

# 超声波振动切削 TC4 钛合金的残余应力数值分析

## Numerical Analysis of Residual Stress for TC4 Caused by Ultrasonic Vibration Cutting

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 杨万辉 陈雷 杨金发 杨惠欣

**[摘要]** 为研究超声波振动切削 TC4 钛合金产生的残余应力,利用三维热力耦合有限元模型对钛合金超声波振动切削和振动时效处理进行了数值模拟。超声波振动切削相比普通切削可有效降低平均切削力,但振动切削的瞬时冲击作用使工件表层产生分布梯度较大的残余应力。振动时效可在一定程度上降低和均化被切削工件的残余应力,并提高 TC4 钛合金工件的抗疲劳性能。

**关键词:** 超声波振动切削 残余应力 振动时效 抗疲劳

**[ABSTRACT]** In order to analyze the stress of TC4 titanium alloy caused by ultrasonic vibration cutting, the numerical simulation for ultrasonic vibration cutting and VSR is carried out using the 3D thermo-mechanical coupled finite element model. Ultrasonic vibration cutting can effectively reduce the average cutting force compared with the ordinary cutting, but the instantaneous impact of vibration cutting results in uneven residual stress on the surface of the workpiece. VSR can make the residual stress of the workpiece reduced and homogenized, and improve the anti-fatigue performance of TC4 titanium alloy workpiece to a certain degree.

**Keywords:** Ultrasonic vibration cutting Residual stress VSR Anti-fatigue

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.15.036

TC4 钛合金因质量轻、强度高、耐热性好、抗腐蚀性强而被广泛应用于航空航天工业,但钛合金切削过程具有冷硬现象严重、切削温度过高、刀具易粘附磨损等特点。超声波振动切削是一种具有分离和变速特性的脉冲式切削技术,可有效降低切削力和切削热,提高刀具使用寿命,改善工件表面加工质量。因此,超声波振动切削成为加工钛合金材料的有效手段。

TC4 钛合金的超声波振动切削过程是高度复杂的非线性问题,有限元法逐步成为研究振动切削加工机理的重要途径。N.Ahmed<sup>[1]</sup>建立了超声波振动切削和普通切削 Inconel 718 的三维有限元模型,对比分析了 2 种方式下切削力和切削温度分布情况。S.Amini<sup>[2]</sup>对超声

波振动切削 IN738 进行了有限元分析,重点研究了切削速度、刀具几何参数以及刀具振动幅度对切削过程的影响。杨亮<sup>[3]</sup>建立了超声波振动切削单晶铜的二维有限元模型,给出了振动过程中应力分布和切削区温度分布的变化规律。易俊杰<sup>[4]</sup>通过二维正交振动切削模型,对 TC4 钛合金的振动切削和普通切削进行了对比分析。国内外学者通过有限元法对超声波振动切削已开展一定的研究工作,但在分析振动切削 TC4 钛合金的残余应力方面仍然不够。由于振动切削具有冲击特性,很有必要对 TC4 钛合金切削产生的残余应力进行深入分析。

## 1 切削加工模型及有限元理论

### 1.1 切削有限元模型

在有限元软件中建立的三维斜角切削模型包含待加工工件和刀具实体模型,待加工工件由工件基体、失效层和切屑层组成,如图 1 所示。工件材料为钛合金 TC4,基体尺寸为 2mm × 1mm × 0.3mm,切屑层和失效层的厚度分别为 0.03mm 和 0.005mm;刀具设为离散刚体,采用材料 PCBN,刀具前角为 18°,后角为 8°,刃倾角  $\lambda_s$  为 10°。工件和刀具采用 C3D8T 八节点六面体双线性热力耦合单元,分别采用结构化和自由网格划分技术。

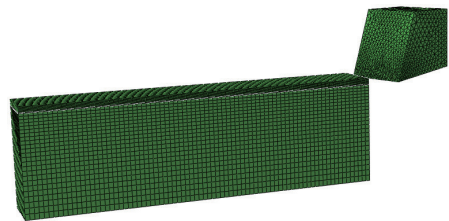


图1 斜角振动切削有限元模型

Fig.1 FEM model of oblique vibration cutting

### 1.2 材料本构方程

斜角振动切削是一种具有大变形、高应变率、局部高温特点的动态过程,可采用 Johnson-Cook 模型描述。该模型综合考虑了加工过程中材料的应变强化效应、应变率强化效应和温度软化作用,定义的本构方程为:

$$\bar{\sigma} = (A + B(\bar{\epsilon}^n)) \left(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) (1 - \bar{T}^m) \quad (1)$$

