

引文格式: 万林林, 郭晋伟, 刘伟, 等. 面向蓝宝石加工的纹理化研磨盘设计及试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 95-101.

WAN Linlin, GUO Jinwei, LIU Wei, et al. Design and experimental research of textured lapping plate for sapphire machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(21): 95-101.

## 面向蓝宝石加工的纹理化研磨盘设计及试验研究\*

万林林<sup>1,2</sup>, 郭晋伟<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>, 张先洋<sup>1,2</sup>, 冉晓茹<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学, 湘潭 411201;

2. 难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭 411201;

3. 湖南九五精机有限责任公司, 湘潭 411200)

[摘要] 蓝宝石晶片在研磨加工中会受到诸多因素的影响, 为了提高蓝宝石研磨加工后的表面质量, 本文从研磨液体积分布及流动均匀性出发, 设计了研磨盘表面纹理。采用有限元计算对所设计的研磨盘进行流场模拟, 同时对研磨盘表面应力分布进行了有限元模拟。为了验证研磨盘的加工性能, 将所设计的研磨盘与无槽研磨盘进行研磨试验的对比。结果表明, 采用槽宽 2 mm、槽深 1 mm 的阿基米德螺旋线沟槽加径向沟槽的设计, 蓝宝石晶片表面粗糙度为 0.210  $\mu\text{m}$ , 晶片表面无破碎、凹坑等损伤, 加工效果明显优于无槽研磨盘, 因此, 本文所设计的研磨盘具有更好的加工性能。

关键词: 蓝宝石晶片; 研磨盘; 纹理设计; 有限元方法; 表面质量

### Design and Experimental Research of Textured Lapping Plate for Sapphire Machining

WAN Linlin<sup>1,2</sup>, GUO Jinwei<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xianyang<sup>1,2</sup>, RAN Xiaoru<sup>3</sup>

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Machining Materials, Xiangtan 411201, China;

3. Hunan Jove Precision Machine Co., Ltd., Xiangtan 411200, China)

[ABSTRACT] Sapphire wafers are affected by many factors during the lapping machining, In order to improve the surface quality of the sapphire lapping machining, by consideration of the volume distribution and flow uniformity of the lapping liquid, the surface texture of the lapping plate is designed. The finite element method is used to simulate the flow field of the designed lapping plate. At the same time, the stress distribution on the surface of lapping plate was simulated by finite element method. In order to verify the processing performance of the lapping plate, the designed lapping plate is compared with the ordinary lapping plate in the lapping experiment. The results show that the design of Archimedes spiral groove plus radial groove with groove width of 2 mm and groove depth of 1 mm is adopted, the surface roughness of the sapphire wafer reaches 0.210  $\mu\text{m}$ , the surface of the wafer has no damage such as crushing and pits, the effect is significantly better than the ordinary lapping plate, therefore the lapping plate designed in this paper has better machining performance.

Keywords: Sapphire wafer; Lapping plate; Texture design; Finite element method; Surface quality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.21.095

\* 基金项目: 湖南省自然科学基金(2020JJ4309); 湖南省教育厅科学研究重点项目(19A163); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4025)。

蓝宝石晶体的主要成分为氧化铝,因其独特的晶格结构,具有熔点高、硬度高(莫氏硬度9级)、化学性质稳定的特点,同时还具备良好的透光性、电气绝缘性及热传导性,被广泛应用于航空航天、军用光电设备、半导体等领域,随着蓝宝石产品的应用领域不断扩大,学者们对蓝宝石晶片的加工质量及加工精度都提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。

研磨加工作为蓝宝石晶片生产流程中的重要工序,不仅要去除蓝宝石晶片切割后留下的不平整表面,同时也要为后续抛光提供更好的表面质量及精度<sup>[3-4]</sup>。而在研磨抛光加工中,磨具表面结构作为影响工件加工质量的重要因素之一<sup>[5-7]</sup>,能够有效改善磨具的加工性能,提升加工质量,所以逐渐成为学者们研究的焦点。

