

磷酸盐激光玻璃与光学沥青抛光胶的摩擦特性

单海洋^{1,2} 徐学科¹ 贺洪波¹ 张宝安¹ 易葵¹ 邵建达¹ 范正修¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 强激光材料重点实验室, 上海 201800)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 摩擦系数是表征光学玻璃抛光特性的重要参量, 平均摩擦系数决定了抛光速率, 摩擦系数的变化范围影响光学玻璃的面形精度和表面粗糙度。通过正交实验, 研究了抛光过程中实验因素对磷酸盐激光玻璃和光学沥青抛光胶之间摩擦特性的影响。极差分析结果表明, 实验因素对平均摩擦系数大小和摩擦系数变化范围影响的显著程度相同。其中, 加载压力影响较大, 而沥青抛光胶胶号影响较小。在本实验中高的平均摩擦系数对应着大的摩擦系数变化范围。另外, 从粘-滑摩擦、粘附、磨料磨削和抛光液液膜方面进行了分析, 对引起摩擦系数随时间变化的诱因进行了探讨。

关键词 材料; 磷酸盐激光玻璃; 光学沥青抛光胶; 摩擦系数; 玻璃抛光; 粘-滑摩擦

中图分类号 TG356.28 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0406001

Friction Properties Between Phosphate Laser Glass and Optical Polishing Pitch

Shan Haiyang^{1,2} Xu Xueke¹ He Hongbo¹ Zhang Baoan¹ Yi Kui¹

Shao Jianda¹ Fan Zhengxiu¹

(¹Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The coefficient of friction is an important parameter for the characterization of optical glass polishing properties. The average coefficient of friction determines the polishing rate, and its variation range affects the surface accuracy and surface roughness of optical glass. In this work, the orthogonal experiments are designed to study the influence of the experimental parameters on the friction properties between phosphate laser glass and optical polishing pitch in the polishing process. The degree that experimental parameters influence the average value and variation range of coefficient of friction is similar. The influence of the applied load is larger while that of polishing pitch type is smaller. A large average frictions coefficient corresponds to a large variation range of frictions coefficient in the experiment. Furthermore, the reasons for the change of frictions coefficient with time are discussed from the aspects of stick-slip friction, adhesion, abrasive grinding and polishing liquid thickness.

Key words materials; phosphate laser glass; optical polishing pitch; coefficient of friction; glass polishing; adhesive-slip friction

OCIS codes 160.3380; 140.3390; 240.5450

1 引言

激光玻璃作为增益介质被广泛应用于各类高功

率和大能量激光装置中^[1~4]。为了减小激光传输中的能量损耗和激光损伤, 要求磷酸盐激光玻璃有非

收稿日期: 2012-11-26; **收到修改稿日期**: 2012-12-11

作者简介: 单海洋(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事掺铈磷酸盐激光玻璃抛光工艺方面的研究。

E-mail: hyshan2011@siom.ac.cn

导师简介: 贺洪波(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学材料制备工艺、材料测试技术等方面的研究。

E-mail: hbhe@siom.ac.cn(通信联系人)

常高的表面抛光质量^[5,6]。抛光是大口径激光玻璃加工工序中的核心工艺,也是耗时最长的一道工序^[7]。目前国内对磷酸盐激光玻璃的抛光,仍然采用传统环形抛光方式和氧化铈抛光液进行抛光,玻璃抛光效率不高和表面质量不稳定是其主要问题。

为了提高和改善玻璃的抛光工艺,有必要对影响玻璃抛光的因素进行分析研究。摩擦系数作为表征摩擦特性的一个重要参量,影响光学玻璃抛光特性。其中,平均摩擦系数决定了抛光速率,摩擦系数的变化范围影响着光学玻璃的面形精度和表面粗糙度。许多研究者已经从磨削量、抛光机制和机床参数等方面^[8,9]对玻璃抛光过程进行过研究,但是对于抛光过程中各因素对物理摩擦的影响情况,特别是磷酸盐激光玻璃与光学沥青抛光胶的摩擦系数测量,目前还没有太多报道。本文通过正交实验对磷酸盐激光玻璃与沥青抛光胶在抛光过程中摩擦系数的变化进行了系列研究。

