

固结磨料抛光垫基体性能与加工性能的实验研究

李锁柱 朱永伟 李 军 樊吉龙 叶剑锋

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 采取不同基体性能的固结磨料抛光垫(FAP),在相同的化学机械抛光(CMP)参数下,研究了溶胀率和铅笔硬度等基体性能对 K9 光学玻璃加工时的材料去除率(MRR)和三维轮廓表面粗糙度(Sa)等加工性能的影响规律。结果表明,溶胀率和铅笔硬度两个基体性能指标共同影响着工件的 MRR 和表面粗糙度。随着基体溶胀率的增大,工件的 MRR 降低,而工件的表面粗糙度变大;随着湿态铅笔硬度的增加,工件的 MRR 也相应增大,而工件的表面粗糙度依据溶胀率的某一值呈现先增大后减小的趋势;同时亲水性 FAP 能对工件进行长时间持续稳定加工,可说明具有自修整功能。

关键词 光学制造; 固结磨料抛光垫; 基体性能; 加工性能; 自修整

中图分类号 TN05; TG74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.012201

Study on Matrix Properties and Machining Performance of Fixed-Abrasive Pad

Li Suozhu Zhu Yongwei Li Jun Fan Jilong Ye Jianfeng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract The relationship between different matrix of fixed abrasive pad(FAP) and the polishing performance of K9 glass is studied under the same chemical mechanical polishing process parameters. Swelling ratio and pencil hardness are selected to evaluate the matrix properties of FAP, and material removal rate (MRR) and 3D-profile surface roughness (Sa) are selected to evaluate machining performance of FAP. The results show that the swelling rate and the pencil hardness of the two substrates together influence the performance of the MRR and surface roughness of the sample. With increasing the swelling rate of matrix, the MRR of sample reduces, and the surface roughness of sample increases; with the increase of wet pencil hardness of the sample, the MRR will also increase accordingly, while the surface roughness of sample based on a value of the swelling rate increases at first and then decreases, and hydrophilic FAP can stand long-time steady processing, which demonstrates the self-conditioning capabilities.

Key words optical fabrication; fixed abrasive pad; matrix properties; process performance; self-conditioning

OCIS codes 220.5450; 160.2750

1 引言

近年来,随着光学与光电子技术的发展,K9 光学玻璃已在很多领域得到了广泛的应用,如用于光学和微系统材料,其表面粗糙度(Sa)对光学和微系统器件的性能具有十分重要的意义,同时,对其加工精度和表面质量也提出了极高的要求。传统光学加工方法已很难适应现代光学制造的需求。针对传统光学零件加工方法的不足,出现了很多先进光学制造方法,主要包括应力盘抛光^[1]、气囊抛光^[2]、磁流变抛光^[3]等确定性光学研抛技术。基于对超光滑表面加工的要求,固结磨料化学机械抛光技术(FA-CMP)也是在这种背景下发展起来的,它将输入变量集中在抛光垫身上,对抛光液和工件特征依赖较小,是一种将非确定性精密加工转化成半确定性精密加工的绿色加工技术^[4]。

收稿日期: 2010-08-09; **收到修改稿日期:** 2010-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(50905086)、江苏省自然科学基金(BK2010512)和南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010127)资助课题。

作者简介: 李锁柱(1979—),男,硕士研究生,主要从事固结磨料超精密抛光方面的研究。E-mail: sunlight_tch@sina.com

导师简介: 朱永伟(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事精密与超精密加工、纳米材料的制备与应用、表面工程等方面的研究。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn(通信联系人)

由于固结磨料研磨抛光代表了未来平坦化技术的发展方向,抛光垫的基体性能和加工性能研究受到重视,特别是提高其基体结合强度和研磨均匀性等。Choi 等^[5]采用亲水性聚合物制备抛光垫,实现固结磨料抛光垫(FAP)的自修正,维持其长时间的稳定抛光,用于塑料注射模的抛光加工时,表面粗糙度达到了纳米级水平。Kim 等^[6]采用亲水性聚合物与氧化铝磨料制备的自修正抛光垫,其粘弹性能优于传统的聚氨酯抛光垫,可长时间稳定抛光。朱永伟等^[7~9]开展了固结磨料抛光垫的制备工艺研究,并比较了亲水性固结磨料抛光垫与传统的游离磨料方法抛光硅片、手机面板玻璃、K9 光学玻璃等的性能研究。同时研究了一种 FAP 的图案优化制备方法,以单晶硅片作为加工对象,对比研究优化图案后的 FAP 加工性能以及与传统游离磨料抛光垫和未优化图案的 FAP 的加工性能。

