

文章编号: 0258-7025(2008)02-0268-05

# 固着磨料加工工艺对磷酸盐钕玻璃 亚表面缺陷的影响

张 伟<sup>1,2</sup> 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要** 散粒磨料研磨与固着磨料研磨是光学研磨加工过程中的两种主要手段,但两者材料去除的机制不同。目前针对高功率固体激光装置中的主要工作物质——磷酸盐激光钕玻璃的亚表面缺陷(SSD)研究相对较少,因此在实验的基础上,通过系统地研究固着磨料对磷酸盐激光钕玻璃的研磨工艺过程,分析了多种因素,如磨料粒径、载荷大小、机床转速,以及结合剂材料与冷却液等对钕玻璃亚表面缺陷形成的影响,并与散粒磨料研磨工艺所产生的亚表面缺陷进行了比较,对关键工艺参数进行定量,为高质量钕玻璃制造工艺的选型以及进一步优化亚表面缺陷提供了重要的参考数据。

**关键词** 材料;光学加工;亚表面损伤;检测;激光玻璃;激光损伤阈值

**中图分类号** TN 244;TG 73 **文献标识码** A

## Effect of Bound Diamond Abrasives Fabrication Technology on Subsurface Damage in Nd-Doped Phosphate Glass

Zhang Wei<sup>1,2</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Loose abrasive grinding and bound abrasive grinding are two principal grinding methods in optical cold process, but they are different in grinding removal mechanism. Nd-doped phosphate glasses are dominating materials in high average power laser solid state lasers. For little investigative experience in subsurface damage (SSD) in Nd-doped phosphate glasses, this paper investigated the grinding removal mechanism using different bound diamond abrasives. The effects of abrasive size, load, spindle speed, bonding material and the coolant on the subsurface damage in Nd-doped phosphate glasses were surveyed as well. Subsurface damage produced by loose abrasives was presented for comparison. All the results provide essential foundation for choosing and optimizing fabrication technology of high-quality Nd-doped phosphate glasses.

**Key words** materials; optical fabrication; subsurface damage; detection; laser glass; laser induced damage threshold

### 1 引 言

光学元件在光学加工过程中不可避免地会造成亚表面损伤(SSD)<sup>[1~3]</sup>,其中宏观损伤主要有微裂纹、划痕、微孔和杂质颗粒等。这些亚表面缺陷在高功率激光辐照下容易造成灾难性破坏,是限制高功

率激光系统实现高通量运行所需元件负载的主要障碍。磷酸盐钕玻璃中的亚表面缺陷除改变材料的机械和光散射等特性外<sup>[4]</sup>,更重要的是大大降低了这类光学元件的激光损伤阈值。其主要机制可归纳为<sup>[5]</sup>:1)亚表面缺陷降低了材料的破坏应力;2)为

收稿日期:2007-06-04;收到修改稿日期:2007-08-08

作者简介:张 伟(1979—),男,江苏人,博士研究生,从事钕玻璃亚表面缺陷研究。E-mail:wilson-siom@163.com

导师简介:朱健强(1964—),男,江苏人,研究员,博士生导师,目前从事高功率激光驱动器的研究与发展工作。

E-mail:jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

光吸收杂质提供容纳空间;3) 调制材料内部的电磁场分布,形成局部电场增强等现象。

磷酸盐激光钹玻璃是高功率固体激光驱动器装置中的激光能量放大介质。随着高功率固体激光系统输出功率的不断提高,由于光学加工产生的亚表面缺陷严重地限制了磷酸盐钹玻璃激光输出能量密度的进一步提高。然而,国内针对磷酸盐激光钹玻璃亚表面缺陷的研究起步较晚,因此全方位开展磷酸盐激光钹玻璃亚表面缺陷的研究具有十分重要意义。

研磨是光学加工成形的重要工序,也是亚表面缺陷产生的主要过程。目前磷酸盐钹玻璃仍采用散粒磨料研磨。经过实验研究表明,散粒磨料研磨主要以脆性断裂机制实现材料去除,其产生的亚表面缺陷较大,约与磨料粒径相同,且受压痕载荷影响较大。而固着磨料研磨作为光学研磨的主要方式之一<sup>[6,7]</sup>,采用了不同的材料去除方式,因此两种磨料在研磨过程中产生的材料表面与亚表面缺陷也存在差异。本文选用精磨丸片作为固着磨料,在实验的基础上首先确定了固着磨料研磨的材料去除机制。系统研究了磷酸盐钹玻璃固着磨料研磨产生的表面亚表面缺陷与各种工艺参数的关系,其结果为高质量钹玻璃制造工艺选型,进一步优化定量工艺参数提供了必要的参考依据。

