

## 表面质量检测及控制

## 非磁性外圆表面磁性磨粒光整加工实验研究

赵文渊<sup>a,b</sup>, 李文辉<sup>a,b</sup>, 白小云<sup>a</sup>, 李秀红<sup>a,b</sup>, 杨胜强<sup>a,b</sup>

(太原理工大学 a.机械工程学院 b.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

**摘要:** **目的** 对比不同类型磁性磨粒的光整加工效果, 找出加工效果较优的磁性磨粒以提高非磁性外圆表面的光整加工质量。**方法** 以 6061 铝合金管为研究对象, 在相同条件下采用不同类型的磁性磨粒进行光整加工实验。采用粗糙度测量仪测试试件加工前后粗糙度值的变化。使用电子天平测试试件加工前后的质量变化, 得出不同类型磁性磨粒加工的材料去除率(MRR)。运用超景深显微镜观测试件加工前后的形貌变化, 进一步对比不同类型磁性磨粒光整加工的效果。**结果** 采用粘结法磁性磨粒光整加工时,  $R_a$  值从初始的  $0.326\ \mu\text{m}$  减小到  $0.286\ \mu\text{m}$ ,  $R_z$  值从初始的  $2.34\ \mu\text{m}$  减小到  $1.95\ \mu\text{m}$ , MRR 为  $0.26\ \mu\text{m}/\text{min}$ 。采用简单混合磁性磨粒光整加工时,  $R_a$  值从初始的  $0.346\ \mu\text{m}$  减小到  $0.303\ \mu\text{m}$ ,  $R_z$  值从初始的  $2.42\ \mu\text{m}$  减小到  $2.09\ \mu\text{m}$ , MRR 为  $0.195\ \mu\text{m}/\text{min}$ 。采用粘弹性磁性磨粒光整加工时, 6 min 后达到加工极限,  $R_a$  值从初始的  $0.332\ \mu\text{m}$  减小到  $0.146\ \mu\text{m}$ ,  $R_z$  值从初始的  $2.25\ \mu\text{m}$  减小到  $1.05\ \mu\text{m}$ , MRR 为  $0.651\ \mu\text{m}/\text{min}$ 。**结论** 与其他类型的磁性磨粒相比, 采用粘弹性磁性磨粒光整加工非磁性外圆表面时, 加工效果最优, 试件表面质量得到大幅度提高。

**关键词:** 磁性磨粒光整加工; 磁性磨粒; 非磁性; 粘弹性; 表面粗糙度; 外圆表面

**中图分类号:** TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0272-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.041

Experimental Study on Magnetic Abrasive Finishing  
of Non-magnetic Material Outer SurfaceZHAO Wen-yuan<sup>a,b</sup>, LI Wen-hui<sup>a,b</sup>, BAI Xiao-yun<sup>a</sup>, LI Xiu-hong<sup>a,b</sup>, YANG Sheng-qiang<sup>a,b</sup>

(a.School of Mechanical Engineering, b.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve finishing quality of non-magnetic outer surface by comparing the finishing effects of various magnetic abrasive particles and finding the magnetic abrasive particles exhibiting better processing effect. With 6061 aluminum alloy tube as object of study, finishing experiments were carried out with different types of magnetic abrasive particles under the same conditions. Changes in roughness value of samples before and after finishing were tested with a roughness measuring instrument. Changes in mass of samples before and after finishing were tested with an electronic balance, and material removal rate (MRR) of various magnetic abrasive particles was obtained. In order to further compare finishing performance of various magnetic abrasive particles, ultra DOF microscope was used to observe changes in morphology before and after finish-

收稿日期: 2017-12-02; 修订日期: 2018-01-15

Received: 2017-12-02; Revised: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(51175365); 山西省自然科学基金(2017D12076)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51175365) and Natural Science Foundation of Shanxi Province of China (2017D12076)

作者简介: 赵文渊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。

Biography: ZHAO Wen-yuan (1991—), Male, Master, Research focus: finishing technology of the precision surface.

