

大尺寸氧化铝陶瓷导轨超精研抛工艺研究

刘 剑^{1,2} 蔡黎明³ 成贤锴³ 顾国刚³ 于 涌^{3*}

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要: 为了提高氧化铝陶瓷导轨超精密研抛加工的工作效率, 分析了研抛压力、研抛速度以及磨料添加间隔等工艺参数与研磨抛光效率的关系。首先, 根据氧化铝陶瓷导轨的特性及物理参数, 确定研磨抛光盘以及磨料的选型。然后以高精度平面平晶作为检测工具, 平晶与导轨表面形成干涉条纹, 利用条纹的数量定量表征研抛效果。最终得到氧化铝陶瓷导轨的最佳工艺参数: 每个研抛压力应该控制在 40 N; 研抛线速度为 45 m/min; 研磨剂的添加时间为 30 min。在同等时间内, 应用此套工艺参数可以达到更高的面型精度。

关键词: 高精度; 陶瓷导轨; 超精研抛

中图分类号: TH163; TH162 + 1 文献标识码: A doi: 10. 3788/CO. 20191203. 0663

Ultra-precision grinding and polishing method of large-scale Al_2O_3 ceramic guides

LIU Jian^{1,2}, CAI Li-ming³, CHENG Xian-kai³, GU Guo-gang³, YU Yong^{3*}

(1. *Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yuy@sibet.ac.cn*

Abstract: In order to improve the ultra-precision polishing efficiency of Al_2O_3 ceramic guides, the relationship between polishing parameters such as polishing pressure, polishing speed, abrasive added interval and polishing efficiency was analyzed. Firstly, the polishing discs and abrasive material were selected based on the physical parameters and characteristics of Al_2O_3 ceramic guide. Secondly, taking the high precision plane parallel crystal as the detection tool, the number of stripes between the crystal and guide were quantitatively used to determine the polishing efficiency. At the end, the best processing parameters for the Al_2O_3 ceramic guide

收稿日期: 2018-10-20; 修订日期: 2018-11-30

基金项目: 苏州市应用基础研究项目(No. SYG201322)

Supported by Basic Applied Research Projects in Suzhou(No. SYG201322)

were obtained: polishing pressure should be controlled to be around 40 N; the line speed of polishing should be 45 m/min; a grinding agent should be added every 30 minutes. Within the same amount of time, this set of process parameters will obtain higher surface accuracy.

Key words: high-precision; ceramic guides; ultra-precision polishing

1 引言

导轨是机床的重要部件之一,是机床的装配基础,也是机床运动的精度基础,机床的加工精度和使用寿命很大程度上取决于机床导轨的质量^[1]。结构陶瓷是近代发展起来的新型材料,在高科技领域应用日益广泛,因其高硬度、高耐磨性、耐腐蚀性等优异性能,逐渐开始代替传统的金属材料应用于机床导轨副中^[2]。然而也正因为陶瓷材料具有高硬度、高耐磨性,以现有的加工条件及手段想要获得高精度的大行程陶瓷导轨副,工艺极为复杂^[3-7]。

清华大学信迎春研究了大尺寸、高精度陶瓷导轨制备的工艺方法^[8],天津大学张方阳做了高纯度氧化铝陶瓷凹球面精密磨削的研究^[9]。湖南大学谢桂枝、尚振涛等人建立了工程陶瓷高速深磨磨削的力学模型^[10-12],为氧化铝陶瓷导轨的粗加工提供了理论基础。德国切削物理学家萨罗蒙提出的超高速磨削机理,大幅度提高了机床生产效率,并得到了很高的加工质量^[13-17]。湖南大学郭力^[18]采用超高速磨削方法,得到了 $0.72\ \mu\text{m}$ 的粗糙度。浙江工业大学纪宏波等人,对氧化铝陶瓷平面零件的超精密研磨做了相关实验^[5],在一定的加工范围内得到了 $6.55\ \text{nm}$ 的超光滑表面。超高速磨削加工方法效率高,但是对设备本身的要求较高。近年来,出现了半硬半软的聚氨酯、沥青等抛光工具,兼备研磨和抛光作用(研磨和抛光的复合加工称之为研抛)。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所陈琦等人^[19-20],提出了一种氧化铝陶瓷导轨的超精密加工方法,并得到了 $0.6\ \mu\text{m}$ 的面型精度,但没有对氧化铝陶瓷导轨的研磨抛光工艺进行详细的研究。

