

文章编号 1004-924X(1999)05-0001-08

磁流变抛光技术

张 峰 余景池 张学军 王权陡

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘 要 对磁介质辅助抛光技术 20 年来的发展作了简要的回顾,进而介绍了磁流变抛光技术的产生和发展背景、抛光机理及微观解释、数学模型,同时提出了这种抛光技术的关键所在,并对其发展未来进行了展望。

关键词 磁介质辅助抛光 磁流变抛光 磁流变抛光液 凸缎带 抛光区

中图分类号 TQ171.684 **文献标识码** A

1 引 言

随着科学技术的进步,各个学科交叉发展,形成了许多新领域,产生了很多新技术。对于光学加工技术,人们也不断地进行探索。80年代初期,日本有人将磁场用于光学加工,形成了磁介质辅助抛光方法。1984年, Y. Tam 和 K. Kawata^[1]利用磁场辅助抛光对聚丙烯平片进行加工。图1为这种加工方法的原理示意图。

他们将一些 N、S 极相间的长条形永久磁铁紧密相连排成一列形成非均匀磁场(磁通密度大约 0.1T)。将盛有非磁性抛光粉(碳化硅,直径 4 μm ,体积含量 40%)和磁性液体(直径为 10~15nm 的四氧化三铁磁性微粒均匀地混合在二十烷基萘基液中)的均匀混合液的圆形容器放置在这个磁场中。磁场梯度使抛光粉浮起来与浸在磁性液体中的工件相接触。在加工过程中,工件与容器同时旋转来实现对材料的去除,其材料去除率为 2 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。经过一小时的抛光工件表面粗糙度降低了 10 倍。1987 年, Y. Satio 等^[2]人又在水基的磁性液体中对聚丙烯平片进行了抛光。这种方法的缺点是抛光压力较小,不能对玻璃或其它较硬材料进行抛光,并且不能对工件面形进行较为有效的控制。

* 国家自然科学基金资助项目(批准号 69608006)

收稿日期: 1999-06-07

修稿日期: 1999-07-02

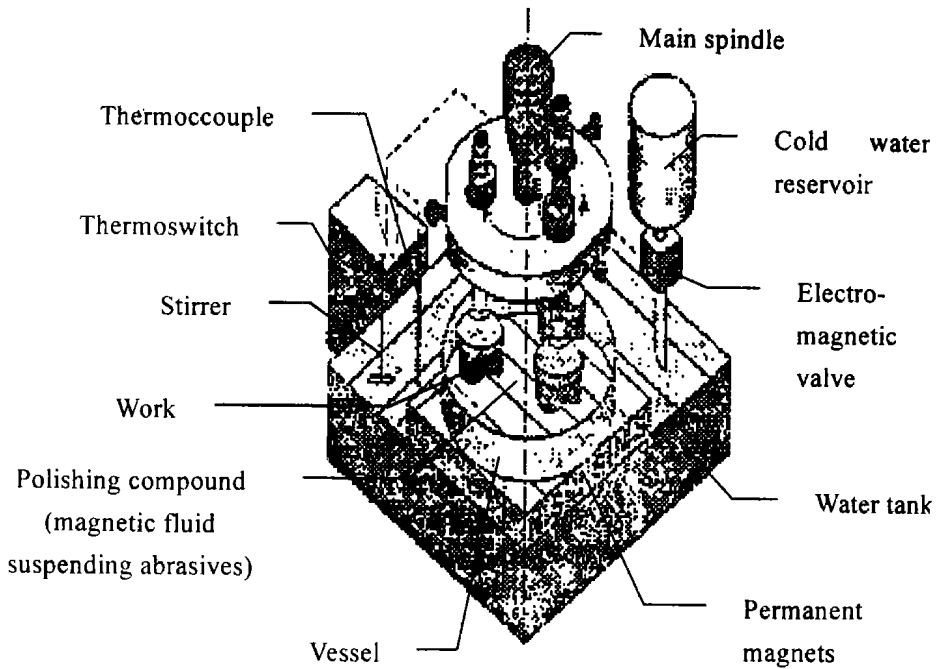


Fig. 1 Polishing of acrylic plates with SiC abrasives in a magnetic fluid composed of 15nm diameter magnetic particles. The pole pieces serve as the reference lapping surface for the workpiece.

