

# 永磁交变磁场磁粒研磨装置及试验研究

闫宇航, 王清阳, 王荟江, 安麟柏, 王本禹, 韩宇阳, 姜佳琦, 丁云龙\*, 韩冰  
(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

[摘要] 为改善平面磁粒研磨加工的效果, 增强磁场的变化, 使磨料进行翻滚更新。本文设计一种永磁交变磁场磁粒研磨装置, 此装置采用了永磁交变磁极产生的交变磁场进行磁粒研磨加工。利用软件对永磁交变磁场进行模拟仿真, 并观察研磨区域磁感应强度的变化。在研磨试验中, 用 SUS304 不锈钢板件作为试验件, 研磨时间为 30 min, 磁性磨料粒径为 80 目, 主轴转速分别为 150 r/min、200 r/min、250 r/min。使用超景深显微镜与触针式粗糙度测量仪对工件加工前后的表面形貌与粗糙度进行检测。通过对比可得, SUS304 不锈钢板的表面形貌逐渐改善, 纹理和凹坑基本去除; 表面粗糙度由原始的  $0.329 \mu\text{m}$  降至  $0.069 \mu\text{m}$ , 达到了光整加工的效果。采用永磁交变磁场磁粒研磨装置可以加快磁性磨粒的更新, 使研磨轨迹更加复杂化, 从而提升研磨效果, 提高研磨效率。

[关键词] 磁粒研磨; 永磁交变磁场; SUS304 不锈钢; 表面粗糙度; 研磨装置; 模拟仿真; 光整加工

[中图分类号] TH6 [文献标志码] A [文章编号] 1003-8884(2024)01-0032-04

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.01.005

## 0 引言

磁粒研磨加工技术 (Magnetic Abrasive Finishing) 是一种先进的光整加工技术, 原理上适用于许多几何形状的表面研磨光整加工, 可以广泛应用于机械加工、汽车制造、航空航天、医疗器械等各个领域<sup>[1-3]</sup>。

在磁粒研磨加工的过程中, 通过控制研磨时间和磨料目数等因素, 达到所需的精度和表面质量<sup>[4]</sup>。磁粒研磨加工中使用磁极吸附磨料, 磨料聚集后磁极旋转形成柔性磨粒刷在工件表面旋转磨削, 实现对工件表面的光整加工<sup>[5-7]</sup>。还可以使用磁力研磨机等设备, 使工件与磁性材料在磁场中旋转、碰撞, 对工件进行研磨加工, 可以有效去除工件

表面的氧化膜、划痕和其他缺陷, 达到磨削抛光效果<sup>[8]</sup>。但磁粒研磨加工技术仍有需要改进之处。如, 永磁体产生的一般为静磁场, 磁场强度与梯度一定, 磨粒易受到磁力的作用而聚在一起不能自由翻滚更新, 导致研磨效果不佳, 加工完成后的表面存在不均匀等缺陷<sup>[9-12]</sup>。

为了解决这一问题, 本文对永磁交变磁场磁粒研磨装置设计及 SUS304 不锈钢板研磨加工进行研究。通过永磁交变磁场中磁力线的引导, 使磨料进行翻滚更新, 运动轨迹复杂化, 提高研磨效率及试件的表面质量。

## 1 试验装置建立

### 1.1 试验装置的结构

交变磁场平面磁粒研磨装置如图 1 所示, 包括主轴进给装置、 $x-y$  轴移动滑台、交变永磁极等。通过控制主轴转速, 进而控制交变永磁极磁场频率和极性。交变永磁体通过联轴器与电机相连, 提供  $z$  轴的进给, 进而控制研磨压力。所述的主轴进给装置包括手摇轮、 $z$  轴移动滑台、电机、电机支架等。通过转动手摇轮调节电机上下进给, 进而改变研磨间隙和研磨压力; 使用电机调节研磨转速, 能够控制研磨效率及永磁交变频率。

$x-y$  轴移动滑台控制工件沿  $x$  轴和  $y$  轴做往复

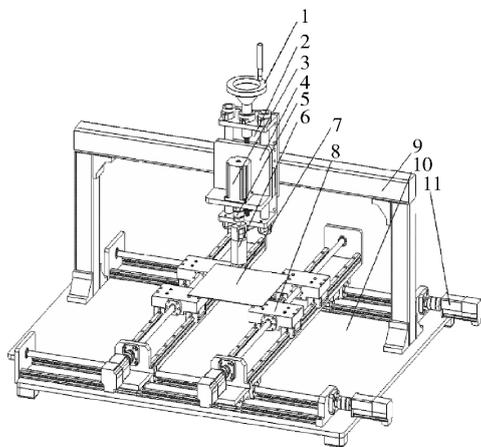
[收稿日期] 2023-11-26

[第一作者] 闫宇航 (2000—), 男, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 主要从事磁粒研磨光整加工方向的研究。

