DOI: 10.3901/JME.2019.13.224

纵扭超声铣削残余应力三维有限元仿真与试验^{*}

牛 赢 焦 锋 赵 波 王晓博

(河南理工大学机械与动力工程学院 焦作 454000)

摘要: 针对钛合金等航空难加工材料, 提出采用纵扭复合超声振动辅助铣削的加工方法以实现压应力抗疲劳制造。根据侧铣-顺铣加工特性, 基于热力耦合作用建立了钛合金铣削等效三维有限元仿真模型, 有效提高了计算效率, 实现了刀具作为载体的纵扭超声振动仿真。根据铣削残余应力的形成机理, 通过机械应力和热应力的加载-释放, 完成了加工残余应力的仿真。利用所建立的有限元模型, 从切削力、切削温度以及加工残余应力角度出发, 对比分析了传统铣削和纵扭超声铣削的差异性, 得出纵扭超声振动能够有效降低切削力和切削温度, 增大表面压应力值和压应力层深度。通过试验对纵扭超声铣削等效模型进行了验证, 结果表明所建立的三维有限元模型能够以较高的精度对切削力、切削温度和加工残余应力进行预测; 进一步通过数值模拟研究了刀具几何参数以及超声表征参数对加工残余应力的影响规律, 为实现钛合金的压应力制造奠定了基础。

关键词: Ti-6Al-4V; 纵扭超声铣削; 三维有限元模型; 模型转换; 试验验证

中图分类号: TG663

3D Finite Element Simulation and Experimentation of Residual Stress in Longitudinal Torsional Ultrasonic Assisted Milling

NIU Ying JIAO Feng ZHAO Bo WANG Xiaobo

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

Abstract: In view of the difficult-to-cut materials such as titanium alloy, the machining method of longitudinal torsion ultrasonic vibration assisted milling (L-TUM) is put forward to realize the anti-fatigue manufacturing. Firstly, the milling process is converted to the oblique cutting model, and a 3D FEM equivalent model of L-TUM is established, it effectively improved the computation efficiency and realized longitudinal torsional ultrasonic vibration and cutting process compound. According to the formation mechanism of the machining induced residual stress (RS), through mechanical and thermal stress loaded and released, the simulation of RS is realized. Then, the difference between the traditional milling and L-TUM is compared from the cutting force, the cutting temperature and the machining induced residual stress, it is concluded that cutting force and temperature are reduced, surface compressive stress and compressive stress layer depth are increased in L-TUM. The experiments are carried out to verify the equivalent model of L-TUM, the results show that the 3D model predicts cutting force, cutting temperature and residual stress with high precision. The influence of tool geometry parameters and ultrasonic characterization parameters on machining residual stress is studied by FEM, It lays a foundation for the compressive stress manufacture of titanium alloy's.

Key words: Ti-6Al-4V; longitudinal torsion ultrasonic vibration assisted milling; 3D FEM model; model transformation; experimental verification

0 前言

钛合金由于其良好的材料性能, 已成为航空航天领域不可或缺的材料^[1-2]。然而, 在机械加工时, 切削温度高、加工回弹变形大, 化学活性高等一系列特点, 造就了其较差的加工性能, 属于典型的难

加工材料, 同时加工后易在已加工表面分布残余拉应力, 严重影响零件的使用性能和寿命^[3-5]。

加工残余应力自 1912 年 MARTENS^[6]提出之后, 因其对零部件的使用性能和服役寿命有着很大的影响, 获得了足够的重视, 并将加工残余应力作为已加工表面质量的一个重要评价标准^[7]。已有大量的研究成果表明, 通过工艺方法、参数选择、过程控制等获得合适的加工残余应力, 能够实现疲劳强度、耐磨耐腐蚀性的显著提升^[8]。同时, 为了寻

^{*} 国家自然科学基金资助项目(U1604255, 51675164, 51475148)。20181024 收到初稿, 20190223 收到修改稿

求加工残余应力的生成机理, 实现加工残余应力的主动控制和调配, 从而进一步提高零部件的抗疲劳性能, 国内外的科研人员投入了大量的精力, 获得了许多富有成效的结论和成果。