通讯作者: 李文辉(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。

Corresponding author: LI Wen-hui (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: finishing technology of the precision surface.

ing. After experiment testing,  $R_a$  value decreased from initial  $0.326\ \mu\text{m}$  to  $0.286\ \mu\text{m}$ ,  $R_z$  value decreased from initial  $2.34\ \mu\text{m}$  to  $1.95\ \mu\text{m}$ , and MRR was  $0.26\ \mu\text{m}/\text{min}$  when the bonding magnetic abrasive particles were used. The  $R_a$  value decreased from initial  $0.346\ \mu\text{m}$  to  $0.303\ \mu\text{m}$ ,  $R_z$  value decreased from initial  $2.42\ \mu\text{m}$  to  $2.09\ \mu\text{m}$ , and MRR was  $0.195\ \mu\text{m}/\text{min}$  when simply mixed magnetic abrasive powders were used. Processing limit was reached,  $R_a$  value decreased from initial  $0.332\ \mu\text{m}$  to  $0.146\ \mu\text{m}$ ,  $R_z$  value decreased from the initial  $2.25\ \mu\text{m}$  to  $1.05\ \mu\text{m}$ , and MRR was  $0.651\ \mu\text{m}/\text{min}$  when viscoelastic magnetic abrasive particles were used in 6 minutes. Compared with other kinds of magnetic abrasive particles, viscoelastic magnetic abrasive particles have better finishing effect, and surface quality of sample is greatly improved.

**KEY WORDS:** magnetic abrasive particle finishing; magnetic abrasive particle; non-magnetic; viscoelasticity; surface roughness; outer surface

磁性磨粒光整加工技术 (Magnetic Abrasive Finishing, MAF) 是一种非传统的精密表面光整加工方法<sup>[1-3]</sup>。该技术是利用磁性磨粒 (Magnetic Abrasive Powders, MAPs) 在磁场作用下产生的作用力, 以及工件和磁极间的相对运动, 实现对工件表面光整加工的一种新技术。与传统的采用刚性工具加工的光整方法 (例如研磨和珩磨) 不同, MAF 利用柔性工具“磁刷”进行加工, 提高表面质量<sup>[4]</sup>。

磁性磨粒光整加工技术广泛应用于各种类型表面的光整加工中<sup>[5-6]</sup>, 例如外圆表面、内孔表面、曲面等, 其中外圆表面的光整加工是一种重要的应用<sup>[7]</sup>。在外圆表面的光整加工中, 磁性磨粒填充在磁体和工件表面的间隙中, 在磁场的作用下形成具有多个切削刃的“磁刷”, 并作用于工件表面。当“磁刷”与工件表面相对运动时, “磁刷”对工件产生微量磨削、挤压等作用, 从而去除外圆表面的峰、谷并使其平滑。光整加工中, 磁场作用于磁性磨粒使其压向工件表面产生法向作用力, 并使其保持在加工区域中。同时工件表面与磁性磨粒相互摩擦产生切向作用力, 在法向力和切向力的共同作用下, 完成光整加工<sup>[8]</sup>。

由上述可知, 磁场力是外圆表面光整加工的关键, 而工件材料的磁性特性影响着磁力线的分布<sup>[9]</sup>, 导致加工作用力发生变化, 进而影响着加工的质量。因此, 工件材料的导磁性能不同, 加工特性也不同<sup>[10]</sup>。与磁性材料相比, 非磁性材料外圆表面在磁性磨粒光

整加工时, 由于工件无法磁化、磁导率较小, 给光整加工造成困难, 严重影响加工效果, 制约 MAF 的推广。基于此, 本文针对非磁性材料的外圆表面, 以 6061 铝合金管为试件, 在相同条件下, 采用不同类型的磁性磨粒进行光整加工实验研究与分析。

## 1 实验条件与方法

### 1.1 实验材料

磁介质相为 200#铁粉, 磨粒相为 600#白刚玉粉末。树脂包括环氧树脂 E-44、聚酰胺树脂 650。白刚玉研磨膏为 W20 (600#)。所用粘弹性基体由聚乙烯醇、硼酸、对羟基苯甲酸丙酯、瓜尔胶和甘油配制而成。表面改性剂包括硅烷偶联剂 KH-550、液压油、油酸、硅油和增塑剂。

### 1.2 磁性磨粒的制备

为进行对比, 本文采用不同工艺制备了 3 种磁性磨粒。在磁性磨粒的制备中保证 200#铁粉和 600#白刚玉粉末的质量比为 2:1, 根据研磨膏中白刚玉所占比例<sup>[11]</sup>得出铁粉与研磨膏的质量比为 72.8:100。

