论分析提供了可行的环境。本文采用三维有限元技术跟踪铣削加工过程, 分析计算

了铣削加工中 4 种走刀路径工况下由于铣削力的作用而产生的残余应力及其分布规律, 为优选走刀路径前提下确定合理的工艺方案提供理论依据。

1 工程模型的力学释义

零件在铣削加工过程中, 由于刀具对切屑及已加工表面的摩擦及挤压作用而使已加工表面产生塑性变形, 待刀具离开后, 塑性变形部分限制了与其相邻部分的弹性恢复, 使零件表层产生残余应力。残余应力的存在严重影响着加工零件的几何形态, 对于航空航天产品中的大型结构件, 它是导致零件弯扭变形的主要因素。因此, 从弹塑性有限元的角度, 结合选定的 4 种走刀路径, 在屏蔽铣削热和装夹系统对残余应力影响的前提下, 采用加载及卸载的算法沿各路径施加运动载荷并同时“铣去”载荷经过的材料, 求出槽表面的残余应力的分布规律, 进而确定合理的加工路径, 为生产现场提供理论依据。

收稿日期: 2002-07-05; 修订日期: 2003-02-23
基金项目: 国家自然科学基金(50175102)和国防型号工程(00-1810-0785)资助项目
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/03/0286/>

2 铣削加工三维有限元模拟^[2]

铣削过程有限元模拟确定工件材料为 7050 - T7451 铝合金,以刀具直径 $\phi 25\text{mm}$ 、前角 16° 、后角 27° 、螺旋角 39° 情况下并针对研究材料经实验获得的三向铣削力为载荷边界条件。网格划分使用 20 节点六面体单元;模型共划分成 1904 个单元,划分结果如图 1 所示。

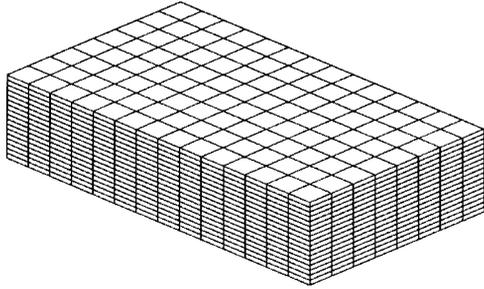


图 1 被加工零件三维有限元模型

Fig. 1 The three dimensional FEM model of part

(1) 运动载荷的模拟 在三维弹塑性有限元模拟中,通过动态对拟去除材料所在单元进行加载和卸载的方法来求得工件中的残余应力。处理方法是:三向铣削力以单元面载荷的形式作用在当前拟去除的单元上,并沿着加工路径向前走步,每个步长就是一个单元。模拟时,每个步长需进行两次有限元求解,一是当前单元的加载求解,二是该单元的卸载求解。待运动载荷走完所有拟去除的单元后再以一个零载荷求解一个子步,从而得到零件内残余应力的分布规律。

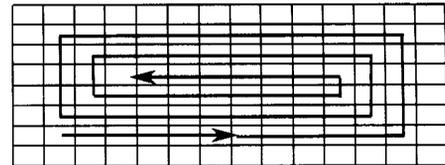
(2) 材料去除过程的模拟 在进行铣削过程模拟时,对切屑层单元处理与否,对计算结果影响很大。过程模拟是动态过程,切屑去除模拟也是动态过程,而动态进行三维网格划分和边界条件重置又比较困难且计算量大,为此,引用有限元法的生死单元技术将铣削力经历过的切屑层单元杀死,使其在计算中不起作用,既保证了计算效率又保证了计算精度。

(3) 不同位置单元的载荷模式 在生产实际中,铣刀的工作状态是不同的,首次进刀时,所有的刀齿都参与切削,称为满刀加工,而后各刀齿断续参与切削。对于这两种情况,要视加载单元所处的状态确定其加载模式。本文将单元看作“积木块^[3]”,被去除单元块因节点的牵制而体现为力的性质,有限元模拟去除块单元的过程就是施加外载荷以克服这种牵制力,这种外载荷的施加依据是三向铣削力,即切向力、进给力和轴向力,刀具走向改变则施加在单元面上的载荷性质也相

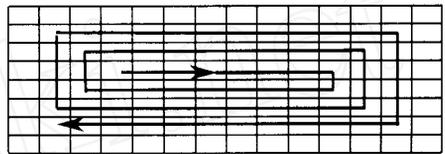
应变换。因此将与之等效的铣削力作为有限元模拟的外加载荷就可以实现铣削过程的力学模拟。

3 模拟结果

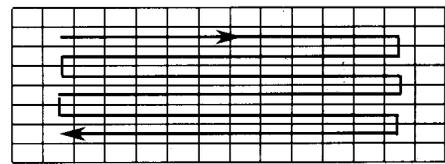
通过上述分析、处理和模拟,得出了给定 4 种走刀路径的铣削加工中已加工表面残余应力的分布规律,铣削加工走刀路径的形式及其对应残余应力的分布规律分别如图 2 和图 3 所示。