对于固结磨料研磨抛光而言,虽然已有不少研究表明,FAP 的基体配方、磨料属性、突起图案属性及其分布规律等特性对工件的加工性能有重大的影响^[10,11]。但是由于目前针对 FAP 的性能评价指标尚不完善,所以关于 FAP 具体的基体性能对工件加工性能影响的研究还很少。本文主要从溶胀率和铅笔硬度入手,分析研究了亲水性 FAP 的基体性能对 K9 光学玻璃加工性能的影响。

2 实验设置

2.1 FAP 基体性能评价指标

为了定量表征亲水性 FAP 的基体特性,本文采用溶胀率和铅笔硬度这两个性能评价指标。

1) 溶胀率测定:为了表征亲水性 FAP 在水性抛光液环境下吸收水分子量的程度,将制备的试样放置到 40 °C 恒温水浴中浸泡,浸泡一段时间后取出并拭干其表面水珠,定义溶胀率为基体试样膜溶胀前后的相对质量变化量,即

$$Q = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 Q 为溶胀率, M_0 为溶胀前基体试样膜的质量, M_1 为溶胀后基体试样膜的质量。

2) 铅笔硬度测定:根据不同的状态,铅笔硬度测定包括干态铅笔硬度和湿态铅笔硬度。依据国标 GB/T 6739-1996《涂膜硬度铅笔测定方法》测定基体膜的干态铅笔硬度;将制备的试样放入 40 °C 的去离子水中溶胀,10 min 后取出并拭干表面水珠,类似方法测定基体膜的湿态铅笔硬度。依次使用 6B~6H(相对硬度值分别为-6~6)从软到硬共 13 个等级硬度的铅笔作为标尺,定义正好划破膜的那级铅笔的硬度作为 FAP 的硬度值。

2.2 实验条件

选用相同粒径和浓度的金刚石微粉(粒径 W 为 2.5~5 μm ,质量分数为 14%)作为磨料,制备 10 组不同性能基体配方的固结磨料抛光垫。根据溶胀率基本相同,再分为 4 组,其干态铅笔硬度均为 3H,湿态铅笔硬度发生变化,按照溶胀率从小到大依次排列如表 1 所示。对具有相同初始状态的 K9 光学玻璃进行研磨抛光试验,在相同研磨抛光工艺参数下,每个工件加工 20 min。

表 1 FAP 的基体性能

Table 1 FAP matrix properties

Group	Numbers	Wet pencil hardness	Swelling ratio /%
I	①	3B	1.31
	②	4B	1.34
	③	2B	1.37
II	④	3B	1.59
	⑤	5B	1.62
III	⑥	5B	2.14
	⑦	4B	2.15
	⑧	2B	2.17
IV	⑨	5B	2.63
	⑩	3B	2.65

2.3 加工性能评价

选取以工件材料去除率(MRR)和 S_a 作为评价 FAP 加工性能两个重要指标。其中,工件 MRR 采用精密电子天平(精度为 0.1 mg)称量抛光前、后工件的质量,并换算成厚度。其计算公式为

$$R_{MR} = \frac{(M_a - M_b)h}{M_a t} \times 10^6, \quad (2)$$

式中 M_a 和 M_b 分别为研磨抛光前、后工件的质量; t 为研磨抛光时间; h 为加工前工件初始厚度。三维轮廓 S_a 由美国 ADE MicroXAM 系统(精度为 0.01 nm)测得。其数值越小,说明工件表面质量越好。

3 结果与讨论

3.1 基体溶胀率对工件 MRR 的影响

在相同的加工条件下研抛 K9 光学玻璃,溶胀率变化对工件 MRR 的影响如图 1 所示。当 FAP 基体的湿态铅笔硬度相同时,随着溶胀率的升高,工件 MRR 呈下降趋势。这是因为:溶胀率越高,则意味着亲水性 FAP 的基体吸收水分子的能力越强,基体的有机高分子网络结构就越松散,粘结剂基体对金刚石磨料的把持能力越弱,磨料对工件的切削作用也就越弱;另一方面,由于在水性抛光液环境下,研磨液的化学成分作用促进工件表层形成一层软质层,在工件的正压力和剪切力作用下,一方面磨粒会下陷,并向后倾斜,出现类似于切削加工中的“让刀”现象。由理论分析知,随着溶胀率的增大,让刀现象更加显著,从而削弱了研磨抛光效率。

