

文章编号 1004-924X(2014)10-2659-08

光学玻璃的激光微结构化砂轮精密磨削

郭 兵^{1,2*}, 赵清亮¹, 陈 冰¹, 于 欣²

- (1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院 精密工程研究所, 哈尔滨 黑龙江 150001;
2. 哈尔滨工业大学 航天学院 光电子技术研究所, 哈尔滨 黑龙江 150080)

摘要: 为了降低大磨粒金刚石砂轮磨削光学玻璃时的亚表层损伤, 利用纳秒脉冲激光对金刚石砂轮进行了表面微结构化加工, 并采用该砂轮研究了光学玻璃的精密磨削加工。首先, 计算了金刚石磨粒在纳秒脉冲激光辐射下的烧蚀阈值和激光束腰半径; 然后, 分析了纳秒脉冲激光在金刚石磨粒上加工的微结构形貌以及微结构化过程中的热损伤; 最后, 采用微结构化大磨粒金刚石砂轮进行光学玻璃的磨削实验, 并分析了亚表层的损伤情况。实验结果表明: 金刚石磨粒在纳秒脉冲激光辐射下的烧蚀阈值为 0.89 J/cm^2 , 激光束腰半径为 $17.16 \mu\text{m}$ 。在粒度为 $150 \mu\text{m}$ 的大磨粒电镀金刚石砂轮上可以实现结构尺寸为 $20 \mu\text{m}$ 的微结构表面加工。与传统金刚石砂轮相比, 微结构化砂轮磨削后的光学玻璃亚表层损伤深度降低了 40% , 达到了降低光学玻璃磨削亚表层损伤的目的。

关键词: 光学玻璃; 微结构化; 金刚石砂轮; 纳秒激光; 精密磨削; 亚表层损伤

中图分类号: TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142210.2659

Precision grinding of optical glasses by laser micro-structured grinding wheels

GUO Bing^{1,2*}, ZHAO Qing-liang¹, CHEN Bing¹, YU Xin²

- (1. *Institute of Precision Engineering, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*
2. *Institute of Opto-Electronics, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)
* *Corresponding author, E-mail: guobing@hit.edu.cn*

Abstract: To reduce the subsurface damage of optical glasses induced by a coarse-grained diamond wheel, the diamond wheel surface was processed in a micro-structuring mode by a nanosecond pulse laser. The grinding wheel was used to investigate the grinding performance of optical glasses. First, the ablation threshold of diamond grits under a ns laser pulse and the laser beam waist radius were calculated. And then, the ablation morphological characteristics were explored, and the thermal damage of diamond grits was analyzed. Finally, the optical glass grinding experiments were performed and the subsurface damage was analyzed. The experimental results show that the ablation threshold of diamond grits and the beam waist radius are 0.89 J/cm^2 and $17.16 \mu\text{m}$, respectively. Base on the optimi-

收稿日期: 2013-11-29; 修订日期: 2014-01-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075093); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2013M541361)

zation of laser parameters, a micro-structured surface with a size of $20\ \mu\text{m}$ is able to generate on an electroplated diamond wheel with a grit size of $150\ \mu\text{m}$. As compared with a conventional diamond wheel, the subsurface damage depth of optical glass workpiece induced by micro-structured diamond wheel is reduced by 40% and realizes the decrease of subsurface damage in optical glass precision grinding.

Key words: optical glasses; micro-structuring; diamond grinding wheel; ns laser; precision grinding; subsurface damage

1 引言

随着光学玻璃在光学、航天、微电子等领域的广泛应用,传统的磨削加工已经不能满足光学精密加工的要求。特别是近年来在大光学工程项目以及光电子消费产品需求日益增长的牵引和推动下,光学玻璃的精密加工正向着高精度、高效率 and 低成本方向发展。采用经过精密修整后的大磨粒金刚石砂轮(粒度在 $90\ \mu\text{m}$ 以上)进行光学玻璃的精密磨削加工,不但能够有效降低砂轮磨损率,提高磨削表面的面形精度,减少砂轮修整时间,而且还能减少磨削工序,实现从粗磨到精磨的一次性加工,从而减少了磨削工具的使用数量,提高了加工效率并大大降低了加工成本^[1]。但是经过修整后的大磨粒金刚石砂轮的磨粒形貌近乎平面,这会增大磨削过程中的法向磨削力,同时增大磨粒与工件之间的摩擦力,诱导产生较大的亚表层损伤。这种深度较大的亚表层损伤限制了大磨粒金刚石砂轮在光学玻璃精密磨削中的应用^[2]。

