

抛光过程中光学元件表面划痕的形成和控制

汤文龙^{1,2}, 梁尚娟^{1,2}, 焦翔¹, 樊全堂¹, 尹进¹, 朱健强^{1*}

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过在石英玻璃的抛光过程中引入 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒, 对抛光过程中石英工件表面产生的划痕类型和收尾阶段不同粒径杂质颗粒产生的划痕长度进行分析, 同时研究了抛光液质量分数和抛光盘结构对石英玻璃抛光质量的影响。结果表明: 杂质颗粒需要盘面提供足够大的支撑力才能在工件表面产生划痕, 而杂质颗粒所受盘面的支撑力大小取决于其位置高度和共同参与受力的基质颗粒数量; 杂质颗粒的位置高度很难掌控, 但在相同工艺条件下, 使用质量分数为 6% 的抛光粉和具有多微孔结构的沥青抛光盘可以有效降低划痕的产生概率, 并且不会导致抛光表面粗糙度变差或过度影响抛光效率, 对实际加工生产有指导意义。

关键词 光学制造; 抛光; 石英玻璃; 划痕; 模型; 表面粗糙度

中图分类号 TG356.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1202009

Formation and Control of Scratches on Surfaces of Optical Components During Polishing

Tang Wenlong^{1,2}, Liang Shangjuan^{1,2}, Jiao Xiang¹, Fan Quantang¹, Yin Jin¹, Zhu Jianqiang^{1*}

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, 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 types of surface scratches on the fused-silica workpiece during the polishing process and the length of the scratches caused by impurity particles having different particle sizes in the ending stage are analyzed by introducing $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ particles into the polishing process of fused-silica glass. Further, the effects of the polishing-powder mass fraction in the polishing solution and the polishing pad structure on the polishing quality of the fused-silica glass are studied. Results show that the impurity particles require sufficient support force provided by the polishing pad to produce scratches on the surface of the workpiece; the support force of the polishing pad on which the impurity particles are subjected depends on their positional height and the number of matrix particles participating in the polishing process. It is difficult to control the positional height of the impurity particles; however, at a relatively high polishing-powder mass fraction of 6%, the microporous pitch-polishing pad effectively reduces the scratching probability without introducing surface roughness or excessively affecting the polishing efficiency under identical process conditions. These observations exhibit guiding significance for processing and production.

Key words optical fabrication; polishing; fused-silica glass; scratch; model; surface roughness

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.5450; 240.5770

1 引言

光学元件是光学系统中极其重要的一个组成部

分, 例如在美国国家点火装置中, 共需要大口径光学元件 7000 余件以及各类小口径元件和备件 30000 余件^[1], 而这些高精度的光学元件的表面质量直接

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-05-22; 录用日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(61827816)、国家自然科学基金面上项目(11875308)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20180024)

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

决定了整个光学系统的性能和可靠性。光学元件的表面质量最早是由 McLeod 等^[2]于 1945 年提出,其中光学外观标准美军标对划痕的级数和长度都有相应要求^[3]。若要控制表面质量,首要问题是抑制划痕的形成和划痕长度。目前,国内外学者对抛光过程中的划痕问题进行了研究。郭亚晶等^[4]采用振镜扫描的方式实现了光学元件表面损伤的检测。韩敬华^[5]研究了抛光粉的粒度分布和晶粒的大小与硬度对抛光质量的影响。梁尚娟等^[6]通过对氧化铈抛光颗粒的表面改性,降低了抛光表面的粗糙度,减少团聚的抛光粉颗粒在工件表面产生的划痕。Chandra 等^[7]指出划痕的形成与抛光粉颗粒的团聚以及加工盘面和工件表面的硬度有关,抛光液的 pH 值在等电点附近或加工盘较硬时更容易产生划痕。Ring 等^[8]认为大粒径杂质颗粒在微观粗糙不平的盘面和工件表面之间受到足够载荷,印入工件表面并相对划动产生划痕,并研究了不同粒径的杂质颗粒在两种不同硬度工件表面形成的划痕数量与划痕深度的关系。Suratwala 等^[9]将划痕的形成过程简化为杂质颗粒在恒力作用下印入盘面,同时在工件表面产生划痕的过程,并且提出了划痕长度的计算公式。上述研究都没有对不同类型的划痕成因和形成条件及其具体过程进行详细研究。本文从理论上分析了不同类型划痕的形成过程,研究了划痕产生概率和长度的影响因素,就抛光液浓度和抛光盘结构对划痕形成的影响进行了实验,并研究了抛光过程中它们对抛光速率以及抛光表面粗糙度 S_a 的影响。

