

小孔内表面磁力研磨加工技术研究进展

张博, 李富柱, 郭玉琴*, 王匀, 申坤伦, 狄智成

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 磁力研磨加工是提高小孔内表面质量的一种重要光整技术, 利用该技术能高效提升小孔类零部件在极端环境下的使役性能。针对小孔内表面的磁力研磨光整加工, 按其发展历程对磁力研磨加工技术进行总结, 归纳了磁性磨粒研磨、磁针磁力研磨、液体磁性磨具研磨、超声辅助磁力研磨和电解磁力复合研磨等加工方法的技术特点, 并分析评述了其局限性。对磁力研磨加工过程中材料去除机理进行了研究, 材料主要以微量切削与挤压、塑性变形磨损、腐蚀磨损、电化学磨损等方式去除, 材料种类不同, 去除机理也不同。其中, 硬脆性材料主要以脆性断裂、塑性变形和粉末化的形式去除; 塑性材料在经历滑擦阶段、耕犁阶段和材料去除阶段后主要以切屑的形式去除。此外, 还对磁力研磨加工过程中的材料去除模型进行了研究, 对单颗磁性磨粒材料去除模型和“磁力刷”材料去除模型进行了分析讨论。最后, 对磁力研磨加工技术今后的研究发展给出了建议并进行了展望。

关键词: 小孔内表面; 磁力研磨加工; 材料去除机理; 材料去除模型

中图分类号: TG356.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)06-0028-17

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.06.003

Advances in Magnetic Abrasive Machining Technique for the Inner Surface of the Small Holes

ZHANG Bo, LI Fuzhu, GUO Yuqin*, WANG Yun, SHEN Kunlun, DI Zhicheng

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212000, China)

ABSTRACT: Inner surface finishing of the small holes has become an enormous technical problem in the field of advanced manufacturing. Magnetic abrasive machining (MAM) as an important finishing technique can improve the surface quality of the small holes due to its significant advantages of flexible contact, good adaptability, and no temperature compensation. In this work, the basic principle, material removal mechanism, and material removal model of MAM are summarized. MAM can be divided into traditional magnetic abrasive machining techniques and composite magnetic abrasive machining techniques according to the development process. Traditional magnetic abrasive machining techniques mainly include magnetic abrasive grinding (MAG) technique, magnetic needle abrasive grinding (MNAG) technique, and fluid magnetic abrasive (FMA) technique. Composite magnetic grinding techniques include ultrasonic-assisted magnetic grinding (UAMG) technique and electrolytic magnetic composite grinding (EMCG) technique. MAG is the most basic technique for finishing the inner surface of the small holes. It uses the interaction between the magnetic field and magnetic abrasive particles to achieve the finishing of the

收稿日期: 2023-03-24; 修订日期: 2023-08-30

Received: 2023-03-24; Revised: 2023-08-30

基金项目: 装备预先研究领域基金 (8092301201)

Fund: Fund Project of Equipment Pre-research Field (8092301201)

引文格式: 张博, 李富柱, 郭玉琴, 等. 小孔内表面磁力研磨加工技术研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(6): 28-44.

ZHANG Bo, LI Fuzhu, GUO Yuqin, et al. Advances in Magnetic Abrasive Machining Technique for the Inner Surface of the Small Holes[J]. Surface Technology, 2024, 53(6): 28-44.

*通信作者 (Corresponding author)

workpiece surface. Due to the different positions of magnetic poles, MAG has two forms of external magnetic pole grinding (EMPG) and built-in magnetic pole grinding (BMPG). In the process of MAG, processing efficiency can be improved by increasing the grinding pressure. MNAG drives the magnetic needle to collide, scratch, and roll to remove the edges, burrs, and recast layers on the inner surface of the small holes. However, due to the effect of the magnetic needle shape, there will be a processing blind area. FMA is a novel type of precision finishing technique based on the theory of magnetic phase transition. Under the action of the magnetic field, the liquid abrasive composed of magnetic particles and abrasive particles changes from free-flowing Newtonian liquid to consolidated Bingham body. As the liquid abrasive contacts with the workpiece and generates relative motion, the finishing of the workpiece surface is realized. UAMG has high processing efficiency, but it has the limitation of being impossible to predict the motion trajectory and grinding path of abrasive particles. EMCG has the advantage of not being limited by the hardness of the material, low abrasive wear, high controllability, and high machining efficiency. However, it is only used for conductive materials. When MAM is used to finish the inner surface of the small holes, the material types are different, so the removal mechanism is also different. The removal mechanism of hard and brittle materials can be divided into brittle fracture removal, plastic deformation removal, and powdered removal. The removal mechanism of plastic materials can be divided into three stages: sliding friction stage, ploughing stage, and material removal stage. The material removal model in MAM can be divided into single magnetic abrasive material removal model and 'magnetic brush' material removal model. However, these models have certain limitations. A perfect material removal model should be further constructed and the mechanism of MAM should be further studied. Finally, suggestions and prospects for future research and development of MAM are given.

KEY WORDS: inner surface of the small holes; magnetic abrasive machining; material removal mechanism; material removal model

光整加工作为降低工件表面粗糙度、获得高形状精度和表面精度的重要手段,是加工制造领域的研究热点和前沿方向^[1]。随着对零件精度和表面质量的要求越来越高,光整加工几乎是获得超高表面质量的唯一途径^[2]。

小孔类零部件作为组成机械零部件的重要零件之一,占机械零件总数的 50%~80%^[3]。小孔类零部件常采用精密钻削、电火花、激光、增材制造等先进技术进行加工,但加工后的表面会存在微毛刺、重铸层和球化效应^[4-6],严重影响其服役性能的发挥。因此,对小孔内表面进行光整,降低表面粗糙度,提升表面质量极为重要。

小孔内表面常用的光整方法有珩磨、滚压、抛光轮加工等^[7],但这些方法存在效率低、难以适应异型孔、不能批量生产等问题。磨粒流加工技术(Abrasive Flow Machining, AFM)虽然不受加工零件形状的限制^[8-9],但由于磨粒流本身高黏度、假塑性的特性^[10],极易出现磨粒结块、因切削力过大而导致的“过抛”、“欠抛”、“倒圆”等加工质量问题^[11]。故而,磁力研磨加工技术(Magnetic Abrasive Machining, MAM)逐渐成为小孔内表面光整加工的研究热点方向之一^[12]。

MAM 由苏联工程师 Konovalov Hulev、Baron 和 Sakulevich 于 1938 年提出^[13-15],因其柔性接触、自适应好、自锐性强、具有良好的仿形性、温升低且无须工具补偿等优点^[16-18],被广泛应用于小孔内表面的光整加工中。本文对近年来 MAM 加工技术的发展进

行了总结,从 MAM 光整加工小孔内表面的工作原理、工作装置、材料去除机理和材料去除模型等方面对 MAM 加工技术进行了系统论述和分析,对该项技术未来的发展给出了建议并进行了展望。

1 MAM 工作原理

MAM 利用磁场与磁性磨粒的相互作用完成对工件表面的挤压、划擦和磨削,从而达到光整加工的目的。如图 1 所示,在磁场的作用下,磁性磨粒将以“压力”的形式加载在小孔内表面,并沿着磁感线方向紧密排列形成具有刚性和切削作用的“磁力刷”^[19-20]。随着磁场的变化,磁性磨粒在工件表面呈现出滑动、滚动和切削 3 种运动状态^[21],完成对工件表面的光整加工。

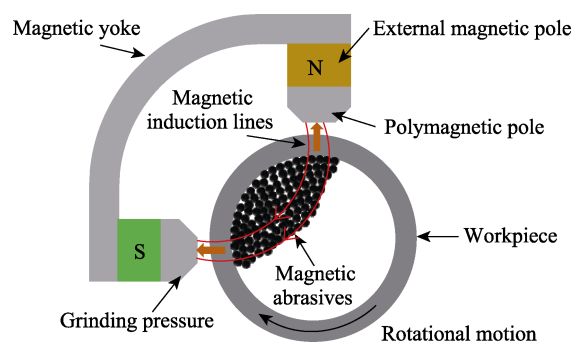


图 1 MAM 工作原理
Fig.1 Principle diagram of MAM

2 MAM 加工装置

按磁场产生原因,MAM 加工装置可分为恒磁力研磨装置和变磁力研磨装置;按工件与磁极的

运动方式,MAM 加工装置可分为工件运动磁力研磨装置、磁极运动磁力研磨装置和复合运动磁力研磨装置。MAM 加工装置的分类与比较如表 1 所示。

表 1 MAM 加工装置的分类与比较
Tab.1 Classification and comparison of MAM devices

| Classification basis | Categories | Characteristics |
|--|---|---|
| Causes of magnetic field generation | Constant magnetic grinding device | Magnetic field source is a permanent magnet or a constant DC electromagnetic coil Suitable for magnetic abrasives that are easily magnetized or demagnetized |
| | Variable magnetic grinding device | Magnetic field source is an AC electromagnetic coil Suitable for magnetic abrasives with strong magnetism |
| The way of the workpiece moves with the magnetic poles | Magnetic grinding device with workpiece movement | Magnetic poles do not move during workpiece movement Suitable for finishing the inner surface of the internal diameter holes |
| | Magnetic grinding device with magnetic polar movement | Workpiece does not move during magnetic poles movement Suitable for finishing the inner surface of the small internal diameter holes |
| | Magnetic grinding device with compound motion | Workpiece and magnetic poles move together Suitable for flat and spherical surface finishing |

3 MAM 加工方法

MAM 按加工对象可以分为外圆面磁力研磨、内圆面磁力研磨、平面磁力研磨、曲面磁力研磨等;按工件导磁性可分为导磁件磁力研磨和非导磁件磁力研磨;按发展历程可分为传统磁力研磨和复合磁力研磨。传统磁力研磨包括磁性磨料研磨、磁针磁力研磨、液体磁性磨具研磨;复合磁力研磨包括超声辅助磁力研磨、电解磁力复合研磨。本文针对小孔内表面 MAM 光整加工技术的研究热点,按其发展历程进行论述。

3.1 磁性磨料研磨

磁性磨料研磨 (Magnetic Abrasive Grinding, MAG) 的工作原理如图 2 所示,磁极在水平方向往复移动的同时也绕中心轴线旋转,磁性磨粒在磁力 F_n 、离心力 F_f 、切向力 F_t 和轴向力 F_a 的共同作用下挤压、划擦工件表面,实现对工件表面材料的微去除。因磁极位置不同,MAG 有外置磁极研磨 (External Magnetic Pole Grinding, EMPG) 和内置磁极研磨 (Built-in Magnetic Pole Grinding, BMPG) 2 种形式^[22]。

