

超精密抛光自由曲面光学的表面生成

张志辉,何丽婷,孔令豹,李荣彬

(香港理工大学 工业及系统工程学系 先进光学制造中心,香港 九龙 00852)

摘要: 超精密抛光是一种新兴的用于制造高精度、高品质的自由曲面光学加工技术。该技术可突破其他自由曲面加工技术的限制,如飞刀铣削和快刀伺服加工的低效、非铁材料的局限等。然而,对超精密抛光中表面生成机理的理解,目前还不完善。探讨了超精密抛光过程中加工策略对表面生成的影响,进行了一系列抛光实验。研究表明:抛光表面的质量很大程度上依赖于加工过程条件及抛光策略的适当选择。抛光加工不仅可用于去除其他加工方式所产生的不利性刀纹,还可以产生功能性应用的结构性表面。该研究结果为深入理解超精密抛光自由曲面光学的表面生成机理,以及优化超精密抛光的表面质量,提供了重要依据和方法。

关键词: 表面生成; 超精密抛光; 自由曲面光学; 加工策略; 过程规划与优化

中图分类号: TB249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2010)03-0496-06

Optical surface generation in ultra-precision polishing of freeform

CHEUNG Chi-fai, HO Lai-ting, KONG Ling-bao, LEE Wing-bun

(Advanced Optics Manufacturing Centre, Department of Industrial and Systems Engineering,
The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon 00852, China)

Abstract: Ultra-precision polishing is an emerging technology for the fabrication of high precision and high quality optical surface of freeform. It is capable of overcoming the shortcomings of other ultra-precision freeform machining technologies, such as the low machining efficiency and non-ferrous materials limitations for ultra-precision raster milling and fast tool servo machining. However, our understanding of the surface generation mechanisms in ultra-precision polishing is far from complete. As a result, an experimental study of the effect of machining strategy on the surface generation in ultra-precision polishing was presented in this paper. A series of polishing experiments had been done. It is interesting to find that the quality of the polished surface heavily relies on a proper selection of process conditions and polishing strategies. The polishing process was not only found to be useful for removing the undesirable machine marks produced by other machining processes but also be able to generate preferred structure texture for functional applications. The results of the study provide an important means for better understanding of the surface generation as well as the strategy for the optimization of the surface quality in ultra-precision polishing of freeform.

Key words: Surface generation; Ultra-precision polishing; Freeform optics; Machining strategy; Process planning and optimization

收稿日期:2009-08-10; 修订日期:2009-09-05

基金项目:香港理工大学研究委员会资助项目(G-YF55);香港特区政府科技署资助项目(GHP/052/06)

作者简介:张志辉(1970-),男,香港人,副教授,主要从事光学工程、先进光学制造技术、精密工程、超精密加工技术、微纳米表面测量技术、精密仪器及机械等方面的研究。Email: mfbenny@inet.polyu.edu.hk

0 引言

自由曲面在工程中的应用日趋广泛,并不断演绎变化,例如在汽车工业中的应用,已迅速从车身、仪表盘及内部的美学概念^[1]转移到了利用LED照明的先进光学反射镜^[2]。不同材料、客户需求、前处理和众多其他的条件,迫切要求加工这些自由曲面光学部件能达到亚微米的形状精度和纳米量级的表面光洁度。尽管这些曲面可以通过其他超精密自由曲面加工技术来加工,如超精密飞刀铣削^[3]和快刀伺服加工^[4]等,但是,这些加工技术局限于非铁材料(如铜、铝等)。超精密抛光技术是一种新兴的加工技术,可用于加工具有亚微米形状精度和纳米表面光洁度的复杂自由曲面,而无材料本身的限制。

