

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.002

超声振动切削铝合金表面残余 应力的有限元仿真^{*}

许东辉, 郭 强^{*}, 张鸿斌, 张明阳
(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要:针对航空铝合金结构件加工的表面质量问题,利用有限元软件 ABAQUS 建立了基于 Johnson-Cook 本构的铝合金 7050-T7451 二维正交热力耦合模型。在相同的切削参数下,比较了传统切削、横向(即切削方向)振动切削和纵向(即轴向)振动切削加工的表层残余应力,并研究了超声振动切削参数、振动频率、振动幅值下,对残余应力的影响规律;通过引用相关文献残余应力的实验数据,验证了仿真模型的正确性。研究表明:3 种切削方式的表面残余应力均为压应力,沿深度方向向残余拉应力过渡,并且振动切削可以明显提高工件表面的残余压应力;表面残余压应力随切削速度和切深的提高而减小,表面残余压应力随着振幅或频率的增大而逐渐增大。

关键词:残余应力; ABAQUS; 正交切削; 超声振动

中图分类号: TH16; TG663

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2019)12-1242-06

Finite element simulation of surface residual stress in ultrasonic vibration cutting of aluminum alloy

XU Dong-hui, GUO Qiang, ZHANG Hong-bin, ZHANG Ming-yang

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Aiming at the surface quality problems of aeronautical aluminium alloy structural parts, a two-dimensional orthogonal thermo-mechanical coupling model of 7050-T7451 aluminium alloy based on Johnson-Cook constitutive model was developed with finite element software ABAQUS. Under the same cutting parameters, the residual stresses of surface layer in conventional cutting (CC), vibration cutting in the cutting direction (CVC) and vibration cutting in the axial direction (AVC) were compared, and the effects of ultrasonic vibration cutting parameters, vibration frequency and vibration amplitude on the residual stresses were studied. The validity of the simulation model was verified by quoting the experimental data of residual stress in relevant literatures. The results indicate that the surface residual stress of the three cutting methods is compressive stress, which tends to the residual tensile stress along the depth direction. Vibration cutting can significantly increase the residual compressive stress of the workpiece surface. Surface residual compressive stress decreases with the increase of cutting speed and depth. With the increase of vibration amplitude or frequency, the surface residual compressive stress increases gradually.

Key words: residual stress; ABAQUS; orthogonal cutting; ultrasonic vibration

收稿日期: 2019-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605147, 51575163);河南省科技厅资助项目(162300410120);河南理工大学校杰青项目和河南理工大学青年骨干项目(2018XQG-05)

作者简介:许东辉(1991-),男,河南长葛人,硕士研究生,主要从事超声加工方面的研究。E-mail:1216461440@qq.com

通信联系人:郭强,男,副教授,硕士生导师。E-mail:guoqiang@hpu.edu.cn

0 引言

铝合金具有密度低、强度高、加工性好的特点,广泛地应用于航空业。航空业对于部件的加工精度和表面质量有着很高的敏感度,优异的加工表面可以提高工件的疲劳强度、抗腐蚀能力和蠕变寿命,而残余应力就是表面质量的一个重要衡量标准^[1]。通常情况下,残余拉应力容易促使已加工表面产生裂纹并使其扩展,从而降低疲劳强度。相反,残余压应力通过抵消一部分工作载荷施加的拉应力,可以提高工件的疲劳寿命。以残余应力为目标的研究已经成为当前热点。

MASMIATI N 等^[2]设计了 D-最优实验,通过优化铣削参数、润滑模式(润滑剂的种类)和铣削模式(即顺铣和逆铣)来铣削中碳钢,并建立了基于表面响应法的数学模型,实现了对表面残余应力的预测。结果表明:在合适的切削参数下,采用 MQL-SiO₂ 纳米润滑剂和顺铣的条件下易得到较小的残余应力,最小残余应力值为 -619.50 MPa;ZHANG Q 等^[3]提出了一种系统的数据驱动模糊建模方法,并成功应用于铝合金加工引起的残余应力的预测,实现了同时最小化残余应力和加工成本的最佳加工方案;MASMIATI N 等^[4]将田口优化方法应用于倾斜端铣切削削的实验设计,同时使用信噪比(S/N)响应分析和变异分析(Pareto ANOVA),进行了数据分析以找到最佳条件,从而实现了已加工表面显微硬度和残余应力的控制。

