

引用格式:刘冰洋,丁云龙,邵文杰,等.磁粒研磨加工技术的研究进展与创新方向[J].有色设备,2025,39(5):1-14.

LIU Bingyang, DING Yunlong, SHAO Wenjie, et al. Research progress and innovation direction of magnetic abrasive finishing processing technology[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(5): 1-14.

# 磁粒研磨加工技术的研究进展与创新方向

刘冰洋<sup>1,2</sup>, 丁云龙<sup>1,2\*</sup>, 邵文杰<sup>1,2</sup>, 马 龙<sup>1,2</sup>, 韩 冰<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;  
2. 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]** 磁粒研磨是一种先进的加工技术,适用于多种几何形状工件表面的精加工,具有残余应力分散、加工均匀性良好、自动化程度高等优点,加工完成后工件表面粗糙度能满足超精密零件的使用要求。本文介绍了磁粒研磨的加工原理,从 5 个方面综述了磁粒研磨加工技术的研究进展,包括磨料制备、磁极的形状和排布方式、仿真模拟以及不同加工技术和工件形状下的材料去除模型和粗糙度模型。对磁粒研磨中的数学模型进行了重点阐述,对建立材料去除模型的关键步骤进行了总结。结果发现:根据不同硬度的材料选用不同研磨相的磁性磨料可以更好地实现对工件的精密加工;对磁场、磨料运动轨迹仿真分析及多场耦合仿真分析可以预测加工中工件的受力大小、热力耦合、磨损情况和温度变化;磁极形状(瓦形、方形、马鞍形等)及磁极排布(N-N、N-S、N-S-N、Halbach 阵列等)、动态磁场(交变磁场、脉冲磁场等)决定这磨料的受力大小和运动情况;材料去除模型和粗糙度模型可精确地分析工艺参数对加工结果的影响,便于设定更加合适的试验参数。最后,对目前研究中存在的缺陷和不足进行了概括,对磁粒研磨技术的未来研究方向提出了建议。

**[关键词]** 磁粒研磨;磁性磨料;磁极排布;仿真模拟;材料去除模型;表面加工

**[中图分类号]** TH161 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)05-0001-14

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.05.001

## 0 引言

随着高端制造业的快速发展,更高的精度要求成为零部件的普遍要求<sup>[1]</sup>,提高精密零件的表面质量和降低表面粗糙度能显著增强其功能性、可靠性和寿命<sup>[2]</sup>。在机械领域,高精度轴承的光滑表面可减少摩擦和磨损,延长使用寿命<sup>[3-4]</sup>;在光学领域,纳米级粗糙度的镜片能避免光散射,确保激光设备的精准性<sup>[5]</sup>;在医疗领域,人工关节的超精密抛光表面可降低细菌附着风险并减少组织损伤<sup>[6-7]</sup>。此外,降低表面粗糙度还能改善密封性、耐腐蚀性和流体效率,从而全面提升产品性能并降低长期维护成本<sup>[8]</sup>。因此,精密与超精密加工技术成为航空航天、医疗器械、光学元件及半导体器件等领域的关键

支撑技术<sup>[9]</sup>。在众多表面精整工艺中,研磨加工因其能够实现纳米级表面粗糙度与亚微米级形状精度,被广泛用于关键零部件的最终表面处理<sup>[10]</sup>。在此背景下,磁粒研磨技术作为一种新型可控柔性加工方法,因其独特的磁场调控机制与加工适应性<sup>[11-13]</sup>,逐渐成为精密加工领域的研究热点<sup>[14-15]</sup>。

本文对近年来磁粒研磨技术的发展进行了总结概括,从磁粒研磨技术的加工原理、磁性磨料与制备、磁粒研磨技术的仿真模拟、磁极形状与排布、磁场复杂化和数学模型这些方面分析磁粒研磨技术的研究进展并对未来的研究提供了一些建议。

## 1 磁粒研磨的加工原理

磁粒研磨加工技术是指磨料在磁场的作用下形

**[收稿日期]** 2025-06-19

**[基金项目]** 辽宁省教育厅科研基金项目(LJ212410146074);辽宁省科技厅博士启动基金(2021-BS-241)。

**[第一作者]** 刘冰洋(2001—),男,河南平顶山人,硕士,主要研究方向为精密加工。

**[通信作者]** 丁云龙(1988—),男,吉林农安人,博士,副教授,主要研究方向为精密加工。

成“磁力刷”，利用其自身研磨相去除工件表面缺陷，实现精密加工的过程。常见的加工形式有管件内表面磁粒研磨和平面磁粒研磨，如图 1 所示<sup>[16-17]</sup>。因此，磁场和磨料是影响加工效果和加工效率的关键，为此不少学者围绕两者展开了研究。

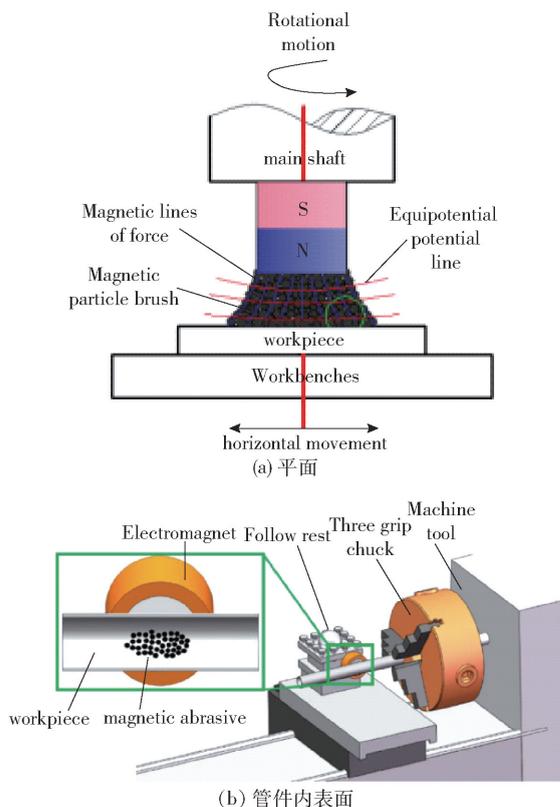


图 1 磁粒研磨加工示意<sup>[16-17]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic particle grinding processing<sup>[16-17]</sup>

## 2 磁性磨料与制备

磁性磨料作为磁粒研磨技术的加工工具，有着至关重要的作用。

### 2.1 传统磨料制备

磁性磨料的制备方法通常有烧结法、粘结法、雾化快凝法、机械合金法等<sup>[18]</sup>。Singh 等<sup>[19]</sup>对简单混合法、烧结法、机械合金法 3 种方法制备的磁性磨料性能进行了对比，结果表明磨料磁通密度的大小与其加工效率成正比，通过机械合金法制备的磨料的加工性能是简单混合法制备磨料的 2.25 倍。使用机械合金法制备磨料，当退火温度为 950 °C 时磨料的导磁性能最佳，当退火温度为 1 050 °C 时磨料的

加工性能最好<sup>[20]</sup>。丁叶等<sup>[21]</sup>通过粘结法制备了铁基碳化硼磁性磨料，改善了研磨相价格昂贵、硬度低等问题。不同配比下磨料能谱分析图如图 2 所示，其中绿色代表铁元素，红色代表硼元素，当物料与黏结剂量为 10:1 时，磨粒表面分布大量的碳化硼粉末，磨料状态最为理想。

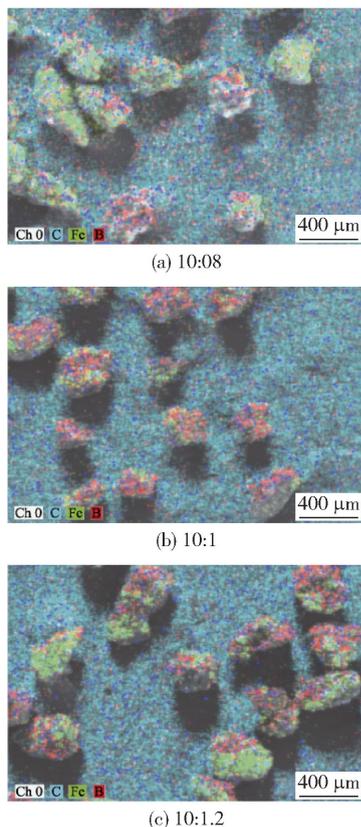


图 2 不同配比下磨料能谱分析图<sup>[21]</sup>

Fig. 2 Energy spectrum analysis of abrasives under different ratios<sup>[21]</sup>

