

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.03.003

单晶蓝宝石衬底磨粒抛光技术研究现状

林晨, 许永超

(福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 结合单晶蓝宝石衬底磨粒抛光工艺的最新研究进展, 从磨粒加工的去除过程出发, 综述了应用于单晶蓝宝石衬底抛光的游离、固结、半固结磨料抛光工艺的材料去除模型、工艺特点及各因素影响规律, 从材料去除率和表面质量的角度对不同的磨粒抛光工艺展开了分析。根据单晶蓝宝石衬底的应用需求和目前抛光方法存在的不足, 指出了蓝宝石衬底超精密抛光技术的下一步研究方向。

关键词: 蓝宝石; 磨粒加工; 游离磨料; 固结磨料; 半固结磨料

中图分类号: TH113

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)03-0216-07

Research status of abrasive polishing technology for single crystal sapphire substrate

LIN Chen, XU Yongchao

(School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Combined with the latest research progress of single crystal sapphire substrate abrasive polishing technology, starting from the process of abrasive removal, a review was conducted of the material removal model, process characteristics and the influence law of the various factors of free, fixed and semi-fixed abrasive polishing technology applied to single crystal sapphire substrate polishing. Different abrasive polishing processes were analyzed from the perspective of material removal rate and surface quality. According to the application requirements of single crystal sapphire substrate and the shortcomings of current polishing methods, the following research direction of ultra-precision polishing technology for sapphire substrate is pointed out.

Keywords: sapphire; abrasive processing; free abrasive polishing; fixed abrasive polishing; semi-fixed abrasive polishing

单晶蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)作为集优良的光学性能、物理性能和化学性能于一体的多功能氧化物晶体,在光电子、通讯、国防等领域都有着广泛的应用^[1-2]。其中,因单晶蓝宝石与半导体氮化镓(GaN)晶格失配度较小、透光性好和适合高温生长过程等特点已成为发光二极管(LED)最重要的衬底材料,占目前LED衬底市场的96%以上^[3]。

LED器件性能的优劣及其可靠性严重依赖于单晶衬底表面外延层的结晶质量和完整性,而外延层的质量主要取决于在外延垒晶之前衬底表

面的加工质量,获得超光滑、超平坦、无表面/亚表面损伤的单晶蓝宝石衬底表面是高质量外延层生长的关键基础条件。抛光作为加工单晶蓝宝石衬底的最后一道工序,如何高效获得高质量、低损伤衬底表面是超精密抛光领域的重要研究课题。

近年来,国内外学者相继提出了众多的单晶蓝宝石衬底抛光新方法,且仍以磨粒加工方式为主。本文通过对不同蓝宝石衬底抛光技术的最新研究进行归纳总结,从材料去除机理出发,对不同的磨粒超精密抛光方法从表面粗糙度、材料去除

收稿日期: 2020-11-03

基金项目: 福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT190402);福建工程学院科研启动基金项目(GY-Z19124)

第一作者简介: 林晨(1997—),男,福建三明人,硕士研究生,研究方向:超精密加工工艺与装备。

通信作者: 许永超(1986—),男,河南新乡人,讲师,博士,研究方向:高效精密加工技术与装备。

率等角度进行比较分析,并对下一步研究重点进行了展望。

1 磨粒加工去除机理

1.1 磨粒加工的去除过程

磨粒加工主要以机械、机械-化学耦合作用对衬底材料进行去除。机械抛光是选用硬度较衬底高或相当的磨料,依靠其犁削和滑擦作用将衬底表面材料去除。以机械-化学耦合作用实现材料去除的磨粒抛光技术包括机械化学抛光(MCP)和化学机械抛光(CMP)两种:MCP是利用硬度比衬底低的活性磨料,借助其与衬底的“摩擦生热”达到产生固相化学反应所需要的活化能,使得衬底表面产生硬度较蓝宝石材料更低的软质层,再通过磨料作用去除反应物;CMP则是采用碱性抛光液与衬底表面产生化学反应,生成一定厚度的软质层,再通过磨料作用去除反应物。

