

探索第三代电火花成形加工的关键技术

Discussion on Key Technology of the Third Generation EDM Forming Machining

北京机床研究所 沈洪
北京市电加工研究所 伏金娟



沈洪

1962年毕业于西安交通大学,从事电加工工艺及机床研发37年。作为项目负责人或主要参加人共完成研究课题26项,开发整机15台、功能部件13种、实用工艺6套,上述项目完成后全部投入生产,共获得省部级科学技术奖7项(二等奖3项,三等奖2项,科技大会奖2项)。自20世纪80年代后工作重点为数控电火花加工技术的研究,作为项目技术负责人自1987年起引进日本JAPAX公司DX45NC机,成功地完成消化、产业化和再开发任务;1991年被评为机电部有突出贡献专家,享受国务院特殊津贴,在大陆及香港杂志上发表多篇论文。

第三代电火花成形机床脉冲电源并不仅仅是微精加工特性有较大改进,而是粗中精加工特性全面改进,只有逐级精细化,到微精加工才会有均匀合适的加工余量。当然,最重要的还不是发脉冲,而是如何让此类微能量脉冲发挥作用,达到稳定放电的目的。

电火花成形机床(Sinking Electro-Discharge Machines, SEDM)是电火花加工机床的主导产品。以信息化、智能化为代表的第三代电火花成形机床,其主要任务是开拓电火花中精加工、超精加工可量化的性能指标,这就需要在电火花成形机床的方方面面做深入细致的探索与研究工作。

脉冲电源的关键技术

1 干净脉冲

首先要解决能量的精准度,即当进入中、精加工后,线路上形成的寄生参数所产生的能量相对该规范脉冲能量来说已足够大,它叠加在放电中,就形成了一些很难抛光的针孔,

也造成了在电极边角处的异常损耗,甚至出现黑斑和烧伤疤痕。这和研磨中磨料粒度的品质一样,在精研磨时,若存在一颗大粒度的砂子就会划伤已研磨好的表面。随着新器件的出现和使用,线路大大精简,走线大大缩短,大量的限流电阻、大风扇、大散热片,甚至连变压器都被取消,使能效利用率从20%提高到80%;电压采用数字细分化,且微精加工线路板被安装在主轴滑枕上,只需一根较短的电缆线固定在工作台上,减少了寄生参数。高档机床还采用双向绝缘,主轴接板和工作台面都采用花岗岩进行绝缘,以减少极间电容。

2 精密电源

和研磨一样,越是精密加工分

档越细,电火花加工亦如此。比如,电火花加工表面粗糙度 R_a 要达到 $0.1\mu\text{m}$ 时,需要换13档规准,如果电火花加工表面粗糙度 R_a 要达到 $0.05\mu\text{m}$ 时,那就需要换17~18档规准。后面几档脉冲能量之差微乎其微,所以要做到脉冲能量极其准确,也就是脉冲电源亦要高精度化。

3 超高频脉冲电源

过去微精电源多用TR-RC线路,也即采用电容的充放电再细分成更窄的脉冲宽度,目的是达到更好的表面粗糙度质量要求,但是这种弛张式放电停歇极小,空载、短路频发,有空载就会有能量叠加,这直接影响到表面质量的控制。TR-RC对小孔或放电面积较小的加工问题不大,但对有一定面积要求的型腔加工这种极间电容仍是一大问题。因此,需要限制电容值,并选用更先进的开关器件来实现更窄的脉冲宽度,尽可能在极短的时间内RC放电基本是稳定的。按目前器件水平可以做到纳米级,如脉冲宽度 $\leq 80\text{ns}$ 是可行的,此时频率可达到500~1000kHz,表面质量就可提高了。

4 “干净表面”的要求,促使脉冲电源智能化

表面质量仅用表面粗糙度 R_a 来表示是不够的,同样的 R_a 表面,可能会有不同的微细缺陷存在,这就是单位面积内的针孔数。这会严重影响脱模效果,可能会发生型腔内材料粘接,从而产生用户难以接受的模具使用寿命缩短的问题。

SEDM的放电坑深度越不一致、越深,精修越难。放电坑深度的不一致是因为到达工件表面的脉冲能量不一致。脉冲能量受寄生参数的影响在减少寄生参数值和避免空载充电后已大大减少,而且它仅是对精加工起作用。最大问题是脉冲能量在到达工件表面前在放电间隙的等离子柱中的消耗是不固定的,尤其是首发放电时的放电间隙可能仅是正

常放电间隙的1/20~1/10(粗、中加工时差距要小一些),此时到达工件表面的能量肯定大。再者,SEDM在中精加工中多用抬刀来维持正常放电,每次抬刀的返回都是一次首发放电,都会留下一批比正常放电要深的坑。而在电火花线切割机床(Wire Electro-Discharge Machines, WEDM)中有专门的切入程序来应对首发放电,比如,采用圆弧切入、减能量、缓进给等措施,避免了断丝及过深痕迹。这种现象在WEDM中出现较少,而在SEDM中出现较多。从点火花放电至回退到正常放电间隙,最快也得数毫秒,可以有成百上千个脉冲放电,为形成正常放电间隙产生必需的屑子。如有能量成阶梯上升的脉冲串与之配套,情况会好一点。即随着间隙逐步加大,才恢复到正常的脉冲能量。同时也需要控制抬刀高度,勿使间隙内的屑子排除太彻底,从而使点火间隙过小。甚至在一个抬刀周期内随着间隙内的屑子浓度的增加,脉冲能量也能随之微调减小,从而使放电坑尺寸更加一致。放电能量针对放电状况的变化有规律的调节应该是脉冲电源智能化的一个方向。这种能量控制亦可有效的防止过度的集中放电,间隙过热,造成局部坍塌,亦会最终留下针孔。

要特别注意的是:第三代电火花成形机床脉冲电源并不仅仅是微精加工特性有较大改进,而是粗中精加工特性全面改进,只有逐级精细化,到微精加工才会有均匀合适的加工余量。当然,最重要的还不是发脉冲,而是如何让此类微能量脉冲发挥作用,达到稳定放电的目的。所以第三代电火花成形机床的研发重点在于技术的集成,而今大间隙放电控制技术的确是一大亮点。

新理念指导下的间隙放电控制技术

在WEDM出现前,SEDM主要是

加工冷冲模,用钢冲头打凹模,广泛采用油杯冲油加工,仅依靠进给伺服的控制,加工稳定性还是可以保证的。之后有了低损耗脉冲电源,转而加工型腔,仍继续使用冲油。但是冲油会造成电极损耗的不均匀和加工间隙的不均匀,而且有不少型腔亦很难实施冲油,需采用抬刀进行排屑,稳定加工的目的达到了,但效率却降低了。

抬刀排屑下的SEDM是在静止的介质中放电,窄窄的间隙密封性极好,中精加工脉冲爆炸力又小,屑子扩散困难,故集中放电向电弧过渡要容易,而且来得很快。这些和WEDM比情况要相差很多,WEDM有强烈水介质冲刷或是在一个比较开放的空间精修,工具电极仅是一根细丝,故放电点是可以检测的,放电点上集中放电时间过长亦是知道的。SEDM曾采用火花射频测量放电点,但效果不佳。采用脉冲波形分类、统计、判断取间隙状态信息,一是干扰太大,二是速度太慢,反馈不足以防止状况出现。所以,当时的适应控制只能偏空和过度反应,用降低效率的代价取得一定的稳定性。

故障预兆检测在实际应用中有一定困难,出现问题时就显得非常突然。采取预防控制方法也是一种有效的措施,在工程上称前馈控制(Feed Forward Control)。SEDM的集中放电向电弧的过渡有如下因素:

(1)加工规准脉冲能量和当前实际放电面积不匹配。要稳定加工,放电电流密度是必须控制的,在电极进给开始放电加工到整个面接触,放电面积的变化很大。尤其是在大部分余量都由HSM去除,SEDM往往是从边角开始,由点到线再到面。解决办法有2种:一是用CAD/CAM技术,将预加工后型腔形状和电极形状数据引入,计算出加工深度和放电面积的关系,并自动编程,转换加工能量,甚至改变进给和抬刀参数。二是用所施加规准的标准蚀除速度除以

实际进给速度,即可得到相应加工面积,以此为转换加工能量的依据。显然第一种方法要可靠得多,标准蚀除速度在实际加工中很难体现,而且它是先测后改,慢一拍。这种能量匹配已经可以做到连续匹配。

(2)排屑和抬刀不匹配。因为放电间隙中介质的流动会造成不均匀的损耗,故今天的SEDM除了穿孔和大型腔粗加工外,都采用抬刀排屑,但要排屑和放电产屑之间达到平衡不容易。放电开始时,由于仅蚀除前一档放电凹坑的翻边,容屑空间就大一些,故排屑速度会快一点,越接近坑底,排屑速度明显变慢。抬刀参数很难适应这种短时间的变化,所以一般都是抬刀过量,造成加工时间过长;且由于过量排屑,间隙内屑子浓度过低,造成再次抬刀回升,又形成一个非常近距离的点火过程,产生了振荡,这都会影响加工效率和电极损耗。因此要有排屑与抬刀参数的适应控制,当抬刀的起始点和抬刀返回首发放电点坐标差值过大,就可认为是抬刀过量,适当减少抬刀高度。

(3)集中放电过渡到电弧只是局部间隙中的屑子浓度过高的问题。如果能将局部屑子及时扩展到整个间隙中,即使没有排出去,由于屑子浓度不高,也不会出现问题。过度的集中放电与放电点迁移不佳有关,如果间隙中屑子均匀,放电点迁移就会容易。均匀一致的集中放电亦可使加工面的平整度和表面粗糙度的一致性有保证。若每档规准加工面都非常平整,就可减少每档规准的加工量,这对提高精加工效率大有好处。

要使屑子均匀填充在整个加工间隙内,最好的办法就是微抬刀技术,这和20世纪60年代的电磁振荡器有相似之处,效果会立竿见影。但这种微抬刀和振动头还不一样,它会保证一段连续放电 τ_m 的时间,对加工效率是一种支撑。频率和幅度还可以精确调整,使集中放电有了一个

节制,与列车脉冲亦有类似的作用。屑子在间隙内均匀化,就可以容纳较多的屑子而不会造成过度污染。所以,2次高抬刀之间间隔就可以拉得长一点,加工效率就上去了。间隔的大小和加工面积有关,这些参数都会有一定的范围变化。

(4)平动技术和SEDM工艺配合不佳。平动技术是SEDM的重要环节,是侧面精加工之必须。通过平动将整个型腔各面进行分割,逐个加工。瞬间加工面积的减少对改善表面粗糙度有利,也对排屑有利。由于是在运动中放电,因此也起了类似研磨网纹的抛光作用。但过去的平动只是用给定的速度对各面轮流放电,在各方向上的时间分配是均等的,实际上不同方向上的加工面积可以相差很大,如窄槽加工,长边就往往因为时间不够而加工不到尺寸。又如用圆弧迹平动加工方型腔,对4个大面的加工时间较短,大多数时间用在修4个角上,造成时间的浪费。此外,WEDM有拐角策略,过角时有一系列参数调整,而SEDM的平动过角就没有这一套。所以就需要用CAD/CAM技术对各个加工面面积和有否复杂型面来自动编程,而且平动的轨迹亦和型腔形状要匹配,使平动少走空程。如有较多各种倾斜角度的侧面,就要采用球面平动,使瞬间加工面分得更细,精加工余量更均匀,精度更好,效率更高。但平动对型腔各面的分割带来其抬刀方向的多变,以及对各面尺寸控制的一致性要求,故使本来庞大的平动软件会更加复杂。如何保证各向型面同时加工到尺寸、修光均匀是有难度的。

目前,WEDM已向微米和亚微米进军了,它在精修时采用恒速进给的。和常规加工一样严格的以机床的运动轨迹控制着加工尺寸,保证每毫米的加工表面放电的时间是一致的。而SEDM情况复杂得多,WEDM是线接触,切向进给,而SEDM是面

接触法向进给(在三维平动中)。由于抬刀的不可或缺,电极会经常越过正常的放电间隙去点火,所以SEDM的到尺寸控制会更困难一点。要同时检测空载电压,各向型面不再放电了才能转规准。到微精加工这样控制都无法保证正常工作,必须用时间控制,具体规定这一档加工每方厘米需要多少时间,当平动对型腔各面分割加工时,如何保证每平方厘米的表面给的时间一致,并且齐步走同时到达,这将是件非常困难的事。所以,SEDM要达到WEDM的尺寸精度还需要相当长的时间。

功能清晰的新伺服系统

要解决中精加工稳定性,伺服系统肯定不是主角,因为在时间常数上不在一个数量级,根本来不及。但它是非常重要的基础条件,而且是SEDM今天发展的热门课题,其主要任务为:一是稳定的、不振荡的首发放电;二是强有力的快速抬刀;三是走位要准,即高精度的重复单位精度。这些都是很难掌握的动态性能。

1 SEDM对伺服系统的要求是如何演变的

在20世纪50~60年代,SEDM主要是加工冲模的,非常强调冲油的作用,只要冲油调节好了,在开始加工时小心缓进,逐渐打稳,就可以平稳地缓缓打透。整个加工是一个慢进给的过程,所以当时的伺服系统都有很大的减速比。后来的液压伺服,速度高了点,也就是300mm/min左右。为了精加工能效果更好,在导向结构上下足功夫,由滚动到静压,以满足平稳的低速无爬行。但到今天,抬刀排屑在SEDM型腔加工中几乎是一统天下,对伺服系统的要求就更高。抬刀排屑中每次都是先有首发放电,你不可能去手动减速,而且在抬刀要强的思想指导下,速度大大提高,在15m/min以上,如此高速下首发放电要不产生振荡是很难的。在

要求更好的表面粗糙度下的微能量放电,首发放电点火间隙已进入微米级,这就要求低速性能非常好。在如此复杂的平动、抬刀,不断进进退退中还要求达到非常好的尺寸精度,对于伺服系统的要求就很高。为此第三代电火花成形机床进给的脉冲当量已达到 50nm,与 HSM 的接刀可在 $\pm 2\mu\text{m}$ 以内,这在 HSM 加工的中大型腔中协助加工局部复杂型面时很有用处。

2 强抬刀的关键在于高加速度

抬刀的要求是在最短的时间内,完成间隙内介质的置换。有一定强度的干净的油冲进来,冲刷间隙,混合后再挤出去,其作用是达到整个型面,比较均匀。当然,进出都有阻力,如果是深窄槽加工就更费劲一点。这和唧筒一样,正负压的形成决定于受力大小及其产生的加速度。过去一般的伺服系统有 0.1g,而新的伺服系统可以达到 0.5g 以上,只有高加速度才能短时间内达到高速度。根据牛顿第二运动定律公式 $F=m \times a$,高加速的伺服系统出力更高,所以说第三代电火花成形机床的伺服系统的特点就是电机的功率加大了。

3 微能量稳定首发放电的关键是采用前馈控制

为保证微能量首发放电的稳定性,必须采用前馈控制。任何伺服系统既要高速又要精确定位,一定要先行减速,如等间隙信号来了再减速刹车、回退,一定会振荡。只要记住抬刀的起始点坐标,返回时首发放电点火点一定在此位置后面,安排适当的减速程序即可以,而且,在控制抬刀高度后,保证间隙内有一定的屑子浓度,使点火间隙不致过小,可能更加有效。在抬刀的提升、反向、接近工件 3 处的加速度都应设置渐变过程,使整机工作更平稳,无冲击声响。

4 伺服的高精度定位——重复定位精度

虽然影响型腔尺寸精度的因

素非常多,但伺服系统的重复定位精度确实是基础,若型腔精度要求 $\pm 5\mu\text{m}$,那重复定位精度一定要压缩到它的 1/3~1/2。在 SEDM 中伺服系统的到位尺寸控制是:伺服轴到达程序终点位置时点火,然后回退至正常放电间隙,若此时加工电压已为空载电压的 70%~80%,则终止程序,也即到达尺寸终点后,还需要完成最后的蚀除才算完成。这和常规加工一样,到尺寸后还要反复几次才能真正达到尺寸。在 NC 行程控制的 SEDM 加工中,型腔尺寸基本上控制住了,仅留下首发放电与正常放电的间隙差作为定时微精加工之抛光量。关键是这个过程对型腔的各个加工面要重复很多很多次,所以对伺服的重复定位精度要求就很高,甚至达到亚微米。

第三代电火花成形机床的伺服系统电机功率有的已达到了千瓦级,丝杠更粗,进给刚性更好,普遍采用闭环控制,更高精度、刚度的循环滚珠(柱)直线滚动导轨,现在交叉滚柱导轨很少用了,因为其安装面精度和装配调节中稍有差错,对运动直线性、灵敏度影响就比较大。

先进的元器件在伺服系统发展中起到关键作用,尤其随着近年来伺服电机技术的突飞猛进发展,其短时间内高扭矩的输出是达到高加工速度的必要条件,同样短时间内可以翻倍的高速度,对深窄槽加工电极高速拉出型腔十分有利,而且大惯量中低速电机用在直拖驱动方式上可以充分发挥电机的性能,使用效果更好、更合理。

高精度和信息化是第三代电火花成形机床的明显特色

SEDM 一般被认为是一种特种加工机床,需要量不大,而且高精度机床在车间里亦是终极加工手段更少,但今天 SEDM 的第三代机床就开创了高精度机床大量应用的先河。

南方一个工厂一次引进 100 台 EDM 机床,其中大部分是高精度的 SEDM 机床。这是缘于大市场的手表、LED 模具加工的需要,其中 SEDM 承担最大最重要的工序。以它为中心利用信息网将 HSM 机外编程和模拟运行、电极和工件的测量等设备组成一个大的加工体系。其生产调度、数据的共享非常密集,并因这种信息技术的介入,其生产有序,工时紧凑,交货周期仅 3~4 周。

SEDM 信息化的基础就是加工的表面质量、尺寸精度、工时都给用户明确数据,并都留有性能裕度,有工艺保证。今天 WEDM 的加工已经可以做到免检,SEDM 的第三代机床亦可以做到。

切削加工存在一个复映误差(Residual Copying Error),即加工余量的不均匀形成加工后的尺寸误差,还有进刀量和实际达到的加工尺寸之差。这与机床工艺系统的刚度及刀具的磨损有关。在 SEDM 中,刚度影响会小一些,但需担心电极损耗的问题。而有了 HSM,加工余量可以控制到很少和很均匀,电极做得很准,使用粗精多个电极加工毫无问题。在中精加工稳定性有很大改善的情况下,有质量保证的石墨电极加工窄槽几乎可以做到零损耗,也即 SEDM 的工具和常规车刀的磨损相近,因此目前 SEDM 的工艺可以达到高精度,只要将高精度的结构要素一一完善,SEDM 高精度化的目标就会实现。

第三代电火花成形机床在小型高档模具的质量和效率上有明显的成效,表面粗糙度 $R_a < 0.3\mu\text{m}$,最好达到 $0.05\mu\text{m}$,加工精度不大于 $\pm 5\mu\text{m}$,效率提高了 30%~50%。它的研发体现在“细”和“综合”,这是所有精品产出的必由之路,这个过程不会结束,还有相当大的发展空间,期待未来更好的 SEDM 不断满足日新月异的市场需求。(责编 夏宛)