

磁辅助加工技术综述

高进, 杨海洋, 张富攀, 王杰, 刘威

(嘉兴南湖学院机电工程学院, 浙江嘉兴 314001)

摘要 本文综述了磁性磨粒光整加工技术, 并探讨了其在机械制造领域的应用。在其加工过程中运用磁场驱动磨粒, 实现对复杂几何形状工件表面的高效且精密加工。文章首先阐述了磁性磨粒光整加工技术的基本原理, 同时, 对加工质量影响显著的关键因素进行了深入分析, 如工件材质、前工序表面状况、加工时长、设备配置和磨粒特性; 其次, 探讨了超声辅助磁粒研磨、电化学辅助磁粒研磨、磁流研磨和磁力研磨技术等不同方法的特点, 分析了它们在特定应用场景下的优势, 并分析了技术的应用范围及其局限性; 最后, 对磁性磨粒光整加工技术的未来发展趋势进行了展望, 并指出了当前技术面临的挑战及潜在的改进方向。本文旨在为相关人员提供借鉴。

关键词 磁性磨粒光整加工; 超声辅助; 电化学辅助; 磁流研磨; 磁力研磨

基金项目: 2024 年国家级大学生创新创业训练计划 (项目编号: 202413291008); 2024 浙江省大学生科技创新活动计划, “新苗人才计划” (项目编号: 2024R440A001)。

中图分类号: TH16

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)11-0001-03

随着工业技术的不断进步, 对机械零件的加工精度和表面质量要求日益提高, 传统的机械加工方法已无法满足这些高标准的要求, 因此, 探索新型高效的加工技术变得尤为重要。磁性磨粒光整加工作为一种创新的表面处理技术, 因其在复杂几何形状工件加工方面的独特优势而受到广泛关注, 磁粒研磨技术是表面光整加工技术的一种, 因为它利用磁场控制磁性磨粒的运动, 能有效解决传统加工难以深入管内的问题, 并且不需要高精度加工设备, 加工精度可达纳米级别, 因此, 在管件内表面加工领域得到了广泛应用^[1]。本文将综述磁性磨粒光整加工技术及其衍生技术的基本原理、应用优势和局限性, 并探讨其在机械制造领域的实际应用, 意在为这一领域的学术研究和实际应用提供参考。

1 磁性磨粒光整加工

磁性磨粒光整加工是一种高效且先进的表面处理技术, 特别适用于复杂形状工件的精密处理。这种技术通过磁场的作用, 利用磁性磨粒对工件表面进行精密加工, 以显著提升表面质量。在这一过程中, 工件材质、前工序的表面状况、加工时长等都是影响加工质量的重要因素。

此外, 设备配置和磨粒特性也对加工效果产生显著影响, 涉及磁路布局、磁场分布、磁极轮廓、研磨间隙以及工件与磁极的振动幅度, 以及与磨料相关的其他关键参数。

磁性磨粒光整加工技术的一个关键优势在于其利用磨粒刷的刚性和柔性, 能够对不同外形的零件进行表面处理, 完成各种内外表面的精整工作^[2]。这一技术已经被广泛应用于航天、航空等领域, 但磁力研磨中磁针的随机和复杂运动增加了加工参数量化和效果预测的难度。此外, 由于需要维持稳定的磁场, 加工过程的成本较高且操作复杂, 操作和维护通常需由专业人员执行。

磁粒研磨技术 (MAF) 是磁性磨粒光整加工的衍生技术, 专门用于加工难以触及的表面, 例如弯曲管道和微细管道的内壁。通过使用磁性磨料 (MAS) 作为多点切削工具, MAF 技术能显著提高工件的表面质量。磁性磨料的制备方法多样, 且先前研究多聚焦于优化特定配方下的 MAF 工艺参数, 这就要求对这些性能进行全面评估和对比^[3]。MAF 技术利用磁场实现复杂工件的精密加工, 磁性磨粒刷依照磁力线的分布进行排列和整合, 通过调整磁场的强度与导向, 能够自由地改变形状、进行分离或重新组合。该技术依赖于磁性磨粒的可塑性以及磁力线的渗透作用, 可以在视觉不可达且难以使用常规工具的区域进行高精度镜面研磨。

在 MAF 加工过程中, 首先, 将高磁性铁颗粒与磨料混合, 然后置于磁极之间, 磁场力促使磁性磨粒在磁极间沿磁力线方向排列, 形成具有一定硬度的“磁性磨粒刷”。工件与磁极相对运动时, “磁性磨粒刷”将对工件表面进行研磨。然而, 这种技术面临的挑战

包括较低的加工效率,不适合大规模生产,以及磁性磨粒的高硬度可能对工件表面造成的损伤。

综上所述,磁性磨粒光整加工技术及其衍生技术MAF,通过精确控制磁场和磨粒,为复杂工件的精密加工提供了有效的解决方案,尽管面临加工成本较高和操作复杂性的挑战,但它们在提升工件表面质量和精度方面的潜力巨大,值得进一步研究和优化。