### 2.2 新型磨料制备

Wang 等<sup>[22]</sup>提出了一种纳米颗粒增强型黏结磁性磨料的制备方法，有效地改善了粘结法制备的磁性磨料存在使用寿命短、黏结剂机械性能差等缺点。

为了对钛合金、陶瓷等高硬度材料表面进行精加工，Ahmad 等<sup>[23]</sup>通过烧结法制备了  $Al_2O_3-SiO_2$  磁性磨料，使用 Ti-6Al-4V 材料验证了其加工性能，烧结法制备磁性磨料是一种通过高温处理使磁性材料与磨料颗粒结合的技术工艺，其核心步骤包括将磁性金属粉末与硬质磨料颗粒按比例混合均匀，随后通过压制成型形成预制坯体，再置于高温炉中在保护气氛下进行烧结。在烧结过程中，金属颗粒间

发生扩散和冶金结合,形成多孔网状结构,同时将磨料颗粒牢固包覆或嵌入基体中<sup>[24]</sup>。Zhang 等<sup>[25]</sup>改进磨料制作方法,使用全新的磨料原材料比例制备出了新型铁基碳化硅复合磁性磨料,工件表面粗糙度降低至  $0.051\ \mu\text{m}$ 。磨料通过其研磨相去除工件表面缺陷,不同研磨相的磨料适配不同的工件材料<sup>[26]</sup>。因此,根据不同硬度的材料选用不同研磨相的磁性磨料可以更好地实现对工件的精密加工。

为了解决磁粒研磨技术加工不锈钢等不导磁材料管件内表面加工效率低的问题,Cheng 等<sup>[27]</sup>使用瓜尔胶作为介质制作凝胶磨料,有效地提高了加工后工件表面的均匀性和加工效率。在加工过程中,随着磁性磨料持续地研磨工件表面,其表面的研磨相会逐渐磨损脱落,导致磁性磨料失效<sup>[28]</sup>;磨料失效会导致加工效果下降,无法均匀地磨削工件表面,甚至造成工件表面粗糙度重新上升。在加工中,磨料失效需要及时更换磨料,以免影响加工效果,但这也延缓加工进程。为解决此问题,Xu 等<sup>[29]</sup>设计了一种加工液循环系统,在保持加工过程稳定性的同时保证了加工过程的连续性,SUS304 不锈钢表面粗糙度由  $273\ \text{nm}$  降低至  $23\ \text{nm}$ 。

### 3 仿真模拟

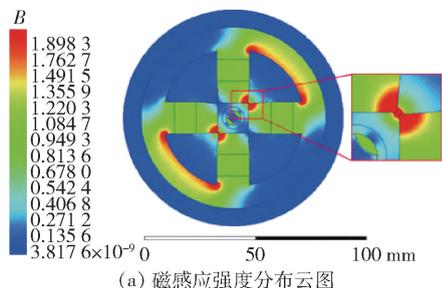
仿真分析可以预测加工中工件的受力大小、热力耦合、磨损情况和温度变化等,从而获得合适的工艺参数,提升加工效率,而且避免了大量的探究试验,节约材料和时间成本<sup>[30]</sup>。因此,在磁粒研磨加工技术的研究中,仿真模拟起着至关重要的作用。

#### 3.1 磁场仿真分析

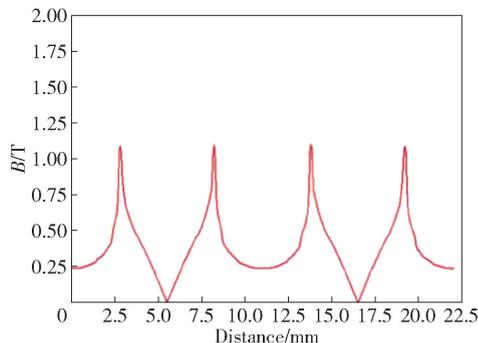
磁场强度的大小决定着磨料的受力情况,因此在合理的范围内磁场强度的大小与加工效率成正相关。陈燕等<sup>[31]</sup>通过 Maxwell 软件模拟了不同聚磁头产生的磁场强度的大小,仿真磁场云图与磁感应强度的分布情况如图 3 所示,磁场主要集中在聚磁头上。根据仿真结果得到最优的聚磁头锥度,将管件内的表面粗糙度由原始的  $0.48\ \mu\text{m}$  降低至  $0.12\ \mu\text{m}$ 。

#### 3.2 磨料运动轨迹仿真分析

磨料的运动轨迹对加工过程中的材料去除机理有着明显影响。在加工弯管零件中单一的磨料轨迹会导致加工不均匀,无法去除平行间隙内的缺陷。王硕等<sup>[32]</sup>使用 ADAMS 软件模拟了不同磁轭偏转



(a) 磁感应强度分布云图



(b) 磁感应强度随距离变化情况

图 3 聚磁头磁感应强度仿真结果<sup>[31]</sup>

Fig. 3 Simulation result of magnetic field under different assembled magnetic heads<sup>[31]</sup>

角度下磨料的运动轨迹,如图 4 所示。根据仿真结果选择了磨料运动轨迹覆盖率最高的磁轭偏转角度,加工完成后不仅完全去除了工件表面缺陷,加工效果相比于单一运动轨迹提高了 54%。

#### 3.3 多场耦合仿真分析

多个软件耦合仿真分析可以通过物理场协同、跨尺度贯通与算法互补,突破单一软件的理论与应用边界,实现对复杂系统的高精度、全维度映射。在 Maxwell 软件中可以对磁场强度进行精确的分析,但无法完整得到磨料与磁场之间的相互效应。为解决此问题,程海东等<sup>[33]</sup>使用 C++ 语言对 EDEM 软件内的磁场模型进行了二次开发,实现了 EDEM 软件中磨料在磁场的作用下与工件之间的接触模型、磨损模型等力学模型的开发。吴传宗等<sup>[34]</sup>基于此方法分析了磁场中磨料运动轨迹和加工效果与工件转速和加工间隙之间的关系,在最优参数的条件下将工件表面粗糙度由原始的  $1.251\ \mu\text{m}$  降低至  $0.187\ \mu\text{m}$ 。导入磁场后的离散元仿真模型如图 5 所示。

电磁铁由于其可控的优点广泛应用于磁粒研磨加工技术中,但其自身存在发热严重的缺陷,电磁铁温度的高低对其磁场强度大小有着重要影响。为探究其温度的变化,设计合理的散热装置,孙岩等<sup>[35]</sup>

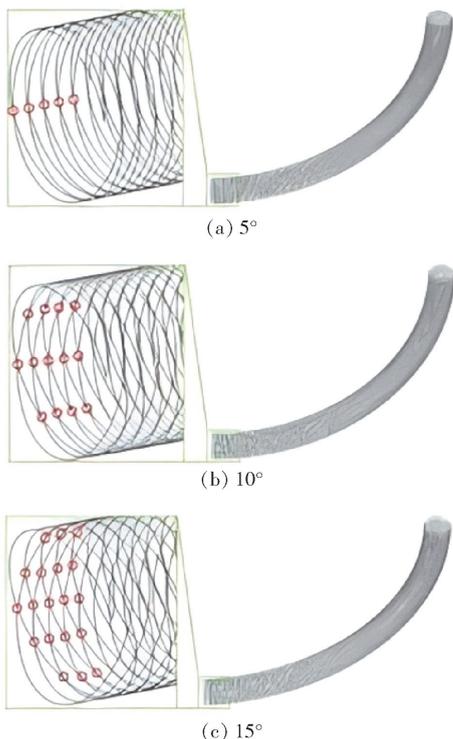


图 4 不同偏转角度下磨料的运动轨迹<sup>[32]</sup>

Fig. 4 Motion trajectory of abrasive under different deflection angles<sup>[32]</sup>

