

文章编号 1004-924X(2024)08-1140-13

## 镍磷合金微沟槽金刚石切削泊松毛刺形成机理

李晓蓬, 余亮宝, 孙占文, 王素娟\*

(广东工业大学 省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:**为了探究镍磷合金超精密切削过程中泊松毛刺的形成原因及规律,并且寻求泊松毛刺尺寸更精准的表征方式,本文通过对镍磷合金泊松毛刺的形成机理进行理论分析,建立其正交切削过程中的泊松毛刺高度和宽度预测模型,并通过实验分析切削参数对泊松毛刺高度和宽度的影响,通过实验观察可知,切削深度对毛刺尺寸影响显著,切削深度由  $3\text{ }\mu\text{m}$  增加至  $9\text{ }\mu\text{m}$  时,毛刺高度增加了  $0.0998\text{ }\mu\text{m}$ ,毛刺宽度增加了  $1.06\text{ }\mu\text{m}$ ,而切削速度对毛刺高度及宽度的影响很小。且通过对比实验得到的毛刺数据和预测数据可知,毛刺高度和宽度预测模型的平均相对误差值分别为  $5.43\%$  和  $8.17\%$ ,验证了预测模型的准确性。同时目前的泊松毛刺高度和宽度表征方法具有一定的误差,因此本文提出了利用积分法计算泊松毛刺体积的方法,并基于体积法建立了更准确的泊松毛刺尺寸表征方法,通过计算得到体积的预测模型平均相对误差值为  $4.81\%$ ,可知泊松毛刺体积的预测模型准确度相对更高。研究结果为镍磷合金正交切削过程中合理选择切削参数和泊松毛刺尺寸评估方法提供了理论指导。

**关键词:**微沟槽切削;镍磷合金;毛刺生成;金刚石切削

**中图分类号:**TG506;TH161.14 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243208.1140

## Formation mechanism of Poisson's burr in micro-grooved diamond cutting of nickel-phosphorus alloy

LI Xiaopeng, YU Liangbao, SUN Zhanwen, WANG Sujuan\*

(State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment,  
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

\* Corresponding author, E-mail: grace.wangsj@gdut.edu.cn

**Abstract:** In order to explore the formation causes and rules of Poisson's burr in ultra precision cutting of nickel-phosphorus alloy, and to seek a more accurate characterization method of Poisson's burr size, this paper conducted theoretical analysis of the formation mechanism of Poisson's burr in nickel-phosphorus alloy and established a prediction model for the height and width of Poisson's burr in orthogonal cutting process. Through experimental analysis of the influence of cutting parameters on the height and width of Poisson's burr, it can be observed that the effect of cutting depth on burr size is significant. When the cutting depth increases from  $3\text{ }\mu\text{m}$  to  $9\text{ }\mu\text{m}$ , the burr height increases by  $0.0998\text{ }\mu\text{m}$  and the burr width increases by  $1.06\text{ }\mu\text{m}$ , while the cutting speed has little effect on the burr height and width. By comparing the burr data obtained from the experiment with the predicted data, it can be seen that the average relative error values of the burr height and width prediction models are  $5.43\%$  and  $8.17\%$ , which verifies the accuracy of

收稿日期:2023-09-30;修订日期:2023-11-01.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51975128)

the prediction model. At the same time, the current characterization method of the height and width of Poisson's burr have certain errors. Therefore, this paper proposed a method for calculating the volume of Poisson's burr using the integration method, and established a more accurate characterization method of the size of Poisson's burr based on the volume method. The average relative error value of the predicted volume model is 4.81%, indicating that the accuracy of the Poisson's burr volume prediction model is relatively higher. The research results provide theoretical guidance for the rational selection of cutting parameters and Poisson's burr evaluation method in the orthogonal cutting process of nickel-phosphorus alloy.

**Key words:** microgroove cutting; nickel-phosphorus alloy; burr formation; diamond cutting

## 1 引言

近年来,随着我国光学事业的不断发展,对光学系统中关键零部件的材料性能及成型工艺提出了更高的要求<sup>[1]</sup>,而精密玻璃模压成型技术由于具备成型精度高、效率高、加工成本低等优点,受到广泛关注,该技术是将模具与玻璃放在工作腔内一起加热到模压温度,一次性精确复制出模具的面型,适合微结构阵列的精密复制<sup>[2]</sup>。然而,由于精密玻璃成型所需温度较高(高达500℃左右),因此,如果选用铜铝合金等作为模具材料,容易因为温度过高而导致模具软化失效;另一方面,碳化硅(SiC)、碳化钨(WC)、硬脆性硅等材料虽然温度稳定性较好,但其加工性能较差,难以在其表面加工精度较高的微结构阵列,且易产生裂纹,加工难度较大,与之相比,镍磷合金熔点通常可达800℃以上<sup>[3-4]</sup>,晶态镍磷合金能够在380℃下进行玻璃模压而不会产生整体形状变形,具有优越的耐腐蚀性、耐磨性、硬度、耐磨性、可焊性、磁性和沉积均匀性<sup>[5-6]</sup>。Brinksmeier等<sup>[7-8]</sup>通过超精密微凿无氧铜、镍银合金、镍磷合金、铝合金等金属,发现镍磷合金在作为逆反射镜的模具上加工效果最好。Yu等<sup>[9]</sup>为了加强镍磷玻璃模具材料的机械性能,提出了一种超声波辅助化学镀法在耐热不锈钢表面合成石墨烯增强镍磷(G-Ni-P)复合薄膜,有效提高了其可加工性。因此,镍磷合金常常被用于加工光学元件玻璃模压的母模。

然而,在镍磷合金切削过程中,由于塑性侧流的原因,材料会向两侧流动形成泊松毛刺,超精密切削镍磷合金产生的泊松毛刺问题会导致

加工质量下降,从而严重影响精加工的模具表面质量<sup>[4]</sup>。另一方面,对于微切削来说,去除毛刺的技术难度较大、成本过高以及容易造成表面其他损伤的产生<sup>[10-11]</sup>。而在精密光学领域,微结构阵列的模芯精度和尺度不断提高,对加工工艺的要求也越来越高<sup>[12]</sup>,因此,探究毛刺的生成机理及其抑制方法显得尤为重要。