抛光可用于不同领域的光学玻璃,如一些大型望远镜^[5],抛光处理提供了具有纹理和超光滑表面的镜片。然而,目前越来越多的镜片通过注塑制造。尽管塑料镜片可通过单点金刚石车削或飞刀铣削加工而获得卓越的表面质量,但残留于镜片表面的刀纹会在聚焦时使聚焦光点发生变形、有杂光等,从而使得镜片难以实现理想或预期的光学效果。文中研究的抛光技术有助于去除加工纹理,以完成最终模芯的加工。此外,抛光是一种生成人类肉眼看不到的微小表面结构的处理过程,同时也是一种可生成高形状精度的过程。在当今高科技光电化的形势下,常规抛光技术已不能满足诸多先进应用的要求,如光学系统的成型镜面和镜片、涡轮叶片以及人工关节等。

然而,在所有加工方法中,抛光几乎是最复杂的过程。有很多不同形式的抛光方法,如化学-机械抛光、带式抛光、自由磨蚀抛光以及固定磨蚀抛光等,抛光过程需要改善或者优化,从而提高表面质量同时缩短抛光时间。XIE^[6]等人研究了自由磨蚀抛光的材料去除机理。自由磨蚀抛光包括抛光垫和可以自由流动的抛光液。其研究结果表明:抛光工具和表面质量之间具有一定的关系,当抛光液中的磨粒尺寸和抛光垫/布的硬度增加时,抛光表面粗糙度将会增加。并且,正接触压力对表面粗糙度也有一定的影响。研究^[7]中,Taguchi方法被用来优化磁流抛光中的抛光条件。

要获得超光滑表面,必须了解材料去除途径^[8]和影响这些去除途径的因素^[6],反之,其又决定抛光过程中

表面质量和形状的控制,在高精密光学^[9]、生物医学^[10]以及汽车零部件^[11]等领域,日益增长的公差控制和要求显得尤其重要。绝大多数对抛光中材料去除机理的研究是基于典型的抛光方法,如机械抛光、带式抛光^[12]、自由磨蚀抛光^[13]、固定磨蚀抛光^[14]、化学-机械抛光^[15]以及射流抛光^[16]等。尽管这些抛光过程已被研究,然而对去除机理现象的理解却远远不够,尤其是多轴超精密抛光这一非传统抛光方式用于加工超精密自由曲面零部件,需要精密、准确地控制欲抛光表面来获得形状和纳米表面光洁度,从而提高所加工的零部件的功能性。文中研究了超精密自由曲面抛光过程中的表面生成,研究结果为优化超精密抛光自由曲面中的表面生成及表面质量提供了重要方法和手段。

1 超精密抛光自由曲面

超精密抛光是一种计算机控制抛光技术(CCP),CCP广泛用于高精度表面生成技术中,提供高品质的表面^[17-18]。CCP的特点在于抛光过程取决于抛光工具的去除特性和工件表面的误差面^[19]。实现一次特定的抛光过程,需要表面误差和刀具去除特性的信息。抛光工具的去除特性也被称为去除函数^[20]或者影响函数。为了获得数据,抛光过程涉及到测量。

研究中,采用了英国Zeeko公司的多轴超精密抛光机(Zeeko IRP 200)进行抛光实验,如图1所示。该抛光机具有7个运动轴,其中4个轴控制工件运动,另外3个轴控制抛光头,如图2所示。该抛光机利用一个位于A轴和B轴的中心的、称为虚拟支点(Virtual Pivot)的位置,并协同抛光头半径来控制工件表面的接触点,使得CNC控制器得知其在机床坐标系里的准确位置,从而实现自由曲面轮廓的精确跟踪。该



