

文章编号 1004-924X(2009)10-2493-06

蓝宝石晶体的双面研磨加工

文东辉,洪滔,张克华,鲁聪达

(浙江工业大学 机械制造及自动化教育部重点实验室,浙江 杭州 310032)

摘要: 为了实现对蓝宝石晶体的高效低损伤研磨加工,对蓝宝石晶体的双面研磨加工表面粗糙度、研磨均匀性和亚表面损伤层的深度进行实验研究。采用 280# 碳化硼磨粒双面研磨(0001)面蓝宝石晶体,考察了研磨时间对材料去除速率、表面粗糙度的作用规律,根据蓝宝石晶体切割表面状态确定了双面研磨的加工余量;通过 WYKO 粗糙度仪从微观上分析了蓝宝石晶体表面的研磨均匀性;最后,应用纳米压入测试分析了亚表面损伤层的深度。实验结果表明:蓝宝石晶体经过 120 min 的双面研磨加工后可以获得 R_a 为 $0.523 \mu\text{m}$, $R_t < 6.0 \mu\text{m}$ 的表面;其深度损伤层约为 460 nm,亚表面损伤层 $< 1 \mu\text{m}$ 。

关键词: 蓝宝石晶体; 双面研磨; 均匀性; 亚表层损伤

中图分类号: O786 **文献标识码:** A

Dual-lapping process for sapphire crystal

WEN Dong-hui, HONG Tao, ZHANG Ke-hua, LU Cong-da

(Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032, China)

Abstract: In order to achieve high efficiency and low damaged layers during a sapphire crystal lapping process, an experimental research on the roughness, lapping uniformity and sub-surface damaged layer were studied in this paper. The sapphire with (0001) orientation was lapped by 280 mesh boron carbide abrasive grits. The effects of lapping time on the material removal rates and surface roughness were investigated, and the processing remainders by the dual-lapping were determined in accordance with the surface states of the sapphire. Then micro-surface uniformity of the sapphire was also presented by using WYKO laser equipment. Finally, a nano-indentation test was carried out to measure the depth of damaged layer according to the hardness or modulus variances. Experimental results show that the sapphire crystal can offer the R_a in $0.523 \mu\text{m}$, $R_t < 6.0 \mu\text{m}$, the depth of heavy damaged layer of 460 nm, and the depth of sub-surface damaged layer no more than $1 \mu\text{m}$, after it is lapped by the abrasive with 280 mesh boron carbide grits in 120 min.

Key words: sapphire crystal; dual-lapping; uniformity; sub-surface damage

收稿日期: 2008-07-15; 修订日期: 2008-10-15.

基金项目: 国家重大科学研究计划资助项目(No. 2006CB932607); 国家自然科学基金重点资助项目(No. 50535040; No. 50705088); 浙江省科技计划重点资助项目(No. 2007C21061); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目; 浙江工业大学重中之中人才基金资助项目

1 引言

早在原始社会,我们的祖先就用研磨的方法来加工石制工具,最早有记载的研磨加工出现在公元前 2000 年左右,埃及人已经开始研磨他们的金属工具^[1]。双面研磨加工是一种以磨粒的微小塑性切削、滚轧等形式为主体的材料去除方式^[2],在材料去除过程中由于上、下研磨盘同时作用,使得局部高温、高压对称作用在工件的两个平行平面,有利于消除热变形或机械作用引发并破坏材料的平面度、平行度^[3]。采用两个平行平面同时进行研磨加工,效率要比分别研磨加工两个平面高出很多,因此,双面研磨已成为晶体超精密表面加工的主要方法^[4]。蓝宝石晶体双面研磨的主要作用有^[5-6]:(1)去除蓝宝石表面由切片过程引起的切痕和凹凸不平;(2)使表面加工损伤达到一致,以便在化学腐蚀过程中确保腐蚀的速度达到均匀一致;(3)修正蓝宝石的几何厚度,使片与片之间的厚度差缩小;(4)提高平行度,使蓝宝石各处的厚度均匀;(5)改善表面平整度。

蓝宝石晶体生长后需要进行切片,切片后的蓝宝石表面十分粗糙且不平整,测试结果表明蓝宝石表面粗糙度不均匀, R_a 范围为 $4\sim 6\ \mu\text{m}$,个别甚至高达 $17.4\ \mu\text{m}$ ^[7],为此需要进行双面研磨加工,以便为后续工序做好准备^[8]。不过双面研磨过程复杂且不可视,往往需要特定的实验来说明研磨机理。目前国内外对蓝宝石晶体双面研磨加工的表面材料去除过程尚未进行深入研究^[9-11],这也极大地阻碍了蓝宝石晶体大批量加工技术水平的提高。

