

doi:10.3969/j.issn.1007-7162.2016.06.004

# 超精密磁流变复合抛光技术研究进展

肖晓兰, 阎秋生, 潘继生, 于 鹏, 梁华卓, 陈 润

(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 对超精密磁流变复合抛光技术的国内外研究进展进行了评述, 介绍了当前主要应用的几种超精密磁流变复合抛光技术的加工原理和发展现状. 重点介绍了磁流变射流复合抛光、超声波磁流变复合抛光、化学机械磁流变复合抛光以及集群磁流变复合抛光的加工技术内涵, 从加工效率、加工表面均匀性、加工精度、加工适合的材料与形状等方面对上述几类超精密磁流变复合抛光方法进行比较和评述. 最后对超光滑无损伤超精密磁流变抛光技术的发展方向进行了预测.

**关键词:** 超精密; 加工; 磁流变; 复合抛光; 技术发展

**中图分类号:** TH709

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-7162(2016)06-0028-06

## A Review on Ultra-precision Compound Polishing Technology of Magnetorheological

Xiao Xiao-lan, Yan Qiu-sheng, Pan Ji-sheng, Yu Peng, Liang Hua-zhuo, Chen Run

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Research on magnetorheological finishing technology at home and abroad is reviewed. According to the development of magnetorheological finishing technology, the current main application of ultra-precision machining principle and progress of magnetorheological compound polishing technology are elaborated, mainly focusing on Magnetorheological Jet Polishing, Ultrasonic-magnetorheological Compound Polishing, Chemo-mechanical Magnetorheological Finishing and Cluster of MRF processing methods and mechanism of material removal. Then the MRF method is compared in terms of surface precision machining, surface integrity and processing efficiency. Finally, a discussion is conducted on how to improve the precision polishing efficiency, forecasting the development of ultra-precision magnetorheological finishing and pointing out the key research direction in the future.

**Key words:** ultra-precision; machining; magnetorheological; compound polishing; technological development

精密光学、核能、大规模集成电路、激光和航空航天等尖端技术中所用的硬脆性材料元件常常需要非常高的表面精度以及非常小的加工损伤层. 高表面精度及表面完整性可以保证光学元件良好的成像质量, 较小的加工损伤层可以减少光学元件在高能应用中的损坏. 超精密加工对工件的材质、加工设备与加工工具、测量和环境等条件都有特殊的要求, 需要综合应用精密机械、精密伺服系统、计算机控制技

术、精密测量以及其他先进技术才能获得良好的加工效果. 超精密加工技术主要有超精密切削、超精密磨削、超精密特种加工和超精密抛光, 而超精密抛光是最终得到超光滑表面的有效加工方法(当被加工表面的尺寸波动范围在 0.1 ~ 0.2 nm 之间, 具有这种特征的表面称为“超光滑表面”). 超精密抛光以获得极限的形状尺寸精度、表面粗糙度以及极少的表面损伤(残余应力、组织变化、微裂纹缺陷等)为

**收稿日期:** 2016-03-31

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51375097); 广东省自然科学基金重点项目(2015A030311044); 高等学校博士学科点专项科研基金(20134420110001)

**作者简介:** 肖晓兰(1979-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为机械设计与精密加工. E-mail: xxlan@gdut.edu.cn

**通信作者:** 阎秋生(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为磨削加工和微细加工技术, 精密分切加工. E-mail: qsyang@gdut.edu.cn

目标,利用微细磨粒的机械作用和化学作用,在软质抛光工具或电/磁场、化学抛光液等辅助作用下,减少或完全消除加工变质层,获得高表面质量<sup>[1]</sup>。

世界各国都在积极研究超精密抛光加工技术,提出了许多新的抛光方法,比如悬浮抛光、电泳抛光、水合抛光、超声抛光、化学机械抛光、应力盘抛光、离子束抛光、射流抛光、气囊抛光、磁流变抛光等。本文对能够实现确定量抛光、加工效率高、表面粗糙度低并且不产生亚表面损伤层的超精密磁流变复合抛光技术的加工原理及加工实例,从加工效率、加工表面均匀性、加工精度、加工适合的材料与形状等方面对上述几类超精密磁流变复合抛光方法进行比较,并预测今后的重点研究方向。