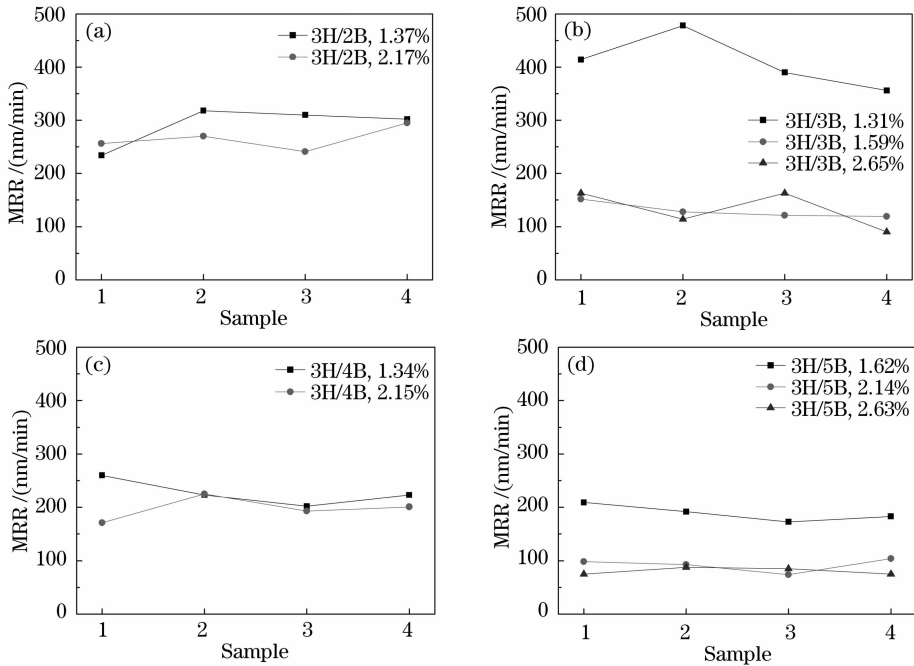


图 1 溶胀率变化对 MRR 的影响规律

Fig. 1 Relationship between swelling ratio and MRR

3.2 湿态铅笔硬度对工件 MRR 的影响

经选取 4 种不同溶胀率的 FAP,针对每种溶胀率的抛光垫,在一定的加工工艺参数下,所得湿态铅笔硬度变化对工件 MRR 的影响结果如图 2 所示。当溶胀率较低时[图 2(a),(b)],湿态铅笔硬度变化对工件 MRR 的影响不明显。此时基体的吸收水分子的能力较弱,溶胀过程较为缓慢。当湿态铅笔硬度越小时,即基体越软,磨粒越易于出刃和脱落,能时刻保持着锋利的状态,故促进材料的去除。但由于铅笔硬度与溶胀率变化的作用同时存在,共同起作用,且溶胀率的作用显然要大于铅笔硬度的作用,因而表现出的规律性不强。

当溶胀率较高时[2(c),(d)],随着铅笔硬度的增大,工件 MRR 增加,规律十分明晰。这是因为,随着基体铅笔硬度的提高,磨削过程中的“让刀”现象趋于微弱,基体对微米金刚石磨料的把持强度提高,FAP 表面参与磨削工作的磨料数量增加,从而使得工件 MRR 提高;同时,由于基体的硬度与耐磨性相关,FAP 的耐用度也同

时得到了显著的提高。由此可以看出 MRR 随两者的变化趋势:随着 FAP 基体湿态铅笔硬度的增加,MRR 也相应呈增大趋势;另外,随着 FAP 基体溶胀率的增大,MRR 呈现出逐渐降低的趋势。