2 实验方案

摩擦特性测试实验在美国中心精仪(CETR)公司生产的 UMT-3 万能摩擦磨损试验机上进行。测试原理与方法是参照美国材料试验学会(ASTM)制定的 D3702-94 标准,其中摩擦系数 f 由如下公式得到:

$$f = T/rW, \quad (1)$$

式中 f, T, r, W 分别代表摩擦系数,测试样品扭矩,测试样品半径和正压力。

摩擦特性测试实验采用盘盘摩擦模式,上盘试样为上海光学精密机械研究所生产的 N31 型掺钕磷酸盐激光玻璃,尺寸大小为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,实验玻璃基片前期经过抛光处理。下盘试样为该所配制的沥青抛光胶盘,尺寸大小为 $\Phi 70 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。

实验设定 4 个影响因素,分别为抛光胶胶号、抛光胶胶盘开槽方式、转动速度及加载压力,各因素分别取三种水平(见表 1)。胶盘开槽方式中方形槽为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,放射形槽之间夹角为 45° ,两种槽都为倒三棱锥形,顶面槽宽 2 mm ,槽深 1 mm 。通过正交实验法设计实验。测量时环境室温控制在 $22 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度控制在 45% 。每次实验前抛光胶胶盘和玻璃之间经过压平处理,在测试仪器圆形槽模具内加有质量分数为 7% 呈悬浮态的氧化铈抛光液(D50 为 $0.4 \text{ }\mu\text{m}$),浸没模具内的沥青胶盘。实验测试时先经过 30 min 的仪器自动转动磨合处理,然后

开始记录测试数据。

表 1 实验因素的设置

Table 1 Configuration of experimental parameters

Level	Polishing pitch type	Groove mode	Rotation speed / (r/min)	Applied load / N
1	2#	no	10	5
2	3, 5#	rectangular	20	10
3	5#	radial	40	20

3 结果与分析

3.1 正交摩擦实验测试结果

通过正交实验法设计实验,利用 CETR UMT-3 万能摩擦磨损试验机测得 9 组实验的摩擦系数随时间(0~3600 s)的变化(系统每 0.3333 s 采集一次数据),测试结果见图 1。从图 1 中可以看出,9 组实验测得的摩擦系数在测试时间内都发生不同程度的起伏变化。起伏变化量被定义为摩擦系数(COF)变化范围,其中曲线(1)、(2)摩擦系数变化范围最小,曲线(5)、(6)、(8)、(9)次之,曲线(3)、(4)、(7)最大。9 组实验的实验条件正交表、平均摩擦系数和摩擦系数变化范围值列于表 2 中。在存在氧化铈抛光液(D50 为 $0.4 \text{ }\mu\text{m}$)的条件下,实验磷酸盐激光玻璃与沥青抛光胶之间的平均摩擦系数(av. COF)为 $3.141 \sim 5.110$ 。

3.2 正交摩擦实验极差分析

对摩擦实验测试结果进行的极差统计分析见表 2,其中, K 为各因素出现次数所得结果之和,下标表示出现次数; k 为相应的平均值;极差 R 为 k 的极大值和极小值之差,表示各因素的显著程度,即 R 越大,对应的因素影响越大。通过极差 R 表征各实验因素对平均摩擦系数和摩擦系数变化范围的显著程度。从表 3 平均摩擦系数极差 R 数值大小比较,发现加载压力对平均摩擦系数的影响最大,其次是抛光胶胶盘开槽方式,然后是转动速度,而抛光胶胶号对平均摩擦系数的影响最小。同理,比较摩擦系数变化范围极差 R , 得到与平均摩擦系数影响情况一样,实验因素中加载压力对摩擦系数变化范围的影响最大,其次是抛光胶胶盘开槽方式,然后是转动速度,最后是抛光胶胶号。比较实验中平均摩擦系数和摩擦系数变化范围数值大小,发现平均摩擦系数正比于摩擦系数变化范围,即大的平均摩擦系数对应着大的摩擦系数变化范围,反之亦然。

