

文章编号 1004-924X(2008)01-0016-06

光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律

王卓, 吴宇列, 戴一帆, 李圣怡, 周旭升

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院机电系, 湖南 长沙 410073)

摘要:提出了一种光学材料研磨亚表面损伤的非破坏性快速检测方法。基于印压断裂力学理论建立了亚表面损伤深度与表面粗糙度的关系模型。使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,并验证了上述模型。最后,分析了研磨加工参数对亚表面损伤深度的影响规律,提出了高效率的研磨加工策略。研究表明:光学材料研磨后亚表面损伤深度与表面粗糙度成单调递增的非线性关系,即 $SSD \sim SR^{4/3}$ 。磨粒粒度对亚表面损伤深度的影响最显著,研磨盘硬度的影响次之,而研磨压力和研磨盘公转速度的影响基本可以忽略。利用建立的亚表面损伤深度与表面粗糙度间的关系模型能够实现亚表面损伤深度的快速、准确和非破坏性检测。

关键词:光学材料;研磨;磁流变抛光;光学检验;亚表面损伤

中图分类号:TQ171.684 **文献标识码:**A

Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity

WANG Zhuo, WU Yu-lie, DAI Yi-fan, LI Sheng-yi, ZHOU Xu-sheng

(College of Mechatronic Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the purpose of rapid measurement of Subsurface Damage (SSD) in lapping process, a nondestructive measuring method was developed. A theoretical model of relationship between SSD depth and Surface Roughness (SR) was established through investigating median and lateral crack system in brittle surface induced by sharp indenter, and contribution of elastic stress field to the median crack propagation was also considered in the loading cycle. Then, SSD depth of lapped K9 glass was measured by Magnetorheological Finishing (MRF) spot technique to verify the validity of the relationship model. Finally, the influences of lapping parameters on SSD depth were investigated experimentally, and an effective lapping procedure was proposed. The results show that the relationship between SSD depth and SR in optical lapping process is nonlinearity in monotone increasing, i. e. $SSD \sim SR^{4/3}$. Moreover, the influence of granularity of abrasive grains on SSD depth is more significant than that of lapping plate hardness, and the influence of lapping pressure and lapping plate revolution velocity can be neglected. The rapid, accurate and non-destructive measurement of SSD depth in lapping process can be realized.

收稿日期:2007-04-18;修订日期:2007-07-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50535020)

Key words: optical materials; lapping; Magnetorheological Finishing (MRF); optical test; Subsurface Damage (SSD)

1 引 言

光学材料研磨加工是衔接磨削和抛光过程的中间工序,研磨加工材料去除效率高,能够快速去除磨削过程引入的亚表面损伤,同时降低表面粗糙度,达到减少后续抛光时间的目的^[1-3]。研磨过程残留的亚表面损伤将直接降低光学零件的强度、长期稳定性、成像质量、镀膜质量和抗激光损伤阈值等重要性能指标^[3-7]。为了避免光学零件最终质量的降低,必须在抛光时将研磨过程引入的亚表面损伤完全去除,其前提是亚表面损伤的快速和准确检测。亚表面损伤掩盖在表面层下,如何对其快速和准确检测是一个尚未解决的难题。到目前为止,人们开发了大量的亚表面损伤测试技术,常用方法包括角度抛光法、Ball Dimpling法和磁流变抛光斑点技术(MRF Spot Technology)等^[8-10]。但是,破坏性测试方法会导致光学零件的破坏或失效,这对昂贵的光学系统或光学元件是极其不利的,并且取样加工试件与实际光学零件的损伤存在差异,此外,该方法的测量效率低^[5]。亚表面损伤的非破坏性测试方法,例如共焦扫描激光显微法、基于强度检测的全内反射显微法和准偏振光技术等^[5,11-12],与破坏性测试方法相比测量精度低、测试系统成本高并且测量结果不直观。考虑到表面粗糙度易于检测,如果能够建立亚表面损伤与表面粗糙度之间的联系,就可以通过表面粗糙度快速预测亚表面损伤,实现亚表面损伤的快速、非破坏性测量。

提高光学零件加工效率,除了要提高研磨过程本身的材料去除效率还要有效控制亚表面损伤以降低后续抛光过程的材料去除量。因此,需要研究研磨加工参数对亚表面损伤深度的影响规律,以此作为优化研磨参数的依据,从而降低研磨损伤提高加工效率。