2 抛光过程中划痕的形成分析

2.1 抛光机理

目前,抛光过程的机理公认是机械、化学、物理综合作用的过程^[10]。磨盘与工件相对运动时,散粒磨料将化学作用形成的较软的水解层机械去除,裸露新的表面,然后再水解、抛光去除,直到获得理想面形。这其中包含了机械去除、水解、沉积层流变作用。在抛光过程中,并不是所有的抛光粉颗粒都能参与核心抛光过程。在散粒磨料的磨削过程中,由于盘面的微观粗糙表面和宏观的开槽刮盘处理,可以参与抛光过程的颗粒数大约只有总数的 30%。此外,抛光粉颗粒的粒径并不完全相同,根据其粒径分布的不同,实际受力并参与抛光过程的颗粒数只有总数的 0.01%~0.1%^[11]。而实际受力并参与抛光的颗粒数直接影响了单个颗粒的受力情况,从而影响划痕的产生。

2.2 划痕的形成条件

在抛光过程中划痕的形成是因为工件表面的杂质颗粒所承载荷超过了临界值,且载荷不同也会导致划痕类型不同^[12]。当载荷大于弹性极限时,在接触区域会产生不可恢复的塑性亮丝,当载荷继续增大超过断裂极限时,还会形成裂纹,包括中位裂纹和侧向裂纹。

由此可知,划痕形成需要以下两个条件。

1) 只有粒径大于平均粒径的杂质颗粒才有可能受到过大载荷而产生划痕。杂质颗粒的来源有很多种,大致可以分为以下两类^[13]。a) 抛光内部来源,主要为抛光液中氧化铈颗粒团聚和抛光过程中产生的盘面与工件的抛光残留物。b) 抛光外部来源,主要为工作服上的团聚抛光颗粒、抛光盘碎屑和胶粒、抛光设备掉落的铁屑,以及工件准备送往抛光时清洗过程残留的磨砂颗粒等。

2) 盘面对杂质颗粒的支撑力足以使颗粒在工件表面产生塑性或是脆性破坏,从而在有一定速度的相对运动情况下形成划痕。Swain^[14]用光学显微镜和扫描电子显微镜进行观察,发现用维氏硬度印压头刻划脆性玻璃表面时,当载荷小于 0.05 N 时,玻璃表面只出现塑性划痕,载荷为 0.1~5 N 时,玻璃表面出现中位裂纹和侧向裂纹,其中载荷为 0.1~1 N 时侧向裂纹不明显,当载荷大于 5 N 时,划痕边界有崩边,侧向裂纹出现交叉情况。

2.3 划痕的形成机理与分析

当杂质颗粒开始产生划痕时,其受力最大,盘面提供的力决定了杂质颗粒的高度。假定沥青盘面为 Kelvin 固体^[15],此时颗粒印入盘面的应力应变关系为

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} + E\varepsilon, \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; η 为黏度; t 为时间; E 为工件的模量。 $E\varepsilon$ 为盘面弹性应力,在划痕产生过程中相对较小,可忽略不计。在颗粒印入过程中,随着印入深度的不断增大,颗粒受力慢慢变小,印入速率也不断减小,此时有

$$\varepsilon(t) = [1 - \exp(-t/\tau)]\sigma/E, \tau = \eta/E. \quad (2)$$

σ 随着应变引起的高度不断增大而逐渐变小,从而导致应变速率减小,直到盘面提供的支撑力不足以支持颗粒在工件表面产生划痕时划痕终止。划痕在起始和结束阶段,划痕深度逐渐变小,由脆性划痕过渡到塑性亮丝,最终杂质颗粒对工件表面的作用力不足以产生划痕时终止,完整划痕的形成过程

如图 1(a) 所示。把划痕随着杂质颗粒印入盘面由脆性划痕开始转变为塑性划痕到划痕自然终止的这一段称为划痕的收尾阶段。在划痕形成过程中,当杂质颗粒对工件表面的作用力锐减到不足以产生划痕时,划痕会突然中断,如图 1(b) 所示,其中支撑力落空只是划痕中断的原因之一,杂质颗粒碎裂等也会导致划痕中断。

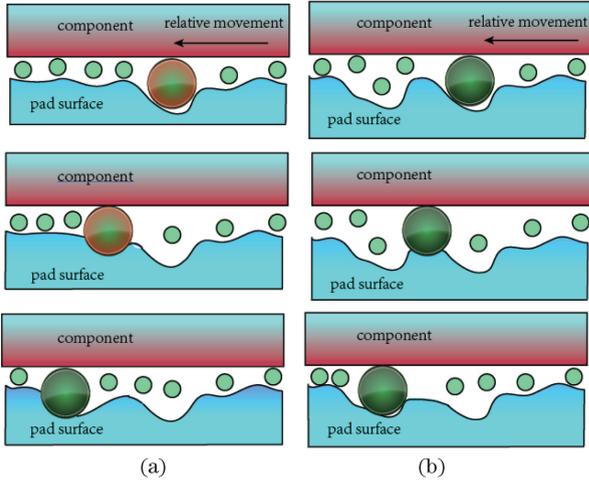


图 1 划痕形成示意。(a)完整划痕;(b)划痕中断
Fig. 1 Schematic of scratch formation. (a) Complete scratch; (b) interrupted scratch

