

活页技术资料

1973

第1号

型腔模具的电火花加工

——晶体管脉冲电源及其工艺效果

第一机械工业部情报所编

机械工业出版社

型腔模具的电火花加工

——晶体管脉冲电源及其工艺效果

北京机床研究所

电加工研究室

一、序

型腔模具的加工一直是电器、仪表等行业长期来存在的老大难问题。采用机加工和钳工这套老的工艺路线,模具制造周期长,劳动生产率低,工人的劳动强度也很大。如一套中小型继电器外壳胶木模具制造周期竟达3~4个月,而且还可能因热处理变形而使模具报废,这给新产品的试制带来很大的困难。

一个中型电器厂,一般每年需补充模具几百套,上一个新产品就需上百套模具,这样每年约需制造一千多套模具,其中型腔模具占20~30%。因此,如何实现型腔模具的高效率机械化加工,是当前生产上迫切需要解决的问题。

随着国民经济的迅速发展,在机械行业,少、无切削和工程塑料得到了广泛的采用。如有一个微型电机厂,为了提高产品的质量和产量,在制造微电机外壳、端盖等零件时,采用铝压铸新工艺,节省了大量的原材料,生产效率和零件质量都有很大的提高。又如齿轮加工,现在也大量采用精锻等新工艺。这些新工艺的采用都带来型腔模具的加工问题。

采用电火花方法加工通孔类模具在我国已有十几年的历史,

目前已广泛的用于生产。但是，型腔模具的电火花加工还是一个新的课题。型腔模具与通孔模具最大的不同点就在于，一个是盲孔，一个是通孔。在穿孔加工时，可以采用加长工具电极的办法来弥补电极的损耗，但是，在型腔加工中就无法采用。因此，要实现型腔加工，必须满足以下三点：（1）工具电极要低损耗，不仅粗规准加工要求低损耗，中规准加工（即 $\nabla 5$ 时）也要求低损耗；（2）电火花加工的最后光洁度要求达到 $\nabla 6$ 以上；（3）由于型腔加工时，一般加工余量较大，要求粗加工有较高的加工生产率。根据以上三条，对脉冲电源提出三点基本要求：

1. 脉冲宽度在大范围内可调

加工电流的脉冲幅值（矩形脉冲）确定以后，要实现工具电极的低损耗，必须要有一定的脉冲宽度，以使在火花放电过程中，蚀出物能够充分的覆盖到电极表面上去，补偿放电时电极的损耗（简称覆盖效应）。例如，当脉冲电流幅值为48安培时，要得到小于1%的电极损耗，脉冲宽度必须大于600微秒。但是，在电源电压和脉冲电流幅值确定的条件下，每个脉冲的能量是与其宽度成比例的。为了要在一台电源上实现粗、中、精不同规准的加工，必须要使脉冲宽度在大范围内可调。当脉冲电流幅值为48安培时，粗加工采用1000微秒的脉冲宽度。此时加工表面光洁度为 $\nabla 3$ ，生产率可达 $340 \sim 400 \text{ mm}^3/\text{分}$ （紫铜电极加工CrWMn钢），要达到 $\nabla 6$ 中限的表面光洁度，必须采用2微秒的脉冲宽度。所以，一般要求脉冲电源输出的方波脉冲能在2微秒至1000微秒的大范围内可调。

2. 脉冲停歇时间可调

加工稳定是获得较高的工艺指标的前提。要得到高的加工稳定性，对于不同的脉冲宽度，要求配有不同的脉冲停歇时间。对于粗规准加工，由于脉冲能量大，介质消游离的时间需要长，脉

冲停歇时间就要求长一点；反之，对于精规准加工，停歇时间就可以短一点。例如，在排屑条件比较好的情况下，当脉冲宽度为1000微秒时，停歇时间需100微秒左右；而当脉冲宽度为2微秒时，停歇时间只需18微秒就可以了。但也不是脉冲宽度确定后，停歇时间就固定不变了。随着加工条件的变化，如工作液变脏或加工深度增加等，需要适当地增加停歇时间，以适应稳定加工的要求。