本文分别从理论和实验角度研究亚表面损伤深度与表面粗糙度之间的本质联系,以通过测量光学零件表面粗糙度直接对研磨加工过程引入的亚表面损伤深度进行准确的预测,从而实现亚表面损伤的快速、非破坏性测量。分析了研磨加工

参数对亚表面损伤深度的影响规律,提出了以提高光学零件加工效率为目的的研磨加工策略。

2 实 验

2.1 试件制备

试件材料为 K9 玻璃,直径为 100 mm,厚度为 10 mm。在自行研制的 AOCMT 机床上采用双旋转方式进行研磨加工,见图 1,研磨盘材料分别为铸铁(布氏硬度 210 MPa)和硬铝(布氏硬度 70 MPa),金刚砂磨料粒度分别为 W20 和 W7,研磨压力在 13.1~24.2 kPa 范围内变化,研磨盘公转速度变化范围为 30~60 r/min,自转与公转的转速比为-1,具体研磨参数见表 1。使用 Taly-surf 6 轮廓仪测量加工后试件表面粗糙度。

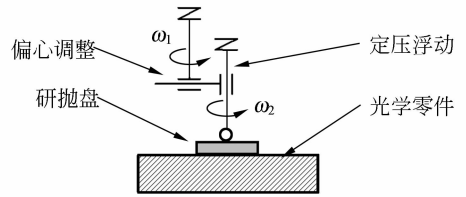


图 1 双旋转研磨方式原理图

Fig. 1 Schematic diagram of two revolving lapping

表 1 金刚砂双旋转研磨实验参数

Tab.1 Experimental parameters of SiC abrasive two revolving lapping

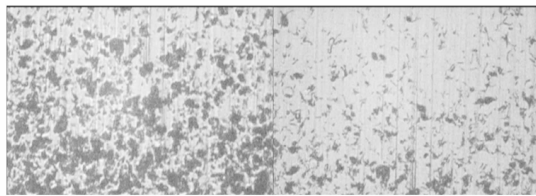
试件号	磨盘材质	磨料粒度	压强 (kPa)	磨盘转速 (r/min)
1	铸铁	W20	16.2	公转 50
2	硬铝	W20	16.2	公转 50
3	硬铝	W20	16.2	公转 30
4	硬铝	W20	16.2	公转 40
5	硬铝	W20	13.1	公转 50
6	硬铝	W20	16.2	公转 60
7	硬铝	W20	20.3	公转 50
8	硬铝	W20	24.2	公转 50
9	铸铁	W7	16.2	公转 50
10	硬铝	W7	16.2	公转 50

2.2 亚表面损伤深度测量

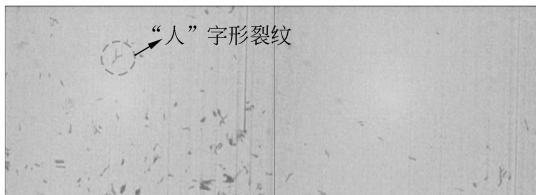
Randi^[10]在 Dimpling 方法基础上开发出磁流变抛光斑点技术解决了 Dimpling 方法及角度

抛光法存在附加损伤和测量效率低的缺陷,此外,它还具有测量面积大、抛光斑点倾角小、利于观测的优点。该测试技术中,抛光斑点起到亚表面损伤放大器的作用,将微米级损伤深度的测量转化为毫米级损伤在水平方向延伸距离的测量。该方法对亚表面损伤的放大能力达到数百倍,非常适用于研磨等低损伤情况的亚表面损伤深度精确测量。因此,本文采用磁流变抛光斑点技术测量亚表面损伤深度。

具体实验步骤如下,使用自行研制的 MRF2006 磁流变抛光机床在每个研磨试件表面抛出 3 个斑点。然后将试件在浓度为 1% 的 HF 溶液中浸泡 5 min,以打开裂纹使其易于观测。使用 VEECO Dektak 6M 型探针式台阶仪(测头尖端半径 $12.5 \mu\text{m}$)测量斑点中线轮廓。试件经超声波清洗后置于微动平台上,使用光学显微镜从斑点头部开始沿斑点中线进行观测,记录损伤消失时的平台移动距离,对应测得的斑点轮廓即可获得亚表面损伤深度。按照相同的实验步骤测量 6 个斑点(两块试件)的损伤深度,取其损伤均值作为该加工条件下的亚表面损伤深度。