在划痕产生的起始阶段,不同杂质颗粒的高度有较大差异,且受力与高度变化的关系无法确定,因此整体划痕长度的预测难度较大。而在收尾阶段,大部分杂质颗粒已经嵌入抛光盘面,单颗粒受力减小,高度变化不大,受力与高度变化的关系依然无法确定,还是难以预测划痕长度,但是对于不同粒径的杂质颗粒所形成的划痕在收尾阶段的长度可以通过简化计算推算出来。

图 2 所示为收尾阶段杂质颗粒和抛光表面的接触情况^[16],此时应力大小和接触区域半径以及深度之间的关系为 $\Delta = \left[\frac{9}{16} \left(\frac{P}{E_r} \right)^2 \frac{1}{R} \right]^{\frac{1}{2}}$, $\Delta = \left(\frac{3}{4} \frac{P}{E_r} R \right)^{\frac{1}{2}}$, 可推出 $P = 4E_r a \Delta / 3$, 颗粒半径 $R = a^2 / \Delta$, 其中 Δ 为印入深度, a 为接触区域半径, P 为颗粒所受载荷, $E_r = E / (1 - \nu^2)$, ν 为泊松比。

由此可以得出收尾阶段印入工件表面相同深度时杂质颗粒的粒径(R_1 、 R_2)与应力大小(F_1 、 F_2)的关系:

$$F_2 / F_1 = \sqrt{R_2 / R_1}. \quad (3)$$

再根据(1)式,忽略弹性力,可推出盘面对颗粒的支撑力 F_s 与印入速度 v 之间的关系,此时大部分杂质颗粒已经嵌入抛光盘面,与盘面接触区域的

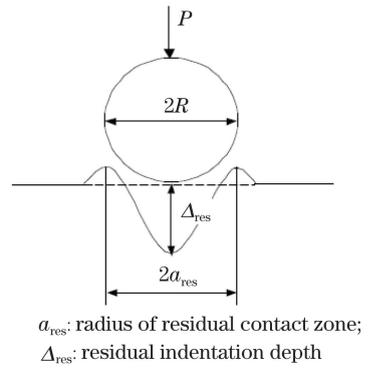


图 2 刚性小球印压示意

Fig. 2 Schematic of residual indentation marked by rigid ball

面积近似为 πR^2 , 可得 $F_s = \pi R^2 \eta \frac{de}{dt}$, 即 $F_s = kR^2 v$, 其中 k 为常数系数。

由此可近似算出收尾阶段所形成的杂质颗粒划痕长度的比例关系即为印入过程的时间比值,在相同印入深度的情况下也就是印入速度(v_1 、 v_2)的反比,即:

$$L_1 / L_2 = v_2 / v_1 = \frac{F_2 R_1^2}{F_1 R_2^2} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

2.4 划痕形成的控制

光学加工工艺包含研磨和抛光两个步骤,抛光作为最后一道工序,是划痕研究中需要重点关注的过程。抛光过程的三个主体分别是工件、抛光液和抛光盘。不同材料和外形工件的四大抛光特征(面形、表面质量、表面粗糙度和去除率)在相同抛光工艺下也会有差异,而本文研究的是后两个主体,即抛光液和抛光盘在加工相同的石英工件时对抛光效果的影响。

在相同的加工环境、工艺条件和相同给液速率下,使用较高浓度的抛光液意味着在抛光过程中参与抛光作用的抛光粉颗粒数目较多,参与抛光作用的磨粒的单颗粒受力减少。即使有杂质颗粒参与受力,其单颗粒受力较小,超过临界值的概率降低,从而形成划痕的概率也降低。在实际光学加工中,抛光表面产生的划痕数量并不多,为方便研究,本实验在抛光液中添加一定浓度的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。抛光颗粒作为杂质颗粒进行破坏性实验,研究了抛光液浓度对抛光质量的影响。

Choi 等^[17]研究了化学机械抛光(CMP)抛光中聚氨酯抛光盘的孔隙和槽对划痕的影响,发现只有槽没有孔的抛光盘会在抛光过程中形成大量不规则划痕。抛光盘面的微孔可以容纳大粒径颗粒,避免其参与抛光作用产生划痕,即使大粒径杂质颗粒已经引起划痕,也会落入盘面微孔而导致支撑力落空,

