

引文格式: 徐捷, 冯平法, 颜键辉, 等. 超声纵振辅助螺旋铣削内壁形貌预测模型[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 72-79.

XU Jie, FENG Pingfa, YAN Jianhui, et al. Prediction model of inner wall morphology in ultrasonic longitudinal vibration assisted helical milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 72-79.

# 超声纵振辅助螺旋铣削内壁形貌预测模型

徐捷<sup>1</sup>, 冯平法<sup>1,2</sup>, 颜键辉<sup>1</sup>, 张建富<sup>2</sup>, 许超<sup>1,3</sup>, 马原<sup>1,3</sup>, 冯峰<sup>1</sup>

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055;

2. 清华大学机械工程系, 北京 100084;

3. 深圳市青鼎装备有限公司, 深圳 518133)

[摘要] 超声纵振螺旋铣削工艺可以显著提高加工质量, 然而其复杂运动学关系会导致已加工表面产生较之于传统螺旋铣削更为复杂的形貌。为了对这一工艺生成的孔内壁加工表面进行形貌预测和规律提炼, 本文提出了超声纵振螺旋铣削的表面形貌预测模型及其可视化方法, 并设计了验证试验, 对波浪纹织构、尖峰、分割层 3 类典型表面特征进行对比, 发现仿真和试验的吻合度良好。随后, 本文利用该模型评估了振幅、转速、公转进给和切向进给对表面形貌的影响。研究结果表明, 超声振动的振幅导致侧壁形成的波浪纹形貌, 且主轴转速的增大导致了波浪纹织构变得稀疏。此外, 切向每齿进给、每公转轴向进给和公转进给速度分别决定了斜向尖峰带的高度、分割层的间距和形貌的凸起高度。

关键词: 钛合金; 螺旋铣削; 运动学分析; 表面形貌; 超声振动辅助加工

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.072



徐捷

博士研究生, 主要研究方向为先进复合材料精密与极低损加工技术。

目前, 航空制造业中不同零部件之间的连接方式大多为铆钉或螺栓,

而这两种连接方式都需要在目标零部件上制孔。由于连接件在服役期间发生疲劳失效而导致的飞机失事事故中, 大多是由于连接孔加工质量低引起, 因此如何提高制孔质量是航空制造业的一个具有重大意义的课题。近年来, 不少学者提出使用螺旋铣削制备对质量要求高的孔, 与传统制孔不同, 螺旋铣削凭借其特殊的进给方式与材料去除机理, 在制孔过程中体现出了较大的技术优势, 是当前航空构件加工制造的研究重点之一。

另一方面, 随着高精密产品工艺要求提高<sup>[1]</sup>以及可控仿生功能表面加工的需要<sup>[2-3]</sup>, 表面形貌的预测成为技术突破的重要瓶颈<sup>[4]</sup>。铣削加工后的表面形貌主要由刀-工相互作用关系所决定<sup>[5]</sup>。为了实现对形

貌的预测, 国内外研究者基于运动学关系, 从解析<sup>[6]</sup>和机器学习<sup>[7]</sup>两个方面展开了大量研究, 在模型中考虑了铣刀振动和刀齿误差, 对钛合金铣削加工后表面形貌特征值( $R_q$ 、 $R_z$ 和 $S_m$ )进行预测。在此基础上, 李雅青<sup>[8]</sup>和周晓勤<sup>[9]</sup>等采用高斯过程回归法, 在自由曲面铣削上建立了表面形貌预测模型, 实现了从简单平面、柱面到复杂面的技术突破。针对复杂曲面的铣削研究, 郑勐等<sup>[10]</sup>建立了球头铣刀运动学方程, 研究了刀具倾角对表面形貌的影响。然而已有的表面形貌预测模型存在时间离散步长对网格尺寸依赖性强的缺点。基于此, 王仁伟等<sup>[11]</sup>提出了一种针对球头铣削改进时间步长算法, 并在五轴铣削加工上得以验证。

近年来, 超声振动辅助铣削凭借

其切削温度低、易于断屑、加工质量高等优点<sup>[12]</sup>逐渐代替了部分传统铣削加工<sup>[13]</sup>。同时,已有的预测模型面对这一新兴加工方式体现出了局限性,因而给表面形貌的预测技术带来了新的挑战。超声振动辅助螺旋铣削具有复杂的刀-工接触关系,其在传统铣削的基础上,叠加了公转进给以及超声频率的振动<sup>[14]</sup>,从而导致表面形貌难以预测。以往的研究关注于铣削后的底面形貌<sup>[15]</sup>,这对于铣槽和盲孔来说是有意义的。然而对于铣边和通孔来说,实际生产更加关注内孔和侧壁形貌,这对提高产品尺寸精度和公差配合有着重要意义<sup>[16-17]</sup>。

本文以钛合金超声振动辅助螺旋铣削为研究对象,采用“Z-Map”法<sup>[18]</sup>对内孔加工表面进行布尔运算,建立了内孔表面形貌的预测模型,并设计了验证试验,从而验证预测模型的可靠性。

## 1 模型描述

### 1.1 运动学分析

在普通螺旋铣孔工艺中,刀具运动由刀具自转、轴向进给运动及绕加工孔轴线旋转运动3个部分组成,如图1所示。其中, $D_H$ 为加工目标孔径; $D_T$ 为刀具直径; $e$ 为目标孔轴线与刀具轴线间偏心距; $a_p$ 为铣刀每公转的轴向进给; $n_z$ 为铣刀自转转速; $n_g$ 为螺旋进给的转速(或称之为公转转速)。其速度方程为

$$\begin{cases} v_g = \frac{2\pi en_g}{60} \\ v_z = \frac{\pi D_T n_z}{60} \\ v_a = a_p n_g \end{cases} \quad (1)$$

