材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021071701

基于超精密切削的柱面微透镜阵列模具制备工艺研究

青建宏[1,2]，李　云[1,2*]

（1. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 文章对柱面微透镜阵列纳米压印中用到的精密模具的制作过程开展了仿真分析和实验研究。超精密切削技术是制作精密压印模具的有效手段之一。基于 Johnson-Cook 本构模型，采用有限元分析方法模拟了超精密切削过程中切削参数与切削力之间的关系，获得了优选的切削参数。实验结果表明，采用优选后的切削参数进行柱面微透镜阵列模具切削能够获得良好的切削效果。切削后模具的面形精度 RMS 值达到 19 nm，表面粗糙度 S_q 达到 4 nm。

关键词： 柱面微透镜阵列；纳米压印；超精密切削；切削参数

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0716－05

Research on Manufacturing Process of Cylindrical Microlens Array Mold Based on Ultra-precision Cutting

QING Jianhong[1,2], LI Yun[1,2]

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: The production process of precision molds used in cylindrical microlens nanoimprint was simulated, and ultra-precision cutting technology is one of the effective means for processing precision imprinting mold. Based on the Johnson-Cook constitutive model, the finite element analysis method was applied to simulate the relationship between the cutting parameters and the cutting force during the ultra-precision cutting process, and the preferred cutting parameters were obtained. Experimental results show that the cylindrical microlens array mold can obtain good cutting effect using the preferred cutting parameters. The surface precision RMS value and the surface roughness S_q of the mold after cutting reaches 19 and 4 nm, respectively.

Key words: cylindrical microlens array; nanoimprint; ultra-precision cutting; cutting parameters

0　引言

压印技术[1]凭借其高效率、低成本以及高精度等优点，在微纳元器件加工中有着广泛的应用。如利用压印技术加工鹅眼结构、金字塔形结构、微透镜阵列等。但压印技术仍然有许多亟待解决的问题，如压印过程中出现气泡、脱模时的表面残留以及模具的精密制造等。其中模具的精密制造是压印技术的重点问题，因为模具的制作缺陷会复制到被压印样品表面，直接影响被压印样品的面形精度及表面粗糙度等关键技术指标。

在纳米压印技术中，目前模具主要分为硬模具和软模具，硬模具采用的材料主要包括硅、二氧化硅、铝合金、镀镍合金等；软模具使用的材料主要有 PDMS，PET 等聚合物[2-4]。与软模具材料相比，硬模具材料的耐久性更高、变形小，但可能存在脱模困难等问题[5]，软模具的优点在于其制造及脱模更容易，因此在压印过程中一般软模具和硬模具会配合使用。目前针对压印模具的制造，主要是结合电子束曝光[6-7]、反应离子刻蚀[8]、化学气相沉积[9]等多

收稿日期：2021－07－17.

*通信作者：李　云

种微纳加工技术[10]。但以上方法一般用于加工深度较浅的二值型微结构。柱面微透镜阵列为连续曲面，且通常加工深度较大，采用以上方法加工较为困难。超精密切削技术是克服上述问题的有效手段。

为了制作高精度的微透镜阵列模具，许多学者展开了深入的研究。Zhou 等[11]通过热回流法加工出微透镜阵列，然后通过电铸法将其转移到镍模上[12]，得到了相对应的凹模具；Hao 等[13]同样先利用热回流法制作相应的微透镜阵列，然后浇铸 PDMS 得到相应凹模。白亚群[14]提出了一种基于压痕法制造微透镜阵列模具的方法，实现了一次成型制备。但由于热回流方法加工不能完全精确控制形状，得到的模具误差较大；压痕法同样也难以精确控制形状。而利用超精密切削技术能获得精密的微透镜阵列模具。Zhang 等[15]提出了一种在侧面加工的超精密车削技术，可制造出高精度、高均匀性的微透镜阵列模具，其表面粗糙度 R_a 达 10.08 nm，但计算较为复杂。Liu 等[16]提出等弧法和等角法，利用慢刀伺服单点金刚石车削加工技术在滚模上加工出面形精度 RMS 值为 0.626 μm 的微透镜阵列，具有一定可行性。Suzuki 等[17-18]利用铣削方法加工出微透镜阵列模具，得到面形精度 PV 值优于 100 nm、表面粗糙度 R_z 小于 15 nm 的微透镜阵列模具，但需要多次对刀，加工精度难以保证。同时为了得到高精度模具，超精密单点金刚石车削进给速度较慢，加工效率较低。同时以上方法大多针对二维球形微透镜阵列模具进行加工，对非旋转微透镜阵列模具如柱面微透镜阵列模具加工研究较少。