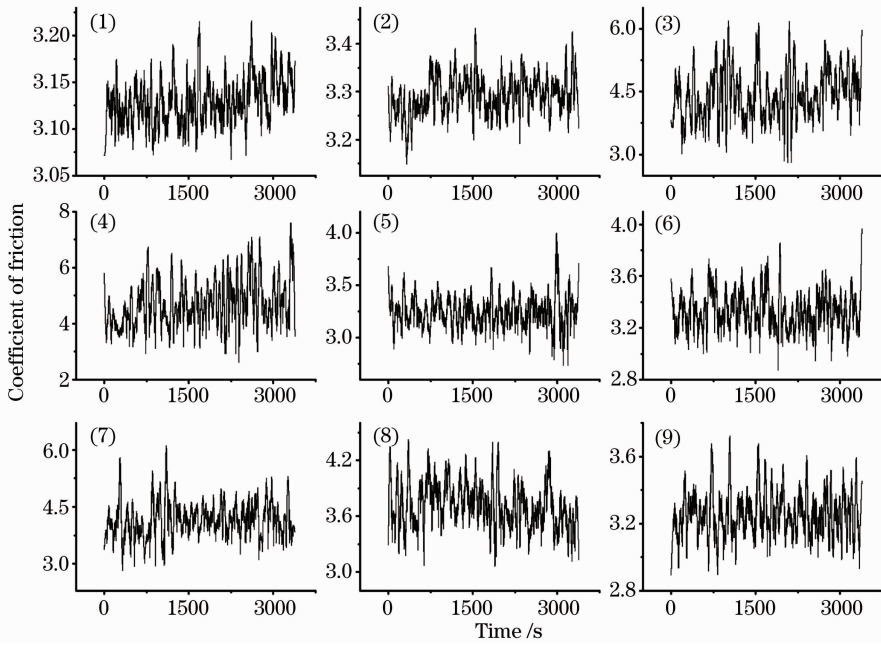


图 1 9 组实验的摩擦系数随时间的变化情况

Fig. 1 Changes of the frictional coefficients with time for 9 groups of experiments

表 2 实验参数的极差分析

Table 2 Range analysis for experimental parameters

Number	Polishing pitch type	Groove mode	Rotation speed	Applied load	av. COF	COF variation range
1	1	1	1	1	3.141	0.147
2	1	2	2	2	3.292	0.281
3	1	3	3	3	4.495	3.368
4	2	1	2	3	5.110	4.943
5	2	2	3	1	3.364	1.255
6	2	3	1	2	3.422	1.088
7	3	1	3	2	4.469	3.274
8	3	2	1	3	3.748	1.352
9	3	3	2	1	3.309	0.821

表 3 实验参数的极差分析

Table 3 Range analysis for experimental parameters

Property parameters	Experimental parameters	Polishing pitch type	Groove mode	Rotation speed	Applied load
av. COF	K_1	10.928	12.720	10.311	9.814
	K_2	11.896	10.404	11.711	11.183
	K_3	11.526	11.226	12.328	13.353
	k_1	3.643	4.240	3.437	3.271
	k_2	3.965	3.468	3.904	3.728
	k_3	3.842	3.742	4.109	4.451
	R	0.322	0.772	0.672	1.180
COF variation range	K_1	3.796	8.364	2.587	2.223
	K_2	7.286	2.888	6.045	4.643
	K_3	5.447	5.277	7.897	9.663
	k_1	1.265	2.788	0.862	0.741
	k_2	2.429	0.963	2.015	1.548
	k_3	1.816	1.759	2.632	3.221
	R	1.164	1.825	1.770	2.480

3.3 实验因素对平均摩擦系数的影响

根据正交摩擦实验测试结果的极差统计分析,对实验因素对平均摩擦系数的影响规律作图。图 2(a)、(b)、(c)、(d)分别给出抛光胶胶号、抛光胶胶盘开槽方式、转动速度及加载压力 4 个实验因素与平均摩擦系数的变化曲线。从图 2(a)可以看出组分比例含量不同的三种抛光胶 2[#]、3.5[#] 和 5[#] 与激光钕玻璃之间的平均摩擦系数分别为 3.643、3.965 和 3.842,3.5[#] 抛光胶与激光钕玻璃之间的平均摩擦系数最大,5[#] 次之,2[#] 最小。图 2(b)中抛光胶不开槽、方形槽和放射形槽三种开槽方式与钕玻璃之间的平均摩擦系数分别为 4.240、3.468 和 3.742。开槽结构的抛光胶胶盘能够降低与激光玻璃之间的摩擦系数,并且方形槽结构引起的平均摩

