

国外电火花加工

专题资料

1977

科学技术文献出版社重庆分社

前 言

电火花加工是50年代迅速发展起来的新技术。它是直接应用电能来蚀除金属材料的。可以用硬度低的导电材料（如铜、铸铁、石墨等）做工具电极加工高硬度、高强度或其它难切削的材料，如淬火钢，各种合金以及金属陶瓷材料等。目前，它已广泛应用于制造各类模具和形状复杂、材料特殊的零件加工。

我国广大工人和科技人员在伟大领袖和导师毛主席的无产阶级革命路线指引下，特别是从无产阶级文化大革命以来，努力实践，勇于创新，已使电火花加工技术得到了飞跃的发展，创造了具有我国特色的崭新的工艺与装备。

为了配合我国进一步发展电火花加工技术的需要，遵照毛主席“**洋为中用**”的教导，重庆市第二电机厂、中国科学院北京电工研究所、江苏省电加工研究所和中国科学技术情报研究所重庆分所共同编译出版了这本《国外电火花加工》专题参考资料，供我国研究和使用电火花加工技术的工人和科技人员参考。

《国外电火花加工》技术参考资料的内容包括综述、专题译文、典型设备介绍及题录索引四部分。主要介绍国外电火花加工技术（未包括电火花线切割、电火花磨削及电火花合金化等）的发展现状、趋势、理论研究、技术应用及设备等情况。

由于我们马列主义、毛泽东思想水平不高，又初次共同编译这方面的资料，错误和不妥之处一定不少，望读者批评、指正。

编 者

一九七六年十月

毛 主 席 语 录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

国外电火花加工概况

电火花加工是把工具电极与工件浸在电介质溶液(工作液)中,并在其间施加脉冲电压,当电极与工件的距离很近时,极间介质被击穿,产生火花放电。在电火花放电时,火花通道中瞬时产生大量的热,足以使工件表面的金属局部熔化甚至汽化蒸发而被蚀除下来,这时工件的金属表面形成了小的凹坑。局部汽化和熔化的金属在爆炸力的作用下被抛入工作液后迅速冷却并凝固成微小的金属颗粒,在工作液的冲刷下金属颗粒离开了火花放电区。一次火花放电后介质绝缘强度恢复,等待下一次放电。经过不断地火花放电,工件表面的金属不断地被蚀除,则在工件表面复制出工具电极的形状,从而达到成型加工的目的。

应该说电火花放电蚀除金属的机理还是相当复杂的,对它的认识至今尚未完全清楚,因而也有各种不同的解释。根据一些实验数据和理论上的分析来看,其物理过程是电磁学、热力学、流体动力学等综合作用的过程。这一过程包括电离、放电、热膨胀、抛出金属等几个阶段。

经过人们的实践认识到要使火花放电用于金属材料尺寸加工,应该解决下述几个问题。

1) 必须有足够的火花放电强度,即应有很大的电流密度,否则金属只是发热而不能熔化或汽化。

2) 火花放电的时间必须极短,只能脉冲性的瞬时放电。因为只有很短的瞬时内产生的大量的热能,才能使热量来不及传导扩散到其余部分,从而能局部地蚀除金属。

3) 火花放电后极间介质必须来得及去游离,迅速恢复其介电强度,以保证脉冲放电不转变成稳定持续的电弧放电。

4) 必须能把电火花加工之后金属颗粒及介质分解的产物不断地从电极间隙中排除出去,否则,加工过程无法进行。

目前成批生产的电火花加工机床已能满足上述要求,因而电火花加工技术已广泛地应用于各种工业部门。

一、电火花加工的现状

1.1 各国电火花加工机床增长情况及拥有量

最近10年,电火花加工技术发展很快,据称,一般机床年增长率仅1%,而电火花加工机床的增长率达到10%。

美国从68—73年的机床增长率,金属切削机床仅为8.6%,而电加工机床则达到41.7%。在11176台电加工机床中,电火花加工机床9145台(占80%)。美国电火花加工机床的使用比率为82%。美国从国外输入的电火花加工机床与其国内生产的机床的比率,大致各占一半左右。美国1973年电火花加工机床的年产量为1800台,平均每月出售台数一般为100台左右。据估计到1975年底,美国拥有的电火花加工机床可能已超过25000台。各种电加工机床在美国的利用情况可参见表1—1。

在美国,电火花加工机床制造厂商有十几家,生产的电火花加工机床的机种有58种。今后电火花加工机床的主要用途,预期将从模具加工发展到直接加工飞机零件和汽车零件。

英国在1961年,1966年和1971年曾三次调查过国内电火花机床的发展情况。调查结果是:1966年比1961年增长78%,1971年又比1966年增长126%。英国在1961年只有电火花机床417台,1966年就发展到743台,到了1971年底就已经拥有2000多台了,在这2000多台电火花机床中,使用5年的占47%,使用10年以内的占78%,4%是使用20年以上的。在英国,宇航工业是电火花机床的主要用户(占电火花机床总台数的18%)。其次为机械制造业(13%)。

在英国制造锻模的总工作量中,电火花加工约占25~30%。在近十年中,英国用于零件加工的电火花机床的生产量也有显著增长。英国有人认为,随着电火花加工方法新的优越性和可能性的不断发现,电火

表 1—1 美国各种电加工机床的利用情况

不同加工机床的利用率 加工种类	电火花加工机床 (EDM)	电解加工机床 (ECM)	电 解 磨 床 (ELG或ECG)
模 具 加 工	75—80% 所有 模 具	1 % 小型锻模 小型塑料成型模	0.1% 超 硬 模 具
零 部 件 加 工	20~25% 1.飞机喷气式发动机零件 2.宇宙科学用零件 3.电子零件(栅极) 4.波导管 5.其他零件	99% 1.飞机喷气式发动机零件 2.飞机的结构件 3.原子能方面的零件 4.去飞边 5.汽车零件	99.9% 1.飞机喷气式发动机零件 2.电气零件 3.超硬刀具 4.加工槽 5.其他零部件

花加工方法的应用,以及投入生产的机床数量几乎将成几何级数增长。

日本第1台电火花加工机床是1954年3月由日本放电加工研究所〔现名ジセパツクス(株)〕制造成功的。该所成立于1953年,这一年在瑞士也成立了阿奇(AGIE)公司。

目前日本的电火花加工机床全国约拥有8000台以上。日本制造电火加工机床的大小公司共有7家。

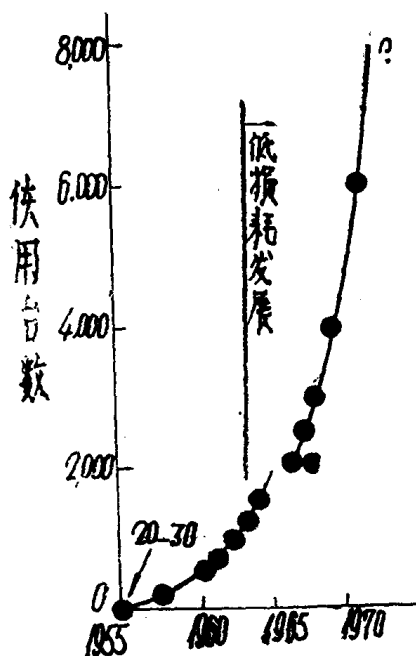


图 1—1 日本电火花加工机床使用台数的增长情况

日本电火花加工机床在模具加工领域的应用情况是:压模(拉深模)35%;塑料模(包括橡胶模、玻璃模)28%;冲模12%;锻模8%;压铸模5%;粉末冶金模3%;其他9%。

在日本,电火花加工机床开始用于压模加工。现在将电火花加工用作穿孔模的加工方法有以下几种方式:1)直接法——用冲头直接电火花加工凹模的方法;2)混合法——将电极接在冲头端部电火花加工凹模的方法;3)一次电极间接法——仅是电火花加工凹模的方法;4)二次电极间接法——同时电火花加工冲头、凹模的方法。