粘结法磁性磨粒制备: 按照铁粉和白刚玉的质量比为 2:1、环氧树脂 E-44 和聚酰胺树脂 650 的质量比为 1:1、树脂与铁粉+白刚玉总质量的质量比为 2:15, 采用粘结法制备工艺<sup>[7]</sup>制备磁性磨粒, 宏观形貌如图 1a。

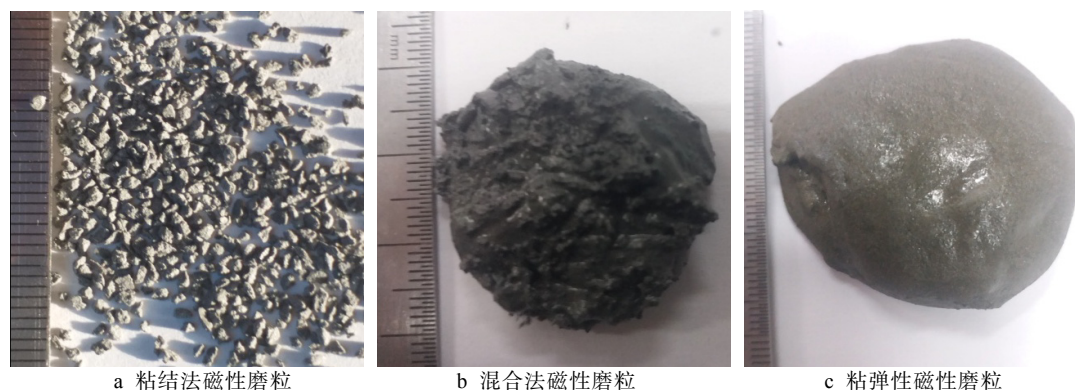


图 1 磁性磨粒照片

Fig.1 Photos of (a) bonding MAPs, (b) mixed MAPs, (c) viscoelastic MAPs

简单混合磁性磨粒制备：按照白刚玉研磨膏 W20（600<sup>#</sup>）和铁粉的质量比为 72.8:100，采用混合法制备工艺<sup>[12]</sup>制备磁性磨粒，宏观形貌如图 1b。

粘弹性磁性磨粒制备：按照文献[13]所述的比例配制粘弹性基体，即聚乙烯醇、硼酸、对羟基苯甲酸丙酯、瓜尔胶和甘油的质量比为 40:5:10:10:10。随后在配制的基体中添加表面改性剂，包括硅烷偶联剂 KH-550、液压油、油酸、硅油和增塑剂（按照文献[13]所述，用量分别为粘弹性基体质量的 1%、10%、4%、6%、3%），最后将基体与铁粉、白刚玉混合，实现化学法<sup>[13]</sup>粘弹性磁性磨粒的制备。宏观形貌如图 1c。

### 1.3 加工实验与测试

实验采用自主研制的磁性磨粒光整加工装置，如图 2 所示，实验参数和条件见表 1。采用 MIV-IN 型三维电控超景深显微镜测试试件表面的微观形貌。使用 M2 型粗糙度测量仪测试试件加工前后的表面粗糙度值。采

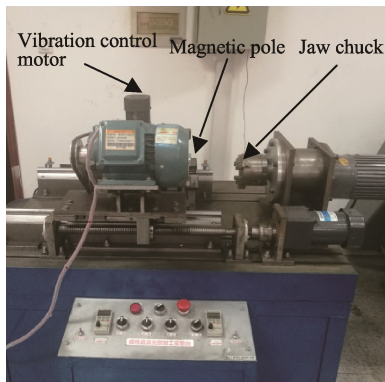


图 2 磁性磨粒光整加工装置图  
Fig.2 Photo of magnetic abrasive finishing device

表 1 实验条件  
Tab.1 Experimental conditions

Conditions	Parameter
Magnetic pole number	2
Magnetic pole arrangement	90°
Workpiece	6061 steel, $\phi 33 \text{ mm} \times \phi 30 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ (outer diameter $\times$ inner diameter $\times$ length)
Spindle speed	500 r/min
Machining gap	3 mm
MAPs	40 <sup>#</sup>
Filling amount of MAPs	25 g
Grinding fluid	Paraffin liquid 6 mL
Magnetic induction density	0.4 T
Amplitude of magnetic pole	5 mm
Frequency of magnetic pole	0.3 Hz

