

超光滑光学表面加工技术发展及应用

马占龙 刘 健 王君林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 超光滑表面在现代光学领域的应用愈来愈广泛, 相应的超光滑表面加工技术也就成为超精密加工技术的重要组成部分。介绍了超光滑表面的特点, 对其加工技术进行了分类比较, 认为非接触式加工方式是获得超光滑表面的理想方法。对国内外现有超光滑表面加工技术的发展进行了归纳总结, 详细阐述了各种技术的加工原理、加工精度及应用范围等。指出了国内超光滑表面加工技术与国际先进水平相比存在的差距, 并分析了超光滑表面加工技术的发展趋势。

关键词 光学制造; 超光滑; 光学表面; 粗糙度; 抛光

中图分类号 TG356.28 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.082202

Development and Application of Ultra-Smooth Optical Surface Polishing Technology

Ma Zhanlong Liu Jian Wang Junlin

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Ultra-smooth surfaces are widely used in the field of optics, and the polishing method is an important component of super-precision technology. Firstly, the characteristics of ultra-smooth surfaces are introduced, and the classification and comparison of the polishing methods are made. It is shown that the non-contact method is the ideal ultra-smooth surface polishing technology. Then the existing ultra-smooth surface polishing technologies are summarized, and the machining mechanism, precision and application spectrum are expounded. At last, the gap of ultra-smooth surface polishing technologies at home and abroad is present, and the trend of the technology is described.

Key words optical fabrication; ultra-smooth; optical surfaces; roughness; polishing

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 240.5770

1 引言

在常规光学系统中, 用于反射、折射的光学元件表面粗糙度 $R_a \leq 0.012 \mu\text{m}$ 才能使用, 而在短波光学领域, 特别是强激光、软 X 射线以及光刻系统等, 对光学元件表面粗糙度的要求极为苛刻, 其明显特征是表面粗糙度小于 1 nm, 从而产生了超光滑表面的概念。所谓超光滑表面^[1,2] 是指其表面粗糙度均方根值小于 1 nm 的表面, 并且具有较高的面形精度和较低的表面波纹度, 无表面疵病和亚表面损伤, 具有完整的晶格结构。一般原子直径小于 0.3 nm, 超光滑表面微观起伏的均方根值为几个原子的尺寸, 因此实现超光滑表面加工的关键在于实现表面材料原子尺寸级的去除。本文对现有超光滑表面加工技术进行分类, 对其加工机理及应用进行详细阐述及分析, 并展望其发展趋势。

2 超光滑表面加工技术分类

目前已有的超光滑表面加工技术根据磨头与工件的接触状态可以分为接触式和非接触式两种方式, 如表 1 所示。接触式抛光是工件与磨头在加工过程中直接接触, 依靠机械磨削作用去除表面材料, 属于传统抛

收稿日期: 2011-03-21; 收到修改稿日期: 2011-05-04; 网络出版日期: 2011-07-21

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX02205)资助课题。

作者简介: 马占龙(1983-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事超光滑光学表面加工工艺方面的研究。

E-mail: mzlcmu@126.com

光范畴。其特点是加工精度低、工件存在亚表面损伤,并且在加工过程中磨头也被磨损,致使去除函数不断变化,抛光过程稳定性和可重复性差。非接触式抛光是工件与磨头在加工过程中不发生接触,依靠磨料粒子(或离子束)冲击工件表面来达到去除材料的目的。可以获得较高的表面精度、无亚表面损伤,且不存在磨头磨损的问题,去除函数稳定,抛光过程的稳定性和可重复性好,但其抛光效率很低。

表 1 超光滑表面加工技术分类

Table 1 Classification of ultra-smooth surfaces polishing technologies

Polishing mode	Contact	No-contact
Machining precision	Low	High
Subsurface damage	Existent	No-existent
Material removal rate	High	Low
Polishing head wear	Existent	No-existent
Removal function	Instable	Stable
Repeatability	Weak	Good

