

基于固结磨料盘的钽酸锂高效研磨加工试验研究

袁巨龙¹, 张韬杰¹, 杭伟¹, 凌洋¹, 王洁^{1,2}, 赵萍¹

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;
2. 杭州职业技术学院 友嘉机电学院, 杭州 310018)

摘要: **目的** 实现钽酸锂材料的高效、高质量、低成本加工。**方法** 选择合适的添加剂作为辅料, 利用树脂结合剂将 3000# 的金刚石磨料通过配混料、固化、压实、修整等步骤, 制成金刚石固结磨料盘。以加工过程中钽酸锂工件的材料去除率、表面形貌以及粗糙度等作为评价指标, 在相同粒径条件下, 用游离磨料、固结磨料磨盘对钽酸锂晶片进行加工, 对比加工结果。**结果** 在压力为 4 kPa、研磨盘转速为 140 rad/min 的条件下, 3000# 金刚石游离磨料铸铁盘研磨 Y-36° 钽酸锂晶片 10 min 后, 材料去除率为 37.89 $\mu\text{m}/\text{h}$, 表面粗糙度 S_a 由 420 nm 改善至 233.308 nm, 但是晶片表面出现深划痕, 从而导致易破碎, 且有少量磨粒残留在钽酸锂晶片上。而在相同加工条件下, 采用 3000# 金刚石固结磨料盘研磨 Y-36° 钽酸锂晶片 10 min 后, 材料去除率为 66.19 $\mu\text{m}/\text{h}$, 表面粗糙度 S_a 降低至 97.004 nm, 且晶片表面划痕较浅, 无磨粒残留在钽酸锂晶片上。**结论** 采用固结磨料盘加工后的表面粗糙度比游离磨料加工后的表面粗糙度更低, 表面形貌更好, 材料去除率更高, 达到了钽酸锂晶片精研的加工效率和表面质量。同时固结磨料盘研磨 LT 晶片时, 其表面粗糙度随压力、转速增大而减小, 材料去除率随压力、转速增大而增大。

关键词: 钽酸锂晶片; 固结磨料盘; 游离磨料; 表面粗糙度; 材料去除率

中图分类号: TG580; TH161 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)10-0349-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.043

Experimental Research on High Efficiency Lapping Machining of Lithium Tantalate Based on Fixed Abrasive Pad

YUAN Ju-long¹, ZHANG Tao-jie¹, HANG Wei¹, LING Yang¹, WANG Jie^{1,2}, ZHAO Ping¹

(1. Key Laboratory of Special Equipment Manufacturing and Advanced Processing Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Fair Friend Institute of Electromechanics, Hangzhou Vocational & Technical College, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: The paper aims to provide a high-efficiency, high-quality and low-cost machining method for lithium tantalite (LT). A fixed abrasive pad with 3000# diamond abrasive, resin bonder, and compounded with auxiliary material was manufactured through mixing, curing, compaction, trimming, etc. The material removal rate (MRR), surface morphology and roughness (S_a) were chosen as indicators to evaluate the processing performance of LT wafer machined with free abrasive and

收稿日期: 2019-02-27; 修订日期: 2019-08-05

Received: 2019-02-27; Revised: 2019-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(51605440, 51575492); 中国博士后科学基金(2017M621966); 浙江省公益技术研究项目(LGG19E050021)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51605440, 51575492), China Postdoctoral Science Foundation (2017M621966), Zhejiang Province Commonweal Technology Research Project (LGG19E050021)

作者简介: 袁巨龙(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工(研磨、抛光、磨削)。

Biography: YUAN Ju-long (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision machining (lapping, polishing, grinding).

通讯作者: 赵萍(1963—), 女, 副教授, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。邮箱: zhaoping@zjut.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Ping (1963—), Female, Associate professor, Research focus: precision and ultra-precision machining technology. E-mail: zhaoping@zjut.edu.cn

fixed abrasive pad, and compare the processing results of free abrasive with fixed abrasive pad under the same test condition. At 40 kPa and 140 rad/min, the Y-36° LT wafer was lapped with 3000# free abrasive pad. 10 minutes later, the MRR of the LT was 37.89 $\mu\text{m}/\text{h}$ and the surface roughness S_a was decreased from 420 nm to 233.308 nm. There were deep scratches on the surface and they were likely to cause wafer breaking. Small amount of abrasive grains embedded on the LT wafer after machining can be observed. Under the same conditions, the LT wafer was also lapped with the fixed abrasive pad. 10 minutes later, the MRR of the LT was 66.19 $\mu\text{m}/\text{h}$ and the surface roughness S_a was decreased to 97.004 nm, shallow scratches can be observed on the wafer surface, and none abrasive particle were embedded on the surface of LT wafer. Compared with the result from the free abrasive lapping, the test using the fixed abrasive pad has better surface morphology, higher material removal rate and better finishing efficiency. When the LT wafer is lapped with fixed abrasive pad, the surface roughness of LT wafer decreases with the increase of pressure and speed; while the MRR increases with the increase of pressure and speed.

