

# 在线电解修整磨削与化学机械抛光相结合的蓝宝石基片组合加工技术

徐志强<sup>1,2</sup> 尹韶辉<sup>3</sup> 姜胜强<sup>1,2</sup> 朱科军<sup>1,2</sup>

- 1.湘潭大学机械工程学院,湘潭,411105
- 2.复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心,湘潭,411105
- 3.湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心,长沙,410082

**摘要:**通过分析 ELID 磨削和 CMP 抛光两种加工技术的原理和特点,充分结合两种技术的优点,对蓝宝石基片进行超光滑纳米级精度的组合加工。从理论上分析和计算了蓝宝石的临界切削深度,以及在不同粒度砂轮下的脆性和延性磨削方式;采用不同粒度的砂轮对蓝宝石基片进行超精密 ELID 磨削实验,快速地获得高质量的加工表面,同时采用磁流变斑点法对加工面的亚表面损伤进行测量;利用 CMP 抛光技术对磨削加工后的表面进行光整,以减少磨削时产生的加工缺陷,使工件的表面质量得到进一步改善与提高,最终获得亚纳米级的表面粗糙度。

**关键词:**蓝宝石基片;在线电解修整磨削;化学机械抛光;组合加工技术  
**中图分类号:**TG58

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.11.009 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## ELID Grinding and CMP Compound Processing Technology for Sapphire Substrates

XU Zhiqiang<sup>1,2</sup> YIN Shaohui<sup>3</sup> JIANG Shengqiang<sup>1,2</sup> ZHU Kejun<sup>1,2</sup>

- 1.School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan,411105
- 2.Engineering Research Center of Complex Tracks Processing Technology and Equipment of Ministry of Education, Xiangtan, Hunan,411105
- 3.National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha,410082

**Abstract:**The machining principles and characteristics of ELID grinding and CMP were analyzed, a new technology integrated with ELID grinding and CMP was applied to machine ultra smooth and nano-precision sapphire substrates. At first, the critical depth of cut was calculated through the theory analyses, the ductile and brittle processing ways of sapphire substrates discussed by different particle sizes of the grinding wheels. The high-quality machined surfaces were obtained by a series of ELID grinding experiments with these grinding wheels, and the sub-surface damages of ground surfaces were measured by the magnetorheological finishing (MRF) method; as the final finishing, CMP was used to decrease subsurface damages and to further improve surface quality, and the sub-nanometer of surface roughness was achieved.

**Key words:**sapphire substrate; electrolytic in-process dressing (ELID) grinding; chemical mechanical polishing (CMP); compound processing technology

### 0 引言

蓝宝石是一种氧化铝( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )的单晶,俗称刚玉,具有耐高温、耐磨损、抗腐蚀、硬度高、透光性好、性质稳定等优良的物化和机械性能。蓝宝石作为一种重要的技术晶体,已被广泛用于红外军事装置、卫星空间技术、高强度激光等,成为实际应用的半导体 GaN/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 发光二极管(LED)、大

规模集成电路 SOI 和 SOS 及超导纳米结构薄膜等最为理想的衬底材料<sup>[1-2]</sup>。近年来随着 LED 技术和手机面板技术的快速发展,高精度、高质量、无表面缺陷的蓝宝石基片加工技术已经成为国际学术界和产业界的研究热点。蓝宝石材料高硬度(莫氏硬度 9 级,仅次于金刚石)、高脆性、高耐磨性等特点,给蓝宝石基片制造和加工带来了很大的困难,使得蓝宝石加工制造成本十分昂贵。目前蓝宝石基片的表面研磨和抛光制造成本已经占