王文珊等<sup>[8]</sup>提出一种蜂窝状结构的半固结磨料研磨盘的设计与制备方法,试验结果表明,该新型结构研磨盘不仅可以获得较高的研磨效率和较好的表面质量,同时还可以提高衬底的面形精度。袁巨龙等<sup>[9]</sup>建立了半固着磨具颗粒流模型,对半固着磨具“陷阱”效应进行了仿真,发现磨具结合强度低、大载荷有利于“陷阱”效应发挥。Guo等<sup>[10]</sup>通过研究沟槽几何形状对抛光液流动时间及摩擦方式的影响,发现沟槽会影响晶片和抛光垫之间的磨粒运动,试验表明,宽沟槽、节距小的结构可以保证更好的抛光均匀性和材料去除率。Wang等<sup>[11-12]</sup>使用二维润滑理论和接触力学模型,发现沟槽存在会增加抛光液流速,有利于碎屑的排出,同时研究了垫块槽的几何形状和其他工艺参数对材料去除率和非均匀性的影响。吕玉山等<sup>[13]</sup>设计了葵花籽粒结构的仿生抛光垫,利用Fluent软件对抛光液的流动状态进行仿真,结果表明,抛光液在仿生抛光垫上的流动是均匀的,抛光液沿叶列斜线沟槽流动,有利于流体向四周发散。Li等<sup>[14]</sup>采用宽2 mm、深1.5 mm的沟槽建立了螺旋面模型,试验结果表明,该模型减缓了抛光液的流动,使液体径向速度趋于均匀,抛光的CaF<sub>2</sub>晶体表面粗糙度可达到0.251 nm。Lee等<sup>[15-16]</sup>以蓝宝石衬底为研究对象,发现沟槽密度可以通过改变晶片与研磨盘接触面之间的液膜厚度来影响研磨效果,因此可以通过减小槽间距来增大槽密度,以达到更好的加工效果。Hong等<sup>[17]</sup>研究了化学机械抛光中的圆形槽型和圆形加径向槽型,试验结果验证了抛光液流动对化学机械抛光性能的影响,径向槽也改善了工艺的不均匀性。

综上所述,合理的磨具表面结构能够进一步改善加工性能,提升加工质量。而在此前的磨具表面结构研究中,螺旋线沟槽加径向沟槽多为经验性设计,所以本研究对阿基米德螺旋线型沟槽加径向沟槽的组合进行了优化设计,对其宽深比、尺寸及走向进行了计算。首先利用有限元模拟方法对沟槽内的流场进行模拟,并分析

了研磨盘表面应力分布,然后采用设计的研磨盘对蓝宝石进行研磨试验,最终获得了较好的表面质量。

## 1 表面纹理设计

本文采用的研磨工艺如图1所示,研磨液从研磨盘的中心上方处注入,在研磨盘的旋转作用下,在沟槽中扩散,同时进入工件和研磨盘的交界面,在磨粒作用下实现工件表面材料的去除。

### 1.1 宽深比设计

由于沟槽内研磨液流动为明渠流<sup>[14]</sup>,若要得到良好的流动及排屑效果,需要对沟槽截面形状、尺寸等相关参数进行计算。在一般的研磨盘表面结构中,沟槽以矩形截面最为常见,同时为了降低加工成本,所以本文选取矩形作为截面形状。

在已选定的截面形状中,根据曼宁公式及明渠均匀流的基本公式:

$$Q = AC\sqrt{Ri} = \frac{1}{n} Ai^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} = \frac{1}{n} \frac{\left(\frac{5}{3} i^{\frac{1}{2}}\right)}{\chi} \quad (1)$$

式中,  $C$  为谢齐系数;  $\chi$  为湿周(即过水截面周长),当粗糙系数  $n$ 、底坡系数  $i$  和过水断面面积  $A$  一定时,水力半径  $R$  越大,通过的流量  $Q$  越大。根据水力最佳断面的条件,则

$$R = \frac{A}{\chi} = \frac{(\beta + m)h^2}{(\beta + 2\sqrt{1+m^2})h} \quad (2)$$

式中,  $A$  为常数(过水断面面积一定时,  $A$  为常数);  $\beta$  为宽深比,  $\beta = \frac{b}{h}$ ,由于要求水力半径  $R$  必须最大,用  $\beta_m$  代替式(2)中的  $\beta$ ,则水力最佳断面的宽深比为

$$\beta_m = \frac{b_m}{h_m} = 2(\sqrt{1+m^2} - m) \quad (3)$$

式中,  $b_m$  为沟槽宽度;  $h_m$  为沟槽深度;  $m$  为边坡系数,在矩形截面中  $m=0$ ,式(3)则转化为

$$\beta_m = \frac{b_m}{h_m} = 2 \quad (4)$$

所以本文设计研磨盘的矩形截面最佳宽深比为2:1,由于宽沟槽、节距小的结构可以保证更好的加工均匀性和材料去除率<sup>[10]</sup>,而且为了保证加工碎屑的有效清除,所以取槽宽为2 mm,根据式(4)可求得槽深为1 mm。

### 1.2 沟槽走向设计

在研磨过程中,研磨液在沟槽中的流动状态会对工

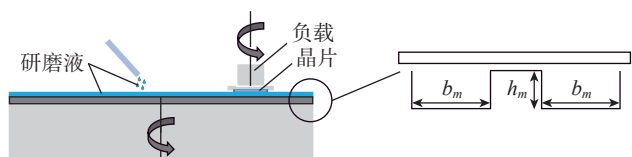


图1 加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of processing principle

件加工的均匀性及工件整体的材料去除率产生很大的影响,由于阿基米德螺旋线的特性,其相邻螺线间的螺距是相等的,而且整个运动过程中具有匀速向外扩张的特点,在加工过程中研磨盘的转速一定,所以在设计时,周向采用阿基米德螺旋线可以使得研磨液匀速向外运动,其直角坐标系下的数学关系为

