

双图案非均匀耦合固结磨盘的设计及实验研究

徐超群, 方从富*, 严振

华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021

摘要 针对传统固结磨盘因其表面沟槽形式单一而难以保证蓝宝石等硬脆性材料加工质量的问题,提出了一种螺旋-同心圆双图案非均匀耦合结构的新型固结磨盘(DPP)设计,并进行了实验研究。DPP采用螺旋槽作为排屑槽,降低了磨盘表面的堵塞程度,以保证加工表面获得低粗糙度,延长工具使用寿命;采用同心圆槽调整磨盘表面磨粒分布,提高了磨盘对工件材料的去除均匀性,以保证加工表面获得更高的平坦度。基于该设计原理,制备了用于蓝宝石加工的新型磨盘,并与传统网格槽型盘(GGP)进行对比。实验结果表明:采用DPP加工时工件表面的凹坑划痕数量更少,约为GGP的35%;研磨后磨盘表面堵塞程度更低,约为GGP的30%。虽然,采用DPP加工时工件材料去除率较GGP低14%,但是材料去除厚度非均匀性为0.0494,比GGP低32%,表面粗糙度为129.4 μm ,比GGP低16.2%。因此,采用DPP加工时工件材料去除分布更均匀,工件表面质量更好。实验结果证明:DPP不仅可以获得更好的工件表面质量,还可以延长磨盘的使用寿命,可满足对高质量表面、大规模生产蓝宝石等脆硬材料的精密研磨加工需求。

关键词 表面光学;螺旋-同心圆双图案;材料去除分布;表面粗糙度;表面形貌;研磨

中图分类号 O472

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0824001

Design and Experimental Study of Double-Pattern Nonuniform Coupling Fixed-Abrasive Pads

Xu Chaoqun, Fang Congfu*, Yan Zhen

College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract Traditional fixed abrasive pads (FAPs) present difficulty in guaranteeing the workpiece machining quality in the lapping of hard and brittle materials owing to the single form of grooves fabricated on the pad surface. To address this problem, in this study, a new type of FAP design called DPP, which has a non-uniform coupling and spiral concentric structured pattern, was proposed and tested. To reduce debris blockage on the DPP surface, spiral grooves were used as chip disposal grooves to ensure that the machined workpiece surface had a lower roughness and thus prolonged DPP life. Moreover, concentric circular grooves were used to adjust the distribution of abrasives on the DPP surface, which can improve the material removal uniformity and surface flatness of the machined workpiece. Based on the proposed design principle, the DPP for sapphire lapping was fabricated and compared with a traditional grid grooved pad (GGP). Experimental results show that the number of pits and scratches on the machined workpiece surface is much fewer when using DPP, which is $\sim 35\%$ of that of GGP, and the degree of blockage of the DPP after lapping is lower, which is $\sim 30\%$ of that of GGP. In lapping with DPP, the material removal rate is $\sim 14\%$ lower than that of GGP, but the nonuniformity of material removal thickness is ~ 0.0494 , which is 32% lower than that of GGP. The surface roughness is $\sim 129.4 \mu\text{m}$, which is $\sim 16.2\%$ lower than that of GGP. Therefore, when DPP is used for sapphire lapping, the distribution of material removal is more uniform and the surface quality of the workpiece is much better. The test results prove that DPP can not only facilitate better workpiece surface quality but also prolong the pad service life, which meets the efficient and precision machining requirements for high-quality surfaces and large-scale production of brittle and hard materials such as sapphire.

Key words surface optics; spiral-concentric double pattern; material removal distribution; surface roughness; surface morphology; lapping

OCIS codes 240.5450; 240.5570; 240.6700

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2019-12-28; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51675193)、华侨大学研究生科研创新基金(18013080037)

* E-mail: cffang@hqu.edu.cn

1 引 言

目前,用于氮化镓生长的最普遍的衬底是蓝宝石。蓝宝石化学性质稳定,加工出的器件质量较好^[1-4]。由于衬底的几何尺寸不断缩小,光刻精度要求越来越高。为了提高光刻精度,需选用较短波长的光,但随之引发焦深减小的问题。当光刻表面凹凸不平时,光刻过程会产生曝光不良甚至不曝光等问题,因此要求光刻表面凹凸变化降至焦深范围内,即实现表面的高度平坦化^[5-8]。有学者提出采用固结磨料磨盘进行加工,由于磨盘表面磨粒分布均匀而且磨粒的运动轨迹可控,故由固结磨料磨盘加工的工件表面质量较高^[9-11]。然而,尽管固结磨料磨盘能够提高加工效率,但是存在磨盘的剧烈磨损和工件表面损伤等问题。为了克服这些问题,有学者提出采用磨盘图案化的方法实现对衬蓝宝石等脆硬材料的精密研磨加工。