用 MP200A 电子天平测试试件加工前后的质量。

通过光整加工去除试件的质量计算材料去除率

MRR,  $MRR = \frac{\Delta m}{\rho} \cdot 2\pi r \cdot L \cdot t$ , 式中  $\Delta m$  为试件加工前后的质量变化值 (mg),  $\rho$  为试件密度 ( $\text{mg}/\text{mm}^3$ ),  $r$  为试件外径 (mm),  $L$  为试件光整加工长度 (mm),  $t$  为加工时间 (min)。

### 1.4 粘弹性磨粒制备前置试验结果分析

为获得最佳粘弹性基体与铁粉+白刚玉总质量的质量比值，分别以不同配比（2:1、1:1、1:2）进行试验，图 3 为不同配比的粘弹性磁性磨粒对粗糙度值  $Ra$ 、 $Rz$  和材料去除率 MRR 的影响曲线。

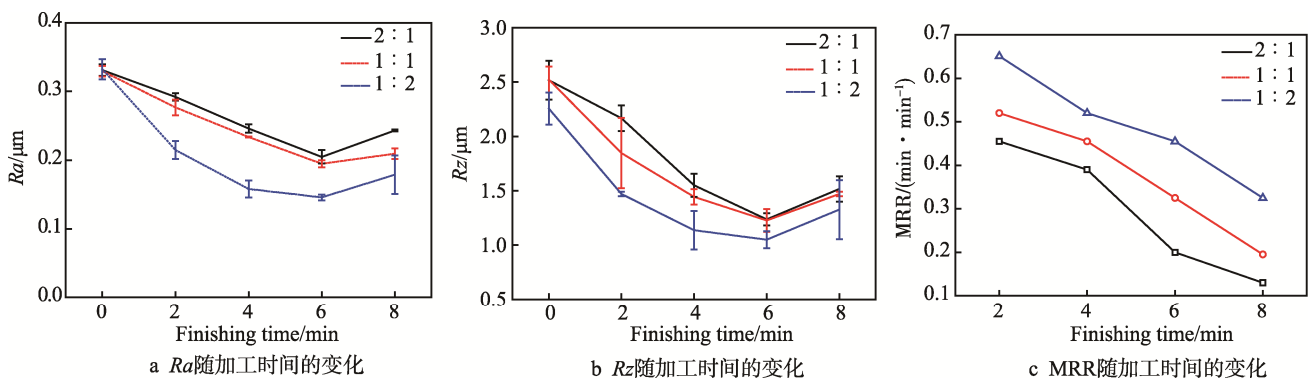


图 3 不同配比粘弹性磁性磨粒光整加工对表面粗糙度值  $Ra$ 、 $Rz$  和 MRR 的影响曲线  
Fig.3 Influence curves of different ratio viscoelastic MAPs on surface roughness  $Ra$  (a),  $Rz$  (b) and MRR (c)

当配比为 2:1 时，MRR 最大为  $0.455 \mu\text{m}/\text{min}$ ，光整加工 6 min 后，粗糙度  $Ra$  值减小到  $0.204 \mu\text{m}$ ，粗糙度  $Rz$  值下降到  $1.24 \mu\text{m}$ 。当配比为 1:1 时，MRR 最大为  $0.52 \mu\text{m}/\text{min}$ ，光整加工 6 min 后，粗糙度  $Ra$  值减小到  $0.194 \mu\text{m}$ ，粗糙度  $Rz$  值下降到  $1.23 \mu\text{m}$ 。当

配比为 1:2 时，光整加工效果较好，MRR 最大为  $0.651 \mu\text{m}/\text{min}$ ，光整加工 6 min 后，粗糙度  $Ra$  值减小到  $0.146 \mu\text{m}$ ，粗糙度  $Rz$  值下降到  $1.05 \mu\text{m}$ 。因此，粘弹性基体与铁粉+白刚玉总质量的最佳质量比为 1:2。

