

文章编号 1004-924X(2015)12-3387-08

铌酸锂晶体的研磨亚表面损伤深度

朱楠楠, 朱永伟*, 李 军, 郑方志, 沈 琦

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对光学材料研磨过程引入的亚表面损伤层(SSD)深度对工件的抛光工序效率和表面质量的影响, 探索了光学材料在研磨过程中的亚表面损伤规律。采用角度抛光的方法测量了软脆材料铌酸锂(LN)晶体的损伤层深度, 分析了研磨方式、磨粒粒径和研磨压力对工件亚表面损伤层的影响规律。结果表明: 研磨方式对损伤缺陷的影响最为显著, 相同研磨条件下游离磨料研磨后的损伤层深度约为固结磨料研磨的 3~4 倍, 游离磨料研磨后工件亚表面存在多处圆弧形裂纹, 固结磨料研磨后主要显现细小裂纹和“人”字型裂纹; 当磨粒粒径从 W28 下降到 W14 后, 游离研磨的亚表面损伤层深度下降至原来的 45%, 而固结研磨的损伤层深度下降至 30%; 另外, 研磨压力的降低有利于减小工件的亚表面损伤。该研究对 LN 晶体研磨方式及研磨工艺的选择具有指导意义。

关键词: 软脆晶体; 铌酸锂晶体; 固结磨料研磨; 磨粒粒径; 亚表面损伤深度

中图分类号: O786; TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3387

Subsurface damage depth of lithium niobate crystal in lapping

Zhu Nan-nan, Zhu Yong-wei*, Li Jun, Zheng Fang-zhi, Shen Qi

(*Jiangsu Province Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology,
College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

* *Corresponding author, E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn*

Abstract: In consideration of the effect of the Subsurface Damage Depth (SSD) of optical material introduced by lapping on the efficiency of polishing process and surface quality of workpieces, this paper explores laws of the subsurface damages (SSDs) of optical materials in lapping process. An angle polishing method was employed to measure the SSD of a soft-brittle material Lithium Niobate (LN) crystal. The influences of lapping type, grit size and lapping parameter on the SSD were investigated experimentally. The results show that lapping method is the most significant factor on the SSD. The SSD of loose abrasive lapping is about 3—4 times that of fixed abrasive lapping in the same condition. Circular cracks are filled in the subsurface of loose abrasive lapping workpiece, while herringbone cracks are mainly distributed over the subsurface of fixed abrasive lapping workpiece. The effects of grit size are also quit remarkable. With the grit size decreasing from W28 to W14, the damage depths of loose abrasive lapping and fixed abrasive lapping are decreased to 45% and 30%, respectively. Moreover, reducing applied load is beneficial to subsurface defects. This study affords a guidance for lap-

收稿日期: 2015-05-05; **修订日期:** 2015-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51175260, No. 50905086); 航空科学基金资助项目(No. 2014ZE52055); 江苏省研究生培养创新工程资助项目(No. KYLX_0231); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

ping method selection and lapping process optimization of LN crystals.

Key words: soft-brittle crystal; lithium niobate crystal; fixed-abrasive lapping; grit size; subsurface damage depth

1 引言

铌酸锂晶体是一种集压电、铁电、热释电、非线性、电光、电弹、光折变等性能于一体的多功能材料,具有良好的热稳定性和化学稳定性,目前已在声表面波滤波器、光波导基片、红外探测器等领域得到了广泛应用^[1-2]。铌酸锂晶体是典型的软脆材料(莫氏硬度为 5)^[3],研磨时极易出现的亚表面损伤(SSD)和磨粒嵌入等缺陷会影响其光学特性,必须在抛光时将研磨阶段引入的亚表面损伤层完全去除。探索研磨方式和研磨参数对铌酸锂晶体亚表面损伤层的影响规律对控制表面质量具有重要意义。

固结磨料研磨与游离磨料研磨相比具有研磨效率高、环境友好、研磨表面一致性好等优点,得到了众多研究者的关注。王建彬^[4]、王占奎^[5]等人分别采用固结磨料研磨硬脆材料蓝宝石和镁铝尖晶石,获得了较高的研磨效率;居志兰^[6]等人研究了不同研磨介质对水晶的固结磨料研磨去除率;李军^[7]、朱永伟^[8]等人从固结磨料研磨垫的自修整性能角度分析了固结磨料的研磨机理。相关研究还表明,采用亲水性固结磨料技术取代游离磨料对软脆晶体铌酸锂进行研磨加工,可从原理上消除磨料嵌入缺陷,并减少亚表面损伤。

