

文章编号 1004-924X(2010)07-1554-08

石英玻璃的化学机械磨削加工

仇中军¹, 周立波², 房丰洲¹, 椎名刚志², 江田弘²

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 日本茨城大学工学部, 茨城 日立 316-8511)

摘要:为了实现石英玻璃基板的高效、高质量加工,进一步改善光掩模设备的性能,进行了石英玻璃化学机械磨削(CMG)加工技术的研究。通过在磨削过程中主动增强磨粒、结合剂以及磨削液与工件的化学反应,并使化学反应与机械去除作用形成动态平衡,从而消除因材料脆性去除而造成的表面损伤等,实现了大口径玻璃工件的高表面质量、高形状精度的加工。针对石英玻璃CMG加工的特点,开发了CMG专用砂轮及磨削液,利用正交实验法优化了石英玻璃CMG加工工艺参数,分析了CMG加工过程中磨削压力、砂轮转速、磨削液流量、pH值等因素对加工表面粗糙度及加工效率的影响,并利用优化后的工艺参数加工得到了 R_a 为0.795 nm的石英玻璃表面。加工后基板的光学性能和化学机械抛光(CMP)加工基板的光学性能相同,能够满足光掩模设备的性能需求。

关键词:化学机械磨削; 石英玻璃; 正交试验法

中图分类号: TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1554

Chemical mechanical grinding for quartz glass

QIU Zhong-jun¹, ZHOU Li-bo², FANG Feng-zhou¹, SHINA Tsuyoshi², EDA Hiroshi²

(*Sate Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. College of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan)

Abstract: To achieve a high-quality quartz glass substrate and to improve the performance of photo-mask equipment, a Chemical Mechanical Grinding (CMG) method for the quartz glass is developed. By actively enhancing the chemical reactions of the workpiece and the abrasive grain, bond and the grinding fluid and dynamically balancing the chemical reaction and mechanical remove, the process method can avoid the sub-surface damage caused by eliminating the brittle material to achieve high surface quality and high shape precision processing of a large-diameter glass workpiece. For the processing characteristics of CMG for the quartz glass, this paper develops the CMG-specific wheel and grinding fluid. Then it uses orthogonal experiment method to optimize the CMG process parameters for the quartz glass, and analyzes the effects of the grinding pressure, wheel speed, grinding fluid traffic, pH value and other factors on the surface roughness and processing efficiency in CMG processing. On the basis of the optimized processing parameters, it obtains the surface roughness of quartz

收稿日期: 2009-09-14; **修订日期:** 2009-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50905125); 天津市自然科学基金资助项目(No. 07JCYBJC18100); 国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA044305, No. 2009AA044204)

glass in 0.795 nm. Obtained results show that the finished substrates have the same optical performance with the substrates processed by Chemical Mechanical Polishing(CMP), and the performance can meet the needs of photomask equipment.

Key words: grinding; CMG process; quartz glass; orthogonal experimental method

1 引言

近年来,随着高集成度半导体工艺技术的发展,其尖端工艺用光掩模技术的需求也越来越迫切,早日开发能够适应目前芯片制造要求的光掩模技术及装备也已经成为摆在研究者面前的紧迫课题。由于光掩模所用的石英玻璃基板的加工质量直接决定着掩模设备的加工能力和性能,因此,光掩模用玻璃基板的加工在下一代光掩模技术中有着至关重要的作用^[1]。

目前,光掩模用玻璃基板的加工主要是采用化学机械抛光(Chemical-Mechanical-Polishing, CMP)方法。CMP采用游离磨粒和研磨盘通过化学和机械复合的去除方式,能够获得具有无变质层、低表面粗糙度的表面,很好地满足了光掩模设备对玻璃基板加工质量的要求。但是由于游离磨粒加工无法稳定实现形状精度的精密控制,在加工大口径工件时很难获得高的形状精度(如平坦度等);另外,CMP需要多个预备加工阶段,造成了加工成本偏高,而且使用过的研磨剂的废弃也会对环境造成影响^[2]。和CMP等游离磨粒方式相比,采用砂轮等固定磨粒加工的方式由于磨粒被结合剂所固定,工件的形状精度可以通过加工设备的精度进行控制,加工大口径工件时更容易获得高的形状精度^[3]。但是和CMP相比,传统的固定磨粒磨削方式的材料去除是单一的机械去除,故存在着表面粗糙度差,易产生加工变质层等缺点,容易造成玻璃基板透光性、折射率等光学性能变差,影响掩模质量^[4]。

