

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.010

# 圆柱型永磁体磁流变抛光头设计及其参数优化<sup>\*</sup>

高春甫, 郑 强, 杨青彤

(浙江师范大学 机械测控与设备技术研究所, 浙江 金华 321004)

**摘要:**针对传统加工技术存在表面损伤、加工效率低的问题,将极具前景的面接触式超精密磁流变抛光技术应用到 3C 制造业中。对圆柱型永磁体磁流变抛光头在加工过程中的抛光垫的形貌进行了研究分析,发现圆柱型永磁体磁流变抛光头在加工过程中存在一种“环状效应”,利用“环状效应”对圆柱型永磁体磁流变抛光头进行了结构设计,并对其进行了设计理念分析;对圆柱型永磁体抛光头在 6061 的铝合金工件上进行了单因素抛光实验,通过实验获得了最优参数。研究表明:该圆柱型永磁体磁流变抛光头能够实现环状加工区域的高效光滑平坦化加工,工件表面粗糙度达到 52 nm,材料去除率达 9.1  $\mu\text{m}/\text{min}$ ,大大提高了磁流变抛光的效率,为面形精度在微米级的超光滑平面的制造提供了一种高效的加工方法。

**关键词:**圆柱型永磁体;面接触;超精密磁流变抛光;环状效应;高效光滑平坦化加工

中图分类号:TH122;TB381

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)12-1286-04

## Design of cylindrical permanent magnet magnetorheological polishing head and its parameter optimization

GAO Chun-fu, ZHENG Qiang, YANG Qing-xing

(Institute of Mechanical Measurement-Control, Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of surface damage and low processing efficiency in traditional processing technology, the extremely promising surface contact ultra-precision magnetorheological polishing technology was applied to 3C manufacturing industry. The morphology of the polishing pad in the process of cylindrical permanent magnet magnetorheological polishing head was studied and analyzed. It was found that the cylindrical permanent magnet magnetorheological polishing head has a “ring effect” during processing. The “ring effect” was structurally designed for the cylindrical permanent magnet magnetorheological polishing head and its design concept was analyzed. The single-factor polishing experiment was carried out on the 6061 Aluminum alloy workpiece by the cylindrical permanent magnet polishing head, and the optimal parameters were obtained by single factor experiment. The results indicate that the cylindrical permanent magnet magnetorheological polishing head can realize high-efficiency smooth flat processing of the annular processing area, the surface roughness of the workpiece reaches 52 nm, and the material removal rate reaches 9.1  $\mu\text{m}/\text{min}$ , which greatly improves the magnetorheological polishing. The efficiency provides an high-efficient processing method for the fabrication of ultra-smooth surfaces with micron-level accuracy.

**Key words:** cylindrical permanent magnet; surface contact; ultra-precision magnetorheological polishing; annular effect; high-efficiency smooth flat processing

收稿日期:2019-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275483)

作者简介:高春甫(1965-),男,吉林公主岭人,博士,教授,主要从事智能材料、机电设备检测与控制、设计及自动化方面的研究。E-mail:cf-gao2007@zjnu.cn

## 0 引言

近年来,铝合金、蓝宝石及单晶 SiC 等材料在手持设备、智能穿戴、集成电路等领域得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。这些材料在使用过程中,要求具有超平坦、超光滑、无表面损伤等特点<sup>[4]</sup>。针对这些材料,若采用传统的加工技术,存在表面损伤、加工效率低等问题,难以获得理想的加工表面<sup>[5]</sup>。

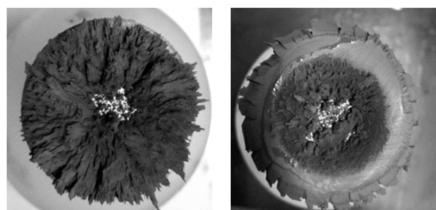
磁流变抛光(MRF)是一种非接触式的确定性的超精密加工技术<sup>[6-7]</sup>,其表面误差和抛光精度的收敛速度高于经典的抛光技术,因此,近年来磁流变抛光技术得到了迅速的发展。

为了提高磁流变加工的效率,本文基于磁流变抛光原理,提出一种基于面接触的圆柱型永磁体磁流变平面抛光加工技术,并利用圆柱型永磁体磁流变抛光头在加工过程中存在的“环状效应”,对圆柱型永磁体磁流变抛光头进行结构设计,最后通过实验来证明所设计的抛光头,可实现环状加工区域的高效光滑平坦化加工。