通过对苏联电解加工(ECM)和EDM申请的专利统计数字情况进行分析,由图1—2中可以看出,

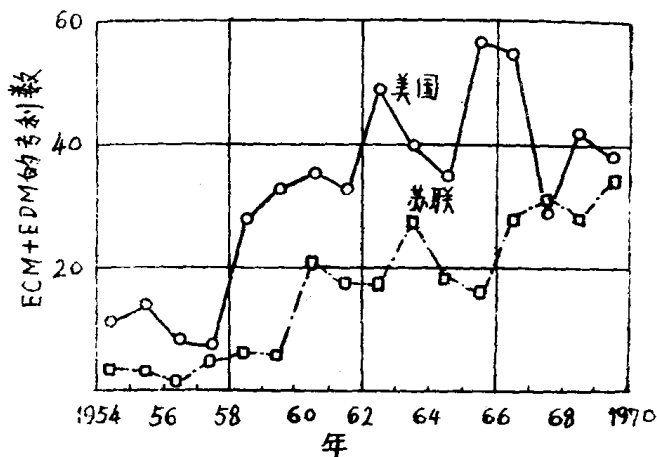


图 1—2 美国和苏联电加工专利的发展情况

从1970年以后,苏联和美国的ECM和EDM申请的专利份数非常接近,据苏刊称,自1970年举行第三次电加工国际讨论会(ISEM—3)后的几年中,美、苏申请批准的专利份数占世界专利总数(指ECM+EDM专利)的三分之一,其余为欧洲国家和日本。美国在1965年申请批准的专利份数最多(约60份),而这一年苏联只有18份。但这2—3年中,苏联已超过了美国专利的增长速度。从图1—3中还可看出苏

联的EDM和ECM的增长和发展情况。1960—1964年申请批准的专利数平均20份左右,但ECM只有几份专利。从1967年以后,ECM开始迅速发展,69年申请的专利就已超过20份(由于申请专利从登记到批准大约是十年时间,因此这两图中表示的发展情况只到70年为止,70年以后的尚未发表)。

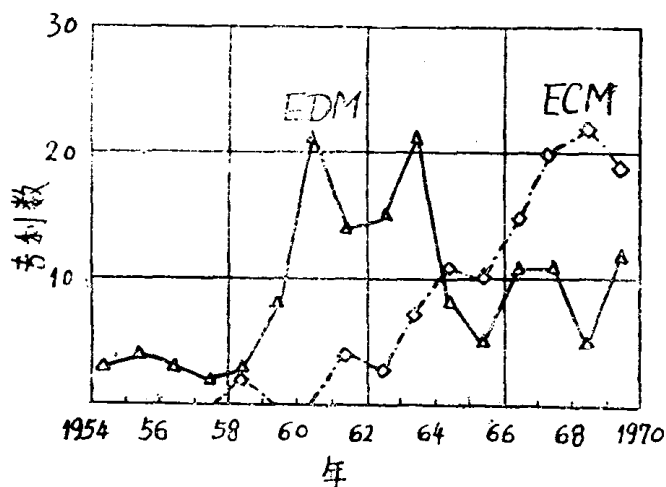


图1-3 苏联的EDM和ECM专利的发展情况

据1971年的统计,苏联年产电加工机床1900台,占金属切削机床总产量值的0.15%左右。但是,据苏联中央统计局1969年11月19日对全国机床制造厂设备利用情况进行了一昼夜的调查统计表明,其中电火花加工机床有23%未在使用,说明利用的并不太好。

其他国家,如瑞士的Charmilles公司和Agie公司,西德的AEG公司,东德的STERE MAT公司和西班牙的ONA公司等近年来制造的新机种也很多。据日刊《プレス技术》1976年2月号报导,一些国家在1974年的电火花加工机床拥有量分别为:

美国10000台	加拿大500台
西德 3000台	东 欧500台
苏联 1000台	意大利300台
英国 1000台	北 欧300台
法国 600台	澳大利亚300台

〔*: 该刊对苏联的统计有问题——编者〕

1.2 应用范围的扩展情况

电火花加工特别适用于制造各类模具,如冲模、锻模、压铸模、塑料模等。其中加工冲模最先采用,目前应用也最为普遍。近年来,电火花加工技术已用于汽车的车门、顶盖等大型压延模以及其它大型模具的制造。大型电火花加工机床目前世界上约有30台。据认为,这类大型模具的电火花加工与仿形铣加工相比缩短工时50%左右。

随着精密机械工业、电子工业等的发展,用机械加工方法很难或者不可能加工的微小精密的模具和零件在急剧增加,由于电火花加工的特点,因此在微细精密加工领域内也获得日益广泛的应用。电火花加工可以用于0.04~1.00毫米范围内的型孔的加工,如化纤喷丝孔、集成元件连接装置的导线导向孔、发动机燃油咀、电子显微镜光栅孔以及人工标准缺陷等窄缝的加工等等。微细精密加工用的机床一般为专用机床以及多工位专用机床,精度较高,有的有光学读数装置,读数精度在1—2微米。工作液、液压油、主轴头应用冷却装置,以防止机床热变形,保证加工精度的稳定。

电火花加工除用于模具和零件制造外,还用于表面磨削、直线和曲线(复杂剖面)切割、金属表面强化以及表面合金化等各种不同的工序。

现在,在美国、苏联、欧洲一些国家以及日本等已经在工厂中建立了专门的电火花加工车间。在英国雷康公司的一个工厂中建立了一个由75台电火花穿孔机床组成的电火花加工车间,且只需几个操作人员看管这些机床。

1.3 机床产品的发展及三化工作

电火花加工经过20几年的发展,瑞士、日本、西德、英国及美国等一些国家的电火花加工机床与脉冲电源已逐步形成系列。制作了大小不同规格的机床以适应各种模具和零件的加工需要。

例如,日本三菱电机公司生产了N系列电火花加工机床,该系列加工机床的特点是:

- 1) 具有灵敏度高的极间距离伺服控制机构,能保证进行稳定加工;
- 2) 具有不会产生蠕动的主轴导向机构;
- 3) 因电火花加工是进行精密加工,所以设计的机床的刚度强,精度高;
- 4) 由于电火花加工多数是在煤油中进行火花放电,所以特别考虑了防止火灾问题;
- 5) 由于使用的工作液在2次加工后会使得制品精度变差,故需要设计较为完善的工作液过滤装置。

N系列加工机床从加工小工件的 $\phi 0.05$ 毫米的小孔到整体加工汽车的压模的大工件,都可根据加工内容任意选定机型。

各国各公司的系列虽不尽相同,但有两点是相似的,其一是机床系列各品种主要按工作台的尺寸、即按加工的对象和用途来分,其二是电源系列按电源的最大平均加工电流来分。此外,还有非系列内的产品,如座标镗、精密型等特殊用途的电火花加工机床。

标准化、通用化工作在近年来也受到重视。1971年,日本精密机械学会设立了由有关大学、研究所和制造厂组成的电火花加工机床性能调查分科会,制订了“电火花加工机床静态精度检查标准(草案)”,对检查项目、测量方法及测量仪器作了规定。由于目前电火花加工工艺90%以上用于模具加工,所以此标准主要针对模具加工用的电火花成型穿孔机床。

1972年,日本又制订了电火花加工机床性能表示方法,并从同年11月起实行。其中规定出厂的机床要有按规定的实验条件和形式作出的机床性能曲线,标明工件和工具电极的材料、电极形状、工作液种类、加工生产率、加工表面粗糙度、电极损耗、测试仪器等主要实验条件和工艺指标。

在日本工业标准(JIS)中的BO122—1964部分规定了电加工机床的代号,供标志图纸或工序表等使用。

苏联在国家标准ГOCT15954—70中制订了电火花穿孔机床的基本尺寸。

英国标准BS4640:1970中也有关于电加工机床的项目。

国外许多公司把组成电火花机床的机床、脉冲电源和过滤器三部分各自形成系列,以达到通用化的目的。用户可根据加工产品的需要适当选配。此外,机床的各种电气的和机械的附件,如日本贾派克斯(ジャベックス)公司的示波器、电极夹具、加工深度程序控制器等均可根据电源和机床的型号以及使用的要求选用,这给用户带来很大的方便。

