

电火花加工技术的介绍

卢石磊

青岛理工大学复杂网络与可视化研究所

电火花加工是一种利用电能和热能进行金属加工的先进和精密技术，可以在形状复杂的金属工件上精确地切割、钻孔和凿削，同时还可以进行微细加工^[1]。

一、介绍

电火花加工是由苏联的拉扎林科发明，灵感来自于开关触点在产生火花放电时会破坏触点，在寻找原因时发现电火花的瞬时高温可以使金属局部熔化或者气化而被消蚀掉，因此在 1943 年利用电蚀原理，研制出第一台实用化的电火花加工装置^[2]。而我国是在上世纪 50 年代开始研究电火花装备，并与 60 年代初期研制出第一台靠模仿形电火花线切割机床。



图 1 电火花

二、工作原理

电火花加工的本质是电极与工件之间放电产生的热效应。其基本工作原理为：在工件表面形成微小的电弧，引起电极与工件表面的电传导和击穿，使电极表面发生微爆和电极材料与工件表面的物质交换，沿工件表面切削。由于工件表面热膨胀的作用，研磨出的切口变窄，电极不断进行下压，维持切削。随着越来越多的电火花被放出，电极逐渐与工件之间的间隔增加，最终使加工完成。电火花加工不需要特殊的刀具，也可以加工非常复杂的形状^[3]。

在电火花加工时，工具和工件并不接触，而是工件和电极之间通过电脉冲建立电场，将工件浸入工作液中，或将工作液充入放电间隙，通过工具电极和工件电极之间的脉冲放电的电蚀作用，即在放电时产生高热、高压等条件，使金属发生熔化、蒸发和溶解，通过间隙自动控制系统控制工具电极向工件进给，当两电极间的间隙达到一定距离时，两电极上施加的脉冲电压将工作液击穿，产生火花

放电，便加工出与工具电极形状相对应的形状^[4]。因此，只要改变工具电极的形状和工具电极与工件之间的相对运动方式，就能加工出各种复杂的型面。

在放电的微细通道中瞬时集中大量的热能，温度可高达一万摄氏度以上，这一点工作表面局部微量的金属材料立刻熔化、气化，并爆炸式地飞溅到工作液中，迅速冷凝，形成固体的金属微粒，被工作液带走，这时在工件表面上便留下一个微小的凹坑痕迹，放电短暫停歇，两电极间工作液恢复绝缘状态^[5]。

接着，下一个脉冲电压又在两电极相对接近的另一一点处击穿，产生火花放电，依次往复。虽然每个脉冲放电蚀除的金属量极少，但因每秒有成千上万次脉冲放电作用，就能蚀除较多的金属。