擦系数小于放射形槽的。在 10,20,40 r/min 三种转动速度条件下得到平均摩擦系数分别为 3.437、3.904 和 4.109[图 2(c)],平均摩擦系数随转动速度的增加而增大,但是增量不呈线性变化。在 5,10,20 N 的加载压力作用下,抛光胶与激光钕玻璃的平均摩擦系数分别为 3.271、3.728 和 4.451[图 2(d)],平均摩擦系数随加载压力的增加而增大,且近似线性变化,体现出在存在氧化铈抛光液条件下,抛光过程中平均摩擦系数与加载压力之间关系的特殊性,与摩擦系统(玻璃、抛光胶和抛光液)的内部变化分不开。如果在玻璃抛光过程中较大的摩擦系数意味着较大的机械磨削效率^[10~13],那么实验因素中需要设定大的加载压力,不开槽的抛光胶盘,大的转动速度,并且选择 3.5[#] 抛光胶。

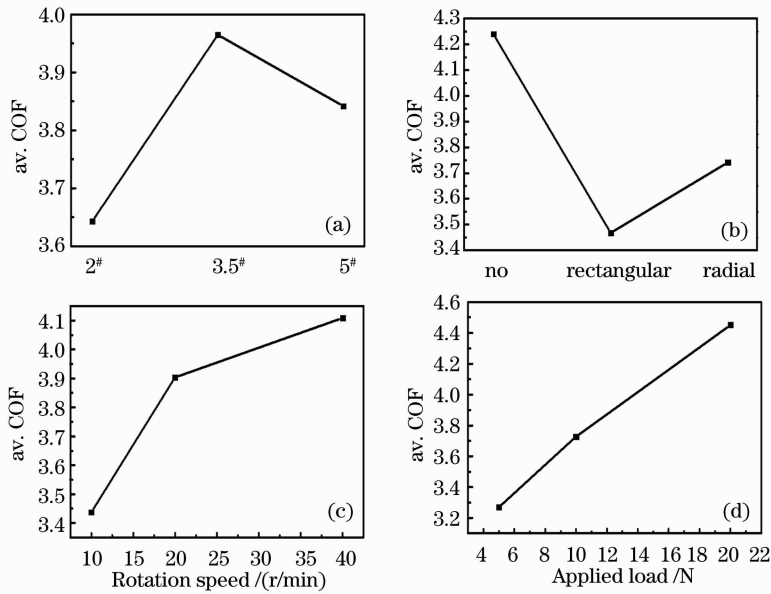


图 2 (a) 抛光胶胶号;(b) 胶盘开槽方式;(c) 转动速度和(d)加载压力对平均摩擦系数的影响规律

Fig.2 Influences of (a) polishing pitch type; (b) groove mode; (c) rotation speed and (d) applied load on the average coefficient of friction

3.4 实验因素对摩擦系数变化范围的影响

根据测试结果的极差统计分析,作图分析抛光胶胶号、抛光胶胶盘开槽方式、转动速度及加载压力 4 个实验因素对摩擦系数变化范围的影响规律[图 3(a)、(b)、(c)、(d)]。图 3(a)显示组分比例含量不同时三个抛光胶 2[#]、3.5[#] 和 5[#] 与激光钕玻璃之间摩擦系数变化范围分别为 1.265、2.429 和 1.816,3.5[#] 抛光胶与激光钕玻璃之间引起的摩擦系数变化范围最大,5[#] 次之,2[#] 最小。抛光胶不开槽、方形槽和放射形槽三种开槽方式与钕玻璃之间的摩擦系数变化范围大小分别为 2.788、0.963 和 1.759[图 3(b)]。开方形槽的变化幅度最小,放射形槽次

之,不开槽最大。图 3(c)显示在 10,20,40 r/min 三种转动速度条件下摩擦系数变化分别为 0.862、2.015 和 2.632,转动速度的增加引起摩擦系数变化范围的增大。在 5,10,20 N 加载压力作用下,抛光胶与激光钕玻璃的摩擦系数变化范围分别为 0.741、1.548 和 3.221[图 3(d)],加载压力的增大同样引起摩擦系数变化范围的增大,且增大幅度近似线性变化。摩擦系数变化范围大小影响到玻璃元件加工表面质量(包括面形精度、表面粗糙度等),实际中要得到好的玻璃加工表面质量,需要摩擦系数变化范围小,即要求各种加工设备及部件平稳运行。为达到这种效果,从实验影响因素角度考虑,可以采用降

