

玻璃材料高速抛光用固着磨料磨具试验研究

林旺票¹, 王洁^{1,2}, 杭伟¹, 吴喆³, 邓乾发¹, 袁巨龙¹

(1. 浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;
2. 杭州职业技术学院 友嘉机电学院, 杭州 310018; 3. 合肥工业大学 机械工程系, 安徽 宣城 242000)

摘要: **目的** 实现玻璃材料的高效高质量低成本抛光。**方法** 选择不同添加剂作为辅料制作固着磨料抛光磨具, 阐明制作工艺、添加剂辅料配方及比例、固着磨料磨具对材料硬度、剪切强度等性能的影响。以工件材料去除率、表面质量以及磨耗比等作为评价指标分析不同添加剂辅料对加工效果的影响, 并通过等效系数优化方法确定添加剂辅料的最优配方。**结果** 碳化硅与钼酸铵可增加磨具的硬度和剪切强度, 磨具中加入适量氧化铝可有效提高工件表面质量。**结论** 固着磨料抛光磨具的添加剂辅料最优配方为: 10.6% (质量分数) 4000# Al_2O_3 和 2% (质量分数) 10000# SiC 。

关键词: 玻璃; 固着磨料; 磨具; 抛光

中图分类号: TG175; TG74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)04-0141-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.04.026

Experimental Research on Fixed Abrasives and Abrasive Tools for High-speed Polishing of Glass Material

LIN Wang-piao¹, WANG Jie^{1,2}, HANG Wei¹, WU Zhe³, DENG Qian-fa¹, YUAN Ju-long¹

(1. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Precision Technology of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Fair Friend Institute of Electromechanics, Hangzhou Vocational & Technical College, Hangzhou 310018, China; 3. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Xuancheng 242000, China)

ABSTRACT: **Objective** To achieve high-quality, low-cost and efficient polishing of glass material. **Methods** Different additives were selected as auxiliary ingredients to prepare polishing abrasive tools with fixed abrasives, and the effects of production process, the formula and proportion of additive materials, the fixed abrasives and abrasive tools on the material hardness and shear strength were illustrated. The material removal rate, surface quality and wear ratio of the workpiece were used as evaluation indexes to analyze the effects of different additive auxiliary materials on the processing results. And the optimal formula of additive auxiliary material was determined by the equivalent coefficient method. **Results** The hardness and shear strength of the abrasive tool could be increased by silicon carbide and ammonium molybdate. The surface quality of workpiece could be effectively improved by addition of

收稿日期: 2014-11-10; 修订日期: 2015-01-23

Received: 2014-11-10; Revised: 2015-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(512280052); 浙江省教育厅科研项目(Y201326972)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(512280052) and Education Department Research of Zhejiang Province(Y201326972)

作者简介: 林旺票(1988—), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要从事玻璃、蓝宝石等材料的超精密加工研究。

Biography: LIN Wang-piao(1988—), Male, from Zhejiang, Master graduate student, Research focus: ultra-precision machining of glass, sapphire and other materials.

通讯作者: 袁巨龙(1962—), 男, 浙江人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超精密加工技术及特种装备。

Corresponding author: YUAN Ju-long(1962—), Male, from Zhejiang, Professor, Ph.D. supervisor, Research focus: ultra-precision processing technology and special equipment.

appropriate amount of Al_2O_3 into the abrasives tool. **Conclusion** The optimal formula of additive for fixed-abrasive polishing was 4000# Al_2O_3 (10.6%) with 10000# SiC (2%).