近年来,张伟等^[9]利用击坑法观察了磷酸盐钽玻璃研磨过程中的亚表面损伤,研究了磨料粒径、载荷大小及工作台转速对钽玻璃表面、亚表面损伤的影响。李圣怡、王卓等^[10-12]利用磁流变抛光斑点技术测量了 K9 玻璃在不同研磨条件下的亚表面损伤深度,并建立了基于压印断裂力学理论的亚表面损伤预测模型。吴东江等^[13]采用截面显微法和择优刻蚀法分别对磷酸二氢钾(KDP)晶体线切割样品、磨削、抛光各阶段进行亚表面损伤检测。戴子华等^[14]提出了 BOE 分步腐蚀法评价 K9 玻璃的亚表面损伤。但是,对于软脆晶体的亚表面损伤评价,尤其是固结磨料研磨条件下的亚表面损伤评价尚未涉及,这也给铌酸锂(LN)晶体的固结磨料研磨工艺参数的确定

带来了诸多困难。

本文采用角度抛光的方法探索研磨方式、磨粒粒径和压力等研磨参数对软脆晶体铌酸锂的亚表面损伤深度的影响规律,可为 LN 晶体研磨抛光工艺参数的制订提供理论指导。

2 实验

2.1 试件制备

试件材料为 X 向 LN 晶体,直径为 70 mm,厚度为 0.5 mm,研磨试验在 CP-4 测试系统上进行。为了研究 LN 研磨后的亚表面损伤规律,设计了研磨试验,对比了研磨方式、磨粒粒径及研磨压力对亚表面损伤层的影响规律,如表 1 所示。游离磨料试验采用 4%(质量百分比)金刚石微粉、1%(质量百分比)分散剂与去离子水混合配制的研磨液,采用铸铁作为研磨盘;同时,分别将粒径为 W28、W14 的金刚石微粉固结在树脂基体中,制成固结磨料研磨垫,研磨液主要为去离子水,添加 0.2%OP-10 乳化剂,以提高垫子的湿润性。固结磨料研磨前,先用油石修整垫子 1 min;每组试验统一转速为 80 r/min,研磨时间均为 20 min;试验结束后超声清洗晶片,吹干。表面粗糙度 R_a 值由 AFM(德国布鲁克)测量得到。

表 1 研磨试验参数

Tab. 1 Experimental parameters of lapping

试验号	组别	磨粒粒度	磨粒浓度 /%(质量百分比)	研磨压力 /kPa
1	游离粗研	W28	4	15
2	游离精研	W14	4	15
3	固结粗研	W28	50	7
4	固结粗研	W28	50	15
5	固结精研	W14	50	7
6	固结精研	W14	50	15
7	切割片	—	—	—

2.2 亚表面损伤深度的测量方法

采用角度抛光原理测量亚表面损伤深度,实验流程如图 1 所示。1)将 10 mm 厚的 K9 玻璃磨

出小角度斜面(度数 $<3^\circ$)作为承载器, 试件加热后用石蜡黏接在 K9 斜面上, 冷却后置于环抛机上抛光斜面。加载时, 使用环抛机自带的调整环固定承载器, 以保持抛光角度的稳定性。抛光工艺参数如表 2 所示; 2) 卸载、超声清洗、吹干, 将斜面置于腐蚀液中, 利用腐蚀作用扩展裂纹, 使其便于观测; 3) 在试件斜面上标记扫描起点和终点, 用 Nanomap 三维形貌仪扫描得到斜面轮廓线, 作为测量亚表面损伤深度的基准线; 4) 将试件置于微动平台上, 用光学显微镜观察斜面上裂纹的分布和类型, 以裂纹结束位置的坐标计算亚表面损伤层深度。