低加载压力、抛光胶胶盘采用方形槽开槽方式、降低

转动速度和使用 2[#] 抛光胶结合的方法。

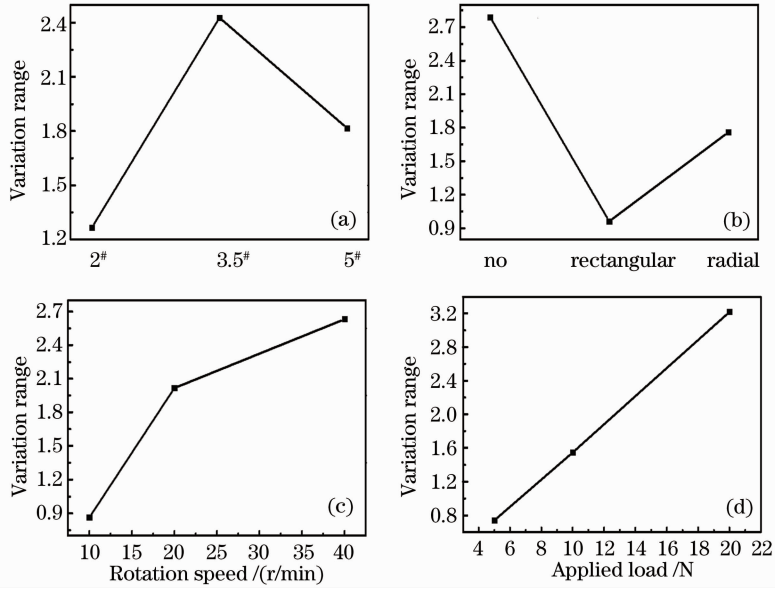


图 3 (a) 抛光胶胶号; (b) 胶盘开槽方式; (c) 转动速度和 (d) 加载压力对摩擦系数变化范围的影响规律

Fig. 3 Influences of (a) polishing pitch type; (b) groove mode; (c) rotation speed and (d) applied load on the variation range of frictional coefficient

4 讨 论

本文通过正交实验,研究了抛光过程中实验因素对磷酸盐激光玻璃和光学沥青抛光胶之间摩擦特性的影响。摩擦系数随时间呈非平稳变化,表现出不同大小的平均摩擦系数和变化范围,分析原因可能为以下 4 方面:

1) 产生粘-滑摩擦振动,切向力很不平稳。沥青抛光胶固有物理属性导致抛光运动中摩擦系数呈现非平稳变化。在常温下抛光沥青呈溶胶-凝胶结构,表现出明显的粘-弹性特性、融变性和流展性^[14~16],使磷酸盐激光玻璃在抛光时产生粘-滑摩擦振动^[17,18]。玻璃的运动很不平稳,滑动与切向振动交替进行。不同沥青抛光胶,由于固有物理属性有所差异,粘-滑摩擦振动情况不同,体现出不同的平均摩擦系数大小和变化范围。

2) 抛光沥青胶表面与激光玻璃表面的粘附作用。沥青在一定的压力和温度作用下,能与接触玻璃表面达到分子和分子接触的范围,产生粘附^[19];沥青中含有一COOH 基团,能与玻璃表面发生化学反应,形成界面化学键,其结合力比分子间引力大 1~2 个数级,能够增强接触表面的粘附作用。沥青抛光胶胶盘表面有一定粗糙度,具有粗糙峰结构,如图 4 所示,粗糙峰粘附玻璃表面,形成“冷焊点”,阻碍玻璃切向运动,形成切向振动,表现为摩擦系数