表面结构化是指砂轮磨削工作表面具有规则的三维拓扑几何形状,并藉此影响砂轮的磨削性能。与传统砂轮相比,表面结构化砂轮可以有效地提高砂轮的容屑空间,减小砂轮与工件的接触面积,改善砂轮的冷却润滑条件,降低磨削温度,减小磨削力^[2-4],通过控制砂轮表面结构的形状和分布,还能实现精密干磨削、高效精密磨削或者低损伤精密磨削。目前,表面结构化砂轮的制造方法主要分为两类:一类为在砂轮制备完成后,通过对砂轮表面磨粒或磨料层的有序去除来实现砂轮的表面结构化加工^[4-5];另一类是在砂轮的制备过程中,通过对磨粒或磨料群的可控排布来获得表面结构化砂轮^[6-7]。然而,对于超硬磨料砂轮,特

别是金刚石砂轮,由于其超高的磨粒硬度,很难在砂轮本身制造出三维结构,因此其表面结构的形成主要靠砂轮结合剂或磨粒黏结剂来完成。这会使金刚石砂轮的结构化制造受到两方面限制:一方面金刚石砂轮表面的磨粒分布密度会大幅降低,砂轮的磨损加剧,而且磨削表面的粗糙度也往往高于传统砂轮;另一方面砂轮表面结构受到磨粒尺寸的限制,很难在大磨粒金刚石砂轮上制造出微米级的微结构表面。

纳秒脉冲激光加工属于短脉冲高能束加工,该技术不但能够实现微米量级的精密加工,而且具有较高的加工效率。虽然金刚石在很宽的光谱范围内是光学透明的,但是纳秒脉冲激光的高峰值能量密度和强烈的热效应能够有效去除金刚石材料,因此非常适合加工金刚石^[8-9]。

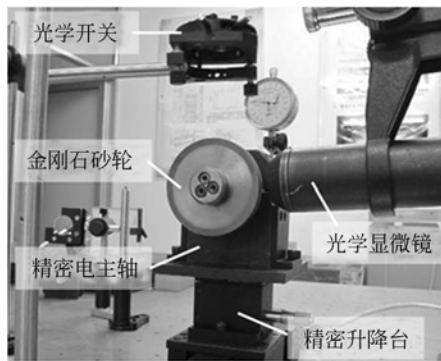
本文从大磨粒金刚石砂轮的激光微结构加工入手,利用微结构表面改善大磨粒金刚石砂轮的磨削性能,从而减小光学玻璃精密磨削后亚表层的损伤。

2 实验系统搭建

2.1 金刚石砂轮激光微结构加工实验

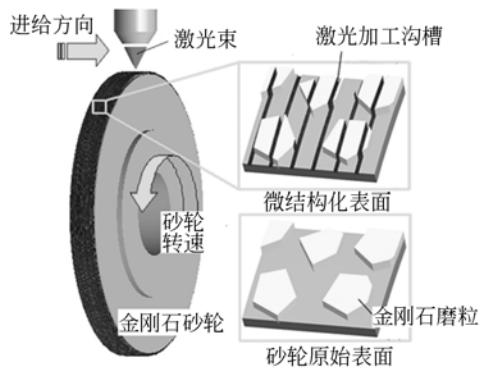
本实验所采用的激光源为美国 Continuum 公司的 Powerlite precision II 9010 型纳秒脉冲激光器,激光波长为 $532\ \text{nm}$,单脉冲能量最高为 $1\ 000\ \text{mJ}$,激光重复频率为 $10\ \text{Hz}$,脉宽为 $4\sim 8\ \text{ns}$ 。为了满足金刚石砂轮激光微结构加工的运动要求,在精密移动平台的基础上搭建了精密电主轴(Dr. Kaiser C58F3),以实现金刚石砂轮的圆周加工。使用反射镜搭建激光光路,利用光学开关控制激光加工时间,实验平台和加工原理如图 1 所示。

