

文章编号 1004-924X(2023)13-1909-13

光刻胶掩膜材料超光滑表面切削

李秋怡¹, 周天丰^{1,2}, 周 佳¹, 胡君剑³, 赵 斌^{1,2*}

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 401120;

3. 江西联创电子有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 鉴于以光刻胶为代表的高分子材料的切削特性决定了掩膜微细结构的加工质量, 以 SU8 为研究对象, 结合实验和仿真分析研究了光刻胶掩膜的切削特性。通过纳米压痕法测试了光刻胶 SU8 的应力-应变关系, 建立了基于能量法的 SU8 切削仿真模型, 然后采用 AdvantEdge FEM 模拟了不同切削参数下光刻胶 SU8 的切削过程, 最后开展了光刻胶 SU8 的超精密加工实验。结合仿真与实验结果, 分析了切削参数和刀具前角对表面质量的影响规律, 优化了光刻胶 SU8 的切削加工参数。结果表明: 表面粗糙度随着切削速度的增大呈现减小的趋势, 随着进给速度和切削深度的增加呈现增大的趋势; 当切削速度为 2.09 m/s、进给速度为 1 mm/min、切削深度为 2 μm 、刀具前角为 0° 时, 光刻胶掩膜的表面粗糙度 R_a 达到最优为 7.4 nm, 无微裂纹等微观缺陷。基于切削仿真与实验结果对加工参数进行优化, 并在光刻胶 SU8 掩膜上实现了高精度微透镜阵列结构的加工。

关键词: 超精密切削; 掩膜加工; 切削仿真; 光刻胶 SU8; 微透镜阵列

中图分类号: TH145.4; TG519.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233113.1909

Ultra-precision cutting of photoresist mask for ultra-smooth surface

LI Qiuyi¹, ZHOU Tianfeng^{1,2}, ZHOU Jia¹, HU Junjian³, ZHAO Bin^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401120, China;

3. Jiangxi Lianchuang Electronic Technology Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

* Corresponding author, E-mail: bin.zhao@bit.edu.cn

Abstract: The cutting characteristics of the polymer determine the processing quality of the microstructure. Considering photoresist SU8 as the representative polymer in this research, the cutting characteristics of the photoresist mask were studied through experimental analysis and simulations. The stress-strain relationship of SU8 was analyzed via the nanoindentation method, and a cutting simulation model of SU8 based on the energy method was established. Next, the cutting characteristics of SU8 under different cutting parameters were simulated using AdvantEdge FEM. Finally, an experiment involving ultra-precision machining of SU8 was performed. According to the simulation and test results, the effects of the cutting parameters and tool rake angle on the surface quality were analyzed, and the cutting parameters of SU8

收稿日期: 2023-01-29; **修订日期:** 2023-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51875043); 国家自然科学基金青年项目 (No. 52205441); 重庆市自然科学基金面上项目 (No. 2022NSCQ-MSX3775)

were optimized. The results demonstrate that the surface roughness decreases with an increase in the cutting speed and increases with the feed rate and depth of cut. Within the scope of the experimental conditions, when the cutting speed is 2.09 m/s, the feed speed is 1 mm/min, the depth of cut is 2 μm , and the tool rake angle is 0°; the surface roughness R_a of the photoresist reaches the optimum value of 7.4 nm, and there are no microfractures. Finally, according to the test and simulation results, the processing parameters were optimized, and a microlens array mask structure was fabricated on SU8 with high precision.

Key words: ultra-precision cutting; mask processing; cutting simulation; photoresist SU8; microlens array

1 引言

模压成形法是微透镜阵列加工的主要制造方法之一^[1]。随着微透镜阵列向着面积最大化、单元形状复杂化的方向发展,模具材料也从普通金属材料向着高硬度、高耐磨性的硬脆材料发展^[2-3]。微切削-刻蚀加工能够在硬脆材料上加工微透镜阵列^[4-5],采用单点金刚石车削在聚合物掩膜上切出微透镜阵列^[6],然后采用离子束刻蚀的方法将掩膜形状转移到基底材料上。在此过程中,聚合物掩膜的加工质量对模具结构的质量有很大影响。与传统金属材料不同,聚合物的玻璃转化温度较低,在加工过程中更容易处于软化状态导致更大的变形,需要结合聚合物本身的性能以及加工参数进行分析。

聚合物由于制备参数不同,机械性能有很大的差异。Yan等^[7]采用动态热机械分析(Dynamic Mechanical Analysis, DMA)测试了光学树脂 PMMA 在不同温度下的力学性能,确定了 PMMA 的存储模量、损耗模量和玻璃转化温度等黏弹性参数。PMMA 的玻璃转化温度为 116 °C,在微切削过程中,PMMA 处于玻璃态和黏弹态,在玻璃态下的表面粗糙度更好。Chung等^[8]采用单轴拉伸实验,获得 SU8 在一定温度范围内杨氏模量和泊松比随应变率的函数关系,研究了温度对 SU8 黏弹性的影响。然而,DMA 和单轴拉伸实验对试样的要求较高,对于涂覆在基底上仅有几十微米厚的聚合物薄膜,不能消除基底效应的影响,难以获得准确结果。聚合物的性质特殊,在不同温度下表现出不同的力学性能,因此切削温度的测量尤为重要。Smith等^[9]利用 Boothroyd^[10]模型对不同条件下的切削温度进行了预测,他认

为聚合物在玻璃转化温度附近有很好的延展性,此时切削容易得到更好的表面质量,并进行了金刚石切削 PS, PMMA, PC 实验验证。Yan等^[11]利用热成像系统测量了车削 SU8/金复合材料时的切削温度,通过改善工艺参数提高了该复合材料端面车削的表面粗糙度。然而,采用数值方法计算切削温度模型复杂,计算困难,热成像系统难以用于微纳加工中切削温度的测量。

在进行切削实验时,Kobayashi^[12]研究了 PMMA, PC, PP 和 HDPE 的加工,总结了进给量和切削速度对材料表面粗糙度的影响,但是由于切削速度低、切削力较小,温度始终在玻璃转化点以下,没有讨论温度导致材料状态改变对聚合物切削的影响。Jagtap等^[13]研究了单点金刚石车削加工参数对 PMMA 表面特性,特别是表面平整度的影响,结果表明,主轴转速对表面平整度的影响较大。以上研究都只考虑了工艺参数对表面质量的影响,没有考虑聚合物本身的性质,获得的最终表面会有裂纹和微孔等微观缺陷,这些缺陷可能与切削时的温度有关。针对切削温度,Xiao^[14]等评估了典型热塑性和热固性聚合物的可加工性,并探究其黏性对表面完整性、切屑形成和切削力的影响。特别讨论了加工过程中应变率和温度之间的相互作用关系。结果表明,聚合物的黏性变形对加工的表面质量起决定性作用。为了尽量减少表面粗糙度,必须选择合适的加工条件,使材料在切削时不发生塑性剥离和脆性开裂。最佳加工条件必须基于聚合物本身的特性,如玻璃转化温度(T_g)、断裂韧性和分子迁移率。对高密度聚乙烯(HDPE)和低密度聚乙烯(LDPE)进行切削实验验证,Carr^[15]认为聚合物的黏弹性对最终的表面粗糙度起着决定性