(a) 距离表面 $1 \mu\text{m}$ (b) 距离表面 $2 \mu\text{m}$
(a) $1 \mu\text{m}$ under surface (b) $2 \mu\text{m}$ under surface



(c) 距离表面 $4 \mu\text{m}$ (d) 距离表面 $6.45 \mu\text{m}$
(c) $4 \mu\text{m}$ under surface (d) $6.45 \mu\text{m}$ under surface

图 2 W20 金刚砂硬铝盘研磨后试件典型亚表面损伤图像(放大倍数 $400\times$)

Fig. 2 Typical SSD micrographs ($400\times$ magnification) in W20 SiC abrasive lapping process with Al lapping plate

图 2 所示为 W20 金刚砂硬铝盘研磨过程(试件 2)产生的典型亚表面损伤图像。可以看出亚表面损伤形式包括侧向裂纹延伸至表面产生的弹坑状缺陷和亚表面裂纹。在距表面 $2 \mu\text{m}$ 范围内损伤形式以弹坑状缺陷为主,并且相邻缺陷会叠加成更大尺寸的缺陷;在距表面 $2\sim 4 \mu\text{m}$ 范围内,弹坑状缺陷逐渐减少,裂纹逐渐增加;而在距表面 $4\sim 6.45 \mu\text{m}$ 范围内弹坑状缺陷消失,损伤形式为亚表面裂纹;当距离表面超过 $6.45 \mu\text{m}$ 后,均为未损伤的基体,亚表面裂纹完全消失。在图 2 (c)中观测到少量具有尖锐压头刻划特征的人字形裂纹^[13],因此硬铝盘研磨过程中除了三体磨损外还存在少量两体磨损现象。考虑到材料断裂去除所需能量比塑性变形所需能量低一个数量级^[3],本文认为在硬铝盘研磨过程中材料主要以脆性断裂方式为主。

3 结果及讨论

3.1 亚表面损伤深度与表面粗糙度的关系

通过上面对亚表面损伤显微图像的分析,本文认为双旋转研磨加工过程可简化为尖锐压头在硬脆材料表面的大规模印压作用,因此可以利用印压断裂力学理论研究亚表面损伤深度与表面粗糙度之间比例关系。对于尖锐压头印压,当印压载荷超过某一临界值,即在接触区下产生不可恢复的塑性变形。进一步增大载荷会形成具有弹塑性接触特征的中位和侧向裂纹系统^[14-16]。Lambropoulos^[17]根据印压断裂力学理论和理想塑性材料孔洞扩张的 Hill 模型分别获得基于尖锐压头印压的中位裂纹和侧向裂纹深度的理论计算式。

中位裂纹深度的理论计算式为^[14,17]:

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

式中,

$$\alpha_K = 0.027 + 0.090 \cdot (m - 1/3),$$

其中, c 为中位裂纹深度, P 为压痕压制载荷, ϕ 为压头锐角, E 为材料弹性模量, H 为材料硬度, K_c 为材料断裂韧性, m 为一无量纲常数,取值介于 $1/3$ 和 $1/2$ 之间。

侧向裂纹深度的理论计算式为^[15,17]:

$$b=0.43 \cdot (\sin \psi)^{1/2} \cdot (\cot \psi)^{1/3} \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^m \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{1/2} \quad (2)$$

通常认为在压痕下方(塑性区域底部附近)形成的侧向裂纹延伸到试件表面是材料去除的原因,这时压痕被完全去除,试件表面残留弹坑状缺陷^[15-16]。因此,本文假设亚表面损伤深度(SSD)为中位裂纹深度,表面粗糙度 P-V 值(SR)为侧向裂纹深度,联立式(1)和(2)并消去参数 P ,得到基于尖锐压头的亚表面损伤深度与表面粗糙度间关系的理论模型:

$$\text{SSD}=3.08 \cdot \alpha_K^{2/3} \frac{1}{\sin \psi^{2/3} E^{2m-2/3} \cdot K_c^{2/3}} (SR)^{4/3}, \quad (3)$$

