

国防工业技术丛刊

50

电火花线电极仿型 切割工艺

成于群編

(内部资料 注意保存)



国防工业出版社

电火花线电极仿型切割工艺

成于群 編

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 $\frac{5}{8}$ 15 千字

1965 年 5 月第一版 1965 年 5 月第一次印刷 印数：0,001--6,400 册

统一书号：N15034·(活)-50 定价：(科六) 0.13 元

一、前 言

綫电极仿型切割是一种先进的电火花精密加工工艺。許多零件的加工可用綫电极仿型切割代替机械加工或手工加工；利用这种加工方法还可以加工用一般加工方法无法加工的零件和工模量具，例如：硬质合金的落料模、复合模、跳步模，云母片冲模的回模及凸凹模，多腔磁控管的阳极块，多边杆的栅极繞制模具，栅网或篩网的电极等。用此法加工淬火合金鋼的回模，可以大大提高生产效率。

在本书中，首先簡要地介紹一下电火花綫电极仿型切割的基本原理；然后介紹仿型切割工艺，其中着重叙述影响工艺指标的各种因素和提高工艺指标的办法；最后列举几則加工实例。

二、仿型加工原理及其工艺特点

1. 仿型加工原理

綫电极仿型加工是电火花加工之一。其加工方式是利用电极絲与被加工工件在工作液中产生火花放电，使工件被腐蝕（見图1），电极絲通过靠模的控制作用使其沿着靠模的輪廓綫的切綫方向进行加工。加工过程中应使切割速度 V_A 等于腐蝕速度 $V_{腐蝕}$ （見图2）。靠模是用金屬板制成，通过絕緣垫片和工件固定在一起，并固定在横导轨的工作台上（見图3）。仿型控制过程是由火花間隙調整器和靠模間隙調整器分別由电极絲与工件、电极絲与靠模之間取出电压信号，經放大后控制伺服电机，在纵、横座标方向上做火花間隙跟踪或靠模追踪运动。从图1和图2中可看

