

微纳制造技术在精密机械零件加工中的工艺创新

朱冬伟

浙江欣兴工具股份有限公司 浙江嘉兴 314000

摘要：本文深入探讨微纳制造技术在精密机械零件加工中的工艺创新。通过阐述微纳制造技术的原理、特点及优势，分析其在微纳齿轮、传感器零件、光学精密零件等多种精密机械零件加工中的应用现状，详细研究光刻加工、电子束加工、离子束加工等创新工艺，并探讨微纳制造技术在精密机械零件加工中面临的挑战及未来发展趋势。研究表明，微纳制造技术凭借高精度、高集成度等特性，为精密机械零件加工带来了革命性变革，但其在成本控制、效率提升和质量保障等方面仍存在改进空间，未来需在多学科融合、智能化制造等方向持续探索，以推动精密机械加工行业的发展。

关键词：微纳制造技术；精密机械零件；工艺创新

引言

随着现代科技飞速发展，精密机械零件在航空航天、医疗器械、电子信息等领域应用愈发广泛，对其精度、性能与功能要求日益严苛。传统机械加工技术在面对微米级甚至纳米级精度需求时，逐渐暴露出局限性，难以满足不断升级的市场需求。而微纳制造技术作为新兴制造技术，能够实现微米、纳米尺度下的精确加工，为精密机械零件加工开辟新路径，成为推动行业发展的关键力量。因此，本研究旨在深入剖析微纳制造技术在精密机械零件加工中的工艺创新，探讨其应用现状、创新工艺、面临挑战及未来趋势，从而助力行业人员全面认识该技术的重要性，为其提供理论参考与实践指导，以促进微纳制造技术在该领域的深化应用，推动精密机械加工行业技术革新，提升我国精密机械制造领域竞争力，满足国家高端制造业发展需求。

一、微纳制造技术概述

（一）微纳制造技术的定义

微纳制造技术是指在微米（1-1000 μm ）和纳米（1-100nm）尺度范围内，对材料进行加工、处理和制造微小结构、器件及系统的技术。它融合了机械工程、电子工程、材料科学、物理学、化学等多学科知识，是一门高度交叉的前沿技术^[1]。以微机电系统（MEMS）为例，其制造过程需要运用光刻、蚀刻等半导体加工工艺，将机械结构与电子元件集成在微小芯片上，像常见的手机加速度计，就是通过MEMS技术，在毫米级的芯片上构建出能够感知运动变化的微纳结构，实现对手机姿态

的精准检测，充分体现了微纳制造技术跨学科融合与微小尺度加工的特性。

（二）微纳制造技术的特点

微纳制造技术具有高精度、高集成度、多功能化、微型化等显著特点。高精度体现在能够实现纳米级甚至亚纳米级的加工精度，满足精密机械零件对尺寸精度和表面质量的严苛要求，如硬盘磁头的制造，需达到纳米级的加工精度，才能确保与盘片之间极小的间距，实现数据的高效读写。高集成度可将多个功能部件集成在微小的空间内，减少零件体积和重量的同时，提升整体性能，像智能手表中集成的微型传感器阵列，能同时实现心率监测、运动计步等多种功能。多功能化使得微纳制造的零件不仅具备传统机械零件的功能，还能融合传感、执行、控制等多种功能，微型机器人中的微纳驱动器，既可以作为运动部件，又能通过集成的传感器感知环境实现自主控制。微型化则顺应了现代产品小型化、轻量化的发展趋势，为精密机械零件在小型设备中的应用提供了可能，如植入式医疗器件，尺寸微小却能在人体内长期稳定工作，实现疾病诊断与治疗。

（三）微纳制造技术的优势

相较于传统机械加工技术，微纳制造技术在精密机械零件加工方面具有诸多优势。首先，能够实现复杂结构的加工，通过光刻、蚀刻等工艺，可以制造出具有高深宽比、精细图案的微小结构，如微流控芯片上复杂的三维流道网络，传统加工技术难以实现，而微纳制造技术却能精准加工^[2]。其次，加工精度更高，可达到纳米级精度，满足高端精密机械零件的加工需求，在半导体

芯片制造中，纳米级的线路精度是实现芯片高性能的关键。再者，材料选择更加广泛，不仅可以加工传统金属材料，还能对半导体材料、高分子材料、陶瓷材料等进行加工，利用陶瓷材料通过微纳制造技术制作的精密零件，具有耐高温、耐磨等特性，适用于极端环境。