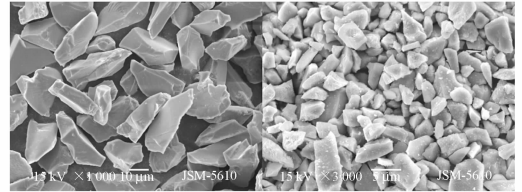
考虑式(1)计算得到的是压头卸载后残留的塑性应力场引发的中位裂纹深度,而实际上中位裂纹形成于印压加载阶段,并且在印压载荷达到最大值时扩展到最终尺寸^[14,16]。根据裂纹扩展的不可逆性,中位裂纹在印压卸载阶段不会闭合,而印压加载阶段的压痕应力场由压痕压制载荷 P 引进的弹性应力场和压痕弹/塑性形变失配或压头下方变形区的楔紧作用导致的塑性应力场两部分组成^[14,16],因此,在计算中位裂纹深度时必须考虑弹性组元对中位裂纹扩展的贡献,则式(3)变为:

$$\text{SSD}=3.08 \cdot (\kappa \cdot \alpha_K)^{2/3} \frac{1}{\sin \psi^{2/3}} \cdot \frac{H^{2m}}{E^{2m-2/3} \cdot K_c^{2/3}} (SR)^{4/3}, \quad (4)$$

其中, κ 为弹性变形对中位裂纹深度的修正系数。

式(4)即为考虑印压加载阶段弹性变形后基于尖锐压头印压的亚表面损伤深度与表面粗糙度间关系的理论模型。对于特定的加工过程,选定材料和磨粒后,就能够利用该理论模型,通过表面粗糙度直接对研磨加工过程引入的亚表面损伤深度进行有效预测。从式(4)可以看出亚表面损伤深度与硬度成正比,与断裂韧性和磨粒锐度角成反比。特别值得注意的是亚表面损伤深度与表面粗糙度成单调递增的非线性关系,即 $\text{SSD} \sim \text{SR}^{4/3}$ 。式(4)中相关系数的取值为:K9 玻璃机械特性参数为 $E=81 \text{ GPa}$, $H=7.2 \text{ GPa}$, $K_c=0.82 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ^[17];数据分析表明, m 取 $1/3$ 更为合适^[17]。Lawn 和 Evans 通过尖锐压头印压实验获得的中位裂纹弹性组元和塑性组元的压痕系数

分别为 $X_e^M=0.032$ 和 $X_r^M=0.026$ ^[14],弹性变形对中位裂纹的修正系数 $\kappa=1+X_e^M/X_r^M=2.23$;使用 JSM-5610LV 扫描电子显微镜分析磨粒形状,由金刚砂磨粒的 SEM 图像估算出磨粒的锐度角范围是 $60^\circ \sim 90^\circ$,见图 3。根据上述相关系数的取值,利用式(4)得到 K9 玻璃金刚砂研磨加工亚表面损伤深度的预测模型, $\text{SSD}=(2.6 \sim 3.2) \times \text{SR}^{4/3}$ 。



(a) W20 (b) W7

图 3 金刚砂磨粒的 SEM 图像

Fig. 3 SEM micrographs of SiC abrasive

将使用磁流变抛光斑点技术和 Talysurf 6 轮廓仪测得的试件 1、2、9 和 10 的亚表面损伤深度和表面粗糙度绘制在图 4 中,以研究亚表面损伤深度与表面粗糙度的关系。可以看出亚表面损伤深度随着表面粗糙度的增大而增大,通过对测量结果的曲线拟合可以进一步发现,亚表面损伤深度与表面粗糙度成单调递增的非线性关系,也就是 $\text{SSD}=3.6 \times \text{SR}^{4/3}$,验证了理论模型的正确性。图 4 中的实测值大于理论预测值是因为轮廓仪探针针尖直径较大导致实测的表面粗糙度小于实际表面粗糙度,此外,实际研磨过程中,压痕间相互作用以及重复印压作用会促进亚表面裂纹进一步扩展。

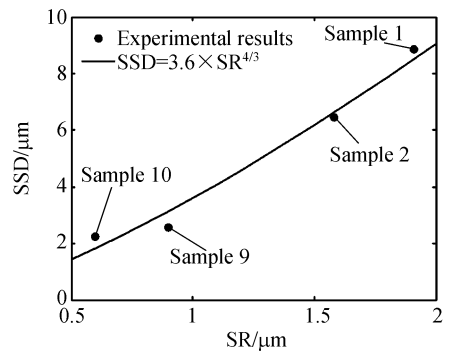


图 4 亚表面损伤深度与表面粗糙度间关系曲线

Fig. 4 Relationship between SSD and SR

3.2 研磨参数对亚表面损伤深度的影响规律

下面分别研究研磨盘硬度、磨粒粒度、研磨压

力和研磨盘公转速度对亚表面损伤深度的影响规律。图 5 所示为研磨盘硬度和磨粒粒度对亚表面损伤深度的影响规律,可以看出,亚表面损伤深度与研磨盘硬度和磨粒粒度成正比,并且磨粒粒度对亚表面损伤深度的影响更显著。