近年来,已有不同学者通过超精密车削、超精密飞切,抑或是在加工前对镍磷合金进行热处理的方式探究了其毛刺生成的问题。Liu等<sup>[13]</sup>通过热处理镍磷合金使其提前晶化,将晶化后的镍磷合金和晶化前的镍磷合金分别进行正交切削,发现晶化后的镍磷合金产生的毛刺尺寸较小。Yu等<sup>[14-15]</sup>在此基础上提出退火温度为600℃,加热速率为5℃/min是最佳的热处理条件,并提出在超精密车削镍磷合金过程中,有效前角受相对刀尖锋利度影响,并决定加工过程中的剪切力和犁耕力,从而影响毛刺生成,在一定范围内降低相对刀尖锋利度可以抑制毛刺生成。Dong等<sup>[16-17]</sup>通过对镍磷合金分别做金刚石飞切和正交切削实验,提出利用金刚石飞切的方法产生的毛刺更少,并基于最大有效切削厚度的概念建立了飞切毛刺累积模型。Liu等<sup>[18]</sup>提出金刚石刀具的切削深度和刃口半径是毛刺形成的两个主要因素,采用较小的切削刃半径的刀具可以有效抑制毛刺的生成。Bao等<sup>[19]</sup>通过对非晶态镍磷合金进行超精密车削,提出了刀具几何形状和切削参数影响镍磷合金加工质量。Zhao等<sup>[20]</sup>提出车削过程中的溶胀效应,提出在车削镍磷合金过程中弹性恢复强于塑性流动,则会降低表面粗糙度,而如果塑性流动强于弹性恢复,则会增加表面粗糙

度。He 等<sup>[21]</sup>通过建立正交切削过程中的力学模型和材料去除模型,通过有限元分析提出了相邻微沟槽之间的塑性变形产生的干涉问题,确定了有效减少塑性变形的办法。Kobayashi 等<sup>[22]</sup>通过能量法预测了切屑的流动方向,通过设计刀具形状以减少毛刺的生成。

现有研究中,关于镍磷合金正交切削过程中的毛刺尺寸预测、毛刺尺寸表征方法较少,因此,本文将通过理论以及实验的方法对泊松毛刺生成原因及其抑制方法进行探讨,为金刚石切削镍磷合金过程中抑制两侧泊松毛刺的生成提供依据。

## 2 毛刺生成机制及表征方式

### 2.1 基于划痕实验的泊松毛刺高度预测模型

正交切削是微切削中刀具与工件相对运动方式最简单的切削方式,可以通过实验选择不同参数,分析不同加工参数对微沟槽的毛刺生成的影响。在超精密加工领域中,由于金刚石刀具具有高硬度、高导热性、不导电、低摩擦、稳定性较好、与大多数金属不反应的缘故,由此成为微切削领域使用最广泛的一种刀具,单点金刚石切削技术具备加工效率高、加工精度高等诸多优点被广泛应用于光学结构的超精密制造<sup>[23-24]</sup>。本文基于正交切削实验研究镍磷合金因塑性侧流引起的泊松毛刺生成规律及其影响因素,正交切削的加工模型及泊松毛刺如图 1 所示。

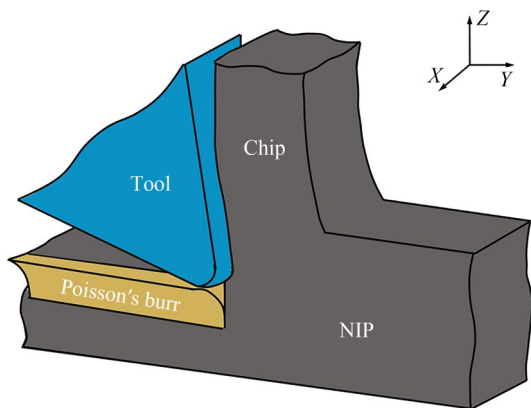


图 1 正交切削及泊松毛刺

Fig. 1 Orthogonal cutting and Poisson's burr

在正交切削过程中,在刀具刚刚切入工件时,由于泊松效应的存在,刀具和材料的挤压会引起材料的塑性侧流,堆积在微沟槽两侧形成毛刺,用于加工微沟槽的金刚石刀具可以类比为划痕测试中使用的压头,而划痕实验主要可以用于研究工件表面附近的材料性能。因此,在正交切削过程中,为了分析泊松毛刺生成原因,可以基于划痕实验分析正交切削过程中的表面变形,划痕实验的表面变形主要取决于材料的流变学,刀具和工件交界面的摩擦力以及刀具的几何形状。

为了研究泊松毛刺的生成,需要假设毛刺的高度等于塑性变形的高度,以及在切削过程中只存在塑性变形没有工件材料的相变。在正交切削过程中,刀具刚进入切削区域时,金刚石刀具沿着切削方向挤压工件,当材料的流动应力等于剪切屈服强度时,工件开始发生塑性侧流,工件材料沿着最小阻力方向流动,当流动应力大于屈服强度时,将会堆积在微沟槽两侧,形成泊松毛刺,其形成示意图如图 2 所示。Jardret 等<sup>[25]</sup>通过 Berkovich 压头进行了划痕实验,研究了塑性侧流和切削深度的关系:

$$\frac{h_a}{h_d} = k_1 \ln x - k_2, \quad (1)$$

其中: $h_a$ 为塑性侧流引起的材料堆高(Pile up)和切削深度之和, $h_a = h_d + h_p$ , $h_d$ 为正交切削的名义切削厚度, $h_p$ 为正交切削过程中产生的毛刺的高度,本文中关于长度宽度等尺寸单位均为  $\mu\text{m}$ 。 $x$ 为划痕实验中材料的流变系数,表示由压头引起的塑性应变和弹性应变之比, $k_1, k_2$ 为无量纲系

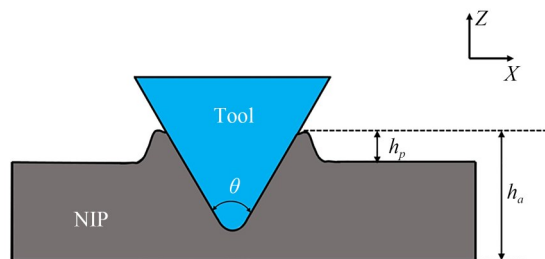


图 2 镍磷合金正交切削塑性侧流原理

Fig. 2 Plastic side flow principle in orthogonal cutting of nickel-phosphorus alloy

数,由超精密切削实验进行标定。因此,毛刺高度与切削深度之比与  $\ln x$  成正比。Bucaille 等<sup>[26]</sup>通过划痕实验研究弹性恢复,测定流变系数( $x$ )与弹性模量( $E$ )等的关系为:

$$x = \frac{E \cot \frac{\theta}{2}}{\sigma_y}, \quad (2)$$

其中: $\theta$ 代表刀具圆弧角度, $\sigma_y$ 代表流动应力,本文公式中的应力单位均为 pa,流动应力在塑性应变状态下近似为剪切面上的正应力。

