

文章编号 1004-924X(2018)04-0843-07

乙醇浓度对亲水性固结磨料垫自修整特性的影响

王子琨¹, 朱永伟^{1*}, 金振弘¹, 李 军¹, 王建彬^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 机电学院 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 安徽工程大学 机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 自修整能力是评价亲水性固结磨料研磨垫加工性能的重要指标。本文选择不同浓度的乙醇水溶液作为研磨介质, 表征了亲水性固结磨料垫基体在研磨介质中的溶胀率与砂浆磨损速率, 探索了亲水性固结磨料垫在不同研磨介质条件下研磨石英玻璃的加工性能, 采用亲水性固结磨料垫在不同阶段的材料去除速率变化 (Material Removal Rate Variation, MRRV) 衡量固结磨料垫的自修整能力。结果表明: 随着研磨介质中乙醇浓度的增加, 溶胀率与砂浆磨损速率均增大, 分别达到了 1.05% 与 5.5 mg/h, 不仅研磨垫的材料去除率与表面质量得到了提高, 同时, 不同阶段的 MRRV 大幅减小, 体现了更优的自修整能力。当乙醇浓度为 25% 时, 平均材料去除率达到 11.82 $\mu\text{m}/\text{min}$, 表面粗糙度 Ra 为 75 nm, 磨料垫具备了良好的加工性能。研磨介质中引入乙醇能有效提高固结磨料垫的加工性能。

关键词: 研磨; 乙醇水溶液; 材料去除率变化; 亲水性固结磨料; 自修整

中图分类号: TG74; TG176 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182604.0843

Effect of ethanol solution on self-condition property of hydrophilic fixed abrasive pad

WANG Zi-kun¹, ZHU Yong-wei^{1*}, JIN Zhen-hong¹, LI Jun¹, WANG Jian-bin^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical and Automobile Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

* Corresponding author, E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn

Abstract: Self-condition property is one of the most important parameters to evaluate the processing performance of hydrophilic fixed abrasive pad. In this paper, the ethanol solution with different concentrations was selected as the abrasive media, and the swelling rate and slurry wear rate were developed to characterize the property of the matrix for hydrophilic fixed abrasive pad. The processing properties were described with the quartz glass lapping experiment with those slurries. Material Removal Rate Variation (MRRV) was proposed to measure the stability degree of the processing. The results show that, with the increase of the ethanol concentration in the abrasive media, the swelling

收稿日期: 2017-08-13; 修订日期: 2017-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51675276); 安徽省自然科学基金青年项目 (No. 1708085QE127); 安徽省高校自然科学研究重点项目 (No. KJ2016A798); 江苏省重点实验室开放基金项目; 南京航空航天大学研究生创新基地开放基金资助项目 (No. kfj20160502)

rate and the slurry wear rate increase, which reach 1.05% and 5.5 mg/h, respectively. Not only the material removal rate and the surface quality of the abrasive pad are improved, but the MRRV of different stages decrease greatly, which show the better self-conditioning ability. When the ethanol concentration is 25%, the average material removal rate reaches 11.82 $\mu\text{m}/\text{min}$, and the surface roughness Ra is 75 nm, which has good processing performance. It shows that the study presented in the paper can effectively improve the processability of the hydrophilic fixed abrasive pad.

Key words: lapping; ethanol solution; Material Removal Rate Variation(MRRV); hydrophilic fixed abrasive pad; self-conditioning

1 引言

固结磨料研磨垫是一种利用高聚物或金属等作为黏结剂将游离的磨料固结制备而成,具备高效低损伤特性的加工工具^[1]。它具有优异的加工性能、极高的磨料利用率以及环境友好特性,已应用于加工多种材料^[2-3]。

