

文章编号 1004-924X(2019)05-1096-07

## 典型功能脆性材料磨削

袁巨龙<sup>1</sup>, 张韬杰<sup>1</sup>, 凌 洋<sup>1</sup>, 王 洁<sup>1,2</sup>, 杭 伟<sup>1\*</sup>

(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, 浙江 杭州 310014;

2. 杭州职业技术学院 友嘉机电学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为了研究典型功能脆性材料钽酸锂和硅片的磨削特性, 建立了端面磨削模型来计算晶片的比磨削能及其表面的磨削力的分布, 并通过实验分析脆性材料的磨削特性。以进给速度作为变量, 选取砂轮端主轴磨削过程中功率增加率作为评价磨削特性的指标进行磨削实验, 同时采集砂轮端主轴的功率值信号, 滤波后计算晶片比磨削能和磨削力的分布。通过端面磨削模型计算可得: 钽酸锂的比磨削能是  $147.46 \text{ J/mm}^3$ , 比硅的大 44%, 表明磨削去除相同体积的钽酸锂需要更多的能量, 钽酸锂晶片表面分布的磨削力比硅片大。磨削过程的主轴功率增加率是预测钽酸锂加工结果的重要指标, 在本实验中一旦增加率大于临界值  $0.6 \text{ W/s}$ , 钽酸锂表面就会产生裂纹。而在相同加工条件下, 无论进给速度如何变化, 硅片的磨削主轴的功率增加率始终保持稳定, 而钽酸锂的主轴磨削过程的功率增加率则与进给速度呈现线性增加关系, 这一现象与钽酸锂的机械性质无关, 而与物理性质有关系。

**关键词:** 脆性材料; 比磨削能; 磨削力分布; 主轴功率增加率

**中图分类号:** TG580.6; TG74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192705.1096

## Grinding of typical functional brittle materials

YUAN Ju-long<sup>1</sup>, ZHANG Tao-jie<sup>1</sup>, LIN Yang<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1,2</sup>, HANG Wei<sup>1\*</sup>

(1. *Key Laboratory of Special Equipment Manufacturing and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;*

2. *Fair Friend Institute of Electromechanics, Hangzhou Vocational & Technical College, Hangzhou 310018, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: whang@zjut.edu.cn*

**Abstract:** To evaluate the grinding performance of typical functional brittle materials, a back-face grinding model was established and subsequently the specific energy of the wafer material and the distribution of grinding force was calculated during the grinding process according to this model. First, a series of grinding experiments were conducted at different feed rates. The rate of increase of spindle power was then chosen to evaluate the grinding performance; the recorded data of grinding power varied significantly, so it was filtered for the subsequent analysis. The experimental results indicate that the specific energy of  $\text{LiTaO}_3$  (LT) is  $147.46 \text{ J/mm}^3$ , which is 44% larger than that of Si, and that the grinding force of LT is larger than that of Si at the same distance from the center of the wafer. The

**收稿日期:** 2019-01-28; **修订日期:** 2019-03-06.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 51605440, No. 51575492); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2017M621966); 浙江省公益技术研究项目 (No. LGG19E050021)

rate of increase of spindle power played a critical role in the machining of  $\text{LiTaO}_3$ . It was found that, above the threshold value of 0.6 W/s, cracks were initiated and resulted in the breakdown of the wafer. Compared with the grinding of Si, spindle power in the  $\text{LiTaO}_3$  grinding experiments exhibited a linear relationship with the increase in feed rate under the same experimental conditions, which indicated that the physical properties other than the mechanical properties may also play a critical role in the grinding process.

