DOI: 10.3901/JME.2013.17.073

Ni-P 镀层的磁性混合流体抛光*

郭会茹¹ 吴勇波¹ 焦黎² 曹建国¹ 李亚国¹

(1. 秋田县立大学机械智能系统工程学部 由利本庄 0150055 日本;

2. 北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室 北京 100081)

摘要: 采用磁性混合流体(Magnetic compound fluid, MCF)对光学镜头模具的镍-磷(Nickel phosphorus, Ni-P)镀层表面进行抛光研究。试验中使用两种构成成分的MCF: 常用的BASF制HQ铁粉(Carbonyl-iron-particles, CIPs)和 Al_2O_3 磨粒基MCF1以及新型的表面 ZrO_2 磨粒(50~100 nm)涂层铁粉基MCF2。两种成分的MCF都消除了Ni-P镀层表面单晶金刚石车削残留的螺旋状切削痕。但使用MCF1, 由于 Al_2O_3 磨粒相对于 ZrO_2 磨粒较大且较硬, 易引入抛光痕及铁粉粒子的嵌入, 难以进一步改善Ni-P镀层的表面质量。采用新型 ZrO_2 磨粒涂层铁粉基MCF2, 则没有引入抛光痕及粒子的嵌入, 实现Ni-P镀层表面粗糙度方均根值(Root mean square, RMS)和 R_a 的改善。通过在 x 轴和 y 轴方向设计抛光路径, 使粒子均具有相对运动速度, 同时改善了Ni-P镀层的表面粗糙度及平坦度。初步证明了磁性混合流体抛光亦可用于较软的磁性材料表面的纳米级光整加工。

关键词: 磁性混合流体抛光 磨粒涂层铁粉 Ni-P 镀层 磁性材料 抛光路径

中图分类号: TG580

Ultrafine Polishing of Nickel Phosphorus Plating with Magnetic Compound Fluid Slurry

GUO Huiru¹ WU Yongbo¹ JIAO Li² CAO Jianguo¹ LI Yaguo¹

(1. Department of Machine Intelligence & Systems Engineering, Akita Prefectural University, Yurihonjou 0150055, Japan;

2. Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Nickel phosphorus (Ni-P) plating on the optical lens mold is polished with magnetic compound fluid (MCF) slurry. Two types of MCF slurry are applied. MCF1 slurry is an HQ carbonyl-iron-particles (CIPs) BASF made and alumina abrasive particles based one while MCF2 slurry is a new zirconia-coated CIPs based one. The spiral shaped cutting marks on the Ni-P plating are eliminated by both the MCF slurries. As alumina abrasive particles in MCF1 slurry are a little larger and harder than zirconia abrasives in MCF2 slurry, scratches and CIPs embedding are caused and it is difficult to further improve the surface finish of Ni-P plating. In contrast, no scratches and CIPs embedding are induced with the new zirconia-coated CIPs based MCF2 slurry and improvement for the surface roughness of root mean square and R_a of the Ni-P plating is achieved. It is also found that polishing trace in both x -axis and y -axis directions is good to enhance the surface finish and the flatness of the Ni-P plating. The preliminary results show that MCF polishing is applicable for the nano-level polishing of soft magnetic material.

Key words: Magnetic compound fluid polishing Abrasives-coated carbonyl-iron-particle Ni-P plating Magnetic materials Polishing trace

0 前言

无电解镍-磷(Nickel phosphorus, Ni-P)镀层较软, 可切削性非常好, 采用单晶金刚石车削加工即

可获得纳米级的镜面, 被 OLYMPUS 等公司用于制造光学镜头模具。然而单晶金刚石车削加工后, 较软的 Ni-P 镀层表面残留有螺旋状切削痕, 影响模具寿命及镜头成形精度。

采用一般抛光方法提高较软材料(如 KDP^[1]、光学塑料^[2]等)的加工精度, 易引入抛光痕及表面的粒子嵌入。美国 Rochester 大学开发的磁流变抛光^[3]

* 日本秋田县新技术开发基金资助项目(学-527)。20120913 收到初稿, 20130227 收到修改稿

技术,可获得几乎为0的抛光压力,已实现光学塑料的亚纳米级加工^[2]。因此,可采用磁流变抛光进一步提高较软的Ni-P镀层的加工精度。目前,磁流变抛光技术多用于光学塑料、光学玻璃^[4]、单晶硅^[5]、陶瓷^[6]等非金属光学零件的光整加工。SINGH等^[7]利用了所要抛光的磁性材料产生的磁场,使磁流变液(Magnetorheological fluid, MRF)呈球状分布,对铁磁性材料EN31制的平面抛光100 min后,表面粗糙度由441 nm提高到70 nm,证明了磁流变液亦可用于磁性材料的光整加工。

