

钕玻璃抛光过程中杂质颗粒物对划痕的影响

曹俊^{1,2} 杨明红¹ 魏朝阳¹ 顿爱欢¹ 顾建勋³ 徐学科³ 邵建达¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

³上海恒益光学精密机械有限公司, 上海 201800

摘要 为了研究不同杂质颗粒物对划痕的影响及其大小与划痕形貌之间的关系,在钕玻璃抛光过程中分别引入三种尺寸的金刚砂、氧化铈团聚物和用过的抛光粉作为杂质颗粒物,对抛光过程中产生的划痕形貌进行统计分析。结果表明,脆性划痕、塑性划痕和混合型划痕都存在,其中脆性划痕占很大比例;氧化铈团聚物和用过的抛光粉产生的划痕浅且少,金刚砂产生的划痕深且多;随着金刚砂粒径的增大,对应产生的划痕的数密度和长度也增加;不同粒径的金刚砂产生的划痕的宽度分布与其对应的粒径分布相似,呈高斯状分布。利用T. Suratwala提出的黏弹性模型,探讨了钕玻璃抛光过程中划痕产生的机理,得到了划痕的宽度与长度都随着引入杂质颗粒物粒径的增大而增加的结论。

关键词 光学制造; 划痕; 钕玻璃; 抛光; 杂质颗粒物

中图分类号 TQ171.684

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0116002

Effects of Rogue Particles on Scratches of Phosphate Neodymium Glass Polishing

Cao Jun^{1,2} Yang Minghong¹ Wei Chaoyang¹ Dun Aihuan¹ Gu Jianxun³
Xu Xueke³ Shao Jianda¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Shanghai Hengyi Optics and Fine Mechanics Co., Ltd, Shanghai 201800, China

Abstract In order to study the effects of different rogue particles on the scratches, and establish the relationship between the rogue particle size and the scratch topography, experiments have been carried out. During the process of phosphate neodymium polishing, three different sizes of corundum, cerium oxide agglomerate and polished powder are introduced as rogue particles. Data of scratch topography is analyzed statistically. The results show that brittle scratches, plastic scratches and mixed scratches all exist, among which brittle scratches account for a large proportion; scratches caused by cerium oxide agglomerate and polished powder are shallow and few, while scratches caused by corundum are deep and many; the scratch density and scratch length caused by corundum of different sizes increase with the increasing of particle size; distribution of scratch widths caused by different sizes of corundum is similar to the distribution of the size of rogue particle, shown as Gaussian distribution. Using the model proposed by T. Suratwala, mechanism of scratch generating during phosphate neodymium glass polishing is investigated. It is illustrated that the width and length of scratches increase with the increasing of rogue particle size.

Key words optical fabrication; scratch; neodymium glass; polishing; rogue particle

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.5450

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-07-23

作者简介: 曹俊(1990—),女,硕士研究生,主要从事钕玻璃环抛工艺方面的研究。E-mail: junc77@siom.ac.cn

导师简介: 魏朝阳(1980—),男,博士,副研究员,主要从事先进光学制造方面的研究。

E-mail: siomwei@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引言

磷酸盐钕玻璃是惯性约束聚变(ICF)系统中的重要组成部分^[1-4],钕玻璃表面的划痕会影响ICF系统激光能量的聚焦,引发激光损伤等问题^[5]。划痕产生的机制很复杂,与抛光过程中的杂质颗粒物、环境空气中灰尘、抛光模等多种因素有关。国外已在熔石英玻璃上做过研磨和抛光过程中产生划痕的实验,可以认为划痕是抛光模和工件之间加载的硬颗粒物不断挤压脆性的工件而产生的^[6]。在静态情况下,产生表面断裂的加载是有限的,可以用钝颗粒物的尺寸或者尖锐颗粒物的材料性质来分析;动态情况下,划痕的形貌可以认为是接触区的颗粒物形貌和外加载荷的函数^[7-9]。

本文主要从杂质颗粒物的因素入手,分别引入三种尺寸的金刚砂、氧化铈团聚物和用过的抛光粉作为杂质颗粒物,用数学统计的方法研究了杂质颗粒物种类和大小对钕玻璃表面划痕的影响,并结合Suratwala等^[10]提出的黏弹性模型探讨了划痕的产生机制,分析了不同粒径的颗粒物对划痕的影响。