解丽静等^[9]研究了工艺参数对高速铣削高强度钢时加工残余应力的影响, 得出已加工易形成残余应力, 并分析了加工残余应力形成的机理和规律。任成祖等^[10]对 TC4 进行铣削加工, 得出在刀具的不同磨损阶段, 加工残余应力的形成机理发生了较大的变化。HUANG 等^[11]对 7050-T751 铝合金进行铣削加工, 研究了不同刀具几何参数对残余应力的影响, 得出刀具几何参数对加工残余应力存在很大影响。张定华等^[12]为了得到加工残余压应力, 对 TC17 进行铣削-抛光-喷丸的加工方式。采用试验方法研究了加工参数对残余应力的影响, 并根据试验结果建立了加工残余应力的经验模型。PU 等^[13]采用有限元分析法研究了 AZ31B Mg 合金的切削加工残余应力, 分析了切削刃圆弧半径和冷却方法对切削加工残余应力的影响。

获得加工残余压应力是一种实现零部件的抗疲劳制造的有效方法^[14], 超声振动尤其是二维超声振动技术由于其高频的振动冲击, 以及分离特性, 能够有效降低加工过程中的平均切削力和切削温度, 实现零部件的压应力制造, 在抗疲劳制造技术中有着重要的地位^[15]。

孙青等^[16]利用有限元软件 ABAQUS, 实现了超声微铣削的仿真研究, 通过所建立的二维和三维有限元模型分析了多组参数对已加工表面残余应力性质及分布状态的影响规律。TRAVIESO 等^[17]利用振动辅助抛光 G10380 钢, 得出通过调整振动系统, 可以改变表面残余应力的分布情况。GANIEV 等^[18]从超声振动加工对材料性能影响的角度, 分析了工艺对加工残余应力的影响。ZHOU 等^[19]将超声振动技术和磁性研磨相结合, 通过试验方法得出在超声振动辅助下能够有效提高加工效率, 并使得表面残余拉应力向残余压应力转变, 改善加工质量。MAUROTTO 等^[20]研究了一维纵向超声振动频率对铣削 AISI 316L 加工残余应力的影响, 通过和传统铣削加工结果的对比, 得出超声振动能够有效改善加工质量。尹韶辉等^[21]研究了不同材料在超声滚压加工的性能, 结果表明超声振动能有效降低切削热和切削力, 从而降低改善加工表面性能。

为了实现钛合金 Ti-6Al-4V 的压应力制造, 本文提出将纵扭超声振动和铣削加工相复合, 基于热力耦合分析, 建立纵扭超声铣削的等效三维有限元仿真模型, 根据加工残余应力形成机理, 实现残余

应力仿真分析, 通过试验对模型进行验证; 在此基础上, 研究刀具几何参数(前角、后角、螺旋角、切削刃半径)以及超声表征参数(纵向振幅、扭转振幅、振动频率、纵扭相位差)对加工残余应力的影响规律, 为钛合金 Ti-6Al-4V 的压应力抗疲劳制造奠定基础。

1 纵扭超声铣削三维有限元仿真

在超声铣削三维有限元仿真中, 为了辨识超声作用对加工过程及结果的影响, 需要在传统铣削仿真的基础上大幅度增加计算量, 计算耗时很高, 且对计算机硬件也有较高的要求, 不利于在工程中推广应用。同时对于刀具作为振动载体的纵扭转超声铣削, 由于刀具已有一个旋转速度的边界条件, 而扭转振动和旋转运动的轴线一致, 再对刀具增加扭转振动会出现对同一对象施加重复冲突的约束, 造成计算中止。

为了解决此问题, 提出将超声铣削三维有限元仿真模型等效为三维斜角切削模型。一方面可以大量节省计算时间和成本; 另一方面由于刀具不再做旋转运动, 可实现对纵扭超声铣削的仿真分析。

1.1 纵扭超声铣削机理

超声振动辅助加工技术是指在刀具或工件上施加周期性的超声振动, 以满足特殊的加工需求。而将刀具作为振动载体可实现不同尺寸和复杂形状的零部件加工, 同时超声振动输出更为均匀稳定, 因而有着更广泛的应用前景, 原理如图 1 所示。

