

文章编号 1004-924X(2010)01-0162-07

磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺

石 峰,戴一帆,彭小强,王 卓

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对传统光学加工技术难于精确测量和控制亚表面损伤的特点,提出用磁流变抛光替代研磨工序并直接衔接磨削的新工艺流程。采用自行研制的磁流变抛光机床 KDMRF-1000 和水基磁流变抛光液 KDMRW-2 进行了磁流变抛光去除磨削亚表面损伤层的实验研究。结果显示,直径为 100 mm 的 K9 材料平面玻璃,经过 156 min 的磁流变粗抛,去除了 50 μm 深度的亚表面损伤层,表面粗糙度 R_a 值进一步提升至 0.926 nm,经过 17.5 min 磁流变精抛,去除玻璃表面 200 nm 厚的材料,并消除磁流变粗抛产生的抛光纹路,表面粗糙度 R_a 值提升至 0.575 nm。由此表明,应用磁流变抛光可以高效消除磨削产生的亚表面损伤层,提出的新工艺流程可以实现近零亚表面损伤和纳米级精度抛光两个工艺目标。

关键词:磁流变抛光;亚表面损伤;光学加工

中图分类号:TQ171.684 文献标识码:A

Removal of subsurface damage in grinding by magnetorheological finishing

SHI Feng, DAI Yi-fan, PENG Xiao-qiang, WANG Zhuo

(College of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As traditional optical machining technologies can not test and control the subsurface damage in grinding precisely, a new optical machining process was introduced, in which a Magnetorheological Finish(MRF) was used to replace the lapping and to follow the grinding processing. A experiment to remove the subsurface damage caused by grinding was carried out by using a KDMRF-1000F polishing machine and KDMRW-2 water based MR. The experimental results indicate that after rough polishing for 156 min firstly, the 50 μm (depth) subsurface damage of the K9 flat glass has been removed and the surface roughness is 0.926 nm. Furthermore, with a fine polishing for 17.5 min, the 200 nm (depth) glass surface can be removed and the ripples caused by rough polishing are also eliminated, which improves the surface roughness to 0.575 nm. These results show that the propose optical machining processing with MRF can remove effectively the subsurface damage caused by grinding and can provide a high surface roughness below 1 nm.

Key words: Magnetorheological Finishing (MRF); subsurface damage; optical machining

收稿日期:2009-03-06;修订日期:2009-04-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50775215;No. 50875256);部委级基金资助项目(9140A18070108KG0147)

1 引言

光学玻璃是无机高分子凝聚态物质,内部呈现短程有序长程无序的非晶态结构。光学玻璃独特的内部结构使得其磨削过程中亚表面损伤只有亚表面裂纹和表面/亚表面残余应力两种形式^[1-2]。裂纹通常是当工件表层内应力超过材料的断裂极限产生的,而残余应力是一种内应力,是由于形变、体积变化不均匀而存留在工件内部并自身保持平衡的一种应力。残余应力对裂纹的产生无直接影响,但会影响已有裂纹的扩展,从而降低元件的使用性能。

传统光学加工采用磨削、研磨、抛光的工艺路线,其对加工过程中产生的亚表面损伤难于精确测量与控制,基本依靠加工经验估计亚表面损伤深度,通常以磨粒平均粒度或表面粗糙度作为估计的依据^[4]。Menapace^[5]提到磨削过程引入的亚表面损伤深度约为磨粒粒度的3倍;Sabia^[6]认为对于固着磨料磨削损伤深度为磨粒平均粒度的5倍,而对于散粒磨料磨削(研磨),损伤深度是磨粒粒度的1~1.8倍,上述经验值的差异可能是由加工设备、加工方式或加工参数的不同引起的。根据加工经验获得的亚表面损伤深度估计值往往偏于保守,虽然保证了加工质量,却降低了加工效率。因此,准确测量亚表面损伤层的厚度是高效去除亚表面损伤层的前提和基础。