二、微纳制造技术在精密机械零件加工中的应用

（一）微纳齿轮加工

在精密机械传动系统中，微纳齿轮的应用越来越广泛。传统齿轮加工方法在制造微纳齿轮时，难以保证齿轮的精度和表面质量。微纳制造技术的出现，为微纳齿轮加工提供了新的解决方案。例如，采用光刻-电铸-注塑（LIGA）工艺，可以制造出具有高精度齿形、光滑表面的微纳齿轮^[3]。首先通过光刻技术在光刻胶上形成精确的齿轮图案，光刻精度可达亚微米级，确保齿形轮廓的精准度；然后利用电铸工艺将图案复制到金属模具上，金属模具的成型精度能进一步保证齿轮的尺寸精度；最后通过注塑工艺批量生产微纳齿轮，一次注塑成型的齿轮尺寸误差可控制在 ± 1 微米以内。这种工艺制造的微纳齿轮，传动精度高、噪音低，在微型机器人领域，微型机器人的微纳齿轮传动系统能实现0.01度的精准角度控制，确保机器人动作的精确性；在微型钟表领域，可使钟表的走时精度提升30%以上，具有重要应用价值。

（二）传感器零件加工

传感器作为获取信息的关键部件，其性能对整个系统的精度和可靠性起着决定性作用。微纳制造技术能够实现传感器零件的微型化和集成化，提高传感器的灵敏度和响应速度。在压力传感器加工中，利用微机电系统（MEMS）技术，通过光刻、蚀刻等工艺在硅片上制造出微型压力敏感结构，如压阻式传感器的压敏电阻和电容式传感器的电容极板^[4]。以电容式压力传感器为例，通过微纳制造技术，可将电容极板的间距缩小至纳米级，大幅提高传感器的灵敏度，能够检测到0.01帕斯卡的微小压力变化。这些微纳制造的传感器零件，具有尺寸小、重量轻、功耗低等优点，在汽车电子领域，可集成在汽车轮胎中实时监测胎压；在生物医学领域，可制成可穿戴式健康监测设备，实现对人体生理参数的连续监测；在航空航天领域，用于飞行器的气压、应力等参数测量，保障飞行安全，广泛应用于多个领域。

（三）光学精密零件加工

光学精密零件对表面精度和光学性能要求极高。微纳制造技术在光学精密零件加工中发挥着重要作用。例如，利用纳米压印光刻技术，可以在光学材料表面制造

出具有纳米级精度的微结构，如增透膜、衍射光栅等。通过该技术制造的增透膜，可使特定波长光线的透过率从90%提升至99%以上，有效减少光线反射损失。此外，飞秒激光加工技术也可用于光学精密零件的微纳加工，通过精确控制激光的能量和作用时间，实现对光学材料的高精度切割、钻孔和表面改性。在手机摄像头镜头加工中，飞秒激光加工技术能够在镜头表面加工出微结构，改善镜头的光学性能，提升拍摄画质；在天文望远镜镜片制造中，可对镜片表面进行纳米级精度的抛光处理，提高望远镜的观测清晰度，为光学精密零件的加工提供了一种高效、灵活的方法。

三、微纳制造技术在精密机械零件加工中的工艺创新

（一）光刻加工工艺创新

光刻加工是微纳制造技术中的关键工艺之一。传统光刻技术存在分辨率有限、加工效率低等问题。近年来，光刻加工工艺不断创新，如极紫外光刻（EUV）技术的出现，将光刻分辨率提升至10nm以下，满足了更小尺寸精密机械零件的加工需求。EUV技术利用极紫外光作为光源，通过反射式光学系统将掩模上的图案转移到光刻胶上，实现高精度图形加工。此外，纳米压印光刻技术也得到了快速发展，它通过将带有图案的模板压印到软质材料上，实现图案的复制，具有成本低、效率高、分辨率高等优点，在微纳齿轮、微流控芯片等精密机械零件加工中具有广阔的应用前景。

（二）电子束加工工艺创新

电子束加工是利用高速电子束轰击材料表面，实现材料的去除、改性和沉积的加工方法。在精密机械零件加工中，电子束加工工艺不断创新。例如，扫描电子束光刻技术可以实现纳米级分辨率的图形加工，通过控制电子束在光刻胶上的扫描路径和曝光剂量，精确制造出复杂的微纳结构。此外，电子束焊接技术也在精密机械零件加工中得到了创新应用，采用脉冲电子束焊接方法，能够实现微小零件的高精度焊接，减少焊接变形和热影响区，提高焊接质量。

（三）离子束加工工艺创新

离子束加工是利用离子束对材料进行蚀刻、溅射和沉积的加工技术。在精密机械零件加工中，离子束加工工艺不断发展创新。聚焦离子束（FIB）加工技术可以实现纳米级的定点加工，通过将离子束聚焦到材料表面的微小区域，实现材料的精确去除和沉积，常用于微纳结构的修复、改性和制造。此外，离子束抛光技术能够实