KEY WORDS: glass; fixed abrasive; abrasive tool; polishing

光学玻璃、人造水晶等玻璃类材料在通信设备显示、饰品精饰等行业领域的应用日趋广泛,如何实现玻璃类材料的高效、高表面质量、低成本抛光并将其应用于批量化生产是当前玻璃材料抛光应用领域研究热点^[1-4]。固着磨料高速抛光是将游离的磨料用结合剂或者烧结等方法固结起来,制成专用磨具,在高速研磨机上进行研磨抛光的新方法^[5-9]。固着磨料抛光不同于传统的游离磨料抛光方法,是依赖于固着在磨具中的磨料去完成抛光任务,在抛光过程中,抛光液不需要添加抛光粉,具有磨料利用率高、加工效率高、成本低和环境污染小等优点,但是同样也存在固着磨具磨损大、工件表面划痕损伤等问题。因此,如何提高工件表面质量及磨具利用率,减少磨具磨损量至关重要^[10-12]。

本文选择不同添加剂作为辅料,制作不同添加剂辅料配方的固着磨料磨具。对不同配方方案磨具的硬度、剪切强度等材料性能进行测试,并基于所制作的固着磨料抛光磨具进行平板玻璃高速抛光实验。以工件材料去除率、表面质量以及磨耗比等为评价指标,分析不同添加剂辅料对磨具加工性能的影响,并通过等效系数优化方法确定最优的添加剂辅料配方及比例。

1 固着磨料磨具制作及性能

固着磨具主要成分为磨料、结合剂和辅料等(见表1)。磨料起到研磨抛光工件的作用,结合剂使磨料和其他辅料粘结,并使磨具固结具有一定的形状,辅料则可以提高固着磨具的特殊性能。

表 1 固着磨粒磨具成分及功能
Tab.1 Formula and function of fixed abrasive and abrasive tool

原材料	成分	功能
磨料	稀土抛光粉 ^[13-15]	研磨、抛光工件
结合剂	不饱和树脂 ^[16]	固结磨料
造孔剂	硫酸镁	容屑,冷却
固化剂	过氧化钾	提高磨具硬度
催化剂	环烷酸钴	促进固化剂粘结
导热剂	碳化硅	吸收热量
活性抛光剂	钼酸铵	增加磨具抛光特性
混合磨粒	氧化铝	增加去除作用

固着磨具是用磨料和结合剂等辅料按一定形状和尺寸粘结而成的用于抛光的工具,其制作工艺流程有配混料、成形、干燥、整形等,步骤如图1所示。

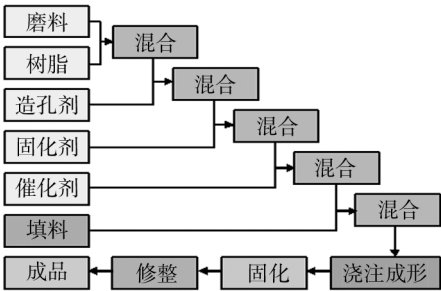


图 1 磨具制作工艺流程
Fig.1 Abrasive tool production process

根据传统经验设计树脂磨具的配方,固着磨具配方(以质量分数计)见表2^[17]。

表 2 磨具配方
Tab.2 Abrasive tool formula

方案	磨料	造孔剂	树脂	固化剂	催化 剂	4000# Al_2O_3	10000# SiC	钼酸 铵
一	55	22	22	0.52	0.52	0	0	0
二	44	22	22	0.52	0.52	11	0	0
三	53	22	22	0.52	0.52	0	2	0
四	53	22	22	0.52	0.52	0	0	2
五	42.4	22	22	0.52	0.52	10.6	2	0
六	42.4	22	22	0.52	0.52	10.6	0	2

磨具的硬度是检验磨具性能的重要指标之一,因此,本实验选取邵氏硬度计 D 型来测量各组磨具的硬度。根据表 2 所采用的磨具制作配方,采用五点法多次测量取平均值,测量结果如图 2 所示。由图 2 可见,与方案一的磨具相比,加入钼酸铵粉末可以增加磨具的硬度,加入碳化硅粉末可以使磨具的硬度值达到最大,而加入氧化铝粉末会降低磨具的硬度。向磨具中同时添加碳化硅和氧化铝、钼酸铵和氧化铝粉末两种粉末,磨具的硬度比原始磨具硬度高。

磨具的剪切强度也是检验磨具性能的重要指标之一,它可以直接反应加工工件时磨具的磨损效果,因此本实验在 RGM-4000 型号微机控制电子万能试验机设计了专用夹具检测磨具的剪切强度。由图 3