Lambropoulos^[3]提出了利用挠度法检测K9、石英和微晶玻璃的表面残余应力,并研究了加工方式和加工参数对表面残余应力的影响规律以及表面残余应力的分布特点。本文针对传统光学加工控制亚表面损伤层的局限性和磁流变抛光的特点,提出了采用磁流变抛光替代研磨工序来直接衔接磨削工序的新工艺路线。首先,通过磁流变粗抛去除磨削产生的亚表面损伤层,而后由磁流变精抛去除粗抛产生的抛光纹路并提升表面质量,最终实现近零亚表面损伤和纳米级精度抛光两个工艺目标。

2 磁流变消除磨削亚表面损伤层的可行性

磁流变抛光技术是利用磁流变抛光液在磁场中的流变性对工件进行抛光,基本加工原理如图1所示^[7-8]。磁流变液进入抛光区前,由于没有外磁场作用,磁敏微粒的磁矩随机排列,磁流变液对外不表现出磁性。此时,磁敏微粒和抛光磨粒均匀分散于基载液中。磁流变液由抛光轮带入抛光区域后,在高强度的梯度磁场作用下磁敏微粒被磁化产生偶极矩,为达到能量最小,磁敏微粒连接成链从而形成“柔性抛光膜”。在磁场的磁性浮力作用下非磁性抛光颗粒析出磁流变液,“镶嵌”在“柔性抛光膜”表面。由于磁流变液在磁场中具有Bingham介质的性质,因此,光学元件压入磁流变液带后,Bingham介质形成的刚性“核心”会在抛光区内产生一楔形区,抛光磨粒在流体动压力作用下贴合光学元件表面并以很高的速度通过该楔形区,从而获得较高的抛光效率。磁流变抛光以其独特的剪切去除机理在保证较高去除效率的同时不引入亚表面损伤^[7],因此,非常适合用于去除光学镜面的亚表面损伤层。

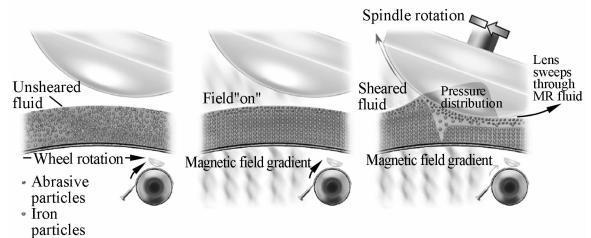


图1 磁流变抛光原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of MRF process

传统抛光过程中,施加在抛光盘上的力通过抛光颗粒传递到光学元件表面,单个抛光颗粒对光学元件表面的正压力约为 10^{-3} N^[9],如图2所示。磁流变抛光过程中,抛光颗粒施加在光学元件表面的正压力由重力 G 、磁浮力 F_z 和液体动压力的法向分量 F_{wn} 三部分组成,其中重力 G 可以

忽略不计。根据磁流变抛光参数及实测的抛光区内的流体动压力,得到磁流变抛光中单个抛光颗粒对光学元件表面施加的正压力约为 10^{-7} N^[10-11],远小于传统抛光中抛光颗粒施加的正压力值。因此,磁流变抛光能够有效消除传统抛光引入的亚表面损伤。

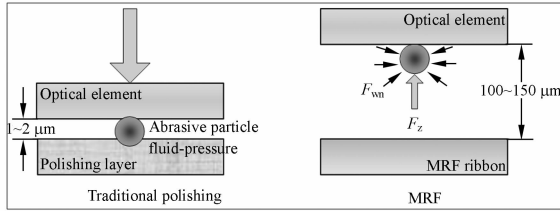


图 2 抛光颗粒与光学表面间相互作用示意图

Fig. 2 Interaction between abrasives and optical surface

3 磁流变消除磨削亚表面损伤工艺

采用自研的 KDMRF-1000 磁流变抛光机床和 KDMRW-2 水基磁流变抛光液进行了磁流变抛光去除磨削亚表面损伤层的实验研究,实验材料为经传统工艺磨削的 K9 材料平面玻璃,其直径为 100 mm。