1.2 磨粒加工的材料去除模型

磨粒加工的抛光效能易受工艺参数、加工设

备、环境等因素的影响。目前,磨粒加工硬脆性材料去除模型主要有 3 类,分别为纯机械去除模型、塑性去除模型、化学-机械耦合去除模型。

(1)纯机械去除模型 只考虑磨粒微切削的机械作用,磨粒在抛光压力的作用下刻入衬底表面,再在一定的转速下切除材料。当前,较为合理的理论模型为 Preston 在研磨玻璃时得出的经验公式,称之 Preston 方程^[4]:

$$R_{\text{MR}} = K_{\text{p}} \times P \times V$$

(1)

式中: R_{MR} 为衬底材料去除率; K_{p} 为 Preston 常系数; P 为抛光压力(Pa); V 为衬底相对抛光盘的线速度(m/s)。

Preston 公式表明,针对玻璃衬底,工件材料去除率与抛光压力和相对转速成正比。但抛光盘的损耗、衬底的形状等因素都集中在 K_{p} 常数中,意义不够明确,因此其他学者在此基础上对其进行了修正,如表 1 所示。

表 1 修正后的材料去除模型
Tab.1 Modified material removal model

修正者	硬脆性材料	修正后的去除模型	修正理由
Liu ^[5]	单晶硅	$R_{\text{MR}} = C' \times \left(\frac{H_{\text{w}}}{H_{\text{w}} + H_{\text{p}}} \right) \times \left(\frac{E_{\text{s}} + E_{\text{w}}}{E_{\text{s}} \times E_{\text{w}}} \right) \times P \times V$ <p>C' 为分解后的研磨常系数; H_{w} 和 H_{p} 为衬底、抛光盘显微硬度(MPa); E_{s} 和 E_{w} 为磨粒、衬底的杨氏模量(MPa)</p>	考虑衬底、磨粒、抛光盘等抛光系统的物理属性
Tseng ^[6]		$R_{\text{MR}} = K_{\text{c}} \times P \times (e^{-\lambda_0} \times V)$ <p>K_{c} 为磨料消耗因子; λ_0 为衬底表面因切痕的增加所导致相对速度退化的系数</p>	考虑磨料的消耗及衬底表面的磨粒切痕
Zhou ^[7]	单晶硅	$R_{\text{MR}} = K_{\text{p}} \times (P_{\text{f}} + P_{\text{a}}) \times V$ <p>P_{a} 为研磨系统设定的压力(MPa); P_{f} 为研磨液因相对流动产生的压力(MPa)</p>	考虑研磨液的相对流动
Lin ^[8]	蓝宝石	$R_{\text{MR}} = K_{\text{p}} \times P^{\alpha} + V^{\beta} + C_{\text{rv}}$ <p>α 和 β 为无量纲的值,且 α 大于 β; C_{rv} 为研磨系统的补偿参数</p>	考虑抛光系统的磨粒粒径、磨料浓度、抛光压力及相对速度的综合影响

(2)塑性去除模型 采用粒度较小的磨粒对衬底表面加工,使磨粒切入的深度足够小、加工面发生塑性流动的现象。塑性去除最重要的是通过相应的工件属性寻找对应的脆塑性临界切深,以此控制磨粒的切入深度小于临界切深。Bifano

等^[9-11]根据压痕断裂力学理论建立了玻璃的临界切深模型:

$$d_{\text{c}} = 0.15 \times \left(\frac{E}{H} \right) \times \left(\frac{K_{\text{c}}}{H} \right)^2$$

(2)