图案化磨盘主要是在磨盘表面加工出不同沟槽图案并对其进行切屑的容屑、排屑。改善磨粒在磨盘上的位置分布,能够有效避免切屑对工件表面的二次划伤,并能减少磨盘的堵塞和磨损,进而获得较高的表面质量。因此,大量学者针对图案化磨盘的设计进行一系列的研究。Wang等^[12]研究了沟槽磨盘对材料去除率的影响,设计的沟槽磨盘与无开槽磨盘的对比实验表明:开槽后磨盘加工区域接触压力增大,研磨液流动速率增大,材料去除率高。虽然实验验证了沟槽磨盘的加工性能优于无开槽磨盘的加工性能,但该学者未研究不同沟槽图案磨盘对加工质量的影响规律。Dong等^[13]建立了材料去除分布模型,发现不同金刚石丸片排布具有不同的材料去除均匀性。虽然,由模型求出的不同排布下磨盘加工性能表现不同,但该学者未研究如何通过优化排布来改善研磨工具的加工性能。Fang等^[14]分析了不同固结磨料磨盘表面图案对蓝宝石片加工的影响规律,运用轨迹非均匀性进行表征,不同图案磨盘所对应的轨迹非均匀性不同。通过优化图案,可以不断降低轨迹非均匀性。丘健等^[15]采用Pro/E软件对金刚石磨盘上的磨粒进行同心圆、纵横、螺旋线三种排布设计,并采用轨迹均匀程度和重合度进行表征,结果表明:三种工具盘加工性能从高到低依次为纵横排布、螺旋线排布和同心圆排布。

然而,在磨盘制备过程中,不仅要获得良好的表面质量,还需要降低磨盘磨损以延长磨盘寿命^[16]。但目前磨盘图案设计较为单一,所设计的槽型很难

同时获得较好的磨粒分布和顺畅的切屑容排,这使得加工质量难以进一步提高。因此,为了提高磨盘寿命和工件表面质量,本文设计了一种双图案非均匀耦合结构的磨盘(DPP),磨盘采用螺旋槽作为排屑槽,其作用是提高磨盘排屑能力,减小磨盘堵塞;采用同心圆槽作为调控槽,其作用是控制磨粒分布,目的是使工件材料的去除更加均匀。基于该原理,制备出新型磨盘,用于对蓝宝石材料的研磨,与传统网格槽盘(GGP)进行实验比较,并从材料去除率、材料去除均匀性、表面粗糙度以及磨盘磨损等角度进行比较。

2 基本原理

2.1 DPP 设计原理及结构

DPP的结构如图1所示,排屑槽采用螺旋型槽,主要作用是增强磨盘排屑效果,减少研磨过程中磨盘的堵塞;同心圆槽结构则主要用于控制磨盘表面金刚石的分布,使得工件材料去除更加均匀。

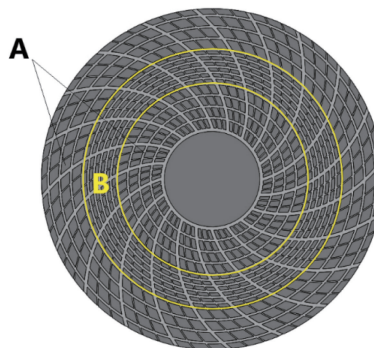


图1 DPP示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DPP

该磨盘的最大特点在于槽型结构的设计。螺旋槽结构是基于阿基米德螺旋线原理设计的。螺旋线是通过一点沿某一方向作匀速运动同时绕该点作匀速圆周运动而形成的。这一运动与研磨液在加工过程中随磨盘作离心运动相似。螺旋槽结构避免了传统固结磨盘沟槽垂直交错而引起研磨液流动不连续的缺点,而且能够及时排除磨屑,不会对工件表面形成二次损伤。螺旋结构函数表达式为

$$r = Rt, 0 < t < 1, \quad (1)$$

$$x = r \cos(\theta t), \quad (2)$$

$$y = r \sin(\theta t), \quad (3)$$

式中: r 为不同时刻 t 与坐标原点之间的距离; R 为磨盘的半径; θ 为不同时刻坐标点与原点的连线与初始方向的夹角的变化率(也称螺旋角度),在其他参数不变的情况下改变 θ 的值将改变螺旋线的形

状。复合磨盘螺旋角度为 60° 、沟槽的宽度为 3 mm、深度为 2 mm、数量为 20 条。

在单点加压工况下,工件中心区域的压力高于外圈区域的压力,因此改变工件中心区域与外圈区域的磨粒分布来改善工件表面的压力分布,可以使工件表面材料去除更加均匀。该方法解决了单一形式沟槽带来压力不均的问题,不仅使工件的受力均匀,而且使磨盘在加工时各区域的磨损区域一致。磨盘图案分布如图 1 所示:A 区域为外圈部分,槽间距为 5 mm;B 区域为中心区域,槽间距为 10 mm;同心圆沟槽宽度同为 1 mm、槽深 2 mm。