工具电极常用导电性良好、熔点较高、易加工的耐电蚀材料，如铜、石墨、铜钨合金和钼等。在加工过程中，接近于无损耗^[6]。

工作液作为放电介质，在加工过程中还起着冷却、排屑等作用。常用的工作液是粘度较低、闪点较高、性能稳定的介质，如煤油、去离子水和乳化液等。

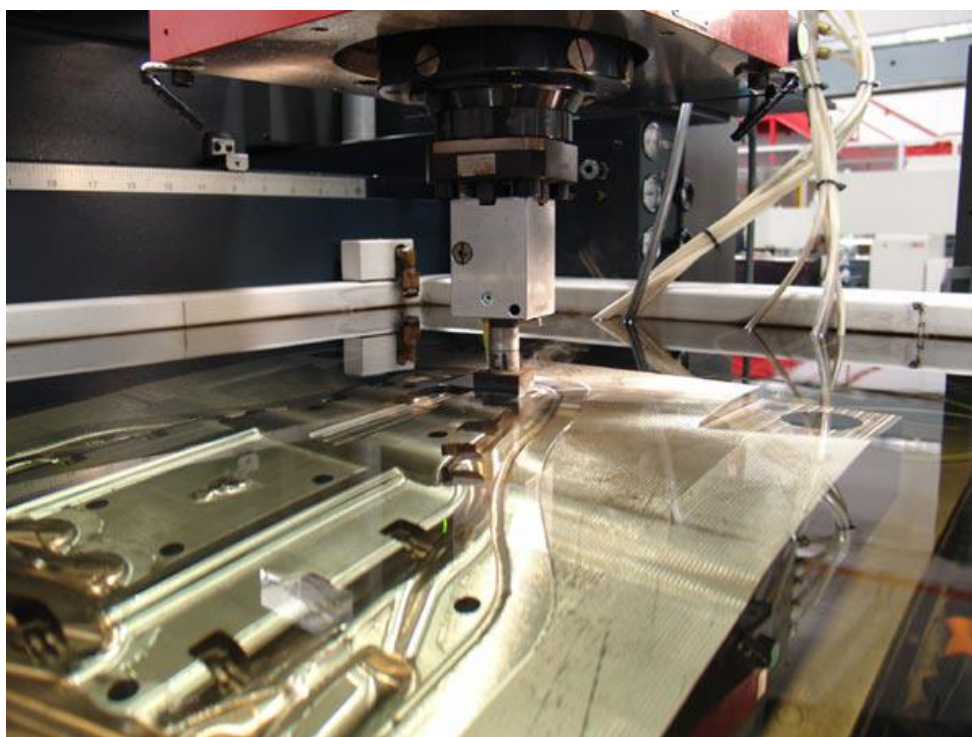


图2 电火花加工复杂造型

三、特点

高精度：电火花加工精度可以达到微米级别，用于加工各种高精度零件。

非接触加工：电火花加工不需要直接接触工件表面，避免了加工过程中的机械损伤，也可以避免工件表面产生热变形和残余应力等问题。

加工高硬度材料：对于硬度很高的材料，如高速钢、硬质合金等材料，利用电火花加工可以轻松完成^[7]。

加工形状复杂的工件：由于电火花加工可以利用电极的形状加工出不同形状的特殊零件，所以可以加工出形状复杂的零件。

去毛刺处理：由于电火花加工所产生的放电脉冲是短脉冲，对于精度要求不高的工件，不需要额外的去毛刺处理，可以减少后续工序^[8]。

生产效率低：由于电火花加工速度较慢，所以生产效率较低，多用于样品制作、小批量生产等场合。

四、常见设备

电火花形腔加工设备能够精加工各种形状的孔、凸凹面，可在硬质合金、高速钢、不锈钢、钛合金等金属材料上进行加工，并具有工艺性能好、加工速度快、加工精度高、表面质量好、几何精度稳定等优点。此技术一般采用 CAD/CAM 工艺软件进行数控加工，可以对工件进行多面加工和三坐标精密修整，并可以通过数据传送接口直接进行数控加工^[9]。

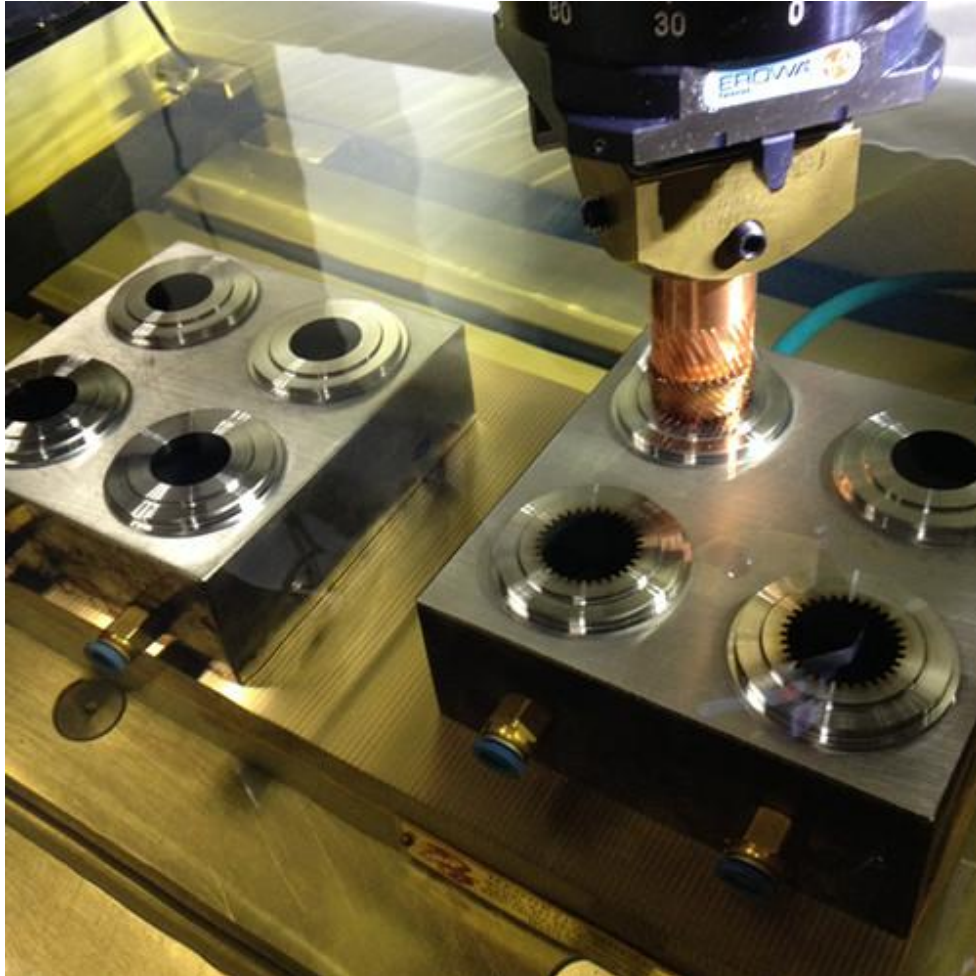


图3 内斜齿形腔电火花放电加工

电火花穿孔加工是利用电火花放电原理，在工件上制造一定形状的穿孔，是一种高精度、高效率的穿孔技术。主要特点是精度高、效率快、质量好、可处理各种形状的穿孔，而且可以加工各种材料，包括硬质材料如金属、石墨等。其加工面积大，深度深，加工精度高，不会破坏工件表面，可以用于金属的孔穴加工，以及非金属材料的微型加工，尤其在模具制造中应用频繁。