式中: d_{c} 为玻璃的临界切深(nm); E 为衬底的杨

氏模量 (MPa); H 为衬底的显微硬度 (MPa); K_C 为材料的断裂韧性 ($\text{MPa} \cdot \text{nm}^{1/2}$)。

Bifano 建立的玻璃临界切深模型除了与衬底的杨氏模量、显微硬度有关系,还取决于材料的断裂韧性。Scholz 等^[12]利用显微压痕法提出材料断裂韧性的测试公式,同时利用该公式对硬脆性材料中的熔融石英、蓝宝石、钛酸钡的断裂韧性进行验算分析,提高了公式应用的广泛性,其得出的材料断裂韧性公式为:

$$K_C = \kappa \times \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{P}{C^2}\right) \quad (3)$$

式中: κ 为与金刚石压头的几何形状相关的常数,一般取 0.036; P 为载荷 (N); C 为衬底表面压痕的裂纹长度 (nm)。

Bifano 的临界切深的理论模型材料仅限于玻璃,且模型采用的网格计数法具有一定主观性,孙玉利^[13]对其模型进行了修正,并根据修正后的公式测算了硅片的临界切深为 54.63 nm。修正公式为:

$$d_c = 1.2 \times \left(\frac{E}{H}\right) \times \left(\frac{K_C}{H}\right)^2 \quad (4)$$

戴欣平等^[14]建立了单颗圆锥状磨粒的压入模型,利用纳米压痕和划痕测试相结合的方法,并借助白光干涉仪、扫描电子显微镜、透射电镜等方法得出单晶蓝宝石塑性去除的临界切深为 100 nm 左右,为蓝宝石衬底加工奠定了理论基础。

(3) 化学-机械耦合去除模型 借助碱性抛光液与衬底表面发生化学反应,生成一软质层,再以磨粒微切削的作用去除材料。Zhao 等^[15]利用弹塑性接触理论和化学分子动力学建立的材料去除速率数学模型,其模型为:

$$R_{MR} = \frac{\pi d_m V_d A_l}{6[(1/\eta) + (1/\gamma) - 1]} \times \left(\frac{6\chi}{\pi D^3}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

式中: d_m 为衬底材料表面分子或者原子的直径 (nm); V_d 为衬底与研磨垫的相对运动速度 (m/s); A_l 为衬底与研磨垫的实际接触面积 (mm^2); η 为发生化学作用的概率,其数值满足 $0 \leq \eta \leq 1$; γ 为发生机械作用的概率,其数值满足 $0 \leq \gamma \leq 1$; χ 为磨料的体积分数; D 为磨料的直径 (μm)。

该模型通过抛光液的化学作用把衬底表面强键的分子转换为弱键的分子物质,再利用磨料机

械作用打破弱键所需要的能量,从分子尺度上去除材料。

2 磨粒加工方式

根据磨粒在加工过程中的运动形式,现有蓝宝石衬底的磨粒抛光技术可分为游离磨料加工、固结磨料加工和半固结磨料加工 3 种。

2.1 游离磨料加工

将磨料分散到抛光液中,磨料呈“游离态”加工。它属于“三体加工”,利用磨料对衬底表面的微切削与划擦作用进行材料去除,其作用机理如图 1 所示^[16]。形状各异的磨粒在抛光压力作用下,一部分嵌入抛光盘中对衬底进行刻划,达到微切削的作用;一部分持续以滚动的方式对衬底进行滚轧。在刻划与滚轧的相互作用下,衬底表面的微裂纹不断扩大直至崩裂实现去除。

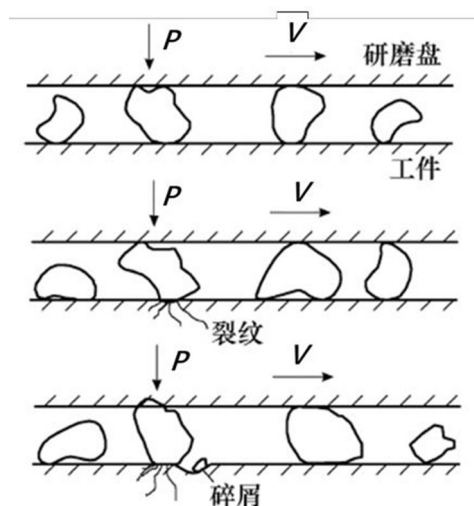


图 1 游离磨料加工的作用机理

Fig.1 Mechanism of free abrasive polishing

游离磨料加工具有加工设备简单、参数调整方便等优点,但也存在明显不足:(1)磨料运动轨迹不可控,磨削力的大小和方向无规律,使衬底表面去除量不均,导致衬底表面质量及平整度差;(2)磨料处于游离状态,加工中易产生飞溅,使磨料利用率降低并污染环境,加工成本高。