## 1 磁流变抛光加工的原理与特点

磁流变抛光 (Magnetorheological Finishing, MRF) 技术的创始人是苏联科学家 W. I. Kordonski, 他与合作者们将流体动力学理论与电磁学理论结合起来,开创了磁流变抛光这一新的技术领域,其加工原理如图 1 所示。在磁极 3 所产生的高强度梯度磁场作用下,磁性粒子被磁化产生偶极矩成链状分布,形成半固体状的 Bingham 体柔性抛光膜;微细磨料颗粒因为非磁性会受到磁场的排斥而从抛光液中析出来,镶嵌在柔性抛光膜的表层。当含有微细磨料的磁流变抛光液 2 被抛光轮 1 带入由工件 5 表面与抛光盘 4 所构成的狭小收缩区域时,会对工件表面产生较大的剪切力,从而实现对工件表面的抛光。

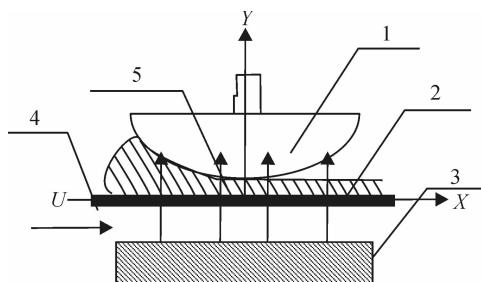


图 1 磁流变抛光的加工原理图

Fig. 1 Schematic view of magnetorheological finishing

1-抛光轮; 2-磁流变抛光液; 3-电磁铁磁极;  
4-抛光盘; 5-工件

磁流变体 (Bingham 体) 具有黏弹性,能有效约束磨粒对工件表面的材料进行抛光去除。磨粒在抛光时处于半固着状态, Bingham 体能使粒度分布不均匀的大、小磨粒均匀作用于加工表面,避免了由于磨粒不均匀导致的划痕和亚表面损伤。另外,由于磁链串对磨粒的柔性夹持作用,即便抛光时选用去除

效率较高的硬磨粒 (如金刚石粉),也能产生高质量的抛光表面。因此,磁流变抛光技术是一种非常好的光学材料精密加工方法,具有抛光效果好、不产生亚表面损伤、适合复杂表面加工等传统抛光所不具备的优点,广泛应用于大型光学元件、半导体晶片、LED 基板、液晶显示面板等材料。

## 2 磁流变抛光方法的提出与发展

Rabinow<sup>[2]</sup> 在 1948 年将微米尺寸的磁极化颗粒分散于非磁性液体中形成悬浮液。在零磁场情况下,该悬浮液与普通流体相似,表现为流动性良好的液体,但在强磁场作用下可于短时间 (毫秒级) 内将表面黏度增加两个数量级以上并呈现类固体特性 (迅速变硬)。这种变化连续且可逆可控,即去掉磁场后又恢复成原来可以流动的流体状态。人们把这种悬浮液称为磁流变液,但是此后的三十多年间由于没有认识到它的剪切应力特性,其发展一直非常缓慢。

20 世纪 90 年代,前苏联学者 Kordonski 与美国罗切斯特大学光学制造中心的 Golini、Jacobs 等人一起将磁流变抛光 (MRF) 理论逐步完善与实用化。他们于 1994 年制作出第一台 MRF 机床样机,对磁流变抛光液在抛光过程中的特性作了微观解释,用流体动力学润滑理论对磁流变抛光进行了初步的理论分析,并通过大量的实验将工件轴在各个角度抛光不同面形和材料的工件所形成的抛光区编成代码储存起来,为实现数控加工打下基础。1998 年 4 月,他们与 QED 公司合作,将快速文本编辑程序 (QED) 技术引入磁流变抛光机中,研制出了第一台磁流变抛光机 Q22-X,使 MRF 技术走向了商业化。