为了简化实验,在前期实验中采用磨料级人



(a) 实验平台

(a) Experimental setup



(b) 激光微加工原理示意图

(b) Illustration of laser micro-structuring

图 1 微结构化实验平台和加工原理示意图

Fig. 1 Experimental setup and illustration of micro-structuring

造金刚石阵列作为激光微结构化的实验对象,磨粒的平均大小为 1 mm。最终加工的金刚石砂轮为 1A1 型电镀金刚石砂轮,金刚石磨粒的平均大小为 150 μm,砂轮直径为 85 mm,厚度为 6 mm。

2.2 光学玻璃的微结构化砂轮精密磨削实验

磨削实验平台为三轴数控超精密坐标磨床 MUGK7120X5,工件材料为光学玻璃 BK7,采用相同规格但未结构化的金刚石砂轮进行对比实验研究。磨削前对电镀金刚石砂轮进行精密修整^[10],将其圆跳动控制在 20 μm 以内。采用水基乳化液作为磨削液,磨削方向与砂轮进给方向的夹角为 45°,砂轮转速为 3 000 r/min,单次磨削深度为 2 μm,进给率为 2 mm/min。磨削实验平台如图 2 所示。

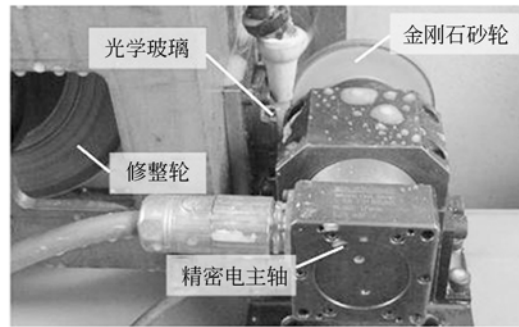


图 2 光学玻璃磨削实验平台

Fig. 2 Experimental setup of optical glass grinding

3 实验结果及讨论

3.1 金刚石磨粒烧蚀阈值的计算

要实现金刚石砂轮的激光微结构化加工,首先应获得金刚石磨粒的激光烧蚀阈值。本文以显微镜观察法为基础,通过测定烧蚀孔直径和激光功率的函数关系来计算金刚石的烧蚀阈值,并同时获得激光束腰半径。

激光光束是高斯光束,其传播符合物理光学的衍射理论,光束截面的最小半径为束腰半径,用 ω_0 表示。高斯光束在传播过程中,光束界面半径 ω 随传播距离 x 按照曲线规律变化,传播中不会出现几何光学中的聚焦点,距离束腰 x 处的光束截面半径 ω 可按照下式计算^[11]:

$$\omega^2 = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda x}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长。

高斯光束束腰处的能量密度分布为:

$$F(r) = F_0 \exp \left[-2 \frac{r^2}{\omega_0^2} \right], \quad (2)$$

式中: r 为截面半径方向上到中心的距离, F 为 r 处的激光能量密度, F_0 为束腰中心的能量密度。

由式(2)推导可得烧蚀直径 D 与聚焦后束腰半径 ω_0 以及材料烧蚀阈值 F_{th} 之间的关系:

$$D^2 = 2 \omega_0^2 \ln \frac{2P}{\pi \omega_0^2 f F_{th}}, \quad (3)$$

式中: f 为激光脉冲重复频率, P 为激光功率。

由式(3)可知,入射功率的对数与烧蚀直径的平方成线性关系,直线斜率为:

$$k = 2 \omega_0^2. \quad (4)$$

烧蚀直径为零时的功率为:

$$P_0 = \frac{1}{2} \pi \omega_0^2 f F_{th}. \quad (5)$$

由此可知,通过实验获得不同激光功率下金刚石磨粒的激光烧蚀孔的直径,再根据入射激光

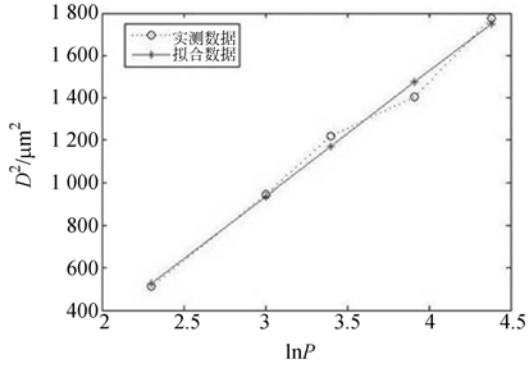


图 3 烧蚀孔直径与激光功率间的关系

Fig. 3 Relationship between ablation diameter and laser power

功率的对数与烧蚀直径平方的线性关系,就可获得金刚石磨粒的烧蚀阈值和激光光束的束腰半径。图 3 所示为拟合获得的烧蚀孔直径与激光功率间的关系。根据式(4)和式(5),可计算获得其束腰半径和纳秒脉冲激光加工金刚石磨粒的烧蚀阈值为:

$$\begin{cases} \omega_0 = 17.16 \mu\text{m} \\ F_{th} = 0.89 \text{ J/cm}^2 \end{cases}$$

3.2 金刚石激光微结构化成形貌分析

图 4 为纳秒激光初次在金刚石表面扫描加工的微沟槽形貌。激光功率为 80 mW,扫描速度为 0.1 mm/s,扫描次数为 1 次,脉冲的重复频率为 10 Hz。从图中可以看出,在纳秒激光加工过程中存在明显的热效应区,材料去除量较小,纳秒激光在金刚石表面形成烧蚀重凝区,在加工区域周围没有裂纹产生。这主要是因为实验中采用的激光峰值功率和脉冲重复频率都较低,使得作用区域前方的拉应力较小,不会产生裂纹;同时,加工区材料的熔化重凝作用也有利于裂纹的愈合,从而抑制了裂纹的产生。

为了进一步研究纳秒激光加工过程中的热效应,在 100 mW 的激光功率下进行纳秒激光烧蚀实验,如图 5(a)所示。图中自上而下,每横排激光作用的脉冲数量分别为 1,2,5,10。可以发现,随着脉冲数量的增加,材料烧蚀区的总面积几乎没有变化,但是由材料去除引起的烧蚀坑直径明

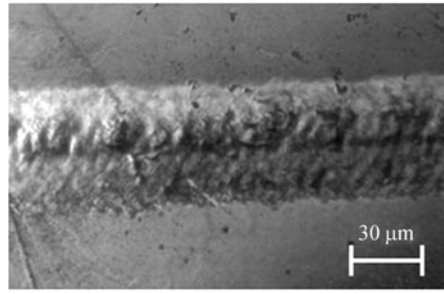
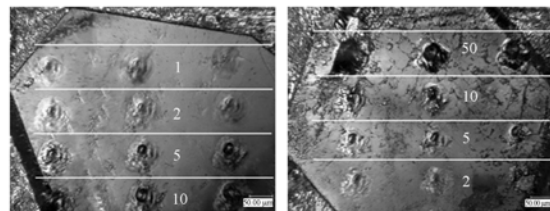


图 4 纳秒激光在金刚石表面扫描加工的微沟槽形貌
Fig. 4 Morphology of groove on diamond by nanosecond laser

显增大,其在烧蚀区所占的比例也在逐渐增多,存在明显的累积效应。这是因为纳秒激光脉冲在连续作用过程中,由于激光作用时间足够长,前次脉冲的部分能量会残留在作用区域,随着后续脉冲能量的叠加,在单脉冲作用下仅能实现材料熔化的区域的温度会继续增高,最终实现材料的去除。进一步增加脉冲个数,图 5(b)所示为在 80 mW 激光功率下加工的烧蚀孔矩阵。图中自上而下,每横排作用的脉冲数量分别为 50,10,5,2。可以看出,当作用脉冲数达到 50 时,材料去除区在整个烧蚀区所占比例达到 80%~90%。而在实际的微结构化金刚石砂轮磨削加工过程中,材料烧蚀去除区比例的增大代表着更大的微结构尺寸,这有利于增大容屑空间,减小磨粒与工件材料的接触面积,从而更利于改善砂轮的磨削性能。因此在金刚石砂轮的微结构化加工过程中,在考虑加工效率的前提下,应尽量提高激光脉冲数量。