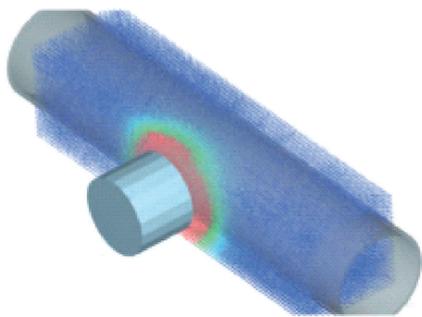


图 5 离散元仿真模型<sup>[34]</sup>

Fig. 5 Discrete element simulation model<sup>[34]</sup>

将 Maxwell 中的电磁损耗耦合到 Fluent 软件中,分析电流变化对电磁铁温度的影响并设计出合理的散热装置。电磁铁温度随时间变化与电流大小和散热装置的关系如图 6 所示。据仿真结果得出 3 A、3 Hz 为理想电流功率,此条件下电磁铁无需停机散热,提高了加工效率。理想电流和装置共同作用下磁铁温度云图如图 7 所示。

#### 4 磁场对磁粒研磨加工影响

磁场是磁粒研磨技术的核心参数,决定磨料的

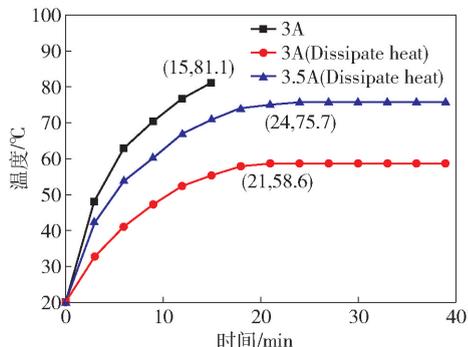


图 6 电磁铁温度变化图<sup>[35]</sup>

Fig. 6 Temperature variation diagram of electromagnet<sup>[35]</sup>

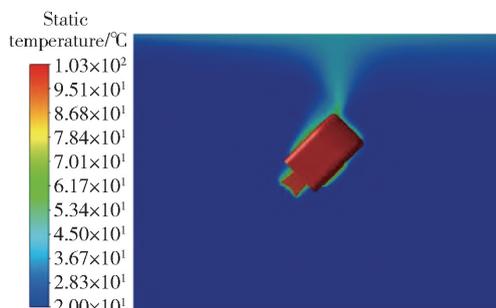


图 7 电磁铁温度云图

Fig. 7 Electromagnetic temperature cloud map

受力大小和运动情况。通常情况下,增大磁场强度可以提高磨料对工件的切削力,从而显著提高材料去除率。磁场的类型决定了工件表面的压力分布,是加工复杂工件表面、提高工件表面均匀性的关键。

#### 4.1 磁极形状

磁极形状可以改变加工区域的磁场梯度与强度分布,决定磁性磨粒刷的形态、刚度及对工件的压力分布。Li<sup>[36]</sup>等分析了不同磁极锥度的磁感应强度大小情况结果发现:当磁极头锥度为 0°时,磁感应强度的峰值为 625 mT;当磁极头锥度为 25°时,磁感应强度的峰值达到 800 mT;当磁极头锥度为 37°时最大磁感应强度仍在 800 mT,但此时磁感应强度变化较大,磁场梯度明显,更适用于磁粒研磨加工技术。不同磁极锥度下磁场强度模拟云图如图 8 所示。

王金龙等<sup>[37]</sup>使用瓦形磁极与普通磁极相结合的方式加工管件,形成了管内外的磁闭合回路。研究表明使用 2 个瓦形磁极时,加工后工件表面质量最好,工件表面粗糙度降低至 0.09 μm,与原始相比,表面粗糙度改善 78.57%。Heng 等<sup>[38]</sup>研究了

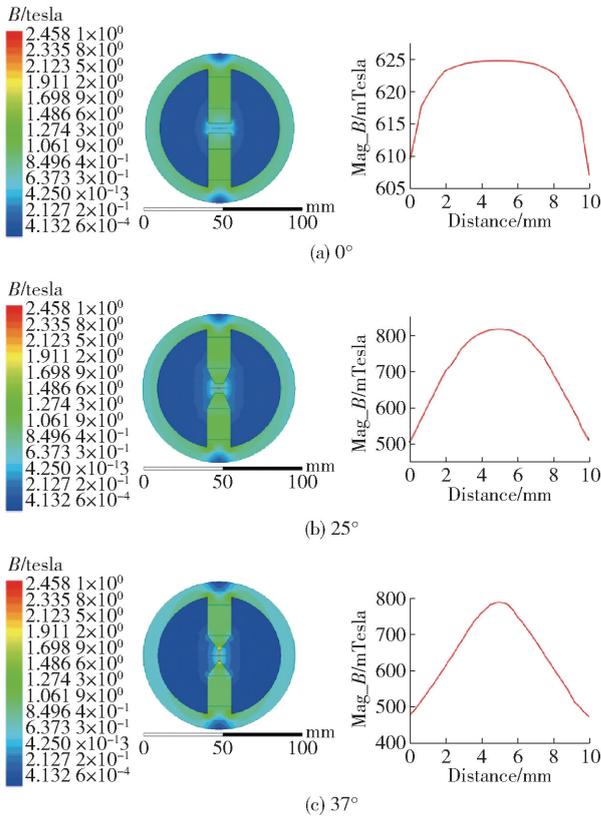


图8 不同磁极锥度下的磁感应强度云图<sup>[36]</sup>

Fig. 8 Cloud map of magnetic induction intensity under different magnetic pole taper angles<sup>[36]</sup>

不同磁极边缘形状对  $ZrO_2$  棒的表面质量的影响,磁极形状和尺寸如图9所示。根据对加工后工件表面粗糙度的方差分析可知,磁极形状对加工效果影响显著,方形磁极在加工区域内产生的磁通密度最高。

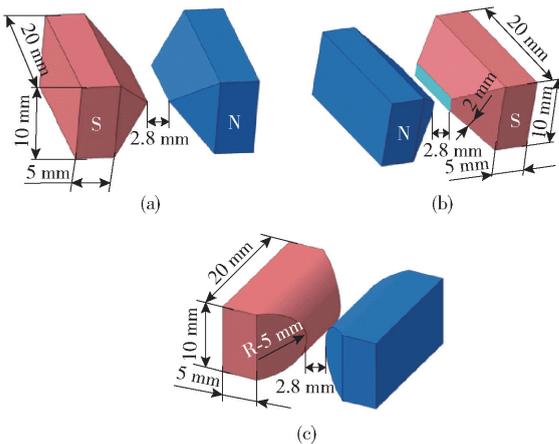


图9 磁极形状和尺寸<sup>[38]</sup>

Fig. 9 Magnetic pole shape and size<sup>[38]</sup>

潘明诗等<sup>[39]</sup>设计了带有弧度的仿形磁极头,将加工区域内的最大磁场强度提升至 0.496 T,加工后工件表面粗糙度降至  $0.23 \mu\text{m}$ 。孙岩等<sup>[40]</sup>将多个仿形开槽磁极进行组合加工“马鞍形”这一复杂工件表面,实现了多个位置的同时加工。

## 4.2 磁极排布

磁极排布可优化加工区域的磁场方向、均匀性及变化模式,影响磨粒刷的整体覆盖范围、运动驱动机制及加工均匀性。Tian 等<sup>[41]</sup>设计了一种多磁极头磁场装置,如图10所示。通过改变 N 极和 S 极的排列构造出多种磁场配置,根据有限元分析得到 N-S-N 这一最佳排布方式,对工件实现了纳米级的精加工。Kala 等<sup>[42]</sup>使用双磁极盘进行磁粒研磨加工,通过改变磁极排列方式,改善了磁力线的分布情况,解决了加工抗磁性工件时磨料切削力较弱这一难题。Naveen 等<sup>[43]</sup>研究了双磁极阵列对加工效果的影响,结果表面 N-S 双磁极排布是单磁极排布加工表面平整度的 8 倍,是 N-N 双磁极排布的 1.5 倍。