本研究结合传统磨削方式和CMP的优点,提出了化学机械磨削(Chemical Mechanical Grinding, CMG)的加工方法。在磨削过程中主动增强化学反应(磨粒与工件、结合剂与工件、磨削液与工件等),并使其与材料的机械去除达到动态平衡,消除因脆性去除而造成的表面损伤等,从而实现了大口径工件的高表面质量、高形状精度的加工。本论文将CMG应用于光掩模用石英玻

璃的加工,讨论了磨削压力、磨削速度等因素对磨削质量的影响,并进行了加工工艺参数的优化,实现了光掩模用玻璃基板的高品质加工。

2 石英玻璃CMG加工机理

石英玻璃加工过程中的材料去除机理十分复杂,其本质可以被认为是机械磨削去除,化学作用和热的表面流动3种过程综合作用的结果:(1)机械磨削去除是通过坚硬的磨料颗粒对玻璃表面进行微小切削作用,在磨削过程中如果能够控制磨粒的切削深度在一个很小的值,对于石英玻璃等硬脆材料也会实现塑性去除,从而实现高质量的光学表面;(2)石英玻璃磨削过程中的化学作用是指玻璃表层在磨粒、结合剂和水的作用下发生的错综复杂的化学过程,主要是由于玻璃表面的水解,大量 SiO_2 转入磨削液中。同时不同的结合剂材料、磨粒也可以和玻璃表面发生化学反应,增强玻璃的去除效果;(3)表面流动作用是指在玻璃加工时由于摩擦热使玻璃表面产生塑性变形和流动,或者是热软化以至熔融而产生流动,凸起的地方将凹陷填平,在这种作用下有利于实现玻璃表面分子重新分布而形成平整表面。

从微观角度来说,在石英玻璃加工过程中,为了实现石英玻璃的材料去除,至少需要对材料施加能够破坏Si-O结合势能的能量。而结合势能的大小宏观上受到温度、化学平衡温度以及反应速度等的影响,因此如果能够将适当的主动化学反应引入到传统的磨削过程中,弱化石英玻璃材料分子的结合势能,就能够实现以很小的去除力打破分子结合,实现无损伤石英玻璃表面加工^[5]。

因此,CMG磨削过程中,通过在磨削液、砂轮结合剂中添加适当的化学成分和选择磨粒种类,促进砂轮、磨削液与玻璃表面的硅酸盐发生化学反应,在玻璃表面形成硅酸凝胶薄膜,会减缓了化学作用的进一步进行。但是由于硅胶层往往是多孔的或因龟裂而产生裂纹,于是溶液中的碱性离子 OH^- 会进一步侵蚀玻璃的网络内体,使玻璃

主体遭到破坏,同时抛光颗粒不断地刮除、吸附胶态硅酸保护层,露出的玻璃表面又不断地发生化学反应,如此循环往复,构成了材料的去除过程^[6-7]。

3 石英玻璃 CMG 加工专用装置

从石英玻璃 CMG 加工的原理可知,在加工过程中,能够发生化学反应的过程主要集中在以下几方面:工件与磨削液;工件与结合剂;工件与磨粒。因此,基于以上 CMG 加工机理,本研究开发了一种能够适用于石英玻璃加工的 CMG 专用砂轮。由于氧化铈具有比较理想的晶格类型(面心立方体),较大的比表面等优点,磨粒选用粒度为 $2.3\ \mu\text{m}$ 的氧化铈(CeO_2)。该磨粒不仅能够和玻璃发生适当的化学反应,同时对 Si-O 键具有很好的切断作用,并且易于从加工表面脱离开,不会对工件表面造成损伤和污染^[8]。采用添加了柠檬酸或者 Na_2CO_3 的树脂作为结合剂。开发的砂轮的外观如图 1 所示。