结合了MRF和磁性流体(Magnetic fluid, MF)各自的优点,磁性混合流体(Magnetic compound fluid, MCF)被岛田邦雄等^[8]研制出来。MCF一般由含有粒径10 nm磁性微粒子的MF、微米级的铁粉和磨粒、植物纤维构成。与MF相比,MCF可产生较大的剪切力;与MRF相比,MCF具有良好的流动性及粒子分散性^[9]。与磁流变抛光一样,磁性混合流体抛光已实现PMMA、FS、BK7、SiC及非金属模具钢(SUS304)^[10]等非磁性材料的纳米级抛光,但尚未进行过磁性材料的抛光。

对表面Ni-P镀层及基体金属(SUS420J2)都具有磁性的模具表面进行了磁性混合流体抛光。采用了常用BASF制HQ铁粉和Al₂O₃磨料基以及新型ZrO₂磨粒涂层铁粉^[4](美国Rochester大学研制)基两种成分的MCF,研究了Ni-P镀层的抛光特性,初步验证了磁性混合流体抛光用于磁性材料表面纳米级加工的可行性。

1 磁性混合流体抛光原理

如图1所示,一柱状永久磁铁,以一定偏心距 r 被吸引在转盘(JIS SS400)下。磁铁下方0.5 mm处固定有附着MCF用的铝板载体。磁铁转盘和铝板有各自的旋转中心轴。用注射器将一定体积的MCF附着到铝板上,MCF内部的磁性微粒子和铁粉粒子则沿磁力线形成磁性簇。磁性簇的形状和尺寸取决于MCF的成分、磁场强度和磁铁偏心距。磨粒分布于磁性簇的内部或间隙内。植物纤维穿插于磁性簇的间隙,有利于增加MCF的黏度。受磁性浮力及重力影响,多数磨粒聚集在磁性簇的尖端。转盘旋转,带动磁铁开始绕转盘中心轴公转,磁场强度不变,磁力线方向则随着磁铁位置的改变周期性变化,产生空间动态磁场,赋予磁性簇空间钟摆运动,磨粒的运动也变得活泼。高速摄像机观测知磁铁公转3 s后,MCF即均匀分布,形成规则形状,具有形状迅速恢复能力^[11]。工件以一定加工间隙 Δ 被固

定在MCF铝板载体下方。磁铁公转和铝板自转开始后,MCF跟随铝板载体一起旋转,使活泼的磨粒与工件之间产生相对运动,从而发挥微小切削作用,实现材料去除。

图1 磁性混合流体抛光原理

2 试验方法

图2为依据抛光原理自制的试验装置。磁性混合流体抛光头由附着MCF用的铝板载体及其旋转驱动用皮带、电动机和磁铁、磁铁公转盘及其旋转用电动机构成,被固定在垂直铣刀盘主轴头上。设计特定夹具将工件($\phi 30\text{ mm} \times 25\text{ mm}$)固定于工作台。3成分动力计(kistler制,9257A型)被固定在工件正下方用来记录加工力。固定方式均为螺钉连接。上下移动主轴头可调整加工间隙 Δ ,定位精度0.001 mm。MCF与工件之间的相对运动路径可由工作台 y 轴向的前后运动和 x 轴向的左右运动来设定。

图2 试验装置

试验中采用了两种成分的MCF。MCF1由常用的HQ铁粉(图3a,平均粒径 $2\text{ }\mu\text{m}$)、Al₂O₃磨粒(平均粒径 $1\text{ }\mu\text{m}$)和水基MF组成,混合比(质量分数)分别为56%,12%,32%。与之相对,MCF2仅由新型ZrO₂磨粒涂层铁粉(图3b,平均粒径 $1.4\text{ }\mu\text{m}$)和水基MF组成,混合比分别为68%,32%。ZrO₂磨粒涂层铁粉表面具有50~100 nm厚^[4]的ZrO₂磨粒涂层。Ni-P镀层表面螺旋状切削痕的PV值约30 nm,仅需微小去除即可改善表面质量,因此两种MCF均未使用植物纤维。磁场下的MCF内部结构显示:MCF1(图3c)为铁粉粒子沿磁力线形成数条链状磁性束,Al₂O₃磨粒(白色)分散在磁性束内部或磁