针对该项技术的研究现状,本文开展了蓝宝石晶体双面研磨加工技术的研究。系统研究了研磨加工的材料去除率、粗糙度、表面均匀性和亚表面损伤,给出了试验方法,并对试验结果进行了分析。

2 试验方法

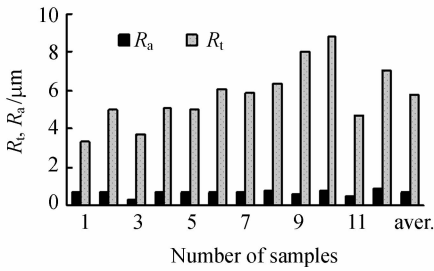
实验所用设备为盛兴机械 MS-6S 双面研磨

机,上、下盘为 $\Phi 380\ \text{mm}$ 铸铁十字槽研磨盘,由于蓝宝石为典型的硬脆陶瓷材料,故选用较低的线速度进行加工,研磨盘转速 $v=7.5\ \text{r/min}$,气压为 $0.1\ \text{MPa}$,压力调节器处于轻压状态,每批次加工 12 片的蓝宝石晶体。蓝宝石晶体原始质量为 $5.261\ 0\ \text{g}$ 。采用德国 Mahr S2 型接触式粗糙度测试仪测试粗糙度,由日本岛津公司的毫克级 ($0.1\ \text{mg}$) AUY220 型天平测量质量,每次加工后采用上海苏豫电子有限公司的双频超声波清洗机 SK2210LH 进行 $5\ \text{min}$ 的清洗,然后在干燥皿中进行干燥处理。

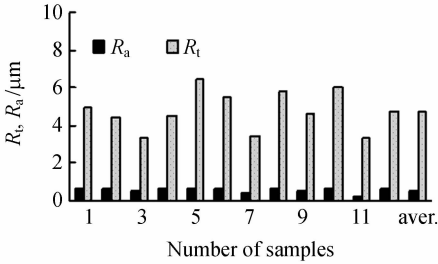
3 试验结果与分析

3.1 表面粗糙度分析

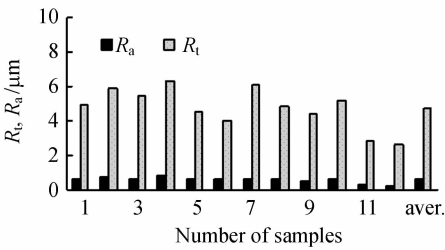
试验结果见图 1~图 3。图中显示:经过 $120\ \text{min}$ 的双面研磨加工后,蓝宝石晶体被去除的双面总厚度为 $90\sim 102\ \mu\text{m}$,平均值为 $97\ \mu\text{m}$,远远超过切片过程中造成的 R_a 最大值 $17\ \mu\text{m}$,根据加工尺寸结合实际经验可以初步判断此双面研磨加工消除了切片的划痕和残余应力。图 1(a)、(b)表明,切片后的蓝宝石晶体表面粗糙不平,研磨过程中局部接触压力很大,因此粗研的起始阶段磨粒去除速率较快,粗糙度下降很快。经过一段时间后,磨粒的粒径尺寸分布趋于平和,蓝宝石晶体与磨粒的接触面逐渐增大,进入均匀性研磨阶段,此时蓝宝石晶体表面粗糙度趋于缓和,如图 1(c)、(d)和图 2(c)、(d)所示,蓝宝石晶体的去除速率趋于稳定。根据实验数据的特征,综合图 1 和图 2 可以判断出:经过 $45\ \text{min}$ 后的研磨加工都属于均匀性研磨阶段,这一结论可以从图 3(a)统计的粗糙度平均值结果中得到论证,在前 $45\ \text{min}$ 时,粗糙度 R_a 下降速度快, $45\ \text{min}$ 后粗糙度 R_a 基本不变,一方面可以衡量出 $280\ \#$ 磨粒的粗糙度加工极限,在 $120\ \text{min}$ 后粗糙度的下降主要是由于磨粒在加工过程中的破碎导致磨粒粒径均匀、细化而进一步使粗糙度下降的结果,