到总加工成本的 80%,因此十分有必要提高蓝宝石基片的加工效率和精度,以降低加工成本<sup>[3]</sup>。

蓝宝石基片的传统加工方法主要有游离磨料研磨、化学腐蚀和化学机械抛光(CMP)工艺。游离磨料研磨工艺所加工的蓝宝石表面粗糙度较大、存在较大的损伤层和残余应力,这些缺陷将严重影响蓝宝石的加工质量,因此后续抛光需要很长的时间来去除这些缺陷<sup>[4]</sup>。CMP工艺是目前蓝宝石基片抛光普遍采用的加工工艺,国内外研究者在抛光原理、工艺装备、工艺参数等方面做了大量的研究工作<sup>[5-7]</sup>,也有部分学者就蓝宝石加工效率和质量开发了一些新工艺和新方法。SEYAMA等<sup>[8]</sup>发明了一种可控气氛的化学机械抛光方法,将抛光单元置于一个密封的容器中,然后根据材料的性质在密闭容器中充入合适的气体,实验验证了利用该方法能大幅提高蓝宝石的抛光效率。WEI等<sup>[9]</sup>尝试用紫外激光来抛光蓝宝石晶体,并讨论了不同加工参数对抛光效率的影响。近年来,国内外开发了一些新工艺,但是这些新工艺不同程度地存在工艺费用昂贵、工艺过程复杂、不适合批量生产等问题。

在线电解修整(ELID)磨削是一种成熟的加工工艺,可实现硬脆材料的高精度、高效率磨削加工<sup>[10]</sup>。本文基于 ELID 磨削和 CMP 光整加工的机理与特点,将两种工艺相结合,对蓝宝石基片进行纳米级精度的加工实验,能快速地得到高质量的蓝宝石基片。

1 蓝宝石基片 ELID 超精密磨削

1.1 蓝宝石基片延性磨削理论

根据硬脆材料的加工理论,蓝宝石基片会有延性和脆性两种加工去除方式。采用延性去除方式能够实现材料的超精密磨削,并获得高质量的加工表面。要实现蓝宝石基片的延性去除,就必须使材料的去除深度小于临界切削深度,即硬脆材料磨削从脆性域转移到延性域的临界切削深度 $d_c$ 值<sup>[11]</sup>:

$$d_c = 0.15 \frac{E}{H} (\frac{K_c}{H})^2 \tag{1}$$

式中, $d_c$ 为临界深度,nm; $E$ 为材料的弹性模量,GPa; $H$ 为材料硬度,GPa; $K_c$ 为材料的断裂韧性,GPa·m<sup>1/2</sup>。

根据蓝宝石材料的基本物理参数,可以计算出蓝宝石材料实现延性磨削的临界切削深度。所选用的蓝宝石基本参数如表 1 所示。

通过式(1)计算可以得到蓝宝石材料的临界切削深度,但是要实现材料延性域磨削,还需了解

表 1 蓝宝石基片基本物理性能参数

Tab.1 The physical parameters of the sapphire substrate

密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	硬度 $H$ (GPa)	泊松比 $\mu$	剪切模量 $G$ (GPa)	弹性模量 $E$ (GPa)	断裂韧性 $K_c$ (GPa·m <sup>1/2</sup> )
3.98	19.6	0.25~0.30	145	345	0.003

砂轮在磨削时单颗磨粒所能实现的最大切削深度。根据砂轮单颗磨粒的最大切削深度公式可以计算出不同粒度的砂轮在试验条件下的最大切削深度。砂轮单颗磨粒的最大切削深度计算公式<sup>[12]</sup>为

$$h_{max} = (\frac{4v_w}{v_s C r} \sqrt{\frac{a}{d_s}})^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中, $v_w$ 为工件速度; $v_s$ 为砂轮的圆周线速度; $d_s$ 为砂轮直径; $C$ 为砂轮单位面积的有效磨粒数; $a$ 为磨削深度; $r$ 为切削路径任一点处切屑宽度与厚度的比,一般为 10~20,在本文中假设为 10。

所选用的砂轮直径 $d_s$ 均为 145 mm,砂轮转速均为 1 000 r/min,ELID 磨削所选用的砂轮基本参数和加工条件如表 2 所示。

表 2 ELID 磨削砂轮基本参数和加工条件

Tab.2 The parameters of ELID grinding wheel and machining conditions

金属结合剂砂轮	平均磨粒直径 $d(\mu\text{m})$	单位面积的有 效磨粒数 $C$	工件速度 $v_w$ (mm/s)	磨削深度 $a(\mu\text{m})$
SD320	47.0	27.59	6.4	3
SD1200	13.0	49.91	3.2	2
SD4000	3.1	99.85	2.4	1
SD8000	1.6	147.83	1.6	1