性束之间; MCF2(图 3d)则仅为 ZrO_2 磨粒涂层铁粉构成的链状磁性束。

图3 SEM 观测的铁粉和 MCF 的内部结构

下表给出了两个工件的抛光试验条件。相比于非磁性材料(加工间隙 Δ 一般为 1 mm), 采用了相对较大的加工间隙, $\Delta=2.2$ mm。其他条件相同的前提下, 工件 I: 抛光头无任何相对运动即定点抛光, 依次采用 MCF2、MCF1、MCF2 分别抛光了 30 min, 15 min, 30 min; 工件 II: 依据定点抛光工件 I 的断面曲线, 设计如表 1 所示的抛光头中心运动路径, x 轴向往复运动 32 mm, y 轴向间隔 4 mm 的 5 个抛光行程, 运动速度均为 10 mm/s, 仅采用 MCF2。每 1 mL 的 MCF 连续抛光 5 min 后更换新的 MCF。采用蒸馏水冲洗工件表面黏附的少许 MCF, 再用压缩空气迅速干燥工件, 进行如下检测来评价抛光特性。

表 1 试验条件

参数	工件 I	工件 II
永久磁铁及其尺寸	Nd-Fe-B, $\phi 18$ mm $\times$ 10 mm	
磁铁偏心距 r /mm	4.5	
MCF 铝板载体转速 n_c /(r/min)	600	
磁铁公转转速 n_m /(r/min)	1 000	
MCF 一次使用量 V /mL	1	
加工间隙 Δ /mm	2.2	
MCF 种类	MCF1, MCF2	MCF2
抛光时间 t /min	75	60
抛光路径	定点	
相对运动速度 v /(mm/s)	—	10

(1) 分别采用 3D 数字显微镜(Keyence 制, VHX-200 型)和 SEM(Elionix 制, ERA-8900 型)观测

抛光前后工件表面纹理。

(2) 采用白光干涉式表面形状测定装置(Zygo 制, NEW VIEW 600)观测抛光前后工件表面粗糙度及形貌; 测定点为以工件中心为基点, 沿上、下、左、右依次各 $702 \mu\text{m} \times 526 \mu\text{m}$ (NEW VIEW600 的 $\times 10$ 镜头测量范围)处。

(3) 采用触针式表面形状及粗糙度测定仪(Taylor Hobson 制, FORMTALYSURF INTRA)测定抛光前后工件表面各直径方向断面曲线。

(4) 采用 ERA-8900 型 SEM 附带的能量分散型 X 射线分析装置(Genesis 制)对工件表面的粒子嵌入或杂物附着情况进行元素分析。

3 试验结果与分析

3.1 工件 I

磁性混合流体定点抛光 75 min 后, 工件表面纹理显示: 单晶金刚石车削残留的螺旋状切削痕(图 4a)已被消除, 但工件表面引入了明显的抛光痕(如图 4b)。对比工件抛光前后断面曲线(图 5)知: MCF 抛光头的抛光区域为直径 28 mm 的圆面, 中心处和边缘处的材料去除量很小, 直径 14~18 mm 圆环处的材料去除量较大, 且直径 16 mm 圆周处的材料去除量最大。先使用 MCF2 抛光 30 min 后, 工件表面粗糙度有些许改善趋势, 亦未观测到表面粒子的嵌入或抛光痕; 接着使用 MCF1 抛光 15 min 后, 则明显观测到如图 4b 和图 6b~6d 中的抛光痕, 极少数区域亦发现如图 7a 所示的粒子嵌入, 粗糙度迅速变差; 最后使用 MCF2 抛光 30 min 后, 也未能消除引入的抛光痕和粒子嵌入, 工件表面形貌如图 6b~6d 所示, 粗糙度比抛光前(图 6a)变差很多。EDS 元素映射分析知: 抛光后工件表面大多数区域与抛光前的元素分布比例相同; 在有粒子嵌入的极少数区域(图 7a)检测到了 Fe 和 O 元素(图 7e、7f), 覆盖了原有均匀分布的 Ni 和 P 元素(如图 7c、7d), 由此推断工件表面有铁粉粒子(HQ 铁粉和 ZrO_2 磨粒涂层铁粉)的嵌入。