的作用,而黏弹性取决于时间和温度,改变工艺参数可以改变切削机理,使材料从脆性断裂转变为塑性去除,还研究了分子量对加工表面粗糙度的影响,结果表明,分子量越高表面粗糙度越高。Kamada^[16]对 PP 和 PP-CeNF 进行了切削对比实验,通过观察表面形貌、切屑形貌、切削力和切削温度研究 CeNF 对材料去除的影响。结果表明,PP 的表面缺陷主要为表面撕裂,PP-CeNF 的表面缺陷主要为表面撕裂与微孔。表面撕裂随切削速度的增大而增大,微孔的产生受切削速度的影响不大而与进给速度相关。当进给量减小到 5 μm/r 时,表面粗糙度约为 10 nm。Yan 等^[11]对光刻胶/金复合材料进行了超精密切削实验,结果表明在高速切削下,切削温度的升高导致材料软化,附着在前刀面上导致边缘形成毛刺;切削后,光刻胶收缩硬化,拉应力导致表面微裂纹的产生。

虽然针对聚合物的力学性能及切削性能已经有了一定研究,但是大多数研究只考虑加工参数与表面粗糙度的关系,并没有结合聚合物的性能进行分析,因为聚合物的性能差别较大,对于 SU8 的切削特性分析较少。在测试聚合物的机械性能时,本文采用纳米压痕实验测量 SU8 的载荷位移曲线,得到应力-应变曲线与杨氏模量,采用差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)测量 SU8 的玻璃转化温度 T_g 。采用仿真分析切削时的温度,建立 SU8 仿真模型,研究 SU8 在不同切削条件下的切削温度。最后,进行了金刚石端面切削实验,对切削力信号进行测量。结合切削温度、切削力与切削后表面微观形貌分析 SU8 切削特性。

2 原 理

2.1 光刻胶掩膜制备工艺

光刻胶材料为 SU8(瑞士, Gersteltec Sarl, GM1060),是一种负性、环氧树脂型光刻胶,在刻蚀过程中有良好的图案转移能力,因此常用作掩膜材料。通过旋涂法在基底材料表面制备掩膜材料,在厚度为 1.5 mm,直径为 5.08 cm(两英寸)的硅基底表面旋涂 SU8,其最大旋涂厚度可达 50 μm^[17]。掩膜制备流程如下:在光刻胶旋涂

前,将硅基底置于等离子体清洗设备(美国, PVA TePla MPS, 310M)中处理,去除表面吸附的杂质,增强基底与光刻胶的结合力;然后,光刻胶依次进行前烘、曝光和后烘等工艺,实现 SU8 光刻胶掩膜的制备,其工艺参数如表 1 所示。

表 1 光刻胶 SU8 薄膜制备的工艺参数
Tab.1 Preparation process parameters of photoresist SU8 film

Process	Process parameter
Plasma clean	100 mL/min O ₂ , 3 min
Spin coating	565 r/min, 40 s
Pre-bake	65 °C, 10 min; 95 °C, 60 min
Exposure	365 nm, 650 mJ/cm ² , 24 s
Post-bake	65 °C, 10 min; 95 °C, 30 min

2.2 光刻胶掩膜材料热机械性能

与传统金属材料不同,热塑性高分子材料的切削特性受温度影响较大,如图 1 所示。热塑性高分子材料的导热系数较低,玻璃态转变温度也较低,在机械切削过程中很容易达到较高的切削温度。当切削速度和切削温度较高时,热塑性高分子材料发生软化,部分材料附着在前刀面上,随前刀面移动,在材料表面形成毛刺;在切削后,热塑性高分子材料会发生收缩和硬化,拉伸应力导致微裂纹,产生加工缺陷,从而影响表面质量^[11,18-19]。

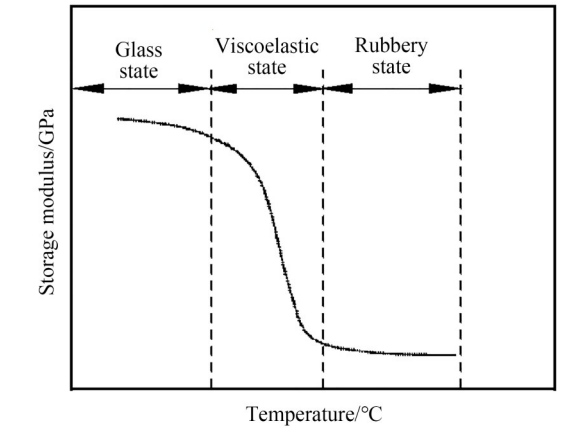


图 1 聚合物材料状态随温度的变化曲线
Fig. 1 Dynamic properties of polymer as function of time

鉴于热塑性高分子材料在不同温度下力学性能显著变化的特点,有必要对光刻胶材料热机械特性进行测试,使用 DSC 对材料的玻璃转化温度进行测试。该实验是在程序控制温度和一定气氛下,测量试样和参比物之间的能量差随温度变化的关系。选用 JY/T 0589.3-2020/热分析方法通则,测量曲线的纵坐标为每克热流率,横坐标为温度,作两次曲线的切线,切线的交点即为玻璃转化温度。在氮气氛围下,实验温度为 $-20\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试结果如图 2 所示,得到玻璃态转变温度 T_g ,SU8 的玻璃态转变温度为 $53.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

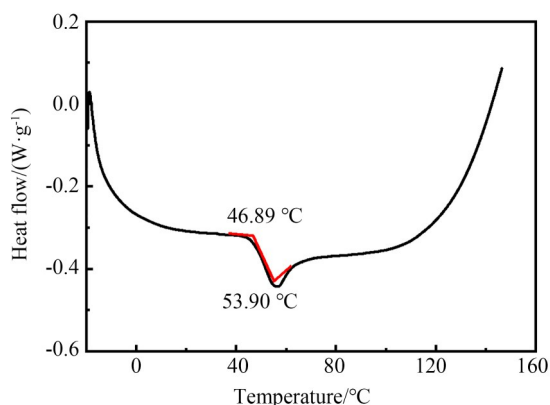


图 2 光刻胶 SU8 的热机械特性测试

Fig. 2 Thermomechanical property test of photoresist SU8

3 仿真模型与实验

3.1 光刻胶掩模材料有限元仿真模型建立

光刻胶 SU8 的超精密切削过程中,切削深度为微米级,与金刚石刀具的切削作用区域较小,难以通过实验测量方法观测切削过程。本文借助有限元仿真方法分析研究光刻胶切削过程中的材料去除特性,采用美国 ThirdWave Systems 公司推出的切削专用仿真软件 Advant Edge FEM 进行车削仿真。加工类型选择微车削。基于能量法的 Power Law 模型可以很好地体现塑性变形、热软化和应变硬化等特性,在超精密加工切削深度微米级时,SU8 有良好的弹塑性,因此选用 Power Law 材料模型^[20],本构模型为:

$$\sigma(\epsilon^p, \dot{\epsilon}, T) = g(\epsilon^p) \Gamma(\dot{\epsilon}) \Theta(T), \quad (1)$$

式中: $\sigma(\epsilon^p, \dot{\epsilon}, T)$ 是材料的流动应力, $g(\epsilon^p)$ 是应变强化函数, $\Gamma(\dot{\epsilon})$ 是应变率效应函数, $\Theta(T)$ 是热软化函数。其中 ϵ^p 是应变, $\dot{\epsilon}$ 是应变率, T 是温度。