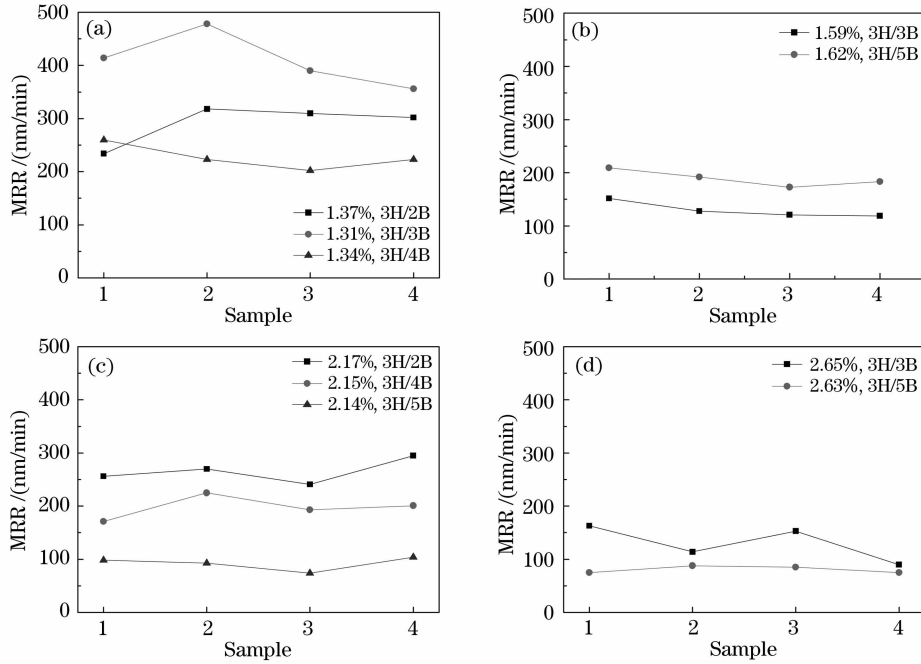


图 2 湿态铅笔硬度变化对 MRR 的影响规律

Fig. 2 Relationship between wet pencil hardness and MRR

3.3 溶胀率对 Sa 的影响

图 3 为在不同湿态铅笔硬度下,溶胀率变化对抛光 K9 光学玻璃后的 Sa 的影响规律。总体上看,Sa 随溶胀率的增大而变大。当 FAP 基体的湿态铅笔硬度较大时[图 3(a),(b)],由于基体粘结剂对磨粒的把持能力足够,在相同的湿态铅笔硬度值时,随着溶胀率的增加,工件 MRR 下降,Sa 呈现稍微增大的趋势;当 FAP 基体的湿态铅笔硬度较小时[图 3(c),(d)],由于基体粘结剂对磨粒的把持能力不足,在研磨抛光过程中,出现强烈的