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta = r \cos(\omega_r t) \\ y = r \cdot \sin \theta = r \sin(\omega_r t) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $r$  为圆周半径;  $t$  为时间;  $\theta$  为角度;  $\omega_r$  为周向的角速度,  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。利用雷诺数方程:

$$Re = \frac{vR}{V} \quad (6)$$

$$R = \frac{bh}{b+2h} \quad (7)$$

式中,  $v$  为流体速度;  $V$  为运动粘度。

最终计算雷诺数为 250, 所以沟槽内部的研磨液流动状态为层流, 在明渠流中, 利用层流运动及其沿程水头损失计算公式:

$$h_f = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

式中,  $h_f$  为沿程水头损失;  $\lambda$  为沿程阻力系数, 大小为

$\frac{64}{Re}$ ;  $l$  为流道长度, 为了保持液体流速的均匀性,  $v$  应为恒定值, 所以在研磨盘离心力的作用下:

$$dh_f = \omega^2 r dr = \lambda \frac{dl}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

式中,  $g$  为重力加速度。

经变形后:

$$\frac{dl}{dr} = \frac{8\omega^2 Rg}{\lambda v^2} r \quad (10)$$

令

$$m = \frac{8\omega^2 Rg}{\lambda v^2} \quad (11)$$

在参数方程下:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta \\ y = r \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (12)$$

将式(10)转化为

$$\frac{d\theta}{dr} = \sqrt{\frac{m^2 - 1}{r^2}} \quad (13)$$

求不定积分可得:

$$\theta = \sqrt{m^2 r^2 - 1} - \arctan \sqrt{m^2 r^2 - 1} + c \quad (14)$$

式中,  $c$  为积分后的常数项。

由式(10)可知, 设计径向沟槽时, 沟槽的弯曲程度、走向与研磨盘转速及液体流速相关, 试验中所用研磨盘半径为 0.15 m, 为了使液体均匀流出, 转速取  $2\pi/\text{s}$ , 研磨液流速取 0.15 m/s, 将上述参数代入式(14)中, 可得出

$\theta = 76.7^\circ$ , 为了确保研磨液能从中心流到边缘且不造成研磨液的浪费, 取径向沟槽的数量为 6, 同时使径向沟槽圆弧半径与研磨盘半径相同, 可以计算得出从研磨盘中心到边缘径向沟槽的弧长, 设计出如图 2 所示的研磨盘表面纹理。

## 2 流场数值模拟

为了观察液体在研磨盘表面的流动情况, 使用计算流体力学软件 ANSYS Fluent, 根据所建三维模型, 选择合适的计算模型并划分网格, 由于四面体网格适合计算具有明显两相流的流场, 因此直接利用。

在模拟计算时采用 VOF 模型, 可以跟踪液体在瞬态下的流动情况, 同时采用两相流进行模拟更符合实际情况, 其中 VOF 模型的体积分数方程和动量方程如下。

体积分数方程:

$$\frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_w \rho_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \vec{v}_w) \right] = (m_{wa} - m_{aw}) \quad (15)$$

式中,  $\rho_w$  为水的密度;  $\alpha_w$  ( $0 < \alpha_w < 1$ ) 为水在模型中的体积分数;  $\vec{v}_w$  为水的速度;  $m_{wa}$  为水相到空气相的传质;  $m_{aw}$  为空气相到水相的传质。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (16)$$

其中,

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a$$

式中,  $\rho$  为多相流中流体混合后的密度;  $p$  为流体压力;  $\vec{F}$  为体积力;  $\mu_w$  为水的粘度;  $\rho_a$  为空气的密度;  $\mu_a$  为空气的粘度。

在模拟中为了减小计算量, 所以简化了模型, 只考虑流体的分布情况, 在初始化时将流体域全部设置为空气, 计算开始时从入口通入液体, 观察液体在流体域中的速度分布及体积分数分布情况。参数设置: 研磨盘转速 60 r/min; 液体进口速度 0.1 m/s。模拟结束后, 以液相体积分数及速度分布作为评价指标。