划痕终止,这就有效缩短了所产生划痕的长度。沥青抛光盘虽然在抛光过程中可以很好地贴合工件表面,抛光表面的中高频误差相对较小,抛光效果优异,但其表面也因流体性质容易变得光滑无孔,使得工件表面的粗糙度上升且容易产生划痕。因此,本文研究了沥青抛光盘改性,通过碳酸氢钠的热分解作用,沥青盘具备多微孔结构,从而在保证高频误差抑制能力的同时,有效降低抛光表面产生划痕的可能性。

综上所述,本文根据划痕的形貌特征和长度提出并验证了划痕的形成机理,并从两个方面进行抛光过程中划痕的抑制研究:一方面通过提高参与抛光的基质颗粒的数量,降低单颗粒的受力,使其难以达到形成划痕的临界受力条件,从而减少所形成划痕的数量,并同时研究工艺条件对抛光效果的影响;另一方面通过制备具有多孔结构的沥青抛光盘,在保持沥青抛光盘抛光优势的前提下,解决了其盘面容易变光滑的问题,免去了普通沥青盘在使用前需要刮盘使表面变粗糙的步骤,只需在每次使用前用毛刷将沥青盘表面微孔结构刷净即可。此外,沥青抛光盘表面微孔可以容纳大粒径颗粒,降低其参与抛光作用产生划痕的概率,即使大粒径杂质颗粒已经引起划痕,也会落入盘面微孔而导致支撑力落空,划痕终止,从而缩短了所产生划痕的长度。

3 实验与分析

3.1 实验

实验样品为熔石英玻璃,直径为 100 mm,厚度为 10 mm。用 W14 绿碳化硅精磨后,再用质量浓度为 4% 的抛光液进行抛光,得到面形统一为凹球面的实验样品,样品的峰谷(PV)值为 0.5λ 左右(λ 为波长)。所使用的抛光粉是中位粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 的 R3303 型高纯氧化铈抛光粉。抛光设备为南京仕研光电设备有限公司的 YP035 型单轴研磨抛光机。抛光盘是用 Gugolz 73# 沥青制作的胶盘,不额外给机头加气压,机头重 28 N,主轴转速为 60 r/min,控制机头摆动的盘转速为 30 r/min,温度为 $(21\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 。破坏性实验用的掺杂颗粒是欣辉科技公司生产的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 抛光颗粒,中位粒径分别为 $1\ \mu\text{m}$ ($0.6\sim 1.6\ \mu\text{m}$)、 $2\ \mu\text{m}$ ($1.1\sim 3.1\ \mu\text{m}$)、 $3\ \mu\text{m}$ ($1.7\sim 6.5\ \mu\text{m}$)。抛光去除率和粗糙度实验用质量分数为 4% 的抛光液对空白样品进行预抛光 15 min,保证样品面形和胶盘贴合后再用不同质量分数的抛光液在相同工艺参数下进行抛光,通过电

子分析天平测量抛光去除质量得到抛光速率,再用 ZYGO 轮廓仪测量得到抛光表面粗糙度,重复进行了三组实验,取三组数据的平均值作为实验结果。破坏性实验也是先用空白样品进行预抛光 15 min,保证样品面形和胶盘贴合,然后用掺杂了 0.5% 质量分数的 Al_2O_3 抛光颗粒的抛光液对样品进行抛光处理 20 min,抛光液的质量分数分别为 2%、4% 和 6%。另外用掺杂了 0.5% 质量分数的 Al_2O_3 抛光颗粒的氧化铈抛光液对样品抛光 20 min, Al_2O_3 抛光颗粒的粒径分别为 1, 2, 3 μm 。用光学显微镜观测实验产生的划痕亮丝。

为了制备多微孔结构沥青抛光盘,将 200 g Gugolz 73# 沥青放入恒温电炉中进行熔融,首先在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 下恒温熔融,等完全熔融后,将温度提升到 $155\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温 3 min。再将称量好的 5 g 碳酸氢钠添加到熔融的沥青中并搅拌均匀。最后将预热至 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的抛光基板水平放置,并将熔融的沥青倒到基板上,自然冷却至室温固化,即得到多微孔沥青抛光盘。

3.2 实验结果分析

3.2.1 抛光粉质量分数对去除率与表面粗糙度的影响

不同抛光粉质量分数的抛光液对石英样品的去除率(R_R)和表面粗糙度(S_a)的影响如图 3 所示。光学加工生产中通常使用的质量分数为 2%~3% 的抛光粉具有较好的去除率,表面粗糙度能保持在 1 nm 以内。随着抛光粉质量分数的提高,抛光速率呈现先升后降的趋势。这是因为在相同的给液速率(160 mL/h)下,随着抛光粉质量分数的提高,参与抛光的抛光粉颗粒逐渐饱和,当抛光粉的质量分数为 3% 时抛光速率最高,去除率达到 $1.4119\ \mu\text{m}/\text{h}$ 。随着抛光粉质量分数继续增大,抛光盘与工件之间的抛光粉颗粒开始出现过饱和,直接影响新、旧抛光粉颗粒的更替,降低了溶剂水在抛光过程中带走抛