仿真模型如图 3 所示, SU8 材料设置为长方形,长 $20\text{ }\mu\text{m}$,宽 $10\text{ }\mu\text{m}$,切削长度为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。选用金刚石刀具,刀具后角 8° ,金刚石刀具设置为刚体。初始切削温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。仿真模型应补充参数为材料的热传导、应变硬化、热软化和应变率强化等。

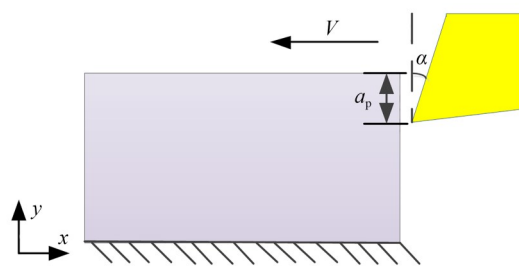


图 3 切削仿真模型

Fig. 3 Simulation model of cutting

光刻胶 SU8 因制备参数不同,物理性质也有所区别^[21],需要先确定 SU8 的基本物理力学性质。光刻胶的热导率、比热、密度等通过查找文献^[8]获得。纳米压痕法属于深度敏感压痕技术,可以测量薄膜的弹性、塑性和硬度等,与其他方法相比,测量范围广。本文所用薄膜材料厚度为微米级,所以选用纳米压痕实验测量薄膜的硬度、杨氏模量、泊松比和应力-应变关系等。通过测量材料在纳米压痕仪压头作用下的最大变形深度及卸载后压痕的回弹程度求出其杨氏模量^[22],被测材料的硬度可由纳米压痕仪直接测得。采用一定的加载速率对压头施加单调增大的载荷至预设的最大值,保载一段时间后再以一定的卸载速率卸载,卸载至载荷最大值的 10% 时保载一段时间,以消除热漂移的影响。实验采用三棱锥形 Berkovich 压头,预设载荷为 60 mN 。

由于最大压痕深度小于薄膜厚度的 $1/10$,可以忽略基底效应的影响^[23]。在加载阶段,载荷-位移曲线可以用抛物线拟合;在卸载阶段,曲线可以用幂指数函数拟合,根据拟合结果得到载荷-位移曲线,如图 4 所示。由载荷-位移曲线可知,完全卸载后,材料没有完全恢复,仍有残余压痕

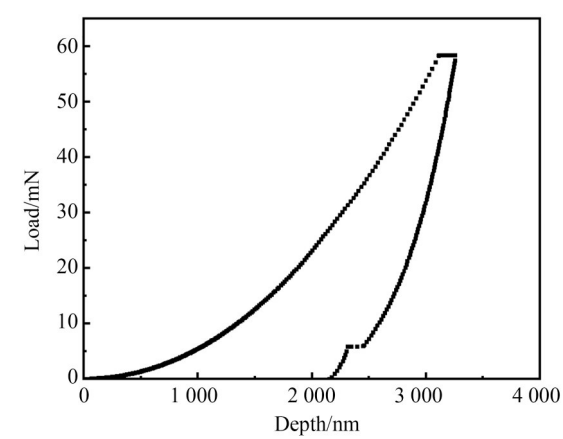


图4 光刻胶SU8载荷-位移曲线
Fig. 4 Load-depth curve of photoresist SU8

深度,说明施加载荷已超过材料的屈服极限,材料先发生一定的弹性变形,应力-应变为线性,然后发生塑性变形,应力-应变为幂指函数。应用量纲分析法得到材料的应变硬化指数和屈服强

度^[24],得到SU8的应力-应变关系为:

$$\sigma = \begin{cases} 4.37\epsilon & (\sigma \leq 59.869 \text{ MPa}) \\ 1.608\epsilon^{0.767} & (\sigma > 59.869 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (2)$$

SU8的应力-应变曲线如图5所示,力学参数如表2所示。

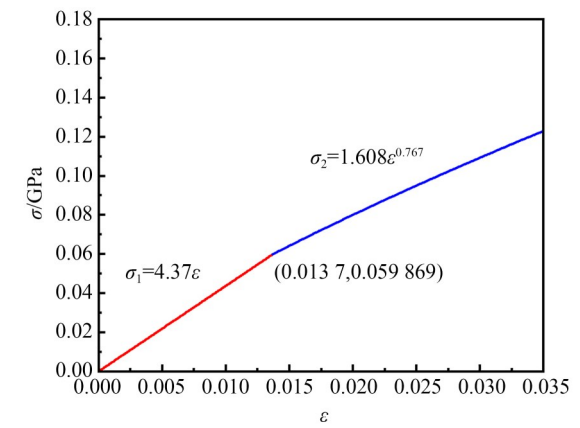


图5 光刻胶SU8的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curve of photoresist SU8

表 2 光刻胶SU8的力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of photoresist SU8

Elastic modulus/GPa	Hardness/GPa	Yield strength/MPa	Strain-hardening exponent	Hardening coefficient
4.37	0.293	59.869	0.767	1.608

3.2 实验设备与实验方案

切削实验在超精密加工中心 Nanoform X (AMETEK Precitech)上进行,机床简图如图6所示,具有X,Z,C,B四轴,可实现SU8端面的超精密车削加工。实验过程中,工件通过真空吸附的方式连接在机床主轴上,刀具安装于B轴上,调节刀架在Y方向上的高度使刀具中心与工件回转中心重合。实验采用端面车削,切削模型如图7所示,工件沿X方向移动,刀具沿Z方向进给,金刚石刀具圆弧半径为0.5 mm,切削参数如表3所示。将工件中心记为原点,工件上任一点到原点的距离记为*l*。切削过程中,使用测力仪(Kistler 9119A)测量切削力信号。

在端面切削中,工件上任一点的切削速度为:

$$v_c = \frac{2\pi l n}{60 \cdot 1000} \quad (3)$$

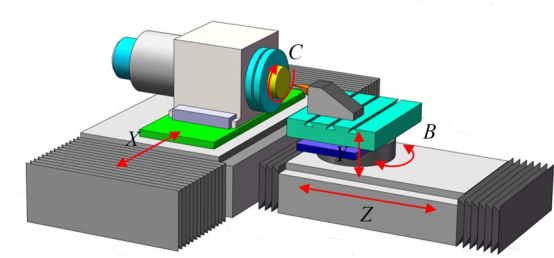


图6 机床运动简图
Fig. 6 Schematic of machine tool movement

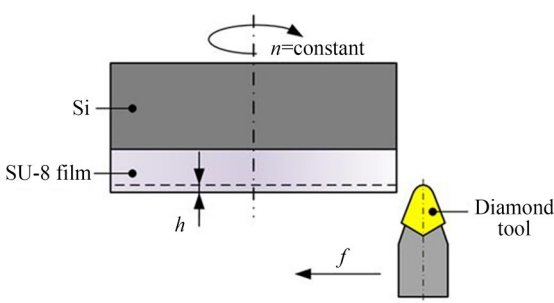


图7 切削实验示意图
Fig. 7 Schematic diagram of face turning

表 3 切削参数
Tab. 3 Cutting parameters

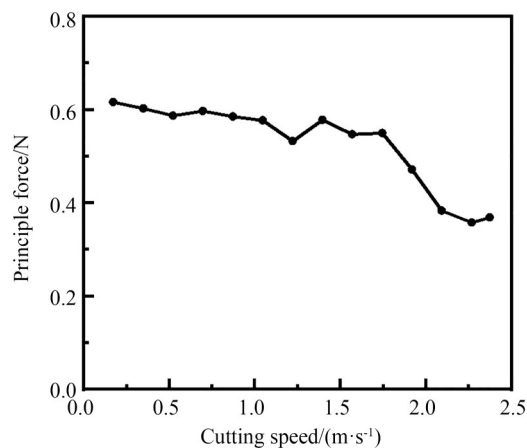
Cutting parameter	Value
Spindle speed $n/(r \cdot \min^{-1})$	1 000
Feed rate $v_f/(mm \cdot \min^{-1})$	1, 5, 10
Depth of cut $a_p/\mu m$	2, 4, 8
Rake angle $\alpha/(\circ)$	0, -25

