

doi: 10.3788/lop47.041603

固结磨料抛光 K9 光学玻璃的工艺实验研究

林 魁 朱永伟 李 军 李 茂 李锁柱

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 采用一种亲水性固结磨料抛光垫(FAP), 通过单因素实验法, 系统地研究了抛光 K9 光学玻璃过程中抛光时间、偏心距、压力、转速、抛光液流量及 pH 值等工艺参数对材料去除速率(MRR)和表面粗糙度的影响规律, 并对实验结果进行了解释。结果表明: 随着抛光时间的延长, K9 光学玻璃的 MRR 逐渐呈下降趋势; 在抛光 20 min 时, MRR 达最大值 310 nm/min, 且表面粗糙度降至最低值为 2.73 nm; 选择较大的偏心距和碱性抛光液环境均有利于提高 MRR; 随着抛光盘转速的升高, MRR 将显著增大。而在一定范围内, 抛光压力和抛光液流量对 MRR 的影响不大。

关键词 K9 光学玻璃; 固结磨料抛光垫; 抛光工艺; 单因素实验

中图分类号 TN05;TG74 OCIS 160.2750 220.5450 文献标识码 A

Experimental Study on Polishing Technology of K9 Optical Glass with Fixed Abrasive Pad

Lin Kui Zhu Yongwei Li Jun Li Mao Li Suozhu

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

Abstract A new hydrophilic fixed abrasive polishing pad (FAP) was studied. Single factor experiment method was employed to explore the effect of polishing parameters such as polishing time, eccentricity, pressure, rotational speed, flow rate and pH value of slurry with FAP on material removal rate (MRR) and surface roughness of K9 optical glass. Results show that MRR drops with time extension. After 20 min polishing, MRR reaches a maximum of 310 nm/min and surface roughness reaches a minimum of 2.73 nm. Large eccentricity distance and alkaline slurry are helpful to improve MRR. With the increase of rotational speed, MRR rises significantly. While in certain range, applied pressure and slurry flow rate have little effect on MRR.

Key words K9 optical glass; fixed abrasive pad; polishing parameter; single factor experiment

1 引 言

随着国防工业和尖端技术的飞速发展, 对脆性材料(如光学玻璃、陶瓷等)的超精密加工需求日益增多, 而化学机械抛光(CMP)是获得精密光学器件的最终加工手段和有效方法^[1]。20 世纪 60 年代之前, 光学玻璃的抛光加工技术一直使用低速的散粒磨料抛光, 主要采用水和抛光粉及添加剂组成的抛光液进行抛光^[2]。到 20 世纪 80 年代初期, 出现了聚氨酯高速抛光材料。在光学玻璃抛光工艺中, 国内外又采用稀土抛光粉对其进行研磨抛光, 使玻璃的表面加工精度得到很大改善。但大部分方法都是基于游离磨料抛光液, 虽然效果显著, 但易造成不必要的浪费以及环境污染^[3]。于是, 固结磨料研磨抛光(FAP)技术应运而生, 它具有

收稿日期: 2009-07-08; 收到修改稿日期: 2009-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(50675104)、江苏省六大人才高峰基金(06-D-024)和江苏省精密与微细加工重点实验室基金(JSPM200707)资助课题。

作者简介: 林 魁(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事精密与超精密加工等方面的研究。E-mail: linkui555@163.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、表现工程等方面的研究。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn (通信联系人)