3.1.1 EMPG

EMPG 采用工件固定磁极旋转或工件旋转磁极固定的方式使磁性磨粒在小孔内表面运动,其工作原理如图 3 所示。

刘海山等^[23]采用 EMPG 光整加工陶瓷孔内表面,

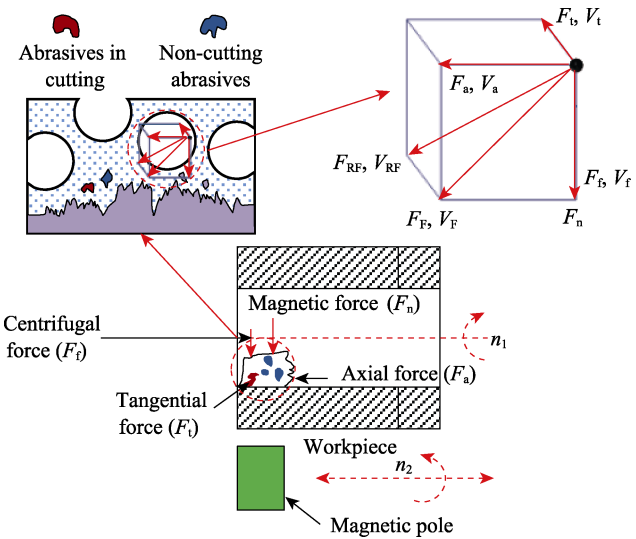


图 2 磁性磨料研磨原理
Fig.2 Principle diagram of MAG

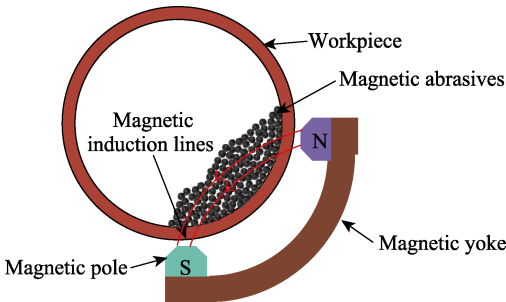


图 3 外置磁极研磨原理
Fig.3 Principle diagram of EMPG

加工后工件表面粗糙度 Ra 由 $2.25\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $0.34\text{ }\mu\text{m}$, 表面质量得到了显著提高。韩冰等^[24]采用 EMPG 光整加工钛合金弯孔内表面, 使其表面粗糙度 Ra 均值由 $0.367\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $0.09\text{ }\mu\text{m}$, 表面形貌变得均匀平整。进一步研究发现, EMPG 加工时的磁极转速、加工间隙、磁性磨粒粒径和轴向进给速度都会影响加工质量, 但磁极转速影响最显著。Mosavat 等^[25]研究表明, 在 EMPG 加工时, 随着磁极转速的增大, 材料去除率也增大, 但较大的磁极转速会使部分磁性磨粒被甩出加工区域, 导致材料去除率有所降低。Jain 等^[26]研究了 EMPG 加工时加工间隙对加工质量的影响, 研究发现, 加工间隙可通过影响磁通密度来影响加工质量, 当加工间隙大于 0.5 mm 时, 加工间隙越小, 工件表面质量越好。Saxena 等^[27]进一步优化了加工间隙参数, 研究表明, 加工低碳钢孔时的最佳加工间隙为 35 mm 。Shinmura 等^[28]研究了磁性磨料中铁磁相的质量百分比与平均粒径对加工效率的影响, 研究表明, 铁磁相质量百分比和平均粒径越大, 加工效率越高。

Heng 等^[29]研究了 EMPG 加工时磁极头形状对加工质量的影响, 研究发现, 相较于锐边和圆边磁极头, 方边磁极头的加工质量最好。肖作义等^[30]研究了 EMPG 加工时磁极开槽情况对加工质量的影响, 研究表明, 在磁极表面开槽可以有效改变磁场分布, 进而提高加工质量和加工效率。进一步研究发现, 磁极表面开矩形槽且当矩形槽的深宽比为 $1:1$ 时加工质量最好, 加工效率最高。

在 EMPG 加工时, 如何提高加工效率成为国内外学者研究的重点。表 2 对不同学者采用的方法进行了总结归纳, 表明在孔内添加辅助磁极或改变磁极分布可以提高加工效率。辅助磁极形状不同, 加工效率也不同, 其中, 球形磁铁和 V 形磁铁较为常用^[31]。此外, 磁极夹角不同, 加工效率也不同。张龙龙等^[32]对磁极分布夹角分别为 90° 、 150° 和 180° 时的磁场分布情况进行了仿真模拟, 如图 4 所示, 结果表明, 磁

感应强度随磁极夹角的增大而减小, 当磁极分布夹角为 90° 时, 磁感应强度最大, 磁场的有效作用区域也最大, 加工效率最高。

尽管 EMPG 是光整加工小孔内表面的有效手段, 但在加工铁磁性小孔内表面和大壁厚小孔内表面时, 由于磁屏蔽效应的存在, 加工效果不明显。Wang 等^[36]采用 EMPG 加工非铁磁性薄壁小孔内表面, 结果表明, 当壁厚为 $1\sim 2\text{ mm}$ 时, 加工效果明显; 当壁厚大于 3 mm 时, 加工效率较低; 当壁厚大于 5 mm 时, 加工效果不理想。

3.1.2 BMPG

BMPG 可解决 EMPG 加工铁磁性孔内表面和大壁厚孔内表面时由于磁屏蔽效应而无法有效加工的问题, 其原理如图 5 所示。

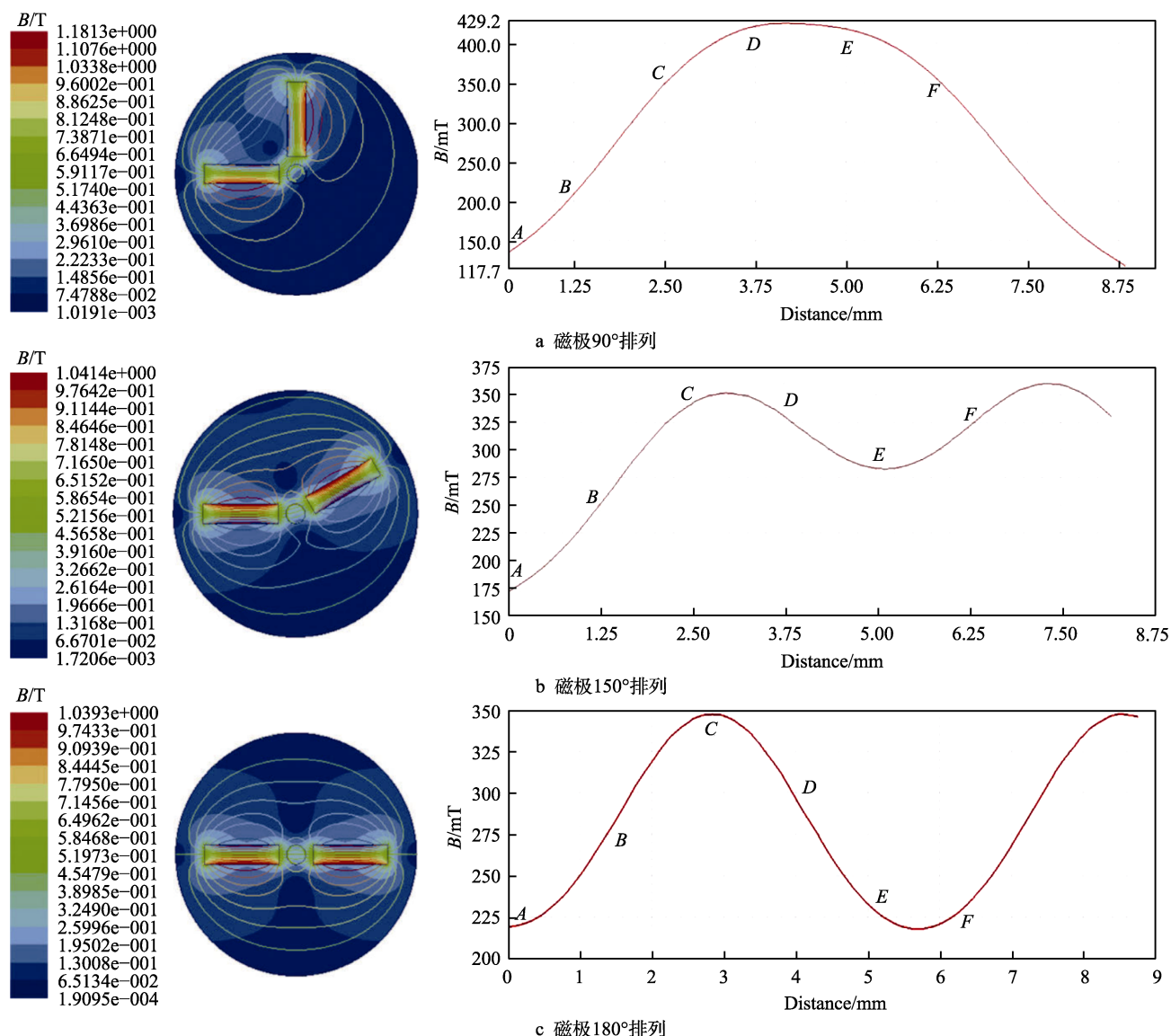
陈燕等^[37]采用 BMPG 对 40Cr 孔内表面进行了加工, 加工后工件表面粗糙度 Ra 值由 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 降低到 $0.25\text{ }\mu\text{m}$, 微裂纹、凹坑等缺陷基本被去除。进一步研究表明, 当磁极为环形、转速达到 $2\text{ }000\text{ r/min}$ 且与工件反向旋转时, 加工效率较高。张桂香等^[38]提出用 Nd-Fe-B 永久磁铁代替电磁铁作为内置磁极来对液压缸内孔表面进行光整加工, 加工后工件表面粗糙度 Ra 由 $0.51\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $0.11\text{ }\mu\text{m}$, 验证了该方法的可行性。

李文龙等^[39]研究了 BMPG 加工时聚磁盘形状对加工质量的影响 (见图 6), 研究表明, 在相同条件下, 当聚磁盘未开槽时, 工件表面粗糙度 Ra 由 $0.509\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $0.127\text{ }\mu\text{m}$, 表面粗糙度值降低率为 75.04% ; 当聚磁盘开槽时, 工件表面粗糙度由 $0.509\text{ }\mu\text{m}$ 下降到 $0.097\text{ }\mu\text{m}$, 表面粗糙度值降低率为 82.45% (见图 7)。在聚磁盘上开槽可改变磁场分布和强度变化, 进而改变研磨压力, 提高加工质量, 应深入研究聚磁盘上开槽部位和开槽形状对加工质量的影响规律。

刘海山等^[23]对 BMPG 加工机理进行了研究, 得出 BMPG 加工时的临界速度公式, 如式 (1) 所示。

表 2 不同 EMPG 加工方法
Tab.2 Different EMPG machining methods

| Methods | Machining effect | Characteristic | Reference |
|--|--|-----------------------------------|-----------|
| Adding a slotted V-magnet to the hole | Improving processing efficiency | Increasing the grinding pressure | [31] |
| Changing the magnetic pole distribution | Improving processing efficiency | Changing magnetic field intensity | [32] |
| Adding a spherical magnet to the hole | Processing efficiency increased by approximately 40% | Increasing the grinding pressure | [33] |
| Adding heat-treated, magnetically conductive austenitic stainless-steel wire to the hole | Improving processing efficiency | Increasing the grinding pressure | [34] |
| Adding N-S clamps to the hole | Significantly improving processing efficiency | Increasing the grinding pressure | [35] |

图4 磁感应强度模拟曲线云图^[32]Fig.4 Magnetic induction intensity simulation curve cloud diagram: a) magnetic poles arranged at 90°; b) magnetic poles arranged at 150°; c) magnetic poles arranged at 180°^[32]