式中, $v_g$ 为刀具轴线相对目标孔轴线的周向运动速度; $v_z$ 为刀尖点的速度,可以分解为刀尖点相对刀具轴线的周向相对速度; $v_a$ 为平行于刀具轴线的轴向进给运动。 $v_g$ 和 $v_z$ 相加可以得到刀尖点垂直目标孔轴线的周

向运动速度 $v_T$ 。

$$v_T = \frac{2\pi en_g + \pi D_T n_z}{60} \quad (2)$$

刀具每齿周向进给 $f_{zt}$ 与刀具每齿轴向进给量 $f_{za}$ 可以表示为

$$\begin{cases} f_{zt} = \frac{2\pi en_g}{N n_z} \\ f_{za} = \frac{n_g a_p}{N n_z} \end{cases} \quad (3)$$

当时间 $t=0$ 时,刀具中心绕着目标孔中心做旋转半径为 $e$ 的螺旋运动,刀尖 $S$ 的运动轨迹是在刀具中心运动轨迹的基础上加入刀具自转,几何关系如图2所示,刀具中心的运动轨迹方程可以描述为

$$\begin{cases} X_{HM} = e \cos \theta + D_T \cos \varphi \\ Y_{HM} = e \sin(-\theta) + D_T \sin(-\varphi) \\ Z_{HM} = \frac{a_p n_g t}{60} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $X_{HM}$ 、 $Y_{HM}$ 和 $Z_{HM}$ 为普通螺旋铣削的运动方程。 $\varphi_z=2\pi n_z t$ 、 $\varphi_g=2\pi n_g t$ ,通过Matlab软件可以绘制出如图3所示的三维轨迹图。

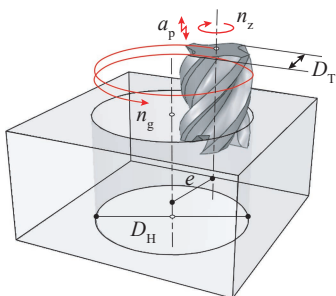


图1 螺旋铣孔原理

Fig.1 Motion principle of helical milling

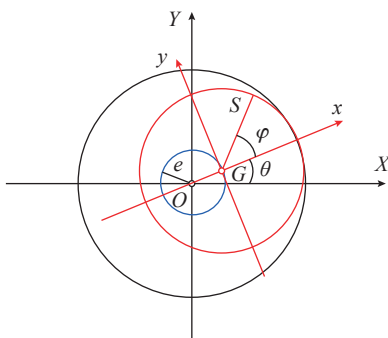


图2 螺旋铣运动学坐标系

Fig.2 Helical milling kinematic coordinate system

在超声纵振螺旋铣削中,在轴向方向需要叠加一个振幅 $A$ 、频率 $f$ 的简谐振动,该方向的速度表达式为

$$v_z = 2\pi f A \sin 2\pi f t \quad (5)$$

积分后代入式(4)中,可以得到超声纵振螺旋铣削的三维轨迹方程为

$$\begin{cases} X_{HM} = e \cos \theta + D_T \cos \varphi \\ Y_{HM} = e \sin(-\theta) + D_T \sin(-\varphi) \\ Z_{HM} = \frac{a_p n_g t}{60} + A \sin 2\pi f t \end{cases} \quad (6)$$

通过Matlab可以绘制出图4所示的三维轨迹示意图。

### 1.2 超声纵振辅助螺旋铣削侧壁表面形貌形成机理

传统钻孔中,刀具轴心固定,切削刃上任一点绕着刀具轴线自转,因

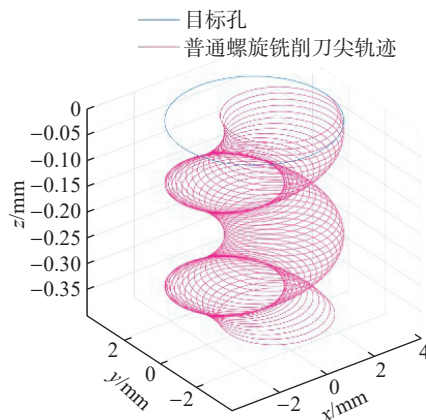


图3 普通螺旋铣刀尖轨迹

Fig.3 Trajectory of conventional helical milling kinematic

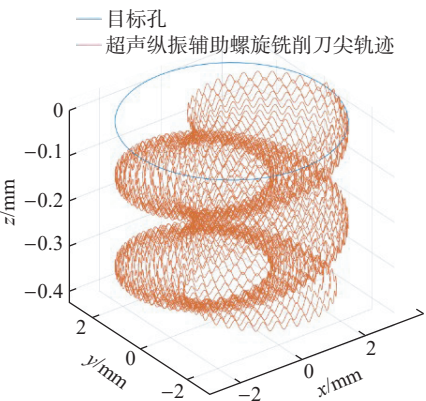


图4 超声纵振辅助螺旋铣削刀尖轨迹示意图

Fig.4 Trajectory of ultrasonic longitudinal vibration assisted helical milling

而刀刃的轨迹为正圆,如图5中的理想轨迹所示。而在螺旋铣孔中,切削刃的运动是自转和进给公转的叠加,刀刃轨迹类似为阿基米德螺旋线。随着公转进给,第1齿(图5蓝色线)和第2齿(图5红色线)的轨迹会出现周期性的“漏切”区域(图5阴影区域),该区域是影响表面粗糙度的重要因素。