本文通过研究氧化铝陶瓷导轨超精密研抛的工艺过程发现,氧化铝陶瓷导轨表面面型研磨抛

光效率与研磨压力、研磨转速及磨料的添加间隔有关。因此总结出一套适用于类似导轨的研磨抛光工艺。本文工作对提高工作效率,降低成本具有重要意义。

2 研抛装置

由于氧化铝陶瓷莫氏硬度为9.5,属高耐磨材料,被研表面的材质密度及表面硬度或多或少存在一定的差异,通过传统的机械研磨和光学精密抛光后,导轨面上可能会存在局部凸点区域和拐点区域,传统的研磨抛光工艺很难对这些区域进行加工。本文所用的氧化铝陶瓷导轨的样件尺寸为 $700\ \text{mm} \times 260\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$,研抛设备为自行研制的数控超精密研磨抛光机。研磨抛光机采用的是平面研磨方式,设备外形如图1所示。



图1 数控超精密研磨抛光机

Fig. 1 Computerized Numerical Control (CNC) grinding and polishing machine with ultra precision

其核心部件研磨抛光头结构如图2所示,研磨抛光头安装在Z向位移平台上,研磨抛光头处的研盘可以根据不同工艺需要,选取不同大小及重量。

力矩电机定子固定在主轴外壳上,电机转子通过电机转子端盖与电机输出轴固定。电缸伸缩轴的上部与电机输出轴由花键连接,即能传递扭

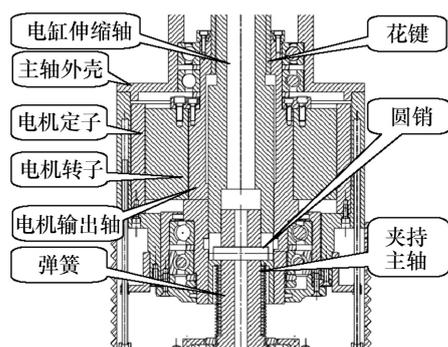


图2 超精密研磨抛光机主轴结构

Fig. 2 Structure of spindle for grinding and polishing machine with ultra-precision

矩又能实现轴向移动。电缸伸缩轴的下部与电机输出轴有较小的间隙配合,保证有较好的定位和回转精度。电缸伸缩轴设有限位槽,圆销穿过夹持主轴,通过过盈配合固定在夹持主轴上,圆销能在限位槽上滑动,实现夹持主轴在电缸伸缩轴内进行有限的轴向移动。圆销在限位槽的作用下,受到一对力耦。电缸伸缩轴通过该力偶将扭矩传递到夹持主轴,通过调节主轴高度,可以得到不同的研磨抛光压力。弹簧套在夹持主轴上,一端是电缸伸缩轴,一端是夹持主轴,开始时处于压缩状态。圆销压在限位槽的下端。当电缸伸缩轴向下移动时,夹持主轴也跟随往下移动。当研具碰到工件时,外力使弹簧缩短,夹持主轴相对于伸缩主轴往回运动,从而实现了研具与工件的缓冲接触,避免研具将工件面形磕伤。

半精研和精研时以湿法、半湿法研磨为主,因此研具材料采用沥青。沥青研磨盘结构如图3所示,研磨盘端面开有宽5 mm,间距30 mm,交叉角60°沟槽。此结构便于存储多余的研磨料,并可以增加切削力;可防止研磨剂的堆积,避免工件塌边;可以及时排除产生的切屑,避免划伤工件,有助于散热。由于工件材料为氧化铝陶瓷,莫氏硬度为9.5,因此磨料采用超硬磨料,粗研时采用碳化硼以降低成本,精研时采用金刚砂。

3 研抛过程及检测

整个氧化铝陶瓷导轨分为研磨阶段、抛光及

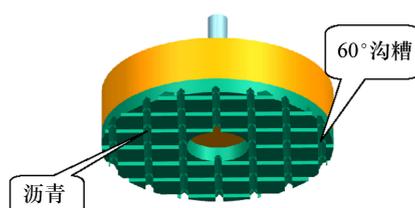


图3 沥青研具

Fig. 3 Grinding tool with asphalt

超精密研磨抛光阶段。

在研磨阶段,采用铸铁研磨平板自由研磨,磨料采用碳化硼。当平面度达到 $2\ \mu\text{m}$ 以后,进入超精密研抛加工,抛光工具采用直径为200 mm的沥青抛光盘;抛光运动轨迹为覆盖整个导轨面的摆线轨迹;磨料依次采用W10~5的金刚石微粉;超精研抛线速度选择40~60 m/min(主轴转速为95 r/min);超精研抛压力取0.01~0.06 MPa;冷却润滑液为纯水。