我国从 20 世纪 90 年代末期逐步开始磁流变抛光的加工研究。中科院长春光学精密机械与物理研究所、国防科技大学、中国科技大学、中国工程物理研究院、哈尔滨工业大学、北京理工大学、清华大学、大连理工大学、湖南大学、东北大学以及广东工业大学等高校及科研院所对磁流变抛光技术进行了深入的研究,研制出各具特色的磁流变抛光实验装置,并不断深入探索磁流变抛光的加工机理。中国工程物理研究院机械制造工艺研究所的唐小会等人<sup>[3]</sup>根据磁流变抛光工艺特点,设计了缎带标定和工件位姿测量等自动化工艺过程,并基于华中数控系统实现了缎带标定和端面测量等工艺过程固定循环 G 代码。广东工业大学的阎秋生等人自主研制了集群磁流变平面抛光加工试验装置,并在集群磁流变平面抛光加工试验装置的基础上提出了集群磁流变-化学机械复合抛光加工方法和基于动态磁场的集群磁流变抛光方法。初始表面粗糙度  $R_a$  为 107 nm 的单

晶碳化硅基片,在经过 60 min 的集群磁流变-化学机械复合抛光后,基片的表面粗糙度  $R_a$  降至 0.71 nm,材料最高去除率 (MRR) 达到 98 nm/min<sup>[4]</sup>.

在磁流变抛光加工机理方面,长春光学精密机械研究所张峰等人<sup>[5]</sup>建立了磁流变抛光材料去除模型,并研制出一种具有优良流变性和较高抛光效率的新型磁流变抛光液以及一种适合大口径非球面反射镜加工的带式磁流变抛光机,还提出一种基于矩阵代数运算模型的磁流变抛光驻留时间求解算法.国防科技大学石峰等人进行了磁流变抛光去除磨削亚表面损伤层的实验研究.他们将直径为 100 mm 的 K9 材料平面玻璃经过 156 min 的磁流变粗抛,去除了 50  $\mu\text{m}$  深度的亚表面损伤层,表面粗糙度  $R_a$  提升至 0.926 nm;再经过 17.5 min 磁流变精抛,去除玻璃表面 200 nm 厚的材料,并消除磁流变粗抛所产生的抛光纹路,表面粗糙度  $R_a$  提升至 0.575 nm<sup>[6]</sup>.东北大学的孙百万等人<sup>[7]</sup>提出并设计了一种往复式动磁场磁流变抛光试验方法,试验结果证明了往复式动磁场磁流变抛光方法的有效性.湖南大学的尹韶辉等人<sup>[8]</sup>分析了磁流变化学抛光的加工机理,对蓝宝石基片的磁流变化学抛光进行了试验研究,利用磁流变化学抛光方法加工蓝宝石基片可获得  $R_a$  为 0.3 nm 的超光滑表面.

### 3 超精密磁流变复合抛光技术

#### 3.1 磁流变射流复合抛光技术

美国罗切斯特大学的光学制造中心 (Center for Optics Manufacturing, COM) 最先提出磁流变射流抛光 (Magnetorheological Jet Polishing, MJP) 技术,用来抛光高陡度的深凹面或内腔表面.其加工原理如图 2 所示,混有微细磨料的磁流变液在喷嘴出口附近的外加局部轴向磁场作用下,在毫秒量级的时间内转化为黏塑性的 Bingham 流体,形成准直的硬化射流束,喷射到一定距离外的工件表面进行抛光加工.外加局部轴向磁场主要起到汇聚射流束的作用,射流束的直径在较长距离内基本保持不变,如图 3 所示.抛光加工时,根据试验获得的射流聚束曲线选择相应的聚束磁场.射流速度越大材料去除率越高,但表面粗糙度也会增大,需要选择适当大小的射流速度,以使表面粗糙度达到最优.COM 的研究人员 Tricard M 等人对熔石英平面工件用 MJP 方法抛光后的表面面形  $P-V$  值为 13 nm,表面粗糙度 RMS 为 2 nm,其加工效果如图 4 所示.国防科技大学戴一帆等人使用 MJP 技术加工直径 48.8 mm、顶点曲率半径 25.45 mm 的凹形光学表面,面型  $P-V$  值由 0.57  $\mu\text{m}$  收敛至 0.25  $\mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>.