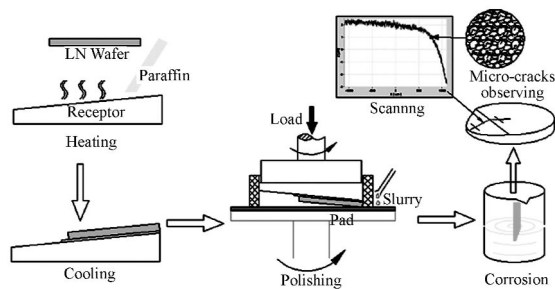


图 1 SSD 检测过程

Fig. 1 Detection process of SSD

表 2 抛光斜面用工艺参数

Tab. 2 Parameters of polishing slope

抛光盘转速	砒码重量	抛光液	流量	抛光时间
50 r/min	1 100g	90~100 nm 硅溶胶	15 ml/min	20 min

3 结果与分析

3.1 研磨方式对工件表面粗糙度的影响

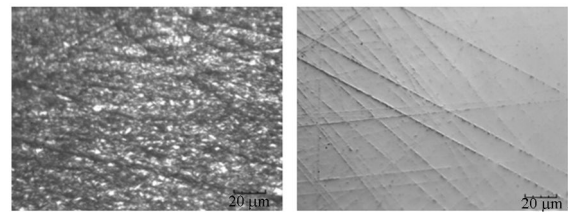
试件经 W28 的游离磨料粗研后 R_a 值反而超过了切割样件(表 3), W14 游离磨料精研后表面粗糙度有所下降, 接近切割样件。形成鲜明对比的是, 样品经 W28 的固结磨料粗研后, 试件表面 R_a 值降至 50 nm 以下, W14 精研后 R_a 值降至几 nm, 粗糙度低了 1~2 个数量级。

表 3 试件研磨后 R_a 值/nm

Tab. 3 R_a /nm of lapped LN

1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
290	245	32.5	49.1	4.1	5.2	230

采用 W28 的游离磨料研磨时, 磨粒在工件与研磨垫之间发生滚动, 产生滚轧效果, 使工件表面产生脆性崩碎而形成切屑, 因此工件表面材料去除以三体脆性去除为主, 表面形貌呈网纹状; 固结磨料研磨时, 磨粒固结在研磨垫中, 在压力的作用下出露部分以犁削形式划擦工件表面; 当磨粒出露高度较低时划痕较浅, 当出露高度较高时划痕深度增大形成表面裂纹及崩碎, 因此材料去除形式以二体脆/塑去除为主; 又因固结磨料垫子的弹性模量远小于铸铁, 磨粒的“退让”作用造成磨粒切入工件较浅, 工件表面较光滑, 如图 2 所示。



(a) 游离研磨

(b) 固结研磨

(a) Loose abrasive lapping (b) Fixed abrasive lapping

图 2 游离研磨和固结研磨后的试件表面显微形貌 (W28)

Fig. 2 Surface micrographs after loose abrasive lapping and fixed abrasive lapping (W28)

3.2 LN 化学浸蚀剂的选择

磨粒卸载时, 中位裂纹闭合, 细小裂纹在光学显微镜下难以观察。化学腐蚀的作用是将原本不易观察的裂纹通过腐蚀扩展得以在显微镜下显现, 关键在于腐蚀液的选择以及腐蚀时间的确定。将抛出的斜面沿倾斜方向切成若干小片, 浸入腐蚀液中, 观察腐蚀后的表面细微裂纹。LN 在熔融 KOH 中的腐蚀速率较快, 腐蚀 2 min 后, 腐蚀过量, 表面显微图片已经观察不到裂纹, 如图 3 所示, 其反应如下^[3]:



采用 40% HF 腐蚀 LN 5 min, 原有缺陷暴露出来, 30 min 时缺陷已经很清晰, 40 min 时腐蚀表面出现过腐蚀坑点。最终确定利用 HF 为腐蚀液, 常温下对 LN 腐蚀 30 min 效果最佳。