本文中所述的氧化铝陶瓷导轨样件尺寸为700 mm×260 mm×200 mm,目标平面度为 $0.3\ \mu\text{m}$,超出传统检测手段,因此本文采用光学干涉条纹检测方案,配合研磨抛光机进行加工。前期检测采用检测平晶进行,如图4所示,平晶外形尺寸为220 mm×30 mm,材料为K9。



图4 干涉条纹示意

Fig. 4 Schematic of interference fringes for the test

经过多次试验发现,影响氧化铝陶瓷导轨研磨效率的因素主要有压力、线速度及研磨料。超精密研抛阶段,为了定量分析,用每小时减少的条纹数量表征研抛效率(n/h)。

3.1 研抛压力对研抛效率的影响

当电缸伸缩轴在电缸作用下,进行轴向移动时,弹簧随之发生变形,夹持主轴受到向下的力增

大,研磨抛光工具对工件的压力也增大了,实现了主动压力调节。经过计算选取了20、30、40、50、60、70、80 N等不同压力下的条纹减少速度。

研抛压力与研抛效率的关系如图5所示,开始时研抛效率随着研抛压力的增加而增大,但当压力大于40 N,研抛效率即条纹数量减少的速度降低了。分析其原因:(1)主要是当研抛压力过大时,金刚石微粉因其脆性特质,由大的颗粒转为小的颗粒,造成研抛效率降低;(2)由于压力过大,冷却润滑液无法完全浸润整个研磨平面,导致研抛效率降低。

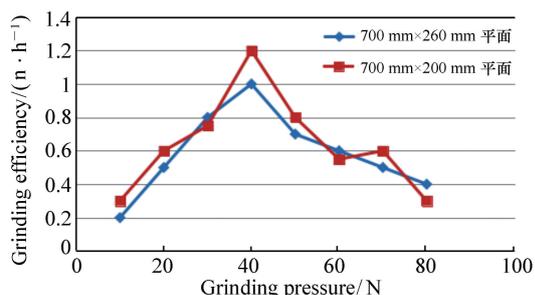


图5 研抛压力与研抛效率的关系

Fig. 5 Relationship between grinding efficiency and grinding pressure

3.2 主轴转速对研抛效率的影响

控制力矩电机输出转速,分别在不同主轴转速下观察条纹减少速度。研抛转速与研抛效率的关系如图6所示。

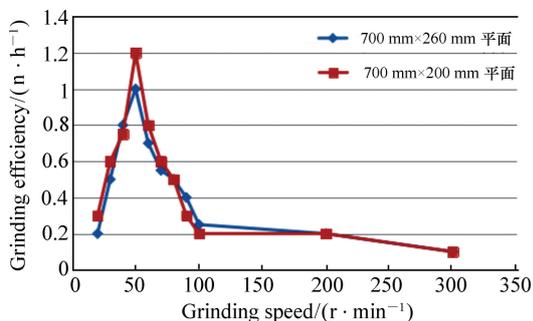


图6 主轴转速与研抛效率的关系

Fig. 6 Relationship between grinding efficiency and grinding speed

可见,有一个最佳线速度43.9 m/min(主轴转速70 r/min)左右,当主轴转速高于200 r/min,研抛效率明显下降,分析其原因:

(1) 主轴转速过低:10~40 r/min,磨料与氧化铝陶瓷导轨之间相对速度较低,没有形成有效的磨削。

(2) 主轴转速过高:研抛盘上产生较大的离心力,冷却润滑剂无法继续附着在研抛盘上,金刚石微粉也只能处于研抛盘的边缘,使作用面变窄,导致研抛效率降低。

3.3 磨料添加间隔对研抛效率的影响

整个研抛过程中,磨料随着时间变细,导致研抛效率逐渐降低,因此需要及时补充磨料。磨料(金刚石微粉)事先与纯净水混合以作为研磨液,研磨液对材料去除速率的提高和表面质量的改善具有促进作用^[21]在研抛盘运动轨迹上预先添加一些研磨液。

磨料的添加周期及添加量对研抛效率的影响如图7所示,可见磨料的作用时间存在一个最大值,当超过120 min以后,原先的磨料颗粒由于挤压、碰撞已经变小,无法起到加工作用。