4 实验结果分析

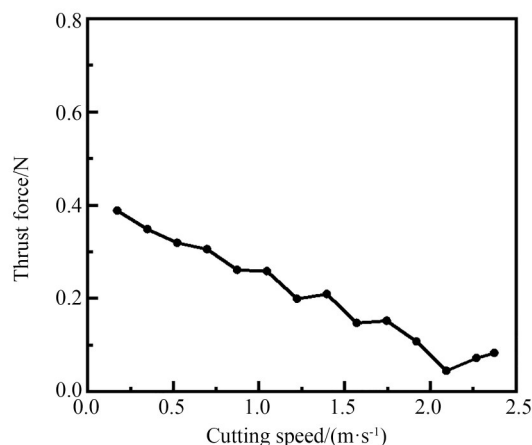
4.1 切削速度对光刻胶掩膜表面质量的影响

在 SU8 端面车削过程中, 由于转速不变, 切削速度随着刀具在工件表面位置的变化而变化: 在工件边缘时切削速度最大, 随着刀具向工件中心移动, 切削速度逐渐降低。为了研究切削速度对表面加工质量的影响, 从工件中心向工件边缘以 2 mm 为间距等距离选取 10 个采样点, 通过白光干涉仪 (Talysurf CCI Lite) 对其表面粗糙度 R_a 进行测量, 结果如图 8 所示。随着切削速度的增大, 表面粗糙度 R_a 逐步减小。对切削力进行分析, 结果如图 9 所示, 随着切削速度的增大, 主切削力和切深抗力逐步降低。为了获得不同切削速度下的切削温度, 对不同切削速度进行仿真分析, 结果如图 10 所示, 随着切削速度的增大, 切削温度逐渐升高。由 DSC 测试结果可知, SU8 的玻璃转化温度为 53.90 $^{\circ}C$, 当切削速度较小时, SU8 仍处于玻璃态, 切削时发生脆性断裂, 切削

力较大, 表面粗糙度 R_a 较大; 当切削速度较大时, SU8 切削温度在玻璃转化温度附近, 材料从玻璃态向黏弹态转变, 材料发生软化, 切削力减小, 也



(a) 主切削力
(a) Principle force



(b) 切深抗力
(b) Thrust force

图 9 切削速度对切削力的影响

Fig. 9 Effects of cutting speed on cutting force

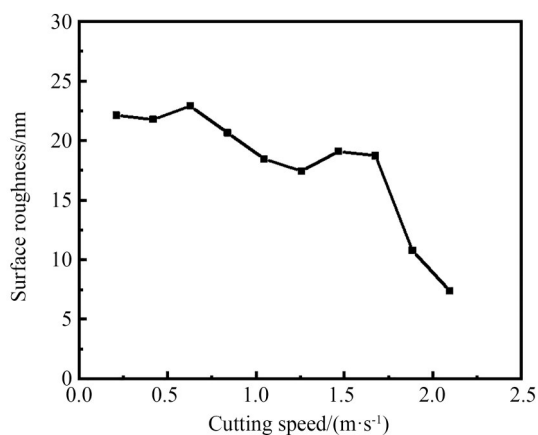
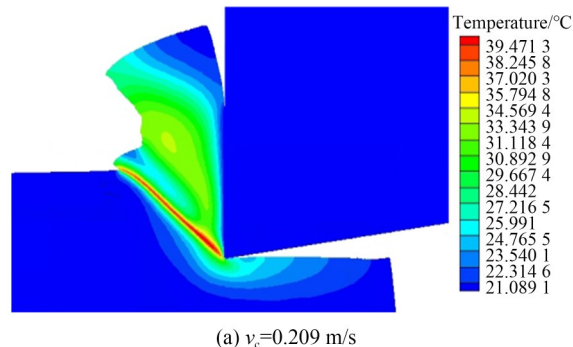


图 8 切削速度对表面质量的影响

Fig. 8 Effect of cutting speed on surface roughness



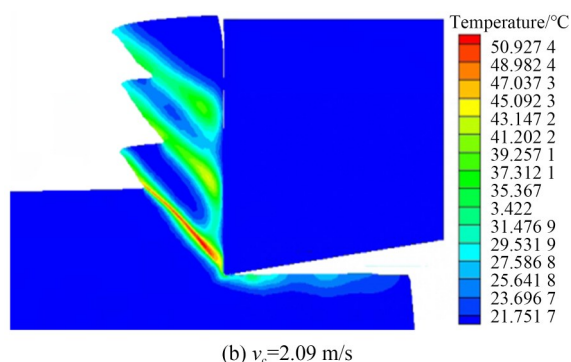
(b) $v_c=2.09$ m/s

图 10 切削速度对切削温度的影响

Fig. 10 Effects of cutting speed on cutting temperature

从脆性去除转变为塑性去除,更容易获得较低的表面粗糙度,因此切削速度越大,切削力越小,表面粗糙度越小。为了进一步研究表面加工质量,通过扫描电镜观测工件中心、工件中部和工件边缘对应不同切削速度的3个区域,测量结果如图11所示。切削速度为0.209 m/s时,表面有大量

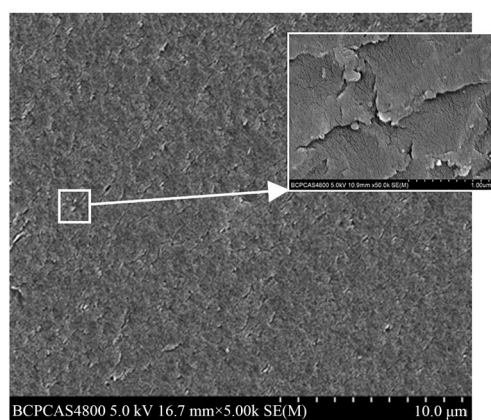
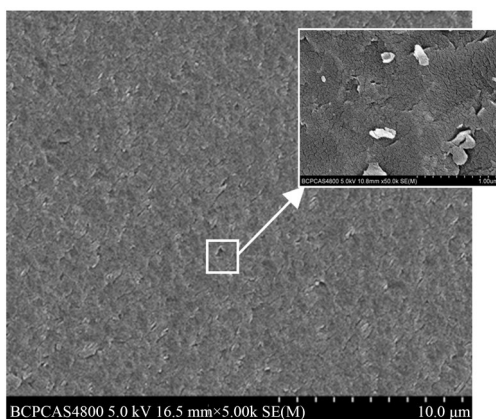
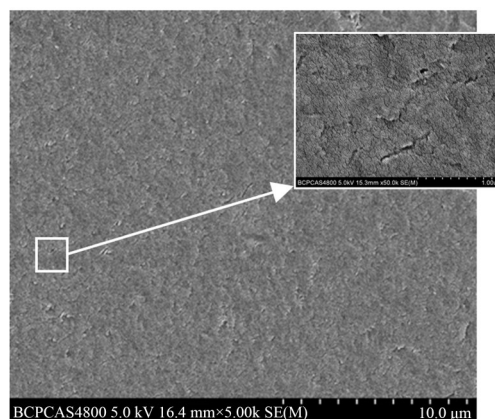
(a) $v_c=0.209$ m/s(b) $v_c=1.047$ m/s(c) $v_c=2.094$ m/s