### 1.3 表面形貌预测模型

#### 1.3.1 刀具和工件模型

在预测模型中,切削刃被默认为多个元素点组成的曲线,工件认为是二维数组,该数组存储了刀具运动轨迹的高度信息,同时忽略了孔壁未加工表面的塑性变形、材料回弹,以及切屑对孔壁表面的划伤。

对于工件模型,在理想状态下,孔壁表面形貌只与刀具的运动有关。此状态下孔壁表面任意点残留高度与刀具在运动过程中经过该点的最低高度相同。以工件中任一点作为原点构建刀具坐标系  $OXYZ$ ,并将工件元素点离散为  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ ,以其  $XOY$  面的坐标作为数组索引。

对于切削刃模型,把切削刃离散成若干个离散点,每个元素点之间的间隔为  $\Delta l$ 。参考实际加工中四刃立铣刀的刀具几何尺寸建立切削刃模型,如图6所示,以立铣刀刀具中心点为原点,刀具轴向为  $Z'$ ,切削底刃所在直线为  $X'$  向,与  $ZX'$  相垂直的方向为  $Y'$  向,建立四刃立铣刀刀

具坐标系  $X'Y'Z'$ 。设刀具半径为  $r$ ,铣刀底刃后角为  $\alpha$ ,刀尖钝圆半径为  $r_b$ ,铣刀底刃某点与铣刀中心点距离为  $l$ ,由几何关系知,铣刀底刃某元素点  $P_0$  在刀具坐标系的坐标为

$$\begin{cases} X' = l \\ Y' = 0 \\ Z' = r_b = \tan\alpha(r - (l + r_b(l + \sin\alpha))), \\ 0 \leq l < r_b(1 + \sin\alpha) \\ Z' = \sqrt{r_b^2 + (r + l)^2}, \\ r + r_b(1 + \sin\alpha) \leq l \leq r \end{cases} \quad (7)$$

设四刃铣刀螺旋角为  $\beta$ ,侧刃某点  $P_0$  与铣刀底端间高度差为  $h$ ,则铣刀侧刃上某点坐标为

$$\begin{cases} X' = r \cos \frac{h - r_b}{r \tan \beta} \\ Y' = r \sin \frac{h - r_b}{r \tan \beta}, r_b \leq h \\ Z' = h \end{cases} \quad (8)$$

考虑到在切削过程中的刀具挠曲变形与刀刃半径的微观变化,在侧刃半径中加入了数量级为纳米的正弦变量模拟刀具中随机变量。

#### 1.3.2 刀具坐标与工件坐标间变换

在预测模型中,刀具坐标系在以旋转角速度  $\omega$  做自转运动,并伴随螺旋状的进给运动与超声频的简谐振动。刀具元素点在工件坐标系下的运动轨迹可以描述为

$$P = P_0 \times C + F \quad (9)$$

式中,  $P$  为刀具元素点加工过程汇总

工件坐标系下的刀尖元素点位置;  $P_0$  为初始点;  $C$  为刀具-工件坐标系转换矩阵;  $F$  为进给运动与超声振动的运动方程。将式(9)展开可以得到

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Xk \\ Yk \\ Zk \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,路径  $k$  为

$$k = \begin{bmatrix} x_0 + v_x t \\ y_0 + v_y t \\ v_z + A \sin(2\pi f t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $x_0$ 、 $y_0$  为加工起始点;  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  为3个方向的进给速度;  $t$  为时间。

#### 1.3.3 时间离散化

为了减少计算量,把时间点离散成若干个时间点,每点的时间间隔为  $\Delta t$ ,生成时间序列,每一个时间点用于刷新刀具的运动位置,得到离散的刀具运动位置。当刀具元素点高度比工件高度点低时,刷新数组中的高度信息,直到总时长计算完毕,最终可以得到加工后的表面形貌。

如图7所示,刀具模型中存在元素点  $P_0$ 、 $P_1$  和时间点  $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  时两点沿着切削路径分别经过  $P_{0,t_0}$ 、 $P_{0,t_1}$ 、 $P_{0,t_2}$  和  $P_{1,t_0}$ 、 $P_{1,t_1}$ 、 $P_{1,t_2}$ 。根据就近原则,当选取不得当的时候,  $P_{1,t_0}$ 、 $P_{1,t_1}$ 、 $P_{1,t_2}$  3点的高度信息会与工件上的

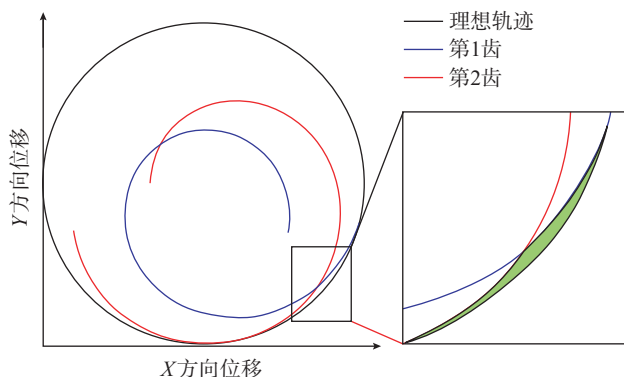


图5 螺旋铣孔刀刃在  $XOY$  平面轨迹示意图

Fig.5 Schematic diagram of helical milling tool edge trajectory in  $XOY$  plane

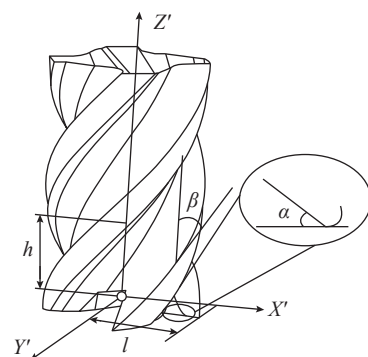


图6 四刃螺旋铣刀示意图

Fig.6 Four edge helical milling tool

A、B、C 3 点进行高度信息比对,而中间经过的其余工件点都不会被更新,被称为“漏判”现象。为了避免此现象发生,刀具元素点在时间间隔内走过的路径长度必须小于等于元素点间隔最小值,即

$$\max \Delta s \leq \min(\Delta x, \Delta y) \quad (12)$$

超声纵振辅助螺旋铣削中,运动速度最快的点位于铣刀的最外圈,因此  $\Delta s$  和  $\Delta l$  需满足

$$\begin{cases} \max \Delta s = \frac{nr\Delta t}{60} + 2\pi fi\Delta t \leq \min(\Delta x, \Delta y) \\ \Delta l \leq \min(\Delta x, \Delta y) \end{cases} \quad (13)$$