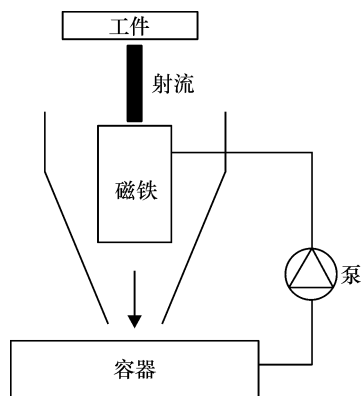


图2 磁流变射流复合抛光加工原理图

Fig.2 Schematic view of magnetorheological jet polishing

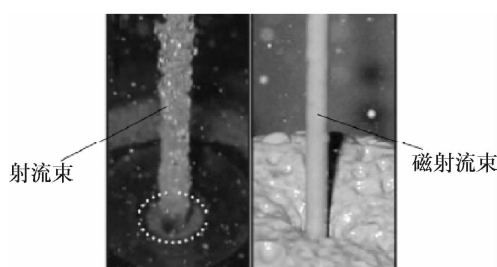


图3 射流束和磁射流束对比

Fig.3 Jet and jet magnetic contrast

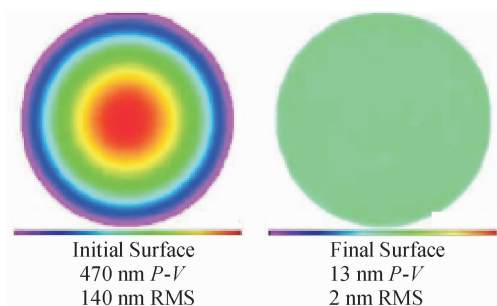


图4 磁流变射流复合抛光熔石英的效果图

Fig.4 Magnetorheological jet polishing renderings of fused quartz

#### 3.2 超声波磁流变复合抛光技术

哈尔滨工业大学的张飞虎等人首先提出了超声波磁流变复合抛光技术 (Ultrasonic-magnetorheological Compound Polishing). 他们研制了一套五轴四联动的超声波磁流变复合抛光装置,其加工原理如图 5 所示.利用插补算法在该装置上对光学玻璃 K9 进行抛光加工实验,可以稳定地获得表面粗糙度小于 1 nm 的 K9 玻璃表面<sup>[10]</sup>.

超声波磁流变复合抛光方法的材料去除率是普通磁流变抛光的 3.1 倍<sup>[11]</sup>,将超声波磁流变复合抛光技术与计算机数字控制技术相结合,可望实现精度和效率都较高的小曲率半径非球面及自由曲面元件的数控加工.

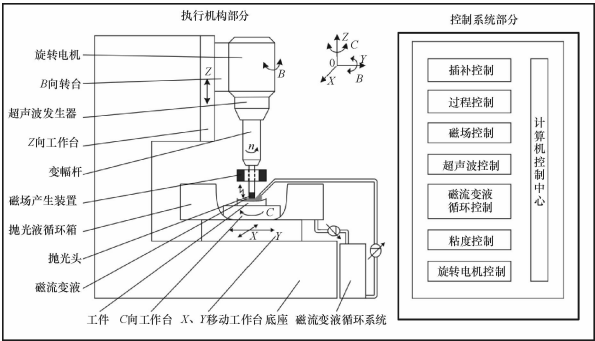


图5 超声磁流变复合抛光加工原理图

Fig. 5 Schematic view of ultrasonic-magnetorheological compound polishing in Harbin Institute of Technology

3.3 化学机械磁流变复合抛光技术

Jain V K 等基于磁流变效应与化学效应提出了化学机械磁流变复合抛光(Chemo-mechanical Magnetorheological Finishing, CMMRF)技术. 将氧化剂、催化剂、磨料等混入磁流变液作为抛光液,在外加磁场作用下使抛光盘表面形成黏弹性抛光垫以约束游离磨粒. 化学机械磁流变复合抛光的加工原理如图6所示. 抛光过程中,工件表面与抛光液会发生化学反应,加工表面的反应物不断被磨粒机械剥离并随抛光液带走,新裸露的被加工表面又被氧化和去除. Jain V K 以硅片为实验材料,在自主研制的 CMMRF 平台上进行实验加工,原始工件的表面粗糙度 Ra 由 13.4 nm 最终降至 0.5 nm<sup>[12]</sup>.