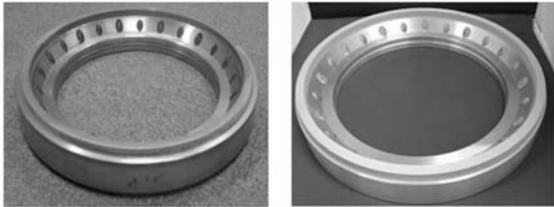


图 1 CMG 专用砂轮
Fig. 1 CMG special wheel

由于石英玻璃 CMG 过程是机械去除和化学等共同作用的结果,从促进磨料、结合剂和工件的化学作用效果考虑,开发的 CMG 砂轮的结合剂选用环氧树脂,磨料选用氧化铈。同时由于磨削过程中,砂轮的磨削能力是由砂轮与工件接触面上存在的磨粒数及其状态决定的,因此砂轮的组织(磨料、结合剂、气孔三者间的体积比)对磨削性能有着很大影响。为了确定石英玻璃 CMG 加工过程中砂轮组织对磨削性能的影响,本实验进行了不同 CMG 砂轮组织的磨削性能实验。

一般来说,砂轮按照组织的不同可以有无气孔低磨粒率、无气孔高磨粒率、有气孔高磨粒率、有气孔低磨粒率等规格。理论上无气孔低磨粒率砂轮不利于磨削过程中磨屑的排出、吸附和化学

过程的进行,容易造成磨削表面质量的恶化,因此在本实验中只是试制了其他 3 种砂轮进行石英玻璃的磨削实验。

利用 3 种砂轮在图 2 所示的能够实现等压控制的立式磨床上分别对石英玻璃进行 CMG 加工。加工条件如表 1 所示。

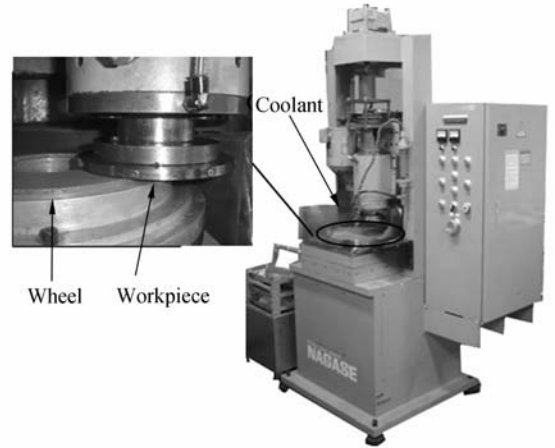


图 2 CMG 加工用立式磨床

Fig. 2 Vertical grinder for CMG processing

表 1 CMG 加工条件

Tab. 1 Processing conditions for CMG

加工条件	
CMG 专用砂轮	无气孔高磨粒率(磨粒 65%)
	有气孔高磨粒率(气孔 15%,磨粒 65%)
	有气孔低磨粒率(气孔 33%,磨粒 25%)
磨粒	氧化铈
工件	石英玻璃(6")
砂轮转速	100 r/min
工件转速	50 r/min
进给速度	定压控制(0.08~0.15 MPa)
磨削方式	干式(无磨削液)

实验过程中通过观察石英玻璃的表面发现,有气孔高磨粒率的砂轮在相同的工艺条件下,磨削表面很快就发生了烧伤现象,如图 3 所示。这主要是由于砂轮气孔和磨粒在砂轮组织中所占比例高于 80%,造成砂轮结合剂的比例比较低,影响了结合剂和石英玻璃间的化学反应速度,在干式磨削(无磨削液)方式下,使材料的去除更多地依靠磨粒的机械去除,因此更容易造成工件的表面烧伤。切削过程表面烧伤会对玻璃的后续加工及光学性能产生严重的影响,所以有气孔高磨粒率的砂轮不符合石英玻璃的 CMG 加工。分别使