1.4 工艺指标的进展情况

电火花加工的生产率也有了很大发展。1956年—1957年间,金属加工的生产率最高只达到2000—5000毫米³/分(按加工材料的不同而异),而在1966年以后,当采用了晶体管脉冲发生器之后,加工生产率可提高到7000—10000毫米³/分。出现了可控硅电源之后,加工生产率又有了提高。特别是最近几年,有些国家,采用多回路电极加工技术之后,加工生产率可提高几倍至几十倍

图1—4(a)表示了过去10年中电火花加工性能的提高情况。从图1—4(a)曲线看出了如果取表面光洁度 $R_{max}=25$ 微米,则过去5年中加工生产率提高约2倍。

无损耗的电火花加工回路在实际中也得到了应用,如图1—4(b)所示。在今天,可以用几乎无损耗的工具电极进行加工也已是众所周知的事了。减小中、精加工的电极损耗已取得某些进展。据称,▽7级光洁度时,电极损耗可降低至1—2%。

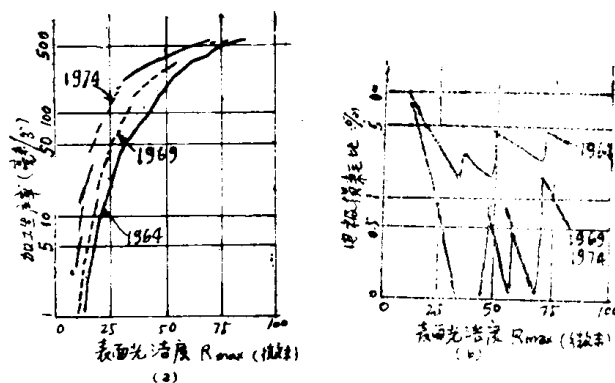


图1—4 加工性能的提高情况

目前国外对于电火花加工表面的评定,普遍是采用 R_a 作指标,即微观不平度算术平均偏差(在欧洲叫 R_a ,英国叫 CLA ,在美叫 AA),但是分级(即选用公比)和表示方法各不相同。只有日本采用 R_{max} (亦用 R_z 表示),即最大不平度来评定。

据国外报导,▽₆的电火花加工表面可与▽₇的磨削表面的工作性能相当。所以,在采用电火花加工之后,工件表面光洁度允许按原要求降低0.5至1级。例如,电火花加工锻模推荐使用光洁度一般是▽₄。另一方面,电火花加工的光洁度与生产率之间存在很大的矛盾,如从▽₆下提高▽₇下,生产率要下降20多倍。因此,精确评定和适当选用光洁度等级,是一个非常重要的问题。

电火花加工的精度是由工具电极的公差、电火花加工机床导轨的精度、工具电极与工件的相对位置以及前道工序和加工时的电参数调整等因素来确定的。采用现代脉冲发生器和装置,极间间隙的精度可保证在5%范围内。考虑到上述所有因素,可达到的加工精度为1—2微米。

为了使表面光洁度与加工精度之间存在一种合适的关系,电火花加工的表面不平度必须压低到所希望的加工精度(电极尺寸与加工后工件尺寸之差)的1/10左右。一般地说,加工面侧面的 R_{max} 为底面的50—70%。其原因是电蚀产物的二次放电机会多。目前国外加工表面光洁度的下限估计 R_{max} 为0.2微米,由此逆算的话,所希望的加工精度则在2微米左右。

除了基本工艺指标,诸如生产率、表面光洁度、加工精度等方面取得了进展外,国外在使用工艺方面也作了一些工作。

目前,在型腔模电火花加工中还存在不少问题,所以使用工艺研究的重点也在于此。在型腔模加工中,国外一般皆采用多电极加工的方法,即以更换电极来弥补电极损耗给加工精度和表面质量带来的影响。但是,更换电极所遇到的问题是多个电极在制造

时的相似性和必须保证装夹电极的重复定位精度。在型腔模电火花加工中使用的电极材料主要是石墨和紫铜。石墨成形虽较容易,但靠手工保证制造精度还是有困难的。为此,美国、法国、英国等已先后研制了专用的石墨电极成形设备。据美国的Carborundum公司称,采用该公司的设备制造的石墨电极其复制精度可达 $\pm 0.0125 \sim 0.05$ 毫米。紫铜电极的成形加工一般皆采用机械切削加锻造和铸造的方法。近年来又发展了高速电铸成形和液压成形等方法。这种加工方法可减少材料与生产费用,并能保证加工的重复精度。

在保证电极装夹的重复定位精度方面,不少国家已制造了专用的定位装置和电极夹具。日本小西六写真工业(株)研制的定位装置精度为 $5/1000$ 毫米以内。瑞典一夹具制造厂则生产了一种3R系列的电火花加工机床用的专用夹具,解决了更换电极时的重复定位精度问题。

最近,国外也有采用单电极加工工艺的了。他们除了进一步研制低损耗的脉冲电源外,也采取了用平动头来修正型腔的方法。最早使用的是法国G.S.P.公司。在该公司制造的M-400-L型电火花加工机床上使用平动头后,可用一个电极实现粗、中、精规范加工。加工精度可达 0.01 毫米。接着,英国、苏联和日本也都相继研制使用了平动头这一附加装置。日本メツブ公司研制的6-LORAN型数控电极夹具可使电极在平面内沿矩形、圆形、对角、靠边等运动以及在平面内振动。它的好处是粗、精规范加工可用同一尺寸的电极,在电极损耗较小的情况下,粗、中、精规范加工也可使用一个电极。6-LORAN数控电极夹具使电极在平面内移动的最大距离为 10×10 毫米;最小的位移为 5 微米;可悬挂的最大电极重量为 30 公斤。

据称,苏联在大型模具的电火花加工型腔时也采用了平动头。另外,苏联为了扩大机床的使用范围还研制了ЛИУЭГ-3型多用电加工主轴头。把它装在电火花加工机床上则可扩大电火花加工的应用范围。该主轴头可使工具电极有不同的运动方式,因而可在工件不动的情况下完成 50 或 70 种不同的工序。

一般在电火花加工型腔模的型腔后,为了提高表面质量和精度尚需手工修磨。而手工修磨的工时约占型腔加工的 $1/3$ 左右,因而迫切需要降低精加工的电极损耗,提高加工精度和表面质量以减少修磨工时,缩短模具制造周期。除此,美国、日本等国家研制了电解锉刀以及应用电化学抛光等工艺来提高电火花加工后型腔的表面质量。日本东洋研磨工业(株)则制造了珩磨机来修磨电火花加工后的型腔表面。修磨的方法虽然很多,但从目前的情况看,国外修磨型腔的

工艺还是一个薄弱环节。

电火花加工应用于汽车工业的压延模加工后,加工面积增加了很多倍。这样,中、精加工需要相当多的时间。因此,为了保证加工表面质量的前提下提高加工生产率,国外采用了多电极加工工艺,即采用各电极间互相绝缘的多回路电极,各电极又分别接于独立的脉冲电源进行加工,因而能在不增加单个脉冲能量的条件下增加单位时间和单位面积上的放电次数,从而提高加工生产率。这是一项解决大型模具加工中生产率与表面质量相矛盾的有效措施。

为了提高电火花加工时的稳定性,国外还研制并使用了定时抬刀、短路切断等装置。对电极上的冲油孔以及排气孔的大小和位置也进行了研究,除此还采用了面积适应的控制系统。

1.5 基础理论的研究情况

近年来,国外加强了电加工方法的理论和物理本质的研究工作,苏联、美国、日本、加拿大、比利时、西德、瑞士的科学中心都在集中力量从事这一工作,并达到了较高的科学水平。在捷克,这方面的研究发展也较迅速。