图 11 不同切削速度下光刻胶 SU8 表面微观形貌电镜图

Fig. 11 SEM micrographs of photoresist SU8 under different cutting speeds

裂纹和凹坑等微观缺陷;切削速度为1.047 m/s时,表面微观缺陷减少但仍有部分缺陷;切削速度为2.094 m/s时,表面微观缺陷明显减少,表面质量最好。

4.2 进给速度对光刻胶掩膜表面质量的影响

为了研究进给速度对表面加工质量的影响,保持其他条件不变,改变进给速度为1,5,10 mm/min进行切削实验,通过白光干涉仪测量表面粗糙度 R_a ,结果如图12所示。当进给速度为5 mm/min与10 mm/min时,表面粗糙度变化不大;当进给速度为1 mm/min时,表面粗糙度较好,在20 nm以下。对切削力进行分析,如图13所示,随着进给速度的增加,主切削力和切深抗力呈现先减少后增加的趋势。随着进给速度增

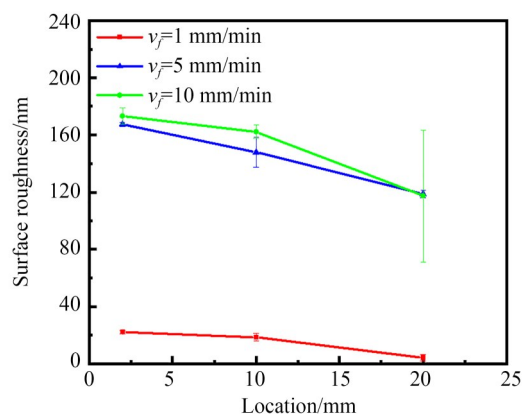
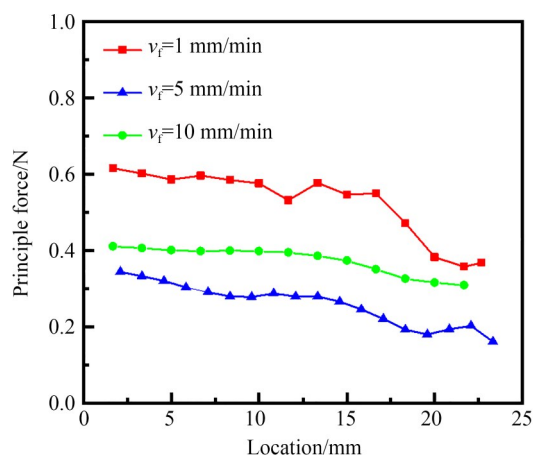
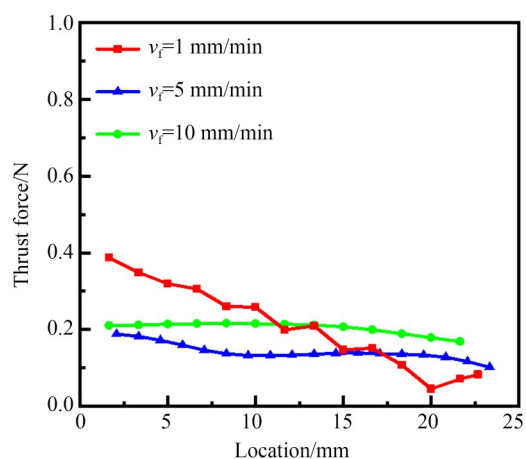


图 12 进给速度对表面质量的影响

Fig. 12 Effect of feed rate on surface roughness



(a) 主切削力
(a) Principle force

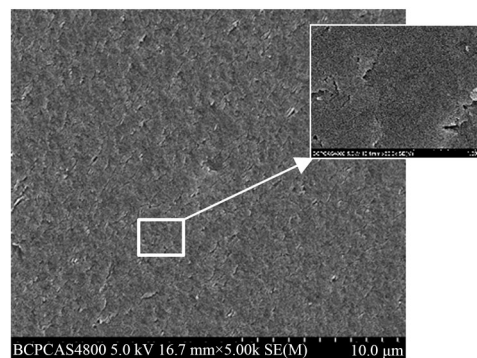


(b) 切深抗力
(b) Thrust force

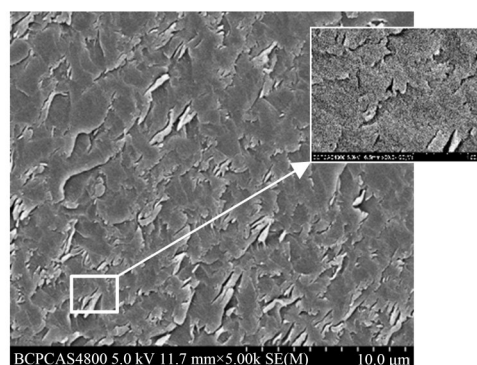
图 13 进给速度对切削力的影响

Fig. 13 Effects of feed rate on cutting force

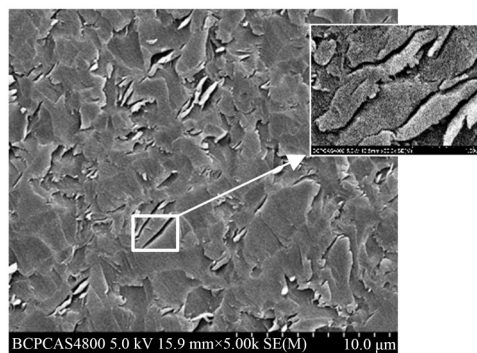
大,切削温度升高,达到玻璃转化温度,光刻胶开始软化,此时切削力变小;当进给速度进一步增大,软化的材料附着在前刀面上随刀具一起移动,使切削力呈现增大的趋势。与传统切削相似,进给速度越大,未变形层厚度越大,表面裂纹越多。随着进给速度的增大,切削力先减少后增加,表面粗糙度变大。为了进一步研究表面加工质量,通过扫描电镜观测不同进给速度下的SU8表面形貌,测量结果如图14所示。进给速度为1 mm/min时,表面较平整,无明显裂纹;进给速度为5 mm/min时,表面有明显裂纹;进给速度为10 mm/min时,表面有大量裂纹和凹坑等微观缺陷。



(a) $v_f = 1$ mm/min



(b) $v_f = 5$ mm/min



(c) $v_f = 10$ mm/min

图 14 不同进给速度下光刻胶SU8表面微观形貌电镜图

Fig. 14 SEM micrographs of photoresist SU8 under different feed rates

4.3 切削深度对光刻胶掩膜表面质量的影响

为了研究切削深度对表面加工质量的影响,保持其他条件不变,在切削深度为2, 4, 8 μm 时进行切削实验,通过白光干涉仪测量表面粗糙度 R_a ,结果如图15所示。当切削深度增加时,表面粗糙度呈现逐步增加的趋势。对切削力进行分析,如图16所示,切削深度的改变对切削力的影响不明显。为了获得不同切削深度下的切