在正交切削过程中,弹性应变对毛刺生成的影响较小,因此在研究毛刺生成过程中忽略弹性应变,只考虑塑性应变,当剪切区的正应力大于屈服应力,即  $\sigma_y > \sigma_e$  时,才会发生塑性流动,形成泊松毛刺,而当剪切区的正应力小于屈服应力,即  $\sigma_y < \sigma_e$  时,则不会发生塑性流动,即不形成毛刺或生成很小的毛刺。由公式(2)可知,流变系数与刀具、材料以及切削工艺皆有关系。该模型接近弹塑性材料的流变学,没有应变率依赖性,塑性部分的变形基于 von Mises 屈服准则和流动规则。

因此,为了得到泊松毛刺的高度,需要计算剪切面上的正应力,而在正交切削中,由剪切区域的力系平衡可知,剪切面上的正应力( $\bar{\sigma}$ )和剪切面上的剪切应力( $\bar{\tau}$ )的关系为:

$$\bar{\sigma} = \bar{\tau} \tan(\varphi + \beta - \gamma), \quad (3)$$

其中: $\varphi$ 为剪切角, $\gamma$ 为刀具等效前角, $\beta$ 为摩擦角,因此,为了得到剪切面上的正应力,需要获得剪切面上的剪切应力,在正交切削中,剪切面上的剪切应力和主切削力( $F_c$ )以及吃刀抗力( $F_t$ )的关系为:

$$\begin{cases} F_c = \frac{\bar{\tau} \cos(\beta - \gamma) h_d w}{\cos(\beta + \varphi - \gamma) \sin \alpha} \\ F_t = \frac{\bar{\tau} \sin(\beta - \gamma) h_d w}{\cos(\beta + \varphi - \gamma) \sin \alpha} \end{cases}, \quad (4)$$

其中:主切削力  $F_c$  以及吃刀抗力  $F_t$  的单位均为

$$\begin{cases} P_c = \frac{\bar{\tau} w R_p}{\sin \eta} [\cos(2\eta) \cos(\varphi - \gamma + \eta) + (1 + 2\theta_p + 2\gamma + \sin(2\eta) \sin(\varphi - \gamma + \eta))] \\ P_t = \frac{\bar{\tau} w R_p}{\sin \eta} [-\cos(2\eta) \sin(\varphi - \gamma + \eta) + (1 + 2\theta_p + 2\gamma + \sin(2\eta) \cos(\varphi - \gamma + \eta))] \end{cases}, \quad (7)$$

N,本文中力的单位均为 N, $w$ 为切削宽度,然而,以上预测公式是基于传统切削,也就是以刀具完全锋利为前提,在超精密正交切削中,刀具的切削刃半径与切削深度的比值较大,无法忽略切削刃半径对切削特性的影响,在刀具切削刃的影响下,一方面有效切削厚度与名义切削厚度不同,另一方面在切削刃的影响下将产生犁耕效应,因此必须对切削力和剪切角的关系进行修正。如图3所示,切削面以下部分被切削刃挤压变形,经过几何分析,被挤压变形的厚度( $u$ )数值为:

$$u = r_e (1 - \sin(\varphi - \gamma)), \quad (5)$$

其中, $r_e$ 为切削刃半径,因此有效切削厚度  $h_t = h_d - u$ ,令  $\chi = \varphi + \beta - \gamma$ ,主切削力与剪切应力的关系可修正为:

$$F_c = \frac{\bar{\tau} \cos(\beta - \gamma) [h_d - r_e + r_e \sin(\varphi - \gamma)] w}{\cos(\chi) \sin \varphi}. \quad (6)$$

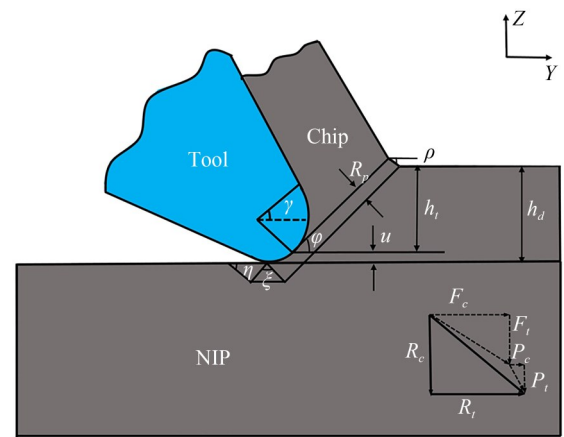


图3 考虑切削刃半径的正交切削滑移线场模型

Fig. 3 Orthogonal cutting slip line field model considering cutting edge radius

对于犁耕力,根据如图3的滑移线场模型,犁耕力可以通过 Waldorf<sup>[27]</sup>的分析确定如下:





松毛刺宽度为:

$$B=\frac{W\cdot(r_{\epsilon}(1-\cos(\varphi+\beta-\gamma))-h_n)}{h_p}.$$
 (14)

由实验观测可知,镍磷合金金刚石正交切削过程中产生的泊松毛刺截面形状可近似为一个三角形,因此,假设泊松毛刺在不同截面的高度和宽度恒定,在得到泊松毛刺的高度及宽度后,可以通过高度与宽度的预测模型,预测截面的毛刺面积以及在一定切削长度( $L_p$ )下单侧泊松毛刺的体积,其体积公式为:

$$V_p=\frac{1}{2}B_ph_pL_p.$$
 (15)

3 实验设备与实验设计

3.1 实验设计

为了研究镍磷合金泊松毛刺生成的影响因素及其尺寸预测,在超精密自由曲面加工机床(Moore Nanotech 350UPL)采用金刚石刀具(表 1)进行镍磷合金的正交切削实验,分析不同的加工参数对镍磷合金金刚石正交切削过程中毛刺生成尺寸大小的影响,包括切削深度和切削速度,具体加工参数如表 2 所示。正交切削过程中,金刚石刀具沿着 Y-轴进行切削,Z-轴控制进给深度,如图 5 所示。利用刀具 A 进行正交切削实验前的超精密车削,利用刀具 B 进行正交切削实验,表 1 为 A,B 两把刀具基本参数。

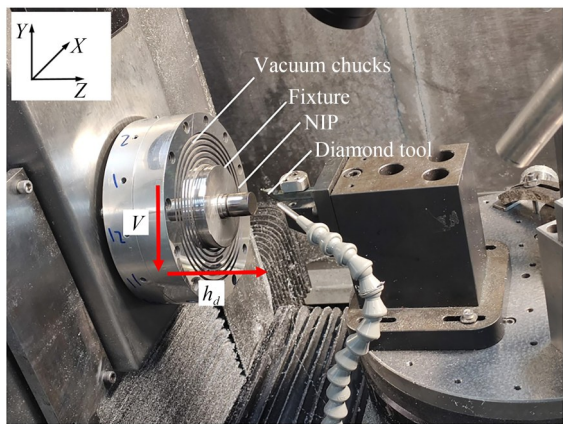


图 5 超精密自由曲面加工机床及镍磷合金正交切削  
Fig.5 Ultra-precision free-form surface processing machine tool and orthogonal cutting nickel-phosphorus alloy

