

文章编号 1004-924X(2014)11-3004-08

## 固结磨料研磨蓝宝石单晶过程中研磨液的作用

王建彬<sup>1,2</sup>, 朱永伟<sup>1\*</sup>, 谢春祥<sup>3</sup>, 徐俊<sup>1</sup>, 居志兰<sup>1</sup>

- (1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016;
2. 安徽工程大学机械与汽车工程学院, 安徽芜湖 241000;
3. 上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

**摘要:**开展了固结磨料研磨单晶蓝宝石面板的实验研究,探索了不同研磨液对材料去除速率和工件表面质量的影响。分析了研磨液对蓝宝石表面的化学作用,探索了固结磨料研磨蓝宝石晶体的材料去除机理。实验显示:使用W14镀镍金刚石墨固结磨料研磨蓝宝石单晶,研磨液仅为去离子水时,材料去除率(MRR)为149.8 nm/min、表面粗糙度( $R_a$ )为76.2 nm;而研磨液中加入2%的乙二醇后,相应的MRR为224.1 nm/min,  $R_a$ 为50.7 nm。用光电子能谱仪(XPS)分析了工件表面,结果表明含有乙二醇的研磨液能够增加蓝宝石工件表面的活性。得到的结果显示:在溶液中加入乙二醇有利于表面软化层的生成并增加蓝宝石表面的活性,说明研磨液对蓝宝石单晶研磨效率的提升和表面质量的改善具有促进作用。

**关键词:**固结磨料;研磨液;乙二醇;蓝宝石晶片

**中图分类号:**O786;TN305.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.3004

## Role of slurry in single crystal sapphire lapping with fixed abrasive pad

WANG Jian-bin<sup>1,2</sup>, ZHU Yong-wei<sup>1\*</sup>, XIE Chun-xiang<sup>3</sup>, XU Jun<sup>1</sup>, JU Zhi-lan<sup>1</sup>

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
  2. School of Mechanical and Automobile Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;
  3. Shanghai Institute of Aerospace Control Technology, Shanghai 200233, China)
- \* Corresponding author, E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn

**Abstract:** Lots of lapping experiments were carried out for a single crystal sapphire by using a diamond fixed abrasive (FA) pad. The effects of different kinds of slurries on Material Removal Rate (MRR) and the surface quality of a workpiece were studied. The chemical influences of slurries on the surface of the crystal sapphire were analyzed and the material removal mechanism of the sapphire crystal by fixed abrasives was explored. Experiments show when W14 diamond fixed abrasive plated nickel is used to lap the single crystal sapphire and the deionized water is used as slurry, the MRR is 149.8

收稿日期:2014-01-13;修订日期:2014-03-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175260);江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2010516);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. NP2012516)

nm/min, and the surface roughness ( $R_a$ ) is 76.2 nm. However, after adding 2% of ethylene glycol into the slurry, those are 224.1 nm/min and 50.7 nm, respectively. A photoelectron spectrometer (XPS) was used to analyze the surface of the workpiece, and it shows that the solution of ethylene glycol has more chemistry promotion for the sapphire surface. These results indicate that the addition of ethylene glycol is helpful for the formation of softened surface layer on the sapphire surface and increases the activity of sapphire surface. It means that the slurry plays an important role for enhancing lapping efficiency and improving surface quality of workpieces.

**Key words:** fixed abrasive; lapping slurry; ethylene glycol; sapphire wafer

## 1 引言

蓝宝石单晶因其优越的物理、光学性能,被广泛应用于发光二极管(LED)衬底材料和固态激光发光介质,并逐步成为下一代手机面板的首选,目前已在 iPhone 手机上试产<sup>[1-2]</sup>。蓝宝石的普遍应用对它的超光滑无损伤表面加工提出了更高要求,但蓝宝石单晶因硬度高、化学性能稳定,属于典型的难加工材料。