3.1 磁流变抛光液与去除函数

KDMRW-2 型水基磁流变抛光液主要由微米直径的羰基铁粉、金刚石抛光粉和基载液组成,其中羰基铁粉的扫描电镜图和粒径分布如图 3 所示。由图 3 可见,羰基铁粉表面光滑,分布均匀,粒径主要分布在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。混和抛光粉后的磁流变抛光液的扫描电镜如图 4 所示。由图 4 可见,经过高速球磨分散后,抛光粉与羰基铁粉颗粒混合均匀,无结块、团聚现象。

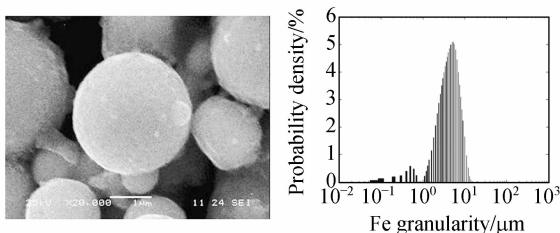


图 3 羰基铁粉的 SEM 图和粒径分布图

Fig. 3 SEM and distribution figure of CI particles

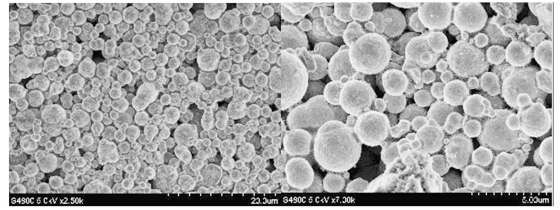


图 4 KDMRW-2 水基磁流变抛光液扫描电镜图

Fig. 4 SEM figure of KDMRW-2 water based MR fluids

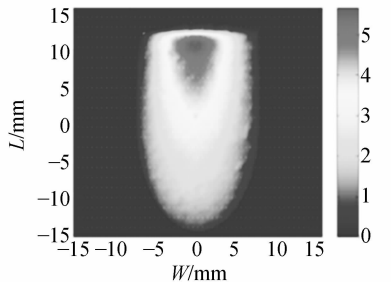
磁流变抛光的去除函数主要采用差动法获取。差动法的主要步骤包括:测量用于制作去除函数的材料样片(要求与目标工件的材料严格一致)的初始面形,样片采用传统抛光的方法制备,一般要求其面形误差峰谷值 $< 1/4$ 波长,表面粗糙度 R_a 值优于 1 nm;控制磁流变抛光模在不同位置依次驻留一定时间;再次测量材料样片的面形,并与初始面形测量数据进行差动法处理。实验中采用的工艺参数分别为:工艺参数一,抛光轮转速 60 r/min,流量 180 l/min,磁场电流 3 A,抛光轮压入深度 0.8 mm;工艺参数二,抛光轮转速 150 r/min,流量 300 l/mm,磁场电流 5 A,抛光轮压入深度 0.8 mm;工艺参数三,抛光轮转速 60 r/min,流量 150 l/min,磁场电流 3 A,抛光轮压入深度 0.3 mm。获得的去除函数详细性能如表 1 所示,主要包括,长度 \times 宽度(L \times W)、峰值去除效率(PRR)、体积去除效率(VRR)和表面粗糙度 R_a 值。

表 1 磁流变抛光去除函数性能表

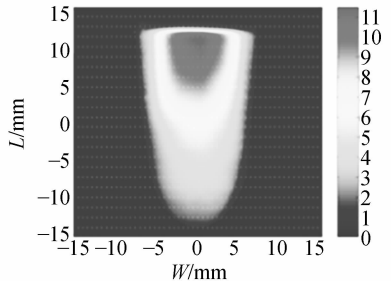
Tab.1 Parameters of MRF polishing spots

Num	L \times W /(mm \times mm)	PRR /($\mu\text{m}/\text{min}$)	VRR /(mm^3/min)	R_a /nm
1	30 \times 17	5.67	1.37	0.607
2	30 \times 17	11.5	2.51	0.827
3	15 \times 7	2.31	0.09	0.414