## 2 实验方案

实验中所使用的加工样品为中国科学院上海光学精密机械研究所激光玻璃研究室提供的 N31 型磷酸盐钹玻璃。样品的直径为 60 mm,厚度为 15 mm。所有样品均经过足够长时间的抛光,去除了研磨等前期工序产生的亚表面缺陷。但是由于抛光后样品表面粗糙度很小,采用固着磨料研磨时容易打滑且去除量极低,因此在进行固着磨料研磨工艺前,把样品放在铜制垂直凹槽研磨盘上,利用粒径为 W10 金刚石散粒磨料预磨 30 min。预磨后样品的表面粗糙度 PV 值约为 2.8  $\mu\text{m}$ ,亚表面缺陷深度约为 9.2~10.1  $\mu\text{m}$ 。

根据磨削量、表面粗糙度、磷酸盐钹玻璃的相对抗磨硬度、结合剂的耐磨损性能等特性定制了五种精磨丸片,以确定和比较丸片结合剂材料对 N31 激光玻璃材料去除机制的影响,并确定固着金刚石磨料粒径与表面粗糙度和亚表面缺陷的关系,丸片特性如表 1 所示。

其中 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup> 丸片由于定制公司保密,其结合剂

表 1 金刚石丸片特性

Table 1 Properties of diamond pellets

Pellet number	Abrasive size / $\mu\text{m}$	Bond material	Diameter /mm	Concentration
1 <sup>#</sup>	10~7	Cu Si Fe	8	12.5%
2 <sup>#</sup>	10~7	Cu Sn Ag	8	12.5%
3 <sup>#</sup>	9~8	Metal	8	—
4 <sup>#</sup>	13~10	Metal	8	—
5 <sup>#</sup>	20~14	Cu Sn Ni	8	12.5%

材料和浓度均未知。

通过环氧树脂系胶结剂分别将 30 片单片直径为 8 mm 的金刚石精磨片呈环状粘于直径 80 mm 的平模上,覆盖比约为 30%。在进行丸片研磨之前,必须修磨丸片。1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> 丸片采用粒径 14~10  $\mu\text{m}$  散粒金刚石磨料修磨,5<sup>#</sup> 采用粒径 28~20  $\mu\text{m}$  散粒金刚石磨料修磨。

材料的去除机制一般可分为脆性断裂和塑性变形两种。其中脆性断裂是通过空隙和裂纹的形成或扩展、剥落及碎裂等方式来完成,而塑性变形则是通过划痕、耕犁和切削成形方式实现材料去除。脆性断裂与塑性变形机制的划分主要依据以下三个方面<sup>[8]</sup>:1) 加工后材料表面的形貌;2) 材料去除率随时间的变化关系;3) 表面粗糙度随时间的变化。

为了确定 N31 激光玻璃的材料去除机制,分别使用表 1 所示丸片研磨 N31 玻璃样品。实验中每隔 2 min 测量一次磷酸盐钹玻璃的材料去除量和表面粗糙度 PV 值,获得材料去除率及表面粗糙度随时间的变化关系,待完全去除散粒磨料预磨产生的亚表面缺陷后再测量样品亚表面缺陷深度,以此确定固着磨料研磨产生的固有亚表面缺陷深度。实际光学研磨加工过程中,机床主轴转速与载荷是影响材料表面粗糙度和亚表面缺陷形成的主要因素。为了确定机床转速和载荷的影响,在实验中选取 550 g 和 1300 g 载荷。由于实验采用的机床最高主轴转速为 300 r/min,为确定主轴转速的影响,选取较低转速 150 r/min 作转速比较。在光学冷加工中,使用冷却液的目的是对金刚石磨削工具进行冷却,以带走光学玻璃加工过程中的热量,保证光学冷加工的顺利进行。采用自来水作为冷却液,另外还采用体积分数为 3% 的三乙醇胺水溶液作为精磨冷却液,pH 值约为 9.2。