磨粒利用率高、对环境友好、材料去除率合理、被加工工件表面质量易于控制等优点,越来越受到关注^[4]。

朱永伟等^[5,6]提出了以溶胀率和铅笔硬度作为衡量 FAP 基体性能的标准,探索了基体各化学成分对其性能的影响规律,并应用于对硅片进行抛光实验,发现抛光效率是游离磨料抛光的 2~3 倍;又对比研究了固结和游离金刚石磨料抛光手机面板玻璃,发现使用固结磨料抛光垫能获得更优质的表面质量,表面粗糙度约 1.5 nm,且相比游离磨料抛光而言,固结磨料抛光获得的表面质量对磨料粒径大小的依赖性较小。本文以工件的材料去除速率(MRR)和表面粗糙度作为衡量抛光性能的标准,探索了固结磨料抛光 K9 光学玻璃时各工艺参数对抛光性能的影响规律。其中,MRR 由赛多利斯 BS223S 型精密分析天平(精度为 0.1 mg)称量工件加工前后的质量经计算而得,表面形貌经 MITUTOYO 测量显微镜测得,表面粗糙度 Sa 及三维轮廓形貌使用 ADE MicroXAM(精度为 0.01 nm)测得。

2 实验

图 1 为实验中所使用的抛光实验平台,其中(a)为长春理工大学开发研制的 PHL-350 型平面高速研磨抛光系统,(b)为在该系统下的抛光原理图。工件夹持压头为被动旋转式,即工件本身绕压头轴并不主动旋转,当电机驱动工作台旋转时,由于工件与抛光垫两者间的摩擦力沿径向分布不同,经摩擦力差带动着工件随着工作同向旋转。

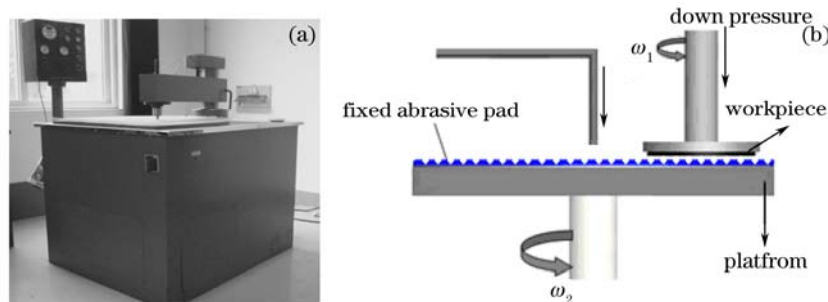


图1 抛光实验平台。(a)PHL-350 型平面高速研磨抛光系统;(b)抛光原理示意图

Fig.1 Polishing system diagram. (a) PHL-350 plane high speed lapping and polishing system; (b) schematic diagram

抛光垫是 CMP 系统的重要组成部分。在 CMP 过程中,抛光垫具有贮存抛光液并把它们运送到工件的整个加工区域,维持抛光所需的机械和化学环境,传递材料去除所需的机械载荷等作用^[7]。因此,合理地选择及使用抛光垫对控制和优化 CMP 过程,实现高效、高质、低成本的 CMP 加工具有重要意义。

本实验中采用的研磨抛光垫是一种以 5~10 μm 金刚石微粒作为磨料、光固化树脂作为基体、经由紫外(UV)固化制备而成的新型亲水性 FAP。其表面具有正方小突起阵列结构,如图 2 所示(突起尺寸为 2 mm \times 2 mm \times 0.5 mm,间距为 1 mm),沟槽便于输送抛光液和排泄抛光产物。

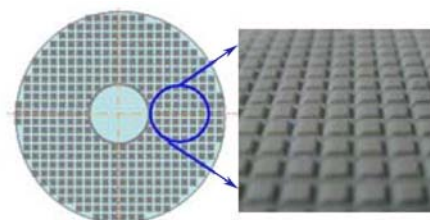


图 2 FAP 及其表面结构

Fig.2 FAP and its surface structure

由于实验中使用含有磨粒的 FAP 作为研磨抛光工具,抛光液中就不含有磨粒,甚至采用去离子水即可,省去了传统游离磨料抛光中抛光浆料和悬浮微粒的处理,以及 pH 值的变化造成磨料性能不稳定及沉淀等问题,简化了整个抛光过程,且不存在抛光液对环境的污染问题,具有绿色环保的作用^[8]。本实验中使用