2 超声辅助磁粒研磨加工

超声辅助磁粒研磨技术是一种将超声波振动与磁粒研磨相结合的先进制造工艺,它通过利用超声波振动激发磨粒的高频振动,显著增强了磨粒的动能,进而提高了材料去除效率及工件表面加工的品质^[4]。这种技术在实现高效加工的同时,有助于提升工件的表面精度和光洁度,对于加工性能要求极高的先进材料,如陶瓷、复合材料和高温合金等,具有显著的应用优势。

超声振动辅助磁粒研磨工艺在精密机械加工、医疗器械制造、汽车、光学元件加工、电子和半导体等众多领域得到了广泛的应用,这些领域对机械加工性能有着极高的要求。该技术能够有效地满足现代制造业对于精度、表面粗糙度和工作效率的严格要求,对促进当代制造业的发展起到了关键作用^[5]。

超声辅助磁粒研磨技术的一个显著优势在于其能够在较低的压力下实现高效的加工,这有助于减少工件在加工过程中的变形和残余应力。此外,超声波的引入不仅提升了磨粒的振动频率,还增强了磨粒在加工区域的分布均匀性,从而在微观层面上提高了加工表面的均匀性。这种均匀性对于保证工件的整体加工质量至关重要。

尽管超声辅助磁粒研磨技术展现出了巨大的潜力和优势,但它在实际应用中也面临着一些挑战。设备的复杂性和高能耗是该技术需要克服的主要问题。为了实现更广泛的工业应用,未来的研究需要集中在简化设备设计、降低能耗以及提高加工效率等方面。通过技术创新和工艺优化,超声辅助磁粒研磨技术有望在未来的精密制造领域发挥更加重要的作用,为先进材料的加工提供更加高效、环保的解决方案。

3 电化学辅助磁粒研磨加工

电化学辅助磁粒研磨技术是一种创新的加工方法,它巧妙地融合了电化学加工与磁粒研磨的双重优势,为金属工件的表面处理提供了一种高效、精密的解决方案。在这一技术中,金属工件作为阳极,在电解液中发生溶解反应,与此同时,磁场的引入不仅激活了

电化学反应,还驱动磁性磨粒去除工件表面的材料,从而显著提升了加工效率和表面质量。

深入的研究表明,磁场的加入对电化学加工过程产生了显著的加速作用,这主要得益于磁场对电解液中离子的扰动效应,促进了电化学反应的进行,进而提高了金属去除率,并有效降低了加工表面的粗糙度。对比实验的结果进一步证实了磁场在提升金属去除率和改善表面粗糙度方面的显著作用。通过对磁场强度、电解液的组成以及电流强度等关键参数的细致调整,可以进一步优化加工效果,实现对工件表面更加精细的控制。

特别值得一提的是,电解-磁粒复合研磨技术在加工难以加工的材料如TC4钛合金等高性能材料方面取得了显著的成功。该技术不仅显著提高了加工效率,降低了表面粗糙度,还改善了工件的表面形貌,展现出在精密加工领域的巨大潜力和应用前景。

电化学辅助磁粒研磨技术作为一项新兴技术,正受到越来越多的关注。未来的研究工作应当着重于深化该技术在不同材料和多样化加工场景下的应用研究,通过不断的工艺参数优化,进一步释放其在提升加工效率和改善表面质量方面的潜力,以期扩大其在工业生产中的应用范围,为精密制造领域带来更多创新和突破。

4 磁流体研磨技术

磁流体研磨技术是一种利用铁磁流体在磁场作用下的特殊行为来实现精密加工的先进技术。这种技术通过将极细的强磁性粒子与适当的载体混合,形成一种特殊的胶体悬浮液,即磁流体。当这种磁流体置于外部磁场中时,磁性颗粒会受到磁力的作用,为悬浮其中的非磁性磨料颗粒提供浮力,使得这些磨料颗粒能够在工件表面进行高速微切削,从而实现高效的研磨效果。

根据金沫吉等人的研究,磁流体研磨技术在加工效率上具有显著的优势,其研磨速率可以达到 $8.2 \mu\text{m}/\text{min}$,这一速率是传统研磨方法的30倍。这种技术在处理超硬材料方面尤为突出,能够以极高的精度和表面质量完成加工任务,表面粗糙度甚至可以降至 $Ra=0.02 \mu\text{m}$,满足最严苛的表面光洁度要求。

磁流体研磨技术特别适合应用于那些具有高硬度、高弹性模量、低密度和低热膨胀系数特性的材料,例如陶瓷材料。它在精密陶瓷球等零件的表面处理方面展现出了巨大的潜力,为这些难以加工的材料提供了