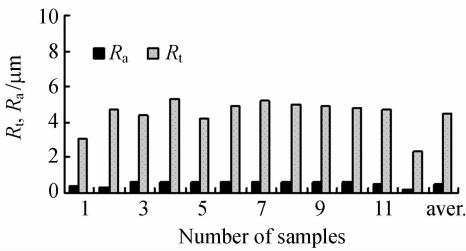
(a) 15 min



(b) 45 min



(c) 75 min

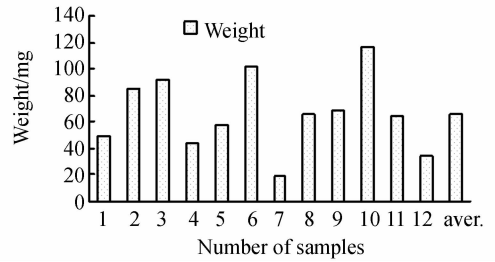


(d) 120 min

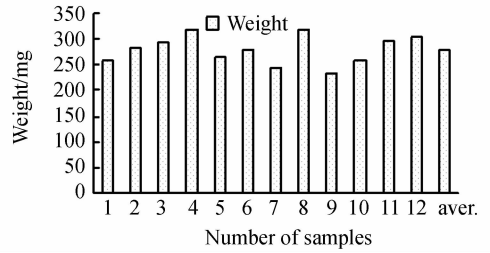
图 1 研磨时间对蓝宝石晶体表面粗糙度的作用
Fig. 1 Effect of lapping time on roughness of sapphire crystal surface

如图 3(b)、(c)所示。

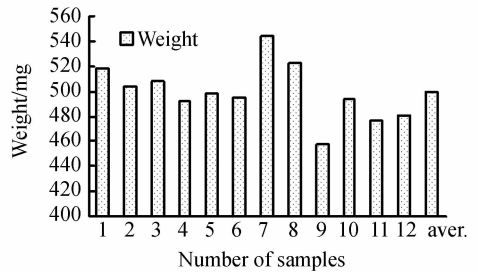
图 4 为对 30 片商品化蓝宝石晶体背面粗糙度的测试结果,其背面粗糙度 R_a 为 $0.522 \sim 0.738 \mu\text{m}$,平均 R_a 值为 $0.607 \mu\text{m}$ 。本文双面研磨加工实验粗糙度 R_a 为 $0.223 \sim 0.598 \mu\text{m}$,平均



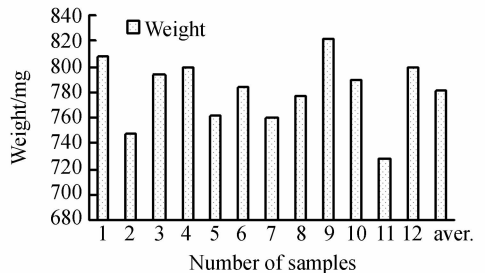
(a) 15 min



(b) 45 min



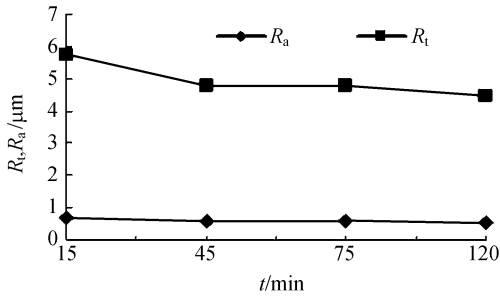
(c) 75 min



(d) 120 min

图 2 研磨时间对蓝宝石晶体质量去除率的作用
Fig. 2 Effect of lapping time on materail removal rate of sapphire crystal

R_a 值为 $0.523 \mu\text{m}$,并且确保了所有加工的蓝宝石晶体表面粗糙度 $R_t < 6 \mu\text{m}$,优于生产商家的加工品质。