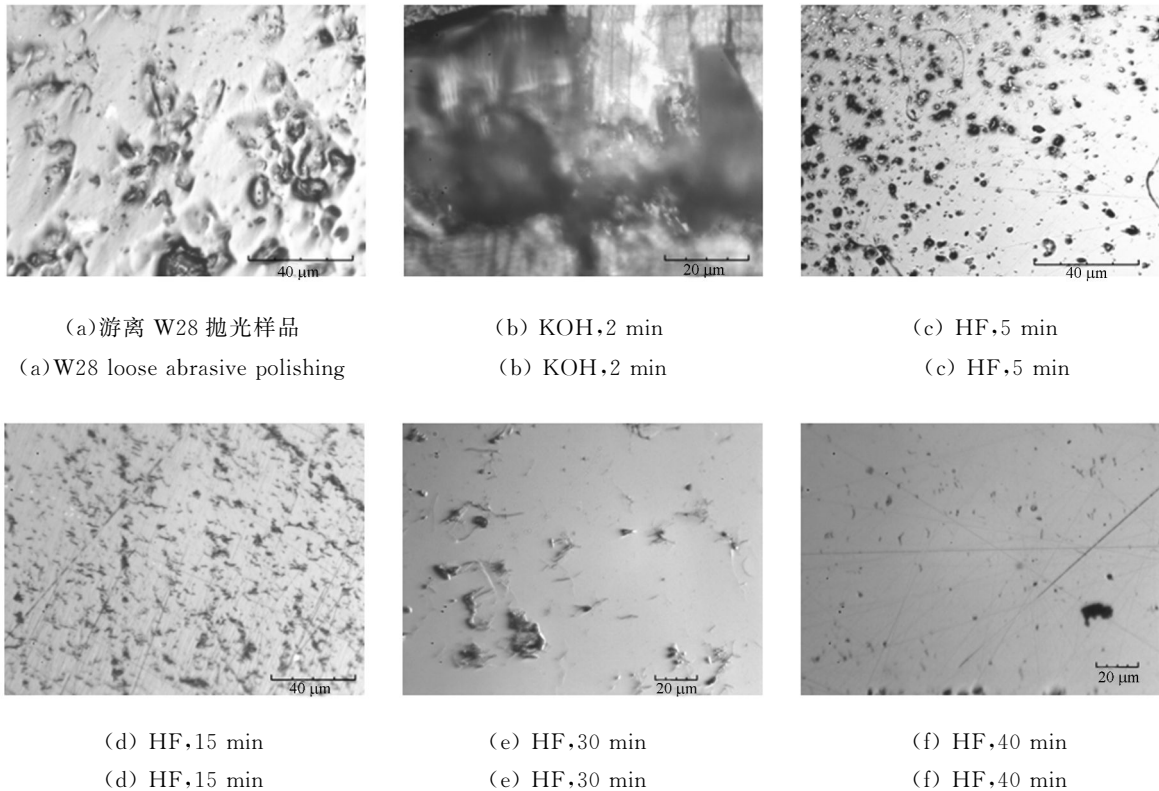


图 3 不同腐蚀效果的亚表面损伤显微图片

Fig. 3 SSD micrographs in different corrosion conditions

3.3 研磨方式对亚表面损伤的影响规律

不同研磨方式对 LN 亚表面裂纹的形成与生长的影响极为显著。15 kPa 研磨压力下, 游离磨料粗研(W28)和精研(W14)后工件的亚表面损伤层深度远大于同阶段固结磨料加工后的工件(图 4)。粗研阶段, 游离研磨后的 SSD 深度比切割样件高出近 1 倍, 为固结研磨的 2.5 倍; 精研阶段游离 SSD 深度高达固结测量值的近 4 倍。

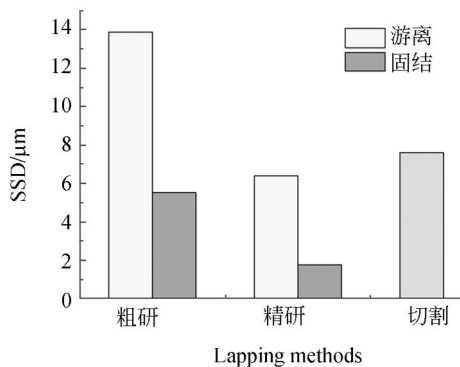


图 4 研磨方式对 LN 试件亚表面损伤层的影响

Fig. 4 Effect of lapping methods on SSD depth of LN

根据压痕断裂力学理论可获得尖锐压头印压

中位裂纹深度 c 的理论计算方法^[15]:

$$c = \alpha_K^{2/3} \left(\frac{E}{H} \right)^{2(1-m)/3} (\cot \phi)^{4/9} \left(\frac{P}{K_r} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

$$\alpha_K = 0.027 + 0.09(m - 1/3), \quad (3)$$

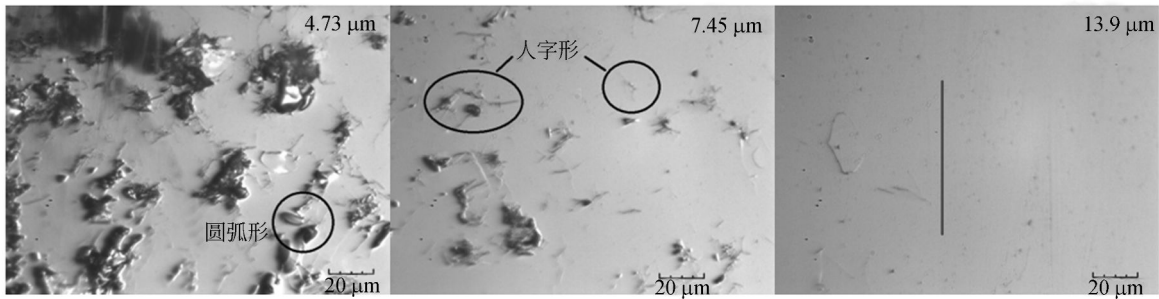
式中: c 为裂纹深度, P 为压痕压制载荷, ϕ 为压头锐角度, E 、 H 、 K_r 分别为材料的弹性模量、表面硬度以及压痕应力场塑性应力强度因子, m 为 $1/3 \sim 1/2$ 之间的常数。