亲水性固结磨料研磨垫的自修整主要体现在树脂基体因水溶胀造成磨损,新鲜磨料出露并维持足够的容屑空间^[4]。Kim^[5-6]等研究了在 KOH 水溶液中,以高聚物为基体的 CeO_2 固结磨料自修整特性,认为碱性环境可以实现 CeO_2 固结磨料垫的稳定加工。Choi^[7]等采用了单因素实验法探索聚合物基体中组份对自修整性能的影响,得到了制备研磨垫所需的最优配比。Tateishi^[8]等通过将 TiO_2 微粉添加至聚氨酯中形成 50% 以上的多孔结构,改善容屑空间,提高自修整性能。利用具备水溶特性的硫酸镁晶体,可在研磨垫中形成不同特征的孔隙,预防研磨垫钝化^[9]。在研磨液中添加碳化硅颗粒增强对研磨垫的磨损,能够改善固结磨料研磨蓝宝石的自修整性能^[10]。化学气相沉积金刚石涂层工具在蓝宝石的研磨中也能够获得较好的加工效率^[11]。Li^[12]等采用三乙醇胺溶液作为研磨介质,利用三乙醇胺与研磨垫中铜的络合反应加速基体磨损,实现了石英玻璃研磨的稳定加工,并采用摩擦系数与声发射信号评价研磨垫的磨损状况。计时鸣^[14]等研究了气压砂轮中不同粒径的磨粒在工具表面的驻留时间与钝化情况。Zheng^[15]等采用材料去除率变化(Material Removal Rate Variation, MRRV)来表征亲水性固结磨料研磨垫的自修整性能。朱永伟^[16]等制备了类多晶结构的金刚石磨粒,研磨过程中磨粒的微破碎形式确保了研磨过程的稳定,

研磨石英玻璃时得到了较好的表面质量与去除效率。

上述研究均未从研磨介质对聚合物网络结构影响的角度考虑亲水性固结磨料垫的自修整实现途径。本文选择常用的有机溶剂乙醇水溶液作为研磨介质,利用它对亲水性固结磨料垫高聚物基体的微量溶解特性,改善固结磨料垫的自修整性能,表征了聚合物基体在乙醇水溶液中的溶胀率与砂浆磨损率,通过 MRRV 研究了不同介质下亲水性固结磨料研磨垫的自修整能力。

2 实验设计

2.1 实验设计

实验分别采用去离子水、5% 乙醇水溶液、15% 乙醇水溶液、25% 乙醇水溶液作为研磨介质,对石英玻璃进行研磨加工。乙醇的临界燃烧浓度约为 30%^[17],为避免实验中乙醇溶液引燃,本文选择的乙醇浓度为 5%~25%。实验在南京利生光学机械有限公司的环抛机上开展,亲水性固结磨料垫中固结了 200/300 目的金刚石聚集体磨粒,具体制备工艺参见文献[14],研磨工艺参数如表 1 所示。加工结束后,采用 NANOMAP500LS 三维轮廓仪测量研磨后石英玻璃工件的表面粗糙度,采用江南 XJX-200 金相显微镜观察加工工件的表面形貌。

2.2 树脂基体溶胀率与砂浆磨损速率

将不含金刚石磨粒的亲水性树脂基体在特定模具中固化,制备尺寸为 40 mm×70 mm×2 mm 的试样。将试样置于 40 °C 的恒温介质中,采用梅特勒托利多 ME104E 精密分析天平测量试样在去离子水、5% 乙醇水溶液、15% 乙醇水溶液和 25% 乙醇水溶液浸泡前后的质量,浸泡时间统一为 1 h。样品的溶胀率定义为样品浸泡前后的质

量变化率 η , 即有:

$$\eta = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: η 为溶胀率, m_0, m_1 为样品浸泡前后试样的质量。

将试样装夹在图1所示的夹具上, 并置于质量浓度为5%的W5碳化硅颗粒砂浆中, 维持40℃恒温, 磨损时间为5h, 分别测量试样在磨损前后的质量。砂浆磨损速率表征为单位时间内树脂被砂浆冲蚀磨损损失的质量, 即有:

$$q = \frac{m_0 - m_1}{t}, \quad (2)$$

式中: q 为砂浆磨损速率, m_0, m_1 为磨损前后试样的质量, t 为磨损时间。

表1 研磨工艺参数

Tab.1 Lapping parameters

参数名称	参数值
研磨盘转速/(r·min ⁻¹)	85
工件转速/(r·min ⁻¹)	80
研磨压力/kPa	13.79
偏心距/mm	100
研磨液流量/(ml·min ⁻¹)	50