在实验中采用便携式表面粗糙度测量仪 SJ-201P 测量样品表面质量,针对每个样品随机采样 8 点,并采用基于击坑<sup>[9,10]</sup>原理自主研发的亚表面缺陷检测设备,来测量固着磨料研磨产生的亚表面缺

陷深度。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 材料去除机制

一般材料以脆性断裂机制进行材料去除后,其表面呈贝壳状均匀毛面、线性材料去除率和不随时间变化的表面粗糙度为表征。图 1 分别给出了金刚石粒度均为 W10 的金刚石散粒磨料研磨后的表面形貌和金刚石精磨丸片研磨后的表面形貌。

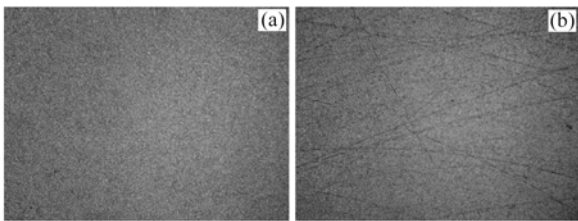


图 1 研磨表面形貌显微图片

Fig. 1 Microphotograph of Nd-doped glass with loose abrasive and bound abrasive

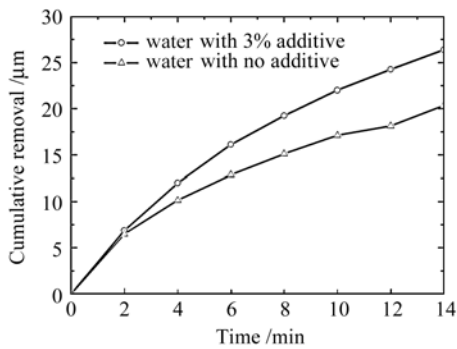


图 2 磷酸盐钕玻璃累积去除量

Fig. 2 Cumulative removal of Nd-dope glass

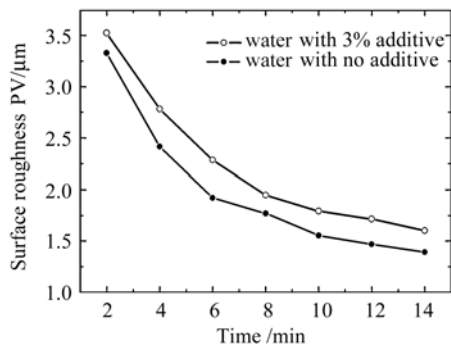


图 3 磷酸盐钕玻璃表面粗糙度变化

Fig. 3 Surface roughness for Nd-doped glass with and without additive

从图 1(a)可以看出,样品表面呈均匀破碎毛面。而经过金刚石丸片研磨后表面则呈现较多交错划痕,见图 1(b),表明材料被金刚石磨刃以犁耕、切

削的形式去除。

图 2 给出了主轴转速 300 r/min,载荷 70 g 时,5# 金刚石丸片研磨累积去除量与时间变化的关系。由图 2 可知,磷酸盐钕玻璃在金刚石丸片研磨下累积去除量随时间并不呈线性变化,且碱性冷却液的添加使金刚石丸片具有了自锐性,有效提高了丸片材料去除率。图 3 给出了 5# 金刚石丸片研磨产生的磷酸盐钕玻璃表面粗糙度 PV 值随时间的变化。可以得到,在水和三乙醇胺水溶液作冷却液时,玻璃表面粗糙度均随着研磨时间的增加而逐渐降低,当达到一定时间后表面粗糙度逐渐呈现平稳状态。实验中,表面粗糙度在 5# 金刚石丸片研磨 14 min 后基本保持不变。精磨冷却液腐蚀金刚石丸片结合剂材料使金刚石丸片更具有自锐性而暴露出更多的金刚石磨刃,增加了材料去除率的同时也在一定程度上增加了表面粗糙度。结合图 1(b),图 2,图 3 可知,5# 金刚石研磨机制主要为塑性变形。