本文首先通过建立切削模型，利用 Johnson-Cook 本构模型对该切削过程进行了有限元模拟，并根据切削模拟情况初步确定了最佳切削参数，为后续切削实验确定参数奠定基础。在利用超精密车床切削过程中，采用往复走刀对微透镜阵列模具进行切削，通过切削实验，确定最佳切削深度为 2 μm、切削速度为 2 m/s，并通过白光干涉仪检测模具表面粗糙度 S_q 为 4 nm，面形精度 RMS 值达到 19 nm，精度较高，能直接用于后续模具压印实验，为得到高质量柱面微透镜阵列模具提供了实验基础。

1　理论基础与求解模型

金属切削的过程复杂，涉及多个物理场相互作用，需要考虑应力应变和应变率等因素的影响，因此需要选择合适的本构模型参数来描述这个过程。Johnson-Cook 本构模型充分描述了各种因素对材料的影响，能较好地反映切削条件下材料的力学性能特性，被广泛应用于切削模拟仿真，其模型表达式为[19]

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

式中，σ 为屈服应力，A 为屈服强度，B 和 n 为强换参数，ε 为等效塑性应变，C 为应变率灵敏系数，$\dot{\varepsilon}$ 为应变率，$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率，T_m 为融化温度，T_r 为室温，m 为温度相关系数。

同时，在有限元模型模拟中，切削模型的失效准则也很重要，其中 Johnson 等[20]提出的 Johnson-Cook 失效准则较为全面地反映了切削过程的材料去除情况，应用广泛，其模型描述为

$$\omega=\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}}\right) \tag{2}$$

式中，ω 为失效参数，$\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}$ 为单元积分点的等效塑性应变增量，$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 为临界等效塑性应变。当 ω 值为 1 时，表面材料失效，产生切屑。

为了分析超精密切削加工过程中的模具形状变化和最优切削参数，建立有限元模型，如图 1 所示，图中 v 表示刀具切削速度。为了便于计算，简化为二维模型，结合实际情况设定刀具刃口半径为 0.1 μm，同时在实际加工过程中工件尺寸较大，有限元仿真中不需要完全模拟整个区域，设定有限元模型模拟工件尺寸为 0.5 mm×0.1 mm。其中，刀具为金刚石车刀，模具材料为 6061 铝材，其基本材料参数如表 1 所示。

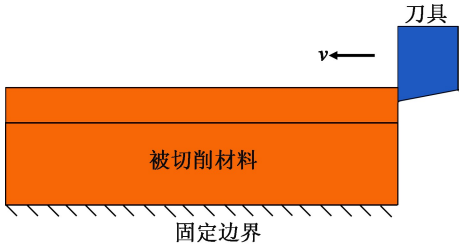


图 1　简化切削模型示意图

表 1　工件和刀具基本材料参数

材料	杨氏模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
工件	68 900	0.33	2 700
刀具	720 000	0.2	3 480

2 有限元结果与分析

2.1 切削深度对加工的影响

在超精密切削过程中，切削深度是一个较为重要的参数，一般对超精密切削来说，切削深度越小，材料所得到的表面质量越好，但此时切削效率较低，不利于大面积加工；而当选择较大切削深度时，加工效率高，但此时相应的切削精度较低，影响加工质量。同时切削力大小也会随着切削深度的不同而变化，也影响加工工件的质量和刀具寿命。在切削加工中，要得到高精度的模具，需设置切削深度较小，仿真了切削深度在 1，2，4，8 μm 等不同情况下的切削情况，得到切削过程中的主切削力和法向切削力，分别如图 2，3 所示。从图 2 中可以看到，当选择切削深度为 4 和 8 μm 时，主切削力波动较大，切削相对不平稳，得到的表面加工质量可能较差，而在切切削深度为 1 和 2 μm 时，可以看到此时两者切削力波动都较小，且切削力相对也较小，更易得到较好的加工表面，在法向切削力方面也有类似的规律，当切削深度为 1 和 2 μm 时，波动很小。同时考虑到切削效率的影响，选择切削深度为 2 μm 作为初步较优切削深度。