2 实验

实验样品为上海光学精密机械研究所研制的N31型钕玻璃,直径为80 mm、厚度为45 mm。实验平台为上海光机所恒益公司的分离器。实验中使用的抛光粉粒径分布见图1,抛光粉的中位粒径为1.176 μm 。

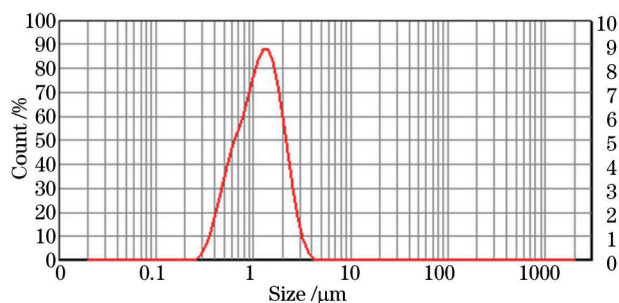


图1 抛光粉粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of polishing powder

采用传统散粒磨料研磨工艺对样品表面进行抛光处理。抛光液按照抛光粉与水的体积比为1:10进行配制,实验的样品均经过足够长时间的抛光,直到前期抛光过程产生的划痕被去除。

实验分别单独引入W10号金刚砂、W14号金刚砂、W28号金刚砂、氧化铈团聚物和用过的抛光粉作为杂质颗粒物,引入杂质的质量均为0.01 g,所有实验均采用在抛光过程中均匀抛洒在抛光模上的方式引入杂质。抛光1 h后取下样品,将钕玻璃抛光的表面清洗干净。在强光照射下用肉眼观察并记录玻璃表面的划痕,再用光学显微镜观察划痕的形貌,记录划痕的形貌和宽度。光学显微镜的放大倍率为100倍。

3 实验结果和分析

3.1 划痕形貌的观测结果

划痕可以分为三类^[10]:1) 塑性划痕,见图2(a),只是玻璃表面的塑性改变,通常指杂质颗粒物在玻璃表面的滑动;2) 脆性划痕,见图2(b),只是玻璃表面的断裂,一般呈现为月牙形;3) 混合型划痕,见图2(c),包括玻璃

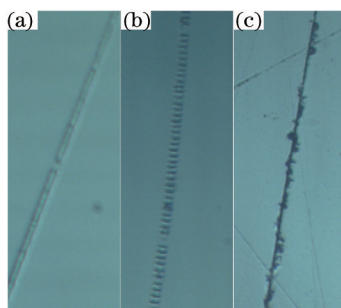


图2 三种类型划痕。(a) 塑性划痕;(b) 脆性划痕;(c) 混合型划痕

Fig.2 Three kinds of scratches. (a) Plastic scratches; (b) brittle scratches; (c) mixed scratches

表面的塑性改变和断裂。统计结果显示脆性划痕在这三类划痕数量上所占的比例是最大的,占了总划痕数的80%~90%。

3.2 不同种类杂质颗粒物对划痕的影响

结合人眼和光学显微镜对划痕表面的观察记录,对划痕的形貌和数密度进行统计,得到结果如表1所示。表1中,氧化铈团聚物和用过的抛光粉呈现团聚物的形式,没有确定的颗粒物的尺寸大小。由表1可以看出当以金刚砂作为杂质颗粒物时会在表面产生数百条划痕,且人肉眼可以观察到较多的深划痕;相比而言,当以氧化铈团聚物和用过的抛光粉作为杂质颗粒物时,在玻璃表面产生的划痕只有几十条,人肉眼观察到划痕比较浅,没有深划痕。

表1 实验结果
Table 1 Results of experiments

Rogue particles	Rogue particle size / μm	Scratch length /mm	Number of scratches	Scratch density / cm^{-2}
W10	10	0.2~10	~108	2.15
W14	14	0.5~15	~340	6.76
W28	28	1~20	~600	11.94
Cerium oxide agglomerate	Agglomerate	0.2~5	~30	0.60
Polished powder	Agglomerate	0.2~5	~10	0.20