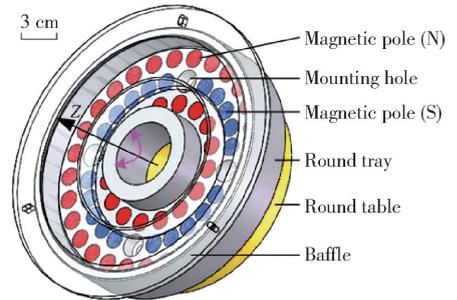


图10 磁极盘结构<sup>[41]</sup>

Fig. 10 Magnetic pole disk structure<sup>[41]</sup>

李文龙等<sup>[44]</sup>研究了聚磁盘开槽前后磁感应强度变化情况,如图11所示。开槽后的磁场梯度值更大,磁场强度变化幅度大,使用开槽磁极加工 15 min 后,工件表面粗糙度改善了 82.45%,使工件表面的纹理更加致密。

刘杰等<sup>[45]</sup>设计了异步旋转的双磁极盘结构对工件两面进行磁粒研磨加工,解决了单面研磨这一缺点,提高了加工效率。当两磁极转速分别为 500 r/min 和 600 r/min 条件下,产生的磁感应强度最高,达到了 917.9 mT。加工完成后工件表面均匀性得到明显提升,表面粗糙度相对差值不超过  $0.003 \mu\text{m}$ 。

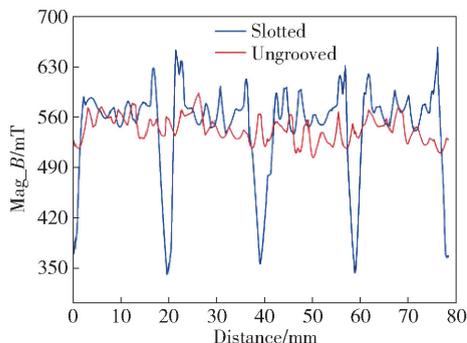


图 11 开槽前后聚磁盘磁场强度变化<sup>[44]</sup>

Fig. 11 Changes in magnetic field strength of magnetic disks before and after slotting<sup>[44]</sup>

Trinh 等<sup>[46]</sup>使用 Halbach 阵列代替传统磁场进行磁粒研磨加工,采用一体化的研磨液输送系统,将工件表面粗糙度由 225.146 nm 加工至 0.932 nm。韩冰等<sup>[47]</sup>研究了 Halbach 磁极排布对于加工效果的影响,分析了不同磁极排布方式的磁场特性,使用 EDEM 对不同磁极数量的 Halbach 排布的磁性粒子进行了动力学仿真分析,模拟完成后工件表面的累计法向/切向能量如图 12 所示。结果表明 Halbach 磁极排布的磁感应强度是传统磁极排布方式的 1.5 倍,5 个磁极排布的加工效率最高。

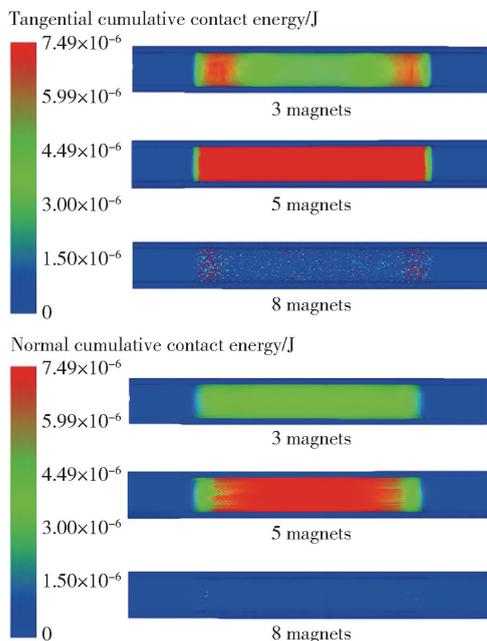


图 12 工件内表面的累计能量<sup>[47]</sup>

Fig. 12 Accumulated energy on the inner surface of the workpiece<sup>[47]</sup>

Moghanizadeh 等<sup>[48]</sup>在工件下方排布了多个电磁线圈,如图 13 所示。通过控制电磁线圈的开关,形成了一条灵活的磁路,实现了磨料在磁路中的运动,同时提高了磨料运动轨迹的多样性。这提升了磁粒研磨技术在自动化过程中的潜力,提高了其灵活性。

### 4.3 动态磁场

Wu 等<sup>[49]</sup>提出了低频交变磁场的磁粒研磨加工工艺,其原理如图 14 所示。由于交流电大小和方向的周期性变化,导致磨料所受磁场力的方向发生改变,从而使磨料随着磁场的变化产生上下波动。

Zou 等<sup>[50]</sup>为解决传统磁场下磨料形成的“磁力刷”无法充分的加工所有的精加工表面,采用了交变磁场磁粒研磨工艺。研究表明电流频率小于 7 Hz 时,材料去除率随电流频率的增加而增加,使用直径为 330 μm 的磨料加工时,频率为 5 Hz 时加工表面质量最好。为了进一步研究交变磁场的加工机制,Xie 等<sup>[51]</sup>研究了电流波形变化对于磁场、磨削力和加工效果的影响。研究表明占空比为 80% 的脉冲电流波形可获得更高的精加工效率和更好的表面质量。材料去除率是静态磁场的 1.7 倍,是正弦交变磁场的 1.45 倍。

为解决磁粒研磨技术加工管内磨料利用率低的问题,刘文浩等<sup>[52]</sup>使用低频交变磁场代替传统磁场,其加工机理如图 15 所示。随着磁场的周期性变化,磨料在工件内部沿磁感应线上下移动、翻滚更新。实现了磨料参与加工位置的不断改变,提高了磨料的自锐性。在最优的工艺参数下,将工件表面粗糙度由原始的 2.25 μm 降低至 0.34 μm,加工后工件表面达到了镜面效果。

与单一磨料轨迹相比复杂轨迹能使磨料在工件表面的运动路径高度随机化和均匀覆盖。这大幅减少了重复路径的概率,确保了材料去除在时间和空间上分布更均匀,从而获得更高的一致性和均匀的表面粗糙度。杨欢等<sup>[53]</sup>使用脉冲磁场辅助磁粒研磨,恒定磁场与脉冲磁场辅助下磨料的运动轨迹如图 16 所示。加工 30 min 后,拥有脉冲辅助磁场的加工效果相比于恒定磁场提高了 32%。

综上所述,动态磁场可以弥补恒定磁场下磨料运动状态单一这一缺点,实现对复杂工件表面的加工,提高加工后工件表面均匀程度。磨料的不断翻滚更新也避免了同一位置切削刃的重复使用,提高

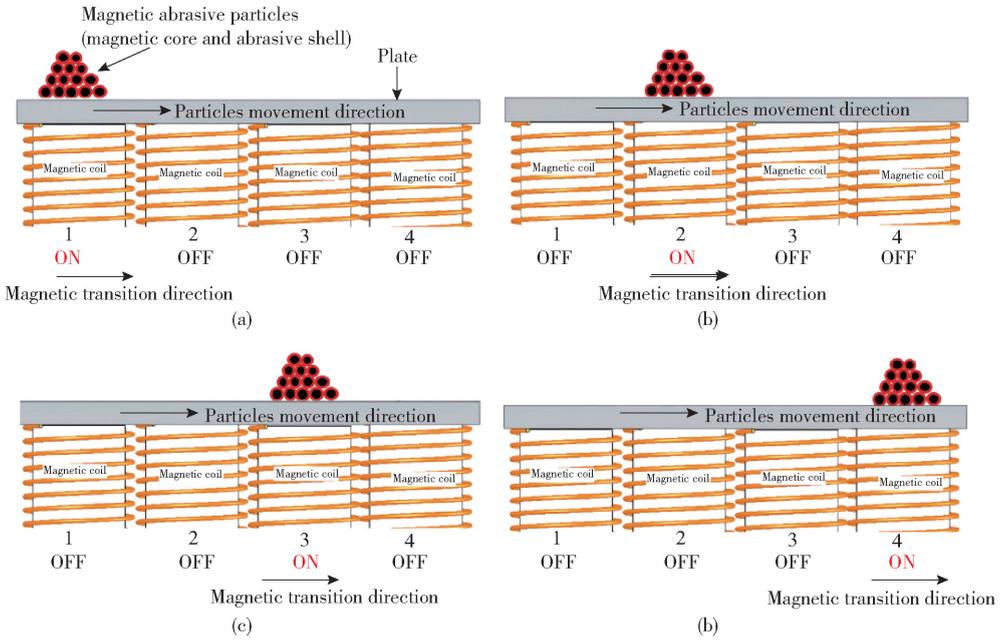


图 13 多个电磁线圈试验装置示意图<sup>[48]</sup>

Fig. 13 Schematic diagram of experimental apparatus with multiple magnetic coils<sup>[48]</sup>