(a) 抛光前

(b) 抛光后

图4 VHX-200 观测到的工件 I 表面纹理

图5 工件I各直径方向断面曲线

图6 Zygo观测的工件I表面形貌

图7 抛光后工件I表面粒子嵌入区域EDS元素映射分析

空间动态磁场下进行磁性混合流体抛光, 铁粉链带动磨粒随磁力线方向的改变做钟摆运动, 产生方向随机的微小抛光力, 消除了规则的螺旋状切削痕。相对于 ZrO_2 磨粒涂层中的 ZrO_2 磨粒, Al_2O_3 磨粒粒径($1\ \mu\text{m}$)相对较大且较硬, 被铁粉链带动相对于工件旋转时, 易在较软的 Ni-P 镀层内引入抛光痕。工件中心处(抛光前见图 6a, PV 值、方均根值(Root mean square, RMS)和 R_a 分别为 32 nm、2.434 nm 和 1.911 nm)引入了一定密度的圆点状抛光痕(图 6b, PV 值、RMS 和 R_a 分别为 1065 nm、6.699 nm 和 4.279 nm), 是因为 MCF 抛光头的中心处粒子相对圆周运动速度非常小, 磨粒的切削作用几乎没有, 则材料去除少, 表面粗糙度难以改善; 工件约 16 mm 圆周处(图 6c, PV 值、RMS 和 R_a 分别为 205 nm、14.769 nm 和 9.469 nm)引入了较稀疏的具有一定长度的抛光痕, 是因为 MCF 抛光头直径 16 mm 圆周处粒子具有较大的相对圆周运动速度, 多数磨粒发挥了切削作用, 材料去除较大; 直径 20.4 mm 圆周处(图 6d, PV 值、RMS 和 R_a 分别为 430 nm、10.793 nm 和 6.188 nm)则引入了更稀疏的较大长度的抛光痕, 是因为越往边缘处, 粒子相对圆周运动速度虽大, 但 MCF 量偏少, 磨粒数量也少, 则材料去除少。工件表面有划痕存在后, MCF 被压缩时, 由于工件对 MCF 具有磁性引力, 铁粉粒子易嵌入到抛光痕中, 难以消除, 导致表面粗糙度变差。

3.2 工件II

采用单晶金刚石车削工件表面, 留下螺旋状切削痕, 工件表面可明显观察到因光的反射、衍射及薄膜干涉等形成的彩色条纹(图 8a); 抛光后, 彩色条纹则变细小甚至消失(图 8b), 表明螺旋状切削痕已被消除。工件表面纹理(图 9)亦显示: 抛光后, 工件表面的切削痕已被消除, 且未观测到粒子的嵌入及抛光痕的引入。工件 II 各直径方向的初始断面曲线与工件 I 基本相同, 由图 10 知: 由于 y 轴向采用了设计的间隔 4 mm 的 5 个抛光行程, 工件表面平坦度大大提高; 作为对比, x 轴向仅采用了 32 mm 的往复运动, 断面曲线形状与抛光前近似一样, 如 x 轴向亦采用间隔 4 mm 的抛光行程, 则可提高工件整体表面的平坦度。工件粗糙度各测定点的 RMS 和 R_a 比抛光前均有些许改善, 如图 11(其中 x、y 方向长度为 0.702 mm 和 0.52 mm)所示, 工件中心处的表面形貌较抛光前变得随机, 表面粗糙度 RMS 和 R_a 分别由抛光前的 2.345 nm、1.810 nm 改善到 2.272 nm、1.761 nm; PV 值则有些许增大, 由抛光前的 26 nm 增大为 49 nm, 可能是由于抛光后工件表面

清洗不够干净引起的。EDS 元素分析(图 12)知: 与单晶金刚石车削获得的表面的元素分布比例几乎相同, 亦可确认无铁粉粒子等的嵌入。

图 8 工件 II 外观照片

(a) 抛光前

(b) 抛光后

图 9 SEM 获得的工件 II 表面纹理

(a) x 轴向

(a) y 轴向

图 10 抛光后工件 II 断面曲线

仅采用 ZrO_2 磨粒涂层铁粉基 MCF 抛光较软的 Ni-P 镀层, 铁粉表面的 ZrO_2 磨粒粒径(50~100 nm), 空间动态磁场下更多数的磨粒发挥了很微小的切削作用, 且 x 轴向设计往复运动抛光路径, 使 MCF 抛光头中心处的粒子也具有相对运动速度从而发挥微切削作用, 避免了圆点状抛光痕的产生, 消除了