(a) 100 mW 激光功率 (b) 80 mW 激光功率
(a) With laser power of 100 mW (b) With laser power of 80 mW

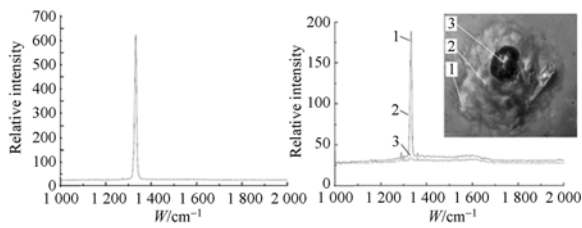
图 5 纳秒激光打孔实验

Fig. 5 Experiments of nanosecond laser ablation

3.3 金刚石激光微结构化过程中的热损伤

采用拉曼光谱分析金刚石磨粒在激光微结构

化过程中的损伤情况,特别是纳秒脉冲激光加工后微结构周围残留的热影响区的石墨化情况,进而分析激光微结构化过程中的金刚石石墨化情况,检测结果如图 6 所示。激光加工的功率为 100 mW,脉冲数为 10。通常来讲,单晶金刚石的拉曼光谱主要为位于 $1\,332\text{ cm}^{-1}$ 的一阶拉曼谱线,对应于两相互贯穿立方子晶格的振动模式。而石墨晶体存在 9 种晶格振动,其中晶格网面内键的伸缩振动对应的拉曼谱线峰值位于 $1\,580\text{ cm}^{-1}$,通常作为石墨的特征谱线,称为 G 峰。在石墨晶体存在缺陷,结构不完整时,在拉曼谱线的 $1\,360\text{ cm}^{-1}$ 处会出现一个谱峰,通常称为 D 峰。从图 6(a)中可以看出,原始金刚石磨粒的谱线在 $1\,332\text{ cm}^{-1}$ 处有一个明显的谱峰,其他位置的谱线都保持在极低的强度,只在 $1\,289\text{ cm}^{-1}$ 处有一个微弱的谱峰,这个峰值并非碳材料的典型拉曼光谱峰值,可能与金刚石磨粒成分的杂质有关。



(a) 原始金刚石 (b) 激光烧蚀金刚石

(a) Original diamond (b) Laser ablation diamond

图 6 激光烧蚀金刚石磨粒的拉曼光谱

Fig. 6 Raman spectra of laser ablation diamond

金刚石磨粒纳秒脉冲激光烧蚀区不同位置的拉曼光谱如图 6(b)所示。图中区域 1 为激光热影响区边缘,区域 2 为热影响区中部,区域 3 为材料烧蚀去除区。可以看出,在纳秒脉冲激光加工后,激光烧蚀区各个部分的谱峰位置基本不变,只是相对强度有所不同。3 个区域的强度最高谱峰仍然出现在 $1\,332\text{ cm}^{-1}$ 处,而在 $1\,580\text{ cm}^{-1}$ 处均会有突起,但是强度较低,没有产生明显的峰值。表 1 为不同区域对应的光谱峰值强度。I1332、I1360、I1580 分别代表 $1\,332$ 、 $1\,360$ 、 $1\,580\text{ cm}^{-1}$ 的谱线强度。I1332/I1580 表征加工后表面金刚石和石墨的相对含量;而 I1360/I1580 表征石墨化度,即石墨结构中达到完整石墨晶体结构的比例。

表 1 纳秒脉冲激光加工金刚石磨粒的谱线峰值强度

Tab. 1 Spectral peaks of diamond by nanosecond laser ablation (mm)

谱线	I1332	I1360	I1580	I1332 / I1580	I1360 / I1580
1	189.15	40.10	36.37	5.20	1.10
2	85.12	34.93	32.81	2.59	1.07
3	34.25	34.15	31.61	1.08	1.08