3 国外超光滑表面加工技术进展

3.1 接触式抛光

1) 浴法抛光(Bowl feed polishing)是20世纪60年代美国为发展深紫外光学而研究的一种加工方法。其加工原理如图1所示,抛光液浸没磨盘与工件的交接面,工件在旋转的沥青盘上水平摆动,并绕自身旋转,保证工件上每点与沥青盘上每点随机接触,使工件材料被均匀去除。1966年, Dietz等^[3]采用这种方法在熔石英平面上获得了均方根粗糙度为0.3 nm的超光滑表面,而当时用常规方法只能获得均方根粗糙度为1~4 nm的表面。1992年, Wingerden等^[4]采用此法获得了均方根粗糙度为0.15 nm的超光滑表面。

2) 聚四氟乙烯抛光是20世纪70年代澳大利亚国家测量实验室的 Leistner等^[5,6]为抛光法布里-珀罗干涉仪而发展的一种超光滑表面加工技术,此法可以在多种材料上获得均方根粗糙度为0.4 nm的表面粗糙度。首先使用沥青磨盘对工件进行预抛光,抛光至表面无任何明显瑕疵后,利用聚四氟乙烯磨具进行抛光。与传统的沥青抛光模相比,聚四氟乙烯磨具不仅有利于保持工件面形,而且可以有效地抑制工件表面的波纹度。

以上方法虽然也得到了表面粗糙度均方根值低于1 nm的超光滑表面,但只能用于平面光学元件的加工,并且不能完全消除亚表面损伤。

3.2 非接触式抛光

1) 浮法抛光(FP)^[7,8]由 Namba等^[7]在1977年提出,通过这项技术可使刚玉单晶的平面面形精度达到 $\lambda/20$ (λ 为工作波长),表面粗糙度低于0.1 nm,并且获得的超光滑表面晶格完好、无亚表面损伤、表面残余应力小,主要应用于录音机、录像机和计算机磁头的生产。浮法抛光工作原理如图2所示,抛光剂采用胶态 SiO_2 , GeO_2 及 Al_2O_3 组成,磨盘是用纯度在99.99%以上的金属锡制成的锡模,要求有非常高的平面度。工作时,将磨盘和工件浸入抛光液中,工件浮在锡盘上绕自身轴线做定轴旋转运动而不摆动,抛光液运动产生的动压力使工件与磨盘之间有数微米厚的液膜,微细粒子在这层液膜中运动,与工件表面不断碰撞,工件表面原子在磨料微粒的撞击作用下脱离工件主体而被去除。

2) 弹性发射加工(EEM)^[9-12]是由 Mori等^[9]提出的一种“原子级尺寸加工方法”,其加工原理如图3所示。微细磨料粒子在流动液体的带动下撞击工件,与工件表面原子在狭小的空间内接触并产生一种原子结合力,当工件表面原子和次表面原子间的结合力小于接触面原子间的结合力时,目标原子才能被去除。基于以上观点,加工面积和深度近似原子尺度,可以得到完美几何表面。用EEM加工软X射线反射镜,表面粗