对金刚砂、氧化铈团聚物和用过的抛光粉做扫描电镜,其扫描电镜图见图3。从图3中可以看出,金刚砂有明显的尖锐的棱角,在抛光过程中,当金刚砂处于蜡盘和工件中间时,这些尖锐的棱角与玻璃表面接触区域将承受较大的载荷,易在玻璃表面产生划痕。而氧化铈团聚物和用过的抛光粉,它们在扫描电镜图中呈现出的是团聚物形式,没有尖锐的棱角,与玻璃表面的接触区域承受的载荷较小,因此不易在玻璃表面造成划痕。

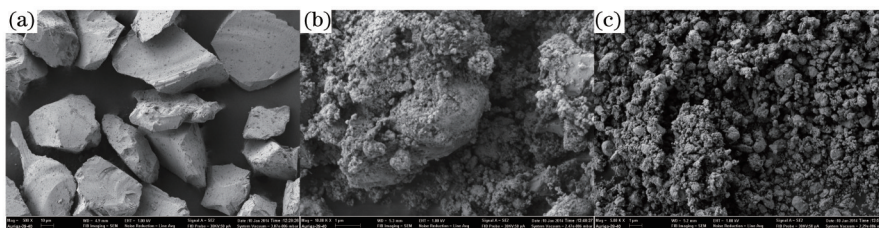


图3 扫描电镜图。(a) 金刚砂; (b) 氧化铈团聚物; (c) 用过的抛光粉

Fig.3 Figures of scanning electron micrograph. (a) Corundum; (b) cerium oxide agglomerate; (c) polished powder

3.3 不同粒径金刚砂对划痕的影响

不同粒径的金刚砂产生的划痕与其粒径的关系见图4。图4(a)中,“*”表示的是不同粒径的金刚砂产生的划痕的数密度,随着金刚砂粒径的增大,钹玻璃表面的数密度也随之增加;图4(b)中三条线段分别表示不同粒径的金刚砂在钹玻璃表面产生划痕的长度范围,从图中可以看出,随着金刚砂粒径的增大,钹玻璃表面产生的划痕的长度也呈现增加的趋势。相同质量的杂质颗粒物,粒径越大,在抛光过程中越容易引起划痕,使玻璃表面光洁度下降。

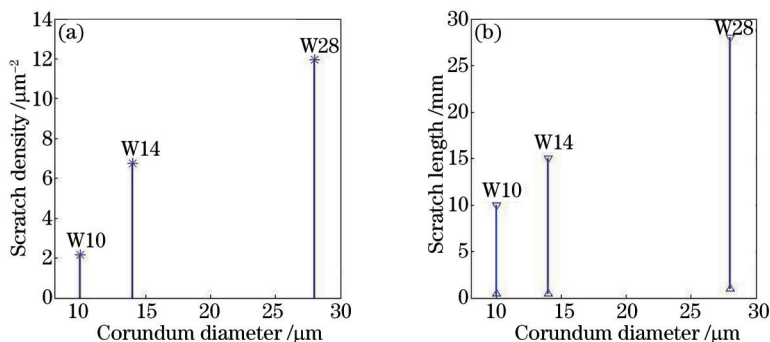


图4 不同粒径金刚砂与其产生划痕的关系。(a) 划痕数密度与金刚砂粒径的关系; (b) 划痕长度与金刚砂粒径的关系

Fig.4 Relationships between scratch caused by corundum and their different sizes. (a) Relationship between scratch density and corundum diameter; (b) relationship between scratch length and corundum diameter

假设一条划痕是由一个杂质颗粒物引起的,则实验中使用的金刚砂颗粒数为 10^5 量级,从表1中可以看出,它们产生的划痕数目为 10^2 量级,抛光过程中引入的杂质颗粒物产生划痕是小概率事件。实验中,测得蜡盘的角速度为 1.4 rad/s ,工件环的角速度为 1.4 rad/s ,工件相对蜡盘中心的平均偏心距为 100 mm ,根据速度的矢量叠加可算出光学元件相对蜡盘的平均速度为 0.28 m/s ,近似地取杂质颗粒物相对光学元件的速度为 0.28 m/s ,根据速度时间公式算出产生一条划痕的时间分别为: $0.71\sim 35.71 \text{ ms}$, $1.79\sim 53.57 \text{ ms}$, $3.57\sim 71.43 \text{ ms}$,划痕产生的时间很短,在毫秒量级。