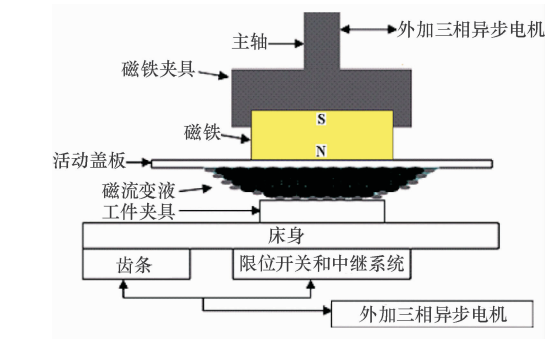


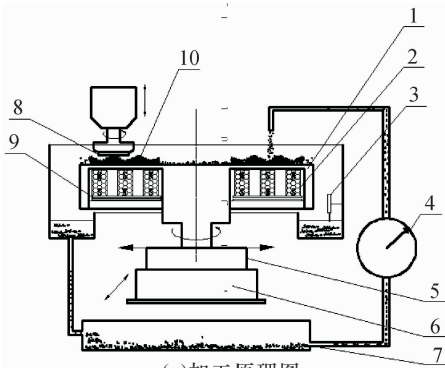
图6 化学机械磁流变复合抛光加工原理图

Fig. 6 Schematic view of chemo-mechanical magnetorheological finishing

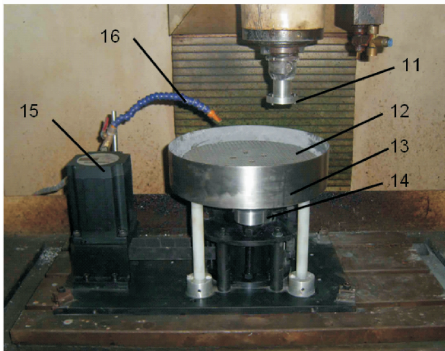
3.4 集群磁流变抛光技术

广东工业大学的阎秋生团队为了实现高效率超光滑平坦化加工,提出了集群分布式磁性体构成抛光工具形成集群磁流变效应抛光(Cluster Magnetorheological Polishing)的新方法. 他们将多个小磁性体有规则地排列在非磁性体圆盘上,形成集群磁流

变效应平面抛光盘,其加工原理及加工实验装置如图7所示<sup>[13]</sup>. 研制了集群磁流变效应平面试验装置并进行了 K9 光学玻璃和硅片的抛光加工试验. 结果表明,集群磁流变效应平面抛光加工方法可以实现高精度抛光,K9 玻璃最终表面粗糙度 Ra 可以达到 0.005 μm,硅片可以达到 0.016 μm. 同时具有高效率,利用 10 min 时间可以实现表面粗糙度下降一个数量级,50 min 可以实现 K9 玻璃降低表面粗糙度 3 个数量级、硅片降低表面粗糙度 1 个数量级<sup>[14]</sup>. 在磁流变抛光工作液中掺杂大尺寸磨粒对 K9 光学玻璃与硅片进行抛光加工实验,发现在粒径为 0.6 μm 的磨粒中掺杂粒径为 1.8 μm 的金刚石粉进行抛光后的表面质量优于粒径为 1.1 μm 的磨粒加工的表面质量,且发现随着掺杂磨粒尺寸的增大,加工表面的 Ra、Rv 值虽有增大,但增长幅度远小于同等状况下游离磨粒加工的增长幅度<sup>[15]</sup>.



(a)加工原理图



(b)加工装置实物图

图7 磁流变平面抛光加工原理及装置图  
Fig. 7 Schematic view and equipment of cluster magnetorheological polishing

1-抗磁抛光盘基体; 2-集群磁极; 3- pH 值测试仪; 4-电泵; 5- X 向工作台; 6-Y 向工作台; 7-磁流变液回收桶; 8-调整垫片 9-工件; 10-抛光液; 11-工件主轴; 12-抛光盘; 13-回收桶; 14-磁场调节系统; 15-带动抛光盘旋转的电机; 16-循环管