的抛光液仅由去离子水和乙二胺混合而成，其中乙二胺用于调节抛光液的 pH 值。

选用在光学材料中具有典型代表意义的 K9 光学玻璃(直径为 75 mm 的圆片)作为抛光对象。K9 玻璃初始毛片由经金刚石外圆锯片切割而成，表面存在着微米级的切割损伤层，故在抛光前统一对所有的工件进行研磨预处理，去除由切割引起的表面损伤，并提高平面度。经研磨预处理后，K9 玻璃表面形貌和三维(3D)轮廓形貌分别如图 3，图 4 所示，表面粗糙度 S_a 为 414 nm。



图 3 抛光前 K9 玻璃表面形貌($\times 1500$)
Fig.3 Morphology of K9 glass before polishing ($\times 1500$)

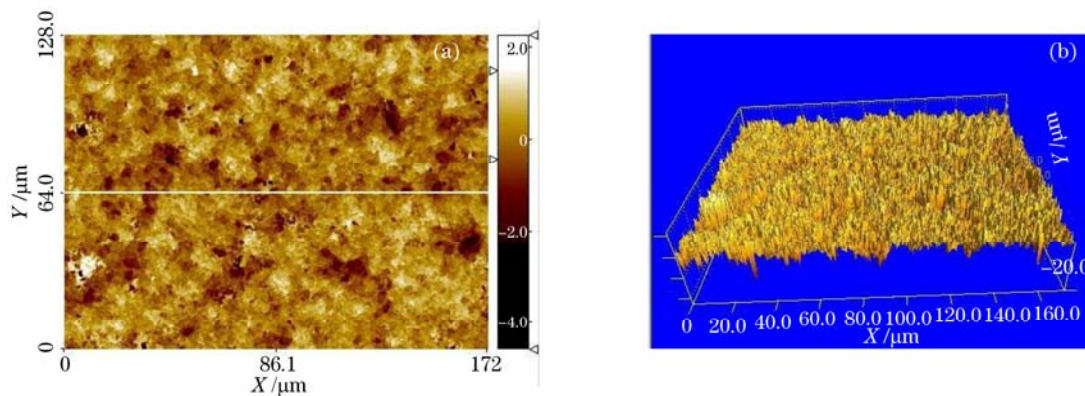


图 4 抛光前 K9 玻璃表面粗糙度(a)和三维轮廓形貌(b)
Fig.4 Surface roughness (a) and 3D topography of (b) K9 glass before polishing

首先，研究了不同抛光时间下工件的平均 MRR 和表面粗糙度，从而确定合适的抛光时间；然后，采用单因素实验法，分别研究了偏心距、抛光压力、抛光盘转速、抛光液流量和 pH 值等抛光参数对 MRR 的影响规律。

3 结果与讨论

3.1 抛光时间

在抛光工艺中，时间参数决定实际抛光效率。对于光学玻璃表面的抛光加工，旨在去除研磨过程中产生的损伤和加工变质层，以减小表面粗糙度，获得表面质量较高的工件。实验中采用的 CMP 工艺参数如表 1 所示，只考虑抛光时间对 MRR 和表面粗糙度的影响，分别取 5 块 K9 玻璃抛光 10, 20, 30, 45 和 60 min，实验结果如图 5 所示。

表 1 CMP 工艺参数
Table 1 Parameters of CMP

Conditions	Parameters or description
Polishing speed /(r/min)	150
Polishing pressure /MPa	0.075
Ph	10.5
Flow /(ml/min)	45
Eccentricity distance /mm	55

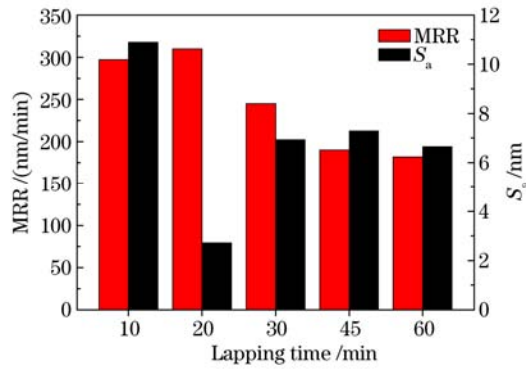


图5 不同抛光时间下的 MRR 和 S_a
Fig.5 MRR and S_a of different polishing times



图6 抛光 20 min 后 K9 玻璃表面形貌($\times 1500$)
Fig.6 Morphology of K9 glass after 20 min polishing ($\times 1500$)