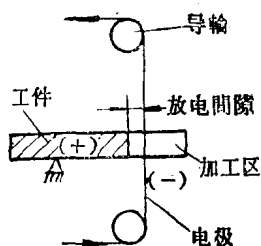


图 1

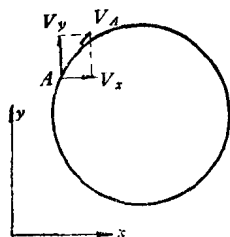


图 2

出，工件与靠模同为阳极。由于靠模与电极丝之间的电压远远小于工件与电极丝之间的电压。靠模被电腐蚀程度是极其微小的。

电极丝是由固定在纵导轨上的保持器支持在空间，并沿其轴向做匀速运动。

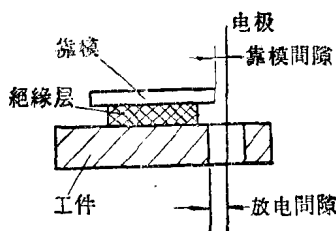


图 3

2. 工艺特点

从加工性能和经济效益来看，线电极仿型切割机床有以下几个特点：

(1) 加工过程中电极丝沿其轴向不断地作匀速移动，这样就避免了由于电极的损耗而造成的精度误差。可以使用较细的电极丝切割细小窄缝。

(2) 在选用适当的电参数和较合理的操作工艺时，可以得到较高的生产率、光洁度和精度。

(3) 加工复杂零件时，不需制造复杂的电极，只需做一个靠模，而且可以用许多次，因而就节省了贵重材料。还可以得到比较好的尖角。

(4) 电极丝是工具又是仿型触头，省去了变换和联动装置，结构简单可靠，仿型精度高。

(5) 在冲片厚度适当时，可同时切出凹凸模来。

三、工艺规律

考核任何生产设备是否先进，主要看它是否能达到较高的工艺指标。

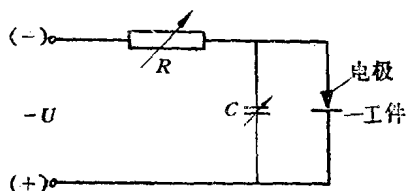
首先来研究一下影响工艺指标的因素：

a) 加工生产率 γ 受放电频率，单个脉冲能量，工作液的性质，电极丝的材料、直径，走线速度，工件材料、厚度，加工过程的排屑条件等因素的影响。

b) 加工精度，也就是加工工件尺寸与靠模尺寸的仿型误差，除了受以上各项因素影响之外，还与脉冲的放电电压 U_c 、限流电阻 R 、电容量 C 有关。

c) 影响光洁度的因素为放电频率、单个脉冲能量、电容量等。

下面谈谈影响上述工艺指标的各项因素之间的关系及正确选择电参数和加工条件的原则。



1. RC 脉冲电源 线电

图 4

极仿型切割机床电源是弛张式 RC 脉冲电源(见图 4)。

电蚀金属是在连续的脉冲放电下进行的。因此放电能量越大、放电脉冲频率越高，生产率就越高。然而在 RC 脉冲电源上提高脉冲放电能量和提高脉冲频率是互相矛盾的。譬如：想提高放电脉冲频率，就必须减少限流电阻值和电容量。但脉冲频率提高，单个脉冲能量相应的减小。同时频率过高时，也就是充电速度大于间隙介质去游离的速度时，会产生电弧放电，使加工工件被破坏。若是加大电容量，单个脉冲能量提高，而频率就相应

的下降。因此此 RC 型非独立式脉冲电路，只有在电源电压 U 、限流电阻 R 、电容量 C 三者之間存在一定比例关系时，才能获得較稳定的加工性。

当电源电压 U 固定时，問題的关键在于确定 RC 之間的匹配关系。

因为短路电流 $I_k \propto \frac{1}{R}$ ，因此研究 R 与 C 的关系，可以轉为研究 I_k 与 C 的关系。 I_k 的大小直接影响各项工艺指标，而 I_k 过大会导致电弧放电或燒断电极絲。假定我們的工件是硬质合金BK11。

(1) 固定电容 $C = 0.05$ 微法，开路电压 $U_s = 100$ 伏，电极絲为 $\phi 0.08$ 毫米的鉬絲。此时 I_k 在 $200 \sim 600$ 毫安範圍內变化，則放电过程由比較稳定进入稳定状态。当 $I_k = 650$ 毫安时，由于 I_k 的提高，控制系統工作不稳定，放电就逐漸不稳定，并且发现断絲現象。当 $I_k = 800$ 毫安时，断絲次数頻繁，加工已很难进行。断絲的原因主要是限流电阻太小，放电頻率过高，間隙介质来不及去游离，造成电弧放电，使电极絲被燒断。被加工表面光洁度下降。

短路电流 I_k 与表面光洁度及生产率的关系示于图 5。从图中可看出 I_k 在 $400 \sim 500$ 毫安內加工稳定性最好，生产率最高。在实际工作中，为了获得較好的光洁度， I_k 在 $350 \sim 400$ 毫安之間选用。

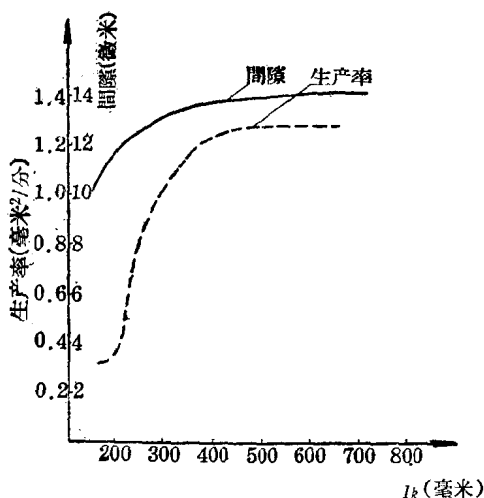


图 5

(2) 短路电流 $I_k = 350$ 毫安 = 常数，电容量 C 值与生产率和放电間隙的关系示于图 6。可見，生产率是随着电容量的变化而变

化的。而且还可以看出当电容量 $C = 0.12$ 微法时生产率最高。 C 值若继续增加生产率就随之下降。这是由于电容量的增加，单个脉冲能量也在提高，但放电频率有所下降。由于单个脉冲能量的提高，被加工件表面光洁度也随着下降。若电容量继续增加时，放电频率显著下降，使生产率降低。