图1 多轴超精密抛光设备

Fig.1 Ultra-precision freeform polishing

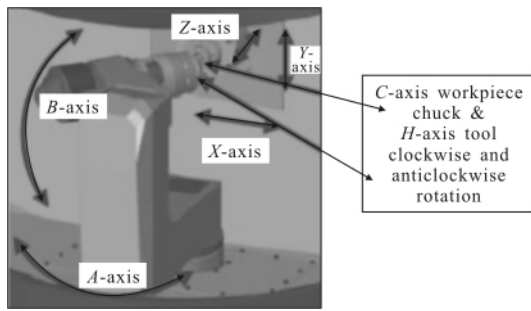


图 2 机床的 7 轴运动
Fig.2 7-axis motion of machine

机床最初设计用于抛光非球面光学零部件^[21], 现在用于抛光自由曲面光学部件。图 3 所示为超精密抛光一个用于自由曲面光学表面的模芯。图 4 为影响表面生成的因素, 包括过程因素和材料因素。过程因素有: 表面进给速度、旋动位置、旋动角、磨头转速、磨头压力、磨头半径、磨具偏移、磨具驻留时间、工件的几何形

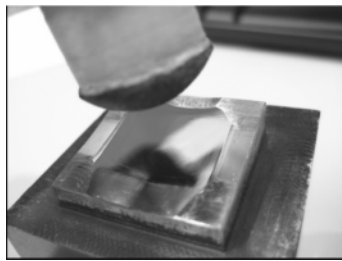


图 3 超精密自由曲面抛光—自由曲面模芯

Fig.3 Ultra-precision freeform polishing of a freeform mould insert

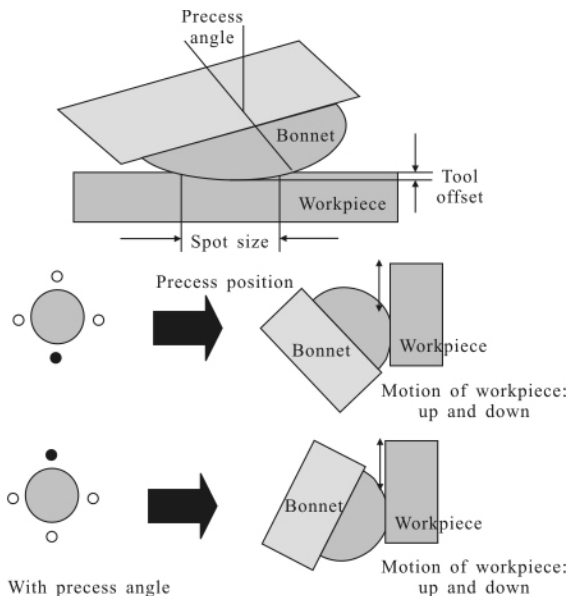


图 4 超精密机械抛光的切削几何模型

Fig.4 Cutting geometry of the ultra-precision mechanical polishing

状等。材料因素有: 抛光布材料、抛光液磨料、工件材料、抛光液温度、抛光液特定重力等。如图 5 所示, 有不同的抛光策略可用于超精密自由曲面抛光, 包括栅格、螺旋以及随机模式等。

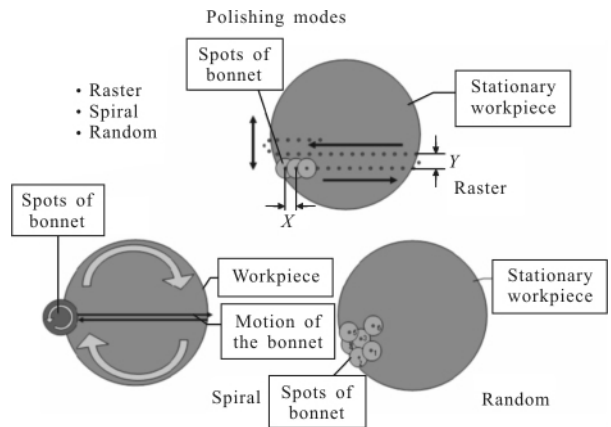


图 5 超精密抛光的不同抛光策略

Fig.5 Different strategies for ultra-precision polishing

2 抛光策略建模与优化的必要性

尽管超精密抛光具备非常强大的加工能力, 但在一些领域仍然缺少重视。例如, 当加工新材料和新表面时, 需进行大量试抛实验来确定抛光材料及过程条件控制等。这表明: 迫切需要开发一个系统性的方法来规划抛光步骤和策略, 使抛光过程更具有可预测性。抛光过程的优化在此领域已受到一些学者的关注。Taguchi 方法被提出用于优化磁流体抛光 (MFP) 中的加工条件^[22]。WANG^[23]等人提出采用神经-模糊技术来优化模具抛光的过程参数。然而, 仍然缺少一个完整的方法来进行抛光过程的优化。