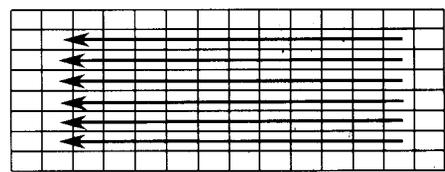
(a) 外环模式



(b) 内环模式



(c) 蜿蜒模式

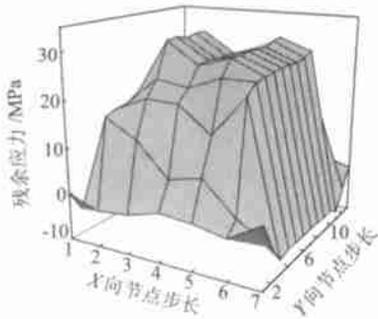


(d) 并进模式

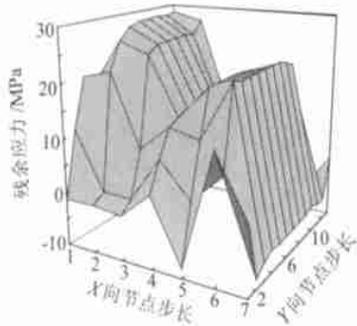
图 2 有限元模拟铣削加工的 4 种走刀路径

Fig. 2 The four tool-routes in milling for FEM simulation

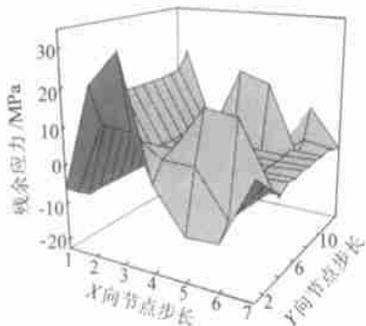
图 3(a) 为外环模式下残余应力分布规律,刀具从边缘向中心运动,应力有较大的释放空间,因而分布均匀,不存在明显集中现象。图 3(b) 为内环模式下残余应力分布规律,因刀具由中心向边缘运动,使应力向边界传播,导致在靠近边界附近有应力积聚。而靠近初始进刀一侧积聚得更为显著,是因为最先去除材料的部位受应力的影响最为敏感。图 3(c) 为蜿蜒模式下残余应力分布规律,由于刀具在运动过程中转向位移小,应力未获得足够的释放时间和空间,致使应力在转折处出现应力集中。图 3(d) 为并进模式下残余应力分布规律,这种加工模式存在多次进刀、出刀操作,使得应力在槽两端出现应力集中。而在平滑区域出现应力突起的现象,则是由于应力随刀具运动而不断释放的缘故。



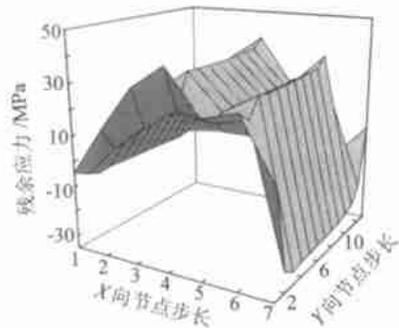
(a) 外环铣削模式已加工表面残余应力分布规律



(b) 内环铣削模式已加工表面残余应力分布规律



(c) 螺旋铣削模式已加工表面残余应力分布规律



(d) 并进铣削模式已加工表面残余应力分布规律

图3 不同加工路径下已加工表面 x 向残余应力的三维有限元模拟结果Fig. 3 The result of x -direction residual stress in machined surface by four routes

4 结 语

根据模拟结果,外环铣削加工模式因主加工区域内残余应力分布均匀而适于在实际加工中采用。其它三种模式则因存在局部应力积聚会使被加工零件具有潜在的变形条件而不适合在实际中实施,如果在精加工中需要考虑矩形框的几何尺寸,则可在外环铣时留出微量余量,待大部余量去除后,再沿框壁进行一次环铣,以使残余应力分布合理,从而保证工件几何尺寸的工艺要求。

参 考 文 献

- [1] 方刚,曾攀. 切削加工过程数值模拟的研究进展[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 394 - 404.
(Fang G, Zeng P. Advances in numerical simulation technology for cutting process[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(3): 394 - 404.)
- [2] 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, 2003.
(Wang L T. Study on residual stresses and distortion theory of aeronautic frame structure in the milling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.)
- [3] Ceretti E, Lazzaroni C, Menegardo L, *et al.* Turning simulations using a three dimensional FEM code[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 99 - 103.

作者简介:



王立涛(1964 -) 男,辽宁法库人,辽宁工程技术大学副教授,博士。主要研究方向为反求工程及数控加工变形控制等。

柯映林(1963 -) 男,湖北黄石人,浙江大学教授,博士生导师。主要研究方向反求工程、先进制造技术等。

(责任编辑:蔡 斐)