虽然上述研究都能一定程度上实现对表面残余应力的预测和控制,但影响残余应力的因素很多,研究通用性不强。

超声加工以其高频的冲击振动、以及分离特性,能有效地降低加工过程中平均切削力和切削温度,提高零件的抗疲劳特性,改善工件表面残余应力^[5],避免传统加工复杂的参数优化问题。TEIMOURI R 等^[6]用超声波辅助球抛光工艺代替传统球磨,通过有限元软件 ABAQUS 仿真得出:超声波中压缩残余应力的最大值明显高于传统抛光工艺,在进给速度 1 000 mm/min,静力为 38 N 条件下,采用超声辅助振动的压残余应力值达到 -217 MPa,而采用传统抛光工艺的压残余应力值为 -163 MPa。牛赢等人^[7]利用 ABAQUS 建立了超声振动铣削的等效三维有限元仿真模型,成功对钛合金 Ti-6Al-4V 进行了铣削残余应力仿真,与传统铣削对比发现:超声振动铣削能够有效降低切削力和切削温度,增大表面残余压应力和压应力层深度;罗明明^[8]利用有限元仿真,研究了刀具轴向振动切削下,

切削速度对钛合金表面残余应力的影响;孙青^[9]利用有限元法,研究了超声振动微细铣削残余应力随各切削参数的变化规律。

因此,超声加工能显著改善工件表面残余应力状态。

本文将采用有限元软件 ABAQUS,建立基于 Johnson-Cook 本构的铝合金 7050-T7451 二维正交热力耦合模型,在相同的切削条件下,比较传统切削、振动切削在切削方向和振动切削在轴向方向加工表面残余应力,并研究超声振动切削参数、振动频率、振动幅值下已加工表面残余应力的影响规律,最后利用实例验证有限元模型的准确性。

1 残余应力有限元模型

金属切削的过程十分复杂,伴随着高温、高压、大应变、大应变率,是一个高度非线性问题。仿真模型的建立需要诸多步骤,如工件材料的本构模型、切屑的失效准则、刀具的尺寸参数、分析步以及网格单元选择。

1.1 工件材料的本构

切削仿真必须要精确地描述所加工材料在高应变、高应变率以及高温下材料的力学行为,因此,仿真的先决条件是准确的本构模型。Johnson-Cook 本构^[10-11]是一种经验模型,能很好地解释众多金属材料切削加工过程中的应变硬化、应变率硬化和热软化行为,其表达式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left(1 - \left[\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right]^m\right)$$

(1)

式中:σ—流动应力;ε—塑性应变;ε̇—塑性应变率;ε̇₀—参考塑性应变率,ε̇₀ 取值为 1;T—工件温度;T_{melt}—工件材料熔化温度;T_{room}—室温温度;A—准静态下的屈服强度;B—硬化模量;C—应变率敏感系数;n—应变硬化指数;m—温度敏感系数。

铝合金 7050 - T7451 的 Johnson-Cook(J-C) 本构参数如表 1 所示^[12]。

表 1 铝合金 7050-T7451 的 J-C 本构参数

A/MPa	B/MPa	n	C	m
441	383.39	0.183	0.019	0.859

1.2 材料失效准则

Johnson-Cook 剪切失效准则通常和 Johnson-Cook 塑性本构模型配合使用,用来描述单元网格失效和分离,从而形成切屑。Johnson-Cook 剪切失效表达式

如下:

$$\bar{\varepsilon}_f^p = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{\sigma_p}{\sigma_{\text{Mises}}} \right) \right] \left(1 + d_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) * \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 —失效参数; $\bar{\varepsilon}_f^p$ —失效时等效塑性应变; $\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}$ —压力偏差应力比; σ_p —压应力; σ_{Mises} —米氏应力。

Johnson-Cook 剪切破坏模型基于元素积分点的等效塑性应变值,当损坏参数超过 1 时,网格发生失效。损坏参数 ω 定义为:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_f^p} \right) \quad (3)$$

式中: $\Delta \bar{\varepsilon}^p$ —等效塑性增量。

铝合金 7050-T7451 失效参数值如表 2 所示^[13]。

表 2 铝合金 7050-T7451 单元失效参数值

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.071	1.248	-1.142	0.147	0

2 仿真模拟结果与分析

2.1 已加工表面残余应力的仿真过程

铝合金表面残余应力的获取分为两个阶段。阶段 1 是切削加工,这一阶段在仿真软件 ABAQUS 的 Explicit 求解器中进行;阶段 2 是冷却阶段,这一阶段在仿真软件 ABAQUS 的 Standard 求解器中进行。

在阶段 1,切削仿真分为两个分析步(即热力耦合显示分析步和动力显示分析步)。其中,热力耦合显示分析步用于完成刀具对于工件的切削,动力显示分析步用于完成退刀。冷却阶段是通过复制阶段 1 的仿真模型,然后删除模型中的刀具模型、刀具材料属性、刀具与工件的接触属性来实现的。冷却仿真的关键是仿真初始条件的设定,通过设置预定义场,将阶段 1 切削加工完成后的最终应力状态作为冷却仿真的初始条件。然后将先前分析步替换为动力显示分析步,重新设置边界条件,采用两点约束,最终完成工件的冷却。

残余应力模拟的两个阶段如图 1 所示。

2.2 残余应力的影响因素及结果分析

仿真模型中,刀具的前角 γ_0 为 15° ,刀具的后角 α_0 为 10° ,材料为硬质合金。工件的几何尺寸为 $3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,材料为 Al7050-T7451。

刀具和工件的物理属性如表 3 所示^[14]。

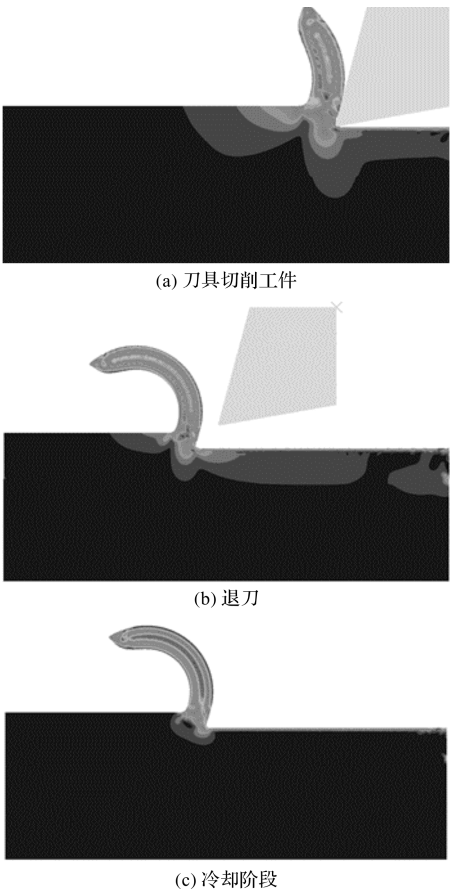


图 1 残余应力模拟的两个阶段

表 3 工件与刀具的物理参数

物理参数	工件(7050-T7451)	刀具(硬质合金)
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 810	1 480
杨氏模量 E/GPa	71	635
泊松比	0.33	0.3
传热率/($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	128	79.6
比热 c /($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	960	176

在建模中,工件被分为两部分,上、下分别为切削层和基体,切削层的网格密度大于基体的。工件网格的单元类型为 CPE4RT。刀具在此次仿真中被设为刚体,其网格类型为 CPE3T。

2.2.1 传统切削、横向振动切削和纵向振动切削加工表面残余应力的比较

超声振动切削振动频率 $f = 20\text{ kHz}$,振幅 $A = 10\text{ }\mu\text{m}$ 。采用横向振动切削(CVC)时,当切削速度 $v_0 \leq v_c$ (即临界切削速度, $v_c = 2 \times \pi \times f \times A = 1\,256.64\text{ mm/s}$),刀具和工件实现分离,从而使连续切削变成断续切削。而传统切削(CC)和纵向振动切削(AVC)均为连续切削。为了能实现刀屑分离,选取切削速度 $v_0 = 800\text{ mm/s} \leq v_c$ 。刀具的切削深度 $a_p = 1\text{ mm}$,进给量 $f_r = 0.1\text{ mm}$ 。

在有限元仿真模型边界条件设置中,常规切削工件完全固定,限制刀具上、下移动和转动,切削速度施加在刀具上。振动切削,刀具振动,限制工件上、下移动和转动,切削速度施加在工件上。

3 种不同切削方式对残余应力的影响如图 2 所示。

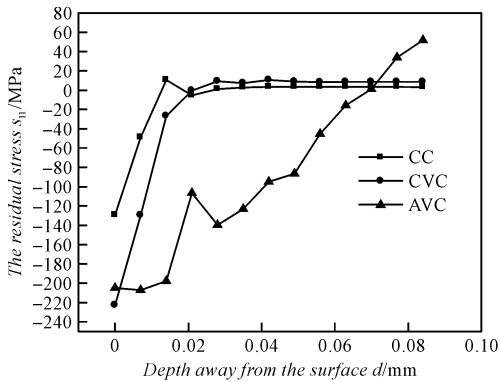


图 2 3 种不同的切削方式对残余应力的影响

由图 2 可知：
在 3 种切削方式下,最大残余压应力值都出现在已加工工件表面。随着切削深度的增加,残余压应力逐渐转变为拉应力,并最终趋于稳定。其中,两种不同振动方向的超声切削比常规切削有更大的表面残余压应力。因此,超声振动切削对于工件表面应力状态的改善具有明显的优势。

本文以横向振动切削为例,研究切削参数、振动频率、幅值对残余应力影响规律。

2.2.2 切削速度对表面残余应力的影响

选取超声振动的振动频率 $f = 20\text{ kHz}$, 振动幅值 $A = 10\text{ }\mu\text{m}$, 刀具的切削深度, 进给量。

切削速度对加工表面残余应力的影响如图 3 所示。

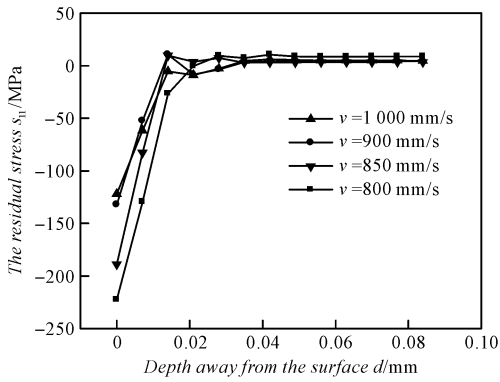


图 3 切削速度对加工表面残余应力的影响

由图 3 可知：
不同切削速度下,残余应力变化的整体趋势一致,都是沿切深由残余压应力向残余拉应力转变,最终在

应力值为 0 处趋于稳定。随着切削速度的增大,工件表面残余压应力值逐渐减小;当切削速度 $v_0 = 800\text{ mm/s}$ 时,表面残余压应力最大,值为 222.69 MPa 。这是因为横向振动切削是非连续切削,切削速度越小,刀具与工件接触时间(即切削时间)占整个加工时长越小,从而刀具与工件接触摩擦产生的切削热越少。当工件冷却到室温后,由热应力所引起的残余拉应力的影响也越小。

2.2.3 切削深度对表面残余应力的影响

本研究选取超声振动的振动频率 $f = 20\text{ kHz}$, 振动幅值 $A = 10\text{ }\mu\text{m}$, 刀具的进给量, 切削速度 $v_0 = 800\text{ mm/s}$ 。

切深对表面残余应力的影响如图 4 所示。

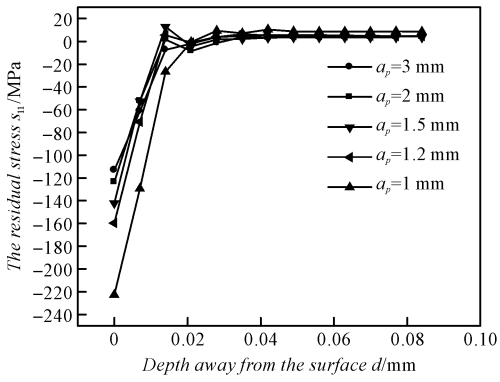


图 4 切深对表面残余应力的影响

由图 4 可知：
切削深度越大,工件表面残余压应力值越小。但切深 a_p 达到 $2\text{ mm} \sim 3\text{ mm}$ 时,表面残余应力值变化不大。

2.2.4 振动幅值对加工表面残余应力的影响

选取超声振动的振动频率 $f = 20\text{ kHz}$, 刀具的进给量 f_r 和切深 a_p 分别为 0.1 mm 和 1 mm , 切削速度 $v_0 = 800\text{ mm/s}$ 。

振动幅值 A 对加工表面残余应力的影响如图 5 所示。

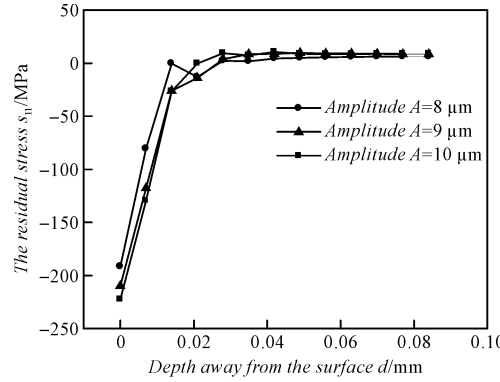


图 5 振动幅值对加工表面残余应力的影响

由图 5 可知:

随着超声振动振幅的提高,已加工表面残余压应力值也相应的提高,即表面残余压应力与振动幅值成正比。由 $v_c = 2 \times \pi \times f \times A$ 可知,幅值 A 越大,临界切削速度就越大,超声加工非连续切削的优势就能很好地体现出来,刀具与工件接触时间(即切削时间)占整个加工时长越小,当刀具离开工件时,有利于切削热的消散。因此,最终由热应力引起的残余拉应力影响越小。

2.2.5 振动频率对表面残余应力的影响

选取超声振动的振动振幅 $A = 10 \mu\text{m}$,刀具的进给量 f_r 和切深 a_p 分别为 0.1 mm 和 1 mm ,切削速度 $v_0 = 1\,000 \text{ mm/s}$ 。

振动频率对加工表面残余应力的影响如图 6 所示。

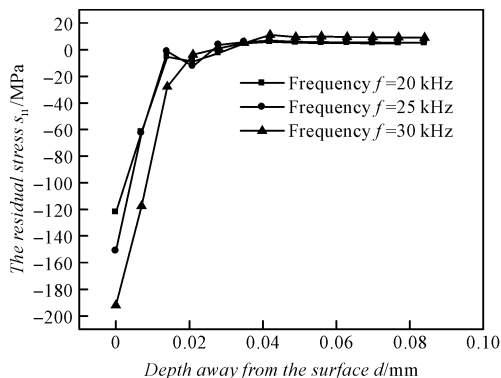


图 6 振动频率对加工表面残余应力的影响

由图 6 可知:

随着振动频率的提高,表面残余压应力也相应的变大,即表面残余压应力与振动频率成正比,原因与振动幅值对加工表面残余应力影响相同。

3 实例与验证

本文采用 FERGANI O^[15] 论文的实验数据来验证有限元模型的准确性。该文通过建立数学分析模型来预测铣削铝合金 7050-T7451 引起的残余应力。实验的切削参数为:铣削的切深 $a_p = 0.5 \text{ mm}$,每齿进给量 $f_z = 0.2 \text{ mm}$,主轴转速 $n = 8\,000 \text{ r/min}$ (即切削速度 $v_0 = 6.7 \text{ m/s}$),铣刀直径 $R = 16 \text{ mm}$ 。

在铣削过程中,切屑厚度是连续变化的,但每齿进给量相较于切削速度很小,因此切屑厚度变化很小。连续变化的切屑厚度可以简化为厚度不变的切屑。等效切屑厚度 H_{equ} 计算公式如下^[16]:

$$H_{\text{equ}} = \frac{f_z \times a_e}{2 \times \arccos\left(1 - \frac{a_e}{R}\right) \times R} \quad (4)$$

式中: a_e —切削宽度,取 $a_e = 8 \text{ mm}$ 。

本研究利用 ABAQUS 软件,建立等效的二维正交切削模型。

仿真与实验对比如图 7 所示。

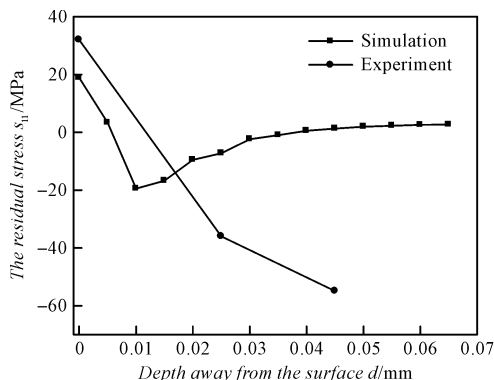


图 7 仿真与实验对比

从图 7 中可以看出:

仿真和实验得到的残余应力分布基本一致。但实验中工件带有初始残余应力,实验最终得到的残余应力值沿深度方向没有趋于 0。

4 结束语

本文通过研究切削参数、振动频率和振动幅值对残余应力的影响规律,得到以下结论:

(1) 比较常规切削、切削方向的振动切削和轴向方向的振动切削残余应力的仿真结果发现:超声加工在改善工件表面残余应力有明显优势;

(2) 随着切削速度的提高,工件表面残余应力趋向于残余拉应力,因为切削速度越高,振动切削过程中刀具与工件的分离越不明显,不利于切削热的散发,最终工件冷却后,受热应力引起的残余拉应力影响较大;

(3) 随着切削深度的提高,工件表面残余应力趋向于残余拉应力,但切深达到一定值,工件表面残余应力变化幅度很小;

(4) 超声振动的振幅和频率对工件表面残余应力影响的变化规律一致,随着振动频率或振幅的提高,表面残余应力取向于残余压应力,因为振动频率或振幅的提高,相应的刀具振动的临界速度 v_c ($v_c = 2 \times \pi \times f \times A$) 会提高,有利于刀具与工件的分离,使得热量不易积累,减少热应力引起的残余拉应力的影响;

(5) 与引用文献的实验数据比较发现,仿真模型能很好满足对残余应力的预测。

在此次有限元仿真中,刀具被视为刚体,而在生产实践中,刀具磨损是很常见的问题。一方面,刀具后刀面磨损加剧了与工件表面的挤压摩擦,在刀具离开后,

工件表面形成了残余压应力;另一方面,刀具磨损致使工件表面的切削温度上升,热应力引起的残余拉应力逐渐增强。因此,刀具磨损量在后续研究中是个很重要的因素。

参考文献(References):

- [1] FUH K H, WU C F. A residual-stress model for the milling of aluminum alloy [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1995, 51(1-4):87-105.
- [2] MASMIATI N, AHMED A D S, MOHD H. Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel[J]. **Measurement**, 2016(86):253-265.
- [3] ZHANG Q, MAHFOUF M, YATES J R, et al. Modeling and optimal design of machini-ng-induced residual stresses in aluminium a-lloys using a fast hierarchical multi-objective optimization algorithm[J]. **Materials andManufacturing Processes**, 2011, 26(3):508-520.
- [4] MASMIATI N, AHMED A D S. Optimizin-g cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress-Taguchi approach [J]. **Measurement**, 2015 (60):267-275.
- [5] 焦 锋,牛 赢,赵 波. 难加工材料铣削残余应力研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(3):267-273.
- [6] TEIMOURI R, AMINI S. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball bur-nishing of AA6061-T6 [J]. **Measurement**, 2018 (116):129-139.
- [7] 牛 赢. 钛合金 Ti-6Al-4V 纵扭超声振动副主铣削残余应力特性研究[D]. 焦作:河南理工大学机械与动力工程学院, 2017.
- [8] 张晓辉,罗明明,许幸新,等. 超声辅助钛合金切削的表面残余应力数值仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5):208-211.
- [9] 孙 青. 超声振动微细铣削残余应力的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2010.
- [10] 董佳灵,黄立新,何祥圣. 球头铣刀铣削 SKD61 钢三维仿真研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(2):17-23, 30.
- [11] JOHNSON G C, BAMMANN D J. A discussion of stress rates in finite deformation problems [J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1984, 20(8):725 - 737.
- [12] FU Xiu-li, AI Xing, WAN Yi, et al. Flow stress modeling for aeronautical aluminum alloy 7050-t7451 in high-speed cutting[J]. **Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics**, 2007, 24(2):139-144.
- [13] RECHT R F. Catastrophic thermoplastics shear [J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1964, 31(2):189-193.
- [14] CHEN Guang, LI Jun, HE Ying-lun, et al. A new approach to the determination ofplastic flow stress and failure initiation strain for aluminum alloys cutting process [J]. **Computational Materials Science**, 2014(95):568-578.
- [15] FERGANI O, LIANG S Y. Analytical modeling of residual stress and the induced deflection of a milled thin plate[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014, 75(1-4):455-463.
- [16] JIANG Zhen-xi, SUN Jie. Structural design of groove and micro-blade of the end mill in aluminum alloys machining based on bionics[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017, 88(9-12):3343-3356.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

许东辉,郭 强,张鸿斌,等. 超声振动切削铝合金表面残余应力的有限元仿真[J]. 机电工程, 2019, 36(12):1242 - 1247.

XU Dong-hui, GUO Qiang, ZHANG Hong-bin, et al. Finite element simulation of surface residual stress in ultrasonic vibration cutting of aluminum alloy[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019, 36(12):1242 - 1247.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>