放电间隙在 C 值小于 0.15 微法时，间隙值是随着电容量 C 值的增加而加大。当 C 值大于 0.15 微法时，间隙趋近于定值。间隙不仅与放电电压有关，而且与单个脉冲能量有关。

2. 工作液的影响

电火花加工唯有在液体介质中才能正常进行。液体介质在加工过程中

使电腐蚀所产生融熔金属微粒迅速冷却，并使这些金属微粒不粘在已加工面上。在一定程度上避免了电弧放电。选择工作液的原则是：

- (1) 要有良好的绝缘性；
- (2) 流动性好，即液体的浓度小；
- (3) 燃点高，放电时不会因大能量的放电或偶然的电弧放电而燃烧；
- (4) 热容量大，便于更好的散热和冷却；
- (5) 对设备和皮肤没有腐蚀作用，没有刺激味；
- (6) 价格便宜。

根据机械科学研究院在“电气仿型线切割机床的工艺试验报

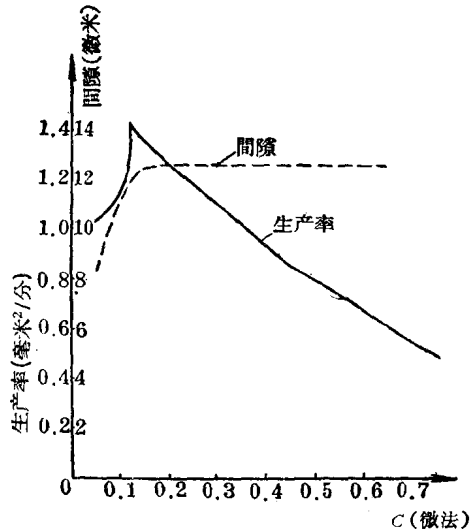


图 6

告”中的报导，煤油是目前較好的工作液。对于清洁和髒污的煤油，在使用中虽然加工规范、条件等一样，但其所得到的加工效果是不同的。

例如当开路电压 $U_x = 100$ 伏时，短路电流 $I_k = 400$ 毫安，电容量 $C = 0.07$ 微法，在清洁的煤油中切割，生产率 γ 可达 1.18 毫米²/分，光洁度 $\nabla\nabla\nabla 7$ ，放电間隙值是稳定的。而在髒污的煤油中进行切割，生产率 $\gamma = 0.8$ 毫米²/分，放电間隙不稳定，表面光洁度有所下降。

煤油髒污使得液体介质絕緣性变坏，流动性差，使加工过程短路次数增加，生产效率下降。严重时甚至导致电弧放电。

因此綫电极仿型切割也和电火花穿孔加工一样，需要有煤油的过滤和循环，使得排屑条件改善，促进生产率和表面光洁度的提高。但是工作液循环，特别是进油和出油的方式，要认真考虑。油在油箱內流动方向尽量避免使电极絲在徑向受到冲击力。

3. 电极絲的影响 电极絲在仿型切割中，起着极其重要的作用。合理选择电极的材料、直徑及其均匀性，这是能否保証加工稳定的重要环节。因此对电极絲的选择必須注意以下几方面：

(1) 良好的导电性 如果电极絲导电性不好，在加工过程中就会有相当一部分能量消耗在电极絲电阻上，使生产率下降；

(2) 較好的抗拉强度 切割时工作部分的电极絲受一定的張紧力，以拉直电极絲。电极絲的拉直与否直接影响加工工艺指标。拉不直甚至于导致切割无法进行下去。例如使用 $\phi 0.025 \sim \phi 0.03$ 毫米的鉚絲張力不大于 130 克， $\phi 0.04 \sim \phi 0.05$ 毫米的鉚絲張力在 200~300 克之間， $\phi 0.06 \sim \phi 0.08$ 毫米的鉚絲張力应大于 500 克。而电极絲本身必須能承受这样的一个力，否則电极絲就会被拉断，加工就无法进行。