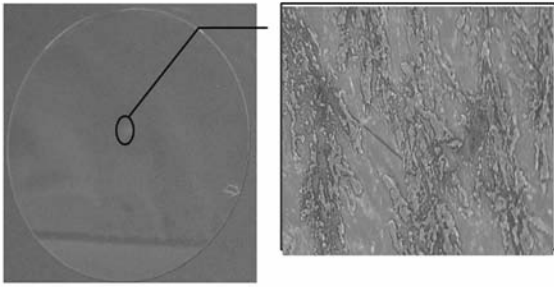


图3 石英玻璃的表面烧伤微观状态

Fig. 3 Microstate of grinding burn for quartz glass

用余下的两种类型砂轮对石英玻璃进行 CMG 加工。为了便于比较,选取初始粗糙度、表面状态大致相同的工件进行磨削。在相同加工工艺条件下,两种类型砂轮的加工表面都没有出现烧伤现象,并且获得了很好的表面粗糙度。其磨削结果如图 4 所示。

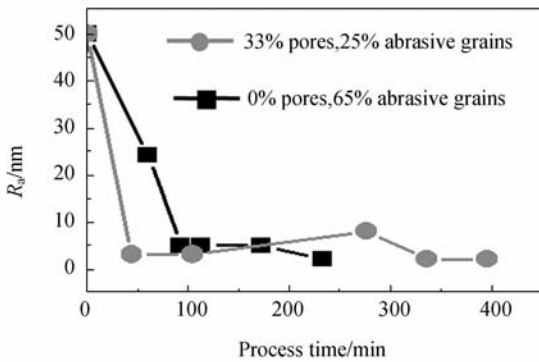


图4 CMG 砂轮类型对磨削效果的影响

Fig. 4 Grinding results of different CMG wheels

从图中可以看出,和无气孔高磨粒率的砂轮相比,完成相同表面粗糙度表面的加工,有气孔低磨粒率砂轮的时间更短,更有效率。这主要是由于有气孔低磨粒率的气孔比较多(33%),容屑空间大,排屑比较方便,因此可减少磨削过程中的堵塞,而且比较多的气孔还可以将空气或者磨削液带入到磨削区域,一定程度地降低了磨削点的温度,也为获得好的磨削表面质量创造了条件。因此,有气孔低磨粒率砂轮更加适合于石英玻璃 CMG 加工。本实验中确定有气孔低磨粒率的砂轮作为石英玻璃的 CMG 加工工具。

磨削液也会对加工效率和加工表面质量产生很大的影响。石英玻璃的加工过程中,水分子会起到亲电和亲核 2 种侵蚀剂的作用,减弱 Si-O 结

合强度,使玻璃结构不断被破坏, SiO₂ 也逐渐溶于水或者以硅酸胶体的形式吸附在玻璃表面上,因此磨粒很容易将其从玻璃表面去除。和其它介质比较,水还具有良好的冷却和洗涤润滑的作用,而且由于石英玻璃的水解作用会使玻璃中的碱金属离子和碱土金属离子不断析出,溶入水中从而造成磨削液的 pH 值升高。如何控制磨削液的 pH 值,并使其在整个抛光过程中保持在适当范围内,是否能获得高质量石英玻璃加工表面质量的关键之一^[9]。本研究在水基磨削液中添加防锈剂、油性剂、防霉剂、抗泡剂等的基础上,用加入两性化合物的方法来稳定磨削液的 pH 值,保证加工后表面不会被过度侵蚀。图 5 所示为采用开发的 CMG 专用磨削液进行湿式磨削和无磨削液的干式磨削的结果。从图中可以看出,实现相同的表面粗糙度,湿式磨削所需要的加工时间仅为干式磨削的 1/3 左右,而且所能够达到的最终表面粗糙度也要小于无磨削液的干式磨削。