式中,  $\bar{\sigma}$  为等效应力,  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率;  $A$  为准静态下的屈服强度,  $B$  为应变硬化系数,  $n$  为应变硬化指数,  $C$  为

应变率敏感系数,  $m$  为温度敏感系数;  $\bar{\varepsilon}^p$  和  $\dot{\varepsilon}^p$  分别为等效塑性应变和等效塑性应变率。  $\bar{T}$  代表无量纲温度, 定义如下:

$$\bar{T} = \begin{cases} 0 & T < T_r \\ (T - T_r)/(T_m - T_r) & T_r \leq T \leq T_m \\ 1 & T > T_m \end{cases}, \quad (2)$$

式中,  $T$  为当前材料温度,  $T_r$  为参考温度,  $T_m$  为熔点温度。TC4 钛合金材料的 5 个 Johnson-Cook 模型常数如表 1<sup>[5]</sup> 所示。

表1 TC4的Johnson-Cook模型常数

A/MPa	B/MPa	$n$	$m$	$C$
1000	780	0.47	0.033	1.02

### 1.3 材料失效准则

斜角超声波振动切削采用 Johnson-Cook 材料失效准则, 该准则通过失效参数  $\omega$  判断切屑失效分离情况。当  $\omega > 1$  时, 单元积分点处的材料失效破坏; 当单元所有积分点处的材料都失效时, 该单元从网格中删除, 实现切屑与工件基体分离。材料失效参数  $\omega$  定义为:

$$\omega = \sum (\Delta \bar{\varepsilon}^p / \bar{\varepsilon}_f^p), \quad (3)$$

式中,  $\Delta \bar{\varepsilon}^p$  为等效塑性应变增量,  $\bar{\varepsilon}_f^p$  是材料失效应变。失效应变  $\bar{\varepsilon}_f^p$  的定义为:

$$\bar{\varepsilon}_f^p = \left( d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q}) \right) \left( 1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0^p}\right) \right) (1 + d_5 \bar{T}), \quad (4)$$

式中,  $d_1 \sim d_5$  为失效参数,  $p$  为静水压力,  $q$  为 Mises 应力。TC4 钛合金材料的单元失效准则参数在表 2<sup>[5]</sup> 中给出。

表2 Johnson-Cook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

### 1.4 切削热及热传递模型

在钛合金超声波振动切削过程中, 切削热主要来源于切屑剪切区的塑性变形功、前刀面与切屑的摩擦功、后刀面与工件的摩擦功。由于后刀面的摩擦功相对较小, 可以忽略不计。在设定钛合金材料均匀且各向同性的条件下, 超声波振动切削工件的三维非稳态热传导控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c \left( u \frac{dT}{dx} + v \frac{dT}{dy} + w \frac{dT}{dz} \right) + q^*, \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为材料密度,  $c$  为比热,  $\lambda$  为热传导系数;  $x$ 、 $y$  和  $z$  为笛卡尔坐标,  $u$ 、 $v$  和  $w$  为运动热源在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的

速度分量;  $q^* = \eta_p \dot{\varepsilon}^p \bar{\sigma}$ , 为塑性变形导致的单位体积热流率;  $\eta_p$  为塑性功转换为热能的系数, 一般取值为 0.9。振动切削钛合金的热传导过程应考虑热接触和对流换热边界条件:

(1) 刀具与切屑的接触摩擦导致的单位面积热流率为  $q_f = \eta_f \tau v_{\text{chip}}$ , 其中:  $\eta_f$  为摩擦功转换为热能的系数, 一般取值为 1.0;  $\tau$  为接触面的切应力;  $v_{\text{chip}}$  为接触面相对滑动速度。

(2) 刀具前刀面与切屑的接触热传导由  $q_g = k_g(\theta_a - \theta_b)$  式决定, 其中:  $q_g$  为热流密度,  $k_g$  为间隙热传导系数,  $\theta_a$  和  $\theta_b$  分别为间隙两边接触物体的温度。

(3) 刀具和工件的自由表面与空气的对流换热由式  $q_c = h_c(T_s - T_0)$  决定, 其中:  $q_c$  为热流密度,  $h_c$  为对流换热系数,  $T_s$  为刀具或工件的表面温度,  $T_0$  为周围环境温度。

