

铝合金铣削残余应力的研究进展

侯湘宇,林有希,孟鑫鑫

福州大学

摘要: 随着航空航天和汽车工业的发展,铝合金因其优良的性能得到了广泛应用,但铝合金铣削时出现的加工变形问题日益突出。铣削过程中产生的残余应力是导致加工变形的主要原因,相较于传统试验方法,有限元模拟仿真研究残余应力具有省时省力、节约成本的优点,更能获知应力场、应变场、温度场等重要信息,因此采用有限元技术对切削加工进行数值仿真将是未来研究铝合金结构件变形问题的大趋势。本文阐述了近年来国内外有限元模拟铣削过程的研究进展,总结了不同条件下对铣削铝合金残余应力的分析及研究成果。

关键词: 铝合金;残余应力;铣削仿真

中图分类号: TG506.1;TH164

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.07.001

Present Situation of Simulation Research on Residual Stress of Aluminum Alloy in Milling

Hou Xiangyu, Lin Youxi, Meng Xinxin

Abstract: With the development of aerospace and automobile industries, aluminum alloys have been widely used due to their excellent properties. However, the problem of machining deformation occurring during the milling of aluminum alloys has become increasingly prominent. The residual stress generated during the milling process is the main cause of the machining deformation. Compared with the traditional experimental method, the finite element simulation study has the advantages of saving time and labor, saving cost, and knowing the important information of stress field, strain field and temperature field. So the use of finite element technology to numerically simulate the cutting process will be a major trend in the study of deformation of aluminum alloy structural parts in the next few decades. In this paper, the research progress of finite element simulation milling process at home and abroad is expounded in recent years, and the analysis and research results of milling residual stress of aluminum alloy under different conditions are expounded.

Keywords: aluminum alloy; residual stress; machining simulation

1 引言

随着航空航天、汽车工业的发展,铝合金及相关制品的地位越发重要,例如在飞机制造领域,越来越多的大型复杂结构件采用铝合金材料。在制造过程中,大型整体薄壁结构件的加工变形问题最为突出,受到了学术界的广泛关注。

航空整体结构件通常具有复杂的型腔结构,加工工艺复杂,极易产生加工变形。影响加工变形的主要因素有工件材料和结构特性、残余应力、切削力和切削热、装夹因素以及加工路径。切削加工所产生的残余应力是影响零件精度稳定性的重要因素,因此通过控制切削加工残余应力以改善大型整体结构件的变形情况成为研究重点。切削加工残余应力的形成受很多因素的影响,包括工件材料属性、切削参数、刀具几何参数、润滑条件、刀具磨损等,这些因

素通过改变切削过程中的切削力和切削热来影响零件已加工表面质量和深度方向残余应力。铣削加工的过程不可避免地会产生残余应力,残余应力的性质和大小对整体薄壁结构件的性能有极大影响,若能准确预测铣削加工的残余应力,将会大幅提高整体薄壁结构件的寿命和性能,进而影响飞机的可靠性和乘客生命安全^[1]。

通过传统试验手段来研究影响残余应力的因素,不但耗时费力增加成本,而且无法获知加工过程中的应力场、应变场和温度场。采用有限元模拟的方法不仅能够考虑工件材料的属性、切削参数、刀具几何参数和切削分离准则等特点,还可以得到被加工零件的切削力、切削热、应力、应变和残余应力分布等重要信息。因此采用有限元技术来模拟切削加工过程、优化模型将是未来研究薄壁结构件变形问题的大趋势^[2]。

2 铝合金铣削残余应力理论研究进展

铝合金铣削加工产生的残余应力是加工表面不

均匀塑性变形的综合结果。铣削过程分析残余应力的产生机理,主要有三部分:①由铣削力引起的残余应力,铝合金材料在拉应力和压应力的共同作用下产生残余应力;②由热引起的残余应力,表层材料经加工升温再冷却至室温,体积收缩且受到里层材料的牵拉,在加工表面产生残余拉应力;③由相变引起的残余应力,加工表面温度升高至临界点,表层铝合金组织发生相变导致体积变化,因而产生残余应力^[3]。了解残余应力的产生机理有助于得到更贴切实际的仿真结果。

完美模拟铣削过程的先决条件是获得有限元建模的关键技术,主要包括材料的本构模型、切屑分离准则、刀具与切屑间的摩擦关系等。在对铝合金进行铣削仿真之前,不仅要分析残余应力的产生机理,还需根据实际情况,完成本构方程的改进,切屑分离准则及刀-屑接触摩擦类型的选择等工作。