振动变化。当加载压力增大时,粘附“冷焊点”数量增多,切向阻力变大,测得的平均摩擦系数变化范围大。

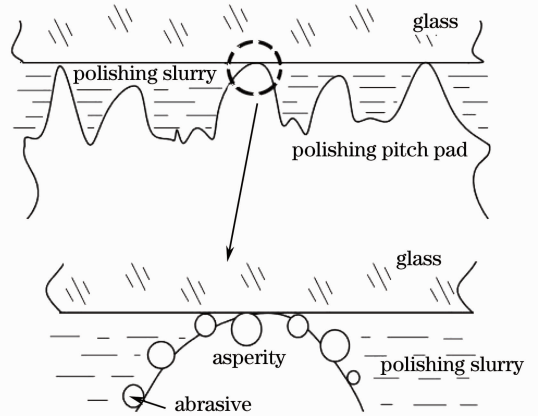


图 4 玻璃、抛光液和抛光胶胶盘的接触示意图

Fig. 4 Schematic of contact between glass, polishing slurry and polishing pad

3) 抛光液磨料与激光玻璃表面的磨削作用。抛光过程中,玻璃与沥青胶接触面间存在抛光液磨料(CeO₂ 颗粒),如图 4 中放大部分所示。磨料的存在能够限制两表面分子间接近,减小吸附力。但是,硬的磨料能够埋到软的沥青抛光胶摩擦面上固定下来,抛光时起到“锉刀”那样的作用,磨削激光玻璃,磨料的“锉刀”效果会使抛光时切向阻力增大。增大加载压力,使镶嵌在抛光胶中的磨料数量增多,“锉刀”面积增大,切向阻力增大,体现为大的摩擦系数。

4) 激光玻璃和抛光胶胶盘间液膜的粘度变化。抛光过程中,抛光液能够在激光玻璃和抛光胶胶盘之间形成一层液膜,液膜厚度变化时,抛光液流体粘度将发生变化。大约在大于 30 nm 时,流体符合牛顿流体;在小于 30 nm 时,流体的粘度表现为非牛顿特性,粘度随间距的减小而增大。当距离达到某一最小值时,流体产生宏观不流动性,即流体产生相变,呈似固体^[20]。当流体膜厚度增加时,摩擦系统的流体润滑状态,使摩擦系数减少;而当流体膜厚度减小时,摩擦系统的边界润滑状态,使摩擦系数增加^[21]。流体膜厚度与速度、压力等工艺参数有关^[22]。

实验中抛光胶胶盘的开槽方式不同,宏观上影响玻璃和沥青胶的接触面积,改变运动时的阻力矩,影响着平均摩擦系数的大小和变化范围。

图 2 和图 3 相近的变化趋势,反映了平均摩擦系数和摩擦系数变化范围变化趋势的相似。大的平均摩擦系数,可以增大激光玻璃在抛光过程中与沥青抛光胶之间的去除效率,但同时引起大的摩擦系数变化范围又会影响玻璃的表面质量,如面形精度或表面粗糙度等。这对矛盾需要根据实际加工需求来解决,例如,如果在玻璃元件表面质量要求不高的情况下,可以适当调整实验因素(工艺参量),如设定大的加载压力、不开槽抛光胶盘、大的转动速度和选择 3.5[#] 抛光胶,来提高平均摩擦系数,增加抛光去除效率;而在表面质量要求很高的情况下,特别是在加工后期,需要通过调整工艺参量,如降低加载压力、抛光胶胶盘采用方形槽开槽方式、降低转动速度和使用 2[#] 抛光胶结合的方法,来降低平均摩擦系数和摩擦系数变化范围,以获得高质量的玻璃表面。另外,可以通过调节工艺参量,使平均摩擦系数和摩擦系数变化范围适中,从而获得较高的抛光效率和较好的表面质量。