由式(2)、(3)可知, 研磨过程中工件亚表面产生裂纹的深度 c 与承受载荷 P 成正比, 载荷越大, 接触区下产生的裂纹深度越深。而游离磨料研磨过程中, 磨粒颗粒完全暴露于工件与铸铁研磨盘的接触间隙, 在正压力、切向摩擦力以及研磨液的冲蚀作用下在接触间隙中滚动。由于铸铁研磨垫表面硬度及弹性模量远高于树脂, 加上铸铁研磨盘对磨料的容留能力低, 间隙内参与工作的磨粒数量少, 磨粒切入工件的深度较深, 作用在单颗磨粒上的压力较大, 由式(2)可知裂纹深度相应变深, SSD 值较大。由于滚轧效果显著, 导致工件表面/亚表面出现大量的剥落坑(图 5(a)、(b), 红线标示裂纹截止位置), 在工件亚表面留下多处

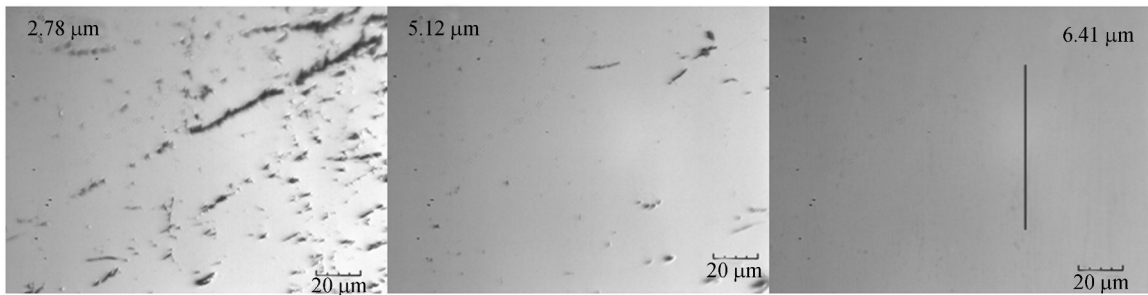
圆弧形裂纹, 材料去除方式以三体脆性去除为主, 表面粗糙度较高。

固结磨料研磨过程中, 由于磨粒出露高度有限, 且研磨垫树脂基体较软导致磨粒的退让作用显著, 切入工件的深度相对较浅; 同时, 固结在树脂中的金刚石磨粒浓度高, 参与研磨作用的磨粒数量多, 相同载荷下, 作用在单颗磨粒的力较小, 裂纹深度较浅。因此同等粒径的磨粒研磨时, 游离磨料研磨后工件的 SSD 值较固结形式的大数倍。

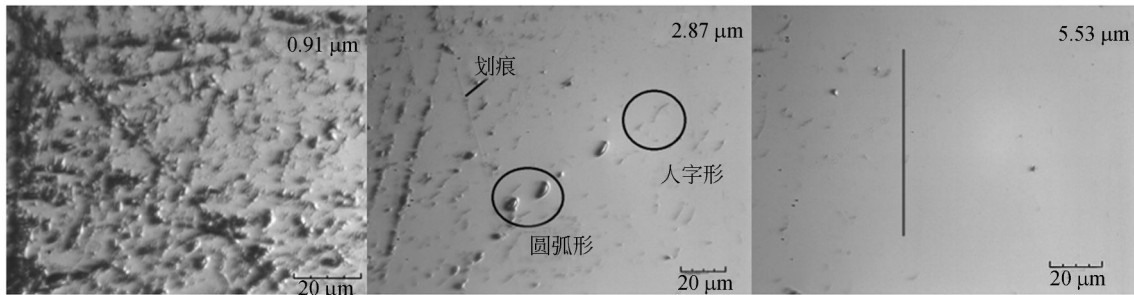
固结研磨垫对磨粒的把持力较强, 大部分磨粒以二体刻划形式作用于工件表面。刻划过程中, 磨粒与工件表面的摩擦力导致接触区的应力分布发生变化, 使得磨粒后缘出现峰值拉应力, 从而表面形成“人”字形裂纹, 图 5(c) 中观察到了犁削残留的细小划痕和具有尖锐压头刻划特征的“人”字型裂纹。部分磨粒因磨钝而受力增大, 破坏了周围包裹的基体而脱落, 在工件亚表面也出现了少量圆弧形裂纹。