根据实验结果可见,在抛光初始阶段,工件与抛光垫尚处于磨合状态,在抛光 20 min 时平均 MRR 达最大值 310 nm/min,之后 MRR 将逐渐降低。这是由于随着加工的进行,工件表面越来越光滑,与 FAP 两者间的摩擦作用逐渐减小,使得抛光效率逐渐降低。从被抛工件表面粗糙度方面可以看出,若抛光时间太短,工件表层材料的去除还没能完全改变上一道工序造成的损伤和变质层,表面质量达不到理想状态;抛光 20 min 后表面粗糙度将降至最小值 2.73 nm,此时的表面形貌和三维轮廓形貌分别如图 6,图 7 所示,较之抛光前的工件表面质量,有很大程度的提高;之后随着抛光时间的延长,表面质量并不会提高,甚至稍有恶化,并将趋向某一稳定值,这是因为长时间抛光时抛光液中化学成分的腐蚀作用将破坏工作表面质量。故为提高资源利用效率,减少浪费,节省时间,对工艺参数研究的抛光实验均取抛光时间 20 min。

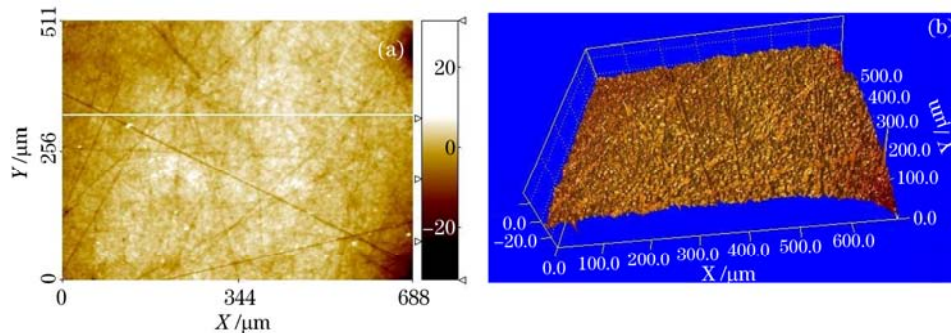


图7 抛光 20 min 后 K9 玻璃表面粗糙度(a)和三维轮廓形貌(b)
Fig.7 Surface roughness (a) and three dimensional topography (b) of K9 glass after polishing

3.2 抛光工艺参数

在表 1 所示的抛光工艺参数基础上,分别取偏心距为 55 mm 和 80 mm,其他参数均不变,经抛光 20 min 后,得到两种不同偏心距下的 MRR,如图 8 所示。实验结果表明,偏心距对 MRR 有很大影响,选择较大的偏心距能够有效提高抛光效率。当偏心距增大时,工件相对抛光垫的线速度将增大,同时摩擦力也迅速增大,从而表现出抛光效率显著增大。由于条件的限制,要使得工件平稳运行,偏心距只能在某一特定的范围内变化,而不能为追求高的抛光效率一味地增大偏心距。

分别取抛光压力为 0.025, 0.050, 0.075 和 0.100 MPa,其他参数均不变,经抛光 20 min 后,得到不同压力下的 MRR,如图 9 所示。实验结果表明:随着抛光压力的增大,工件的 MRR 将相应地增大,这是因为增大压力将导致抛光垫和工件间的摩擦力增大,即磨粒对工件的微切削作用增大,从而提高了抛光效率。这与传统的游离磨料抛光中普雷斯顿方程基本吻合,但也不尽相同。采用固结磨料抛光时,提高压力对抛光效率的影响并不大,而在游离磨料抛光时,当压力增大,抛光效率也迅速提高。