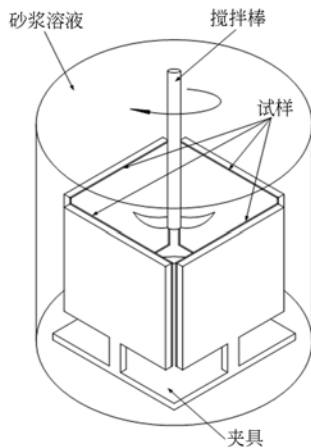


图1 砂浆磨损试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of slurry wear experiment

2.3 研磨垫自修整性能评价

对石英玻璃工件进行持续2h的加工, 加工前工件尺寸为25.4 mm×5.3 mm, 待加工面的表面粗糙度 $R_a=105.1$ nm。加工期间每隔30 min将工件取出, 采用精密分析天平测量其质量变化, 由式(3)可计算得出加工过程中的阶段平均材料

去除速率(Material Removal Rate, MRR):

$$MRR = \frac{(m_0 - m_1) \times l}{m_0 \times t}, \quad (3)$$

式中: l 为加工前工件的初始厚度, m_0 为石英玻璃加工前的质量, m_1 为石英玻璃加工后的质量, t 为研磨时间。

本研究中采用MRRV来表征亲水性固结磨料垫的自修整能力, 即材料去除速率随时间变化的稳定性。

$$MRRV = \frac{MRR_2 - MRR_n}{MRR_2}, \quad (4)$$

式中: MRR_n 为每次测量得到的阶段平均材料去除率, MRR_2 为亲水性固结磨料垫第2阶段的材料去除率。MRRV定义中采用第二阶段的材料去除速率作为标准, 是因为考虑到第一阶段研磨时, 固结磨料垫刚刚经过油石的修正, 不具有代表性。MRRV越小, 研磨垫的自修整性能越好。

3 实验结果与分析

3.1 树脂基体在不同介质中的溶胀率

由式(1)可计算得出在不同研磨介质浸泡1h后树脂基体的溶胀率, 其结果如表2所示。

表2 不同研磨介质下基体的溶胀率

Tab.2 Swelling ratio of matrix in different slurries

乙醇浓度	溶胀率 (%)
0	0.83
5	1.01
15	1.05
25	1.05

表2表明, 在研磨介质中添加乙醇对树脂的溶胀率有很大的影响, 添加5%乙醇后, 溶胀率提高约21.7%; 在15%的乙醇水溶液中, 树脂基体的溶胀率最大, 达到1.05%; 25%浓度乙醇水溶液溶胀率则与15%浓度乙醇水溶液的溶胀率相等。

树脂基体的溶胀过程类似于溶解过程, 依据相似相容原理, 含有大量碳氢基团与羟基官能团的树脂分子在乙醇的作用下网络结构扩张, 能够容纳更多的水分子与乙醇分子。实验结果表明, 乙醇树脂基体网络结构的扩张能力有限, 当乙醇

水溶液浓度从 15% 增加到 25% 时, 溶胀率没有增加; 当树脂表层扩张的网络结构容纳乙醇与水达到一定量时, 分子间的间隙被全部填满, 介质中的物质难以继续渗透, 树脂溶胀速率减缓。