2.2 磨盘图案制备

由于磨盘图案设计较为复杂,运用传统加工方式难以成型,而且传统加工在进刀和退刀过程中会产生边界效应。为了解决上述问题,本磨盘制备采用消失模法,模具结构如图 2 所示,该模具采用 3D 打印而成,采用水溶性聚乙烯醇(PVA)材料,这种材料打印的模具强度高,易于脱模。选用 3301# 型树脂和 306# 型树脂配制无磨料的树脂混料,其中 3301# 型树脂的质量分数占比为 $63\% \sim 70\%$,将配制好的树脂混料铺在基体盘上[见图 3(a)],在紫外光下固化 15 min 左右,形成无磨料固化层[见图 3(b)]。再将无磨料树脂和金刚石微粉按质量比 3:1 进行混合,加入气相二氧化硅、分散剂(两者质量占主成分质量的 0.5%),搅拌均匀,铺平后放入模具[见图 3(c)],最后用紫外光固化 2 h。当树脂固结后放入水中浸泡 3 h 后用水冲洗即可获得脱模成型模具[见图 3(d)]。用消失模法制备可设计出复杂且难以加工的图案,还可避免加工过程造成崩边和边界效应,能够保证磨盘的强度和耐用度。

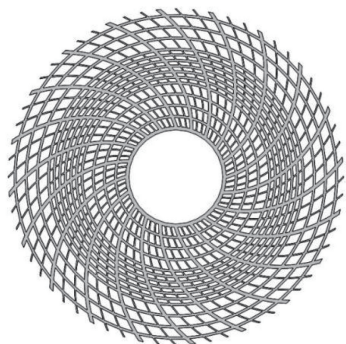


图 2 磨盘模具

Fig. 2 Mould of DPP

2.3 研磨设备及实验

本研究所有实验均在型号为 UNIPOL-1200S 的科晶自动压力研磨抛光机上进行,并选用蓝宝石

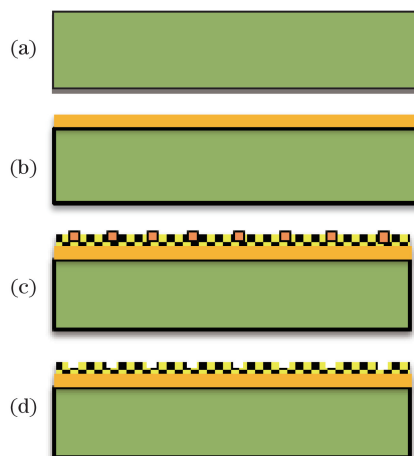


图 3 制备过程图。(a)基体盘;(b)具有无磨料层的基底;(c)加磨料层并放入模具;(d)脱模成型

Fig. 3 Preparation process. (a) Basic plate; (b) basic plate with non-abrasive layer; (c) adding abrasive layer and putting it into the mold; (d) demoulding forming

衬底为工件材料,开展单面研磨实验,以验证磨盘的加工效果。试样为 2 inch(1 inch=2.54 cm)C 向蓝宝石衬底。

研磨时,工件贴在载物盘上作自转运动,同时绕磨盘作公转运动,研磨压力由载物盘提供,使衬底与上、下盘面压合并通过相对运动实现研磨加工。为了更好地比较新型磨盘的性能,选用传统 GGP 分别进行实验(见图 4),具体实验参数如表 1 所示。实验过程中,对研磨前后衬底的厚度、表面粗糙度和表面形貌进行测量,最后在加工完成后检测磨盘的表面形貌。工件的厚度采用测厚仪进行测量;衬底表面粗糙度采用 3D 光学轮廓仪,选取 P1、P2、P3 三个点进行观测对比;磨具表面形貌采用光学显微镜进行观测。

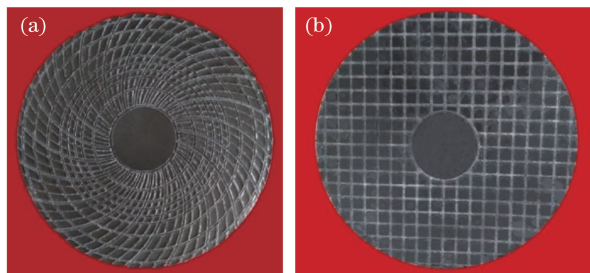


图 4 两种实验盘。(a) DPP; (b) GGP

Fig. 4 Two test pads. (a) DPP; (b) GGP

3 分析与讨论

磨盘的研磨压力和转速比是影响研磨加工质量

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Pad speed / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	Rotational speed ratio	Pressure / kg	Eccentricity / mm	Lapping time / min
60	0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3	2g, 3g, 4g, 5g, 6g, 7g	85	20

Note: g is gravitational acceleration.

的重要参数。为了评价压磨盘的加工效果,实验分别在不同研磨压力和转速比下开展,并从表面粗糙度、材料去除率和磨盘形貌三方面进行评价。

3.1 衬底表面质量

用 3D 光学轮廓仪观测衬底的表面形貌。研磨转速比为 1.1,偏心距为 85 mm,研磨时间为 1 h,研磨压力为 4g kg。由于 DPP 通过同心圆槽对磨粒位置进行调控,使得工件表面的压力分布更加均匀,故工件表面材料去除均匀性好。衬底表面形貌如图 5 所示。从 3D 光学轮廓仪拍摄的工件表面形貌来看,DPP 的加工工件表面凹坑和划痕比网格槽更少。为了能够对比 DPP 和 GGP 两种磨盘下的实际加工差异,需要对工件表面划痕和凹坑等缺陷进行定量统计。鉴于加工后工件表面破碎凹坑具有明显的盆地特征,采用数字图像处理技术中的分水岭分割方法对采集的图像进行识别标记,处理前后的图