KEY WORDS: lithium tantalate; fixed abrasive pad; free abrasive; surface roughness; material removal rate

钽酸锂 (LiTaO_3 , 以下简称 LT) 晶体作为一种典型的单晶体“软脆”材料, 具有优异的压电、热释电和光电等多种性质, 其介电常数 $\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$ 为 53.6, 压电应变常数 d_{15} 为 $2.64 \times 10^{-11} \text{ C/N}$, d_{22} 为 $0.75 \times 10^{-11} \text{ C/N}$ 。LT 材料不仅在航空、航天等国防工业领域, 且在民用光电产品上也有广泛的应用, 是光通讯、激光及光电子领域中的基本功能材料, 广泛应用于表面波 (Surface Acoustic Wave, SAW) 器件、窄带滤波器、传感器、光子可调谐滤波器、声光器件、光陀螺仪、海量光子存储器、光波导、光开关、光通信调制器、干涉仪回转器、传感器、高速通信器件和倍频器件等, 特别是对于高频弹性波器件, 3G、4G 甚至 5G 标准下还没有其他更具优势的商品化晶体材料可以代替, 因此 LT 晶体被认为是无线通讯中最重要的基础材料之一, 其市场需求量增加显著, 且对加工的要求向大尺寸、超薄、近无损伤表面等方面发展。

目前, 国内外关于 LT 单晶超精密加工方面的相关研究报道并不多, 目前已公开的研究主要以磨削和游离磨料加工为主。杭伟等^[1]在磨削 LT 时采用了金刚石砂轮, 并在实验中加入了冷却电解液, 有效地抑制了 LT 晶片的破损风险, 降低了 LT 晶片的表面粗糙度。Hyunseop Lee 等^[2]在抛光液中加入柠檬酸后发现, 钽酸锂晶片材料去除率从没加入之前的 227.8 nm/min 提高到了 314.7 nm/min, 表面粗糙度降低到了 0.17 nm。杜宏伟等^[3]研究了在抛光液中加入过氧化氢和氢氧化钠, 利用化学反应的发生, 来提高材料的去除率。综上可知, LT 的主要加工方法仍旧沿用传统硬脆材料硅的加工方法, 沿用切片—倒角—研磨—抛光—清洗的工艺流程, 研磨和抛光阶段均采用游离磨料加工, 而游离磨料加工存在着面型精度差、加工效率低、环境友好性差等缺点。相比游离磨料加工, 固结磨料盘加工效率高、工件的面型精度较易控制, 逐渐成为平面超精密加工的研究热点之一。固结磨料盘是通过结合剂将磨料固结, 并在其中添加合适的添加剂, 制成磨具, 其可以在普通研磨抛光机上进行后续加工, 从而降低了改造的设备成本。

本文采用固结磨料盘研磨抛光技术加工 LT 晶片, 通过与游离磨料的实验结果进行对比, 验证了固结磨料磨盘加工 LT 晶片的有效性, 并研究了固结磨料盘加工 LT 晶体的材料去除率、表面粗糙度及表面质量, 为解决钽酸锂晶体的高效加工难题提供了一种新的探索方向。

1 实验

1.1 固结磨料盘的制作

固结磨料盘主要由磨料、结合剂、纳米级四氧化三铁、碳酸氢铵等组成。磨料起到材料去除、面型形成的作用; 结合剂的作用是将磨料和其他辅料粘结在一起; 添加剂则是为了改善磨具的加工性能。其制作工艺流程主要由配混料、固化、修整等步骤组成, 基本步骤如图 1 所示。先将磨料、辅料与树脂结合剂混合, 并搅拌均匀, 待成形后压实, 然后放入干燥箱中。干燥温度分为四个等级: 干燥温度 80 $^{\circ}\text{C}$, 干燥时间 4 h; 干燥温度 90 $^{\circ}\text{C}$, 干燥时间 4 h; 硬化温度 100 $^{\circ}\text{C}$, 硬化时间 4 h; 硬化温度 110 $^{\circ}\text{C}$, 硬化时间 4 h。最后进行脱模处理, 制成固结磨料盘。