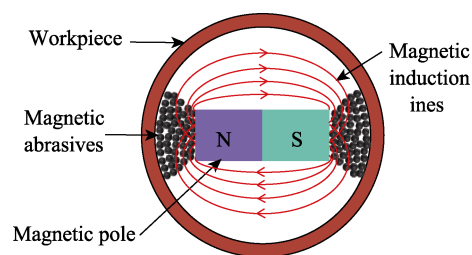
$$v = \sqrt{\frac{R}{f \cdot m} \left(\frac{V_0 B}{\mu_0} \cdot \frac{\partial B}{\partial y} - \frac{f B^2}{4 \mu_0} \cdot \frac{3 \pi (\mu_r - 1) w}{3(2 + \mu_r) + \pi (\mu_r - 1) w} \cdot S \right)} \quad (1)$$

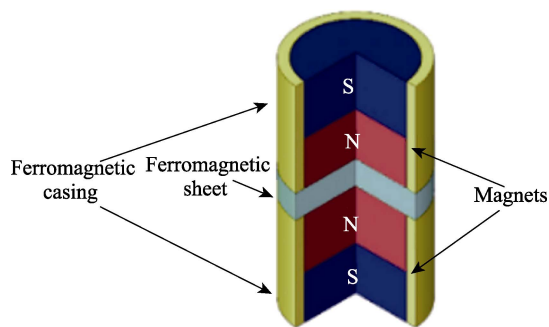
式中: R 为孔的内径; f 为工件表面的摩擦因数; m 为单颗磁性磨粒的质量; V_0 为磁性磨粒中含铁的体积; B 为磁感应强度; w 为磁性磨粒中含铁的容积率; S 为磁性磨粒与工件的接触面积; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为磁性磨粒中铁磁性材料的相对磁导率。

式(1)表明, 当磁性磨粒的速度大于临界速度时, 在增大研磨压力的同时, 也会使磁性磨粒的切削能力下降, 导致加工效率降低。因此, 在 BMPG 加工时要选择合理的工艺参数和加工工艺。

综上, EMPG 和 BMPG 各有优势。EMPG 采用磁极外置的方式, 加工质量高, 对工件的表面损伤小, 易实现自动化。但由于存在磁屏蔽效应, 不适用于非铁磁性大壁厚小孔和铁磁性小孔内表面的加工。当壁

厚大于 5 mm 时, EMPG 加工效果不理想。而 BMPG 采用磁极内置的方式有效避免了磁屏蔽效应的影响, 但磁极内置会导致磁性磨粒运动轨迹单一, 且运动轨迹间相互叠加会形成较深的划痕损伤工件表面。此外, 如何进一步提高加工效率, 也是 EMPG 和 BMPG 亟需解决的问题。

图5 内置磁极研磨原理
Fig.5 Principle diagram of BMPG

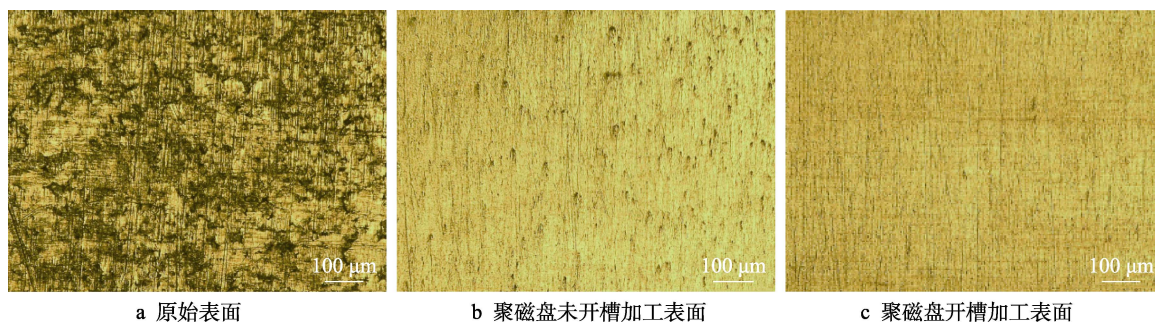
图 6 开槽聚磁盘示意图^[39]Fig.6 Schematic diagram of slotted polydisk^[39]

3.2 磁针磁力研磨

磁针磁力研磨 (Magnetic Needle Abrasive Grinding,

MNAG) 的原理如图 8 所示。磁力驱动磁针与工件表面发生碰撞、划擦和滚压^[40], 可去除工件的棱、毛刺以及内表面的重铸层, 在提升工件表面质量的基础上对工件表面起到强化改性的作用^[41]。

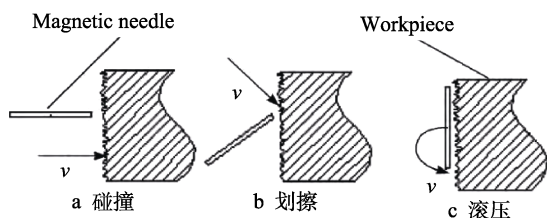
陈燕等^[42]采用 MNAG 完全去除了涡轮轴内壁的积碳 (见图 9), 但在去除过程中发现磁针会与工件表面碰撞导致氧化, 氧化后的 Fe 会加速积碳的沉积, 故加工完后需要冲洗或蹭刷以去除渗入的 Fe 元素。徐会等^[43]采用 MNAG 对燃油喷嘴内表面的积碳进行了去除, 通过建立表面粗糙度和材料去除量的数学模型, 得到了 MNAG 去除燃油喷嘴内表面积碳的最佳工艺参数如下: 磁场转速为 1 000 r/min, 磁针型号为 $\phi 0.8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。



a 原始表面

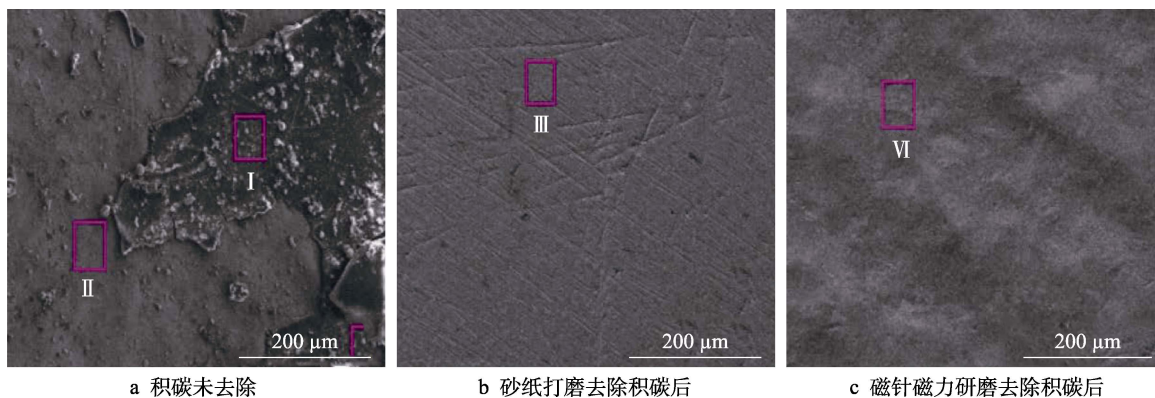
b 聚磁盘未开槽加工表面

c 聚磁盘开槽加工表面

图 7 微观表面形貌^[39]Fig.7 Schematic diagram of micro surface topography: a) original surface; b) unslotted polydisk machined surface; c) slotted polydisk machined surface^[39]图 8 磁针磁力研磨原理^[40]Fig.8 Principle diagram of MNAG: a) collision; b) scratch; c) rolling^[40]

有学者提出可利用 MNAG 去除小孔棱边处的毛

刺^[44-45], 研究表明, 经过 MNAG 加工后, 微小喷嘴孔棱边处的毛刺和叶片气膜冷却孔棱边处的毛刺均被有效去除, 表面形貌得到改善, 加工质量得到明显提高。进一步地, 杨欢等^[41]研究了 MNAG 去除小孔边缘毛刺时磁极盘排布方式对加工质量的影响 (见图 10)。研究表明, 采用方案 3 的排布方式后, 小孔边缘的毛刺和积瘤均被有效去除, 相较于原始手工加工, 加工效率提高了 64 倍, 毛刺去除率可达到 95% 以上。MNAG 解决了小孔工件棱边处毛刺难以去除的加工难题, 进一步提高了工件的使用寿命。

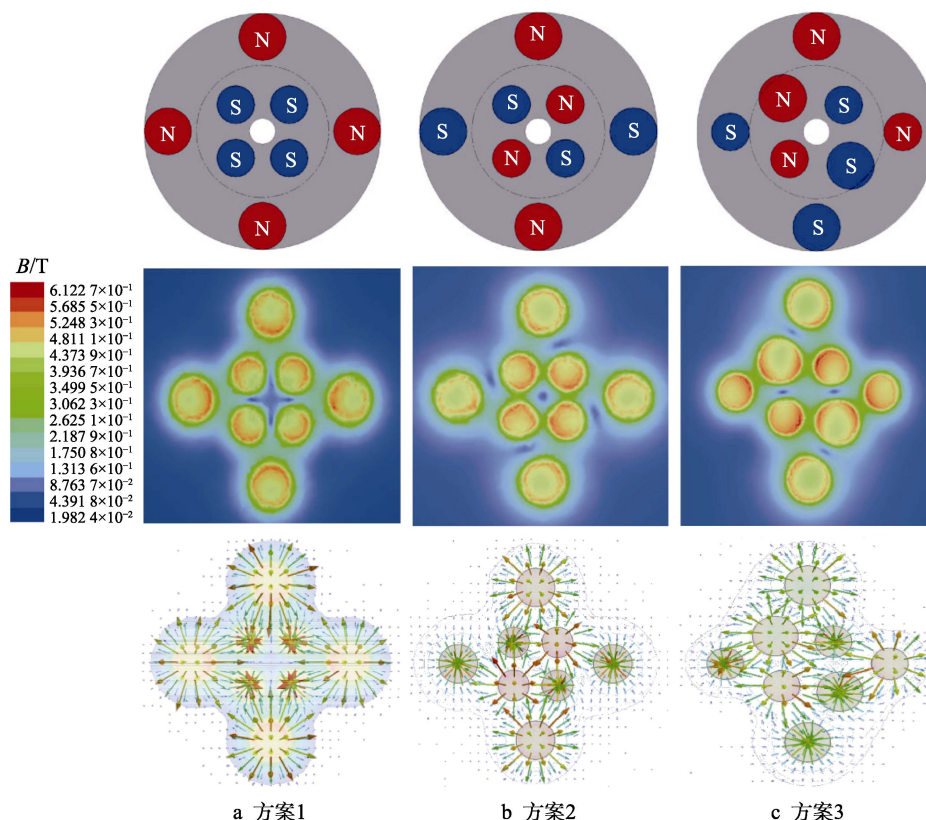


a 积碳未去除

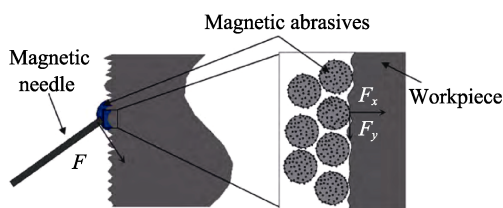
b 砂纸打磨去除积碳后

c 磁针磁力研磨去除积碳后

图 9 不同状态下涡轮轴内壁的表面形貌^[42]Fig.9 Surface morphology of turbine shaft inner wall under different conditions: a) carbon is not removed; b) after removal of carbon by sanding; c) after removal of carbon by MNAG^[42]