1989年, Suzuki等^[3]人用柔性的橡胶垫和聚氨酯将铜盘槽内的磁性液体密封。工件浸于聚氨酯上方的抛光液中。在磁场的作用下, 磁性液体受力作用到橡胶垫和聚氨酯抛光盘上, 柔性的聚氨酯抛光盘受力变形, 使其形状与工件面形相吻合来实现对工件进行抛光的。他们对曲率半径为50mm的硬而脆的晶体进行抛光。经过30min的抛光, 工件表面粗糙度从15nm降到1nm(1.7nm rms), 面形误差从0.4 μ m降低到0.3 μ m。这种方法虽然可以获得较大的抛光压力, 但很不容易控制。1993年, 他们又对直径为40mm的非球面Pyrex^R玻璃工件进行了试验, 其材料去除率为2~4 μ m/h, 仍没有实现对工件的边缘进行控制^[4]。

1994年出现一种叫“磁性液体研磨”的光学加工方法^[5]。这种方法是在磁性液体中放一个“浮体”, 在磁场的作用下, 磁性液体给“浮体”以力的作用, 使其与工件相接触来进行抛光。这样, 以整个“浮体”所受的力来代替原来单个抛光粉所受的力, 使抛光压力大大加强。这种方法比较适合陶瓷材料加工。

另有一种称之为“磁微粉抛光”的光学加工方法^[6]。这种方法适合轴的抛光。将轴的周围放置很多磁性抛光粉, 在外磁场的作用下, 磁性抛光粉聚结在一起形成“磁粉刷”。当轴旋转时, 轴与“磁粉刷”摩擦, 从而对轴进行抛光。这种方法适合于钢或陶瓷的加工。

这些磁介质辅助抛光方法, 或者抛光效率太低, 或者产生较大的破坏层, 或者抛光不易控制, 总之都存在一定的缺陷。

2 磁流变抛光技术的产生和发展背景

为了获得高精度面形和不产生破坏层,有人将流体动力学理论引入光学加工形成一些非接触抛光方法。较有代表性的一种方法称之为“水上飞机抛光”,它是基于流体动力学润滑理论^[7]。这种抛光方法是这样的,当一个沿圆周方向具有多个倾斜表面的圆盘在液体中旋转时,液楔产生的流体压力使圆盘表面上的工件浮起。当随着流体运动的抛光粉颗粒通过工件由于浮起而与圆盘之间形成的空隙时,不断地撞击工件表面,从而引起材料的去除。其缺点是抛光压力小,效率低。另一种方法叫“弹性发射机”抛光^[8~10]。工件和放在其上的小球一起浸没在抛光液中,由于流体效应,当小球旋转时,小球和工件之间形成一层很薄的润滑膜,抛光粉随着流体进入润滑膜引起对工件的去除。有人认为其抛光机理是这样的,抛光粉颗粒进入润滑膜时便与工件表面原子相结合,当抛光粉颗粒随流体流走时,工件表面上与抛光粉颗粒结合在一起的原子也随之流走,从而实现了对工件表面材料的去除。

这些非接触抛光方法虽然不产生下表面破坏层,但是其抛光效率较低。为了既提高抛光效率,使抛光过程容易控制,又不产生下表面破坏层,90年代初,William I. Kordonski, I. Prokhorov 及合作者^[11~12]将电磁学、流体动力学理论、分析化学结合于光学加工中,发明了磁流变抛光(MRF)技术。这种方法利用磁流变抛光液在磁场中的流变性进行抛光的。在高强度的梯度磁场中,磁流变抛光液变硬,成为具有粘塑性的Bingham介质。当这种介质通过工件与运动盘形成的很小空隙时,对工件表面与之接触的区域产生很大的剪切力,从而使工件表面材料被去除。

1995年,Rochester大学的光学加工中心(COM)利用MRF方法对一批直径小于50mm的球面和非球面光学元件进行了加工^[13~14]。结果材料为熔石英的球面元件表面粗糙度降到0.8nm(rms),面形误差为0.09 μm 。材料为BK7的非球面元件表面粗糙度降到1nm(rms),面形误差为0.86 μm 。这些光学元件都达到了图纸要求。

1996年,他们用流体动力学润滑的理论对磁流变抛光进行了初步的理论分析^[15]。他们发现MRF中的流体运动形式类似于轴颈轴承润滑时流体的运动形式,并对MRF中的剪切应力进行了理论推导。同时,他们建立了一套完整的磁流液循环、搅拌、散热系统。并做了大量的实验,将工件轴在不同角度时,不同面形和材料的试验件形成的抛光区编成代码储存起来,以便实现数控^[16]。