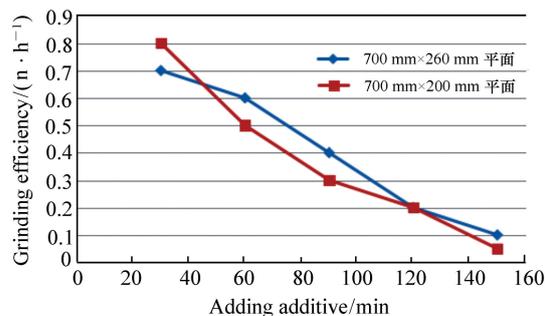


图7 磨料添加间隔与研抛效率的关系

Fig. 7 Relationship between grinding efficiency and abrasive added interval

此外磨料添加量也存在一个最佳值,当超过该值以后,多余的磨料会在离心力作用下飞散到边缘,造成研抛效率下降。

4 工艺试验

利用 Zygo GPI 18"平面干涉仪检测同一根导轨的两个面型,图8(a)为700 mm×200 mm区域的面型精度(X、Y坐标值均为像素),图8(b)为采用传统工艺参数(抛光压力为20 N;研抛主轴

转速为 210 r/min; 研磨剂的添加时间为 20 min) 加工 1 h 后获得的面型精度, PV 值从 0.96λ 降低

至 0.92λ, 同时 RMS 由 0.122λ 变成 0.133λ。

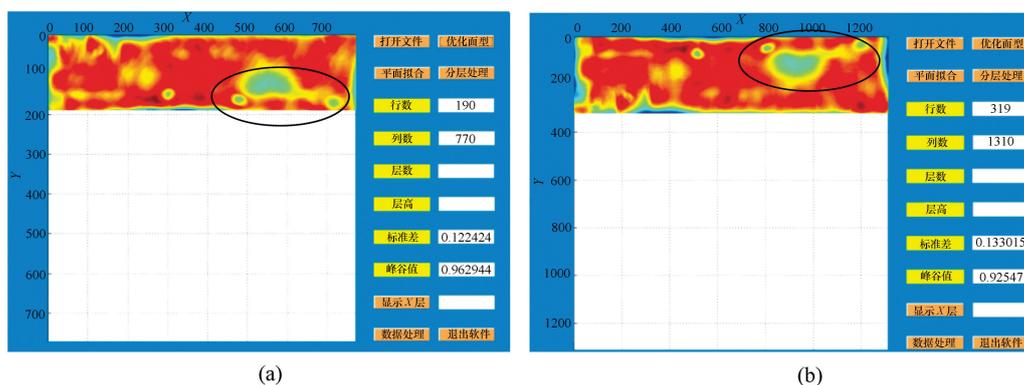


图 8 传统工艺参数磨削效果

Fig. 8 Results with traditional grinding process

利用研磨抛光机, 将研抛压力控制在 40 N; 研抛主轴转速为 43.9 m/min; 研磨剂的添加时间为 30 min 导轨抛亮后, 即利用干涉仪检查面型, 并用干涉仪数据指导研抛路线, 对局部凹、凸面进行针对性加工, 避免过度研抛, 以提高整个导轨的平面度, 而保证导轨平行度的难点则在于工件的装夹设计。图 9(a) 为 700 mm × 260 mm 范围内的面型精度 (X、Y 坐标值均为像素), 图 9(b) 为采

用本文工艺参数加工 1 h 后获得的面型精度, PV 值从 0.86λ 降低至 0.6λ, RMS 值从 0.107 降低到 0.079。相比图 8 的结果, 本套工艺参数能在同样时间内获得更好的局部面形精度。郑州大学郑锦华等人发现研磨抛光表面会有微孔结构的形成^[22], 本文限于条件, 将在下一阶段继续深入研究分析抛光表面的微裂纹情况。