在实际工作中，电极絲的选择和合理使用是非常重要的工作。譬如：鉚电极絲本身就不直，弯弯曲曲，有时不易被发現，影响加工的稳定性。

(3) 耐蚀性好 电火花加工电极总是有相对损耗, 虽然线电极切割过程中电极丝沿其轴向不断移动, 但在放电面上仍然有损耗, 损耗会使电极丝的强度减弱。同时还会对靠模产生磨损。因而选择损耗小的材料做电极丝对提高加工精度, 延长靠模使用寿命起一定的作用。

为了提高加工的工艺指标和延长靠模寿命, 目前多用黄铜、紫铜、钼等金属丝做电极。

在同一电参数下, 使用紫铜丝和钼丝对同一材料及同样厚度的工件进行切割, 生产率不同。例如: 使用钼丝 $\phi 0.08$ 毫米切割, 生产率 $\gamma = 1 \sim 1.2$ 毫米²/分。在使用 $\phi 0.12$ 毫米的紫铜丝切割时, 生产率 $\gamma = 1.2 \sim 1.35$ 毫米²/分。

在强度上紫铜丝不如钼丝好。

在允许的条件下, 最好选用直径较大的电极丝, 因为直径大, 切缝宽, 排屑条件较好, 加工过程稳定, 生产率高。但是不利于凹模内尖角的加工, 圆弧可能要大。若电极丝直径大于 $\phi 0.2$ 毫米, 则不易拉直; 电极丝直径过小, 则切缝小, 不利于排屑, 同时因电阻加大, 加工稳定性差, 生产率低, 且易断丝, 但是可以切出较好的内尖角。因此在实用中电极丝直径 $\phi 0.06 \sim \phi 0.12$ 毫米最合适。

电极丝在切割时不断更换, 有助于排屑, 使生产率提高。一般电极丝的送进速度为 $300 \sim 500$ 毫米/分。若将其速度提高到 $800 \sim 900$ 毫米/分, 切割生产率会提高。尤其是在加工粘性材料(如淬火钢)时, 生产率可由原来的 0.80 毫米²/分提高到 1.41 毫米²/分, 由于电极的相对耗损, 只用一次, 所以电极丝送进速度太快会造成浪费。

4. 工件的材料和厚度 电火花加工硬度高、脆性的导电材料比较稳定, 生产率高。如硬质合金、淬火硬度在 Rc60 以上的合金钢, 二者切割时的生产率是接近的, 光洁度在 $\nabla \nabla \nabla 7$ 左右。

对淬火硬度低或不淬火的钢、不锈钢等材料, 加工过程就极

不稳定，短路次数较多，生产率低，光洁度为 $\nabla\nabla 5$ 左右。

硬脆的材料电加工情况就比较好。此外加工性能的好坏还与金属的物理性能有关。前面所述的加工性与 E. M. 列文松著“金属电火花加工”中的叙述有些不一样。导电性能好的金属如黄铜、紫铜等加工生产率在 $2 \sim 2.4$ 毫米²/分，光洁度达 $\nabla\nabla\nabla 8$ 左右。

工件的厚度不同，加工效果也不一样。切割厚度为 $6 \sim 10$ 毫米的硬质合金的工件时，切割光洁度为 $\nabla\nabla\nabla 7 \sim 8$ 。如果把工件厚度增加一倍，光洁度就降到 $\nabla\nabla 6$ 左右。生产率也降到 $0.60 \sim 0.80$ 毫米²/分。主要原因就是工件厚度加大，电蚀产物不能很快从加工区域排除，造成二次放电和短路，破坏加工的稳定性。

5. 靠模设计与制造 线电极仿型切割，目前必须制做仿型加工用靠模，靠模的尺寸精度与光洁度直接影响到被加工工件的质量，因此在靠模设计上要比工件有较高的要求。

制造电子器件及仪表零件所用的模具与量具，被加工表面光洁度要求为 $\nabla\nabla\nabla 8$ 或更高。线电极切割光洁度虽然能达到 $\nabla\nabla\nabla 7 \sim 8$ ，但往往在加工过程中出现一些偶然的短路现象或换向不稳定、不及时等，或者由其它原因造成加工不稳定，被加工的工件表面某些地方会出现一些细小的纹路，使加工质量变坏。因此在切割一些模具和零件时，都考虑 $0.01 \sim 0.015$ 毫米的双面研磨量。靠模的尺寸可以用经验公式计算。