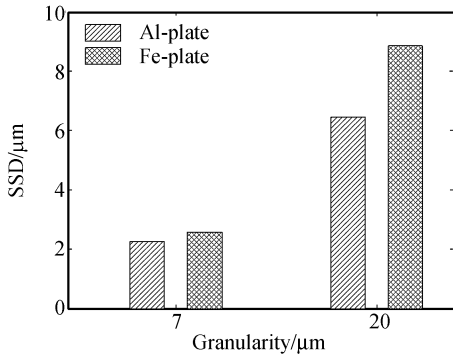


图 5 研磨盘硬度和磨粒粒度对亚表面损伤深度的影响规律

Fig. 5 Influences of lapping plate hardness and granularity of abrasive grains on SSD

图 6 所示为研磨压力对亚表面损伤深度的影响规律(W20 金刚砂硬铝盘研磨,研磨盘公转速度 50 rpm),可以看出,亚表面损伤深度与研磨压力成正比,但是损伤深度只是在很小的范围内变化,变化量 $<8\%$ 。这是因为随着研磨压力的增大,研磨盘与试件间的间隙减小,承担载荷的有效磨粒数也同时增大,导致单个有效磨粒实际接触压力基本保持恒定。

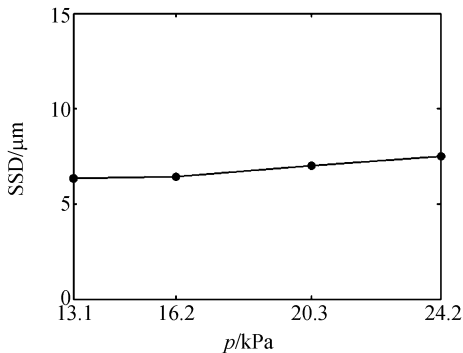


图 6 研磨压力对亚表面损伤深度的影响规律

Fig. 6 Influence of lapping pressure on SSD

图 7 所示为研磨盘公转速度对亚表面损伤深度的影响规律(W20 金刚砂硬铝盘研磨,研磨压力 16.2 kPa),可以看出,随着研磨盘公转速度的增大,亚表面损伤深度呈现递减的趋势,但是损伤深度只是在很小的范围内变化,变化量 $<4\%$ 。

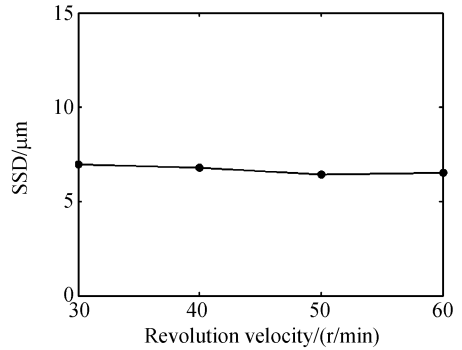


图 7 研磨盘公转速度对亚表面损伤深度的影响规律

Fig. 7 Influence of revolution velocity of lapping plate on SSD

由上面的分析可知:磨粒粒度对亚表面损伤深度的影响最显著,研磨盘硬度的影响次之,而研磨压力和研磨盘公转速度的影响基本可以忽略,并且亚表面损伤深度均小于研磨磨粒粒度的一半。

综合考虑研磨加工参数对材料去除效率和亚表面损伤深度的影响,本文将研磨过程分为粗研和精研两个阶段,粗研过程中选用铸铁盘 W20 金刚砂,追求材料去除的高效率,以快速去除磨削过程残留的亚表面损伤;精研过程中选用硬铝盘 W7 金刚砂,追求高表面质量和低亚表面损伤,以减少后续抛光时间。研磨过程中选取较大的压力和较高的公转速度有利于提高加工效率。