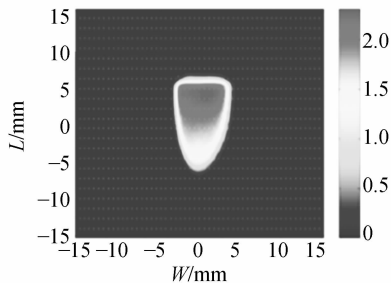
如图 5(a) 所示,去除函数一外形尺寸较大,去除效率居中,去除函数内部变化趋势平缓,可用于制造测量亚表面损伤层厚度的磁流变斑点。如图 5(b) 所示,去除函数二体积去除效率高达 $2.51\ \text{mm}^3/\text{min}$,可用于磁流变粗抛,高效地去除磨削产生的亚表面损伤层。如图 5(c) 所示,去除函数三的表面粗糙度 R_a 值为 0.414 nm,可用于磁流变精抛,去除粗抛产生的抛光纹路提升表面质量。



(a) 工艺参数一
(a) Parameters No. 1



(b) 为工艺参数二
(b) Parameters No. 2



(c) 为工艺参数三
(c) Parameters No. 3

图 5 磁流变抛光的去除函数

Fig. 5 Polishing spots of MRF process

3.2 确定亚表面损伤层的深度

磁流变斑点法可用于确定磨削过程产生的亚表面损伤层厚度^[7]。利用磁流变抛光不产生附加亚表面损伤的特性,在磨削表面制造磁流变抛光斑点,以暴露试件的亚表面裂纹层,酸蚀后根据试件亚表面裂纹延伸的水平距离及磁流变斑点的中心线轮廓可以确定亚表面裂纹层的深度。首先,在 K9 玻璃磨削表面试抛几个磁流变斑点以调整

磁流变工艺参数,确保斜面最深处刚好穿过亚表面裂纹层。然后,如图 6 所示,采用去除函数一,在磨削表面制造 3 个斑点(每个斑点驻留 15 min),抛光斑点的起始线为 S 线,终止线为 E 线,中心线分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 。

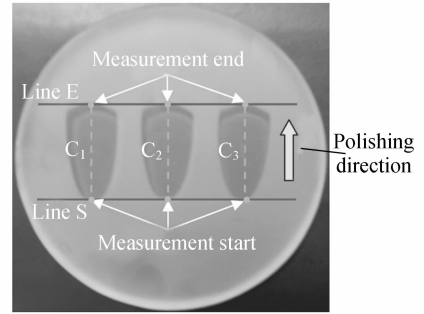


图 6 磨削表面的磁流变抛光斑点

Fig. 6 Polishing spots of MRF on optical surface after grinding

根据干涉仪测出的去除函数一的去除效率,可以计算出磁流变抛光斑点中心线处的轮廓图,如图 7 所示。将制造斑点后的表面浸入 HF 酸蚀刻液(5% HF, 腐蚀 2 min)中进行蚀刻以打开裂纹使其易于观测。试件经超声波清洗后置于微动平台,使用光学显微镜沿中心线 C_2 观测损伤(S 线开始,E 线终止),见图 8,图中(a)~(o)距离表面分别为:0.5、5.6、10.2、14.0、20.6、22.3、25.8、28.4、32.2、34.0、37.1、41.7、44.9、48.5、49.6 μm 。记录损伤消失时的平台移动距离,对应斑点沿抛光方向的轮廓即可获得亚表面裂纹深度,取 3 个斑点测量值的平均值,即得到该 K9 玻璃磨削亚表面裂纹深度约为 50 μm 。