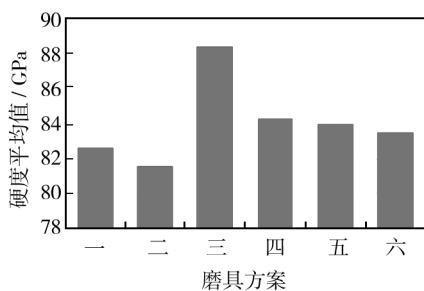


图2 磨具硬度值与磨具方案关系

Fig.2 Relationship between hardness of abrasive tool and abrasive tool

可见,方案一相比,加入钼酸铵粉末可以增加磨具的剪切强度,加入碳化硅粉末磨具的剪切强度达到最大,加入氧化铝粉末会降低磨具的剪切强度。向磨具中同时添加碳化硅和氧化铝、钼酸铵和氧化铝粉末两种粉末,磨具的剪切强度比原始磨具剪切强度高。

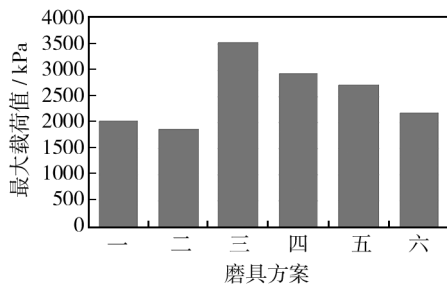


图3 磨具最大剪切载荷值与磨具方案关系

Fig.3 Relationship between maximum shear load of abrasive tool and abrasive tool

2 试验

固结磨料研抛技术是研磨抛光的发展趋势,具有优越的平坦化效果、环境友好性、材料去除均匀性等特点。如图4所示,在抛光时,高速旋转的固结磨粒抛光盘施加载荷于固定不动的工件上,两者产生相对运动,经过液体循环装置将抛光液加到磨具与工件之

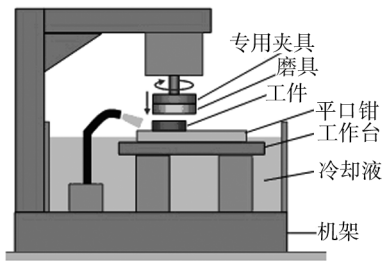


图4 加工实验台

Fig.4 Processing Test Bench

间,工件表面最突出的部分首先与磨具相接触,并在与磨具的相互作用中逐渐被去除,最终实现整个磨具的平坦化。

在固着磨料抛光时,磨具与工件表面间的作用可以看成许多微小磨粒与工件表面相互作用的过程。在固着磨具加工方式下,材料去除主要基于两体磨损机理,磨粒以刻划或耕犁的方式实现材料去除。图5为单颗磨粒加工示意图,抛光工件时,在施加载荷的作用下促使磨粒附近工件表面在一定区域内发生变形;当磨粒以水平方式运动时,突出部分的表面将以切屑形式被去除。

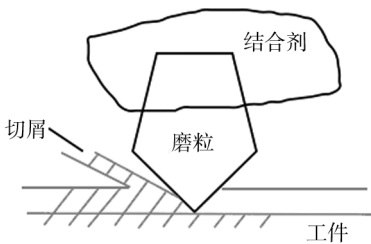


图5 单颗磨粒加工示意

Fig.5 Schematic of single grain processing

本实验采用高速抛光的方法对玻璃进行研磨抛光,同时综合考虑设备及实验参数的影响,力求取得更好的加工效果。实验所采用的磨具尺寸为 $\phi 100\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,玻璃工件尺寸为 $\phi 10\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,具体实验步骤为:玻璃贴片(清洗、干燥)→检测(初始表面)→高速抛光→取下玻璃(清洗、干燥)→检测(加工后表面)→数据分析。