国外在基础科学研究方面,特别重视加工条件的最佳化和制造电蚀过程数学模型。极间的能量分布和脉冲能量的利用可通过改善工作液来使其最佳化。当然,还需寻找合适的电极材料,因为合适的电极—工件这一对极的材料直接影响着工作液的性能,评定的原则是电能输出高和损耗很小。为了更好地研究放电过程,作了电蚀加工过程的模拟试验。看来,用一个热(学)模型(ein thermisches Modell)可望获得最好的结果。热模型上有一个带中央热源的圆柱体。利用这种有限单元法(mit der methode den finiten Elemente),可以确定蒸发掉一定材料体积所必须的能量。在这方面的研究工作除了利用数学模型外还要借助于电子计算机才能解决。

关于电火花加工机理方面的研究还在继续进行。因为一些经典理论不能完全解释电火花加工过程的全部现象,甚至理论与实验数据相矛盾。实际上,火花放电电蚀除金属过程是相当复杂的。然而通过不断地实践研究,终究会找到其内在的规律,从而使电火花加工技术推向一个新的高度。

在直接指导应用的使用工艺理论方面,各国也作了不少研究工作。这对研制新电源、选择合理的电源参数与波形,以及选用电极材料和工作液等都是具有指导意义的。

苏联是偏重于理论研究的。苏联哈尔科夫工业学院研究了脉冲电源波形与参数和工艺特性之间的关

系,给出了在非方波的脉冲电流情况下,为了使工具电极损耗最小而选择电流脉冲参数的基本依据。M. B. коренблюм在研究材料电火花加工金属蚀除的原理时认为,火花放电时产生的热流决定了加工表面光洁度、生产率、工具电极损耗和加工间隙。并认为热流是与脉冲参数有关的。而脉冲参数则对工艺特性有很大的影响,所谓最佳脉冲参数是指在满足一定的表面光洁度和工具电极损耗的情况下能获得最高的加工生产率。他还具体指出了电极上平均电压、脉冲电流幅值、脉冲宽度对表面光洁度、加工生产率和电极损耗的影响,并得出了经验公式。他同时也研究了梳齿形波和梯形波脉冲在电火花加工中的效果。在H. K. фотеев的研究中,指出了脉冲电源的脉宽和各挡规准对被加工零件表面主要的微观几何特性的影响,从而在保证加工零件表面质量方面对脉冲电源的参数提出了要求。Г. С. Шмаков在研究电极材料的电蚀特性时提出它和材料的热物理常数有很大的关系,另外还和材料的电子结构有关。根据这一结论他认为钨和铜钨合金的耐电蚀性好,在电火花加工时损耗小,因而在精加工时较好的电极材料。并认为蜂窝式多相结构的生铁耐电蚀性能好,也可作为电极材料。

日本的清水明彦在1970年发表了从数学上分析电火花放电能量和加工性能、加工表面光洁度、加工生产率、电极损耗、加工间隙等的关系的研究结果。这对研制新型脉冲电源的参数和波形是有参考意义的。木下夏夫在其它参数都固定的情况下研究了脉冲电源的脉冲宽度对加工生产率的影响,对五个公司生产的八台机床作了实际测定,得出了脉宽与加工生产率的关系曲线。

由于电火花加工表面是在3000℃以上的高温下熔化,又在工作液中急速冷却,所以对工件的实用特性必定有很大的影响。这主要表现在化学成份浓度的变化,金相组织和硬度的变化,残余应力以及显微裂纹的产生等。为此,日本东北特殊钢(株)进行了实验研究,得出了一些规律。

上述一些研究工作在其它一些国家也在进行。

1.6 发展趋势

目前,电火花加工的应用范围急速地扩大,进而对加工的精度、效率以及自动化程度提出更高的要求,这就相应地促进了电火花加工机床的发展。

最近,由于国外感到从事模具手工制造的熟练劳动力不足,再加上对模具的需要量日益增加,交付使用日期缩短,以及用户要求降低制造费用等,因此,在国外对大型模具的制造,采用超大型的电火花加工机床进行加工的国家愈来愈多。到1971年为止,仅美

国CINCINNATI、ELOX、INGERSOL等公司就制造和投产了超大型机床约有12台。电极材料几乎全为石墨。主要用于加工落料模和切边模。加工拉深模时,用仿形加工后再经精修的石墨电极。在欧洲,意大利的LAMET模具制造公司自制的超大型机床使用电铸电极,主要用来加工大型的拉深模。日本、瑞士也制造了超大型机床。在发展这类机床时,除了要解决机床的刚度以与振动有关的基础问题之外,还要关心加工电源的研究,机床操作性能、安全性以及工具电极的制造等技术的研究。

图1—5是用来加工4米长的柴油机曲轴的装置,两个相同的本体由4个工作头构成。使用的加工电源装置单台容量为600安,共4台,输入的电流合计2400安。有效地使用了多回路加工技术。

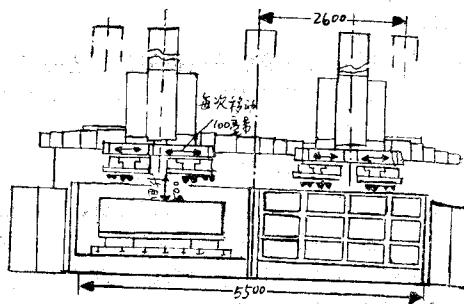


图1—5 大型柴油机曲轴的加工装置

近年来,国外在电火花加工机床生产方面,除朝着大型化方向发展外,也正积极地朝着小型化方向发展。电火花加工用于微细加工在国外愈来愈盛行。作为实验的例子是在5微米厚的黄铜上钻直径2微米的微细孔。在发动机的喷咀上钻直径75微米的孔,精度为±5微米。现在对深为直径5倍的孔加工极为容易。在微细加工时,由于重复放电容易造成不稳定的问题。为了能迅速有效地重复放电,有必要使微细加工高速化。因此,采用了很灵敏的可动线圈式主轴头(MCヘッド),如图1—6所示,即串接在原来的电动机伺服机构上的直列2段伺服进给方式。由于MCヘッド(主轴头)对狭窄的加工间隙内的工作液有高度搅拌能力,上述进给方式是极有效的。

为了在加工过程中自动调整加工条件,使加工稳定进行,除研制高效、低损耗和具有适应控制的新型电源外,较普遍地采用了电子计算机控制火花间隙的状态、记忆加工条件和自动检索最佳加工参数等。这为电火花加工机床操作的自动化创造了条件。如日本的DM-250N型、DK7000-EP60M型、英国的N600

能量值之间的相互依赖性所造成的灵活性较差等。

尽管弛张式电源是一种早期的电源，但国外并未完全弃置不用。相反，当采用电容器放电用来产生短脉冲时，可有效地用来加工具有很高光洁度的表面。通常，晶体管电源所能产生的脉冲宽度为 1 微秒以上，但是，电容器电源所产生的脉冲宽度可以小于 0.5 微秒。事实上，当加工速度不作为一个问题时，例如在精密微细（如窄槽、微孔等）加工条件下，仍有不少采用弛张式一类电源的。

目前，为了发挥其长处，因而对此类电源仍在进行某些改进。例如，苏联为了提高弛张式电源的加工生产率，提出了一种桥式电容储能器线路。另一个办法是在负载电路中接上起开关作用的可控硅或晶体管，当出现电弧时，这种开关可以把电容器电源断开。采用这种线路的好处是，在保持原有的高表面光洁度的条件下，可以提高加工生产率和降低电极损耗。还有一种方法是采用多回路加工，如苏联的 38 回路电源加工短路环异形槽就是一例。这些新线路都收到了一定的效果。

2. 晶体管电源

这种线路的加工生产率比弛张式线路高，电极损耗也比弛张式线路低。晶体管线路与可控硅线路相比，前者的频率特性比后者好些。晶体管是一个比较好的开关元件，当电极和工件之间短路时或是发生其他故障时，可以比较容易地切断电流和改变加工条件。