一种全新的加工方法。

尽管磁流体研磨技术展现出了巨大的应用前景，但作为一项新兴技术，其加工成本相对较高，这在一定程度上限制了它的广泛应用。目前，磁流体研磨的理论和实践仍在不断发展和完善中，尚未形成一套成熟的、适用于各种材料和零件形状的通用加工指导原则。此外，磁流体研磨过程中可能出现的热动力学问题和流体损失等问题也需要进一步的研究和解决，以提高加工的稳定性和效率。

未来的研究需要集中在降低磁流体研磨技术的成本、优化加工工艺、解决热动力学问题以及减少流体损失等方面。通过这些努力，磁流体研磨技术有望在未来的精密加工领域发挥更加重要的作用，为各种高性能材料的加工提供更加高效、精密的解决方案。

5 磁力研磨技术

磁力研磨技术是一种通过磁性磨料在磁场中聚合形成的“磁力刷”来实现工件表面光整的先进加工工艺。在这一过程中，磁性磨料在磁场的作用下被塑造成具有一定刚性的磨刷，它们在研磨压力的作用下对工件表面进行有效的撞击和挤压，从而达到光整加工的目的。当前的磁力研磨研究多集中于单一磨粒尺寸的应用，而磨粒尺寸是公认的影响磁力研磨效率和质量的关键要素之一^[6]。粒径的大小直接关系到研磨的精度和效率，因此对研磨参数的精细调控对于实现最佳加工效果至关重要。

在磁力研磨的操作过程中，磁力刷在磁力的驱动下积极地对工件表面进行加工，而工件本身在音圈电机的驱动下进行轴向的高频振动。这种振动增加了磁性磨料与工件表面的相对运动，从而显著提升了研磨效率^[7]。这种技术的应用范围非常广泛，包括但不限于平面光整、外圆、内圆、复杂曲面以及微型零件的加工。磁力研磨技术在增材制造领域显示出其独特的优势，能够有效地光整那些由增材制造技术生产的、具有复杂内表面的零件，如波导管等。

尽管磁力研磨技术凭借其在复杂形状加工方面的能力而备受青睐，但它也面临着一些挑战和局限性。对于非磁性材料，可能需要通过特殊磁化处理才能进行磁力研磨，这无疑增加了加工的复杂性和成本。

此外，在追求极高加工精度的应用场景中，磁力研磨可能难以完全满足要求。同时，磁力研磨设备及相关技术的高昂成本也可能限制了其在工业规模上的广泛应用^[8]。

为了克服这些挑战，未来的研究需要探索更经济高效的磁力研磨设备和方法，优化磁性磨料的配比和粒径分布，以及开发更精确的磁场控制技术。通过这些努力，磁力研磨技术有望在未来的精密加工领域实现更广泛的应用，并为制造业带来更高的加工效率和更优的加工质量。

6 结束语

本文全面探讨了磁辅助加工技术的多方面内容，包括其基本原理、关键影响因素、不同辅助技术的融合应用，以及该技术在现代工业中的潜在价值和挑战；深入分析了磁辅助加工技术在提高工件表面质量和精度方面的巨大潜力，尤其是在处理复杂几何形状和难加工材料时；同时，也指出了技术发展中的问题，如成本、操作复杂性和加工效率等。

展望未来，我们相信通过不断的研究和创新，磁辅助加工技术将更加成熟，为机械制造领域带来更多的可能性。我们期待该技术能够在工业生产中得到更广泛的应用，并为提升产品质量和生产效率做出更大的贡献。

参考文献：

- [1] 李毓深,曲禹鑫,程海东,等.磁粒研磨中磁性磨料的动力学行为仿真研究[J].电镀与精饰,2024,46(02):107-112.
- [2] Zou Hang, Ying Jun, Ma Xuedong, et al. Effect of magnetic needle magnetic particle grinding process on the performance of metal aluminum plates[J]. Surface Science and Technology. Volume 2, Issue 1. 2024.
- [3] Amardeep Singh, Palwinder Singh, Arishu Kaushik, et al. Baljinder Ram. Comparative assessment of abrasives in magnetic abrasive finishing: An experimental performance evaluation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Volume 604, Issue. 2024.
- [4] Wang, Y., Li, et al. Ultrasonic-assisted magnetic abrasive finishing of complex surfaces: A review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5-6): 1417-1432.
- [5] 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(06):39-54.
- [6] 陈晓明,徐成宇,季冬锋,等.基于混合粒径的TC4钛合金低粗糙度磁力研磨研究[J].表面技术,2024,52(12):112-159.
- [7] 陈法宇,孙玉利,王燎原,等.磁力研磨法光整内凹槽底面的工艺参数优化[J].金刚石与磨料磨具工程,2022(02): 212-222.
- [8] 同[7].