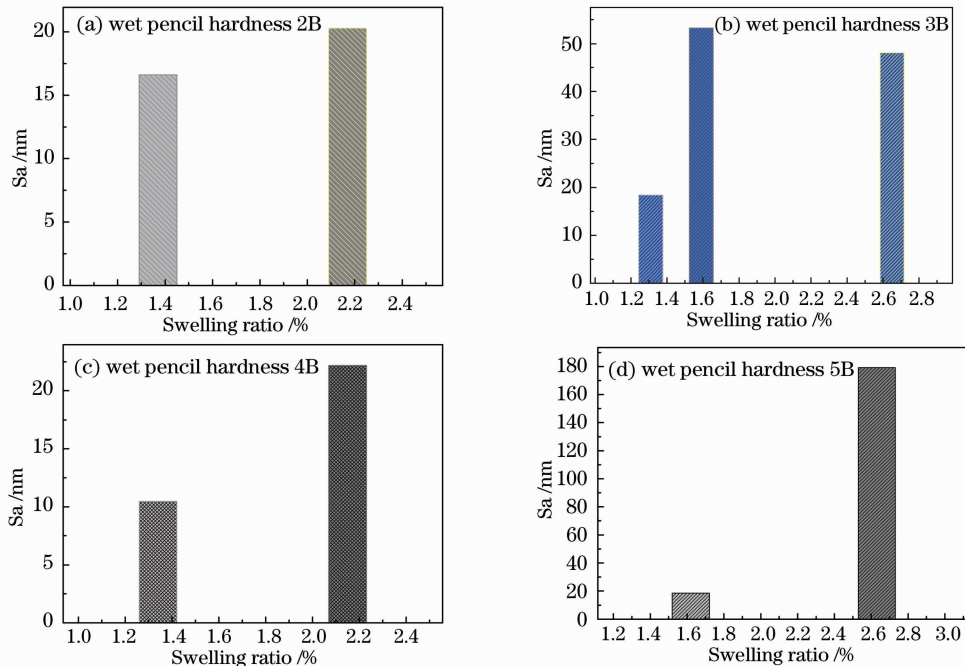


图 3 溶胀率变化对 Sa 的影响规律

Fig. 3 Relationship between swelling ratio and Sa

“让刀”现象,随着溶胀率的增加,MRR 将会大幅降低,导致前道加工工序中造成的损伤层无法有效去除,从而表现出随着溶胀率的增加,被加工工件的 Sa 明显增加。

3.4 湿态铅笔硬度对 Sa 的影响

图 4 在不同溶胀率下,湿态铅笔硬度变化对抛光 K9 光学玻璃后 Sa 的影响规律。当 FAP 基体的溶胀率较低时[图 4(a),(b)],随着铅笔硬度的提高,工件 Sa 增大。由于随着湿态铅笔硬度的降低,基体对磨粒的支持能力下降,“让刀”现象较为明显,不易产生粗大划痕,从而表现为工件 Sa 减小。当 FAP 基体的溶胀率较高时[图 4(c),(d)],随着铅笔硬度的提高,工件 Sa 下降。由于随着湿态铅笔硬度下降,基体对磨粒的支持强度也随之减小,势必会进一步导致 MRR 下降,导致上一工序的损伤层无法完全去除,工件 Sa 无法进一步提高。当 FAP 基体的溶胀率适中时[图 4(c)],湿态铅笔硬度对 Sa 的影响并不显著。

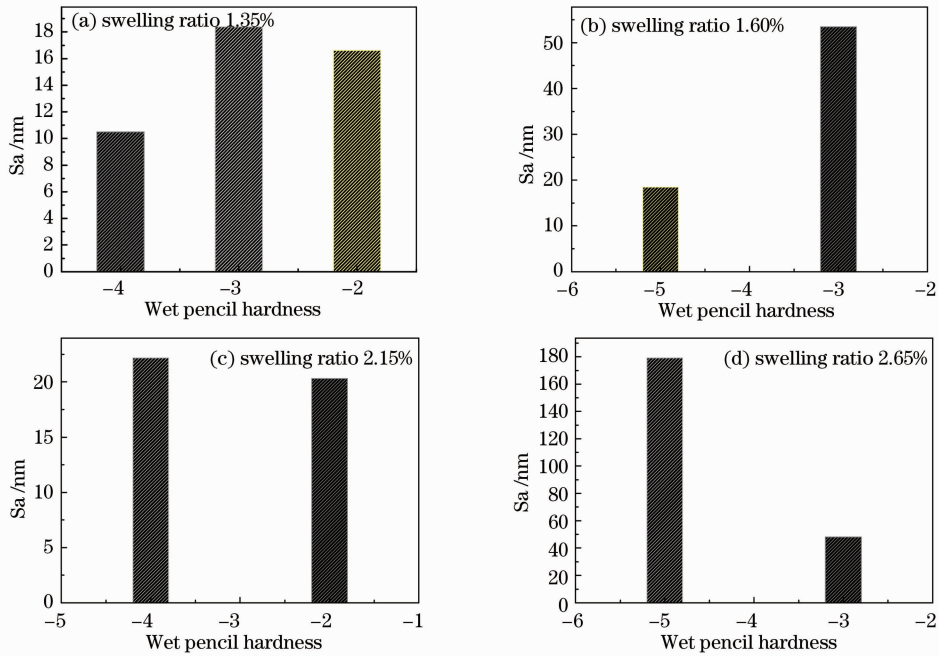


图 4 湿态铅笔硬度变化对 Sa 的影响规律

Fig. 4 Relationship between wet pencil hardness and Sa

3.5 亲水性 FAP 的自修整功能研究

采用亲水性 FAP 加工 K9 光学玻璃时,能对工件进行长时间持续稳定加工且无需对 FAP 进行修正,即具有自修整功能。宏观上,表现为长时间研磨抛光时 MRR 和 Sa 具备相当程度的稳定性。