像如图 6 所示。通过计算破碎凹坑在工件表面的像素占比,得出采用 DPP 加工后的工件表面破碎凹坑约为采用 GGP 加工的 35%,加工缺陷明显减少。因此,选择 DPP 进行蓝宝石研磨加工,能够获得更好的工件表面质量。

为了量化比较不同磨盘的加工性能,对其加工后表面质量进行检测。图 7 给出不同研磨压力和转速比下研磨蓝宝石衬底的表面粗糙度,比较得出 DPP 研磨后衬底的表面粗糙度明显低于 GGP,同时可以看出转速比小数位为奇数时的粗糙度值低于相邻偶数值的转速比。当转速比小数位为奇数时磨粒轨迹在工件上的重复率低,材料去除更均匀,从而表面粗糙度值更小,而且在不同转速比下 DPP 平均表面粗糙度为 129.4 μm ,比 GGP 的平均粗糙度低 16.2%,平均峰谷(PV)值为 6.6 μm ,比 GGP 低 12.2%。另外,衬底的粗糙度随压力的

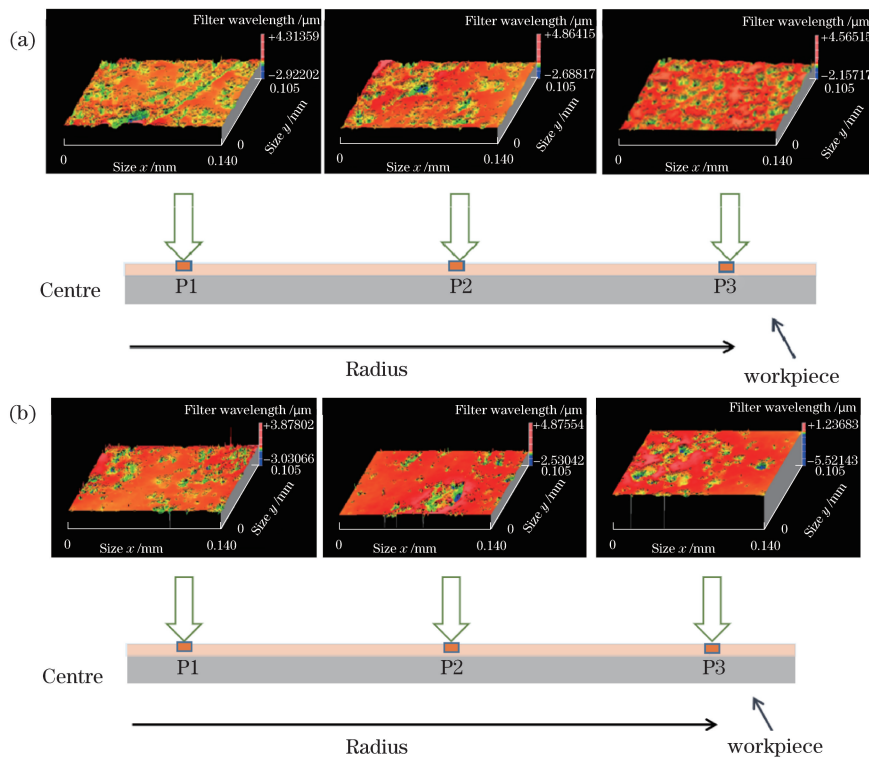


图 5 两种磨盘加工工件形貌。(a) GGP 加工工件表面形貌;
(b) DPP 加工工件表面形貌

Fig. 5 Morphologies of the workpiece processed by two kinds of pads. (a) Surface morphology of the workpiece processed by GGP; (b) surface morphology of the workpiece processed by GGP

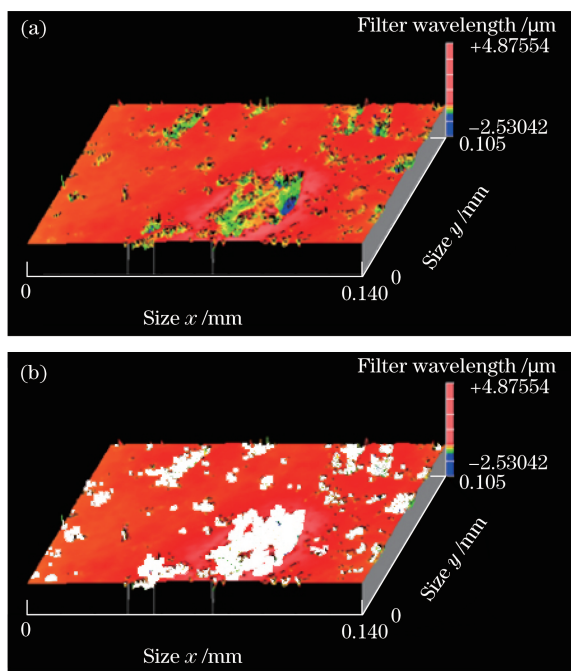


图 6 工件表面缺陷提取。(a)工件原形貌;
(b)缺陷提取后工件形貌

Fig. 6 Extraction of surface defects on the workpiece.
(a) Original morphology of workpiece;
(b) morphology of workpiece after defect extraction