5 结 论

1) 抛光胶胶号、抛光胶胶盘开槽方式、转动速度及加载压力影响着磷酸盐激光玻璃与沥青抛光胶之间的平均摩擦系数大小和摩擦系数变化范围。

2) 实验因素对平均摩擦系数大小和摩擦系数变化范围影响的显著程度趋势相同。加载压力影响较大,而沥青抛光胶胶号影响较小。

3) 本实验中高的平均摩擦系数对应着大的摩擦系数变化范围。平均摩擦系数决定了抛光速率,摩擦系数的变化范围影响着光学玻璃的面形精度和

表面粗糙度。实际加工中根据玻璃表面质量要求来调整工艺参量以提高加工效率或表面质量,或者建立加工效率或表面质量之间的平衡。

4) 抛光过程中粘-滑摩擦、粘附作用、磨料磨削和液膜粘度变化可能是引起摩擦系数随时间变化的诱因。

参 考 文 献

- 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
- Wen Lei, Yang Jingxin, Liu Renhong *et al.*. Small signal gain coefficients in Nd³⁺ doped phosphate glass [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302009
温磊, 杨镜新, 刘仁红等. 掺钕磷酸盐玻璃的小信号增益性能[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302009
- Wang Xiaofa, Fan Zhongwei, Yu Jin *et al.*. High energy and high efficiency Nd: glass regenerative amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(8): 0802002
王小发, 樊仲维, 余锦等. 高能量高效率钕玻璃再生放大器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0802002
- Wang Fang, Zhou Lidan, Han Wei *et al.*. Third harmonic generation with large-scale rapid growth KDP crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s106005
王芳, 周丽丹, 韩伟等. 大口径快速生长 KDP 晶体三倍频性能研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s1): s106005
- W. Howard Lowdermilk, David Milam. Laser-include surface and coating damage[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9): 1888~1903
- Li Zhongya, Li Chengfu, Cheng Lei. Investigation in enhancing the laser include damage intensity of Nd-doped phosphate glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 562~565
李仲伢, 李成富, 程雷. 增强掺钕磷酸盐玻璃激光破坏强度的研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(5): 562~565
- Zhang Baoan, Chen Heming, Zhu Jianqiang. Quality control in large-aperture laser glass optical processing[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(1): 96~100
张宝安, 陈鹤明, 朱健强. 大口径激光玻璃光学加工的质量控制[J]. *应用光学*, 2009, **30**(1): 96~100
- Michael John Cumbo. Chemo-Mechanical Interactions in Optical Polishing[D]. New York: University of Rochester, 1993
- Cao Chong, Feng Guoying, Yang Liming *et al.*. Calculation and simulation for the factors affecting relative grinding removal in ultra-precision continuous polishing [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 67~71
- H. Carchnov. Flat Glass Grinding and Polishing Technology [M]. Mao Wenjie, Yang Yingfang Transl. Beijing: China Industry Press, 1965. 84~225
H. 卡恰洛夫. 平板玻璃研磨抛光工艺学[M]. 毛文杰, 杨映芳译. 北京: 中国工业出版社, 1965. 84~225
- C. J. Evans, E. Paul, D. Dornfeld *et al.*. Material removal mechanisms in lapping and polishing [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003, **52**(2): 611~633
- Joseph M. Steigerwald, Shyam P. Murarka, Ronald J. Gutmann. Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials[M]. New York: John Wiley & Son, Inc. 1997
- Cook, Lee M.. Chemical processes in glass polishing[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1990, **120**: 152~171
- Mullany, E. Corcoran. An innovative look at precision polishing tools[C]. Proceedings of the 3rd CIRP International Conference

- on High Performance Cutting, Dublin, Ireland, 2008. 589
- 15 B. Gillman, F. Tinker. Fun facts about pitch and the pitfalls of ignorance[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 72~79
- 16 Mullany B., Turner S.. Optical polishing pitches: impact frequency responses and indentation depths[J]. *J. Appl. Opt.*, 2010, **49**(3): 442~449
- 17 Dahl P. R.. Solid friction damping of mechanical vibrations[J]. *AIAA Journal*, 1976, **14**(12): 1675~1682
- 18 Yang Xiujuan, Yan Xiangzhen, Jia Shanpo. Frictional contact analysis of packer rubber with large deformation based on adhesive-slip frictional contact method[J]. *J. Mec. Str.*, 2006, **28**(2): 229~234
杨秀娟, 闫相祯, 贾善坡. 封隔器胶筒大变形的粘-滑摩擦接触分析[J]. *机械强度*, 2006, **28**(2): 229~234
- 19 Wu Herong, Wang Binfang. Polymer Physics[M]. Shanghai: East China Institute of Chemical Technology Press, 1990. 343~361
- 吴和融, 王斌芳. 高分子物理学[M]. 上海: 华东化工学院出版社, 1990. 343~361
- 20 Michelle L. Gee, Patricia M. McGuiggan, Jacob N. Israelachvili *et al.*. Liquid to solidlike transition of molecularly thin film under shear[J]. *J. Chem. Phys.*, 1990, **93**(3): 1895~1906
- 21 Luo Jianbin, Wen Shizhu. Characteristics and mechanism of film lubrication[J]. *Sci. China Ser. A*, 1996, **26**(9): 811~819
雒建斌, 温诗铸. 薄膜润滑特性和机理研究[J]. *中国科学(A辑)*, 1996, **26**(9): 811~819
- 22 Luo Jianbin, Huang Ping, Wen Shizhu. Characteristics of fluid lubrication films at the nano-scale[J]. *ASME J. Tribol.*, 1999, **121**(4): 872~878

栏目编辑: 韩 峰