

镜面电火花加工技术原理和应用

高超

广州恒佳精工科技有限公司 广东广州 510663

摘要：探讨镜面电火花加工技术的原理、特点、应用领域及发展趋势，针对加工中遇到的问题制定解决方案，通过优化工艺装备、控制放电参数以及选择合适的电极材料等改善措施，来减少热变形和电极磨损，提高表面精度及加工效率。

关键词：镜面电火花加工技术；高精度；解决方案；发展趋势



工程师 高超

1 序言

镜面电火花加工技术是一种先进的加工方法，利用电火花放电的原理，在工件表面产生高温、高压等物理效应，从而实现工件表面的高精度加工。镜面电火花加工技术的背景可以追溯到20世纪50年代，当时电火花加工技术已经被广泛应用于金属加工领域，但是其加工表面的表面粗糙度值较高，无法满足高精度加工的需求。为解决这一问题，研究人员开始探索如何改善电火花加工的表面质量，最终研究出了镜面电火花加工技术。

镜面电火花加工技术在工业制造领域有着重要的作用和地位，主要在于其可以实现微米级的加工

精度，能够满足许多高精度加工场景的需求，同时拥有较高的加工速度，能够大大提高加工效率，节约时间和成本，还适用于金属、非金属等各种导电材料的加工，具有较高的适应性和灵活性。最重要的是镜面电火花加工技术可以实现对工件表面的高精度加工，加工后的表面质量好，不易产生划痕、毛刺等缺陷，提高了工件质量和可靠性。随着科技和加工设备的不断更新，镜面电火花加工技术也将迭代更新发展，为各行业提供更高质量、更高效率的加工解决方案。

镜面电火花加工的研究目的及意义主要包含以下几个方面。

(1) 提高加工精度 镜面电火花加工技术可以实现微米级的加工精度，能够加工出非常细小和复杂的形状，满足高精度加工的需求。这对于一些需要精确尺寸和形状的零部件制造非常重要，如精密模具、微型光学元件等。

(2) 提高加工效率 相比传统的机械加工方法，镜面电火花加工技术具有更高的加工效率，可以同时加工多个工件，且不受材料硬度的限制，适用于各种金属材料 and 导电性非金属材料的加工。这对于提高生产效率、缩短加工周期具有重要意义。

(3) 扩大加工范围 镜面电火花加工技术还可以加工一些难以通过传统方法加工的材料，如高硬度材料、脆性材料等。它可以在不产生热应力和变

形的情况下，对这些材料进行精细加工，提高材料的使用性能和寿命。

(4) 探索新的应用领域 比如在微纳米加工领域，可以利用镜面电火花加工技术制造出微型器件和微流控芯片等。此外，镜面电火花加工技术还可以应用于精密医疗器械、航空航天和电子等领域，推动相关行业的发展。

2 镜面电火花加工技术的原理

电火花放电加工工艺的基本原理是利用电火花放电的高温、高压和高速冲击力，通过在工件表面产生放电间隙，使电极和工件之间的电流通过放电间隙，产生高温等离子体，使工件表面材料瞬间熔化、气化和溶解，从而实现非接触式加工^[1]。

在加工时，电极和工件分别连接电源正负极，将电火花油填入到要放电加工的间隙中，通过预先设定的加工程序和工作机台间隙自动控制系统，操控电极向工件进给。当电极和工件之间间隙达到一定距离时，脉冲电压将分解工作流体产生火花放电。大量热能瞬间集中在细小的间隙通道，温度迅速升高伴随压力急剧变化，导致工件表面少量金属立即熔化或气化并进入电火花油中，重新凝固成固态金属颗粒，被电火花油带走，这一过程会在工件表面形成微小的坑槽^[2]。当本次放电完成后，机床会带着电极后退，间隙中的电火花油恢复绝缘状态，等到机床带动电极再次靠近时，激发下一次脉冲电压产生，进行放电加工，并重复上述过程。

镜面电火花加工技术是电火花放电加工的一种特殊形式，其原理是通过控制电极和工件之间的放电间隙，使电流通过间隙时产生的高温等离子体在工件表面形成微小的坑槽，然后通过电极和工件之间的微小位移，使放电间隙在不同位置上进行放电，从而逐渐将坑槽填平，最终形成平整的表面。通过反复放电和位移，可以实现对工件表面的高精度加工，达到镜面的表面粗糙度要求。具体加工过程如下。

(1) 电极和工件之间形成放电间隙 在镜面电火花加工中，电极和工件之间的放电间隙非常小，通常在几微米到几十微米之间。通过控制电极和工件之间的间隙大小，可以控制放电的能量和形状。