2.2 固结磨料加工

利用硬质结合剂将磨料固定于抛光盘上,依靠磨粒外露的锋刃对衬底表面的耕犁作用去除材料,属于“二体加工”。固结磨料加工的作用机理如图 2 所示^[17]。

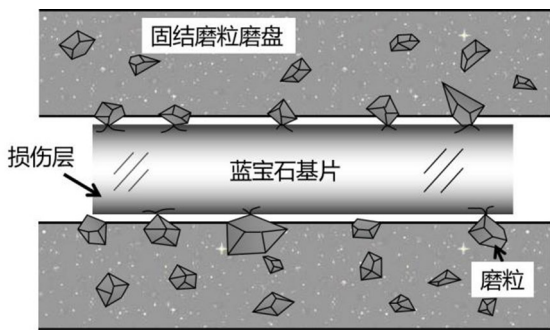


图 2 固结磨料加工的作用机理

Fig.2 Mechanism of fixed abrasive polishing

固结磨料加工的优点是:磨料固定于抛光盘上,不易脱落,磨料利用率较高;可实现高速运动,磨粒的轨迹呈规律运行;结合剂硬度高,加工后衬底表面面形精度较好。固结磨料加工也存在不足:(1)固结磨具在制备过程中超细磨料分散不均匀且易团聚,导致衬底表面划痕严重;(2)磨粒外露的锋刃高度不等,易造成衬底表面及亚表面机械损伤,抛光效果不佳。

2.3 半固结磨料加工

以不饱和树脂、藻酸钠盐^[18]等软质结合剂以及磁流变液的“陷阱”效应为代表,使磨粒在一定范围内移动,同时又受到约束而形成半固结磨料加工,半固结磨料加工有效避免了大颗粒磨粒对工件表面造成的损伤,如图 3 所示^[19]。以“二体磨损为主、三体磨损为辅”,介于游离磨料与固结磨料之间,较大磨粒在压力作用下,使周围的磨粒发生迁移,较大磨粒逐渐陷入其余颗粒中,直至达到等高状态。

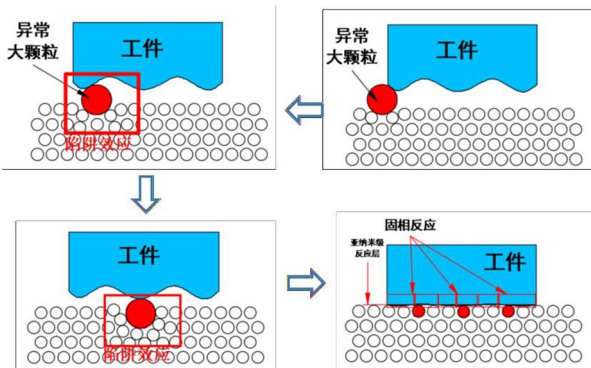


图 3 半固结磨具的“陷阱效应”

Fig.3 “Trap effect” of semi-fixed abrasive polishing tool

半固结磨料加工的优点是:(1)可使用较大粒径的磨料代替超细磨粒加工衬底,避免超细磨

料团聚;(2)半固结抛光盘具有一定的弹性,使磨粒在一定的范围内发生退让而保持出刃高度一致,抛光表面质量较好,避免对衬底表面产生深度划痕,实现对蓝宝石高质量的柔性抛光。半固结磨料加工是一种比较理想的加工方法,但其盘面较软,磨粒易脱落,存在加工效率低且寿命短等不足。

2.4 不同磨料加工方式的影响因素

磨料加工蓝宝石衬底易受加工工艺参数(压力、转速、时间)、磨粒参数(种类、粒径、浓度)等因素的影响。对于游离磨料加工,当抛光压力过小时,与衬底接触的磨料减少,不利于发挥磨料切削作用;抛光压力适中时,有利于较多磨料对衬底进行滚轧和划擦作用;抛光压力过大时,衬底与抛光垫之间的间隙变小,粒径较大的磨粒易对衬底产生损伤。加工转速方面,当转速过小时,磨料运动不充分,衬底与磨料接触机会减少,导致材料去除率降低;抛光转速适中时,衬底与磨料的接触机会变多,使磨料对衬底的切削更聚集、均匀,对衬底的抛光效果较好;抛光转速过大时,磨料还未产生切削作用,便在离心力的作用下引起飞溅,导致衬底抛光加工质量差。在恒定的抛光压力及转速条件下,由于衬底初始粗糙度较大,磨料的去除作用较为明显,衬底抛光效果较好。随着加工时间的延长,衬底表面粗糙度逐渐趋于稳定。

对于固结磨料加工,当抛光压力较小时,由于固结磨料外露的磨粒高度不一致使得有效磨粒数较少,导致材料去除率较低;抛光压力较大时,固结磨料参与切削的数量增多,亦可提高化学反应所需的活化能,衬底材料去除率变大,但表面损伤是主要问题。对于抛光转速较小时,磨料出刃高度不均,使衬底表面受力不均,转速相对不平稳,造成抛光效果差;抛光转速较大时,衬底转动相对平稳,发挥切削作用的磨料变多,抛光性能变好。Wang 等^[20]通过单因素试验法研究了抛光压力、转速对蓝宝石衬底的材料去除率及表面粗糙度的影响规律,如图 4 所示。

对于半固结磨料加工,当抛光压力过小时,因磨粒粒径不一致,蓝宝石接触磨料的数量较少,抛光效果较差;抛光压力较大时,抛光盘的“陷阱”作用明显,可兼顾表面质量和材料去除率,衬底抛光性能较优;抛光压力过大时,因盘面较软,加工后衬底平整度较差。对于加工转速方面,当抛光

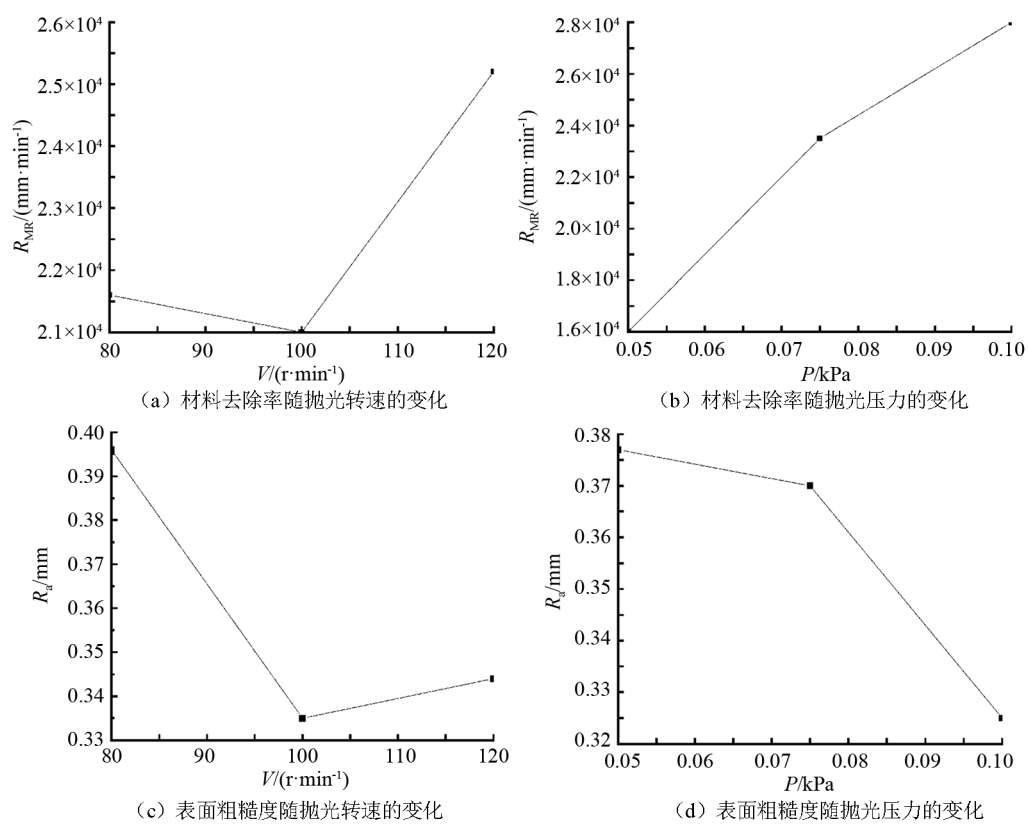


图 4 抛光转速、压力对蓝宝石衬底材料去除率及表面粗糙度的影响
Fig.4 Influences of polishing speed and pressure on sapphire substrate material removal rate and surface roughness

转速过小时,磨粒对衬底的切削减弱,抛光效率较低;抛光转速增大时,磨粒对衬底的切削作用明显,抛光效果好。

对于不同的抛光技术,磨料的种类、粒径和浓度也会对加工效果产生显著影响。在磨粒种类方面,传统的机械抛光主要采用硬度比蓝宝石高或相当的磨料来去除材料,在抛光中容易产生深刻痕。现今基于机械-化学耦合的作用,大多采用硬度低于蓝宝石的二氧化硅磨料,利用碱性抛光液或者二氧化硅与工件发生化学反应,生成一层硬度较低的软质层,再由磨粒的机械作用去除。熊伟、Wu、林旺票等^[19,21-22]均采用了二氧化硅对单晶蓝宝石进行抛光,得到了较好的表面质量和较高的材料去除率。

Zhang、臧江龙、郑坤等^[23-25]通过实验得出了衬底材料去除率随着磨粒粒径、浓度的增大而增大的结论。游离磨料的粒径、浓度增大会增加磨料对工件的滚轧和划擦。固结磨料的粒径增大会引起耕犁效应加剧。固结磨料浓度过小时,外露

的磨料数量少,导致磨料受力大而容易脱落,抛光盘损耗加大,衬底加工效果差;浓度过大时,对磨料的束缚能力变差,易增加抛光盘的损耗,影响其形状精度和使用寿命,因此固结磨料的浓度适中才有利于衬底抛光。半固结磨料的粒径增大会降低“陷阱效应”的作用,导致较大粒径的磨料无法完全陷入,造成衬底加工表面划痕明显。

3 磨粒加工方式的比较分析

同等条件下,不同的磨粒加工方式对蓝宝石衬底的表面粗糙度、材料去除率不一致,分析并对比不同的磨粒加工方式对蓝宝石衬底抛光实现高效率、高质量、无污染的超精密加工研究具有指引作用。

kim 等^[26]对“三体加工”的游离磨料和“二体加工”的固结磨料抛光蓝宝石衬底进行单因素实验对比分析。随着不同的工艺参数数值的增大,二者的材料去除率均提高,但是固结磨料始终高于游离磨料,如图 5 所示。使用铜树脂盘、铝树脂

盘、锡树脂盘、固结金刚石盘抛光衬底后的表面粗糙度分别为 38.03、25.28、19.03、69.05 nm。游离磨料处于自由态,对衬底进行“滚轧”和“划擦”的三体加工作用是由基盘和载物盘之间产生的。而固结磨料加工,其产生“耕犁”的二体加工作用对衬底材料去除贡献较大,所以游离磨料抛光衬底的材料去除率较固结磨料低,但固结磨料外露的锋刃高度差异明显,易使衬底表面产生崩碎凹坑和“耕犁”痕迹,其抛光后表面粗糙度较游离磨