图 10 3 种磁极分布方案^[41]Fig.10 Three magnetic pole distribution schemes: a) scheme 1; b) scheme 2; c) scheme 3^[41]

朱慧宁等^[46]采用 MNAG 光整加工航空发动机涡轮叶片气膜孔, 研究表明, 当磁针尺寸为 $\phi 0.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、磁场转速为 800 r/min、研磨时间为 8 min 时, 涡轮叶片气膜孔周边毛刺高度由 $43.9 \mu\text{m}$ 变为 $20.2 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 Ra 由 $0.5 \mu\text{m}$ 下降到 $0.16 \mu\text{m}$, 工件表面得到了明显的改善。但 MNAG 加工时会存在加工盲区, 且在加工过程中磁针碰撞会对工件表面造成损伤。为此, 周传强等^[47]提出了磁性磨粒辅助磁针磁力研磨的新方法 (见图 11)。研究表明, 当磁针与磁性磨粒的质量比为 1:2 时, 加工后工件表面粗糙度 Ra 值由 $1.0 \mu\text{m}$ 下降到 $0.54 \mu\text{m}$, 工件表面无明显的加工纹理和磁针碰撞痕迹, 且无研磨盲区的存在。磁针中磁性磨粒的加入既增加了磁针束的柔性, 又起到了碰撞缓冲作用, 可避免磁针碰撞工件产生损伤, 同时, 磁针也增大了磁性磨粒的研磨压力和切削力, 有利于消除 MNAG 加工时的加工盲区, 这为消除 MNAG 的加工盲区提供了有益参考。

图 11 磁性磨粒辅助磁针磁力研磨原理^[47]Fig.11 Principle diagram of MAMNAG^[47]

周传强等^[40]采用 MNAG 光整加工 SUS316 异型孔内表面, 研究表明, 加工后工件表面粗糙度 Ra 平均值由 $1.47 \mu\text{m}$ 下降到了 $0.47 \mu\text{m}$, 且孔内焊接相贯线处的残留焊渣和毛刺也被完全去除, 表面质量得到明显改善。Yamaguchi 等^[48]研究发现, MNAG 加工时磁针的大小会对加工表面产生一定的影响。朱慧宁等^[46]研究了 MNAG 加工时磁极转速、磁针长度、磁针直径对加工表面的影响, 研究表明, 在一定范围内, 随着磁极转速、磁针长度和磁针直径的增大, 磁针获得的动能增大, 对工件表面的作用力也增大, 导致工件表面粗糙度有所降低。但当磁极转速、磁针长度和磁针直径过大时, 磁针对工件表面的作用力过大, 会在工件表面留下划痕, 在损伤工件表面的同时使工件表面粗糙度变大。

综上, MNAG 更适用于异型小孔内表面的光整加工, 尤其针对小孔棱边处重铸层的积瘤和毛刺以及异型变截面孔相贯线处的残留焊渣和毛刺, MNAG 具有无可比拟的优势, 可显著提高工件表面质量。但 MNAG 加工时会存在加工盲区, 且研磨压力过大会对工件表面产生损伤, 因此, 如何消除 MNAG 加工时的加工盲区和更好地控制研磨压力是 MNAG 需要解决的问题。

3.3 液体磁性磨具研磨

液体磁性磨具研磨 (Fluid Magnetic Abrasives,

FMA)是一种利用磨具的动态变化来实现工件表面光整加工的柔性加工技术^[49]。如图 12 所示,液体磨具主要由磁性粒子和磨料颗粒组成,在施加磁场后,磨具会由自由流动的牛顿液体变为固结状态的 Bingham 体,进而使工件接触并产生相对运动,实现对工件表面的光整加工^[50]。

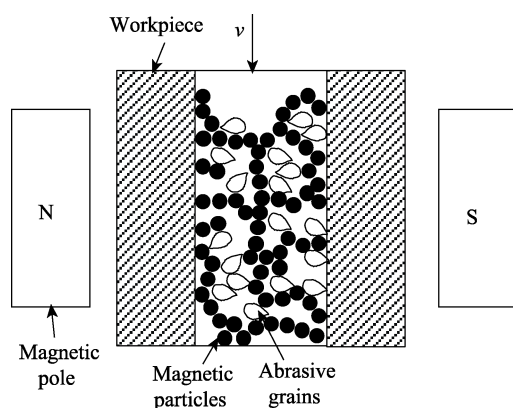


图 12 液体磁性磨具研磨原理
Fig.12 Principle diagram of FMA

周钦等^[51]研究了 FMA 加工时磨料粒度、入口压力、电流强度等工艺参数对工件表面质量的影响,研究表明,在合适的范围内,材料去除率和工件表面质量随磨粒直径、入口压力以及电流强度的增大而提高,但过大的磨粒直径、入口压力以及电流强度会提高表面粗糙度,导致工件表面质量变差。赵志强^[52]研究发现,电流强度对加工质量和加工效率的影响程度较大,他对电流强度、加工时间及入口压力等工艺

参数进行了优化,得到了光整加工 $\phi 3$ mm 黄铜小孔时的最优工艺参数如下:电流强度为 3.0 A、加工时间为 10 min 和入口压力为 0.3 MPa。

Vshivkov 等^[53]研究表明,FMA 加工时存在的滑移效应会严重影响加工过程中材料的去除率和加工效果的一致性。段海栋等^[54]考虑了滑移效应对材料去除率的影响,研究发现,FMA 加工时在有效磁场强度区间内,材料去除率随磁场强度的增大而增大,在该区间外材料加工效率极低或不能进行加工。

针对 FMA 加工小孔内表面时难以实现表面粗糙度监测的问题,赵志强^[52]提出了基于压力差的表面粗糙度监测方法,研究表明,FMA 加工时压力差与表面粗糙度之间存在稳定的关系,该方法为 FMA 加工时工件表面粗糙度的在线监测提供了一种新的思路。

综上,FMA 加工对工件形状的适应性强,可对异型小孔内表面进行光整加工,但 FMA 加工过程中磨具会动态变化,难以控制工艺参数,难以实现表面粗糙度的监测,故容易产生“欠加工”、“过加工”等加工质量问题。因此,如何提高 FMA 工艺参数的可控性,是 FMA 加工技术需要解决的技术难题。

3.4 超声辅助磁力研磨

超声辅助磁力研磨 (Ultrasonic Assisted Magnetic Grinding, UAMG) 通过给辅助磁极添加轴向超声振动以提高加工效率,其原理如图 13 所示。通过给辅助磁极添加轴向振动,可改变磁性磨粒的切削方向和运动轨迹,在增大瞬时研磨压力的同时,提高了加工效率^[26]。

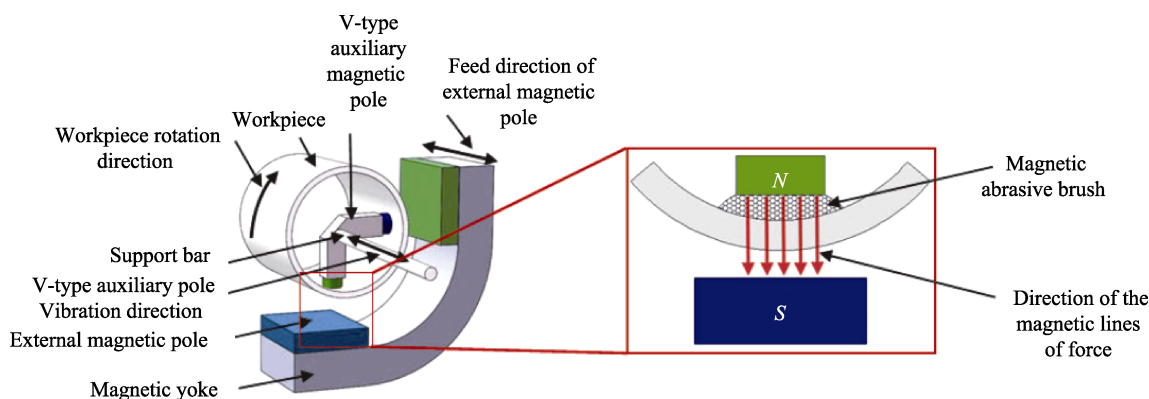


图 13 超声辅助磁力研磨原理^[55]
Fig.13 Principle diagram of UAMG^[55]

杨海吉等^[56]采用 UAMG 光整加工 TC4 薄壁细长孔内表面,研究表明,加工 40 min 后,添加超声振动的工件表面粗糙度 R_a 值由 $1.4 \mu\text{m}$ 降至 $0.25 \mu\text{m}$,材料去除量可达到 50 mg,而未添加超声振动的工件表面粗糙度 R_a 值仅由 $1.4 \mu\text{m}$ 降至 $0.45 \mu\text{m}$,材料去除量为 35 mg,可见超声振动的引入显著改善了工件的表面质量。焦安源等^[57]采用 UAMG 对锥形孔进行

加工 (见图 14),加工后工件表面粗糙度 R_a 值由 $1.23 \mu\text{m}$ 降到 $0.25 \mu\text{m}$,微波峰、凹坑和加工纹理均被去除,表面质量得到显著提高,工件形状精度得到明显改善。康璐等^[58]研究了 UAMG 加工时超声振动与磁力研磨的协同增效机制,研究发现,改变磁极头形状更有利于去除工件表面加工纹理和波纹,在提高加工质量的同时也能提高加工效率。

陈燕等^[59]研究了 UAMG 加工镍基合金 GH4169 异型孔内表面时主轴转速、磁性磨粒粒径、超声频率和超声振幅等工艺参数对工件表面粗糙度的影响(见图 15)。研究表明,在相同条件下,随着主轴转速、磁性磨粒粒径、超声频率和振幅的增大,工件表面粗糙度下降速率加快,但当主轴转速过高、磁性磨粒粒径过大、超声振幅过大时,在降低磁性磨粒性能的同时也会在工件表面产生较长的划痕,从而影响加工质

量。因此, UAMG 加工时要合理选择工艺参数。

综上,引入超声振动能实现磁性磨粒旋转与轴向高频振动的复合运动,在提高加工效率的同时也使加工纹理更细密均匀,并从根源上阻止细小裂纹的扩展,这是一种很有应用前景的光整加工方法。但超声振动频率不同,振幅不同,主轴转速不同,加工效果也不同,所以 UAMG 加工的工艺参数需要进一步优化。

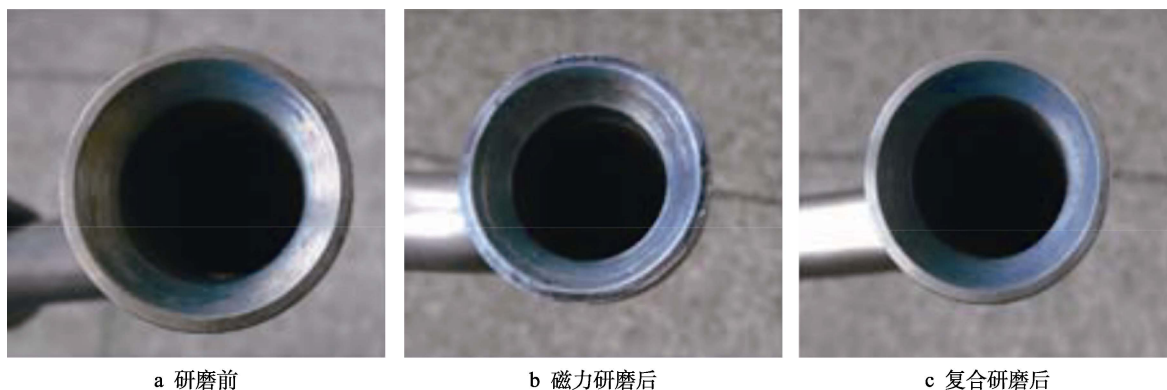


图 14 超声辅助磁力研磨光整加工锥孔前后着色图^[57]