3.5.1 长时间抛光的 MRR

采用各种不同基体配方的亲水性 FAP,分别对 K9 光学玻璃进行长时间精研试验,不同抛光时间段的 MRR 如图 5 所示。为了表征 FAP 长时间抛光 MRR 的稳定性,定义 Δ_i 为在所研究的加工时间段里每个 FAP 对工件去除率的相对变化量,若 Δ_i 越小则表示该亲水性 FAP 长时间加工工件的 MRR 稳定性越好,即

$$\Delta_i = \frac{R_{MR-max} - R_{MR-min}}{\bar{R}_{MR}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 R_{MR-max} 为加工时间段里最大 MRR, R_{MR-min} 为加工时间段里最小 MRR, \bar{R}_{MR} 为加工时间段里的平均 MRR。

图 6 是由(3)式得到各 FAP 对 K9 光学玻璃去除率的相对变化量的影响,可以很清楚地看出各种基体配方

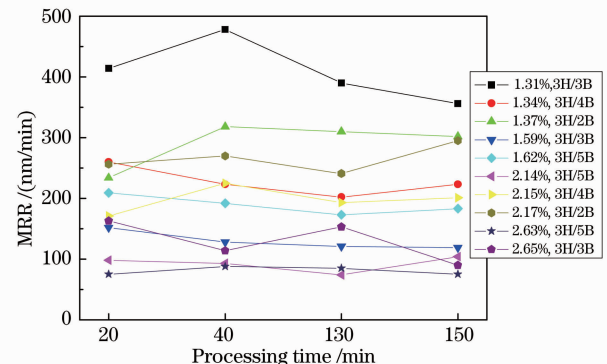


图 5 不同抛光时间段工件的 MRR

Fig. 5 MRR of K9 at different polishing time

的 FAP 加工 K9 光学玻璃时的自修整性能,其中①~⑨号 FAP 的 Δ_i 均在 30%左右,⑤号、⑧号和⑨号的 Δ_i 甚至在 20%以下,说明用 FAP 抛光 K9 玻璃时,具备相当程度的自修整功能。而⑩号 FAP 长时间加工 K9 玻璃时 MRR 相对变化率较大,可以认为不具备理想的自修整功能,这是因为⑩号 FAP 的溶胀率过大铅笔硬度过小,在水性抛光液环境下,基体对磨料的把持能力大幅显著下降,在工作过程中不足以支持磨粒对工件的微切削作用。

3.5.2 长时间抛光的 Sa

图 7 为不同时间段内,FAP 长时间抛光 K9 光学玻璃的 Sa。对于②~⑧号 FAP 而言,即当溶胀率适中时,抛光 90 min 后的 K9 玻璃的 Sa 与抛光 20 min 时相差不大。也说明这些基体配方的 FAP 具有较好自修整功能,即对工件长时间抛光的 Sa 具有稳定性。溶胀率最小的①号 FAP 与最大的⑩号 FAP 的自修整性能比较微弱。这可能是因为当溶胀率太小时,在抛光过程中不易发生“让刀”现象,从而可能造成工件表面比较粗大的划痕;而当溶胀率太大,且湿态铅笔硬度过小,如⑨号抛光后的工件表面形貌,此时 MRR 很小,当对 K9 光学玻璃抛光 20 min 后,可能抛光的时间太短,上道工序所造成的切割损伤层还来不及完全去除,抛光 90 min 后,Sa 比 20 min 稍小,但仍相对其他的样品要大,说明由于 MRR 太低下,加工 90 min 仍未能使得切割损伤层完全去除,从而表现出被抛工件的 Sa 比溶胀率较小时的 Sa 要更大。

4 结 论

本文从溶胀率和铅笔硬度入手,研究了亲水性 FAP 的基体性能对 K9 光学玻璃加工性能的影响。通过实验研究发现,随着 FAP 基体溶胀率的增大,MRR 呈现出逐渐降低的趋势;随着 FAP 基体湿态铅笔硬度的增加,MRR 也相应呈增大趋势。FAP 基体的溶胀率和铅笔硬度都影响着工件的表面粗糙度,随着溶胀率的增大而变大。当溶胀率较小时(小于 2.15%),Sa 随着湿态铅笔硬度的升高而增大;当溶胀率较大时(大于 2.15%),Sa 随着湿态铅笔硬度升高而减少。当溶胀率适中时,制备出的亲水性 FAP 能对 K9 光学玻璃实现长时间稳定抛光,说明亲水性 FAP 具有良好的自修整功能。