根据砂轮基本参数、磨削条件,以及表 1 和表 2 中的基本参数,通过以上公式计算得出蓝宝石晶体在不同粒度砂轮下的延性去除和脆性去除分布图,见图 1。从图中可知:粗粒度砂轮(320 号和 1200 号砂轮)ELID 磨削所能实现的单颗磨粒的最大切削深度已经超出了蓝宝石实现延性磨削的临界切削深度,如虚线所示;在细粒度砂轮下,如

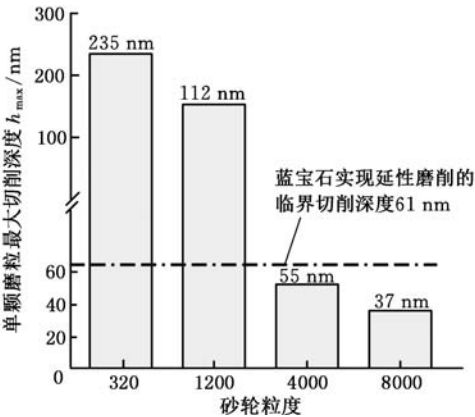


图 1 不同粒度砂轮的最大切削深度

Fig.1 The maximum cutting depth of different particle size grinding wheels

4000 号和 8000 号砂轮, ELID 磨削能实现蓝宝石材料的延性域去除方式。

1.2 蓝宝石 ELID 磨削实验条件

工件为 35 mm×15 mm×0.5 mm 的蓝宝石基片, ELID 磨削实验在一台立式超精密的三轴磨床 (HSG-10A2, Nachi-Fujikoshi Corp.) 上进行, 如图 2 所示。加工过程中, 在旋转砂轮和固定电极形成的微小间隙中注入具有电解能力的电解液。在电解装置的电解效应下, 砂轮表面的金属结合剂逐渐去除, 并形成绝缘氧化膜。同时工件摩擦砂轮, 并使砂轮表面的氧化膜脱落而露出锋利的磨粒, 由于电解修锐过程在磨削时连续进行, 故可以实现高效率的磨削。ELID 磨削包含以下步骤: ①金属结合剂砂轮的超精密修整; ②砂轮的预电解磨削; ③工件的在线电解磨削。在 ELID 磨削过程中, 依次使用不同粒度的金属结合剂砂轮 (320 目、1200 目、4000 目、8000 目) 进行 ELID 磨削, 通过 ELID 专用电源来控制电解参数, 并且调整好每个砂轮所需的合适加工条件。蓝宝石基片 ELID 磨削实验条件如表 3 所示, 蓝宝石基片 ELID 磨削完成后, 采用白光干涉仪 (Zygo Newview5230) 和光学显微镜 (VHX-700F Keyence Corp.) 观测其表面形貌和粗糙度。

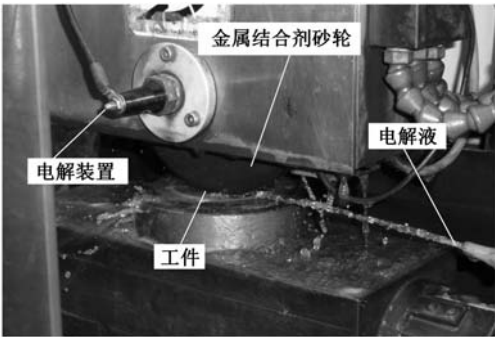


图2 蓝宝石基片 ELID 磨削加工

Fig.2 The sapphire substrate of ELID grinding

表 3 ELID 磨削实验条件

Tab.3 ELID grinding conditions

材料	蓝宝石				
机床	ELID 平面磨床				
砂轮	金属结合剂砂轮				
	直径: 145 mm (320 目、1200 目、4000 目、8000 目)				
电源	电源 (FUJI Corp.), 电流: 6 A, 电压: 90 V, 占空比: 2 μs				
砂轮转速	1 000 r/min				
磨削条件	砂轮型号	320	1200	4000	8000
	切削深度 (μm)	3	2	1	1
	工件速度 (mm/s)	6.4	3.2	2.4	1.6
	总的切削深度 (μm)	20	10	5	2