在实验中使用的 1# ~ 4# 金刚石丸片的累积去除量和表面粗糙度变化与 5# 样品表现出了相同的变化趋势,如图 4 和图 5 所示,进一步表明实验所选

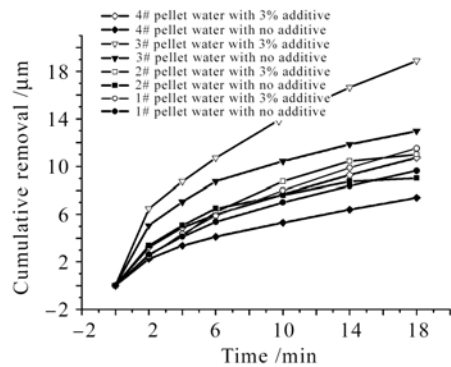


图 4 磷酸盐钕玻璃累积去除率

Fig. 4 Cumulative removal of Nd-dope glass

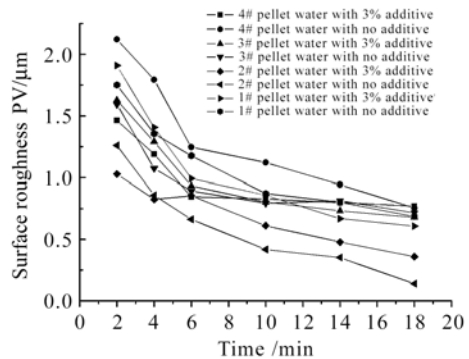


图 5 磷酸盐钕玻璃表面粗糙度变化

Fig. 5 Surface roughness for Nd-doped glass with and without additive

的五种金刚石丸片研磨机制主要是塑性形变。

与脆性断裂去除机制不同,材料塑性去除时,表面材料将产生塑性流动。在剪切应力的作用下,脆性材料像金属一样形成切屑而被去除。当载荷达到一定极限值时,才诱发裂纹产生。因此当材料以塑性形变机制去除时,其产生的亚表面缺陷较小。

在完全去除预磨产生的亚表面缺陷后,精磨丸片产生的亚表面缺陷结果如表 2 所示。

表 2 精磨片研磨形成的磷酸盐钕玻璃亚表面缺陷

Table 2 Subsurface damage in Nd-doped glass produced by multi-pellets grinding

	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
Water SSD / $\mu\text{m}$	3.1	3.3	2.3	3.2	5.8
Additive SSD / $\mu\text{m}$	3.9	3.8	3.2	3.9	6.9

粒径在 10~7  $\mu\text{m}$  金刚石散粒磨料所产生的亚表面缺陷深度约为 9.2~10.1  $\mu\text{m}$ 。由表 2 可知,相同粒径金刚石固着磨料(1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> 丸片)研磨产生的亚表面缺陷较小,仅为散粒磨料研磨产生亚表面缺陷深度的 1/3。与散粒磨料研磨相似的是,较大的金刚石粒径产生的亚表面缺陷深度也较大。5<sup>#</sup> 样品粒径为 20~14  $\mu\text{m}$ ,所产生的亚表面缺陷深度约为 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> (金刚石粒径 10~7  $\mu\text{m}$ ) 的两倍。粒径最小的 3<sup>#</sup> 丸片则形成了最小的亚表面缺陷。1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> 丸片采用了不同的金属结合剂,而亚表面缺陷深度并没有表现出太大的差异。因此实验选用的结合剂材料对磷酸盐钕玻璃表面/亚表面缺陷影响较小。

冷却液的作用是使吸附在工具表面的金属基体微小颗粒和玻璃碎屑脱离工作面,从而增加了金刚石露出基体的高度,进一步增加参与磨削的金刚石量,因此在一定程度上增加了表面粗糙度和亚表面缺陷深度,见表 2,图 3 和图 5。表 3 给出了相同粒径(W10)金刚石散粒磨料研磨和固着磨料研磨所产生的表面粗糙度结果比较,其中固着磨料研磨采用 3% 三乙醇胺水溶液作为冷却液。

表 3 不同研磨方式产生的磷酸盐钕玻璃表面粗糙度

Table 3 Surface roughness in Nd-doped glass produced by different grinding methods

	Surface roughness Ra / $\mu\text{m}$	Surface roughness PV / $\mu\text{m}$
Loose abrasives	0.37	2.86
Bound abrasives	0.08	0.71

由表 3 可知,固着磨料研磨产生的表面粗糙度约为散粒磨料研磨产生的表面粗糙度值的 1/4,此外粒径 W20 金刚石两种磨料研磨产生表面粗糙度与表 3 也非常接近。综合表 2,3 中的数据可知,固

着磨料研磨同散粒磨料研磨相比,具有较好的表面粗糙度和较小的亚表面缺陷的优势,有效提高了后续抛光效率,节省了加工时间。因此采用固着磨料研磨有利于磷酸盐钕玻璃加工中亚表面缺陷的控制以及高质量钕玻璃加工工艺参数的优化。

### 3.2 机床转速的影响

实验中采用的机床转速最高为 300 r/min。为了初步验证机床主轴转速对磷酸盐钕玻璃表面/亚表面缺陷的影响,实验中选择了较低的转速 150 r/min。同时为了提高磨削效率,采用了精磨冷却液作为添加剂。实验测得精磨丸片产生的亚表面缺陷如表 4 所示。

表 4 转速对磷酸盐钕玻璃亚表面缺陷的影响

Table 4 Effect of spindle speed on subsurface damage in Nd-doped glass

	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
300 r/min SSD / $\mu\text{m}$	3.9	3.8	3.2	3.9	6.9
150 r/min SSD / $\mu\text{m}$	4.4	3.9	3.5	4.6	7.5

通过分析表 4 的各列数据可知,在低速磨削条件下,精磨丸片研磨在一定程度上产生了更大的亚表面缺陷深度,主要是由于法向磨削力和切向磨削力随着机床主轴转速的提高而减小<sup>[11]</sup>。在较低转速下产生亚表面缺陷的法向切削力较大,从而导致以转速 150 r/min 研磨产生了较大的亚表面缺陷,且相同研磨时间后,低速研磨表面粗糙度较大,表面粗糙度 PV 值平均比高速研磨大 0.1  $\mu\text{m}$ 。此外随着转速的增高,磨粒与工件间的高速冲击作用逐渐显露出来,高速冲击工件的动能作用与工件材料上,工件材料内部分子产生强烈的内摩擦,从而使材料表现出塑性流动现象,法向和切向磨削力都下降很多。

### 3.3 载荷大小的影响

假定磨削产生的裂纹形状是半硬币形态的,Inasaki 采用了压痕负载和准静态维氏压痕研究中所形成的中位/径向裂纹系统范围之间的关系<sup>[12]</sup>来估计磨削中所形成裂纹的长度  $l_{mc}$

$$l_{mc} = \{0.034(\cot\psi)^{2/3}[(E/H)^{1/2}/K_c]\}^{2/3} P^{2/3}, \quad (1)$$

式中  $E$  为弹性模量,  $H$  为维氏硬度,  $2\psi$  为压痕角,  $K_c$  为陶瓷材料的断裂韧性,  $P$  为压痕负载。(1) 式估计磨削中产生的裂纹长度有一定的局限性,因为获得(1)式的裂纹长度是在准静态条件下获得的。用准静态特性研究冲击载荷下动态裂纹的规律不能正确反映材料在冲击载荷作用下的动态特性,因此在实际动态磨削过程中,需要根据实验结果对(1)式

中的参数进行修正。

实验中选择 4# 丸片,并选择了两种不同的载荷:550 g和1300 g。主轴转速:300 r/min,精磨冷却液:体积分数为 3%的三乙醇胺水溶液。表 5 给出了不同载荷下,磷酸盐钕玻璃表面/亚表面缺陷数据,其中载荷70 g为样品自身质量。

表 5 载荷对磷酸盐钕玻璃表面/亚表面缺陷的影响

Table 5 Effect of load on surface/subsurface damage in Nd-doped glass

Load /g	70	550	1300
Subsurface damage / $\mu\text{m}$	3.9	5.9	8.2
Surface roughness PV / $\mu\text{m}$	0.67	1.02	1.07

固着磨料研磨时,金刚石磨刃与材料间的法向切削力和切向切削力共同作用实现材料去除。从表 5 可以看出,当载荷增大至550 g时,表面粗糙度和亚表面缺陷深度均增加1.5倍,而当载荷进一步增加时,表面粗糙度增值明显小于亚表面缺陷增幅。表明随着载荷的增大,并不能有效提高固着磨料金刚石磨刃对材料产生的切向切削力导致表面粗糙度逐渐趋于平稳。法向切削力是产生亚表面缺陷的主要因素,根据实验数据分析可知,法向切削力仅为载荷的 20%。对磷酸盐钕玻璃而言,亚表面缺陷深度估计可根据(1)式修正为

$$l_{mc} = \{0.034(\cot\phi)^{2/3}[(E/H)^{1/2}/K_c]\}^{2/3} P_n^{2/3}, \quad (2)$$