集群磁流变柔性抛光垫的“容没”效应,可以容许粒径不一致的大、小磨粒均匀作用于加工表面,不易导致加工表面的划伤和亚表面损伤,可选择硬度

高的磨粒以增加其材料去除效率. 为获得原子级的超光滑平坦表面, 需要磨粒对工件表面的切入深度足够小并做到塑性状态去除, 就要采用超细的亚微米/纳米级磨粒和磁性粒子进行磁流变抛光, 但是这样会导致磁流变效应急剧减弱, 对加工表面的抛光压力减小, 使抛光效率显著降低. 另外, 由于磁流变液的黏弹性, 工件经过集群磁流变抛光垫后会把凸起的柔性抛光垫压下而无法恢复, 从而失去了对工件的压力, 使得工件边缘与其他区域的材料去除率相差极大, 并且磨料在黏弹性抛光垫中难以更新, 进一步降低了加工效果. 基于以上问题, 阎秋生团队提出了基于动态磁场的集群磁流变抛光方法, 其抛光原理如图 8 所示<sup>[16]</sup>.

当主轴电机带动偏心主轴旋转, 会驱使同步旋转的偏心轴固定盘发生转动, 偏心轴固定盘的转动使各柔性偏心转动轴同步转动, 进而带动各磁极在磁铁转动偏心距下转动, 实现磁极端面的静态磁场向动态磁场转变. 通过调节偏心套筒的旋转角度, 可以调节磁铁的转动偏心距, 进而调节动态磁场. 该抛光方法通过使磁极阵列有规律地偏心转动, 形成动态磁场, 可以实现集群磁流变柔性抛光垫的形状修

复以及磨料向柔性抛光垫表面富集自锐, 从而改善磁流变柔性抛光垫的加工性能, 进一步提高集群磁流变的抛光效率, 实现工件表面材料的高效率超光滑平坦化抛光.

综上所述, 从加工表面精度、加工效率、加工表面均匀性和加工适合的材料与形状等方面将上述的超精密磁流变复合抛光技术进行比较, 归纳如表 1 所示.

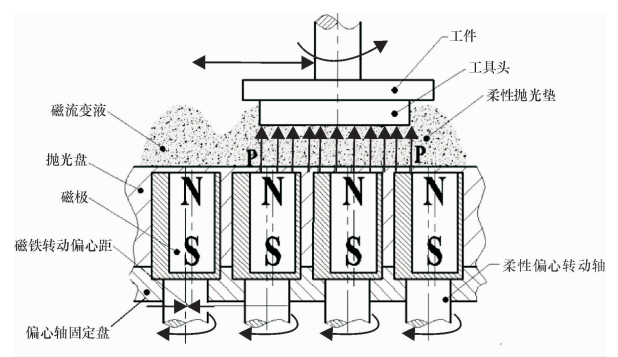


图 8 基于动态磁场的集群磁流变平面抛光加工原理图  
Fig. 8 Schematic view of cluster magnetorheological polishing based on the dynamic magnetic field

表 1 几种典型的超精密磁流变复合抛光技术比较

| Tab. 1 Comparison of several typical ultra-precision magnetorheological compound polishing techniques |           |                           |       |      |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------|-------|------|-----------------------|
| 磁流变复合抛光技术                                                                                             | 粗糙度 Ra/nm | 面型精度 P-V 值/ $\mu\text{m}$ | 表面均匀性 | 加工效率 | 适合加工材料形状              |
| 磁流变射流复合抛光                                                                                             | <0.5      | 0.013                     | 好     | 低    | 高陡度的凹形光学零件和内腔等复杂形面    |
| 超声波磁流变抛光                                                                                              | <1.00     | 0.35                      | 较差    | 较高   | 小曲率半径的凹非球曲面和自由曲面的光学元件 |
| 化学机械磁流变抛光                                                                                             | <0.50     | 0.15                      | 较好    | 较高   | 平面、自由曲面、硬脆性材料/难加工金属   |
| 集群磁流变抛光                                                                                               | <0.50     | 0.18                      | 较好    | 高    | 大面积高精度的超光滑平坦化确定性抛光    |