1997年,COM的研究人员对初始面形精度为30nm(rms)左右的熔石英及其它六种玻璃材料光学元件进行试验,经过5~10min的抛光,面形精度达到了1nm左右。同时,他们又对磁流变抛光液成分进行了化学分析,通过以氧化铝或金刚石微粉等非磁性抛光粉代替原磁流变抛光液中的非磁性抛光粉氧化铈,较为成功地对一些红外材料进行了抛光^[17]。1998年4月,他们将快速文本编辑程序(QED)技术引入Q22型磁流变抛光机中,大大缩短了抛光时间,提高了抛光效率。这是MRF技术商业化进程上的一大飞跃。

目前,他们正对磁流变抛光过程的化学原理和机械原理进行继续而深入的研究,以便使这项光学加工技术更加趋于成熟。

3 磁流变抛光技术的抛光机理及微观解释

3.1 磁流变抛光技术的抛光机理

以用磁流变抛光技术加工凸球面光学元件为例, 阐述这种抛光方法的抛光机理。图 2 为磁流变抛光方法加工凸球面的原理示意图。被加工工件位于运动盘上方, 并与运动盘成一很小的固定不变的距离, 于是工件表面与运动盘表面形成了一个凹空隙。磁极置于工件和运动盘的下方, 并且在工件和运动盘所形成的小空隙附近形成一个高梯度磁场。运动盘内盛有磁流变抛光液, 当磁流变抛光液随运动盘一起运动到工件与运动盘所形成的小空隙附近时, 梯度场使之聚结、变硬, 形成一凸起带, 成为具有粘塑性的 Bingham 介质。这样具有较高运动速度的 Bingham 介质通过小空隙时, 对工件表面与之接触的区域产生很大的剪切力, 从而使工件表面材料被去除。

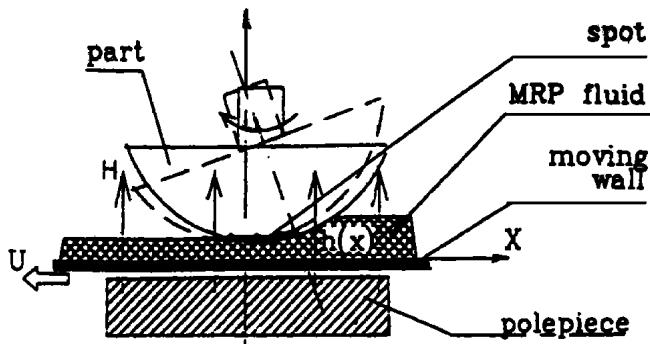


Fig. 2 Scheme of MR finishing

运动盘内盛有磁流变抛光液, 当磁流变抛光液随运动盘一起运动到工件与运动盘所形成的小空隙附近时, 梯度场使之聚结、变硬, 形成一凸起带, 成为具有粘塑性的 Bingham 介质。这样具有较高运动速度的 Bingham 介质通过小空隙时, 对工件表面与之接触的区域产生很大的剪切力, 从而使工件表面材料被去除。

工件表面被抛光的区域称为抛光区。从图 2 中可以看出, 工件轴除了可以绕自身轴线作回转运动外, 还可以作以轴上某点为中心, 以工件的曲率半径为半径的摆动。于是工件表面的各个带区都可以经过抛光区, 从而实现对工件整个表面的材料去除。通过控制工件表面各个带区在抛光区内的停留时间, 来控制各带区材料的去除量, 进而精修工件面形。抛光区的大小和形状取决于很多因素, 如磁流变抛光液的成份, 磁流变抛光液被送入磁场之前的机械成型方式, 工件表面被抛光部分的形状, 工件浸入磁流变抛光液地深度, 抛光区磁场强度的分布以及工件的机械性能等。在磁流变抛光过程中, 应对这些因素加以控制, 以便确保抛光区的稳定性。

磁流变抛光方法, 可以认为是以磁流变抛光液在磁场作用下, 在抛光区范围内形成的具有一定硬度的“小磨头”代替散粒磨料抛光过程中的刚性抛光盘。在磁场的作用下, 磁流变抛光液变硬, 粘度变大, 并且“小磨头”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它因素都固定不变。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。这些优点是传统的刚性抛光盘所无法比拟的。