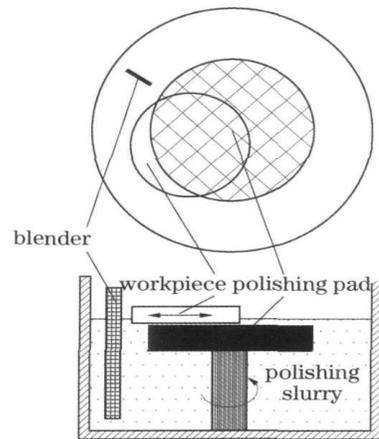


图 1 浴法抛光原理图

Fig. 1 Principle scheme of bowl feed polishing

糙度均方根值可达 0.1 nm。

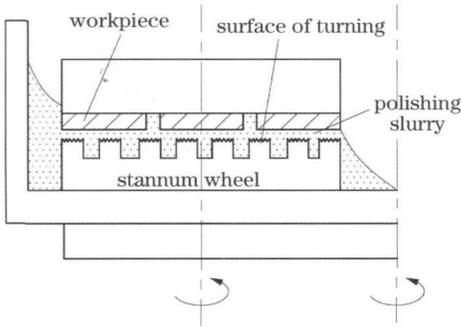


图 2 浮法抛光原理图

Fig. 2 Principle scheme of float polishing

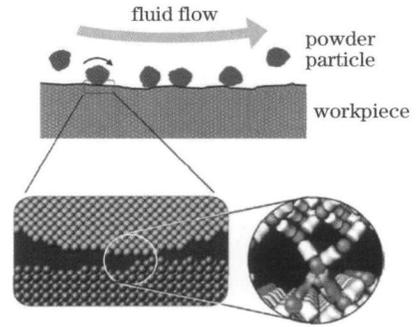


图 3 弹性发射加工材料去除机理

Fig. 3 Material removal mechanism of elastic emission machining

液体流动的实现主要有 3 种方式,如图 4 所示。图 4(a)为聚氨酯旋转球抛光,将工件和旋转头都浸没在抛光液中,通过控制法向载荷使旋转头靠近工件,当旋转头旋转时,在其与工件之间的楔形间隙就形成了流体动压润滑现象,从而带动粒子撞击工件表面;图 4(b)为聚氨酯圆柱抛光轮抛光,采用圆柱抛光轮带动磨料粒子运动,相比于旋转球具有更高的加工效率;图 4(c)狭缝射流抛光,微细磨料粒子通过狭缝喷嘴的射流带动而与工件表面发生撞击。

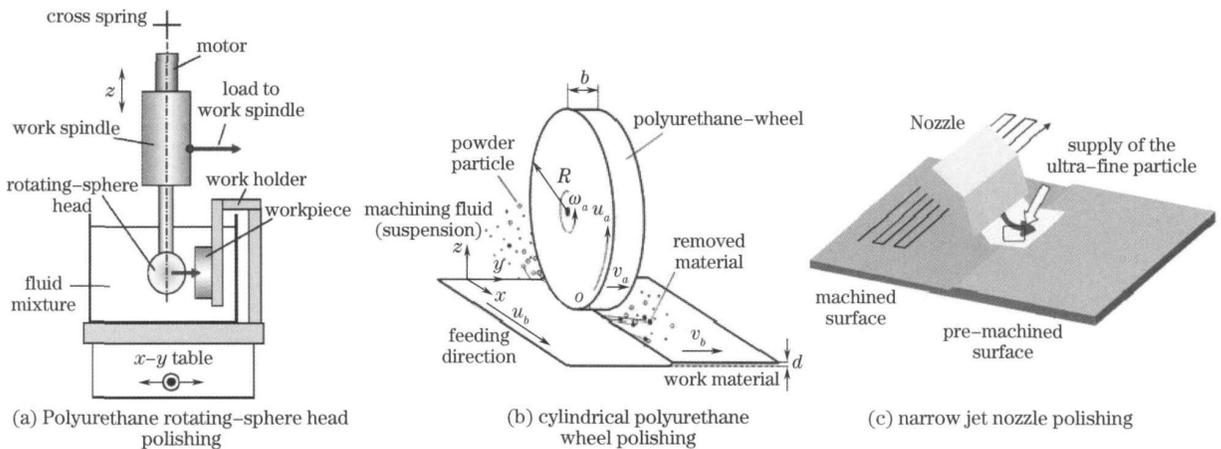


图 4 弹性发射加工实现方式

Fig. 4 Principle scheme of elastic emission machining

3) 离子束抛光技术 (IBF)^[13,14] 是 20 世纪 70 年代就开始研究的一种新型超精密加工方法,它利用具有一定能量的惰性气体离子束流轰击工件表面,通过离子和工件表面的原子碰撞,传递动量和能量,使得一部分原子被剥离工件表面,形成对工件表面材料的去除,其抛光原理如图 5 所示。离子束抛光一般用来对工件表面进行精确面形修正,首先要将工件预抛光到一定精度,然后进行离子束抛光。其特点是材料去除率非常小,面形精度可达 1 nm,表面粗糙度均方根值可达 0.6 nm,特别适合于光学零件表面的超高精度加工。

4) 等离子体辅助化学刻蚀 (PACE)^[15,16] 是 1988 年由 Bollinger 等^[15] 提出的。与离子束抛光不同,它是通过化学反应来达到去除材料的目的,其原理如图 6 所示。整个加工过程在真空室中进行,加工时,向抛光块中注入某种化学气体,在射频激励离子激光器作用下,化学活性等离子体与工件表面物质发生化学反应,生成气相反应物并被排走。在加工中,等离子体产生低能能量流,以低能离子和活泼中性物质的形式存在;控制这一能量流可以很好地控制化学反应的速度,必要时还可以实现离子束对表面的碰撞,以提高材料的去除率。PACE 具有抛光效率高、无亚表面损伤、无污染等优点,适于球面和非球面的加工。目前 Perkin-Elmer 公司用该技术已在直径为 0.5~1 m 的非球面上加工出面形精度小于 $\lambda/50$ 、表面粗糙度均方根值低于 0.5 nm 的超光滑表面。