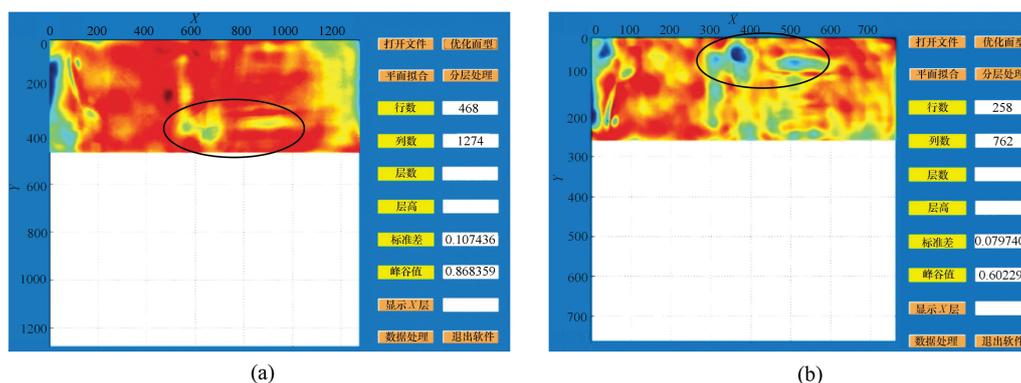


图 9 新型工艺参数磨削效果

Fig. 9 Results with new grinding process

5 结 论

针对本文提到的大面积氧化铝陶瓷导轨面, 通过分析研抛效率得出结论:

(1) 采用专用的研抛主轴结合研磨抛光机的

XY 工作台, 可以取代原先人工研磨的方式获得较高的面型精度, 降低了工作强度, 提高了研抛效率。

(2) 根据不同研抛参数下的试验结果, 总结出了一套工艺参数: 研抛压力为 40 N; 研抛线速度 45 m/min; 研磨剂的添加时间为 30 min。此套工

艺方法较传统研磨抛光加工在同样时间内可以达到更高的面型精度。

参考文献:

- [1] 孙军龙,刘长霞,王亮申. 载荷和添加透辉石/AlTiB对氧化铝基陶瓷导轨材料摩擦磨损特性的影响[J]. 鲁东大学学报(自然科学版) 2013, 29(1): 83-88.
SUN J L, LIU CH X, WANG L SH. Effect of load and adding diopside/AlTiB on friction and wear behaviors of alumina matrix ceramic guide way materials [J]. *Ludong University Journal (Natural Science Edition)* 2013, 29(1): 83-88. (in Chinese)
- [2] 刘长霞. Al₂O₃基大型结构陶瓷导轨材料及其摩擦磨损性能研究[D]. 济南: 山东大学 2007.
LIU CH X. Research on large-scale advanced alumina matrix structural ceramic guide way material and its wear behaviors [D]. Jinan: Shandong University 2007. (in Chinese)
- [3] 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.
YUAN J L, WANG ZH W, WEN D H *et al.*. Review of the current situation of ultra-precision machining [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 2007, 43(1): 35-48. (in Chinese)
- [4] 李军,朱永伟,左敦稳,等. Nd:Y₃Al₅O₁₂透明陶瓷的超精密加工[J]. 硅酸盐学报 2008, 36(8): 1178-1182.
LI J, ZHU Y W, ZUO D W *et al.*. Ultra-precision machining of transparent Nd:Y₃Al₅O₁₂ ceramics [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* 2008, 36(8): 1178-1182. (in Chinese)
- [5] 纪宏波,彭岩,周芬芬,等. 氧化锆陶瓷平面零件超精密研磨实验的研究[J]. 机电工程 2013, 30(9): 1059-1062, 1105.
JI H B, PENG Y, ZHOU F F *et al.*. Experimental study on ultra-precision lapping for zirconia ceramic plane [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering* 2013, 30(9): 1059-1062, 1105. (in Chinese)
- [6] 苗远方. 功能陶瓷的物理性能[M]. 北京: 化学工业出版社 2007.
MIAO Y F. *The Physical Characteristics of Functional Ceramics* [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2007. (in Chinese)
- [7] 陈琦. 大行程纳米级定位工作台的结构设计[J]. 光学精密工程 2016, 24(5): 1065-1071.
CHEN Q. Structure design of nanometer positioning stage with a large stroke [J]. *Opt. Precision Eng.* 2016, 24(5): 1065-1071. (in Chinese)
- [8] 信迎春. 大尺寸、高精度陶瓷导轨制备工艺探索[D]. 北京: 清华大学 2011.
XIN Y CH. Preparation of ceramic slider with big dimension and high precision [D]. Beijing: Tsinghua University 2011. (in Chinese)
- [9] 张方阳. 高纯度氧化铝陶瓷凹球面精密磨削研究[D]. 天津: 天津大学 2005.
ZHANG F Y. Research on precision grinding about concave spherical surface of high-alumina ceramic [D]. Tianjin: Tianjin University 2005. (in Chinese)
- [10] 谢桂芝,尚振涛,盛晓敏,等. 工程陶瓷高速深磨磨削力模型的研究[J]. 机械工程学报 2011, 47(11): 169-176.
XIE G ZH, SHANG ZH T, SHENG X M *et al.*. Grinding force modeling for high-speed deep grinding of engineering ceramics [J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2011, 47(11): 169-176. (in Chinese)
- [11] 谢桂芝,黄含,盛晓敏,等. 工程陶瓷高效深磨磨削力和损伤的研究[J]. 湖南大学学报 2008, 35(5): 26-30.
XIE G ZH, HUANG H, SHENG X M *et al.*. Investigation on the grinding force and the ground damages in the high efficiency deep grinding of advanced ceramics [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)* 2008, 35(5): 26-30. (in Chinese)
- [12] 谢桂芝,黄红武,黄含,等. 工程陶瓷材料高效深磨的试验研究[J]. 机械工程学报 2007, 43(1): 176-184.
XIE G ZH, HUANG H W, HUANG H *et al.*. Experimental investigations of advanced ceramics in high efficiency deep grinding [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 2007, 43(1): 176-184. (in Chinese)
- [13] HUANG H, YIN L, ZHOU L B. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2003, 141(1): 329-336.