其中  $P_n$  表示法向切削力,  $P_n \approx 0.2P$ 。

由于在实验中固着磨料研磨均为塑性变形机制,表面粗糙度随时间逐渐减小,使得亚表面缺陷与表面粗糙度的比值的讨论无实际意义。但是,无论是主轴转速还是载荷变化引起的表面粗糙度变化,实验结果表面较大的表面粗糙度必然对应较大的亚表面缺陷深度。

## 4 结 论

实验定制的 5 种金刚石丸片材料去除机制均为塑性变形。固着磨料研磨产生的表面粗糙度和亚表面缺陷深度较相同粒径散粒磨料研磨要小得多,分别是散粒磨料研磨产生表面粗糙度的 1/4 和亚表面缺陷深度的 1/3。精磨冷却液在提高磨削率的同时也增加了表面粗糙度和亚表面缺陷深度。固着磨料研磨,法向切削力是产生亚表面缺陷的主要因素。较低机床主轴转速具有较高的切向和法向切削力,而导致较大的表面粗糙度和亚表面缺陷。较高机床

转速有利于形成较好的表面质量和更小亚表面缺陷。载荷对磷酸盐钕玻璃表面亚表面缺陷影响较大。载荷的增大,并不能有效提高固着磨料金刚石磨刃对材料产生的切向切削力,导致表面粗糙度逐渐趋于平稳。法向切削力约为载荷的 20%。对磷酸盐钕玻璃而言,载荷对亚表面缺陷深度根据(1)式修正为  $(0.2P)^{2/3}$ 。虽然亚表面缺陷与表面粗糙度在塑性形变去除机制下不再具有常数比例关系,但是表面粗糙度仍可以作为亚表面粗糙度的表征参数。越粗糙的工件表面,其亚表面缺陷深度也越大。

## 参 考 文 献

- 1 F. W. Preston, B. Sc., A. M. I. C. E.. The structure of abrade glass surface [J]. *Trans. Opt. Soc.*, 1922, **23**(3):141~164
- 2 Joseph A. Randi, John C. Lambropoulos, Stephen D. Jacobs. Subsurface damage in some single crystalline optical materials [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12):2241~2249
- 3 P. E. Miller, T. I. Suratwala, L. L. Wong *et al.*. The distribution of subsurface damage in fused silica [C]. *SPIE*, 2005, **5991**:1~25
- 4 Jiang Zhonghong. ICF laser glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1165~1176  
姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1165~1176
- 5 M. D. Feit, A. M. Rubenchik. Influence of subsurface cracks on laser induced surface damage[C]. *SPIE*, 2004, **5273**:264~272
- 6 John C. Lambropoulos, Stephen D. Jacobs, Birgit E. Gillman *et al.*. Deterministic microgrinding, lapping, and polishing of glass-ceramics [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2005, **88**(5):1127~1132
- 7 John C. Lambropoulos, Tong Fang, Paul D. Funkenbusch *et al.*. Surface microroughness of optical glasses under deterministic microgrinding [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(22):4448~4462
- 8 P. Paul Hed, David F. Edwards. Optical glass fabrication technology. 1: Fine grinding mechanism using bound diamond abrasives [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(21):4670~4676
- 9 A. Lindquist, Stephen. D. Jacobs, A. Feltz. Surface preparation technique for rapid measurement of sub-surface damage depth[C]. *Science of Optical Finishing*, Washington, D. C: OSA, 1990. 57~60
- 10 Yiyang Zhou, Paul D. Funkenbusch, David J. Quesnel *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**(12):3277~3280
- 11 Zhao Henghua, Cai Guangqi. Model establishment and mechanism research of chip-formation due to shock under ultra-high speed grinding [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, **15**(12):1038~1041  
赵恒华,蔡光起. 超高速磨削冲击成屑模型构建与机理研究[J]. *中国机械工程*, 2004, **15**(12):1038~1041
- 12 B. R. Lawn, A. G. Evans, D. B. Marshall. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the median/radial crack system [J]. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1980, **63**(9-10):574~581