光学玻璃表面液流悬浮研抛加工

张 富,赵 继,庄 艳

(吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022)

摘 要:在研究表面光整加工方法的基础上,提出了一种液流悬浮研抛加工的新工艺方法。研制了基于三坐标数控铣床的液流悬浮研抛试验系统,并对光学玻璃(K9)进行了液流悬浮研抛试验。对研抛过程进行了分析,探讨了脆性材料的去除机理,即在磨粒冲击和剪切作用下,工件表面是以冲击和剪切的塑性去除方式加工的。试验结果表明:利用液流悬浮SiC纳米磨料研抛的方法可以实现光学玻璃的纳米去除和超光滑表面加工。

关键词:机械制造工艺与设备;研抛加工;液流悬浮;去除机理;塑性去除

中图分类号:TH161 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-5497(2007)03-0544-04

Polishing of optical glass surface by hydrodynamic suspension

Zhang Fu, Zhao Ji, Zhuang Yan

(*College of Mechanical Science and Technology, Jilin University, Changchun* 130022, *China*)

Abstract: Based on the research of the finishing machining process of the surface, a new polishing technique, the hydrodynamic suspension polishing was proposed. A hydrodynamic suspension test system based on a three-coordinates NC milling machine was developed and the polishing experiment was performed on the optical glass (K9). The polishing process was analyzed and the removal mechanisms of the brittle material were discussed. It is found that the surface roughness is reduced by the plastic deformation and plastic removal under the impacting and shearing of the abrasive. The results show that the polishing by the hydrodynamic suspension with colloided SiC nano-abrasive is valid for the nano meter cutting and the nanometer super-smooth surface processing.

Key words: mechanical manufacture technique and equipment; polishing; hydrodynamic suspension; removing mechanism; plastic removal

近年来,随着航空航天和微电子技术的迅猛发展,光学晶体和半导体材料的超光滑表面的加工方法成为制造业的研究热点。在传统研磨抛光技术基础上研发出了一些新型精密和超精密游离磨料加工方法[1-3],如弹性发射加工、液中研抛、液体动力抛光、磁流体抛光、浴法抛光、磁性研磨、浮法抛光、喷射加工等。这些方法多用于光学晶体和半导体材料的超光滑表面加工[4-10]。超光滑表面具有如下特征:①表面粗糙度 $Ra<1$ nm;②尽可能小的表层破坏和变质;③亚表面无损伤;④表面残余应力极小;⑤晶体表面具有完整的晶格结构,即表面无晶格错位。液流悬浮纳米磨料研抛加工方法正是基于对超光滑表面加工的要求而提出的。利用研抛工具头的高速旋转带动悬浮

收稿日期:2006-10-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50175049).

作者简介:张富(1965-),男,讲师,博士研究生. 研究方向:超精密加工. E-mail:zhangfu@mail.jlu.edu.cn

通讯联系人:赵继(1959-),男,教授,博士生导师. 研究方向:智能精密制造. E-mail:zj@jlu.edu.cn

在流体介质中的纳米磨料对工件进行加工，研磨工具与工件被加工表面不接触，形成非接触研磨抛光，或称动压抛光。研磨抛光在研抛液中进行，热变形影响小，又可防止空气中尘埃的影响，可以实现超光滑表面的加工。

1　液流悬浮试验装置和试验条件

1.1　试验装置

作者所在课题组研制的液流悬浮加工系统如图 1 所示。该系统中工具头的高速旋转主运动由高速无刷变频调速电机提供，可在 0～18000 r/min 内无级调速，功率为 800 W。利用三坐标数控机床实现 X、Y 和 Z 方向的进给运动，通过编程可实现复杂的加工运动。研抛工具的材料为聚氨脂和橡胶。