综上,超声纵振辅助螺旋铣削侧壁表面形貌预测模型的具体实现流程如图 8 所示,并通过 Matlab 软件对预测模型的结果进行可视化。

## 2 试验验证

### 2.1 试验方案

钛合金普通和超声纵振辅助螺旋铣削试验在三轴精密加工中心 (THU ULTRASON 850) 进行,如图 9 所示。通过三轴机床中 3 个方向的插补运动来实现螺旋铣削加工。为了防止材料塑性变形对表面形貌结果的影响,本文采用高弹性模量的钛合金 (TC4) 板材,工件尺寸为 200 mm × 100 mm × 10 mm,利用 (Kistler 9255b) 测力仪实时监测加工过程中切削力的变化情况。工件通过专用夹具夹持固定到机床工作

平台上。刀具为四刃硬质合金刀具,其中加工参数如表 1 所示,刀具尺寸如表 2 所示,模型预测如图 10 所示。

在加工完成以后对已加工孔进行切割制样,并使用超景深显微镜 (KEYENCE VH-Z500R) 分别对不同转速下的普通与超声纵振辅助螺

旋铣削后的工件进行孔壁形貌观察。

### 2.2 验证结果

如图 10 和 11 所示,在转速 3000 r/min 的条件下,仿真结果和试验的结果均显示出超声纵振辅助螺旋铣削后的内壁具有规则的波浪形织构,且波浪振幅与刀具的超声振动

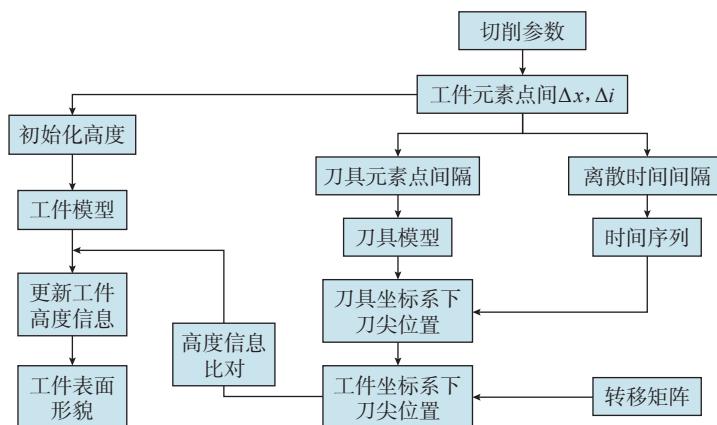


图 8 侧壁表面形貌仿真模型流程图

Fig.8 Flow chart of side wall surface topography simulation model



图 9 螺旋铣孔试验平台

Fig.9 Experimental set-up of helical milling

表 1 加工参数

Table 1 Machining parameters

主轴转速 / (r · min <sup>-1</sup> )	切向每齿进给量 / (mm · z <sup>-1</sup> )	轴向每公转进给 / (mm · z <sup>-1</sup> )	孔半径 / mm	公转半径 / mm
3000, 6000	0.0075	0.1	6	1

表 2 刀具尺寸

Table 2 Tool geometry

刀具长度 / mm	刀具直径 / mm	螺旋角 / (°)	前角 / (°)	后角 / (°)
35	4	35	10	10

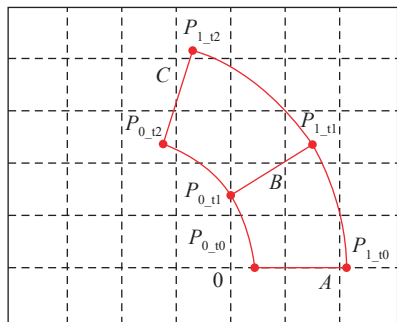


图 7 工件网格矩阵图

Fig.7 Workpiece element matrix diagram

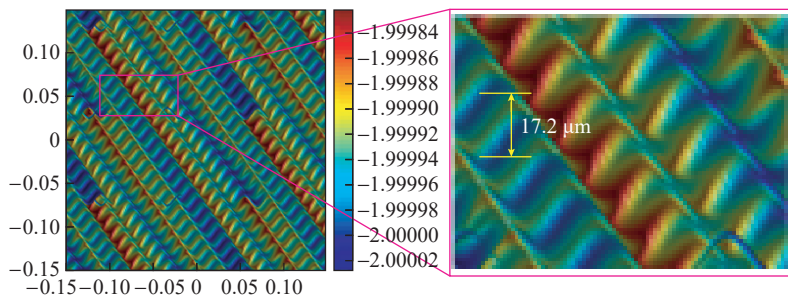


图 10 模型预测的波浪纹 (mm)  
Fig.10 Wavy texture predicted by model (mm)