抛光工件很少被一次性完成, 需要重复抛光过程, 直到工件表面质量符合标准或者满足客户需求。自由曲面具有较大的曲率变化, 整个表面不能一次性完成抛光。接着的问题就是, 应该首先采用哪一个抛光过程? 后续的抛光过程将如何影响表面质量及形状精度? 面对大量的抛光材料, 如何决定采用哪种抛光过程和抛光材料来达到预期的加工效果? 此外, 抛光过程包括了过程参数和影响函数, 需要决定采用哪个影响函数、设定过程参数以及抛光模式等。通常, 优化的过程参数和抛光步骤很大程度上依赖于机床操作员的经验和技巧, 往往要通过耗时又昂贵的试抛方法来实现。所以, 有必要开发一个过程建模模型来优化

抛光过程,从而获得预期的抛光效果。

此外,仍然缺少一个表面生成的过程规划模型,用以生成既定表面纹理结构。例如,去除模芯上的刀纹,用抛光来生成实际应用的纹理型表面。因此,研究利用不同的抛光方法、参数和工具来加工这些超光滑自由曲面就显得至关重要。

3 实验研究

实验分为 A 部分和 B 部分。A 部分研究抛光去除超精密飞刀铣削残留于光学表面的刀痕的效果; B 部分研究抛光策略对机械抛光自由曲面光学中表面生成的影响。

3.1 A 部分:抛光去除表面刀痕的效果

工件材料为镍铜,粗加工采用美国 Precitech 公司的 5 轴自由曲面加工中心 (Freeform 705 G) 的飞刀铣削加工方法,粗加工条件为:主轴转速 4 000 r/min,进给速度 300 mm/min,切削深度 10 μm,切削间距 0.2 mm。之后进行抛光,抛光条件参数见表 1。利用非接触式测量系统 Wyko NT8000 测量曲面的三维数据。

表 1 A 部分实验所采用的抛光条件参数

Tab.1 Polishing conditions used in Part A of the experiment

Parameter	Value
Polishing cloth	Hard
Head speed/r · min ⁻¹	1 500
Head pressure/Pa	2
Offset/mm	0.6
Feed rate/mm · min ⁻¹	1 000
Polishing fluid class	Middle
Precess angle/(°)	0

图 6 为抛光前和抛光后的三维表面拓扑形貌。飞刀铣削残留于工件表面的槽状刀痕对于光学应用是不利的,因为可能会产生微小光栅效应从而影响表面的光学性能。如图 7 所示,表面粗糙度 R_a 已从 693.04 nm 减小到 56.52 nm,同时,飞刀铣削产生的刀痕已经去除。图 8 为抛光前后的显微镜图像。采用超精密抛光使得表面质量显著改善,这为优化光学表面的表面纹理提