Fig.14 UAMG finishing cone hole before and after coloring: a) pre-grinding; b) magnetic grinding; c) composite grinding^[57]

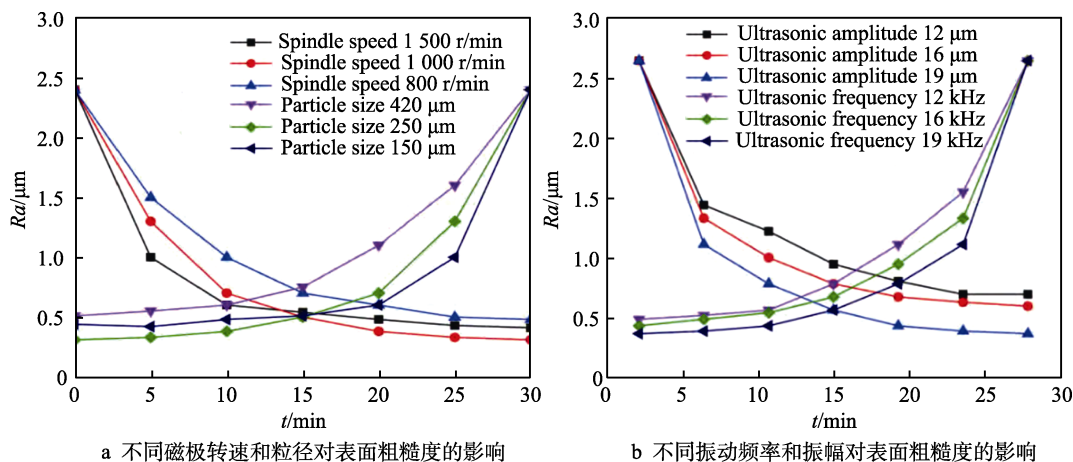


图 15 UAMG 不同工艺参数对表面粗糙度的影响^[59]

Fig.15 Effect of different UAMG process parameters on profile surface roughness: a) effect of different magnetic pole speed and particle sizes on surface roughness; b) effect of different vibration frequencies and amplitudes on surface roughness^[59]

3.5 电解磁力复合研磨

电解磁力复合研磨 (Electrolytic Magnetic Composite Grinding, EMCG) 融合了磁力研磨可控性高和电解加工高效性的优点,其原理如图 16 所示。EMCG 对小孔进行加工时,经蠕动泵抽取的电解液与工件表面反应生成致密的钝化膜,随后磁性磨粒翻滚、挤压、变形和微切削钝化膜,实现工件表面的光整^[60]。

廖明等^[62]采用 EMCG 光整加工钛合金孔内表面,研究发现,与纯磁力研磨和纯电化学加工相比,

EMCG 能获得更好的表面粗糙度、材料去除量以及表面微观形貌。田腾腾等^[63]对 EMCG 加工钛合金工件时的工艺参数进行了优化,研究表明,当主轴转速为 1 000 r/min、电解电压为 15 V、进给速度为 2.5 mm/s 时,加工后工件表面粗糙度 Ra 值由 1.7 μm 下降到 0.13 μm ,表面微裂纹和微观形貌得到了明显的改善。

谭悦等^[64]研究了 EMCG 加工时磁极转速、电解电压对工件表面质量的影响,研究发现,在一定范围内,随着磁极转速的升高和电解电压的增大,工件表面的粗糙度有所下降,但磁极转速过高、电压过大会导致加工效率降低甚至破坏工件表面,因此,合理选

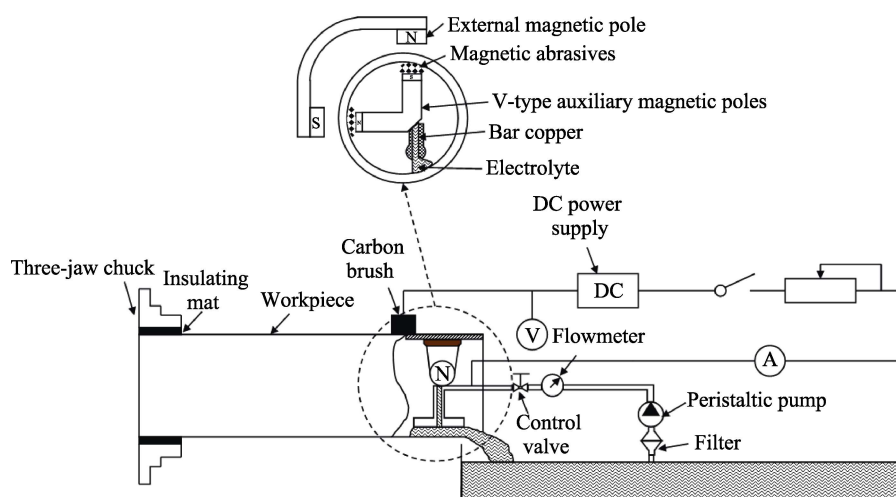


图 16 电解磁力复合研磨原理^[61]
Fig.16 Principle diagram of EMCG^[61]

择磁极转速和电解压力极为重要。康璐等^[65]研究了 EMCG 加工对磁性磨粒性能的影响, 研究发现, EMCG 加工后磁性磨粒中铝的相对质量分数仅由 27.60% 降至 23.48%, 而 MAG 加工后铝的相对质量分数由 27.60% 降至 13.38%。研究表明, EMCG 可有效降低磁性磨料中研磨相的损失, 提高磁性磨料的利用率和使用寿命, 进而提高加工效率。

刘新龙等^[66]将 MAG 和 EMCG 相结合, 提出了一种新型电解-旋转超声磁力复合研磨加工方法, 并采用该方法对 TC4 钛合金孔边的毛刺进行了去除, 研究表明, 当磁极转速为 1 300 r/min、电解电压为 9 V、旋转超声振幅为 4 μm 、加工时间为 8 min 时, 孔边的毛刺被完全去除, 工件表面粗糙度 R_a 由 1.60 μm 降至 0.12 μm , 工件表面质量得到了明显的改善, 但该方法应用于小孔内表面加工的可行性需要进一步研究。

综上, EMCG 将 MAG 与电化学相结合, 具有不受材料硬度限制、磨粒磨损小、可控性高、加工效率高等优点。但在 EMCG 加工过程中, 工件必须为导电材料, 且电解液的使用会对环境造成污染。

4 MAM 材料去除机理

4.1 MAM 材料去除方式

相关研究表明, MAM 加工时材料的去除方式主要有以下 4 种^[67]: 1) 微量切削与挤压, 在磁场力的作用下, 磁性磨粒随机变化角度和位置, 不断挤压、划擦、微切削工件表面, 实现对工件表面的光整加工; 2) 多次塑性变形磨损, 在加工过程中, 较为圆钝的磁性磨粒对工件表面进行挤压形成塑性变形, 不断积累的塑性变形会在工件表面产生加工硬化, 导致材料以磨屑的形式从工件表面脱落; 3) 腐蚀磨损, 在磁性磨料研磨作用下, 磨损后的金属表面由于环境的腐蚀会迅速形成一层极薄的氧化膜, 氧化膜在随后的摩

擦中脱落, 从而达到光整加工的效果; 4) 电化学磨损, 磁场力的作用会导致磁性磨粒两端和工件表面分别产生微小的电动势和电流, 从而形成电化学效应, 进一步提高磁力研磨效果。

4.2 硬脆性材料去除机理

在 MAM 光整加工小孔内表面时, 材料种类不同, 去除机理也不同。如图 17 所示, 脆性断裂去除、塑性变形去除和粉末化去除为硬脆性材料的主要去除机理^[68]。在加工过程中, 材料发生脆性断裂后以裂纹扩展的形式被去除称为脆性断裂去除, 在尖劈、划刻和堆积等作用下发生塑性变形后以切屑的形式被去除称为塑性变形去除^[69]。当主轴对材料高速加工时, 磨料与工件相对运动产生的气流带走加工时产生的粉末被称为粉末化去除。进一步研究表明, 在脆性去除和塑性去除之间存在的临界切削深度 (d_{lin}) 是影响材料去除方式的重要因素, 当切削深度小于 d_{lin} 时, 塑性变形去除为材料的主要去除方式; 当切削深度大于 d_{lin} 时, 脆性断裂去除为材料的主要去除方式; 当切削深度在亚微米级时, 材料主要以粉末化去除的方式被去除^[68,70]。

4.3 塑性材料去除机理

MAM 在加工塑性材料时, 塑性材料去除可分为滑擦阶段、耕犁阶段和材料去除 3 个阶段^[71]。在加工初期, 磁性磨粒仅与工件表面产生摩擦, 工件表面发生塑性和弹性变形, 此时磨粒并不切削工件表面, 为滑擦阶段。随后, 磁性磨粒切削刃开始切入工件表面, 工件表面材料沿着磨粒的两端挤出形成隆起, 进入耕犁阶段, 滑擦阶段和耕犁阶段都不产生切屑。当切削深度不断增大到临界切削深度后进入材料去除阶段, 此时在磁性磨粒切削刃的作用下, 耕犁阶段隆起的材料会不断流动, 直到沿切削刃前面滑出形成切屑。研究表明, 当磨粒低速滑擦时, 耕犁作用随切削深度的

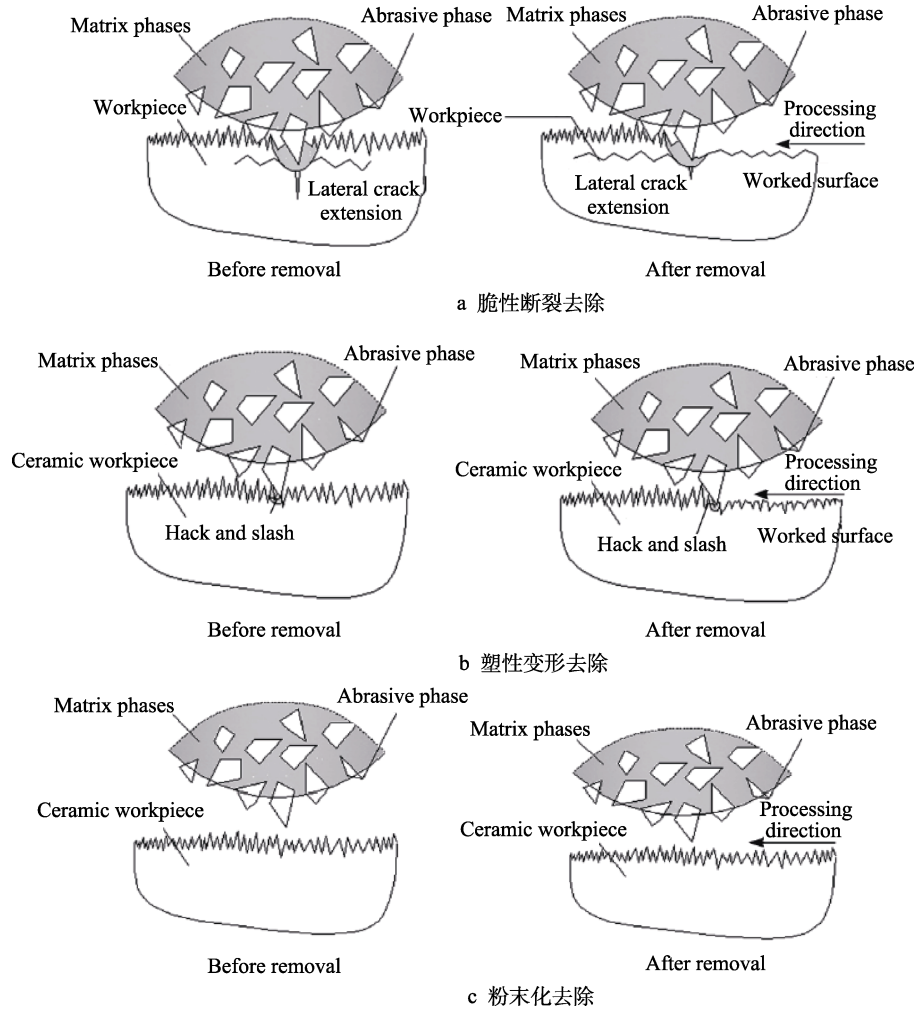
图 17 磁力研磨加工时材料的去除方式^[68]