(2) 电流通过放电间隙 当电流通过放电间隙时，由于电阻和电压的作用，放电间隙中的气体被电离，形成等离子体。等离子体的温度非常高，可以达到几千甚至几万摄氏度。

(3) 等离子体对工件表面进行冲击 等离子体的高温 and 高速冲击力会使工件表面的材料瞬间熔化、气化和溶解。同时，等离子体中的离子和电子也会与工件表面的材料发生化学反应，使表面材料发生物理和化学变化^[3]。

(4) 反复放电和位移 通过控制电极和工件之间的微小位移，使放电间隙在不同位置上进行放电。通过反复放电和位移，可以逐渐将工件表面的坑槽填平，最终形成平整的表面。

3 技术特点

镜面电火花加工技术具有如下特点。

(1) 高精度 镜面电火花加工技术可以实现非常高的加工精度，可以达到亚微米级别的表面粗糙度值和形状精度。这使得其在需要高精度表面的领域，如光学仪器、模具制造等方面得到广泛应用。

(2) 高效率 镜面电火花加工技术具有较高的加工效率。由于电火花放电的高温 and 高速冲击力，因此可以在很短的时间内完成加工过程。这使得其在大批量生产和紧急加工的情况下具有优势。

(3) 加工范围广 镜面电火花加工技术适用于各种材料的加工，包括金属、非金属和复合材料等。无论是硬度较高的材料，如钢、铁等，还是脆性材料，如陶瓷、玻璃等，都可以通过镜面电火花加工技术进行加工。

(4) 表面质量好 镜面电火花加工技术可以实现高质量的表面加工。由于电火花放电的高温 and 高速冲击力，因此可以使工件表面的材料瞬间熔化、气化和溶解，从而消除表面缺陷和残留应力，得到平整、光滑的表面。

(5) 灵活性高 镜面电火花加工技术具有较高的灵活性。通过调整电极和工件之间的放电间隙、电流和放电时间等参数，可以实现不同形状和尺寸的加工。同时，可以通过控制电极和工件之间的微小位移，实现复杂形状的加工。

4 应用领域

镜面电火花加工技术的应用领域如下。

(1) 模具制造 镜面电火花加工技术可以用于制造高精度、高质量的模具。通过电火花放电的方式，在金属工件表面形成微小的放电坑，进而实现对工件的加工和雕刻。这种加工方式可以制造出非常精细的模具，能够满足模具制造中对于尺寸精度和表面质量的要求。

(2) 航空航天 航空航天领域对于零部件的精度和质量要求非常高，镜面电火花加工技术可以实现各种材料的高精度加工，用于制造航空航天领域的各种零部件，如发动机零部件、航空航天设备的外壳等。

(3) 汽车制造 汽车制造领域对于零部件的精度和表面质量要求也非常高，镜面电火花加工技术可以用于制造汽车的各种零部件，如发动机、变速器零部件等。

(4) 电子行业 电子行业对于微小零部件的加工要求非常高，镜面电火花加工技术可以用于制造电子行业的各种零部件，如芯片、电路板等。

(5) 医疗器械 医疗器械对于精度和表面质量的要求非常高，镜面电火花加工技术可以用于制造医疗器械领域的各种零部件，如手术器械、人工关节等。

(6) 仪器仪表领域 镜面电火花加工技术可以用于制造仪器仪表领域的各种零部件，如光学仪器、精密测量仪器等。

5 发展趋势

镜面电火花加工技术的发展趋势如下。

(1) 高精度加工 随着科技的不断进步，镜面电火花加工技术将朝着更高的精度发展，能够实现更细微的加工和更高的表面质量。

(2) 多功能加工 镜面电火花加工技术将不断发展出更多功能，能够实现更多种类的加工需求。例如，可以实现不同形状的孔加工、复杂曲面加工等。

(3) 自动化和智能化 随着自动化和智能化技术的发展，镜面电火花加工技术也将朝着自动化和智能化方向发展。通过引入机器人、自动化控制系统和人工智能等技术，可以实现加工过程的自动化和智能化，提高生产效率和加工质量。

(4) 新材料加工 随着新材料的不断涌现，对

于加工技术的要求也在不断提高。镜面电火花加工技术将不断适应新材料的加工需求，开发出适用于各种新材料的加工方法和工艺。

(5) 环保和节能 在加工过程中，镜面电火花加工技术可以减少材料的浪费和能源的消耗，未来将更加注重环保和节能，通过改进加工工艺和设备的方式，减少对环境的负面影响。

6 面临的挑战和解决方案

镜面电火花加工技术面临的挑战和解决方案如下。

(1) 加工过程中的热效应和热变形问题 解决方案：①控制放电参数，如脉冲电流、放电时间等，以减少热效应。②使用切削液对工件和电极进行冷却，以降低温度。③选择合适的工件材料，如热稳定性高的材料，以减少热变形。