将划痕的宽度按 $2 \mu\text{m}$ 取一个区间,做出其宽度分布的统计图,粒度仪测得了金刚砂的粒度分布。然后将划痕的宽度和粒径的宽度取统一坐标作为横坐标,纵坐标为划痕宽度分布和金刚砂的粒度分布,用MATLAB软件中的spcrv函数平滑曲线,画出3组实验的双坐标图如图5所示。

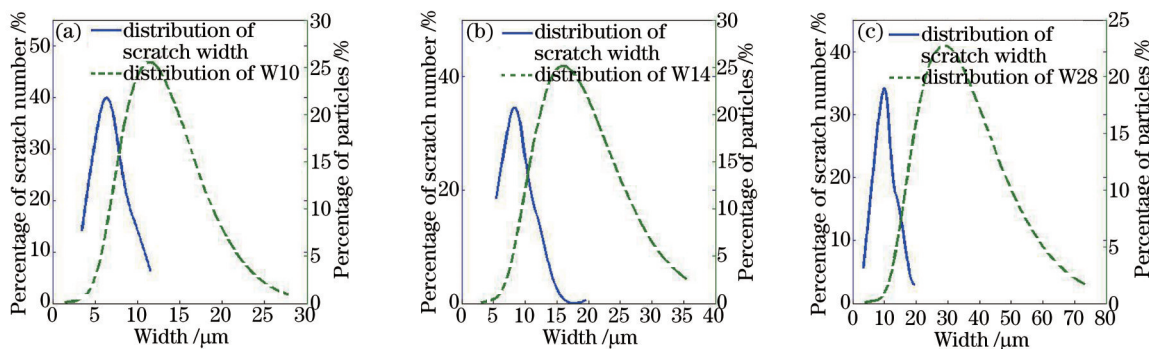


图5 划痕宽度分布和金刚砂粒度分布。(a) W10; (b) W14; (c) W28

Fig.5 Distributions of scratch width and corundum particle size. (a) W10; (b) W14; (c) W28

图5中,划痕的宽度分布与杂质颗粒物的粒径分布相似,近似为高斯状分布,根据图5中划痕宽度分布和金刚砂的粒径分布,用MATLAB软件算出其极值处的划痕宽度和粒径宽度(即中位粒径)见表2,表2中也统计了划痕的最大的宽度和金刚砂的最大粒径。

表2 划痕宽度和杂质粒径

Table 2 Scratch width and rogue particle size

Rogue particle experiment	W 10	W 14	W 28
Scratch width at distribution extreme value / μm	6.34	8.31	9.94
Particle size at distribution extreme value / μm	11.34	16.07	29.02
Widest scratch width / μm	13.39	15.41	21.36
Maximum rogue particle size / μm	20.45	29.49	57.70

由表2中可以看出,W10的中位粒径近似为其划痕分布极值处宽度的1/2,最宽的划痕宽度近似为最大粒径宽度的1/2;W14的中位粒径近似为其划痕分布极值处宽度的1/2,最宽的划痕宽度近似为最大粒径宽度的1/2;W28的中位粒径近似为其划痕分布极值处宽度的1/3;最宽的划痕宽度近似为最大粒径宽度的1/3。由图5中可以看出,产生的划痕宽度在 $25 \mu\text{m}$ 以下,这是因为光学元件和抛光模之间间隙的间距是一定的,能够容进的杂质颗粒物的尺寸是一定的,W10和W14几乎所有颗粒物均能进入间隙,所以它们产生的划痕宽度与杂质颗粒物尺寸的关系一样;而W28只有部分能进入间隙,所以比例关系会变小。

3.4 基于黏弹性模型的分析

Suratwala等^[6,10]认为划痕的产生机理为:任意时刻,光学元件和抛光模之间有大的颗粒物时,由于它的尺寸大,它将承受比抛光模上其他粒子更大的负载,这一载荷足以造成光学元件的脆性或塑性划痕,见图6(a);当大颗粒物相对于抛光模静止,或者是盘与光学元件的间距小于等于氧化铈抛光粉的粒径时,则停止产生划痕,见图6(b)。