3.2 树脂基体在不同介质中的砂浆磨损速率

由式(2)可计算得出砂浆磨损 5 h 后树脂基体砂浆的磨损速率, 结果如表 3 所示。

表 3 不同研磨介质下基体砂浆的质量损失

Tab. 3 Slurry wear rate of matrix with different slurries

乙醇浓度/%	砂浆磨损速率/(mg·h ⁻¹)
0	4.28
5	4.40
15	4.65
25	5.50

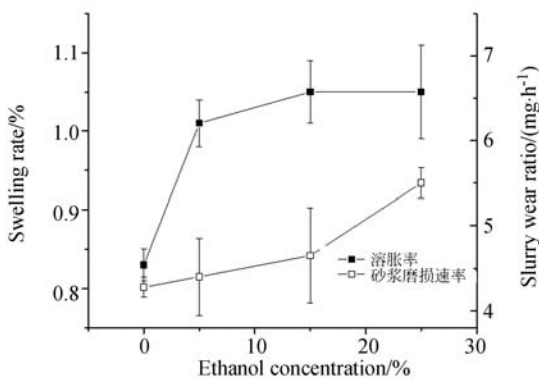


图 2 砂浆磨损速率与溶胀率的关系

Fig. 2 Relationship between slurry wear ratio and swelling rate

对比树脂基体的溶胀率与砂浆磨损速率, 如图 2 所示, 结果表明砂浆冲蚀磨损速率随着介质中乙醇浓度的增加而提高, 但与溶胀率的增加速率不一致。当乙醇浓度为 5% 时, 样品在实验中的磨损质量略高于介质为去离子水时。在此研磨介质下树脂在乙醇分子的作用下网络间隙显著增大, 由于乙醇的浓度较低, 分子网络结构的微量变化对砂浆磨损速率的影响较小。当乙醇浓度增加到 15% 以上时, 较高浓度的乙醇使树脂表层在单位时间内接触到的乙醇分子数量大幅增加, 网络空间在高浓度乙醇分子的作用下快速扩大, 导致树脂表层形成更为松软的软化层, 在砂浆磨损实验中体现出更易磨损的特性。

3.3 不同研磨介质下的加工效率与表面粗糙度

采用不同的研磨介质对石英玻璃进行研磨实验, 由式(3)可计算得出研磨垫在不同研磨介质下对石英进行研磨的阶段平均去除率, 结果如图 3 所示。采用 NANOMAP 500LS 对加工后的石英进行表面粗糙度测量, 表 4 为阶段平均去除率与加工后的表面粗糙度。

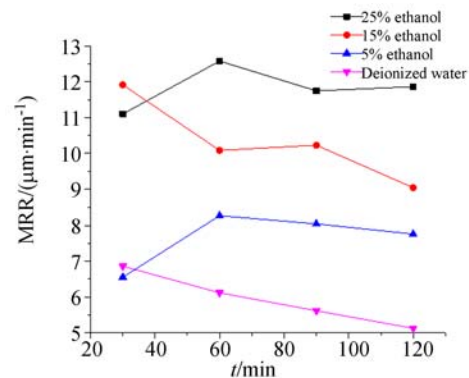


图 3 不同研磨介质下材料去除率

Fig. 3 MRR with different slurries

表 4 阶段平均材料去除率与加工后的最优表面质量

Tab. 4 Average MRR and surface roughness after processing

研磨时间/min	去离子水	5% 乙醇	15% 乙醇	25% 乙醇
	0~30	6.86	6.56	11.91
30~60	6.12	8.28	10.08	12.57
60~90	5.62	8.05	10.23	11.74
90~120	5.13	7.76	9.04	11.86
平均材料去除率/(μm·min ⁻¹)	5.93	7.66	10.32	11.82
表面粗糙度 Ra/nm	95.3	93.3	78.9	75.0

实验结果表明, 当研磨介质为 5% 的乙醇与去离子水时, 加工效率显然低于乙醇浓度为 15% 与 25%, 随着乙醇浓度的增加, 加工后工件的最优表面粗糙度 Ra 下降。当乙醇浓度为 25% 时, 平均材料去除率最高, 达到 11.82 μm/min, 最优表面粗糙度 Ra 达到 75.0 nm。

对比树脂样品的砂浆磨损质量与平均 MRR 及溶胀率与加工后的表面质量, 关系如图 4 和图 5 所示。显而易见, 加工后工件的表面粗糙度 Ra 随着树脂溶胀率的增加而下降, 平均 MRR 随着砂浆磨损速率的增加而提高。乙醇无法对石英玻璃进行反应, 不参与研磨过程中的化学作用, 对表面质量与加工效率的影响来源于研磨垫表面软