3. 脉冲电流幅值可调

对于不同的加工状态，要求不同的脉冲电流幅值。如当加工面积较小时，为了保证工具电极的低损耗，在一定的脉冲宽度下，必须减小脉冲电流幅值。特别是在既要达到较高的加工表面光洁度，又要求低的电极损耗，在减小脉宽的同时，必须大幅度的减小脉冲电流幅值。加当脉宽为50微秒时，把脉冲电流幅值降到8安培，才能使加工表面光洁度达到 $\nabla 5$ ，电极损耗降到3%，再要降低电极损耗，就必须把脉冲电流幅值再减小。

无论是闸流管脉冲电源，还是电子管脉冲电源，都无法全而满足这些要求。闸流管和电子管都是属于高阻抗的开关元件，为了与负载（火花间隙）匹配，脉冲电源的输出端需要加脉冲变压器，进行阻抗转换。因此，要获得宽脉冲的输出是非常困难的。为了全面满足上述三项要求，选用晶体管作为开关元件，是比较合适的。晶体管脉冲电源除了具有体积小、重量轻、耗电少、效率高、寿命长、结构简单和容易实现组件化等优点外，晶体管是低阻抗开关元件，它可以把能量直接输入火花间隙，不需要脉冲变压器进行阻抗匹配。因此，它可以很容易的获得各种不同脉冲宽度和脉冲停歇时间。晶体管脉冲电源的功率输出级是由多管并联组成的，所以，只要调节功率级的工作管子数，即可很方便的获得各种不同的脉冲电流幅值。总而言之，晶体管脉冲电源系统

具有最大的灵活性。它还比较容易实现适应控制等要求，为电火花脉冲电源进一步的完善提供良好的条件。

二、晶体管脉冲电源

(一) 自振式晶体管脉冲电源

自振式脉冲电源是晶体管脉冲电源中最简单的一种。由多谐振荡器组成的主振级输出方波脉冲，经过放大后推动功率输出级，功率级向火花间隙输出强大的脉冲能量（见图1）。图2为该电源的原理线路图。功率输出级由24只高频大功率晶体管（3DA27）分四组并联组成，每一组（六只管子并联）有一个末前级推动。电源电压选用80伏。当火花间隙短路时，通过每个功率管的脉冲电流幅值为3安培。在正常工作时，每个功率管可以输出2安培左右的电流幅值（火花间隙等效反电势为25伏左右）。脉冲电源总效率（输入到加工区功率与从电网输入功率之比）约为30%。

晶体管脉冲电源具有结构简单的优点，但也有容易损坏的缺点。如何避免功率管的损坏，是晶体管脉冲电源在参数设计和走线设计中应该特别注意的一个问题，它是晶体管脉冲电源能否可靠用于生产的关键。