实验所用检测设备有马尔高度计,Mahr 数显千分表 1086R,BMM-550 系列正置透反射金相显微镜,时代手持式粗糙度仪 TR210。

3 结果与分析

每组不同配方磨具加工玻璃工件 20 min 后,磨具去除量、玻璃工件去除量以及磨耗比与磨具的关系如图6—8所示,玻璃表面粗糙度与磨具关系如图9所示。

从图6可以看出,磨具中只加入钼酸铵时,活性抛光剂没有机械去除作用,材料去除量较低;同时加入碳化硅与氧化铝时,两者混合具有的有机机械化学作用使材料去除量最高;同时加入氧化铝与钼酸铵,机械化学结合次之;只加入氧化铝或碳化硅,则效果一般。图8与图2和图3的趋势不同。活性抛光剂不

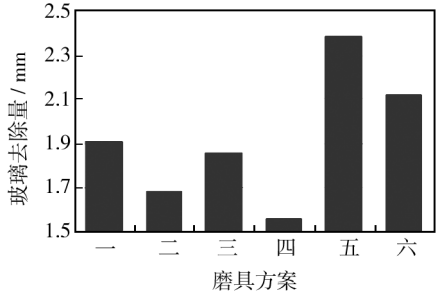


图 6 磨具方案与玻璃去除量关系

Fig. 6 Relationship between the abrasive tool program and the glass removal

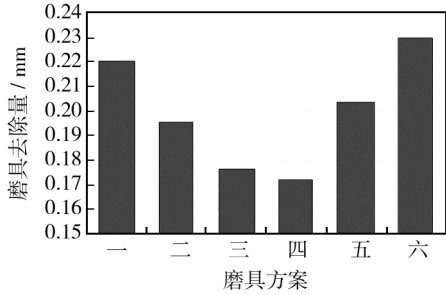


图 7 磨具方案与磨具去除量关系

Fig. 7 Relationship between the abrasive tool program and abrasive tool removal

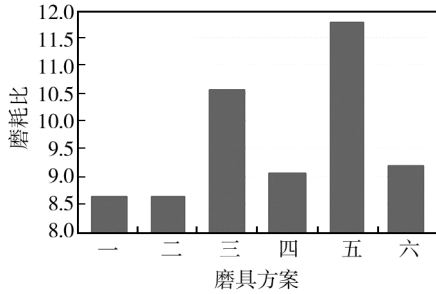


图 8 磨具方案与磨耗比关系

Fig. 8 Relationship between the abrasive tool program and abrasion ratio

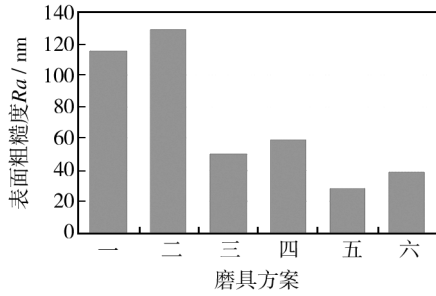


图 9 磨具方案与粗糙度关系

Fig. 9 Relationship between the abrasive tool program and roughness

仅能增加宏观硬度、剪切强度,还可增加磨具本身的抛光能力,使得磨具磨损量最低;碳化硅机械去除作用低于氧化铈,磨具磨损量次之;氧化铝降低了磨具宏观硬度、剪切强度,但是促使微观抗剪切能力增强。综合图 6—8,同时加入氧化铝和碳化硅时,磨具磨耗比最大;同时加入氧化铝和钼酸铵时,磨具磨耗比次之;只加入氧化铝时,磨具磨耗比最小。

每组磨具加工玻璃工件 1 h 后,取下玻璃工件清洗,进行晶相显微观测,结果如图 10 所示。有化学机械作用抛光的方案五的玻璃工件表面划痕要比其他少,说明在磨具中加入碳化硅和氧化铝、钼酸铵和氧化铝后,可以明显减少工件表面划痕、损伤等问题。