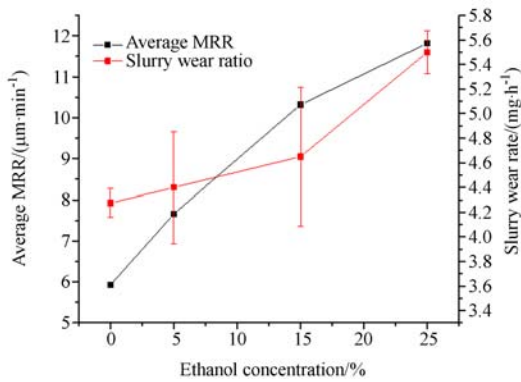


图 4 砂浆磨损速率与平均 MRR 的关系

Fig. 4 Relationship between slurry wear rate and average MRR

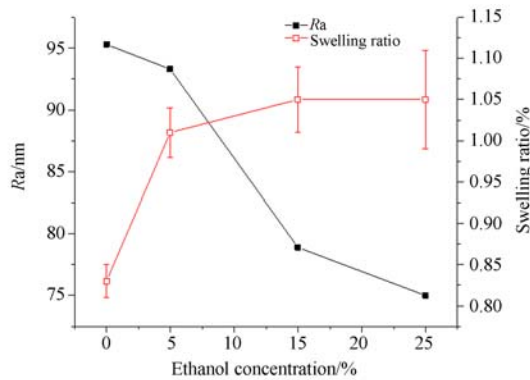


图 5 溶胀率与加工后的表面粗糙度关系

Fig. 5 Relationship between swelling ratio and average surface roughness

化造成的磨粒退让程度与树脂基体的磨损速率。由于树脂具有一定的柔性,当研磨垫受到工件向下的载荷时,磨粒发生弹性退让。随着乙醇浓度的增加,研磨垫的表层溶胀区域增厚且弹性模量下降,磨粒的弹性退让增加,在加工时对工件的切入深度下降,此时磨粒对工件的脆性去除量降低,能够获得更好的表面质量。如图 6 所示,可以看出随着乙醇浓度的增加,在弹性退让作用下,工件表面划痕深度有所下降;而且当乙醇浓度增加后,树脂基体的耐磨损性能下降,包裹在基体内的新鲜磨粒更易于随着基体的磨损而暴露,参与加工的磨粒拥有更为锋利的棱角,去除效率增加。

3.4 自修整性能评价

当基体的磨损速率较慢时,往往会出现磨钝的磨粒在基体支撑下无法脱落,持续以较低的效率进行去除,而去除效率低下则导致工件在加工

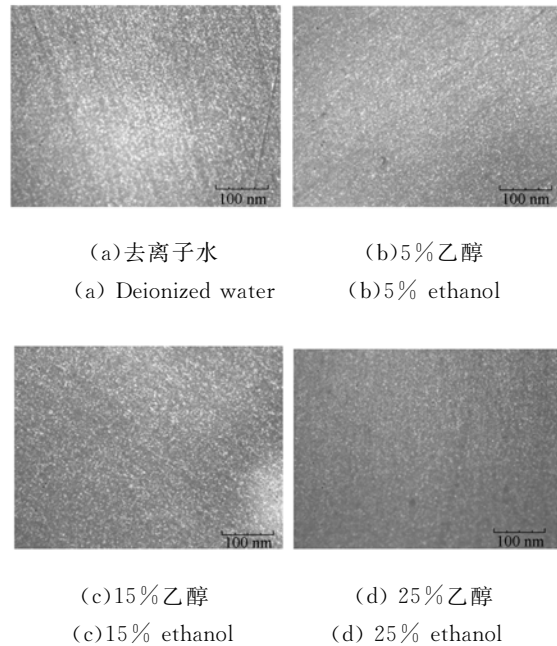


图 6 不同乙醇浓度加工后工件的表面形貌

Fig. 6 Surface morphologies of workpieces after lapping with different ethanol concentrations