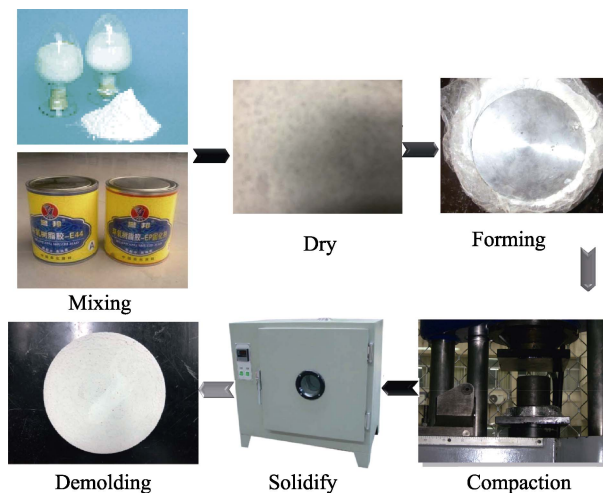


图 1 磨具制作流程

Fig.1 Manufacturing process of fixed abrasive pad

1.2 固结磨料盘的研磨原理

固结磨料盘工作原理如图 2 所示。固结磨料盘通过修锐，露出磨粒，然后固结磨粒对其工件进行微量的切削，形成材料的去除。相对于游离磨料研磨加工，固结磨料盘研磨由于磨料颗粒相对于工件的运动轨迹是确定的，因此工件材料的表面一致性有所提高，加工效率和磨粒利用率高。

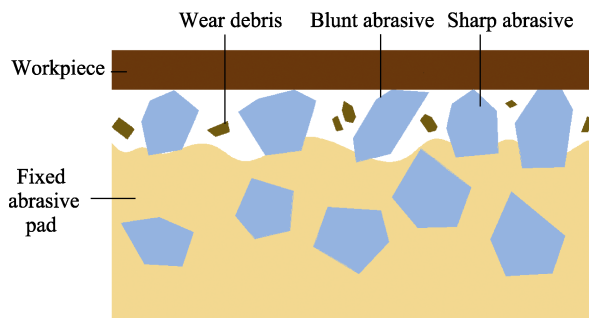


图 2 固结磨料盘的工作原理
Fig.2 The working principle of fixed abrasive pad

固结磨料盘研磨时，当突出的磨粒在与工件的相互摩擦中被磨钝后，由于接触面积增大，磨钝的磨粒因接触摩擦力变大而脱落；同时固结磨料盘的结合剂也被逐渐磨除，露出下层的结合剂和新的磨粒。由于新的磨粒和工件材料接触区域减小，导致产生的局部压强变大，材料去除速率增加。同时固结磨料盘通常使用去离子水作为研磨液，不仅减轻了游离抛光液使用后的处理成本及其对环境的压力，还大大减少了晶片过游离抛光时的凹陷和过蚀等现象^[17]。

1.3 加工实验条件

实验所用设备为智能型纳米抛光机 Nanopoli-100，研磨液为去离子水，加工原理示意图如图 3 所示。将钽酸锂晶片粘在基盘上，在基盘上施加载荷，右边为修整环，左边为粘有晶片的基盘，晶片随研磨盘同方向转动。

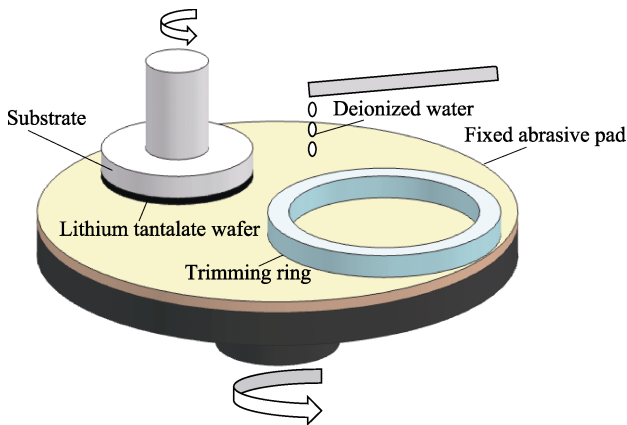


图 3 研磨加工示意图
Fig.3 Schematic diagram of lapping

实验中加工工件为直径为 5.08 cm 的 Y-36° LT 晶片，厚度为 500 μm，加工条件如表 1 所示。在固结磨料盘研磨加工过程中，采用 3000#金刚石固结磨料盘，其中金刚石磨料含量为 50%，加工过程中，研抛液为去离子水。游离磨料研磨时，采用铸铁盘，同样选用 3000#金刚石磨料，与去离子水混合制作成研磨液。通过称取钽酸锂晶片加工前后质量的变化，来计算材料的去除率。用 SEM 扫描电子显微镜观测被加工区域的表面形貌，并利用 SuperView W1 光学 3D 表面轮廓仪测量晶片的表面粗糙度。

表 1 实验条件
Tab.1 Conditions of experiment

| Parameters | Value |
|---|---|
| Work-piece | Y-36° lithium tantalate wafer |
| Processing equipment | Nanopoli-100 Nano intelligent polishing machine |
| Lapping pad | Fixed abrasive pad/Cast iron pad |
| Load/kPa | 4 |
| Abrasive type | 3000# diamond |
| Rotating speed/(rad·min ⁻¹) | 140 |
| Time/min | 10 |