但是，晶体管线路也存在一些问题，如晶体管线路的容许电流比可控硅小，所以当需要采用大电流进行粗加工时，所需要的元件要比可控硅多得多。

晶体管电源线路有多种形式，都能在一定程度上提高电源的性能。一种线路是把两个多谐振荡器用作时基装置，其中一个多谐振荡器用来测定脉冲接通的时间，另一个用来测定脉冲断开的时间。与其相似的一种线路是采用一个简单的单稳态的多谐振荡器。这种振荡器（如图 2-2）发出来的信号是可调的，这种

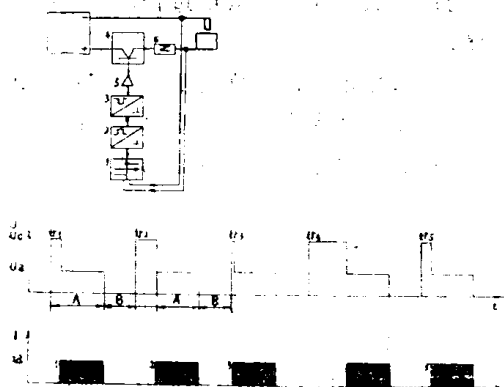


图2-2 具有一个单稳态多谐振荡器的线路和特性曲线

信号可用来控制时基装置，从而确定断续器（即大功率晶体三极管，这种三极管可以开关很大的电流）的接通时间。接通时间过去以后，断续器就自动断开。

但是，这两种线路都是产生一种不规则的脉冲，都采用一种独立的装置来控制加工规准，忽略了放电间隙中所存在的确定电火花是否能够通过的这个条件。而等能量脉冲发生器（瑞士恰米莱斯公司线路），则能克服上述缺点。

图2-3所示的等能量脉冲线路，在这个线路中，主要的区别是外加一个检测器，以便检测和控制放电间隙中的条件变化，从而确定下一次放电的最佳时间。因此，放电间隙条件可以有效地确定工作规准。

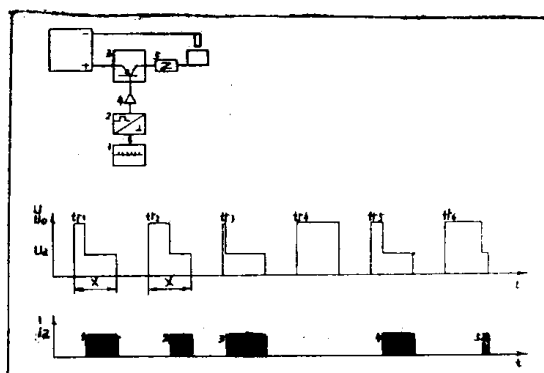


图2-3 Charmilles公司的等能量脉冲线路和特性曲线

上述线路可以保证每次放电都具有相同的脉冲宽度和相同的能量。而且，由于工作规准取决于来自检测器（依靠放电来触发的）的信号（只有在放电间隙条件良好时，才能发生这样的放电），因此，工作规准取决于放电间隙条件。由此可见，这种方法可提高加工生产率，保证表面光洁度和保证放电间隙的均匀性。

3. 可控硅脉冲发生器

可控硅电源的一个突出优点是它能够很容易地提供一个高压脉冲，所以这种电源适合于在高速条件下进行加工。可控硅电源的耐电压性能要比晶体管电源高得多。而且，其电流容量也比晶体管电源大。所以，即使在高压情况下，可控硅电源都能经受得住冲击电压。由于可控硅电源经得住高压，所以电极和工件之间的距离可以长些。因而也易于实现自动进给电极，而且可以保证重复放电的稳定性。当采用大电流进行粗加工时，由于可控硅电源的电流容量大，所以不需要很多元件。

但是，可控硅电源仍存在一些问题。由于它受到关断时间的限制，所以，目前要获得很高的频率不及晶体管电源的潜力大。另一个存在的问题是波形的控

制比较复杂,不如晶体管电源那样容易控制。

由于国外生产的晶体管和可控硅的质量不断提高,近年来愈来愈多的公司正采用晶体管和可控硅电源来代替以往的弛张式脉冲电源。例如 Charmilles 公司生产的 P₃ 型 (50 安) 等脉冲发生器加工 淬 火 工 具 钢,在电极低损耗的条件下生产率为 400 毫米³/分,精加工最高光洁度达 $\nabla 8$; Agie 公司生产的 L 系列 85 安的可调复合脉冲电源,用石墨加工钢,在电极低损耗条件下生产率可达 750 毫米³/分,精加工时最高光洁度可达 $\nabla 8$; 加工硬质合金可达 $\nabla 10$ 。近年来,日本研制成一种称为“F 回路”的晶体管电源,可以在电极损耗比为 1~2% 时,获得 $\nabla 7$ 的光洁度,对于型腔模具加工,可以大大缩短电加工后的手工修整时间;同时由于其稳定性提高,可以用钢凸模作电极直接加工凹模。因此,利用钢打钢,加工滑柱式冲模可以在组合状态下进行。曾以这种方式加工出汽轮发电机铁芯冲模,过去对这样大的冲模制造,要用座标镗床,用高精度冲床(微米/级);在模板上加工装配孔,镶拼分开的凹模;另外凸模与凹模之间的间隙调整要花很长的时间。采用冲模呈组合状态下的电火花加工方法,整付模具的间隙与电火花放电间隙相同,各处都很均匀,不需进行麻烦的间隙调整,从而大大缩短模具制造时间。

4. 正弦波全波整流线路

法国朗格潘电焊公司 (La Sondure Ehctrigue Languepin) 研制了一种正弦波全波整流线路。这种电路既可以通过变压器接到工业电网上,也可以接到高频发生器上。

据称,采用 3 种线路,粗加工时,可提高加工生产率,大大降低电极损耗,甚至可把电极损耗下降为零。

采用正弦波全波整流电路进行加工,当以单回路运行时,生产率为 3350 毫米³/分;当以双回路运行时,生产率为 6700 毫米³/分;以三回路运行时,生产率为 10000 毫米³/分,当生产率为 800 毫米³/分时,铜电极的电极损耗实际等于零。

5. 连续脉冲发生器

最近,在第一届欧洲国际机床展览会 (IEMO) 上,法国 GSP 公司及其英国代理商展出了一台 EDM 5 型电火花加工机床。该机床配用的脉冲电源及旋转头是根据法国 Languepin 公司的专利制造的。这种电源叫做连续脉冲发生器,电源容量为 50 安。它的特点是在加工时工具电极没有损耗,因而,用一个电极就可完成粗、精加工工序。据称,用一个电极加工了

18 个零件后尚未测出电极的几何尺寸有何变化。使用该电源的另一特点是电蚀产物的排出不需要加压冲洗。在电火花加工过程中出现的气泡能引起工作液循环,这样电蚀产物会自动地从加工区被带走。

Languepin 公司的脉冲电源与一般电源的不同点在于它的波形。它消除了两脉冲之间所必须的间歇时间,因此“脉冲进行”的时间是连续的。

脉冲电源的好坏,在很大程度上影响着电火花加工机床的性能,因而对脉冲电源的研究、改进工作各国都很重视。目前主要在下述两个方面开展研究工作:

1. 充分挖掘现有脉冲电源的潜力,合理地调节脉冲参数。为此研制了自适应控制电源,采取了数字程序控制转换规准以及定时抬刀、短路切断等自动化措施。这样就能最大限度地发挥电源的效能,始终保持在最佳状态下工作。如日本三菱电机公司发明的电火花加工条件自动检索装置 (インフオメータ),它是满足光洁度、间隙、电极损耗比等加工特性最佳电火花加工的电气条件 (电流峰值、脉宽、电极极性等) 的所谓印刷输出装置。该装置可记忆包括各种电极材料的 3000 个电火花加工数据。