表 1 刀具几何参数

Tab. 1 Cutting tool geometric parameters

Tool	A	B
Nose radius/mm	2.512 2	0.059
Edge radius/mm	54.419	97.743
Rake angle/(°)	0	0
Clearance angle/(°)	10	10

表 2 实验切削参数选择

Tab. 2 Experimental cutting parameters

Experiment No.	Cutting depth $h_d/\mu\text{m}$	Cutting speed $V/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
1	3	200
2	4	200
3	5	200
4	6	200
5	7	200
6	8	200
7	9	100
8	9	200
9	9	300
10	9	400
11	9	500
12	9	600
13	9	700
14	9	800

正交切削过程中利用 Kistler 品牌的力测量仪(力传感器型号为 9256C,信号采集及处理仪型号 5080)记录超精密切削力的变化过程(图 6 (a)和图 7 所示),加工后的工件由 Bruker GT-X 白光干涉仪检测其所加工的沟槽表面形貌(如图 6(b)和图 8 所示),用以评价毛刺的高度与宽度。

3.2 实验结果

在完成镍磷合金的切削实验后,由 Bruker GT-X 白光干涉仪对微沟槽的表面形貌进行测量,不同深度的切削力信号和毛刺形貌如图 7 和图 8 所示(彩图见期刊电子版),图 7 中红色曲线

代表所测得的主切削力,蓝色曲线代表所测得的吃刀抗力,图8展示了不同深度的毛刺形状。将白光测得的毛刺形貌作图9处理,可得到泊松毛刺的实验高度和宽度,如图9(a)和图9(b)所示,通过提取侧面数据可得到一组毛刺高度以及宽度,然而,如图9(c)和图9(d)所示,毛刺高度在不同Y轴截面有一定波动,因此通过Y轴等间距截取一个横截面,得到Y轴等间距位置

的毛刺高度宽度并作平均,以此减小测量误差,继而得到该切削条件下的毛刺高度及宽度。同时,为了验证模型的准确性,计算其平均相对误差值,设预测数据和实验数据分别为 $y_{\text{pred}}$ 和 $y_{\text{exp}}$ ,则平均相对误差值的计算公式为:

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{\text{exp}}(i) - y_{\text{pred}}(i)|}{y_{\text{exp}}(i)} \times 100\%. \quad (16)$$