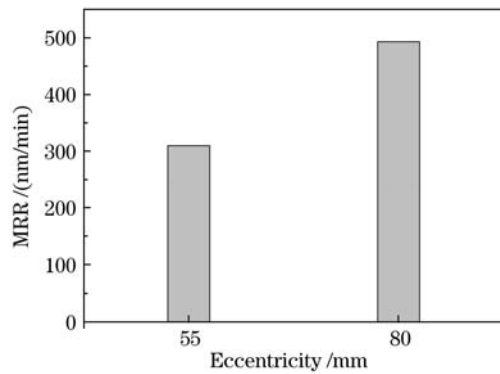


图 8 不同偏心距下的抛光速率
Fig.8 MRR of different eccentricity

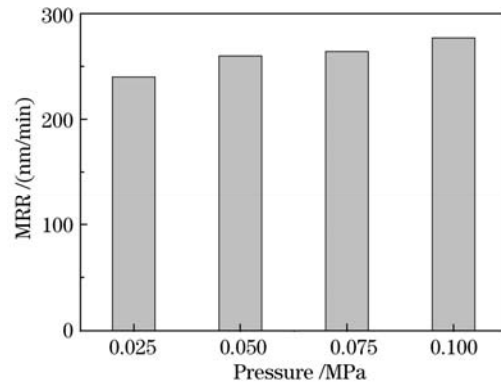


图 9 不同压力下的抛光速率
Fig.9 MRR under different pressures

分别取转速为 97, 150 和 234 r/min, 其他参数均不变, 经抛光 20 min 后, 得到不同转速下的 MRR 如图 10 所示。实验结果表明, 适当提高抛光盘的转速, 工件的 MRR 随之迅速增大, 这也和经典的普雷斯顿方程相吻合。且相对于压力而言, 转速对 MRR 的影响更加显著, 故增大抛光盘的转速是一种有效提高抛光效率的途径。由于机床刚度的限制, 实际选择的转速也不宜过大。

改变抛光液的流量, 分别取 15, 30 和 45 ml/min, 其他参数均不变, 经抛光 20 min 后, 得到不同流量下的 MRR 如图 11 所示。实验结果表明, 当抛光液流量在 15~45 ml 的范围内, 工件的 MRR 随着抛光液流量的增大将缓慢增大。这是因为使用的是亲水性 FAP, 适当增大抛光液的流量时, 一方面会使 FAP 基体充分和水分子接触, 促进基体吸水溶胀, 使抛光垫表层参与微切削的磨粒磨钝后能适时脱落, 以及新的锋利磨粒适时出露, 保证工作时的磨粒始终足够锋利, 且能够及时带走抛光产物和残余碎屑, 从而提高抛光效率; 另一方面, 增大抛光液流量将会带走工件和抛光垫间摩擦产生的热量, 降低了抛光环境的温度, 从而削弱了抛光液中的化学成分对 K9 玻璃的作用, 不利于提高抛光效率。故抛光液流量对 MRR 的影响不大。但抛光液流量不宜过低, 当抛光垫表面出现干涸状态时, 抛光过程中会产生尖锐的噪声。