图1 纵扭超声振动声学系统

超声振动辅助铣削切削刃的运动轨迹相较于传统铣削发生了较大的变化, 对切削力、切削温度、加工残余应力等加工过程和结果产生直接的影响。

根据超声振动特性, 建立纵扭超声铣削切削刃运动方程

$$\begin{cases} x(t) = v_f \cdot t + R_t \cdot \sin(\omega_{n-t}) \\ y(t) = R_t \cdot \cos(\omega_{n-t}) \\ z(t) = A_t \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 是纵扭超声的振动频率; R_t 为刀具半径;

v_f 为进给速度; A_t 为纵扭超声振动中的纵向振幅;
 ω_{n-t} 为刀具的实际转角。

由式(1)计算得到纵扭超声铣削时切削刃的运动轨迹,如图 2 所示。在纵扭超声铣削过程中,当选择合适的参数时,刀具和工件会产生周期性的分离,图中所示的分离点和结合点即为刀具-工件分离和接触的特征点。同时由于纵扭超声振动能够实现切削刃在三维空间中运动,有效避免了后刀面和已加工表面的摩擦挤压,同时将刀-屑之间的摩擦阻力转变为有利的切削力,有效降低平均切削力和切削温度,提高加工质量。

图 2 纵扭复合超声振动切削刃轨迹特征

1.2 模型等效转换

在侧铣-顺铣加工时,每个切削刃从切入到切出工件,未变形切屑厚度是动态变化,为了便于计算,将此模型进行简化,如图 3 所示。

图 3 侧铣-顺铣未变形切屑厚度简化模型

图 3 中, $h_{\max}$ 为最大未变形切屑厚度, l 为未变形切屑长度,将其近似为 l' , a_e 为径向切深,可得其几何关系如下式

$$h_{\max} = \left[2f_z \sqrt{\frac{a_e}{2R_t}} \right] \cos \beta \quad (2)$$

$$l = l' = \sqrt{2R_t \cdot a_e} - \frac{v_f}{2nN} \quad (3)$$

式中, f_z 、 a_e 、 R_t 、 β 、 v_f 、 n 、 N 分别代表每齿进给量、切削宽度、铣刀半径、铣刀螺旋角、进给速度、主轴转速、铣刀齿数。

将铣削三维模型等效转换为三维斜角切削模型,如图 4 所示。图中 LUV 和 TUV 分别代表纵向和扭转超声振动。 RP 为超声振动作用点, R_t' 为等效铣刀半径,便于扭转振幅弧度制的转换。

图 4 铣削转换斜角切削模型

1.3 纵扭超声铣削等效模型建立

1.3.1 刀具和工件几何模型

分别做出刀具和工件的模型,如图 5 和 6 所示。其中,刀具材料为硬质合金,其物理性能如表 1 所示;工件材料为 Ti-6Al-4V,物理性能如表 2 所示。

图 5 斜角切削刀具模型

图 6 斜角切削工件模型

表 1 刀具材料物理性能^[22]

密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ GPa	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	热膨胀系数/ °C ⁻¹	泊松比
14.5	600	4.5	75.4	0.22

表 2 Ti-6Al-4V 材料属性^[22]

材料性能	温度/°C			
	25	100	300	400
密度/(kg/m ³)	4 400			
热导率/(W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	6.8	7.9	10.5	11.5
弹性模量/(N/mm ²)	11 200	11 000	9 800	9 200
泊松比	0.34	0.34	0.35	0.37
热膨胀系数/×10 ⁻⁶ °C ⁻¹	9.32	9.4	9.6	9.7
比热容/(J/(kg · °C))	611	624	674	690
非弹性热分数	0.9			

1.3.2 材料本构模型和切屑分离准则

Johnson-cook 材料本构模型能够在高应变速率下表现为应变硬化、应变速率强化和热软化效应,更符合切削加工的实际情况。同时, J-C 失效准则也更适用于金属在高应变率下的变形,因而本文中采用 J-C 本构模型和 J-C 失效准则,分别如式(4)和(5)所示。

$$\sigma = \left(A + B \varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (4)$$

式中, A 是准静态下的屈服强度; B 是硬化模量; C 是应变率敏感系数; $\dot{\varepsilon}$ 是应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 是参考应变率; m 是温度敏感系数; n 是应变硬化指数; T_r 是室温; T_m 是材料熔点。Ti-6Al-4V 的 J-C 本构模型参数如表 3 所示。

表 3 Ti-6Al-4V 材料 J-C 本构参数^[22-23]

A	B	n	C	m
875	793	0.386	0.033	0.71

$$\varepsilon_p^f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_p}{\sigma_{Mises}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (5)$$