1.3 实验结果及讨论

图 3 所示为磨削后的蓝宝石基片表面微观形

貌。如图 3a 所示, 蓝宝石表面在经过 320 号砂轮磨削后, 工件表面几乎都是脆性变形区域, 工件表面未见磨削痕迹。如图 3b 所示, 经过 1200 号砂轮磨削后, 工件表面部分可见磨削痕迹, 出现了脆性区域与延性域并存的迹象。如图 3c 所示, 经过 4000 号砂轮磨削后, 磨削纹路清晰, 但是工件表面依旧存在着少量脆性区域。如图 3d 所示, 经 8000 号砂轮磨削后, 工件表面磨削纹路十分清晰, 表示材料已经完全实现了延性域的磨削。按照理论计算结果, 4000 号和 8000 号砂轮能够实现蓝宝石延性域的磨削, 但是从实验后的结果来看, 两者都存在少量的脆性域, 这是因为影响蓝宝石材料的延性域磨削的因素很多, 除了砂轮速度、工件速度、砂轮平均磨粒尺寸、磨削深度外, 还有机床本身的精度 (如主轴回转精度、刚度、进给控制系统的分辨率、机床导轨的运动精度等), 另外还要求砂轮的修整精度非常高, 磨削时的电解液和电解参数也需要控制适当。

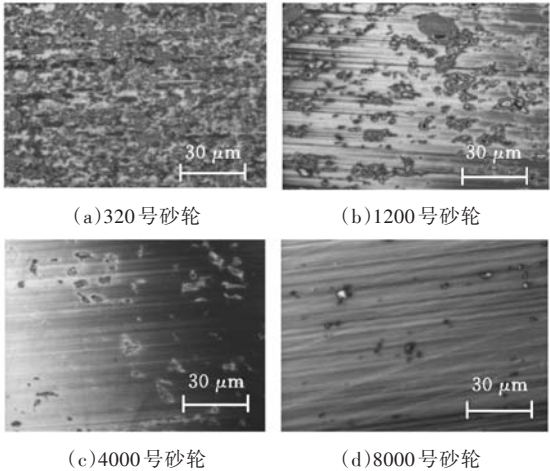


图3 蓝宝石表面不同粒度砂轮磨削后的微观形貌

Fig.3 The microscopic morphology of sapphire surface by different particle sizes after grinding

通过以上计算和实验, 图 4 总结了在 ELID 磨削时不同粒度砂轮与蓝宝石去除方式的关系, 在砂轮粒度小于 1200 目时, 工件表面的去除是在脆性磨削域进行的, 当砂轮粒度大于 4000 目时, 零件表面以延性磨削方式为主, 砂轮粒度在 1200 目至 4000 目时, 蓝宝石表面去除存在一个过渡域, 在