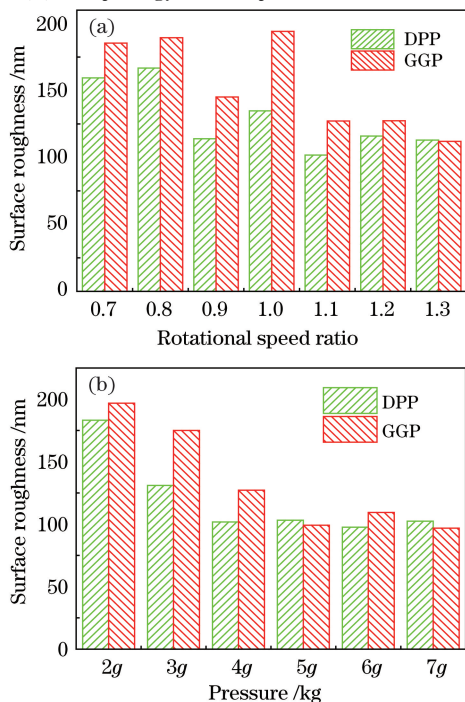


图 7 不同磨盘研磨蓝宝石衬底的表面粗糙度。(a)转速比对表面粗糙度的影响;(b)压力对表面粗糙度的影响
Fig. 7 Surface roughness of sapphire substrate polished by different pads. (a) Influence of rotational speed ratio on surface roughness; (b) influence of pressure on surface roughness

增大而减小。当研磨压力从 2g kg 增大到 4g kg 时,两种磨盘表面粗糙度快速降低,在不同压力下, DPP 平均表面粗糙度比 GGP 低 10.6%, 平均 PV 比 GGP 低 9.1%。这主要是因为随着研磨压力的增大,磨盘表面更多的磨粒参与切削,快速去除衬底表面不平整的部分,从而使得衬底粗糙度降低得非常明显。但随着压力继续增大,有效磨粒数不再增加,磨粒也会向黏合剂内回退,使得粗糙度难以进一步降低。但总的来说,采用 DPP 能获得更小的表面粗糙度,表面粗糙度在 80~100 nm 以内。同时,随着转速比的增大,PV 值也在逐渐降低。且在整个加工过程中,DPP 对应的 PV 值均比网格磨盘对应的 PV 值小很多,且 DPP 的 PV 值减小幅度更加明显,最小值可达到 5.829 μm (如图 8 所示)。

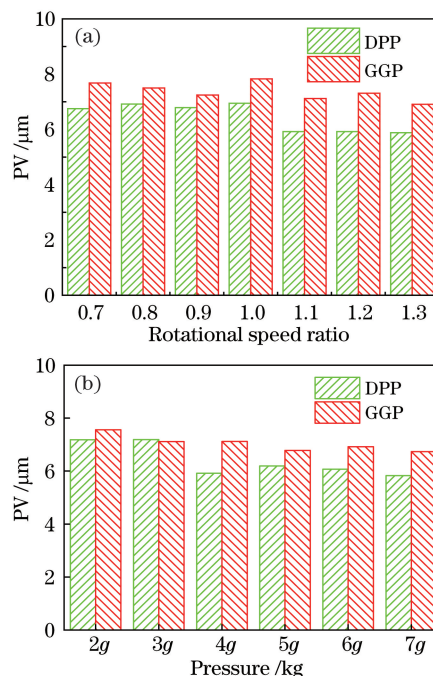


图 8 不同磨盘研磨蓝宝石衬底的 PV 值。

(a)转速比对 PV 的影响;(b)压力对 PV 的影响

Fig. 8 PV of sapphire substrate polished by different pads. (a) Effect of rotational speed ratio on PV;
(b) effect of pressure on PV

3.2 材料去除率

不同研磨压力和转速比下蓝宝石衬底的材料去除率如图 9 所示。随着转速比的增大,材料去除率处于波动状态,材料去除率在转速比小数位为偶数时偏低,转速比小数位为奇数时偏高,分析原因:转速比小数位为奇数时,磨粒轨迹重合率低,磨粒有效轨迹长度比转速比小数位为偶数时长,去除的材料多[见图 9(a)]。随着压力的增大,材料去除率先增大然后减小。压力逐渐增大,参与加工的磨粒数也

逐渐增多,但磨粒超过最大切深时,随着压力的增大,磨盘排屑能力降低,导致材料去除率降低[见图 9(b)].但在加工过程中,DPP 的材料去除率始终低于 GGP,在不同转速下,DPP 平均材料去除率比 GGP 低 14.3%,在不同压力下,DPP 平均材料去除率比 GGP 低 14.7%。在工件与磨盘接触的工作区域,由于 DPP 在工件中心增加更多的沟槽,使得 DPP 的有效面积小于 GGP,故参与加工的磨粒数较少,导致材料去除率也始终低于 GGP,但从数据上可以看出差距很小。虽然 DPP 的效率略低,但材料去除分布更均匀。