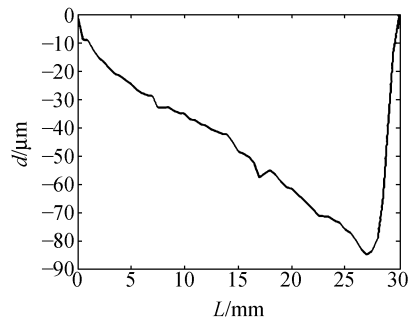


图 7 磁流变抛光斑点中心线轮廓图(沿抛光方向)
Fig. 7 Profile of centerline in MRF (along polishing direction)

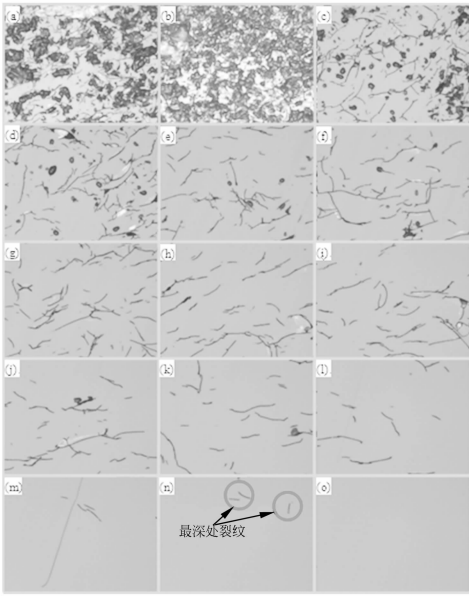


图8 磨削后 K9 玻璃亚表面裂纹光学显微图像(1000×)
Fig.8 Microscope figures of subsurface cracks of K9 flat after grinding (1000×)

3.3 磁流变粗抛去除磨削亚表面损伤层

利用体积去除效率为 $2.51 \text{ mm}^3/\text{min}$ 的去除函数二,去除直径为 100 mm 的 K9 玻璃由磨削产生的 $50 \mu\text{m}$ 亚表面损伤层。磁流变抛光机床 KDMRF-1000 采用光栅扫描路径,扫描间隔为 1 mm,扫描时间为 156 min。磁流变粗抛后的表面粗糙度如图 9 所示,表面粗糙度 R_a 值为 0.926 nm。由图 9 可见,由于磨削表面对磁流变抛光过程的影响,使得粗抛后磁流变抛光纹路明显,并且表面粗糙度低于去除函数二在样片表面上获得的表面粗糙度($R_a=0.827 \text{ nm}$)。