现材料表面的超光滑加工，通过离子束对材料表面的原子级去除，使表面粗糙度降低至纳米级，满足光学精密零件等对表面质量要求极高的零件加工需求。

四、微纳制造技术在精密机械零件加工中面临的挑战

(一) 成本控制问题

微纳制造技术涉及高端设备和精密工艺，设备购置成本高、工艺研发投入大，导致精密机械零件的生产成本居高不下。例如，一台极紫外光刻机的价格高达数亿美元，使得企业在引入该技术时面临巨大的资金压力。此外，微纳制造过程中对材料的要求较高，一些特殊材料价格昂贵，进一步增加了生产成本。因此，如何降低微纳制造技术的成本，提高其经济效益，是目前面临的重要挑战之一。

(二) 加工效率问题

虽然微纳制造技术在精度方面具有显著优势，但在加工效率上仍有待提高。一些微纳加工工艺，如电子束光刻、离子束加工等，加工速度较慢，难以满足大规模生产的需求。以电子束光刻为例，其加工速度通常以平方微米/小时为单位，相比传统机械加工的高效率，存在较大差距。因此，如何提高微纳制造技术的加工效率，实现高精度与高效率的平衡，是推动其在精密机械零件加工中广泛应用的关键。

(三) 质量保障问题

微纳制造技术对加工环境和工艺参数要求极为严格，微小的环境变化和工艺波动都可能导致零件质量出现问题。例如，在光刻加工中，环境温度、湿度和洁净度的变化会影响光刻胶的性能和曝光效果，从而影响零件的加工精度和质量。此外，微纳制造的精密机械零件尺寸微小，检测和质量控制难度大，需要采用先进的检测设备和技術。

五、微纳制造技术在精密机械零件加工中的未来发展趋势

(一) 多学科融合发展

微纳制造技术的发展将越来越依赖多学科的融合。未来，机械工程、材料科学、电子技术、物理学、化学等学科将更加紧密地结合，共同推动微纳制造技术的创新。例如，材料科学的发展将为微纳制造提供更多性能优异的材料，满足精密机械零件在不同环境下的使用需求；电子技术与微纳制造技术的融合，将实现微纳传感器、微纳执行器等智能零件的集成制造，提升精密机械系统的智能化水平。

(二) 智能化制造

随着人工智能、大数据、物联网等技术的发展，微纳制造技术将朝着智能化方向发展。智能化制造系统能够实时监测加工过程中的各种参数，通过数据分析和智能算法，自动调整工艺参数，实现加工过程的优化和质量控制。例如，利用机器学习算法对微纳加工过程中的数据进行分析，预测加工结果，提前发现潜在问题并进行调整，提高加工精度和效率。

(三) 绿色制造

在可持续发展理念的推动下，微纳制造技术将更加注重绿色制造。未来，微纳制造工艺将朝着低能耗、低污染、资源循环利用的方向发展。例如，开发环保型光刻胶和蚀刻液，减少化学试剂的使用和排放；优化加工工艺，提高材料利用率，降低能源消耗。同时，加强微纳制造废弃物的回收和处理，实现资源的循环利用，推动精密机械加工行业的绿色发展。

结论

微纳制造技术凭借其高精度、高集成度等特性，在精密机械零件加工中展现出了巨大的优势和潜力，为精密机械零件加工带来了革命性变革。通过工艺创新，如光刻加工、电子束加工、离子束加工等技术的不断发展，能够制造出具有复杂结构和优异性能的精密机械零件，满足航空航天、医疗器械、电子信息等高端领域的需求。然而，微纳制造技术在精密机械零件加工中仍面临成本控制、加工效率和质量保障等挑战。未来，微纳制造技术将朝着多学科融合、智能化制造和绿色制造的方向发展，通过不断创新和完善，进一步提升其在精密机械零件加工中的应用水平，推动精密机械加工行业向更高精度、更高效率、更智能化和更绿色的方向发展，为我国高端制造业的发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 王立众. 第1章超快激光加工技术: 微纳制造领域的精密革命[J]. 下一代创新科技, 2025, (00): 3-12.
- [2] 王志琴. 机械制造工艺与机械设备加工工艺探讨[J]. 中国设备工程, 2024, (07): 112-114.
- [3] 武志伟, 康小平. 机械加工技术在汽车工业中的应用分析[J]. 科技与创新, 2024, (07): 191-193.
- [4] 李选祥, 郭佳乐, 黄莉. 精密机械零件加工中的表面质量控制与提升技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(03): 141-143.