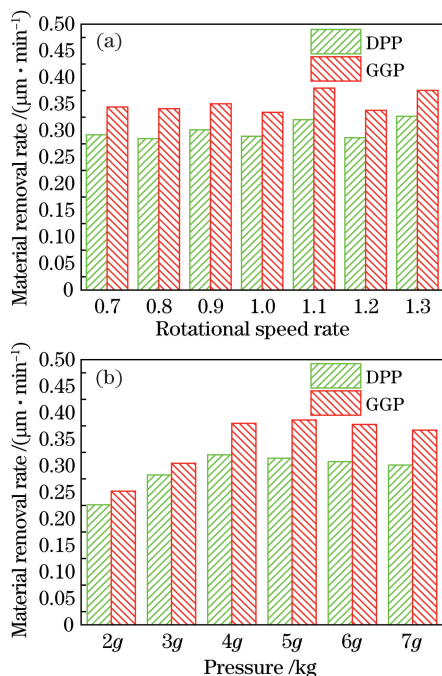


图 9 不同研磨参数下材料去除。(a)转速比对材料去除率的影响;(b)压力对材料去除率的影响
Fig. 9 Material removal under different polishing parameters. (a) Effect of rotational speed ratio on material removal rate; (b) effect of pressure on material removal rate

为了进一步比较材料去除分布效果,在研磨转速比为 1.1,研磨压力为 4g kg 的条件下观察不同槽型磨盘材料去除分布(见图 10)。从图可以看出,DPP 的平均去除厚度为 18.70 μm,GGP 的平均去除厚度为 21.05 μm,GGP 的去除效率略高于 DPP,但 GGP 加工后的工件表面去除厚度值波动远大于 DPP,计算得到 GGP 的去除厚度非均匀性值(CV)为 0.0731,而 DPP 的去除厚度非均匀性值为 0.0494,GGP 的去除厚度非均匀性值比 DPP 高 32%。这反映出 DPP 对材料的去除更均匀,工件表面更加平整。

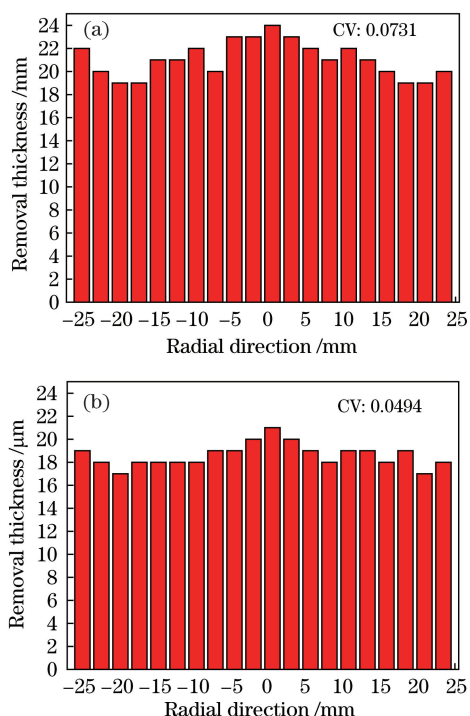


图 10 GGP 与 DPP 的去除厚度分布。(a) GGP 的去除厚度分布;(b) DPP 的去除厚度分布
Fig. 10 Removal thickness distribution of GGP and DPP. (a) Removal thickness distribution of GGP; (b) removal thickness distribution of DPP

3.3 磨盘表面形貌

为了对比 GGP 与 DPP 表面加工后的堵塞情况,在相同加工条件下,基于两种磨盘分别加工蓝宝石片,并观察在 40, 80, 120 min 时的磨盘表面形貌(见图 11)。随着研磨时间的增加,磨盘表面的亮斑渐渐增多,这是由磨盘堵塞逐渐加剧造成的。同时磨盘表面出现凹坑说明有少量磨粒脱落,但磨盘表面的磨粒数没有明显减少,这反映出磨盘的自锐性较好。通过对比两个磨盘的表面形貌,可以看出,DPP 的表面凹坑数和白色亮点数都少于 GGP,同样采用图像处理的方法来计算磨盘,由于磨屑造成的堵塞具有明显的磨屑色泽特征,适合采用阈值法进行图像分割处理(见图 12),获得堵塞面积,计算出 DPP 的亮斑面积比 GGP 低 70%。由此说明 DPP 的堵塞程度低于 GGP 的堵塞程度。形成这种巨大差异的原因在于:GGP 的沟槽为十字型,会与研磨液偏摆流动方向形成运动干涉,导致研磨液流动不畅通,从而易导致磨屑在磨盘沟槽交汇处形成堵塞堆积[见图 13(a)];而 DPP 采用阿基米德摆线设计的沟槽与研磨液加工时的流动方向相吻合,研磨液和磨屑更易排出[见图 13(b)]。