(a) 抛光前

(b) 抛光后

图 11 工件 II 中心处粗糙度

图 12 抛光后工件 II 表面 EDS 元素映射分析

单晶金刚石车削残留的螺旋状切削痕, 且不会引入抛光痕及铁粉粒子等的嵌入, 改善了 Ni-P 镀层表面质量。利用 MCF 抛光头直径 14~18 mm 圆环处的材料去除较大的特点, 设计抛光路径为沿 y 轴向间隔 4 mm 的 5 个抛光行程, 先逐渐消除了工件中心处切削残留的凸起, 然后均匀抛光断面各处, 获得了较平坦的表面。

4 结论

(1) 在空间动态磁场下进行的磁性混合流体抛光, 磨粒被铁粉链带动做钟摆运动, 产生方向随机的微小抛光力, 两种成分的 MCF 都消除了 Ni-P 镀层表面残留的螺旋状切削痕。

(2) Al_2O_3 磨粒粒径(1 μm)相对 ZrO_2 磨粒较大且

较硬, 易引入抛光痕及铁粉粒子的嵌入, 铁粉粒子被吸引在抛光痕中, 难以消除, 导致 Ni-P 镀层表面粗糙度变差很多。

(3) ZrO_2 磨粒涂层铁粉表面的 ZrO_2 磨粒粒径 ($<100\text{ nm}$) 较小, 更多数的磨粒发挥了很微小的切削作用, 且通过设计抛光路径, 使粒子均具有相对运动速度, 则没有引入抛光痕及粒子的嵌入, 改善了 Ni-P 镀层表面粗糙度 RMS 和 R_a 的同时, 也提高了表面抛光平坦度。由此可见, 磁性混合流体抛光可实现较软的磁性材料表面的纳米级光整加工。

参 考 文 献

- [1] WANG Qiangguo, CONG Weilong, PEI Zhijian, et al. Rotary ultrasonic machining of potassium dihydrogen phosphate (KDP) crystal: An experimental investigation on surface roughness[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2009, 11(2): 66-73.
- [2] DEGROOTE J E, ROMANOFISKY H J, KOZHINOVA I A, et al. Polishing PMMA and other optical polymers with magnetorheological finishing[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5180: 123-134.
- [3] JACOBS S D, GOLINI D, HSU Y, et al. Magnetorheological finishing: A deterministic process for optics manufacturing[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2576: 372-382.
- [4] SHAFRIR S N, ROMANOFISKY H J, SKARLINSKI M, et al. Zirconia-coated carbonyl-iron-particle-based magnetorheological fluid for polishing optical glasses and ceramics[J]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6797-6810.
- [5] SIDPARA A, JAIN V K. Nano-level finishing of single crystal silicon blank using magnetorheological finishing process[J]. Tribology International, 2012, 47: 159-166.
- [6] CHENG Haobo, FENG Yunpeng, REN Liqiang, et al. Material removal and micro-roughness in fluid-assisted smoothing of reaction-bonded silicon carbide surfaces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4563-4567.
- [7] SINGH A K, JHA S, PANDEY P M. Design and development of nanofinishing process for 3D surfaces using ball end MR finishing tool[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(2): 142-151.
- [8] 島田邦雄, 藤田豊久, 岡・英夫, 等. MCF(磁気混合流体)の流体力学的特性と磁化特性[J]. 日本機械学会論文集(B編), 2001, 67(664): 3034-3040.
SHIMADA K, FUJITA T, OKA H, et al. Hydrodynamic and magnetized characteristics of MCF (magnetic compound fluid)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B, 2001, 67(664): 3034-3040.
- [9] SHIMADA K, MATSUO Y, YAMAMOTO K, et al. A new float-polishing technique with large clearance utilising magnetic compound fluid[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2008, 1(3-4): 302-315.
- [10] FURUYA T, WU Yongbo, NOMURA M, et al. Fundamental performance of magnetic compound fluid polishing liquid in contact-free polishing of metal surface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1-3): 536-541.
- [11] 佐藤隆史, 呉勇波, 林偉民, 等. 磁気混合流体(MCF)による 3 次元研磨に関する研究[J]. 砥粒加工学会誌, 2010, 54(7): 425-430.
SATO T, WU Yongbo, LIN Winmin, et al. Study of three-dimensional polishing using magnetic compound fluid (MCF)[J]. Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 2010, 54(7): 425-430.

作者简介: 郭会茹, 女, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为磁性混合流体抛光。

E-mail: guohuiru85@163.com

吴勇波, 男, 1961 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密抛光与超声波磨削。

E-mail: wuyb@akita-pu.ac.jp