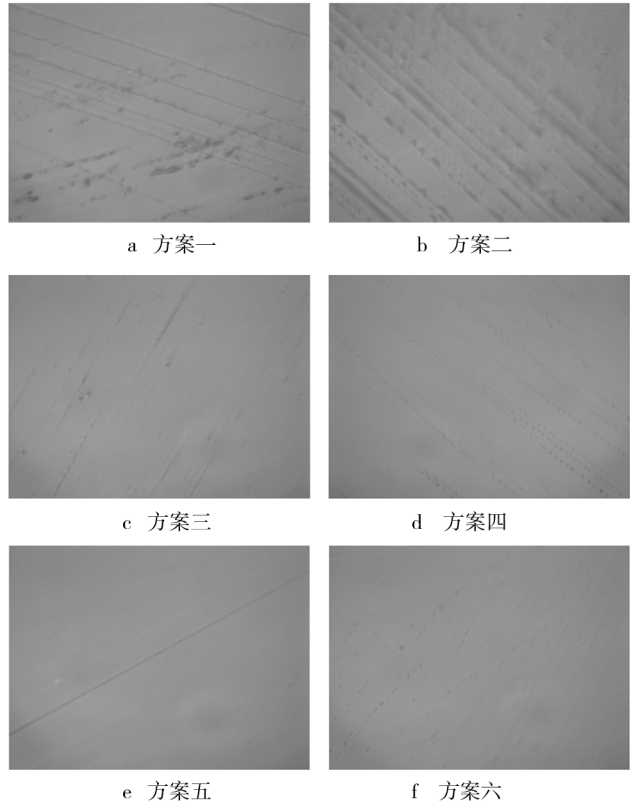


图 10 加工后玻璃工件晶相显微照片(600×)

Fig. 10 Surface observation of glass workpiece after processing

工件材料去除量、表面粗糙度与磨耗比分别表征了磨具的材料去除效率、加工表面质量以及耐磨性(使用成本),本文依据这 3 个指标对上述磨具配方方案进行最优化选择。选择基于等效系数法的多目标优化方法作为最优化方法,方法原理如下。

假设有 n 个方案与 m 个指标,于是可以产生 $n \times m$ 个指标值 D_{ij} ,其中 $i \in [1, n], j \in [1, m]$ 。设 m 个指标的目标函数为 $f_j, j \in [1, m]$,则各指标值的目标系数 D'_{ij} 见式(1)^[18]:

$$\begin{cases} D'_{ij}=D_{ij}/\max(D_j) & f_j \text{ 要求越大越好} \\ D'_{ij}=-D_{ij}/\max(D_j) & f_j \text{ 要求越小越好} \end{cases} \quad (1)$$

可见 $D'_{ij} \in [-1, 1]$ 。随后可求得第 n 个方案的综合评价指标 $D_i^* = \text{sum} \{ D'_{ij} \}, j \in [1, m]$, 该值最高者即为最优方案。各方案的不同指标的目标系数及综合评价指标见表 3。

表 3 不同磨具配方的等效系数法优化结果

Tab.3 Equivalent coefficient optimization results of different abrasive tool formulations

方案	材料去除量	表面粗糙度	磨耗比	综合评价指标
一	0.799	-0.899	0.737	0.637
二	0.708	-1.000	0.737	0.444
三	0.778	-0.388	0.898	1.289
四	0.654	-0.457	0.772	0.969
五	1.000	-0.217	1.000	1.783
六	0.889	-0.295	0.785	1.379

由表 3 可知,方案五拥有最高的综合评价指标值,因此选择最优方案为:10.6% 4000[#] Al₂O₃ 和 2% 10000[#] SiC。

4 结论

基于所制作的固着磨料实验,表明导热剂碳化硅与活性抛光剂钼酸铵可增加磨具的硬度和剪切强度;在磨具中同时加入适量氧化铝可以有效缓解甚至避免划痕、裂纹对玻璃表面的损伤,提高加工效率。最终以工件材料去除率、表面质量以及磨耗比作为评价指标,通过等效系数优化方法确定的最优方案为:10.6% 4000[#] Al₂O₃ 和 2% 10000[#] SiC。

参考文献

[1] DYATLOVA O N,BYKOV V V. Chemical Polishing of Glass [J]. Glass and Ceramics,1962,19(2):77—81.