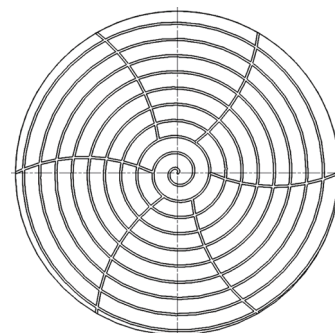


图2 研磨盘表面纹理

Fig.2 Surface texture of the lapping plate

### 2.1 未开槽研磨盘表面流场分析

图3和4分别为无槽研磨盘表面液相体积分数分布图和液相速度分布图。液体从中心滴落后,由于有初始的入口速度,在滴落到研磨盘中间时有一定的速度突变,在研磨盘的旋转作用下,液体从中心开始扩散,并且在径向有加速现象,在越远离研磨盘中心的位置其速度越大,速度最大处为0.75 m/s,最小处仅为0.1 m/s,而且由于离心力的作用其液相分布也出现了极不均匀的现象,液体容易集中在研磨盘中心位置(图5),模拟结果符合实际情况。

### 2.2 有槽研磨盘表面流场分析

图6为本文设计有槽研磨盘表面液相体积分数分布图和液相速度分布图。液体从盘中心上方进入,当液体刚滴落到研磨盘表面时,在离心力的作用下开始向沟槽内扩散,如图6(a)所示,在经过充分流动后,液体充满沟槽大部分区域,且分布均匀,只有局部区域液体分布较少,因此,在一定程度上可以保证研磨液在研磨盘表面区域的均匀流动,以满足加工时的需求。

液体速度分布如图6(b)所示,由于有了周向沟槽及径向沟槽的沿程阻滞,液体并没有明显加速趋势,速度在0.6 m/s左右,与无槽盘表面液体速度分布相比,其整体速度分布均匀,径向速度波动也更小,达到了预期的设计效果。

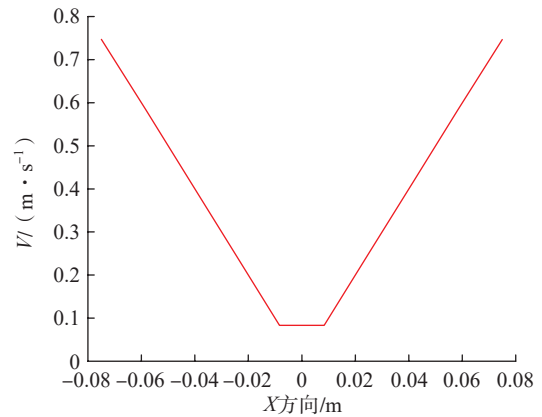


图5 液体径向速度曲线

Fig.5 Liquid radial velocity curve

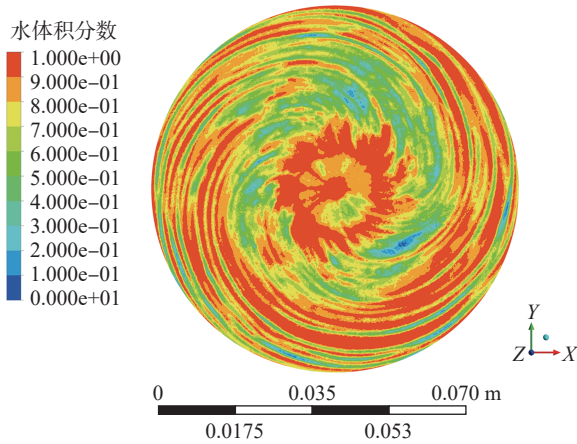


图3 液相体积分布

Fig.3 Liquid phase volume distribution

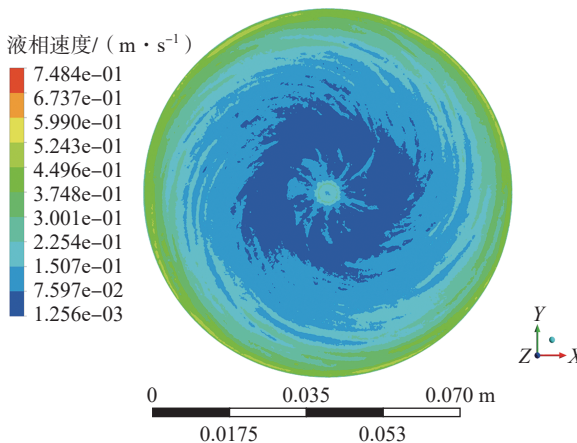
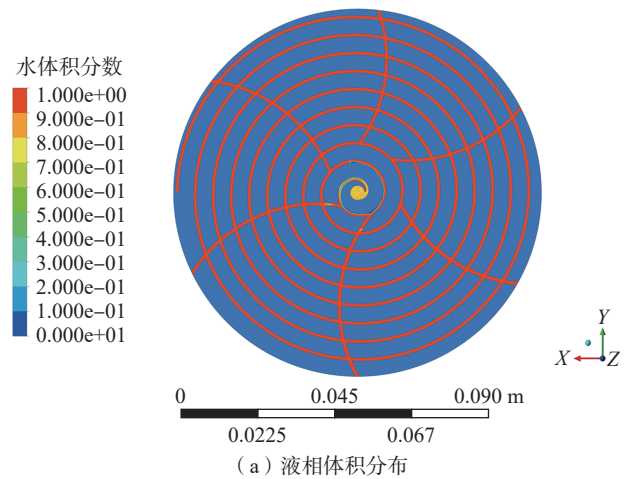
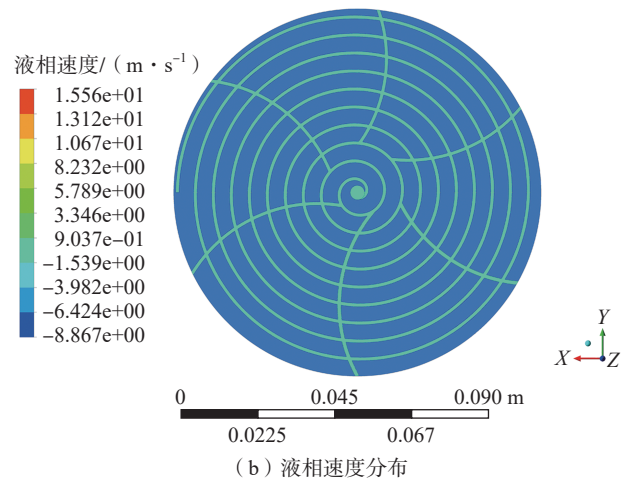