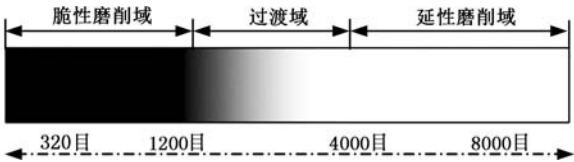


图4 不同粒度砂轮的磨削域

Fig.4 The grinding field of different particle sizes grinding wheel



该域中蓝宝石表面既有脆性去除又有延性去除。

利用ZYGO白光干涉仪测量工件的表面粗糙度,测量结果如图5所示,图中分别显示了不同磨粒的砂轮下,工件所获得的表面粗糙度。如图5a所示,经过320号砂轮磨削以后,蓝宝石的表面粗糙度均方根值(RMS)为528.36 nm、 $R_a=215.45$  nm;图5b所示,经过1200号砂轮磨削以后,蓝宝石的表面粗糙度RMS值为185.43 nm、 $R_a=136.64$  nm;如图5c所示,经过4000号砂轮磨削以后,蓝宝石的表面粗糙度RMS值为67.57 nm、 $R_a=16.79$  nm;如图5d所示,经过8000号砂轮磨削以后,蓝宝石的表面粗糙度RMS值为15.95 nm、 $R_a=8.43$  nm。通过实验证明,通过ELID磨削方式依次采用不同粒度的砂轮有利于工件快速实现超精密延性磨削,并获得高质量的加工表面。

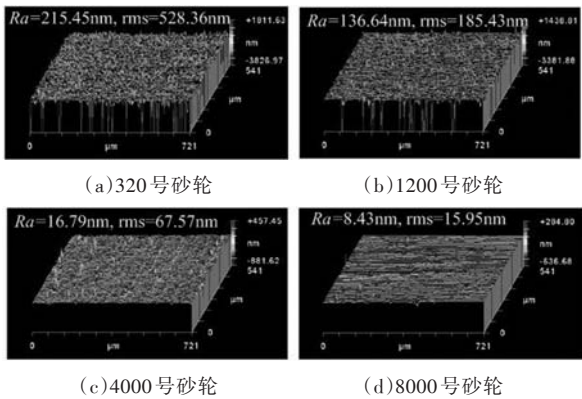


图5 蓝宝石基片的表面粗糙度

Fig.5 The surface roughness of the sapphire substrate

2 亚表面损伤测试

本实验采用磁流变抛光斑点法对待测面进行亚表面损伤的测量,由于磁流变抛光采用柔性剪切去除的抛光方式,故能够完全去除亚表面损伤且不会带来新的损伤。本次实验装置和测量方法如图6所示,具体方法为:在抛光过程中,将ELID磨削后的工件置于磁流变液中并调整好抛光间隙,然后通过磁流变抛光头在ELID磨削表面抛出一个凹坑,凹坑穿过已磨削表面的亚表面损伤层,以保证所有的亚表面损伤均暴露出来。最后利用光学显微镜对抛光后的凹坑依次向底面进行多点测量。

磁流变抛光后,利用光学显微镜对加工面的亚表面损伤进行检测,测量时,首先在凹坑附近找到磨削面,并测试磨削面的微观形貌,同时将该磨削面设为基准平面,然后从基准平面出发沿着凹坑轮廓线进行亚表面损伤的观测,并将每个测量区域的起点和终点的两次均值作为亚表面损伤的

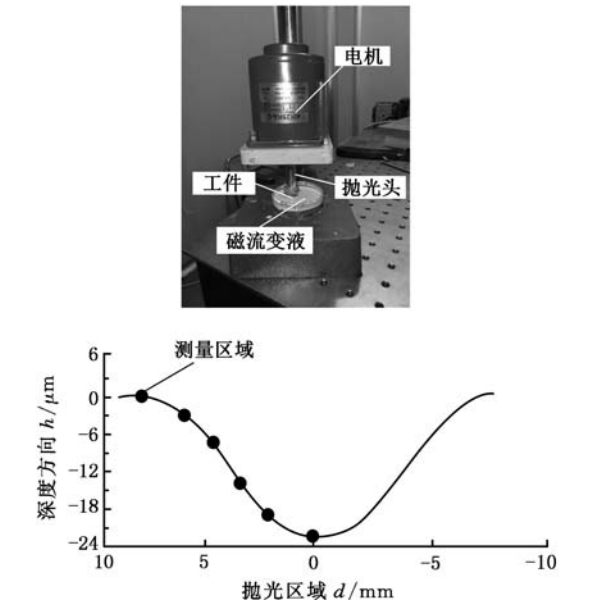


图6 亚表面损伤磁流变抛光实验装置及测量方式  
Fig.6 The magnetic rheological polishing experimental device of surface damage and measurement method