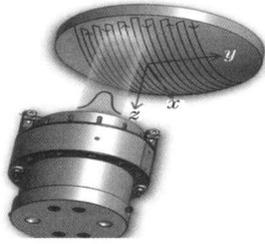


图 5 离子束抛光原理图

Fig. 5 Principle scheme of ion beam figuring

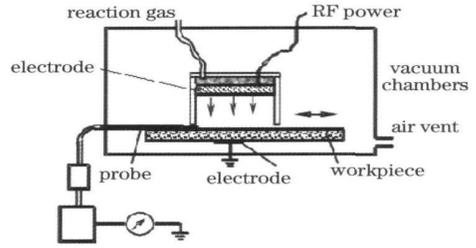


图 6 等离子体辅助抛光原理图

Fig. 6 Principle scheme of plasma assisted chemical etching

5) 等离子体化学蒸发加工(PCVM)^[17,18]由 Mori 等提出,主要为 EEM 提供预加工表面,应用于极紫外或 X 射线反射镜面形修正,其原理如图 7 所示。首先在电极和工件间产生高压等离子体区,随后通入反应气体,利用等离子体来激发反应气体中的活性粒子使其与工件表面原子发生化学反应,将之转变为挥发性产物,最后通过气体蒸发实现表面材料加工。由于等离子体区是在高压环境下产生的,其材料去除能力同机械去除相当,具有比传统的等离子体溅射更高的去除效率;另外由于此法采用化学反应去除工件表面材料,其表面具有非常好的特性,无亚表面损伤。2002 年采用此法在直径为 160 mm(半球面度 0.5 μm)的熔石英表面获得了均方根粗糙度为 0.37 nm 的超光滑表面^[18]。

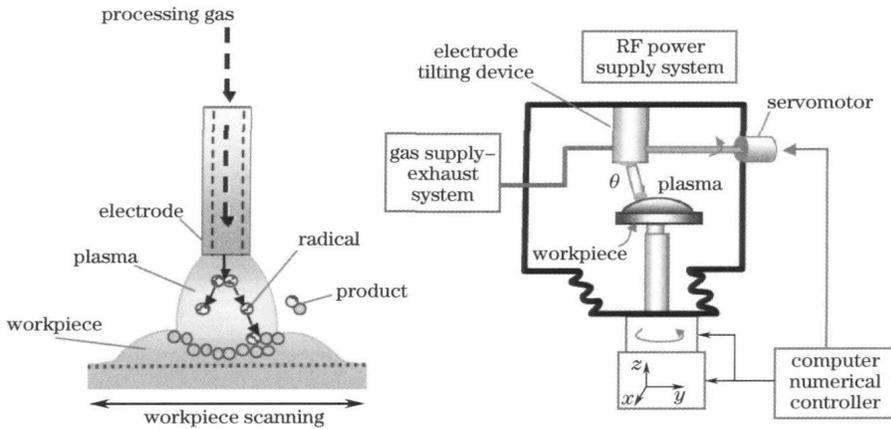


图 7 等离子体化学蒸发原理图

Fig. 7 Principle scheme of plasma chemical vaporization machining

6) 磁流变抛光(MRF)^[19,20]最早由白俄罗斯学者 Kordonski 在 20 世纪 80 年代末提出,1993 年在罗彻斯特大学光学加工中心得到了进一步发展,并于 1998 年由 QED 公司研制成功 Q22 磁流变机床。磁流变抛

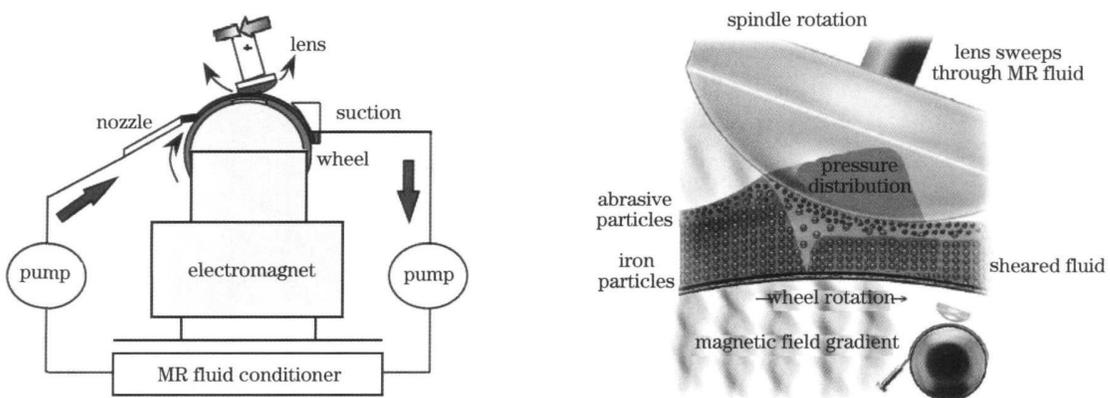


图 8 磁流变抛光原理图

Fig. 8 Principle scheme of magnetorheological finishing

光是将电磁学理论、流体力学、分析化学等应用于光学制造而形成的一项综合技术。利用磁流变抛光液在磁场中的流变特性对工件进行抛光,可以得到面形精度优于 30 nm(峰-谷值)、表面粗糙度均方根值小于 0.5 nm 的超光滑光学表面,并且已在熔石英上获得了均方根粗糙度为 0.27 nm 的超光滑表面,其工作原理如图 8 所示。磁流变液由抛光盘循环带入抛光区中,在该区域内,磁流变液在高强度的梯度磁场的作用下,成为具有粘塑性的 Bingham 介质,变硬、粘度变大,形成具有一定形状的“柔性抛光模”(磁流变液在磁场中形成的凸起缎带),当“柔性抛光模”流经工件与运动盘形成的间隙时,会产生很大的剪切力,对工件表面材料实现去除。“柔性抛光模”的形状和硬度可以由磁场实时控制,而影响抛光区稳定性的其他因素都固定不变,这样既能通过控制磁场来控制抛光区的大小和形状,又能确保在一定磁场强度下抛光区的稳定性,达到定量修整工件表面的目的。

对以上所述非接触式加工方法进行比较分析,如表 2 所示。从表中可以看出,浮法抛光技术虽然加工表面粗糙度最好可达 0.077 nm,但只适用于平面光学元件的加工;离子束加工技术、等离子体辅助化学蚀刻、等离子体化学蒸发加工等加工方法虽然对工件形状没有限制,适用于平面、球面和非球面光学元件的加工,但加工精度相对较低;弹性发射加工和磁流变抛光不仅能够满足平面、球面和非球面光学元件的加工,并且加工精度高,无亚表面损伤,是目前最为理想的两种超光滑表面加工方法。

表 2 非接触式加工方法比较

Table 2 Comparison of non-contact polishing methods

Polishing method	FP	EEM	IBF	PACE	PCVM	MRF
Roughness /nm	0.077	0.1	0.6	0.5	0.37	0.27
Application field	Plane	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited

4 我国超光滑表面加工技术的发展

我国超光滑表面加工技术同国际先进水平相比还有一定差距,但近年来也取得了较大发展,在对一些国外加工技术进行研究的同时也提出了一些较为新颖的加工方式。

高宏刚等^[21]对浮法抛光技术进行研究,研制成功了浮法抛光机床,在 K9 玻璃上获得了表面粗糙度均方根值优于 0.3 nm 的超光滑表面。2007 年 Shen 等^[22]采用浴法抛光技术在熔石英平面上获得了表面粗糙度均方根值为 0.8 nm 的光滑表面。近年来国内多所高校及研究所对离子束和磁流变等先进技术进行了开发及应用,并成功研制了离子束和磁流变加工机床,取得了大量研究成果^[23-26]。

刘向阳等^[27]根据“磨料颗粒最小值的极限为零”的思路提出了无磨料低温抛光技术,其原理如图 9 所示,冰盘在与玻璃表面的摩擦作用下不断融化,使得玻璃表面始终有一层水膜,由水和玻璃之间的水解作用生成一种易于去除的物质,在摩擦作用下被去除。采用此法在石英玻璃表面获得了 $R_a = 0.53$ nm 的超光滑表面。

于兆勤等^[28]提出了一种流体二维超声振动抛光技术,其基本原理如图 10 所示。采用流体代替传统抛

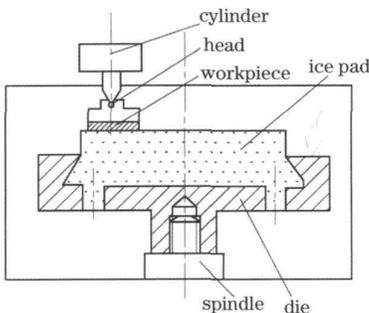


图 9 无磨料低温抛光示意图

Fig. 9 Scheme of non-abrasive polishing

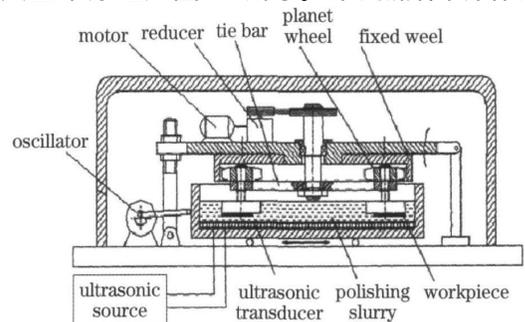


图 10 流体二维超声振动抛光原理图

Fig. 10 Principle scheme of liquid two-dimensional vibration polishing

光盘作为抛光工具,在水平和垂直方向附加二维高频振动作为抛光作用力对工件进行抛光,使流体分子或微细磨料粒子以一定的速度不断冲击工件表面,利用抛光液与工件之间的物理-化学作用完成材料去除,从而获得超光滑表面。同时由于流体的自适应性,能始终与工件保持完全的均匀接触,极大地降低了控制难度。采用此法在熔石英表面获得了 $R_a = 0.6 \text{ nm}$ 的超光滑表面。

5 结论与展望

目前国际上超光滑表面加工技术发展已经较为成熟,无论是平面、球面还是非球面的加工都已不再是难事,并且非接触式加工方式由于其加工精度高、无亚表面损伤等特点,逐渐成为实现超光滑表面最为理想的加工技术。而我国的超光滑表面加工技术虽然取得了一系列成果,但仍处于研究的初级阶段,无论是加工精度还是稳定性方面都还有待提高。

随着对光学元件加工精度要求的不断提高,超光滑表面加工技术还将得到进一步发展,新的加工机理和加工方法也将不断涌现。它正朝着高质量、高效率、低成本、无污染的方向发展。

参 考 文 献

- 1 Gao Honggang, Chen Bin, Cao Jianlin. Fabricating technology for supersmooth surfaces [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **3**(1): 57~ 60
- 2 高宏刚,陈 斌,曹健林. 超光滑光学表面加工技术[J]. *光学 精密工程*, 1995, **3**(1): 57~ 60
- 3 Li Xishan, Ge Hezhong. The technology of ultra-smooth surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1998, **35**(11): 1~ 9
- 4 李锡善,戈鹤忠. 超光滑表面加工技术[J]. *激光与光电子学进展*, 1998, **35**(11): 1~ 9
- 5 R. W. Dietz, J. M. Bennett. Bowl feed technique for producing supersmooth optical surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(5): 881~ 882
- 6 J. V. Wingerden, H. J. Frankena, B. A. V. der Zwan. Production and measurement of superpolished surfaces[J]. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(5): 1086~ 1092
- 7 A. Leistner. Progress report on teflon polishers for precision optical flats[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(4): 960~ 961
- 8 A. Leistner, E. G. Thwaite, F. Lesha *et al.*. Polishing study using teflon and pitch laps to produce flat and supersmooth surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(10): 1472~ 1482
- 9 Y. Namba, H. Tsuwa. Ultra-fine finishing of sapphire single crystal[J]. *Ann. CIRP*, 1977, **26**(1): 325~ 329
- 10 J. M. Bennett, J. J. Shaffer, Y. Shubano *et al.*. Float polishing of optical materials[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(4): 696~ 703
- 11 Y. Mori, K. Yamauchi, K. Endo. Elastic emission machining[J]. *Precision Engineering*, 1987, **9**(3): 123~ 128
- 12 Kim Jeong-Du. Motion analysis of powder particles in EEM using cylindrical polyurethane wheel[J]. *Internat. J. Machine Tools & Manufacture*, 2002, **42**(1): 21~ 28
- 13 K. Yamamura, H. Mimura, K. Yamauchi *et al.*. Aspheric surface fabrication in nm-level accuracy by numerically controlled plasma chemical vaporization machining and elastic emission machining[C]. *SPIE*, 2002, **4782**: 265~ 270
- 14 M. Kanaoka, C. Liu, K. Nomura *et al.*. Processing efficiency of elastic emission machining for low-thermal-expansion material[J]. *Surf. Interface Anal.*, 2008, **40**(6-7): 1002~ 1006
- 15 T. W. Drueding. Ion beam figuring of small optical components[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(12): 3565~ 3571
- 16 M. Weiser. Ion beam figuring for lithography optics[J]. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 2009, **267**(8-9): 1390~ 1393
- 17 L. D. Bollinger, C. B. Zarowin. Rapid, nonmechanical, damage-free figuring of optical surfaces using plasma-assisted chemical etching (PACE)[C]. *SPIE*, 1988, **966**: 82~ 97
- 18 L. D. Bollinger, G. Steiberg, C. B. Zarowin. Rapid optical figuring surfaces with plasma assisted chemical etching (PACE)[C]. *SPIE*, 1991, **1618**: 14~ 21
- 19 Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura *et al.*. Development of plasma chemical vaporization machining and elastic emission machining systems for coherent X-ray optics[C]. *SPIE*, 2001, **4501**: 30~ 42
- 20 H. Takino, N. Shibata, H. Itoh *et al.*. Fabrication of optics by use of plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(19): 3971~ 3977
- 21 M. Tricard, P. Dumas, G. Forbes. Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology[C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 284~ 299
- 22 P. Dumas, D. Golini, M. Tricard. Improve figure and finish of diamond turned surfaces with magnetorheological finishing

- (MRF)[C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 296~ 304
- 21 Gao Honggang, Cao Jianlin, Chen Bin. Float polishing for supersmooth surfaces[J]. *Optical Technique*, 1995, **21**(3): 40~ 43
高宏刚,曹健林,陈斌. 浮法抛光超光滑表面加工技术[J]. 光学技术, 1995, **21**(3): 40~ 43
- 22 Zhenxiang Shen, Bin Ma, Zhanshan Wang *et al.*. Fabrication of flat and supersmooth surfaces with bowt-feed polishing process[C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 67220U
- 23 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1131~ 1135
戴一帆,周林,谢旭辉等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1131~ 1135
- 24 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 198~ 205
戴一帆,石峰,彭小强等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 198~ 205
- 25 Zhang Feng, Yu Jingchi, Zhang Xuejun *et al.*. Magnetorheological finishing technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(5): 1~ 8
张峰,余景池,张学军等. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(5): 1~ 8
- 26 Wu Jianfen, Lu Zhenwu, Zhang Hongxin *et al.*. Optimized dwell times solution for optics in ion beam figuring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 192~ 197
武建芬,卢振武,张红鑫等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 192~ 197
- 27 Liu Xiangyang, Wang Lijiang, Gao Chunfu *et al.*. Experimental study on cryogenic polishing optical material without abrasive[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2002, **38**(6): 47~ 50
刘向阳,王立江,高春甫等. 光学材料无磨料低温抛光的试验研究[J]. 机械工程学报, 2002, **38**(6): 47~ 50
- 28 Yu Zhaoqing, Yang Zhonggao, Huang Zhigang *et al.*. Study on ultra-smooth surface polishing based on liquid two-dimension vibration[J]. *Manufacturing Technology and Machine*, 2007, (5): 90~ 92
于兆勤,杨忠高,黄志刚等. 流体二维振动超光滑表面加工技术[J]. 制造技术与机床, 2007, (5): 90~ 92