## 1 新型抛光头的设计

### 1.1 圆柱型永磁体抛光垫的“环状效应”

抛光垫抛光前后形貌如图 1 所示。



(a) 抛光前 (b) 抛光后

图 1 抛光垫抛光前后形貌

由图 1 可知:利用圆柱型永磁体作为磁流变抛光装置的抛光头时,磁流变抛光液在磁场的作用下瞬间由液相变为固相,形成链状结构,且沿着磁力线分布,具有放射状分布的特征。

同时,由于磁流变流体作为一种铁磁性材料,比空气的磁导率高 10 倍,从而更容易引导磁通量<sup>[8]</sup>。因此,磁流变液与空气界面处的磁通密度梯度增大,在抛光垫的侧面,磁通的磁力线出现最大程度的发散,在永磁体磁场的边缘效应的作用下,磁流变液具有一种向外移动的趋势。

当永磁体抛光头高速旋转时,抛光垫与工件凸起的高峰发生剪切,此时,剪切力促进了磁流变抛光垫的

重新分布,抛光头抛光工件一段时间后,抛光垫会形成一个窄小的环状抛光垫。

针对圆柱形永磁体抛光头形成的放射状抛光垫变为环状抛光垫特性,本文将其特性定义为基于圆柱型永磁体磁流变抛光头的“环状效应”。

### 1.2 设计理念

为了有效地利用“环状效应”来提高抛光的效率,本文设计出一种圆柱型永磁体磁流变抛光头。

抛光头设计理念如图 2 所示。

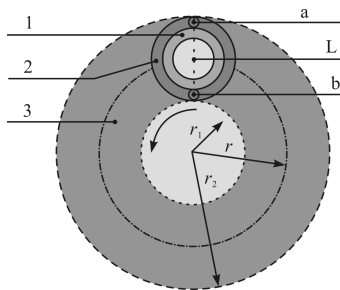


图 2 抛光头设计理念

1 - 低压区;2 - 高压区

图 2 中,圆柱型永磁体产生的磁场都具有边缘效应,抛光垫对工件形成的压力与磁场强度呈正相关。

现假设抛光垫形成的抛光压力区为 2 个(2 个抛光压力区只是为了阐述原理的方便,当存在多个抛光压力区时,原理不变)。

区域 2 为高压区,对工件的去除率较大,是工件去除的主要工作区域;区域 1 为低压区,对工件的去除率相对较小,起到平滑工件的作用。由于该抛光区域半径小导致线速度较低,在一定程度上也能弥补其所引起去除率低的问题。

本文以图 2 中的线段 L 为例,说明当磁极随着抛光头高速旋转时,形成的环状抛光垫经过加工区域内任意区域时的情况:

(1)抛光头经过线段 L 时,经过两次区域 2;抛光头经过线段 L 的两个端点 a、b 时,由于线段 L 加工区只经过一次抛光区域 2,造成了线段 L 两个端点处去除率较低,抛光头经过线段 L 时,加工区域 L 均匀去除的实际长度略低于 L 的长度;

(2)当把线段 L 的抛光原理拓展到环状区域时,抛光头对环状区域内任意线段“L”的加工过程都是相同的,因此,磁极形成的抛光垫在加工区域 3(略小于区域 3)内对工件实现了材料的均匀去除;

(3)为了提高抛光头的加工效率,圆柱型磁极的个数增加为 4 个,当圆柱型磁极形成的抛光垫跟随主轴一起旋转一周时,相当于 1 个圆柱型磁极形成的抛

光垫对工件加工了 4 次。

### 1.3 基于“环状效应”的方案设计

基于上述的设计理念,本文设计了一种新型抛光头。该抛光头的设计结构图如图 3 所示。

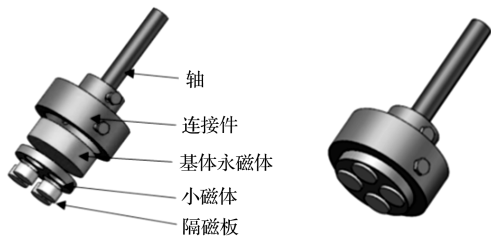


图 3 抛光头的设计结构图

图 3 中,在基体永磁体(主要是为了提高磁场强度)的下表面上添加 4 个小磁体,其在基体永磁体的圆周上均匀分布,小磁体与基体永磁体利用磁力可以连接在一起;隔板板用来定位小磁体的精确位置;连接件用来连接基体永磁体及轴。