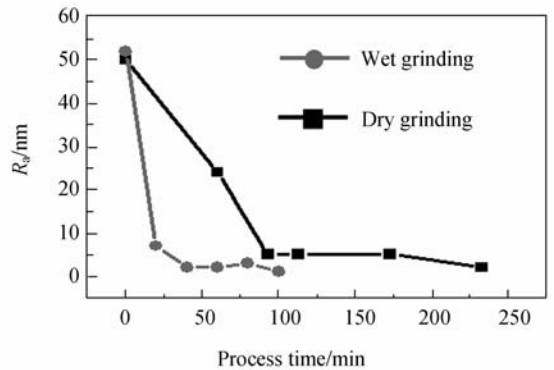


图5 CMG 磨削液对磨削效果的影响

Fig. 5 Grinding results of different CMG fluids

利用开发的专用砂轮及磨削液,进行了石英玻璃 CMG 加工的实验。

4 石英玻璃 CMG 加工实验及结果分析

4.1 石英玻璃 CMG 加工实验及工艺参数优化

石英玻璃 CMG 加工效果受到多种因素及其耦合作用的影响,对于这些参数很难定量地去分析,只能通过实验进行定性分析。磨削过程中由于影响磨削效果的因素比较多,如果一一进行单因素实验,需要进行大量的实验,还要有足够的时

间和成本。为了通过有限的实验,高效、准确地进行各因素对磨削效果的定性定量分析,优化加工工艺,本实验采用了正交试验设计的方法,希望利用该方法合理地安排实验,从大量的实验数据中挑选适量的、有代表性的点来确定石英玻璃 CMG 加工的最佳工艺参数组合,从而实现最佳的磨削效果。

根据立式磨床进行定压 CMG 加工的特点,从机械去除和化学作用两个方面确定影响磨削效果的有磨削压力、砂轮的转速、磨削液的 pH 值、磨削液的流量等 4 个因素。本文通过预备实验分

别确定了每组因素的范围,并在范围内取 3 个数值(水平)。磨削效果的表征则采用磨削效率(材料去除效率)和表面粗糙度 R_a 。实验按照 4 因素 3 水平($L_9(3^4)$)正交表进行设计,实验方案如表 2 所示。

按照表中各号实验方案分别进行实验。实验中材料的去除率利用电子天平(新光电子 SH-200)测出加工前后的质量差,然后通过密度换算得到去除效率的结果。表面粗糙度采用 ZYGO New View 200 白光干涉仪进行测量,得到的测量结果见表 2。

表 2 实验方案及最终结果

Tab. 1 Programs and results of orthogonal experiment

实验方案				实验结果				
A	B	C	D	Y_{i_1}	Y_{i_2}	综合评分		
压力	砂轮转速	pH	(流速)	磨削效率($\times 10^{-3}$ mm/min)	表面粗糙度	$Y_i/\%$		
1	2	3	4		R_a/nm			
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	5.729	0.900	-107.6	
2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂	2.74	0.887	-116.9	
3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃	12.453	0.900	-82.7	
4	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	2.491	1.070	-144.0	
5	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁	6.227	1.107	-135.4	
6	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂	14.944	0.961	-81.2	
7	A ₃	B ₁	C ₃	D ₂	4.732	0.967	-120.9	
8	A ₃	B ₂	C ₁	D ₃	1.494	0.901	-123.5	
9	A ₃	B ₃	C ₂	D ₁	4.234	0.758	-92.9	
K_1	-307.2	-372.6	-313.3	-335.9	$Y_i = b_{i_1} Y_{i_1} + b_{i_2} Y_{i_2}$			
K_2	-361.6	-375.9	-353.8	-319.9	$b_{i_1} = \frac{50}{h_1} = \frac{50}{13.45} = 3.717$ (越大愈好,设为正值);			
K_3	-337.3	-257.6	-339.0	-350.2	$b_{i_2} = -\frac{50}{h_2} = -\frac{50}{0.349} = -143.266$ (越小越好,设为负值);			
$\overline{K_1}$	-102.4	-124.2	-104.4	-111.9	$K_i(M_j) = \sum_{i=1}^{i=3} Y(M_j), M = A, B, C, D$			
$\overline{K_2}$	-120.5	-125.3	-117.9	-106.7				
$\overline{K_3}$	-112.4	-85.9	-113.0	-116.7				
R	18.2	39.4	13.5	10.1	$\overline{K}_i = \frac{K_i}{3}, R = K_{\max} - K_{\min}$.			