料差。
Luo 等^[18]研究了固结磨料和半固结磨料对蓝宝石衬底的抛光性能,得到金刚石固结磨料和半固结磨料对蓝宝石衬底抛光材料去除率为 26.9、3.5 nm/min,表面粗糙度为 99、3.7 nm。半固结磨料因其磨料可在适度范围内移动,可使盘面磨粒外露的锋刃高度保持一致对衬底加工,其能获得的表面粗糙度效果较好,但因其盘面较软,对衬底抛光材料去除率相对较低。

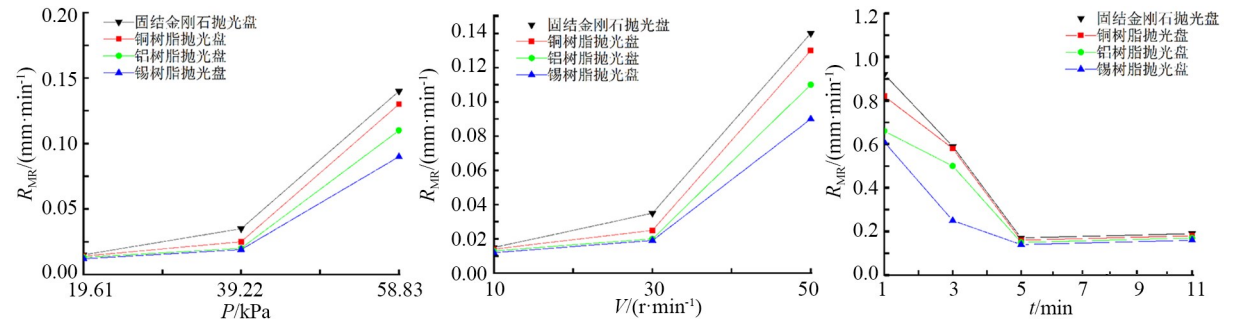


图 5 不同工艺参数下游离磨料和固结磨料抛光蓝宝石衬底的材料去除率
Fig.5 Material removal rate of sapphire substrate polished by free abrasive polishing and fixed abrasive polishing with different process parameters

4 总结与展望

目前,国内外研究者在单晶蓝宝石衬底的磨粒抛光技术方面取得了一系列进展,但随着蓝宝石需求量的增大,对其加工质量的要求也不断提升,必将对磨粒抛光提出更新的、更严格的要求。为了提高单晶蓝宝石的磨粒精密加工技术,以下问题值得进一步深入研究:

1)新机理。当前磨粒加工技术的机理研究中,较多以游离磨料展开为主。通过相关工艺参数的调整及计算机仿真软件等手段,揭示固结磨料及半固结磨料的加工机理,有效地提高单晶蓝宝石高面形精度和高质量的表面。

2)新工艺。不同的磨粒加工方式加工单晶蓝宝石较为单一化,参数变化种类较少。根据不同的磨粒加工方式的特点进行结合,制备多种组合式的复合结构磨具对单晶蓝宝石衬底精密抛光,确定最优的工艺参数组合。

3)装备开发。研制新型抛光设备,提高设备抛光自动化程度,实现自动装夹工件加工、抛光液自动检测更换、抛光工具修整程序简化且一键控制、降低抛光废品率。

4)工程批量化。从整个加工工艺链角度出发研究单晶蓝宝石抛光环节的衔接,实现全程加工自动处理,缩短单晶蓝宝石整个加工工艺流程时间。

参考文献:

[1] KLUNNIKOVA Y V, ANIKEEV M V, FILIMONOV A V, et al. Machine learning application for prediction of sapphire crystals defects[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2020, 18(1): 100029.
[2] ANANCHENKO D V, NIKIFOROV S V, KUZOVKOV V N, et al. Radiation-induced defects in sapphire single crystals irradiated by a pulsed ion beam[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section B, Beam Interactions with Materials and Atoms. 2020, 466: 1-7.
[3] 荣新, 李顺峰, 葛惟昆. 第三代半导体Ⅲ族氮化物的物理与工程:从基础物理到产业发展的典范[J]. 物理与工程, 2017, 27(6):4-19.