- [14] HUANG H ,LIU Y C. Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramics in high speed deep grinding[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2003 43(8) : 811-823.
- [15] KLOCKE F ,BRINKSMEIER E ,EVANS C *et al.* . High speed grinding-fundamentals and state of the art in Europe ,Japan and the USA[J]. *CIRP Annals* ,1997 46(2) : 715-724.
- [16] HWANG T W ,EVANS C J ,MALKIN S. An investigation of high speed grinding with electroplated diamond wheels [J]. *CIRP Annals* 2000 49(1) : 245-248.
- [17] 魏源迁. 国外硬脆材料的最新加工技术 [J]. 磨床与磨削 ,1998(2) : 15-19.
WEI Y Q. The new processing technology of hard and brittle materials abroad [J]. *Grinding and Grinding Machine* ,1998 (2) : 15-19. (in Chinese)
- [18] 郭力. 工程陶瓷高效深磨工件表面粗糙度研究 [J]. 湖南文理学院学报(自然科学版) 2007 ,19(4) : 69-73.
GUO L. Grinding surface roughness research in high efficiency deep grinding of engineering ceramics [J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science(Natural Science Edition)* 2007 ,19(4) : 69-73. (in Chinese)
- [19] 陈琦. 一种 Al_2O_3 陶瓷导轨的超精密加工方法 [J]. 现代制造工程 2015(4) : 74-76.
CHEN Q. Research on ultra-precision machining technology of the Al_2O_3 ceramic guides [J]. *Modern Manufacturing Engineering* 2015(4) : 74-76. (in Chinese)
- [20] 成贤锴 ,顾国刚 ,陈琦 等. 基于样条插值算法的工业机器人轨迹规划研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术 2014 (11) ,122-124.
CHENG X K ,GU G G ,CHEN Q *et al.* . Research on planning trajectory of industrial robot based on B-spline interpolation algorithm [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique* 2014(11) ,122-124. (in Chinese)
- [21] 王建彬 ,朱永伟 ,谢春祥 等. 固结磨料研磨蓝宝石单晶过程中研磨液的作用 [J]. 光学 精密工程 2014 22(11) : 3004-3011.
WANG J B ,ZHU Y W ,XIE CH X *et al.* . Role of slurry in single crystal sapphire lapping with fixed abrasive pad [J]. *Opt. Precision Eng.* 2014 22(11) : 3004-3011. (in Chinese)
- [22] 郑锦华 ,吴双 ,魏新煦 等. 研磨抛光表面微孔结构的形成 [J]. 光学 精密工程 2016 24(4) : 788-795.
ZHEGN J H ,WU SH ,WEI X X *et al.* . Formation of surface micro-pore texture by grinding and polishing [J]. *Opt. Precision Eng.* 2016 24(4) : 788-795. (in Chinese)

作者简介:



刘 剑(1973—) 男,吉林长春人,高级工程师,1996年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事精密机械加工与制造等方面的研究。E-mail: ky1_liujian@sina.com



于 涌(1975—) 男,吉林长春人,博士生导师,2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,机械制造及其自动化专业,目前主要从事医疗仪器中机电一体化技术研究,及其在康复工程和连续血液净化系统中的应用研究。E-mail: yuy@sibet.ac.cn