3.2 磁流变抛光的微观解释

磁流变液由磁性颗粒、基液和稳定剂组成^[18]。磁性颗粒常选用球形金属或铁氧体磁性材料, 其微粒尺寸范围一般为 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$ 。用于磁流变抛光的磁流变液的基液应该是具有良好流动性(无外加磁场情况下)和热稳定性的无污染的绝缘介质, 如水、硅油等。稳定剂必须有特殊的分子结构: 一端有一个对磁性颗粒界面产生高度亲和力的钉扎功能团; 另一端还需有一个极易分散于基液中去的适当长度的弹性基团。稳定剂使磁性颗粒稳定的悬浮于基液中。将抛光粉颗粒混合于磁流变液中就形成了磁流变抛光液。在无外加磁场的情况下, 抛光粉颗粒或者

均匀的分布在磁流变液中, 或者与磁流变液分离而存在于其表面。当有外加磁场作用时, 磁流变液中磁性颗粒聚结成链状结构, 抛光粉颗粒受力浮于磁流变液表面, 与工件相接触。在抛光过程中, 抛光粉颗粒和磁性颗粒同时作用于工件表面, 由于磁性微粒和抛光粉颗粒硬度差不多, 有的种类的磁性颗粒硬度甚至高于抛光粉微粒, 所以它们都对工件的材料去除有贡献。图 3 描绘了磁场作用下微粒的运动情况。这个抛光过程中的化学作用和物理作用还有待于进一步研究。

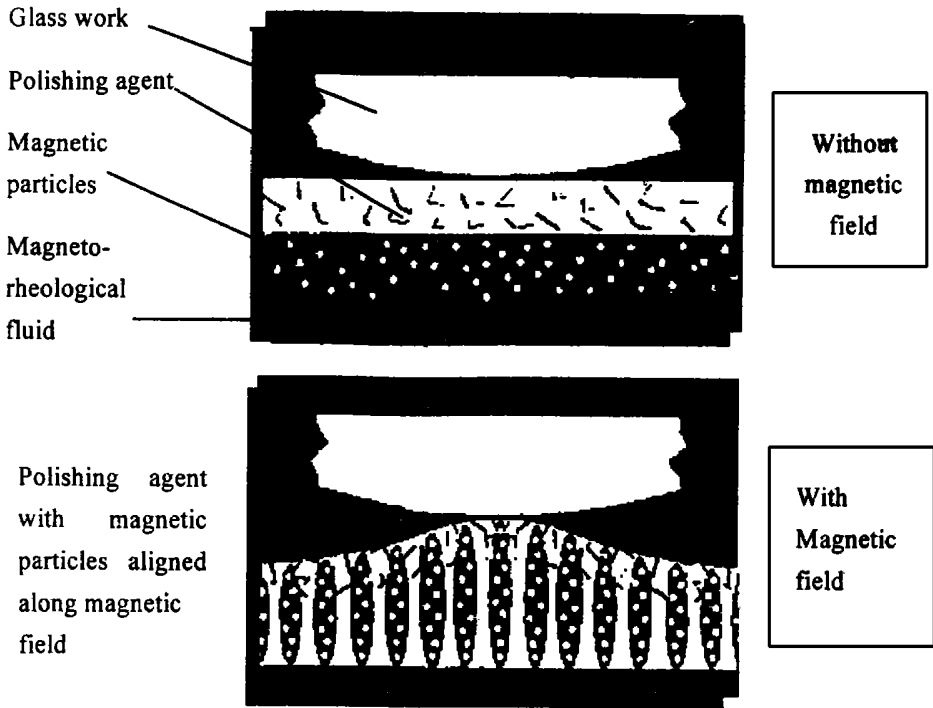


Fig. 3 Idealized drawing to depict particle motion in a magnetic field

4 磁流变抛光材料去除率的数学模型

磁流变抛光是一种先进的光学加工技术。其数学模型建立的依据是在光学加工上, 被实验所验证了的, 并为人们所普遍接受的 Preston 方程。由 Preston 方程, 材料的去除率可表示为:

$$R = K \frac{W}{\mu} = K \frac{\tau U}{\mu} \quad (1)$$

其中, K ——Preston 系数

W ——抛光区内磁流变抛光液的抛光功率

μ ——抛光区内磁流变抛光液与工件的摩擦系数

τ ——抛光区内磁流变抛光液的剪切应力

U ——抛光区内磁流变抛光液的最大运动速度(运动盘在抛光区的线速度)