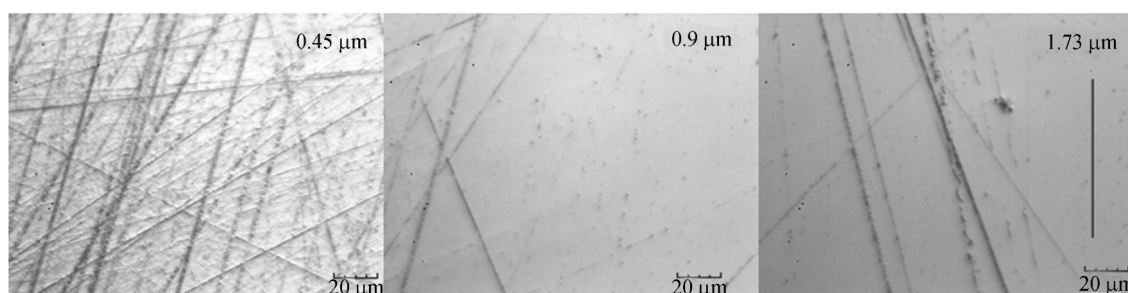
(a) 游离研磨 W28 (15 kPa)
(a) Loose abrasive lapping W28 (15 kPa)



(b) 游离研磨 W14 (15 kPa)
(b) Loose abrasive lapping W14 (15 kPa)

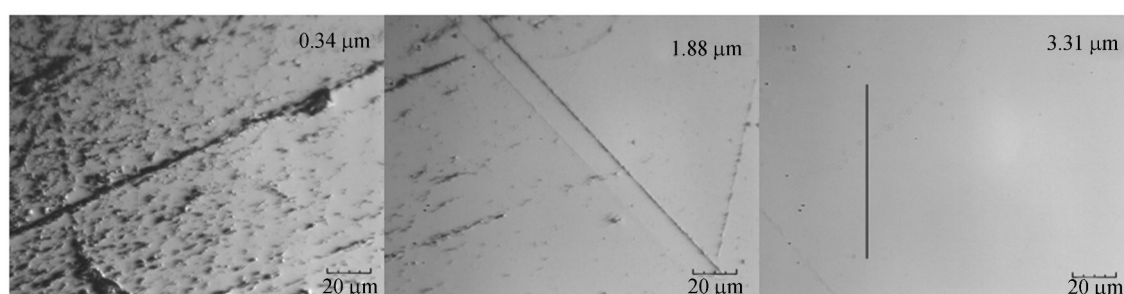


(c) 固结研磨 W28 (15 kPa)
(c) Fixed abrasive lapping W28 (15 kPa)



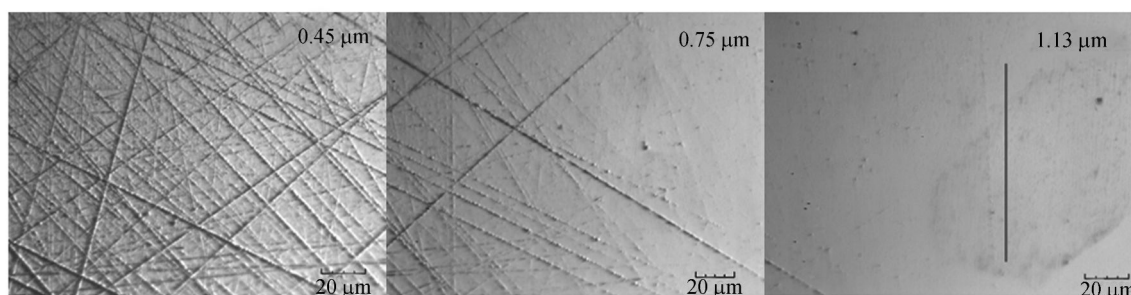
(d) 固结研磨 W14 (15 kPa)

(d) Fixed abrasive lapping W14 (15 kPa)



(e) 固结研磨 W28 (7 kPa)

(e) Fixed abrasive lapping W28 (7 kPa)



(f) 固结研磨 W14 (7 kPa)

(f) Fixed abraivse lapping W14 (7 kPa)