- [4] DEGROOTE J E, MARINO A E, WILSON J P, et al. Removal rate model for magnetorheological finishing of glass[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(32):7927-7941.
- [5] LIU C W, DAI B T, TSENG W T, et al. Modeling of the wear mechanism during chemical-mechanical polishing[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1996, 143(2):716-721.
- [6] TSENG W T, CHIN J H, KANG L C. A comparative study on the roles of velocity in the material removal rate during chemical mechanical polishing[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1999, 146(5):1952-1959.
- [7] ZHOU C, SHAN L, HIGHT J R, et al. Interfacial fluid pressure and its effects on SiO₂ chemical mechanical polishing[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2000, 613(1):711-7113.
- [8] LIN Z C, HUANG W S, TSAI J S. A study of material removal amount of sapphire wafer in application of chemical mechanical polishing with different polishing pads[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(8):2353-2364.
- [9] BIFANO T G, FAWCETT S C. Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding[J]. *Precision Engineering*, 1991, 13(4):256-262.
- [10] 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(2):184-189.
- [11] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding of brittle materials:experimental results and the development of A model[C]//32nd Annual International Technical Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering. Proc SPIE 0966, Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics. San Diego, CA, USA, 1989:108-115.
- [12] SCHOLZ T, SCHNEIDER G A, MUÑOZ-SALDAÑA J, et al. Fracture toughness from submicron derived indentation cracks[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(16):3055-3057.
- [13] 孙玉利. 冰冻固结磨料化学机械抛光单晶硅片的基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- [14] 戴欣平, 赵萍, 文东辉. 单晶蓝宝石的延性研磨加工[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(6):1316-1324.
- [15] ZHAO Y W, CHANG L, KIM S H. A mathematical model for chemical-mechanical polishing based on formation and removal of weakly bonded molecular species[J]. *Wear*, 2003, 254(3/4):332-339.
- [16] 鲁聪达, 王笑, 文东辉, 等. 超精密研磨技术及其发展的研究(上)[J]. *现代制造工程*, 2008(3):126-128.
- [17] 杨金双. 蓝宝石基片双面磨削机床结构设计与分析[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [18] LUO Q F, LU J, XU X P. Study on the processing characteristics of SiC and sapphire substrates polished by semi-fixed and fixed abrasive tools[J]. *Tribology International*, 2016, 104:191-203.
- [19] 林旺票. 基于固相反应的半固着磨具及其对蓝宝石抛光的探索研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2015.
- [20] WANG J B, LI Z, GAO H, et al. Process optimization of lapping sapphire substrate with fixed diamond abrasive pad[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 693:1090-1097.
- [21] 熊伟, 储向峰, 董永平, 等. 不同磨料对蓝宝石晶片化学机械抛光的影响研究[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(6):1064-1069.
- [22] WU K, ZHOU L B, ONUKI T, et al. Study on the finishing capability and abrasives-sapphire interaction in dry chemo-mechanical-grinding (CMG) process[J]. *Precision Engineering*, 2018, 52:451-457.
- [23] ZHANG Z F, ZHANG W J, ZHANG S D, et al. Study on chemical mechanical polishing performances of sapphire wafer (0001) using silica-based slurry[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2017, 6(10):P723-P727.
- [24] 臧江龙. 单晶蓝宝石基片固结磨料机械化学抛光技术[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [25] 郑坤. 蓝宝石基片研抛加工试验及表面粗糙度模型研究[D]. 广州:广东工业大学, 2019.
- [26] KIM H M, PARK G H, SEO Y G, et al. Comparison between sapphire lapping processes using 2-body and 3-body modes as a function of diamond abrasive size[J]. *Wear*, 2015, 332-333:794-799.