从以上分析可以得知，随着粘弹性磁性磨粒中铁

粉含量的减少, 光整加工效果变差。这是由于当铁粉含量较少时, 粘弹性磁性磨粒所受的磁力较小, 把持力不足, 导致部分磨粒会随工件运动, 因此光整加工效果较差。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同磁性磨粒对表面粗糙度的影响

图 4 为采用不同磁性磨粒光整加工时试件表面粗糙度值的对比曲线。采用粘结法磁性磨粒时,  $R_a$  值从初始的  $0.326 \mu\text{m}$  最低可减小到  $0.286 \mu\text{m}$ ,  $R_z$  值从初始的  $2.34 \mu\text{m}$  最低可减小到  $1.95 \mu\text{m}$ 。采用简单混合磁性磨粒时,  $R_a$  值从初始的  $0.346 \mu\text{m}$  最低可减小到  $0.303 \mu\text{m}$ ,  $R_z$  值从初始的  $2.42 \mu\text{m}$  最低可减小到  $2.09 \mu\text{m}$ 。采用粘弹性磁性磨粒时, 随着加工时间的继续,  $R_a$ 、 $R_z$  值逐渐减小, 6 min 后达到加工极限,  $R_a$  值从初始的  $0.332 \mu\text{m}$  减小到  $0.146 \mu\text{m}$ ,  $R_z$  值从初始的  $2.25 \mu\text{m}$  减小到  $1.05 \mu\text{m}$ 。

由以上分析可以看出, 采用粘结法和简单混合法制备的磁性磨粒加工效果不明显, 而粘弹性磁性磨粒的加工效果明显, 这是由加工中磁力线的分布以及磁性磨粒自身的特点造成的。

使用粘结法和简单混合法制备的磁性磨粒光整加工时, 由于磁性磨粒为铁磁性物质, 磁导率比铝合金、空气的大, 当其填充在加工间隙中时, 由于存在磁短路现象, 致使磁力线分布方向扭曲, 发生变化<sup>[14-15]</sup>, 如图 5a 和 5b 所示。磁力线分布的变化导致磁性磨粒在加工过程中的分布也发生变化, 如图 5c 所示。此时, 磁性磨粒沿磁力线呈弧状分布, 磁性磨粒中力链的方向不是垂直作用于试件表面, 尽管存在一定的作用力, 但较小, 不足以去除足够的金属, 因此采用这两种磁性磨粒光整加工时效果差。

虽然粘弹性磁性磨粒也会使磁力线的分布发生

变化, 但其基体为粘弹性材料, 具有瞬时弹性和滞弹性回复能力。在磁场力的作用下, 粘弹性磁性磨粒受到磁极头和试件的挤压后发生变形, 并充满加工间隙。此时, 在弹性恢复力作用下, 粘弹性磁性磨粒基体中的白刚玉挤压试件表面。当试件与粘弹性磁性磨粒发生相对运动时, 白刚玉划擦试件表面, 实现光整加工。与此同时, 沿磁力线方向的分力阻止磁性磨粒飞离加工间隙, 使其保持在加工间隙中, 因此采用粘弹性磁性磨粒光整加工时, 加工效果好。

研究表明<sup>[16]</sup>, 光整加工中, 磁性磨粒的填充量会

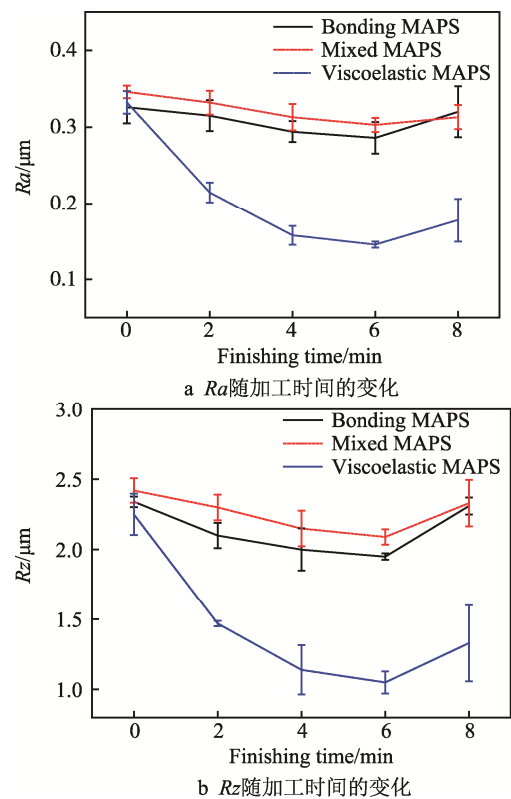


图 4 不同磁性磨粒光整加工对表面粗糙度值的影响曲线  
Fig.4 Influence curves of different MAPs finishing on surface roughness: a)  $R_a$ , b)  $R_z$