图 5 亚表面损伤缺陷分布显微图

Fig. 5 Micrographs of defect distribution for subsurface damage

3.4 磨粒粒径对亚表面损伤的影响

不论是哪种研磨方式,磨粒粒径对 SSD 的影响都很显著。当粒径从 W28 减小到 W14 后,研磨工件的 SSD 值下降约 60%~70%,如图 6 所示。同样磨粒质量分数的游离研磨液中,磨粒粒径下降,参与滚轧工件表面的有效磨粒数大幅增多,在外加载荷不变的条件,每颗磨粒承受的载荷相应减小,轧入工件的深度减小,因此亚表面损伤层深度也减小。

固结研磨垫中,树脂基体吸水膨胀后对磨粒

的把持力减弱,磨粒受工件的挤压出现“弹性退让”现象,随着磨料粒度的下降,研磨垫表面的树脂微突起也承担了部分研磨压力,使得 SSD 值下降的程度高于游离磨料研磨。由于固结研磨垫表面磨粒出露高度的差异、分布的随机性以及磨粒在树脂基体中弹性退让程度的影响,研磨过程中有效磨粒承担的法向力各不相同,因此亚表面裂纹的密集程度也不尽相同(图 5(c),5(d))。15 kPa 下,小粒径产生的划痕和裂纹更加细小,表面质量好。

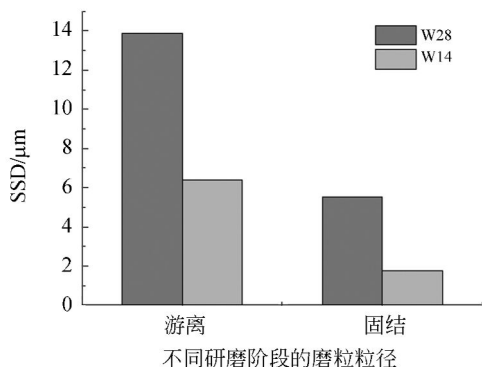


图 6 磨料粒径对 LN 试件亚表面损伤层的影响

Fig. 6 Effect of grit sizes on SSD depth of LN

3.5 研磨压力对亚表面损伤的影响

考虑到铌酸锂材料的软脆特性,采用低研磨压力有利于提高加工工件的表面质量,除采用 15 kPa 的研磨压力外,还开展了低压力(7 kPa)研磨试验,探索研磨压力的变化对其亚表面损伤的影

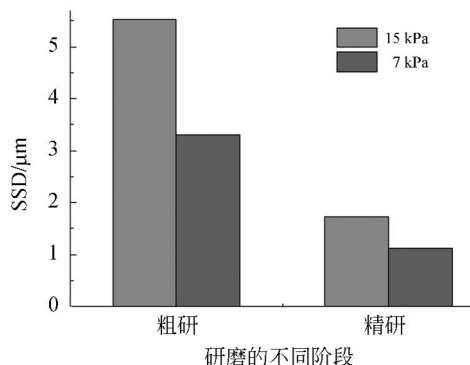


图 7 压力对 LN 试件亚表面损伤层深度的影响

Fig. 7 Effect of applied loads on SSD depth of LN

参考文献:

- [1] NESPRIAS F, VENTVRINO M, DEBRAY M E, *et al.*. Heavy ion beam micromachining on LiNbO₃ [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2009, 267: 69-73.
- [2] SIVARAJAH P, WERLEY C A, OFORIOKAI B K, *et al.*. Chemically assisted femtosecond laser machining for applications in LiNbO₃ and LiTaO₃ [J]. *Applied Physics A*, 2013, 112(3): 615-622.
- [3] 孔勇发. 多功能光电材料——铌酸锂 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 12-16.
KONG Y F. *Multi-function photoelectric materials—Lithium niobate* [M]. Beijing: Science Press, 2005: 12-16. (in Chinese)

响。图 7 表明,压力下降 50% 后,相同粒径的固结磨料研磨后的工件亚表面损伤深度有所下降,下降幅度约 40%。这一测量结果与 Lambropoulos 的理论相同,即中位裂纹深度 c 正比于载荷 P 的 $2/3$ 次方^[15]。如图 5(d) 和 (f) 所示, 15 kPa 压力下存在少量圆弧状缺陷,而 7 kPa 下几乎都为“人”字形、“一”字形裂纹以及浅表细小裂纹,表面粗糙度已达到几 nm 范畴。