参 考 文 献

- 1 Fan Bin, Wan Yongjian, Chen Wei *et al.*. Manufacturing features comparing between computer control active-lap and computer control optical surface for large aspherical optics[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 128~132
范斌,万勇建,陈伟等. 能动磨盘加工与数控加工特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 128~132
- 2 Zhang Wei, Li Hongyu, Yu Guoyu. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 27~34
张伟,李洪玉,于国彧. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 27~34
- 3 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by gag netorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 198~205
戴一帆,石峰,彭小强等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 198~205
- 4 Yuan Julong, Wang Zhiwei, Wen Donghui *et al.*. Review of the current situation of ultra-precision machining[J]. *Chinese J.*

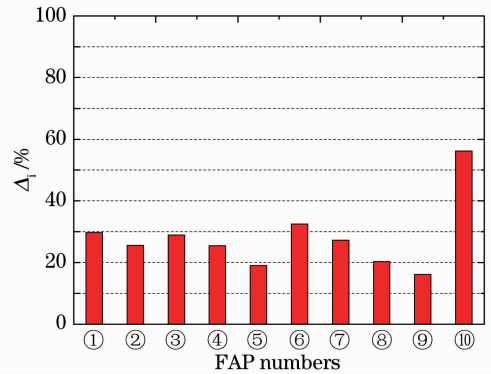


图 6 FAP 抛光 K9 玻璃 MRR 的相对变化量
Fig. 6 MRR variation of K9 after polishing

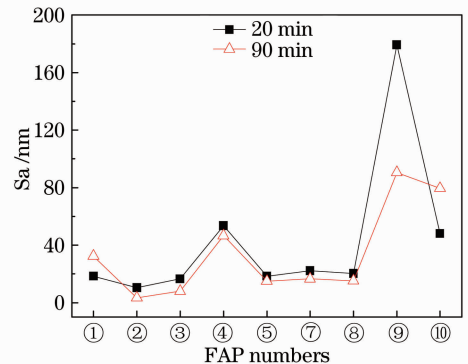


图 7 抛光不同时间后 K9 玻璃的表面粗糙度
Fig. 7 Surface roughness of K9 at different polishing time

- Mechanical Engineering, 2007, **43**(1): 35~48
- 袁巨龙,王志伟,文东辉等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报, 2007, **43**(1): 35~48
- 5 J. Y. Choi, H. D. Jeong. A study on polishing of molds using hydrophilic abrasive pad[J]. *Intl. J. Mach. Tools Manufac.*, 2004, (44): 1163~1169
- 6 H. Kim, B. Park, S. Lee *et al.*. Self-conditioning fixed abrasive pad in CMP[J]. *J. Electrochemical Society*, 2004, **151**(12): 858~862
- 7 Zhu Yongwei, Wang Jun, Li Jun *et al.*. Research on the polishing of silicon wafer by fixed abrasive pad[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, **20**(6): 723~727
- 朱永伟,王 军,李 军等. 固结磨料抛光垫抛光硅片的探索研究[J]. 中国机械工程, 2009, **20**(6): 723~727
- 8 Wang Jun, Li Jun, Zhu Yongwei *et al.*. Experimental study on polishing of mobile phone panel glass with unfixed-abrasive and fixed-abrasive pad[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2009, (2): 13~17
- 王 军,李 军,朱永伟等. 游离和固结金刚石磨料抛光手机面板玻璃的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, (2): 13~17
- 9 Lin Kui, Zhu Yongwei, Li Jun *et al.*. Experimental study on polishing technology of K9 optical glass with fixed abrasive pad[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041603
- 林 魁,朱永伟,李 军等. 固结磨料抛光 K9 光学玻璃的工艺实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 041603
- 10 Wei Xin, Xiong Wei, Huang Ruiwei *et al.*. Study on the performances of polishing pad in chemical-mechanical polishing[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2004, (5): 40~43
- 魏 昕,熊 伟,黄蕊慰等. 化学机械抛光中抛光垫的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004, (5): 40~43
- 11 Li Mao. Pattern Optimization and Performance Evaluation of Fixed Abrasive Pad[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. 18~23
- 李 茂. 固结磨料抛光垫图案优化及抛光垫性能评价[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010. 18~23