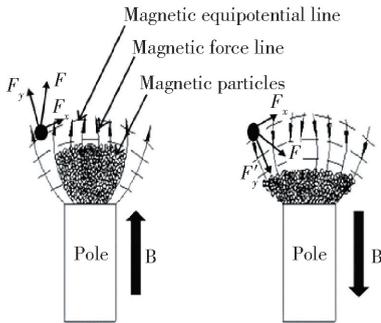


图 14 交变磁场下磨料的受力分析<sup>[49]</sup>

Fig. 14 Force analysis of abrasive under alternating magnetic field<sup>[49]</sup>

了磨料的使用寿命。

## 5 磁粒研磨工艺模型

### 5.1 材料去除模型

材料去除模型通过量化磨料与工件的微观作用机理,建立工艺参数(如磁场强度、磨料直径和加工时间)与去除量之间的数学关系,从而实现对加工结果的精准预测、工艺参数的定向优化以及加工过程的稳定性控制。与传统优化工艺参数相比,应用该模型可大幅减少试验次数和试验成本。

Li 等<sup>[54]</sup>根据 Archard 磨损模型,建立了管内表

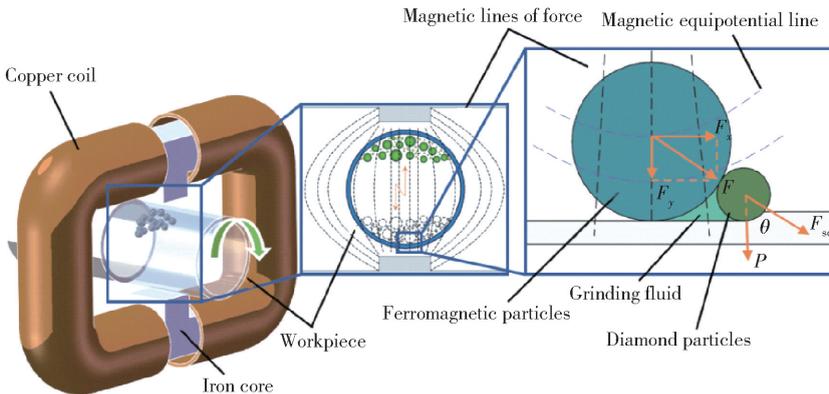


图 15 交变磁场加工机理<sup>[52]</sup>

Fig. 15 Mechanism of alternating magnetic field processing<sup>[52]</sup>

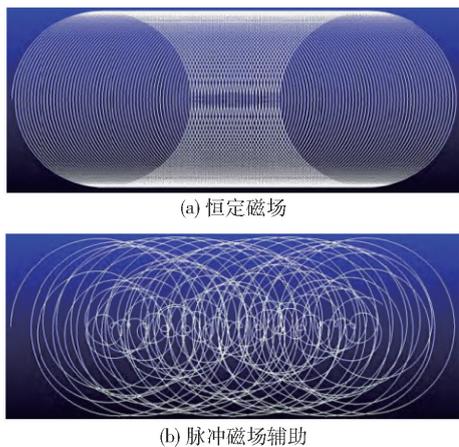


图 16 磨料运动轨迹<sup>[53]</sup>

Fig. 16 Abrasive motion trajectory<sup>[53]</sup>

面材料去除率与磁压和磁极转速的函数关系数学模型,如式(1)所示。

$$MRR = \frac{dM}{dt} = \frac{K_{\beta} \rho_w \frac{B^2}{16\mu_0} \frac{3\pi(\mu_r - 1)\omega}{3(2 + \mu_r) + \pi(\mu_r - 1)\omega} \frac{\pi^2 d_a^2 DL}{(3 + \sqrt{2})(d_a + d_f)^2} V(t)}{H} \quad (1)$$

式中: $M$ 为材料去除量; $\rho_w$ 为工件材料密度; $K_{\beta}$ 为材料去除系数; $B$ 为磁通密度; $\mu_0$ 为真空磁导率, $\mu_r$ 为磁性磨料的相对磁导率; $H$ 为磁场强度; $d_a$ 、 $d_f$ 分别为磨料直径和铁磁粒子直径; $D$ 为工件直径; $L$ 为磁极长度; $\omega$ 为介质中铁磁性颗粒的体积百分比。

该模型得到了磁粒研磨加工管类零件时磁场强度、磨料直径、磁极转速等主要参数与材料去除量之间的函数关系。该模型明确了不同参数对材料去除率大小的影响程度,为关键参数的确定与分析提供了依据。

与加工管类零件不同,磁粒研磨加工平面零件时,磨料吸附在磁极上,在磁极压力的作用下去除工件表面材料。Gao 等<sup>[55]</sup>在磨料为完美球形、磨料表面研磨相分布均匀、磨料切削性能在加工过程中不变等理想条件下分析单颗磨料的材料去除面积,结合单颗磨料磨削长度和有效磨料数量得出加工过程中的材料去除量,如图 17~18 所示。

有效磨料的数量和单颗磨料磨削长度如式(2)、(3)所示。

$$N_{am} = \frac{\pi d_p}{d_a} \quad (2)$$

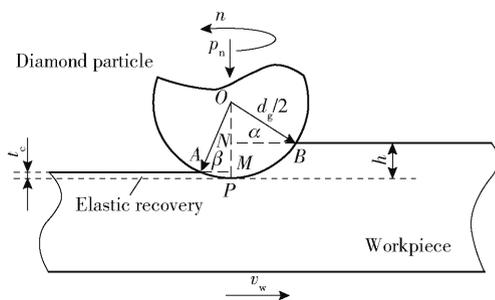


图 17 磨料与工件接触示意<sup>[55]</sup>

Fig. 17 Schematic diagram of contact between abrasive and workpiece<sup>[55]</sup>

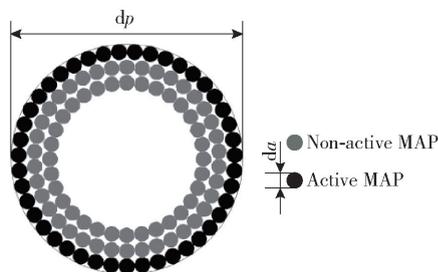


图 18 活性磨料计算示意<sup>[55]</sup>

Fig. 18 Schematic diagram of active abrasive calculation<sup>[55]</sup>

$$L = \frac{T}{t_i} l_i \quad (3)$$

式中: $d_p$ 为磁极直径; $d_a$ 为磨料直径; $t_i$ 为时间间隔; $T$ 为加工时间; $l_i$ 是单个磨料在某个时间间隔内的研磨轨迹。

由于圆柱磁极上磁通密度分布不均匀、磨料切削刃不规则等原因,导致理论材料去除模型与试验结果相比存在一定偏差,但材料去除趋势与实际吻合良好。

Chen 等<sup>[56]</sup>通过模拟分析确定了磁粒研磨技术加工复杂表面时自由曲面上磁场密度和磁场强度的分布,单颗磨料压痕如图 19 所示。

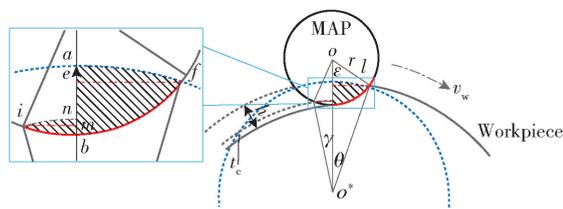


图 19 单颗磨粒压痕示意<sup>[56]</sup>

Fig. 19 Schematic diagram of single abrasive grain indentation<sup>[56]</sup>

根据工件表面曲率、磁极速度、加工间隙和磨料

直径等参数,建立了球形磨料加工复杂表面上的材料去除模型,如式(4)所示。

$$V = (S_{\text{sector-abf}} + S_{\text{sector-inb}}) \frac{T}{t_i} l_i \frac{S}{S_r} \quad (4)$$