实验中,各成分分别为: $A_{1,2,3} = 24$ kPa, 12 kPa, 2.4 kPa;

$B_{1,2,3} = 900$ r/min, 600 r/min, 300 r/min;

$C_{1,2,3} = 8.5, 7.5, 5.5$;

$D_{1,2,3} = 1.2$ l/min, 6 l/min, 12 l/min。

由于本试验需考察两个指标(磨削效率、表面粗糙度),而且对于石英玻璃 CMG 加工过程来说,这 2 个指标之间是相互矛盾的,也就是说加工过程希望加工效率即材料的去除效率愈大愈好,而表面粗糙度却是希望其愈小愈好。为兼顾这个

两个指标,需找出使每个指标都尽可能好的最佳工艺条件,因此在数据处理时应用到了加权综合评分法。加权综合评分值 Y_i 的计算公式如式 1 所示:

$$Y_i = b_{i_1} Y_{i_1} + b_{i_2} Y_{i_2} + \dots + b_{i_j} Y_{i_j}, \quad (1)$$

式中, b_{ij} 为权因子系数, 表示各项指标在综合加权评分中应占的权重; Y_{ij} 为考察指标; i 为第 i 号试验; j 为第 j 号考察指标。

对于本试验来说, $i=1, 2, \dots, 9, j=1, 2$, 由于在本试验中的 2 个指标的变化趋势相反, 因此 b_{i1} 和 b_{i2} 的符号相反。这里设 b_{i1} 的符号为正, b_{i2} 的符号则为负。由于材料去除效率和表面粗糙度对于石英玻璃 CMG 加工同等重要, 因此假设两个指标对最终磨削效果的影响是同等重要的, 各占 50 分(或者是 50%), 权重分值在后面的计算时还可以作适当地调整。

计算材料去除效率和表面粗糙度的变化范围即最大值与最小值之差 h :

材料去除效率: $h=14.944-1.494=13.45$

表面粗糙度: $h=1.107-0.758=0.349$

利用式(2)计算权因子系数 b_{ij} :

$$b_{ij} = \frac{\text{权重分值}}{h} \quad (2)$$

利用式(1)、(2)分别计算的权因子系数和加权综合评分值见表 2。

4.2 试验结果分析

对表 2 中的实验数据及其处理结果进行分析, 直接从表中各组方案的实验结果来看, 第 6 组实验方案的综合评分为 81.2 是最高的, 所以在进行过的所有实验方案中最优的参数组合应该是 $A_2B_3C_1D_2$ 。从极差 R_a 的大小可以看出各因素中对综合结果影响最大的是 B(砂轮的转速), 其次是 A(磨削压力), C(磨削液 pH 值), D(磨削液流量)。而从各单项因素的综合评分平均值可以得到最优的加工工艺参数组合: A_1 (磨削压力 24 kPa), B_3 (砂轮转速 300 r/min), C_1 (磨削液 pH 值 8.5), D_2 (磨削液流量 6 l/min)。

获得的最佳工艺参数组合可以从石英玻璃 CMG 加工原理进行解释。CMG 加工过程包括机械去除和化学反应, 从机械角度讲在允许的范围内, 压力越大, 磨粒对石英玻璃表面及因化学反应生成的凝胶薄膜的刮除作用越大; 同样砂轮的转速越高, 单位时间内磨粒对石英玻璃表面的刮除作用次数越多^[10], 但是, 由此单位时间由砂轮带入磨削区的冷却液也会增加, 从而会使磨削区的温度降低, 减弱化学反应的速度, 而仅靠机械去

除作用很难获得高的磨削效率和好的表面质量; 磨削液的 pH 越大, 磨削液中的 OH⁻ 含量越多, 因此对玻璃的网状内体侵蚀就会越快, 使玻璃分子间的结合势能弱化, 促进玻璃表面的材料去除。磨削液的作用主要有两个, 一方面是冷却作用, 避免磨削区温度过高造成玻璃烧伤, 影响石英玻璃表面质量和光学性能, 从这个角度讲冷却液的流量越大越有利于抑制温度的升高; 另一方面, 磨削液的流量越大, 带入磨削区的 OH⁻ 也就越多, 也就越有利于弱化石英玻璃化学分子间的结合势能。因此从理论上讲, 在石英玻璃的 CMG 加工过程中, 磨削液的流量越大会越有利于磨削效率和表面质量的提高, 但是由于化学反应的进程也会受到温度的影响, 温度过低会抑制化学反应发生, 因此磨削过程中, 需要适当地供给磨削液, 既保证玻璃表面不会因为温度过高被烧伤, 也要防止磨削区的温度过低抑制了化学反应的进行。