目前,对于单晶蓝宝石的加工需采用切片、倒角、研磨、抛光等多道工序完成,其中研磨加工是工件获得良好平面度、保证抛光质量和效率的关键工序,也是专家学者研究的热点。单晶蓝宝石的研磨一般利用逐级减小研磨液中  $B_4C$  磨料的粒径,控制研磨的进给量,来获得较好的表面粗糙度<sup>[3-6]</sup>。由于研磨过程中,硬度较大的磨料在工件和研磨盘之间滚轧,容易造成较大的表面损伤层,增加了抛光时间;另外研磨液中磨料利用率低、耗费大、还污染环境。目前,固结磨料由于可依靠凸起的磨粒实现材料的微量切除而成为了高效低损伤加工的有效手段<sup>[7-8]</sup>。Liang 等<sup>[9]</sup>采用超声辅助的金刚石树脂砂轮对单晶蓝宝石进行磨削,获得了  $0.4\sim 0.6\ \mu\text{m}$  的表面粗糙度。Kim 等<sup>[10]</sup>使用固结的金刚石研磨垫并在研磨液中加入氧化铝磨料双面研磨蓝宝石工件,利用氧化铝磨粒对研磨垫的修整实现了  $1\ \mu\text{m}/\text{min}$  的材料去除速率。固结磨料加工中,研磨抛光液的化学作用也不容忽视。Tian 等<sup>[11]</sup>利用固结磨料抛光硅衬底,比较了不同抛光液对材料去除率和表面质量的影响,

发现抛光液组份和 pH 值的改变对抛光效果具有较大影响,从而推断抛光液与工件表面具有一定的化学作用。居志兰等<sup>[12]</sup>研究了固结磨料抛光水晶中,抛光液中的化学物质可以软化水晶玻璃表面表层,从而有利于材料去除速率的提高。但由于蓝宝石的高化学稳定性,蓝宝石晶片研磨过程中的研磨液的化学作用尚未见报道。

本文采用自制的金刚石固结磨料研磨垫对蓝宝石晶片进行研磨实验,通过改变研磨液的成份,探究研磨液在固结磨料研磨蓝宝石晶体中的作用,并借助光电子能谱仪 XPS 分析研磨液对蓝宝石表面的化学作用,探索固结磨料研磨蓝宝石晶体的材料去除机理,为加工工艺的优化提供了理论指导。

## 2 实验部分

### 2.1 固结磨料研磨垫制备

固结磨料研磨垫利用高聚合物的树脂材料作黏接剂,把一定粒径的金刚石磨料通过加热引发固化剂,加热固化而成。通过改变磨料粒径的大小可以调节研磨垫的应用。在磨料中加入了适量的细铜粉,可以提高研磨垫硬度,改善工件面型精度。固结磨料研磨垫制备流程如图 1 所示,研磨垫可分为磨料层和基体层,磨料层表面有凸起结构,凸起之间留有沟槽,便于研磨液的流动和研磨碎屑的排出。基体层不含磨料,具有一定的弹性,方便研磨垫与研磨盘的黏接,有利于研磨过程中研磨垫刚度的调节。

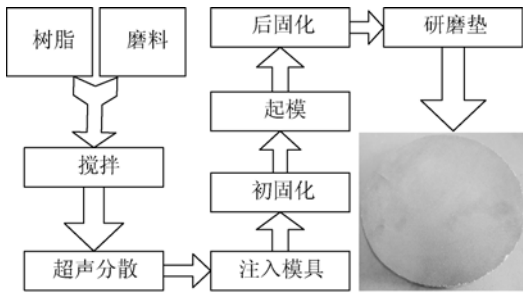


图 1 固结磨料研磨垫制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart of FA pad

## 2.2 实验设计

样品为直径 50.8 mm, 厚度 0.5 mm 的蓝宝石晶体的(0001)晶面, 研磨加工实验在智能型纳米级抛光机(Nanopoli-100)上进行, 实验采用 W14 镀镍金刚石制作的固结磨料研磨垫。为了保证研磨条件的一致性, 研磨加工前先用 W75 的研磨垫粗磨 10 min, 粗研加工参数如表 1 所示。

表 1 研磨加工参数

Tab. 1 Lapping parameters

参数名称	参数值
研磨盘转速/(r · min <sup>-1</sup> )	80
研磨压力/kPa	21
偏心距/mm	45(定偏心)
研磨液流量/(ml · min <sup>-1</sup> )	100
研磨时间/min	30