(a) 研磨时间对平均粗糙度的作用

(a) Effect of lapping time on average roughness

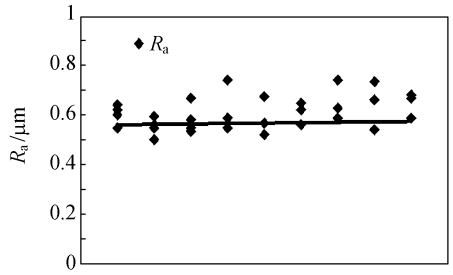


图 4 商品化蓝宝石晶体未减薄前的表面粗糙度

Fig. 4 Roughness of commercial sapphire crystal before back grinding process

3.2 研磨均匀性分析

双面研磨后蓝宝石晶体表面的均匀去除和较低的表面损伤对后续精密单面研磨去除量和工艺参数的选择具有直接的指导作用。常规的做法是依据经验进行多级粒度的研磨,每道研磨工序都指定一定厚度的材料去除量,以此来保证去除上道工序造成的表面损伤。这些经验往往缺乏科学的依据,难以以这种概论的形式来适应不同的加工对象,此外很多经验都是依赖于金属加工推断得出的,对于硬脆难加工陶瓷材料的适用性更值得商榷。

图 5 为双面研磨随机挑选的 3 个蓝宝石晶体样品测试结果,由于双面研磨加工的磨粒大小不均匀,蓝宝石晶体表面的研磨加工包括了二体和三体摩擦磨损的多种形式,因而其局部表面的均匀性存在一定差异。在 3 片蓝宝石晶体表面经过多点测试,选择了几种表面状态不佳的形貌分别如图 5(a)、(b)、(c) 所示,从 WYKO 激光干涉的测试结果可以看到,宏观表面均匀性较好,但局部均匀性还有待进一步提高。出现此类特征的研磨表面主要受以下因素的影响:1) 研磨盘直径较小 ($\Phi 386\text{ mm}$) 使得研磨片的线速度差较大,研磨片内的不同位置材料去除机理和速度存在差异;2) 研磨机的加载压力为上研磨盘自重再加上气压,载荷过大且不可按曲线的方式进行调节和控制;3) 研磨机所有回转的部件全部由一个主电机带动,游轮、上下研磨盘的转速无法进行相关的匹配调节,由此提高研磨均匀性也受到一定的制约。从上述蓝宝石晶体双面研磨样品的宏观和微观测试分析结果来看,蓝宝石晶体表面 R_t 的水平在 $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$,与此同时,考虑到蓝宝石晶体的后

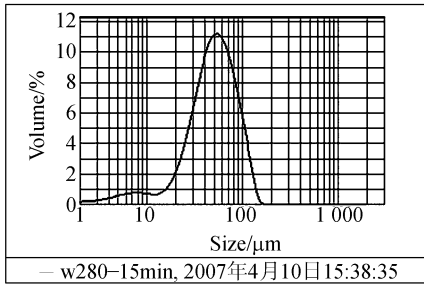
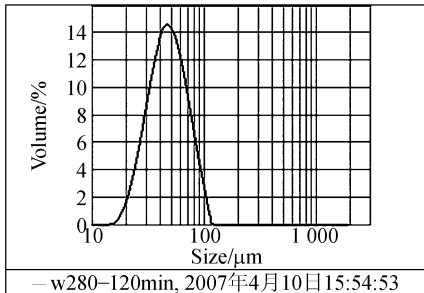
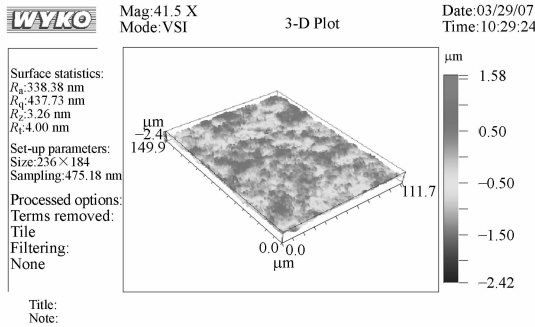
d(0.1):20.436 μm d(0.5):50.136 μm d(0.9):93.984 μm (b) 15 min 后 280 # B₁C 磨粒的粒度分布(b) Size distribution of 280 # B₁C abrasive grain after 15 mind(0.1):26.777 μm d(0.5):46.421 μm d(0.9):76.687 μm (c) 120 min 后 280 # B₁C 磨粒的粒度分布(c) Size distribution of 280 # B₁C abrasive grain after 120 min