的振幅大小一致。从波浪形织构的振幅对比情况来看,仿真预测的高度差为  $17.2\ \mu\text{m}$ ,而白光干涉仪测量的高度差为  $17.4\ \mu\text{m}$ ,相对误差率为 1.14%,这与仿真模型预测的结果吻合。同时,织构间存在规则的倾斜尖峰,尖峰点连线后与垂直线夹角由铣刀螺旋角决定。若刀具不发生崩刃及颤振现象,该角度理论上与螺旋角相等。如图 12 所示,仿真模型的尖峰线与垂直线夹角为  $55^\circ$  (与铣刀螺旋角相等),而白光干涉仪拍摄图像的测量结果为  $55.6^\circ$ ,相对误差率为 1.07%。

与普通铣削不同,螺旋铣削存在公转轴向进给。在不同的公转期间内,尖峰带会被切断,被切断的区域称之为“分割层”。在试验结果中,分割层以阴影形式呈现,而且模型预测结果表示为红蓝颜色的突变,如图 13 所示。

### 3 模型应用与讨论

在模型被验证可靠的基础上,进一步地对四刃螺旋铣刀(螺旋角为  $35^\circ$ ,刀具半径  $r=2\ \text{mm}$ )、制孔半径  $R=3\ \text{mm}$  的铣孔工艺展开预测和讨论,重点关注超声振动振幅、主轴转速、切向进给和公转进给对表面形貌的影响。

#### 3.1 振幅对侧壁表面形貌的影响

当主轴转速  $n=4000\ \text{r/min}$ 、切向每齿进给  $f_{zt}=0.015\ \text{mm/z}$ 、每公转轴向进给  $a_p=0.1\ \text{mm/z}$ 、超声频率

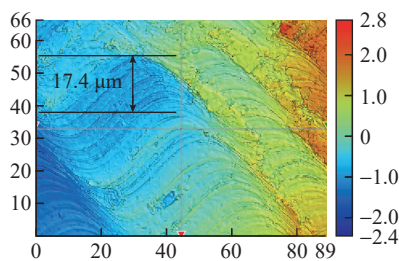
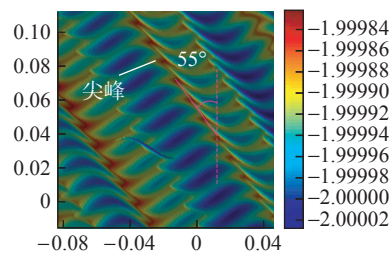


图 11 白光干涉仪观测的波浪纹 ( $\mu\text{m}$ )  
Fig.11 Wavy texture observed by white-light interferometers ( $\mu\text{m}$ )

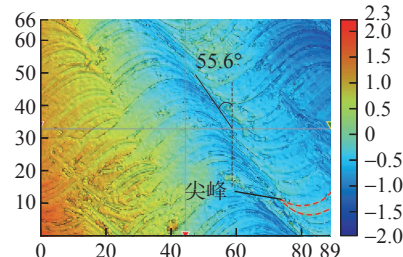
$f=22525\ \text{Hz}$  时,纵振振幅  $A$  取  $0, 2\ \mu\text{m}, 4\ \mu\text{m}, 6\ \mu\text{m}$ 。如图 14 所示,振幅  $A=0$  时为普通螺旋铣孔,加工表面的形貌取决于刀具形貌、切削速度、每齿轴向进给与每公转轴向进给,三维形貌为横向的切痕,伴随倾斜角度为铣刀螺旋角的斜向材料去除残余带。施加超声振动后,三维形貌出现简谐的波纹状织构,并伴随横向切痕(即分割层)。同时,伴随振幅的加大,加工表面上简谐振动的微观特征愈加明显,具体表现为正余弦切痕幅值增大。以上规律充分说明,振幅对侧壁波浪形织构幅值起决定性作用。

#### 3.2 主轴转速对侧壁表面形貌的影响

当切向每齿进给  $f_{za}=0.015\ \text{mm/z}$ 、每公转轴向进给  $a_p=0.1\ \text{mm/z}$ 、超声频率  $f=22525\ \text{Hz}$ 、纵振振幅  $A=6\ \mu\text{m}$ 、主轴转速  $n$  取  $3000\ \text{r/min}, 4000\ \text{r/min}, 5000\ \text{r/min}, 6000\ \text{r/min}$ 。如图 15 所示,随着切削速度增大,波浪状织构会变得越稀疏,这是由于在相同的刀

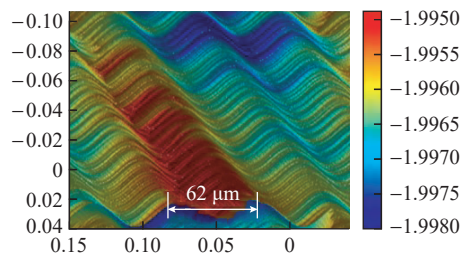


(a) 模型预测结果 (mm)

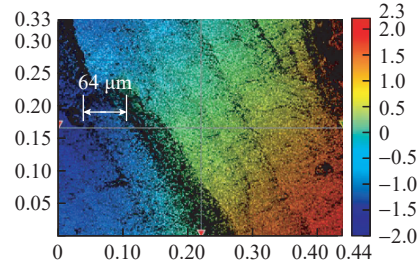


(b) 试验结果 ( $\mu\text{m}$ )

图 12 模型预测结果与试验结果的尖峰验证  
Fig.12 Sharp-like peak validation of predictions and experimental results



(a) 模型预测结果 (mm)



(b) 试验结果 ( $\mu\text{m}$ )

图 13 模型预测结果与试验结果的分割层验证  
Fig.13 Segmented layer validation of predictions and experimental results

具自转周期内,转速越低所需切削时间越长,所经历超声振动周期次数增多,从而导致超声振动对材料切除时间更长,高频的刀尖振动会形成更为密集的织构。因此,在临界转速以下,提高转速,有利于获得更为光滑的加工表面。