深度,每个试件测量6个区域的深度。在测量过程中,观测每个被测区域的亚表面损伤情况,当测量至某个深度时,被测区域无亚表面损伤(也就是表面斑点消失),再往下继续测量也无损伤,则认定该深度为最终的亚表面损伤深度。图7所示为320号金属结合剂金刚石砂轮ELID磨削后蓝宝石加工面的亚表面损伤分布情况,从亚表面损伤分布规律来看,该磨粒砂轮磨削后的损伤深度为22.3 μm左右。

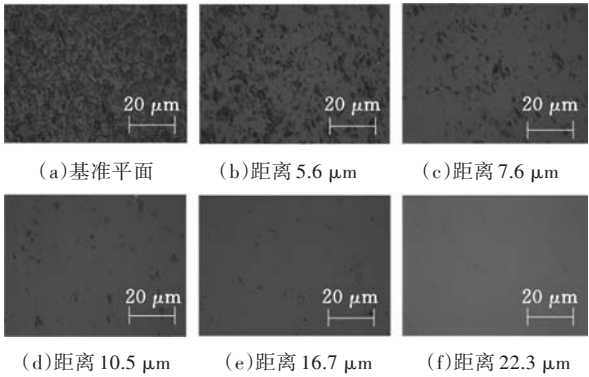


图7 蓝宝石亚表面裂纹显微图(320号砂轮磨削后)  
Fig.7 The surface crack micrograph of sapphire surface(after grinding by No. 320 grinding wheel)

利用该方法对其他ELID磨削表面的亚表面损伤进行测量,测量结果如表4所示。从表4可知,经过不同粒度的砂轮ELID磨削后,蓝宝石基片的亚表面损伤层深度随着砂轮粒度的减小而逐步减小,这是由于大粒度的砂轮主要以脆性去除的方式对表面进行加工,使裂纹深度扩展,因此增大了亚表面损伤层深度。但是随着砂轮粒度的减

小,尤其砂轮粒度从4000目到8000目时,加工面的损伤层深度并未出现明显的减小趋势,造成上述现象的可能原因在于机床本身的精度和加工条件只能保持在一定精度范围,因此磨粒粒径的减小未能对亚表面损伤层产生实质性的影响。

表4 不同粒度的砂轮磨削后产生的亚表面损伤深度  
Tab.4 The different depth of subsurface damage after grinding by particle size of grinding wheels

砂轮粒度	320	1200	4000	8000
损伤深度(μm)	22.3	9.6	3.4	2.8

3 CMP抛光实验

ELID超精密磨削通过在线修锐使砂轮的磨粒锋利微刃作用于工件表面,同时产生的氧化膜对工件表面具有抛光作用,故容易实现蓝宝石材料的延性域加工和快速地得到较高的表面精度,但是ELID磨削加工还存在大量的磨削痕迹、表面和亚表面缺陷,因此经过ELID加工后的表面还无法满足光学元件的加工要求。CMP抛光采用游离磨料和化学反应的方式对材料进行去除加工,能获得接近无损伤的高质量表面。

3.1 实验装置及条件

CMP抛光实验是在一台小型的平面抛光机(Enjis Corp.)上进行的。工件为上述经过8000号砂轮ELID磨削后的蓝宝石基片,工件表面粗糙度 $Ra=8.43\text{ nm}$ ,加工实验条件如表5所示。整个抛光过程采用粗抛和精抛两个阶段,粗抛时采用粒度为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石磨粒,抛光2 h后改用纳米级的硅胶抛光液,再加工1 h。

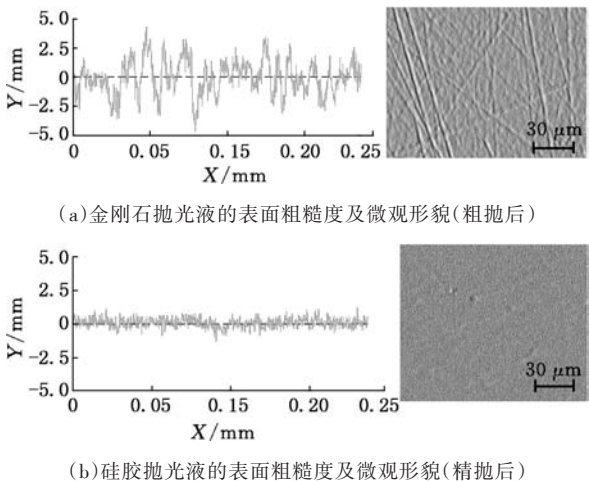
表5 蓝宝石CMP抛光实验条件  
Tab.5 The experimental conditions of CMP polishing