为了探索研磨液组份对固结磨料研磨蓝宝石的影响, 选用有利于研磨垫自修整性能提高的常见碱性物质, 并通过改变其含量, 探索不同研磨液在相同研磨条件研磨蓝宝石单晶的差异。研磨液具体组份如表 2 所示。

表 2 研磨液的化学组份

Tab. 2 Compositions of lapping slurries

研磨液	研磨液组份
A	去离子水
B	去离子水+乙二醇(1%)
C	去离子水+乙二醇(2%)
D	去离子水+乙二胺(0.1%)
E	去离子水+乙二胺(0.2%)
F	去离子水+三乙醇胺(2%)
G	去离子水+三乙醇胺(4%)

## 2.3 表面粗糙度 $R_a$ 和去除速率(MRR)的测量

研磨加工完成后, 使用江南 XJX-200 型正置双目金相显微镜观察工件表面形貌。采用 NanoMap500LS 测量工件表面粗糙度  $R_a$ , 扫描长度为 1 500  $\mu\text{m}$ , 扫描速度为 100  $\mu\text{m}/\text{s}$ , 采样频率为 60 pts/s。工件的初始厚度由上海力易得 ENDURA 数显千分尺 E0571(分辨率 0.01 mm)测得, 工件加工前后的质量由德国赛多利斯(SARTORIUS)BS224S(220 g/0.1 mg)精密天平计量, 材料去除速率为:

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

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

## 2.4 XPS 分析

为了测试蓝宝石工件研磨后的表面化学组份, 采用美国 Thermo 公司 XPS(ESCALAB 250Xi)分别对 A, C, E, G 4 种不同的研磨液浸泡后的研磨工件和未经浸泡的干态研磨工件进行能谱对比分析, 测试工件表面的元素组份和结合能, 推断元素的价态和存在方式。测试设置条件: 以 AlK $\alpha$  为激发源( $h\nu = 1\,486.6 \text{ eV}$ ); 发射功率 200 W; 真空度优于  $1.0 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ ; 以污染碳 C $_{1s} = 285.0 \text{ eV}$  作为元素结合能的参考内标。

## 3 结果与讨论

### 3.1 材料去除速率

蓝宝石单晶在不同研磨液作用下的材料去除率如图 2 所示。在其它工艺条件相同的情况下, 仅含有去离子水的研磨液 A 对应的材料去除速率最小, 为 149.8 nm/min, 含有其它化学组份的研磨液材料去除速率明显高于去离子水研磨液 A, 去除速率最高的为含有 2% 乙二醇的研磨液 C, 为 224.1 nm/min。而含有相同化学组份, 不同浓度的研磨液在研磨加工过程中的材料去除速率变化不大, 如 B 和 C、D 和 E、F 和 G 之间的差别。