由表 1 中的数据可以看出,越靠近烧蚀区的中心,其金刚石谱峰的相对强度越小;与之相应,代表石墨的 D 峰和 G 峰的相对强度越大,而其石墨化度没有明显的改变。这说明在纳秒激光加工过程中,金刚石磨粒的整个激光烧蚀区都存在着石墨化现象,并且随着脉冲激光能量密度的增加,其表面的石墨化程度变大。而在激光烧蚀区的中心,激光能量密度最大的材料去除区在随后的磨削过程中仅起到存储切屑和磨削液,以及分割磨粒与工件接触面积的作用,因此这个区域内的热损伤不会对磨削过程产生影响。但是材料去除区边缘的热影响区对磨削性能的影响很大,其石墨化现象会降低由材料去除区边缘生成的微磨削刃的强度,进而降低了磨削过程中的切削作用,不利于降低磨削力。因此在实际加工中,不但应该减小热影响区的面积,还应该采用较低的单脉冲能量,从而减小其热损伤。

3.4 微结构砂轮表面对光学玻璃磨削质量的影响

根据以上分析,在利用纳秒脉冲激光进行金刚石砂轮的微结构化加工过程中,可以通过提高脉冲重复频率,降低扫描速度,或者增加扫描次数来提高脉冲个数,从而减小热影响区面积,增大材料去除区的比例;同时通过降低单脉冲能量和纳秒激光加工过程中的热效应进一步提高纳秒激光的加工质量。图 7 为在单颗金刚石磨粒上加工的微沟槽结构阵列,激光功率为 80 mW,脉冲的重复频率为 10 Hz,扫描速度为 0.01 mm/s,扫描次数为 1 次。图 8 为在电镀金刚石砂轮上加工的微结构表面。从图中可以看出,砂轮表面的微结构清晰规整,磨粒没有发生脱离和破碎,微沟槽尺寸为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右,周期为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。

采用微结构化金刚石砂轮进行光学玻璃的精密磨削实验,磨削前利用金属基烧结金刚石砂轮对它进行对滚修整,将砂轮的径向跳动控制在 20

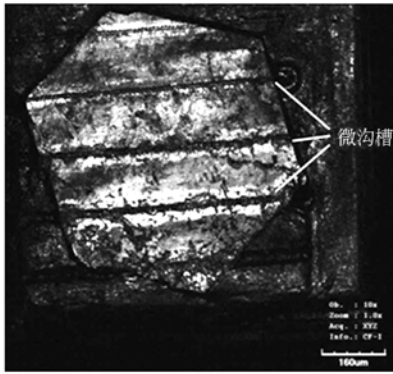
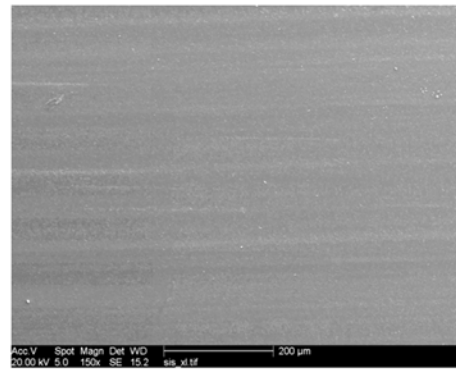


图 7 单颗金刚石磨粒上加工的微沟槽结构阵列形貌
Fig. 7 Morphology of groove array on single diamond grit



(b) 微结构化金刚石砂轮磨削表面

(b) Ground surface by micro-structured diamond wheel

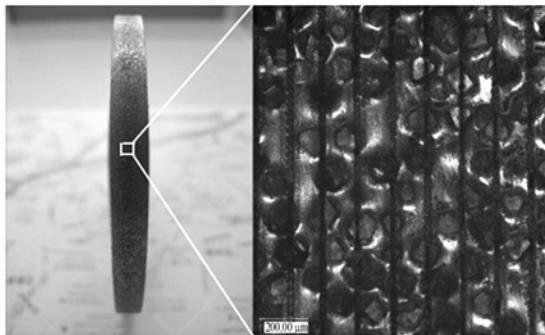


图 8 微结构化的金刚石砂轮表面形貌

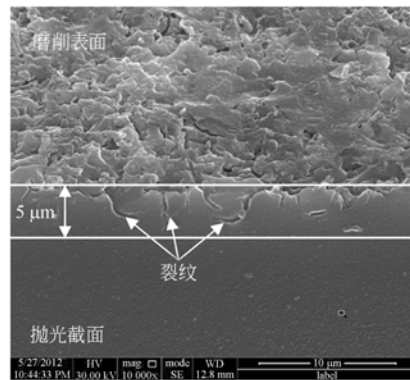
Fig. 8 Morphology of micro-structured diamond wheel

μm 以内。图 9 为磨削后光学玻璃表面的 SEM 照片,可以看出微结构化金刚石砂轮的磨削表面要略好于传统金刚石砂轮的磨削表面,表面裂纹有所减少。表面粗糙度检测结果(垂直磨削方向)表明,传统砂轮磨削表面的 R_a 值为 37 nm ,而微结构化金刚石砂轮磨削表面的 R_a 值为 49 nm 。这主要是因为微结构化处理细化了金刚石磨粒,

图 9 BK7 光学玻璃的磨削表面

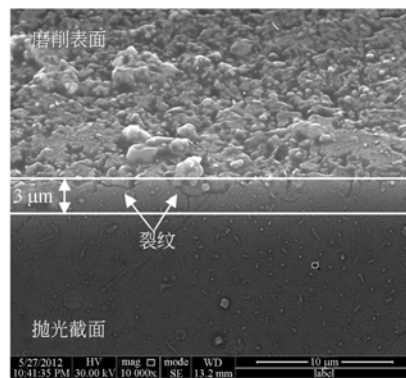
Fig. 9 Ground surfaces of optical glass BK7

与传统的近乎于平面的磨粒形貌相比,降低了磨削过程中平面磨粒对磨削表面的“平整”作用。



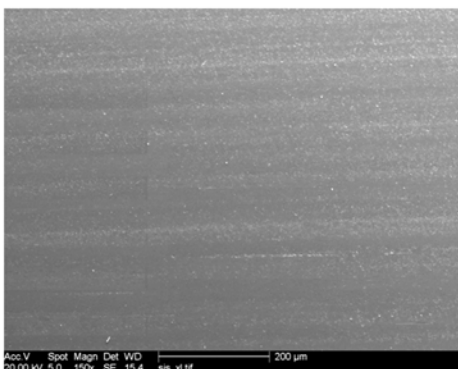
(a) 传统金刚石砂轮磨削后亚表层损伤情况

(a) Subsurface damage by conventional diamond wheel



(b) 微结构化金刚石砂轮磨削后亚表层损伤情况

(b) Subsurface damage by micro-structured diamond wheel



(a) 传统金刚石砂轮磨削表面

(a) Ground surface by conventional diamond wheel

图 10 BK7 光学玻璃的亚表层损伤

Fig. 10 Subsurface damage of optical glass BK7

利用角度抛光法测量了磨削后工件亚表层的裂纹深度^[12-14]。检测结果表明,使用传统的金刚石砂轮磨削后的光学玻璃工件的亚表层损伤深度最大为 5 μm 左右;而采用激光微结构化的金刚石砂轮磨削后的光学玻璃,其亚表层损伤情况得到了明显的改善,裂纹扩展深度最大仅为 3 μm ,降低了 40%。这主要是因为金刚石砂轮表面的微结构化处理不但增加了磨粒的有效磨削刃,增强了磨削过程中磨粒的切削作用,减弱了滑擦和耕犁作用,而且还细化了金刚石磨粒,减小了未变形磨屑厚度,从而改善了由磨削过程引入的亚表层损伤。图 10 为磨削后工件断面的 SEM 照片。