利用最佳工艺参数进行石英玻璃 CMG 加工, 得到表面测量结果如图 6 所示。从加工工件中任取一个进行测试, 并和 CMP 加工基板进行比较, 结果如图 7 所示。从图中可看出, CMG 加工后工件的表面粗糙度 $R_a \leq 1$ nm, 同时其光学性能(透过率 $\geq 93\%$, 反射率 $\leq 7\%$)和 CMP 加工工件测量结果基本相同。这说明 CMG 加工方法在保证表面粗糙度的同时, 对工件亚表面的损伤也很小, 能够满足光掩模设备对基板光学性能的要求^[11]。

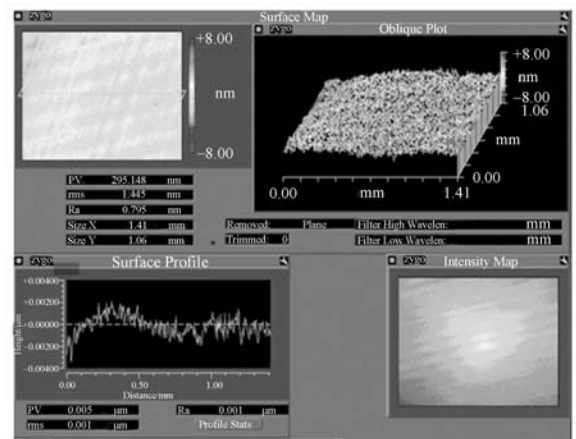


图 6 CMG 加工结果($R_a=0.795$ nm)

Fig. 6 Result of CMG processing

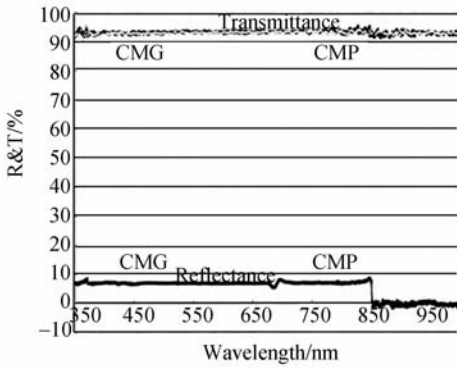


图 7 加工基板光学性能测试

Fig. 7 Optical performance of quartz glass substrate (by CMP and CMG)

5 结 论

本研究进行了石英玻璃 CMG 加工方法的研究。通过在磨削过程中主动增强化学反应,弱化

石英玻璃的结合势能,消除因脆性去除而造成的表面损伤,实现了大口径工件的高表面质量、高形状精度的加工。根据 CMG 加工的原理,开发了专用砂轮(气孔 33;磨粒 25)及水基磨削液,对影响加工效率及加工质量的工艺参数进行了研究,阐明了在 CMG 加工过程中对加工效率和加工质量产生影响的因素,顺序分别是:砂轮转速>磨削压力>磨削液 pH 值>磨削液流量。基于正交实验法进行了 CMG 加工工艺参数优化实验,利用优化后的工艺参数进行大口径石英玻璃的 CMG 加工,获得了等同于 CMP 加工表面粗糙度 R_a 为 0.795 nm,光学透过率 $\geq 93\%$,反射率 $\leq 7\%$ 的加工表面。加工结果表明,CMG 加工的石英玻璃基板在表面质量和光学性能上基本能够满足光掩模设备的性能需求。