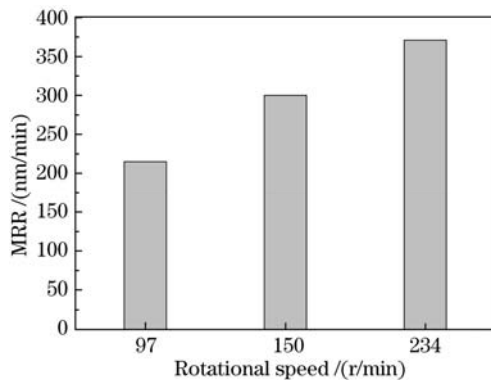


图 10 不同转速下的抛光速率
Fig.10 MRR at different rotational speeds

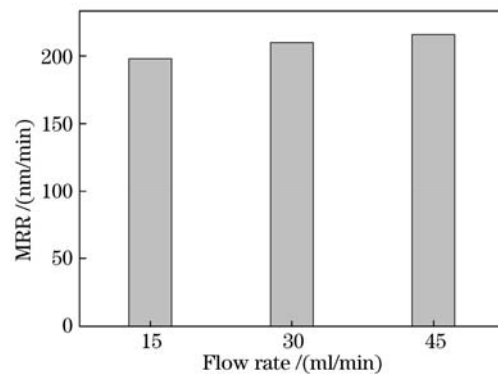


图 11 不同流量下的抛光速率
Fig.11 MRR of different flow rates

改变抛光液的 pH 值, 分别取 pH 为 7, 9, 10.5, 12, 其他参数均不变, 经抛光 20 min 后, 得到不同 pH 值下的 MRR 如图 12 所示。实验结果表明, 当 pH 为 7 时, 抛光效率较低; 当 pH 为 9 时, 抛光效率显著升高; 当 pH 升高到 10.5 和 12 时, 抛光效率变化不大。这是因为在碱性抛光液的化学作用下, K9 玻璃表面将更容易形成一层软化层, 继而在抛光垫的机械作用下更容易被去除。故当 pH<9 时, 制约抛光效率的主要环节是化学作用; 而当 pH>9 时, 化学作用已经达到饱和, 制约抛光效率的主要环节则是机械作用。

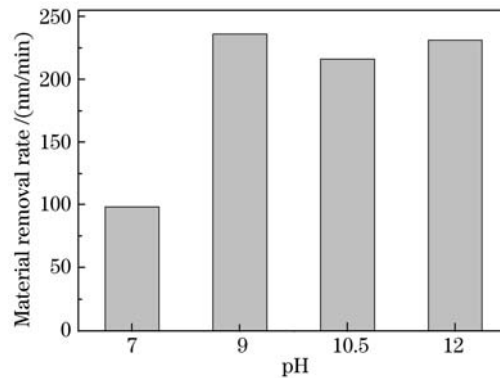


图 12 不同 pH 值下的抛光速率
Fig.12 MRR of different pH value

4 结 论

固体磨料研磨抛光技术作为新一代加工技术,具有多种优点,受到学术界和业界的广泛关注。探究基体各化学成分对其性能的影响规律,有利于完善和提高固体抛光技术的加工质量。本文通过单因素实验法,系统研究了亲水性固结磨料抛光垫加工 K9 光学玻璃时各工艺参数对抛光性能的影响规律。该研究结果可应用于光学加工产业,对光学玻璃的加工工艺具有一定的指导性意义。

参 考 文 献

- Yuan Julong, Wang Zhiwei, Wen Donghui *et al.*. Review of the current situation of ultra-precision machining[J]. *Chinese J. 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
- Wang Xiankui, Tang liying, Cheng Jinshu. Grinding technology with abrasive belt[J]. *China Mechanical Engineering*, 1991, **2**(6):33
王先逵, 汤李缨, 程金树. 砂带磨削技术[J]. *中国机械工程*, 1991, **2**(6):33
- Zhao Yanling, Xiang Jingzhong, Gu Yuwu. Study on polishing mechanism of grinding film[J]. *Journal Harbin Univ. Sci & Tech.*, 2007, **12**(1): 114~117
赵彦玲, 向敬忠, 顾玉武. 硼硅玻璃薄膜的抛光工艺[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2007, **12**(1): 114~117
- Zhang Kunling. Overview the machining technology of hard and brittle materials[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2008, (5): 1~6
张坤领. 硬脆材料加工技术发展现状[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2008, (5): 1~6
- 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
- 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
- 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
- Du Hongwei. Study on Chemical Mechanical Polishing of Tantalum Lithium Crystal Wafer[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2004. 6~7
杜宏伟. 光电子材料钽酸锂晶片化学机械抛光过程研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2004. 6~7