### 3.3 切向每齿进给对侧壁表面形貌的影响

当每公转轴向进给  $a_p=0.1$  mm/z、超声频率  $f=22525$  Hz、纵振振幅  $A=6$   $\mu$ m、主轴转速为  $n=4000$  r/min,切向每齿进给取  $0.0075$  mm/z、 $0.015$  mm/z、 $0.0225$  mm/z、 $0.030$  mm/z。仿真结果如图 16 所示,随着切向每齿进给增

大,表面形貌没有发生规律性变化,红色区域数量的增多,意味着尖峰高度随之增大。这是由于增大切向每齿进给,铣刀完成相同公转周期所需的自转周期次数减少,导致材料切削盲区(即刀刃无法切到区域)面积变大,同样也使得材料去除量变少。

### 3.4 轴向进给对侧壁表面形貌的影响

当切向每齿进给  $f_z=0.015$  mm/z、主轴转速  $n=4000$  r/min、超声频率  $f=22525$  Hz、纵振振幅  $A=6$   $\mu$ m,公转轴向每齿进给取  $0.05$  mm/z、 $0.10$  mm/z、 $0.15$  mm/z、 $0.2$  mm/z。如图 17 所示,随着公转轴向进给增大,分割层的间距也增大,且间距大小与公转轴向