2 结果与讨论

2.1 钽酸锂晶片的表面质量

试验中采用金刚石固结磨料盘和游离磨料分别对钽酸锂晶片进行研磨，研磨后测量了 3 个点，钽酸锂晶片的原始表面粗糙度 S_a 如图 4a、b 所示，其平均值为 420.112 nm。游离磨料研磨在铸铁盘上进行，如图 4a、c 所示。经过 10 min 研磨后，三个点的表面粗糙度 S_a 平均值为 233.308 nm，表面粗糙度仍然很大；如图 4a、d 所示，经过固结磨料盘研磨加工 10 min 后，三个点的平均表面粗糙度 S_a 降到 97.004 nm 范围内，表面较为光滑。

如图 5a 所示，在游离磨料研磨时，钽酸锂晶片易发生破碎，影响了工件表面的加工质量；而经固结磨料盘研磨后的钽酸锂晶片表面完整，如图 5b 所示。图 6a—c 分别为 Y-36°钽酸锂研磨前、固结磨料盘研磨 10 min 后、游离磨料研磨 10 min 后的 SEM 图。从图可知，研磨前，晶片表面凹凸不平；游离磨料研磨后，虽然表面粗糙度下降，但存在磨粒嵌入的现象；固结磨料盘研磨后，效果显而易见，除存在少量划痕，表面质量较好。

经过对比可以发现，固结磨料盘研磨钽酸锂获得的表面粗糙度 S_a 优于游离磨料研磨，且对于钽酸锂的表面粗糙度 S_a ，固结磨料盘加工的只有游离磨料加工的一半，且从图 4c、d 与图 6b、c 可以观察得到，

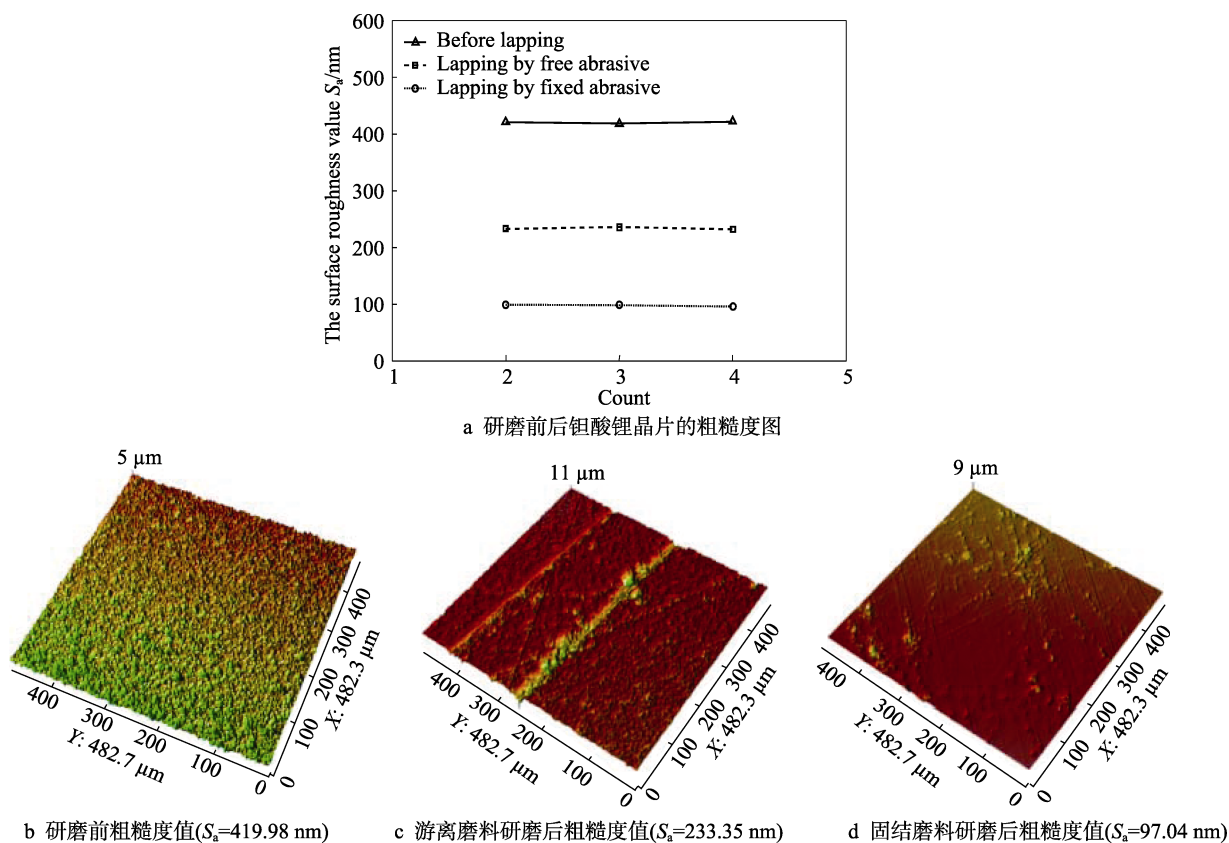


图4 Y-36°钽酸锂晶片的粗糙度值

Fig.4 The roughness value of Y-36° lithium tantalate wafer: a) roughness picture before and after lapping; b) roughness before lapping ($S_a=419.98$ nm); c) roughness after lapping by free abrasive ($S_a=233.35$ nm); d) roughness after lapping by fixed abrasive ($S_a=97.04$ nm)

