

# 磁性磨粒辅助磁针磁力研磨的应用研究

周传强<sup>1</sup>, 韩冰<sup>1</sup>, 肖春芳<sup>2</sup>, 陈燕<sup>1</sup>, 刘新龙<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 长沙航空职业技术学院, 长沙 410124)

**摘要:** **目的** 解决磁针磁力研磨工艺中磁针对工件表面碰撞损伤及存在研磨盲区的问题。**方法** 在磁针中加入磁性磨粒增加磁针束的柔性, 同时磁针为磁性磨粒提供研磨压力和切削力。将三相正弦交流电接入定子线圈, 利用交流电的相位差产生旋转磁场, 驱动混合磨料对微小复杂工件进行研磨。在混合磨料总质量不变的条件下, 依次采用磁针、磁性磨粒和不同质量混合比的混合磨料进行对比试验。**结果** 相较于单一磨料, 使用混合磨料加工 40 min 后的工件表面形貌较好, 表面粗糙度值下降幅度大, 且有较大的材料去除量。当磁针与磁性磨粒的质量混合比为 1:2 时, 加工后的工件表面形貌最佳, 无明显加工纹理和磁针碰撞痕迹, 工件表面粗糙度值由原始的 1.0  $\mu\text{m}$  下降到 0.54  $\mu\text{m}$  左右, 材料去除量为 2.8 mg 左右, 微小沟槽内无研磨盲区。**结论** 在电磁研磨工艺中, 使用磁针和磁性磨粒质量比为 1:2 的混合磨料可提高研磨效果, 避免磁针的碰撞对工件表面造成损伤, 磁针可将磁性磨粒挤入工件微小沟槽, 无研磨盲区。

**关键词:** 电磁研磨; 混合磨料; 微小复杂工件; 表面质量; 微小沟槽

**中图分类号:** TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0275-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.037

## Application of Magnetic Abrasive Particle Aided Magnetic Needles Grinding

ZHOU Chuan-qiang<sup>1</sup>, HAN Bing<sup>1</sup>, XIAO Chun-fang<sup>2</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, LIU Xin-long<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha 410124, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the problems of collision damage and blind sector in magnetic needle magnetic grinding process. Magnetic abrasive particles were added to increase the flexibility of the magnetic needles. At the same time, the magnetic needle provided grinding pressure and cutting force for the magnetic abrasive particles. The three-phase sinusoidal alternating current was connected to the stator coil, and the phase difference of the alternating current was used to generate a rotating magnetic field to drive the mixed abrasive to grind the tiny and complicated workpieces. Under the condition that the total mass of the mixed abrasive was unchanged, the magnetic needles, the magnetic abrasive particles and the mixed abrasive with differ-

收稿日期: 2018-07-14; 修订日期: 2018-09-17

**Received:** 2018-07-14; **Revised:** 2018-09-17

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51105187); 湖南省自然科学基金项目 (2017JJ5056); 辽宁省教育厅重点项目 (2017LNZD02); 辽宁科技大学研究生教育改革与科技创新创业项目 (LKDYC201709)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51105187), Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (2017JJ5056), Liaoning Provincial Department of Education Key Projects (2017LNZD02), Postgraduate Education Reform and Science and Technology Innovation and Entrepreneurship Project of University of Science and Technology Liaoning (LKDYC201709)

**作者简介:** 周传强 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

**Biography:** ZHOU Chuan-qiang (1991—), Male, Master, Research focus: precision machining.

**通讯作者:** 韩冰 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工。邮箱: hanb75@126.com

**Corresponding author:** HAN Bing (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision machining. E-mail: hanb75@126.com

ent mass mixing ratios were sequentially used to carry out comparative experiments. Compared with single abrasive, the workpiece surface morphology after 40 min of processing with mixed abrasive was better. The surface roughness value decreased greatly, and there was a larger amount of material removed. When the mass mixing ratio of the magnetic needle and the magnetic abrasive particles was 1 : 2, the surface morphology of the processed workpiece was the best, and there was no obvious processing texture or magnetic needle collision trace. The surface roughness of the workpiece decreased from the original  $Ra$  1.0  $\mu\text{m}$  to  $Ra$  0.54  $\mu\text{m}$ . The material removal amount was about 2.8 mg. There was no grinding dead angle in the micro groove. In the electromagnetic grinding process, the use of a mixed abrasive of magnetic needles and magnetic abrasive particles with a mass mixing ratio of 1 : 2 can improve the grinding effect and prevent the surface of the workpiece from being damaged by the collision of the magnetic needles. The magnetic needle can squeeze magnetic abrasive particles into narrow grooves of the workpiece without grinding blind areas.