功率管的损坏主要是由热击穿和电压击穿引起的。为了避免发生热击穿，采取适当提高工作电压和减小工作电流的办法是比

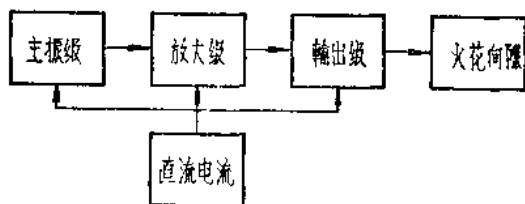


图1 自振式脉冲电源原理方框图

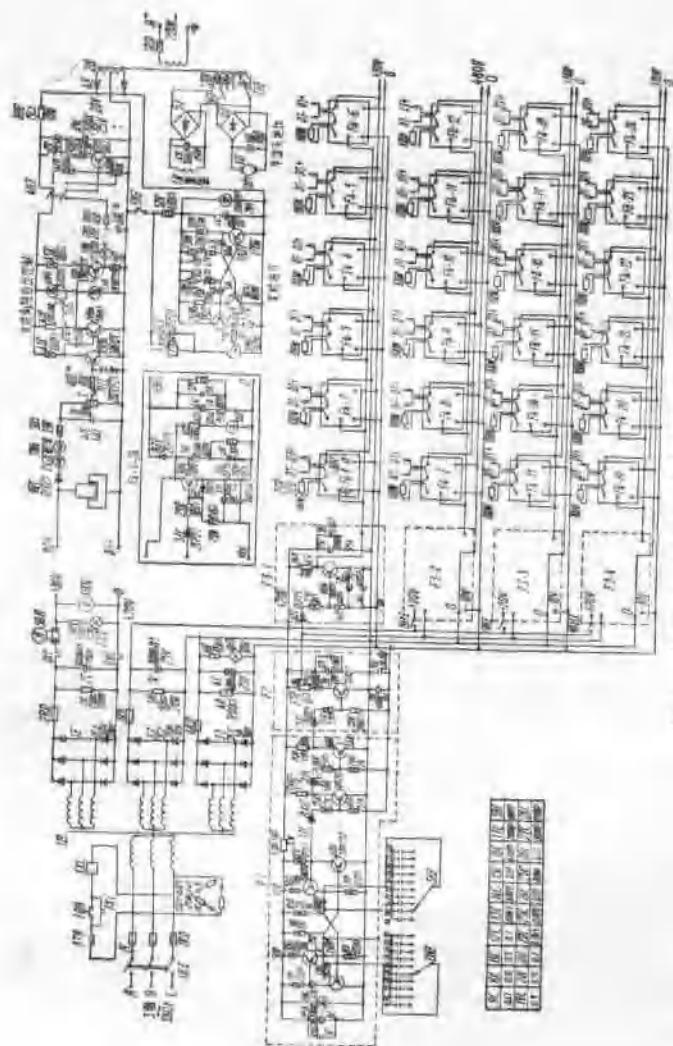


图 3 自激式晶体管脉冲电源原理图

较有效的。回路感应电势是造成电压击穿的主要原因。由公式 $E = L \frac{dI}{dt}$ 知道，影响感应电势数值的主要因素是寄生电感和脉冲电流梯度。

减小回路寄生电感的主要措施：

(1) 功率级限流电阻选用国产釉膜电阻（原称薄膜电阻、硅酸钡电阻），它具有大功率无感特性。

(2) 凡是功率级一律采用无感走线法。如图 3 所示，从直

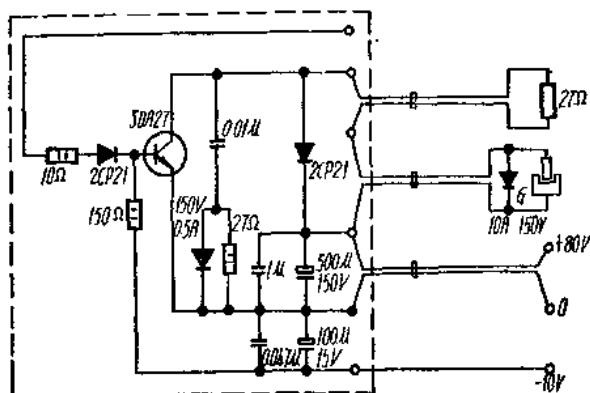


图 3 末级功放管走线示意图

流电源引出，经火花间隙、限流电阻和功率管回到直流电源，均采用双股平行塑料绝缘软线走来回线，它使走线电感减到最低值。平行线电感 $L = l (4 \ln \frac{2a}{r_0} + \mu_r) \times 10^{-7}$ 亨 ($2a$ ，两导线之中心距； l ：导线长度 (米)； r_0 ：线芯半径)，如选用 RFB(3.52 × 7.04) 丁晴-聚氯乙烯平行复合物软线， $2a = 3.2$ 毫米， $r_0 = 0.6$ 毫米，可以计算得到 $L = 0.668 l$ 微亨，令 $l = 3$ 米，则 $L = 2$ 微亨。此 L 值在允许的范围內。

减小脉冲电流梯度的主要措施：

(1) 末级功率管采取各管各自自成回路的走线方案。即末级每个功率管的对外引线都是独立的。对于每个管子来说，外回路电流的变化幅度为一个管的最大电流脉冲幅值，当火花间隙短路时为 3 安培。

(2) 在末级功率管的集电极和发射极之间并联阻容回路（见图 4）。它使晶体管开关时外回路引线中的电流变化速度减慢，如当管子由饱和导通到截止时，由于 C 、 D 旁路的存在，使外回路电流不会立即停止，它通过限流电阻 R_c 对 C 充电，即外回路电流下降的时间常数为 $R_c C$ ，已知 $R_c = 27$ 欧姆，取 $C = 0.01$ 微法，则 $R_c C = 0.27$ 微秒。管子由截止变导通的时候，为了使电容 C 上的能量放出来，在二极管 D 的两端并有电阻。电阻太大会影响脉冲电流的上升沿，电阻太小又使管子受冲击太大。现取 $R = R_c$ 。