4 结 论

本文针对大磨粒金刚石砂轮,计算获得金刚石磨粒在纳秒脉冲激光辐射下的烧蚀阈值为

0.89 J/cm²,激光束腰半径为 17.16 μm 。金刚石砂轮的纳秒脉冲激光微结构化加工过程中,通过提高脉冲重复频率,降低扫描速度或者增加扫描次数来提高脉冲个数,从而增大微结构的加工尺寸;同时通过降低单脉冲能量和纳秒激光加工过程中的热效应来提高微结构表面的加工质量。最终基于纳秒脉冲激光在粒度为 150 μm 的大磨粒电镀金刚石砂轮上实现了结构尺寸为 20 μm ,周期为 100 μm 的微沟槽阵列结构加工,加工后的砂轮表面的微结构清晰规整,没有发现磨粒的脱离和破碎现象。磨削实验结果表明,虽然采用激光微结构化的金刚石砂轮磨削后的光学玻璃表面粗糙度 R_a 值为 49 nm,略高于传统金刚石砂轮磨削表面;但是磨削后光学玻璃的亚表层裂纹扩展深度仅为 3 μm ,比传统金刚石砂轮(裂纹扩展深度为 5 μm)降低了 40%。

参考文献:

- [1] HEINZEL C, RICKENS K. Engineered wheels for grinding of optical glass[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, 58(1):315-318.
- [2] GUO B, ZHAO Q L, ZHANG W. Optical glass grinder with laser structured coarse-grained diamond wheels[C]. *Proceedings of EUSPEN, Berlin, Germany*, 2013:31-34.
- [3] KOSHY P, IWSAKI A, ELBESTAWI M A. Surface generation with engineered diamond grinding wheels; insights from simulation[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, 52(1):271-274.
- [4] TAWAKOLI T, RABIEY M. An innovative concept and its effects on wheel surface topography in dry grinding by resin and vitrified bond CBN wheel [J]. *Machining Science and Technology*, 2008, 12(4):514-528.
- [5] AURICH J C, HERZENSTIEL P, SUDERMANN H, et al.. High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, 57(1):357-362.
- [6] YUAN H P, GAO H. On the control and optimization of abrasive distribution pattern on grinding tool surfaces[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2008, 31(1):72-80.
- [7] DING W F, XU J H, FU Y C, et al.. Development and performance of monolayer brazed CBN grinding tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 34(5-6):491-495.
- [8] OHFUJI H, OKUCHI T, ODAKE S. Micro/nano-structural investigation of laser-cut surfaces of single and polycrystalline diamonds [J]. *Diamond and Related Materials*, 2010, 19(7-9):1040-1051.
- [9] 李小飞,朱东彬,董俊慧. 激光选区烧结及其在精密制造业中的应用[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5):1222-1227.
- LI X F, ZHU D B, DONG J H. Selective laser sintering and its application to precision casting process for ceramic models[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1222-1227. (in Chinese)
- [10] ZHAO L L, ZHAO Q L, HAN S. Electroplated diamond wheel dressing and precision grinding of optical glasses [C]. *Proceedings of EUSPEN, Stockholm, Sweden*, 2012:469-472.
- [11] 赵清亮,姜涛,董志伟,等. 飞秒激光加工 SiC 的烧蚀阈值及材料去除机理[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21):172-177.
- ZHAO Q L, JIANG T, DONG ZH W, et al.. Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond Laser [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,

- 2010, 46(21):172-177. (in Chinese)
- [12] ZHAO Q L, LIANG Y, STEPHENSON D, *et al.*. Surface and subsurface integrity in diamond grinding of optical glasses on Tetraform 'C' [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47 (14): 2091-2097.
- [13] 戴欣平, 赵萍, 文东辉. 单晶蓝宝石的延性研磨加工[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(6): 1316-1324.
DAI X P, ZHAO P, WEN D H. Ductile lapping of single crystal sapphire [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1316-1324. (in Chinese)
- [14] 吕东喜, 王洪祥, 黄燕华. 光学材料磨削的亚表面损伤预测[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(3): 680-686.
LÜ D X, WANG H X, HUANG Y H. Prediction of grinding induced subsurface damage of optical materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 680-686. (in Chinese)

作者简介:



郭 兵 (1983—), 男, 吉林延吉人, 博士, 讲师, 2012 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要研究方向为光学功能表面的超精密磨削加工技术。E-mail: guobing@hit.edu.cn



赵清亮 (1968—), 男, 河南新乡人, 博士, 教授, 博士生导师, 德国洪堡学者, 1999 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 主要研究领域为超精密加工技术、硬脆和难加工材料的高效加工技术。E-mail: zhaqingliang@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)