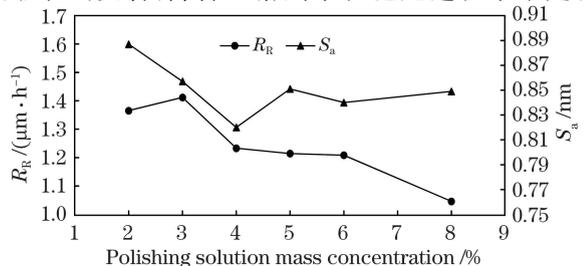


图 3 抛光液质量浓度对抛光速率和表面粗糙度的影响
Fig. 3 Effect of polishing-powder mass fraction in polishing solution on polishing rate and surface roughness

光屑和陈旧抛光粉颗粒的作用,导致棱角更为锋利的新抛光粉颗粒难以接触到工件表面;去除率也随着抛光粉质量分数的继续增大而逐渐下降,抛光粉的质量分数为 8% 时,去除率由 3% 质量分数时的峰值 $1.4119 \mu\text{m}/\text{h}$ 下降到 $1.0459 \mu\text{m}/\text{h}$, 下降幅度达到 25.9%。

从图 3 可以看出,在抛光液的抛光粉质量分数相对较低的阶段,石英样品抛光表面的粗糙度 S_a 随着抛光粉质量分数的增大而减小,当抛光粉质量分数为 4% 时抛光表面粗糙度低至 0.82 nm 。而

随着质量分数的继续提高,抛光后的表面粗糙度会有一个小幅的回升。这是因为抛光过程中参与磨削的抛光粉颗粒数随质量分数的增大而增多后,单颗粒所受的载荷下降,导致最终抛光表面的粗糙度减低。质量分数过饱和后,溶剂水的流动性变差,带走抛光残留物和热量的能力下降,抛光粉颗粒更容易团聚,导致抛光过程存在局部去除不均匀的现象,粗糙度会有一些的回升。图 4 所示为抛光液的质量分数分别为 2% 和 6% 时的表面粗糙度 S_a 的检测结果。

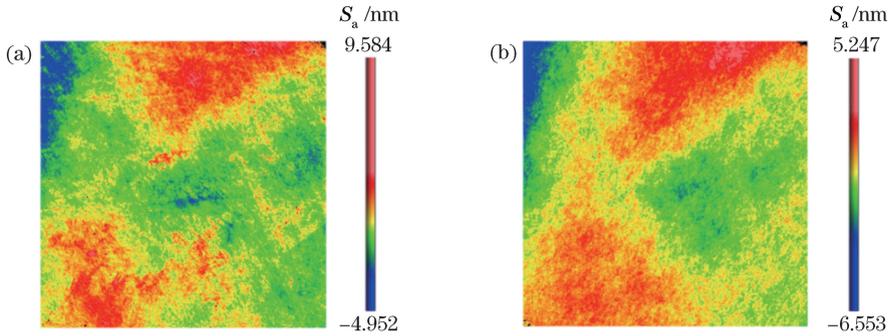


图 4 采用不同质量浓度抛光液抛光的表面粗糙度检测结果。(a) 2% 质量浓度;(b) 6% 质量浓度

Fig. 4 Measured results of surface roughness polished by polishing solutions with different polishing-powder mass fractions. (a) Mass fraction of 2%; (b) mass fraction of 6%

3.2.2 划痕形貌

加工过程中出现的划痕可以分为 3 类,如图 5 所示。

在实际光学加工生产中,塑性划痕是最多的,它的形成条件较低,不需要较大的杂质颗粒,抛光液中也可以形成氧化铈团聚颗粒。一般情况下,宽度小于 $1 \mu\text{m}$ 的亮丝在光学检测中是不作要求的,可以忽略。通常情况下在表面上可以决定光洁度质量级别的划痕都是图 5(b) 所示的复合划痕,也有少量如图 5(c) 所示的“短道子”划痕,这种划痕没有经过收

尾阶段,在没有达到塑性划痕形成条件时,盘面对颗粒的支撑力落空,划痕突然终止,只形成了一段脆性短划痕。划痕中断在整个划痕形成过程中都会出现,脆性划痕阶段杂质颗粒所受载荷较大,从时间上来看其处于整个过程的前中期阶段,杂质颗粒印入盘面不深,容易发生三体滚动且受力较大,因此该阶段更容易出现落空或颗粒碎裂的情况。