Fig.17 Material removal methods of MAM: a) brittle fracture removal; b) plastic deformation removal; c) powdered removal^[68]

增大而逐渐减弱,沟槽两侧的塑性隆起随磨削速度和磨粒去除面积的增大而降低^[72]。此外,在磨削过程中,在相同条件下,提高磨削速度可降低磨削力,从而显著降低切屑形成难度^[73]。

5 MAM 材料去除模型

5.1 单颗磁性磨粒材料去除模型

王琰^[74]将磁性磨粒视为刚体,在忽略磁性磨粒间相互作用力的基础上对磁性磨粒进行了受力分析,建立了单颗磁性磨粒所受磁场力 F 的数学模型,如式(2)所示。

$$\begin{cases} F_x = \frac{k}{\mu_0} \mathcal{N} \cdot V \cdot B \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \\ F_y = \frac{k}{\mu_0} \mathcal{N} \cdot V \cdot B \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \\ F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k 为磁通集中系数; V 为单颗磁性磨粒的

体积; \mathcal{N} 为磁性磨粒的磁化率; μ_0 为真空磁导率; B 为磁感应强度; $\partial H/\partial x$ 、 $\partial H/\partial y$ 为磁场强度在 x 、 y 方向上的梯度; F_x 、 F_y 为磁性磨粒在 x 、 y 方向上受到磁场力的分力。该模型表明,在 MAM 加工过程中,磁性磨粒受到的磁场力大小与磨粒体积、磁化率、磁导率、磁感应强度等因素有关,这为分析单颗磁性磨粒所受的磁场力提供了理论参考,但该模型未考虑磁性磨粒间的相互作用力,其可行性有待进一步验证。

Liu 等^[75]对该模型进行了简化,研究了磁场强度对磁性磨粒所受磁场力的影响,简化后的模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} F_x = V \cdot \mathcal{N} \cdot \mu_0 \cdot H \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \\ F_y = V \cdot \mathcal{N} \cdot \mu_0 \cdot H \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \\ F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: H 为磁场强度。该模型表明,磁性磨粒所受磁场力与磁场强度间存在线性关系,可通过增大磁场的磁感应强度来增大磁性磨粒所受的磁场力,从而

提高 MAM 加工效率。

为了进一步探究磁性磨粒开始光整加工的条件, 金洙吉等^[12]在对单颗磁性磨粒进行受力分析时考虑了磁性磨粒间的相互作用力 (见图 18), 分析表明, 当磁性磨粒切向所受的合力 ΔF_t 大于切向研磨压力 F_t 时, 即满足式 (4) 时, 磁性磨粒就会与工件表面产生相对运动, 对工件表面开始光整加工。

$$\Delta F_t = F \cos \alpha + F' \cos \theta + mg \cos \beta > F_t \quad (4)$$

式中: F' 、 m 、 g 分别为周围其他磁性磨粒对该磨粒的压力、磁性磨粒的质量、重力加速度。该模型为确定磁性磨粒光整加工的初始条件提供了理论参考。

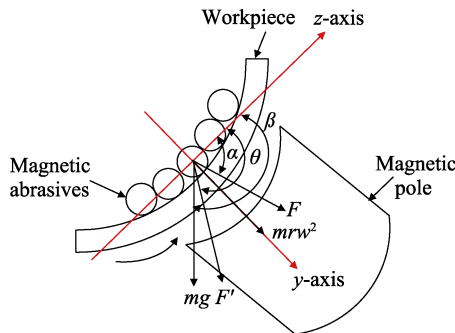


图 18 单个磁性磨粒受力示意图^[12]
Fig.18 Force diagram of single magnetic abrasive grain^[12]

为了探究单颗磁性磨粒在 MAM 加工过程中对工件表面产生的研磨压力, 邓超等^[76]建立了单颗磁性磨粒产生研磨压力 P 的数学模型, 如式 (5) 所示。

$$P = \frac{H^2 \mu_0}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu_m} \right) = \frac{B^2 \mu_0}{2} \left(1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (5)$$

式中: μ_m 为磁性磨粒的相对磁导率。该模型表明, 在 MAM 加工过程中, 单颗磁性磨粒产生的研磨压力与外部磁场和磁导率有关。由于相对磁导率与磁性磨粒的性质有关, 因此通过提高磁性磨粒的相对磁导率来提高 MAM 加工效率具有很大的局限性, 故可通过增大外部磁场的磁感应强度来提高加工效率。

Jain 等^[77]还建立了 MAM 加工时单个磁性磨粒切削深度 h 的数学模型, 如式 (6) 所示。

$$h = \frac{d_g}{2} - \sqrt{\frac{d_g^2}{4} - \frac{f_n}{\pi K H_w}} \quad (6)$$

式中: f_n 为单个磨粒的研磨压力; d_g 为磨粒直径; H_w 为材料的布氏硬度; K 为材料特性参数。该模型为分析 MAM 加工效率提供了理论参考。

5.2 “磁力刷”材料去除模型

芦亚萍等^[78]对 MAM 加工时材料的去除规律进行了研究, 建立了“磁力刷”去除材料的数学模型, 如式 (7) 所示。

$$M = C \sum_{i=1}^n k_1 k_{2i} \rho v_i A_i \frac{H_i^2}{2N} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu} \right) \quad (7)$$

式中: M 为材料去除量; C 为实验系数; n 为参与切削的磨粒数量; k_1 为与工件材料硬度成反比的常数; k_{2i} 为与磨粒粒度及其刃口切入工件的能力成正比的常数; ρ 为材料密度; A 为单个磁粒与工件的实际接触面; N 为磁性磨粒个数; μ 为磁性磨粒的磁导率。该数学模型表明, 当工件、磨粒、填充量、研磨压力、研磨时间等工艺参数一定时, 加工效率与磨粒切入工件的能力 k_{2i} 有关, 因此, 可通过提高磨粒切削时刃口的锋利度来提高磨粒的研磨能力。

陈燕等^[37]结合研磨理论对“磁力刷”光整加工小孔内表面时的研磨压力进行了分析, 建立了 MAM 加工时“磁力刷”产生研磨压力 F 的数学模型, 如式 (8) 所示。

$$F \propto D^3 J H \frac{\partial H / \partial x}{\partial H / \partial y} \quad (8)$$

式中: D 和 J 分别为磁性磨粒的直径和磁性磨粒的磁化率。该模型表明, “磁力刷”产生的研磨压力与磁性磨粒的直径、磁化率、磁场强度及磁场强度变化率成正比, 可以通过选用大颗粒的磁性磨粒、增大磁场强度或磁场强度变化率来提高加工效率。

杨海吉^[79]对光整加工工艺的数学模型 Preston 经验公式 (见式 (9)) 进行了分析, 提出可通过增大磁力刷与工件表面间的相对运动速度来提高加工效率。

$$R(x, y) = qv(x, y)P(x, y) \quad (9)$$

式中: $R(x, y)$ 为单位时间加工区域中磁性磨粒在某点 (x, y) 的材料去除率; q 为其他因素的影响常数; $v(x, y)$ 为磁性磨粒与工件表面的相对运动速度; $P(x, y)$ 为“磁力刷”的研磨压力。

此外, 李刚^[80]还利用指数模型建立了“磁力刷”光整加工细长孔内表面时表面粗糙度的预测模型, 如式 (10) 所示。

$$Ra = 10^{2.9039} p^{-0.595} d^{-0.1815} t^{-0.6268} \quad (10)$$

式中: p 为细长管的转速; d 为磁性磨粒的粒径; t 为光整加工细长孔内表面的加工时间。该模型表明, 提高细长孔的转速、增大磁性磨粒的粒径、延长加工时间可有效提高工件的表面质量, 但该模型是在加工 TC4 钛合金细长孔内表面的实验基础上得出的, 并不适用于其他实验条件, 所以该模型有一定的局限性。

6 总结

综上所述, MAM 加工技术通过磁场与磁性磨粒的相互作用完成对工件表面的挤压、划擦和磨削, 从而达到光整加工的目的。MAM 加工具有仿形性好、柔性接触、自适应好、自锐性强、温升低且无须工具补偿等优点, 适合对小孔内表面进行光整, 各种 MAM 加工方法的比较如表 3 所示。

表 3 各种 MAM 加工方法的比较
Tab.3 Comparison of various MAM methods

| Processing methods | | Characteristics | Processing accuracy | Processing efficiency | Influencing factors | Limitations |
|--------------------|------|--|---------------------|-----------------------|---|---|
| MAG | EMPG | Magnetic poles are external, high machining quality, low surface damage, easy to automate | Micron scale | Low | Pole head shape, pole arrangement, pole speed, machining gap, magnetic grain size, axial feed speed, whether to add auxiliary poles | Not suitable for ferromagnetic holes or small holes with large wall thickness |
| | BMPG | Magnetic poles are built-in, suitable for ferromagnetic holes or small holes with large wall thickness | Micron scale | Low | Pole head shape, magnetic grain size, polydisk shape, polydisk slotting shape and position | Single magnetic grain path, easily damaged workpiece surfaces |
| MNAG | | High efficiency of removing nodules and burrs | Micron scale | Relatively high | Magnetic pole speed, magnetic needle length, magnetic needle diameter, magnetic pole disc arrangement | Blind spots and damage to workpiece surfaces |
| FMA | | High adaptability to the shape of the workpiece | Micron scale | Relatively high | Abrasive size, inlet pressure, current strength, magnetic field range | Difficult to control the process parameters, easy to produce processing quality problems such as 'under-processing' and 'over-processing' |
| UAMG | | High processing efficiency | Micron scale | High | Spindle speed, magnetic particle size, ultrasonic frequency and ultrasonic amplitude | Impossible to predict the motion trajectory and grinding path of abrasive particles |
| EMCG | | Unlimited material hardness, low abrasive wear, high controllability, high machining efficiency | Micron scale | High | Magnetic pole speed, electrolytic voltage | Only for conductive materials |

在 MAM 加工过程中，主要通过微量切削与挤压、塑性变形磨损、腐蚀磨损和电化学磨损等方式实现对材料的去除，材料种类不同，去除机理也不同。硬脆性材料去除机理可分为脆性断裂去除、塑性变形去除和粉末化去除。塑性材料的去除可分为滑擦阶段、耕犁阶段和材料去除 3 个阶段。尽管 MAM 加工技术在小孔内表面光整加工中具有一定的优势，但也存在一定的局限性，未来仍有一些工作需要进行：

1) 应深化材料去除机理和材料去除模型的研究。MAM 加工时材料种类不同，去除机理也不同。目前 MAM 加工时的材料去除模型大都不考虑磁性磨粒在加工中的磨损情况，因而建立的模型与实际加工过程存在误差，故只有深化对材料去除模型的研究，才能更深入分析材料的去除机理，更好地制定加工工艺。

2) 应加强工艺参数的优化。MAM 加工时的工艺参数不同，加工效率不同，加工质量也不同。因此，要加强工艺参数的优化，深入研究加工质量最好、加工效率最高的最佳工艺参数组合。

3) 应提高 MAM 的加工效率。尽管 MAM 加工有诸多优势，但相较于其他加工方法，加工效率较低。因此，MAM 加工技术必须朝着复合化的方向发展，通过与超声加工、电化学加工等其他技术复合，才能

充分发挥各个技术的优势，提高加工效率，满足现代化生产的要求。

参考文献：

[1] SAMBHARIA J, MALI H S. Recent Developments in Abrasive Flow Finishing Process: A Review of Current Research and Future Prospects[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(2): 388-399.