式中, ε_p^f 是材料在失效时的等效塑性应变, σ_p 是压应力, σ_{Mises} 是 Mises 应力, $\dot{\varepsilon}_p$ 是塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 是准静态应变率, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 和 D_5 是单元失效参数。Ti-6Al-4V 的单元失效准则参数如表 4 所示^[22-23]。

表 4 Ti-6Al-4V 的 J-C 失效准则参数

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

1.3.3 接触属性和边界条件

考虑热力耦合作用, 采用动力、温度-位移、显式分析模型。在超声辅助切削过程中, 依据采样定理^[24], 场输出和历程输出的取样频率必须大于超声频率的 2 倍以上。

约束工件切削区域另一侧的所有自由度, 将工件固定。赋予刀具参考点绕其轴线的旋转角速度和沿着切削方向的进给速度, 同时赋予刀具参考点沿刀具轴向的超声周期位移, 实现刀具的纵扭超声复合振动。赋予刀具、工件和“测力仪”初始温度边界条件 25 °C。

1.4 残余应力仿真模型

根据加工残余应力形成机理, 将残余应力的仿真分为四步: 切削阶段、卸载阶段、约束转换阶段和冷却阶段。

在切削阶段, 对工件进行完全固定, 刀具施加进给和超声振动, 如图 7a 所示。切削过程完成, 刀具离开工件, 工件不再受机械载荷作用, 如图 7b 所示。但由于在切削阶段对工件进行了完全约束, 卸载后这些约束依然存在, 因而需要对工件的约束进行转换, 对加工区域的另一侧, 约束其三个端点, 另一端点给予完全自由度, 以实现工件的弹性变形恢复和应力释放, 如图 7c 所示。约束转换之后, 对工件施加温度边界条件, 使其温度逐渐达到室温,

从而得到工件最终的残余应力, 如图 7d 所示。

图 7 残余应力仿真过程

1.5 仿真结果及分析

1.5.1 切削力和切削温度结果及分析

图 8 为切削刃的纵向和扭转振幅的曲线, 从图中可以看到, 切削刃输出的幅值、相位差以及频率满足目标期望, 这也进一步说明采用该方法对纵扭超声辅助加工进行仿真是有效的。仿真所采用的主要参数如表 5 所示。

图 8 纵扭振幅仿真结果(参数 1)

表 5 主要仿真参数

	切削速度 /(m/min)	每齿进给量 /(mm/z)	径向切深 /mm	纵振振幅 /μm	扭转振幅 /μm
(I)	25	0.008	0.15	5	4
(II)	40	0.005	0.10	4	3.2

其中图 9a 为纵扭超声辅助加工切削力的仿真结果, 图 9b 为传统加工切削力仿真结果, 其中 F_x 代表图 4 中 X 方向的切削力。对两种加工条件下的切削力信号进行对比, 可以发现相同点均是切削力有小及大, 到达峰值后又下降, 呈现抛物线趋势, 这符合未变形切屑层厚度的变化规律。而不同处主要有: 在纵扭超声振动切削中, 切削力会随着超声振动产生周期性的“回零”波动, 这主要是由于纵扭超声加工过程中刀具-工件分离特性造成的; 在传统切削中, 切削力虽有较小范围的波动, 但未出现“回零”现象, 即刀具和工件不出现分离情况。

图 9 切削力仿真结果(参数 I)

图 10 为距离加工表面不同深度切削温度的仿真结果, 其中图 10a 和 10b 分别为纵扭超声辅助切削和传统切削条件下的切削温度。对比可以发现, 相同点均是在切削阶段, 节点处的温度逐渐上升, 当刀具距离节点最近时, 节点温度达到最大值。而不同处主要有: 在纵扭超声振动切削中, 切削温度会随着超声振动产生周期性的波动, 刀具距离节点越近, 温度波动约剧烈, 且节点最高温度要小于传统加工。

图 10 切削温度仿真结果(参数 I)

1.5.2 残余应力结果及分析

图 11a 和 11b 为两组不同加工参数下(如表 5 中参数 I 和 II)纵扭超声铣削和其他加工条件所获得的残余应力对比结果, 图 11 中 LUC、CC、TC 以及