(2) 电极磨损和电极寿命问题 解决方案：①使用高质量的电极材料，如铜、铜钼合金等，以提高电极的耐磨性。②控制放电参数，如脉冲电流、放电时间等，以减少电极磨损。③定期检查和更换电极，以保持加工质量和提高电极寿命^[4]。

(3) 放电稳定性和表面质量问题 解决方案：①优化放电参数，如脉冲电流、放电时间等，以提高放电稳定性和表面质量。②使用高精度的电极和工艺装备，以提高加工精度和稳定性。③定期清洁和维护设备，以保证加工质量和稳定性。④进行加工前的工艺规划和试验，以确定最佳的加工参数和工艺流程。

7 优势和局限性

镜面电火花加工技术适用于各种硬度和复杂形状工件的加工，其主要优势如下。

(1) 高精度 镜面电火花加工可以实现微米级的加工精度，适用于高精度零件的加工。

(2) 复杂形状工件的加工 镜面电火花加工技术可以实现各种复杂形状工件的加工，包括内外轮廓、孔洞等。

(3) 不受材料硬度限制 可以加工各种硬度的材料，包括金属、陶瓷及合金等。

(4) 无接触加工 镜面电火花加工是一种无接触加工方法，不会对工件表面造成机械应力和

变形。

(5) 高效率 可以同时加工多个工件，提高加工效率。

然而，镜面电火花加工技术也存在如下不足及局限性。

(1) 加工速度较慢 由于每次放电只能去除微小的材料，因此加工速度相对较慢。

(2) 表面质量有限 由于放电过程中易产生热效应和热变形，因此某些材料的镜面电火花加工表面质量可能不如其他加工方法。

(3) 电极磨损和寿命问题 电极在放电过程中会有一定的磨损，需要定期更换，增加了成本和工作量。

8 技术发展方向

随着制造业的发展和对高精度零件需求的增加，镜面电火花加工技术有着广阔的发展前景，未来发展方向包括如下几个方面。

(1) 提高加工速度 通过优化放电参数和改进设备，提高镜面电火花加工速度，提高生产效率。

(2) 改善表面质量 研究和开发新的电极材料、切削液等，以减少热效应和热变形，提高加工表面质量。

(3) 自适应控制技术 引入自适应控制技术，实时监测和调整放电参数，以提高加工稳定性和

精度。

(4) 联合加工技术 将镜面电火花加工与其他加工方法相结合，如组合加工、多工位加工等，以完成更复杂的加工任务。

9 结束语

本文探讨了镜面电火花加工技术的原理、特点、应用领域以及发展趋势，并总结了其优势和局限性。针对加工过程中遇到的问题制定解决方案，与其他加工方法相结合，实现各种硬度和复杂形状的工件加工。镜面电火花加工技术在高精度零件加工领域有着广泛的应用前景，并且随着技术的不断发展和创新，其加工速度和表面质量将会得到进一步提升。

参考文献：

- [1] 张帅，吕汝金，刘建伟，等. 电火花线切割加工工艺参数对工艺指标影响的研究[J]. 桂林电子科技大学学报，2022 (6) : 431-436.
- [2] 刘礼贵. 电火花加工中常见缺陷及预防措施[J]. 江西电力职工大学学报，2000 (3) : 25-27.
- [3] 王迪. 电火花成型技术在模具制造中的应用与研究[J]. 现代制造技术与装备，2018 (8) : 53, 57.
- [4] 高衍顺. 镜面电火花加工试验研究[J]. 内燃机与配件，2021 (8) : 209-210.

MW 20250212

(上接第9页)

法、高精度的传感器应用，使得加工精度得以不断突破，趋近亚微米乃至纳米级；高速切削技术配合高性能刀具，将大幅缩短加工周期，提升生产效率；智能化技术的融入更是为加工过程带来质的飞跃，实现了加工过程的智能监控与自适应调整。

展望未来，五轴加工技术与装备的发展前景广阔且充满机遇。作为制造业的核心基石，其发展水平是衡量国家制造业竞争力的重要标志。面对机遇与挑战，我们应坚定不移地加大科研投入，深化产学研合作，构建完善的人才培养体系，全力突破关键技术瓶颈，实现五轴加工技术与装备的自主可控发展。这不仅是中国制造业从制造大国迈向制造强国的必经之路，更是在全球制造业竞争中赢得主

动、占据战略高地的关键举措。

参考文献：

- [1] 张根保，王扬. 国内外五轴加工机床可靠性研究现状分析[J]. 金属加工（冷加工），2015 (18) : 43-47.
- [2] 左晓明，吴海兵，陈小岗. 非正交双转台加工中心五轴定位铣削的后置处理与仿真验证[J]. 机械科学与技术，2012 (1) : 154-158, 162.
- [3] 张任，魏仁军，逢庆庆，等. 特种材料干冰冷却切削技术研究[J]. 电子元器件与信息技术，2024 (4) : 203-205.

MW 20250226