**KEY WORDS:** electromagnetic grinding; mixed abrasive; small and complicated workpiece; surface quality; micro groove

在机械零件从毛坯到成品的加工过程中,被加工零件表面通常存在不同程度的表面缺陷,如表面不平、断边、毛刺、划痕、微裂纹等<sup>[1]</sup>。特别是随着产品小型化的发展趋势和精密工程技术的飞速发展,对零件的微孔、微沟槽和复杂三维微结构的加工质量,提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。传统的光整加工工艺很难实现对微小复杂工件的表面处理,对于微小复杂工件的表面光整处理大多采用非传统加工工艺<sup>[3]</sup>。孙岩等<sup>[4]</sup>采用圆盘环形磁极实现了对沟槽表面的加工。宋庆环<sup>[5]</sup>通过在 CN 铣床主轴上加线圈产生磁场的方法,吸附磁性磨料对复杂曲面进行研磨。李阔等人<sup>[6]</sup>利用交变旋转磁场驱动磁针,可去除叶片气膜孔毛刺。Amniah S K 等人<sup>[7]</sup>运用一种新型磁力研磨内螺旋加工装置对圆柱形管的沟槽进行研磨,在保证外形尺寸的条件下,使工件表面粗糙度下降至 0.3  $\mu\text{m}$ 。Kajal S 等人<sup>[8]</sup>在 CNC 机床上装夹柱状磁铁,吸附磨料对左轮手枪枪管进行研磨,达到了很好的加工效果,使枪管内表面的光洁度提高了 80% 左右。以上研究人员均采用传统磁性磨料对工件进行加工。传统磁性磨粒在加工微小复杂工件时存在装夹困难、研磨不均和效率低等问题。传统磁针磁力研磨工艺虽然可以很好地去除毛刺等表面缺陷,但是难以避免对工件表面的碰撞损伤,且对于微小沟槽存在研磨盲区。

为解决以上问题,本文采用三相交流电产生旋转磁场,驱动磁针-磁性磨粒混合磨料对微小复杂工件进行研磨加工。磁性磨粒的加入增加了磁针束的柔性,起到碰撞缓冲的作用,很好地避免了磁针对工件的碰撞损伤。而磁针为磁性磨粒提供刚性“基体”,为磁性研磨粒子提供了研磨压力和切削力。此外,采用单因素试验,以工件表面粗糙度和去除量为试验指标,探究了两种磁性磨料不同质量比对试验结果的影响,以找到最佳的质量比。

## 1 电磁研磨机理分析

### 1.1 旋转磁场产生原理

旋转电磁的产生和三相异步电机定子磁场的产

生类似,如图 1 所示,相关电流表达式见式(1)。三相正弦交流电(相位差为  $120^\circ$ )依次通过定子线圈时,利用相位差即可得到所需要的旋转磁场<sup>[9]</sup>。如图 2 所示,当 3 个定子绕组接入三相交流电源后,绕组中便通入正弦交流电,假定电流的瞬时值为正时,其从各绕组的首端流入,末端流出,电流流入端用“×”表示,电流流出端用“•”表示。图中 A-Z、B-Y 和 C-Z 为三相绕组,分别接  $i_A$ 、 $i_B$  和  $i_C$ 。 $t_1$ 时刻, A-Z 绕组电流  $i_A$  为 0, B-Y 和 C-Z 绕组电流  $i_B$  和  $i_C$  分别从 Y、C 端流入,从 B、Z 端流出。根据右手螺旋定则,可判断其磁场方向为图 1 ( $t_1$ ) 所示。类似地,可以得出  $t_2$  和  $t_3$  时刻的磁场方向。自  $t_1$  时刻起至  $t_4$  时刻,电流变化了一个周期,磁场在空间也旋转了一周。电流持续交替,磁场不断旋转,从而产生旋转磁场。

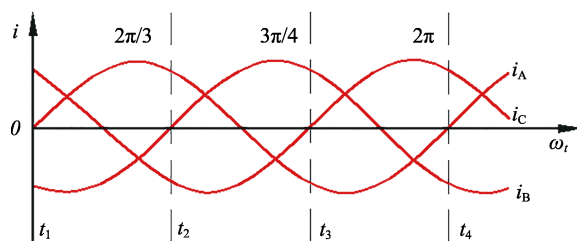


图 1 三相正弦交流电波形图  
Fig.1 Oscillogram of three-phase sinusoidal

$$\begin{aligned} i_A &= i_m \sin \omega t \\ i_B &= i_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= i_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

在交流电产生的电磁场中,磁力线分布、磁场强度和磁感应强度是影响电磁研磨加工效果的关键因素。当线圈缠绕方式不同时,加工区域的磁力线分布、磁场强度和磁感应强度有所差异。在确定线圈缠绕方式时,用 ANSYS Maxwell 16.0 对不同缠绕方式的线圈进行电磁模拟。图 3 为线圈绕组极对数  $P$  分别为 1 和 2 时磁力线的分布状况,其中红色线圈接  $i_A$  相电,蓝色和绿色分别接  $i_B$  和  $i_C$  相电。

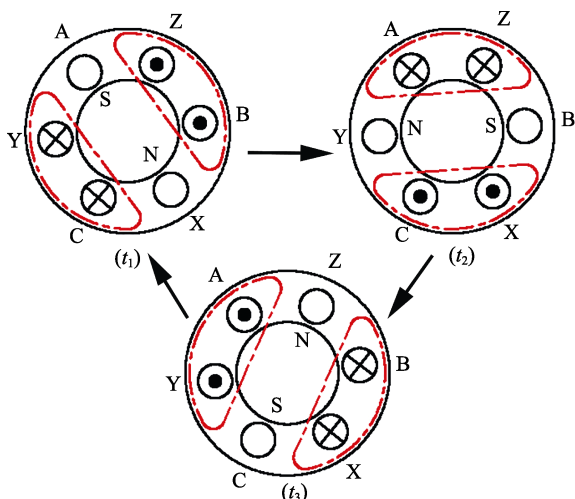


图 2 旋转磁场产生原理

Fig.2 Principle diagram of rotating magnetic field generation

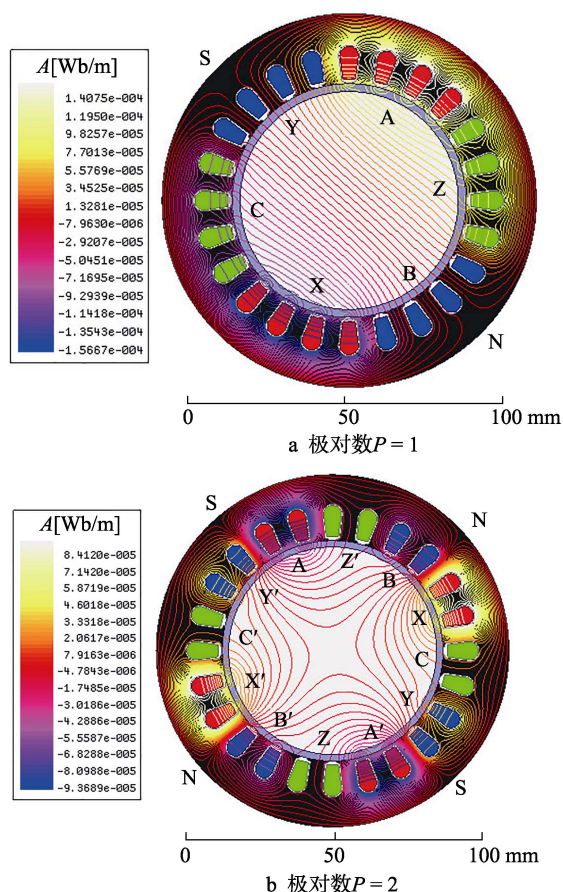


图 3 线圈不同缠绕方式下磁力线分布

Fig.3 Distribution of magnetic field lines under different winding modes of coils: a) polar number  $P=1$ ; b) polar number  $P=2$ 

如图 3 所示,在其他条件不变的情况下,当定子绕组极对数  $P$  增加时,穿过加工区域的磁力线数量减少,且有磁力线空白区域;磁感应强度变小,相应的磁场强度也会下降。此外,极对数增加时,磁场旋转速度也会下降,磁场旋转速度由公式  $n=60f/P$  计算,其中  $f$  为频率 (Hz),  $P$  为极对数,极对数  $P$  和磁场

旋转速度成反比。因此定子线圈绕组采用极对数为 1 的缠绕方式。

## 1.2 混合磨料研磨机理

如图 4 所示,试验所用混合磨料分为两种,一种为细小圆柱状磁针,材质为经磁化处理的 304 不锈钢,直径为 0.5 mm,长度为 5 mm。在旋转磁场的驱动下,细小磁针在容器桶内激烈翻滚、旋转、跳跃,其作用机理主要为塑性变形。当细小磁针以一定速度一次或多次对工件表面进行划擦、刻划、碰撞、滚压时,表层金属会发生塑性变形,当塑变程度超过材料允许的塑性变形极限时,微小切屑会脱落,以实现微量磨削加工<sup>[10]</sup>。因为磁针对工件进行划擦、刻划和碰撞,极易对工件表面造成损伤。另一种磁性磨料为磁性磨粒,由氧化铝粒子和铁粉烧结而成,烧结温度为 1200 °C。铁粉为铁磁相,氧化铝粒子为研磨相,铁粉和氧化铝质量比为 2 : 1,平均粒径为 150~200  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒微刃均布于 Fe 粒子表面,使其兼具导磁性和磨削性<sup>[11]</sup>。

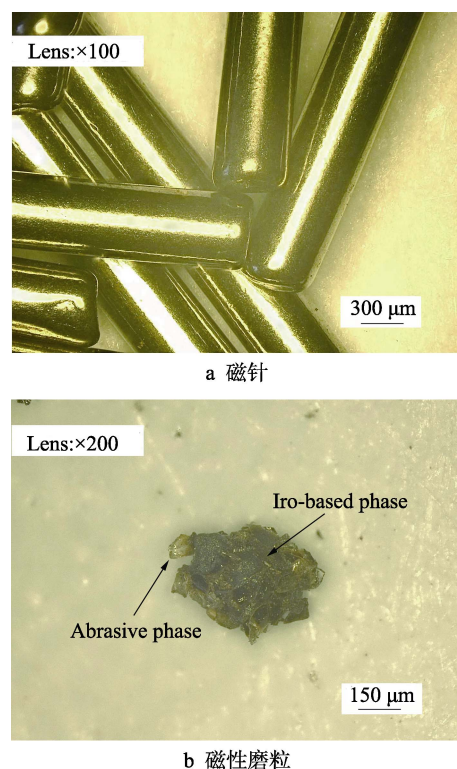


图 4 磁性磨料

Fig.4 Magnetic abrasive: a) magnetic needles; b) magnetic abrasive particle

磁针具有一定的刚性,在去除工件表面的加工纹理和飞边毛刺时,也会对表面造成碰撞损伤。此外,刚性磁针在研磨狭小区域时,存在研磨盲区。磁性磨粒具有良好的柔性和自适应性,但是需要给其一定的研磨压力,才能实现对工件的研磨<sup>[12-13]</sup>。如图 5 所示,将混合磨料置于磁场中,由于磁场的尖端效应,磁性



磨粒会聚集在细小磁针端部。吸附在细小磁针两端的磁性粒子将磁针“切削刃”包裹起来,取而代之的是磁性磨粒的研磨相——氧化铝颗粒微刃。同时,磁针为磁性磨粒提供了一个刚性“基体”,当磁针划擦工件表面时,为吸附在表面的磁性磨粒提供了研磨压力和切削力。

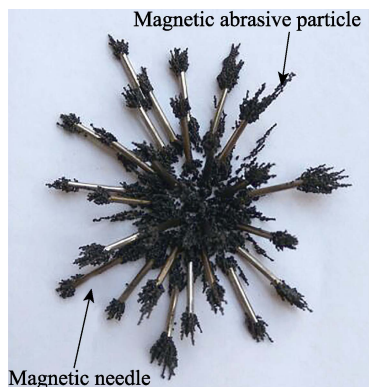


图5 混合磨料在磁场中的分布  
Fig.5 Distribution of mixed abrasive in magnetic field

如图6所示,激烈翻滚、旋转、跳跃的细小磁针,在磁场中被磁化后,其吸附一定量的磁性磨料,在以一定的角度划擦工件表面时,为磁性磨粒提供研磨压力  $F_x$  和切削力  $F_y$ ,而在磁性研磨工艺中,研磨压力和切削力是产生去除量的两个必要因素<sup>[14]</sup>。

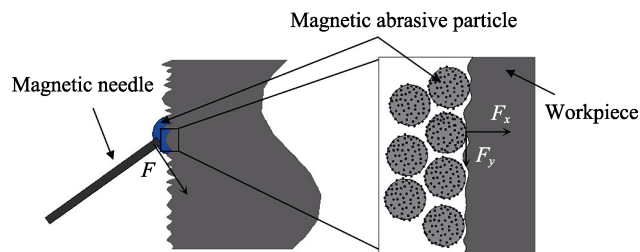


图6 混合磨料研磨机示意图  
Fig.6 Schematic diagram of grinding mechanism of mixed abrasive

### 1.3 磁针磁场力分析

磁针在电磁场中被磁化后,在表面存在表面磁化

电流,其内部也存在磁化电流。用  $\delta_s$  和  $\delta_v$  分别表示表面磁化电流密度和体磁化电流密度,则有<sup>[15]</sup>:

$$\delta_v = \nabla \times M \quad (2)$$

$$\delta_s = -\mathbf{n} \times M \quad (3)$$

式中:  $\nabla$  为对矢量做偏导,它是一个矢量;  $M$  为介质磁化强度;  $\nabla \times M$  表示为  $M$  的旋度,磁化电流体密度等于磁化强度的旋度;  $\mathbf{n}$  为表面法相矢量;“-”代表方向。电磁场对磁针的作用力可以表示为:

$$F = \oint_S \delta_s \times B ds + \iiint_V \delta_v \times B dv \quad (4)$$

将式(2)和式(3)带入式(4),得:

$$F = \oint_S (-\mathbf{n} \times M) \times B ds + \iiint_V (\nabla \times M) \times B dv \quad (5)$$

式中:  $B$  为磁感应强度(T)。磁针为各向同性的磁介质,其受到电磁场的作用力为:

$$F = \iiint_V (\nabla \times M) \times B dv \quad (6)$$

介质磁化强度  $M$  又可表示为  $M = \frac{\mu_r - 1}{\mu_0 \mu_r} B$ , 其中

$\mu_r$  为磁介质的磁导率,  $\mu_0$  为真空磁导率,带入公式(6)经矢量运算整理后可得:

$$F = \frac{\mu_r - 1}{2\mu_0 \mu_r} \iint_S B^2 ds \quad (7)$$

在1.1节中对电磁场的模拟分析可知,在加工区域,内磁场的分布均匀(图3a),因为导磁材料的磁导率  $\mu_r$  远远大于1,可将公式(7)简化为:

$$F = \frac{\mu_r - 1}{2\mu_0 \mu_r} B^2 S = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S = \frac{1}{2} BHS \quad (8)$$

式中:  $B$  为磁场与磁针作用面处的磁感应强度(T);  $H$  为磁场与磁针作用面处的磁场强度(A/m);  $S$  为磁场与磁针作用面的面积( $\text{m}^2$ )。用 ANSYS Maxwell 16.0 对电磁绕组进行电磁模拟,可得出电磁场中的磁场强度  $H$  和磁感应强度  $B$  的分布云图,如图7和图8所示,根据公式(8)可计算出单个磁针在电磁场中所受到的磁场力。

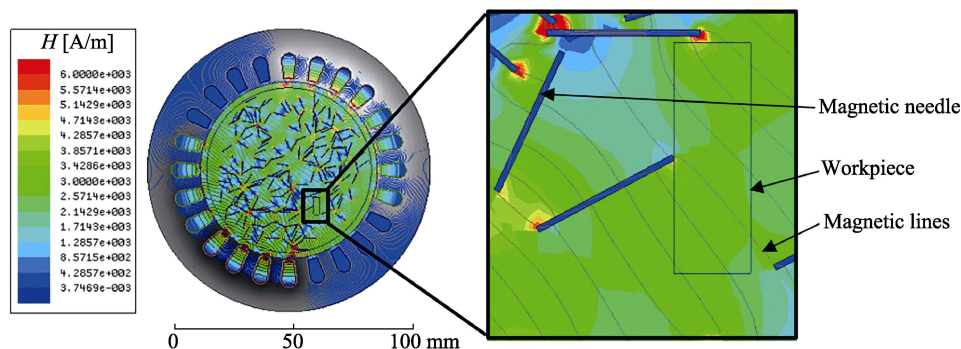


图7 磁场强度分布图  
Fig.7 Distribution map of magnetic field intensity

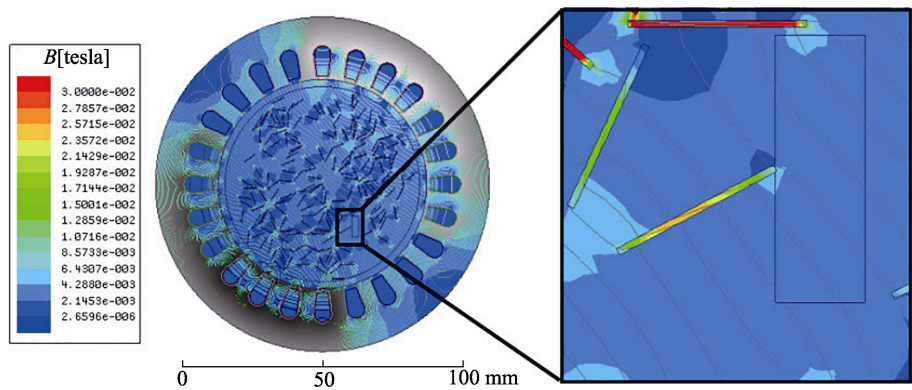


图 8 磁感应强度分布图  
Fig.8 Distribution map of magnetic induction intensity

根据动量定理,具有一定动能的细小磁针碰撞工件表面时,工件会受到一个冲击力 $F_n$ ,其计算公式为 $F_n=\Delta P/\Delta t$ ,其中 $\Delta P$ 为细小磁针碰撞工件时的动量变化值, $\Delta t$ 为碰撞时间。虽然磁针的质量较小,但其运动速度很大,作用时间短,依然会产生较大的冲击力 $F_n$ 。对于较软材质的工件磁针的碰撞会对其表面造成损伤,而磁性磨粒的加入起到一个“缓冲”作用,避免了磁针与工件直接碰撞。混合磁性磨料在加工区域始终受到磁场力 $F$ 的作用,因此这里的“缓冲”作用只减少了碰撞力 $F_n$ ,而对于磁场力 $F$ 的影响较小,

因此磁针可以为磁性磨粒提供足够的研磨压力和切削力。

2 试验过程及结果分析

2.1 试验条件

试验设备为自行研制的电磁研磨机,主要由绕组线圈、变频器和控制面板等构成。该设备可设定加工时间和频率等工艺参数,图 9 为电磁研磨设备的示意图。

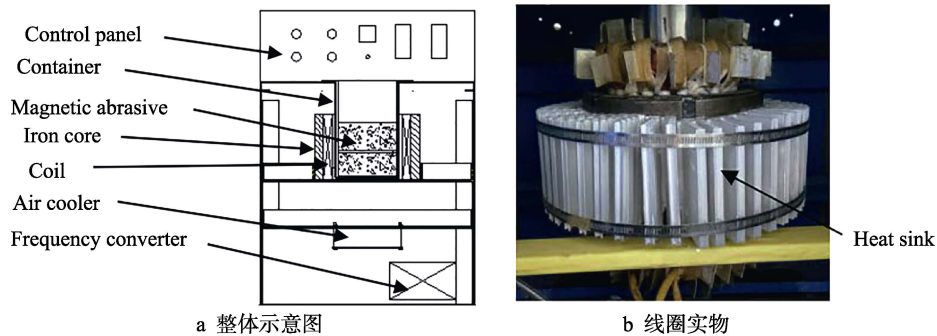


图 9 电磁研磨设备示意图  
Fig.9 Schematic diagram of electromagnetic grinder equipment: a) overall diagram; b) real object of coil diagram

设备工作电压为 380 V,磁场转速通过变频器控制。加工时,将工件与磁性磨料放入容器中,加入劳力恩 SR-9911 研磨液(大连盛瑞贝尔化工有限公司),设定加工频率和时间,对工件进行研磨加工。试验所用样件为铝合金材质,如图 10 所示,样件为批量生产,个体间性能差异较小,其直径为 14 mm,内孔直径为 5 mm,厚度为 5 mm,槽宽仅为 1.2 mm。由于形状特殊,尺寸较小,在加工成形时会存在加工纹理及飞边毛刺等表面缺陷,这些表面缺陷会严重影响工件的使用效果<sup>[16]</sup>。若采用传统的研磨工艺,将面临装夹困难、研磨不均等问题,采用磁性磨料辅助磁针磁力研磨工艺时,无需考虑装夹问题,且研磨均匀。

设定加工时间为 40 min,频率设定为 16 Hz,保持其他参数不变,只改变磨料配比,以工件表面形貌、表面粗糙度值和材料去除量为试验指标,探究混合磨

料在电磁研磨工艺中的最佳配比,细小磁针和磁性磨粒按质量比分别设置为 1 : 1、1 : 2、1 : 3,混合磨料总质量不变,为 300 g。为减少工件个体差异所造成的误差,每组试验加工 3 个工件,试验具体工艺参数见表 1。

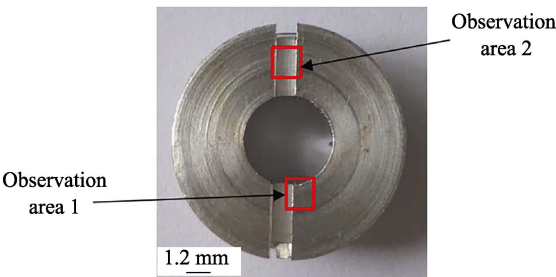


图 10 工件实物图  
Fig.10 Real object of workpiece



表 1 试验条件  
Tab.1 Experimental conditions

Parameter	Specification
Magnetic needle type/mm	$\phi 0.5 \times 5$
Magnetic abrasive particle diameter/ $\mu\text{m}$	150~200
Frequency/Hz	16
Grinding fluid/mL	50
Processing time/min	40

## 2.2 试验结果分析

使用日本基恩士生产的 VHX-500F 超景深 3D 电

子显微镜观测表面微观形貌, 图 11 为工件观测区域 1 表面形貌对比图, 通过对比可以看出, 经过 40 min 的研磨, 工件表面形貌较原始形貌有明显的不同。使用混合磨料加工后, 工件表面形貌如图 1c、d、e 所示, 无明显加工纹理。在本次试验中, 当磁针与磁性磨粒的质量比为 1:2 时, 加工后的表面质量最佳, 表面无明显加工纹理、麻点和凹坑。这是因为在本次试验中, 当磁针与磁性磨粒的质量比为 1:2 时, 磁性磨粒恰好将磁针两端包裹住, 当磁针与工件碰撞时, 避免了磁针端部与工件直接碰撞, 且无多余的磁性磨粒阻碍、粘连磁针的运动。

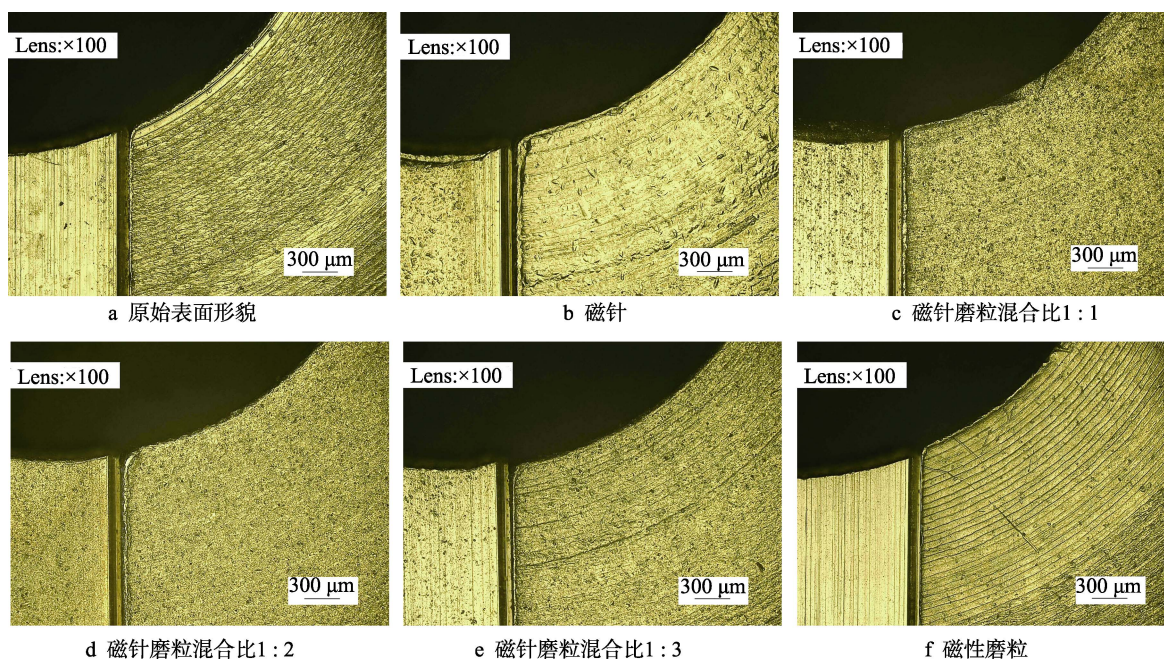


图 11 工件观测区域 1 表面形貌对比

Fig.11 Comparison of surface topography of workpiece observation area 1: a) original surface topography; b) magnetic needles; c) magnetic needle abrasive mixing ratio 1:1; d) magnetic needle abrasive mixing ratio 1:2; e) magnetic needle abrasive mixing ratio 1:3; f) magnetic abrasive particles

当磁性磨粒较少时, 如图 11c 所示, 磁性磨粒无法将磁针端部完全包裹, 因此“缓冲”效果不明显。当磁针与工件碰撞时, 端部少量磁性磨粒嵌入工件表面, 形成麻点状凹坑; 当磁性磨粒较多时, 如图 11e 所示, 磁性磨粒在研磨液中的分布密度较大, 且磁化后相互粘连, 阻碍磁针的运动, 因此研磨效果不明显。

图 12 为观测区域 2 工件微小沟槽表面形貌对比图, 与工件表面形貌对比图一致, 当磁针与磁性磨粒的质量比为 1:2 时, 微小沟槽表面形貌最佳。单纯使用磁针时, 在靠近沟槽两端的部位明显存在研磨盲区, 且在中间区域有碰撞凹痕。单独使用磁针对样件进行研磨时, 虽然磁针端部可以进入微小沟槽, 但受磁针形状和沟槽的约束, 磁针无法对沟槽内部边角处进行研磨。加入磁性磨粒后, 磁针可将端部附着的磁性磨粒挤压进沟槽内, 从而起到研磨的作用。此外, 磁性磨粒具有柔性, 可对沟槽内部进行均匀研磨, 无研磨盲区。

加工过程中分别用触针式表面粗糙度测量仪(广州市广精精密仪器有限公司, 型号 JB-8E)和精度为 0.1 mg 的电子分析天平(常熟市双杰测试仪器厂, 型号为 JJ224BC)收集工件表面粗糙度值和材料去除量的相关数据, 为减少测量误差, 每组数据测量 3 次取平均值。单独使用磁针对工件进行研磨, 如图 13a 所示, 研磨 20 min 时, 工件表面粗糙度值有上升的趋势, 这说明磁针的碰撞对工件表面造成了一定的损伤。使用混合磨料加工工件时, 表面粗糙度值均低于使用单一磨料加工的工件。加入磁性磨粒后, 避免了磁针与工件表面的直接碰撞。此外, “切削刃”由原来的磁针端面变成磁性磨粒的研磨相, 因此使用混合磨料可以得到较低的表面粗糙度值和较大的材料去除量。当磁针与磁性磨粒的质量比为 1:2 时, 加工后的工件表面粗糙度值最低, 可降至 0.54  $\mu\text{m}$ ; 去除量最大, 为 2.8 mg。



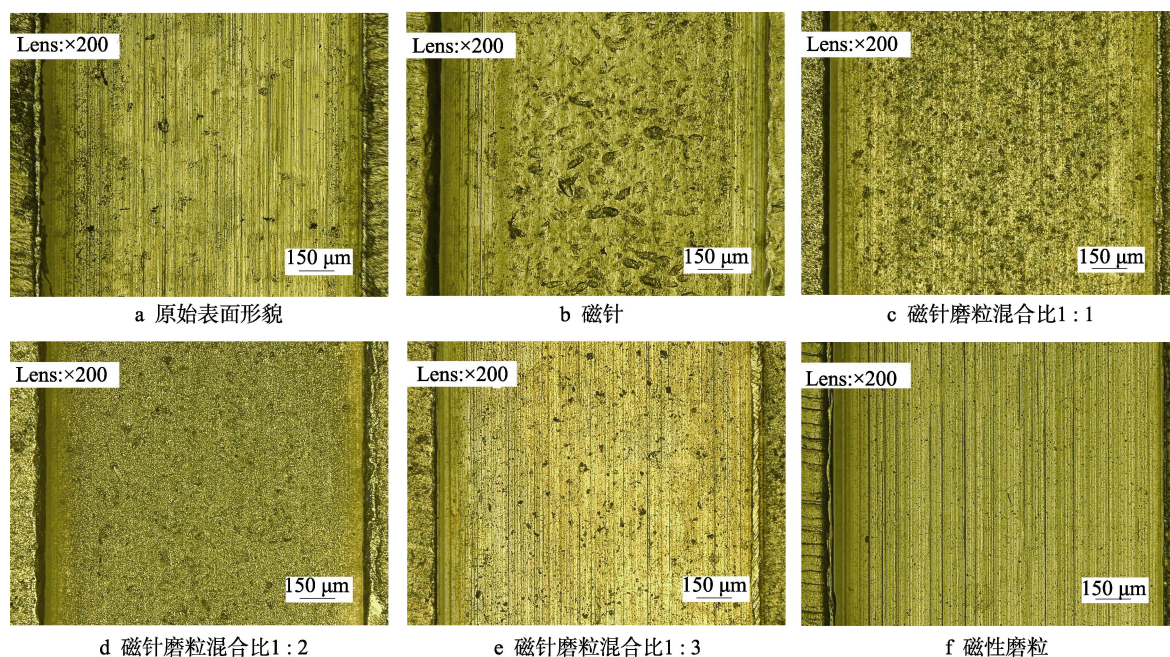


图 12 工件观测区域 2 表面形貌对比图

Fig.12 Comparison of surface topography of workpiece observation area 2: a) original surface topography; b) magnetic needles; c) magnetic needle abrasive mixing ratio 1 : 1; d) magnetic needle abrasive mixing ratio 1 : 2; e) magnetic needle abrasive mixing ratio 1 : 3; f) magnetic abrasive particles

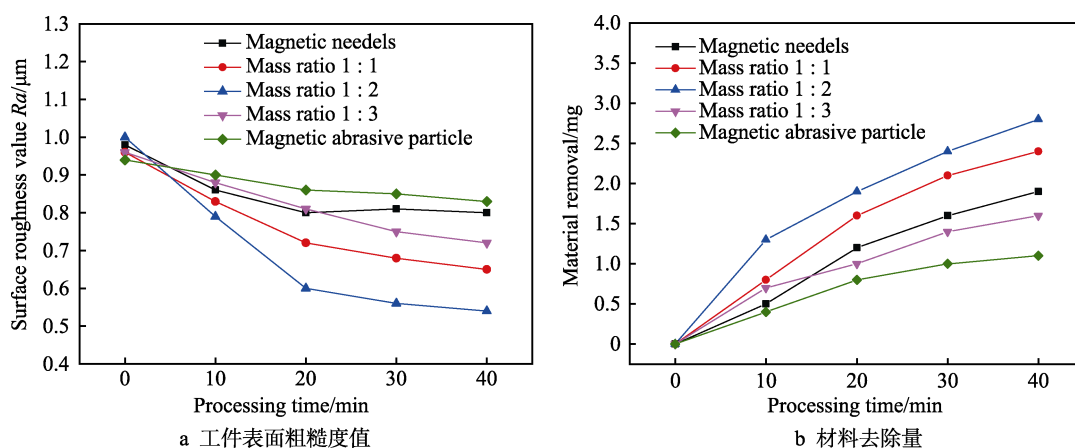


图 13 工件表面粗糙度值和材料去除量随加工时间的变化

Fig.13 Trend chart of workpiece surface roughness and material removal with processing time: a) workpiece surface roughness value; b) material removal

如图 13b 所示, 单独使用磁针时, 以磁针的端部为“切削刃”, 其切削效果不明显, 主要是造成工件表面的塑性变形; 单独使用磁性磨粒时, 没有足够的研磨压力和切削力, 因此研磨效果不明显。磁性磨粒过少时不能将磁针端部完全包裹, 同样会对工件表面造成损伤。当磁性磨粒过多时, 磁性磨粒密度过大, 磁化后的磁性磨粒与磁针相互粘连, 磁针运动受阻, 研磨效果较差。当磁针与磁性磨粒的质量比为 1 : 2 时, 可以获得最大的材料去除量。

### 3 结论

1) 通过 ANSYS Maxwell 软件模拟分析, 当通

入定子线圈的电流不变, 极对数  $P$  为 1 时, 加工区域内磁力线分布较均匀, 产生的磁感应强度比较大, 有利于提高工件表面的研磨效率和均匀性。

2) 相较于单一磁性磨料, 磁性磨粒辅助磁针研磨可获得更好的表面质量, 在磁针中加入磁性磨粒可以起到缓冲作用, 减少磁针对工件表面的碰撞损伤。此外, 起到磨削作用的切削刃, 由原来的磁针端面变成磁性磨粒的研磨相——氧化铝颗粒微刃, 提高了材料去除量; 磁针可将磁性磨粒挤进微小沟槽, 实现了对微小沟槽的研磨加工, 提高了研磨的均匀性。

3) 当磁针与磁性磨粒的质量比为 1 : 2 时, 磁性磨粒恰好可以附着在磁针两端, 磁针端部无裸露也没有多余磁性磨粒阻碍磁针运动, 研磨效果相对较为理

想。磁性磨粒辅助磁针磁力研磨为微小复杂工件的研磨加工提供了一种新途径。

#### 参考文献:

- [1] YANG S, LI W. Surface quality and finishing technology[M]. Bratislava: Surface Finishing Theory and New Technology, 2018.
- [2] GUPTA K, JAIN N K, LAUBSCHER R F. Assisted hybrid machining processes[J]. Springer briefs in applied sciences & technology, 2016, 236: 45-65.
- [3] DEBNATH S, KUNAR S, ANASANE S S, et al. Non-traditional micromachining processes: Opportunities and challenges[M]. Heidelberg: Springer International Publishing, 2017.
- [4] 孙岩, 兰勇, 陈燕. 磁性和非磁性材料微小沟槽表面的磁力研磨光整加工[J]. 制造技术与机床, 2015(9): 132-136.  
SUN Yan, LAN Yong, CHEN Yan. The finishing machining of tiny groove surface of magnetic and non-magnetic materia by magnetic abrasive finishing[J]. Manufacturing technology & machine tool, 2015(9): 132-136.
- [5] 宋庆环. 磁研磨法应用于模具型腔的光整加工[J]. 机械设计与制造, 2009(2): 248-250.  
SONG Qing-huan. Magnetic grinding method applied in complex cavity finishing[J]. Machinery design & manufacture, 2009(2): 248-250.
- [6] 李阔, 陈燕, 张志超, 等. 利用交变旋转磁场去除叶片气膜孔毛刺的试验研究[J]. 航空制造技术, 2017(9): 66-70.  
LI Kuo, CHEN Yan, ZHANG Zhi-chao, et al. Experimental study on film cooling hole de-burring by alternating rotating magnetic field[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2017(9): 66-70.
- [7] 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): 1-10.
- [8] KAJAL S, JAIN V K, RAMKUMAR J, et al. Experimental and theoretical investigations into internal magnetic abrasive finishing of a revolver barrel[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2017, 56: 1-18.
- [9] 李彦俊, 陈燕, 郭龙文. 磁研磨法去除微小喷嘴棱边处毛刺的研究[J]. 航空制造技术, 2014, 453(9): 88-90.  
LI Yan-jun, CHEN Yan, GUO Long-wen. Study of de-burring on edge of micro nozzle by magnetic abrasive finishing[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2014, 453(9): 88-90.
- [10] 高建红. 钛合金滚磨光整加工表面完整性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014: 18-22.  
GAO Jian-hong. Study of surface integrity of titanium alloy with barrel finishing technology[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014: 18-22.
- [11] 杨海吉, 韩冰, 陈燕, 等. 自旋转磁极在合金管内表面精密抛光中的应用[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(2): 189-195.  
YANG Hai-ji, HAN Bing, CHEN Yan, et al. The application of rotating magnetic pole in the polishing of the inner surface of the alloy tube[J]. Tribology, 2018, 38(2): 189-195.
- [12] 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.
- [13] ZHOU K, CHEN Y, DU Z W, et al. Surface integrity of titanium part by ultrasonic magnetic abrasive finishing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 80(5-8): 997-1005.
- [14] JAIN V K, SAREN K K, RAGHURAM V, et al. Force analysis of magnetic abrasive nano-finishing of magnetic and non-magnetic materials[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 896: 1-11.
- [15] 王瑜. 永磁装置中磁场力的计算[J]. 磁性材料及器件, 2007(5): 49-52.  
WANG Yu. Calculation of magnetic force of permanent magnet devices[J]. Journal of magnetic materials and devices, 2007(5): 49-52.
- [16] 杨海涛, 张清林, 陈大陆. 柴油机喷嘴喷孔表面微观形貌测量及应用[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 283-289.  
YANG Hai-tao, ZHANG Qing-lin, CHEN Da-lu. Surface microstructure measurement and application of diesel engine nozzle holes[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 283-289.