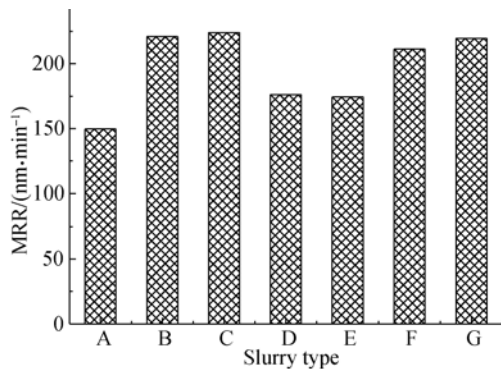


图 2 不同研磨液作用下的材料去除速率

Fig. 2 MRR with different lapping slurries

单晶蓝宝石工件在水中具有一定的水解作用,表面会生成相应的软化层,有利于材料的去除<sup>[13-14]</sup>。含有乙二醇、乙二胺和三乙醇胺的研磨液在研磨加工中对蓝宝石的水解作用更强,从而获得了高于研磨液为去离子水的材料去除率。乙二醇是增塑剂和表面活性剂的主要成分,在研磨加工过程中,增加了蓝宝石工件表面的活性,使蓝宝石工件表面的 Al 元素更易于同溶液中的 OH<sup>-</sup> 根离子结合,生成硬度较小的氢氧化合物,从而有利于提高材料去除率。当研磨液中含有三乙醇胺时,因三乙醇胺易与固结磨料研磨垫中表层的铜粉起络合反应,增强了研磨垫的自修整性能,使更多颗粒的金刚石与工件接触,一定程度上促进了研磨加工材料的去除。当研磨液中含有乙二胺的组份时,因乙二胺密度比水小,少量的乙二胺易于空气中的 CO<sub>2</sub> 生成不挥发的碳酸盐,沉积于抛光液容器的底部,大部分的乙二胺溶于水生成水合乙二胺。乙二胺的加入增加了溶液中的 OH<sup>-</sup> 根离子,有利于蓝宝石工件表面氢氧化铝的生成,但氢氧化铝在有机弱碱中的稳定性也一定程度上减小了蓝宝石工件表层化学反应的速度。从图 2 可以看出,在蓝宝石研磨加工过程中,含有不同组份的研磨液在加工过程中对材料去除率的提升强弱依次是:乙二醇>三乙醇胺>乙二胺>去离子水。同时,含有相同组份不同浓度的研磨液材料去除率差别不明显,这是由于碱性物质的增加,有利于蓝宝石表面软化层的生成,提高了加工效率;同时也加大了溶液对研磨垫表面铜粉的腐蚀,使金刚石颗粒因把持力减小而脱落,影响金刚石的出露高度,导致去除率下降,两方面综合作用的结果致使材料去除率变化不大。

### 3.2 工件表面质量

图 3 所示为经不同研磨液加工后蓝宝石工件表面粗糙度数值,  $R_a$  为 50.7~76.2 nm,其中经去离子水研磨后的工件表面粗糙度值最大,其次为含有三乙醇胺的研磨液和含有乙二胺的研磨液研磨的工件,含有乙二醇的研磨液研磨的工件表面粗糙度数值最小。相同化学组份不同浓度的研磨液研磨后的工件表面粗糙度数值变化不明显,其差距在几个纳米之间,说明同一种研磨液对蓝宝石表面的化学应对浓度的敏感性较微弱。而不同化学组份的研磨液对蓝宝石工件的化学反应差别相对较大,含有 2% 乙二醇的研磨液 C、0.2% 乙二胺的研磨液 E、2% 三乙醇胺的研磨液 F 与仅含有去离子水的研磨液 A,研磨后工件表面粗糙度  $R_a$  的数值分别相差 25.5, 15.2 和 7.5 nm,可见含有乙二醇的研磨液更能改善固结磨料研磨蓝宝石衬底的表面粗糙度,其次为三乙醇胺和乙二胺。

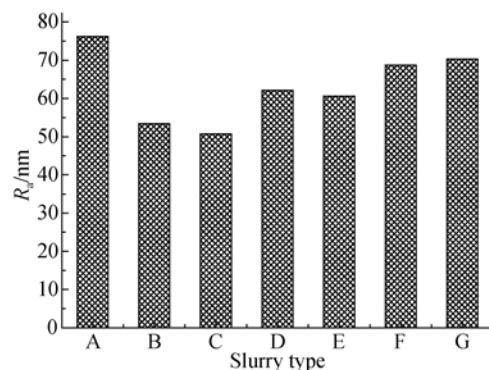
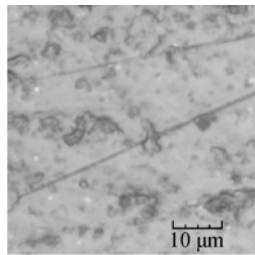
图 3 不同研磨液作用下的表面粗糙度  $R_a$ 

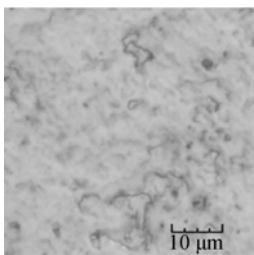
Fig. 3 Average surface roughness of lapped sapphires with different slurries