**Key words:** brittle materials; specific energy; distribution of grinding force; increasing rate of spindle power

## 1 引言

作为典型的功能型“软脆”晶体钽酸锂 ( $\text{LiTaO}_3$ , 简称 LT) 是一种具有自发极化, 且极化强度能在外加电场下重新归零<sup>[1]</sup>, 硬度低<sup>[2]</sup> (莫氏硬度为小于 6), 极易破碎的铁电晶体<sup>[3]</sup>。钽酸锂属于三方晶系 3 m 点群, 为铁电相, 因具有卓越的电光<sup>[4]</sup>、压电<sup>[5]</sup>、热释电<sup>[6]</sup>等物理特性和优良的机械耦合系数和机械品质因数, 而在航空、航天, 民用光电产品等领域得到了广泛应用, 如表面波器件、窄带滤波器、传感器、光子可调谐滤波器、声光器件、光陀螺仪, 高频宽带滤波器、高频压电环能器、超声延迟线介质<sup>[7-10]</sup>等, 也是目前为止发现的光学性能最佳、指标最好的新一代信息功能晶体材料。

目前, 我国众多高速信息处理器件和光电器件制造企业正在大力发展以钽酸锂为基片的光电信息产品。随着产品小型化和高频化的市场要求, 超薄高质量钽酸锂晶片的需求量也越来越大。目前, 钽酸锂主流的减薄加工方法是研磨抛光, 但研抛加工存在着加工效率低、一致性差等问题<sup>[11]</sup>。超精密端面磨削加工具有加工工件形状精度优、加工效率高等优点<sup>[12-14]</sup>。因此, 本课题组针对钽酸锂进行超精密端面磨削加工研究, 同时选取另外一种典型的硬脆功能晶体硅片作为加工对象进行对比, 研究其磨削特性。首先提出晶片端面磨削模型来计算晶片的比磨削能和晶片表面磨削力的分布, 由磨削模型计算结果可知: 钽酸锂的比磨削能为  $147.46 \text{ J/mm}^3$ , 比硅的比磨削能大 44%, 这也就意味去除相同体积的钽酸锂需要更多的能量; 在磨削实验中, 钽酸锂晶片表面分布的

磨削力比硅片大。磨削主轴消耗的功率增加率是预测钽酸锂加工结果的重要指标, 在本实验中一旦功率大于临界值 0.6 W/s, 钽酸锂表面就会产生裂纹。而在相同加工条件下, 无论进给速率如何变化, 硅片的磨削主轴的功率增加率始终保持稳定, 钽酸锂的功率增加率则与进给速率呈现线性增加的关系, 这一现象与钽酸锂的材料物理性质有关。

## 2 晶片端面磨削材料去除模型

磨削参数如下:  $J_s$  为晶片的比磨削能 ( $\text{J/mm}^3$ );  $f$  为进给速率 ( $\mu\text{m}/\text{min}$ );  $r_s$  为砂轮半径 (mm);  $r_1$  为晶片圆心到磨粒切削面的距离 (mm);  $r_w$  为晶片半径 (mm);  $n_s$  为砂轮转速 (r/min);  $n_w$  为晶片转速 (r/min);  $P$  为磨削主轴功率 (W)。

典型的立式端面磨削示意图如图 1 所示, 晶

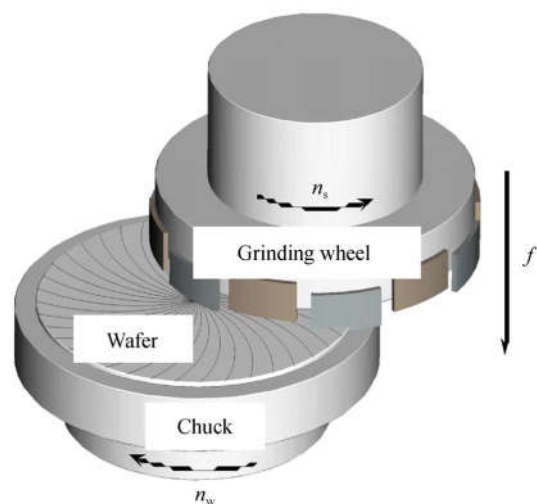


图 1 端面磨削示意图

Fig. 1 Schematic illustration of face grinding

片通过空气负压吸附在多孔陶瓷吸盘上,在磨削过程中,砂轮一边以转速  $n_w$  旋转,一边沿着进给方向  $f$  磨削去除材料,砂轮与晶片以偏心的方式按照各自的转速转动。