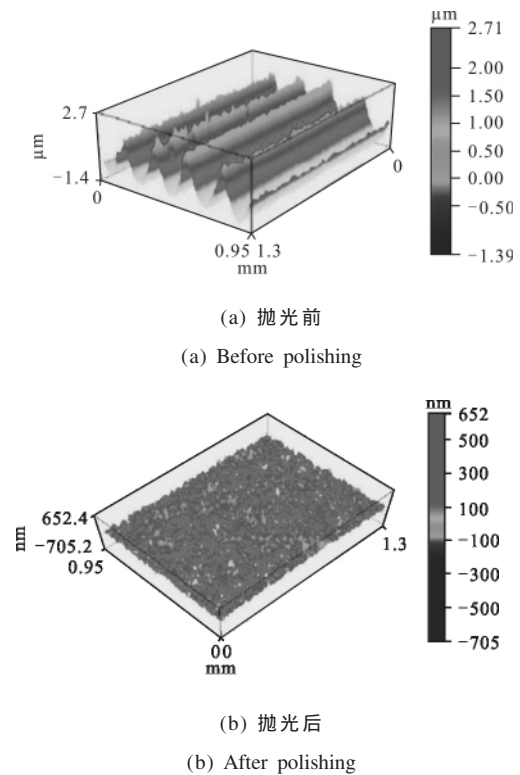


图 6 Wyko NT8000(5X)测量的三维表面形貌
Fig.6 3D surface topographies under Wyko (5X)

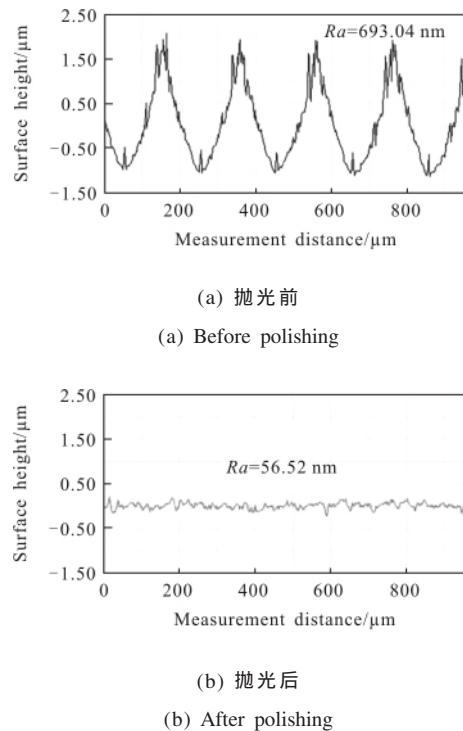
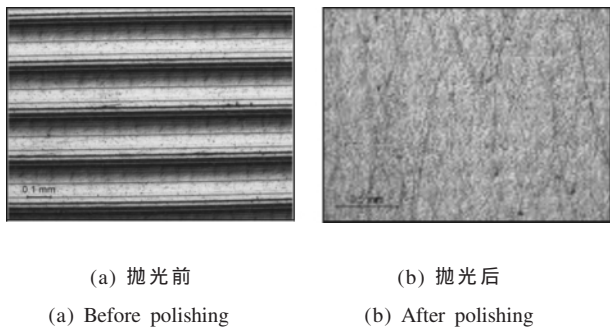


图 7 工件表面粗糙度轮廓线

Fig.7 Surface roughness profile of the machined surfaces cross-section



(a) 抛光前 (a) Before polishing
(b) 抛光后 (b) After polishing

图 8 显微镜图像

Fig.8 Micrograph of surfaces

提供了一个重要方法。

3.2 B 部分:抛光策略对表面生成的影响

工件材料为镍铜,粗加工采用美国 Precitech 公司的超精密车床(Nanoform 200)单点金刚石车削,粗加工条件为:主轴转速 1 200 r/min,进给速度 4 mm/min。之后进行抛光,抛光条件参数见表 2。

表 2 B 部分实验所用的抛光条件参数

Tab.2 Polishing conditions used in Part B of the experiment

Parameters	Values	
	Raster	Spiral
Precess angle/(°)	15	15
Head speed/r·min ⁻¹	1 200	1 200
Offset/mm	0.3	0.3
Head pressure/Pa	10 ⁵	10 ⁵
Step/mm	1	N/A
Feed rate/mm·min ⁻¹	50	50
C-axis speed/r·min ⁻¹	N/A	100
Polishing number	N/A	1
Bonnet radius/mm	20	20
Polishing cloth	Cerium oxide D'16	Cerium oxide D'16
Polishing fluid	Al ₂ O ₃ (1.5 μm)	Al ₂ O ₃ (1.5 μm)