图4 液相速度分布

Fig.4 Liquid phase velocity distribution



(a) 液相体积分布



(b) 液相速度分布

图6 有槽研磨盘表面液相体积分布与速度分布

Fig.6 Liquid phase volume distribution and velocity distribution of designed lapping plate

仿真结果表明,无论是液相体积分布均匀性,还是液相速度分布,本文设计的有槽研磨盘模拟效果都要优于无槽研磨盘。本文设计的有槽研磨盘可以明显改善研磨液流场分布,有利于改善研磨盘的加工性能。

### 3 研磨盘表面应力场模拟

在研磨过程中,晶片与研磨盘接触区域的应力分布会直接影响晶片最终的加工效果。所以有必要对所设计的有槽研磨盘与普通无槽研磨盘的应力场分布进行对比分析。

#### 3.1 模型的建立

对两种不同的研磨盘分别进行建模,为了提高计算效率,将模型尺寸适当缩小,并对模型结构进行了适当简化,假设研磨盘表面与晶片紧密贴合。其中研磨盘直径为 150 mm,晶片直径为 30 mm,厚度为 2 mm。所建模型如图 7 所示。

#### 3.2 载荷与边界条件

设置研磨盘做旋转运动,且限制研磨盘的平移和转动自由度,工件固定不动,并在工件表面施加压力载荷,研磨盘转速设置为 60 r/min,工件表面载荷为 0.01 MPa。

#### 3.3 模拟结果分析

图 8 为无槽和有槽研磨盘表面应力分布图,无槽研磨盘应力主要集中在与晶片接触的位置,且在接触的中心区域出现应力集中的现象;而设计的有槽研磨盘表面等效应力虽然整体数值比无槽研磨盘大,但是在接触区域应力分布均匀,未出现应力集中。

仿真结果表明,本文所设计的有槽研磨盘表面应力分布更加均匀,有利于改善研磨盘的加工性能,进一步提升工件的加工质量。

## 4 试验结果及分析

#### 4.1 试验装置及条件

研磨加工试验在智能型超精密平面研抛机(Nanopoli-100)上进行,试验装置如图 9 所示。本文所设计的有槽研磨盘实物如图 10 所示。为了验证所设计的研磨盘对蓝宝石加工质量的影响,用表面无槽的研磨

盘作为对照组进行试验,研磨盘材质均为铸铁,选取研磨盘转速为 60 r/min(与仿真一致),研磨液流量为 20 mL/min,研磨压力为 10 kPa,使用 W14 的金刚石研磨液。被加工材料为直径 49 mm,厚度 2 mm 的蓝宝石晶片,加工前表面粗糙度为 0.406 μm。采用时代 TR200 粗糙度仪测量晶片加工后的表面粗糙度,采用超景深显微镜(VHX-1000)对晶片表面形貌进行观测。