在划痕形成过程中杂质颗粒的三体滚动还会导致超长划痕的出现,严重影响了表面光洁度级别。图 5(d) 所示的超长划痕与其他几种划痕不同,在收

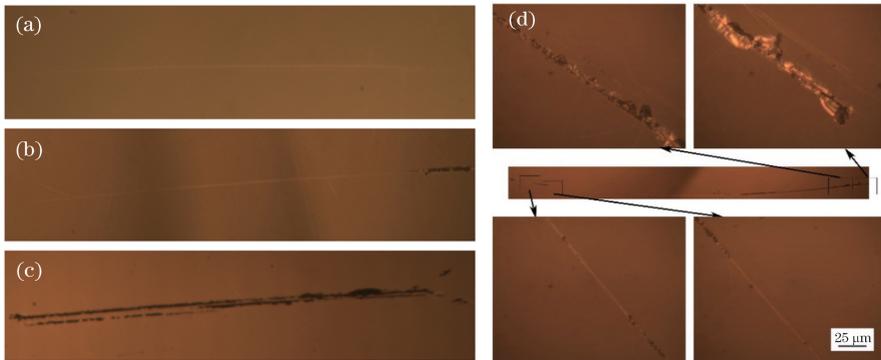


图 5 不同类型划痕显微图。(a) 塑性划痕;(b) 脆性和塑性的复合划痕;(c) 脆性划痕;(d) 超长划痕

Fig. 5 Micrographs of different types of scratches. (a) Plastic scratches; (b) composite scratches with brittleness and plasticity; (c) brittle scratches; (d) extra-long scratches

尾阶段杂质颗粒所载荷随着印入盘面深度增大而减小,划痕即将终止时,杂质颗粒在盘面进行三体滚动,使得颗粒的高度位置又开始爬升,所载荷增大,处于收尾阶段的划痕没有进入终止阶段,杂质颗粒所载荷反而提升到足以产生脆性划痕,由于杂质颗粒多次重复滚动,脆性划痕和塑性划痕交替出现,使得此类划痕的长度相较于普通划痕的长度成倍增加。图 5(d)所示的划痕出现了 4 次交替变化,由于显微镜视场原因只截取了前 2 次周期变化划痕。这种情况的出现严重损害了表面质量,进而影响工件的光洁度级别,容易使得工件最终由于光洁度不达标而返厂重修。

3.2.3 划痕长度

由划痕形成过程的分析可知:在收尾阶段,高度变化一样时,不同粒径杂质颗粒印入过程所需的时间不同,在相同工艺参数的情况下,假定颗粒相对于工件的速度相同,可得到收尾阶段划痕长度与颗粒粒径的变化关系。图 6 所示为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $3\ \mu\text{m}$ 中位粒径的杂质颗粒形成的收尾阶段划痕长度实际统计结果与根据 $2\ \mu\text{m}$ 中位粒径的杂质颗粒产生的划痕长度模拟的 $3\ \mu\text{m}$ 结果,其中模拟结果与统计的实验结果较为吻合。这是因为实验中杂质颗粒选用的是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒,该颗粒形貌接近球形,与所用的刚性小球印压模型较为吻合。从图 6 可以看出,收尾阶段小粒径颗粒形成的划痕长度模拟结果和实际结果偏差稍大,其原因是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒和模型还是有一定差异,中位粒径为 $2\ \mu\text{m}$ 的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 磨粒由于粒径分布情况,有 10% 的颗粒粒径小于 $1.1\ \mu\text{m}$,无法产生划痕。而根据第 2 节的理论分析,与中位粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 的基质抛光粉颗粒相比, $1.1\ \mu\text{m}$ 的杂质颗粒不足以产生划痕,且两种杂质颗粒的 D50(颗粒累

积分分布为 50%) 粒径才达到 $2\ \mu\text{m}$ 以上,因此模拟 $3\ \mu\text{m}$ 的下限比实际统计结果稍有上移,且实际统计中 $3\ \mu\text{m}$ 杂质颗粒形成的多数划痕(颗粒累积分布为 67%) 粒径都在 $2\ \mu\text{m}$ 以内。另外,实际统计的 $3\ \mu\text{m}$ 杂质颗粒产生的长度在 $4\ \text{mm}$ 以上的划痕数量比模拟结果少,这是因为在实际抛光中,杂质颗粒要形成一个完整划痕的难度较大,尤其是长划痕,其形成时间相对较长,很可能会出现盘面对杂质颗粒的支撑波动或者杂质颗粒自身碎裂等情况,使得实际形成的长划痕数量要比模拟数量少,但两者的长度范围较为一致。