过程中产生更少且更细小的磨屑。磨屑的大小与数量对基体的磨损也同样有着关键的影响。随着加工的进行,研磨垫具有锋利刃角的磨粒难以出露,参与磨削的多为磨钝的磨粒,导致去除率下降,加工无法保持稳定,表面质量下降。当研磨垫拥有较好的自修整性能时,基体的磨损速率与磨粒的失效速率几乎相等,磨粒与基体同步磨损,容屑空间随着基体的磨损稳定出现;研磨垫中参与磨削的磨粒始终具有锋利棱角,能够形成稳定的磨屑,维持较好的加工性能与表面粗糙度。

由式(4)分别计算研磨垫在不同介质下第三、第四阶段材料的 MRRV,结果如表 5 所示。结果表明,随着研磨介质中乙醇浓度的增加,研磨垫能够获得更好的自修整性能。在第三阶段乙醇浓度为 15% 时 MRRV 为 -0.014 9,此时材料去除率较第二阶段微量增加,体现出研磨垫的自修整能力;在第四阶段研磨介质为 25% 乙醇水溶液时, MRRV 为 0.056 5,研磨垫在加工过程中的去除效率最小;乙醇的引入促进了研磨垫基体的磨损。当研磨介质为去离子水时,第三阶段 MRRV 为 0.081 7,第四阶段 MRRV 为 0.161 8,此时由于基体磨损速率较低,新鲜的磨粒难以出露,且容屑空间堵塞,研磨垫表面钝化,加工效率持续下降。

表 5 不同研磨介质下材料的去除率变化

Tab. 5 MRRV in different slurries

研磨时间/min	0%	5%	15%	25%
60~90	0.081 7	0.027 8	-0.014 9	0.066 0
90~120	0.161 8	0.062 8	0.103 2	0.056 5

4 结 论

本文研究了研磨垫树脂基体在不同浓度乙醇水溶液下的溶胀性能与砂浆磨损性能。实验结果表明:当乙醇浓度大于 5% 时,基体的溶胀率显著提高,但砂浆磨损速率并未随之提升;当乙醇浓度大于 15% 时,砂浆磨损速率开始变大;当乙醇浓

度为 25% 时,溶胀率与砂浆磨损速率达到最大,分别为 1.05% 与 5.50 mg/h。在相同的工艺参数下,由于磨粒退让,工件表面粗糙度 Ra 随着基体溶胀率的提高而下降;材料去除率随着磨损率的提高而增加,并在研磨介质为 25% 浓度乙醇水溶液时达到最优,材料去除率为 11.82 $\mu\text{m}/\text{min}$,表面粗糙度为 75 nm。

最后,探索了研磨介质乙醇浓度对研磨垫 MRRV 的影响,并以此为基准衡量了不同浓度乙醇介质下研磨垫的加工稳定情况。结果表明,在现有实验范围内,当乙醇浓度为 25% 时,MRRV 为 0.056 5,加工稳定性最好,亲水性固结磨料研磨垫的自修整性能优异。

参考文献:

- [1] VAN DER VELDEN P. Chemical mechanical polishing with fixed abrasives using different subpads to optimize wafer uniformity[J]. *Microelectronic Engineering*, 2000, 50(1-4): 41-46.
- [2] DONG ZH CH, CHENG H B. Study on removal mechanism and removal characters for SiC and fused silica by fixed abrasive diamond pellets[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 85: 1-13.
- [3] 林魁,朱永伟,李军,等. 金刚石固结磨料研磨 K9 玻璃的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(1): 6-11.
- LIN K, ZHU Y W, LI J, *et al.*. Study on lapping of K9 glass by fixed abrasive pad[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2010, 29(1): 6-11. (in Chinese)
- [4] 朱永伟,王成,徐俊,等. 固结磨料研磨垫孔隙结构对其加工性能的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 911-917.
- ZHU Y W, WANG CH, XU J, *et al.*. Influence of pore distribution of fixed abrasive pad on its machining performance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 911-917. (in Chinese)
- [5] KIM H, PARK B, LEE S, *et al.*. Self-conditioning fixed abrasive pad in CMP[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, 151(12): G858-G862.
- [6] KIM H, KIM H, JEONG H, *et al.*. Self-conditioning of encapsulated abrasive pad in chemical mechanical polishing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 142(3): 614-618.
- [7] CHOI J Y, DO JEONG H. A study on polishing of molds using hydrophilic fixed abrasive pad[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(11): 1163-1169.
- [8] TATEISHI T, GAO Q, TANI Y, *et al.*. Development of a high-porosity fixed-abrasive pad utilizing catalytic effects of TiO₂ on polyurethane matrix[J]. *CIRP Annals*, 2006, 55(1): 321-324.
- [9] 徐俊,朱永伟,朱楠楠,等. 亲水性固结磨料研磨垫自修整机理探索[J]. *纳米技术与精密工程*, 2014, 12(6): 429-434.
- XU J, ZHU Y W, ZHU N N, *et al.*. Self-conditioning mechanism of hydrophilic fixed abrasive pad[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2014, 12(6): 429-434. (in Chinese)
- [10] 王凯,朱永伟,郑方志,等. 游离碳化硅磨粒辅助的蓝宝石固结磨料研磨研究[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(11): 2937-2942.
- WANG K, ZHU Y W, ZHENG F ZH, *et al.*. Study on the grinding of sapphire using fixed abrasive with free silicon carbide particles[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(11): 2937-2942. (in Chinese)
- [11] 卢文壮,杨斌,冯伟,等. 应用 CVD 金刚石涂层工具研磨单晶蓝宝石[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 540-546.
- LU W ZH, YANG B, FENG W, *et al.*. Lapping of sapphire wafers by CVD diamond coated tools[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 540-546. (in Chinese)

- [12] LI J, HUANG J D, XIA L, *et al.*. Effect of chemical additive on fixed abrasive pad self-conditioning in CMP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1-4): 107-113.
- [13] 李军, 夏磊, 王晓明, 等. 三乙醇胺浓度对固结磨料研磨垫自锐性能的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3287-3293.
- LI J, XIA L, WANG X M, *et al.*. Effect of triethanolamine concentration on self-sharpening performance of fixed abrasive pad[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3287-3293. (in Chinese)
- [14] 计时鸣, 王成湖, 金明生, 等. 渐进式黏磨层气压砂轮的设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1365-1372.
- JI SH M, WANG CH H, JIN M SH, *et al.*. Design of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1365-1372. (in Chinese)
- [15] ZHENG F ZH, ZHU N N, ZHU Y W, *et al.*. Self-conditioning performance of hydrophilic fixed abrasive pad[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5-8): 2217-2222.
- [16] 朱永伟, 沈琦, 王子琨, 等. 多晶金刚石固结磨料研磨垫精研石英玻璃的性能探索[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1003003.
- ZHU Y W, SHEN Q, WANG Z K, *et al.*. Lapping performance on quartz glass of fixed abrasive pad embedded with multi-grain diamond grits[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1003003. (in Chinese)
- [17] 王德勇, 廖光焯. 不同浓度酒精池火燃烧特性实验研究[C]. *中国工程热物理学会燃烧学2009年学术会议论文集*, 中国工程热物理学会, 2009.
- WANG D Y, LIAO G X. Experimental study on fire combustion characteristics of different concentration alcohol pool[C]. *China National Symposium on Combustion 2009, Chinese Society of Engineering Thermophysics*, 2009. (in Chinese)

作者简介:



王子琨(1991—),男,江西九江人,博士研究生,2012年于辽宁石油化工大学获得学士学位,2015年于南昌航空大学获得硕士学位,主要从事超精密加工技术的研究。E-mail: wangzikunde@gmail.com

导师简介:



朱永伟(1967—),男,浙江平湖人,教授,博士生导师,1988年于中南大学获得学士学位,1991年于长沙矿冶研究院获得硕士学位,2002年于中南大学获得博士学位,主要从事纳米材料的制备与应用、精密超精密加工、表面工程等方面的研究。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn