

中走丝电火花线切割机的特点与发展趋势

Characteristics and Development of Medium-Speed Wire Cut Electro Discharge Machine

上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心 李明辉
上海大量电子设备有限公司 杨振步
上海市工业技术学校 蒋文英



李明辉

上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心教授、博士研究生导师。曾兼任中国机械工程学会特种加工分会第七届理事会副理事长及数控线切割技术委员会主任,上海市模具技术协会荣誉理事长。专业特长:特种加工与现代模具制造技术。

电火花线切割加工(Wire Cut Electro Discharge Machining, WEDM)是基于电极与工件之间脉冲放电时的电腐蚀现象,即每次脉冲放电时都会产生大量的热量使放电点附近的

通过电加工界广大科技人员和制造商的共同努力,我们已经掌握了高速走丝线切割机多次切割技术,开发生产出能实现无条纹切割和多次切割的中走丝机,并在应用过程中获得了较好的工艺效果,促进了高速走丝电火花线切割机的发展。

局部金属瞬时融化和气化,并把熔融和气化的金属抛离工件表面,从而在工件表面形成一个微小的放电凹坑。如果所采用的脉冲放电能量大,则加工速度就快,而加工表面粗糙度变差。

随着模具工业的发展,广大用户迫切要求:电火花线切割加工不仅要速度快,而且要有尚佳的加工表面质量。为满足广大用户需要,单向低速走丝电火花线切割机在 20 世纪 60 年代就采用了多次切割技术,即第一次切割用较大的电规准进行高速粗切割,然而逐步采用精规准和精微规准进行第二次、第三次甚至第四次切割修光,以获得理想的加工表面质量和加工精度。低速走丝线切割

机采用多次切割技术的结果表明,多次切割是解决线切割加工速度与加工表面质量矛盾、获得较高综合工艺效果的有效办法。

几乎就在低速走丝电火花线切割机推广应用多次切割技术的同时,有关技术人员也在高速走丝机上进行大量的多次切割试验,虽取得了不少研究成果,但直至 20 世纪末,仍无一家在生产中真正得到应用。难于在商品化线切割机上实现多次切割的主要原因是:在电极丝高速移动的情况下,运丝系统工作不稳定,电极丝的空间形位变化异常,使前后二次切割的空间位置无法重叠,加上高速走丝 WEDM 的往返切割条纹明显,要推广应用多次切割技术十分困

难。

2002年5月,上海大量电子设备有限公司在第九届中国国际模具技术和设备展览会上推出了能实现无条纹切割和多次切割的TP系列高速走丝电火花线切割机,3次切割后的尺寸差 $\Delta \leq 0.006\text{mm}$,加工表面粗糙度 $Ra \leq 1\mu\text{m}$,其加工质量明显高于其他高速走丝线切割机,并接近于一般的低速走丝线切割机,从而引起了众多制造商和用户的注意,并逐步被浙江地区的用户称之为“中走丝机”。所谓的“中走丝机”,并非走丝速度介于高速走丝与低速走丝之间,而是指加工质量介于高速走丝与低速走丝之间。

严格来说,把那些能实现无条纹切割和多次切割的切割机称之为“中走丝机”是不够科学的。因为,被广大用户称为“中走丝机”的TP系列电火花线切割机与其他高速走丝机的结构基本一样,走丝速度也是2~11m/s,走丝的形式仍为往复双向走丝。所不同的仅仅是应用了某些自主开发的专利技术,能够实现无条纹切割和多次切割,使线切割加工质量有显著提高。

实现多次切割应具备的条件

现已公认,多次切割可以有效提高高速走丝电火花线切割机的加工质量。前人的研究结果和上海大量公司的生产经验说明,高速走丝线切割机要实现多次切割,还必须对原有机床进行必要改革,创造如下条件:

(1)为使前后二次切割轨迹完全一致,应按国家有关技术标准严格控制高速走丝电火花线切割机的制造精度和走丝系统的稳定性。

(2)研究结果表明,切割时工件内的电极丝形位变化甚微,近于一条直线,而形位变化主要与支点离工件表面距离有关。采用高耐磨性的导向装置能有效控制电极丝的空间形位变化,且导向装置离工件表面越近

效果越好。

(3)往返切割条纹是影响高速走丝线切割表面质量的重要因素,应采取有效措施控制往返切割条纹的产生。

(4)高速走丝线切割机的高频脉冲电源及跟踪控制都是为一次切割工艺设计制作的,并不适用于多次切割。欲想实现多次切割,就应该根据多次切割的需要重新设计制作高频脉冲电源和跟踪控制系统。

(5)在深入研究高速走丝电火花线切割机多次切割工艺的基础上,合理设置粗切割、精修和精微修光的脉冲参数、加工轨迹补偿量、电极丝移动方式及其移动速度等,并开发相应的多次切割软件。

多次切割的工艺参数设置

1 第一次切割的工艺参数

第一次切割的主要任务是高速稳定切割,各有关参数设置原则如下:

(1)脉冲参数。

应选用高峰值电流大脉冲能量进行快速切割。为了获得更好的工

艺效果,通常采用分组脉冲,并控制脉冲电流的上升率。

(2)电极丝中心轨迹的补偿量 f 。

$$f = \delta + 1/2d + \Delta + s,$$

式中, f 为补偿量,单位为mm; δ 为第一次切割时的单边放电间隙,单位为mm; d 为电极丝直径,单位为mm; Δ 为给第二次切割留的加工余量,单位为mm; s 为精修余量,单位为mm。

在高峰值电流和大脉冲能量加工的情况下,第一次切割的单面放电间隙 δ 约为0.02~0.025mm;精修余量 s 甚微,约在0.005mm之内;而加工余量 Δ 则取决于第一次切割后的加工表面粗糙度和材料变形影响。这样,补偿量 f 大约在0.05~0.07mm之间,具体视加工条件而异,选大了会影响第二次切割的速度,选小了又会在第二次切割时难于保证加工质量。

(3)走丝方式。

为实现高速稳定切割,应采用整个丝筒的绕丝长度全程往复走丝,走丝速度10~11m/s。

2 第二次切割工艺参数



大型线切割机

第二次切割的任务是修光并保证切割精度,各有关参数设置原则如下:

(1) 脉冲参数。

要达到修光效果,就必须减小脉冲能量;但脉冲能量太小,又会影响第二次切割的速度,因为第二次切

值,而不是名义上的电极丝直径。

(3) 走丝方式。

由于第三次切割时的加工量甚微,所以在第二次切割时应采取有效措施消除往返切割条纹,保证加工精度和表面平整度。上海大量电子设备有限公司生产的 TP 系列线切割机

度。

(2) 电极的中心轨迹线的补偿量 f : 由于此时的单边放电间隙很小,仅 0.003mm 左右,补偿量主要取决于电极丝直径。设精修时电极丝的直径为 d ,则补偿量 $f=1/2d+0.003\text{mm}$ 。实际上,第三次精修时只是对表面修光,并不能改变零件的形状和尺寸,加上柔性电极在放电时的弹跳作用和高速移动,电极丝贴紧加工零件(即不考虑 0.003mm 的放电间隙)也是可以的。

(3) 走丝方式: 第三次切割加工量甚微,但对加工表面质量的提高十分明显,如何保证在第三次切割过程中能均匀修光,是一个技术难题。目前有不少的线切割机在第三次切割之后加工表面都会出现加工表面粗糙度不均现象,即有的地方修得很光,有的地方则没有修到。上海大量电子设备有限公司采用限速进给方法基本上可以克服修光不均的现象。实际上,以某种速度恒速进给,效果会更好。



中走丝线切割机

割仍需加工约 0.03mm 的加工余量。通常,选用第二次切割的脉冲参数应能保证加工表面粗糙度值减小一半,即第二次切割后的表面粗糙度值约为 $Ra1.5\sim 1.7\mu\text{m}$ 左右。

(2) 电极丝中心轨迹线的补偿量 f 。

由于第二次切割是精修,所选用的脉冲参数都比较小,其单边放电间隙一般只有 0.005~0.007mm,且第三次切割所需的加工余量甚微,大约只有 0.003~0.005mm,二者相加约为 0.01mm。所以,第二次切割的补偿量应为 $1/2d+0.01\text{mm}$ 。值得注意的是,电极丝的直径应该是加工时实测

是采用了他们自己开发的超短行程往返走丝切割专利技术和限速进给方法,实现了无条纹切割,为第三次进一步精微修光创造了条件。有的制造商则采用其他走丝方式和导向方法来消除往返切割条纹,虽效果有异,但也可以为第三次精微修光创造条件。

3 第三次切割的工艺参数

第三次切割的主要任务是修光,以获得较理想的加工表面质量。

(1) 脉冲参数: 应采用精微加工脉冲参数,脉冲宽度在 $1\mu\text{s}$ 以下,并采取有效对策,克服线路寄生电容和电感影响,保证精微加工的放电强

多次切割的工艺效果

1 能明显提高线切割加工质量

根据 GB/T 7926-2005 电火花线切割机精度国家标准要求,我们利用上海大量电子设备有限公司生产的 TP-25 线切割机进行了切割试验。工件为 40mm 厚的 Cr12 正八棱柱(对边距 28mm),一次切割和三次切割的加工质量见表 1。

(1) 能进行多次切割的高速走丝电火花线切割机,其制造精度都比较高,所以加工尺寸和表面质量都能高于国家标准要求;

(2) 能进行多次切割的线切割机,都装有电极丝导向装置,使电极丝运行稳定,有助于减小工件纵剖面上的尺寸差;

(3) 二次切割之后,不仅能提高加工表面质量,而且可以解决一次切割时的材料变形影响,提高加工精

表1 高速走丝线切割加工质量比较

序号	检测内容	GB/T 7926-2005 要求	TP-25 线切割机 一次切割	TP-25 线切割机 三次切割
1	纵剖面上的尺寸差 /mm	0.012	≤ 0.007	≤ 0.003
2	横剖面上的尺寸差 /mm	0.015	≤ 0.010	≤ 0.006
3	加工尺寸差 /mm	0.015	≤ 0.010	≤ 0.006
4	加工表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	≤ 2.500	≤ 2.300	≤ 1.000

度;

(4) 由于多次切割时的精修参数都比较小,最终加工表面质量都比较好。

2 能保证一定的切割速度

在开发高速走丝线切割机多次切割技术的初期,人们比较关心加工精度和加工表面质量,而忽视切割速度。那时的平均切割速度一般在 $15\sim 20\text{mm}^2/\text{min}$,用户普遍希望能进一步提高。

试验研究结果表明,改进高频脉冲电源、跟踪进给控制方式以及线切割工作液,都有助于提高线切割总平均速度。上海大量电子设备有限公司试验时的总平均切割速度已达到 $30\text{mm}^2/\text{min}$ 以上,即第一次切割速度为 $120\text{mm}^2/\text{min}$,第二次切割速度为 $70\sim 80\text{mm}^2/\text{min}$,第三次切割速度在 $90\sim 100\text{mm}^2/\text{min}$ 。而苏州新火花公司开发的中走丝机,四次切割的总平均速度已达到 $40\text{mm}^2/\text{min}$,只是加工表面粗糙度差一点, R_a 仅为 $1.39\mu\text{m}$ 。

实现全闭环控制是中走丝机的发展趋势

市场上现有的中走丝机虽能够实现多次切割,也可以获得 $R_a < 1\mu\text{m}$ 的表面粗糙度,但数控坐标精度不高。市场上现有的中走丝机所使用的导轨、丝杆与螺母都没有很高的精密度,机床控制也无法补偿螺杆的螺距误差、传动过程的间隙、电极损耗带来的加工误差以及控制过程发生的控制信号丢失等等。

为了满足模具行业大型模具和级进模加工需要,也是为了进一步提高线切割产品的市场竞争力,近几年有的公司从线切割机的软、硬件二方面入手,已开发了多项专利技术,基本上解决了数控信息丢失、螺距与传动间隙引起的误差,以及电极损耗等影响的加工精度降低,并成功地开发了控制精度高的全闭环控制中走丝

机,应该能满足级进模加工需要。

例如,利用上海大量电子设备有限公司的全闭环(或者说双闭环控制)控制中走丝机,在1块 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 10\text{mm}$ 钢板上加工4个相距 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 直径 10mm 的圆孔,仍采用割1修2的多次切割方法,结果不仅能保证直径 10mm 孔的表面粗糙度 $R_a < 1.2\mu\text{m}$,圆度误差在 0.006mm 之内,而且4



孔中心距的偏差都在 0.008mm 之内,即加工精度能控制在 $0.008\sim 300\text{mm}$ 之内。这不仅远远高于国家标准对数控线切割加工精度的规定,而且也能满足大多数级进模和大型模具线切割加工的需要。

结束语

通过电加工界广大科技人员和制造商的共同努力,我们已经掌握了高速走丝线切割机多次切割技术,开发生产出能够实现无条纹切割和多次切割的中走丝机,并在应用过程中获得了较好的工艺效果,促进了高速走丝电火花线切割机的发展。为此,我们可以达成以下4点共识:

(1) 市场上现有的中走丝机实质上是一种能够实现无条纹切割和多次切割的往复式高速走丝电火花线切割机,它的加工质量明显优于普通的高速走丝机。

(2) 不是所有的高速走丝电火花线切割机可以称为“中走丝机”。只有那些制造精度高,并在诸方面创造了多次切割条件的高速走丝线切割机才能称之为“中走丝机”。

(3) 高速走丝线切割机采用多次切割技术后,其加工质量提高显著,并接近于经济型低速走丝线切割机,但这种机床的价格及其消耗则远远低于低速走丝电火花线切割机,因

而受到广大用户的欢迎。

(4) 目前实现多次切割的中走丝机,一般只能确保小零件的加工质量,难于保证大中零件的加工质量。采用交流伺服机驱动和全闭环控制的中走丝机,能实现齿隙补偿、螺距补偿及丝径补偿,大幅度提高定位精度和加工精度,是中走丝机的发展趋势。

参考文献

- [1] 刘志东. 快速走丝线切割多次切割特性及其可行性研究. 电加工, 1990(5): 10-15.
- [2] 郭烈恩, 刘正坝, 邢晓峰, 等. 高速走丝线切割机多次切割加工电极丝动态性能研究. 电加工, 1999(6): 22-25.
- [3] 熊光跃, 李明奇, 李明辉. WEDM 加工过程中的电极丝形位变化. 电加工与模具, 2002(6): 22-24.
- [4] 李明奇, 李明辉, 张建荣. 高速走丝电火花线切割加工多次切割工艺的研究和应用. 电加工与模具, 2003(4): 45-47.

(责编 小城)