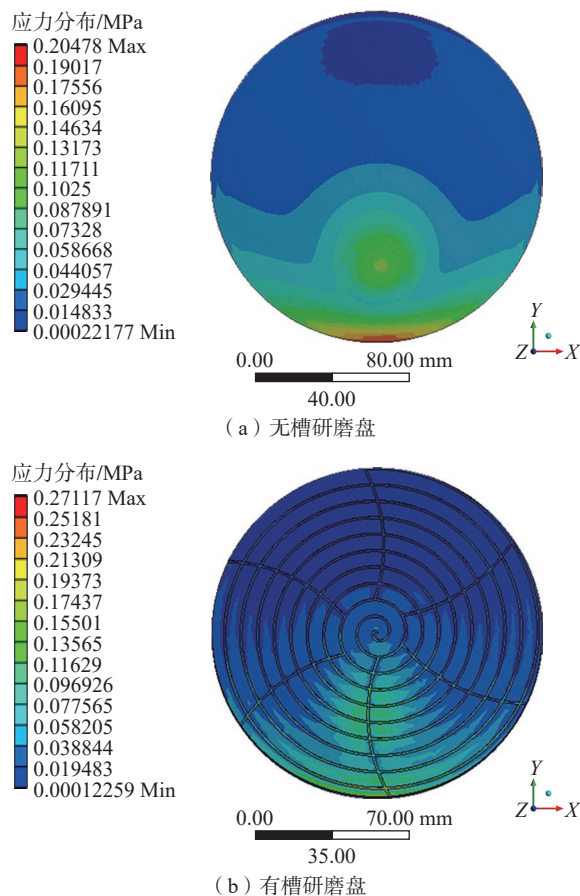


图 8 表面应力分布图

Fig.8 Surface stress distribution

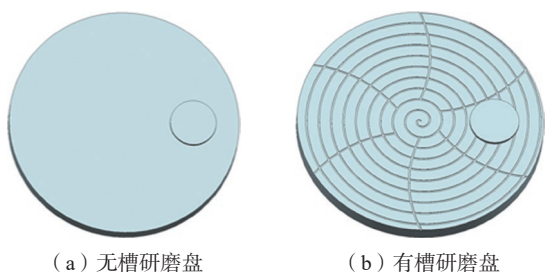


图 7 研磨盘三维模型

Fig.7 3D model of lapping plate

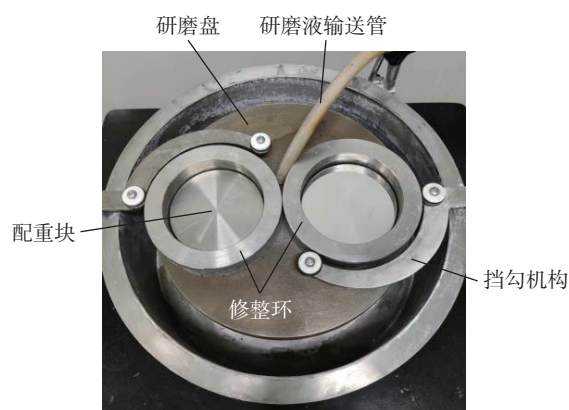


图 9 试验装置

Fig.9 Experimental device

### 4.2 材料去除率

本次试验的材料去除率由加工前后质量差计算得出,即

$$MRR = \frac{(M_0 - M) \cdot h}{M_0 \cdot t} \cdot 10^6 \text{ (nm} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (17)$$

式中,  $M_0$  和  $M$  分别为工件加工前、后的质量,  $g$ ;  $h$  为工件加工前的初始厚度,  $mm$ ;  $t$  为研磨时间,  $min$ 。

根据试验结果,材料去除率对比如图 11 所示,在进行的 5 组试验中,无槽研磨盘的材料去除率平均值为 206.3  $nm/min$ ,所设计的有槽研磨盘材料去除率平均值为 90.8  $nm/min$ ,形成较大差异的主要原因是:由于沟槽的存在,研磨盘与工件表面的接触面积减小,研磨时,参与加工的有效磨粒减少,导致材料的整体去除率降低;而无槽研磨盘在研磨过程中,由于铸铁材质较硬,大量的磨粒可以直接与晶片表面接触,同时粒径较大的金刚石磨粒会在工件与研磨盘间形成连续滚动,甚至镶嵌在研磨盘表面,在工件表面形成深划痕,进一步导致工件的材料去除率增大,同时也使得工件表面质量下降。

### 4.3 表面质量分析

在经过研磨试验后,蓝宝石晶片的表面粗糙度值对



图 10 设计的研磨盘

Fig.10 Designed lapping plate

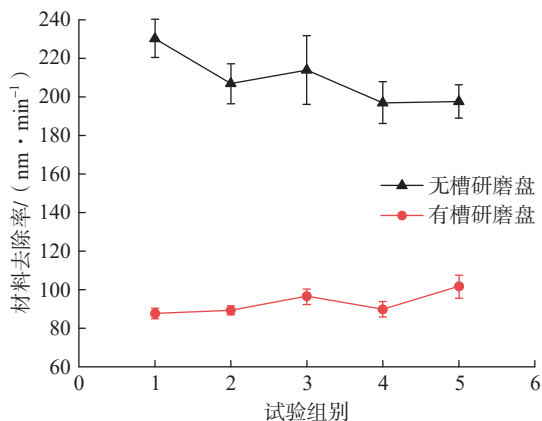


图 11 材料去除率对比

Fig.11 Comparison of material removal rate

比如图 12 所示。结果表明,在相同的试验条件下,本文设计的有槽研磨盘加工后的蓝宝石晶片表面粗糙度平均值为 0.210  $\mu m$ ,明显小于无槽研磨盘加工后的平均值 (0.317  $\mu m$ ),加工后的表面形貌分别如图 13 所示。