不同研磨液研磨后蓝宝石工件的表面形貌如图 4 所示。由于蓝宝石工件粗研后,面型精度较好,工件表面峰谷(PV)值低于 2  $\mu\text{m}$ ,而蓝宝石经过 30 min 的精研后,材料去除量可达 5  $\mu\text{m}$  左右,可以排除精研后表面划痕是粗研阶段所留的可能。经去离子水研磨后的工件表面有较深的划痕,说明在研磨过程中去离子水和蓝宝石工件之间的化学反应比较微弱,材料的去除主要依靠研磨垫上出露金刚石的切削。含有三乙醇胺的研磨液 F 和 G 研磨后的工件亦有较明显的划痕,可能是由于三乙醇胺增强了研磨垫的自修整性能,

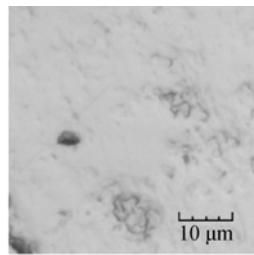
FAP 表面金刚石颗粒出露高度大,磨粒对表面进行滑擦造成较深的划痕。含有乙二醇的研磨液 B 和 C 划痕相对较少,说明其在加工的过程中化学反应较强,其次是含有乙二胺的研磨液 D 和 E。



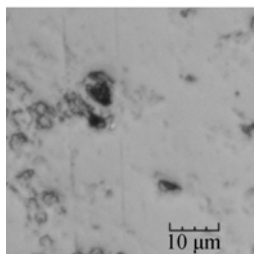
(a) 研磨液 A  
(a) slurry A



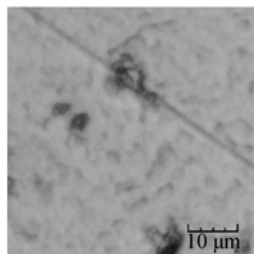
(b) 研磨液 B  
(b) Slurry B



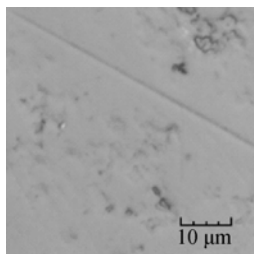
(c) 研磨液 C  
(b) Slurry C



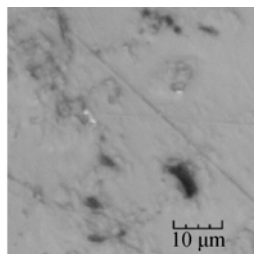
(d) 研磨液 D  
(d) Slurry D



(d) 研磨液 E  
(e) Slurry E



(f) 研磨液 F  
(f) Slurry F



(g) 研磨液 G  
(g) Slurry G

图 4 不同研磨液研磨后的工件表面形貌

Fig. 4 Sapphire surfaces lapped with different slurries

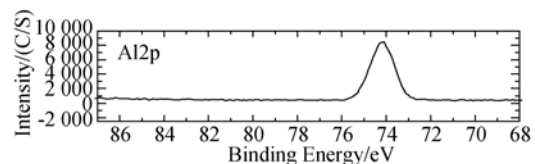
研磨液在固结磨料研磨蓝宝石单晶的过程中,一方面工件表面发生一定的化学作用,生成硬

度相对较小的表面软化层,有利于材料去除率的提高和表面质量的改善。另一方面研磨液对固结磨料研磨垫也有一定的腐蚀作用,促进研磨垫中金刚石磨粒的出露,加大对工件材料的切削。在整个研磨加工过程中,这两方面的作用都不能忽视,从工件的表面质量分析,对于工件表面质量提高具有促进作用的研磨液化学组份分别是:乙二醇>三乙醇胺>乙二胺>去离子水。