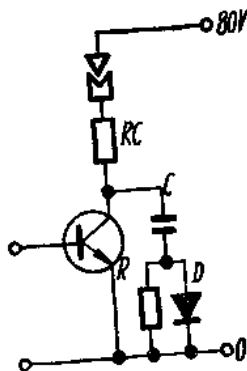


图 4 末级功放管的阻容保护回路

24 个功率管的输出线引到机床工作台上汇总。从工作台引向加工区的线段上通过的是电源的总电流，它是无法做到无感的（见图 5），为了减小这个线段所产生的感应电势，在 AB 两端接有二极管。

根据初步试验，末级功

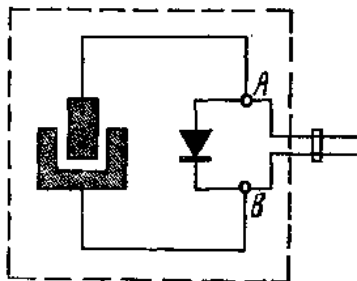


图 5 加工区引线示意图

率放大线路在采取上述措施后，基本上可以避免损坏问题。

（二）等脉冲式晶体管脉冲电源

自振式晶体管脉冲电源输出的脉冲电压宽度和停歇时间是按照工艺要求事先选定的。在加工过程中，这些参数固定不变。众所周知，真正决定工艺指标的是火花间隙中放电的电流脉冲宽度。如图6所示，由于火花间隙击穿点时间的变化，脉冲电流的宽度是变化的，因而影响了加工的工艺指标。等脉冲式脉冲电源比较好的克服了这个缺点，它输出的脉冲电流的宽度是相等的，即输出到火花间隙去的每个脉冲的能量是相等的。

在脉冲放电过程中，火花间隙中的介质产生电离现象。放电结束后，电离现象能在几微秒至几百微秒的时间内消失。

火花放电的能量越大，所需的恢复时间就越长，反之则可短。只要介质恢复了绝缘强度，就可进行下一次的放电，否则会形成不规则放电，甚至发展到电弧放电，造成电极和工件的烧伤。能否根据介质的绝缘强度恢复情况，确定脉冲电源发出第二个脉冲的时间。这就是等脉冲电源要解决的第二个问题。

图7为等脉冲式晶体管脉冲电源的原理方框图。等脉冲控制系统由检测级 T_1 、脉宽调节级 T_2 和控制级 T_3 组成。图8为等脉冲控制系统的原理线路。 T_1 是一个不对称的由电位控制的双稳态触发器。它能检测火花间隙是否被击穿和介质绝缘强度的恢

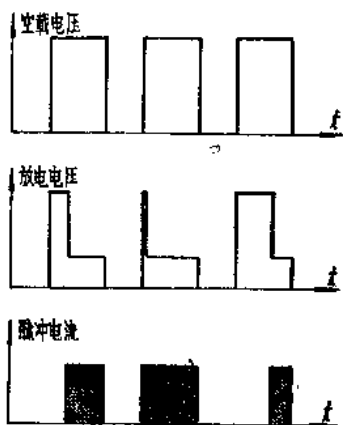
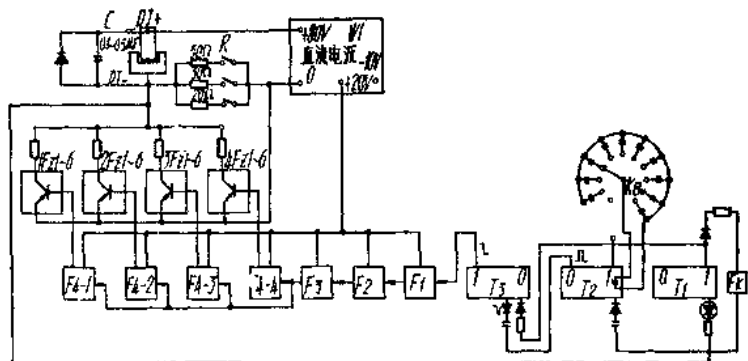


图6 自振式脉冲电源放电波形



复情况。 T_2 是一个单稳态触发器。调节电容的大小，可以调节脉冲电源所输出的脉冲电流的宽度。 T_3 是一个对称的双稳态触发器。它控制功率级晶体管的截止和导通。控制线路的原始状态如图7所示。图中“1”表示高电位，即该管截止；“0”表示低电位，即该管导通。由于 T_3 的“1”端输至放大器 F_1 ，末级功率管处于饱和导通状态，电源直流电压（80伏）加在电极和工件之间，

等待间隙击穿。当工具电极的进给导致火花间隙击穿时，输入到 T_1 一个电位信号（此信号约有55伏左右）。 T_1 翻转。 T_1 的输出信号经反向放大和电容微分，获得一个正脉冲信号，它使 T_2 翻转。经一定延时（相当于输向火花间隙的脉冲电流的宽度）后， T_2 自行翻回，恢复到原始状态。 T_2 翻回时，输出脉冲电压的后沿经微分后获得负脉冲。此负脉冲使 T_3 翻转，末级功率管就截止。随着火花间隙的消游离，电极与工件之间的电压逐渐升高（通过电阻 R 向电容器 C 充电），检测信号电压则逐渐下降，当降至一定值时（本设计中取12伏）， T_1 翻回到原始状态， T_3 也翻回到原始状态，功率级晶体管重新导通，火花间隙再次等待击穿。周而复始，达到连续加工的目的。图9为等脉冲电源输出的电压和电流波形。如果火花间隙由于某种原因不能恢复绝缘强度，则 T_1 的输入始终是高电位，末级功率管始终处于截止状态，达到了自行快速切断的目的。

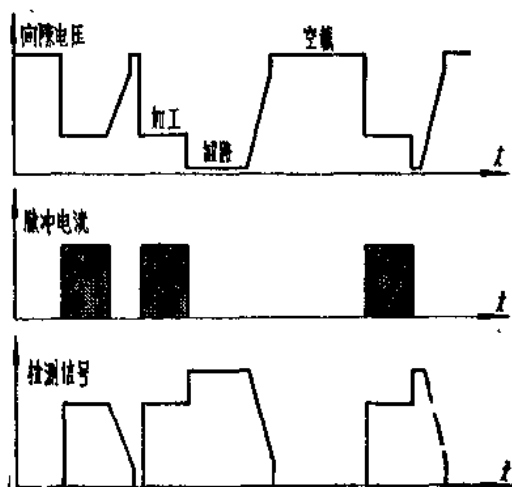


图9 等脉冲电源主要波形图

(三) 复式晶体管脉冲电源

自振式和等脉冲式晶体管脉冲电源在采用紫铜电极或石墨电极进行型腔加工时，均有良好的加工性能。但是还存在两个缺点：

(1) 采用铸铁电极或钢电极进行穿孔加工时，稳定性不够理想（等脉冲式比自振式要好一些）。使电源用于冷冲模加工比较困难。

(2) 选用宽脉冲小电流加工时，即既要达到较高的加工表面光洁度，又要有较低的电极损耗，加工稳定性不够理想。

为了解决上述这两个问题，可以采用复式脉冲线路。图10为其原理方框图。主要工作波形可见图11。300伏的高压脉冲（引导脉冲）与80伏的低压

脉冲同时输向火花间隙。高压脉冲的能量很小，它只起击穿引导的作用。由于它的电压高，间隙击穿的范围就大，脉冲利用率大大上升，加工稳定性显著改善。特别是在采用铸铁电极或钢电极进行穿孔加工时，稳定性很好。选用宽脉冲小电流的规范加工时，稳定性也有很大的改善。它为低损耗的精加工创造了条件。