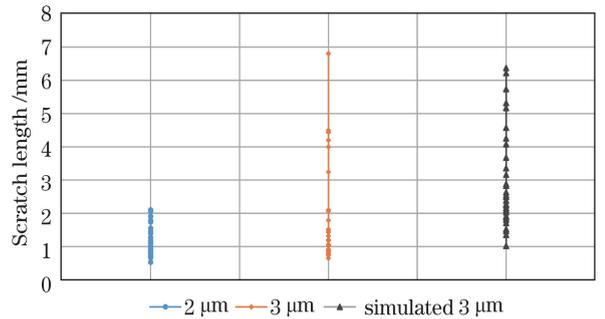


图 6 $2\ \mu\text{m}$ 和 $3\ \mu\text{m}$ 中位粒径的杂质颗粒形成划痕的实际统计结果与根据 $2\ \mu\text{m}$ 杂质颗粒产生的划痕长度模拟的 $3\ \mu\text{m}$ 结果

Fig. 6 Actual statistical results of scratches formed by impurity particles with $2\text{-}\mu\text{m}$ and $3\text{-}\mu\text{m}$ intermediate particle sizes and simulated $3\text{-}\mu\text{m}$ results based on scratch lengths generated by $2\text{-}\mu\text{m}$ impurity particles

3.2.4 多微孔结构抛光盘

抛光过程中,抛光盘和工件的实际接触区域大小会影响抛光效率,因此多微孔结构抛光盘的孔径不能过大,一般控制在 $50\sim 500\ \mu\text{m}$,如图 7 所示。



图 7 多微孔沥青抛光盘。(a)实物图;(b)光学显微镜

Fig. 7 Microporous pitch-polishing pad. (a) Physical picture; (b) optical micrograph

由于杂质颗粒产生划痕需要一定的载荷条件,因此在相同的抛光参数与工艺条件下,为保证对比性和可操作性,在抛光液中添加了同一质量分数的相同杂质颗粒,使得横向对比时各自抛光过程中杂质颗粒数量相同,从而直观看出在一定条件下抛光液中的抛光粉质量分数对所产生划痕数量的影响,结果见表 1。

根据第 2 节的理论分析结果,可通过提高基质抛光颗粒的数量来达到降低杂质颗粒所承受的载荷,从而降低划痕产生概率的目的。实验结果表明,随着基质抛光颗粒质量分数的增大,经过抛光 20 min 后,样品表面出现的划痕数量明显减少,说明在抛光过程中使用中位粒径为 1 μm 的 R3303 型抛光粉时,其在抛光液的质量分数为 6% 时,划痕产生的概率会相对较小。而具有多孔结构的沥青抛光盘表面能够存储大粒径的杂质颗粒,使杂质颗粒在抛光盘和工件之间参与抛光作用的可能性降低,盘面微孔结构的存在还会导致引起划痕的杂质颗粒受力落空,从而达到减少划痕数量和抑制划痕长度的目的。

表 1 掺入相同杂质颗粒时不同质量分数抛光液在抛光过程中产生的划痕数量

Table 1 Number of scratches produced during polishing process by polishing solution with different polishing-powder mass fractions doped with same amount of impurity particles

Mass fraction of polishing powder / %	2	4	6
Number of scratches(normal pad)	52	37	26
Number of scratches(microporous pad)	17	15	9

此外,抛光盘表面的微孔结构使得抛光粉和工件表面接触更充分,且可以容纳更多的抛光粉颗粒,抛光效率得到了显著提升,并且饱和抛光浓度也稍有提升,如图 8 所示。

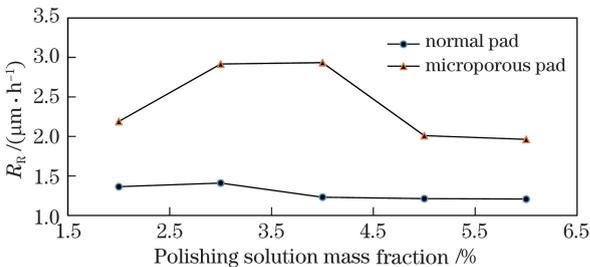


图 8 两种抛光盘上抛光液质量浓度对抛光速率的影响

Fig. 8 Effects of polishing-powder mass fraction in polishing solution on polishing rate for normal polishing pad and microporous polishing pad

从图 8 可以看到,在使用多微孔沥青盘抛光后,对石英样品的去除率显著提升,由原来的最高

1.4119 μm/h 提升到最高 2.9342 μm/h。除了主要与抛光盘的多微孔结构有关以外,碳酸氢钠的热分解产物碳酸钠对石英样品的抛光去除也有促进作用。根据理论计算,假定碳酸氢钠热分解完全,将表层微孔视为 0.3 mm 直径的均匀孔,盘面整体厚度为 10 mm,碳酸氢钠的添加量为 5 g,抛光液的给液速率为 160 mL/h,查表可知碳酸根水解常数为 1.78×10^{-4} ,由此可得抛光液的 pH 值为 11。由此形成的碱性环境对二氧化硅的水解过程有促进作用,提高了化学反应速率,从而提升了硬度较高的石英样品的去除速率。使用 pH 精密试纸测试时,发现抛光过程中抛光液的实际 pH 值在 7 到 8 之间,这可能是因为抛光界面接触较为充分,反应比较迅速,形成的 OH⁻ 离子消耗较快,难以在 pH 试纸上表现出来。