[2] 陈金身,智红梅. 一种玻璃抛光用新型抛光盘的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2012(3):78—81.

CHEN Jin-shen,ZHI Hong-mei. A New Research of Polishing Plate for Glass[J]. Diamond and Abrasives Engineering,2012(3):78—81.

[3] 熊伟,储向峰,白林山,等. GaN 基 LED 衬底材料化学机械抛光研究进展[J]. 表面技术,2014,43(1):125—130.

XIONG Wei, CHU Xiang-feng, BAI Lin-shan, et al. Advances in Chemical Mechanical Polishing GaN-based LED

Substrate Material[J]. Surface Technology,2014,43(1):125—130.

[4] 彭进. 化学机械抛光的发展现状与研究方向[J]. 表面技术,2012,41(4):95—98.

PENG Jin. Chemical Mechanical Polishing Current Development and Research Directions [J]. Surface Technology,2012,41(4):95—98.

[5] LIU Q, YANG J, TIAN C. High Speed Lapping Paraboloid by Means of a Lapping Tool Bending Method[C]//Optical Devices and Instruments International Society for Optics and Photonics,2006.

[6] YOKOTA H, SAKATA H, NISHIBORI M, et al. Ellipsometric Study of Polished Glass Surfaces [J]. Surface Science,1969,16:265—274.

[7] WANG Xiao-sheng. Non-abrasive Polishing of Glass[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2002,42(4):449—456.

[8] WANG Liang. Effect of Chemicals on Chemical Mechanical Polishing of Glass Substrates[J]. Chinese Physics Letters,2007,24(1):259.

[9] 王吉翠. 蓝宝石晶片机械化学研磨抛光新方法研究[J]. 表面技术,2011,40(5):101—103.

WANG Ji-cui. A New Method of Research Sapphire Wafer Chemical Mechanical Polishing [J]. Surface Technology,2011,40(5):101—103.

[10] YANG J D. Analysis of Errors Produced in Machining Paraboloid by Means of a Lapping Tool Bending Method[C]//6th International Symposium on Test and Measurement 2005,2005.

[11] 刘建河. 固着磨料高速研磨的关键技术研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2013,35(4):84—90.

LIU Jian-he. Research on Key Technologies Fixed Abrasive Grinding Speed [J]. Changchun University of Technology: Natural Science Edition,2013,35(4):84—90.

[12] 杨建东. 纳米级高速研磨技术[J]. 中国科学:E 辑,2007,37(9):1214—1223.

YANG Jian-dong. Nanoscale High-speed Grinding Technology[J]. Chinese Science: Series E,2007,37(9):1214—1223.

[13] 陈建清. 超细 CeO₂ 磨料对硅片的抛光性能研究[J]. 中国机械工程,2004,15(8):743—745.

CHEN Jian-qing. Superfine CeO₂ Performance Abrasive for Polishing Silicon Wafers [J]. China Mechanical Engineering,2004,15(8):743—745.

[14] 刘军. 二氧化铈浆料抛光机理的研究进展[J]. 稀土,2012,33(1):28—33.

LIU Jun. Progress Ceria Slurry Polishing Mechanism [J]. Rare,2012,33(1):28—33.

- [15] 绍东. 光学玻璃抛光用稀土抛光粉的制备[J]. 稀土, 2002, 23(6): 46—49.
SHAQ Dong. Optical Glass Polishing Rare Earth Polishing Powder Preparation[J]. Rare, 2002, 23(6): 46—49.
- [16] 何峰. 硫酸钙和硫酸镁晶须对复合树脂维氏硬度的影响[J]. 口腔医学, 2011, 31(3): 154—156.
HE Feng. Impact of Calcium Sulfate and Magnesium Sulfate Whisker Composite Resin Vickers Hardness[J]. Stomatology, 2011, 31(3): 154—156.
- [17] 李印江, 雷建荣, 胡在簋. 磨具配方的配料比设计[J]. 磨

料磨具与磨削, 1992, 3: 34—38.

LI Yan-jiang, LEI Jian-rong, HU Zai-Gui. Recipe Ingredients Abrasive than Design[J]. Abrasives and Grinding, 1992, 3: 34—38.