凹模加工用靠模尺寸计算公式为

$$A = (B - 2\delta - d)_{-0.005}^{+0.005}$$

凸模加工用靠模尺寸计算公式为

$$A = (B + 2\delta + d)_{+0.005}^{+0.005}$$

式中 A ——凹(凸)模靠模尺寸；

B ——凹(凸)模名义尺寸；

2δ ——双面放电间隙；

d ——双面研磨量；

$\pm\Delta$ ——凹(凸)模尺寸公差。

公差中的0.005表示仿型机床之仿型精度差。

靠模光洁度比零件要求光洁度高1~2级,材料可选用铜、钢等,一般常用45*钢,不需热处理,靠模厚度仿型部分在0.5~1毫米之间。靠模板本身厚度可根据形状大小及要求确定,一般不大于3毫米。

使用时,靠模与工件固定在一起并装夹在工作台上再进行加工。固定方法可以用粘粘或机械固定。最好用机械式的固定(见图7),固定后靠模板与工件的不平度在0.005~0.01毫米间。工

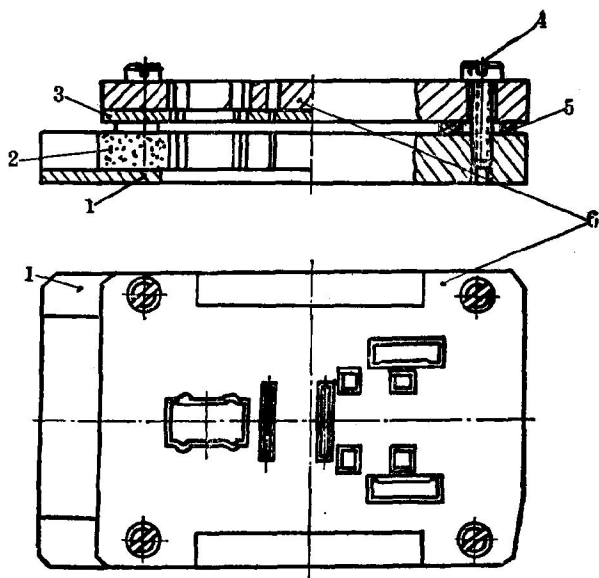


图7 靠模和凹模的装配。

1—凹模固定板; 2—硬质合金凹模; 3—靠模; 4—胶木螺钉;

5—绝缘垫片; 6—靠模固定板。

件与靠模之间的绝缘垫片用有机玻璃、夹布胶木片或云母片,厚度在0.5毫米以上;在放置绝缘垫片时,垫片的边缘离开加工面大于2毫米。

云母片因为在切断处起层,容易使电蚀物吸附在上面而堆积,造成靠模与工件絕緣性能下降,所以很少使用。目前最常用的为0.50~1毫米夹布胶木片。

四、应用綫电极仿型加工的实例

1. 跳步模的切割

凹模材料是BK-25,厚度6毫米。綫电极为 $\phi 0.08$ 毫米的鉚絲,加工规范为:

开路电压100伏,短路电流350毫安,电容量0.08微法;

电极絲張力 >700 克,送进速度225毫米/分;

工作液是煤油;

生产率为1.18毫米²/分。

靠模尺寸见图8,靠模与工件固定見装配图7,加工后之凹模尺寸见图9,由于凹模加工后仍留有研磨量,全部尺寸沒有詳細測量,表面光洁度 $\nabla\nabla\nabla 7$,仿型誤差在 ± 0.005 毫米之內。凹模孔切割时间为20小时。

2. 小窄槽切割

用此法加工的一种多边杆栅极繞制模具示于图10,在圓錐上均匀的切出 $0.035^{+0.005}$ 的小槽,綫电极为 $\phi 0.025$ 毫米的鉚絲,加工规范为:

开路电压90伏,短路电流160毫安,电容量0.01微法;

电极絲电阻 ≤ 90 欧姆/米,电极絲張力 ≤ 120 克,送进速度452毫米/分,平均切割速度0.146毫米/分;

工作液是煤油;