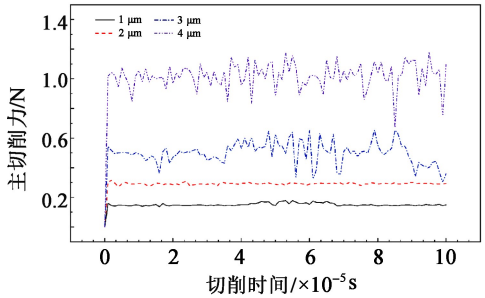


图 2 不同切削深度下主切削力

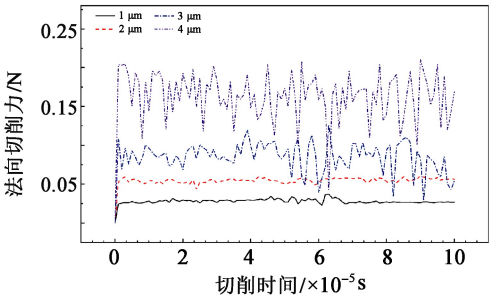


图 3 不同切削深度下法向切削力

2.2 切削速度的影响

在进行超精密车削过程中，切削速度也是影响加工质量的一个重要因素。与切削深度类似，当选择较小的切削速度时，加工质量较好，但效率较低；切削速度较大时，加工质量较低，但效率较高，因此可根据实际需要选择合适的切削速度和最优参数。同样仿真了刀具在切削速度为 1，2，4 m/s 下的切削情况，仿真结果如图 4，5 所示。从图中可以看到，选择不同的切削速度时，总体主切削力约为 0.3 N，但当切削速度为 4 m/s 时，切削力相对波动较大，切削力不平稳，易出现加工缺陷，而当速度减小为 1 m/s 或 2 m/s 时，切削力波动相对较小，能更易加工出高质量结果，同时为了兼顾加工效率，初步选择 2 m/s 速度作为切削参数。

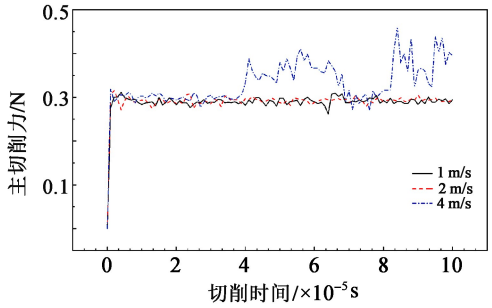


图 4 不同切削速度下主切削力

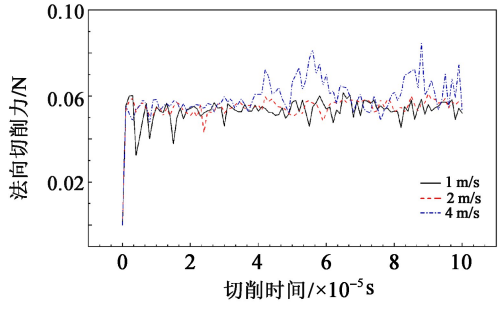


图 5 不同切削速度下法向切削力

3 实验验证

通过以上仿真模拟，初步确定了切削深度与切削速度，其中切削深度为 2 μm，切削速度为 2 m/s，利用该参数在超精密车削车床上进行微透镜阵列模具加工实验。在该切削实验中，由于微透镜阵列模

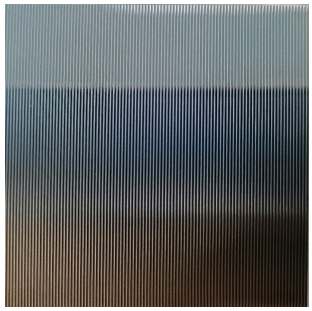
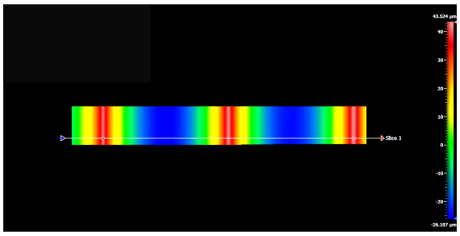
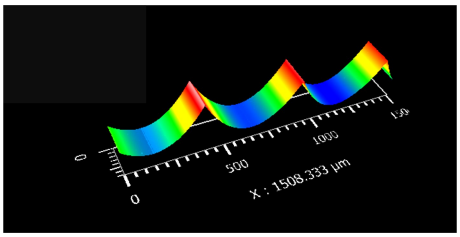