- [18] 刘莉, 辛振祥. 配方优化设计方法简介[J]. 橡塑技术与装备, 2004, 30(10): 8—12.
LIU Li, XIN Zhen-xiang. About Recipe Optimization Method[J]. Plastics Technology and Equipment, 2004, 30(10): 8—12.

(上接第 136 页)

- [11] 郁炜, 吕冰海, 袁巨龙. 精密陶瓷球体研磨过程中材料去除模型的研究[J]. 华中科技大学学报, 2014, 42(2): 74—76.
YU Wei, LYU Bin-hai, YUAN Ju-long. The Study of Material Removal Model in the Lapping Process of the Precision Ceramic Ball[J]. Journal of Huazhong University of Science, 2014, 42(2): 74—76.
- [12] 王志友, 吕玉山. 新型光纤连接器端面研磨抛光机的运动分析[J]. 机械工程师, 2007(8): 38—40.
WANG Zhi-you, LYU Yu-shan. Analysis on the Kinematics of a New Lapping and Polishing Machine for the Fiber Optical Connector End Surface[J]. Mechanical Engineer, 2007(8): 38—40.
- [13] 郁炜, 吕讯, 楼飞燕. CMP 加工过程中抛光速度对液膜厚

度的影响分析[J]. 轻工机械, 2008, 26(6): 97—99.

YU Wei, LYU Xun, LOU Fei-yan. Effect of Polishing on Slurry Film Thickness in Chemical Mechanical Polishing[J]. Light Industry Machinery, 2008, 26(6): 97—99.

- [14] 仇中军, 尹萍, 卢翠, 等. 石英玻璃表面改性后的力学特性分析[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(1): 6—9.
QIU Zhong-jun, YI Ping, LU Cui, et al. Mechanical Property Analysis of Modified Quartz Glass[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013, 31(1): 6—9.
- [15] 顾欣, 张晨辉, 雒建斌, 等. 石英光纤端面的化学机械抛光试验研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(1): 11—17.
GU Xin, ZHANG Chen-hui, LUO Jian-bin, et al. Research on Polishing End Face of Silica Optical Fiber[J]. Tribology, 2008, 28(1): 11—17.

(上接第 140 页)

- PENG jin, XIA lin, ZOU wen-jun. Research Status and Prospect of Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 95—98.
- [9] 王吉翠, 邓乾发, 周兆忠, 等. 蓝宝石晶片机械化学研磨抛光新方法研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 11—103.
WANG Ji-cui, DENG Qian-fa, ZHOU Zhao-zhong, et al. The Study on the Method of Mechano-chemical Polishing about the Grinding Polishing of Sapphire[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 11—103.
- [10] 徐进, 雒建斌. 超精密表面抛光材料去除机理研究进展[J]. 科学通报, 2004, 49(17): 1700—1705.
XU Jin, LUO Jian-bin. Research Progress of Material Removal Mechanism of Surface Polishing with Ultra Precision[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(17): 1700—1705.
- [11] ZHANG Yin-xia. Study on Subsurface Damage Model of the Ground Monocry Stallinge Silicon Wafers[J]. Key Engineering Material, 2009, 416: 66—70.
- [12] 赵永武, 刘家浚. 半导体芯片化学机械抛光过程中材料去除机理研究进展[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(3): 283—

287.

ZHAO Yong-wu, LIU Jia-jun. Recent Progress in Study on Material Removal Mechanisms of Silicon Wafer During Chemical Mechanical Polishing[J]. Tribology, 2004, 24(3): 283—287.

- [13] 刘幸龙. 固结磨料研磨 SiC 晶体基片研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
LIU Xing-long. Study on Fix-Abrasive Lapping SiC Crystal Substrate[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.
- [14] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CHEN Kui. Experimental Design and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] 刘瑞江, 张业旺. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52—55.
LIU Rui-jiang, ZHANG Ye-wang. Study on the Design and Analysis Methods of Orthogonal Experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52—55.