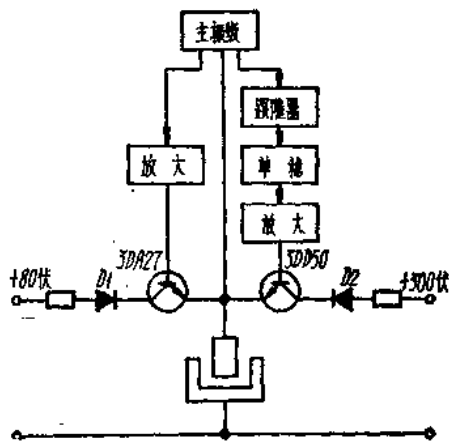


图10 复式脉冲电源工作原理图

由多谐振荡器输出的可调方波脉冲分成两路（见图10）。一路与自振式脉冲电源完全一样，另一路经过跟随器去触发单稳，单

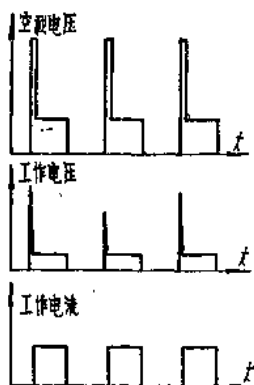


图11 复式脉冲电源工作波形

过二极管 D_1 输向加工区。 D_1 选用普通的硅整流二极管。对应每个功率晶体管串联一个二极管，二极管容量选 5 安培。

三、火花间隙自动控制系统

要实现电蚀加工，必须维持一定的火花间隙。随着火花放电的进行，工具电极与工件之间的间隙就会逐渐加大。为了使加工能连续进行，在现代的电火花加工机床上，都采用了电液压力伺服系统。电蚀产物的排除，使火花间隙经常受到外界干扰。自动控制系统质量的好坏，直接影响脉冲电源性能的发挥。

对自动控制系统的要求，可以概括为下面三点：

(1) 要求间隙自动调整系统反应灵敏，动作迅速和工作稳定度高。也就是说，要求组成系统的各个环节死区小、惯性小。要求系统有足够的放大倍数和稳定余度。

(2) 要求跟踪系统的速度跟踪范围广。加工规准的变化很大，粗精加工的生产率相差很悬殊。而且随着加工面积的变化，主轴直线进给速度也会变化。为适应各种不同的加工情况，要求

控制系统具有很宽的速度跟踪范围。

(3) 要求控制系统具有足够的刚性和抗干扰能力。为了强化电蚀过程, 加工时必须加有一定的强迫油循环系统。它相当于一个很大的干扰源。若系统刚性不好, 很难实现理想的控制。

电—液压伺服系统由火花间隙测量环节、电子放大器、电—机械转换器、喷嘴—挡板液压放大器和执行机构—油缸五部分组成。图12为其原理方框图。从火花间隙测得的电信号, 经过电子放大器放大后, 给电—机械转换器一个电流信号。它使挡板克服液压力后有一个相应的位移。油缸上下油腔压力差的变化, 使主轴作出相应的运动, 调节火花间隙的大小。现对控制系统的主要环节作简要说明。

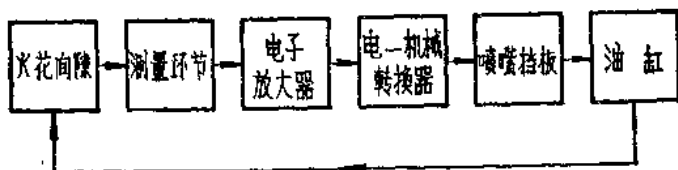
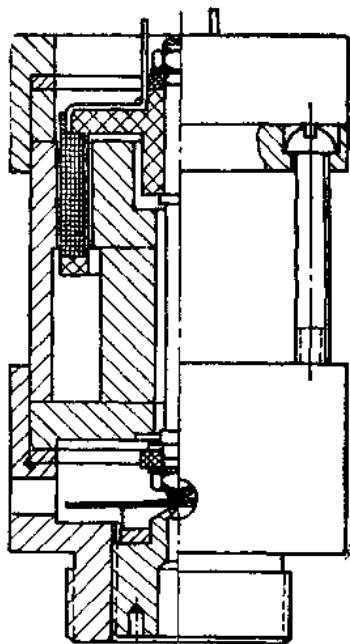
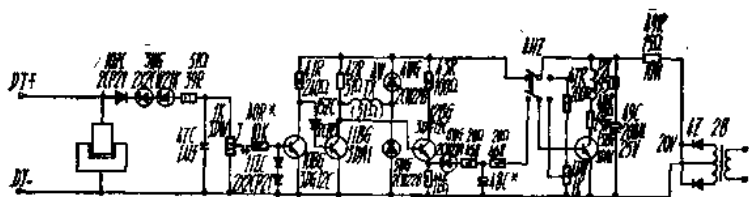


图12 电—液压伺服系统原理方框图

间隙测量与电子放大器 火花间隙是无法直接测量的, 只能用电测法间接测量。测量环节是否合理, 能否比较真实的反映间隙的实际情况, 对控制系统有很大的影响。

由10ZC, 3WG, 39R, 47C和3DW组成峰值测量环节(见图13)。稳压管3WG用来抵消工作间隙击穿后在间隙两端的压降, 使测量环节在火花间隙进入危险工作状态以前, 就能及时反映。图13中PX为平衡线圈, TX为调节线圈。在正常工作时, PX中的电流不变化, 它使挡板处于平衡位置。TX中的电流随着火花