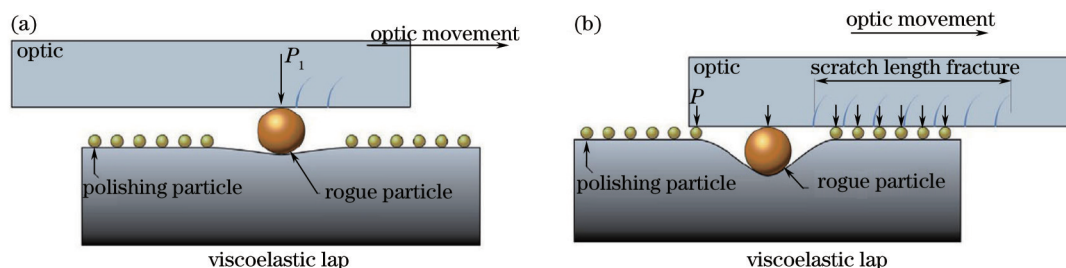


图6 划痕产生机理。(a) 开始产生划痕; (b) 停止产生划痕

Fig.6 Mechanism of scratch generating. (a) Begin generating scratches; (b) stop generating scratches

将产生划痕的机制简化为图7中的模型, Lee等^[11-12]建立了一个力平衡方程:

$$E_{lap} \varepsilon + \eta_{lap} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{P}{\pi a^2}, \quad (1)$$

式中 E_{lap} 为弹性模量, η_{lap} 为黏度, P 为颗粒物上的负载, a 为接触区半径, 式中应变为

$$\varepsilon = \tan \theta = \frac{a}{\sqrt{R^2 - a^2}}. \quad (2)$$

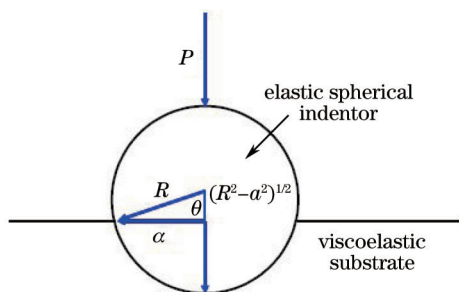


图7 杂质颗粒物渗入弹性材料的示意图

Fig.7 Schematic illustrating penetration of rogue particle into a viscoelastic substrate

将(2)式代入(1)式, 用变量代换的方法解偏微分方程得到

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \frac{\chi}{\tau} = \frac{3P}{\pi R^2 \eta_{lap}} (1 + \chi^{2/3}), \quad (3)$$

其解为

$$\begin{cases} \chi = \varepsilon^3 = \frac{a^3}{(R^2 - a^2)^{3/2}} \\ \tau = \frac{\eta_{lap}}{3E_{lap}} \end{cases}. \quad (4)$$

结合(3)式和(4)式, 取 $E_{lap} = 100 \text{ MPa}$, $\eta_{lap} = 9 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ^[6], 即可画出接触区半径与时间的关系图, 见图8。图8中可以看出, 三种金刚砂粒径的颗粒接触区半径都趋于稳定, a 即为划痕宽度的一半, W10在1ms之内就达到平衡, W14在3ms左右达到平衡, W28在20ms之后趋于平衡, 划痕形成的时间与实验数据相符合。随着颗粒粒径的增大, 接触区半径呈现增加的趋势, 即划痕的宽度随着颗粒的粒径的增大而增加。

Suratwala等^[6]提出了划痕长度的公式:

$$\langle L \rangle \cong 8.9 \frac{\langle v \rangle \eta_{lap} R^2}{P}, \quad (5)$$

式中 $\langle L \rangle$ 是划痕的长度, $\langle v \rangle$ 是工件相对蜡盘的速度, η_{lap} 为黏度, R 为杂质颗粒物半径, P 为颗粒物上的负载, 取 $\langle v \rangle = 0.28 \text{ m/s}$, $\eta_{lap} = 9 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 可以画出如图9所示的关系图, 图中取 P 为0.1N、6N, 三条竖线分别为实验中三种颗粒物产生的划痕的长度, 线段部分包含了80%的划痕的长度。

从图9中可以看出, 随着颗粒物的半径的增大, 其产生的划痕的长度的范围越大, 产生的划痕的长度也越长, 对于直径为80mm的实验样品, 当杂质颗粒物的粒径达到38μm甚至以上时, 就有可能在玻璃的表面