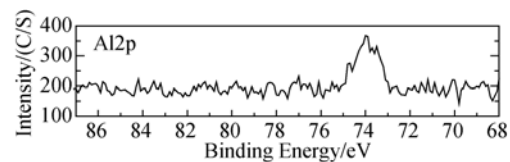
### 3.3 XPS 分析

为了比较不同研磨液对蓝宝石工件的化学作用,使用含有去离子水、乙二醇、乙二胺和三乙醇胺 4 种不同化学组份的研磨液 A, C, E, G 分别对相同条件研磨后的蓝宝石单晶浸泡 30 min, 和一片未经浸泡的干态蓝宝石工件进行 XPS 能谱分析。图 5 所示为工件表面 XPS 窄扫 Al2p 图谱, 和图 5(e) 干态 Al2p 谱峰相比, 经过研磨液浸泡后的 Al2p 谱峰均发生了峰位偏移, 说明研磨液浸泡后的蓝宝石工件表面 Al 元素存在于不同的化合态, 可能是工件表面的  $Al_2O_3$  与研磨液发生了相应的化学反应。

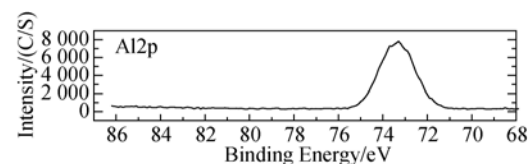
Al2p 谱峰在 73.3~74.1 eV 的结合能为  $Al_2O_3$  中 Al 元素的结合能, 74.3~75.0 eV 为  $Al(OH)_3$  中 Al 元素的结合能, 73.9~74.3 eV 为  $AlO(OH)$  中 Al 元素的结合能<sup>[15-17]</sup>。工件表面 Al2p 谱峰峰位的差异是由于 Al 元素不同价态共存的结果。



(a) 研磨液 E  
(a) Slurry E



(b) 研磨液 C  
(b) Slurry C



(c) 研磨液 G  
(c) Slurry G

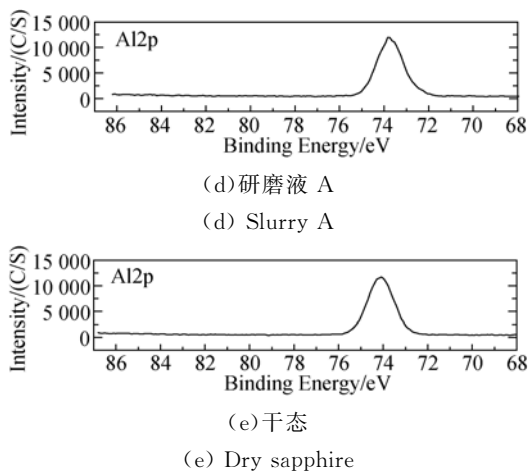
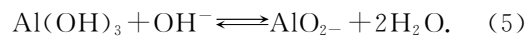
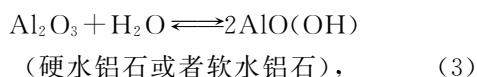
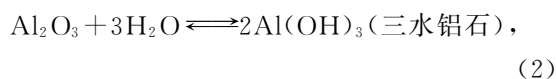


图 5 不同研磨液浸泡后工件表面 Al2p 图谱  
Fig. 5 Al2p spectra of soaked sapphires with different slurries

表 3 XPS 中 Al2p 分峰后的峰位和相对含量  
Tab. 3 Position and relative content of Al2p

类别	峰位/eV	相对含量/%
A	74.1	96.71
	74.3	3.29
C	73.5	88.57
	74.0	11.43
E	73.4	92.23
	74.1	7.77
G	73.3	94.68
	73.4	5.32

对 Al2p 谱峰分峰拟合处理,根据谱峰面积计算各不同价态对应峰位的相对含量如表 3 所示。可以看出,经过研磨液浸泡后的工件 Al2p 均有双峰位的出现,可以推断工件表面均发生了一定程度的化学反应。溶液中 OH<sup>-</sup> 根离子的增加,促使蓝宝石表面键能较小的 Al—Al 键断裂,与 OH<sup>-</sup> 根离子结合生成 Al(OH)<sub>3</sub> 或 AlO(OH) 物质。溶液中的乙二醇对蓝宝石工件表面化学作用的促进较为明显,其次是乙二胺和三乙醇胺。蓝宝石工件在研磨液的作用下,可能发生的化学反应方程式为