日本贾派克斯 (ジャパツクス) 公司最近在研制的 DS315-NC 型全自动电火花加工机床上采用了富士通 FANUC—260A 型数控装置。它用 ATC 装置数控予置,加工的基本条件自动检索,并以数字表示,加工工序和定位也用数字控制。

2. 积极发展新型脉冲电源。理想的高效、高光洁度、低损耗的脉冲电源,一直是电火花加工机床研制者追求的目标。最近几年出现的复式晶体管脉冲电源、等能量脉冲发生器、正弦波全波整流线路、梯形波、梳形波线路、连续脉冲发生器以及高频窄脉冲电源等都是在这方面努力的成果。这些电源都在不同程度上提高了性能,促进了电火花加工技术的发展。

随着对电火花加工机理认识的深化以及电子工业及其它新技术的发展,新型的,能更好地满足电火花加工要求的电源会不断涌现,这也必然会促使电火花加工技术有一个很大的突破。

三、电火花加工用电极

在电火花加工中,对电极材料的选择是否正确,将直接或间接地影响放电的稳定性、加工速度、光洁度和精度。因此,电极材料一般须能满足以下几点基本要求:

1. 放电稳定可靠;
2. 电极损耗低;
3. 加工速度快;
4. 加工表面光洁度高;
5. 容易加工和成形;
6. 成

本低，材料来源容易，7.机械强度高。

但是，并不是所有的电极材料都能满足上述条件，所以必须根据电源线路、对加工精度的要求和加工材料与对象（加工通孔或型腔模，大工件还是小型工件）的不同而有所侧重。

在比较常用的电极材料中有，铜、铜合金、石墨、黄铜、铸铁、铝以及烧结材料。烧结材料如：铜

钨合金和碳化钨，银钨合金等，大多用于精密微细加工。目前国外也在采用钢打钢，在模具制造中可以用上模直接加工出下模。要采用那一种材料在很大程度上取决于应用对象和所包含的成本的高低。

表3—1分类表示了各种电极材料及其可加工性和用途，这在设计电极时是应予以考虑的。

表 3—1 主要电极材料及其用途

材料名称	可加工性					用途	备注
	切削	磨削	锻造	铸造	其他		
铜和铜板	差	差	一般	差	铜电铸法 铜喷镀法 放电成形法	所有不通孔加工 浅的通孔加工	1) 可以低损耗加工 2) 加工速度高 3) 容易用腐蚀方法减小尺寸 4) 容易得到 5) 磨削有问题
黄铜	好	一般	一般	差		通孔加工（杂件） 浅的通孔加工	1) 便宜，特别适用于复杂件的加工 2) 容易用腐蚀方法减小尺寸 3) 不能做到低损耗加工，特别不利于超硬合金的加工
石墨	好	一般	不能	不能		所有大工件不通孔加工 不要求高精度的通孔加工	1) 可以低损耗加工 2) 加工速度大 3) 切削性能好 4) 不适合超硬合金加工 5) 切削、磨削时必须处理粉尘 6) 微细形状的切削、磨削时产生剥落
银钨 铜钨	一般	一般	不能	不能		几何形状的不通孔加工 精密通孔加工	1) 价格高，可作通用电极材料 2) 用RC电源加工时损耗最小 3) 适于超硬合金的加工
铝	好	差	一般	差		大工件通孔加工 大工件不通孔加工	1) 适于用大电流高效率加工
铁	好	好	一般	一般		通孔加工	1) 适用于高电压电源

石墨电极在国外最近几年获得了广泛应用。在美国使用的电极中80%以上是石墨电极，苏联的ЭЭГ牌号的石墨电极，西德的EK系列石墨电极，也都是被普遍采用的。而在日本过去是很少使用石墨电极的。最近由于生产石墨电极的厂商意识到了石墨作为电火花加工用电极的重要性，在日本已开始迅速发展这种石墨电极的生产。而在苏联美国和西德等国家估计今后石墨电极将会得到进一步普及。

与其他金属电极相比，石墨电极具有一系列优点，当然它也是有缺陷的。如在机械加工时拐角部分

易崩损和对环境造成污染等，后者可利用石墨粉尘轻的特点安装简单的集尘装置来解决。

在表3—2中列出了日本东海电极制造公司使用的石墨电极的特性，在以下条件下进行了实际的电火花加工，研究了电极损耗比（相对加工深度的电极损耗长度的百分率），加工生产率、工件的表面光洁度与石墨电极特性的关系。

使用的电火花加工机	DIAX DM250
电源	DE90T + OP3
工作液	EDF

工作液压力	喷流0.2公斤/厘米 ²	加工电压、电流	30伏, 9安
工件	SK 5	峰值电流	18安
加工深度	20毫米	脉冲宽度, 停歇时间	各80微秒
电极特性	正极性		

表 3—2

使用的石墨电极的特性

试 验 编 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粒子平均直径 (微米)	2	3	5	5	7.5	10	15	20	25
视在密度 (克/厘米 ³)	1.90	1.81	1.61	1.81	1.83	1.88	1.85	1.86	1.75
硬度 (肖氏)	70	78	64	71	64	62	66	57	55
电阻率 (微欧·厘米)	1600	1700	2000	1200	1330	850	1300	860	1000
弯曲强度 (公斤/厘米 ²)	550	620	490	900	650	550	450	550	360
压缩强度 (公斤/厘米 ²)	1200	1550	890	1300	1300	1020	1120	1,080	720
各向异性系数(异方比—日文)	1.05	1.05	1.03	1.03	1.20	1.50	1.50	1.55	1.30
晶格常数C ₀ (Å)	6744	6764	6746	6740	6734	6736	—	—	6732

现将其结果概略地用图表示如下:

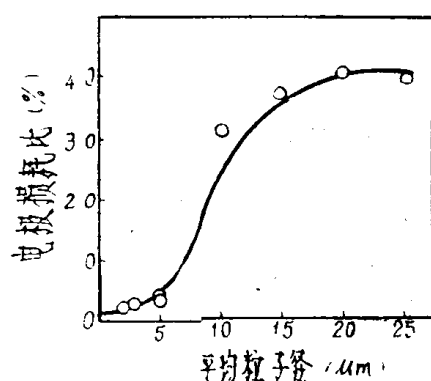


图3-1 平均粒子径与电极损耗比的关系

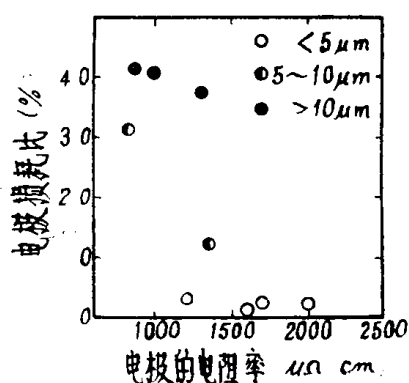


图3-2 电极的电阻率与电极损耗比的关系

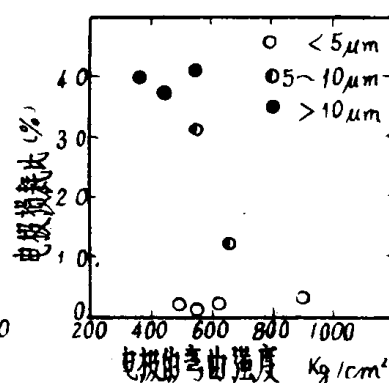


图3-3 电极的弯曲强度与电极损耗比的关系

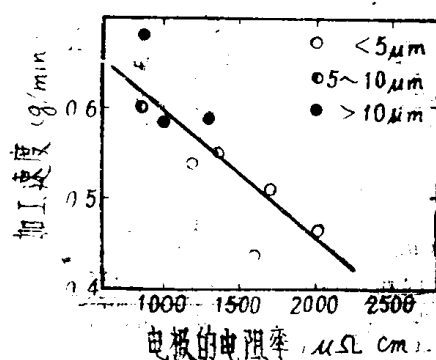


图3-4 电极电阻率与加工速度的关系

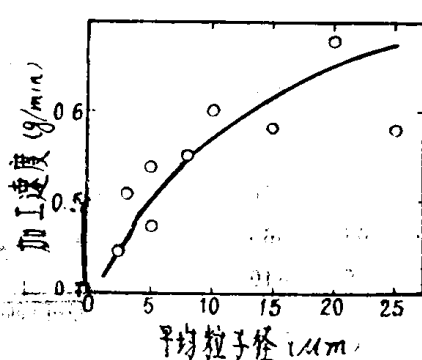


图3-5 平均粒子径与加工速度的关系

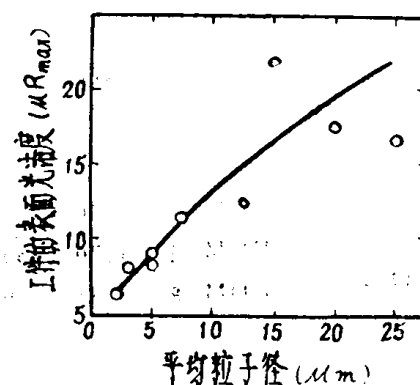


图3-6 平均粒子径与工作表面光洁度的关系

图3—1示出了电极的结构粒子平均直径与电极损耗比的关系曲线。粒子直径小于5微米时，电极损耗比小，超过5微米时急剧地增加，15微米以上就是大致上稳定了。图3—2示出了电极的电阻率与电极损耗比的关系。电阻率在1200微欧·厘米以下时，损耗

比大，超过这个数值时，损耗比变小。同时也要受到图3—1中的粒子直径的大小程度的影响。

图3—3所示为电极的弯曲强度与电极损耗比的关系，这种场合也要受到粒子直径的大小程度的影响，大致是机械强度高，则损耗比小。另外，在电极的体

积密度与电极损耗比之间看不到明确的相互关系。

图 3—4 所示是电极的电阻率与加工速度的关系。电阻率愈低，加工速度愈高。

图 3—5 是电极结构粒子平均直径与加工速度的关系。由图可见，粒子直径愈大加工速度也愈高。

图 3—6 是电极结构粒子平均直径与工件表面光洁度的关系。随着粒子直径的减小，加工表面光洁度越好。

由此可以看出，支配电极的损耗比的是结构粒子的大小，同时，粒子的微细化使结构均匀，也使每单位放电面的放电点数增加，从而减轻了各放电点上的放电能量的负荷，结果就使得电极的损耗降低。

表 3—3 石墨电极材料的牌号及其特性

公司名	牌 号	体积密度(克/厘米 ³)	电阻率(微欧·厘米)	肖氏硬度	弯曲强度(公斤/厘米 ²)
东海电极	HK 12	1.70	1800	45	400
	HK 22	1.72	1300	55	550
	HK 23	1.78	1600	75	700
东 洋 カーボン	EDA103	1.72	900	45	420
	EDA104	1.78	780	45	450
	EDA105	1.80	900	45	450
日 本 カーボン	FG 303	1.80	900	55	570
	EG 36	1.72	1300	55	420
	SEG6	1.80	1100	45	350
日立化成	HED11	1.75	880	50	400
	HED113	1.81	830	50	500
东洋炭素	SEM 2	1.75	1000	55	360
	SEM 3	1.88	850	62	550
	SEM 5	1.80	—	50	500
ポ コ (POCO)	EDM 1	1.60	2000	65	420
	EDM 2	1.70	1500	68	560
	EDM 3	1.84	1300	70	840
ル カーボン	ELLOP 8	1.70	1300	45	300
	ELLOR 9	1.80	1500	60	500
	ELLOR 10	1.85	1500	65	700

其次，对加工生产率来说，电阻率是起支配作用的。这时，除了电阻的增加会使得放电能量的电阻损耗增大以外，根据经验得知，石墨的电阻是与其热传导率成反比的，当使用电阻大的电极时，由于放电所产生的热的扩散速度小，工作液的绝缘性能恢复慢，

其结果便使得加工生产率下降。

表 3—3 示出了在日本有代表性的电火花加工用的石墨电极材料。在这些作为电火花加工用的电极材料中包括了新研制的专用的原料，这些是 ポコ (POCO) 制品，东海电极 HK23，日本カーボン FG303，东洋炭素 SEM5 等。

现在在日本国内使用的制品有：东海电极公司制的 トスフート (制品名)，东芝セラシツク (陶瓷) 公司制的 クリヤーカーボン (透明石墨)，日本カーボン (石墨) 公司制的制品以及进口的 Texas Instrument 公司制的 TIKOAT 以及 Ultra Carbon 公司制的制品等，这些制品的工艺方法都不清楚。

在制作电极方面，国外除使用仿形铣床或数控机床用机械加工方法加工外，如必须制作几个形状相同的电极时，则可应用放电成形法 (图 3—7)，电铸法 (图 3—8) 等。图 3—9 是一种稍加改变的将一束电极压装在模型内的很独特的方法。

表 3—4 是几种电极制造方法的特点。

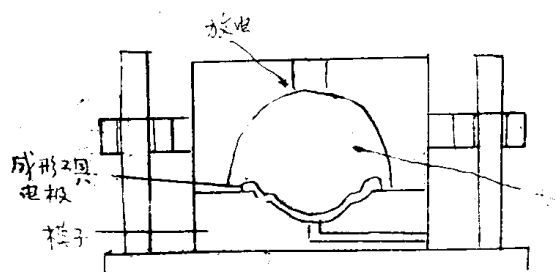


图 3—7 放电成形法 (原理图)

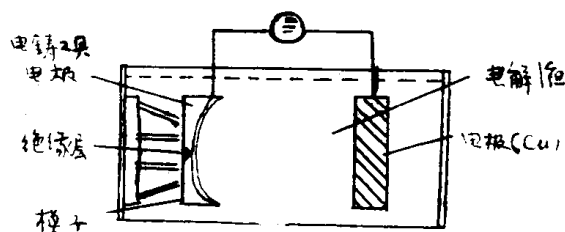


图 3—8 电铸法 (原理图)

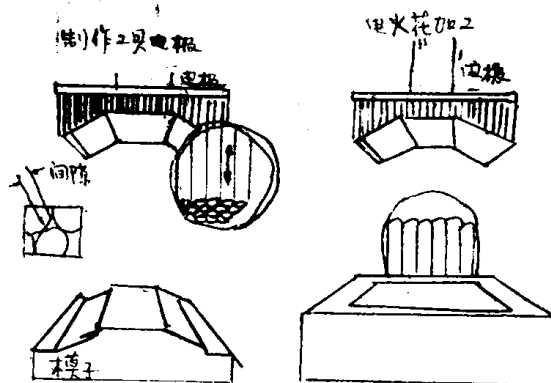


图 3—9 用成束电极制作的工具电极并用它进行电火花加工

表 3—4

不通孔模电极的制造方法和特点

电极制作方法	使用装置	电极材料	形状和精度	特 点
机械切削方法	仿形铣削	石墨	2 维、3 维	适于多品种少量生产。 必须人工修整。 需要木模、石膏模、树脂模等模型或图纸、穿孔带。
	NC 铣削	其他金属	± 0.05 毫米	
电 铸 法	电铸设备	铜	3 维 $\pm 0.02 \sim 0.05$ 毫米	适于多品种少量生产。 需要靠模（木模、石膏模、树脂模）。 不能用于粗加工。 需要排液处理装置。
压力成形法	放电压力成形机	铜	3 维 $\pm 0.02 \sim 0.03$ 毫米	适于大量生产。 需根据靠模制作模具。 不怎么适合粗加工。 生产率远比电铸法高。
	爆炸成形机	铜	3 维 $\pm 0.02 \sim 0.03$ 毫米	
特殊加工	加压振动成形机	石墨	3 维 $\pm 0.05 \sim 0.1$ 毫米	适合大量生产 特殊模具需用靠模
	加压烧结机	石墨	3 维 ± 0.05 毫米	