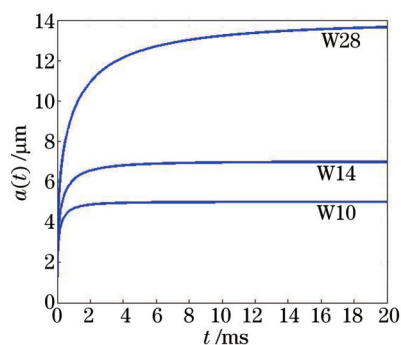


图8 接触区半径和时间的关系

Fig.8 Relationship between contact zone radius and time

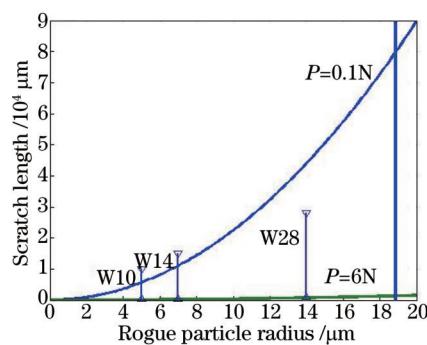


图9 划痕长度与杂质颗粒尺寸的关系

Fig.9 Relationship between scratch length and rogue particle size

产生贯穿整片玻璃的破坏性划痕。Suratwala等^[6]提出 P 的范围是 1~5 N, 是产生划痕的范围, 而这里取 P 的范围为 0.1~6 N, 范围变大, 原因是文献中提出的模型是基于熔石英玻璃, 而这里是在钹玻璃表面做实验, 钹玻璃的材质较软, 即压力很小时就可能在钹玻璃表面产生划痕。

4 结 论

在抛光过程中引入三种杂质颗粒物, 研究其产生的划痕, 用数学统计的方法统计了划痕的宽度及长度信息。结果表明, 引入杂质颗粒物均产生划痕, 其中脆性划痕占很大比例, 塑性划痕和混合型划痕较少; 金刚砂会产生的划痕深且数目多, 氧化铈团聚物和用过的抛光粉产生的划痕浅且数目少; 随着金刚砂粒径的增大, 对应产生划痕的数密度和长度也增加; 且不同粒径金刚砂产生的划痕的宽度分布与其对应的颗粒物的粒径分布相似, 呈高斯状分布, 峰值处划痕宽度和杂质颗粒物的中位粒径大小存在比例关系。结合 Suratwala 提出的黏弹性模型建立划痕宽度与时间的关系及杂质颗粒物的大小与划痕长度之间的关系, 说明了划痕的宽度与长度都与引入的杂质颗粒物粒径有关, 都随着粒径的增大而增加。

参 考 文 献

- 1 Jiang Zhonghong. ICF laser glasses[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(9): 1265-1276.
姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1265-1276.
- 2 Peng Hansheng, Zhang Xiaomin, Wei X F, *et al.*. Design of 60-kJ SG-III laser facility and related technology development [C]. SPIE, 2001, 4424: 98-103.
- 3 G H Miller, E I Moses, C R Wuest. The national ignition facility: enabling fusion ignition for the 21st century[J]. Nuclear Fusion, 2004, 44(2): 228-238.
- 4 M L Andre. Status of the LMJ project[C]. SPIE, 1997, 3047: 38-42.
- 5 Liu Hongjie, Huang Jin, Wang Fengrui, *et al.*. Subsurface defects of fused silica optics and laser induced damage at 351 nm[J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12204-12217.
- 6 T Suratwala, R Steele, M D Feit, *et al.*. Effect of rogue particles on the sub-surface damage of fused silica during grinding/polishing [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, 354(18): 2023-2037.
- 7 Brian Lawn. Fracture of Brittle Solids-Second Edition, Cambridge Solid State Science Series[M]. New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1993.
- 8 M V Swain. Microfracture about scratches in brittle solids[J]. Proc R Soc Lond A, 1979, 366: 575-597.
- 9 Kun L, Liao T W. Surface/subsurface damage and the fracture strength of ground ceramics[J]. J Mater Proc Technol, 1996, 57(3): 207-220.
- 10 T Suratwala, P Miller, M Feit, *et al.*. Scratch forensics[J]. Optics & Photonics News, 2008, 20(9): 12-15.
- 11 E H Lee, J R M Radok. The contact problem for viscoelastic bodies[J]. J Appl Mech, 1960, 27(3): 438-444.
- 12 M L Oyen. Spherical indentation creep following ramp loading[J]. J Mater Res, 2005, 20(8): 2094-2100.

栏目编辑: 韩 峰