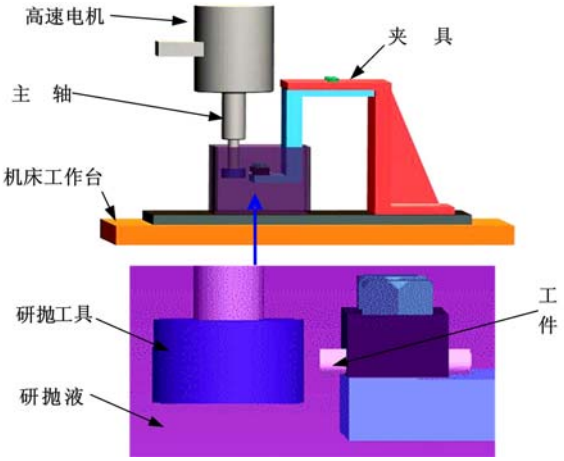

图 1　研抛加工系统

Fig. 1　The polishing system

1.2　试验条件

在研抛试验中，为了探索液流悬浮研抛工艺方法的加工效果，采用的试件为光学材料 K9 玻璃，流体介质采用 22 号工业流体润滑油，常温下的运动黏度为 19.8～24.2 mm^2/s。研磨头是直径为 40 mm 的软橡胶圆柱体，试验转速设为 3000 r/min 和 6000 r/min，与工件表面保持微小间隙并呈相切状态。研抛液为在 1500 ml 介质中加入 20 g 的 SiC 纳米粉形成的混合液。磨料为绿色 β 相 SiC 纳米粉，类球形，直径为 30～40 nm，莫氏硬度为 9.5～9.75，理论密度为 3.21 g/cm^3，粉体松散密度为 0.05 g/cm^3。

2　液流悬浮研抛试验结果

对光学材料 K9 玻璃预加工的步骤为：下料→粗磨→302# 金刚砂粗磨→303# 金刚砂粗磨→305# 金刚砂粗磨。预加工后工件的表面粗糙度 Ra 为 8～9 nm。

由于测量表面粗糙度时采样区域小，为了更准确地体现加工后工件表面的状态，在加工表面上分别选取 1、2、3 三个表面进行测量。加工后 K9 玻璃试件表面的粗糙度数值用 WYKO 测量，结果如图 2 所示。用 WYKO 扫描的加工前、后的表面形貌如图 3、4 所示，垂直于加工进给方向的剖面二维轮廓曲线如图 5 所示。