机床	流速 (mL/min)	抛光盘转速 (r/min)	抛光压力 (kPa)	抛光磨粒
平面抛光机床	150	80	37	金刚石和硅胶

3.2 实验结果

经过金刚石抛光液的CMP粗加工后,工件表面粗糙度及微观形貌如图8a所示,经过测量,工件表面粗糙度 $Ra=0.82\text{ nm}$ ,但是工件表面有许多细小的抛光痕迹,需要进一步的精抛加工。经过纳米级硅胶抛光液CMP精抛后,工件的表面质量如图8b所示。工件的表面粗糙度 $Ra$ 达到 $0.34\text{ nm}$ ,粗抛时产生的抛光痕迹已被去除。

综上所述,分别利用金刚石和硅胶两种抛光液对蓝宝石基片进行CMP抛光实验,经过粗抛和精抛两道工序后,加工面的磨削痕迹和加工缺陷已得到去除,工件达到了良好的加工质量,表面粗



(a) 金刚石抛光液的表面粗糙度及微观形貌(粗抛后)

(b) 硅胶抛光液的表面粗糙度及微观形貌(精抛后)

图8 CMP粗抛和精抛后加工面的表面粗糙度和微观形貌

Fig.8 The surface roughness and microstructure of machining surface after coarse and fine CMP

糙度 $Ra$ 为 $0.34\text{ nm}$ ,证明了CMP抛光是ELID磨削后提高工件表面质量、去除表面缺陷的后续重要加工工艺。

4 结论

(1)本文提出了一种蓝宝石基片的ELID超精密磨削和CMP抛光组合加工工艺,通过理论计算得出蓝宝石基片实现延性域磨削的理论磨削深度为 $61\text{ nm}$ 。

(2)通过ELID磨削实验实现了蓝宝石基片脆性磨削到延性磨削的过程,获得了表面粗糙度 $Ra=8.43\text{ nm}$ 的加工面,并利用磁流变斑点法对加工面的亚表面损伤进行了检测,得出了不同粒度砂轮产生的亚表面损伤深度。实验证明了CMP抛光能够有效去除ELID磨削时产生的磨削痕迹和加工缺陷,最终得到了表面粗糙度 $Ra$ 为 $0.34\text{ nm}$ 的高质量表面。

(3)本文将ELID磨削和CMP抛光两种工艺结合起来对蓝宝石基片进行超精密加工,可以实现蓝宝石基片的亚纳米级的光学要求,该组合加工工艺为光学元件低成本、高效率的超精密加工制造提供了一种有效的方法。

参考文献:

[1] 周兆忠,文东辉,张克华,等.磨粒粒径对蓝宝石研磨均匀性影响的试验研究[J].中国机械工程,2009,20(21):2549-2552.  
ZHOU Zhaozhong, WEN Donghui, ZHANG Kehua, et al. Experimental Investigation on the Effect of Abrasive Grain Size on the Lapping Uniformity of Sapphire Wafer [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20

(21):2549-2552.

[2] HU X, SONG Z, PAN Z, et al. Planarization Machining of Sapphire Wafers with Boron Carbide and Colloidal Silica Abrasives [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(19):8230-8234.

[3] 周兆忠,袁巨龙,文东辉. 蓝宝石衬底的超光滑表面加工进展Ⅲ[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(3): 8-13.

ZHOU Zhaozhong, YUAN Julong, WEN Donghui. Survey on the Progress of Ultra-smooth Sapphire Wafer Surface [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(3):8-13.