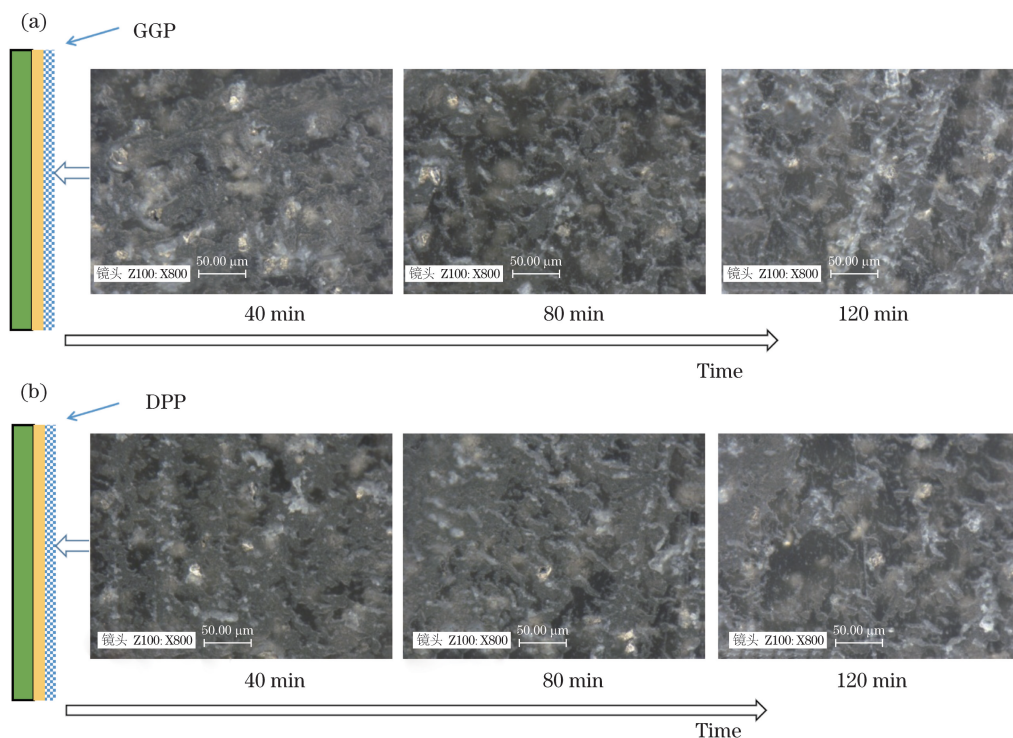


图 11 两种磨盘表面形貌。(a) GGP 表面形貌;(b) DPP 表面形貌

Fig. 11 Surface morphologies of the two pads. (a) Surface morphologies of GGP; (b) surface morphologies of DPP

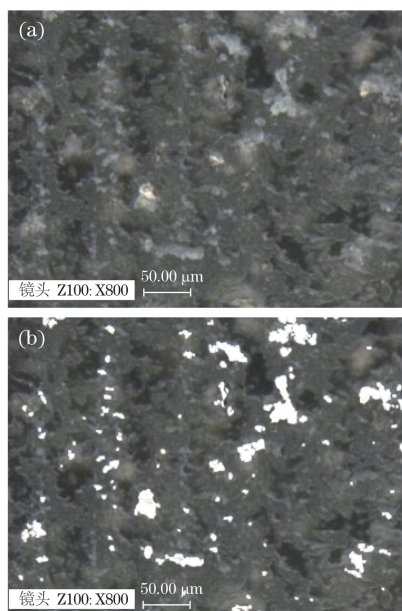


图 12 磨盘形貌图。(a)磨盘原形貌图;(b)磨盘磨屑提取图
Fig. 12 Morphology of the FAP. (A) Original morphology of the FAP; (b) extraction of debris from the FAP

4 结 论

针对传统固结磨盘由于表面沟槽形式单一使得加工蓝宝石等脆硬材料加工质量难以保证的问题,提出了一种螺旋槽与同心圆槽耦合结构的固结磨盘的设计与实验研究,并从理论上分析了该磨盘的加

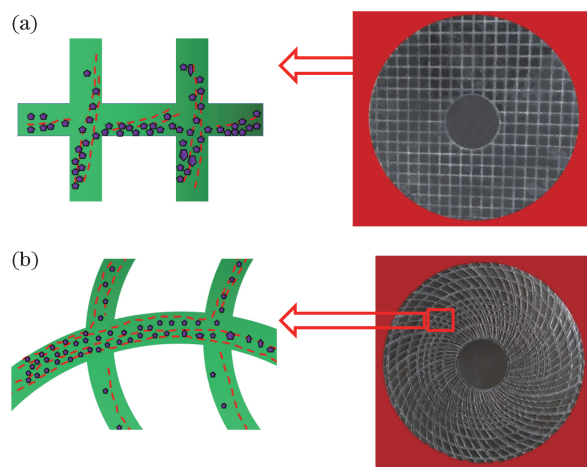


图 13 两种槽型盘磨屑流动示意图。(a) GGP 磨屑流动示意图;(b) DPP 磨屑流动示意图

Fig. 13 Schematic diagram of abrasive debris flow in two kinds of groove plates. (a) Schematic diagram of abrasive debris flow in GGP; (b) schematic diagram of abrasive flow in DPP