[2] SAI C K D, JAMEEL B S M. Optimization of Process Parameters in Surface Finishing of Al6061 by Using Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18: 3365-3370.

[3] 郭丽静. 孔加工技术综述[J]. 机械工程与自动化, 2011(2): 212-214.

GUO L J. General Situation of Precision Hole Machining Technique[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011(2): 212-214.

[4] HAN S, SALVATORE F, RECH J, et al. Effect of Abrasive Flow Machining (AFM) Finish of Selective Laser Melting (SLM) Internal Channels on Fatigue Performance[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 248-257.

[5] GÜNTHER J, LEUDERS S, KOPPA P, et al. On the

- Effect of Internal Channels and Surface Roughness on the High-cycle Fatigue Performance of Ti-6Al-4V Processed by SLM[J]. *Materials & Design*, 2018, 143: 1-11.
- [6] YAMAZAKI M, SUZUKI T, MORI N, et al. EDM of Micro-rods by Self-drilled Holes[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/2/3): 134-138.
- [7] 杨胜强, 李文辉, 杨世春. 面向内孔的表面光整加工技术研究综述[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2010(1): 56-60.
- YANG S Q, LI W H, YANG S C. Research on Hole Surface Finishing Technology[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2010(1): 56-60.
- [8] BÄHRE D, BRÜNNET H, SWAT M. Investigation of One-Way Abrasive Flow Machining and In-Process Measurement of Axial Forces[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 419-424.
- [9] 高航, 吴鸣宇, 付有志, 等. 流体磨料光整加工理论与技术的发展[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(7): 174-187.
- GAO H, WU M Y, FU Y Z, et al. Development of Theory and Technology in Fluid Abrasive Finishing Technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(7): 174-187.
- [10] 周悦, 王雨婷, 伊福廷, 等. 基于磁流变技术的微孔内壁抛光装置研制及性能研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(6): 252-257.
- ZHOU Y, WANG Y T, YI F T, et al. Development and Performance of Equipment for Polishing Inside Walls of Micro-Holes Based on Magnetic-Field-Assisted Polishing Technology[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(6): 252-257.
- [11] PINTAUDE G, GRABARSKI M I, MOREIRA P P. Maintenance of Hydroerosive Grinding Efficiency Based on Particle Size Distribution of Abrasive Fluid[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41(2): 94.
- [12] 金洙吉, 徐文骥, 方建成. 不锈钢管内圆表面磁力研磨加工实验研究[C]// 特种加工技术——2001 年中国机械工程学会年会暨第九届全国特种加工学术年会论文集. 苏州: [出版者不详], 2001: 368-370.
- JIN Z J, XU W J, FANG J C. Experimental Study on Magnetic Abrasive Finishing of Stainless Steel Tube Inner Surface[C]// *Special Processing Technology-Proceedings of the 2001 Annual Conference of the Chinese Society of Mechanical Engineering and the 9th National Academic Annual Conference on Special Processing*. Suzhou: [s.n.], 2001: 368-370.
- [13] FOX M, AGRAWAL K, SHINMURA T, et al. Magnetic Abrasive Finishing of Rollers[J]. *CIRP Annals*, 1994, 43(1): 181-184.
- [14] ZHANG S R, LIU W N. Experimental Study on Mechanism and Performance of Magnetic Abrasive Finishing[J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 304/305: 384-388.
- [15] WANI A M, YADAVA V, KHATRI A. Simulation for the Prediction of Surface Roughness in Magnetic Abrasive Flow Finishing (MAFF)[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 190(1/2/3): 282-290.
- [16] SINGH D K, JAIN V K, RAGHURAM V, et al. Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush[J]. *Wear*, 2005, 259(7/8/9/10/11/12): 1254-1261.
- [17] YIN S, SHINMURA T. Vertical Vibration-assisted Magnetic Abrasive Finishing and Deburring for Magnesium Alloy[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(12/13): 1297-1303.
- [18] 周亚旗, 王栋, 叶恒宇, 等. 磁力研磨外圆面的磁极设置及工艺参数优化[J]. *机械设计与制造*, 2018(12): 113-116.
- ZHOU Y Q, WANG D, YE H Y, et al. Study on Magnetic Pole Arrangement and Process Parameters Optimization of External Surface Finishing of Cylinder Using Magnetic Abrasive Finishing[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(12): 113-116.
- [19] SHINMURA T, TAKAZAWA K, HATANO E, et al. Study on Magnetic Abrasive Finishing[J]. *CIRP Annals*, 1990, 39(1): 325-328.
- [20] 高小龙, 郑勇, 孙帆, 等. 磁性磨料制备技术的研究进展[J]. *硬质合金*, 2010, 27(2): 118-123.
- GAO X L, ZHENG Y, SUN F, et al. Research Progress of Preparation Technique of Magnetic Abrasive Grain[J]. *Cemented Carbide*, 2010, 27(2): 118-123.
- [21] 李学全, 李峻, 胡德金, 等. 磁力研磨技术[J]. *机械设计与制造工程*, 2000, 29(1): 53-54.
- LI X Q, LI J, HU D J, et al. Magnetic Force Grinding Technology[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2000, 29(1): 53-54.
- [22] 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.
- LIU W H, CHEN Y, LI W L, et al. Research Progress of Magnetic Abrasive Finishing Technology[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(1): 47-61.
- [23] 刘海山, 赵玉刚, 吕晓倩. 铁磁材料内表面的磁力研磨研究[J]. *机械制造与自动化*, 2008, 37(1): 110-112.
- LIU H S, ZHAO Y G, LYU X Q. Study on Magnetic Abrasive Finishing to the Inner Surface of Ferromagnetic Material[J]. *Machine Building & Automation*, 2008, 37(1): 110-112.
- [24] 韩冰, 刘立鑫, 陈燕. 磁力研磨法加工弯管内表面的工艺参数优化[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(6): 814-817.
- HAN B, LIU L X, CHEN Y. Optimization of Process Parameters on Magnetic Abrasive Finishing to Inner Surface of Bending Pipe[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(6): 814-817.
- [25] MOSAVAT M, RAHIMI A. Numerical-experimental Study on Polishing of Silicon Wafer Using Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. *Wear*, 2019, 424/425: 143-150.
- [26] JAIN V K, KUMAR P, BEHERA P K, et al. Effect of Working Gap and Circumferential Speed on the Performance of Magnetic Abrasive Finishing Process[J]. *Wear*, 2001, 250(1): 384-390.

- [27] SAXENA V, YADAV P S, PALI H S. Effect of Magnetic Abrasive Machining Process Parameters on Internal Surface Finish[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 25: 842-847.
- [28] SHINMURA T. Study on a New Internal Finishing Process by the Application of Magnetic Abrasive Machining: Internal Finishing of Stainless Steel Tube and Clean Gas Bomb[J]. *JSME International Journal*, 1995, 38(4): 798-804.
- [29] HENG L, KIM J S, TU J F, et al. Fabrication of Precision Meso-scale Diameter ZrO_2 Ceramic Bars Using New Magnetic Pole Designs in Ultra-precision Magnetic Abrasive Finishing[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(11): 17335-17346.
- [30] 肖作义, 赵玉刚, 吴文权. 磁极形状对磁粒光整加工的影响[J]. *机械制造*, 2003, 41(8): 45-46.
XIAO Z Y, ZHAO Y G, WU W Q. Experimental Study of the Effects of Different Magnetic Pole Shapes on Magnetic Abrasive Machining[J]. *Machinery*, 2003, 41(8): 45-46.
- [31] 陈燕, 张耀明, 邓超, 等. V形磁铁在 SUS304 管内表面抛光中的应用[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(15): 187-191.
CHEN Y, ZHANG Y M, DENG C, et al. Application of V-Shaped Magnet in Polishing the Inner Surface of the SUS304 Tubing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(15): 187-191.
- [32] 张龙龙, 焦安源, 陈燕, 等. 磁粒研磨 Al2024 细长管的机理及试验研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 303-309.
ZHANG L L, JIAO A Y, CHEN Y, et al. Mechanism and Experimental Study of Al2024 Slender Tube by Magnetic Particle Grinding[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(9): 303-309.
- [33] 韩冰, 邓超, 陈燕. 球形磁铁在弯管内表面磁力研磨中的应用[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(6): 565-570.
HAN B, DENG C, CHEN Y. The Spherical Magnet Processing of Inner Surface of Bending Pipe by Magnetic Abrasive Finishing[J]. *Tribology*, 2013, 33(6): 565-570.
- [34] KANG J, YAMAGUCHI H. Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing Using a Multiple Pole-tip System[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(3): 510-516.
- [35] ZOU Y H, SHINMURA T. Study on Internal Magnetic Field Assisted Finishing Process Using a Magnetic Machining Jig[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 291/292: 281-286.
- [36] WANG Y, HU D. Study on the Inner Surface Finishing of Tubing by Magnetic Abrasive Finishing[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(1): 43-49.
- [37] 陈燕, 宋宗朋, 李昌, 等. 磁研磨法抛光 40Cr 钢管件内表面的影响因素[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(4): 62-69.
CHEN Y, SONG Z P, LI C, et al. Influencing Factors on Polishing Inner Surface of 40Cr Steel Pipe Fittings with a Magnetic Grinding Method[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(4): 62-69.
- [38] 张桂香, 赵玉刚, 赵东标, 等. 大壁厚内圆槽磁力光整加工装置设计[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(6): 861-864.
ZHANG G X, ZHAO Y G, ZHAO D B, et al. Design of a Magnetic-Abrasive Finishing Device for Inner Surface Groove of Thick Tubing[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(6): 861-864.
- [39] 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 W L, CHEN Y, LYU Y N, 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.
- [40] 周传强, 韩冰, 马学东, 等. SUS316 异形管件内表面磁针磁力研磨的试验研究[J]. *现代制造工程*, 2019(10): 1-5.
ZHOU C Q, HAN B, MA X D, et al. Study on the Magnetic Abrasive Finishing of the Inner Surface of SUS316 Irregular Tubular by Magnetic Needles[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(10): 1-5.
- [41] 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.
YANG H, CHEN S, MA R, et al. Removal of Burrs on the Edges of Micropores in Complex Contour Skins by Magnetic Finishing[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(9): 342-351.
- [42] 陈燕, 胡玉刚, 巫昌海, 等. 磁针磁力研磨去除涡轮轴内壁积碳[J]. *表面技术*, 2020, 49(6): 259-266.
CHEN Y, HU Y G, WU C H, et al. Removal of Carbon Deposition on the Inner Wall of Turbo Shaft by Magnetic Needle Grinding[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(6): 259-266.
- [43] 徐会, 康仁科, 陈燕. 磁力研磨法去除燃油喷嘴积碳的试验研究[J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 55-66.
XU H, KANG R K, CHEN Y. Experimental Study on Removing Carbon from Fuel Nozzles by Magnetic Grinding[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 55-66.
- [44] 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, 57(9): 88-90.
LI Y J, CHEN Y, GUO L W. Study of Deburring on Edge of Micro Nozzle by Magnetic Abrasive Finishing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(9): 88-90.
- [45] 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, 60(9): 66-70.
LI K, CHEN Y, ZHANG Z C, et al. Experimental Study on Film Cooling Hole Deburring by Alternating Rotating Magnetic Field[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(9): 66-70.
- [46] 朱慧宁, 马小刚, 程海东, 等. 磁针磁力研磨工艺对发