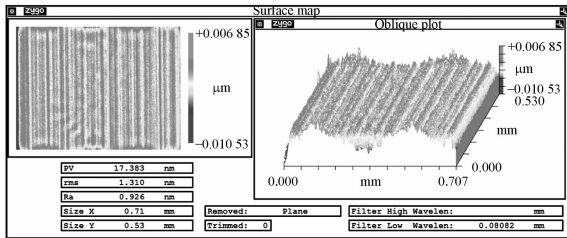


图 9 磁流变粗抛后表面粗糙度

Fig.9 Surface roughness after rough MRF polishing

3.4 磁流变精抛光去除粗抛纹路并改善表面质量

传统抛光后玻璃表层残留的亚表面损伤包括表面水解层和亚表面缺陷层。其中,表面水解层

内包括浅表面流动层、塑性划痕和抛光过程嵌入的浓度沿深度递减的抛光杂质,王卓^[7]检测出的传统抛光表面水解层深度约为 76~105 nm,磁流变抛光的水解层深度约为 46.3~55.5 nm;亚表面缺陷层可能包括研磨过程残留的亚表面裂纹、脆性划痕和残余应力及抛光过程自身引入的塑性划痕。Carr^[12]检测出传统抛光缺陷层深度为 100~500 nm。磨削后的表面直接经过磁流变粗抛,未经历研磨过程,亚表面缺陷层内主要为抛光过程自身引入的塑性划痕。王卓^[7]检测出磁流变抛光产生的塑性划痕深度约为 3~5 nm。参考上述数据,为充分去除粗抛后玻璃表面的亚表面损伤层,利用去除函数三去除玻璃表面 200 nm 厚度的材料。磁流变抛光机床 KDMRF-1000 采用光栅扫描路径,扫描间隔为 1 mm,扫描时间为 17.5 min,扫描时将镜面旋转 90°,使精抛的抛光纹路相互垂直。磁流变精抛后的表面粗糙度如图 10 所示,表面粗糙度 R_a 值为 0.575 nm。由图 10 可见,精抛后表面的粗糙度已大为改善,且粗抛的抛光纹路已被消除。图 11 为 HF 酸洗掉表面水解层后的表面粗糙度测试结果,表面粗糙度 R_a 值为 0.764 nm。由图 11 可见,酸洗后表面粗糙度有一定程度的恶化,抛光纹路也更为清晰。

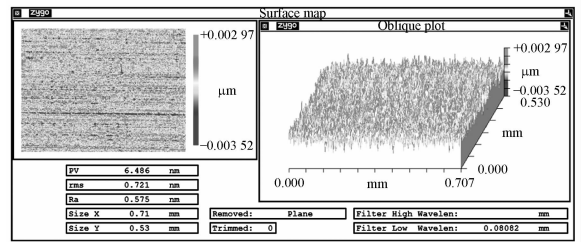


图 10 磁流变精抛后表面粗糙度

Fig.10 Surface roughness after final MRF polishing

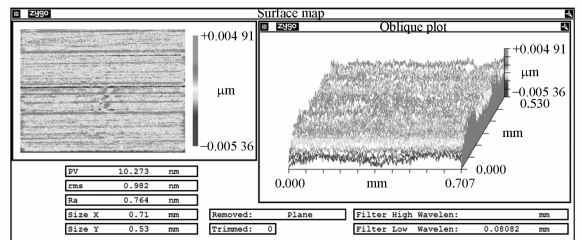


图 11 磁流变精抛后表面粗糙度(酸洗掉表面水解层后)

Fig.11 Surface roughness after final MRF polishing (after removing hydrolytic layer by HF acid)

4 结 论

磁流变抛光以其独特的剪切去除机理能够在保证较高去除效率的同时不引入亚表面损伤,因此可采用磁流变抛光替代研磨工序来直接衔接磨削工序,克服传统光学制造技术对亚表面控制的局限性。

本文分析了磁流变消除磨削亚表面损伤层的可行性,提出了磁流变粗、精抛相结合的工艺路线,并采用自研的磁流变抛光机床 KDMRF-1000

和水基磁流变抛光液 KDMRW-2 进行了实验验证。针对直径为 100 mm 的 K9 材料平面玻璃,首先采用磁流变斑点法精确测定其磨削亚表面裂纹深度为 50 μm ,而后经过 156 min 的磁流变粗抛,去除 50 μm 亚表面损伤层,表面粗糙度 R_a 值提升至 0.926 nm,而后经过 17.5 min 的磁流变精抛,去除玻璃表面 200 nm 厚的材料,消除了粗抛产生的抛光纹路,表面粗糙度 R_a 值提升至 0.575 nm,实现了近零亚表面损伤和纳米级精度抛光的工艺目标。

参考文献:

- [1] 吴东江,曹先锁,王强国,等. KDP 晶体加工表面的亚表面损伤检测与分析[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1721-1726.
WU D J, CAO X S, WANG Q G, *et al.*. Damage detection and analysis of machined KDP crystal sub-surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1721-1726. (in Chinese)
- [2] 王卓,吴宇列,戴一帆,等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. 光学精密工程,2008,16(1):16-21.
WANG ZH, WU Y L, DAI Y F, *et al.*. Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):16-21. (in Chinese)
- [3] LAMBROPOULOS J C, XU S, FANG T, *et al.*. Twyman effect mechanics in grinding and micro-grinding[J]. *Appl. Opt.*, 1996,35:5704-5713.
- [4] SURATWALA T, WONG L, MILLER P, *et al.*. Sub-surface mechanical damage distribution during grinding of fused silica[J]. *J. Non-cryst. Solids.*, 2006,352(52-54):5601-5617.
- [5] MENAPACE J A, DAVIS P J, STEELE W A, *et al.*. MRF applications: measurement of process-dependent subsurface damage in optical materials using the MRF wedge technique[J]. *SPIE*, 2005, 5991:39-49.
- [6] SABIA R, STEVENS H J, VARNER R. Pitting of a glass-ceramic during polishing with cerium oxide [J]. *J. Non-cryst. Solids.*, 1999,249:123-130.
- [7] 王卓. 光学材料加工亚表面损伤关键技术研究[D]. 国防科学技术大学,2008.
WANG ZH. *Study on the key techniques of subsurface damage in optical fabrication*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [8] ERIN J, GOLINI D. *Surface interactions between nanodiamonds and glass in Magnetorheological Finishing (MRF)* [D]. New York: University of Rochester, 2007.
- [9] HALLOCK B, DUMAS P, SHOREY A, *et al.*. Recent advances in deterministic, low-cost finishing of sapphire windows[J]. *SPIE*, 2005, 5786: 154-164.
- [10] 张峰,张斌智. 磁流体辅助抛光工件表面粗糙度研究[J]. 光学精密工程,2005,13(1):34-38.
ZHANG F, ZHANG B ZH. Surface roughness of optical elements fabricated by magnetic fluid-assisted polishing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 34-38. (in Chinese)
- [11] 张峰,余景池,张学军. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程,1995,7(5):55-58.
ZHANG F, YU J CH, ZHANG X J, *et al.*. Magnetorheological finishing technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995,7(5):1-7. (in Chinese)
- [12] CARR J W, FEARON E, SUMMERS L J, *et al.*. Subsurface damage assessment with atomic force microscopy [C]. *Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) Report*, 1999, April 16:1-4.

作者简介:



石 峰(1980—),男,辽宁朝阳人,博士研究生,主要从光学精密工程与计算机控制,磁流变抛光技术等方面的研究。
E-mail: sf.wind@yahoo.com



彭小强(1977—),江西宁都人,国防科技大学副教授,主要研究方向为精密工程和先进光学制造,发表论文 20 余篇。
E-mail: pxq@sina.com.cn

王 卓(1978—),男,安徽人,博士研究生,主要研究方向为亚表面损伤检测。

导师简介:



戴一帆(1966—),男,江苏南京人,博士,教授,1988 年于国防科技大学获得学士学位,1995 年于莫斯科航空学院获博士学位,主要研究方向为精密工程与计算机控制。E-mail: dyf@nudt.edu.cn

● 下期预告

UV-LIGA 和微细电火花加工技术 组合制作三维金属微结构

杜立群^{1,2},莫顺培¹,张余升²,刘 冲^{1,2}

(1. 大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室,辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

为了制作三维金属微结构,研究了 UV-LIGA 和微细电火花加工技术组合加工的工艺方法。首先,使用 UV-LIGA 技术制作准三维金属微结构。然后,对该微结构进行微细电火花加工制作三维金属微结构。使用该方法制作出了局部为梯形凸台和锥形凹槽三维微结构的镍模具。梯形凸台的尺寸为:长 584 μm 、高 50 μm 、顶面宽 24 μm 、底面宽 70 μm 、斜面倾角 45°;锥形凹槽的尺寸为:长 600 μm 、宽 27 μm 、深 23 μm 、斜面夹角 60°。同时分析了微细电火花加工中放电参数对表面粗糙度的影响,在工作电压为 65V、标称电容为 100 pF 时得到 Ra 为 0.08 μm 微细电火花加工表面。研究表明,使用该方法可实现三维金属微结构的制作。通过减小工作电压和标称电容的方法可降低微细电火花加工的表面粗糙度。