(a) Kistler测力仪  
(a) Kistler force measuring instrument



(b) Bruker GT-X白光干涉仪  
(b) Bruker GT-X white light interferometer

图6 超精密测量及检测设备

Fig. 6 Ultra-precision measuring and testing equipment

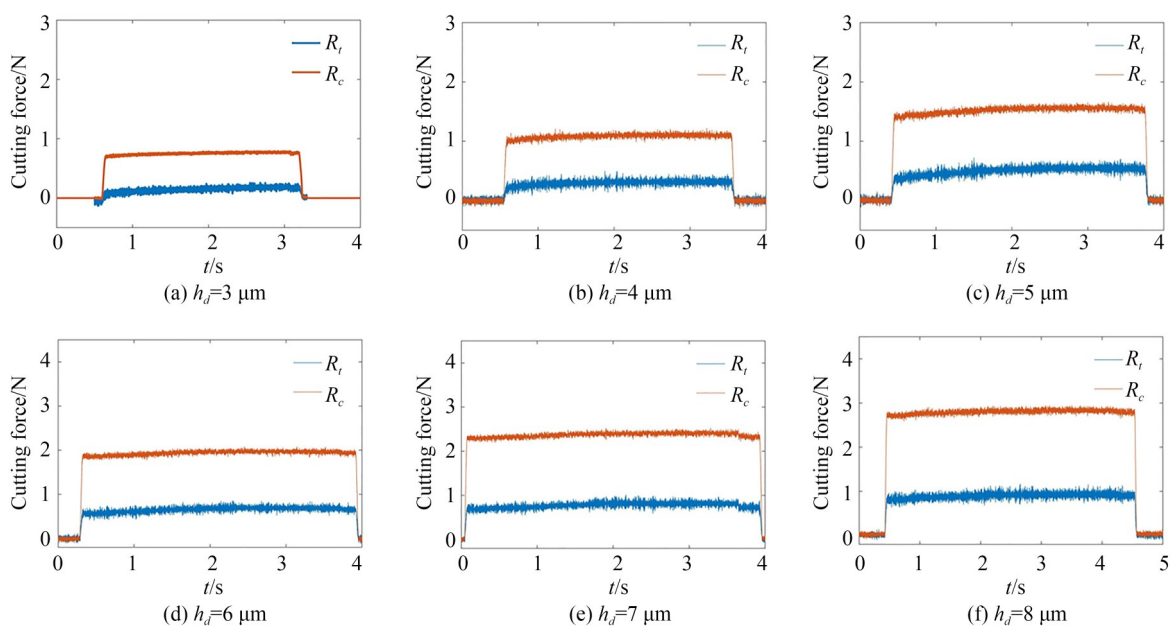


图7 不同切削深度的切削力信号

Fig. 7 Cutting force signals at different cutting depths

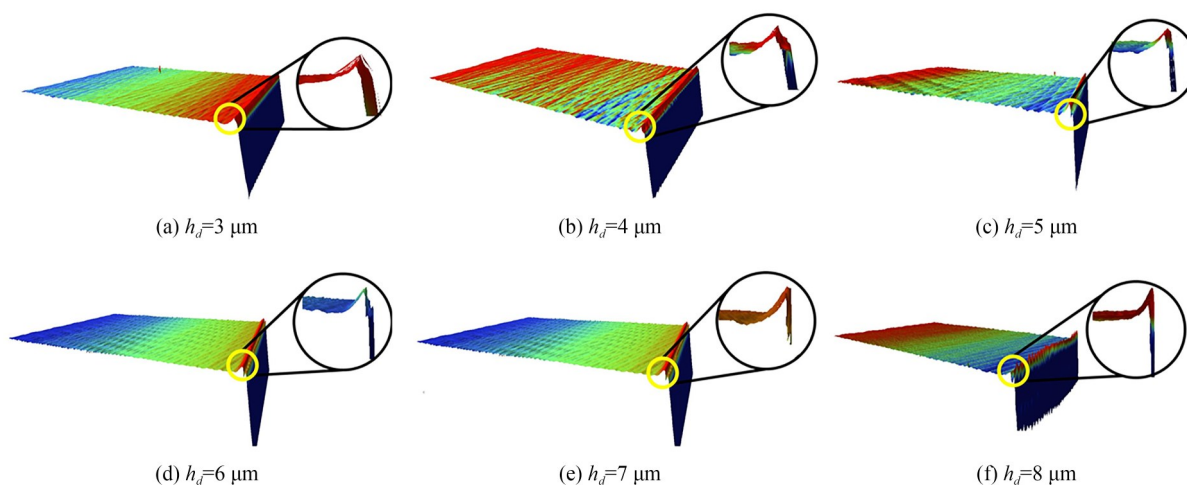
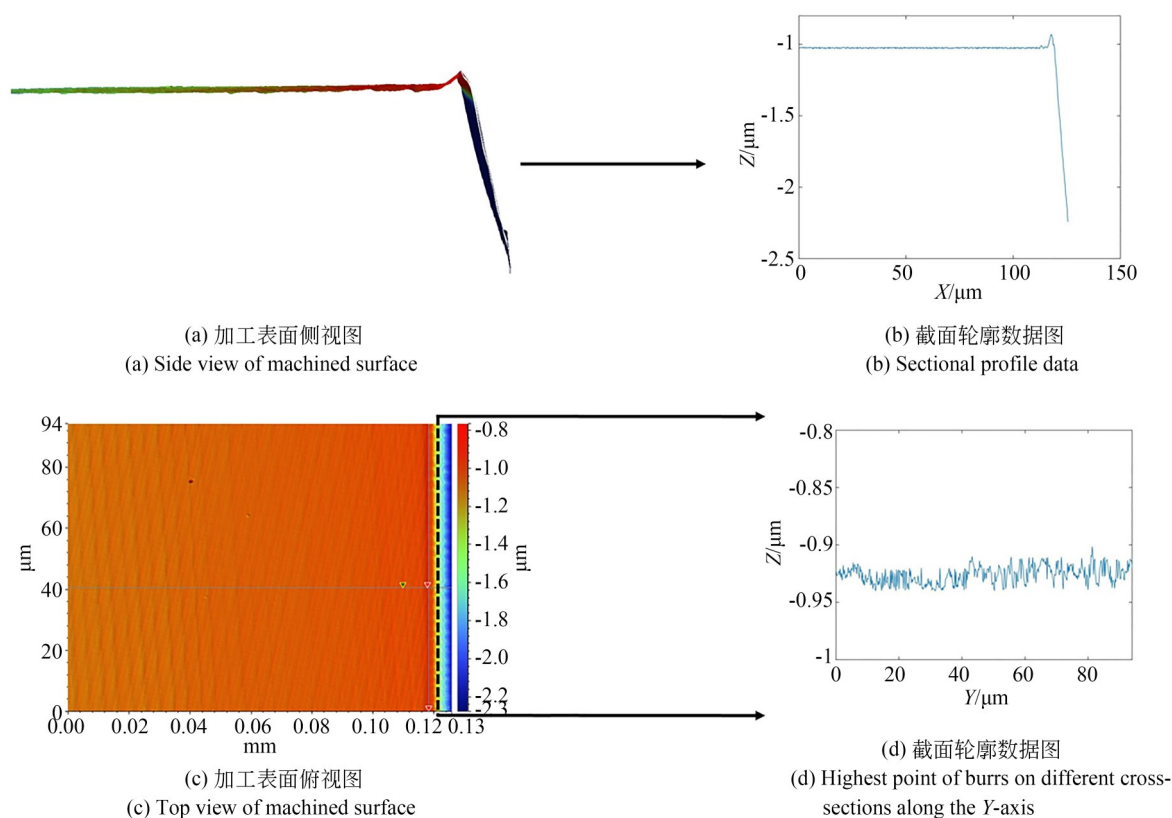


图 8 不同切削深度的毛刺形貌

Fig. 8 Burr morphology at different cutting depths

图 9 泊松毛刺的表征结果 ( $h_d = 3 \mu\text{m}$ ,  $V = 200 \text{mm/min}$ )Fig. 9 Characterization results of Poisson's burr ( $h_d = 3 \mu\text{m}$ ,  $V = 200 \text{mm/min}$ )

### 3.3 实验分析

#### 3.3.1 切削深度对泊松毛刺生成的影响

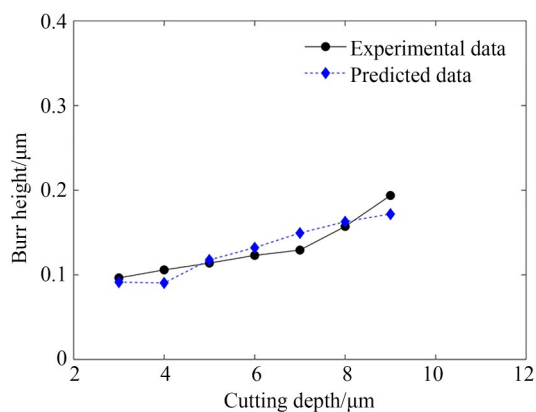
通过将实验测得的不同切削深度的力和毛刺高度代入泊松毛刺的高度预测模型中,可以得

到不同切削深度下的毛刺高度和毛刺宽度的预测数据,同时通过公式(16)计算可得到毛刺高度和宽度预测模型的平均相对误差值分别为 8.93% 和 9.67%,因此毛刺高度和宽度预测模型

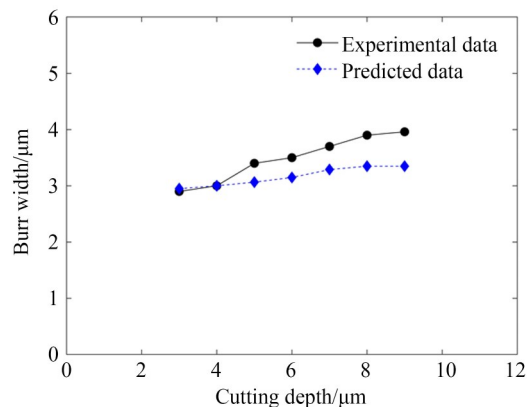


对不同切削深度下毛刺尺寸的预测具有较高的准确性。同时,由高度预测模型可知,随着切削深度的增加,流变系数的值明显增大,塑性流动增大,从而导致泊松毛刺尺寸的增大。如图 10 所示,由实验数据可知,切削深度由  $3\text{ }\mu\text{m}$  增加至

$9\text{ }\mu\text{m}$ ,毛刺高度从  $0.0964\text{ }\mu\text{m}$  增加到  $0.1938\text{ }\mu\text{m}$ ,增长速度呈先慢后快的趋势,毛刺宽度从  $2.9\text{ }\mu\text{m}$  增加至  $3.96\text{ }\mu\text{m}$ ,整体增长速率较为平缓,因此对镍磷合金的正交切削中,适当地减小切削深度可以减小泊松毛刺的形成。