## 2 残余应力数值模拟及结果分析

### 2.1 残余应力数值模拟过程

为研究工件残余应力的分布规律, 采用以下 3 种有对比性的加工模拟方案: (1) 施加初始边界条件 → 普通切削 → 约束转换 → 降温冷却; (2) 施加初始边界条件 → 超声波振动切削 → 约束转换 → 降温冷却; (3) 施加初始边界条件 → 超声波振动切削 → 振动时效 → 约束转换 → 降温冷却。

在振动切削阶段, 工件移动速度为  $v$ , 刀具振动切削速度  $v_r = A\omega \cos \omega t$ , 临界切削速度  $v_c = A\omega$ , 速度系数  $k = v/v_c$ 。在振动时效阶段, 激振力通过在工件上施加随时间正弦变化的面载荷来模拟<sup>[6]</sup>。若使工件受力点产生应力释放而又不发生破坏, 则动应力  $\sigma_d$  与残余应力  $\sigma_r$  之和应大于工件屈服强度  $\sigma_s$ , 同时动应力  $\sigma_d$  应小于工件疲劳极限  $\sigma_{-1}$ 。在约束转换阶段, 去除工件的边界条件和接触条件, 并通过三点约束法限制工件的刚体运动。在降温冷却阶段, 通过设置工件外表面为热交换表面, 与外部环境进行对流换热, 将工件温度降至与周围环境同温, 消除切削热对残余应力的影响。

### 2.2 结果分析

#### 2.2.1 振动切削对工件残余应力的影响分析

将方案(1)和方案(2)进行对比, 研究普通切削和振动切削对残余应力的影响。普通切削时, 刀具不动, 工件以  $v=0.5\text{m/s}$  的速度运动; 超声波振动切削时, 在工件底部加载水平运动速度  $v=0.5\text{m/s}$ , 在刀具刚体参考点处加载振动切削速度, 振幅  $A=10\mu\text{m}$ , 频率  $f=20\text{kHz}$ , 临界切削速度  $v_c=0.628\text{m/s}$ , 速度系数  $k < 1$ 。图 2 给出振动切削过程中等效应力的分布情况, 超声波振动切削的瞬间冲击作用使工件产生很不均衡的应力分布。

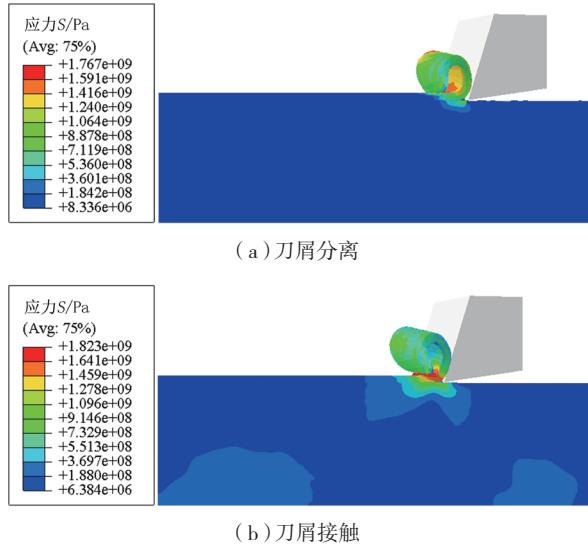


图2 切削过程中应力分布

Fig.2 Stress distribution in cutting process

如图3所示,在切宽为0.3mm的条件下,普通切削阶段的稳态切削力达到20N,而振动切削阶段的瞬态切削力峰值约为20N。振动切削过程的平均切削力较小,但力加载率非常大,工件受到较强的瞬时冲击。

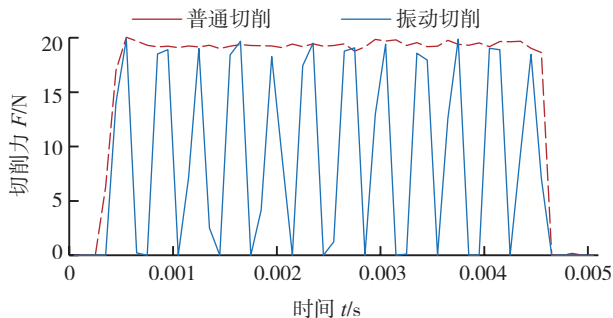


图3 切削力  
Fig.3 Cutting force

利用2种切削方式去除工件表层材料后,工件沿层深方向的残余应力等值线如图4所示。在普通切削方式下工件沿层深方向的残余应力分布较为均匀,随着距表层距离的增加,残余应力逐渐由表层的拉应力转为压应力,且数值趋于减小;在振动切削方式下工件沿层深方向的应力数值变化范围较大,工件基体的残余应力分布很不均衡,拉应力和压应力夹杂存在,应力梯度变化很大,在工作条件下容易因外界载荷和边界条件变化而引起工件尺寸和形状变化,影响零件疲劳强度和冲击韧性,减弱零件抗疲劳性能。