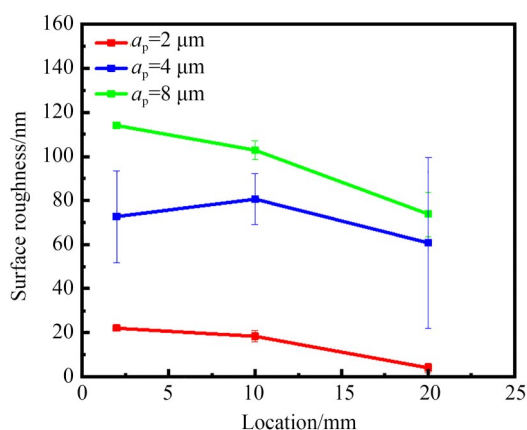


图 15 切削深度对表面质量的影响

Fig. 15 Effect of depth of cut on surface roughness

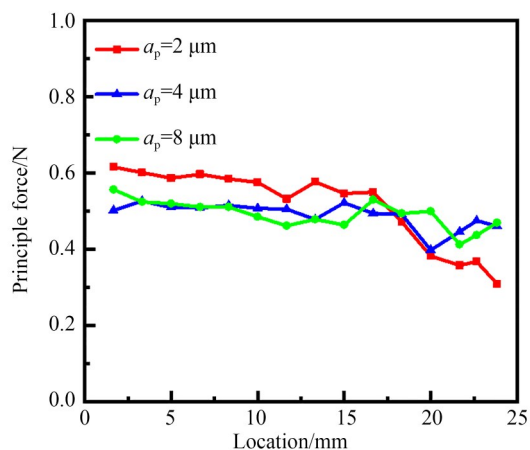
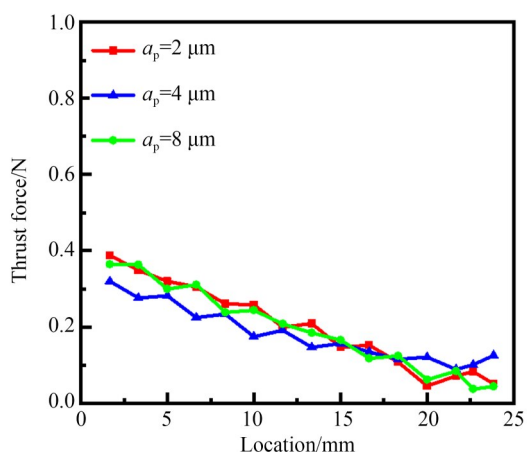
(a) 主切削力
(a) Principle force(b) 切深抗力
(b) Thrust force

图 16 切削深度对切削力的影响

Fig. 16 Effects of depth of cut on cutting force

削温度,对不同切削深度进行仿真分析,结果如图 17 所示。随着切削深度的增加,切削温度呈现上升趋势,当切削深度为 $4 \mu\text{m}$ 时,切削温度过高,材料已超过玻璃转化温度,软化更加明显,向橡胶态转变。切削深度增加,切削温度明显上升,超过玻璃转化温度后材料软化,这也导致切削深度对切削力的影响不大。随着切削深度的增大,获得的表面粗糙度也变大。为了进一步研究表面加工质量,通过扫描电镜选取不同切削深度进行观测,结果如图 18 所示。切削深度为 $2 \mu\text{m}$ 时,表面无明显裂纹与凹坑;切削深度为 $4 \mu\text{m}$ 时,表面有明显裂纹与凹坑;切削深度为 $8 \mu\text{m}$ 时,表面有大量明显的裂纹与凹坑等微观缺陷。当切削深度为 $4 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$ 时,切削温度过高,较高的热应力导致表面微裂纹发生扩张。

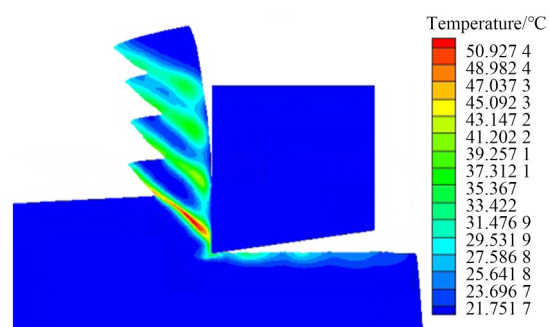
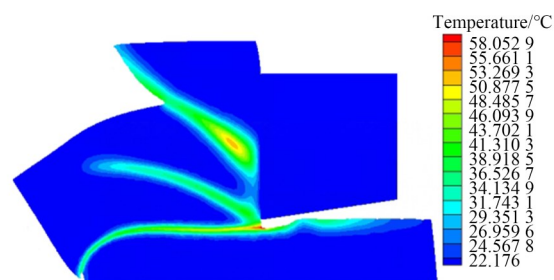
(a) $a_p=2 \mu\text{m}$ (b) $a_p=4 \mu\text{m}$

图 17 切削深度对切削温度的影响

Fig. 17 Effects of depth of cut on cutting temperature

4.4 刀具角度对光刻胶掩膜表面质量的影响

为了研究刀具角度对表面加工质量的影响,保持其他条件不变,刀具前角为 0° 和 -25° 时进行切削实验,通过白光干涉仪测量表面粗糙度 R_a ,结果如图 19 所示。当刀具前角为 -25° 时,与刀

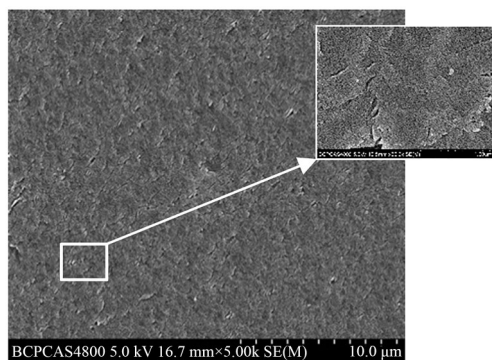
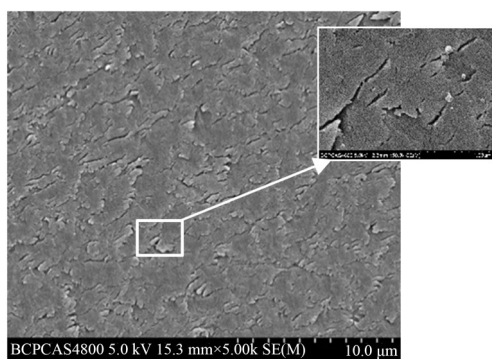
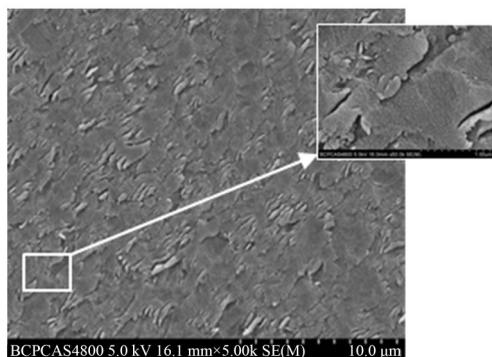
(a) $a_p=2\ \mu\text{m}$ (b) $a_p=4\ \mu\text{m}$ (c) $a_p=8\ \mu\text{m}$