可以看出,经无槽研磨盘加工后的蓝宝石晶片表面出现了深划痕、凹坑、破碎等缺陷,而经本文设计研磨盘加工后的蓝宝石晶片只有较轻微的划痕,无其他明显损伤。这是因为无槽研磨盘在加工时,由于盘表面研磨液分布不均匀,容易造成磨粒集中在加工区域,不能及时地更新,同时在研磨盘与晶片接触区域产生应力集中,使得较大粒径的磨粒会在研磨盘与工件之间形成滚动直至嵌入到研磨盘表面,不仅破坏了研磨盘表面的平整度,也对工件造成较大损伤,最终在工件表面形成深划痕甚至表面破碎、凹坑等缺陷,而且由于研磨液的整体

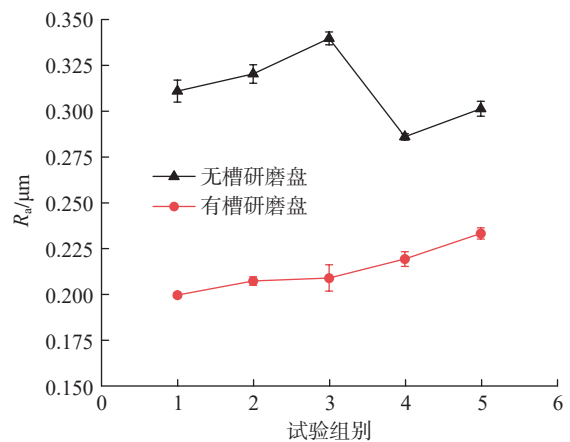
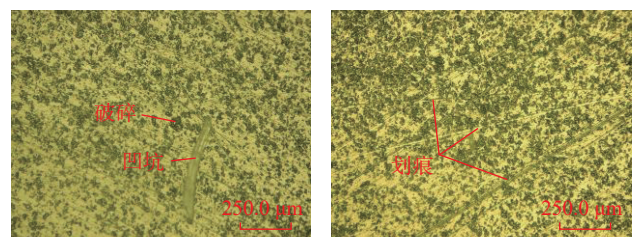
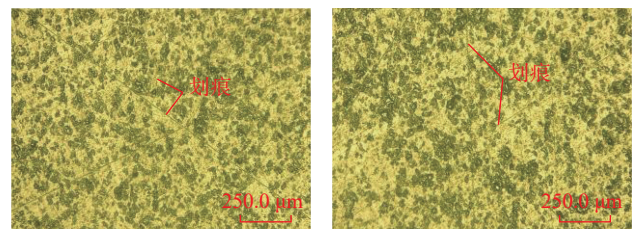


图 12 表面粗糙度对比

Fig.12 Comparison of surface roughness



(a) 无槽研磨盘加工后



(b) 有槽研磨盘加工后

图 13 有槽和无槽研磨盘加工后晶片表面形貌

Fig.13 Wafer surface morphology after grooving and ungrooved lapping disk processing

流动性较差,脱落的工件碎屑未能及时地排出,较大的工件碎屑会进一步对研磨盘和工件表面造成破坏,最终导致工件表面质量下降。

相反,在所设计的研磨盘表面,研磨液虽然在流动过程中受到沟槽沿程的阻滞,但相较无沟槽研磨盘表面会有更均匀的液膜厚度,以及更好的分布特性,可以及时地将工件碎屑排出,避免碎屑对工件表面造成进一步的损伤。研磨液在由内而外的流动过程中,径向速度均匀性得到了很大的改善,可以更均匀地分布,而且在工件和研磨盘接触的区域,磨粒不易造成聚集,可以及时更新,同时研磨盘表面应力分布均匀,可以进一步保证晶片表面材料去除的均匀性,所以工件在研磨加工后,表面质量更好。

## 5 结论

(1) 本文设计的研磨盘沟槽宽深比为 2:1, 根据实际需要取槽宽为 2 mm, 槽深为 1 mm。利用阿基米德螺旋线加径向沟槽设计出相应的沟槽走向。

(2) 流场仿真结果表明, 对比无槽研磨盘表面, 沟槽的设计明显改善研磨盘表面液相体积分布及径向速度的均匀性; 研磨盘表面应力场仿真结果表明, 本文设计的研磨盘表面应力分布均匀, 且没有出现明显的应力集中现象。