在这个模型中以磁流变抛光液的剪切应力代替传统抛光中正压力是因为在抛光过程中,主要是依靠磁流变抛光液的剪切应力进行工件材料去除的,并且对于磁流变液来说,研究剪切应力更方便一些。

剪切应力 τ 的确定比较复杂,可由 Bingham 模型和流体动力学润滑理论推导出^[15]。在磁场中,磁流变抛光液的流变特性满足 Bingham 方程,其剪切应力 τ 可表示为下式:

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_0 \text{sign}(\dot{\gamma}) \quad (2)$$

式中: η_0 ——不加外磁场时磁流变抛光液的粘度

$\dot{\gamma}$ ——磁流变抛光液的剪切速率

τ_0 ——外磁场作用下磁流变抛光液的屈服应力

$\text{sign}(\dot{\gamma})$ ——是符号函数,表示 τ_0 前面的符号与 $\dot{\gamma}$ 取同号

在如图 2 所示的坐标系中,由流体动力学润滑理论可知:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3)$$

其中: P ——抛光区内工件所受的压力

将(3)式对 y 积分得:

$$\tau = \frac{dp}{dx}y + C_1 \quad (4)$$

式中: $\frac{dp}{dx}$ ——抛光区内工件所受的压力梯度

C_1 ——积分常数

将(4)式代入(2)式并再次对 y 积分得:

$$\frac{1}{2} \frac{dp}{dx} y^2 - \eta_0 u \pm \tau_0 y + C_1 y + C_2 = 0 \quad (5)$$

式中, u ——磁流变抛光液的运动速度

C_2 ——为另一积分常数

将边界条件: (1) $y = 0$ 时 $u = U$, (2) $y = h$ 时 $u = 0$, 代入(5)式求出 C_1 值并代入(4)得

$$\tau = \frac{dp}{dx} \left(y - \frac{h}{2} \right) - \frac{\eta_0 U}{h} - \tau_0 \quad (6)$$

其中, h ——工件表面与运动盘所形成小空隙的高度

这样公式(1)中的所有参数都为已知。美国 Rochester 大学的光学加工中心的研究人员在这个模型的指导下做了许多实验,实验结果和理论模型相符合的较好。

5 磁流变抛光技术实现的关键及未来展望

5.1 磁流变抛光技术实现的关键

从磁流变抛光的机理可以看出,这种抛光技术实现的关键是:

(1) 磁流变抛光液的研制。磁流变抛光液应具有在无外加磁场时流动性好,当有外磁场作用时流变性好,硬度能变得很大,且对磁场的响应速度快等特点。

(2) 应能通过磁场控制磁流变抛光液形成“小磨头”的大小、形状以及“小磨头”作用于工件

上的压力, 从而控制材料的去除量, 获得稳定的抛光过程。

在这两项关键技术上, Rochester 大学的光学加工中心的研究人员做了大量的工作, 并取得了一定的成果。他们自行研制了许多种类的磁流变抛光液, 把各种条件下所形成的抛光区形状输入微机, 初步对磁流变抛光过程实现了数控。这两项关键技术仍需进一步研究以便这种抛光技术更加完善。

5.2 对磁流变抛光技术的未来展望

磁流变抛光这种新兴的光学加工方法以其加工速度快, 效率较高, 不产生下表面破坏层及易于实现微机数控等优点已渐为人们所接受。另外, 磁流变抛光还有一个显著的优点: 这种抛光方法利用磁流变抛光液在磁场作用下形成的柔性小“磨头”对工件表面各个环带区进行加工, 因此特别适合非球面光学元件的制造。但目前磁流变抛光还只局限于对中小口径(直径在 100mm 以下)的光学元件的加工。因此应对其进一步研究, 使之也能对大中口径的光学元件的加工也行之有效。那时, 磁流变抛光这种先进的光学加工方法必将更受人们的青睐。