### 3.4 研磨机理

图 6 所示为固结磨料与蓝宝石工件接触示意图。研磨过程中,研磨垫表面经过修整后,部分金刚石磨料露出表面与蓝宝石工件接触。在载荷作用下,蓝宝石工件和研磨垫做相对运动,研磨垫上出露的金刚石颗粒对蓝宝石工件进行机械滑擦和耕犁,以切削去除蓝宝石工件表面最先接触的材料,实现二体磨削加工。在加工过程中,由于研磨垫基体对金刚石颗粒的把持力不等,会造成金刚石出露高度不同,当金刚石颗粒出露较低时,其切入蓝宝石工件表面的深度也较小,可以实现二体的延性加工。而当金刚石颗粒出露高度增加到一定程度时,由于其较高的硬度使其切入蓝宝石工件表面的深度增大,造成工件表面裂纹,实现了工件的二体脆性加工。在加工过程中,由于研磨压力的作用,使工件对出露磨粒的切向力增加,当切向力增加到一定程度时,会造成小部分出露高度大的金刚石颗粒脱落,混入研磨液中,对工件表面造成滚轧,实现材料的三体脆性加工。故从纯机械的角度出发,固结磨料对蓝宝石工件的研抛应该是二体延性加工、二体脆性加工和三体脆性加工综合作用的结果。

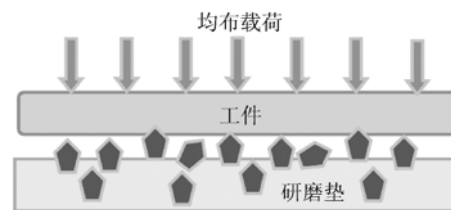


图 6 固结磨料研磨蓝宝石单晶示意图  
Fig. 6 Schematic illustration of lapping sapphire with FA pad

同时,在固结磨料对蓝宝石工件的研磨过程中,研磨液一直处于工件与研抛垫之间。一方面,研磨加工过程中产生的切屑通过研磨液的流动排出,另一方面根据蓝宝石自身的物理和化学特性分析,研磨液对工件的化学作用也不能被忽视。蓝宝石工件在抛光过程中的水合层厚度为 1 nm 左右,但在碱性溶液里更易于 OH<sup>-</sup> 根离子结合生成软化层<sup>[14]</sup>。当研磨液中仅为去离子水时,研磨液中的 H<sup>+</sup> 和 OH<sup>-</sup> 根离子基本平衡,蓝宝石工件表面仅靠

水合反应生成相应的  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  水合层,当溶液中  $\text{OH}^-$  根离子增加时, $\text{Al}_2\text{O}_3$  在碱性溶液中更易于  $\text{OH}^-$  根离子结合生成硬度较小的水铝石和偏铝酸根离子,有利于随后磨粒的机械去除。同时,研磨液中的化学组份亦会与研磨垫中的铜粉等物质络合,增加研磨垫基体的磨损,适当减小基体对磨粒的把持力,提高了 FAP 的自修正能力,有助于提材料的去除速率。因此,固结磨料研磨过程中,蓝宝石工件材料的去除是机械和化学综合作用的结果。

## 4 结 论

本文开展了固结磨料研磨单晶蓝宝石面板的实验研究。在其它工艺参数相同的情况下得的研究结果表明:使用 W14 镀镍金刚石固结磨料研磨蓝宝石单晶,研磨液仅为去离子水时,材料去除率 MRR 为 149.8 nm/min、表面粗糙度  $R_a$  为 76.2

nm;而研磨液中加入 2% 的乙二醇后,相应的值分别为 MRR 为 224.1 nm/min,  $R_a$  为 50.7 nm。说明研磨液对材料去除速率的提高和表面质量的改善具有促进作用。另外,含有 2% 乙二醇的研磨液浸泡后的工件表面 XPS 窄扫 Al2p 谱峰最弱,且发生峰位偏移的相对含量较高,说明在研磨过程中,乙二醇更能够增加蓝宝石工件表面的活性,促进化学反应的发生,获得较好的表面质量和较高的材料去除率。相同化学组份不同浓度的研磨液其研磨效果没有明显差别,故蓝宝石单晶的固结磨料研磨适宜的研磨液组份依次是:(1% 乙二醇) > (2% 三乙醇胺) > (0.1% 乙二胺) > (去离子水)。本文的工作为加工工艺的优化提供了理论指导。