- 动机涡轮叶片表面质量的试验研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(18): 62-68.
- ZHU H N, MA X G, CHENG H D, et al. Experimental Study on Surface Quality of Engine Turbine Blade by Magnetic Needle Magnetic Abrasive Technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(18): 62-68.
- [47] 周传强, 韩冰, 肖春芳, 等. 磁性磨粒辅助磁针磁力研磨的应用研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 275-282.
- ZHOU C Q, HAN B, XIAO C F, et al. Application of Magnetic Abrasive Particle Aided Magnetic Needles Grinding[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 275-282.
- [48] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Internal Finishing Process for Alumina Ceramic Components by a Magnetic Field Assisted Finishing Process[J]. Precision Engineering, 2004, 28(2): 135-142.
- [49] UMEHARA N, KOBAYASHI T, KATO K. Internal Polishing of Tube with Magnetic Fluid Grinding. Part 2, Fundamental Polishing Properties with Rotating Balls and with Oscillating Balls[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1995, 149(1/2): 188-191.
- [50] SUN H W, YANG S C. Study on the Finishing Mechanism of Fluid Magnetic Abrasive[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2007, 29(2/3/4): 141.
- [51] 周钦, 孙恒五, 王娟, 等. 液体磁性磨具小孔光整加工材料去除机理及实验[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(2): 140-146.
- ZHOU Q, SUN H W, WANG J, et al. Mechanism and Experiment of Material Removal for Liquid-Magnetic Abrasive Tool Finishing Machining of Micro-Holes[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2014, 12(2): 140-146.
- [52] 赵志强. 液体磁性磨具孔光整加工工艺参数对加工效果的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- ZHAO Z Q. Study on the Influence of Technological Parameters of Hole Finishing of Liquid Magnetic Abrasive Tool on Machining Effect[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [53] VSHIVKOV S A, RUSINOVA E V, SAFRONOV A P, et al. Effect of a Magnetic Field on the Rheological Properties of Magnetic Liquids Based on Iron Oxides[J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2015, 89(2): 327-330.
- [54] 段海栋, 孙恒五, 赵志强. 液体磁性磨具滑移效应对材料去除率的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(5): 113-116.
- DUAN H D, SUN H W, ZHAO Z Q. Influence of Slip Effect of Fluid Magnetic Abrasive on Material Removal Rate[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(5): 113-116.
- [55] 谭悦, 陈燕, 曾加恒, 等. 电解-磁力复合研磨对 TA18 管内表面光整加工[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(5): 248-252.
- TAN Y, CHEN Y, ZENG J H, et al. Finishing and Machining of Inner Surface of TA18 Pipe by Electrolytic-Magnetic Composite Grinding[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(5): 248-252.
- [56] 杨海吉, 邓祥伟, 韩冰, 等. 超声波辅助磁力研磨 TC4 薄壁细长管内表面研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 30-33.
- YANG H J, DENG X W, HAN B, et al. Study on the Inner Surface of TC4 Thin-Walled Tube by Ultrasonic Vibration Assisted MAF[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(2): 30-33.
- [57] 焦安源, 全洪军, 陈燕, 等. 超声磁力复合研磨钛合金锥孔的试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 114-119.
- JIAO A Y, QUAN H J, CHEN Y, et al. Experimental Research of Titanium Alloy Taper Hole by Ultrasonic Magnetic Abrasive Finishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 114-119.
- [58] 康璐, 陈燕, 赵杨, 等. 超声振动辅助磁力研磨协同增效机制与试验研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(21): 57-62.
- KANG L, CHEN Y, ZHAO Y, et al. Synergistic Mechanism and Experimental Study of Ultrasonic Vibration Assisted Magnetic Grinding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(21): 57-62.
- [59] 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 Y, ZENG J H, HU Y G, 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.
- [60] YAMAGUCHI H, SHINMURA T. Study of an Internal Magnetic Abrasive Finishing Using a Pole Rotation System Discussion of the Characteristic Abrasive Behavior[J]. Precision Engineering, 2000, 24(3): 237-244.
- [61] 谭悦, 陈燕, 曾加恒, 等. 电解-磁力复合研磨对 TA18 管内表面光整加工[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(5): 248-252.
- TAN Y, CHEN Y, ZENG J H, et al. Finishing and Machining of Inner Surface of TA18 Pipe by Electrolytic-Magnetic Composite Grinding[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(5): 248-252.
- [62] 廖明, 韩冰, 陈燕, 等. 钛合金管内表面的电化学磁力研磨复合光整试验[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3): 123-131.
- LIAO M, HAN B, CHEN Y, et al. Inner Surface of Titanium Alloy Tube by Electrochemical Magnetic Abrasive Compound Finishing[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(3): 123-131.
- [63] 田腾腾, 陈燕, 谭悦, 等. 电解-磁力研磨钛合金的工艺参数优化[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(1): 27-30.
- TIAN T T, CHEN Y, TAN Y, et al. Optimization of Process Parameters for Electrolytic Magnetic Abrasive Grinding of Titanium Alloy[J]. Plating and Finishing,

- 2018, 40(1): 27-30.
- [64] 谭悦, 陈燕, 曾加恒, 等. 电解-磁力复合研磨 TA18 钛合金管内表面研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 140-142.
- TAN Y, CHEN Y, ZENG J H, et al. Study on Inner Surface of TA18 Titanium Alloy Pipe by Electrochemical Magnetic Composite Finishing[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(2): 140-142.
- [65] 康璐, 陈燕, 钱之坤, 等. 电解磁力复合加工对磁性磨粒性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(1): 78-81.
- KANG L, CHEN Y, QIAN Z K, et al. Effect of Electrolytic Magnetic Composite Machining on Properties of Magnetic Abrasive Particles[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(1): 78-81.
- [66] 刘新龙, 陈燕, 王杰, 等. 电解旋转超声复合磁力研磨去除 TC4 钛合金孔边毛刺[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(13): 680-684.
- LIU X L, CHEN Y, WANG J, et al. Deburring of TC4 Titanium Alloy Hole Edge by Magnetic Grinding in Combination with Electrolysis and Rotational Ultrasonic Vibration[J]. Electroplating & Finishing, 2019, 38(13): 680-684.
- [67] 陈红玲, 张银喜. 磁性磨料磨粒的磨削机理研究[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(5): 562-565.
- CHEN H L, ZHANG Y X. Grinding Mechanism Study on Magnetic Abrasive Grains[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000, 31(5): 562-565.
- [68] 梁伟, 张桂香, 张鹏, 等. 球形磁性磨料磁力研磨 ZrO_2 材料机理研究[J]. 现代制造工程, 2020(2): 1-5.
- LIANG W, ZHANG G X, ZHANG P, et al. Mechanism of Magnetic Abrasive Finishing of ZrO_2 Material with Spherical Magnetic Abrasive[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(2): 1-5.
- [69] BOCHAROV Y, KOBAYASHI S, THOMSEN E G. The Mechanics of the Coining Process[J]. Journal of Engineering for Industry, 1962(11): 491-501.
- [70] AST J, SCHWIEDRZIK J J, WEHRS J, et al. The Brittle-ductile Transition of Tungsten Single Crystals at the Micro-scale[J]. Materials & Design, 2018, 152: 168-180.
- [71] RENTSCH R, INASAKI I. Molecular Dynamics Simulation for Abrasive Processes[J]. CIRP Annals, 1994, 43(1): 327-330.
- [72] 冯宝富, 赵恒华, 蔡光起. 单颗磨粒高速磨削 45 钢和 20Cr 钢的研究[J]. 现代制造工程, 2003(11): 7-10.
- FENG B F, ZHAO H H, CAI G Q. Experimental Study on Single-Grit High-Speed Grinding 45 and 20 Cr Steels[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2003(11): 7-10.
- [73] 冯宝富, 赵恒华, 蔡光起, 等. 高速单颗磨粒磨削机理的研究[J]. 东北大学学报, 2002, 23(5): 470-473.
- FENG B F, ZHAO H H, CAI G Q, et al. Study on the Single Grain High-Speed Grinding Mechanism[J]. Journal of Northeastern University, 2002, 23(5): 470-473.
- [74] 王琰. 磁性磨料在磁力研磨加工中受磁场力作用的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(5): 37-39.
- WANG Y. Study on Magnetic Force of Magnetic Abrasive in Magnetic Abrasive Finishing[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(5): 37-39.
- [75] LIU Z Q, CHEN Y, LI Y J, et al. Comprehensive Performance Evaluation of the Magnetic Abrasive Particles[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1): 631-640.
- [76] 邓超, 韩冰, 陈燕. 磁研磨法对钛合金弯管内表面的抛光研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(3): 62-64.
- DENG C, HAN B, CHEN Y. Study of Inner Surface Polishing of Titanium Alloy Elbow Pipe by Magnetic Abrasive Finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(3): 62-64.
- [77] JAIN V K, KUMAR R, DIXIT P M, et al. Investigations into Abrasive Flow Finishing of Complex Workpieces using FEM[J]. Wear, 2009, 267(1/2/3/4): 71-80.
- [78] 芦亚萍, 马季, 张军强, 等. 超声磁粒复合研磨技术[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 552-556.
- LU Y P, MA J, ZHANG J Q, et al. Ultrasonic Magnetic Abrasive Finishing Technology[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 552-556.
- [79] 杨海吉. $\Phi 4 \times 150$ mm 细长管内表面磁力研磨精密光整试验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2018.
- YANG H J. Experimental Study on the Precision Finishing of the Inner Surface of $\Phi 4 \times 150$ mm Slender Tubes by Magnetic Grinding[D]. Anshan: University of Science and Technology of Liaoning, 2018.
- [80] 李刚. 细长管内表面磁力研磨光整及表面粗糙度预测模型建立[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019.
- LI G. Modeling of Magnetic Grinding Finishing and Surface Roughness Prediction on the Inner Surface of Slender Tubes[D]. Anshan: University of Science and Technology of Liaoning, 2019.