式中:  $S_{\text{sector-abf}}$ 、 $S_{\text{sector-inb}}$  分别为两个弧形阴影的面积;  $S/S_r$  为活性磨料的数量。

该模型可深入理解磁粒研磨工艺对自由复杂表面的加工机理以及曲率对其材料去除率的影响。

Zhang 等<sup>[57]</sup>建立了激光熔融增材制造技术生产的工件在磁粒研磨加工技术下的材料去除率模型,并考虑了工件不同程度的斜角的影响,如式(5)所示。结果表明斜角并不是一个重要因素,对工件硬度变化几乎没有影响。

$$MRR = \frac{V}{t} = \rho N A L N_p \times 10^6 \quad (5)$$

式中:  $V$  磨料单次去除体积;  $t$  为时间;  $\rho$  为工件密度;  $N$  为磨料数量;  $A$  为磨料磨削产生的截面面积;  $L$  为工件长度;  $N_p$  为每分钟磨削次数。

超声辅助磁粒研磨使磨料高频撞击工件表面,材料脆性剥离加速,能够更高效地实现工件表面的精加工。Misra 等<sup>[58]</sup>将材料去除量分为稳态材料去除量和瞬态材料去除量,从而建立了超声辅助磁粒研磨中的材料去除模型。稳态材料去除量  $Q_s$  和瞬态材料去除量  $V_T$  如式(6)~(7)所示。

$$Q_s = \frac{1}{4} K_s \rho_w n_a \left[ D_a^2 \sin^{-1} \left( \frac{D_i}{D_a} \right) - D_i (D_a - t_i) \right] V_{\text{avg}} \quad (6)$$

式中:  $K_s$  为稳态材料去除系数;  $\rho_w$  为工件材料的密度;  $n_a$  为有效磨料的数量;  $D_a$  为磨料的平均直径;  $D_i$  为磨料压痕直径;  $t_i$  为磨料压痕深度;  $V_{\text{avg}}$  为磨料的平均速度。

$$V_T = 2R_a A_f (1 - e^{-C_T t}) \quad (7)$$

式中:  $V_T$  为瞬时去除体积;  $R_a$  为平均粗糙度值;  $A_f$  为加工表面积;  $C_T$  为瞬态系数;  $t$  为加工时间。

稳态材料去除由磨料磨削和划痕产生,瞬态材料去除由磨料剪切不规则部分产生,二者与工件表面粗糙度密切相关。

综上所述,材料去除量建模是一个复杂的过程,需要考虑磨料形状、磁极转速、工件形状、加工方式、有效磨料数量等多种因素。材料去除量建模流程如图20所示。

## 5.2 粗糙度模型

表面粗糙度决定着零件的使用寿命,降低工件

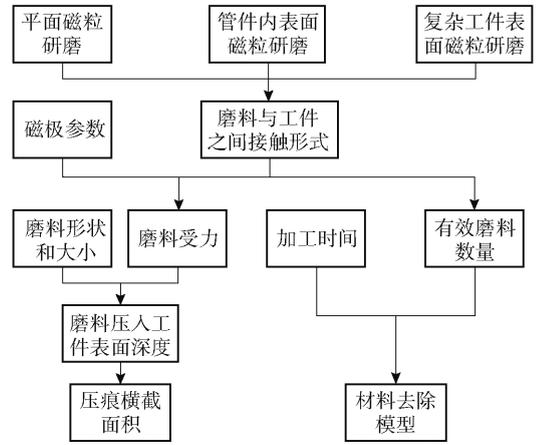


图20 材料去除模型建模流程

Fig. 20 Process for modeling material removal model

表面粗糙度是精密加工中最重要的目的之一。

宋壮等<sup>[59]</sup>使用鱿鱼优化算法与最小二乘支持向量机相结合的方法,结合正交试验结果构建了粗糙度预测模型。在此模型预测的最优参数条件下进行加工,将工件表面粗糙度降低至  $0.062 \mu\text{m}$ ,与预测模型的误差值仅为 2.44%。Song 等<sup>[60]</sup>以加工间隙、磁极转速、进给速度和磨料质量为输入值,以表面粗糙度  $R_a$  为输出值,结合 GWO 算法构建了 SVR 粗糙度预测模型。与验证试验结果相比,粗糙度预测模型误差为 2.82%。但神经网络等算法需大量的高质量训练数据,而精密加工试验成本较高、需要时间较长,使用小样本数据时预测模型的误差可能较大。因此,相较于算法预测模型,数学模型预测的核心优势在于其基于明确的物理或经验方程,能清晰揭示加工参数与粗糙度之间的因果关系,结果可解释性强,便于理解内在机理并针对性优化工艺,具有更可靠的理论基础。

材料去除率与表面粗糙度密切相关,粗糙度模型是与工艺参数和材料去除率相关的复杂函数,因此许多学者在材料去除率模型的基础上建立了粗糙度数学模型。Kala 等<sup>[61]</sup>将工件表面的峰值假定为三角形,如图21所示。

利用洛伦兹力方程和安培定律计算磨料在磁场中的受力,同时考虑了磨料尺寸的正态分布、磨料与工件表面之间的摩擦力、磁通密度、磁链倾角等多方面因素,计算出了磨料碰撞后工件表面峰值的高度,如式(8)所示。

$$R_{ai} = \frac{1}{b_0} \left[ \frac{b_0 + b_i}{2} \left( R_{\text{max}} - \sum_1^i h_i \right) \right] \quad (8)$$

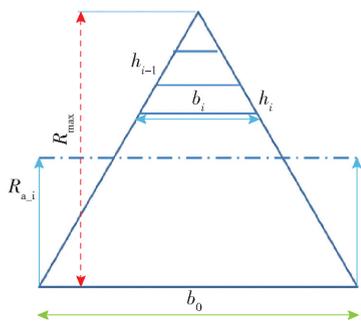


图 21 工件表面的峰值示意<sup>[61]</sup>

Fig. 21 Schematic diagram of peak values on the surface of the workpiece<sup>[61]</sup>

式中： $i$  为磨料碰撞次数； $b_0$  为三角形基底宽度； $b_i$  表示第  $i$  次迭代后梯形上表面的宽度； $h_i$  为第  $i$  次冲程中剪切峰的高度； $R_{\max}$  表示峰值的最大高度。

通过 MATLAB 计算累积每次碰撞后的材料去除量，得到工件表面的粗糙度值。研究表明，该模型能够准确预测不同加工参数下的表面粗糙度变化，为优化双盘磁粒研磨加工工艺提供了有力的理论支持。

Pandey 等<sup>[62]</sup> 提出了一种化学腐蚀工件表面后的粗糙度建模方法，通过试验测定了不同浓度氢氧化钾溶液化学腐蚀后工件表面的维氏硬度，并建立了硬度与氢氧化钾浓度的数学关系。基于磨粒的几何形状和穿透深度，计算磨料的磨损常数，得出单位时间内的材料去除体积。结合工件初始表面粗糙度、加工后的表面粗糙度和材料去除率，建立了加工后工件表面粗糙度的数学模型，如式(9)所示。

$$R_{af} = R_{ao/aol} - \left( \frac{1}{\pi D} \times \sqrt{R_{ao/aol} \psi vt N_s} \right) \quad (9)$$

式中： $R_{ao/aol}$  为工件加工前后表面粗糙度比值； $R_{aol}$  为加工后工件表面粗糙度； $D$  为工件直径； $\psi$  为压痕面积。