(a) 切削深度对毛刺高度的影响  
(a) Effect of cutting depth on burr height



(b) 切削深度对毛刺宽度的影响  
(b) Effect of cutting depth on burr width

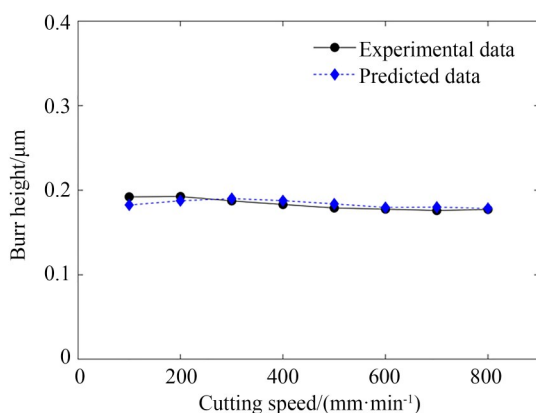
图 10 切削深度对毛刺尺寸的影响

Fig. 10 Effect of cutting depth on burr size

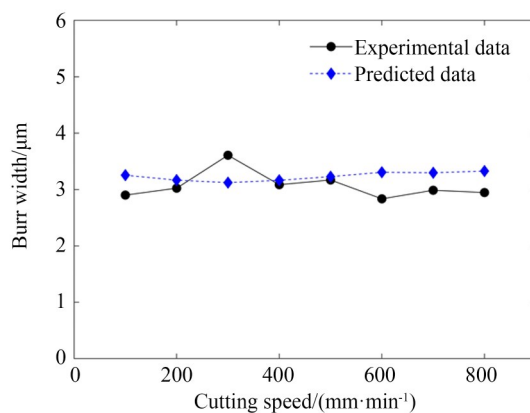
### 3.3.2 切削速度对泊松毛刺生成的影响

与研究切削深度对泊松毛刺的影响类似,通过测量不同切削速度的主切削力和吃刀抗力,可以得到切削速度影响下的泊松毛刺高度与宽度的理论尺寸,同样地,可以得到本组实验中毛刺高度和宽度的预测模型平均相对误差值分别为

2.37% 和 6.86%,结合切削深度实验的预测毛刺高度宽度的平均相对误差值,可以得到整个正交切削实验中毛刺高度及宽度的预测模型平均相对误差值分别为 5.43% 和 8.17%。如图 11 所示,随着切削速度的增加,泊松毛刺的高度和宽度的变化较小,趋于平稳状态,这是因为在正交



(a) 切削速度对毛刺高度的影响  
(a) Effect of cutting speed on burr height



(b) 切削速度对毛刺宽度的影响  
(b) Effect of cutting speed on burr width

图 11 切削速度对毛刺尺寸的影响

Fig. 11 Effect of cutting speed on burr size

切削中,由于材料的去除部分没有进行二次切削、切削里程较短,不会产生较大的摩擦热。通过对切削力的测量可知,切削速度的增加会导致切削力小幅度的下降,这种下降会使得毛刺高度尺寸总体下降,切削速度由 100 mm/min 增加至 800 mm/min 的过程中,最大毛刺高度和最小毛刺高度相差不超过  $0.02\text{ }\mu\text{m}$ ,总体呈小幅度下降趋势,最大毛刺宽度和最小毛刺宽度相差不超过  $0.3\text{ }\mu\text{m}$ ,但这种下降相对切削深度的影响可以忽略不计,因此切削速度对毛刺生成的影响较小。

### 3.4 正交切削镍磷合金泊松毛刺的表征方法

镍磷合金泊松毛刺的高度直接影响了加工的精度,而其毛刺的宽度则加重了去除毛刺的难度,因此,泊松毛刺的高度和宽度的研究一般是科学界的研究重点。然而,由于加工条件、加工方法和测量条件的限制,泊松毛刺的高度和宽度在整个切削过程中往往并非一直恒定,如图 12(a)所示,因此需要对实验测得的毛刺高度及宽度需要对不同截面进行取平均,这无疑使得实验结果具有一定的误差性,故需要寻求一种新的泊松毛刺表征方法,用以表征泊松毛刺的尺寸大

小,而实验产生的毛刺的体积可以准确表征出泊松毛刺的三维特征,因此提出体积法作为泊松毛刺的表征方法。这需要对正交切削完成后的泊松毛刺的表面特征进行测量,利用微积分体积公式计算不规则几何性质的体积,计算同一条件下的泊松毛刺体积,具体操作如下:

在对镍磷合金泊松毛刺的形成的处理上,采用白光干涉仪采集镍磷合金微沟槽的数据点并导出,并在第三方数据处理软件上进行三维模型的重构,如图 12(a)和图 12(b)为微沟槽和单边泊松毛刺的白光图,图 12(c)和图 12(d)为模型重构图和拉平后的毛刺图形,其中的数据处理过程包括:

- (1)数据过滤:去除导出数据集中的坏点及无用点;
- (2)间距取点:对数据集进行等间距取点,以防止电脑及软件内存溢出;
- (3)模型构建:将剩下的数据点进行网格成面并定量分析泊松毛刺的大小。
- (4)毛刺体积:如图 12(e)所示,将毛刺模型分成  $n \times n$  个几何体,并利用积分法求得泊松毛刺的体积。