4 结 论

在划痕产生过程中,由于很难定量分析杂质颗粒位置高度和受力随高度的变化关系,抛光过程中产生的划痕长度难以定量预测。本文通过引入不同粒径的 α-Al₂O₃ 颗粒,研究了抛光过程中不同类型划痕的形成过程,发现形成的划痕长度不确定性很大:若在划痕形成过程中受到盘面给予的支撑落空,划痕中断,长度较小;若杂质颗粒出现三体滚动,划痕长度则成倍增加。本文还模拟了收尾阶段杂质颗粒形成的划痕长度与颗粒粒径的关系,发现划痕长度的比例关系为粒径比的 2/3 次方,与实验结果相吻合。理论分析和实验结果表明,通过提高抛光液的质量分数和在沥青盘表面添加微孔结构,可提高参与抛光作用的基质抛光粉颗粒数量,降低单颗粒的受力,其受力大小突破临界值的可能性相对降低,且由于微孔结构的存在,大粒径颗粒实际参与抛光过程的可能性相对较少,这就降低了划痕产生的概率。在综合考虑抛光去除率和抛光表面粗糙度的前提下,通过工艺改进和沥青盘改性,将抛光液的质量分数提升到 6%,并利用碳酸氢钠热分解,使沥青抛光盘具有多微孔结构,能够在保证沥青抛光盘优异的抛光效果的前提下,抑制了划痕的形成和划痕长度,对实际加工有重要的指导意义。

参 考 文 献

[1] Campbell J, Hawley-Fedder R, Stolz C, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 84-

- 101.
- [2] McLeod J H, Sherwood W T. A proposed method of specifying appearance defects of optical parts [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1945, 35 (2): 136-138.
- [3] Aikens D M. The truth about scratch and dig [C]// *International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing*, June 13-17, 2010, Jackson Hole, Wyoming, United States. Washington, D.C.: OSA, 2010: OTuA2.
- [4] Guo Y J, Tang S X, Jiang X Q, *et al.* Damage inspection of optical surface based on galvanometer scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (6): 0612003.
郭亚晶, 唐顺兴, 姜秀青, 等. 基于振镜扫描方式的光学元件表面损伤检测 [J]. *光学学报*, 2017, 37 (6): 0612003.
- [5] Han J H. Study on controlling the super smooth surface roughness of optical components [D]. Sichuan: Sichuan University, 2006.
韩敬华. 控制光学元件超光滑表面粗糙度的研究 [D]. 四川: 四川大学, 2006.
- [6] Liang S J, Tang W L, Jiao X, *et al.* Effect of modified polishing agent on polishing quality of optical glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (12): 1203001.
梁尚娟, 汤文龙, 焦翔, 等. 改性抛光剂对光学玻璃抛光质量的影响 [J]. *中国激光*, 2017, 44 (12): 1203001.
- [7] Chandra A, Karra P, Bastawros A F, *et al.* Prediction of scratch generation in chemical mechanical planarization [J]. *CIRP Annals*, 2008, 57 (1): 559-562.
- [8] Ring T A, Feeney P, Boldridge D, *et al.* Brittle and ductile fracture mechanics analysis of surface damage caused during CMP [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007, 154 (3): H239-H248.
- [9] Suratwala T, Steele R, Feit M D, *et al.* Effect of rogue particles on the sub-surface damage of fused silica during grinding/polishing [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(18): 2023-2037.
- [10] Evans C J, Paul E, Dornfeld D, *et al.* Material removal mechanisms in lapping and polishing [J]. *CIRP Annals*, 2003, 52(2): 611-633.
- [11] Suratwala T, Wong L, Miller P, *et al.* Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(52/53/54): 5601-5617.
- [12] Bulsara V H, Chandrasekar S. Direct observation of contact damage around scratches in brittle solids [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3060: 76-88.
- [13] Kwon T Y, Cho B J, Ramachandran M, *et al.* Investigation of source-based scratch formation during oxide chemical mechanical planarization [J]. *Tribology Letters*, 2013, 50(2): 169-175.
- [14] Swain M V. Microfracture about scratches in brittle solids [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1979, 366(1727): 575-597.
- [15] Zhang Y T. *Theory of thermo-viscoelasticity* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002.
张义同. *热粘弹性理论* [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [16] Chen K H, Lambropoulos J C. Inverse topographic analysis of scratches [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5180: 29-39.
- [17] Choi J G, Prasad Y N, Kim I K, *et al.* The synergetic role of pores and grooves of the pad on the scratch formation during STI CMP [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2010, 157 (8): H806-H809.