电火花线切割机的原理是将一根极细的金属丝作为电极，通过高频脉冲放电，在工件表面产生一道电火花，使其表面产生局部高温电蚀，从而将工件切割成所需形状。线切割机使用电极丝作为切割工具，其直径通常为 0.05mm 至 0.30mm。线切割机有多个控制轴，如 X、Y、Z 和 C 轴等，可控制切割头的运动轨迹，实现二维或三维切割。因为线切割机可以切割不同硬度、不同形状工件，

所以它常用于制造精密模具、造型模具、铜、铝等合金材料的零部件、钛合金配件、医疗器械等领域。并且可以快速、精确地切割各种硬度和厚度的材料，不会产生较大的振动和应力，同时也可以减少工件的浪费，提高生产效率^[10]。缺点是，切割过程中要注意消耗掉电极丝的长度，而且电极丝对设备的使用寿命有一定影响。



图 4 电火花线切割机

五、应用领域

由于电火花加工具有精度高、成本低、加工能力强、操作简单等优势，已经被广泛应用于各种制造业中^[11]。

- 1.航空制造业：电火花加工可以制造机身结构件、涡轮等高精度、复杂的零件。比如协助制造发动机叶轮、涡轮器、燃气轮盘、轴承和变速箱。
- 2.汽车制造业：电火花加工可以制造高精度、复杂的汽车零部件，如精密歧管、发动机板和气门座等。
- 3.模具制造业：模具加工需要高精度和高表面质量。
- 4.医疗器械制造：电火花加工可以制造高精度医疗器械的组件，如齿轮、电极和局部切除器具。
- 5.电子制造业：电火花加工可以制造高精度、精密的电子元器件，如连接器、反光镜、微电子组件等。

6.船舶制造业：应用于修建海洋结构的材料（特别是马尼托沃克金属板），电火花加工得到广泛应用。电火花加工可以给马尼托沃克金属板切割、钻孔等，以精度取代早期的手工铣床工作。

六、注意事项

选对工艺参数：在进行电火花加工前，需要根据工件的材质、硬度、形状等因素，选择合适的工艺参数，如放电电压、放电电流、脉冲宽度、脉冲间隔等。不同的工件需要不同的加工参数。

选择合适的电极：电极是电火花加工中非常重要的一部分，需要选择合适的电极材料和形状。电极材料应该具有良好的导电性和抗腐蚀性，常用的电极材料有铜、钨铜、硬质合金等。电极形状应该与工件形状相适应。

放电次数：每次放电后，需要清理电极和工件表面的金属屑和氧化物，以保证加工质量。另外，对于较薄的工件，应该注意控制放电次数，以避免切割穿孔。

加工液的选择：电火花加工需要使用加工液，在选择加工液时，需要考虑液体温度、导电性、腐蚀性和清洁性等因素。一般情况下，加工液的温度应该保持在 20℃ 左右。

保护环境：电火花加工过程中会产生电磁辐射和粉尘，需要在加工区域内设置良好的通风设施和粉尘抽取装置，以保证工作环境的清洁和安全^[12]。

加工后处理：电火花加工完成后需要进行后处理，如去毛刺、打磨、清洗等。特别是去毛刺，需要使用合适的工具和方法，以保证工件表面的平整度和质量。

参考文献

- [1] 梁家明. 电火花放电加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 张江涛. 电火花加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [3] 曹小平. 电火花加工实验教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 林景芬. 电火花加工[M]. 台北市: 全华科技图书股份有限公司, 2011.
- [5] 王根云. 基于冲击波原理的电火花加工技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [6] 吴刚. 电火花加工技术在航空制造中的应用[J]. 现代制造工程, 2014(7): 134-136.
- [7] 熊禹, 周兴国等. 电火花加工技术研究进展[J]. 模具工业, 2010(10):1-5.
- [8] 王健, 田玉茹等. 电火花加工的研究与应用[J]. 中州工业科技, 2012(18):98-99.
- [9] 徐世英, 王涛等. 电火花加工高硬度钢的研究[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(08):13-16.
- [10] 董志伟, 许春等. 电火花加工在微细零件加工中的应用与发展[J]. 精密制造与自动化, 2014, 43(03):1-8.
- [11] 马晓斌, 李宏彬等. 电火花加工加工工艺参数优化及工艺分析[J]. 机床与液压, 2015, 06:93-96.
- [12] 刘文良, 胡金辉等. 电火花穿孔加工中工艺参数对加工效率的影响[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(02):51-55.