[通信作者] 丁云龙 (1988—), 男, 吉林农安人, 副教授, 博士, 主要从事磁粒研磨光整加工方向的研究。

[基金项目] 辽宁省教育厅科学研究经费项目 (2019LNQN01); 辽宁省科技厅博士启动经费 (2021-BS-241)。

[引用格式] 闫宇航, 王清阳, 王荟江, 等. 永磁交变磁场磁粒研磨装置及试验研究[J]. 有色设备, 2024, 38(1): 32-35+49.



1. 手摇轮;2. Z轴滑轨;3. 电机;4. 电机连接板;5. 联轴器;6. 永磁交变磁极;7. 工件;8. 导轨;9. 龙门架;10. 工作台底座;11. 电机

图1 平面交变磁粒研磨试验装置

运动,从而使工件表面可以被均匀的研磨。交变永磁极的部分包括上部固定导磁支架、下部旋转交变研磨头、环形径向磁铁

### 1.2 试验装置的工作原理

研磨机装置在主轴旋转时,带动永磁极下部的旋转交变研磨头,与上部固定的导磁支架产生相对旋转运动,进而出现了磁力回路产生的有无及极性的转变情况,交变永磁研磨头的原理图如图2所示。

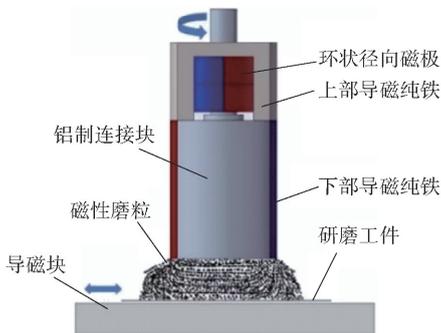


图2 交变永磁研磨头原理

加工区域内沿磁感线分布的磁性磨料会进行旋转翻滚更新的周期性变化,主动加快研磨时磁性磨粒的循环,使磁性磨粒能够得到充分、高效利用,从而提升研磨效率及效果。

## 2 交变永磁极仿真与磁感应强度分布

通过建模软件绘制出交变永磁极的基本模型,环形径向磁极的外径为 30 mm、厚度为 10 mm;上下 2 个导磁纯铁的厚度为 10 mm;磁极整体外径为

50 mm、高度为 100 mm。导出模型到磁场仿真软件,定义材料,磁场类型设置为瞬态场,将仿真得到的永磁交变磁极的两种研磨状态进行讨论。首先对整个永磁交变磁极对外不显磁性时的状态进行分析,把永磁交变磁极下部环形径向磁极的磁力方向进行调转,改变了永磁交变磁极上部与下部磁力方向,使其不同,从而呈现出对外不显磁性时的状态,如图3所示。再将下部环形径向磁极的磁力方向进行调转,改变永磁交变磁极上部与下部磁力方向,使其相同,从而整个永磁交变磁极呈现出对外显磁性时的状态,如图4所示。