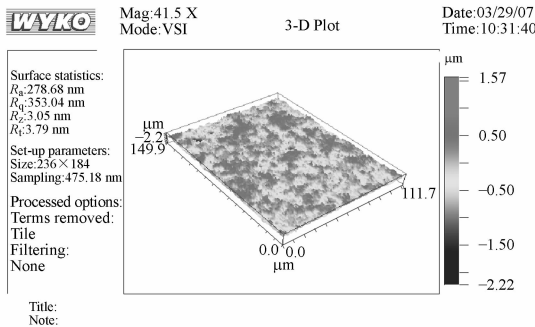
图 3 研磨时间对磨粒粒度分布及晶体平均粗糙度的作用

Fig. 3 Effect of lapping time on abrasive size distribution and average roughness of sapphire crystal

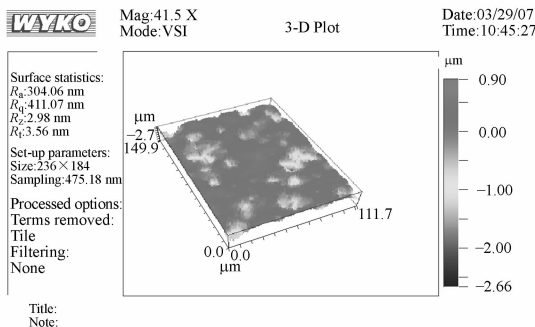
续研磨方式为单面研磨加工,因此双面研磨加工的均匀性只要达到可以接受的水平,然后可通过单面研磨加工来进一步提高蓝宝石晶体的表面均匀性和降低表面损伤层。



(a) 1#工件 WYKO 激光干涉下的表面形貌
(a)Surface profile of workpiece 1



(b) 2#工件 WYKO 激光干涉下的表面形貌
(b)Surface profile of workpiece 2



(c) 3#工件 WYKO 激光干涉下的表面形貌
(c)Surface profile of workpiece 3

图 5 双面研磨后蓝宝石晶体的表面形貌

Fig. 5 Surface profiles of dual-lapped sapphire crystals at WYKO laser interference

3.3 亚表面损伤分析

为了进一步确定蓝宝石晶体亚表面的损伤均

匀程度,采用美国 MTS XP 微纳米压痕系统的纳米压入和划痕系统进行微观分析。根据 ISO 纳米压入对表面的要求,要获得粗糙度导致的测试误差 $<5\%$,则压入深度必须为表面粗糙度 10 倍以上,双面研磨获得的微观表面粗糙度 R_a 仍然可以达到 $15\text{ nm}(5\text{ }\mu\text{m}\times 5\text{ }\mu\text{m})$,且蓝宝石表面对纳米探针的吸附作用可以忽略不计,因此纳米硬度的误差仍主要是由于亚表面非均匀性损伤导致的。图 6 为纳米压入过程中蓝宝石晶体亚表层硬度与加载位移的关系,从其硬度趋于平滑的状态计算,200 nm 位移内为粗糙度影响区,200 nm 位移以外为均匀性影响区,结合蓝宝石晶体的标准硬度偏差,蓝宝石晶体的深度损伤层约为 460 nm,蓝宝石晶体双面研磨加工的亚表层损伤深度约 $1\text{ }\mu\text{m}$,由于微观测试结果的微小性,这个数值仅为延性域研磨损伤层深度,并不包括脆性裂纹的影响。

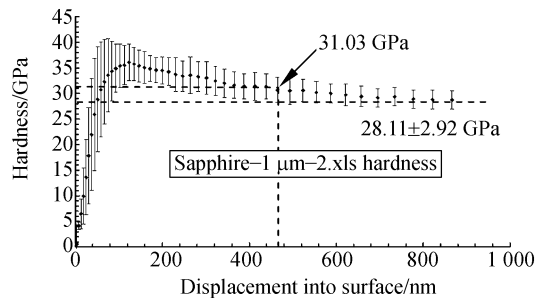


图 6 蓝宝石晶体纳米压入硬度与加载位移的关系
Fig. 6 Hardness vs loaded distance during nano-indent sapphire crystal

4 结论

本文对蓝宝石晶体双面研磨加工的材料去除速率、粗糙度、表面均匀性、亚表层损伤进行了系统的试验研究。经过 120 min 的双面研磨加工后,蓝宝石晶体被去除的总厚度为 $90\sim 102\text{ }\mu\text{m}$,平均值为 $97\text{ }\mu\text{m}$,远远超过切片过程中造成的 R_z 最大值 $17\text{ }\mu\text{m}$ 。商品化蓝宝石晶体背面粗糙度 R_a 为 $0.522\sim 0.738\text{ }\mu\text{m}$,平均值为 $0.607\text{ }\mu\text{m}$;本文实验双面研磨后蓝宝石晶体粗糙度 R_a 为 $0.223\sim 0.598\text{ }\mu\text{m}$,平均值为 $0.523\text{ }\mu\text{m}$,并且确保了所有加工的蓝宝石晶体表面粗糙度 $R_z < 6\text{ }\mu\text{m}$ 。采用光学显微镜、WYKO 激光粗糙度仪、微纳米压痕和划痕试验综合测试和分析了蓝宝石晶体表面