0.25毫米);

最大平衡电流: 0.3安培;

最大平衡力: 180克。

调节线圈参数:

线圈匝数: 600匝 (线径为0.14毫米);

最大调节电流: 0.1安培;

最大调节力: 120克。

扁喷嘴 采用扁喷嘴结构可以改善喷嘴—挡板液压放大器的灵敏度, 减小工作死区。在D 6125 或 DYT-2 的液压头上采用 0.5×4 毫米开口的扁喷嘴时, 主轴最大进给速度 $V_{\text{进}} = 200 \sim 250$ 毫米/分, 最大回升速度 $V_{\text{回}} = 550 \sim 600$ 毫米/分 (油泵压力 $P_0 = 15$ 公斤/厘米², 阻尼孔 $d_1 = 0.8$ 毫米), 而过去采用圆喷嘴时, $V_{\text{进}} = 150$ 毫米/分, $V_{\text{回}} = 250$ 毫米/分。由于扁喷嘴液流对挡板的液压弹力可以代替弹簧片的作用, 因而可以把电—机械转换器中的弹簧片刚度大大削弱, 使其只起支承和导向作用。这就解决了原来弹簧片使用寿命短的问题。它能长期工作而不用更换。它不需要调节喷嘴与挡板的相对位置, 使主轴头结构大大简化。

四、主要工艺规律

粗加工时电极低损耗是型腔加工的主要关键。为此, 必须研究粗加工时影响电极损耗的各种因素及其规律。

1. 极性效应

紫铜或石墨电极在粗加工时都要采用反极性加工, 即工具电极接正极, 工件接负极, 否则就不能实现低损耗。

2. 电流脉冲宽度的影响

在电流脉冲幅值不变的条件下, 随着脉冲宽度的减小, 电极损耗显著增加 (见图15)。

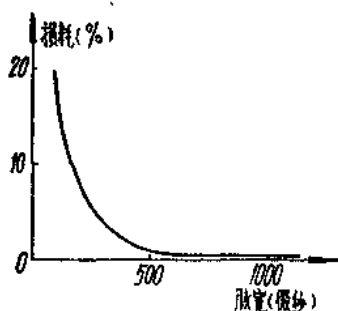


图15 脉宽与电极损耗关系

试验条件: 电极材料—紫铜; 工件材料—CrWMn; 极性—负极性; 加工面积— $\phi 40$ 毫米; 加工深度—5毫米。

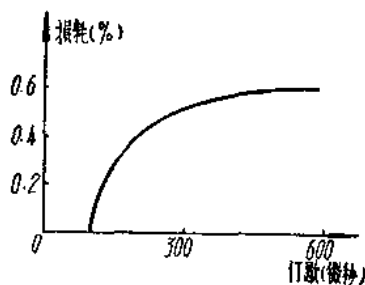


图16 电极损耗与停歇时间关系

试验条件: 电极材料—紫铜; 工件材料—CrWMn; 脉宽—1200微秒; 加工面积— 40×40 毫米; 加工深度—5毫米。

3. 脉冲停歇时间的影响

在脉冲宽度固定的条件下, 停歇时间的增加使电极损耗上升(见图16)。

4. 电流密度的影响

随着加工电流密度的增加, 由于能量密度增加后, 覆盖效应跟不上电极的损耗, 造成工具电极损耗的增加(见图17)。

当型腔具有尖角或窄槽时, 最好分两次加工, 先加工主型腔, 然后选用较小的电流, 对尖角或窄槽部分单独加工, 这样可以减小电极的损耗。

为了缩短型腔的加工时

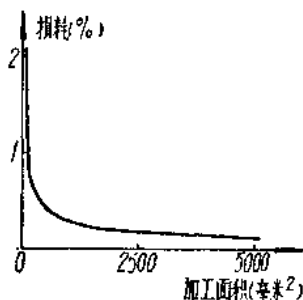


图17 电极损耗与加工面积关系

试验条件: 电极材料—紫铜; 工件材料—CrWMn; 电极形状—圆形; 极性—负极性; 脉宽—1200微秒; 电流幅值—48安培。