比磨削能  $J_s$  是一种非常重要的材料参数,它反映的是去除单位体积材料所需的能量,其计算公式为:

$$J_s = \frac{P}{V_{\text{MRR}}}, \quad (1)$$

其中  $V_{\text{MRR}}$  为材料单位时间的体积去除率。

$V_{\text{MRR}}$  可由式(2)计算而得:

$$V_{\text{MRR}} = \frac{\pi r_w^2 f}{1000}. \quad (2)$$

联立式(2),式(1)改写为:

$$J_s = \frac{60P}{\pi r_w^2 f} \times 10^3. \quad (3)$$

磨削功率可以通过采集实验数据得到,因此材料的比磨削能  $J_s$  可以从式(3)得到。

磨削力沿着半径方向上的分布也是非常重要的磨削结果,同样也可以通过这个模型得到。如图 2 所示(彩图见期刊电子版),黄色扇形区域是晶片按转速  $n_w$  转动,砂轮单圈转动后在晶片表面的磨削面积,  $r_1$  是沿着半径方向距离圆心的长度,而弧形面积  $S_{\text{rev}}$  可由式(4)计算得到。

$$S_{\text{rev}} = 2\pi r_1 \Delta \frac{n_w}{n_s}, \quad (4)$$

其中  $\Delta$  是磨削过程中的单位切深,可由式(5)得到。

$$\Delta = \frac{f}{n_w} \times 10^3. \quad (5)$$

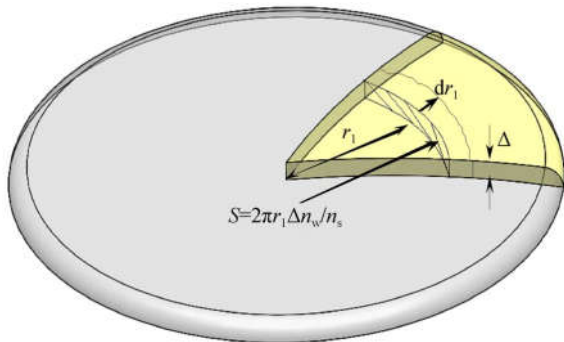


图 2 砂轮单圈转动晶片去除模型

Fig. 2 Removal model of wafer grinding in one rotation

联立式(4)和式(5),可得:

$$S_{\text{rev}} = 2\pi r_1 \frac{f}{n_w} \frac{n_w}{n_s} \times 10^3 = 2\pi r_1 \frac{f}{n_s} \times 10^3. \quad (6)$$

而沿着半径方向对弧形面积进行积分  $dr_1$  可得:

$$dV_{\text{MRR}} = S_{\text{MRR}} \times dr_1 = \frac{1}{30} \pi r_1 f \times 10^3 dr_1. \quad (7)$$

而去除体积  $dV_{\text{MRR}}$  所需的能量  $dP$  可由下面公式计算:

$$dP = J_s \times dV_{\text{MRR}} = \frac{J_s \pi}{30} f r_1 \times 10^3 dr_1. \quad (8)$$

而晶片的线速度可由式(9)计算:

$$v = \frac{2\pi r_s n_s}{60}, \quad (9)$$

根据  $F = \frac{P}{v}$ , 联立式(8)和式(9),磨削力沿着半径方向的分布为:

$$dF_t/dr_1 = \frac{dP}{v} = \frac{J_s}{r_s} \frac{f}{n_s} r_1. \quad (10)$$

## 3 实验

### 3.1 实验条件

如图 3(a)所示,磨削实验在专门为晶片加工设计的 UPG-150H 超精密磨床上进行,晶片粘结在玻璃基板上通过负压吸附在多孔陶瓷盘上。在端面磨削中,砂轮端和晶片端对半重叠安装在独立的主轴上,端面砂轮转动经过晶片的圆心,同时砂轮以一定的进给速度向晶片运动。如图 3(b)所示,基于前期的研究结果<sup>[15]</sup>,心型砂轮因具有很好的热传导性和自锐性而被选取作为本实验的砂轮。如图 3(c)所示,本实验的加工对象为 15.24 cm(6 英寸)的钽酸锂晶片和 20.32 cm(8 英寸)的硅片,选用纯水作为磨削液,其温度控制在 5 °C。

每次磨削加工前,金刚石砂轮都会用软质的碳化硅砂轮进行修锐。修锐使得每个砂轮片都能保持很好的锐利状态。砂轮端的功率可以通过安装在砂轮端的变频器采集,通过 A/D 转换

器变成数字信号记录在电脑端,再通过公式计算,把记录的值可以转化为功率值,其它加工条件如表 1 所示。

表 1 磨削加工条件

Tab.1 Grinding conditions

Parameters	Test setting
Grinding wheel	SD3000C160V Heart-diamond
Work piece speed $n_w/(r \cdot \min^{-1})$	50
Wheel speed $n_s/(r \cdot \min^{-1})$	1 200
Feed rate $f/(\mu\text{m} \cdot \min^{-1})$	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10
Wafer type	6 inch LiTaO <sub>3</sub> wafer (0110) 8 inch Silicon wafer (100)
Coolant	Pure water
Coolant temperature $T/^\circ\text{C}$	5

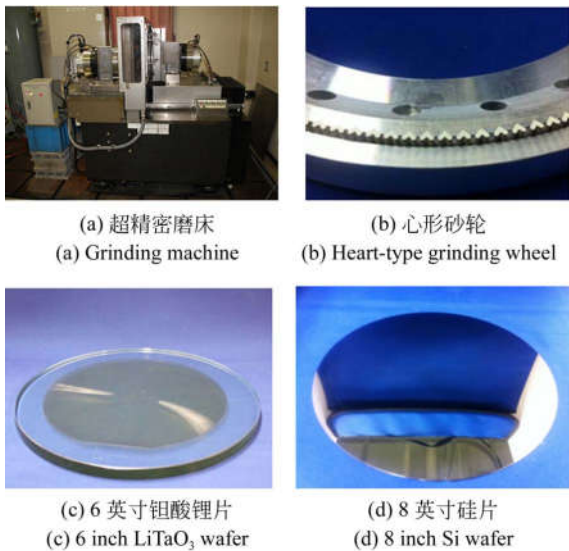


图 3 加工设备、砂轮以及样品图

Fig. 3 Experimental setup, grinding wheel and samples

### 3.2 实验结果

#### 3.2.1 比磨削能

图 4 是硅片磨削实验中砂轮端的功率图。因为本实验中使用的是高频换能器,功率的记录值易受噪音而波动,因此在分析前对采集信号进行滤波。由滤波后的值可知,当功率值达到 323 W 以上,砂轮接触晶片进入磨削阶段,而

随着砂轮进一步的进给,主轴功率稳定在 953 W 左右。而如前文所述,只有磨削阶段的功率用于计算材料的比磨削能  $J_s$ ,其中磨削阶段的功率通过该阶段功率曲线对时间进行积分再除以相应的时间求得,而磨削过程功率的增加率可以近似看成切向磨削力的增加率。从图 4 可知,硅片的磨削阶段直到加工结束都可以保持稳定磨削状态。

图 5 是钽酸锂磨削实验中砂轮端的功率图,与硅片磨削功率图相比,钽酸锂磨削功率只能保持很短的稳定状态,然后持续上升,其增加率定义为  $K = \tan \theta$ 。等同于硅片分析方法,钽酸锂磨削阶段的功率也用于计算其晶片的比磨削能  $J_s$ 。