材料本构关系是铣削仿真建模的基础与前提,构建反映材料在切削条件下的本构模型,是切削建模的前提条件。常见的本构模型有

J-C 本构模型

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (1)$$

Zerilli-Armstrong 模型

FCC(面心立方)

$$\sigma = \Delta\sigma'_c + c_1 \exp(-c_3 T + c_4 T \ln \dot{\varepsilon}) + c_5 \dot{\varepsilon} + kd^{-0.5} \quad (2)$$

BCC(体心立方)

$$\sigma = \Delta\sigma'_c + c_2 \varepsilon^{0.5} \exp(-c_3 T + c_4 T \ln \dot{\varepsilon}) + kd^{-0.5} \quad (3)$$

此外还有 Bodner-Partom 本构模型、Power law 本构模型以及 Nemat-Nasser 本构模型等。在众多本构模型中,由于 Johnson-Cook 本构方程考虑了应变硬化、应变率硬化和热软化效应,在试验中容易获得材料参数且易在有限元软件中实现,在金属切削中应用最广泛。但 J-C 本构模型由于其局限性,只能描述材料流动应力应变硬化现象。Kassner M. E. 等^[4-6]研究发现,当金属材料发生较大应变且应变超过一定值时,流动应力会随应变的进一步增大出现下降趋势,即发生应变软化。同时,铝在高温和纯剪切大应变的情况下表现出明显的软化,这是多种现象共同作用的结果。最广泛接受的早期解释涉及纹理的发展导致平均泰勒因子的下降。最近的研究表明,因为位错上升被普遍认为是高温塑性的速率控制机制,因而可以得出结论,导致软化的主要原因是位错攀爬应力的增加。

对航空工业来说,有必要对铝合金本构模型中

应变软化部分进行研究,Senthil K. 等^[7]研究了 7075-T651 铝合金在不同应力状态、应变速率和温度下的流动和断裂行为,探讨了极端条件下材料在红外航空航天和装甲结构中的流动和断裂特性。针对 Johnson-Cook 本构方程在应变软化方面的空白,一些学者在该基础上进行了修改或提出了新的考虑应变软化效应的本构模型。Galamaz M. 等^[8]在 Johnson-Cook 本构方程的基础上,增加温度和应变相关的双曲正切函数项以考虑应变软化效应;Sima M. 等^[9]在 Galamaz M. 的基础上,通过双曲正切函数项处增加指数实现了对材料流动应力的更好控制,验证了采用此本构仿真数值模型的准确性,同时进一步说明了采用考虑应变软化效应的本构模型能提高数值模拟的精度。

刀-屑分离是指正常切削过程中,切屑会逐渐成形并与前刀面产生摩擦,继而与前刀面分离的现象(见图1)。在有限元分析理论中,刀-屑分离准则是指刀-屑接触区切屑单元所受拉应力为零时的刀-屑分离。目前有限元仿真的常用切屑分离准则主要有物理分离准则和几何分离准则,段春争等^[10]经分析比较两种准则,认为几何分离准则通过刀尖与分离线之间的临界距离来判断切屑是否分离,不能很好地反映被加工材料的物理性质;物理分离准则主要以某些特定量的数值为准则来判断被加工材料的切屑是否与材料发生分离,相比之下,物理分离准则更加贴近实际切削过程。

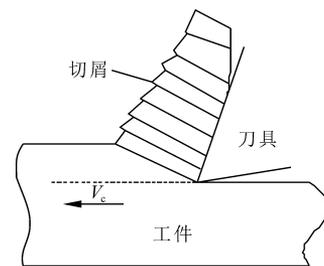


图1 流动层与前刀面随切屑流动发生分离

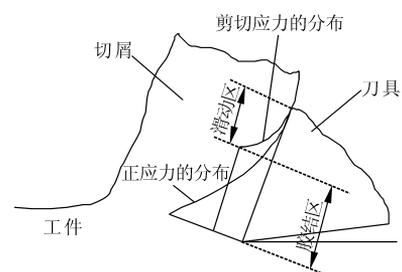


图2 直角切削时刀-屑摩擦模型

铣削刀具与切屑间的摩擦关系非常复杂,刀具的前刀面与切屑、后刀面与已加工表面都存在摩擦

和挤压作用,在实际研究中,通常以直角切削时的刀—屑摩擦模型作为理论模型进行分析(见图2)。由于摩擦产生的切削热直接影响刀具的磨损,继而影响刀具使用寿命、工件加工精度和表面质量^[11],因此,仿真中建立更贴合实际的刀—屑摩擦模型可以显著提升切削加工模拟的准确性。