均匀性及其亚表面的损伤层,根据微纳米压痕试验蓝宝石晶体亚表层硬度变化趋势,得到了双面

研磨加工蓝宝石晶体表面的深度损伤层约为 460 nm,亚表层损伤层深度约为 1 μm 。

参考文献:

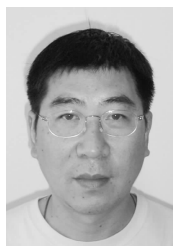
- [1] 袁哲俊. 精密和超精密加工技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
YUAN Z J. *Precision and Ultra-precision Machining Technology* [M]. Beijing: Mechanical engineering press,2007. (in Chinese)
- [2] MARINESCU I D, UHLMANN E, DOI T. *Handbook of Lapping and Polishing* [M]. CRC Press, 2006.
- [3] ZHOU L B, SHIMIZU J, SHINOHARA K, *et al.*. Three-dimensional kinematical analyses for surface grinding of large scale substrate[J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(2):175-184.
- [4] 胡刚翔. 单晶硅双面抛光加工理论及工艺优化的研究[D]. 浙江工业大学硕士学位论文, 2006.
HU G X. *Polishing mechanism and process optimization during dual-polishing silicon wafer* [D]. Master dissertation, Zhejiang University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [5] WANG Y Z, LIU S L, PENG G L, *et al.*. Effects of surface treatment on sapphire substrates[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 174:241-245.
- [6] NIU X H, LIU Y L, TAN B M, *et al.*. Method of surface treatment on sapphire substrate[J]. *Trans-*

- actions Nonferrous Metal Society of China*, 2006, 16:732-734.
- [7] 鲁聪达. 高亮度LED蓝宝石衬底低损伤研磨机理研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2007.
LU C D. *Study on free damage mechanism of precision lapping sapphire wafer for high lighting light-emitting diode* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] 王娟, 刘玉岭, 檀柏梅, 等. 蓝宝石衬底片的精密加工[J]. 微电子学, 2006, 36(1):46-48.
WANG J, LIU Y L, TAN B M, *et al.*. Fine Polishing of Sapphire Substrates[J]. *Microelectronics*, 2006, 36(1):46-48. (in Chinese)
- [9] SAITOW T, HIRAYAMA T, YAMAMOTO T, *et al.*. Lattice strain and dislocations in polished surfaces on sapphire[J]. *Journal of American Ceramic Society*, 2005, 88(8):2277-2285.
- [10] ZHU H L, TESSAROTO L A, SABIA R. Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 236:120-130.
- [11] ZHU H L, NIESZ D E, GREENHUT V A. The effect of abrasive hardness on the chemical-assisted polishing of (0001) plane sapphire[J]. *Journal of Materials Research*, 2005, 20(2):504-520.

作者简介:



文东辉(1974—),男,江西高安人,博士,副教授,2002年于大连理工大学获得博士学位,现为全国纳米技术标准化技术委员会G-4工作组委员,全国磨粒技术委员会委员,浙江省高校中青年学科带头人,主要从事超精密加工装备及技术的研究。E-mail: wendh@zjut.edu.cn



洪滔(1968—),男,浙江杭州人,博士,教授,2002年于香港理工大学获得博士学位,现为浙江工业大学研究生院(筹)副院长,主要从事弹塑性力学、纳米力学的研究。E-mail: thong@zjut.edu.cn



张克华(1975—),男,湖南益阳人,博士,讲师,2008年于浙江工业大学获得博士学位,主要从事磨粒加工、数控系统等方面的研究。E-mail: mature@126.com



鲁聪达(1964—),男,浙江慈溪人,博士,教授,2007年于浙江工业大学获得博士学位,现为浙江工业大学机械工程博士后流动站负责人,主要研究方向为精密模具设计及其成型。E-mail: lcd@zjut.edu.cn