由试验结果分析可知，经过研抛后 K9 玻璃工件表面形貌得到了显著改善，粗糙度明显降低，液流悬浮研抛光学玻璃能够实现纳米量级去除加工，获得超光滑表面。

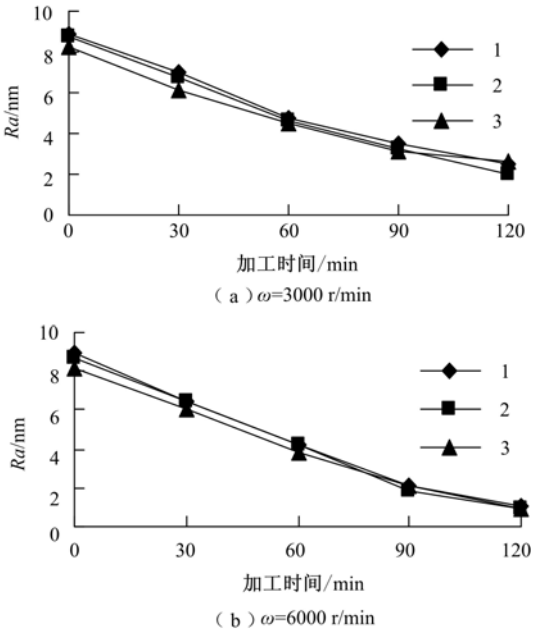

图 2　K9 光学玻璃加工结果

Fig. 2　The polishing results of optical glass K9

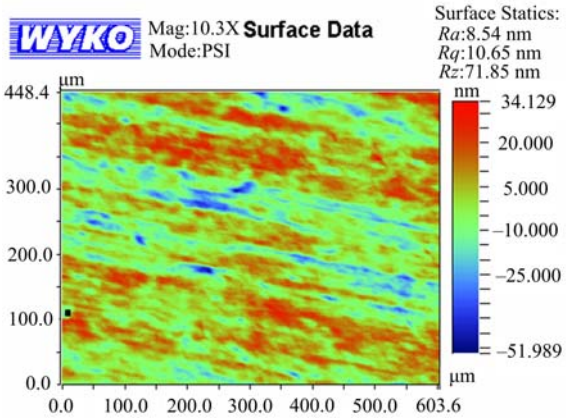

图 3　研抛前表面形貌

Fig. 3　The outline of surface before polishing

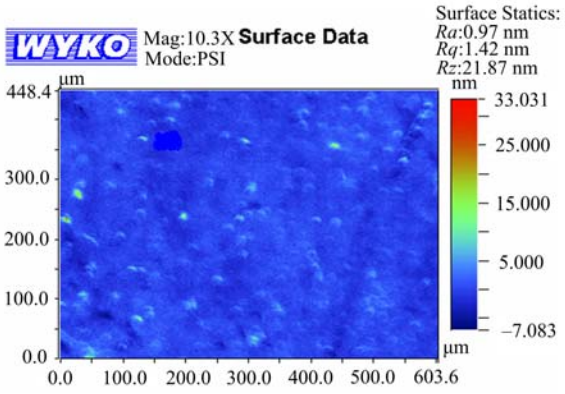

图 4 研抛后工件的形貌

Fig. 4 The outline of surface after polishing

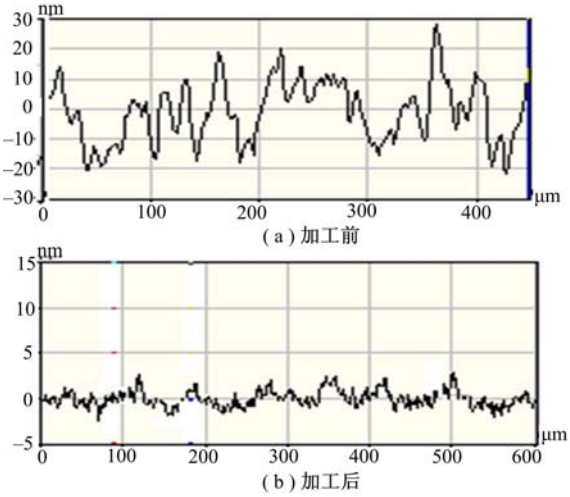

图 5 加工前后表面的二维轮廓曲线

Fig. 5 The 2-D outline before and after polishing

3 光学玻璃材料去除机理分析

液流悬浮研抛加工是通过磨粒传递能量实现的，为了去除工件表层材料，实现超光滑表面加工，磨粒就必须有足够的能量以破坏工件表面原子和亚表面原子间的结合能或结合力。研抛工具与工件处于非接触状态，磨粒并非以固结状态直接作用于工件表面，磨粒的能量是通过流动的研抛液获得的，并且随研抛液作用于工件表面。

光学玻璃属于脆性材料，若用脆性断裂方法去除工件表层材料，不可能获得超光滑表面。从冲蚀磨损的角度分析，单个磨粒冲击脆性材料产生的应力和裂纹与磨粒尺寸、冲击载荷的大小及方向、材料的抗冲击强度有关。脆性材料在大尺寸磨粒和大冲击能量的垂直冲击下，将产生环形裂纹和脆性剥落，有时一次冲击就能使材料流失；而在磨粒尺寸较小、冲击能量较小时，则存在塑性去除的可能[11]。液流悬浮加工正是用纳米磨粒以小能量冲击光学玻璃表面，不可能发生脆性剥落去除。

由于脆性材料硬度高、脆性大，其物理机械性能（尤其是韧性和强度）与金属材料有很大差异。在微量切除条件下，其切除方式既不同于一般金属的塑性剪切过程，又不同于一般高脆性材料的纯断裂过程。Geoge[12]等人用金刚石磨料对硬脆材料进行压痕试验分析了脆性材料的断裂机理。当载荷很小时，在压头侧面会出现类似于金属的隆起现象，即塑性流动。随着载荷的增大，脆性材料的塑性变形区会进一步增大。当载荷超过某一临界载荷时，压头下即有裂纹产生，临界载荷 P_c 与材料的硬度和断裂韧性等因素有关，即

$$P_c = \lambda_0 K_c \left| \frac{K_c}{H} \right|^3 \tag{1}$$

式中：K_c 为材料的断裂硬度；H 为材料的硬度；λ_0 为与材料有关的系数。

此后，Bifano[13]等建立了脆性材料脆塑转换的临界切削深度公式

$$a_c = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_{Ic}}{H} \right)^2 \tag{2}$$