工机理和加工质量。从工件表面形貌、表面粗糙度、材料去除率以及磨盘表面形貌等角度,对比分析了新型磨盘 DPP 与传统磨盘 GGP 的加工性能。研究表明:采用 GGP 研磨蓝宝石时比采用 DPP 研磨时的材料去除率略高,在不同转速比和压力时分别提高了 14.3% 和 14.7%,这主要是由于 DPP 磨盘表面的有效加工面积略低于 GGP 磨盘(约 11.4%)。

但是,采用 DPP 研磨的工件材料去除厚度非均匀性更低,约低于 GGP 的 32%。通过对比研磨后的工件表面形貌、表面粗糙度和 PV,发现采用 DPP 研磨后的工件表面破碎凹坑更少,其数量约为 GGP 的 35%;采用 DPP 研磨后的工件表面粗糙度在不同转速比和压力下也分别降低了 16.2%和 10.6%。相应地,采用 DPP 研磨后的工件 PV 也分别降低了 12.2%和 9.1%。对研磨后的磨盘进行表面形貌进行检测和统计分析,发现 DPP 因表面具有复杂耦合图案可很好地抑制堵塞磨损,其堵塞磨损程度较 GGP 降低了约 70%。由此可见,与单一图案的固结磨盘相比,复杂耦合图案对提升磨盘的加工性能具有明显的促进作用。面对越来越大的由工件加工尺寸带来的大接触加工区和难排屑等问题,这种新型复杂耦合图案磨盘的优越性将更加凸显。

参 考 文 献

- [1] Zhang N C, Wang P, Hua X, et al. Optical radiation characteristics and structural phase transition of sapphire under megabar pressure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0730002.
张宁超, 王鹏, 华翔, 等. 兆巴压力下蓝宝石发光辐射特性与结构相变 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0730002.
- [2] Hu Z W, Shao M J, Guo J M, et al. Comparison of grinding characteristics of different crystal surfaces for sapphire [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1250-1258.
胡中伟, 邵铭剑, 郭建民, 等. 蓝宝石不同晶面磨削特性比较 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1250-1258.
- [3] Hu X B, Hao Q, Guo Z R, et al. Dicing of sapphire wafer with all-fiber picosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102016.
胡小豹, 郝强, 郭政儒, 等. 全光纤皮秒激光切割蓝宝石晶圆的实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102016.
- [4] Gagliardi J J, Kim D, Sokol J J, et al. A case for 2-body material removal in prime LED sapphire substrate lapping and polishing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(3): 348-354.
- [5] Liang Z Q, Wang X B, Wu Y B, et al. An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of monocrystal sapphire [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(4): 868-876.
- [6] Arunachalam A P S, Idapalapati S, Subbiah S. Multi-criteria decision making techniques for compliant polishing tool selection [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79 (1/2/3/4): 519-530.
- [7] Tam H Y, Cheng H B, Wang Y W. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192/193: 276-280.
- [8] Li M. Pattern optimization of polished abrasive pad and performance evaluation of polishing pad [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
李茂. 固结磨料抛光垫图案优化及抛光垫性能评价 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [9] Zhu Y W, Wang J, Li J, et al. Research on the polishing of silicon wafer by fixed abrasive pad [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(6): 723-727, 732.
朱永伟, 王军, 李军, 等. 固结磨料抛光垫抛光硅片的探索研究 [J]. *中国机械工程*, 2009, 20(6): 723-727, 732.
- [10] Yu J F. Studies on properties and application of novel CMP pad and slurry [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
余剑峰. 新型化学机械抛光垫和抛光液的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [11] Du J X, Su J X, Wang Z H, et al. Formation mechanism of non-uniformity on material removal in chemical mechanical polishing of hard and brittle crystal substrate [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2012, 41(4): 1130-1137.
杜家熙, 苏建修, 王占合, 等. 硬脆晶体基片化学机械抛光材料去除非均匀性形成机制研究 [J]. *人工晶体学报*, 2012, 41(4): 1130-1137.
- [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] Dong Z C, Cheng H B. Study on removal mechanism and removal characters for SiC and fused silica by fixed abrasive diamond pellets [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 85: 1-13.
- [14] Fang C F, Liu C, Zhao Z X, et al. Study on geometrical patterns of textured fixed-abrasive pads in sapphire lapping based on trajectory analysis [J]. *Precision Engineering*, 2018, 53: 169-178.
- [15] Qiu J, Chen Z X, Wei S J, et al. Design of orderly arraying diamond grits and its trajectory simulation based on PRO/E [J]. *Superhard Material Engineering*,

2012, 24(6): 21-24.

丘健, 陈泽鑫, 魏少佳, 等. 基于 PRO/E 的金刚石磨粒有序排布设计及其运动轨迹仿真[J]. 超硬材料工程, 2012, 24(6): 21-24.

[16] Deng W W. Preparation and experimental study of

brazed micro-powder diamond grinding disc with surface grooved abrasive block[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2017.

邓文文. 表面开槽磨块化钎焊微粉金刚石磨盘的制备与实验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2017.