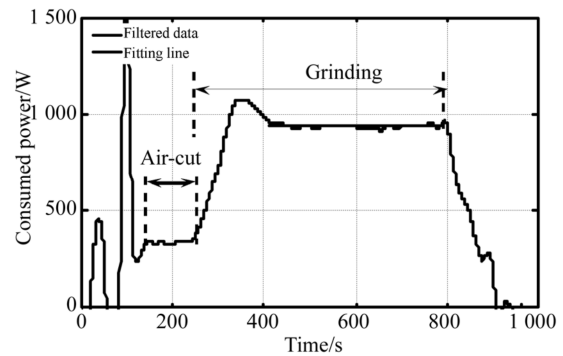


图 4 硅片加工中功率与时间的关系

Fig. 4 Typical consumed power vs. time of silicon test

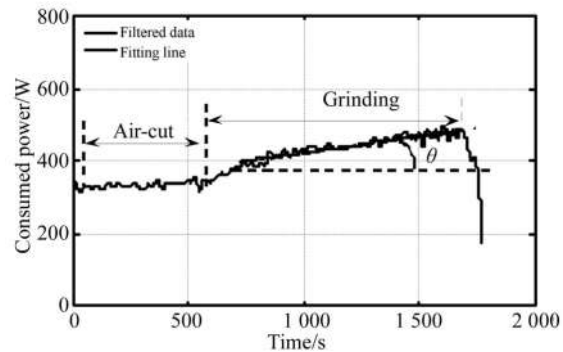


图 5 钽酸锂加工中功率与时间的关系

Fig. 5 Typical consumed power vs. time of LT test

图 6 是硅片和钽酸锂磨削阶段主轴功率与进给速度的关系,无论钽酸锂还是硅片,磨削的功率

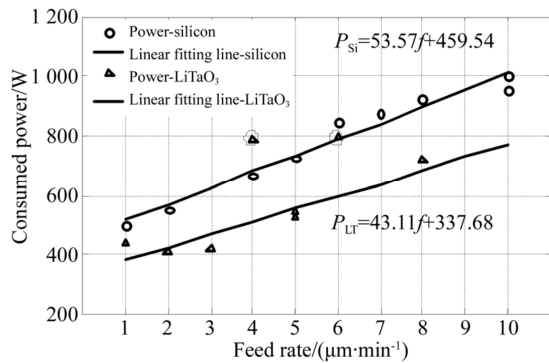


图 6 钽酸锂和硅片磨削阶段功率与进给速度的关系  
Fig. 6 Consumed power  $P$  vs. feed rate  $f$  for LT and Si

与进给速度呈现线性关系,这与前面的理论分析的结果有很好的吻合。而对于钽酸锂来说,当进给速度为 4 和 6  $\mu\text{m}/\text{min}$  时,晶片出现了破损现象,因此分析中不会采用这两组数据,通过线性拟合方法,两种晶片的主轴消耗功率  $P$  与进给速度  $f$  的关系如下:

$$P_{\text{Si}} = 53.57f + 459.54, \quad (11)$$

$$P_{\text{LT}} = 43.11f + 337.68. \quad (12)$$

联合式(3)和式(11),硅片的比磨削能为:

$$J_{\text{Si}} = \frac{53.57 \times 60}{\pi r_w^2} = 102.3 (\text{J}/\text{mm}^3).$$

用同样的方法可得钽酸锂的比磨削能为:

$$J_{\text{LT}} = \frac{43.11 \times 60}{\pi r_w^2} = 147.46 (\text{J}/\text{mm}^3).$$

由上述计算结果可得,钽酸锂的比磨削能  $J_s$  比硅片大,也就意味着钽酸锂材料去除比硅片多需要 44% 的能量,这与之前的研究结果一致<sup>[16]</sup>。

### 3.2.2 磨削力分布

通过式(10)和磨削实验结果可得,钽酸锂和硅片磨削过程中的磨削力分布如图 7 所示。由结果可知,钽酸锂晶片表面分布的磨削力比硅片表面分布的磨削力要大,在距离晶片中心位置 6 cm 处,钽酸锂的磨削力要比硅片的大 42%。

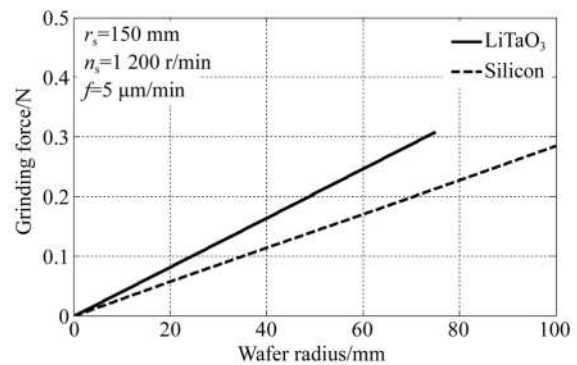


图 7 钽酸锂和硅片的磨削力分布  
Fig. 7 Distribution of grinding force for LT and Si

### 3.2.3 Si 和 LT 磨削结果对比

图 8 是磨削主轴的功率增加率  $K$  与进给速度的关系。由图可知,硅片的  $K$  值随进给速度波动很小,只有 -0.2 到 0.2  $\text{W}/\text{s}$ ,也就表明硅片在磨削过程中,砂轮呈现出很好的自锐性,磨削功率或者磨削力非常稳定且没有裂纹产生。而与硅片的磨削结果相比,虽然钽酸锂也是采用同样的加工条件,但是由图可知钽酸锂的磨削功率的增加率随着进给速度的增大持续增加,即钽酸锂的  $K$  值与进给速度  $f$  呈现线性关系,而当  $K$  大于临界值 0.6  $\text{W}/\text{s}$  时,裂纹也很容易产生,这很难从传统硬脆材料加工的机械性质方面找到合理的解释,这与 LT 材料的物理性质有关,还需要进一步的研究。

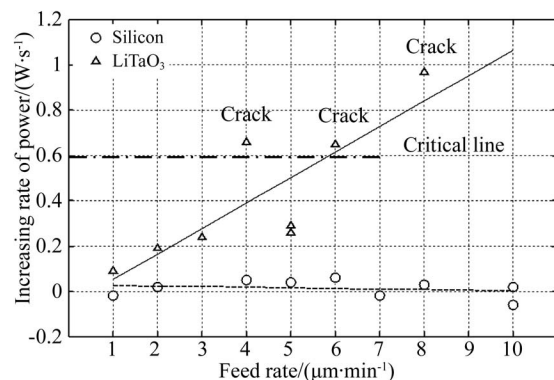


图 8 磨削主轴的功率增加率  $K$  与进给速率  $f$  的关系  
Fig. 8 Relationship between increasing rate of grinding spindle  $K$  and feed rate  $f$

## 4 结 论

本文选用典型的软脆材料钽酸锂和硬脆材料硅片作为研究对象,进行了脆性材料磨削实验研究。实验结果表明:通过建立端面磨削模型来计算材料的比磨削能和磨削力的分布,得到钽酸锂的比磨削能是  $147.46 \text{ J/mm}^3$ ,比硅的值大 44%;而在磨削过程中,钽酸锂晶片表面分布的磨削力