致谢:本文为作者在日本茨城大学工作期间完成企业合作项目内容,研究中江田研究室提供了实验场地、设备和指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] ZHOU L B, SHINA T, QIU ZH J. Research on chemo-mechanical grinding of large size quartz glass substrate [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33: 499-504.
- [2] 张银霞, 邰伟, 康仁科. 单晶硅片磨削的表面相变 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8):1440-1445.
ZHANG Y X, GAO W, KAN G R K. Phase transformations of grinding monocrystalline silicon wafer surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1440-1445. (in Chinese)
- [3] BRINKSMIEIER E, HEINZEL C, WITTMANN M. Friction, cooling and lubrication in grinding [J]. *CIRP Annals*, 1999, 48:581-598.
- [4] VENKATESH V C, LZMAN S. Development of a novel binderless diamond grinding wheel for machining IC chips for failure analysis [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 185:31-37.
- [5] 周立波, 河合真二, 本田将之. Si ウエハの Chemo-Mechanical-Grinding(CMG)に関する研究 [J]. *精密工学会誌*, 2002, 68(12):1559-1563.
- [6] ZHOU L B, HONDA K S. Masayuki research on chemo-mechanical-grinding (CMG) of Si wafer [J]. *Journal of JSPE*, 2002, 68(12):1559-1563. (in Japanese)
- [7] SINHOFF V. Generative precision grinding of optical glass [J]. *Annals of the CIRP*, 1998, 47:253-258.
- [8] SURATWALA T, WONG L, MILLER P. Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352:5601-5617.
- [9] HUANG H, WANG B L, WANG Y. Characteristics of silicon substrates fabricated using nanogrinding and chemo mechanical grinding [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 479:373-379.
- [10] 王慧军, 张飞虎, 赵航, 等. 超声波磁流变复合抛光中几种工艺参数对材料去除率的影响 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10):1583-1588.
- [11] WANG H J, ZHANG F H, ZHAO H, et al.. Effect of several processing parameters on material removal ratio in ultrasonic-magnetorheological compound finishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1583-1588. (in Chinese)

- [10] 谢晋, 阮兆武. 光学自由曲面反射镜模芯的镜面成型磨削[J]. 光学精密工程, 2007, 17(3): 344-349.
- XIE J, RUAN ZH W. Mirror form grinding of free-form surface of reflector mould core [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 17(3): 344-349. (in Chinese)

- [11] 孟庆华, 向阳. 高精度测量光学玻璃折射率的新方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2114-2119.
- MENG Q H, XIANG Y. Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2114-2119. (in Chinese)

作者简介:



仇中军(1974—),男,吉林长春人,副教授,2003年于哈尔滨工业大学获得工学博士学位,主要从事超精密加工、微纳制造技术方面的研究。E-mail: qiuzhongjun@gmail.com.



周立波(1963—),男,浙江杭州人,教授,主要从事超精密磨削及设备的研究。E-mail: lbzhou@mx.ibaraki.ac.jp

房丰洲(1963—),男,黑龙江鹤岗人,教授,主要从事超精密制造、微纳加工技术的研究。E-mail: fzfang@gamil.com

椎名刚志(1983—),男,日本栃木县人,硕士研究生,主要从事光学零件的无损伤加工研究。E-mail: shiina@hcs.ibaraki.ac.jp

江田弘(1942—),男,日本茨城县人,教授,从事超光滑表面加工技术及装备开发的研究。E-mail: eda@mx.ibaraki.ac.jp

● 下期预告

单探测器偏振相干层析信号傅立叶变换分析

陈晓冬,汪毅,李海峰,李乔,郁道银

(天津大学教育部光电信息与技术重点实验室,天津 300072)

研究了生物组织的双折射率、质地密度及层次结构等不同特性对单探测器偏振相干层析(PS-OCT)信号傅立叶频谱的影响。探讨单探测器偏振OCT的成像理论,建立多层组织模型,模拟以该模型为样品的单探测器偏振OCT信号,分析了不同模型参数对信号傅立叶频谱的影响。实验以牛软骨、新鲜及干牛腱为样品,利用单探测器偏振OCT系统对它们进行A型扫描,再对获得的数据进行傅立叶变换。从获得的傅立叶频谱中观察到,随着样品双折射率、背散射率、结构层次等特性不同,频谱中的谱峰形状及其所对应的频率也发生了变化。研究证实了单探测器偏振OCT系统检测多种生物组织特性的能力。