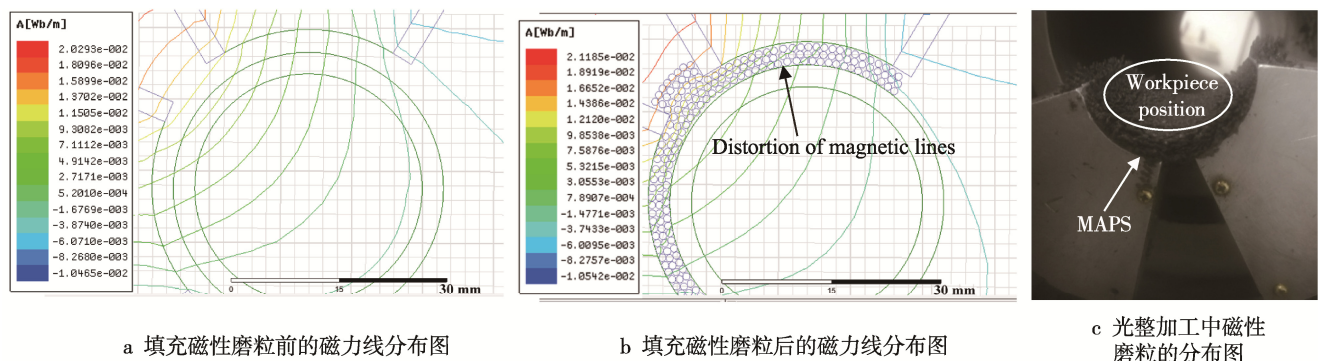


图 5 磁力线和磁性磨粒分布图

Fig.5 Magnetic force lines and MAPs distribution diagrams: a) distribution diagram of magnetic force lines before filling with MAPs, b) distribution diagram of magnetic force lines after filling with MAPs, c) distribution diagram of MAPs in the finishing process



对加工效果产生影响。采用粘结法磁性磨粒加工时,受自身粒径和堆积间隙的影响,部分磁性磨粒会分布在加工间隙外,如图 6a 所示。而粘弹性磁性磨粒中,铁粉和白刚玉的粒径较小,同时基体具有粘塑性,可以携裹其中的白刚玉运动,因此在磁场力和基体粘着力的共同作用下,白刚玉大量集聚在加工间隙中。参与光整加工的白刚玉数目增多,加工能力增大,如图 6b 所示。

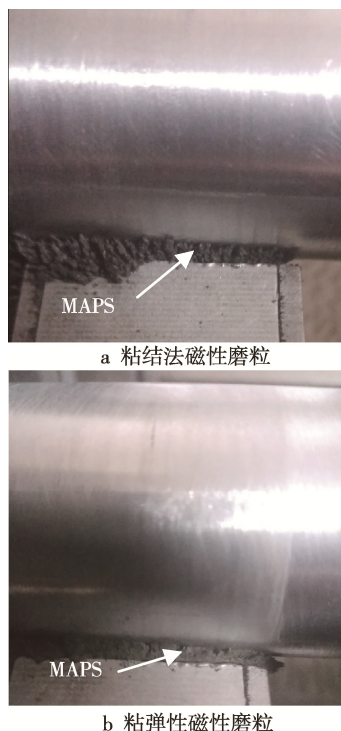


图 6 磁性磨粒光整加工照片

Fig.6 Photo of Magnetic abrasive finishing: a) bonding MAPs, b) viscoelastic MAPs

## 2.2 不同磁性磨粒对材料去除率的影响

由图 7 可知,材料去除率随着加工时间的延长而逐渐减小。在光整加工开始阶段,试件表面粗糙,凸峰和毛刺较多,质量较差,因此材料去除量较大, MRR 较大。但是随着光整加工的继续,试件表面逐渐平坦、光

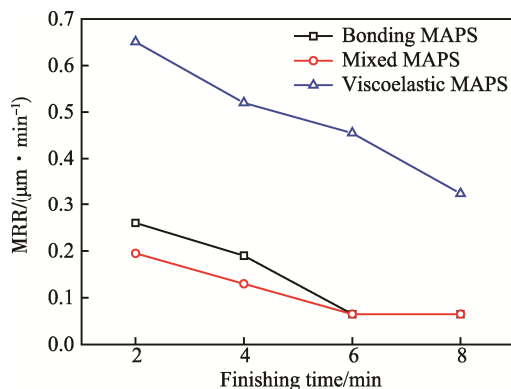


图 7 不同磁性磨粒的 MRR 曲线

Fig.7 MRR curves of different MAPs

滑,材料去除量越来越小,因此 MRR 逐渐减小。

采用粘结法、简单混合和粘弹性磁性磨粒光整加工的材料去除率 (MRR) 最大值分别为 0.26、0.195、0.651 μm³/min。可见,与其他两种磁性磨粒相比,粘弹性磁性磨粒加工的材料去除率最大。

根据 Preston 经验公式<sup>[17]</sup>:  $R(x,y)=KV(x,y)P(x,y)$  可知,磁性磨粒与试件之间的压力越大,材料去除量越大,公式中  $R(x,y)$  为材料去除量 (mg),  $K$  为磁性磨粒与加工有关的比例常数,  $V(x,y)$  为磁性磨粒与试件之间的相对速度 (r/min),  $P(x,y)$  为磁性磨粒与试件间的压力 (N)。与其他两种磁性磨粒光整加工相比,粘弹性磁性磨粒作用于试件表面的正压力较大,从而导致材料的去除量较大,因此其 MRR 较大。

## 2.3 不同磁性磨粒对表面形貌的影响

图 8 为磁性磨粒光整加工前后的表面形貌图。从图中可以看出,采用粘结法磁性磨粒和简单混合磁性磨粒光整加工前后的表面形貌(见图 8b 和图 8c)变化很小。这是因为试件在机加工后,表面存在肉眼几乎观察不到的微小毛刺,光整加工后,这些微小毛刺被去除,表面形貌有所改善。但由于光整作用力较小,导致材料去除量不足,无法使试件表面的凸峰去除,因此机加工纹理依然存在,表面质量不能进一步提高。

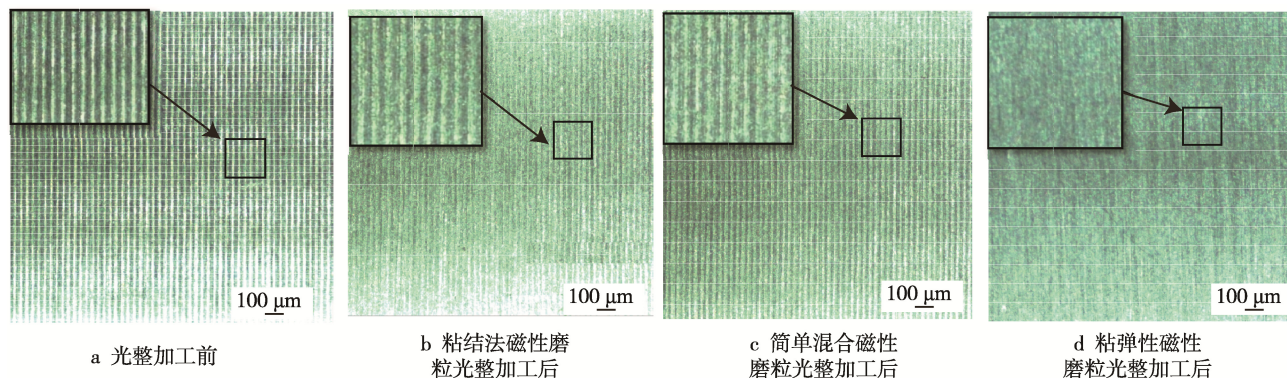


图 8 磁性磨粒光整加工前后表面形貌图

Fig.8 Surface morphologies before and after finishing: a) before finishing, b) after finishing with bonding MAPs, c) after finishing with mixed MAPs, d) after finishing with viscoelastic MAPs

与其他两种磁性磨粒加工后的表面形貌相比, 粘弹性磁性磨粒光整加工后的试件表面更加平坦, 纹路较细, 表面质量明显提高, 如图 8d。这是由于粘弹性磁性磨粒具有粘着性, 能够在加工间隙集聚大量的白刚玉, 有利于光整加工。同时, 采用粘弹性磁性磨粒光整加工时, 加工挤压作用力强, MRR 较大, 在加工过程中, 随着加工时间的延长能有效去除试件表面的金属层, 从而弱化表面的微观凸起, 使得微观表面得到整平, 加工效果好。而其他两种磁性磨粒光整加工时, MRR 较小, 因此金属去除能力较弱, 光整加工后的试件表面质量相对较差。

### 3 结论

1) 当磁极头布置为  $90^\circ$ , 采用粘结法和简单混合法制备的磁性磨粒光整加工非磁性材料外圆表面时, 磁性磨粒会引起磁力线发生变化, 导致加工作用力不足, 加工效果较差。

2) 当磁极头布置为  $90^\circ$  时, 粘弹性磁性磨粒更加适应于非磁性外圆表面的磁性磨粒光整加工。加工后的表面质量得到很大改善, 粗糙度值  $Ra$  从初始的  $0.332\ \mu\text{m}$  减小到  $0.146\ \mu\text{m}$ , 材料去除率 MRR 为  $0.651\ \mu\text{m}/\text{min}$ 。

#### 参考文献:

- [1] CHOU S H, WANG A C, LIN Y C. Elucidating the Rheological Effect of Gel Abrasives in Magnetic Abrasive Finishing[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 866-871.
- [2] YIN S, SHINMURA T. Vertical Vibration-assisted Magnetic Abrasive Finishing and Deburring for Magnesium Alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(12-13): 1297-1303.
- [3] VERMA G C, KALA P, PANDEY P M. Experimental Investigations into Internal Magnetic Abrasive Finishing of Pipes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88(5-8): 1-12.
- [4] GIVI M, TEHRANI A F, MOHAMMADI A. Polishing of the Aluminum Sheets with Magnetic Abrasive Finishing Method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(9-12): 989-998.
- [5] PASHMFOROUSH F, RAHIMI A. Nano-finishing of BK7 Optical Glass Using Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. Applied Optics, 2015, 54(9): 2199-2207.
- [6] CHOOPANI Y, RAZFAR M R, SARAIEAN P, et al. Experimental Investigation of External Surface Finishing of AISI 440C Stainless Steel Cylinders Using the Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 83(9-12): 1811-1821.
- [7] 杨胜强, 李文辉, 陈红玲, 等. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 166-213.
- [8] AMNIEH S K, MOSADDEGH P, TEHRANI A F. Study on Magnetic Abrasive Finishing of Spiral Grooves inside of Aluminum Cylinders[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5-8): 224-230.
- [9] 陈燕, 张广彬, 韩冰, 等. 磁力研磨法对陶瓷管内表面超精密抛光技术的试验研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 32(2): 131-137.
- [10] 刘润爱. 非磁性材料磁性研磨加工的研究[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(4): 372-375.
- [11] 许鹏飞. 研磨工艺及研磨膏的配制[J]. 精密制造与自动化, 1996(1): 45-50.
- [12] CHEN Y, SONG Q H, WANG X, et al. Study on the Characteristics of Simply Mixed the Magnetic Abrasives Particles[J]. Advanced Materials Research, 2007, 24-25: 133-138.
- [13] 杨小鹏, 李秀红, 李文辉, 等. 一种新型粘弹性磁性磨具的制备及其加工实验研究[J]. 机械设计与制造, 2017(6): 97-100.
- [14] 严济慈. 电磁学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013: 193-225.
- [15] 钟锡华. 电磁学通论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 245-278.
- [16] JIAO A Y, QUAN H J, LI Z Z, et al. Study of Magnetic Abrasive Finishing in Seal Ring Groove Surface Operations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5-8): 1195-1205.
- [17] PAN J, YAN Q. Material Removal Mechanism of Cluster Magnetorheological Effect in Plane Polishing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9-12): 2017-2026.