实际切割零件槽寬为0.032~0.035毫米,放电間隙为0.0035~0.005毫米。

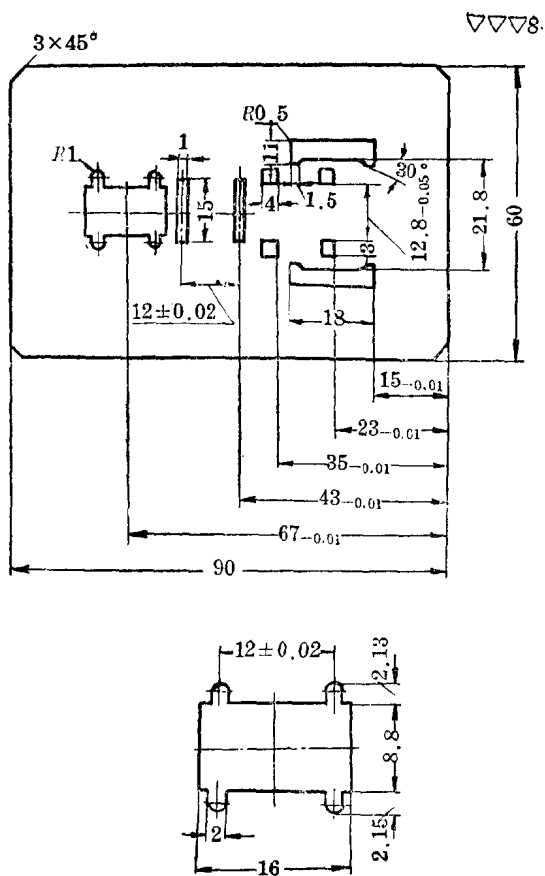


图9 凹模。

3. 鋼凹模的切割

綫电极仿型切割不仅能加工硬质合金，且能加工鋼材料，图11是一块电子管阳极落料凹模，靠模尺寸见图12。

工件材料是鉻鎢錳合金鋼，厚度7毫米，淬火硬度 Rc61，綫电极为 $\phi 0.08$ 毫米的鉬絲，加工规范为：

开路电压115伏，短路电流 360 毫安，电容量 0.035 微法；

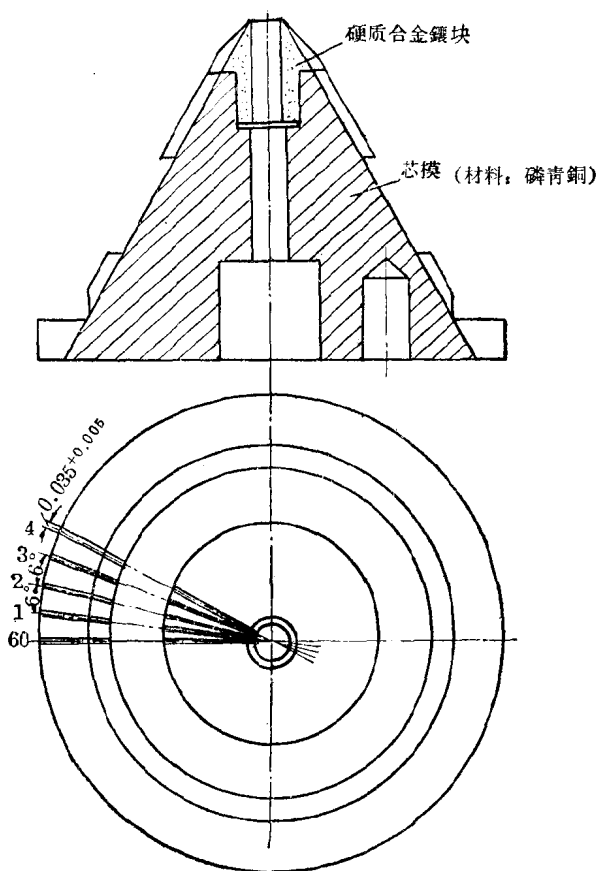


图10 繞柵模。

电极絲張力 > 700 克，送进速度 978 毫米/分；

工作液是煤油；

生产率为 1.50 毫米³/分。

整个凹模加工过程非常稳定，整个被加工面没有什么紋路，光洁度 $\nabla\nabla 6$ ，放电間隙很均匀，全部在 0.005 毫米之內。可見，鋼模具是完全可以用电极仿型切割进行加工的，切割这个