L-TUC 分别代表纵向超声辅助铣削, 传统铣削、扭转超声铣削和纵扭超声铣削。

图 11 残余应力仿真结果

从图中可以看到, 一维纵向超声铣削和扭转铣削, 相较传统铣削, 能一定程度上提高工件内部的残余压应力, 但作用程度有限。而纵扭超声铣削, 能够有效提高工件表面的残余压应力和工件内部最大的残余压应力, 同时一定程度上增大了工件内部最大压应力值和压应力层深度, 可作为一种有效的压应力制造技术。其主要原因是在纵扭超声加工时, 由于刀具-工件周期性的分离, 实际净切削时间要远小于传统切削, 同时切屑-刀具之间原有的摩擦阻力也转变为对切削过程有利的切削力, 使得切削力要小于传统铣削时的切削力。此外, 在纵扭超声铣削时, 一方面刀具-工件的分离特性, 增加了切削热的扩散时间; 另一方面由于降低了切削力的同时, 相当于减弱了剪切热源的强度, 使切削温度要小于传统铣削。从而降低了在残余应力形成中的塑性凸出效应和热效应, 同时受到超声振动的冲击作用, 造成了加工残余压应力值以及最大压应力深度要大于传统铣削。

2 纵扭超声铣削等效模型试验验证

2.1 试验条件

本试验在 VMC850E 三轴立式加工中心, 采用无线传输超声集成刀柄(原理如图 1 所示), 利用硬质合金 TiAlN 涂层刀具(型号: Union C-CES 4100-2500), 对钛合金 Ti-6Al-4V 进行纵扭超声侧铣-顺铣加工。铣削试验的现场如图 12 所示。

图 12 试验现场

2.2 试验结果检测条件和方法

通过 Kistler 9257B 压电式三向测力仪测量加工过程中的切削力,采用夹丝法布置 K 型热电偶测量切削温度,热电偶布置原理如图 13 所示,切削力(切削力方向如图 4 所示)和切削温度的测量结果如图 14 所示。

图 13 热电偶布置示意图

图 14 切削力和切削温度测量结果

通过 X 射线衍射仪(型号 PROTO-XRD)测量已加工表面的残余应力,检测时采用铜靶 K-Alpha 辐射,主要检测参数如表 6 所示,借助电解抛光机可对工件加工表面进行电化学剥层,实现亚表层残余应力的检测。

表 6 残余应力主要检测参数

参数	数值	参数	数值
管电压/kV	25~30	管电流/mA	25
衍射晶面	Ti-213	滤波片	Ni
光圈规格/mm	1×5	Beta 角/(°)	±19
X-ray 弹性常量	1/2*S ₂ =11.8879×10 ⁻⁶	Bragg 角法线倾斜角/(°)	100~184

2.3 试验验证结果

分别从切削力、切削温度以及加工残余应力三个角度对有限元仿真模型进行了试验验证,结果如图 15 和 16 所示。

图 15 切削力和切削温度仿真结果试验验证

对比可以发现,通过有限元仿真所得出来的结果和试验结果存在一定的偏差,主要原因为:① 仿真模型没办法涵盖所有的物理现象;② 仿真模型所

图 16 残余应力仿真结果验证(两组参数)

采用的材料参数,本构参数等实际情况均存在一定误差;③ 仿真加工条件为理想状态,忽略任何外在因素干扰;④ 仿真过程中,受制于硬件和时间的限制,忽略了连续加工的影响。

然而仿真和试验结果的趋势基本吻合,这也证明了通过所建立的仿真模型可实现对加工结果趋势的模拟预测。

3 参数对加工残余应力影响分析

3.1 刀具几何参数对残余应力影响分析

刀具几何参数对加工过程和结果都有较大的影响,然而通过试验方法研究刀具几何参数对加工结果的影响难度较大,一方面成本高、效率低;另一方面成形刀具几何参数选择余地较少,而定制刀具参数耗时长、成本高,几何精度难以保证。通过有限元仿真方法可经济、高效实现刀具几何参数对加工结果影响的分析,为工程应用提供了选择。

通过正交试验设计,分析刀具几何参数对加工过程的影响,采用 4 因素 4 水平的试验方案,仿真结果如表 7 所示,表中 r_c 代表切削刃半径, D_{RS} 为加工残余应力。

表 7 刀具几何参数对加工结果影响

编号	前角 /(°)	后角 /(°)	螺旋角 /(°)	r_c /mm	应力 D_{RS} /MPa	
					表面	最大
t1	0	10	30	0.005	-103	-269
t2	0	12	40	0.010	-145	-641
t3	0	14	50	0.015	-36	-213
t4	0	16	60	0.020	-147	-182
t5	2	10	40	0.015	-582	-680
t6	2	12	30	0.020	-233	-607
t7	2	14	60	0.005	-60	-264
t8	2	16	50	0.010	-80	-375
t9	4	10	50	0.020	-32	-610
t10	4	12	60	0.015	-61	-258
t11	4	14	30	0.010	-214	-682
t12	4	16	40	0.005	-52	-358
t13	6	10	60	0.010	-96	-298
t14	6	12	50	0.005	-46	-171
t15	6	14	40	0.020	-175	-495
t16	6	16	30	0.015	-179	-416

(a) 刀具几何参数与表面残余应力的响应关系

(b) 刀具几何参数与最大残余应力的响应关系

图 17 刀具几何参数与残余应力的响应关系

根据表 7 中的结果,分析刀具几何参数与加工残余应力的响应关系,如图 17 所示,图 17a 为刀具几何参数对表面加工残余应力的响应关系,图 17b 为刀具几何参数对工件内最大加工残余压应力的响应关系。从图 17 中可以看到,虽然两图存在差异,但趋势较为接近,在所选参数的范围内,随着前角的增大,残余压应力先增加后又下降;随着后角的增大,残余压应力会在波动中略有减小;随着螺旋角的增大,残余压应力会有较大幅度减小;而随着切削半径的增大,残余压应力先增大后减小。

据上述分析可知,为获得较大的表面残余压应力,应选取的最优刀具几何参数组合为前角 2° 、后角 10° 、螺旋角 40° 、切削刃半径 0.015 mm ;而为获得最大残余压应力,应选取的最优刀具几何参数组合为前角 2° 、后角 10° 、螺旋角 40° 、切削刃半径 0.01 mm 。

表 8 给出了刀具几何参数对残余压应力的贡献率,从表中可以看到,刀具几何参数对残余应力的敏感性占比虽有差异,但敏感性主次性几乎一致。其中螺旋角影响最大,切削刃半径次之,前角和后角分列三、四位。

表 8 刀具几何参数对残余应力的贡献率 (%)

残余应力种类	刀具几何参数			
	前角	后角	螺旋角	切削刃半径
表面残余应力	25.82	15.38	32.93	25.87
最大残余应力	19.09	16.17	36.03	28.71

3.2 超声表征参数对加工结果影响

在超声铣削加工中,超声表征参数(纵向振幅、扭转振幅、频率、纵扭相位差)对加工结果的影响是不可忽略的。而在试验中通过改变声学系统获得从而不同超声表征参数是非常不易的,但通过仿真方法可经济、高效实现超声表征参数对加工结果影响的分析。

根据正交试验设计,采用 4 因素 4 水平的试验方案,仿真结果结果如表 9 所示。

表 9 超声表征参数对加工结果影响

试验 编号	纵向振幅 / μm	扭转振幅 / μm	频率 /kHz	相位差 /($^\circ$)	应力 RS/MPa	
					表面	最大
u1	2	2	16	-90	-33	-459
u2	2	4	24	-30	-254	-568
u3	2	6	32	30	-66	-490
u4	2	8	40	90	-104	-394
u5	4	2	24	30	-61	-652
u6	4	4	16	90	-85	-254
u7	4	6	40	-90	-181	-434
u8	4	8	32	-30	-115	-342
u9	6	2	32	90	-104	-393
u10	6	4	40	30	-170	-757
u11	6	6	16	-30	-56	-332
u12	6	8	24	-90	-186	-475
u13	8	2	40	-30	-115	-276
u14	8	4	32	-90	-59	-289
u15	8	6	24	90	-103	-402
u16	8	8	16	30	-176	-531

根据表 9 中的结果,分析超声表征参数与残余应力的响应关系,如图 18 所示,图 18a 为超声表征参数对表面残余应力的响应关系,图 18b 为超声表征参数对工件最大残余压应力的响应关系。

从图 18a 中,可以看到,随着纵向振幅的增大,表面残余压应力在小范围波动,并有增大的趋势;随着扭转振幅和超声频率的增大,表面残余压应力也呈现一个波动增大的趋势;而随着纵-扭相位差的增大,表面残余压应力会在波动中减小。从图 18b 中可以看到,随着纵向和扭转振幅的增大,最大残余压应力会有一定程度的下降,并存在波动;随着频率的增加,最大残余压应力在波动中有增大的趋势;而随着纵-扭相位差的增大,最大残余压应力会有先增大后又减小的趋势,造成该现象的主要原因是随着相位差的变化,临界转速和净切削时间及其占空比发生周期性的变化,当选择合适的相位差时可以获得较大的残余压应力。

图 18 超声表征参数与加工残余应力的响应关系

表 10 给出了超声表征参数对加工残余应力的贡献率, 从表中可以看到, 扭转振幅和频率对表面残余应力影响最大, 纵-扭相位差影响随后, 纵向振幅影响最小; 纵-扭相位差对最大残余压应力影响最大, 频率和纵向振幅影响次之, 扭转振幅影响最小。

表 10 超声表征参数对残余应力的贡献率 %

残余应力种类	超声表征参数			
	纵向振幅	扭转振幅	频率	相位差
表面残余应力	9.92	35.92	34.85	19.31
最大残余应力	20.5	9.38	26.04	44.08

根据上述分析可知, 为获得较大的表面残余压应力, 应选取的最优超声表征参数组合为纵向振幅 $6\text{ }\mu\text{m}$ 、扭转振幅 $8\text{ }\mu\text{m}$ 、频率 24 kHz 、纵扭相位差 -30° ; 而为获得最大残余压应力, 应选取的最优刀具几何参数组合为纵向振幅 $6\text{ }\mu\text{m}$ 、扭转振幅 $4\text{ }\mu\text{m}$ 、频率 24 kHz 、纵扭相位差 30° 。

4 结论

(1) 针对超声铣削三维有限元模型计算耗时大, 硬件要求高, 且不易实现纵扭超声铣削的仿真等诸多问题, 通过模型转换, 建立了纵扭超声铣削的等效三维有限元模型; 对仿真所得到的切削力、切削温度和加工残余应力进行了分析讨论, 并和试验结果进行对比, 结果表明所建立的纵扭超声铣削等效三维有限元模型能够以较高的精度对切削力、切削温度以及加工残余应力进行预测。

(2) 根据所建立的有限元仿真模型, 对比分析了传统铣削、纵向超声铣削、扭转超声铣削和纵扭超声铣削在切削力、切削温度以及加工残余应力的差异性, 结果表明, 纵扭超声铣削能够有效提高工件表面和工件内部最大的残余压应力值, 同时在一定程度上增大了压应力层的深度。

(3) 采用正交试验设计, 通过有限元仿真分析了刀具几何参数对加工残余应力的影响, 结果表明: 刀具螺旋角对已加工表面和内部最大残余应力均有较大的影响, 随着螺旋角的增大加工压应力值随之降低。

(4) 采用正交试验设计, 通过有限元仿真分析了超声表征参数对加工残余应力的影响, 结果表明: 已加工表面残余应力和扭转振幅有较大的关系, 随着扭转振幅的增大, 表面残余压应力值会在波动中呈现增大的趋势; 而最大残余压应力和纵扭相位差有较大的关系, 选择合适的相位差能够获得较大的残余压应力。

参 考 文 献

- [1] 陈五一, 袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2010(15): 26-30.
CHEN Wuyi, YUAN Yuefeng. Research development of cutting technology for titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(15): 26-30.
- [2] SU H, LIU P, FU Y, et al. Tool life and surface integrity in high-speed milling of titanium alloy TA15 with PCD/PCBN tools[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(5): 784-790.
- [3] 葛恩德, 苏宏华, 程远庆, 等. TC4 板孔冷挤压强化残余应力分布与疲劳寿命[J]. 中国机械工程, 2015, 26(7): 971-976.
GE Ende, SU Honghua, CHENG Yuanqing, et al. Residual stress fields and fatigue life of cold expansion hole in titanium alloy TC4[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(7): 971-976.
- [4] 王明海, 李世永, 郑耀辉. 超声铣削钛合金材料表面粗糙度研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 341-346.
WANG Minghai, LI Shiyong, ZHENG Yaohui. Surface roughness of titanium alloy under ultrasonic vibration milling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 341-346.
- [5] 姜增辉, 王琳琳, 石莉, 等. 硬质合金刀具切削 Ti6Al4V 的磨损机理及特征[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 178-184.
JIANG Zenghui, WANG Linlin, SHI Li, et al. Study on tool wear mechanism and characteristics of carbide tools in cutting Ti6Al4V[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 178-184.
- [6] MARTENS D I A. Handbuch der Materialienkunde für den Maschinenbau [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1912.
MARTENS D I A. Handbook of materials science for mechanical engineering [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1912.
- [7] 王立涛, 柯映林, 黄志刚, 等. 航空结构件铣削残余应力分布规律的研究[J]. 航空学报, 2003, 24(3): 286-288.
WANG Litao, KE Yinglin, HUANG Zhigang, et al. Study on residual stress produced in milling of aeronautic