式中：a_c 为脆性材料加工脆塑转变的最小深度；E 为材料的弹性模量；K_{Ic} 为材料的静态断裂韧性。

Zhang[14]认为用静态断裂韧性参数来研究动态裂纹的起始规律不合理，因此将临界切削深度公式修改为

$$a_c = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_{Id}}{H} \right)^2 \tag{3}$$

式中：K_{Id} 为材料的动态断裂韧性，K_{Id} 约为 K_{Ic} 的三分之一。

根据上述公式计算出本文所用的光学材料 K9 玻璃的临界切深 $a_c = 0.244\ \mu m$。在加工过程中，只要切深小于 244 nm 时，就能以塑性切除方式去除工件表层材料。液流悬浮加工中所用磨粒的尺寸仅为 30～40 nm，远小于临界切深，可以保证研抛加工在塑性去除范围内进行。

4 结束语

液流悬浮纳米磨料研抛加工光学玻璃的试验结果表明，该加工方法能对光学玻璃实现超光滑表面加工，而且通过对试验条件的分析证明，在液流悬浮加工中材料受到磨粒冲击和剪切作用，其去除是在塑性范围内进行的，为脆性材料加工提供了一种超光滑的表面加工方法。

参考文献：

[1] 吴敏镜. 超精密加工技术的现状和展望[J]. 航空精密制造技术，2002，38(3)：1-6.
Wu Min-jing. Status and development tendency of ultraprecision machining technique [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology，2002，38(3)：1-6.

[2] Zarudi I，Han B S. Deformation and material removal rate in polishing silicon wafers[J]. Materials Processing Technology，2003，140(9)：641-645.

[3] Umehara N，Kawauchi M. Fundamental polishing properties of frozen magnetic fluid grinding [J]. Magnetism and Magnetic Materials，1999，201(12)：364-367.

[4] Liu Y. Investigation on the final polishing slurry and technique of silicon substrate in ULSI[J]. Microelectronic Engineering，2003，66 (4)：438-444.

[5] Gharbia Y A，Katupitiya J. Loose abrasive blasting as an alternative to slurry polishing of optical fiber end faces [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture，2003，43(6)：1413-1418.

[6] Chiu Jian-bin，Yu Cheng-ching，Shen Shih-haur. Application of soft landing to the process control of chemical mechanical polishing [J]. Microelectronic Engineering，2003，65(3)：345-356.

[7] Kim Jeong-Du. Motion analysis of powder particles in EEM using cylindrical polyurethane wheel [J]. Machine Tools and Manufacture，2002，42(1)：21-28.

[8] Su Y T，Kao Y C. An experimental study on machining rate distribution of hydrodynamic polishing process[J]. Wear，1999，224：95-105.

[9] Zhou Chun-hong，Shan Lei，Robert Hight J，et al. Fluid pressure and its effects on chemical mechanical polishing[J]. Wear，2002，253：430-437.

[10] Hashino T，Kurata Y. Mechanism of polishing of SiO_2 films by CeO_2 particles [J]. Non-Crystalline Solids，2001，283：129-136.

[11] 李特卓，董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京：机械工业出版社，1987：43-85.

[12] Geoge S C. Study on critical condition of brittle material of ultra-precision grinding[C]// Salmon Stuart C. Modern Grinding Process Technology. New York：McGraw-Hill，Inc，1992：382-385.

[13] Bifano T G，Dow T G，Scattergood R O. Ductile-regime grinding：a new technology for machining brittle materials[J]. Jorunal of Eng for Industry，1991，113：184-189.

[14] Zhang Bi. Subsurface evaluation of ground ceramics [J]. Annals of the CIRP，1995，44：263-267.