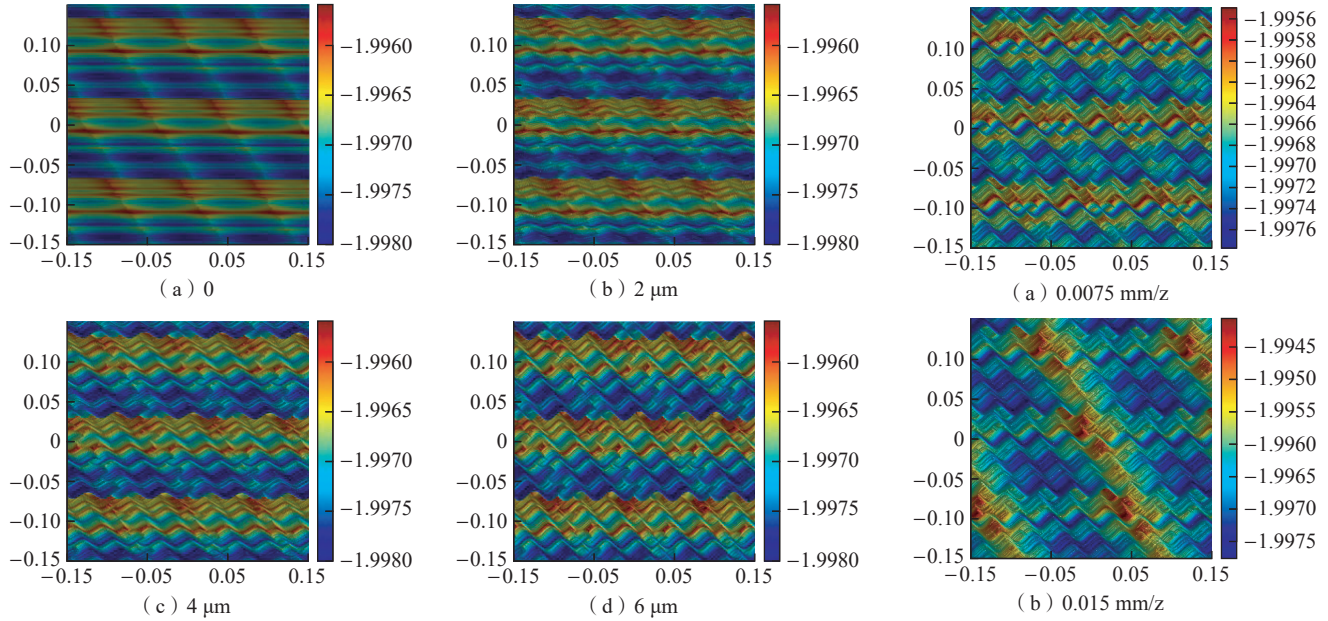


图 14 不同振幅下的孔壁形貌预测

Fig.14 Hole inner wall morphology prediction at different amplitudes

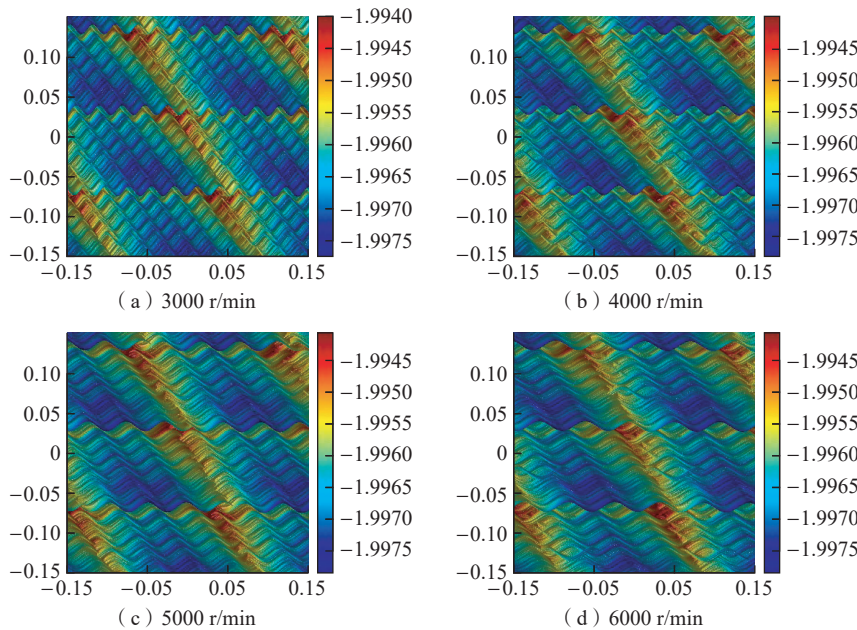


图 15 不同主轴转速下的孔壁形貌预测

Fig.15 Hole inner wall morphology prediction at different speeds of spindle

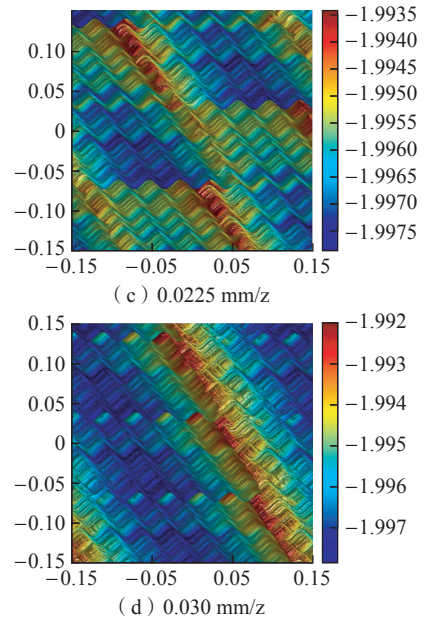


图 16 不同切向每齿进给下的超声纵振辅助螺旋铣削孔壁形貌预测

Fig.16 Hole inner wall morphology prediction at different tangential feed per tooth

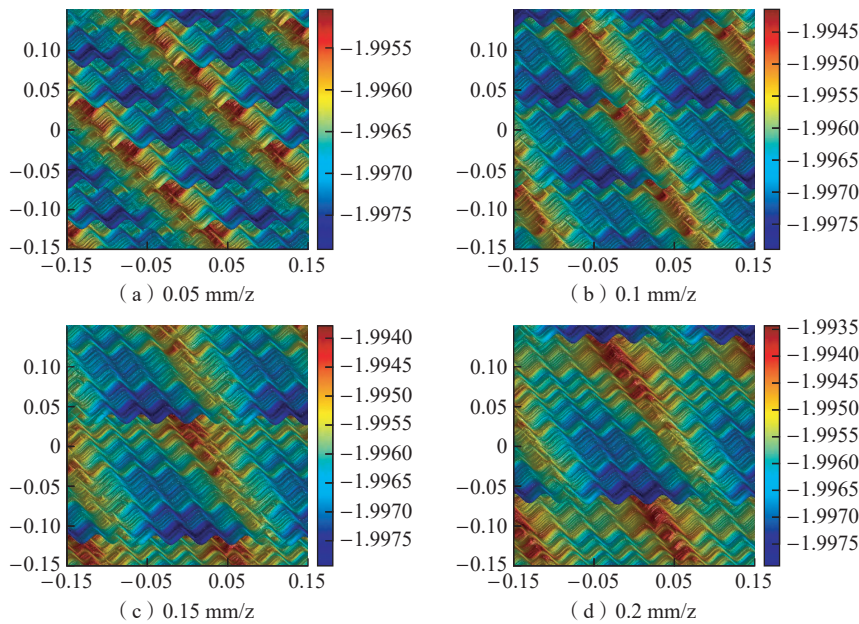


图 17 不同每公转轴向进给下的超声纵振辅助螺旋铣削孔内壁形貌预测  
Fig.17 Hole inner wall morphology prediction at different orbital feed per tooth

进给参数一致。这是因为螺旋铣削存在公转、自转及刀具振动 3 个周期,且 3 个周期相位差均不相同。因为相位差的原因,部分侧壁材料去除残余带被切断,而随着每公转轴向进给增大,被切断所需的轴向距离越大,呈正相关关系。另一方面,高度信息的结果显示,侧壁形貌的高度与每公转进给参数高度相关。当公转进给增大时,轴向切削盲区面积增大,从而导致材料去除量减少。

#### 4 结论

本文提出了超声纵振辅助螺旋铣削内孔表面形貌的预测模型,采用“Z-Map”法对内孔加工表面进行布尔运算,并将结果可视化。

(1) 试验结果有效证明了模型的可靠性,真实反映了铣削后内壁形貌中的波浪纹结构、尖峰及分割层 3 类典型微观细节。

(2) 随着振幅  $A$  的增大,在侧壁中由于简谐振动形成的波浪纹振幅越明显。

(3) 当主轴转速  $n$  增大,波浪纹结构逐渐稀疏。同时,随着切向每齿进给增大,斜向尖峰带的高度也增大。

(4) 随着每公转轴向进给的增大,分割层间距会增加;形貌凸起高度在高公转进给速度下高于低转进给速度条件。

该模型的建立和验证能够有效提高超声辅助精密加工表面质量预测能力,有助于提高产品尺寸精度的技术工艺优化效率,对于超声辅助精密加工技术领域的学术研究具有积极的意义。

#### 参考文献

[1] LIAO Z R, LA MONACA A, MURRAY J, et al. Surface integrity in metal machining—Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 162: 103687.  
[2] TOWNSEND A, SENIN N, BLUNT L, et al. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: A review[J]. Precision Engineering, 2016, 46: 34–47.  
[3] ARIZMENDI M, JIMÉNEZ A,

CUMBICUS W E, et al. Modelling of elliptical dimples generated by five-axis milling for surface texturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 137: 79–95.

[4] TORTA M, ALBERTELLI P, MONNO M. Surface morphology prediction model for milling operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(7): 3189–3201.