4 结 论

本文利用磁流变抛光斑点技术测量研磨加工过程引入的亚表面损伤深度。分别从理论和实验角度研究亚表面损伤深度与表面粗糙度之间的本质关系,并分析了研磨加工参数对亚表面损伤深度的影响规律,得到如下结论:

(1) 建立了适用于光学材料研磨加工的亚表面损伤深度与表面粗糙度间关系的理论模型。利用该模型,能够通过表面粗糙度、磨粒形状和材料机械特性对亚表面损伤深度进行准确的预测,从而实现亚表面损伤深度的快速、准确和非破坏性检测。

(2) 预测亚表面损伤深度时,考虑了压痕应力场弹性组元对中位裂纹扩展的贡献,使得亚表面损伤的理论预测值更接近实测值。

(3) 光学材料研磨加工产生的亚表面损伤深度与表面粗糙度成单调递增的非线性关系,即 $SSD \sim SR^{4/3}$ 。在本文的研磨条件下 $SSD = 3.6 \times SR^{4/3}$ 。

(4) 磨粒粒度对亚表面损伤深度的影响最显

著,研磨盘硬度的影响次之,而研磨压力和研磨盘公转速度对亚表面损伤的影响分别 $< 8\%$ 和 4% ,并且亚表面损伤深度均小于磨粒粒度的一半,基本可以忽略。

参考文献:

- [1] 牛海燕,张学军. $\Phi 124$ mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 539-544. NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\Phi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)
- [2] 张文生,张飞虎,董申. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 139-143. ZHANG W SH, ZHANG F H, DONG SH. Diamond cutting of optical brittle materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 139-143. (in Chinese)
- [3] BUIJS M, HOUTEN K K V. Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping[J]. *Wear*, 1993, 166: 237-245.
- [4] 刘德福,段吉安,钟振. 光纤连接器端面研磨装置运动分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 159-166. LIU D F, DUAN J A, ZHONG J. Motion analysis of lapping machine for end-face of optical fiber connector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 159-166. (in Chinese)
- [5] FINE K R, GARBE R, GIP T, *et al.*. Non-destructive, real time direct measurement of subsurface damage[J]. *SPIE*, 2005, 5799: 105-110.
- [6] SHEN J, LIU S, YI K, *et al.*. Subsurface damage in optical substrates[J]. *Optik*, 2005, 116: 288-294.
- [7] GENIN F Y, SALLEO A, PISTOR T V, *et al.*. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2001, 18(10): 2607-2616.
- [8] TONNELIER X, SHORE P, LUO X, *et al.*. Wheel wear and surface subsurface qualities when precision grinding optical materials[J]. *SPIE*, 2006, 6273: 61-70.
- [9] ZHOU Y, FUNKENBUSCH P D, QUESNEL D J, *et al.*. Effect of etching and imaging mode on the measurement of subsurface damage in microground optical glasses[J]. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1994, 77: 3277-3280.
- [10] RANDI J A, LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D. Subsurface damage in some single crystalline optical materials[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(12): 2241-2249.
- [11] FAHNLE O W, WONS T, KOCH E, *et al.*. iTIRM as a tool for qualifying polishing processes[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(19): 4036-4038.
- [12] WANG J, MAIER R L. Quasi-Brewster angle technique for evaluating the quality of optical surfaces[J]. *SPIE*, 2004, 5375: 1286-1294.
- [13] YOUNG H T, LIAO H T, HUANG H Y. Surface integrity of silicon wafers in ultra precision machining[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, 29: 372-378.
- [14] LAWN B R, EVANS A G, MARSHALL D B. Elastic/Plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1982, 63(9-10): 574-581.
- [15] MARSHALL D B, LAWN B R, EVANS A G. Elastic/Plastic indentation damage in ceramics: the lateral crack system[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1982, 65(11): 561-566.
- [16] COOK R F, PHARR G M. Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1990, 73(4): 787-817.
- [17] LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D, RUCKMAN J. Material removal mechanisms from grinding to polishing [J]. *Ceram. Trans.*, 1999, 102: 113-128.

作者简介:王卓(1979—),男,安徽淮南人,博士研究生,研究方向为光学材料加工亚表面损伤检测与评价。E-mail: wangzhuo0305@yahoo.com.cn

李圣怡(1946—),男,湖南长沙人,教授,博士生导师,主要研究方向为精密工程与微机电系统。E-mail: syli@nudt.edu.cn