2.2.2 振动时效对工件残余应力的影响分析

将(2)和(3)进行对比分析,研究振动时效对残余应力的影响。在振动时效阶段,在已加工表面施加随时间正弦变化的激振力,幅值为100MPa,频率为1kHz。

沿工件层深方向的应力对比情况如图5所示,振动时效使工件受力部位产生适度的塑性变形,表层残余应力逐步由拉应力转变为压应力,增强零件尺寸稳定性,提高疲劳强度。

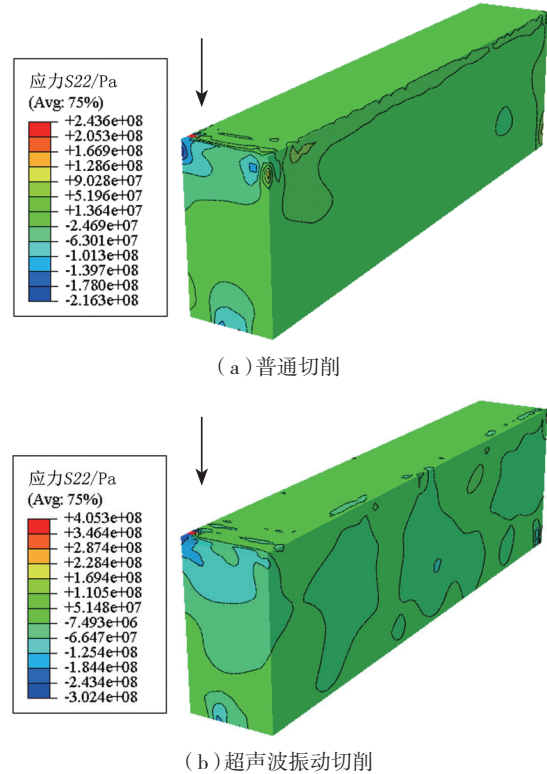


图4 不同切削方式下应力等值线

Fig.4 Stress contour in different cutting ways

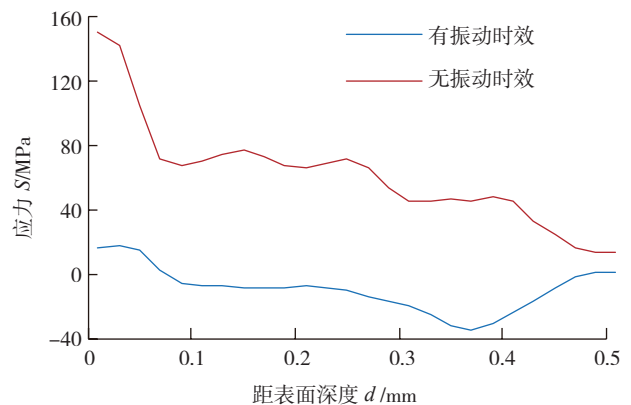


图5 沿工件层深的残余应力分布

Fig.5 Residual stress distribution along vertical direction of workpiece

3 结论

(1) 超声波振动切削的分离特性,可有效降低平均切削力,改善切削散热条件,提高TC4钛合金工件的加工质量。

(下转第41页)

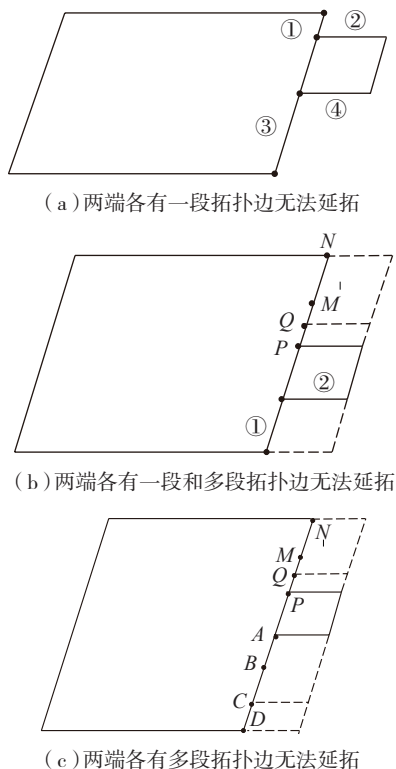


图4 多段拓扑边延拓出现在中部情况及处理方法

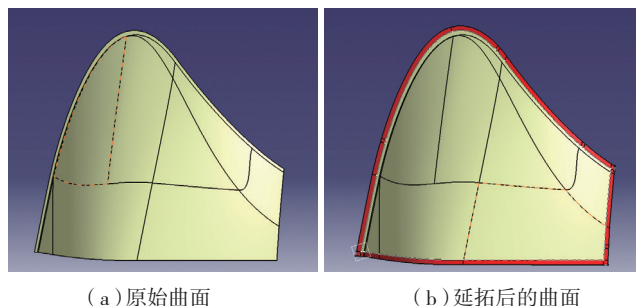
Fig.4 Several combined topology boundaries extension occur in middle and its processing method

外插延伸线,将其加入 LIST3 中,将 LIST3 中的曲线依次连接组成封闭线框,利用填充功能填充线框组成延拓面。

### 3 实例

下面通过若干实例来说明以上曲面延拓方法的可行性。

如图 5 所示的曲面,由于曲面比较复杂,如果使用 CATIA 自带的功能直接进行延拓,在有些边界处延拓出的曲面无法达到预期的效果;同时如果改变曲面的延拓长度,有些边界则会出现无法延拓的情况。应用本文中的延拓的方法后,一次性延拓后延拓曲面如图 5 (b),能够达到预定的要求。



(a) 原始曲面

(b) 延拓后的曲面

图5 某曲面及其延拓

Fig.5 Certain surface and its extension

## 4 结论

为了解决在 CATIA 设计过程中曲面延拓困难的问题,本文提出了 CATIA 中曲面延拓的新方法:尽可能多地结合边界曲线段进行延拓,对存在结合后无法延拓的曲线段,采用其他方法,比如扫掠、填充等替代。该方法在 CATIA 二次开发环境中实现,能够快速延拓曲面,经实际检验后,能够满足设计要求。目前,该功能已经应用于复合材料成型模具的设计中。

### 参考文献

- [1] 姜坤,周雄辉,黎旻,等. 检具设计中延伸曲面修补方法. 上海交通大学学报, 2011,45(11):1720-1724.
- [2] Shetty S, White P R. Curvature-continuous extension for rational B-spline curves and surfaces. Computer-Aided Design, 1991, 23(7):484-491.
- [3] 余正生,雷毅. NURBS 曲线曲面延伸. 工程图学学报, 1997(1):7-18.
- [4] 赵东福,许澍虹,柯映林. 组合三角 Bezier 曲面的延伸. 机械工程学报, 2003,39(4):87-91.
- [5] 初剑,魏志强,孟祥宾,等. 基于 Delaunay 三角剖分的曲面求交技术. 系统仿真学报, 2009,21(1):155-158.

(责编 亿霖)

(上接第 38 页)

(2) 超声波振动切削具有的冲击特性,降低了零件的疲劳强度和冲击韧性,使被切削工件表层的应力梯度变化较大,残余应力分布很不均衡,沿层深方向的拉应力和压应力夹杂存在。

(3) 在合理的工艺参数下,振动时效能有效地降低和均化超声波振动切削产生的表层残余应力,可在一定程度上提高工件尺寸、形位精度的稳定性以及工件表层的抗疲劳性能。

### 参考文献

- [1] Ahmed N, Mitrofanov A V, Babitsky V I, et al. Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718. Materials Science and Engineering, 2006, 424(1/2): 318-325.
- [2] Amini S, Soleimanimehr H. FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3):43-47.
- [3] 杨亮,卢泽生. 精密超声波振动切削单晶铜的计算机仿真研究. 系统仿真学报, 2007,19(4):738-741.
- [4] 易俊杰,刘长毅. 钛合金 TC4 超声波振动切削有限元仿真. 中国制造业信息化, 2008, 37(23): 29-32.
- [5] 吴红兵,刘刚,柯映林,等. 钛合金的已加工表面残余应力的数值模拟. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(8):1389-1393.
- [6] 付建科,范万里,陈维璧,等. 基于有限元法的重大焊接结构振动时效工艺参数研究. 机械设计与制造, 2008(2):119-121.

(责编 亿霖)