(3) 本文设计的有槽研磨盘加工蓝宝石晶片后, 其表面粗糙度平均值为 0.210  $\mu\text{m}$ , 表面只有轻微划痕, 晶片表面平整度较好, 且无其他明显损伤; 而无槽研磨盘后进行加工后, 蓝宝石晶片表面粗糙度平均值为 0.317  $\mu\text{m}$ , 且晶片表面多深刻痕、破碎甚至凹坑。

(4) 试验结果表明, 本文设计的有槽研磨盘表面纹理能够改善研磨液流场分布和研磨盘表面应力分布, 提升研磨盘加工性能, 有利于获得更好的工件表面质量。

## 参考文献

- [1] 考政晓, 叶大千, 于璇, 等. 蓝宝石衬底材料的研究及应用进展[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(1): 102–107.
- [2] KAO Zhengxiao, YE Daqian, YU Xuan, et al. Research and application progress of sapphire substrates[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2018, 47(1): 102–107.
- [3] 周海. 衬底基片超精密加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] ZHOU Hai. Substrate ultra-precision processing technology[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [5] 潘继生, 郑坤, 廖博涛, 等. 蓝宝石基片的单面研磨工艺研究[J]. 现代制造工程, 2019(6): 89–95.
- [6] PAN Jisheng, ZHENG Kun, LIAO Botao, et al. Research on the single-sided lapping parameters of sapphire substrate[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(6): 89–95.
- [7] 王建彬, 朱永伟, 王加顺, 等. 研磨方式对单晶蓝宝石亚表面损伤层深度的影响[J]. 人工晶体学报, 2014(5): 1099–1104.

WANG Jianbin, ZHU Yongwei, WANG Jiashun, et al. Effect of lapping methods on subsurface damage depth of single crystal sapphire[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014(5): 1099–1104.

[5] WANG Z, WU Y, DAI Y, et al. Subsurface damage distribution in the lapping process[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1417–1426.

[6] 王洁, 赵萍, 吕冰海, 等. 用于功能陶瓷材料超精密平面加工的固结磨具的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(17): 2873–2881.

WANG Jie, ZHAO Ping, LÜ Binghai, et al. Research progress of the fixed abrasive tools for ultra-precision planar machining of functional ceramics[J]. Materials Reports, 2019, 33(17): 2873–2881.

[7] 文东辉, 鲁聪达, 周兆忠. 蓝宝石衬底研磨加工中研磨盘材质的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 247–250.

WEN Donghui, LU Congda, ZHOU Zhaozhong. Effect of plate materials on sapphire wafer lapping process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 247–250.

[8] 王文珊, 胡中伟, 赵欢, 等. 蜂窝状结构半固结磨料研磨盘的制备及应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 69–77.

WANG Wenshan, HU Zhongwei, ZHAO Huan, et al. Preparation and application of semi-fixed abrasive lapping plates with cellular structure[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 69–77.

[9] 袁巨龙, 王志伟, 钱苗, 等. 半固结磨具“陷阱”效应的颗粒流模拟[J]. 中国机械工程, 2009, 20(6): 714–718.

YUAN Julong, WANG Zhiwei, QIAN Miao, et al. Particle flow simulation on the “trap” effect of semi-fixed abrasive plate[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(6): 714–718.

[10] GUO Y C, LEE H, LEE Y, et al. Effect of pad groove geometry on material removal characteristics in chemical mechanical polishing[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(2): 303–306.

[11] WANG Y C, YANG T S. Effects of pad grooves on chemical mechanical planarization[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2007, 154(6): H486.

[12] WANG Y C, YANG T S. Modeling and calculation of slurry-chemistry effects on chemical-mechanical planarization with a grooved pad[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2009, 63(1): 33–50.

[13] 吕玉山, 张田, 王军, 等. 叶序结构抛光垫表面的抛光液流场分析[J]. 润滑与密封, 2011, 36(3): 24–29.

LÜ Yushan, ZHANG Tian, WANG Jun, et al. Analysis of the polishing slurry flow on the polishing pad surface with phyllotaxis pattern[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(3): 24–29.

[14] LI J, HUANG J Y, HUA C, et al. Design of surface grooves on a polishing pad based on slurry uniform flow[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9): 4795–4803.

[15] LEE T, JEONG H, LEE S, et al. Effect of the lapping platen groove density on the characteristics of microabrasive-based lapping[J]. Micromachines, 2020, 11(8): 775.

[16] LEE T, LEE S, JEONG H, et al. Effects of groove shape dimension on lapping characteristics of sapphire wafer[J]. Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 2016, 32(4): 119–124.

[17] HONG S, BAE S, CHOI S, et al. A numerical study on slurry flow with CMP pad grooves[J]. Microelectronic Engineering, 2020, 234: 111437.

通讯作者: 万林林, 副教授, 博士生导师, 研究方向为硬脆材料高效精密加工技术。

(责编 七七)