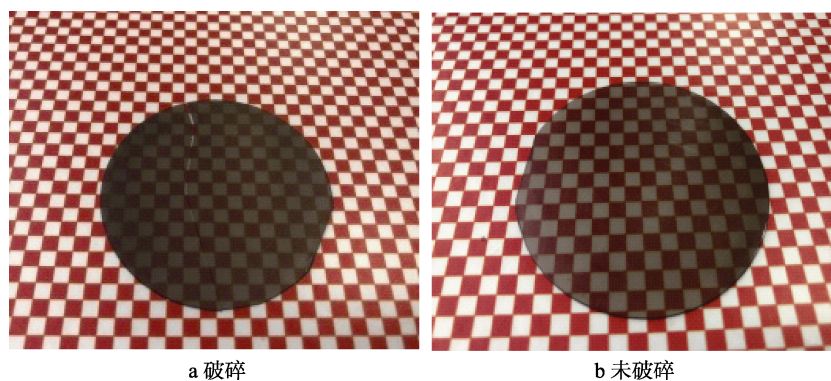


图5 钽酸锂晶片

Fig.5 LT wafer: a) broken; b) unbroken

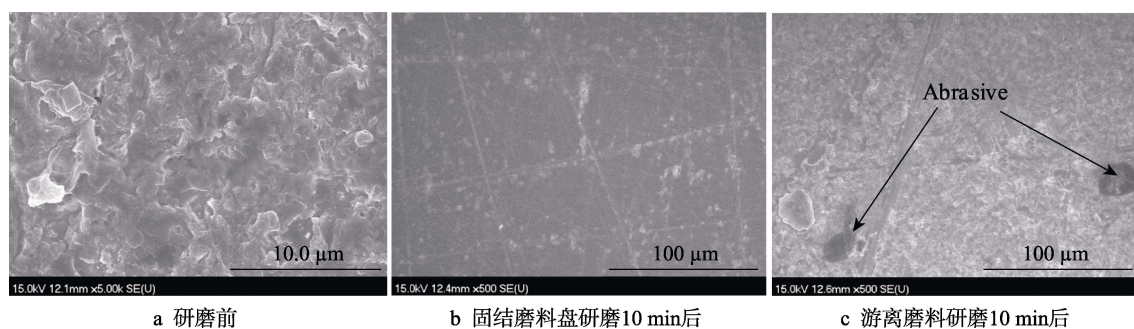


图6 Y-36°钽酸锂晶片的SEM图

Fig.6 SEM picture of Y-36° lithium tantalate wafer: a) before lapping; b) after 10 minutes of lapping by using fixed abrasive pad; c) after 10 minutes of lapping by using free abrasive

固结磨料盘研磨的钽酸锂晶片划痕要比游离磨料研磨的更浅、更细。一方面,这是由于游离磨料研磨主要以滚轧为主,磨粒在工件与铸铁盘之间大多处于滑擦或滚动运动形式,产生了滚压效果,工件表面材料去除以三体脆性去除为主,所以游离磨料对钽酸锂晶片造成的部分划痕较深,且磨粒在工件表面滚动轨迹随机,工件易上下振动,工件表面易产生脆性崩碎,形成切屑和凹坑。固结磨料盘研磨主要以犁削为主,材料去除以二体塑性去除为主,晶体表面只会形成细小的划痕。当固结磨料盘研磨时,磨粒固结在研磨盘中,且相对于工件的运动轨迹是一定的,在压力的作用下,出露部分以犁削形式划擦钽酸锂晶片表面。当磨粒出露高度较低时,划痕相应较浅;当出露高度较高时,磨粒受摩擦力作用会脱落,即有自身修整的能力。另一方面,游离磨料研磨时,磨粒的分布存在随机性,而固结磨料盘中磨料分布均匀,且加工晶片时受力较为均匀,对工件的加工更加均匀化,有利于改善晶片整体表面粗糙度,同时固结磨料盘的弹性模量远小于铸铁,在同样情况下,固结磨料盘的磨粒会有更好地向下凹陷的效果,磨粒切入钽酸锂晶片的深度相对较浅,故固结磨料盘研磨钽酸锂晶片得到的表面较光滑。

2.2 钽酸锂晶片材料去除率 MRR

如图 7 所示,相同条件下重复 3 次实验发现,游离磨料研磨后, Y-36° 晶向的钽酸锂晶片材料去除率 MRR 平均为 37.89 $\mu\text{m}/\text{h}$,而固结磨料磨盘研磨 10 min 后, Y-36° 晶向的钽酸锂晶片材料去除率 MRR 平均为 66.19 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