4 结 论

超精密磁流变抛光技术在近年来得到迅速发展, 纳米水平的加工精度使其占有越来越重要的地位. 但是针对磁流变抛光的微观尺度加工机理的研究仍然处于定性分析阶段, 目前的加工方案主要是经验性的总结, 还缺乏系统性的理论研究, 对实现新一代半导体材料的高效率平坦化加工和超光滑无损表面抛光的研究尚未建立起完整的超精密加工体系, 还需要进一步创新理论和加工方法. 后续将从磁场产生和作用机理方面、磁流变液的动态微观结构方面、磁流变加工过程的作用力(抛光力)、磨粒的作用机制和运动轨迹等方面来进行深入系统地研究, 从而定量寻求超光滑无损伤超精密磁流变抛光

技术的加工工艺方案.

参考文献:

[1] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.  
YUAN J L, ZHANG F H, DAI Y F, et al. Development research of science and technologies in Ultra-precision machining field [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177. (in Chinese)  
[2] RABINOW J. The magnetic fluid clutch[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948, 67(12): 1167-1167.  
[3] 唐小会, 陈华, 郑永成, 等. 基于华中数控的磁流变抛光机床工艺过程设计与开发[J]. 制造技术与机床, 2015

- (8): 168-172.
- TANG X H, CHEN H, ZHENG Y C, et al. The design and development of the craft process of magnetorheological polishing machine tool based on central China numerical control[J]. *Manufacturing Technology & Machine*, 2015 (8): 168-172.
- [4] WU Z C, YAN Q S, BAI Z W, et al. Ultra smooth polishing research based on the cluster magnetorheological effect [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 487: 283-288.
- [5] 张峰. 磁流变抛光技术在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015(9): 266-272.
- ZHANG F. Research progress of magnetorheological finishing technology at CIOMP[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015 (9): 266-272.
- [6] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 162-168.
- SHI F, DAI Y F, PENG X Q, et al. A new technique for eliminating subsurface damage layer of grinding surface with magnetorheological finishing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (1): 162-168.
- [7] 孙百万, 黎胜权, 王任胜, 等. 往复式动磁场磁流变抛光机理及抛光液制备[J]. *机械设计与制造*, 2016 (7): 81-84.
- SUN B W, LI S Q, WANG R S, et al. Reciprocating dynamic magnetic rheological polishing mechanism and polishing liquid preparation[J]. *Mechanical Design and Manufacture*, 2016 (7): 81-84.
- [8] 尹韶辉, 王永强, 李叶鹏, 等. 蓝宝石基片的磁流变化学抛光试验研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(05): 80-87.
- YIN S H, WANG Y Q, LI Y P, et al. Experimental study on magnetorheological finishing of sapphire substrate[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52 (05): 80-87.
- [9] 戴一帆, 张学成, 李圣怡, 等. 确定性磁射流抛光技术[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5): 171-176.
- DAI Y F, ZHANG X C, LI S Y, et al. Deterministic magnetorheological jet polishing technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45 (5): 171-176.
- [10] 于兴滨. 超声磁流变复合抛光面形误差修正的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2014.
- [11] 王慧军. 超声波磁流变复合抛光关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2007.
- [12] JAIN V K, RANJAN P, SURI V K, et al. Chemo-mechanical magneto-rheological finishing (CMMRF) of silicon for microelectronics applications[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 323-328.
- [13] YAN Q S, YAN J W, LU J B, et al. Ultra smooth planarization polishing technique based on the cluster magnetorheological effect [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 135(135): 18-23.
- [14] PAN J S, YAN Q S, XU X P, et al. Abrasive particles trajectory analysis and simulation of cluster magnetorheological effect plane polishing [J]. *Physics Procedia*, 2012, 25(22): 176-184.
- [15] 白振伟, 阎秋生, 路家斌, 等. 集群磁流变效应抛光垫的磨粒“容没”效应机理研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(20): 146-152.
- BAI Z W, YAN Q S, LU J B, et al. Study on the mechanism of the effect of polishing pad on the magnetorheological effect of the cluster[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(20): 146-152.
- [16] 潘继生, 阎秋生, 高伟强, 等. 磁流变柔性抛光垫的动态磁场自锐抛光装置及其抛光方法: CN201510801886.4 [P]. 2015-11-20.