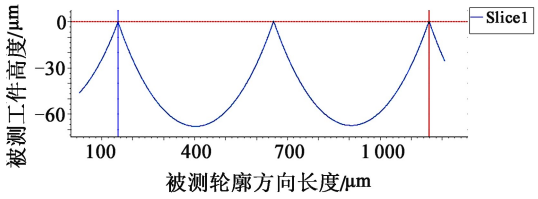
图 6 柱面微透镜阵列模具



（a）　俯视图

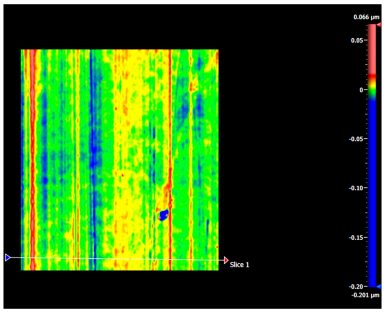


（b）　3D 图

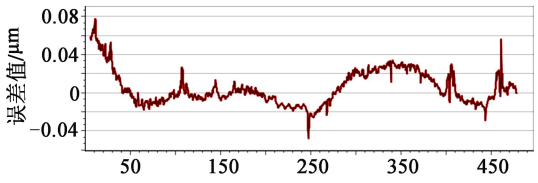


（c）　测量曲线图

图 7　测量截面轮廓示意图



（a）　局部粗糙度结果图

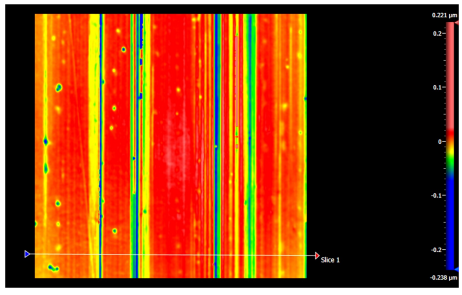


（b）　轮廓误差曲线

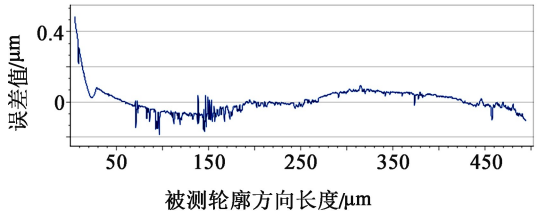
图 8　测量结果分析图

具为柱面微透镜阵列结构，为了实现高效快速加工，利用刀具的往复走刀直接进行车削加工，走刀一次完成一次车削，通过多次往复走刀可以完成模具加工。同时该微透镜阵列模具为凹模，不会出现刀具干涉情况，并选用金刚石车刀作为超精密切削刀具。设定初选较优参数进行加工，加工后整体工件如图 6 所示。利用白光干涉仪检测面形结果，其测量截面轮廓曲线如图 7(a)～(c)所示，可以看到测量轮廓曲线具有较好的一致性，其轮廓边界清晰，轮廓较好，得到柱面微透镜阵列模具周期为 0.504 mm，其矢高约为 67.39 μm，相较预期结果，误差为 0.6%，切削结果精度较高。本次实验为车削柱面阵列，进一步针对白光干涉仪的检测结果，从测量结果中提取轮廓误差曲线，拟合去掉基础的柱面形状后，得到轮廓与柱面的偏离量，分析其面形误差和表面粗糙度，其结果如图 8 所示，测量得到表面粗糙度 S_q 为 4 nm，面形精度 RMS 值达到 19 nm，精度较高，能满足模具制造的高精度需求。

同时为了确定该切削参数较优，改变切削参数进行切削实验，结果如图 9 所示。由表面轮廓误差曲线可知，此时误差较大，表面粗糙度 S_q 约为 11 nm，面形精度 RMS 值约为 68 nm，表面撕裂严重，所得模具结果较差，相较于所选择的最优参数有一定差距。经过对比，可以说明本文所选参数较优，能得到较高的面形精度。



（a）　局部粗糙度结果图



（b）　轮廓误差曲线

图 9　较差切削参数下的检测结果图

4　结论

为了实现柱面微透镜阵列的快速高效制造，需要利用压印技术进行复制转移，而模具的精密制造是压印技术中的关键技术。本文针对铝合金柱面微透镜阵列模具的超精密切削技术展开研究，为了快速确定超精密车削时的较优参数，利用 Johnson-Cook 本构模型对超精密切削过程进行了模拟。模

拟结果表明,当选择切削速度为 2 m/s、切削深度为 2 μm 时,切削波动小,切削效果较好。进一步基于超精密单点金刚石车床开展切削实验,验证了仿真结果,并获得了较优的面形精度结果,表面粗糙度 S_q 达 4 nm,面形精度 RMS 值达 19 nm。实现了铝合金微透镜阵列模具的精密制造。

参考文献:

[1] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint lithography with 25[J]. Science, 1996, 272(5258): 85-87.