采用了两种栅格抛光策略(水平抛光和竖直抛光),以及螺旋抛光策略。不同抛光策略的刀具轨迹如表 3 所示。图 9 为不同抛光策略下的三维表面形貌。从图中可以看到:表面微结构从螺旋形改变到水平栅格状,再到格子状。这表明:表面微结构的模式可以通过适当的抛光策略及其合成来产生。研究结果为设计和加工不同

表 3 不同抛光策略的轨迹示意图

Tab.3 Trajectories of the tool path for different polishing strategies

1st polishing	2nd polishing	3rd polishing
Spiral	Raster: horizontal	Raster: vertical

功能性应用的各种结构形表面提供了重要依据及方法,如用于光学设备的散射镜及光栅。

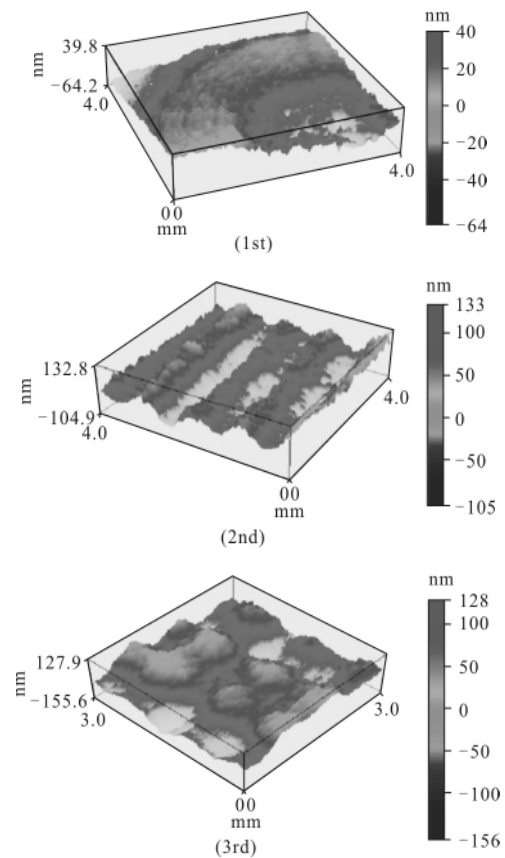


图 9 不同抛光阶段下工件表面三维形貌

Fig.9 Surface topographies for the workpiece after different stages of the polishing process

4 结论

先进光学零部件的加工要求超精密加工技术具备加工亚微米形状精度及纳米粗糙度的能力。超精密抛光是一种日渐浮现的加工技术,可突破其他超精密加工方式的局限性,如金刚石车削、飞刀铣削等。文中

对超精密抛光表面生成进行了实验性的研究。

进行了一系列的抛光实验来研究影响表面生成的因素,以及抛光策略对表面生成的影响。A部分实验研究了利用抛光技术去除其他超精密加工(如飞刀铣削)残留于工件表面的刀痕。研究结果表明:影响表面光学性能的不利表面纹理可通过超精密抛光有效去除。B部分实验研究了不同抛光策略的加工路径对表面生成的影响。实验发现:预期的表面结构和形貌可通过适当规划和合成预定的刀具轨迹来生成。研究结果为设计和加工功能性应用的结构形表面(如光学应用中的散射镜和光栅)提供了重要依据和方法。

参考文献:

- [1] QIN S, WRIGHT D K, KANG J, PRIETO P A. Use of three-dimensional body motion to free-form surface design [J]. **Journal of Engineering Manufacture**, 2006, **220**: 335-339.
- [2] YIN D, LIU X, ZHENG Z R, GU P F. Secondary optical design for LED illumination using freeform lens [C]//**SPIE**, 2008, **7103**: 71030-71038.
- [3] CHEUNG C F, KONG L B, LEE W B, et al. Modelling and simulation of freeform surface generation in ultra-precision raster milling [J]. **Journal of Engineering Manufacture**, 2006, **220**(11): 1787-1801.
- [4] CHEUNG C F, LEE W B, TO S, et al. A framework of a model-based simulation system for prediction of surface generation in fast tool servo machining of optical microstructures [J]. **Key Engineering Materials**, 2007, **339**: 407-411.
- [5] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BINGHAM R G, et al. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation [C]//**SPIE**, 2002, **4842**: 73-84.
- [6] XIE Y S, BHUSHAN B. Effects of particle size, polishing pad and contact pressure in free abrasive polishing [J]. **Wear**, 1996, **200**: 281-295.
- [7] JIANG M, KOMANDURI R. Application of Taguchi method for optimization of finishing condition in magnetic float polishing (MFP) [J]. **Wear**, 1997, **213**: 59-71.
- [8] EVANS C J, PAUL E, DORNFELD D, et al. Material removal mechanisms in lapping and polishing [J]. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2003, **52**: 611-633.
- [9] JACOBS S D. Manipulating mechanics and chemistry in precision optics finishing [J]. **Science and Technology of Advanced Materials**, 2007, **8**: 153-157.
- [10] HILERIO I, MATHIA T, ALEPEE C. 3D measurements of the knee prosthesis surfaces applied in optimizing of manufacturing process [J]. **Wear**, 2004, **257**: 1230-1234.
- [11] CHANG K H, TANG P S. Integration of design and manufacturing for structural shape optimization [J]. **Advances in Engineering Software**, 2001, **32**: 555-567.
- [12] AXINTE D A, KRITMANOROT M, AXINTE M, et al. Investigations on belt polishing of heat-resistant titanium alloys [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2005, **166**: 398-404.
- [13] GHARBIA Y A, KATUPITIYA J. Loose abrasive blasting as an alternative to slurry polishing of optical fibre end faces [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2003, **43**: 1413-1418.
- [14] CHOI J Y, JEONG H. A study on polishing of molds using hydrophilic fixed abrasive pad [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2004, **44**: 1163-1169.
- [15] SEO Y J, KIM N H, LEE W S. Temperature effects of pad conditioning process on oxide CMP: Polishing pad, slurry characteristics, and surface reactions [J]. **Microelectronic Engineering**, 2006, **83**: 362-370.
- [16] KIM J D, KANG Y H, BAE Y H, et al. Development of a magnetic abrasive jet machining system for precision internal polishing of circular tubes [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1997, **71**: 384-393.
- [17] JACOBS S D. Innovations in polishing of precision optics part I [J]. **Convergence**, 2003, **11**(1): 1-7.
- [18] POLLICOVE H, GOLINI D. Deterministic manufacturing process for precision optical surfaces [J]. **Key Engineering Materials**, 2003, **238-239**: 53-58.
- [19] BINGHAM R G, WALKER D D, KIM D H, et al. Novel automated process for aspheric surfaces, in current developments in lens design and optical systems engineering [C]//**SPIE**, 2000, **4093**: 445-450.
- [20] FESS E, SCHOEN J, BECHTOLD M, et al. Ultraform finishing process for optical materials [C]//**SPIE**, 2005, **5869**: 88-93.
- [21] Zeeko. IRP200 [EB/OL]. [2010-06]. http://www.zeeko.co.uk/index.php?Itemid=82&id=19&option=com_content&task=view.
- [22] JIANG M, KOMANDURI R. Application of Taguchi method for optimization of finishing conditions in magnetic float polishing [J]. **Wear**, 1997, **213**(1-2): 59-71.
- [23] WANG J J, JUN Z, WU B H, et al. A time optimized process planning system for mold/die [J]. **Materials Science Forum**, 2006, **505-507**: 499-504.