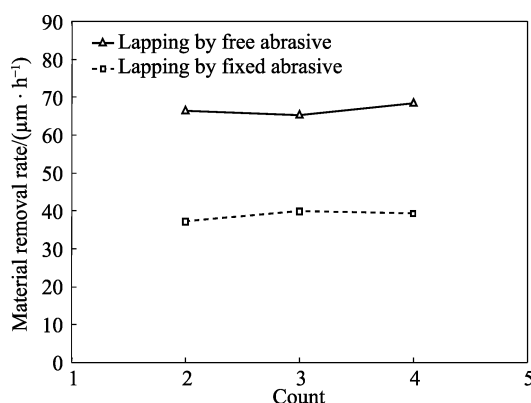


图 7 Y-36° 钽酸锂在两种加工条件下的材料去除率
Fig.7 The material removal rate of Y-36° lithium tantalate under two processing conditions

通过对比可以发现,固结磨料研磨钽酸锂晶片时,LT 的材料去除率 MRR 显著大于游离磨料研磨 LT 的材料去除率 MRR,为游离磨料的 1.5 倍。这是由于加工前通过修锐,固结磨料磨盘上的金刚石磨粒已露出,从而加快对钽酸锂晶片材料的去除,而当磨

粒磨钝后,会因相应增大的摩擦力而脱落,此时采用持续修锐加工,可以持续地露出下层的锋利磨粒,从而持续保持对钽酸锂晶片的高效加工。

2.3 钽酸锂固结磨料盘加工参数对其加工的影响

2.3.1 研磨参数对 LT 晶片表面粗糙度的影响

图 8a 为固结磨料盘转速为 120 r/min 时,研磨压力与钽酸锂晶片表面粗糙度的关系图。从图中可知,钽酸锂晶片的表面粗糙度随压力的增大而变小。这是因为随着压力的增大,磨粒切入晶片的深度变大,能去除工件表面一些较大的凹陷区域,使得整体粗糙度 S_a 得到改善。

图 8b 为研磨压力为 4 kPa 时,研磨盘转速与钽酸锂晶片表面粗糙度的关系图。从图可知,钽酸锂晶片表面粗糙度随着研磨盘转速的增大而减小。这是因为磨盘转速的增大,使磨粒与钽酸锂晶片在单位时间内的接触频率增加,有利于磨平突出的部位,晶片平坦度得到了提高,加工后,整体表面粗糙度就得到了提高。

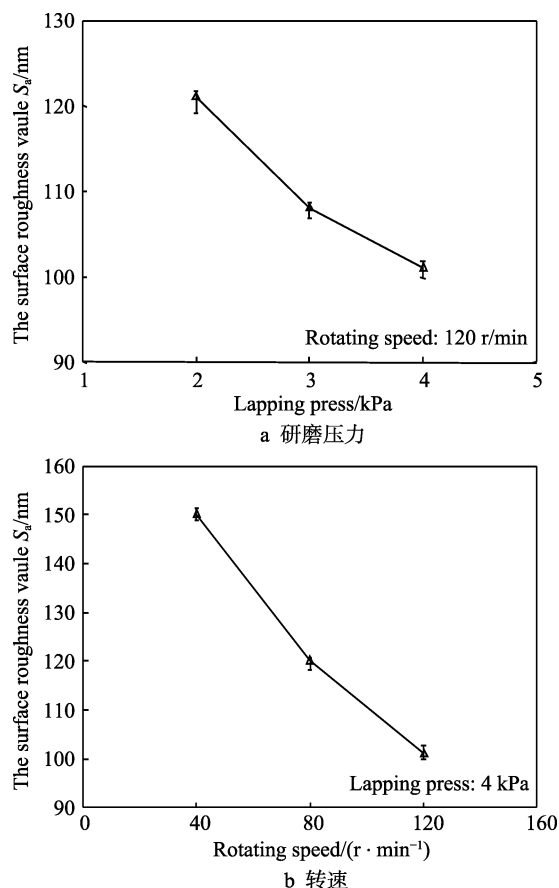


图 8 研磨压力、转速与 LT 表面粗糙度的关系
Fig.8 The relationship between lapping pressure rotation speed and the surface roughness of LT:
a) lapping pressure; b) rotation speed

2.3.2 研磨参数对 LT 晶片材料去除率的影响

图 9a 为当固结磨料盘转速为 120 r/min 时, 工件材料去除率与研磨压力的关系图。可以发现, 随着研磨压力的增大, 钽酸锂晶片材料去除率随之变大。这是由于随着研磨压力的增大, 磨粒对钽酸锂晶片的切入深度变大, 在单位时间内材料去除率就上升了。

图 9b 为研磨压力等于 4 kPa 时, 研磨盘与钽酸锂晶片材料去除率之间的关系图。可以发现, 当研磨盘转速增加, 材料去除率也随之增加。这是由于研磨盘转速的增大, 使磨粒相对速度变大, 单位时间内磨粒研磨晶片的频率变大, 材料去除率也就随之变大。