[2] Bender M, Plachetka U, Ran J, et al. High resolution lithography with PDMS molds[J]. J. of Vacuum Science Technology B Microelectronics & Nanometer Structures, 2004, 22(6): 3229-3232.

[3] Bender M, Fuchs A, Plachetka U, et al. Status and prospect of UV-nanoimprint technology—Science Direct [J]. Microelectronic Engin., 2006, 83(4-9): 827-830.

[4] 李延强, 兰红波, 许 权, 等. 纳米压印复合软模具建模研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 170-181.
Li Yanqiang, Lan Hongbo, Xu Quan, et al. Modeling of flexible composite mold for nanoimprint lithography[J]. J. of Mechanical Engineering, 2018, 54(19): 170-181.

[5] 兰红波, 丁玉成, 刘红忠, 等. 纳米压印光刻模具制作技术研究进展及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 1-13.
Lan Hongbo, Ding Yucheng, Liu Hongzhong, et al. Review of template fabrication for nanoimprint lithography[J]. J. of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 1-13.

[6] 王立永, 李涤尘, 卢风兰. 压印模具的精密制造工艺优化研究[J]. 精密制造与自动化, 2003(1): 42-44.
Wang Liyong, Li Dichen, Lu Fenglan. Research on optimization of precision manufacturing process of imprint mould[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2003(1): 42-44.

[7] 李寒松, 丁玉成, 卢秉恒. 步进闪光压印光刻模具制作工艺研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 337-340.
Li Hansong, Ding Yucheng, Lu Bingheng. Template fabrication process in step and flash imprint lithography[J]. J. of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 337-340.

[8] Wang Q D, Duan Y G, Lu B H, et al. Imprint template fabrication based on glass wet etching using a soft etching mask[J]. J. Micromech. Microeng., 2006, 16(3): 564-570.

[9] Murphy P F, Morton K J, Fu Z, et al. Nanoimprint mold fabrication and replication by room-temperature conformal chemical vapor deposition[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90(20): 163.

[10] 殷敏琪, 孙洪文, 王海滨. 紫外纳米压印技术的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(5): 347-354.
Yin Minqi, Sun Hongwen, Wang Haibin. Research progress in UV nanoimprint lithography technology [J]. Micronanoelectronic Technology, 2017, 54(5): 347-354.

[11] Zhou L, Dong X X, Lv G C, et al. Fabrication of concave microlens array diffuser films with a soft transparent mold of UV-curable polymer[J]. Optics Communications, 2015, 342: 167-172.

[12] Ting C J, Huang M C, Tsai H Y, et al. Low cost fabrication of the large-area anti-reflection films from polymer by nanoimprint/hot-embossing technology[J]. Nanotechnology, 2008, 19(20): 205301.

[13] Xiong H, Wang L, Wang Z. Chalcogenide microlens arrays fabricated using hot embossing with soft PDMS stamps[J]. J. of Non-Crystalline Solids, 2019, 521: 119542.

[14] 白亚群. 压痕法微透镜阵列模具加工精度研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
Bai Yaqun. Accuracy analysis of micro-lens array mold manufactured by indentation process[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[15] Zhang X D, Li L H, Li Z X, et al. Highly uniform manufacturing method for large-area microlens arrays[J]. Inter. J. of Advanced Manufacturing Technol., 2018, 95: 99-108.

[16] Liu Y T, Qiao Z, Qu D, et al. Experimental investigation on form error for slow tool servo diamond turning of micro lens arrays on the roller mold[J]. Materials, 2018, 11(10): 1816.

[17] Suzuki H, Moriwaki T, Yamamoto Y, et al. Precision cutting of aspherical ceramic molds with micro PCD milling tool[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technol., 2007, 56(1): 131-134.

[18] Takino H, Oba T, Takeuchi Y, et al. Fabrication of spherical MLA mold by ultra-precision multiaxis-control milling[C]// Proc. of the 13th Inter. Conf. of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2013: 101-104.

[19] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-548.

[20] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

作者简介:

青建宏(1997—),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要研究方向为微纳米压印技术;

李 云(1986—),男,湖北黄冈人,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为精密制造以及压印技术。