[4] 王娟,刘玉岭,檀柏梅,等. 蓝宝石衬底片的精密加工[J]. 微电子学, 2006, 36(1):46-48.

WANG Juan, LIU Yuling, TAN Baimei, et al. Fine Polishing of Sapphire Substrates [J]. Microelectronic, 2006, 36(1):46-48.

[5] GAGLIARDIA 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, 35:348-354.

[6] 刘道标,徐晓明,周海,等. 蓝宝石衬底双面研磨亚表面损伤分布研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(19):2568-2572.

LIU Daobiao, XU Xiaoming, ZHOU Hai, et al. Study on Distribution of Subsurface Damage on Sapphire Substrate after Two-sided Lapping [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(19):2568-2572.

[7] KIM H, MANIVANNAN R, MOON D, et al. Evaluation of Double Sided Lapping Using a Fixed Abrasive Pad for Sapphire Substrates [J]. Wear, 2013, 302: 1340-1344.

[8] SEYAMA T, DOI T K, WATANABE S. A New Bell-jar Type Controlled Atmosphere Polishing Characteristics of Silicon and Sapphire [C]//The 1st PAC-RIM International Conference on Planarization CMP and Its Application Technology. Tokyo, 2004, 257:177-185.

[9] WEI X, XIE X Z, HU W, et al. Polishing Sapphire Substrates by 355nm Ultraviolet Laser [J]. International Journal of Optics, 2012, 12:1-7.

[10] KASUGA H, OHMORI H, MISHIMA T, et al. Investigation on Mirror Surface Grinding Characteristics of SiC Materials [J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2009, 10(3):351-354.

[11] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime Grinding: a New Technology for Machining Brittle Materials [J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113:184-189.

[12] TONSHOFF H K, PETERS J, INASAKI I, et al. Mod-

elling and Simulation of Grinding Processes [J]. Annals of the CIRP, 1992, 41(2):677-688.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:徐志强,男,1984年生,讲师。研究方向为超精密磨削和抛光。E-mail: dashan-211@163.com。

(上接第1309页)

ZHANG Wuxiang, YANG Yi, LUO Jun, et al. Size Adjustment of Multi-closed-loop Deployable Mechanisms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(19):11-20.

[11] WEI Guowu, CHEN Yao, DAI Jiansheng. Synthesis, Mobility, and Multifurcation of Deployable Polyhedral Mechanisms with Radially Reciprocating Motion [J]. Journal of Mechanical Design, 2014, 136(9): 1-12.

[12] DING X L, YANG Y, DAI J S. Design and Kinematic Analysis of a Novel Prism Deployable Mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 63(5):35-49.

[13] 杨毅,丁希仑. 剪式单元可展机构静力学分析与拓扑优化设计[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2): 184-189.

YANG Yi, DING Xilun. Analysis and Topology Optimization of Deployable Mechanism Based on Pantograph [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(2): 184-189.

[14] 李端玲,张忠海,于振. 球面剪叉可展机构的运动特性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(13):1-7.

LI Duanling, ZHANG Zhonghai, YU Zhen. Kinematic Characteristic Analysis of Spherical Scissors Deployable Mechanisms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(13):1-7.

[15] 袁茹,王剑,王三民,等. 剪刀机构环形阵列可展结构的运动学与动力学研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(17):2309-2313.

YUAN Ru, WANG Jian, WANG Sanmin, et al. Kinematics and Dynamics Analysis of Ring Array Deployable Structures Based on SLE [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(17):2309-2313.

[16] 孙远涛,王三民,刘霞. 剪式机构线性阵列可展结构的动力学特性研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(24): 2917-2925.

SUN Yuantao, WANG Sanmin, LIU Xia. Dynamics Research of Linear Array Deployable Structures Based on Structure of Scissor-like Element [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(24):2917-2925.

(编辑 胡佳慧)

作者简介:杨博彦,男,1985年生,博士、讲师。研究方向为机构学和机械系统动力学。发表论文10余篇。E-mail: mmts\_tjpu@126.com。