在距离圆心相同距离的条件下比硅片大。磨削主轴功率的增加率是预测钽酸锂加工结果的重要指标,一旦功率增加率值大于临界值  $0.6 \text{ W/s}$ ,钽酸锂表面就会产生裂纹。在相同的加工条件下,无论进给速率  $f$  如何变化,硅片的磨削主轴的功率增加率  $K$  始终保持稳定,而钽酸锂的功率增加率  $K$  则与进给速率  $f$  呈现线性增加关系,这一现象与钽酸锂的材料物理性质有关系,还需要进行进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] HANG W, ZHOU L B, ZHANG K H, *et al.*. Study on grinding of  $\text{LiTaO}_3$  using effective cooling and electrolyte solution[J]. *Precision Engineering*, 2016, 44:62-69.
- [2] KIM W Y, LEE H C. Low-voltage nonvolatile multi-bit memory fabricated by the patterning and transferring of ferroelectric polymer film[J]. *Organic Elec.*, 2015,19: 1-6.
- [3] PANG L L, WANG Z G, SUN J R, *et al.*. Evolution of optical absorption and strain in  $\text{LiTaO}_3$  crystal implanted by energetic He-ion[J]. *Materials and Atoms*, 2015, 354: 301-304.
- [4] MA C, LU F, MA Y. Study of the effect of H implantation and annealing on  $\text{LiTaO}_3$  surface blistering[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*,2015,342:76-81.
- [5] SHI L, SHEN Q, QIU Z. Concentration-dependent upconversion emission in Er-doped and Er/Yb-codoped  $\text{LiTaO}_3$  polycrystals[J]. *Journal of Luminescence*, 2014, 148: 94-97.
- [6] WU X, ZHENG W. Theoretical explanation of g factors for  $\text{Ti}^{3+}$  ions in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  crystals [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2014,125(6):1753-1755.
- [7] LIU X. Influence of Scions on optical properties of  $\text{Ce}:\text{LiTaO}_3$  crystals[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013,124(18): 3646-3648.
- [8] BELIVICHIS J, RIMEIKA R, ČIPLYS D. Acousto-optic interaction with leaky surface acoustic waves in Y-cut  $\text{LiTaO}_3$  crystals[J]. *Ultrasonics*, 2012,52(5):593-597.
- [9] SHI Y L, ZHANG C, ZHANG H, *et al.*. Low (sub-1-volt) halfwave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromophore shape[J]. *Science*, 2000,288(5463):119-122.
- [10] SAITO Y, TAKAO H. High performance lead-free piezoelectric ceramics in the  $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3\text{-LiTaO}_3$  solid solution system[J]. *Optics Letters*, 2006, 338(1):17-32.
- [11] 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.
- [12] DENG Q F, YUAN J L, WEN D H, *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. (in Chinese)
- [13] 王紫光,高尚,朱祥龙,等. 硅片低损伤磨削砂轮及其磨削性能[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2689-2696.
- [14] WANG Z G, GAO SH, ZHU X L, *et al.* Grinding wheel for low-damage grinding of silicon wafers and its grinding performance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2689-2696. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] HU ZH W, SHAO M J, GUO J M, *et al.*. Comparison of grinding characteristics of different crystal surfaces for sapphire[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1250-1258. (in Chinese)
- [17] 马振芳,王丽,姜雪,等. 镁铝尖晶石的塑性域磨削[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 963-968.
- [18] MA ZH F, WANG L, JIANG X, *et al.*. Ductile grinding of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  spinel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 963-968. (in Chinese)
- [19] HANG W, ZHOU L B, SHIMIZU J, *et al.*.

Study on the thermal influence of grinding process on  $\text{LiTaO}_3$  [J]. *Advanced Material Research*, 2013,797: 252-257.

[16] HANG W, ZHOU L B, SHIMIZU J, *et al.*.

Study on the mechanical properties of lithium tantalite and the influence on its machinability [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2013,7(6):644-653.

作者简介:



袁巨龙(1962—),男,博士,教授,博士生导师,1992 于浙江大学获得博士学位,主要从事精密与超精密加工(研磨、抛光、磨削)工艺、装备和在线在位检测技术的研究。E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn

通讯作者:



杭伟(1984—),男,博士,讲师,硕士生导师,2014 年于日本茨城大学获得博士学位,主要从事超精密加工技术及其装备,尤其是软脆功能材料的超精密减薄加工。E-mail: whang@zjut.edu.cn