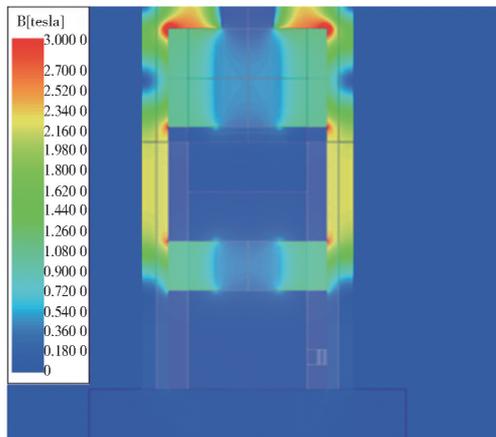


图3 对外不显磁性时永磁交变磁场云图

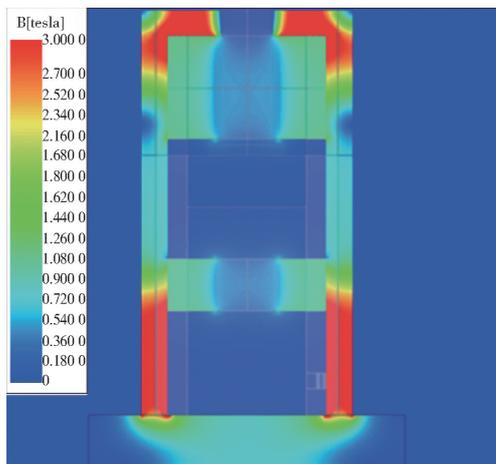


图4 对外显磁性时永磁交变磁场云图

从图3、图4中可以看出永磁交变磁极在显磁性与不显磁性时的状态。在不显磁性时,磁性最强的部分主要集中在内部以及上部,对外磁场很小,几乎为零。在显磁性时,内部环形径向磁极的磁力沿着纯铁与外部形成了一个磁感线通路,此时为永磁

交变磁极的场强峰值状态。

### 3 试验条件与试验结果

#### 3.1 试验参数

试验条件如表 1 所示,工件为 SUS304 不锈钢平板,长宽尺寸 150 mm × 150 mm。为防止研磨中产生热量过高,使用水基研磨液进行散热降温,而且具有一定的润滑性,在保证磁性磨粒的磨削去除量的基础上,又一定程度减少了划痕。另外磁性磨料目数选择 80 目。由于永磁交变磁极在研磨过程中交变时会有一瞬间对外不显磁性,因此磁性磨料会因受到离心力的作用被甩离研磨区域,所以经过反复试验验证,在转速为 250 r/min 时磁性磨料可以保持团聚状态,所以将转速区间选取为 250 r/min 以下。依次取 150 r/min、200 r/min 与 250 r/min,由于永磁交变磁极完成一次显磁性和不显磁性的过程为

一个周期,所以一个周期磁极转动 1 周,算出对应的交变频率分别为 2.5 Hz、3.33 Hz、4.16 Hz。设置研磨时间为 30 min,使用超景深显微镜与触针式测量仪观察表面形貌并且测量粗糙度。

表 1 试验参数表

名称	参数值
工件材料	SUS304 不锈钢
磁极头材料	电工纯铁
工件尺寸/(D/mm)	150 × 150
原始粗糙度/(Ra/μm)	0.3
加工间隙/(d/mm)	1.5

#### 3.2 试验结果

在研磨时间为 30 min,磨料目数为 80 目的条件下,取主轴转速分别为 150 r/min、200 r/min 与 250 r/min 研磨前后的表面形貌如图 5 所示。