图 18 不同切削深度下光刻胶 SU8 表面微观形貌电镜图
Fig. 18 SEM micrographs of photoresist SU8 under different depths of cutting

具前角为 0° 相比, 表面粗糙度变大。对切削力进行分析, 如图 20 所示, 负前角刀具的切削力比 0° 前角刀具的切削力大。为获得不同刀具角度切削时的切削温度, 对不同刀具角度进行仿真分析, 结果如图 21 所示, 负前角刀具切削时温度略高于 0° 前角刀具。采用负前角刀具切削会造成切削区域较大的切削变形, 不利于产生好的加工质量。负前角的刀具对切削温度的变化影响有

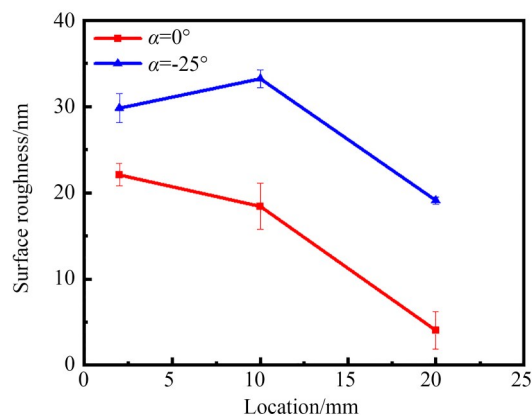


图 19 刀具前角对表面质量的影响

Fig. 19 Effect of rake angle on surface roughness

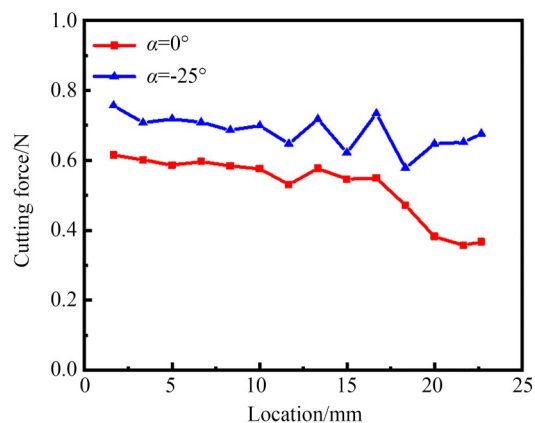
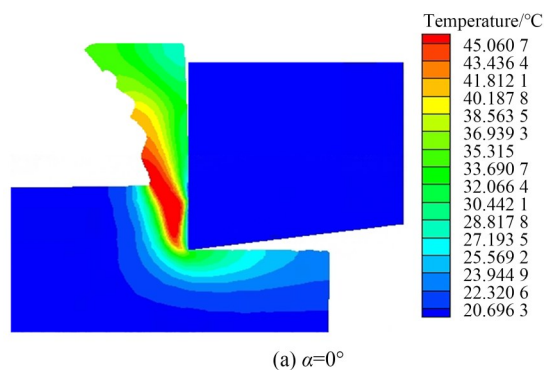


图 20 刀具前角对切削力的影响

Fig. 20 Effect of rake angle on cutting force

限, 但负前角切削时的挤压变形远大于 0° 前角。为了进一步研究表面加工质量, 通过扫描电镜选取不同角度前角加工区域进行观测, 结果如图 22 所示。当前角为 0° 时, 表面裂纹较小; 当前角为 -25° 时, 表面有明显的裂纹与凹坑。

(a) $\alpha=0^\circ$

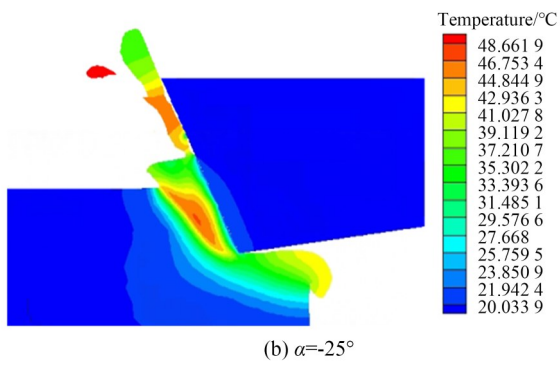


图 21 刀具前角对切削温度的影响
Fig. 21 Effects of depth of cut on cutting temperature

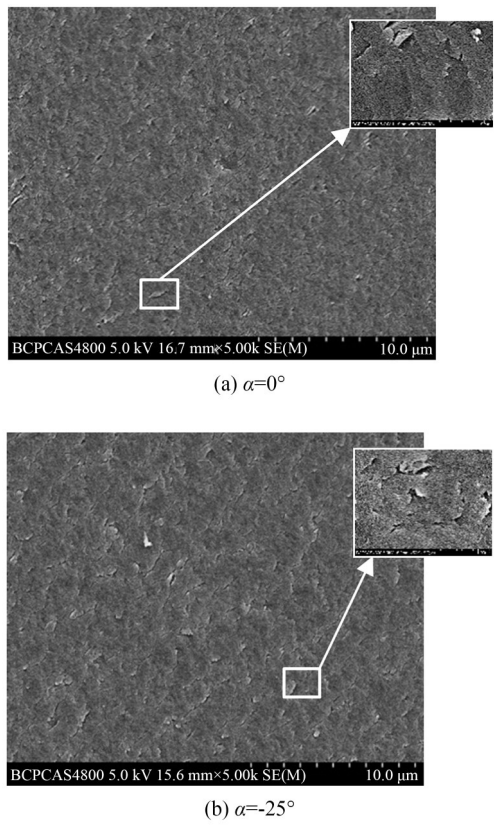


图 22 不同刀具前角下光刻胶 SU8 表面微观形貌电镜图
Fig. 22 SEM micrographs of photoresist SU8 under different rake angles

5 切削加工实验

根据以上研究,为了保证切削 SU8 可以获得良好的表面质量,需要控制加工参数和刀具角度,当切削速度为 2.09 m/s、进给速度为 1 mm/min、切削深度为 2 μm、刀具前角为 0°时,SU8 切

削表面粗糙度 R_a 为 7.4 nm。图 23 为切削后 SU8 的表面微观形貌电镜图,表面无裂痕等微观缺陷。设计 9×9 微透镜阵列,在此加工条件下进行切削实验,透镜形貌如图 24 所示。加工的阵列一致性好,表面无明显缺陷,其周期与矢高符合预期的设计参数。