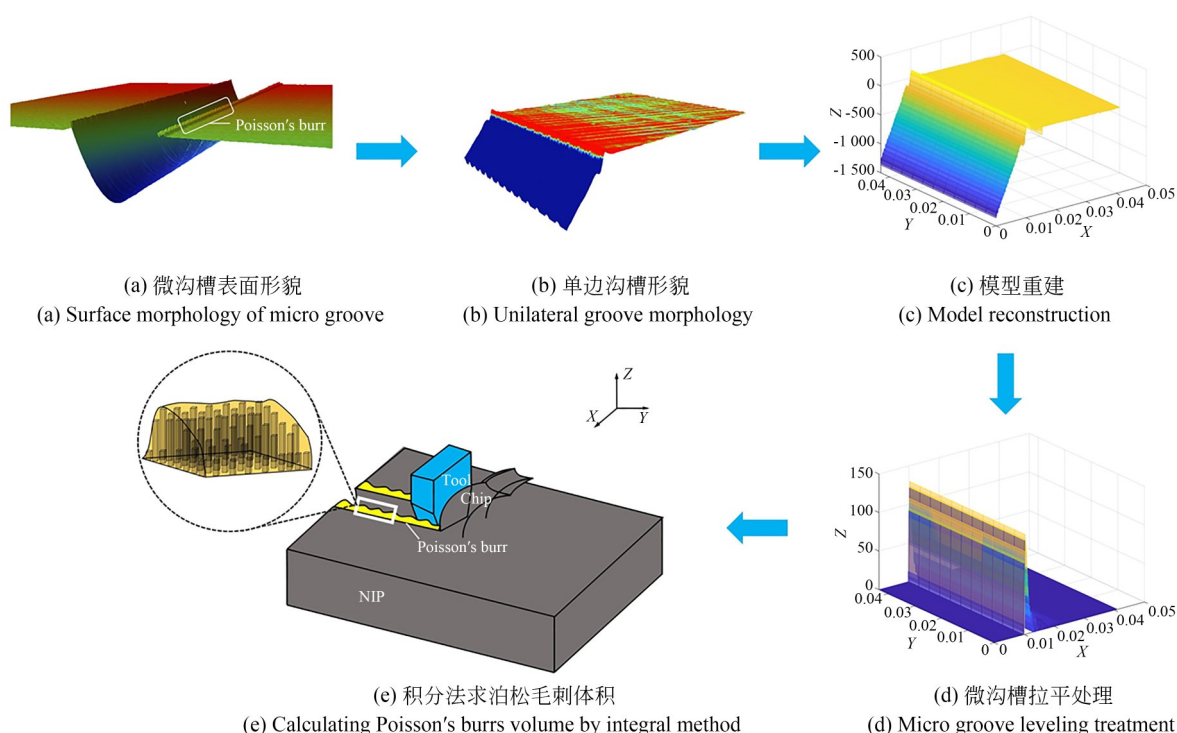


图 12 镍磷合金泊松毛刺体积计算流程

Fig. 12 Calculation process for Poisson's burr volume of nickel-phosphorus alloy

在 3.2 小节中,对切削深度和切削速度对泊松毛刺的影响进行了研究,在数据测量过程中,需要对较多不同截面的高度宽度的数据进行取平均,在实际操作中具有一定的误差性,因此将两组实验利用体积法进行表征可得到如图 13 所示的数据图,由图可知,毛刺体积随着切削深度

的变化速率和趋势均一致,而切削速度对毛刺体积的影响则较小,总体趋于平稳,同样地,通过计算可以得到毛刺体积的预测模型平均相对误差值为 4.81%,通过对比毛刺高度宽度预测模型的平均相对误差值可知,泊松毛刺体积的预测模型准确度相对更高。

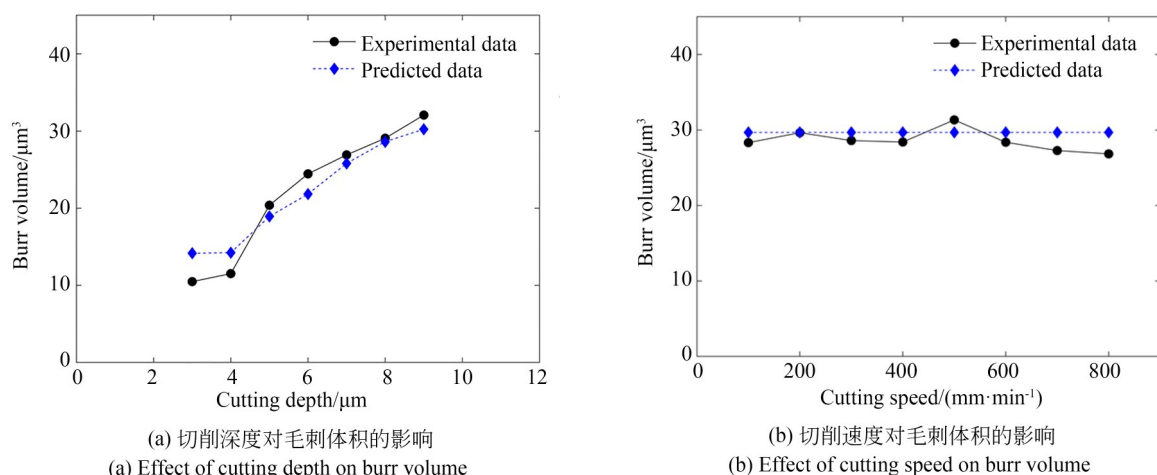


图 13 加工参数对毛刺体积的影响

Fig. 13 Effect of processing parameters on burr volume

## 4 结 论

本文通过理论与实验的方法研究镍磷合金金刚石切削的泊松毛刺问题,建立了镍磷合金超精密金刚石正交切削两侧泊松毛刺高度及宽度的理论模型,并根据泊松毛刺三角形截面的特征预测一定切削长度下单侧泊松毛刺的体积。同时,通过镍磷合金金刚石正交切削实验获得不同切削条件下的毛刺高度和宽度,对比预测数据,毛刺高度、毛刺宽度的平均相对误差值分别为 5.43% 和 8.17%,验证了所建模型的准确性。另一方面,实验结果表明:切削深度的增加会导致镍磷合金的毛刺高度和宽度的增大,而切削速度

对毛刺高度和宽度的影响不显著。当切削深度由 3  $\mu\text{m}$  增加至 9  $\mu\text{m}$  时,毛刺高度从 0.096 4  $\mu\text{m}$  增加至 0.193 8  $\mu\text{m}$ ,毛刺宽度从 2.9  $\mu\text{m}$  增加至 3.96  $\mu\text{m}$ ;而切削速度由 100  $\text{mm}/\text{min}$  增加至 800  $\text{mm}/\text{min}$  时,最大毛刺和最小毛刺的高度差不超过 0.02  $\mu\text{m}$ 、宽度差不超过 0.3  $\mu\text{m}$ 。最后,针对在不同截面上毛刺高度和宽度值波动较大所导致的表征误差问题,本文提出了基于积分法计算泊松毛刺体积的方法,用以表征泊松毛刺的尺寸,并基于毛刺高度和宽度理论模型建立了毛刺体积的预测模型,对比实验结果,毛刺体积预测模型的平均相对误差为 4.81%,证明了泊松毛刺体积的预测模型误差更小、准确度更高。

## 参考文献:

- [1] 王亚茹,李英杰,邹莱,等. RB-SiC 金刚石磨粒柔性刻划材料去除及表面损伤行为[J]. 光学精密工程, 2022, 30(14): 1704-1715.  
WANG Y R, LI Y J, ZOU L, *et al.* Material removal and surface damage behavior of diamond grain

- for flexible scribing RB-SiC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(14): 1704-1715. (in Chinese)
- [2] ZHOU T F, HE Y P, WANG T X, *et al.* A review of the techniques for the mold manufacturing of micro/nanostructures for precision glass molding [J]. *International Journal of Extreme Manufactur-*