- structure[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2003, 24(3): 286-288.
- [8] ZHOU J Z, HUANG S, ZUO L D, et al. Effects of laser peening on residual stresses and fatigue crack growth properties of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52(3): 189-194.
- [9] 辛民, 解丽静, 王西彬, 等. 高速铣削高强高硬钢加工表面残余应力研究[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(1): 19-23.
- XIN Min, XIE Lijing, WANG Xibin, et al. Study on the surface residual stress of high hardness and strength alloy steel in high speed milling[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(1): 19-23.
- [10] 杨晓勇, 任成祖, 陈光. 钛合金铣削刀具磨损对表面完整性影响研究[J]. *机械设计*, 2012, (11): 22-26.
- YANG Xiaoyong, REN Chengzu, CHEN Guang. Effects of tool wear on surface integrity in milling titanium alloy [J]. *Journal of Machine Design*. 2012, (11): 22-26.
- [11] HUANG X, SUN J, LI J. Experimental investigation of the effect of tool geometry on residual stresses in high speed milling 7050-T7451 aluminium alloy[J]. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2015, 9(4): 359-369.
- [12] LIANG T, ZHANG D, YAO C, et al. Evolution and empirical modeling of compressive residual stress profile after milling, polishing and shot peening for TC17 alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26: 155-165.
- [13] PU Z, UMBRELLO D, DILLON O W, et al. Finite element simulation of residual stresses in cryogenic machining of AZ31B Mg alloy[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 13: 282-287.
- [14] 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(3): 267-273.
- JIAO Feng, NIU Ying, ZHAO Bo. Research progress of residual stress in milling of difficult-to-machine materials [J]. *Surface Technology*, 2017(3): 267-273.
- [15] ZHU Y, WANG K, LI L, et al. Evaluation of an ultrasound-aided deep rolling process for anti-fatigue applications[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 18(8): 1036-1040.
- [16] 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, 2010.
- SUN Qing. Research on residual stresses in ultrasonic vibration assisted micro-milling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] TRAVIESO-RODRIGUEZ J A, GOMEZ-GRAS G, DESSEIN G, et al. Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9-12): 1757-1765.
- [18] GANIEV M M. Dynamics of an ultrasonic impact tool with an intermediate striker[J]. *Russian Aeronautics*, 2008, 51(1): 75-83.
- [19] ZHOU K, CHEN Y, DU Z W, et al. Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(5-8): 997-1005.
- [20] MAUROTTO A, WICKRAMARACHCHI C T. Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: A feasibility study[J]. *Ultrasonics*, 2016, 65: 113-120.
- [21] 尹韶辉, 张辉润. 超声振动滚齿加工试验[J]. *新技术新工艺*, 1995(6): 22.
- YIN Shaohui, ZHANG Huirun. Experiment of ultrasonic vibration hobbing [J]. *New Technology and New Process*, 1995(6): 22.
- [22] YANG D, LIU Z, REN X, et al. Hybrid modeling with finite element and statistical methods for residual stress prediction in peripheral milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 108-109: 29-38.
- [23] CHEN G, REN C, YANG X, et al. Finite element simulation of high-speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56(9-12): 1027-1038.
- [24] NYQUIST H. Certain factors affecting telegraph speed[J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1924, XLIII(2): 412-422.
-
- 作者简介: 牛赢, 男, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为精密与超精密加工技术与装备。
E-mail: niuying@hpu.edu.cn
- 焦锋, 男, 1971 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为精密与超精密加工技术与装备、特种加工技术。
E-mail: jiaofeng@hpu.edu.cn
- 赵波(通信作者), 男, 1956 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为精密与超精密加工技术与装备、特种加工技术。
E-mail: zhaob@hpu.edu.cn