一般认为，多个电极采用标准模具复制的方法较好，其中以放电压力成形应用最多，今后期待石墨压制成形加工。而当仅需制 1～3 个电极时，现用电铸法，此外是仿形加工、数控切削以及两者兼用的联合控制加工方法等，并已试制成五轴控制电极成形机。

电极制造技术的进展比较迟缓。目前多采用在靠模铣床上铣制石墨块来加工电极，也可用锻造、火焰喷镀、电解沉积铜、铜爆炸成形、铸铝或挤压铝等方法。最近西德 Bruninghaus 钢铁厂创造了一种铜电极制造法。把一张厚 3.54 毫米的铜片放在母模或生产模具上，用一块硬胶垫短时间粗压后把该铜片放入模具，并用密封板夹住，再在电极的背面加上高压油，用液压使它变形。液压成形重复 3～4 次，其间铜片要退火，直到反映出模具形状为止。然后给铜片加衬垫并打上定位和固定孔。粗、精加工电极的制作方法相同，对于粗加工电极来说，在铜片和模具之间要放上一层中间金属薄片，其厚度相当于加工余量。对于精加工电极其厚度相当于电火花间隙量。据说这种生

产电极的新方法可大大节约费用和材料。

另外，一种新的石墨电极制造法——全成形加工法，所用时间缩短到只有用单刃刀具加工方法的 1%。这是由美国电火花加工公司发明的全成形加工机床，它实质是一个石墨复制机。它用一个由铸造的磨料环氧树脂或金属样件来生产石墨复制件。环氧树脂样件可生产大约 100 个电极，钢制样件寿命更长，但它必须有粗糙表面作切削刃用。

四、适应控制

所谓适应控制系统就是当加工开始以前，操作人员给定各种限制条件，而电火花加工机床则按这些给定条件自行判断加工状况而进行最佳的加工。

当进行电火花加工时，随着加工的进展，加工面积大小，加工深度，工作液中的废屑浓度等因素的变化将会影响放电间隙中的反复放电的稳定性，从而引起电极间绝缘强度的下降、产生短路和其它异常现象，甚至引起停工或损坏工件。适应控制系统则可

以自动地选择在最高脉冲频率条件下进行加工,而且经常由电子线路来检测和判断加工状态,同时可以根据放电间隙的绝缘恢复情况来防止持续电弧。经常保持最高加工速度。

适应控制系统一般由四种电子线路组成:检测线路、判断线路、记忆线路和操作线路。

检测线路:当极间绝缘强度局部下降、发生局部放电集中,出现持续电弧征兆时,这种装置可以精确而迅速把它检测出来,并向判断线路和记忆线路发出信号。

判断线路和记忆线路:这两种线路的作用是根据检测线路发出的信号,来判断正在进行加工的条件是否最佳,并及时处理随时变化的放电状况,找出最佳的放电条件。

操作线路:根据判断线路发出的信号,调整预定的脉冲宽度、峰值电流、脉冲停歇时间,从而控制加工电流。

适应控制系统的优点是它能够根据表面光洁度、电极损耗、脉冲停歇时间等因素,在开始一次给定脉冲条件,而以后的加工直至加工完毕的这一过程中,不仅不需要进行监视和调整,而且加工效率高,不产生持续电弧,从而不会烧伤工件。

目前,国外出现很多控制线路,下面仅举数例:

图4-1示出了一种适应控制系统的方框图。其中鉴定部件用来确定系统的动态特性。控制部件将系统的动态特性信息与要求的特性进行比较并向控制电路发出信号。修正部件用来监督控制电路(即反馈电路)的动作。

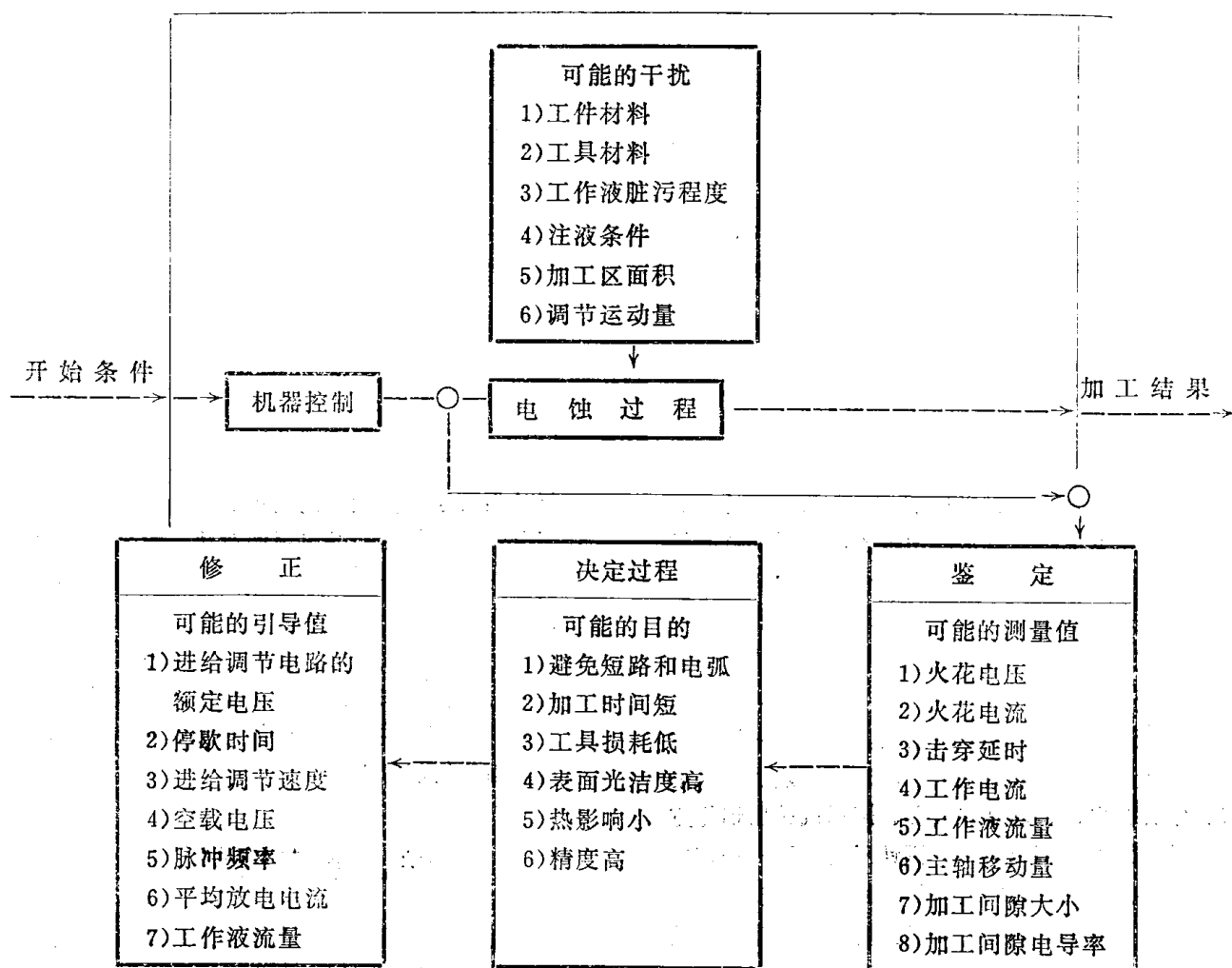


图4-1 一种适应控制系统的方框图

在电火花加工时,输入信号是电信号。但是,同时控制几个参数要求专门的算法或阿拉伯数字算法。不是目前所有知道的控制系统都可叫做适应控制系统。这种系统的前身是能够显示加工过程的质量和稳定性的仪器。瑞士Charmilles公司制造的这种 Mo-

nitron装置,它不仅可使操纵人员观察全部加工过程进行的情况,而且还能使操作人员积极影响这个过程以获得最佳的参数。操作台上的信号灯一亮,便能指示出加工过程中出现的下列4种异常现象中的一种,操作人员便可将其排除: 1. 产生电弧放电; 2.