参 考 文 献

- 1 Tain Y., Kawata K. Development of High-Efficiency Fine Finishing Process Using Magnetic Fluid. *Annals of the CIRP*, 1984, 33: 217 ~ 220
- 2 Niihara Y, Saito H, Oshio T, Hanaoka T. Float Polishing Using Magnetic Fluid with Abrasive Grains. *Proc 6th Intl Conf Prod Eng, Osaka*, 1987. 335 ~ 340
- 3 Suzuki H, Kodera S, Hara S, Matsunaga H, Kurobe T. Magnetic field-assisted polishing: application to a curved surface. *Prec Eng*, 1989, 4: 197 ~ 202
- 4 Suzuki H, Kodera S, Matsunaga H, Kurobe T. Study on Magnetic Field-Assisted Polishing (2nd Report): Effect of Magnetic Field Distribution on Removal Distribution. *J Jap Soc Pre Eng*, 1993, 59: 83 ~ 88
- 5 Umehara N. Magnetic Fluid Grinding—A New Technique for Finishing Advanced Ceramics. *Annals of the CIRP*, 1994, 43: 185 ~ 188
- 6 Fox M, Agrawal K, Shinmura T, Komanduri R. Magnetic Abrasive Finishing of Rollers. *Annals of the CIRP*, 1994, 43: 181 ~ 184
- 7 Gormley J, Manfra M, Calawa A. *Rev Sci Instrum*. 1991, 52(8): 1256 ~ 1259
- 8 Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Elastic emission machining. *Precision Engineering*, 1987, 9: 123 ~ 128
- 9 Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Mechanism of atomic removal in elastic emission machining. *Precision Engineering*, 1988, 10: 24 ~ 28
- 10 Su Yaw-Terng, Wang Shuh-Yi, Chao Ping-Yi, Hwang Yeong-Dong, Hsiao Jar-Sian. Investigation of elastic emission machining process: lubrication effects. *Precision Engineering*, 1995, 17: 164 ~ 172
- 11 Kordonski W m I. Adaptive Structures Based on Magnetorheological Fluids. *Proc 3rd Int Conf, Adaptive Struct.*, ed Wada, Natori and Breitbach, 13-17, San Diego, CA, 1992
- 12 Prokhorov I V, Kordonsky W I, Gleb L K, Gorodkin G R, Levin M L. New High-Precision Magnetorheological Instrument-Based Method of Polishing Optics. *OSA OF&T Workshop Digest*, 1992, 24: 134 ~ 136
- 13 Golini D, Pollicove H, Platt G, Jacobs S, Kordonski W. Computer control makes asphere production run

of the mill. *Laser Focus World*, 1995, 83 ~ 86

- 14 Jacobs S D, Golini D, Hsu Y, Puchebner B E, Strafford D, Kordonski W m I, Prokhorov I V, Fess E, Pietrowski D, Kordonski V M. Magnetorheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing. *Proc SPIE*, 1995, 2576: 372 ~ 382
- 15 Kordonski W m I, Jacobs S D. Magnetorheological Finishing. *International Journal of Modern Physics B*, 1996, 10: 2837 ~ 2848
- 16 Golini D, Jacobs S D, Kordonski W I, Dumas P. Precision Optics Fabrication Using Magnetorheological Finishing. to be published in *Proc SPIE, CR67: Advanced Materials for Optics and Precision Structures*, Edited by Ealey, Paquin, and Parsonage, San Diego, CA, 26 July 1997
- 17 Jacobs S D, Yang Fuqian, Fess E M, Feingold J B, Gillman B E, Kordonski W I, Edwards H, Golini D. Magnetorheological Finishing of IR Materials. *Proc SPIE*, 1997, 3134: 258 ~ 269
- 18 杨仕清, 张万里, 龚捷, 谭锐, 王豪才. 磁流变液的流变学性质研究. *功能材料*, 1998, 29(5): 550 ~ 552

Magnetorheological Finishing Technology

ZHANG Feng, YU Jing-Chi, ZHANG Xue-Jun, WANG Quan-Dou

*(The State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

The developing of magnetic media-assisted finishing technology in the last 20 years is reviewed in this paper. Producing, developing, mechanism and micromechanism and mathematical model of magnetorheological finishing are described in detail. The key technology and the future of finishing are also given in the paper.

Key Words: Magnetic media-assisted finishing, Magnetorheological finishing, Magnetorheological polishing fluid, Convex ribbon, Polishing spot

张 峰 男, 1969 年 1 月生, 1991 年毕业于长春光学精密机械学院光学工程系, 1997 年又在该院获得光学仪器专业硕士学位。现在中国科学院长春光学精密机械研究所攻读博士学位, 从事光学超精加工与检测方面的研究工作, 主要研究方向为磁流变光学加工技术。