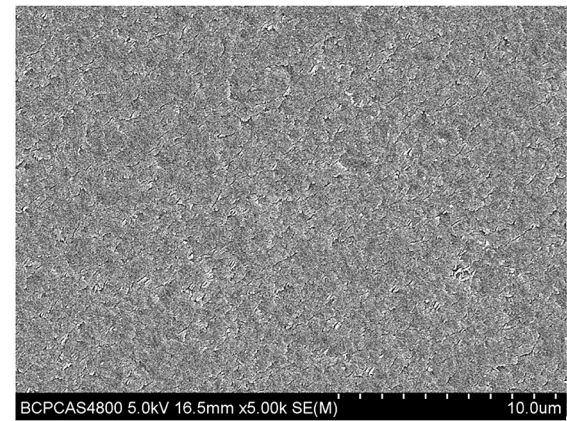


图 23 SU8 切削平面微观形貌电镜图
Fig. 23 SEM micrographs of SU8 face turning

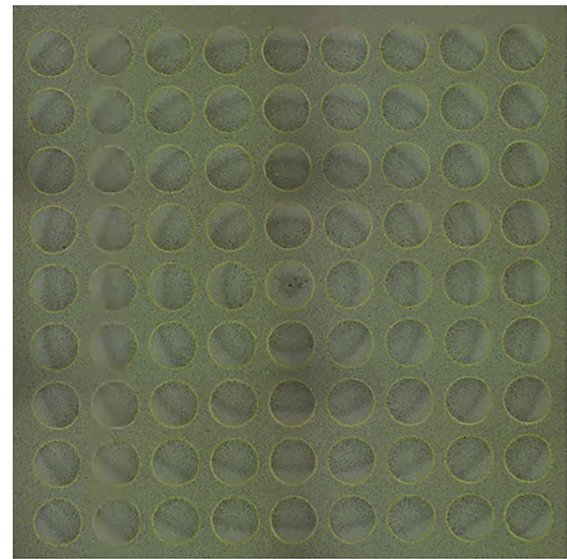


图 24 微透镜阵列形貌
Fig. 24 Morphology of microlens array

6 结 论

本文对光刻胶 SU8 进行机械性能测试与热机械特性测试,建立了 SU8 切削仿真模型。在不同工艺参数下进行 SU8 端面车削实验,分析了表面粗糙度、切削力和切削温度对 SU8 切削性能的

影响。当切削温度接近玻璃转化温度 53.90 °C 时, SU8 从玻璃态转变为黏弹态, 从脆性去除转变为塑性去除, 可以获得良好的表面质量。但是当温度进一步升高, SU8 从黏弹态转变为橡胶态, 切削表面质量变差。工艺参数影响 SU8 的车削表面质量, 当进给速度减小时, 能获得良好的表面; 切削深度对切削力的变化影响不大; 负前

角刀具会增加挤压变形, 从而获得较差的表面质量。当切削速度为 2.09 m/s、进给速度为 1 mm/min、切削深度为 2 μ m 时, 光刻胶掩膜的表面粗糙度 R_a 达到最优值 7.4 nm, 且无裂纹等微观缺陷; 0°前角能够有效抑制表面裂纹缺陷的产生。最后, 通过微透镜阵列加工验证了该加工参数下 SU8 具有良好的切削性能。

参考文献:

- [1] 龚峰, 李康森, 闫超. 玻璃精密模压成形的研究进展[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6):1380-1391.
GONG F, LI K S, YAN CH. Progress on precision glass molding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6):1380-1391. (in Chinese)
- [2] LIU X H, ZHOU T F, ZHANG L, *et al.* Fabrication of spherical microlens array by combining lapping on silicon wafer and rapid surface molding[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(7): 075008.
- [3] XIE J Q, ZHOU T F, LIU Y, *et al.* Mechanism study on microgroove forming by ultrasonic vibration assisted hot pressing [J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 270-277.
- [4] CHEN Y, LI L, YI A Y. Fabrication of precision 3D microstructures by use of a combination of ultraprecision diamond turning and reactive ion etching process[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(5): 883-890.
- [5] ZHOU T F, XU R Z, RUAN B S, *et al.* Fabrication of microlens array on 6H-SiC mold by an integrated microcutting-etching process [J]. *Precision Engineering*, 2018, 54: 314-320.
- [6] 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 ZH 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)
- [7] YAN Y, ZHOU P, WANG H P, *et al.* Thermal effect on poly(methyl methacrylate) (PMMA) material removal in the micromilling process[J]. *Polymers*, 2020, 12(9). DOI: 2122.
- [8] CHUNG S, PARK S. Effects of temperature on mechanical properties of SU-8 photoresist material [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(9): 2701-2707.
- [9] SMITH E. F. *Single-point Diamond Turning of Amorphous Thermoplastic Polymers*[D]. Raleigh: North Carolina State University, NC, 1989.
- [10] BOOTHROYD G. *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*[M]. New York: McGrawHill, 1975.
- [11] YAN J. Ultraprecision cutting of photoresist/gold composite microstructures [J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 133-136.
- [12] KOBAYASHI A, SAITO K. On the cutting mechanism of high polymers[J]. *Journal of Polymer Science*, 1962, 58(166): 1377-1396.
- [13] JAGTAP K. Experimental investigation on the influence of cutting parameters on surface quality obtained in SPDT of PMMA[J]. *International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology*, 2014.
- [14] XIAO K Q, ZHANG L C. The role of viscous deformation in the machining of polymers[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, 44(11): 2317-2336.
- [15] CARR J W, FEGER C. Ultraprecision machining of polymers[J]. *Precision Engineering*, 1993, 15(4): 221-237.
- [16] KAMADA Y, YAN J W. Machinability investigation for cellulose nanofiber-reinforced polymer composite by ultraprecision diamond turning[J]. *International Journal of Automation Technology*, 2021, 15(4): 475-482.
- [17] ROBIN C J, VISHNOI A, JONNALAGADDA K N. Mechanical behavior and anisotropy of spin-coated SU-8 thin films for MEMS[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(1): 168-180.
- [18] 杨其, 李光宪. 聚合物及其复合材料的微成型加工研究进展[J]. 高分子通报, 2013(9):107-115.

- YANG Q, LI G X. Review on micro molding of polymers and polymer composites [J]. *Chinese Polymer Bulletin*, 2013(9):107-115. (in Chinese)
- [19] 解孟涛,刘俊标,王鹏飞,等. 离心法曲面涂胶的胶层厚度研究[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(1): 71-77.
- XIE M T, LIU J B, WANG P F, *et al.* Research on resist-layer thickness by spin-coating on curved substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(1): 71-77. (in Chinese)
- [20] 姜峰,李宏伟. 金属切削有限元仿真软件 AdvantEdge FEM 用户手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2018.
- JIANG F, LI H W. *User Manual of Finite Element Simulation Software AdvantEdge FEM for Metal Cutting* [M]. Beijing: China Machine Press, 2018. (in Chinese)
- [21] 褚金奎,李双亮,张然. SU-8胶光弹性性能显微测试[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 547-552.
- CHU J K, LI S H L, ZHANG R. Microscopic test of photoelastic properties of SU-8 adhesive [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 547-552. (in Chinese)
- [22] 龚江宏. 准静态纳米压痕的理论基础与数据分析[J]. *陶瓷学报*, 2021, 42(2):181-245.
- GONG J H. Theoretical foundation and data analyses of quasi-static nanoindentation [J]. *Journal of Ceramics*, 2021, 42(2):181-245. (in Chinese)
- [23] OLIVEIRA GL, COSTA CA, TEIXEIRA S, *et al.* The use of nano- and micro-instrumented indentation tests to evaluate viscoelastic behavior of poly (vinylidene fluoride) (PVDF) [J]. *Polymer Testing*, 2014, 34: 10-16.
- [24] DAO M, CHOLLACOOP N, VLIET K, *et al.* Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(19): 3899-3918.

作者简介:



李秋怡(1998—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,2020年于南京理工大学获得学士学位,主要研究方向为超精密加工。E-mail: 13770927796@163.com

通讯作者:



赵斌(1991—),男,山东德州人,博士,助理教授,硕士生导师,2018年于山东大学获得博士学位,主要研究方向为高性能陶瓷刀具、难加工材料切削加工。E-mail: bin.zhao@bit.edu.cn