[5] 徐安平, 张大卫, 黄田, 等. 柔性螺旋立铣刀数控铣削表面形貌物理仿真模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(4): 262–266.

XU Anping, ZHANG Dawei, HUANG Tian, et al. Physical simulation model for peripherally milled surface topography considering the cutter flexibility[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(4): 262–266.

[6] CAI C Y, AN Q L, MING W W, et al. Modelling of machined surface topography and anisotropic texture direction considering stochastic tool grinding error and wear in peripheral milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 292: 117065.

[7] RIFAI A P, AOYAMA H, THO N H, et al. Evaluation of turned and milled surfaces roughness using convolutional neural network[J]. Measurement, 2020, 161: 107860.

[8] 李雅青, 赵培铁, 姜彬, 等. 铣削钛合金加工表面形貌特征参数的预测[J]. 工具技术, 2020, 54(1): 41–46.

LI Yaqing, ZHAO Peiyi, JIANG Bin, et al. Prediction study on surface topography distribution of milling titanium alloy[J]. Tool Engineering, 2020, 54(1): 41–46.

[9] 周晓勤, 谢雪范, 马伟, 等. 自由曲面铣削表面形貌仿真方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(1): 19–22.

ZHOU Xiaoqin, XIE Xuefan, MA Wei, et al. Research on topography simulation method in end milling free form surfaces[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(1): 19–22.

[10] 郑勤, 董永亨. 球头铣刀倾角对硬铝合金工件表面形貌的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(4): 36–41.

ZHENG Meng, DONG Yongheng. Effect of inclination-angle of ball-milling cutter on surface morphology of hard aluminium alloy workpiece[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(4): 36–41.

[11] 王仁伟, 张松, 葛人杰, 等. 改进的球头铣刀加工表面形貌建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 973-980.

WANG Renwei, ZHANG Song, GE Renjie, et al. Modified machined surface topography modeling in ball-end milling process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(4): 973-980.

[12] 牛赢, 焦锋, 赵波, 等. 纵扭超声铣削残余应力三维有限元仿真与试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 224-232.

NIU Ying, JIAO Feng, ZHAO Bo, et al. 3D finite element simulation and experimentation of residual stress in longitudinal torsional ultrasonic assisted milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 224-232.

[13] 张翔宇, 隋嵩, 张德远, 等. 超声振动改善深孔镗削加工质量[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 143-148.

ZHANG Xiangyu, SUI He, ZHANG Deyuan, et al. The improvement of deep-hole boring machining quality assisted with

ultrasonic vibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 143-148.

[14] 张园, 康仁科, 刘津廷, 等. 超声振动辅助钻削技术综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 33-44.

ZHANG Yuan, KANG Renke, LIU Jinting, et al. Review of ultrasonic vibration assisted drilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 33-44.

[15] 倪陈兵, 朱立达, 宁晋生, 等. 超声振动辅助铣削钛合金铣削力信号及切屑特征研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 207-216.

NI Chenbing, ZHU Lida, NING Jinsheng, et al. Research on the characteristics of cutting force signal and chip in ultrasonic vibration-assisted milling of titanium alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 207-216.

[16] 陈光, 刘见, 戈家影, 等. 基于运动学及力热分析的CFRP超声振动辅助螺旋铣孔质量影响机制[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 199-209.

CHEN Guang, LIU Jian, GE Jiaying, et al. Experimental study on ultrasonic vibration helical milling of CFRP based on kinematic and thermal-mechanical analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 199-209.

[17] CHEN G, REN C Z, ZOU Y H, et al. Mechanism for material removal in ultrasonic vibration helical milling of Ti6Al4V alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 138: 1-13.

[18] 董永亨, 李淑娟, 洪贤涛, 等. 基于Z-MAP方法的球头铣刀铣削力的建模[J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 201-212.

DONG Yongheng, LI Shujuan, HONG Xiantao, et al. Modeling on the milling force of ball-end milling cutter based on Z-MAP method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 201-212.

通讯作者: 冯峰, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为智能制造与精密加工技术。

## Prediction Model of Inner Wall Morphology in Ultrasonic Longitudinal Vibration Assisted Helical Milling

XU Jie<sup>1</sup>, FENG Pingfa<sup>1,2</sup>, YAN Jianhui<sup>1</sup>, ZHANG Jianfu<sup>2</sup>, XU Chao<sup>1,3</sup>, MA Yuan<sup>1,3</sup>, FENG Feng<sup>1</sup>

(1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Shenzhen Tsingding Technology Co., Ltd., Shenzhen 518133, China)

**[ABSTRACT]** Ultrasonic longitudinal vibration assisted helical milling (ULVAHM) can significantly improve the machining quality. However, the complex kinematics can result in a more complex morphology of the surface machined by ULVAHM than that by a conventional helical milling. To predict the morphology and summarize the rules of the machined surface generated by ULVAHM, a morphology prediction model and its visualization method were proposed in this study, and a verification experiment was conducted to compare the three typical microscopic characteristics, namely, wave texture, sharp-like peak and segmented layer. A favorable agreement between experimental and simulation results was demonstrated. Afterwards, the effects of amplitude, rotational speed, revolution feed and tangential feed on the surface morphology were evaluated by using the model. The investigation results show that the amplitude in ultrasonic vibration leads to the formation of wavy patterns on sidewalls. As the spindle speed increases, the wavy pattern weave becomes sparser. Meanwhile, the height of oblique crest band, the spacing of split layers, and the height of shaped projection are determined by the circumferential feed per tooth, axial feed per tooth, and feed speed, respectively.

**Keywords:** Titanium alloy; Helical milling; Kinematic analysis; Surface morphology; Ultrasonic vibration assisted machining

(责编 古索)