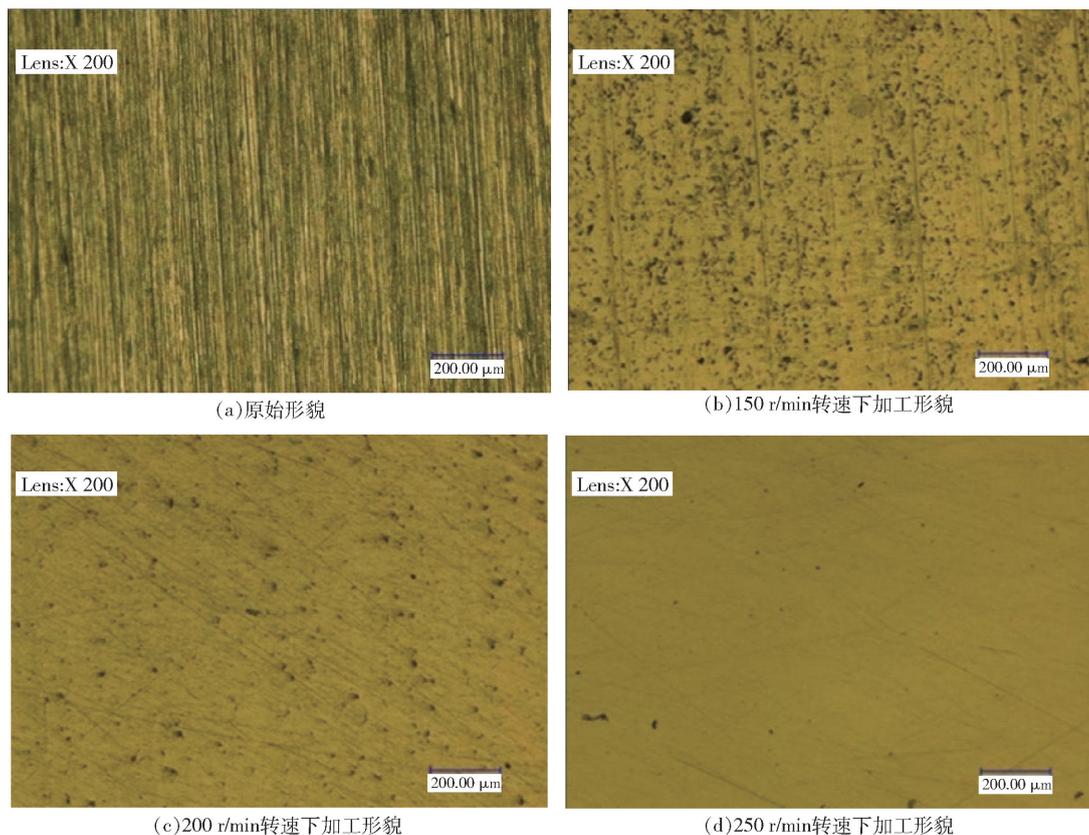


图 5 试件研磨前后表面形貌

从图 5 中可以看出在磨料目数为 80 目,研磨时间 30 min,随主轴转速提高,工件的表面形貌逐渐变好,能明显看出划痕逐渐减少,且比较均匀。证明其

研磨轨迹随着交变磁场而变得复杂化。

从图 6 可以看出,在主轴转速为 250 r/min 的条件下加工后,工件的表面粗糙度由 0.329 μm 降低至

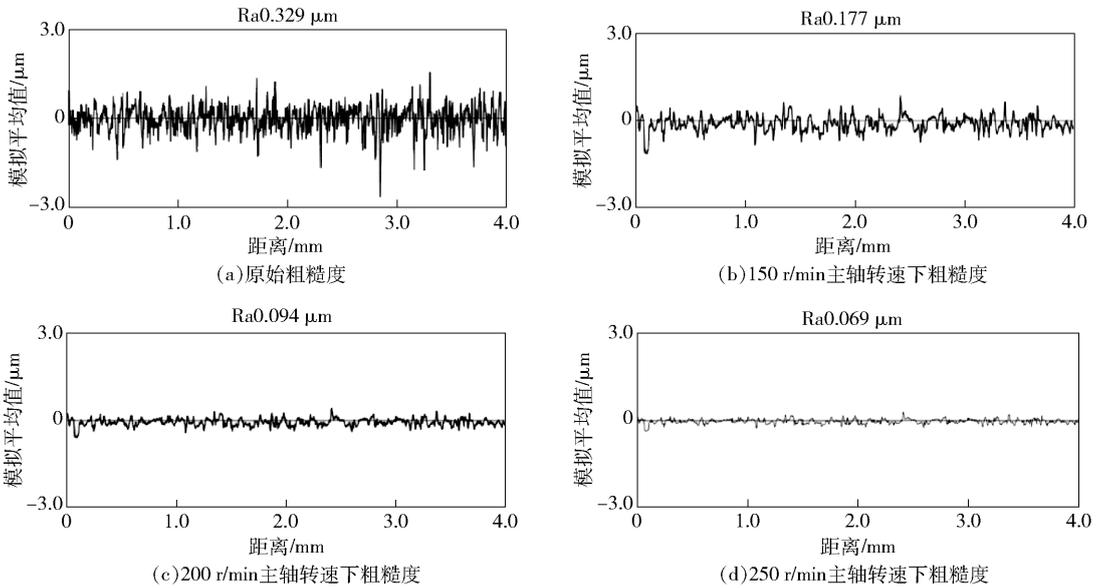


图6 加工前后粗糙度曲线

0.069  $\mu\text{m}$ , 工件表面具有更好的表面质量。

## 4 结论

1) 验证了永磁交变磁场平面磁粒研磨装置能够有效控制永磁交变频率,  $x-y$  轴移动滑台控制工件沿  $x$  轴和  $y$  轴做往复运动, 从而使工件表面可以被均匀地研磨。

2) 通过模拟软件对永磁交变磁极的仿真, 探究了永磁交变磁极由对外显磁性的峰值向对外不显磁性的转变过程, 产生的永磁交变磁场带动磁性磨粒运动使其运动轨迹更为复杂, 使得磨料翻滚更新, 提高磨料的利用率, 在磨料目数为 80 目, 研磨时间为 30 min 时, 主轴转速为 250 r/min 得到的表面质量最好, 进一步提高了加工效率。

3) 通过试验得出, 在磨料目数与研磨时间一定时, 不同的转速和频率对工件表面的粗糙度影响较大。经过对比可得出, 永磁交变磁极在磨料目数为 80 目, 研磨时间为 30 min, 主轴转速为 250 r/min 时, SUS304 不锈钢板的表面形貌达到最佳。

### [参考文献]

[1] 杨欢, 陈松, 张磊, 等. 脉冲电磁场辅助平面磁粒研磨加工试验[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 313-321.  
 [2] 刘文浩, 陈燕, 李文龙, 等. 磁粒研磨加工技术的研究进

展[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 47-61.  
 [3] 刘文浩, 陈燕, 张东阳. 基于低频交变磁场的陶瓷管内表面磁力研磨加工[J]. 中国表面工程, 2021, 34(5): 147-154.  
 [4] 舒坤, 孙岩, 陈燕. 超声振动辅助磁粒研磨技术的研究进展[J]. 振动与冲击, 2023, 42(6): 39-54+78.  
 [5] 潘明诗, 陈燕, 张东阳. 仿形磁头对电磁研磨管件内表面形成的影响[J]. 中国表面工程, 2022, 35(6): 274-285.  
 [6] 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.  
 [7] 李奎, 韩冰, 朱子俊, 等. 磁粒研磨中单颗磁性磨粒磁场力的实验研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(5): 15-22.  
 [8] 杨欢, 陈松, 马瑞, 等. 磁力研磨法去除复杂轮廓蒙皮微孔边缘毛刺[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 342-351.  
 [9] 尹义蕾. 旋转永磁场光整加工磁场发生装置设计及其实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.  
 [10] 孙岩, 兰勇, 杨海吉, 等. 双向复合振动辅助磁力研磨加工的试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 125-131.  
 [11] 杜兆伟, 陈燕, 周锟, 等. 磁力研磨法对整体叶盘的抛光工艺研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(20): 93-95+100.  
 [12] 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.

(下转第 49 页)

improve its dynamic characteristics, topology optimization method was used for lightweight design of the ram structure, and a comparative analysis was conducted on the structure before and after optimization. After the final optimization, the mass of the ram was reduced by 31%, and the first-order natural frequency increased by 22.4%. This study not only improves the dynamic performance of the machine tool ram components, but also achieves lightweight design of the ram components. This method lays the foundation for the optimization design of other key components and the whole machine of this type of machine tool.

**Key words:** high-speed vertical five axis machining center; ram; lightweight design; topology optimization; dynamic performance ▲

(上接第 35 页)

## Study on magnetic particle grinding device with permanent magnet alternating field and experiments

YAN Yuhang, WANG Qingyang, WANG Huijiang, AN Linbai, WANG Benyu,  
HAN Yuyang, JIANG Jiaqi, DING Yunlong, HAN Bing

**Abstract:** In order to improve the effect of planar magnetic abrasive finishing, the change of magnetic field is enhanced to make the abrasive roll and renew. In this paper, a magnetic particle grinding device with permanent magnet alternating field was designed. The device uses the alternating magnetic field generated by the permanent magnet alternating pole for magnetic particle grinding processing. Software was used to simulate the permanent magnet alternating magnetic field and observe the change of magnetic induction intensity in the grinding area. During the grinding experiment, SUS304 stainless steel plate was used as workpiece, grinding time is 30 min, magnetic abrasive particle size is 80 mesh, the spindle speed is 150 r/min, 200 r/min and 250 r/min. Surface morphology and roughness of the workpiece before and after grinding were compared by using ultra depth microscope and stylus roughness measuring instrument. By comparison, it can be concluded that surface morphology of SUS304 stainless steel plate is gradually improved, nearly all the texture and pits were removed. Surface roughness is reduced from the original 0.329  $\mu\text{m}$  to 0.069  $\mu\text{m}$ , and the effect of finishing is achieved. Usage of permanent magnet alternating magnetic field magnetic particle grinding device can speed up the renewal of magnetic particles, and make the grinding track more complicated, thus improving the grinding effect and grinding efficiency.

**Key words:** magnetic particle grinding; permanent magnet alternating magnetic field; SUS304 stainless steel; surface roughness; grinding device; simulation; finishing ▲