## 2 抛光头实验及参数选取

### 2.1 抛光头单因素实验

加工间隙、转速、加工时间是磁流变抛光工艺中的重要参数<sup>[9]</sup>。

为了优化新型磁流变抛光头工艺的参数,即在尽可能提高工件表面质量的同时,尽可能地提高工件材料的去除率,达到兼顾效率与工件质量的效果,本文对所设计的新型抛光头进行单因素定点去除实验。

每组定点实验进行 2~3 次,取其输出工艺参数(表面粗糙度  $Ra$ 、去除率  $Z$ )的平均值作为衡量值。

具体的实验参数如表 1 所示。

| 表 1 单因素实验参数 |                       |                                               |                        |
|-------------|-----------------------|-----------------------------------------------|------------------------|
| 实验组别        | 加工间隙<br>$g/\text{mm}$ | 转速 $n/$<br>$(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 加工时间<br>$t/\text{min}$ |
| 1           | 0.5                   | 400                                           | 5                      |
| 2           | 0.8                   | <b>600</b>                                    | <b>10</b>              |
| 3           | <b>1.1</b>            | 800                                           | 15                     |
| 4           | 1.4                   | 1 000                                         | 20                     |
| 5           | 1.7                   | 1 200                                         | 25                     |

加粗字体—不变参数

单因素实验中,加工间隙对加工效果的影响结果如图 4 所示。

由图 4 可见:

加工间隙对工件抛光效果影响显著,材料的去除率以及工件的表面粗糙度对其及其敏感:

(1)随着加工间隙的减小,材料的去除率在不断

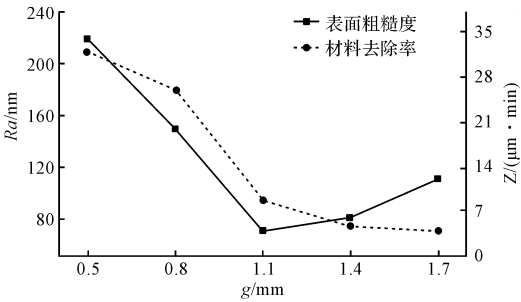


图 4 加工间隙对加工效果的影响

增大,且其影响程度也越来越高,这是由于随着加工间隙的减小,磁场强度越强,对于抛光垫中磨粒的束缚能力越强,形成的磁化压力也就越大,从而使材料去除率增加;

(2)工件的表面质量随着加工间隙的增加,其抛光效果越来越好,当其超过加工间隙 1.1 mm 时,工件的加工效果反而变坏,这是由于当加工间隙过大时,抛光头旋转时会带入周围的磁流变液进入抛光垫,使其某一部分压力增大,造成了去除率的不一致。

抛光头转速对加工效果的影响如图 5 所示。

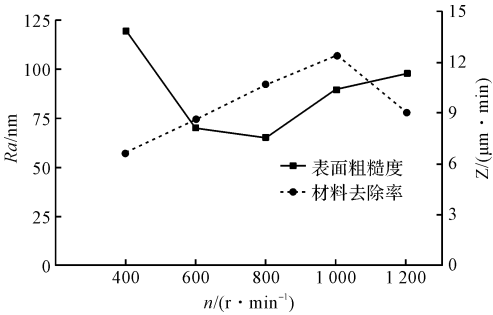


图 5 抛光头转速对加工效果的影响

由图 5 可见:

随着速度的增加,工件材料的去除率基本呈线性增加,基本符合 Preston 方程。剪切应力随着抛光头转速的增加而线性增大,而当抛光头超过临界转速 1 000 r/min 时,材料去除率开始下降。

一方面,过高的转速使得抛光垫中的离心力不断增大,在一定程度上降低了抛光垫对工件的压力;另一方面,在磁场的作用下,磁流变液是一种非牛顿流体,存在剪切稀化作用<sup>[10]</sup>,也在一定程度上降低了其抛光效率。

随着速度的提高,工件的表面质量越好,这是因为随着抛光头转速的提高,抛光垫中的磨粒与工件表面机械作用的次数越高,抛光效果越好。

加工时间对加工效果的影响如图 6 所示。

由图 6 可知:

(1)在加工初始阶段,工件表面粗糙度随时间迅速下降;