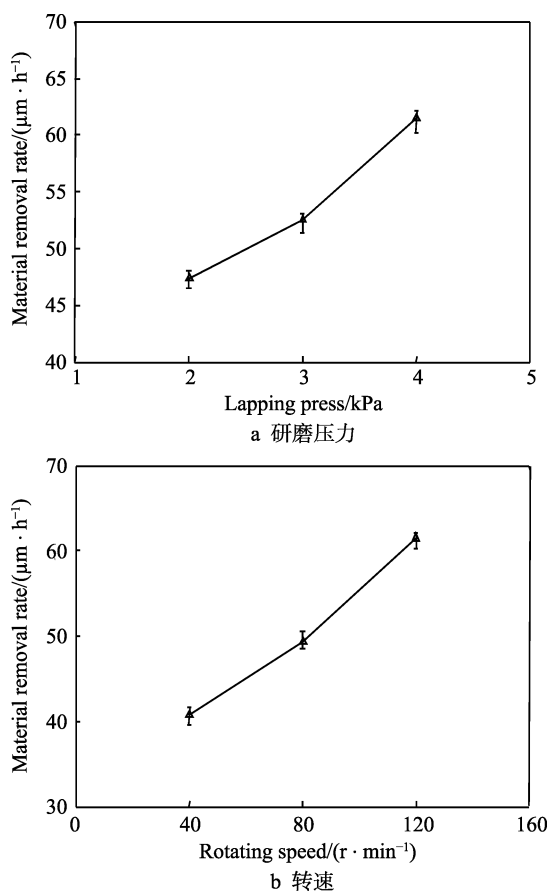


图 9 研磨压力、转速与 LT 材料去除率的关系
Fig.9 The relationship between lapping pressure, rotation speed and the material removal rate of LT: a) lapping pressure; b) rotation speed

3 结论

针对 Y-36°钽酸锂晶片, 本文采用了固结磨料盘研磨的方法, 选用了 3000#金刚石制作固结磨料盘, 与传统的游离磨料研磨进行了对比, 同时研究了固结磨料盘工艺参数对加工结果的影响, 相关结论如下:

1) 采用金刚石固结磨料盘对钽酸锂晶片进行研

磨, 在 10 min 内, 钽酸锂晶片表面粗糙度 S_a 从初始的 420 nm 降到 97 nm 左右; 而利用游离磨料在铸铁盘上研磨钽酸锂晶片时, 其表面粗糙度值 S_a 只能降到 200 nm 左右, 表面粗糙度 S_a 的改善效果将近提高了 2 倍。当固结磨料盘研磨时, 磨粒更好的退让作用, 造成磨粒切入钽酸锂晶片较浅, 相比较游离磨料研磨, 固结磨料盘研磨的钽酸锂晶片表面较光滑, 且无磨粒嵌入在晶片表面上, 研磨后表面质量较好。

2) 在转速为 140 rad/min、压力为 4 kPa 的条件下, 固结磨料盘研磨钽酸锂晶片材料去除率 MRR 是游离磨料研磨钽酸锂晶片的 1.5 倍。

3) 在固结磨料盘研磨时, LT 晶片的表面粗糙度随压力、转速增大而变小, 而 LT 晶片材料去除率随压力、转速增大而增大。

参考文献:

- [1] HANG Wei, ZHOU Li-bo, ZHANG Ke-hua, et al. Study on grinding of LiTaO_3 wafer using effective cooling and electrolyte solution[J]. Precision engineering, 2016, 44: 62-69.
- [2] LEE H. Effect of citric acid in chemical mechanical polishing (CMP) for lithium tantalate (LiTaO_3) wafer[J]. Advance material research, 2015, 806: 305-310.
- [3] 杜宏伟. 光电子材料钽酸锂晶片化学机械抛光过程研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2004.
- [4] DU Hong-wei. Study on chemical mechanical polishing of tantalum lithium crystal wafer[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2004.
- [5] TYMIAK N I, GERBERICH W W. Initial stages of contact-induced plasticity in sapphire. I. surface traces of slip and twinning[J]. Philos mag, 2007, 87(33): 5143-5168.
- [6] NOWAK R, CHROBAK D, NAGAO S, et al. An electric current spike linked to nanoscale plasticity[J]. Nat nanotechnol, 2009, 4(5): 287-291.
- [7] GERBERICH W W, NELSON J C, LILLEODDEN E T, et al. Indentation induced dislocation nucleation: The initial yield point[J]. Acta mater, 1996, 44(9): 3585-3598.
- [8] INKSON B J. Dislocations and twinning activated by the abrasion of Al_2O_3 [J]. Acta mater, 2000, 48(8): 1883-1895.
- [9] LV B H, YUAN J L, YAO Y X, et al. Study on fixed abrasive lapping technology for ceramic balls[J]. Materials science form, 2006, 532-533: 460-463.
- [10] CHOI J Y. A study on polishing of molds using hydrophilic fixed abrasive pad[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2004, 44(11): 1163-1169.
- [10] 袁巨龙. 功能陶瓷的超精密加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- YUAN Ju-long. Ultra precision machining of functional ceramics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000.