- ing, 2021, 3(4): 27-58.
- [3] 陈斌,周聪,谢晋,等. 金刚石刀轮滚压脆断单晶硅和蓝宝石的实验研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(6): 702-710.
- CHEN R, ZHOU C, XIE J, *et al.* Experimental study on rolling and brittle fracture to single crystal silicon and sapphire by diamond cutter wheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(6): 702-710. (in Chinese)
- [4] YAN J W, OOWADA T, ZHOU T F, *et al.* Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(10): 4802-4808.
- [5] ZHOU T F, YAN J W, LIANG Z Q, *et al.* Development of polycrystalline Ni-P mold by heat treatment for glass microgroove forming [J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 25-30.
- [6] ZHOU T F, WANG Z F, RUAN B S, *et al.* Study on the blackening phenomenon of leaded glass during microgroove molding using nickel phosphorous mold [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(8): 10420-10427.
- [7] BRINKSMEIER E, GLÄBE R, SCHÖNEMANN L. Diamond Micro Chiseling of large-scale retroreflective arrays [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(4): 650-657.
- [8] BRINKSMEIER E, SCHÖNEMANN L. Generation of discontinuous microstructures by diamond micro chiseling [J]. *CIRP Annals*, 2014, 63(1): 49-52.
- [9] YU Q, ZHOU T F, JIANG Y G, *et al.* Preparation of graphene-enhanced nickel-phosphorus composite films by ultrasonic-assisted electroless plating [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435: 617-625.
- [10] SCHALLER T, BOHN L, MAYER J, *et al.* Microstructure grooves with a width of less than 50  $\mu\text{m}$  cut with ground hard metal micro end Mills [J]. *Precision Engineering*, 1999, 23(4): 229-235.
- [11] FANG F Z, LIU Y C. On minimum exit-burr in micro cutting [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14(7): 984-988.
- [12] 王之岳,陈灶灶,朱利民,等. 微透镜阵列单点金刚石车削补偿技术[J]. 光学精密工程, 2022, 30(7): 813-820.
- WANG Z Y, CHEN Z Z, ZHU L M, *et al.* Single point diamond turning and compensation for micro-lens array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(7): 813-820. (in Chinese)
- [13] LIU Y, ZHAO W X, ZHOU T F, *et al.* Microgroove machining on crystalline nickel phosphide plating by single-point diamond cutting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(1): 477-484.
- [14] YU Q, ZHOU T F, HE Y P, *et al.* Effects of relative tool sharpness on surface generation mechanism of precision turning of electroless nickel-phosphorus coating [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(7): 3113-3121.
- [15] YU Q, ZHOU T F, HE Y P, *et al.* Annealed high-phosphorus electroless Ni-P coatings for producing molds for precision glass molding [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 262: 124297.
- [16] DONG X B, ZHOU T F, PANG S Q, *et al.* Comparison of fly cutting and transverse planing for micropylar array machining on nickel phosphorus plating [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(5): 2481-2489.
- [17] DONG X B, ZHOU T F, PANG S Q, *et al.* Mechanism of burr accumulation and fracture pit formation in ultraprecision microgroove fly cutting of crystalline nickel phosphorus [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(12): 125008.
- [18] LIU X, ZHOU T F, PANG S Q, *et al.* Burr formation mechanism of ultraprecision cutting for microgrooves on nickel phosphide in consideration of the diamond tool edge radius [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9): 3929-3935.
- [19] BAO X Y, YAO P, XU J M, *et al.* Correction to: effect of tool geometry and cutting parameters on surface quality and chip morphology of amorphous electroless nickel-phosphorus alloy in ultraprecision turning [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(5): 2479.
- [20] ZHAO Q L, CHEN J Y, LUO J. Analysis of the swelling effect in single-point diamond turning [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314/315/316: 984-987.
- [21] HE Y P, ZHOU T F, KUMAR A S, *et al.* Study on the non-free plastic shear removal of mate-



- rial and cutting-induced deformation of micron-sub-micron grooves [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317: 117999.
- [22] KOBAYASHI R, XU S L, SHIMADA K, *et al.* Defining the effects of cutting parameters on burr formation and minimization in ultra-precision grooving of amorphous alloy [J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 115-121.
- [23] 陈肖, 柯金洋, 余中迪, 等. 单晶硅激光辅助超精密切削工艺优化与表面特性 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(1): 99-108.
- CHEN X, KE J Y, SHE Z D, *et al.* Optimization of process parameters and surface characteristics in laser-assisted ultra-precision cutting of monocrystalline silicon [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(1): 99-108. (in Chinese)
- [24] 宋满仓, 张建磊, 于超, 等. 聚晶金刚石复合片的电火花线切割精密加工试验 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1303.
- SONG M C, ZHANG J L, YU C, *et al.* Experiment of WEDM precision machining for polycrystalline diamond compact [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1303. (in Chinese)
- [25] JARDRET V, ZAHOUANI H, LOUBET J, *et al.* Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test [J]. *Wear*, 1998, 218(1): 8-14.
- [26] BUCAILLE J L, FELDER E, HOCHSTETTER G. Mechanical analysis of the scratch test on elastic and perfectly plastic materials with the three-dimensional finite element modeling [J]. *Wear*, 2001, 249(5/6): 422-432.
- [27] WALDORF D J, DEVOR R E, KAPOOR S G. A slip-line field for ploughing during orthogonal cutting [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1998, 120(4): 693-699.
- [28] MERCHANT M E. Mechanics of the metal cutting process. I. orthogonal cutting and a type 2 chip [J]. *Journal of Applied Physics*, 1945, 16(5): 267-275.
- [29] ZHANG X Q, ARIF M, LIU K, *et al.* A model to predict the critical undeformed chip thickness in vibration-assisted machining of brittle materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 69: 57-66.
- [30] VENKATACHALAM S, LI X P, LIANG S Y. Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(7): 3306-3319.
- [31] LI Z J, FANG F Z, GONG H, *et al.* Review of diamond-cutting ferrous metals [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5): 1717-1731.

## 作者简介:



李晓蓬(1998—),男,广东揭阳人,硕士研究生,2021年于广东工业大学获得学士学位,主要从事超精密镍磷合金切削生成机理的研究。E-mail: 794800685@qq.com

## 通讯作者:



王素娟(1978—),女,江西萍乡人,博士,教授,2001年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2004年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2011年于香港理工大学获得哲学博士学位,省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室核心成员,广东省引进“纳米数控装备及纳米加工技术创新团队”核心成员,中国自然科学基金委通讯评审专家,中国机械工程学会高级会员、中国光学工程学会第一届先进光学制造青年委员会执行秘书长,主要从事超精密加工、先进光学制造基础理论和应用研究。E-mail: grace.wangsj@gdut.edu.cn; grace.wangsj@gmail.com