(2)随着工件表面凸峰逐渐被磨平,磨粒的切削作

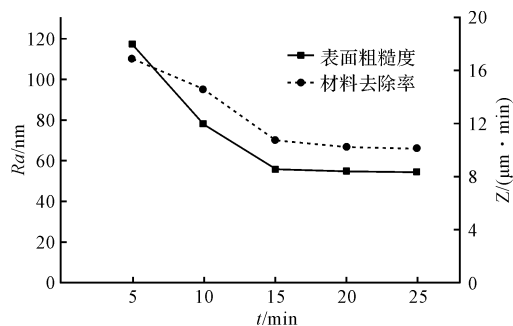


图6 加工时间对加工效果的影响

用大大下降,工件表面粗糙度下降的变化量开始变慢;

(3)到加工后期(即加工时间超过 20 min),延长加工时间对加工效果作用微乎其微,工件的表面粗糙度与材料去除率趋向于稳定值。

## 2.2 优化参数抛光实验

综上所述,通过单因素实验,可以获取圆柱型永磁体磁流变抛光头在单点抛光的情况下,加工 6061 铝合金工件时较为优化的工艺参数为:

加工间隙为 1.1 mm,转速为 800 r/min,加工时间为 20 min。

所获得的表面粗糙度和材料去除率分别为: 52 nm, 9.1  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

工件加工表面效果如图 7 所示。



图7 最佳参数加工表面效果

由图 7 可知:

采用最佳参数加工的工件,形成了一个表面光滑平坦环状区域,由此可以看出,该加工区域取得了较好的加工效果。

## 3 结束语

通过对圆柱型永磁体磁流变抛光头在加工过程中抛光垫的形貌分析,本文提出了其在加工过程中存在

着一种“环状效应”;利用“环状效应”,对圆柱型永磁体磁流变抛光头进行了结构设计,并通过单因素实验获得了该抛光头的最优参数。

实验结果表明:6061 铝合金工件表面的粗糙度达到 52 nm,材料去除率达 9.1  $\mu\text{m}/\text{min}$ 。该结果可以为面形精度在微米级的超光滑平面的制造提供一种高效的加工方法。

同时,在研究过程中,本文还发现一些问题需要进行改进,主要改进工作有以下几点:

(1)该抛光技术形成的加工区域为 1 个去除深度均匀的环状区域,需进一步研究和优化抛光工具在加工轨迹下的抛光技术;

(2)开发磁流变液循环搅拌装置。磁流变液在加工的过程中,水分会随着时间蒸发,若仅补充蒸馏水而不搅拌,易导致磁流变液浓度分布不均匀,影响磁流变液的稳定性;且搅拌装置可以防止磁流变液沉淀失效,因此,磁流变液循环搅拌装置很有开发的必要。

## 参考文献 (References):

- [1] 葛坤鹏,李圣怡,胡 皓. 铝合金反射镜磁流变抛光表面质量控制的参数优化[J]. 纳米技术与精密工程,2017,15(2):151-157.
- [2] 李 智. 组合磁流变抛光的关键技术研究[D]. 长沙:湖南大学车辆工程学院,2016.
- [3] 王永强. 大抛光模磁流变超光滑平面抛光技术研究[D]. 长沙:湖南大学机械工程学院,2016.
- [4] 肖晓兰,阎秋生,潘继生,等. 超精密磁流变复合抛光技术研究进展[J]. 广东工业大学学报,2016,33(6):28-33.
- [5] 潘继生,阎秋生,路家斌,等. 集群磁流变平面抛光加工技术[J]. 机械工程学报,2014,50(1):205-212.
- [6] 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(5):80-87.
- [7] 张 峰. 磁流变抛光技术的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2000.
- [8] RANJAN P, BALASUBRAMANIAM R, JAIN V K. Analysis of magnetorheological fluid behavior in chemo-mechanical magnetorheological finishing (CMMRF) process[J]. **Precision Engineering**, 2017(49):122-135.
- [9] 李叶鹏. 直线摆动方式磁流变平整加工工艺研究[D]. 长沙:湖南大学机械工程学院,2016.
- [10] 于 鹏. 钛酸锶电瓷基片动态磁场磁流变抛光研究[D]. 广州:广东工业大学机械工程学院,2017.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

高春甫,郑 强,杨青彤. 圆柱型永磁体磁流变抛光头设计及其参数优化[J]. 机电工程,2019,36(12):1286-1289.

GAO Chun-fu, ZHENG Qiang, YANG Qing-xing. Design of cylindrical permanent magnet magnetorheological polishing head and its parameter optimization[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(12):1286-1289.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>