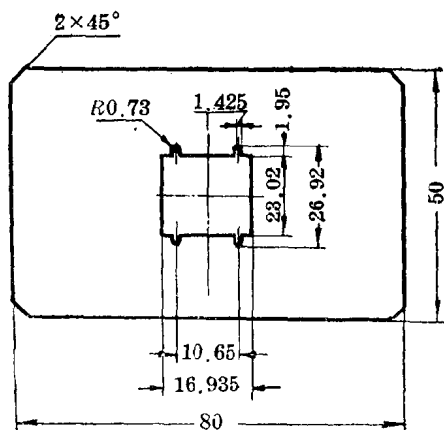


图11 靠模。

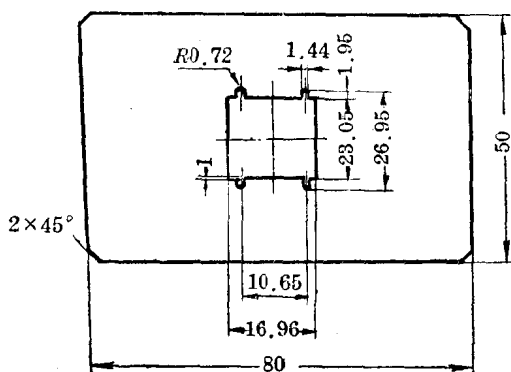


图12 凹模。

模具时，綫电极的送进速度提高了近一倍，材料的淬火硬度比較高，其它条件没有什么变化，生产率也提高一倍多，这个結果是与分析相符合的。关于鋼加工性能还需进一步研究，影响加工工艺指标的因素也还需要进一步地摸索。

4. 多电极穿孔加工

加工示意图如图 13 所示,零件材料为 BK-25, 穿孔厚度 3 毫米, 在 30.2×31.8 毫米² 的面积內分布着 38 个孔, 要求孔徑小于 $\phi 0.4$ 毫米, 綫电极為 $\phi 0.3$ 毫米的錫絲, 并全部固定在电极絲固定板上, 由导向板定位导向, 电极长度 25 毫米, 导向板与被加工工件之間的距离在 2~3 毫米間, 选用加工规范为:

开路电压 95 伏, 短路电流 400 毫安, 电容量 0.1 微法;
工作液是煤油。

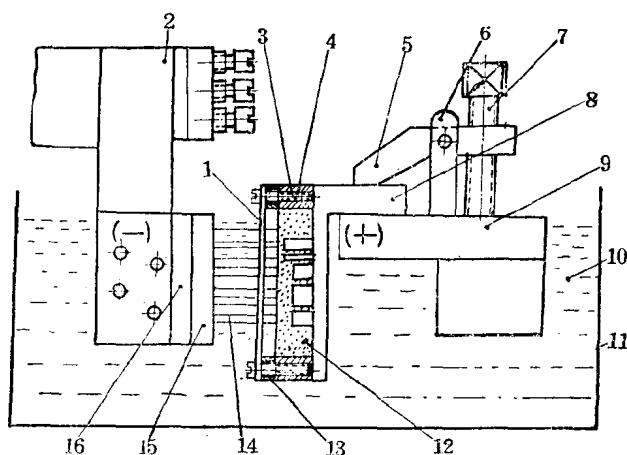


图 13 多电极穿孔示意图:

1—导向板; 2—保持器; 3—胶木螺钉; 4—固定套; 5—压板; 6—支架;
7—螺钉; 8—连接板; 9—台面; 10—煤油介质; 11—有机玻璃箱;
12—工件; 13—絕緣片; 14—电极絲; 15—电极絲固定板; 16—固定板。

加工进行比較稳定, 短路次数很少, 全部加工仅用了三个多小时, 比单个孔的加工节省了八个小时, 輔助时间也大大縮短, 而且保证了加工的可靠性。

从以上实例中說明綫电极仿型加工, 不仅可以仿型, 在配备专用夹具后, 可以使其加工內容更丰富。