Misra 等<sup>[63]</sup> 建立了超声辅助磁粒研磨中的表面粗糙度模型。通过分析电机的旋转和超声波振动，计算了磨料颗粒在三维空间中的坐标和速度，并引入了临界粗糙度值这一概念，使得模型能够更准确地预测抛光过程的极限，即当表面粗糙度达到临界值时，无论延长抛光时间还是增加磨削强度，均无法进一步改善表面粗糙度。粗糙度模型如式(10)所示。

$$R_{ai}(\tau) = (R_{ao} - R_{acr}) e^{[-C_{Ra}(Q_s \tau + 2R_{ao} A \rho_w (1 - e^{-C_T \tau}))]} + R_{acr} \quad (10)$$

式中： $R_{ao}$  为原始表面粗糙度； $R_{acr}$  为临界表面粗糙度值； $C_{Ra}$  为表面粗糙度比例常数； $Q_s$  为材料去除率； $\tau$  为加工时间； $A_f$  为一个周期内磨料与工件的接触面积； $\rho_w$  为材料密度； $C_T$  为瞬态系数。

该模型证实了在精加工过程中，瞬时表面粗糙度值与精加工时间之间存在指数相关性。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

1) 磁粒研磨加工技术是一种先进的加工技术适用于对平面、管件内表面、复杂曲面的加工，加工后的工件可以满足超精密加工的要求。

2) 磁性磨料的制备方法通常有烧结法、粘结法、雾化快凝法、机械合金法等，根据材料硬度选择合适的研磨相可以使加工更加高效。

3) 不同形状和排列方式的磁极可以改变加工区域的磁场分布从而影响磨粒刷的形态、刚度和受力，从而提高工件表面的质量和均匀性。

4) 仿真技术可以对试验结果的趋势进行预测，降低试验成本。磁粒研磨研究中常用的仿真软件有 Maxwell、ADAMS、EDEM、Fluent 等。

5) 磁粒研磨工艺模型的建立则可精确地分析工艺参数对加工结果的影响，便于设定更加合适的试验参数。

### 6.2 展望

磁粒研磨加工技术的研究未来也存在着一定空间，具体可从以下方向着手。

1) 对于磨料轨迹的研究主要依靠于仿真软件，因此只能对不同参数条件下磨料轨迹的变化趋势进行分析，无法精确到磨料的运动轨迹。

2) 复杂磁场下，由于磨料的翻滚更新，其使用寿命得到了提升。但目前对于磨料的翻滚更新的研究只停留在其由于磁场强度的变化而导致的，对于磨料的具体运动状态随时间的变化并没有精确的分析，且磨料寿命的提升程度也没有精确的表述。

3) 在磁粒研磨的工艺模型中通常将磨料视为规则的球体，但磨料由于制备方法的不同可能产生不同的形状，因此建立不同形状的几何模型有着重要意义。

4) 磨料磨削性能随加工时间的变化情况尚不明确，研究磨料的使用寿命可以设置更加合适的加工参数，防止由于加工中出现磨料失效的现象而导

致的加工效果的下降,而且目前磁粒研磨工艺模型中通常将磨料视为刚体,忽略了磨料磨削性能的下降低对于材料去除量的影响。因此,明确磨料切削性能在加工中的变化有利于得到更加精确的工艺模型。

#### [参考文献]

- [1] 崔远驰,张嵩,唐晗,等.中国仪器产业发展:现状,挑战及展望[J].光学精密工程,2024,32(13):1965-2003.
- [2] 魏青轩,李雪婷,王世民,等.用于二维运动平台控制的变同步比圆弧插补方法[J].仪器仪表学报,2024,45(11):89-100.
- [3] 郭路广,戴卓豪,王东峰,等.力流变工艺对轴承滚道表面质量与精度的影响[J].中国机械工程,2025,36(2):271-279.
- [4] 傅百恒,王卫杰,王元钦,等.高精度球面洛伦兹力磁轴承设计与分析[J].北京航空航天大学学报,2022,48(11):2222-2229.
- [5] 贾琦璠,朱祥龙,杨垒,等.固结磨料研磨石英晶片材料去除率建模与试验研究[J].光学精密工程,2023,31(16):2362-2371.
- [6] 王微,尹春艳,俞蓓,等.钛合金人工关节体精密铸造及无损检测[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2021,39(2):94-97.
- [7] 刘志强,梁玉瑶,高阁,等.表面处理技术对人工关节摩擦磨损性能的影响[J].中国组织工程研究,2022,26(10):1604-1609.
- [8] 李可欣,任莹晖,李伟,等.多能场辅助微细磨削技术研究进展[J].机械工程学报,2025,61(13):1-26.
- [9] 耿俊媛,张号,孟祥和,等.基于原子力显微镜的三维表面多参数检测技术[J].中国科学:技术科学,2024,54(12):2221-2254.
- [10] Kajal, S., V. Jain, J. Ramkumar, et al. Experimental and theoretical investigations into internal magnetic abrasive finishing of a revolver barrel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100:1105-1122.
- [11] Vahdati, M., S. Rasouli. Study of magnetic abrasive finishing on freeform surface[J]. Transactions of the IMF, 2016, 94:294-302.
- [12] Wang, Y., D. Hu. Study on the inner surface finishing of tubing by magnetic abrasive finishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45:43-49.
- [13] Verma, G. C., P. Kala, P. M. Pandey. Experimental investigations into internal magnetic abrasive finishing of pipes[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 88:1657-1668.
- [14] Shinmura, T., K. Takazawa, E. Hatano, et al. Study on magnetic abrasive finishing[J]. CIRP annals, 1990, 39:325-328.
- [15] 焦安源,张龙龙,陈燕,等.磁粒研磨TC4孔棱边毛刺的机理及试验研究[J].表面技术,2019,48(3):283-290.
- [16] 潘明诗,陈燕,程海东,等.基于线圈优化设计的黄铜管内表面电磁抛光试验[J].表面技术,2022,51(9):260-270.
- [17] 陈宇辉,韩冰,齐琦,等.钛合金平面磁粒研磨轨迹的均匀性实验研究[J].电镀与精饰,2021,43(1):1-6.
- [18] 王鹏川,金洙吉.铁基金刚石磁性磨料的制备及其性能研究[J].表面技术,2016,45(12):78-83.
- [19] Singh, A., P. Singh, A. Kaushik, et al. Comparative assessment of abrasives in magnetic abrasive finishing: an experimental performance evaluation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 604:172312.
- [20] Singh, A., P. Singh, S. Singh, et al. Effect of annealing temperature on the magnetic properties and finishing efficiency of mechanically alloyed magnetic abrasives[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 556:169455.
- [21] 丁叶,陈燕,丁云龙,等.黏结法制备铁基碳化硼磁性磨粒[J].表面技术,2022,51(3):151-157.
- [22] Wang, L., Y. Sun, G. Zhang, et al. Investigation on the preparation and finishing performance of a novel nanoparticle-enhanced bonded magnetic abrasive[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129:4631-4642.
- [23] Ahmad, S., R. Singari, R. Mishra. Development of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> based magnetic abrasive by sintering method and its performance on Ti-6Al-4V during magnetic abrasive finishing[J]. Transactions of the IMF, 2021, 99:94-101.
- [24] 马雨寒,张宝瑞,周长乐,等.cBN-Fe磁性磨粒的制备工艺及性能[J].金刚石与磨料磨具工程,2023,43(4):422-431.
- [25] Zhang, G., Y. Zhao, D. Zhao, et al. New iron-based SiC spherical composite magnetic abrasive for magnetic abrasive finishing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(2):377-383.
- [26] Zhu, P., G. Zhang, J. Du, et al. Removal mechanism of magnetic abrasive finishing on aluminum and magnesium alloys[J]. The International Journal of Advanced

- Manufacturing Technology, 2021, 114 (5 - 6): 1717 - 1729.
- [27] Cheng, K.-C., K.-Y. Chen, H.-P. Tsui, et al. Characteristics of the polishing effects for the stainless tubes in magnetic finishing with gel abrasive[J]. Processes, 2021, 9(9): 1561.
- [28] 董彦辉, 牛风丽, 任泽, 等. 金刚石磁性磨料与SiC磁性磨料的研磨加工性能分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(3): 379 - 385.
- [29] Xu, J., Y. Zou. Development of a new magnetic abrasive finishing process with renewable abrasive particles using the circulatory system[J]. Precision Engineering, 2021, 72: 417 - 425.
- [30] 王天堃, 齐朝晖, 赵天骄, 等. 起重机中滑轮绳索系统晃动冲击的动力学仿真研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(1): 190 - 197, 242.
- [31] 陈燕, 赵杨, 陈松, 等. 基于旋转磁场的6061铝合金弯管内表面光整加工[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 73 - 81.
- [32] 王硕, 陈松, 程海东, 等. 空间弯管内表面磁粒研磨位姿轨迹优化试验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(14): 146 - 156.
- [33] 程海东. 管件内表面磁粒研磨中磨粒动力学仿真研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [34] 吴传宗, 马小刚, 张亮, 等. 管件内壁磁粒研磨时的磨粒动力学行为仿真及分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2024, 44(2): 244 - 251.
- [35] 孙岩, 潘明诗, 刘冰洋, 等. 基于磁粒研磨法的电磁铁温升研究[J]. 表面技术, 54(12): 164 - 174.
- [36] Li, W., Y. Chen, M. Cheng, et al. Effect of magnetic head shape on processing of titanium alloy wire by magnetic abrasive finishing[J]. Materials, 2020, 13(6): 1401.
- [37] 王金龙, 陈燕, 张泽群, 等. 瓦形磁极对磁粒研磨加工管件内表面的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 158 - 166.
- [38] Heng, L., J. S. Kim, J.-F. Tu, et al. Fabrication of precision meso-scale diameter ZrO<sub>2</sub> ceramic bars using new magnetic pole designs in ultra-precision magnetic abrasive finishing [J]. Ceramics International, 2020, 46(11): 17335 - 17346.
- [39] 潘明诗, 陈燕, 张东阳. 仿形磁极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.
- [40] 孙岩, 潘明诗, 王杰, 等. 仿形组合磁极研磨增材制造复杂表面工艺研究[J]. 表面技术, 2023, 52(6): 361 - 368.
- [41] Tian, Y., C. Shi, Z. Fan, 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.
- [42] Kala, P., P. M. Pandey, G. C. Verma, et al. Understanding flexible abrasive brush behavior for double disk magnetic abrasive finishing based on force signature[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 28(3): 442 - 448.
- [43] Naveen, K., V. V. Shanbhag, N. Balashanmugam, et al. Investigation of magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives with double pole arrangement [J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2017, 31(4): 314 - 326.
- [44] 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, 367.
- [45] 刘杰, 焦安源, 张家龙, 等. 基于异步旋转磁极的TC4薄板双面磁粒研磨工艺研究[J]. 表面技术, 2024, 53(10): 196 - 206.
- [46] Trinh, N. D., N. M. Quang, L. T. P. Thanh, et al. An advanced magnetic abrasive finishing with regenerative abrasive particles for polymethyl methacrylate material using a Halbach array[J]. Sādhanā, 2025, 50(74): 1 - 23.
- [47] 韩冰, 唐嘉斌, 杨海吉, 等. 基于Halbach阵列的磁粒研磨细长管内表面试验[J/OL]. 中国表面工程, 1 - 14. <https://link.cnki.net/urlid/11.3905.TG.20250515.1722.002>.
- [48] Moghanizadeh, A., F. Ashrafizadeh, M. Bazmara. Development the flexible magnetic abrasive finishing process by transmitting the magnetic fields[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(3 - 4): 2115 - 2125.
- [49] Wu Jinzhong, Zou Yanhua, Sugiyama Hitoshi. Study on finishing characteristics of magnetic abrasive finishing process using low-frequency alternating magnetic field [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1 - 4): 585 - 594.
- [50] Zou Y, H Xie, C Dong, et al. Study on complex micro surface finishing of alumina ceramic by the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5 - 8): 2193 - 2202.
- [51] XIE Huijun, ZOU Yanhua. Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field—discus-

- sion on the influence of current waveform variation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(7-8): 2471-2483.
- [52] 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): 146-154.
- [53] 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.
- [54] LI Wenhui, LI Xiuhong, YANG Shengqiang, et al. A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: material removal behavior and finishing performance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 260: 20-29.
- [55] GAO Yuewu, ZHAO Yugang, ZHANG Guixiang, et al. Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 177: 105601.
- [56] CHEN Pengfei, GAO Yuewu, ZHAO Guoyong, et al. Modeling of material removal mechanism on free-form surface in magnetic abrasive finishing process[J]. Precision Engineering, 2024, 91: 507-521.
- [57] Zhang, J., A. Chaudhari, H. Wang. Surface quality and material removal in magnetic abrasive finishing of selective laser melted 316L stainless steel[J]. Journal of manufacturing processes, 2019, 45: 710-719.
- [58] Misra, A., P. M. Pandey, U. Dixit. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131: 853-867.
- [59] 宋壮, 赵玉刚, 刘广新, 等. 基于WOA-LSSVM的磁粒研磨表面粗糙度预测及工艺参数优化[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 242-252, 297.
- [60] Song, Z., Y. Zhao, G. Liu, et al. Surface roughness prediction and process parameter optimization of Ti-6Al-4V by magnetic abrasive finishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122: 219-233.
- [61] Kala, P., V. Sharma, P. M. Pandey. Surface roughness modelling for double disk magnetic abrasive finishing process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 37-48.
- [62] Pandey, K., P. M. Pandey. Surface roughness modeling in chemically etched polishing of Si(100) using double disk magnetic abrasive finishing[J]. Machining Science and Technology, 2019, 23: 824-846.
- [63] Misra, A., P. M. Pandey, U. Dixit. Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 133: 344-356.

## Research progress and innovation direction of magnetic abrasive finishing processing technology

LIU Bingyang<sup>1,2</sup>, DING Yunlong<sup>1,2,\*</sup>, SHAO Wenjie<sup>1,2</sup>, MA Long<sup>1,2</sup>, HAN Bing<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;  
2. Liaoning Key Laboratory of Special Machining for Complex Workpiece Surface, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** Magnetic abrasive finishing is an advanced machining technology suitable for precision machining of surfaces of various geometric shapes of workpieces. It has the advantages of residual stress dispersion, good machining uniformity, and high degree of automation. After processing, the surface roughness of the workpiece can meet the requirements for the use of ultra precision parts. The article introduces the processing principle of magnetic abrasive finishing, and summarizes the research progress of magnetic abrasive finishing processing technology from five aspects, including abrasive preparation, shape and arrangement of magnetic poles, simulation, as well as material removal models and roughness models under different processing techniques and workpiece shapes. The mathematical model in magnetic abrasive finishing was emphasized, and the key steps for establishing a material removal model were

summarized. The results show that selecting magnetic abrasives with different grinding phases according to materials of varying hardness can better achieve precision machining of workpieces. Simulation analysis of magnetic field, abrasive motion trajectory, and multi-field coupling can predict the force magnitude, thermo-mechanical coupling, wear condition, and temperature change of the workpiece during machining. The shape of the magnetic poles (tile shape, square shape, saddle shape, etc.), the arrangement of magnetic poles (N-N, N-S, N-S-N, Halbach array, etc.), and the dynamic magnetic field (alternating magnetic field, pulsed magnetic field, etc.) determine the force magnitude and motion of the abrasives. Material removal models and roughness models can accurately analyze the impact of process parameters on machining results, facilitating the setting of more appropriate experimental parameters. The advantages and disadvantages of the algorithm model and mathematical model in the roughness model are analyzed. Finally, the shortcomings and deficiencies in current research are summarized, and suggestions for future research directions of magnetic abrasive finishing technology are proposed.

**Keywords:** magnetic abrasive finishing; magnetic abrasive; magnetic pole arrangement; simulation; material removal model; surface processing ▲

---

## 敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)等数据平台下载使用。

本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010-63936591、010-63933053 联系。

《有色设备》编辑部