

复合磁极磁粒研磨平面机理及试验探究

朱子俊, 韩冰, 陈燕, 李奎

(辽宁科技大学 辽宁省复杂工件表面特种加工重点实验室, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: **目的** 探究磁粒研磨中复合磁极磁回路对工件表面质量及表面粗糙度值的影响, 解决传统平面磨粒受磁力较小而远离加工区域, 从而使表面质量较低的问题。**方法** 对提出的磁极复合磁路法进行研磨机理分析, 并通过磨粒在加工中的受力分析, 进而分析影响因素。使用等效磁路法, 对 3 种磁路所形成加工区域的磁感应强度进行计算, 进而采用 Ansoft Maxwell 软件对 3 种磁路的磁场梯度模拟仿真进行对比分析, 综合分析、评价影响因素的作用, 为试验打下理论基础。最后使用表面粗糙度仪及超景深 3D 显微镜, 对采用不同磁回路研磨前后的工件表面粗糙度值及表面质量进行测量与记录。**结果** 复合磁极磁路中的磁感应强度大于传统研磨加工, 具有明显、对称的磁场梯度效果。与传统式研磨相对比, 表面粗糙度值从 $0.10\ \mu\text{m}$ 降至 $0.06\ \mu\text{m}$, 在表面粗糙度改善率上提升 40%, 工件表面研磨质量较好。**结论** 复合磁极式磁粒研磨工艺对工件表面的划痕、凹坑、斑点等达到了良好的去除效果, 使工件表面平整并具有镜面效果, 较传统研磨明显具有质量好、效率高的优点。

关键词: 复合磁极; 磁粒研磨; 等效磁回路; SUS304 不锈钢; 表面粗糙度值; 表面微观形貌

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)09-0352-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.09.037

Mechanism Analysis and Experimental Study of Plane of Compound Magnetic Pole Magnetic Abrasive Lapping

ZHU Zi-jun, HAN Bing, CHEN Yan, LI Kui

(Liaoning Key Laboratory of Special Machining for Complex Workpiece Surface,
University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the influence of compound magnetic pole magnetic circuit on the surface quality and surface roughness value of the workpiece in magnetic abrasive lapping and solve the problem that the traditional magnetic abrasive lapping in abrasive particles far away from the processing area due to the smaller magnetic force, which makes the workpiece surface quality is low. Firstly, the lapping mechanism of the composite magnetic pole magnetic circuit method is analyzed, and the influence factors are analyzed through the force analysis of the abrasive particles in the processing. The equivalent magnetic circuit method is used to calculate the magnetic induction intensity of the processing area formed by the

收稿日期: 2020-09-14; 修订日期: 2020-11-18

Received: 2020-09-14; Revised: 2020-11-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51775258)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775258)

作者简介: 朱子俊 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: ZHU Zi-jun (1995—), Female, 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。

Corresponding author: HAN Bing (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision machining.

引文格式: 朱子俊, 韩冰, 陈燕, 等. 复合磁极磁粒研磨平面机理及试验探究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 352-360.

ZHU Zi-jun, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Mechanism analysis and experimental study of plane of compound magnetic pole magnetic abrasive lapping[J]. Surface technology, 2021, 50(9): 352-360.

three magnetic circuits. And then Ansoft Maxwell software is used to compare and analyze the magnetic gradient simulation of the three magnetic circuits, comprehensively analyze and evaluate the effect of the influencing factors, so as to lay a theoretical foundation for the test. Finally, the surface roughness and surface quality of the workpiece before and after lapping with different magnetic circuits were measured and recorded by surface roughness measuring instrument and super deep scene 3D microscope. Compared with traditional lapping, the magnetic induction intensity in the magnetic circuit of composite magnetic pole is larger, and has obvious and symmetrical magnetic field gradient effect. The workpiece surface roughness value is reduced from $0.10\ \mu\text{m}$ to $0.06\ \mu\text{m}$, and the improvement rate of surface roughness is increased by 40%. The surface lapping quality of the workpiece is better. The results show that the composite magnetic pole magnetic abrasive finishing process can remove the scratches, pits and spots on the surface of the workpiece, which makes the surface of the workpiece smooth and has mirror effect. Compared with the traditional lapping process, it has obvious advantages of good quality and high efficiency.

KEY WORDS: compound magnetic pole; magnetic abrasive lapping; magnetic circuit; SUS304 stainless steel; surface roughness value; surface micro-topography

磁粒研磨光整加工工艺是一种新兴超精密表面加工技术,其利用磁力线穿透非导磁物体的性质,将具有磁性及切削能力的研磨粒子吸附于研磨磁极头,通过手动调节固定加工间隙,将研磨粒子压附在平面表面,使得研磨粒子随旋转磁极与进给台的复合运动切削、划刻工件表面,以此完成精密加工^[1-2]。该种加工工艺具有微量切削去除、加工中温升小、磁源稳定、柔性仿形加工等优点,已经广泛应用于各种领域零部件的精加工中^[3-6]。磁粒研磨技术的材料去除量会影响工件表面粗糙度及加工效率,其主要影响因素为研磨压力^[7-9]。在磁粒研磨加工中研磨压力,主要受磁极所形成磁场强度及研磨粒子的磁导率的影响^[10-11],而加工环境中的磁场强度大小可通过对磁极的磁回路进行设计来控制,以此得到高效的加工方法。磁粒研磨中,磁极的排布会影响加工区域磁场力的分布及大小,进而控制磁力刷的分布、形状,磁极位置对研磨粒子作用于工件表面的研磨压力的大小及方向也有很大的影响^[12-15]。因此,磁回路的设计,对加工表面的精密度和均匀性有重要的影响。

张鹏^[16]采取了永磁体表面开槽的措施。该措施是现今平面加工一直使用的改善方案^[17],目的是改善圆柱形永磁体表面磁感应线分布较疏散导致的磁感应强度不均匀,从而在加工平面时,解决工件表面质量较差的问题。结果表明,开槽后对平面抛光效率及质量均有所提升。使用该方法使磁极表面磁感线分布较均匀,但磁极整体磁感应强度变化较小,磁极吸附的外部研磨粒子受离心力作用大于所受磁力而飞离加工区域,研磨效率提升不明显。程森^[12]使用工件下置旋转磁极盘,带动工件上表面的径向充磁辅助磁极旋转的方案,有效地解决了研磨粒子因磁极中心与圆周磁力大小不同而分布不均匀的问题,使加工区域的磁感应强度呈对称分布,加工效率得到提升,表面质量也有所提升。但在该方案中,辅助磁极 N/S 交界处与工件接触加工的研磨粒子无法进行更换,导致该位置加工由起初的效率较高,到后期则会因粒子无法自锐

更新而出现研磨不均匀的现象。SUS304 不锈钢经加工 40 min 后,表面粗糙度数值从 $0.25\ \mu\text{m}$ 降至 $0.16\ \mu\text{m}$,表面精加工效果不明显,加工效率未得到明显提升。

针对上述中出现的加工区域磁感应强度较弱或部分研磨粒子无法自我更新等问题,本文提出复合磁极磁粒研磨工艺对平面进行精加工,研磨效果较好,装置搭建简单。该方案是在工件下方放置轴向充磁磁极与其他金属形成的组合块,与工件上方使用的轴向充磁磁极复合加工。加工中,研磨粒子随磁极的旋转与进给台的直线运动在工件表面形成复杂轨迹,实现有效且快速的去除,达到表面光整效果。文中利用等效磁路法对磁极所形成的磁路进行理论计算,进而对研磨过程中的影响因素进行理论分析,而后使用磁力仿真软件对加工区域磁场强度分布进行模拟分析,最后对综合评价出的磁回路方案进行相关验证试验,使工件实现高的研磨效率及表面效果。

1 复合磁极磁粒研磨原理

1.1 基本原理

图 1a 为传统平面磁粒研磨加工技术作用于平面的原理图。轴向圆柱形磁极通过磁极座固定,加持在铣床主轴,磁性磨粒与研磨液以一定比例混合并吸附于磁极表面,随磁极的旋转,对工件表面进行精密加工。但该方法研磨平面时,研磨粒子所受磁力较小,在预设加工间隙研磨平面时,出现研磨粒子飞离加工区域的现象,使得研磨效果不佳,又需手工调整加工间隙,保持磁极吸附研磨粒子与工件表面形成螺旋运动进行材料去除,使得加工过程中效率较低。针对这种问题,采取复合磁极组成的有效磁回路对平面进行加工,如图 1b 所示。轴向圆柱形磁极通过磁极座固定,加持在铣床主轴,小型圆柱形磁极固定在金属块中形成组合块,与上部磁极形成磁回路,磁性磨粒与研磨液以一定比例混合并吸附于磁极表面,随磁极的

旋转与进给台的进给，形成相对运动，对工件表面进行精密加工。该方案可有效地改善磁回路中磁力线的排布方式，增强了研磨粒子在加工区域所受到的研磨

压力，能保证单位时间内研磨粒子的数量，并以此减小对工件表面加工轨迹的交叉角，快速降低表面粗糙度，提高研磨效率。

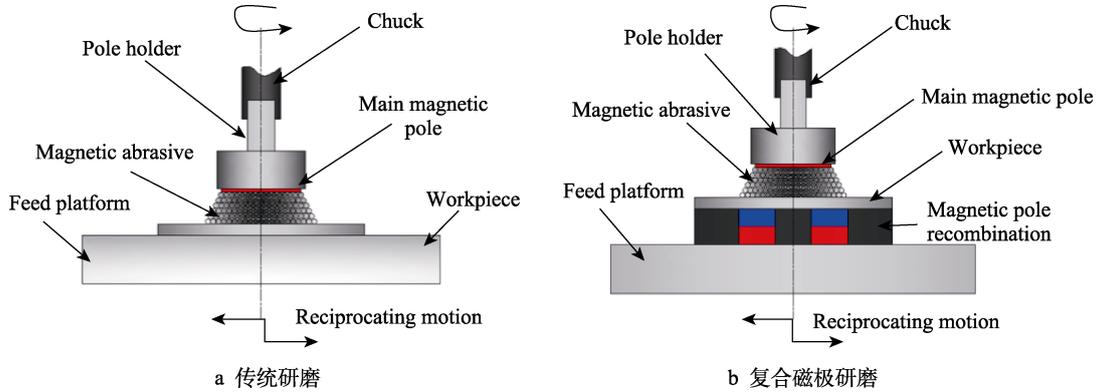


图1 磁粒研磨加工原理图

Fig.1 Principle diagram of magnetic abrasive lapping: a) traditional lapping; b) compound magnetic pole lapping

1.2 受力分析

磁粒研磨工艺中，研磨粒子随磁场磁力线方向形成柔性磁性团，具有可仿形、自锐性等特点，有利于

对工件表面的柔性切削加工。研磨粒子与研磨粒子间相互吸引，随着所受力的作用，共同作用于工件表面，因此可通过对单个磨粒的受力分析，得出整体加工的运动状态。图2为研磨粒子的受力示意图。

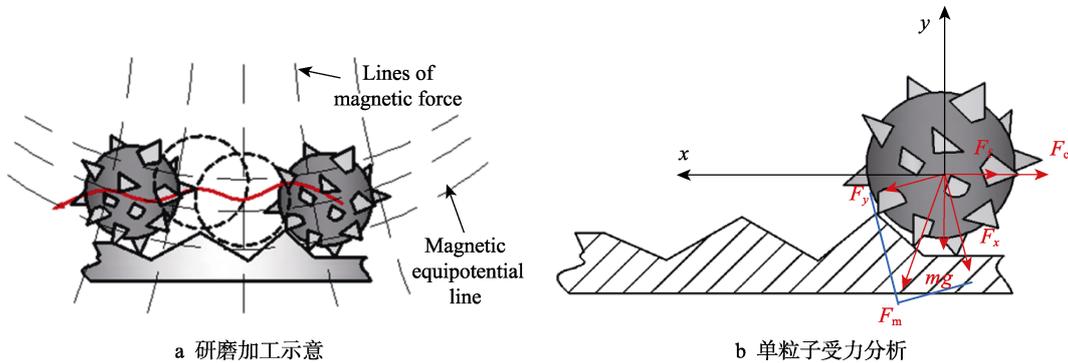


图2 磨粒受力分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of force analysis of abrasive particles: a) lapping process; b) force analysis of single particle

图2a为研磨粒子在工件表面的切削示意图。可知，研磨粒子受磁场力作用吸附成团，延磁力线方向挤压工件表面，并随磁极的主旋转运动，在工件表面旋转，进而对工件表面形成刮擦、划刻等微量切削，以此实现研磨加工。图2b为单颗研磨粒子受力分析示意图，研磨粒子所受力在x方向分为三部分，分别为复合磁极磁回路形成的磁力 F_m 、离心力 F_c 与摩擦力 F_f ，其中磁力可由沿磁力线方向的 F_x 与垂直磁力线方向的 F_y 计算合力可得，公式为：

$$F_m = V \chi \mu_0 H \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

式中： V 是磁性研磨粒子体积； χ 是研磨粒子磁化率； μ_0 是真空磁导率； H 是磁场强度； $\frac{\partial H}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial H}{\partial y}$

分别为沿 x 和 y 方向的磁场强度。磁感应强度与磁场强度的关系为 $B = \mu_0 \mu_r H$ ，因此可得到粒子所受磁力 F_m 与磁感应强度 B 的关系为：

$$F_m = V \chi \mu_r B \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

在磁粒研磨加工平面时，若研磨粒子不随离心力作用飞离加工区域，则需使所受磁力大于 X 轴负方向离心力 F_c 与阻力的合力 F_f ，又 $F_c = m\omega r^2$ 、 $F_f = \mu(mg + F_m)$ ，因此可得到相关的公式为：

$$F_m > m\omega r^2 + \mu(mg + F_m) \quad (3)$$

式中： m 为磨粒的质量； ω 为磨粒的旋转角速度； r 为磨粒的转动半径； μ 为磨粒与工件表面接触的摩擦因数。将公式(2)带入公式(3)中，进行化简可得：

$$B > \frac{m(\mu g + \omega r^2)}{V \chi \mu_r (\mu - 1) \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2}} \quad (4)$$

由公式(2)和公式(4)可以看出，研磨粒子所受 X 方向的磁力 F_m 与磁感应强度 B 成正比，若磨粒所受包裹性磁力大于所受离心力与摩擦力的合力，则需提升磁感应强度，由此可减少研磨加工时磨粒的飞离，增加研磨区域对工件表面的刮擦，并减小螺旋轨迹交叉角。又通过公式(4)可以观察到，提升加工区域的磁场梯度也可以实现上述过程。因此，通过复合磁极磁回路的设计来改善磁场梯度，也可以使研磨粒子所受磁力大于离心力。

1.3 磁感应强度计算

通过 1.2 节中公式(2)和公式(4)的分析，研磨粒子所受磁力与磁极在工件表面的磁感应强度大小成正比关系。此外，磁感应强度是研磨粒子能否参与加工研磨的重要因素，且由研磨压力公式 $P = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right)$ 可知，磁感应强度数值大小是研磨压力的重要影响因素之一，增加其数值可减少研磨粒子飞离现象，并能增加研磨区域的研磨粒子对工件表面的切削力度，因此提升磁回路中的磁感应强度具有重要作用。通过对磁粒研磨加工过程中的磁路进行分析及设计，来提高研磨压力，可通过永磁体磁感应强度公式(5)进行计算。

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (5)$$

式中： Φ 是磁通量； S 是磁路横截面积。

传统平面加工试验中所用轴向柱形磁体，其表面中心距离 X 位置的磁场强度计算公式为：

$$B = \frac{B_r}{2} \left(\frac{L + X}{\sqrt{R^2 + (L + X)^2}} - \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \right) \quad (6)$$

式中： L 是磁体轴向长度； R 是圆柱形磁体半径； B_r 是剩余磁感应强度。N35 钕铁硼永磁体具有高磁能积、高矫顽力、高工作温度、体积小、磁场均匀稳定等优点^[18-19]。N35 钕铁硼永磁体的主要性能指标见表 1。

表 1 钕铁硼 (Nd-Fe-B) N35 永磁极的性能参数

Tab.1 Performance parameter table of (Nd-Fe-B) N35 permanent magnetic pole

B_r/T	$H_c^b/(kA \cdot m^{-1})$	$H_c^j/(kA \cdot m^{-1})$	$(BH)_{max}/(kJ \cdot m^{-3})$	$t_w/^\circ C$
1.17~1.21	≥ 868	≥ 955	263~287	80

试验中取 $L=9$ mm, $R=12.5$ mm, $X=2$ mm, $B_r=1.21$ T^[16], 可计算出工件表面距离磁极间隙为 2 mm 时^[20-21], 磁极中心处对该位置产生的磁场强度为 $B=0.3025$ T, 使用特斯拉仪测得该尺寸磁极表面磁感应强度大小为 $B=0.3072$ T, 可通过 $\sigma=(B_c-B_s)/B_s$ (σ

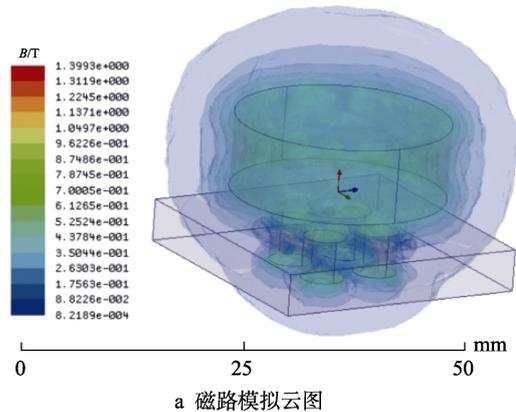
为相对误差, B_c 为测量值, B_s 为计算值) 进行计算, 由此所得误差率为 1.55%。

2 磁粒研磨工艺中磁路的分析

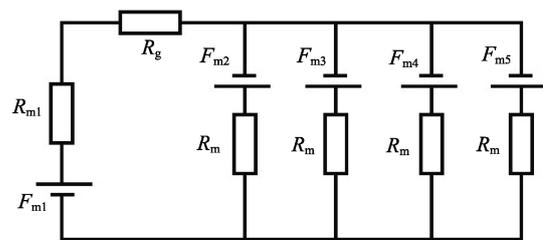
磁粒研磨中使用永磁体作为磁源装置, 具有体积小、磁力稳定等优点。磁粒研磨中使用的切削刀具为烧结法制作, 具有铁基体及研磨相的磁性研磨粒子。永磁体施加在磁性研磨粒子的磁力, 可使磨粒中研磨相的切削刃对工件表面进行微量切削, 进而实现精密加工^[22-23]。因此, 强化加工间隙中的磁场强度, 是提升研磨效率的重要方法。

2.1 磁粒研磨的不导磁磁路结构设计及计算

图 3 为并联式的静态磁路, 上部柱形轴向磁极由炮塔铣床主轴加持, 下部复合磁极由 4 个轴向柱形磁极安装于非导磁块中制成。试验过程中, 工件置于复合磁极上, 保持磁极与工件间的加工间隙一致。图 3a 中, 加工磁极头与工件下方设计安装的复合磁极形成闭合磁路, 使研磨粒子随磁极在工件间做相对运动, 旋转刮擦工件表面。为了分析磁路空隙中磁场强度的大小, 对其等效磁路图进行分析, 如图 3b 所示。图中 F_m 为对应磁极的磁势, R_{m1} 为加工永磁体的内部磁阻, R_m 为工件下方磁极组合块填充的柱形轴向磁极的内部磁阻, R_g 为工件加工间隙的空气磁阻。由磁粒研磨中研磨压力公式分析可得, 研磨加工间隙处,



a 磁路模拟云图



b 等效磁路图

图 3 磁粒研磨加工磁路图

Fig.3 Magnetic circuit diagram of magnetic abrasive lapping: a) magnetic circuit simulation nephogram; b) equivalent magnetic circuit diagram

磁感应强度 B 的大小是加工效率的决定性因素,使用等效磁路法可以有效且准确地计算其磁感应强度,因此通过分析对比磁路设计中空隙处形成的磁感应强度,可对下一步试验打下良好的理论基础。

由磁路第二定理 $\sum \phi R_m = \sum HL$ 可得:

$$\phi_{m1}R_{m1} + 4\phi_g R_g + \phi_0 R_0 = H_1 L_1 + 4HL \quad (7)$$

式中: ϕ 为穿过该截面的磁通量,磁极组合块中磁极性质、体积及充磁方向相同,因此磁极的磁通相同,合计为 $\phi_0 = \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5 = 4\phi$; R_0 为磁阻,由并联磁路性质可得 $R_0 = \frac{R_m}{4}$; H_1 、 H 分别为加工头永磁体及磁极组合块中磁极的磁场强度; L_1 和 L 分别为永磁体沿着磁路方向的长度。在磁路中, $\phi = BS$,

$R = \frac{L}{\mu S}$, 其中 S 为永磁体及气隙沿磁路方向的有效截面积; μ 为永磁体的绝对磁导率,可由公式 $\mu = \mu_0 \mu_r$ 计算,其中, μ_r 为相对磁导率,由材料自身性质所决定, μ_0 为常数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。本试验采用的钕铁硼永磁体相对磁导率 $\mu_r = 1.05$ 。上述公式中,永磁体的 B 、 H 分别为永磁体位于工作点时的磁场强度,可通过公式(8)计算。

$$\begin{cases} H_m = \frac{\gamma}{2\sqrt{\gamma}-1} \left(\sqrt{1-\frac{2\sqrt{\gamma}-1}{\gamma}} - 1 \right) \\ B_m = \frac{\gamma \left(1 - \sqrt{1-\frac{2\sqrt{\gamma}-1}{\gamma}} \right)}{2\sqrt{\gamma}-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: γ 为描述退磁曲线形状的凸度系数,

$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c}$ 。由此可算得钕铁硼永磁体工作点处的

H 、 B 值分别为 -726 kA/m 、 1.2 T ,将该数值及永磁体的相关参数带入式(7)中,算得图 3b 中磁路加工间隙处磁感应强度 $B_g = 0.47 \text{ T}$,相较原始单柱形轴向磁极加工而言,磁感应强度提升 55%,有效地提高了研磨压力。

2.2 磁粒研磨的导磁磁路设计及计算

通过 2.1 节中的设计,主加工磁极与复合磁极构成的磁回路,有效地提升了加工间隙处的磁感应强度。2.1 节中的磁极组合块的承载板件为不导磁件,铸铁被磁体磁化后,也具有一定大小的磁场,因此设计修改图 3 中下部的组合板材质为铸铁,进行计算分析。图 4 中,上部柱形轴向磁极由炮塔铣床主轴加持,下部为铸铁复合磁极,由 4 个轴向柱形磁极安装于铸铁板块中制成。试验过程中,工件置于复合磁极上,保持磁极与工件间的加工间隙一致。图 4a 为磁路结构示意图,其等效磁路如图 4b 所示。图中 R 为铸铁被永磁体磁化后具有磁力而形成的内部磁阻,由于铸铁被磁化至饱和后,其内部磁场强度较小,因此可以省略这部分的磁场计算。根据磁路第二定理可得计算公式:

$$\phi_{m1}R_{m1} + 4\phi_g R_g + \phi_0 R_0 = H_1(L_1 + 4L) \quad (9)$$

其中,磁通量 $\phi_0 = \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5 = 4\phi_m = 4\phi + 4\phi_m$,磁阻 $R_0 = \frac{1}{4}(R + R_m)$ 。铸铁磁化后,磁感应强度 $B =$

0.24 T , $\mu_r = 620$,由此计算可得 $\mu_0 = 7.79 \times 10^{-4}$ 。复合磁极中,铸铁在计算磁通时,由磁化相关的文章可知,铸铁与磁极轴线对中磁化,铸铁的磁性也表现为轴向磁力线,且铸铁内部磁畴与外磁场方向趋于一致^[24-25],因此计算时,铸铁沿磁力线方向取值。将相关参数代入式(8),算得 $B_g = 0.61 \text{ T}$,相较于磁极组合板不导磁时,磁路空隙处磁感应强度提升 29.79%,由此认为,可使用此磁路对工件进行加工。

使用导磁磁路辅助磁粒研磨加工时,利用式(9)可推算出,固定磁极大小后,导磁磁路中磁极之间的间隙 x 与磁回路气隙 B_g 的关系为 $B_g = 0.65 - 18.45x$ 。由此可得,组合板中固定的两磁极间距离和磁极加工间隙处的磁感应强度成反比,且组合块中加工间隙处磁感应强度的最大值为 0.65 T ,由上部分计算磁极间隙为 2 mm 时,所得磁感应强度为 0.61 T 。此时,随组合块中磁极间隙的减小,磁回路的磁感应强度增大缓

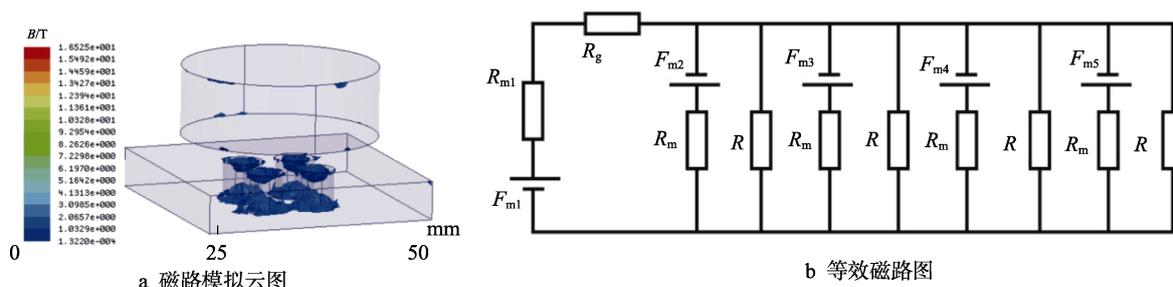


图 4 磁粒研磨加工磁路图

Fig.4 Magnetic circuit diagram of magnetic abrasive lapping: a) magnetic circuit simulation nephogram; b) equivalent magnetic circuit diagram

慢, 但磁极间距离过小不利于加工安装, 因此选择间隙为 2 mm 作为实际加工值。

2.3 磁场模拟分析

Ansoft Maxwell 是永磁体模拟的软件之一。在 2.1 节和 2.2 节中分别就两种磁路对工作间隙处的磁感应强度作用效果进行计算及分析, 得出两种复合磁极磁路较传统加工磁路磁感应强度都有增强的效果。圆柱

磁极表面磁场梯度如图 5a 所示。磁极磁感应强度顶峰呈现水平、无波动趋势, 通过经验及文献了解到^[24-25], 磁场表面呈现部分梯度有利于磨料的自锐性, 实现了接触工件表面端磨料的自我翻滚, 以及受磁场梯度峰顶与峰底不同大小磁力的吸引而上下更换研磨的作用, 因此本小节通过该软件对以上两种磁回路工件表面磁感应强度进行模拟, 对比分析磁路在工件表面所形成的磁场梯度, 为接下来的试验打下理论基础。

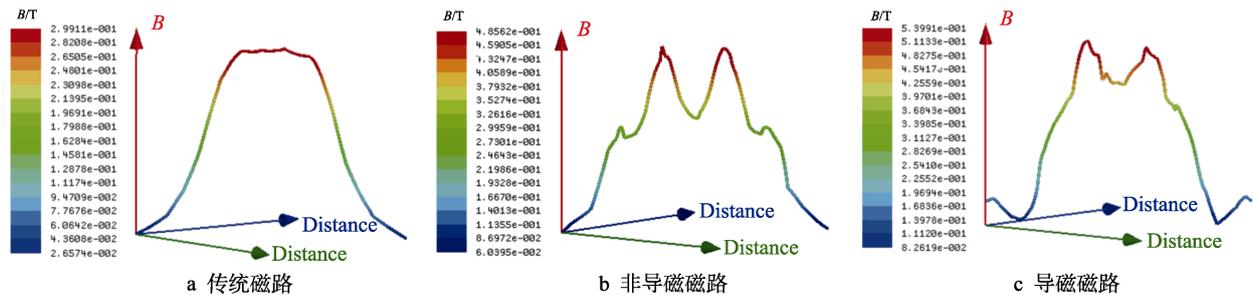


图 5 磁场梯度分布示意图

Fig.5 Schematic diagram of magnetic field gradient distribution: a) traditional magnetic circuit; b) non-magnetic circuit; c) magnetic circuit

图 5 为 3 种不同磁路的磁场梯度示意图。通过图 5 中的对比能明显地看出, 对比传统单磁极式的无波动趋势, 非导磁磁路与导磁磁路呈现对称性的峰顶与峰底, 磨粒在主磁极直径方向, 由峰顶处吸附外圈与上部磨料进行进峰底处, 从而实现工件表面磨料的外圈及上部磨料的互换, 延长磨料的寿命。在图 5b 与图 5c 中可观察到, 因磁极外部铸铁具有一定的导磁性能, 因此峰顶与峰底间梯度差小于非导磁磁路, 但导磁磁路不仅峰顶处的磁感应强度较强, 在图形的中部峰值较非导磁磁路也较大, 只有磁感应强度大于磨粒所受离心力与阻力的合力时, 才能不飞离研磨区

域, 实现研磨区域的有效加工。

3 试验装置与条件

本次试验采用炮塔铣床夹持柱形轴向磁极座的柄部, 复合磁极固定于纵向滑台面上, 工件固定在复合磁极上, 试验装置如图 6 所示。加工过程中, 铣床带动研磨磁极旋转, 轴向滑台带动工件轴向进给, 研磨粒子在研磨磁极和工件轴向进给的相对运动中对工件表面沿轴向进行旋转加工, 实现对工件表面的精密加工。

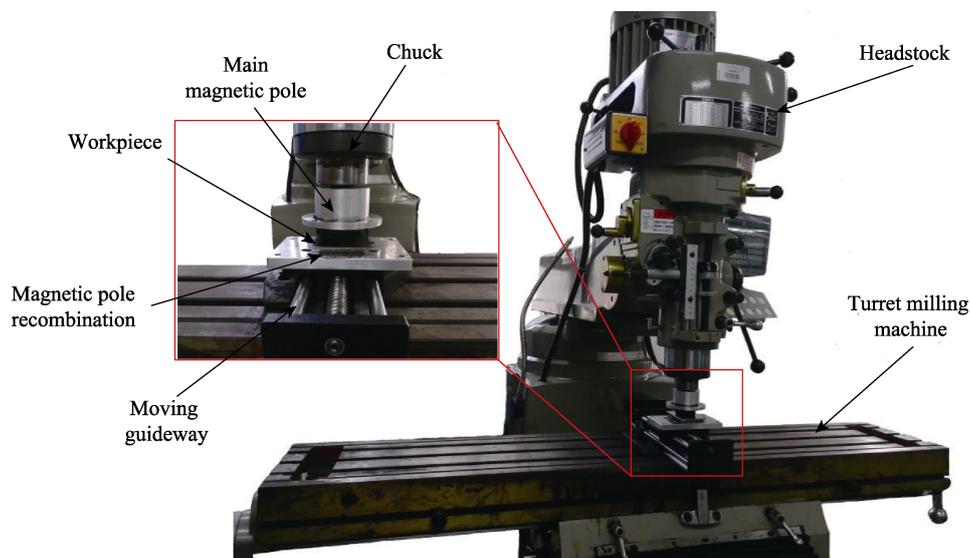


图 6 磁粒研磨加工装置图

Fig.6 Diagram of magnetic abrasive lapping device

本次试验条件如表 2 所示。研究对象为 SUS 304 不锈钢材质，材料普遍易得，且加工、使用范围广泛，较钛合金等难加工材料而言，加工时间较短，便于试验的快速进行。磁极固定于炮塔铣床后，将 12 g 研

磨粒子与水基研磨液以质量比为 3:1 的比例混合，吸附于 $\phi 25\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 的加工磁极表面，并与置于复合磁极上的工件表面保持 2 mm 的加工间隙，加工磁极与复合磁极中的辅助磁极和磁化铸铁形成新的磁回路，可减小磁回路距离，增大研磨压力。加工磁极随主轴旋转运动，配合工件下方纵向滑台的进给运动，可优化平板表面加工轨迹，研磨 20 min 后，实现对工件表面的精密加工。

表 2 试验条件
Tab.2 Experimental condition

Project	Parameter
Magnetic pole	Nd-Fe-B: $\phi 25\text{ mm} \times 9\text{ mm}$
Magnetic pole recombination	Nd-Fe-B: $\phi 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$
Workpiece	SUS 304 stainless steel
Magnetic abrasive	Average particle size 150 μm
Spindle speed	450 r/min
Machining gap	2 mm
Feed rate	2 mm/s
Lapping liquid	Water base lapping fluid

4 结果与分析

图 7 为使用 VHX-500F 超景深 3D 电子显微镜拍摄的工件研磨前后表面微观形貌。由图 7a 可观察到，工件原始表面存在黑色凹坑斑点和较大尺寸的划痕，依据表面粗糙度曲线及 R_{mr} 数值由 2.659 μm 减少到 1.206 μm ，观察到原始表面划痕较深，凸起较少。图

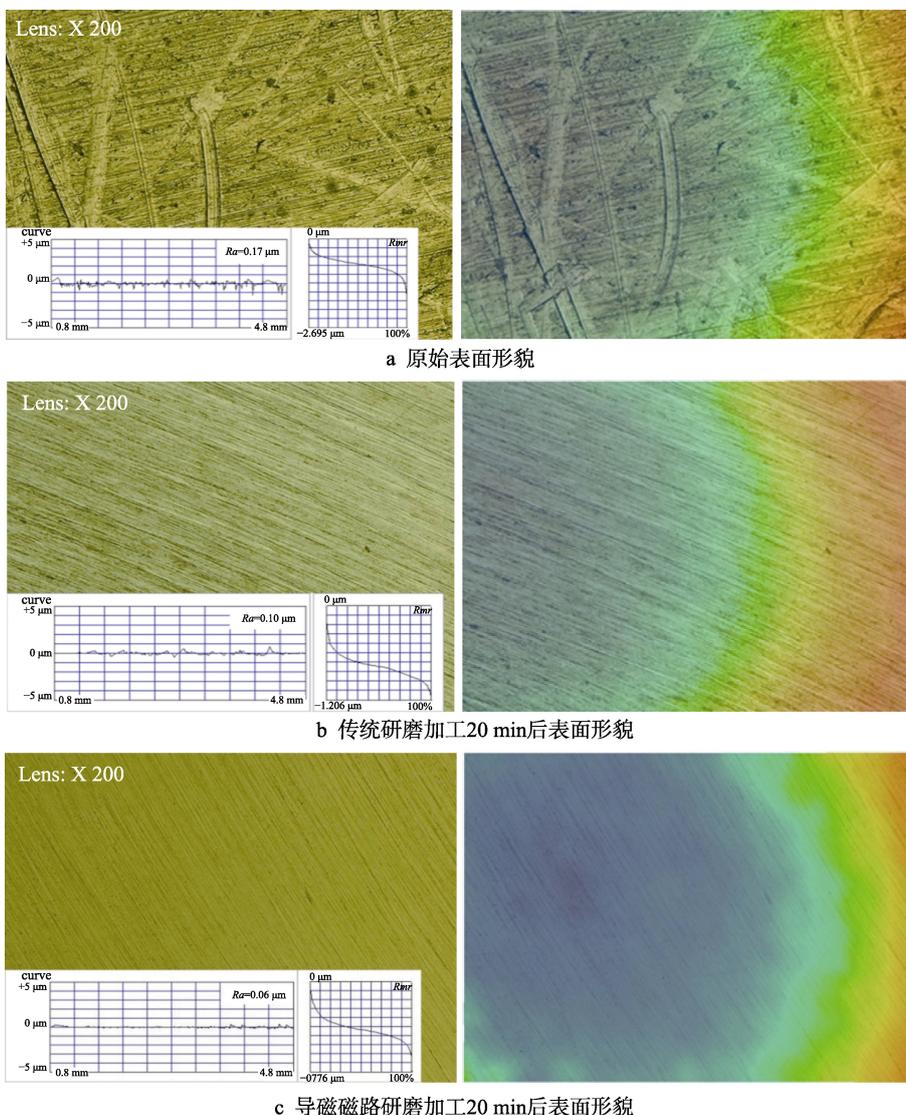


图 7 SUS 304 不锈钢板件研磨前后的对比图

Fig.7 Comparison diagram of SUS 304 stainless steel plate before and after lapping: a) original surface morphology; b) surface morphology after 20 min traditional lapping; c) surface morphology after 20 min magnetic circuit lapping

7b 为传统加工工艺加工 20 min 后,发现 Ra 值由加工前的 $0.17\ \mu\text{m}$ 降至 $0.1\ \mu\text{m}$,表面粗糙度改善率为 41%,磁粒研磨工艺对工件表面进行微量切削,使得工件表面与划痕底部的距离减少,去除了部分材料。图 7c 为使用复合磁极的导磁磁路加工 20 min 后,表面粗糙度曲线波动较小, Rmr 数值由 $2.659\ \mu\text{m}$ 减少到 $0.776\ \mu\text{m}$,表面原始加工划痕更为平整,划痕高度差减小,表面粗糙度改善率相较原始平面为 65%,有效地改善了平面表面微观形貌。

图 8 为传统磁粒研磨与复合磁极导磁磁路加工后的实物图。观察图 8a 表面,较周围原始表面出现光亮表面,但未出现镜面效果。观察图 8b 表面可得,经导磁磁路加工后的研磨区域较传统研磨加工变大,且呈现镜面效果,工件表面质量得到很大的改善。



图 8 不同磁路加工研磨前后质量对比图

Fig.8 Quality comparison of before and after different magnetic circuit lapping: a) traditional magnetic circuit; b) magnetic circuit lapping

5 结论

1) 使用复合磁极导磁磁路研磨工件表面,经过 20 min 研磨后,工件表面划痕深度变浅,表面粗糙度改善率较原始达到 65%,较传统研磨加工达到 40%。研磨加工表面质量好,对工件表面的划痕、凹坑、斑点等达到了良好的去除,加工表面获得镜面效果,加工质量及加工效率明显高于传统研磨加工。

2) 通过对磁回路模拟分析,复合磁极加工方式的磁感应强度强于传统磁粒研磨加工,且具有明显的对称磁场梯度,有利于研磨加工中磨粒的自我更新,并能减少磨粒因离心力等飞离加工区域而造成研磨区域较小、表面质量下降、研磨效率较低的现象。

3) 等效磁路法能对磁回路形成的有效加工区域磁感应强度数值进行计算,形成线性回归方程,因此可通过此方法对确定的磁回路进行磁极保持间隙、磁

极尺寸、磁极数量等进行计算,能有效地减少试验及模拟过程。

参考文献:

- [1] 张龙龙, 焦安源, 陈燕, 等. 磁粒复合研磨 SUS304 不锈钢孔道的机理与试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 259-266.
ZHANG Long-long, JIAO An-yuan, CHEN Yan, et al. Mechanism and experimental study of SUS304 stainless steel hole by magnetic particle compound grinding[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 259-266.
- [2] XIE Hui-jun, ZOU Yan-hua, DONG Chao-wen, et al. Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field: Investigation of mechanism and applied to aluminum alloy plate[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 102(5-8): 1509-1520.
- [3] 梁伟, 张桂香, 张鹏, 等. 磁力研磨光整加工 ZrO_2 陶瓷材料试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 310-316.
LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, et al. Experimental research on magnetic abrasive finishing for ZrO_2 ceramic materials[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 310-316.
- [4] 阎秋生, 李基松, 潘继生. 熔融石英玻璃衬底的平面研磨加工实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(1): 60-65.
YAN Qiu-sheng, LI Ji-song, PAN Ji-sheng. Experimental research on plane lapping of fused silica glass substrate[J]. Diamond & abrasives engineering, 2019, 39(1): 60-65.
- [5] 陈燕, 曾加恒, 胡玉刚, 等. 超声复合磁力研磨加工镍基合金 GH4169 异形管[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 118-124.
CHEN Yan, ZENG Jia-heng, HU Yu-gang, et al. Special-shaped pipe of nickel based alloy GH4169 by ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing[J]. China surface engineering, 2018, 31(6): 118-124.
- [6] VAHDATI M, RASOULI S A. Study of magnetic abrasive finishing on freeform surface[J]. Transactions of the IMF, 2016, 94(6): 294-302.
- [7] 康璐, 陈燕, 严正伟, 等. SiC-Fe 磁性研磨粒子的制备工艺和研磨性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(4): 53-57.
KANG Lu, CHEN Yan, YAN Zheng-wei, et al. Preparation process and grinding properties of SiC-Fe magnetic abrasive particles[J]. Ordnance material science and engineering, 2018, 41(4): 53-57.
- [8] 张龙龙, 焦安源, 陈燕, 等. 磁粒研磨 Al 2024 细长管的机理及试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 303-309.
ZHANG Long-long, JIAO An-yuan, CHEN Yan, et al. Mechanism and experimental study of Al2024 slender tube by magnetic particle grinding[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 303-309.

- [9] 李龙邦. 基于螺旋磁场的弯管内表面磁粒研磨研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019.
LI Long-bang. Magnetic abrasive finishing on the inner surface of the tube based on spiral magnetic field[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2019.
- [10] CHANG G W, YAN B H, HSU R T. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2002, 42(5): 575-583.
- [11] TIAN Ye-bing, SHI Chen, FAN Zeng-hua, et al. Experimental investigations on magnetic abrasive finishing of Ti-6Al-4V using a multiple pole-tip finishing tool[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 106(7-8): 3071-3080.
- [12] 程淼, 陈松, 赵杨, 等. 双磁极式磁粒研磨机理分析及试验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 81-89.
CHENG Miao, CHEN Song, ZHAO Yang, et al. Mechanism analysis and experimental study of dual magnetic pole magnetic particle grinding[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 81-89.
- [13] KALA P, SHARMA V, PANDEY P M. Surface roughness modelling for double disk magnetic abrasive finishing process[J]. Journal of manufacturing processes, 2017, 25: 37-48.
- [14] 刘顺, 韩冰, 陈燕, 等. 超声磁粒复合研磨对石英玻璃管内表面的光整研究[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 265-270.
LIU Shun, HAN Bing, CHEN Yan, et al. Inner surface finishing of quartz glass tube by ultrasonic magnetic particle composite grinding[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 265-270.
- [15] 陈燕, 周锟, 牛凤丽, 等. 航空发动机整体叶盘磁力研磨光整实验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2323-2330.
CHEN Yan, ZHOU Kun, NIU Feng-li, et al. Experiment of surface finishing on aero-engine blisk by magnetic abrasive finishing[J]. Journal of aerospace power, 2015, 30(10): 2323-2330.
- [16] 张鹏, 张桂香, 梁伟, 等. 磁力光整加工铝镁合金永磁极研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(11): 1324-1328.
ZHANG Peng, ZHANG Gui-xiang, LIANG Wei, et al. Research on magnetic abrasive finishing processes of aluminum-magnesium alloy permanent magnet poles[J]. China mechanical engineering, 2018, 29(11): 1324-1328.
- [17] ZOU Yan-hua, XIE Hui-jun, ZHANG Yu-long. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 109(7-8): 1825-1839.
- [18] 王方. 钕铁硼永磁材料发展探究[J]. 甘肃科技纵横, 2018, 47(8): 44-47.
WANG Fang. Research on development of Nd-Fe-B permanent magnet materials[J]. Scientific & technical information of Gansu, 2018, 47(8): 44-47.
- [19] 陈彦臻, 胡以怀, 袁春旺, 等. 爬壁机器人永磁吸附轮的磁路及结构设计分析[J]. 制造业自动化, 2019, 41(6): 83-87.
CHEN Yan-zhen, HU Yi-huai, YUAN Chun-wang, et al. The analysis of magnetic circuit and structural design of permanent magnetic adsorption wheel on climbing robot[J]. Manufacturing automation, 2019, 41(6): 83-87.
- [20] 张兆亮. 磁化处理对金属材料摩擦磨损性能影响的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2004.
ZHANG Zhao-liang. Effect of magnetization on the tribological properties of metal material[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2004.
- [21] 沈俊波. 激光-电磁场复合强化提升45钢硬度和耐磨性能的研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
SHEN Jun-bo. The research of laser-electromagnetic field coupling strengthening improving hardness and wear resistance properties of 45 steel[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [22] MOSAVAT M, RAHIMI A, ESHRAGHI M J, et al. Nano-finishing of the monocrystalline silicon wafer using magnetic abrasive finishing process[J]. Applied optics, 2019, 58(13): 3447-3453.
- [23] NATSUME M, SHINMURA T. Study on the mechanism of plain magnetic abrasive finishing process (elucidation of normal force characteristics)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers series C, 2008, 74(737): 212-218.
- [24] 陈春增, 张桂香, 赵玉刚. 磁力研磨加工的永磁极结构优化设计[J]. 现代制造工程, 2017(1): 7-11.
CHEN Chun-zeng, ZHANG Gui-xiang, ZHAO Yu-gang. Simulation design of permanent magnetic pole on magnetic abrasive finishing[J]. Modern manufacturing engineering, 2017(1): 7-11.
- [25] 李文龙, 陈燕, 吕旖旎, 等. 聚磁盘形状对磁粒研磨加工管件内表面的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 354-359.
LI Wen-long, CHEN Yan, LYU Yi-ni, et al. Influence of shape of aggregate magnetic iron plate on inner surface of pipe by magnetic abrasive finishing[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 354-359.