(下转第 371 页)

- cavity surface[J]. Die & mould industry, 2009, 35(3): 55-59.
- [5] 康桂文. 磁流变抛光技术的研究现状及其发展[J]. 机床与液压, 2008, 36(3): 173-175.
KANG Guiwen. Research status and development of magnetorheological polishing technology[J]. Machine tool & hydraulics, 2008, 36(3): 173-175.
- [6] ALAM Z, IQBAL F, GANESAN S, et al. Nanofinishing of 3D surfaces by automated five-axis CNC ball end magnetorheological finishing machine using customized controller[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 100(5-8): 1031-1042.
- [7] 周宪明. 环保型铜和铝表面的电化学抛光[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
ZHOU Xianming. Electrochemical polishing of environmentally friendly copper and aluminum surfaces[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [8] TILEY J K, SHIVELEY I I, VISWANATHAN G B, et al. Novel automatic electrochemical-mechanical polishing (ECMP) of metals for scanning electron microscopy[J]. Micron, 2010, 41(6): 615-621.
- [9] JAIN V K, ADSUL S G. Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM)[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2000, 40(7): 1003-1021.
- [10] KENDA J, DUHOVNIK J, TAVČAR J, et al. Abrasive flow machining applied to plastic gear matrix polishing [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 71(1-4): 141-151.
- [11] 赵磊. 小孔磨粒流抛光技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
ZHAO Lei. Research on small hole abrasive flow polishing technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [12] LARRY L, PATER Ph D. PAUL H BORST. An extrusion-type pulsed jet device[J]. WJAT, 1998, 3(2): 87-103.
- [13] SEMKO A N. Fluctuating powder-driven pulsed water jet[J]. Journal of mathematical sciences, 2001, 103(3): 418-422.
- [14] KNISELY C, ROCKWELL D. Self-sustained low-frequency components in an impinging shear layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 116: 157-186.
- [15] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Self-Sustained oscillations of impinging free shear layers[J]. Annual review of fluid mechanics, 1979, 11(1): 67-94.
- [16] KIMURA I, HOSODA T. A non-linear $k-\epsilon$ model with realizability for prediction of flows around bluff bodies [J]. International journal for numerical methods in fluids, 2010, 42(8): 813-837.
- [17] CROW S C, CHAMPAGNE F H. Orderly structure in jet turbulence[J]. Journal of fluid mechanics, 1971, 48(3): 547-591.
- [18] LUO Z C. Fluid network theory[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1988.
- [19] ROCKWELL D O. Prediction of oscillation frequencies for unstable flow past cavities[J]. Trans asme J fluids Eng, 1977, 99(2): 294-300.
- [20] JIARONG F, ZHAOHUI W, SI C. Self-excited oscillation frequency characteristics of a paralleled pulsed jet nozzle [J]. Energy procedia, 2017, 141: 619-624.
- [21] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Review-self-sustaining oscillations of flow past cavity[J]. Fluid engineering, 1978, 100(2): 152.
- (上接第 354 页)
- [11] 李伯民, 赵波, 李清. 磨料、磨具与磨削技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
LI Bo-min, ZHAO Bo, LI Qing. Abrasives, grinding tools and grinding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [12] 林旺票, 王洁, 杭伟等. 玻璃材料高速抛光用固着磨料磨具试验研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 141-146.
LIN Wang-piao, WANG Jie, HANG Wei, et al. Experimental research on fixed abrasives and abrasive tools for high-speed polishing of glass material[J]. Surface technology, 2015, 44(4): 141-146.
- [13] 邓乾发, 袁巨龙, 文东辉, 等. 半固着磨具在非晶态 NiPdP 合金薄膜铜片衬底精密研磨中的应用[J]. 表面技术, 2009, 38(8): 1-6.
DENG Qian-fa, YUAN Ju-long, WEN Dong-hui, et al. Approach to semi-fixed abrasive grinding plate on surface lapping copper substrates of amorphous Ni-Pd-P alloy films[J]. Surface technology, 2009, 38(8): 1-6.
- [14] MARINESCU I D, UHLMANN E, DOI T. Handbook of lapping and polishing[M]. Florida: CRC Press, 2006.
- [15] 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, 2013, 302: 1340-1344.
- [16] 刘幸龙. 固结磨料研磨 SiC 晶体基片研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
LIU Xing-long. Study on fix-abrasive lapping SiC crystal substrate[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.
- [17] 朱楠楠. 铌酸锂晶体的固结磨料高效低损伤研抛机理与工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
ZHU Nan-nan. Mechanism and process research of lithium niobate lapping and polishing by fixed abrasive pad with a high efficiency and low damage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.