刀—屑接触面的摩擦现在普遍采用刀具前角的正应力和摩擦应力之间的关系来表示,刀具前刀面上的平均摩擦系数公式为

$$\tan\beta = \frac{F_f}{F_n} = \frac{\tau_{st}}{\sigma_{imax}} \left(1 + y \frac{l_{st}}{l_f} \right) \quad (4)$$

这种方法在各种切削数值仿真中得到了广泛应用。在给定不同的切削速度和进给量的前提下,丁杰雄等^[12]发现刀—屑摩擦系数会随切削速度和进给量的增加发生显著变化,当输入合适的刀—屑摩擦系数时,获得的数值模拟结果更加贴近实际试验结果。从而证明,刀—屑摩擦系数的准确性直接影响数值模拟精度。

3 铝合金铣削残余应力仿真研究进展

有限元法(FEM)作为预测加工变形和残余应力常用的数值方法,在如何制造出精度更高的零件这一问题上发挥了重要作用。国内外学者凭借FEM手段在铣削残余应力领域取得了诸多成果。

从铣削刀具的角度出发,Shen Q.等^[13]研究了切削刃形状影响加工表面残余应力分布的有限元模型。仿真模拟发现,随着平均切削刃半径的增大,表面拉伸残余应力值和最大压缩残余应力值呈增大趋势。与使用珩磨加倒角切削刃相比,平均切削刃半径较小的切削刃可以显著减小表层残余应力。

以切削参数为切入点,Outeiro J. C.等^[14]通过有限元模拟和试验分析了刀具和工艺参数对铝合金正交切削产生的残余应力的影响,并在有限元模拟的基础上进行验证,试验的结果与有限元仿真模拟的结果非常吻合,说明Outeiro J. C.等提出的有限元模型适用于研究切削参数对加工残余应力的影响。研究还指出,采用断续切削可以限制表面残余应力的增大。

以铝合金6061为例,Jiang Z.等^[15]提出一种综合建模方法来预测由铣削残余应力引起的变形,更精确地反映了切削参数与铣削残余应力之间的关系。首先利用响应面设计(RSD)建立了一种新的模型,可以根据不同的切削参数预测工件沿切削方向的残余应力分布。在此基础上,根据估算的应力分

布和材料力学理论推导出挠度公式,并进行仿真分析。结果表明,该方法可以准确地估计给定切削参数下的残余应力分布,从而有效地预测残余应力引起的工件变形。

经典有限元方法在灵活性和精度方面存在局限性,为了突破这种局限,Alvise L.等^[16]提出了一种基于水平集的方法来定义独立于工件网格的切削路径。这种定义方式解决了以往仿真试验中,切削路径与由初始几何形状定义的工件网格不匹配的问题,大大提高了机翼零件的铣削仿真精度。同时采用水平集方法对模型中刀具轨迹进行定义,多次加工过程之间无需重新啮合,节省了大量计算时间。这种方法可以用于新航空航天部件的抗畸变设计和开发,通过仿真来预测任何新概念部件的变形行为。

铝合金表面的残余应力经过铣削加工后,会发生一定程度的重分布。Salvati E.等^[17]基于有限元方法,提出了一种经过简化的特征应变残余应力重构法,对表面处理引起的残余应力进行重构,大大减少了有限元软件预处理步骤的计算量。试验证明,涉及热力耦合变形的通用表面处理可以用一个简单的连续函数表示,该函数只依赖于材料的深度。这种方法的优点是适用于任何复杂形状的固体。

为了准确预测加工引起的残余应力,Guo Y. B.等^[18]提出了一种有限元模型,此模型适用于普遍的表面残余应力预测。应用此模型进行有限元模拟加工分析后发现,峰值剪切应力和峰值剪切应变的大小和位置均不受残余压应力影响,说明压缩残余应力不会影响表面以下的疲劳裂纹萌生,但可以抑制疲劳裂纹的扩展。

对于多框架构件的残余应力问题,Guo H.等^[19]建立了铣削变形分析的有限元模型,并利用三维有限元模拟改变铣削条件,对铣削变形结果进行预测和分析。通过比较仿真结果和铣削试验结果,对所提出的模型进行修改,证明了预测方法的有效性。这种有限元模型的创新之处在于引入了一种称为“房屋建筑框架建模”的方法,对大尺寸单片多框架部件的有限元分析建模行之有效。

Gao H.等^[20]考虑了双轴初始残余应力后,提出了一种基于板壳理论的分析模型以预测加工变形。从有限元模拟中得出结论,加工挠度可以表示为初始残余应力和影响系数的线性总和。同时发现,基于该有限元模型的分析结果,由对称初始残余应力引起的最终偏转在理论上可以被认为是零,因而在加工过程中若是注意使铣削力对称作用于工件,则

可以有效抑制加工变形,即使是半对称加工也有助于减少加工变形。

4 铝合金薄壁件铣削残余应力研究进展

在航空航天领域,加工残余应力是衡量铣削质量的重要指标,能否控制残余应力至关重要。在航空航天工业中最为突出的是大型铝合金薄壁件的加工变形问题,Wang Z. J. 等^[21]采用有限元方法对加工残余应力引起的变形问题进行了分析,并通过试验验证了仿真结果。结果表明:对于铝合金薄壁件加工变形,残余应力的释放是其主要成因。同时,结论也证明了铝合金材料去除率存在一个临界值,当材料去除率达到此临界值后,铝合金的加工变形趋于稳定。

Wei Y.^[22]采用有限元模型来研究航空薄壁零件的加工变形和残余应力,并分析了由残余应力产生的变形及相应的控制方法。经仿真模拟和试验验证后发现,如果样品的长度远大于宽度,那么纵向残余应力的影响将远远大于横向残余应力,且纵向残余应力将占据影响变形的主要部分。同时,在有限元仿真建模的前期工作中,如果零件的实际初始残余应力小而均匀,对加工变形进行的预测和控制将会更加准确。

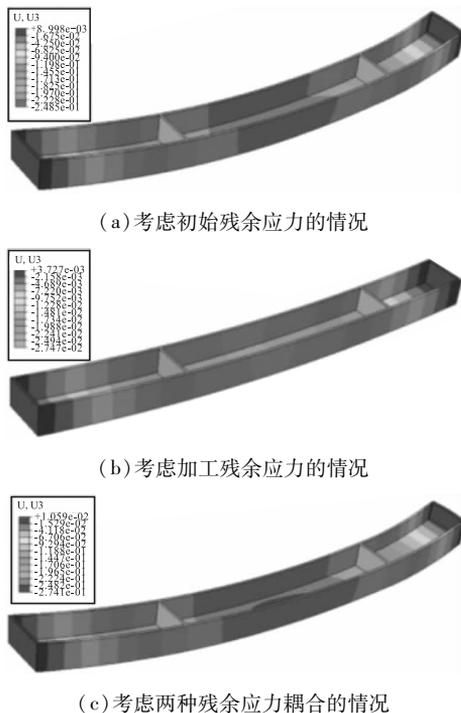


图3 某结构件的有限元仿真模型结果

针对薄壁零件加工变形的问题,一些学者从不同方面得出了结论。Tang Z. T. 等^[23]开发了有限元

预测模型,提出加工变形预测模型,该模型考虑了多因素的耦合效应,包括初始残余应力、夹紧载荷、铣削机械载荷、铣削热负荷、机械加工残余应力。这种有限元模型预测了真实框架整体构件的加工成形,为验证预测模型的准确性,在坐标测量机上测量了变形量,模型的变形测量结果与试验结果吻合较好,说明该变形预测模型可作为研究整体构件加工变形进一步控制策略的有效方法;Huang X. 等^[24]通过有限元仿真模拟和试验研究了整体构件变形的主要影响因素(见图3)。考虑了坯料的初始残余应力和加工引起的残余应力两种影响因素的耦合作用。为了研究坯料初始残余应力对部件变形的影响,使用化学铣削去除加工引起的部件加工表面残余应力。

研究结果表明,加工残余应力并不是影响三框架整体梁变形的主要因素,但加工残余应力与初始残余应力的耦合作用加剧了变形。通过有限元模拟和试验研究了铝合金飞机整体构件的加工变形,并验证了有限元模拟的预测精度,得到的模拟结果与试验结果吻合良好。

5 结语

经过综合国内外不同学者对铝合金铣削残余应力的有限元仿真研究成果,可以得出以下结论:

(1)控制切削过程中的一些条件,如减小切削刃几何半径、采用断续切削方式、用水平集方法重新定义切削路径等,可以有效减轻由加工残余应力带来的铝合金变形问题,同时可以提高有限元仿真的准确性。

(2)从不同角度分析铝合金的铣削残余应力问题,可以得出不同的分析模型,因此寻求考虑更多影响因素的有限元分析方法将成为下一步研究方向。

(3)对于大型铝合金薄壁件的加工变形问题,残余应力是其主要成因,且纵向残余应力占据影响变形的主导地位,同时多重因素的耦合效应也加重了变形,考虑以上要点有助于进一步研究整体构件加工变形的控制策略。

参考文献

- [1] Li J G, Wang S Q. Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 997-1012.
- [2] Wang L, Huang H, West R W, et al. A model of deformation of thin-wall surface parts during milling machining process [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(5):

- 1107 – 1115.
- [3] 郭培燕, 王素玉, 冯桢, 等. 切削加工表面残余应力的产生和控制[J]. 工具技术, 2007, 41(3): 46 – 48.
- [4] Kassner M E, Wang M T, Perez-Prado S. Large-strain softening of aluminum at elevated temperature[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(10): 3145 – 3153.
- [5] Kassner M E, Wang M Z, Perez-Prado M T, et al. Large-strain softening of aluminum in shear at elevated temperature[J]. Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and Materials Science), 2002, 33(10): 3145 – 3153.
- [6] Kassner M E, Ermagan R. Understanding large – strain softening of aluminum in shear at elevated temperatures[C]. Tms Meeting & Exhibition. Springer, Cham, 2018.
- [7] Senthil K, Iqbal M A, Chandel P S, et al. Study of the constitutive behavior of 7075-T651 aluminum alloy[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108: 171 – 190.
- [8] Calamaz M, Coupard D, Girof F. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(3 – 4): 275 – 288.
- [9] Sima M, Ozel T. Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(11): 943 – 960.
- [10] 段春争, 王肇喜, 李红华. 切削锯齿形切屑形成过程的有限元模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(2): 226 – 232.
- [11] Abdelali H B, Claudin C, Rech J, et al. Experimental characterization of friction coefficient at the tool-chip-workpiece interface during dry cutting of AISI 1045[J]. Wear, 2012, 286 – 287(none): 108 – 115.
- [12] 丁杰雄, 崔海龙, 张川东, 等. 面向金属切削过程数值模拟的材料本构方程和刀-屑摩擦特性[J]. 工程科学与技术, 2012, 44(6): 181 – 185.
- [13] Shen Q, Liu Z, Hua Y, et al. Effects of cutting edge micro-geometry on residual stress in orthogonal cutting of Inconel 718 by FEM[J]. Materials, 2018, 11(6): 13 – 18.
- [14] Outeiro J C, Umbrello D, MSaoubi R. Experimental and numerical modelling of the residual stresses induced in orthogonal cutting of AISI 316L steel[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(14): 1786 – 1794.
- [15] Jiang Z, Liu Y, Li L, et al. A novel prediction model for thin plate deflections considering milling residual stresses[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1 – 4): 37 – 45.
- [16] Alvisé L, Chantzis D, Schoinochoritis B, et al. Modelling of part distortion due to residual stresses relaxation: an aeronautical case study[J]. Procedia Cirp, 2015, 31: 447 – 452.
- [17] Salvati E, Korsunsky A M. A simplified FEM eigenstrain residual stress reconstruction for surface treatments in arbitrary 3D geometries[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138 – 139(4): 138 – 139.
- [18] Guo Y B, Barkey M E. FE-simulation of the effects of machining-induced residual stress profile on rolling contact of hard machined components[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(3): 371 – 388.
- [19] Guo H, Zuo D W, Wu H B, et al. Prediction on milling distortion for aero-multi-frame parts[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 499(1): 230 – 233.
- [20] Gao H, Zhang Y, Wu Q, et al. Investigation on influences of initial residual stress on thin-walled part machining deformation based on a semi-analytical model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262(10): 437 – 448.
- [21] Wang Z J, Chen W Y, Zhang Y D, et al. Study on the machining distortion of thin-walled part caused by redistribution of residual stress[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(2): 175 – 179.
- [22] Wei Y, Wang X W. Computer simulation and experimental study of machining deflection due to original residual stress of aerospace thin-walled parts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(3 – 4): 260 – 265.
- [23] Tang Z T, Liu Z Q, Wan Y, et al. Study on residual stresses in milling aluminium alloy 7050-T7451[J]. Advanced Design and Manufacture to Gain a Competitive Edge, 2008, 22(3): 168 – 178.
- [24] Huang X, Sun J, Li J. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5 – 8): 1035 – 1041.
- 第一作者: 侯湘宇, 硕士研究生, 福州大学机械工程及自动化学院, 350116 福州市
- First Author: Hou Xiangyu, Postgraduate, College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China
- 通信作者: 林有希, 教授, 福州大学机械工程及自动化学院, 350116 福州市
- Corresponding Author: Lin Youxi, Professor, College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China