4 结 论

本文利用角度抛光的方法测量铌酸锂晶体研磨过程中引入的亚表面损伤层深度,分析了研磨方式、磨料粒径、研磨压力的影响规律。结果显示:常温下 40% 浓度的 HF 作为腐蚀液对 LN 腐蚀 30 min 观察裂纹的效果最佳。不同研磨方式对铌酸锂晶体亚表面裂纹生长的影响区别最为显著,游离磨料研磨后的亚表面损伤深度是固结磨料研磨的 3~4 倍。游离方式留下多处圆弧形裂纹,SSD 值较大,表面粗糙度较高;固结方式残留的主要为犁削细小裂纹和具有尖锐压头刻划特征的“人”字型裂纹。磨料粒径的影响较为显著,当粒径从 W28 减小到 W14 后损伤层深度下降了 55%~70%,划痕和裂纹更加细小。研磨压力降低 50% 后,相同粒径的固结磨料研磨后工件的亚表面损伤层深度下降约 40%。15 kPa 压力下出现个别圆弧状缺陷,而 7 kPa 下几乎都为“人”字形、“一”字形裂纹以及浅表细小裂纹。

- [4] 王建彬, 朱永伟, 谢春祥, 等. 固结磨料研磨蓝宝石单晶过程中研磨液的作用 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 3004-3011.
WANG J B, ZHU Y W, XIE CH X, *et al.*. Role of slurry in single crystal sapphire lapping with fixed abrasive pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 3004-3011. (in Chinese)
- [5] 王占奎, 朱永伟, 朱琳, 等. 三乙醇胺在镁铝尖晶石固结磨料研磨中的作用 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1034-1043.
WANG ZH K, ZHU Y W, ZHU L, *et al.*. Effect of triethanolamine in lapping spinel using fixed abrasive pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1034-1043. (in Chinese)

- [6] 居志兰, 朱永伟, 王建彬, 等. 抛光介质对固结磨料 (in Chinese) 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, 23(4):955-962. (in Chinese)
- [7] 李军, 夏磊, 王晓明, 等. 三乙醇胺浓度对固结磨料研磨垫自锐性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12):3287-3293.
LI J, XIA L, WANG X M, *et al.*. Effect of triethanolamine concentration on performance of fixed abrasive self-sharpening pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3287-3293. (in Chinese)
- [8] 朱永伟, 王成, 徐俊, 等. 固结磨料研磨垫孔隙结构对其加工性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4):911-917.
ZHU Y W, WANG C, XU J, *et al.*. Influence of pore distribution of fixed abrasive pad on its machining performance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):911-917. (in Chinese)
- [9] 张伟, 朱健强. 磷酸盐钕玻璃表面/亚表面损伤特性实验研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(2):268-272.
ZHANG W, ZHU J Q. Experimental Investigation on Surface/Subsurface Damage of Nd-Doped Phosphate Glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2):268-272. (in Chinese)
- [10] 王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(1):16-21.
WANG Z, WU Y L, DAI Y F, *et al.*. Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):16-21. (in Chinese)
- [11] 李圣怡, 王卓, 吴宇列, 等. 基于研磨加工参数的亚表面损伤预测理论和试验研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2):192-198.
LI SH Y, WANG ZH, WU Y L, *et al.*. Prediction theory and experiment of subsurface damage based on lapping processing parameters [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2):192-198. (in Chinese)
- [12] 王卓. 光学材料加工亚表面损伤检测及控制关键技术研究 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008.
WANG ZH. *Study on the Detection and Control Techniques of Subsurface Damage in Optical Fabrication* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [13] 吴东江, 曹先锁, 王强国, 等. KDP 晶体加工表面的亚表面损伤检测与分析 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1721-1726.
WU D J, CAO X S, WANG Q G, *et al.*. Damage detection and analysis of machined KDP crystal subsurface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1721-1726. (in Chinese)
- [14] 戴子华, 朱永伟, 王建彬, 等. K9 玻璃亚表面损伤的分步腐蚀法测量 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(2):287-293.
DAI Z H, ZHU Y W, WANG J B, *et al.*. Measurement of sub-surface damage of K9 Mass by step-by-step etching method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):287-293. (in Chinese)
- [15] LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D, RUCKMAN J, *et al.*. Material removal mechanisms from grinding to polishing [C]. *Finishing of Advanced Ceramics and Glasses*, *Ceramic Transactions*. 1999, 102: 113-128.

作者简介:



朱楠楠(1988—),女,安徽淮南人,博士研究生,主要从事软脆材料精密超精密加工方面的研究。E-mail: zhunan-nan021@126.com

导师简介:



朱永伟(1967—),男,浙江平湖人,教授,博士生导师,1988年于中南大学获学士学位,1991年于长沙矿冶研究院获硕士学位,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、表面工程等方面的研究。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn