

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.03.008

## 零件表面磁力研磨抛光中磁场特性的仿真分析\*

范登胜

(闽西职业技术学院 智能制造学院, 福建 龙岩 364000)

摘要: 在磁力研磨的光整加工中, 很多加工因素对其研磨效率会产生影响。针对光整加工中加工参数的选取或优化通常依赖于经验或存在反复实验的问题, 该文选取平面、圆管内外表面、异形面作为研究对象, 利用 ANSYS Maxwell 软件对主要工艺参数(例如: 加工间隙、磁极形状、有无辅助磁极等)进行有限元分析。通过仿真获得了不同加工条件下的磁场状态及磁感应强度的变化规律, 为加工参数选取或优化的准确性提供了分析方法和理论参考依据。

关键词: 磁力研磨; 研磨效率; 工艺参数; 有限元分析

中图分类号: TG580.68

文献标识码: A

文章编号: 1007-4414(2024)03-0027-04

## Simulation Analysis of Parts Surface for Magnetic Field Characteristics in Magnetic Grinding and Polishing

FAN Deng-sheng

(School of Intelligent Manufacturing, Minxi Vocational and Technical College, Longyan 364000, Fujian, China)

**Abstract:** During the magnetic abrasive finishing (MAF) process, many machining factors will affect its finishing efficiency. Against the problem that selection or optimization of machining parameters always rely on experience or repeated experiments in MAF process, in this article, through selecting plane, inner and outer surface of circular tube and shaped surface as the research objects, the ANSYS Maxwell software is proposed to carry out finite element analysis on the main process parameters (such as machining gap, magnetic pole shape, auxiliary magnetic pole, etc.). The change rules in magnetic field state and magnetic induction intensity under different processing conditions are obtained through simulation. It provides an analytical method and theoretical reference for the accuracy of selection or optimization of machining parameters.

**Key words:** magnetic grinding; grinding efficiency; process parameters; finite element analysis

## 0 引言

随着制造技术的高速发展, 诸多领域中对零件表面的精度要求越来越高<sup>[1]</sup>。磁力研磨技术作为先进精密光整加工工艺的一种, 其加工原理是在强磁场作用下, 填充在磁场中的磁性磨料沿着磁力线的方向排列起来, 吸附在磁极上形成“磁刷”, 并对工件表面产生一定的压力。磁极在带动磨料旋转时, “磁刷”的磨料与工件表面产生相对摩擦, 从而实现对工件表面的光整加工<sup>[2]</sup>。此方法具有很强的自适应性, 可以根据加工区域的形状调整自身的形状以贴合加工表面, 其在复杂的异形面、圆管内外表面、平面等零部件的加工方面具有独特的优势。

国内磁力研磨加工技术研究开始于 20 世纪 80 年代中后期, 目前仍处于实验研究阶段, 实际应用较少。近年来, 一些研究单位自行研制出不同的磁力研磨实验装置, 并对轴承管道、钢管、螺纹环规、丝锥、电机轴、齿轮、阶梯轴、钢球等工件进行了研磨实验, 取得了较为理想的加工效果<sup>[3]</sup>。

我国对磁力研磨技术的研究仍处于试验研究阶段, 缺乏对其理论层面的研究。笔者首先利用有限元法对加工中的磁场特性进行分析, 一方面将该方法与试验相结合, 探究更优化的加工特性; 另一方面也可以通过该方法在一定程度上减少试验工作量。然后通过对平面、圆管内外表面、异形面三种典型工件进行磁力研磨加工, 并利用 ANSYS Maxwell 软件对主要工艺参数(例如: 加工间隙、磁极形状、有无辅助磁极等)进行仿真分析, 从而获得磁场状态及磁感应强度的变化, 并提取磁感应强度曲线图进行定量对比分析。该方法的应用对磁力研磨技术实现最优加工具有一定的工程价值。

## 1 磁力研磨加工原理

### 1.1 平面磁力研磨加工原理

平面磁力研磨原理图如图 1 所示。在平面工件上方一定距离处安装磁极, 工件放置于工作台上, 磁极和工件之间留有一定的间隙, 用于填充磁性磨粒, 磨粒在磁感线的作用下形成磁粒刷。主轴带动磁极

\* 收稿日期: 2023-10-08

基金项目: 福建省中青年教育科研项目: 磁力研磨去除微孔边缘毛刺的工艺研究(编号: JAT220746)。

作者简介: 范登胜(1986-), 男, 福建龙岩人, 实验师, 研究方向: 机械制造。

发生旋转运动,使得磁刷与工件相互摩擦,从而实现  
对工件表面的精密研磨加工。

### 1.2 圆管内表面磁力研磨加工原理

圆管内表面磁力研磨加工原理图如图2所示。  
在对非导磁或弱导磁性的圆管进行研磨时,在圆管外部  
固定安装一组呈90°的外部磁极。在圆管内部填入  
磁性磨粒,磁性磨粒按照磁感线的排布形式,形成  
具有一定强度和刚度的“磁刷”。当圆管旋转,外部  
磁极沿着管件轴向做往复运动时,圆管内部的“磁  
刷”被外部磁极吸附并沿圆管轴向做匀速往复运动,  
“磁刷”与圆管内表面形成一定相对运动,从而实现  
对圆管内表面的精密光整加工。

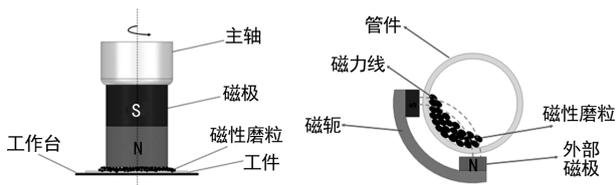


图1 平面磁力研磨原理图

图2 圆管内表面磁力研磨原理图

### 1.3 异形面磁力研磨加工原理

异形面磁力研磨加工的装置通常由磁极、磁性磨粒、工件等三部分组成,其研磨原理如图3所示。由于异形面抛光的磁极磨头大多为球面磨头,为了实现  
对复杂的自由表面的精密研磨加工,磁极底部与工件  
之间通常留有一定的间隙(1~3 mm),间隙主要是为了  
在磁极与工件之间填充  
磁性磨粒<sup>[4]</sup>。在磁力的作用  
下,磨粒被磁化,磨粒按  
照磁感线的排布形式,形  
成具有一定刚度的磁刷,并  
对工件表面施加一定的压  
力,沿着工件表面移动实  
现了对工件表面的研磨加  
工。

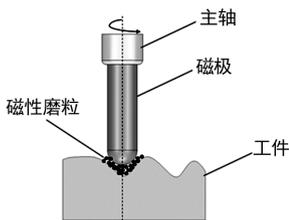


图3 异形面磁力研磨原理图

## 2 磁力研磨加工的模拟仿真

### 2.1 平面磁力研磨加工实验研究

#### 2.1.1 加工间隙的影响

加工间隙不仅会影响到加工区域的磁感应强度,也会影响到“磁刷”的刚度。当加工间隙过大时,加工区域的磁感应强度减弱,研磨压力降低,最终将导致工件表面粗糙度值增大;当加工间隙过小时,磁性磨粒就会划伤工件表面,从而导致工件表面粗糙度增大<sup>[5]</sup>。因此在磁力研磨加工过程中,应该根据研磨的实际需要来合理选择加工间隙的大小。

针对不同加工间隙的平面磁力研磨加工进行ANSYS Maxwell 仿真模拟,结果如图4所示。对比结

果表明:加工间隙为1 mm的磁感应强度最大,加工间隙为3 mm的磁感应强度最小,由此可见加工间隙越小,所得到的磁感应强度越大,研磨效率也越高。

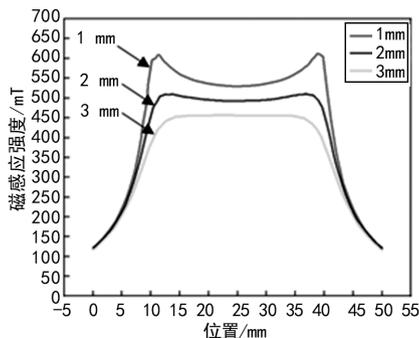


图4 加工间隙对磁感应强度的影响

#### 2.1.2 磁极形状的影响

针对不同磁极形状的平面磁力研磨加工进行ANSYS Maxwell 仿真模拟,结果如图5、6所示。通过仿真结果可以看出:表面开槽的磁极产生的磁感应强度明显大于表面未开槽的磁极,且开槽形状越复杂,产生的磁感应强度越强。

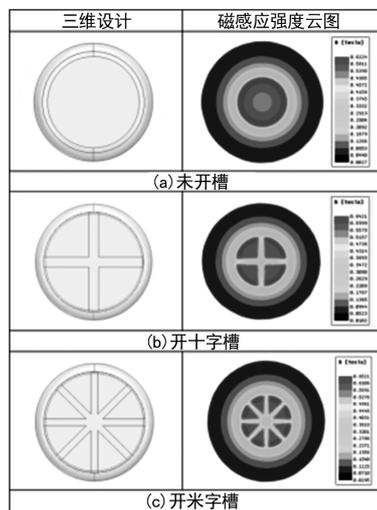


图5 磁极设计与磁感应强度分布云图

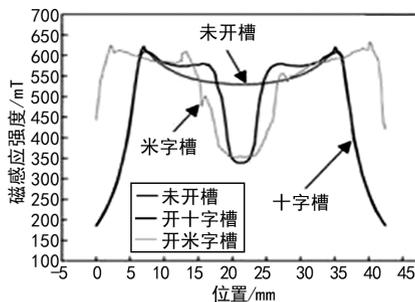


图6 磁感应强度曲线图

### 2.2 圆管内表面磁力研磨加工实验研究

#### 2.2.1 加工间隙的影响

在圆管内表面加工中,研磨间隙的大小对工件表

面粗糙度的影响关系与平面磁力研磨相似。针对不同加工间隙的圆管内表面研磨加工进行 ANSYS Maxwell 仿真模拟,结果如图 7、8 所示。分析可知:加工间隙为 7.95 mm 的磁感应强度最大;加工间隙为 9.95 mm 的磁感应强度最小。由此便可得出,当磁极与圆管工件的加工间隙越小,所得到的磁感应强度越大,研磨效率也随之越高。

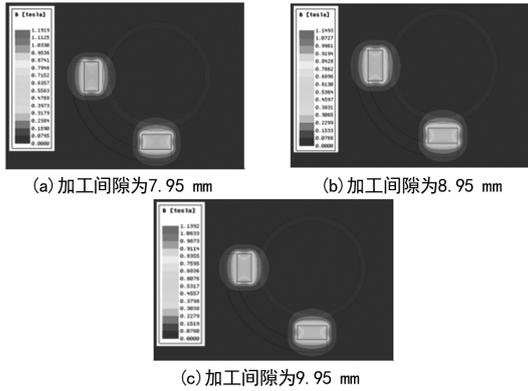


图 7 磁感应强度分布云图

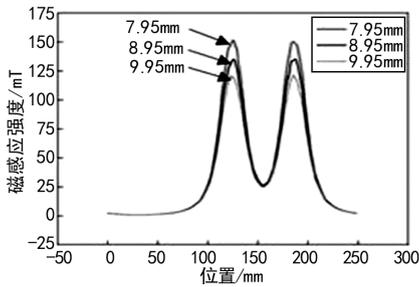


图 8 磁感应强度曲线图

### 2.2.2 辅助磁极的影响

进行圆管内表面磁力研磨加工时,在圆管内表面放入辅助的磁极,这时辅助磁极和外部磁极会形成一个“N-S-N-S”的闭合磁回路,如图 9 所示。随着加工范围内磁感线的数量的增加,加工范围内的磁场强度和研磨压力也随之增大。

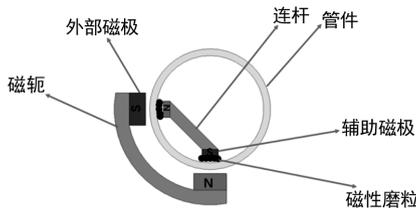


图 9 添加辅助磁极的圆管内表面磁力研磨加工原理

通过 ANSYS Maxwell 仿真软件对加工区域有无辅助磁极两种情况下的磁感应强度变化情况进行模拟分析,结果如图 10、11 所示。由图 10(a)可知,圆管内无辅助磁极情况下,加工范围内的磁场大部分是

由外部的磁极产生,两个呈 90°的外部磁极之间的相对距离较大,磁场分布更为分散,穿过圆管的磁感线数量偏少,产生的磁感应强度也较小,研磨压力也随着过小,从而导致加工效率较低。由图 10(b)可知,当圆管内添加了辅助磁极时,外部磁极与圆管内的辅助磁极距离较近,可以形成闭合磁场回路,磁场分布较为集中,穿过圆管的磁感线数量较多,产生的磁感应强度较大,研磨压力也随之增大,从而提高了加工效率<sup>[6]</sup>。

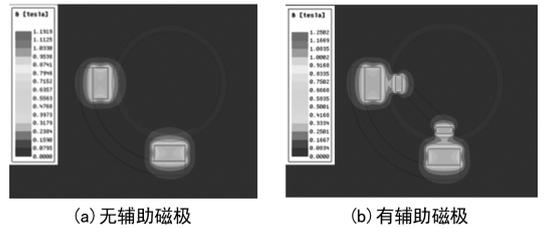


图 10 磁感应强度分布云图

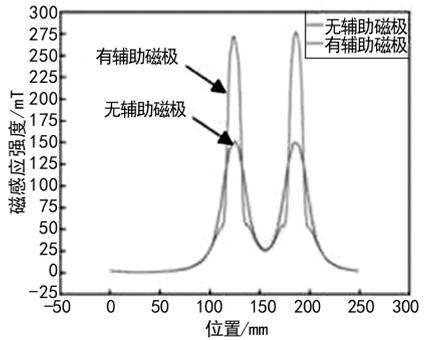


图 11 磁感应强度曲线图

## 2.3 异形面磁力研磨加工实验研究

### 2.3.1 加工间隙的影响

针对加工间隙的不同对异形面磁力研磨加工进行 ANSYS Maxwell 仿真模拟,结果如图 12 所示。

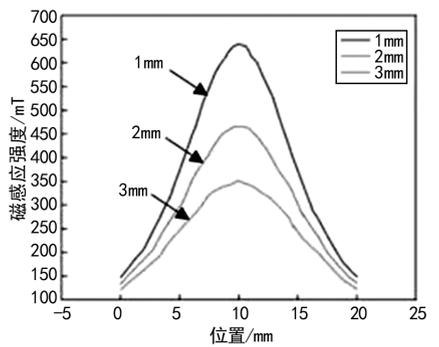


图 12 加工间隙对磁感应强度的影响

由仿真结果可知,在对异形面进行磁力研磨加工时,当加工间隙增加时,会使磁性磨粒的排布更加松散,同时也会使漏磁增加,从而使磁感应强度下降,最

终使研磨压力下降。

### 2.3.2 磁极形状的影响

对开不同形状槽的磁极进行 ANSYS Maxwell 仿真模拟分析,结果如图 13 所示。由磁感应强度曲线图分析可知,开槽后的磁极较之未开槽的磁极,磁极端面的磁感应强度较强,磁场的尖端效应会在磁极开槽之处形成较多的磁粒刷,从而提高研磨效率。

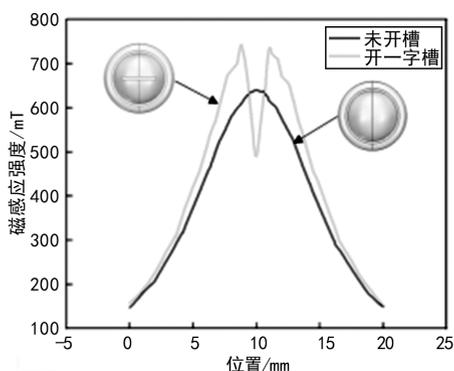


图 13 磁感应强度曲线图

## 3 结论

以平面、圆管内表面、异形面零件作为加工对象,利用 ANSYS Maxwell 仿真软件研究了磁力研磨法的主要参数(加工间隙,辅助磁极,磁极形状等工艺参数)对磁感应强度的影响,得到结论如下。

(1) 当加工间隙偏大时,加工区域的磁感应强度减弱,研磨压力降低,最终将导致表面粗糙度值增大;

相反的,当加工间隙偏小时,会划伤工件表面,从而导致工件表面的粗糙度值增大。因此,应该根据研磨的实际需要来合理选择加工间隙的大小。

(2) 加工圆管内表面时,当管内塞入辅助磁极,圆管的外部磁极与圆管内的辅助磁极会形成一个闭合的磁场回路。在工件加工范围内的磁场分布较为集中,穿过圆管的磁感线数量较多,产生的磁感应强度较大,研磨压力也随之增大,从而提高了加工效率。

(3) 采用表面开槽的磁极可通过提高磁感应强度来增加研磨压力。在磁场的尖端效应影响之下,将会产生更多的“磁刷”,从而使研磨的效率得到提升。

综上所述,文中通过有限元法对磁力研磨技术对不同零件的加工特性进行了理论分析,为该技术在未来的产业化提供了一定的理论支撑。

### 参考文献:

- [1] 徐立军,王 文,杨 诚.磁力研磨加工技术综述[J].组合机床与自动化加工技术,2003(1):43-45.
- [2] 赵玉刚,江世成,周锦进.新型的复杂曲面磁粒光整加工机床[J].机械工程学报,2000(3):101-103.
- [3] 张 雷,周锦进,金珠吉,等.磁力研磨加工技术[J].电加工,1998(1):38-43.
- [4] 马东雄,丁金福,李晓东.磁研法在模具曲面中的抛光机理与技术研究[J].机械设计与制造,2009(3):242-244.
- [5] 李长河,孙奕澎,蔡光起.自由磨粒复杂曲面磁力研磨光整加工试验研究[J].制造技术与机床,2005(5):72-75.
- [6] 包宝军.曲面数控研磨机床研究[D].陕西:西安理工大学,2009.

(上接第 26 页)

通 Ni60A 提高了 3 倍,可以满足一些高硬度领域的使用要求。

(5) 采用火花等离子烧结技术制备出块状非晶,在粉体非晶度的基础上进一步保证了非晶度。块状非晶在高硬度的同时耐腐蚀性得到了较大幅度的提高,相比较传统 Ni60A 合金耐腐蚀性提高了 10 倍,可以满足实际使用要求。

通过以上研究可以看出,铁基非晶合金粉末可以通过高压水雾化工艺进行制备,通过该工艺生产出的粉末具有较高的非晶度和良好的耐腐蚀性,表面硬度较高,能够在一些特殊领域实现其特殊的性能,可以满足军工、石油、化工、火电、水电、核电、汽车、海洋工

程等领域的防腐耐磨性能需求。

### 参考文献:

- [1] 史玉童.铁基非晶合金粉体气雾化制备数值模拟与实验研究[D].北京:中国科学技术大学,2022.
- [2] 毛 轩.冷喷涂铁基非晶合金涂层的制备及组织性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
- [3] 冯 再,陈 伟.水雾化法制备低硬度镍基合金粉末的研究[J].四川有色金属,2014(3):50-52.
- [4] 刘天豪,郭胜峰.铁基块体非晶合金的形成规律与力学性能研究进展[J].材料工程,2020,48(11):46-57.
- [5] 周震界.铁基非晶合金涂层设计制备及耐蚀耐磨性能研究[D].南京:东南大学,2022.
- [6] 赵晓飞.气雾化铁基非晶合金粉末的工艺优化与性能评价[D].沈阳:东北大学,2017.