## 5 致 谢

本研究中的 XPS 分析得到了合肥工业大学分析测试中心刘衍芳老师的支持,在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] AKSELDOR M S, BRUNI F J. Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2012, 360: 134-145.
- [2] PORRAS P, SAIDI H, YEGNESWARAN V. *Security and privacy in mobile information and communication systems* [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 141-152.
- [3] LI Z C, PEI Z J, FUNKENBUSCH P D. Machining processes for sapphire wafers: a literature review [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, 225(7): 975-989.
- [4] HU X K, SONG Z T, PAN Z C, *et al.*. Planarization machining of sapphire wafers with boron carbide and colloidal silica as abrasives [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(19): 8230-8234.
- [5] 文东辉, 洪滔, 张克华, 等. 蓝宝石晶体的双面研磨加工 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2493-2498. WEN D H, HONG T, ZHANG K H, *et al.*. Dual-lapping process for sapphire crystal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2493-2498. (in Chinese)
- [6] 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. DAI X P, ZHAO P, WEN D H. Ductile lapping of single crystal sapphire [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1316-1324. (in Chinese)
- [7] TANIKELLA B V, SIMPSON M A, CHINNAKARUPPAN P, *et al.*. Sapphire substrates and methods of making same [P]. US:8455879, 2013-6-4.
- [8] 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: 348-354.
- [9] LIANG Z Q, WANG X B, WU Y B, *et al.*. An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in ultrasonic assisted grinding (EUAG) of monocrystal sapphire elliptical [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212: 868-876.
- [10] KIM H M, MANIVANNAN R, MOON D J, *et al.*. Evaluation of double sided lapping using a fixed abrasive pad for sapphire substrates [J]. *Wear*, 2012, 302: 1340-1344.
- [11] TIAN Y, ZHONG Z, NG J H. Effects of chemical slurries on fixed abrasive chemical-mechanical polishing of optical silicon substrates [J]. *International Journal of Precision Engineering and Man-*

- ufacturing*, 2013, 14(8): 1447-1454.
- [12] 居志兰,朱永伟,王建彬,等. 抛光介质对固结磨料化学机械抛光水晶的影响[J]. 光学精密工程, 2013,21(4):955-962.  
JU ZH L, ZHU Y W, WANG J B, *et al.*. Effect of slurries on chemical mechanical polishing of decorative glasses by fixed abrasive pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 955-962. (in Chinese)
- [13] ZHU H L, TESSAROTO L A, SABIA R, *et al.*. Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 236(1): 120-130.
- [14] ZHU H L, NIESZ D E, GREENHUT V A, *et al.*. The effect of abrasive hardness on the chemical-assisted polishing of (0001) plane sapphire [J]. *Journal of Materials Research*, 2005, 20(2): 504-520.
- [15] KLOPROGGE J T, DUONG L V, WOOD B J, *et al.*. XPS study of the major minerals in bauxite: gibbsite, bayerite and (pseudo-) boehmite [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 296(2): 572-576.
- [16] THOMAS S, SHERWOOD P M A. Valence band spectra of aluminum oxides, hydroxides, and oxyhydroxides interpreted by X. alpha. calculations [J]. *Analytical Chemistry*, 1992, 64 (21): 2488-2495.
- [17] BORGES J, FONSECA C, BARRADAS N P, *et al.*. Influence of composition, bonding characteristics and microstructure on the electrochemical and optical stability of  $\text{AlO}_x\text{N}_y$  thin films [J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 106: 23-34.

#### 作者简介:



王建彬(1982—),男,安徽临泉人,博士研究生,讲师,2003年、2008年于安徽工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事硬脆材料的超精密加工技术研究。E-mail: wjb@ahpu.edu.cn

#### 导师简介:



朱永伟(1967—),男,浙江平湖人,教授,博士生导师,1988年于中南大学获得学士学位,1991年于长沙矿冶研究院获得硕士学位,2002年于中南大学获得博士学位,主要从事纳米材料的制备与应用、精密超精密加工、表面工程等方面研究。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn