

第2章

先进制造工艺技术

先进制造工艺是在不断变化和发展的传统机械制造工艺基础上逐步形成的一种制造工艺技术，是高新技术产业化和传统工艺高新技术化的结果。先进制造工艺是先进制造技术的核心和基础，一个国家的制造工艺技术水平的高低，在很大程度上决定了其制造业在国际市场的竞争实力。

本章主要讲述电火花成型加工技术、电火花线切割加工技术、快速成型制造技术、微细加工技术、超精密加工技术、高速加工技术和其他加工技术。

本章要点

- 电火花成型加工技术
- 电火花线切割加工技术
- 快速成型制造技术
- 微细加工技术
- 超精密加工技术
- 高速加工技术
- 逆向工程技术

本章难点

- 电火花成型加工技术
- 电火花线切割加工技术
- 快速成型制造技术

2.1 电火花成型加工技术

作为先进制造工艺技术的一个重要分支，电火花加工技术自 20 世纪 40 年代开创以来，

历经半个多世纪的发展，已成为先进制造技术领域不可或缺的重要组成部分。尤其是进入 20 世纪 90 年代后，随着信息技术、网络技术、航空和航天技术、材料科学技术等高新技术的发展，电火花加工技术也朝着更深层次、更高水平的方向发展。虽然一些传统加工技术通过自身的不断更新发展以及与其他相关技术的融合，在一些难加工材料加工领域（尤其在模具加工领域）表现出了加工效率高等优势，但这些技术的应用没有也不可能完全取代电火花加工技术在难加工材料、复杂型面、模具等加工领域中的地位。相反，电火花加工技术通过借鉴其他加工技术的发展经验，正不断向微细化、高效化、精密化、自动化、智能化等方向发展。

按照工具电极的形式及其与工件之间相对运动的特征，可将电火花加工方式分为六类：

- 1) 利用成型工具电极，相对工件作简单进给运动的电火花成型加工。
- 2) 利用轴向移动的金属丝作工具电极，工件按所需形状和尺寸作轨迹运动，以切割导电材料的电火花线切割加工。
- 3) 利用细管冲注高压水基工作液，作简单轴向进给运动的小孔加工。
- 4) 利用金属丝或成型导电磨轮作工具电极，进行小孔磨削或成型磨削的电火花磨削。
- 5) 用于加工螺纹环规、螺纹塞规、齿轮等的电火花共轭回转加工。
- 6) 刻印、表面合金化、表面强化等其他种类的加工。

2.1.1 电火花成型加工的基本原理、特点

1. 电火花成型加工原理

电火花成型加工是利用浸在工作液中的工具电极和工件脉冲放电时产生的电蚀作用蚀除导电材料的特种加工方法，又称放电加工或电蚀加工，简称 EDM。

电火花成型加工与传统的切削加工完全不同，加工过程是在液体介质中进行的，机床的自动进给调节装置使工件和工具电极之间保持适当的放电间隙，当工具电极和工件之间施加很强的脉冲电压（达到间隙中介质的击穿电压）时，会击穿介质绝缘强度最低处。由于放电区域很小，放电时间极短，所以，能量高度集中，使放电区的温度瞬时高达 10 000 ~ 12 000 ℃，工件表面和工具电极表面的金属局部熔化、甚至汽化蒸发。局部熔化和汽化的金属在爆炸力的作用下抛入工作液中，并被冷却为金属小颗粒，然后被工作液迅速冲离工作区，从而使工件表面形成一个微小的凹坑。一次放电后，介质的绝缘强度恢复等待下一次放电。如此反复使工件表面不断被蚀除，并在工件上复制出工具电极的形状，从而达到成型加工的目的。其加工原理如图 2-1 所示，该装置通常由四大部分组成。

1) 脉冲电源。产生放电加工所需的间歇脉冲，是电火花加工的能量供给装置。

2) 机床主体。用来实现电极 2 与工件 4 的装夹固定及调整两者的相对位置，配合控制系统，实现预定加工要求的机械系统。

3) 控制系统。为了满足放电间隙良好的保持要求及预定的形状加工要求，对电极与工

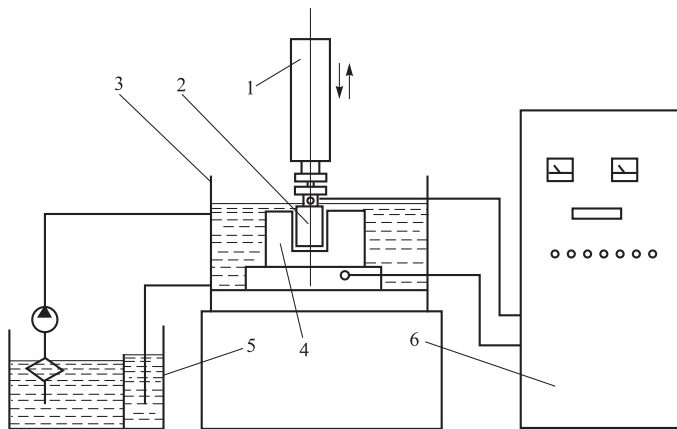


图 2-1 电火花成型加工原理图

1—主轴；2—电极；3—工作油槽；4—工件；5—工作液装置；6—脉冲电源

件间的相对位置通过主轴的运动进行调整与控制。数控电火花成型机床已有了五轴联动的控制系统，但在生产线上使用的大多是单轴数控或两轴联动的控制系统。

4) 工作液装置。主要由储液箱、泵、过滤器、管道阀门等组成，用于向放电区域不断提供干净的工作液，并将电蚀产物带出放电区域，经过滤器滤掉这些微粒。高精度电火花成型机床的工作液装置除了过滤精度高（能滤掉 $>3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的微粒）外，大多配有工作液温控装置及冷却装置。

2. 电火花加工常用名词、术语及符号

(1) 放电间隙

放电间隙指加工时工具和工件之间产生火花放电的一层距离间隙。在加工过程中，则称为加工间隙 S ，它的大小一般在 $0.01 \sim 0.5 \text{ mm}$ 之间，粗加工时间隙较大，精加工时则较小。加工间隙又可分为端面间隙和侧面间隙。

(2) 脉冲宽度 t_i (μs)

脉冲宽度简称脉宽，它是加到工具和工件上放电间隙两端的电压脉冲的持续时间，为了防止电弧烧伤，电火花加工只能用断断续续的脉冲电压波。粗加工可用较大的脉宽 $t_i > 80 \mu\text{s}$ ，精加工时只能用较少的脉宽 $t_i < 10 \mu\text{s}$ 。

(3) 脉冲间隔 t_0 (μs)

脉冲间隔简称脉间或间隔，也称脉冲停歇时间。它是两个电压脉冲之间的间隔时间。间隔时间过短，放电间隙来不及消除电离和恢复绝缘，容易产生电弧放电，烧伤工具和工件；脉冲间隔选得过长，将降低加工生产率。加工面积、加工深度较大时，脉冲间隔也应稍大。

(4) 开路电压或峰值电压

开路电压是间隙开路时电极间的最高电压，等于电源的直流电压。峰值电压高时，放电间隙大，生产率高，但成型复制精度稍差。

(5) 火花维持电压

火花维持电压是每次火花击穿后，在放电间隙上火花放电时的维持电压，一般在 25 V 左右，但它实际是一个高频振荡的电压。电弧的维持电压比火花的维持电压低 5 V 左右，高频振荡频率很低，一般示波器上观察不到高频成分，观察到的是一水平亮线。过渡电弧的维持电压则介于火花和电弧之间。

(6) 加工电压或间隙平均电压 $U(V)$

加工电压或间隙平均电压是指加工时电压表上指示的放电间隙两端的平均电压，它是多个开路电压、火花放电维持电压、短路和脉冲间隔等电压的平均值。在正常加工时，加工电压在 30 ~ 50 V，它与占空比、预置进给量等有关。占空比大、欠进给、欠跟踪、间隙偏开路，则加工电压偏大；占空比小、过跟踪或预置进给量小（间隙偏短路），加工电压即偏小。

(7) 加工电流 $I(A)$

加工电流是加工时电流表上指示的流过放电间隙的平均电流。精加工时小，粗加工时大；间隙偏开路时小，间隙合理或偏短路时则大。

(8) 短路电流 $I_s(A)$

短路电流是放电间隙短路时（或人为短路时）电流表上指示的平均电流（因为短路时还有停歇时间内无电流）。它比正常加工时的平均电流要大 20% ~ 40%。

(9) 峰值电流 $I_e(A)$

峰值电流是间隙火花放电时脉冲电流的最大值（瞬时），日本、英国、美国常用 I_e 表示，虽然峰值电流不易直接测量，但它是实际影响生产率、表面粗糙度等指标的重要参数。在设计制造脉冲电源时，每一功率放大管串联限流电阻后的峰值电流是预先选择计算好的。为了安全，每个 50 W 的大功率晶体管选定的峰值电流约为 2 ~ 3 A，电源说明书中也有说明，可以按此选定粗、中、精加工时的峰值电流（实际上是选定用几个功率管进行加工）。

(10) 放电状态

放电状态指电火花加工时放电间隙内每一脉冲放电时的基本状态。一般分为 5 种放电状态和脉冲类型。如图 2-2 所示。

1) 开路（空载脉冲）。放电间隙没有击穿，间隙上有大于 50 V 的电压，但间隙内没有电流流过，为空载状态（ $t_d = t_i$ ）。

2) 火花放电（工作脉冲，或称有效脉冲）。间隙内绝缘性能良好，工作液介质击穿后能有效地抛出、蚀除金属。波形特点是：电压有 t_d 、 t_c ，电流有 I_e ，波形上有高频振荡的小锯齿波形。

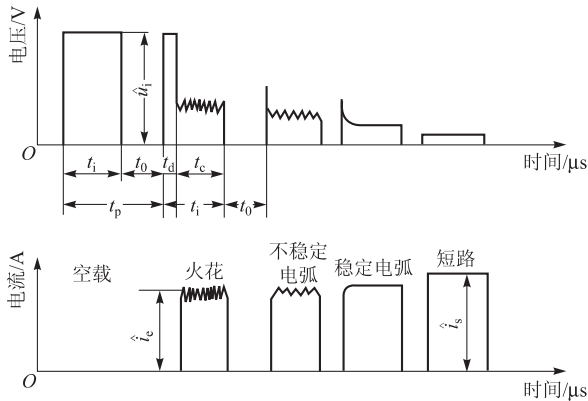


图 2-2 电火花加工的 5 种放电状态

3) 过渡电弧放电 (不稳定电弧放电, 或称不稳定火花放电)。过渡电弧放电是正常火花放电与稳定电弧放电的过渡状态, 是稳定电弧放电的前兆。波形特点是击穿延时 t_d 很小或接近于零, 仅成为一尖刺, 电压电流波上的高频分量变低成为稀疏和锯齿形。早期检测出过渡电弧放电, 对防止电弧烧伤有很大意义。

4) 电弧放电 (稳定电弧放电)。由于排屑不良, 放电点集中在某一局部而不分散, 局部热量积累, 温度升高, 恶性循环, 此时火花放电就成为电弧放电, 由于放电点固定在某一点或某局部, 因此称为稳定电弧, 常使电极表面结炭、烧伤。波形特点是 t_d 和高频振荡的小锯齿波基本消失。

5) 短路 (短路脉冲)。放电间隙直接短路相接, 这是由于伺服进给系统瞬时进给过多或放电间隙中有电蚀产物搭接所致。间隙短路时电流较大, 但间隙两端的电压很小, 没有蚀除加工作用。

以上各种放电状态在实际加工中是交替、概率性地出现的 (与加工规准和进给量、冲油、间隙污染等有关), 甚至在一次单脉冲放电过程中, 也可能交替出现两种以上的放电状态。

(11) 加工速度 v_w 或 V_w (mm^3/min)

对于电火花成型机来说加工速度是指在单位时间内, 工件被蚀除的体积或质量。一般用体积表示。若在时间 T 内, 工件被蚀除的体积为 V , 则加工速度 V_w 为: $V_w = V/T$ (mm^3/min), 有时为了测量方便, 也用质量加工速度 v_m 或 V_m (g/min) 来表示。对于线切割机来说, 加工速度是指在单位时间内, 工件被切面积。即用 mm^2/min 来表示。在规定表面粗糙度 (如 $Ra = 2.5 \mu\text{m}$)、相对电极损耗 (如 1%) 时的最大加工速度, 是衡量电加工机床工艺性能的重要指标。一般情况下, 生产厂给出的是最大加工电流, 在最佳加工状态下所能达到的最高加工速度。因此, 在实际加工时, 由于被加工件尺寸与形状千变万化, 加工条件、排屑条

件等与理想状态相差甚远，即使在粗加工时，加工速度也往往大大低于机床的最大加工速度指标。

（12）表面粗糙度

表面粗糙度是指加工表面上的微观几何形状误差。对电加工表面来讲，即是加工表面放电痕——坑穴的聚集，由于坑穴表面会形成一个加工硬化层，而且能储存润滑油，其耐磨性比同样粗糙度的机加工表面要好，所以加工表面允许比要求的粗糙度大些。而且在相同粗糙度的情况下，电加工表面比机加工表面亮度低。

（13）相对损耗或损耗比（损耗率） θ （%）

相对损耗或损耗比是工具电极损耗速度和工件加工速度之比，并以此来综合衡量工具电极的耐损耗程度和加工性能。

（14）面积效应

面积效应指电火花加工时，随加工面积大小变化而加工速度、电极损耗比和加工稳定性等指标随之变化的现象。一般加工面积过大或过小时，工艺指标通常降低，这是由于“电流密度”过小或过大引起的。

（15）深度效应

随着加工深度增加而加工速度和稳定性降低的现象称深度效应。主要是电蚀产物积聚、排屑不良所引起的。

3. 电火花成型加工的特点

电火花成型加工的优点主要有：

1) 加工时，工具电极与工件材料不接触，两者之间宏观作用力极小。工具电极材料不需比工件材料硬，因此，工具电极制造容易。

2) 由于电火花加工是靠脉冲放电的电热作用蚀除工件材料的，脉冲放电的能量密度高，便于加工用普通的机械加工方法难于加工或无法加工的特殊材料和复杂形状的工件。不受材料硬度影响，不受热处理状况影响，与工件的机械性能关系不大。

3) 由于放电蚀除材料不会产生大的机械切削力，因此对脆性材料如导电陶瓷或薄壁弱刚性的航空航天零件，以及普通切削刀具易发生干涉而难以进行加工的精密微细异形孔、深小孔、狭长缝隙、弯曲轴线的孔、型腔等，均适宜采用电火花成型加工工艺来解决。

4) 脉冲放电持续时间极短，放电时产生的热量传导扩散范围小，放电又是浸没在工作液中进行的，因此，对整个工件而言，在加工过程中几乎不受热的影响。

5) 可以改革工件结构，简化加工工艺，提高工件使用寿命，降低工人劳动强度。

电火花加工也有其一定的局限性：

1) 它仅适于加工金属等导电材料，不像切削加工那样可以轻松地加工塑料、陶瓷等绝缘材料。

2) 在一般情况下，电火花加工的加工速度要低于切削加工。因此，合理的加工工艺路

线应当是：凡可用刀具加工的，尽量采用常规机械切削加工去除大部分加工余量，仅将刀具难以进行切削的局部留下，采用电火花加工工艺补充加工。

3) 由于电火花加工是靠电极间的火花放电去除金属，因此工件与工具电极都会有损耗，而且工具电极的损耗大多集中在尖角及底部棱边处，这直接影响了电火花成型加工的成型精度。

4) 最小圆角半径有限制，难以清角加工。

5) 加工后表面产生变质层，在某些应用中需进一步去除。

6) 工作液的净化和加工中产生的烟雾污染处理比较麻烦。

由于电火花加工具有传统切削加工无法比拟的优点，其应用领域日益扩大，已成为先进制造技术中不可缺少的重要补充工艺手段之一，目前已广泛应用于各类精密模具制造、航天、航空、电子、电器、精密微细机械零件加工，以及汽车、仪器仪表、轻工等众多行业。主要解决难加工材料（超硬、超软、脆性材料等）及复杂形状零件的加工难题。其加工范围已达到小至几十微米的小轴、孔、缝，大到几米的超大型模具和零件。

2.1.2 电火花成型加工的基本规律

1. 实现电火花成型加工的条件

实现电火花加工，应具备如下条件。

(1) 工具电极和工件之间必须维持合理的距离

在合理的距离范围内，既可以满足脉冲电压不断击穿介质，产生火花放电，又可以适应在火花通道熄灭后介质消电离以及排出蚀除产物的要求。若两电极距离过大，则脉冲电压不能击穿介质、不能产生火花放电，若两电极短路，则在两电极间没有脉冲能量消耗，也不可能实现电腐蚀加工。

(2) 两电极之间必须充入介质

在进行材料电火花尺寸加工时，两极间为液体介质（专用工作液或工业煤油）；在进行材料电火花表面强化时，两极间为气体介质。

(3) 输送到两电极间的脉冲能量密度应足够大

在火花通道形成后，脉冲电压变化不大，因此，通道的电流密度可以表征通道的能量密度。能量密度足够大，才可以使被加工材料局部熔化或汽化，从而在被加工材料表面形成一个腐蚀痕（凹坑），实现电火花加工。因而，通道一般必须有 $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ 电流密度。放电通道必须具有足够大的峰值电流，通道才可以在脉冲期间得到维持。一般情况下，维持通道的峰值电流不小于 2 A 。

(4) 放电必须是短时间的脉冲放电

放电持续时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ s}$ 。由于放电时间短，使放电时产生的热能来不及在被加工材料内部扩散，从而把能量作用局限在很小范围内，保持火花放电的冷极特性。

(5) 脉冲放电需重复多次进行, 并且多次脉冲放电在时间上和空间上是分散的

这里包含两个方面的意义: 其一时间上相邻的两个脉冲不在同一点上形成通道; 其二, 若在一定时间范围内脉冲放电集中发生在某一区域, 则在另一段时间内, 脉冲放电应转移到另一区域。只有如此, 才能避免积炭现象, 进而避免发生电弧和局部烧伤。

(6) 脉冲放电后的电蚀产物能及时排放至放电间隙之外, 使重复性放电顺利进行

在电火花加工的生产实际中, 上述过程通过两个途径完成。一方面, 火花放电以及电腐蚀过程本身具备将蚀除产物排离的固有特性; 蚀除物以外的其余放电产物(如介质的汽化物)亦可以促进上述过程; 另一方面, 还必须利用一些人为的辅助工艺措施, 例如工作液的循环过滤, 加工中采用的冲、抽油措施等。

2. 影响电火花成型加工的因素

(1) 极性效应

电火花加工时, 相同材料两电极的被腐蚀量是不同的。其中一个电极比另一个电极的蚀除量大, 这种现象叫作极性效应。如果两电极材料不同, 则极性效应更加明显。在国内, 把工件与脉冲电源正极相接的加工称为“正极性”加工, 反之为“负极性”加工。当采用短脉冲(如纯铜加工钢时, $t_i < 10 \mu\text{s}$)精加工时, 应选用正极性加工, 当采用长脉冲(如纯铜加工钢时, $t_i > 80 \mu\text{s}$)粗加工时, 应选用负极性加工, 可以得到较高的加工速度和较低的电极损耗。应当特别指出的是, 当电极和工件均为钢, 即“钢打钢”时, 无论是粗加工还是精加工, 工件均应和负极相接, 即采用负极性加工。

(2) 覆盖效应

在油类介质中放电加工会分解出负极性的游离碳微粒, 在合适的脉宽、脉间条件下将在放电的正极上覆盖碳微粒, 叫覆盖效应。利用覆盖效应可以降低电极损耗。但只有负极性加工才有利于覆盖效应。

(3) 二次放电

“二次放电”也是影响电火花加工形状精度的重要因素。二次放电是指已加工表面上由于电蚀产物再次进行的非正常放电, 它集中表现在加工深度方向产生斜度和加工棱角边变钝等方面, 如图 2-3 所示。

(4) 加工速度

加工速度高时, 工具电极的损耗会增大。在电火花加工的实用过程中, 粗加工采用长脉冲时间和高放电电流, 既实现了速度高, 又实现了损耗小的目的, 缓解了加工速度和工具电极损耗的矛盾。但是, 在精加工时, 矛盾激化了。为了实现小能量加工, 必须大大压缩脉冲放电时间。为达到脉冲放电电流与脉冲放

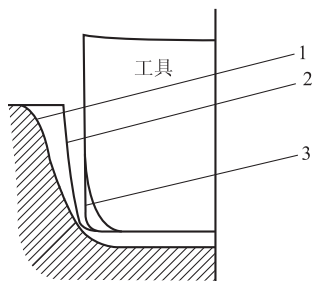


图 2-3 电火花加工时的加工斜度

- 1—实际工件轮廓线; 2—电极有损耗而不考虑二次放电时工件轮廓线;
3—电极无损耗时工具轮廓线

电时间参数的合理组合，亦必须大大压缩脉冲放电电流。这样，不仅加大了工具电极相对损耗，又大幅度降低了加工速度。

(5) 表面粗糙度

加工速度高时，加工表面粗糙度会增大。为了解决电火花加工速度与加工表面粗糙度之间的矛盾。人们试图将一个脉冲能量分散为若干个通道同时在多点放电。用这种方法既改善了加工表面粗糙度，又维持了原有的加工速度。到目前为止，实现人为控制的多点同时放电的有效方法只有一种，即分离工具电极多回路加工。为了实现整体电极的多通道加工，人们设想了各种方法，并进行了多年的实验摸索。但是迄今为止，尚没有彻底解决。在实用过程中，型腔模具的加工采用粗、中、精逐挡过渡式加工方法。加工速度的矛盾是通过大功率、低损耗的粗加工规准解决的；而中、精加工虽然工具电极相对损耗大，但在一般情况下，中、精加工余量仅占全部加工量的极小部分，故工具电极的绝对损耗极小，可以通过加工尺寸控制进行补偿，或在不影响精度要求时予以忽略。

(6) 工具电极损耗

在电火花成型加工中，工具电极损耗直接影响成型精度，特别对于型腔加工，电极损耗这一工艺指标较加工速度更为重要。电极损耗分为绝对损耗和相对损耗。绝对损耗最常用的是体积损耗速度 V_e 和长度损耗速度 V_{eh} 两种方式，它们分别表示在单位时间内，工具电极被蚀除的体积和长度。即

$$V_e = \Delta V/t \quad (\text{mm}^3/\text{min})$$

$$V_{eh} = \Delta H/t \quad (\text{mm}/\text{min})$$

相对损耗是工具电极绝对损耗与工件加工速度的百分比。通常采用长度相对损耗比较直观，测量也比较方便。在电火花成型加工中，工具电极的不同部位，其损耗速度也不相同。在精加工时，一般电规准选取较小，放电间隙太小，通道太窄，蚀除物在爆炸与工作液作用下，对电极表面不断撞击，加速了电极损耗，因此，如能适当增大放电间隙，改善通道状况，即可降低电极损耗。图 2-4 为相对长度损耗示意图。

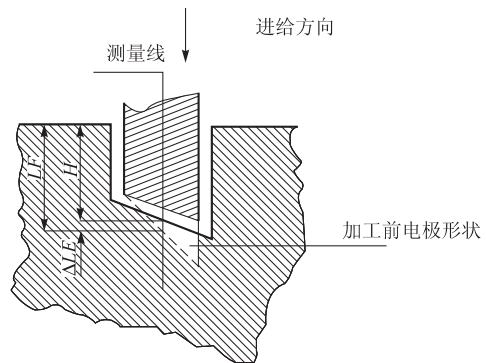


图 2-4 相对长度损耗

H —加工深度； LF —计数深度； ΔLE —电极损耗

(7) 放电间隙

放电间隙如果恒定，不会影响到成型加工的精度，但实际加工中，有关参数不可避免地要发生变化，特别是排屑条件及放电间隙中电蚀产物浓度的变化，将导致加工区域二次放电机会不同，从而使得放电间隙不均匀，产生加工斜度及圆角等。除了间隙能否保持均匀一致外，间隙大小对加工精度同样有影响，尤其是复杂形状的加工表面，其棱角部位电场强度分布不

均, 间隙越大, 影响也越大。因此, 从减小加工误差的角度考虑, 应当采用弱的加工规范, 缩小放电间隙, 以提高仿形精度。电参数对放电间隙的影响非常显著, 精加工时放电间隙一般只有 0.01 mm 左右, 而粗加工时可达 0.3 ~ 0.5 mm。保持加工过程的稳定性对保持间隙均匀是非常重要的, 所以放电间隙并不是愈小愈好, 因为间隙过小, 单个脉冲能量很小, 加工效率低, 而且因排屑不畅而使得加工不稳定, 从而导致放电间隙不均匀, 加工精度反而降低。提高间隙电压及增大单个脉冲能量都能加大放电间隙。

(8) 放电产物排除

电火花加工只有在放电产物的产生和排除速度达到平衡的条件下才能顺利进行。一旦这种平衡遭到破坏, 电火花加工就不可能进行。放电产物的产生和排除这一对矛盾的关键在于“排除”。也就是说, 在电火花加工中, 解决的方法不应以牺牲加工速度去适应排除, 而应积极开创排除的条件以适应加工速度。以此为目的, 首先必须对破坏产生与排除达到平衡的原因有充分认识。排除速度不适应产生速度的原因与工艺条件有关。例如, 在成型加工中, 型孔太深, 放电面积过小或过大; 又如线切割加工中, 工件太厚, 电极丝直径太小等。此外, 还和加工脉冲参数有关。例如, 采用较小脉冲能量进行中、精加工时, 放电间隙较小, 排屑困难; 另一个影响产物排除的原因就是加工面形状复杂, 使排屑路径不畅通。上述原因造成的矛盾, 不仅使加工稳定性变差, 脉冲利用率变低, 加工速度变慢, 甚至可能达到根本不能维持继续加工的地步。这些问题尚没有十分有效的解决办法, 目前常用的处理办法有: ① 人工排屑排气。可以在工具电极上预钻若干小孔, 以开辟排屑路径。还可以采用工具电极周期提升, 来弥补产生与排除之间的不平衡; ② 采用强迫冲油或抽油的方式促进产物的排除, 如图 2-5 所示; ③ 加速工作液的循环过滤; ④ 提高脉冲空载电压, 加大放电间隙, 用以改善排屑条件; ⑤ 两电极之间存在相对运动 (例如成型加工中的旋转头、平动头, 线切割加工中的走丝), 具有改善间隙屑性能的作用; ⑥ 利用超声振动 (或其他措施) 与电火花加工的复合作用, 对改善排屑条件有明显作用。

3. 数控电火花成型加工机床的工具电极的选择

工具电极材料必须具有导电性能良好、电腐蚀困难、电极损耗小, 并且具有足够的机械强度、加工稳定、效率高、材料来源丰富、价格便宜等特点。

电火花成型加工常用的工具电极材料有钢、铸铁、石墨、黄铜、紫铜、铜钨合金、银钨合金等。电极设计的主要内容是选择电极材料, 确定结构形式和尺寸等。目前, 型腔电火花加工中应用最广泛的材料是石墨和紫铜。石墨电极加工容易, 密度小, 质量轻, 但力学性能较差, 在采用宽脉冲大电流加工时容易起弧烧伤。同时, 不同质量的石墨材料电火花加工性能也有很大差异。一般选用颗粒小而均匀、气孔率低、抗弯强度高和电阻率低的石墨材料。紫铜的组织致密、韧性强, 用来加工形状复杂、轮廓清晰、精度高和表面粗糙度小的型腔, 但紫铜的切削加工性能差, 密度较大, 价格较高, 不适宜大中型电极。铜钨合金和银钨合金是较理想的型腔加工电极材料, 但价格昂贵, 只在特殊情况下采用; 铸铁、黄铜、钢等, 因

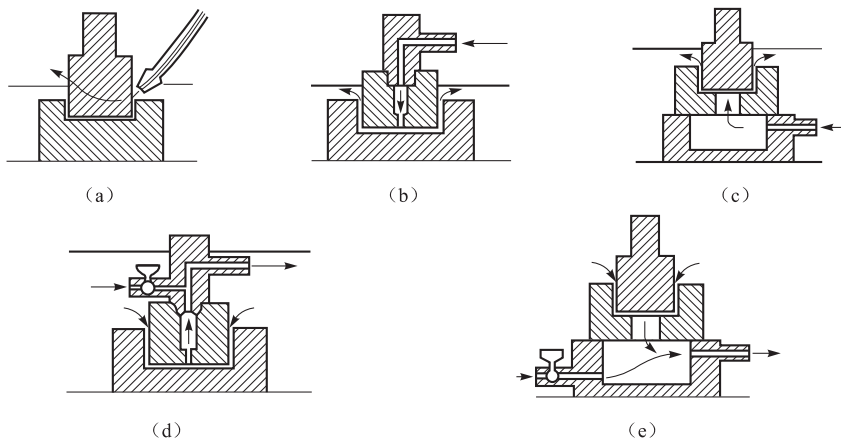


图 2-5 冲液与抽液排屑方式

- (a) 依靠喷嘴从电极侧面喷入加工液；(b) 在电极一侧设置喷流孔，合理分配路径；
 (c) 将工件设置在喷流容器上，从下喷流；(d) 电极吸引——将粉末和气体吸往电极的液处理孔；
 (e) 下孔吸引——从工件的下孔吸入吸引容器

其损耗大，加工速度低，均不适宜型腔的加工。

电火花成型加工中常用的电极材料的性能及应用特点如表 2-1 所示。

表 2-1 常用电极材料性能及其加工性

电极材料	性能			特点	材质	应用
	加工稳定性	电极损耗	机械加工性能			
铸铁	一般	一般	好	制造容易，材料来源丰富	最好用优质铸铁	适用于复合式脉冲电源加工，常用于加工冷冲模的电极
钢	较差	一般	好	应用广泛，模具穿孔加工时常用品，电规准选择应注意加工稳定性	以锻件为好	适用于“钢打钢”冷冲模加工
石墨	较好	较小	较好	材质抗高温，变形小，制造容易，质量轻，但材料容易脱落、掉渣，机械强度较差，易折角	细粒致密、各向同性的高纯石墨	适用于大型模具加工用极
黄铜	好	较大	好	制造容易，特别适宜在中小电规准情况下加工，但电极损耗太大	冷拔或轧制棒或板材	用于可进行补偿的加工场所

电极材料	性能			特点	材质	应用
	加工稳定性	电极损耗	机械加工性能			
纯铜 (紫铜)	好	一般	较差	材质质地细密, 适应性广, 但磨削加工困难	以无杂质锻打电解铜最好	应用广泛
银铜合金	好	小	一般	电蚀速度快, 高光洁度, 低损耗粗精加工可一次完成	铸造坯料加工	应用于精密模具电极
铜钨 (银钨) 合金	很好	很小	一般	针对钨钢、耐高温超硬合金金属等, 高光洁度, 可使模具达到非常高的精度	粉末冶金制作, 以粒度细的为好	精密微细加工类模具电极

2.1.3 电火花成型加工设备

1. 电火花成型加工机床结构

数控电火花成型加工机床由于功能的差异, 导致在布局和外观上有很大的不同, 但其基本组成是一样的, 都由脉冲电源、数控装置、工作液循环系统、伺服进给系统、基础部件等组成, 如图 2-6 所示。

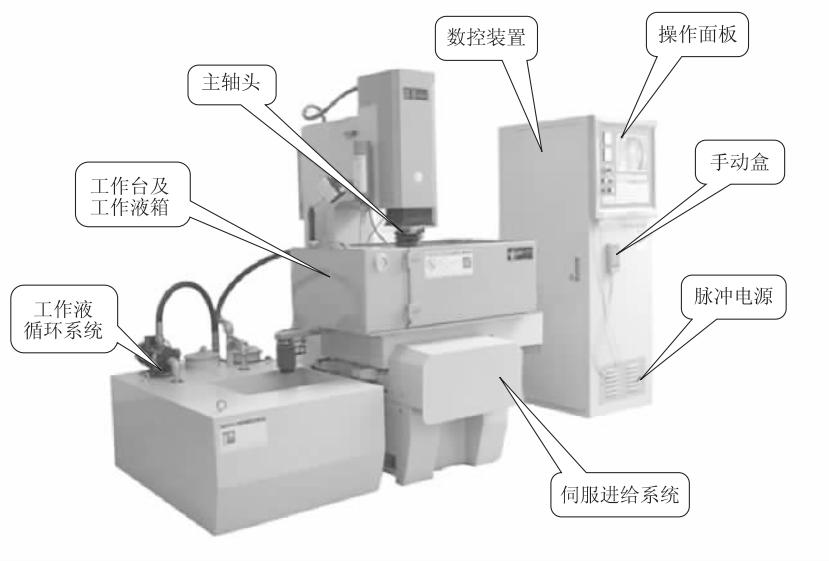


图 2-6 电火花成型加工机床结构

(1) 床身和立柱

床身和立柱是基础结构,由它确保电极与工作台、工件之间的相互位置。位置精度的高低对加工有直接的影响,如果机床的精度不高,加工精度也难以保证。因此,不但床身和立柱的结构应该合理,有较高的刚度,能承受主轴负重和运动部件突然加速运动的惯性力,还应能减少温度变化引起的变形。

(2) 主轴头

主轴头是电火花成型加工机床的一个关键部件,在结构上由伺服进给机构、导向和防扭机构、辅助机构三部分组成,控制工件与工具电极之间的放电间隙。主轴头的好坏直接影响加工的工艺指标,如生产率、几何精度以及表面粗糙度,因此主轴头应具备以下条件:①有一定的轴向和侧向刚度及精度;②有足够的进给和回升速度;③主轴运动的直线性和防扭转性能好;④灵敏度要高,无爬行现象;⑤不同的机床要具备合理的承载电极质量的能力。主轴头运动控制方式主要有电液伺服进给、步进电机伺服进给、直(交)流伺服进给、直线电机伺服进给。我国早在20世纪60—70年代曾广泛采用液压伺服进给的主轴头如DYT-1型、DYT-2型,目前已普遍采用步进电动机、直流电动机或交流伺服电动机作进给驱动的主轴头。

(3) 工作台和工作液箱

工作台主要用来支承和装夹工件。在实际加工中,通过转动纵横向丝杆来改变电极与工件的相对位置。工作台上装有工作液箱,用以容纳工作液,使电极和工件浸泡在工作液里,起到冷却、排屑作用。工作台是操作者装夹找正时经常移动的部件,通过移动上下滑板,改变纵横向位置,达到电极与工具件间所要求的相对位置。

(4) 工作液循环过滤系统

电火花加工时工作液的作用有以下几方面:

1) 放电结束后恢复放电间隙的绝缘状态(消电离),以便下一个脉冲电压再次形成火花放电。为此要求工作液有一定的绝缘强度,其电阻率在 $103 \sim 106 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。

2) 使电蚀产物较易从放电间隙中悬浮、排泄出去,免得放电间隙严重污染,导致火花放电点不分散而形成有害的电弧放电。

3) 冷却工具电极和降低工件表面瞬时放电产生的局部高温,否则表面会因局部过热而产生积炭、烧伤并形成电弧放电。

4) 工作液还可压缩火花放电通道,增加通道中压缩气体、等离子体的膨胀及爆炸力,以抛出更多熔化和汽化了的金属,增加蚀除量。

5) 工作液应对人体和设备无害,安全和价格低廉。工作液在选择和使用过程中还应注意以下几点:①闪点尽量高的前提下,黏度要低。电极与工件之间不易产生金属或石墨颗粒对工件表面的二次放电,这样一方面能提高表面的粗糙度,又能相对防止电极积炭率;②为提高放电的均匀稳定、加工精度及加工速度,可采用工作液混粉(硅粉、铬粉等)的

工艺方法；③ 按照工作液的使用寿命定期更换；④ 严格控制工作液高度；⑤ 根据加工要求选择冲液、抽液方式，并合理设置工作液压力。

目前国内外电火花加工用工作液主要成分是煤油，在大功率加工时常用机械油或在煤油中加入一定比例的机械油。

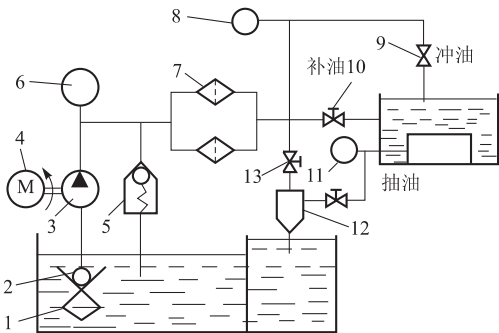


图 2-7 工作液循环系统油路图

- 1—粗过滤器；2—单向阀；3—吸入液压泵；4—电动机；
5—溢流安全阀；6—压力表；7—精过滤器；8—冲油压力表；
9—压力调节阀；10—快速进油阀；11—抽油压力表；
12—射流抽吸管；13—冲油选择阀

图 2-7 为工作液循环系统油路图，它既能冲油又能抽油。其工作过程是：储油箱的工作液首先经过粗过滤器 1、单向阀 2、吸入液压泵 3，这时高压油经过不同形式的精过滤器 7 输向机床工作液槽，溢流安全阀 5 控制系统的压力不超过 400 kPa，快速进油控制阀 10 供快速进油用，待油注满油箱时，可及时调节冲油选择阀 13，由压力调节阀 9 来控制工作液循环方式及压力，当冲油选择阀 13 在冲油位置时，补油冲油都不通，这时油杯中油的压力由压力调节阀 9 控制。当冲油选择阀 13 在抽油位置时，补油和抽油两路都通，这时压力工作液穿过射流抽吸管 12，利用流体速度产生负压，达到实现抽油的目的。

在加工过程中产生的电蚀产物主要是金属粉屑和高温分解出来的炭黑，若不及时排出，工作液混浊将会导致加工不稳定。因此在工作液系统中必须采用过滤装置，以及时将加工产生的蚀除物颗粒滤掉，保持工作液的清洁，使放电过程能稳定持续地进行。其过滤方式和特点见表 2-2。

表 2-2 过滤方式和特点

过滤方式	特点
介质过滤（木屑、黄沙、纸质、灯草芯、硅藻土、泡沫塑料等）	结构简单，造价低，但使用时间短，耗油多
离心过滤	过滤效果较好，结构复杂，清渣较困难
静电过滤	结构较复杂，一般不采用，因电压高，有安全问题，故用于小流量场合
自然沉淀过滤	适合于大流量的油箱和油池

（5）脉冲电源

加在放电间隙上的电压必须是以脉冲形式放电的，否则，放电将成为连续的电弧。脉冲

电源的作用是把工频交流电转换成供给火花放电间隙所需要的能量来蚀除金属。脉冲电源对电火花加工的生产率、表面质量、加工速度、加工过程的稳定性和工具电极损耗等技术经济指标有很大的影响。脉冲电源应满足的要求有：① 脉冲参数应能简单方便地进行调整，以适应各种材料、各种加工要求的需要；② 尽可能小的电极损耗，这是保证成型精度的重要条件之一；③ 加工表面粗糙度应能满足使用要求；④ 有足够的输出功率，满足生产线的加工速度要求；⑤ 电源性能稳定、可靠、价位合理，便于维修。脉冲电源的分类方法有很多。按功能可分为等电压脉宽（等频率）、等电流脉宽脉冲电源，以及模拟量、数字量、微机控制、适应控制、智能化等脉冲电源。按其作用原理和所用的主要元件、脉冲波形等可分为多种类型，见表 2-3。现在普及型（经济型）的电火花加工机床都采用高低压复合的晶体管脉冲电源，中、高档的电火花加工机床都采用微机数字化控制的脉冲电源，而且内部存有电火花加工规准数据库，可以通过微机设置和调用各档粗、中、精加工规准参数。

表 2-3 电火花脉冲电源分类

按主回路中主要元件种类	张弛式、电子管式、闸流管式、脉冲发电机式、晶闸管式、晶体管式、大功率集成器件式
按输出脉冲波形	矩形波、梳状波分组脉冲、三角波形、阶梯波、正弦波、高低压复合脉冲
按间隙状态对脉冲参数的影响	非独立式、独立式
按工作回路数目	单回路、多回路

（6）伺服进给装置

电火花加工与切削加工不同，属于“不接触加工”。正常电火花加工时，工具和工件间有一放电间隙 S 。如果间隙过大，脉冲电压击不穿间隙间的绝缘工作液，则不会产生火花放电，必须使电极工具向下进给，直到间隙 S 等于或小于某一值（一般 $S=0.1\sim 0.01\text{ mm}$ ，与加工规准有关），才能击穿并产生火花放电。在正常的电火花加工时，工件以 v_w 的速度不断被蚀除，间隙 S 将逐渐扩大，必须使电极工具以速度 v_d 补偿进给，以维持所需的放电间隙。如进给量 v_d 大于工件的蚀除速度 v_w ，则间隙 S 将逐渐变小，甚至等于零，形成短路。当间隙过小时，必须减少进给速度 v_d 。如果工具工件间一旦短路（ $S=0$ ），则必须使工具以较大的速度 v_d 反向快速回退，消除短路状态，随后再重新向下进给，调节到所需的放电间隙。这一间隙便是通过伺服进给装置实现的。

2. 电火花成型加工机床的附件

（1）可调节工具电极角度的夹头

装夹在主轴下的工具电极，在加工前需要调节到与工件基准面垂直，在加工型孔或型腔时，还需在水平面内调节、转动一个角度，使工具电极的截面形状与加工出工件型孔或型腔预定的位置一致。垂直度调节功能，常用球面铰链来实现，水平调节功能，靠主轴与工具电极安装面的相对转动机构来调节，垂直度与水平转角调节正确后，应用螺钉锁紧。此外，机床主轴、床身连成一体接地，而装工具电极的夹持调节部分应单独绝缘，以防止操作人员触电。可调电极夹头结构如图 2-8 所示。

(2) 平动头

电火花粗加工时的火花间隙比半精加工的要大，而半精加工的火花间隙比精加工的又要大一些。当用一个电极进行粗加工，将工件的大部分余量蚀除掉后，其底面和侧壁四周的表面粗糙度很差，为了将其修光，就得改变规准逐挡进行修整。由于后挡规准的放电间隙比前挡小，对工件底面可通过主轴进给进行修光，而四周侧壁就无法修光了。平动头就是为解决修光侧壁和提高其尺寸精度而设计的。平动头是一个使装在其上的电极能产生向外机械补偿动作的工艺附件。在采用单电极加工型腔时，可以补偿上一个加工规准和下一个加工规准之间的放电间隙差。平动头的动作原理是：利用偏心机构将伺服电动机的旋转运动通过平动轨迹保持机构，转化成电极上每一个质点都能围绕其原始位置在水平面内作平面小圆周运动，许多小圆的外包络线就形成加工表面。其运动半径即平动量 Δ 通过调节可由零逐步扩大，以补偿粗、半精、精加工的火花放电间隙 δ 之差，从而达到修光型腔的目的。其中每个质点运动轨迹的半径就称为平动量。平动头结构如图 2-9 所示。



图 2-8 可调电极夹头



图 2-9 平动头

(3) 永磁吸盘

固定工件很方便的一种附件，吸力一般大于 100 N/cm^2 。使用时只需用内六角扳手左旋或右旋即可松开或吸紧工件。其结构如图 2-10 所示。



图 2-10 永磁吸盘

2.1.4 电火花成型加工技术发展

先进制造技术的快速发展和制造业市场竞争的加剧，为电火花成型加工技术的研究和工艺开发、设备更新提供了新的动力。今后电火花成型加工的加工对象将主要面向传统切削加工不易实现的难加工材料、复杂型面等加工，其中精细加工、精密加工、窄槽加工、深腔加工等将成为发展重点。同时，还与其他特种加工技术或传统切削加工技术的复合应用，充分发挥各种加工方法在难加工材料加工中的优势。

相对于切削加工技术而言，电火花成型加工技术仍是一门较年轻的技术，在今后的发展中，还将不断借鉴切削加工技术发展过程中取得的经验与成果，根据电火花成型加工自身的技术特点，选用适当的加工理论、控制原理和工艺方法，向数控化方向发展，在已有成果的基础上不断完善、创新。朝着高效率、高精度、低损耗、微细化、自动化、安全、环保等方向发展。

1. 电火花成型加工理论的发展

在加工工艺理论研究方面，研究热点主要是如何提高电火花成型加工的表面质量和加工速度，降低损耗，拓展电火花加工的范围，以及探索复杂、微细结构的加工方法等。通过将研究成果应用于生产实践，全面提高了电火花成型加工的加工性能。在控制理论研究方面，智能控制一直是研究重点。国内外生产的新型电火花成型加工机床大多采用了智能控制技术，此项技术的应用使机床操作更容易，对操作人员要求更低。同时，智能控制系统具有自学习能力，可在线自动监测、调整加工过程，以实现加工过程的最优化控制。

虽然电火花成型加工的理论研究在基础理论、加工工艺理论、控制理论等方面都有一定发展和提高，但加工工艺理论、控制理论要得到更进一步全面发展，就必须在整个放电过程机理的研究上有所突破。因此，电火花成型加工理论研究的发展趋势将是在进一步探讨加工工艺理论和控制理论，提高电火花成型加工的加工性能及加工范围，取得更好控制效果的同时，重点研究放电过程的机理。

电火花成型加工机理研究未取得突破性进展的主要原因除放电过程本身的复杂性、随机性外，还由于研究方法及手段缺乏创新性。因此，还需要借鉴其他研究领域的成功经验，引入先进的研究方法和试验技术，克服传统研究方法的局限性、深入剖析和揭示整个放电过程的内在本质，建立可客观反映放电过程规律的理论模型，以指导电火花成型加工工艺理论和控制理论的研究，而计算机仿真技术可能是实现这一过程的有效工具。

2. 电火花成型加工设备结构的改进

借鉴现代切削加工机床的发展经验,电火花成型加工设备向数控化方向发展是一个不可逆转的趋势。一方面以高精度、高速度、自动化为追求目标,以技术优势占领市场;另一方面充分考虑设备的性能价格比,通过对机床功能的合理定位,进行结构改进和模块化设计,采用开放性的数控系统,提高机床设计的合理性,以最低的价格和足够的功能向用户提供满足不同加工需要的各类电火花成型加工机床。

为全面推动电火花成型加工设备的技术进步,在采用先进控制系统的同时,机床结构的设计也在进一步完善,其主要发展方向表现在以下两方面:

(1) 直线伺服系统的应用

电火花成型加工设备采用直线电机伺服系统可使加工性能获得明显改善,具体表现为:

1) 可实现轴的直接直线运动,省去丝杠—螺母传动环节,从而保证轴的高速运动。

2) 采用直线电机与滑板一体化结构,可消除滑板与电机之间因存在中间环节而引起的机械响应滞后现象,提高系统的灵敏度,缩短动态响应时间,保证加工过程的稳定性。

3) 直线电机伺服系统的运动方式决定了其位置检测环节必须采用直线位置反馈元件,实现无中间环节的直接位置检测,从而构成一个全闭环系统,保证加工过程的高精度及精度保持性。

目前,直线伺服系统的应用在深窄、微小型腔加工及模压零件一模多腔加工方面具有明显的技术优势。但是,这些技术优势要真正实现,除需结合电火花成型加工放电过程特性,解决直线伺服系统本身的技术难题外,还必须解决一系列与直线伺服系统配套的相关技术,如直线运动系统的动力平衡、工作台的结构改进等。

(2) 机床运动方式的改进

突破现有电火花成型加工机床运动方式的局限性,是发挥其技术优势、推动其产业发展的另一重要途径。借鉴现代切削加工技术的发展经验,可在机床主要的加工成型运动基础上引入圆周运动,特别是采用多轴回转系统与多种直线运动协调组合成多种复合运动方式,以适应不同种类工件的加工要求,扩大电火花成型加工的加工范围,提高其在精密加工方面的比较优势和技术效益。目前,国内外许多电火花成型加工机床在运动方式上作了一些改进,如瑞士阿奇公司生产的 AGIF MONDO STAR20(50)机床拥有 EQUIMODE 功能,能实现空间任何方向的半球平动,这种平动功能在实际加工中具有很高实用价值。但目前电火花成型加工机床增设的运动方式还较为单一,应用范围有限。电火花成型加工要在加工精度、加工效率、加工范围等方面取得重大突破,一个重要的发展方向就是对机床成型运动方式的创新和多样化。

此外,机床的整体结构设计必须充分考虑环境保护以及人一机协调性,借助先进的设计方法和手段(如 CAD、有限元分析等)对机床结构进行全面优化设计,充分提高机床结构的先进性和合理性。

3. 电火花成型加工工艺的发展趋势

通过对电火花成型加工机理的研究,进一步揭示放电过程的内在规律,并以此为指导,推动电火花成型加工工艺向高效率、高精度、低损耗方向发展,同时还应注意微细化加工方面的发展。

(1) 加工过程的高效化

加工过程的高效化不仅体现在通过改进电火花加工伺服系统、控制系统、工作液系统、机床结构等,减少上述因素对电火花成型加工效率的影响,在保证加工精度的前提下提高粗、精加工效率,同时还应尽量减少辅助时间(如编程时间、电极与工件定位时间、维修时间等),这就需要增强机床的自动编程功能,扩展机床的在线后台编程能力,改进和开发适用的电极与工件定位装置;在机床维护方面,应增强机床的多媒体功能和在线帮助功能,对于常见故障,操作人员可直接根据计算机提示实现故障排除,同时这也有利于增强机床的可操作性和操作人员的操作技能。

(2) 加工过程的精密化

通过采用一系列先进加工技术和工艺方法,目前电火花成型加工精度已有全面提高,有的已达到镜面加工水平。但从总体来看,先进技术在实际生产中的应用还不够成熟和广泛,因此有必要全面推动已有先进技术的进一步完善及向产业化方向发展。在保证加工速度、加工成本的前提下,使电火花成型加工的精度水平进一步提高,使电火花成型加工成为一些主要零件、关键零件的最终加工方式。同时,对加工精度的衡量不能仅仅局限于工件的尺寸精度和表面粗糙度,还应包括型面的几何精度、变质层厚度以及微观裂纹、氧化、锈蚀等。

(3) 加工过程的微细化

电火花成型加工的一个重要应用领域是窄槽、深腔、微细零件的加工,因此加工过程的微细化是今后一个重要的发展方向。电火花微细加工机理与常规电火花成型加工相同,但有自身的工艺特点:每个脉冲的放电能量很小,工作液循环困难,稳定的放电间隙范围小等。基于这些工艺特点,微细电火花成型加工的加工装置、工作液循环系统、电极制备等必然与常规电火花成型加工有很大区别。因此,需要重点研究非机械作用力及其干扰对加工过程的影响等,进一步提高加工效率、加工精度及加工过程的稳定性。

(4) 应用范围的扩大

目前,电火花成型加工不仅可加工各种导电金属材料和复杂型腔,还能实现对半导体材料、非导电材料的加工,并取得了较好的加工效果。同时,电极材料的种类也不断增多。这方面的主要发展趋势为:进一步研究半导体材料、非导电材料的放电加工机理,促进其加工效率、加工精度、加工过程稳定性的提高,扩大可加工材料的范围;除加工复杂型腔外,进一步实现对三维型腔、复杂型面的加工;研制性能优越的新型电极材料。

4. 电火花成型加工数控系统的发展趋势

数控系统是数控机床的核心部分，其性能的提高不仅可直接改善加工效率、加工精度和加工稳定性，同时也是扩大加工范围、实现复杂精密加工的重要途径。先进数控系统的应用可为电火花成型加工带来显著的经济效益和广阔的发展前景，已成为衡量电火花成型加工技术水平的重要标志。电火花成型加工在数控系统方面的发展趋势主要表现在以下几方面：

(1) 建立基于 PC 机的开放式数控体系

具有开放性的数控体系是当前数控系统的发展主流，而 PC 机自身的特点决定了它是一种标准的开放性结构系统。与以前的数控系统相比，基于 PC 机的数控系统具有以下优点：① 系统具有更高的集成度和可靠性；② 资源丰富，适于产品开发；③ 控制功能强大，形式多样，可实现多机控制、多目标控制；④ 系统具有更高柔性。

目前应用于数控机床的基于 PC 机的数控系统多为专用型结构，虽具有结构较简单、技术较成熟、开发成本较低等优点，但随着技术的进一步发展，其软、硬件具有封闭性的缺点愈益明显。例如，这种结构的数控系统很难及时应用计算机技术的最新成果，不同系统之间很难相互兼容，用户不易增设或改进适合自身实际的专用功能，PC 机资源利用率低，难以完全发挥 PC 机的优势，控制系统功能不完善等。

(2) 实现加工过程控制的智能化

提高电火花成型加工过程的自动化是该加工技术发展的必然趋势。由于电火花成型加工是在复杂环境下基于复杂任务对复杂对象的控制，传统的控制系统已不能满足自动化加工的要求，因此需要建立多输入、多输出的控制系统，智能控制将是解决此类复杂问题的有效途径。智能控制系统具有自学习和自适应功能，能自主调节系统的控制结构、进行决策规划和广义问题求解。它就如同一个有经验的操作者，可通过对加工信息的定性刻画，模拟熟练操作者的思维方式，根据当前的加工状态调整加工参数，进而实现提高加工效率、加工精度、加工过程稳定性以及简化操作过程，拓宽加工范围的目的。

加工过程的智能控制主要包括三方面内容：① 人工神经网络技术；② 模糊控制；③ 专家系统。为了紧跟先进制造技术的发展步伐，应将最先进的人工智能技术引入电火花成型加工过程控制中，利用各种控制技术的特点与优势，研制智能化、模块化的电火花成型加工机床的控制部件和执行机构，促进电加工产业的全面技术进步。

5. 操作安全与环境保护

随着科技进步和人类文明的发展，人们对工作条件的改善和环境保护的要求越来越高。电火花成型加工由于其自身特点，在加工过程中不可避免地会产生工作液飞溅、烟雾、噪声、电磁辐射、有害气体等不安全因素和污染，对操作者人身安全及环境的危害不可忽视。因此，为保证电加工产业的可持续发展，必须根据“绿色制造”原则，实现资源的最有效利用和废弃物的最低限度产生与排放。具体可采取以下措施：① 封闭的机床工作区。这有

利于改善工作液、烟雾、电磁辐射等对人体、机床、工作环境的污染，有利于操作过程中防止触电危险以及对有害气体的集中处理排放。② 替代性技术的运用。例如，为减少使用工作液所造成的环境污染，可在保证加工效率、加工精度、加工成本以及加工过程稳定性的前提下，尽量选用污染较小的工作液，同时应大力研究、开发不使用工作液的成型加工技术。③ 废弃物的后处理。对于加工中产生的废液、废气必须经过处理后才能排放。需要特别指出，对加工过程产生的污染物的合理处理，不仅有利于提高工作的安全性、减少环境污染，还有利于改善操作者的工作环境，使操作者工作时心情愉快，这对于提高电加工产业的社会形象和市场竞争能力是十分有益的。

2.2 电火花线切割加工技术

2.2.1 电火花线切割加工原理、特点及应用范围

1. 数控电火花线切割加工原理

电火花线切割加工是在电火花加工基础上于 20 世纪 50 年代末最早在前苏联发展起来的一种新的工艺形式，是用线状电极（钼丝或铜丝）靠火花放电对工件进行切割，故称为电火花线切割，简称线切割。线切割已获得广泛的应用，目前国内外的线切割机床已占电加工机床的 60% 以上。

图 2-11 为电火花线切割加工及装置的示意图。利用细钼丝或铜丝 4 作工具电极进行切割，储丝筒 7 使钼丝作正反向交替移动，加工能源由脉冲电源 3 供给。在电极丝和工件之间浇注工作液介质，工作台在水平面两个坐标方向各自按预定的控制程序，根据火花间隙状态作伺服进给移动，从而合成各种曲线轨迹，把工件切割成型。

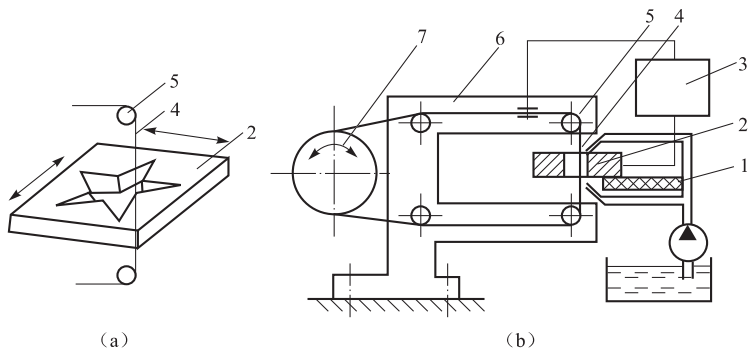


图 2-11 电火花线切割原理

1—绝缘底板；2—工件；3—脉冲电源；4—钼丝；5—导向轮；6—支架；7—储丝筒

根据电极丝的运行速度,电火花线切割机床通常分为两大类:一类是快走丝电火花线切割机床(WEDM—HS)。这类机床的电极丝作高速往复运动,一般走丝速度为8~10 m/s。这是我国生产和使用的主要机种,也是我国独有的电火花线切割加工模式;另一类是慢走丝电火花线切割机床(WEDM—LS)。这类机床的电极丝作低速单向运动,一般走丝速度低于0.2 m/s,这是国外生产和使用的主要机种。

此外,按加工特点可分为大、中、小型以及普通直壁切割型与锥度切割型等。

2. 线切割加工的特点

与电火花成型加工相比,电火花线切割加工有如下特点:

1) 由于工具电极是直径较小的细丝,省掉了成型工具电极的制作,靠数控技术实现复杂的切割轨迹,缩短了生产准备时间,加工周期短。

2) 脉冲电源的加工电流较小,脉冲宽度较窄,属中、精加工范畴,所以只采用正极性加工,工件与脉冲电源的正极相接。

3) 采用水或水基工作液,不会引燃起火,容易实现安全无人运转。

4) 线切割电极丝比较细,切缝很窄,可以加工微细异形孔、窄缝和复杂形状的工件。且只对工件材料进行“套料”加工,实际金属去除量很少,材料的利用率很高。

5) 因工具电极是运动的长金属丝,故可加工很小的窄缝或人工缺陷。当切割的周长不大时,单位长度的电极丝损耗很小,对加工精度的影响也很小。而慢走丝线切割由于电极丝只是一次性使用,所以电极丝的损耗对加工精度无影响。但是,电极丝自身的尺寸精度对快、慢走丝线切割机床的加工精度均有直接的影响。

3. 线切割加工的应用范围

线切割加工为新产品试制、精密零件及模具制造开辟了一条新的工艺途径,主要应用于以下几个方面:

(1) 加工模具

适用于各种形状的冲模,调整不同的间隙补偿量,只需一次编程就可以切割凸模、凸模固定板、凹模及卸料板等,模具配合间隙、加工精度通常都能达到要求。此外,还可加工挤压模、粉末冶金模、弯曲模、塑压模等通常带锥度的模具。

(2) 加工电火花成型加工用的电极

一般穿孔加工的电极以及带锥度型腔加工的电极。对于铜钨、银钨合金之类的材料,用线切割加工特别经济,同时也适用于加工微细复杂形状的电极。

(3) 加工零件

在试制新产品时,用线切割在板料上直接割出零件,例如切割特殊微电机硅钢片定转子铁心。由于不需另行制造模具,可大大缩短制造周期、降低成本。另外修改设计、变更加工程序比较方便,加工薄件时还可多片叠在一起加工。在零件制造方面,可用于加工品种多,数量少的零件,特殊难加工材料的零件,材料试验样件,各种型孔、凸轮、样板、成型刀

具。同时还可进行微细加工，异形槽和标准缺陷的加工等。

2.2.2 电火花线切割加工设备

电火花线切割加工设备主要由机床本体、脉冲电源、控制系统、工作液循环系统和机床附件等几部分组成。图 2-12 和图 2-13 分别为快走丝和慢走丝线切割加工设备组成图。

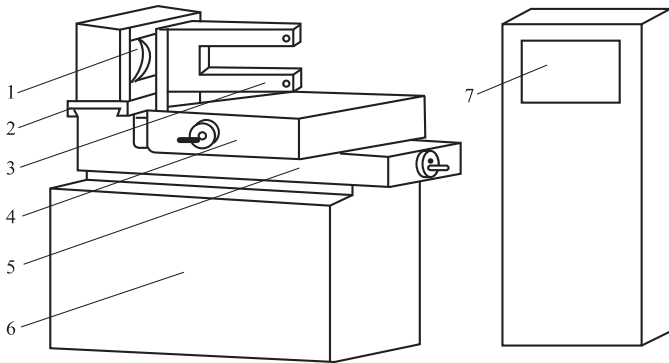


图 2-12 快走丝切割加工设备组成

1—卷丝筒；2—走丝溜板；3—丝架；4—纵向滑板；5—横向滑板；6—床身；7—控制柜

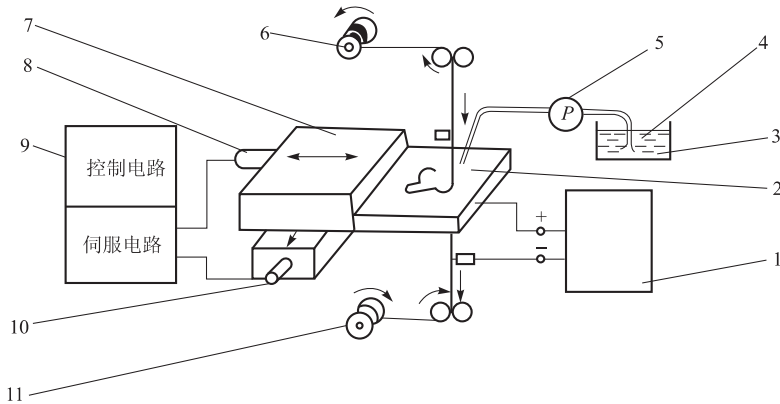


图 2-13 慢走丝切割加工设备组成

1—脉冲电源；2—工件；3—工作液箱；4—去离子水；5—泵；6—放丝卷筒；
7—工作台；8—X 轴电动机；9—数控装置；10—Y 轴电动机；11—收丝卷筒

1. 机床本体

机床本体由床身、坐标工作台、走丝机构、丝架、工作液箱、附件和夹具等几部分组成。

(1) 床身部分

床身一般为铸件，是坐标工作台、绕丝机构及丝架的支承和固定基础。通常采用箱式结构，应有足够的强度和刚度。床身内部安置电源和工作液箱，考虑电源的发热和工作液泵的振动，有些机床将电源和工作液箱移出床身外另行安放。

(2) 坐标工作台部分

电火花线切割机床最终都是通过坐标工作台与电极丝的相对运动来完成对零件加工的。为保证机床精度，对导轨的精度、刚度和耐磨性有较高的要求。一般都采用“十”字拖板、滚动导轨和丝杆传动副将电动机的旋转运动变为工作台的线性运动，通过两个坐标方向各自的进给移动，可合成获得各种平面图形曲线轨迹。为保证工作台的定位精度和灵敏度，传动丝杆和螺母之间必须消除间隙。

(3) 走丝机构

走丝系统使电极丝以一定的速度运动并保持一定的张力。在快走丝机床上，一定长度的电极丝平整地卷绕在储丝筒上，丝张力与排绕时的拉紧力有关（为提高加工精度，近年来已研制恒张力装置），储丝筒通过联轴器与驱动电机相连。为了重复使用该段电极丝，电机由专门的换向装置控制作正反向交替运转。走丝速度等于储丝筒周边的线速度，通常为 $8 \sim 10 \text{ m/s}$ 。在运动过程中，电极丝由丝架支撑，并依靠导轮保持电极丝与工作台垂直或倾斜一定的几何角度（锥度切割时）。

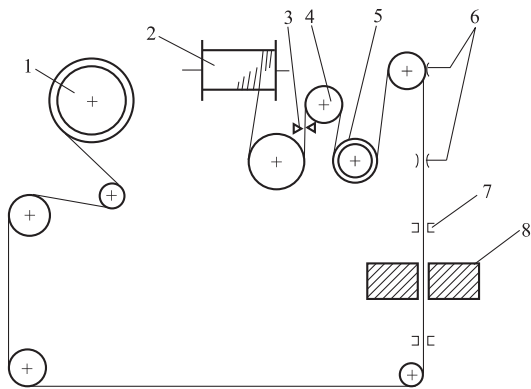


图 2-14 慢走丝运丝机构示意图

- 1—卷丝轮；2—未使用的金属丝筒；3—拉丝模；4—张力电动机；
5—电极丝张力调节轴；6—退火装置；7—导向装置；8—工件

慢走丝系统如图 2-13 和图 2-14 所示。自未使用的金属丝筒 2（绕有 $1 \sim 3 \text{ kg}$ 金属丝）开始，靠卷丝轮 1 使金属丝以较低的速度（通常 0.2 m/s 以下）移动。为了提供一定的张力（ $2 \sim 25 \text{ N}$ ），在走丝路径中装有一个机械式或电磁式张力机构 4 和 5。为实现断丝时可能自动停车并报警，走丝系统中通常还装有断丝检测微动开关。用过的电极丝集中到卷丝筒上或送到专门的收集器中。

为了减轻电极丝的振动，应使其跨度尽可能小（按工件厚度调整），通常在工件的上下采用蓝宝石 V 形导向器或

圆孔金刚石模导向器，其附近装有引电部分，工作液一般通过引电区和导向器再进入加工区，可使全部电极丝的通电部分都能冷却。有的机床上还装有自动穿丝机构，能使电极丝经一个导向器穿过工件上的穿丝孔而被传送到另一个导向器，在必要时也能自动切断，为无人

连续切割创造了条件。

(4) 锥度切割装置

为了切割有落料角的冲模和某些有锥度（斜度）的内外表面，有些线切割机床具有锥度切割功能。实现锥度切割的方法有多种，下面介绍两种。

1) 偏移式丝架。主要用在快走丝线切割机床上实现锥度切割。其工作原理如图 2-15 所示。图 2-15 (a) 为上（或下）丝臂平动法，上（或下）丝臂沿 X 、 Y 方向平移，此法锥度不宜过大，否则导轮易损，工件上有一定的加工圆角。图 2-15 (b) 为上、下丝臂同时绕一定中心移动的方法，如果模具刃口放在中心“0”上，则加工圆角近似为电极丝半径。此法加工锥度也不宜过大。图 2-15 (c) 为上、下丝臂分别沿导轮径向平动和轴向摆动的方法，此法加工锥度不影响导轮磨损，最大切割锥度通常可达 5° 以上。

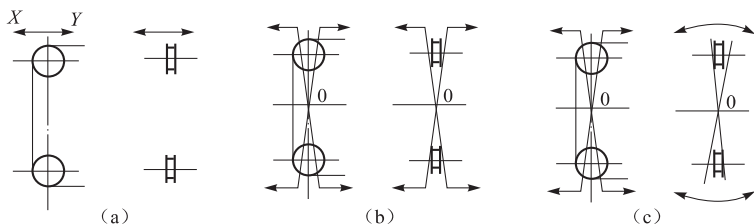


图 2-15 偏移式丝架实现锥度加工的方法

2) 双坐标联动装置。在慢走丝线切割机床上广泛采用。上导向器能作纵横两轴（称 U 、 V 轴）驱动，与工作台的 X 、 Y 轴在一起构成 NC 四轴同时控制，如图 2-16 所示，这种方式的自由度很大，依靠强有力的软件，可以实现上下异形截面形状的加工。最大的倾斜角度一般为 $\pm 5^\circ$ ，有的甚至可达 $30^\circ \sim 50^\circ$ （与工件厚度有关）。

在锥度加工时，保持导向间距（上下导向器与电极丝接触点之间的直线距离）一定，是获得高精度的主要因素，为此有的机床具有 Z 轴设置功能，并且一般采用圆孔方式的无方向性导向器。

2. 脉冲电源

电火花线切割加工脉冲电源受加工表面粗糙度和电极丝允许承载电流的限制，

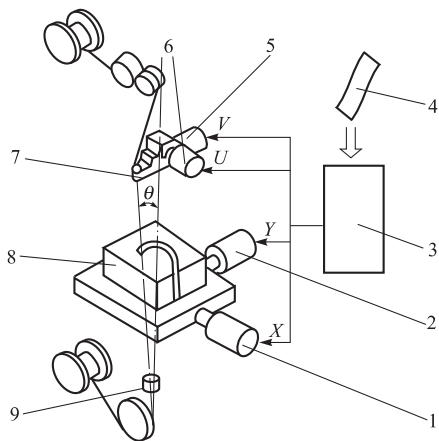


图 2-16 四轴联动锥度切割装置

1— X 轴驱动电动机；2— Y 轴驱动电动机；3—控制装置；
4—数控纸带（程序）；5— V 轴驱动电动机；6— U 轴驱动电动机；7—上导向器；8—工件；9—下导向器

线切割加工脉冲电源的脉宽较窄 ($2 \sim 60 \mu\text{s}$)，单个脉冲能量、平均电流 ($1 \sim 5 \text{ A}$) 一般较小，所以线切割加工总是采用正极性加工。脉冲电源的形式品种很多，如晶体管矩形波脉冲电源、高频分组脉冲电源、并联电容型脉冲电源和低损耗电源等。

(1) 晶体管矩形波脉冲电源

如图 2-17 所示。广泛用于快走丝线切割机床，在慢走丝机床上用得不多，因为慢走丝时排屑条件差，要求采用窄脉宽和高峰值电流，这样势必要用到高速大电流的开关元件，电源装置也要大型化。但近年来随着半导体元件的进展，这种方式的电源也可用于慢走丝机床上。

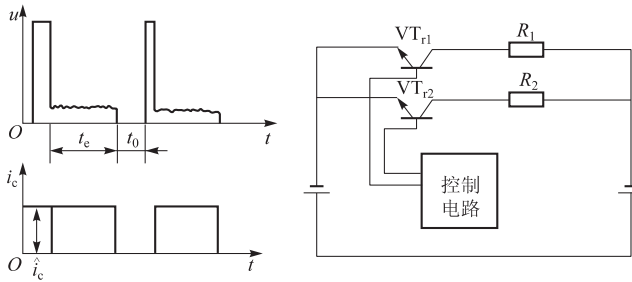


图 2-17 晶体管矩形波脉冲电源

(2) 高频分组脉冲电源

高频分组脉冲波形如图 2-18 所示，它是矩形波派生的一种波形，即把较高频率的脉冲分组输出。

矩形波脉冲电源对提高切割速度和改善表面粗糙度这两项工艺指标是互相矛盾的，亦即欲提高切割速度，则表面粗糙度差，若要求表面粗糙度好，则切割速度下降很多。而高频分组脉冲波形在一定程度上能解决这两者的矛盾，在相同工艺条件下，可获得较好的加工工艺效果，因而得到了越来越广泛的应用。

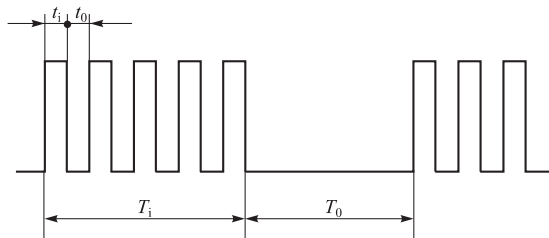


图 2-18 高频分组脉冲波形

图 2-19 为高频分组脉冲电源的电路原理方框图。图中的高频脉冲发生器、分组脉冲发生器和门电路生成高频分组脉冲波形，然后经脉冲放大和功率输出，把高频分组脉冲能量输送到放电间隙。

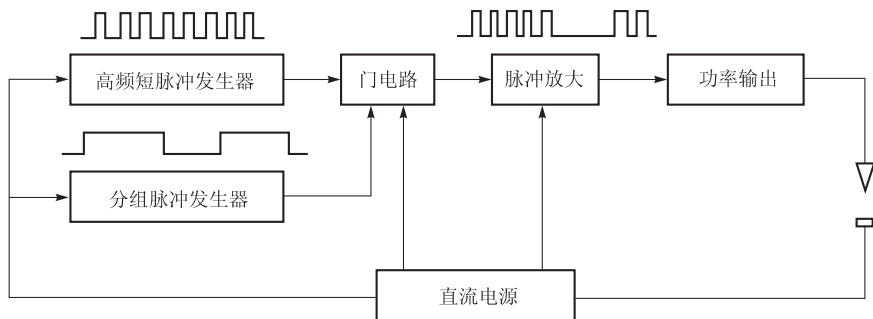


图 2-19 高频分组脉冲电源的电路原理方框图

3. 工作液循环系统

在线切割加工中,工作液对加工工艺指标的影响很大,如对切割速度、表面粗糙度、加工精度等都有影响。慢走丝线切割机床大多采用去离子水作工作液,只有在特殊精加工时才采用绝缘性能较高的煤油。快走丝线切割机床使用的工作液是专用乳化液,目前供应的乳化液有好多种、各有其特点。有的适于精加工,有的适于大厚度切割,也有的是在原来工作液中添加某些化学成分提高其切割速度或增加防锈能力等。不管哪种工作液都应具有下列性能。

(1) 具有一定的绝缘性能

火花放电必须在具有一定绝缘性能的液体介质中进行。工作液的绝缘性能可使击穿后的放电通道压缩,局限在较小的通道半径内火花放电,形成瞬时、局部高温熔化、汽化金属。放电结束后又迅速恢复放电间隙成为绝缘状态。绝缘性能太低,将产生电解而形不成击穿火花放电,绝缘性能太高,则放电间隙小,排屑难,切割速度低。一般电阻率在 $10^3 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 为宜。

(2) 具有较好的洗涤性能

所谓洗涤性能,是指液体有较小的表面张力,对工件有较大的亲和附着力,能渗透进入窄缝中去,此外还有一定的去除油污的能力。洗涤性能好的工作液,切割时排屑效果好,切割速度高,切割后表面光亮清洁,割缝中没有油污。洗涤性能不好的则相反,有时切割下来的料芯被油污糊状物黏住,不易取下来,切割表面也不易清洗干净。

(3) 具有较好的冷却性能

在放电过程中,尤其是大电流加工时,放电点局部瞬时温度极高。为防止电极丝烧断和工件表面局部退火,必须充分冷却。为此,工作液应有较好的吸热、传热和散热性能。

(4) 对环境无污染,对人体无危害

在加工中不应产生有害气体,不对操作人员的皮肤、呼吸道产生刺激,不应锈蚀工件、夹具和机床。

此外,工作液还应具有配制方便、使用寿命长、乳化充分、冲制后不能油水分离、储存时间较长及不应有沉淀或变质现象等特点。

由于线切割切缝很窄,顺利排除电蚀产物是极为重要的问题,因此工作液的循环与过滤装置是线切割加工不可缺少的部分。其作用是充分地、连续地向加工区供给清洁的工作液,及时从加工区域中排除电蚀产物,对电极丝和工件进行冷却,以保持脉冲放电过程能稳定而顺利地进行。工作液循环装置一般由工作液泵、液箱、过滤器、管道和流量控制阀等组成。对快走丝机床,通常采用浇注式供液方式,而对慢走丝机床,近年来有些采用浸泡式供液方式。

2.2.3 电火花线切割加工的工艺基础

1. 线切割加工的主要工艺指标与影响因素

线切割加工的主要工艺指标有切割速度、加工精度及加工表面质量等。

(1) 切割速度及其影响因素

电火花线切割加工的切割速度是按加工相同厚度工件时，在单位时间内切割长度尺寸的大小来评价的。换句话说，是以电极丝单位时间内扫过的面积来评价的，其单位为 mm^2/min ，电火花成型加工是以单位时间内蚀除的体积来评价，其单位为 mm^3/min （由于线切割加工所用电极丝直径不同，切缝体积难以准确表明切割速度的快慢）。目前快走丝线切割的最高切割速度可达 $80 \sim 200 \text{ mm}^2/\text{min}$ ，而慢走丝线切割因峰值电流高，最大切割速度可达 $350 \text{ mm}^2/\text{min}$ 。

影响切割速度的主要因素有：

1) 单个脉冲的放电能量愈大、放电脉冲数愈多，峰值电流愈大，蚀除的材料也就愈多。一般说来，脉冲宽度和脉冲频率与切割速度成正比。当然，单个脉冲能量过大，也会导致电极丝振动加大，反而使切割速度下降，且易造成断丝；脉冲频率过高，脉冲间隔太小，无法充分消除电离，也会引发电弧烧伤工件及烧断丝，使加工无法正常进行，导致切割速度下降。在实际操作时，一定要掌握好分寸，以防“欲速则不达”。

此外，在其他条件不变的情况下，提高脉冲电压会使峰值电流增大，切割速度会相应提高。电源电压一般以 $60 \sim 100 \text{ V}$ 为佳。而慢走丝线切割由于工作液为去离子水，电源电压可高达 $150 \sim 300 \text{ V}$ 。

2) 极性。实践证明：放电加工时，其正、负极的蚀除量是不同的。在窄脉冲加工时，正极（阳极）的蚀除量高于负极（阴极）的蚀除量，这种现象称为“极性效应”。线切割加工大多是窄脉冲加工，为了提高切割速度，工件一律接脉冲电源的正极。

3) 工件材料对切割速度也有较大影响。材料的熔点、沸点、导热系数愈高，放电时蚀除量愈小。因为导热系数高，热传导快，能量损失大，导致蚀除量降低。钨、钼、硬质合金等材料的切割速度比加工钢、铜、铝时低。

4) 电极丝的运动速度对切割速度也有较大的影响。走丝速度越快，放电区域温升越小，由于工作液更新速度加快，电蚀产物排除速度也越快，确保了稳定加工，有利于切割速度的提高。

(2) 加工精度及其主要影响因素

工件的加工精度指加工尺寸精度、形状及位置精度等。国产快速走丝线切割的加工精度范围大约为 $\pm(0.005 \sim 0.01) \text{ mm}$ ，而慢走丝线切割的加工精度可达到 $\pm(0.002 \sim 0.005) \text{ mm}$ 。影响加工精度的主要因素有：

1) 机床的机械精度。如丝架与工作台的垂直度、工作台拖板移动的直线度及其相互垂

直度、夹具的制造精度与定位精度等，对加工精度有直接影响。导轮组件的几何精度与运动精度以及电极丝张力的的大小与稳定性对加工区域电极丝的振动幅度和频率有影响，所以对加工精度误差的影响也很大。

为了提高加工精度，应尽量提高机床的机械精度和结构刚度，确保工作台运动平稳、准确、轻快，电极丝的张力尽量恒定且偏大一些。同时，对于固定工件的夹具也应予重视，除了夹具自身的制作精度外，装夹时也一定要牢固、可靠。

2) 电参数。如脉冲波形、脉冲宽度、间隙电压等对工件的蚀除量、放电间隙以及电极损耗大小有较大影响。当脉冲宽度大，间隙电压高时，峰值电流加大，导致放电间隙增大。因此，在加工过程中应尽量维持脉冲宽度、间隙电压的稳定，使放电间隙保持均匀一致，从而有助于加工精度的提高。

放电波形的前、后沿较陡，可降低电极丝损耗，有利于加工精度的提高。对于慢走丝线切割来说，则要求电极丝自身的尺寸精度要高（直径误差通常应不大于 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ）。

3) 控制系统。控制系统的控制精度对加工精度也有直接影响，控制精度愈高、愈稳定，则加工精度愈高。

(3) 加工表面质量及其主要影响因素

评价线切割加工表面质量主要是看工件表面粗糙度的高低及表面变质层的薄厚。电极丝在放电过程中不断移动，难免会产生振动，对加工表面产生不利的影晌，而放电产生的瞬间高温使工件表层材料熔化、汽化，在爆炸力作用下被抛出，但有些材料在工作液的冷却下又重新凝固，而且，在放电过程中也会有少量电极丝材料溅入工件表层，所以在工件表层会产生变质层。对表面质量影响较大的因素有：

1) 脉冲宽度与脉冲频率。脉冲宽度的大小决定每个放电坑穴体积的大小。当要求工件表面粗糙度低、变质层薄时，必须选用窄脉冲加工。因为脉冲频率高，放电坑穴重叠机会加大，有利于降低表面粗糙度。通常脉冲间隔均大于脉冲宽度。当间隙电压较高或走丝速度较高、电极丝直径较大时，由于排屑条件良好，可以适当减小脉冲间隔，提高放电频率，而当工件厚度偏大，排屑条件不佳时，则应适当加大脉冲间隔。

2) 工件材料。熔点高、导热好的材料，其表面粗糙度优于熔点低、导热差的材料。前者的变质层厚度也小于后者。为了改善加工表面质量，应使用合适的加工材料。

3) 走丝系统。走丝系统运行应平稳，以减少对电极丝的扰动，使电极丝在切割过程中运动轨迹始终保持直线状态。当电极丝的张力较大且恒定时，有助于降低电极丝的振动，改善加工表面的粗糙度。

4) 工作液。加工部位的工作液应供应充足，以有效清洁放电间隙，从而使放电坑穴均匀一致。工作液又可及时带走电蚀产物并冷却电极丝，从而确保放电切割的正常进行。

2. 电火花线切割工艺

电火花线切割工艺是使用线切割机床，按工件图纸要求，将毛坯按一定工艺技术与方法

加工成符合设计要求的工件。在设备一定的情况下，合理地选择工艺方法和工艺路线，是确保工件达到设计要求的重要环节之一。线切割加工模具或零件的工艺过程通常分为如下几个步骤：① 认真分析研究工件图纸及其技术要求，以确定哪些工件适宜用线切割加工，哪些不宜采用线切割加工工艺；② 加工前的工装夹具准备及必要的工艺准备；③ 选择切割参数及确定切割路线，工件进行装夹找正；④ 编制加工程序；⑤ 线切割加工；⑥ 切割后工件清理与检验。

(1) 认真分析工件图纸及其技术条件

如表面粗糙度及尺寸精度要求过高或是工件厚度超过丝架开档的，以及工件材料导电性极差甚至绝缘的，均不适合采用线切割加工工艺。对于线切割加工的工件，应明确加工的关键部位及关键尺寸，供选择切割参数及确定切割路线时参考。

1) 工件的拐角、夹角、窄缝的尺寸要求应符合线切割加工的特点。例如，工件拐角（或凹角）尺寸必须大于或等于电极丝半径与放电间隙之和，也就是说，切割凹角时，得到的是一个过渡的圆弧。

2) 切割窄缝的宽度 $b \geq d + 2s$ ，式中 d 为电极丝直径， s 为单边放电间隙，如图 2-20 所示。

3) 当进行凹、凸模具成套加工时，应注意电极丝的运动轨迹与图形轮廓是不同的。切凹模时，电极丝的运动轨迹处在图纸要求轮廓的内部，如图 2-21 所示；而切割凸模时，电极丝的运动轨迹处于图形轮廓的外部。

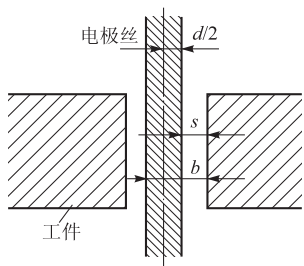


图 2-20 最窄切缝尺寸示意图

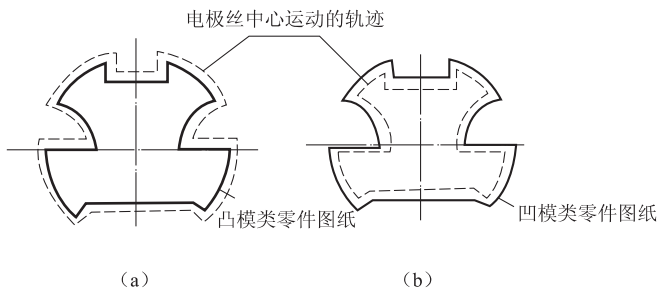


图 2-21 轨迹与轮廓的区别
(a) 切割凸模时；(b) 切割凹模时

(2) 加工前的工装夹具准备及必要的工艺准备

1) 设备的检查与调整。加工设备正常与否，直接影响着线切割加工的工艺指标和切割质量，因此必须经常对机床进行检查、维护与保养，尤其是在加工精度要求较高的重要工件之前，必须对设备进行认真的检查与调整。检验所用量具的精度等级一定要高于被检验项目精度等级一级以上。

导轮的径向跳动及 V 形槽的形状、工作台纵横向拖板丝杠副的间隙、电极丝保持器（或限幅器）等关键环节，应当经常进行检查与调整，发现问题及时排除。特别是导轮的质量与运动状况对加工质量有直接影响。其故障大致有如下几种情况：① 导轮轴承磨损，导致导轮径向跳动及轴向窜动超差（通常要求不超过 0.005 mm）、噪声加大；② 因导轮轴承润滑不足或有污物侵入，快速运动的电极丝与导轮 V 形定位面可能发生相对滑动，导致导轮 V 形面异常磨损；导轮的径向跳动及电极丝运动时的振动会造成两者接触不良而产生火花放电，使 V 形定位面烧损，从而使电极丝抖动加剧。有时，因导轮 V 形槽磨损成深沟状而易将电极丝夹断；③ 导轮轴安装时与工作台 Y 轴轴线不平行，运行时会产生振摆，且导致导轮过早损坏。

为此，除经常检查与调整外，还应注意及时清洗和去除导轮槽内的污物，延长导轮的使用寿命。

2) 保持器（或限幅器）的检查与维护。由于电极丝表面有众多放电凹坑，在高速移动时会使其接触的保持器（或限幅器）磨出沟槽，容易卡丝，因此应经常调整保持器（或限幅器）的工作面位置。

3) 选择适用的电极丝，并调整电极丝与工作台的垂直度。

① 当工件较厚且外形较简单时，宜选用直径较粗（如 $\phi 0.16$ mm 以上）的电极丝；而当工件厚度较小且形状较复杂时，宜选用较细（一般取 $\phi 0.10 \sim \phi 0.12$ mm）的电极丝。注意所选用的电极丝应在有效期内（通常为出厂后一年），过期的电极丝因表面氧化等原因，加工性能下降，不宜用于工件的加工。② 电极丝缠绕并张紧后，应校正及调整电极丝工作段对工作台面的垂直度（X、Y 两个方向）。在生产实践中，大多采用简易工具（如直角尺、圆柱棒或规则的六面体），以工作台面（或放置其上的夹具工作面）为检验基准，目测电极丝与工具表面的间隙上下是否一致，如图 2-22 所示。如上下间隙不一致，应调整至 $S_a = S_b$ 为止。

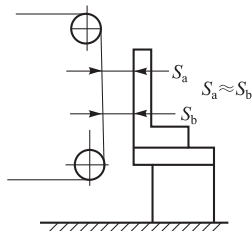


图 2-22 电极丝垂直度调整

4) 工件准备。

① 由于线切割加工多为工件的最后一道工序，因此工件外形大多具有规则的外形，可选一个适当的面作为工件的工艺基准面。对基准面应当仔细清除其表面的毛刺及污物等，以免影响定位精度。② 当工件型腔与外形位置精度要求较高时，应选定一基准边（或基准孔）供找正时使用。③ 根据型腔及工件材料的状态，选择适宜位置打穿丝孔，并以穿丝孔校准边的坐标位置。在切割凸模时，为防止工件坯料变形，尽量在坯料内部打穿丝孔，如图 2-23 所示。而对于对称加工、多次穿丝的工件，穿丝孔位置应以图 2-24（b）方案为好。④ 根据型腔特点及工件材料热处理状态，选择好切割路线，如图 2-23 及图 2-25 所示。也就是说，应仔细分析工件加工时可能产生的变形及其方向，确定合适的切割路线。一般应

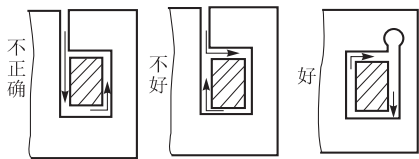


图 2-23 切凸模时加工穿丝孔的比较

将图形最后切割部位尽量靠近装夹部位。例如，在整块毛坯上切割工件时，坯料的边角处变形较大（尤其是淬火钢和硬质合金），因此确定切割位置时，应避免坯料边角，或使型腔距各边角位置大致相同。若变形问题不突出，则可按图纸的尺寸标注确定切割路线为顺时针或逆时针。

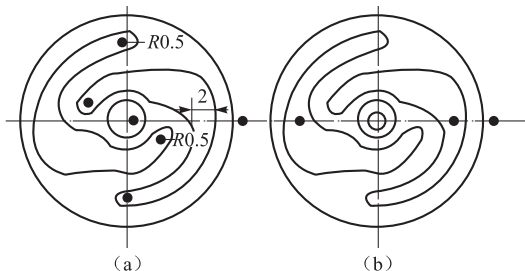


图 2-24 切内形时穿丝孔位置选择

(a) 不正确；(b) 正确

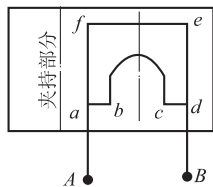


图 2-25 切割路线

(3) 编制程序

1) 首先确定坯料热处理状态、材质、电极丝直径、模具配合间隙、放电间隙（由工件材质及电参数确定）、过渡圆半径等已知条件。

2) 计算和编写加工程序。编程时，要根据坯料情况、工件轮廓形状及找正方式，选择合理的装夹位置及起割点。起割点应选择在该图形拐角处，或容易将尖锐部分修去的地方。

编程时还应考虑如何选用适当的定位以简化编程工作。工件在工作台上的位置不同，会影响工件轮廓线的方位，从而使各点坐标的计算结果不同，其加工程序也随之改变。例如，在图 2-26 (a) 中，图形的各线段均为斜线，计算各点坐标较麻烦。若使工件的 α 角变为 0° 或 90° ，则各斜线程序均变为直线程序，从而大大简化了编程工作。同样，图 2-26 (b) 图形中的 α 变为 0° 、 90° 或 45° 时，也会简化编程工作，而 α 为其他角度时，编程就变得复杂。

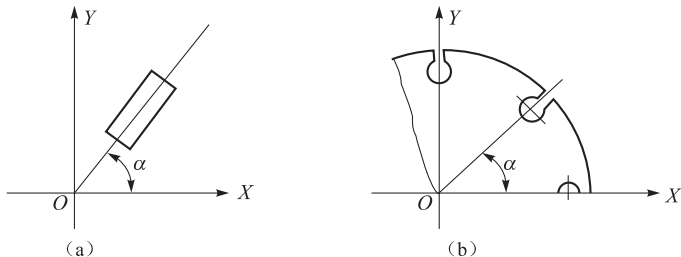


图 2-26 工件定位的合理选择

(4) 工件装夹与找正

工件装夹与找正是工件加工成败的关键工序之一，一定要认真操作。工件找正后，应根据工件图纸的技术要求如材质、热处理状态及精度要求等，选择合适的加工参数。

(5) 切割加工

为了确保最终的加工能达到图纸要求，在正式加工工件前，应使用所编制的加工程序进行样板试切。这样，既可检验程序的正确性，又可对脉冲电源的电参数及进给速度进行适当的调整，保证加工的稳定性。

完成这些准备工作后，就可以正式加工模具了。通常先加工固定板、卸料板，然后加工凸模，最后加工凹模。凹模加工完毕，不要急于松开压板取下工件，而应先取出凹模中的废料芯，清洗一下加工表面，将加工好的凸模试放入凹模中，检验配合间隙是否符合要求。若配合间隙过小，可再加工一次，修大一些；若凹模有差错，可按加工坐标程序对有差错的地方进行必要的修补（如切去差错处，补镶一块材料后再进行补充加工）。

(6) 切割后的工件应进行必要的清洗，然后对工件进行如下的检验

1) 模具各部分尺寸精度及配合间隙。例如，对落料模来说，凹模尺寸应与图纸的基本尺寸一致，凸模尺寸应为图纸基本尺寸减去冲模间隙。而对于冲孔模来说，凸模尺寸与图纸基本尺寸相同，而凹模尺寸则为图纸基本尺寸加上冲模间隙。此外，固定板与凸模为静配合，卸料板大于或等于凹模尺寸。对于级进模来说，主要是检验步距精度。

检验工具可根据模具精度要求的高低，分别选用三坐标测量机、万能工具显微镜或投影仪、内外径千分尺、块规、塞尺、游标卡尺等。通常检具的精度要高于待检工件精度一级以上。模具配合间隙的均匀性大多采用透光法进行目测。

2) 可采用平板及刀口角尺等检验垂直度。

3) 加工表面粗糙度检验，在生产现场大多使用“表面粗糙度等级比较样板”进行目测，而在实验室中则采用轮廓仪检验。

3. 常用夹具和工件装夹方法

(1) 常用夹具名称、规格和用途

1) 压板夹具，主要用于固定平板式工件，如图 2-27 所示。当工件尺寸较大时，则应成对使用。当成对使用时，夹具基准面的高度要一致。否则，因毛坯倾斜，使切割出的工件型腔与工件端面倾斜而无法正常使用。如果在夹具基准面上加工一个 V 形槽，则可用来夹持轴类圆形工件。

2) 分度夹具，主要用于加工电机定子、转子等多型孔的旋转形工件，可保证较高的分度精度。如图 2-28 所示。近年来，因为大多数线切割机床具有对称、旋转等功能，所以此类分度夹具已较少使用。

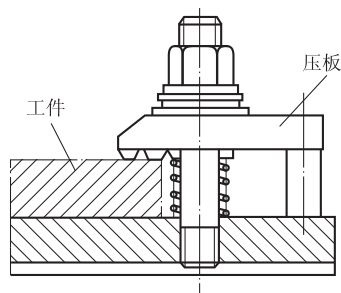


图 2-27 压板式夹具

3) 磁性夹具, 对于一些微小或极薄的片状工件, 采用磁力工作台或磁性表座吸牢工件进行加工。磁性夹具的工作原理如图 2-29 所示。当将磁铁旋转 90° 时, 磁靴分别与 S、N 极接触, 可将工件吸牢, 如图 2-29 (b) 所示; 再将永久磁铁旋转 90°, 如图 2-29 (a) 所示, 则磁铁松开工件。

使用磁性夹具时, 要注意保护夹具的基准面, 取下工件时, 尽量不要在基准面上平拖, 以防拉毛基准面, 影响夹具的使用寿命。

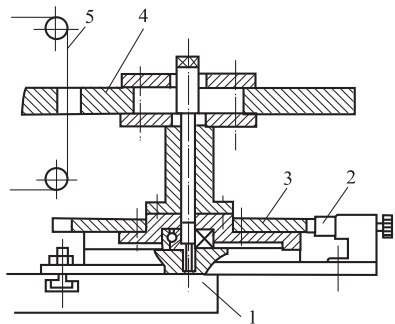


图 2-28 分度夹具结构示意图

1—工作台; 2—定位销; 3—分度转盘; 4—工件; 5—电极丝

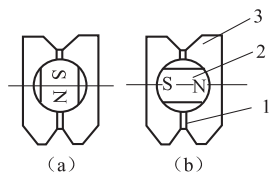


图 2-29 磁性夹具工作原理

1—铜焊层; 2—永久磁铁; 3—磁靴

(2) 工件装夹的一般要求

- 1) 工件的基准面应清洁, 无毛刺、污物及氧化皮等。
- 2) 夹具自身要制作精确, 且夹具与工作台面要固定牢靠, 不得松动或歪斜。
- 3) 工件装夹后, 既要有利于定位、找正, 又要确保在加工范围内不得与丝架臂发生干涉, 否则无法加工出合格的工件。
- 4) 夹紧力要均匀, 不得使工件局部受力过大而发生变形。
- 5) 同一类工件批量切割时, 最好制作便捷的专用夹具, 以提高加工效率。
- 6) 对细小、精密、薄壁的工件, 应先固定在不易变形的辅助夹具上, 再安装固定到机床上, 以保证加工的顺利进行。

(3) 常见的装夹方式

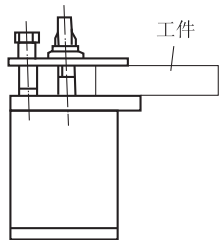


图 2-30 悬臂式支撑

1) 悬臂式支撑, 如图 2-30 所示, 这种装卡方式通用性强, 结构简单, 装夹方便。但由于处于悬臂状态, 对工件尺寸及质量有较大限制。

2) 两端式支撑, 如图 2-31 所示, 当工件尺寸较大时, 将两端分别固定在夹具上, 支撑稳定可靠, 定位精度高。

3) 桥式支撑, 如图 2-32 所示, 用两条垫铁架在两端支撑夹具体上, 跨度宽窄可根据工件大小随意调节。特别是对于带有

相互垂直的定位基准面的夹具体，这样侧面有平面基准的工件就可省去找正工序，若找正与加工基准是同一平面，则可间接推算和确定出电极丝中心与加工基准的坐标位置。这种装夹方式有利于外形和加工基准相同的工件实现成批加工。

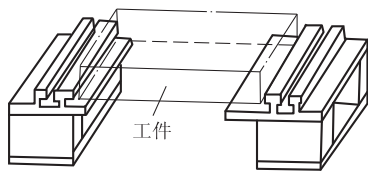


图 2-31 两端式支撑

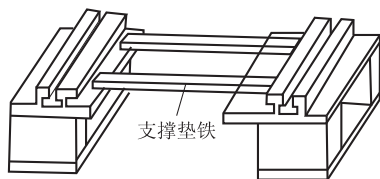


图 2-32 桥式支撑

4) 板式支撑，如图 2-33 所示，这种装夹方式是按工件的常规加工尺寸制造托板，托板上加工出矩形或圆孔，并在板上配备有 X 和 Y 向定位基准。其装夹精度易于保证，适宜在常规生产中使用。

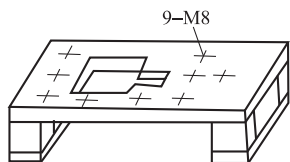


图 2-33 板式支撑

5) 复式支撑，如图 2-34 所示，这种方式是将桥式和板式支撑复合，只不过板式支撑的托板换成了专用夹具。这种夹具可以方便地实现工件的批量加工，又能快速地装夹工件，节约辅助工时，保证成批工件加工的一致性。

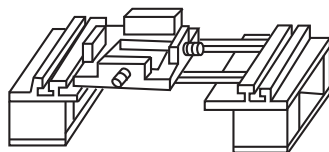


图 2-34 复式支撑

6) 专用特殊夹具：

① 当工件夹持部分尺寸太少，几乎没有夹持余量时，可采用如图 2-35 所示的夹具。由于在右侧夹具块下方固定了一块托板，使工件犹如两端支撑（托板上平面与工作台台面在一个平面上），保证加工部位与工件上下表面相垂直。② 用细圆棒状坯料切割微小零件用专用夹具，如图 2-36 所示。圆棒坯料装在正方体形夹具内，侧面用内六角螺钉固定，即可进行切割加工。③ 加工多个复杂工件的夹具，如图 2-37 所示。

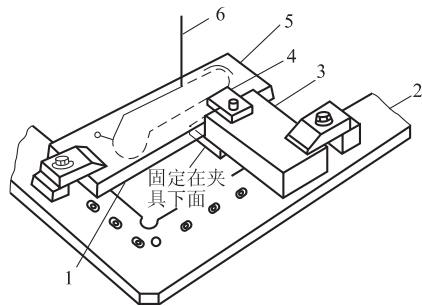


图 2-35 小余量工件的专用夹具

- 1—工件下面和台面成同一平面；
- 2—工作台；3—夹具块；
- 4—夹紧工作；5—工件；6—电极丝

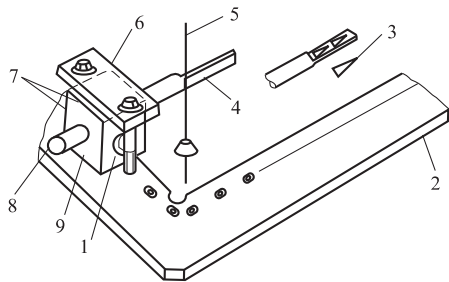


图 2-36 圆棒坯料切割专用夹具

- 1—固定用内六角螺钉；2—工作台；
- 3—用电极丝切割加工两个工件；
- 4—加工成片状；5—电极丝；6—夹子；
- 7—夹具四面平面应垂直；8—圆棒坯料；
- 9—夹具；

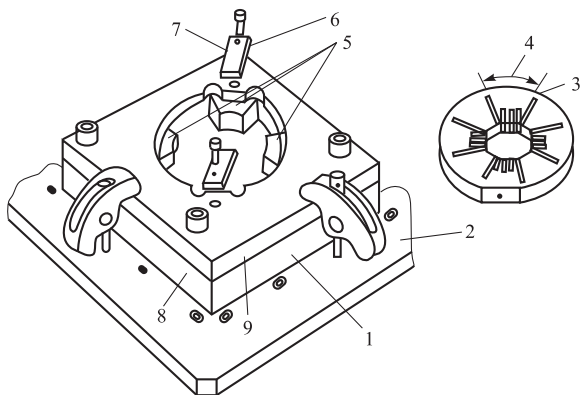


图 2-37 加工多个复杂工件的夹具

- 1—夹具；2—工作台；3—切断；4—此段成为工件；
- 5—突出部支持工件；6—夹紧工件用的夹板；7—矩形板；
- 8—下板；9—上板

2.2.4 电火花线切割编程

操作人员为了按图纸的尺寸和要求完成加工任务，必须编制工件加工程序，控制线切割机进行切割。编程是实现线切割加工的前提。线切割编程方法分手工编程法和计算机编程法。手工编程是线切割操作的一项基本功，能使操作者比较清楚地了解加工工艺过程及计算方法，但对于复杂的零件，手工编程的工作相当繁杂。近年来，利用计算机编程越来越普遍，国内绝大多数生产厂的线切割机均已采用计算机自动编程，从而大大减轻了编程的工作量，促进了线切割加工工艺的快速发展。

在编程的过程中，编制的程序必须按照一定格式才能使机器读懂并执行。线切割机床的程序格式有：3B 指令（个别扩充为 4B 或 5B）格式，多用于快走丝线切割机床。ISO 指令格式（国际标准化组织）或 EIA（美国电子工业协会）格式，多用于慢走丝线切割机床。为了提高生产效率通常一些简单的工件或单一工序加工，采用手工编程即可快速完成加工任务。

1. 3B 指令编程

3B 指令用于不具有间隙补偿功能和锥度补偿功能的数控线切割机床的程序编制。程序描述的是钼丝中心的运动轨迹，它与钼丝切割轨迹（即所得工件的轮廓线）之间差一个偏移量 f ，这一点在轨迹计算时必须特别注意。无间隙补偿的 3B 指令程序格式见表 2-4。

(1) 符号定义

1) 分隔符号 B。X、Y、J 均为数字，用分隔符号（B）将其隔开，以免混淆。

表 2-4 无间隙补偿的 3B 指令程序格式

B	X	B	Y	B	J	G	Z
分隔符号	X 坐标值	分隔符号	Y 坐标值	分隔符号	计数长度	计数方向	加工指令

2) 坐标值 (X, Y)。一般规定只输入坐标的绝对值, 其单位为微米 (μm), 微米以下应四舍五入。

对于圆弧, 坐标原点移至圆心, X, Y 为圆弧起点的坐标值; 对于直线 (斜线), 坐标原点移至直线起点, X, Y 为终点坐标值。允许将 X 和 Y 的值按相同的比例放大或缩小; 对于平行于 X 轴或 Y 轴的直线, 即当 X 或 Y 为零时, X 或 Y 值均可不写, 但分隔符号必须保留。

3) 计数方向 (G) 的选取。选取 X 方向进给总长度进行计数, 称为计 X , 用 GX 表示; 选取 Y 方向进给总长度进行计数, 称为计 Y , 用 GY 表示。

对于直线加工, 当终点的坐标在图 2-38 的各个区域时, 若 $|Y_p| > |X_p|$ 时, 取 GY ; $|X_p| > |Y_p|$ 时, 取 GX ; $|X_p| = |Y_p|$ 时, 取 GX 或 GY 均可。

对于圆弧, 当圆弧终点坐标在图 2-39 所示的各个区域时, 若 $|X_p| > |Y_p|$ 时, 取 GY ; $|Y_p| > |X_p|$ 时, 取 GX ; $|X_p| = |Y_p|$ 时, 取 GX 或 GY 均可。

计数方向的选取是否正确, 决定本条指令加工是否正确。

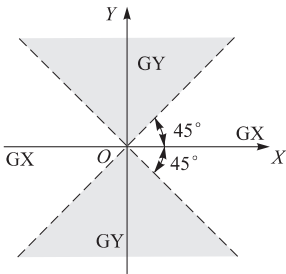


图 2-38 斜线的计数方向

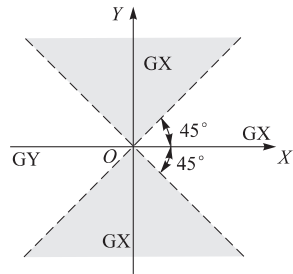


图 2-39 圆弧的计数方向

4) 计数长度 (J) 的计算。计数长度是指被加工图形在计数方向上的投影长度 (即绝对值) 的总和, 以 μm 为单位。

① 直线加工指令计数长度的计算。当计数方向确定之后, 计数长度等于该线段在计数方向坐标轴的投影。如图 2-40 所示。

② 圆弧加工指令计数长度计算。当计数方向确定之后, 计数长度等于圆弧段在计数方向坐标轴投影。如图 2-41 所示。

当圆弧段跨几个象限时, 将圆弧段在各象限在计数方向坐标轴上的投影之和作为总的计

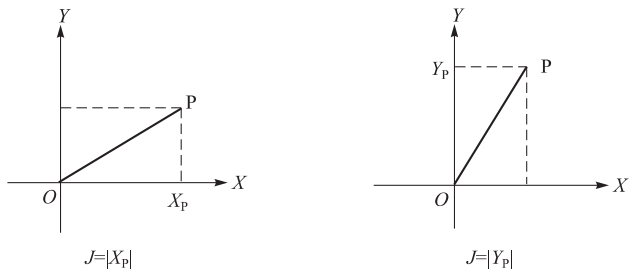


图 2-40 直线段计数长度计算

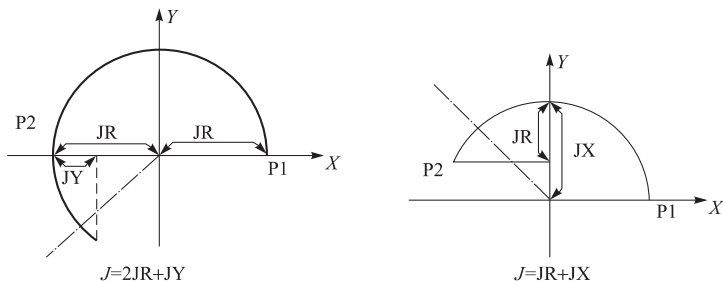


图 2-41 圆弧段计数长度的计算

数长度；当圆弧不跨过象限时，计数长度等于圆弧在计数方向坐标轴上的投影。

5) 加工指令 (Z) 的选取。

① 对于直线加工指令来说，如果直线段位于第 I、II、III、IV 象限，则加工指令分别选取为 L1、L2、L3、L4。当直线位于 X 轴上时，正向选取 L1，反向选取 L3，当直线位于 Y 轴上时，正向选取 L2，反向选取 L4。如图 2-42 所示。

② 对于圆弧加工指令来说，圆弧起点确定加工指令。加工圆弧时，若被加工圆弧的加工起点分别在坐标系的四个象限中，并按顺时针插补，加工指令分别用 SR1、SR2、SR3、SR4 表示；当起点位于 X 轴时，正向取 SR4，反向取 SR2；当起点位于 Y 轴时，正向取 SR1，反向取 SR3，如图 2-43 所示。

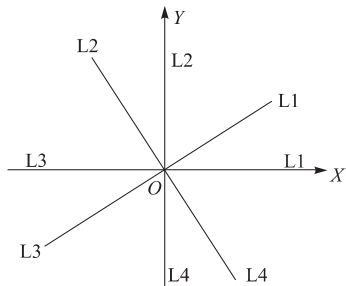


图 2-42 直线加工指令选取

按逆时针方向插补时，加工指令分别用 NR1、NR2、NR3、NR4 表示。当起点位于 X 轴时，正向选取 NR1，反向选取 NR3，当起点位于 Y 轴时，正向选取 NR2，反向选取 NR4，如图 2-44 所示。

(2) 结束符及跳步模

当一模具有多个封闭路径组成时，此模具称为跳

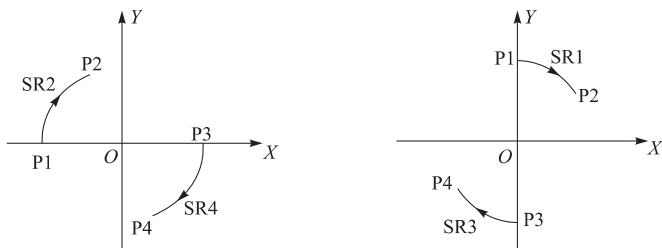


图 2-43 顺圆加工指令选取

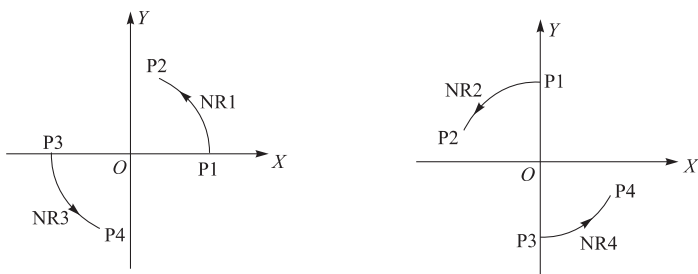


图 2-44 逆圆加工指令选取

步模。在系统中规定一个跳步模加工完毕的结束符为“D”，从前一跳步模到下一跳步模的引入段完毕后也为“D”，整个程序结束符为“DD”。例如图 2-45 所示，起割点为 P 点，沿 X 轴的正方向起割，该跳步模的 3B 程序如下：

```

B5000B0B5000GXL1
B5000B0B20000GYNR1
B5000B0B5000GXL3
D
B30000B0B30000GXL1
D
B3000B0B3000GXL1
B3000B0B12000GYNR1
B3000B0B3000GXL3
DD
    
```

(3) 编程举例

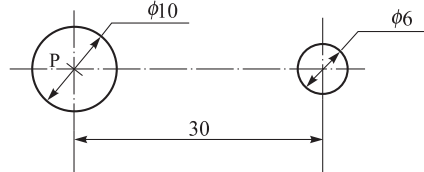


图 2-45 加工图形

1) 采用 3B 指令格式编制如图 2-46 加工程序, 其起割点为 P 点, 沿顺时针方向切割, 其 3B 程序如下:

```

B0B15000B15000GYL4
B20000B0B20000GXL1
B0B15000B30000GXSR1
B40000B0B40000GXL3
B0B15000B30000GXSR3
B20000B0B20000GXL1
B0B15000B15000GYL2
DD
    
```

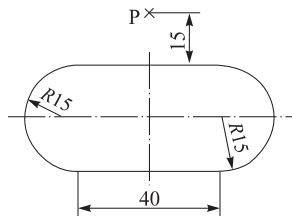


图 2-46 加工图形

2) 采用 3B 指令格式编制图 2-47 加工程序, 其起割点为 P 点, 先沿 X 轴的负方向, 再沿顺时针方向切割, 其 3B 程序如下:

```

B0B5000B5000GYL4
B0B5000B8000GYNR4
B0B7000B7000GYL2
B5000B0B5000GXL1
B0B1000B1000GYSR1
B0B17000B17000GYL4
B2000B0B2000GXSR4
B6000B0B6000GXL3
B2000B0B4000GYNR1
B6000B0B6000GXL3
B0B2000B2000GYSR3
B0B17000B17000GYL2
B1000B0B1000GXSR2
B5000B0B5000GXL1
B0B7000B7000GYL4
B4000B3000B6000GXNR2
B0B5000B5000GYL2
DD
    
```

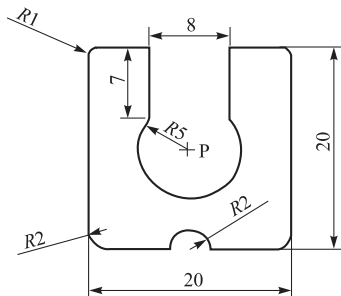


图 2-47 加工图形

2.4B 指令格式及定义

4B 指令用于具有间隙补偿功能和锥度补偿功能的数控线切割机床的程序编制。所谓间隙补偿, 指的是钼丝在切割工件时, 钼丝中心运动轨迹能根据要求自动偏离编程轨迹一段距离 (即补偿量)。当补偿量设定为偏移量 f 时, 编程轨迹即为工件的轮廓线。显然, 按工件

的轮廓编程要比按钼丝中心运动轨迹编程方便得多, 轨迹计算也比较简单。而且, 当钼丝磨损, 直径变小; 当单边放电间隙 Z 随切割条件的变化而变化后, 也无需改变程序, 只需改变补偿量即可。锥度补偿指的是, 系统能根据要求, 同时控制 X 、 Y 、 U 、 V 四轴的运动 (X 、 Y 为机床工作台的运动, 即工件的运动, U 、 V 为上线架导轮的运动, 它分别平行于 X 、 Y), 使钼丝偏离垂直方向一个角度 (即锥度), 切割出上大下小或上小下大的工件来。

4B 指令就是带 “ \pm ” 符号的 3B 指令, 为了区别于一般的 3B 指令, 故称之为 4B 指令:

\pm BX BY BJ G Z

其中的 “ \pm ” 符号用以反映间隙补偿信息和锥度补偿信息, 其他与 3B 指令完全一致。间隙补偿切割时, “+” 号表示正补偿, 当相似图形的线段大于基准轮廓尺寸时为正补偿; “-” 号表示负补偿, 当相似图形的线段小于基准轮廓尺寸时为负补偿。具体而言, 对于直线, 在 B 之前加 “ \pm ” 符号的目的仅是为了使指令的格式能够一致, 无需严格的规定, 对于圆弧, 规定以凸模为准, 正偏时 (圆半径增大) 加 “+” 号, 负偏时 (圆半径减小) 加 “-” 号。在进行间隙补偿切割时, 线和线之间必须是光滑的连接, 若不是光滑的连接, 则必须加过渡圆弧使之光滑。

3. 锥度加工指令格式及定义

锥度编程采用绝对坐标 (单位为 μm), 上下平面图形为统一的坐标系, 编程时每一一直纹面为一段。直纹面是由上平面的直线段或圆弧段与对应的下平面的直线段或圆弧段组成的母线均为直线的特殊曲面。编程时要求出这些直线或圆弧段的起点和终点, 而且上下平面的起点和终点一一对应。

(1) 指令格式

- | | | | |
|----|---------|----|-----------------------|
| 1) | X1 | Y1 | 上平面起点坐标 |
| 2) | X2 | Y2 | 上平面终点坐标 |
| 3) | L (或 C) | | L 为直线, C 为圆弧 |
| 4) | X3 | Y3 | 下平面起点坐标 |
| 5) | X4 | Y4 | 下平面终点坐标 |
| 6) | L (或 C) | | |
| 7) | A (或 Q) | | A 为段段之间的分隔符, Q 为程序结束符 |

如果第 3 行或第 6 行为 “C”, 则在第 3 行与第 4 行 (或第 6 行与第 7 行) 之间加入两行:

- | | | | |
|-------|---------|----|---------------|
| (3') | X0 | Y0 | 圆心坐标 |
| (3'') | C (或 W) | | C 为逆圆, W 为顺圆。 |

(2) 编程举例

编制图 2-48 的加工程序, 图中上平面由 0—1—2—3—4—5—6—7—8—9—1—0, 下平面由 0—1'—2'—3'—4'—5'—6'—7'—8'—9'—1'—0, 为变锥不等过渡圆弧的加工工件。

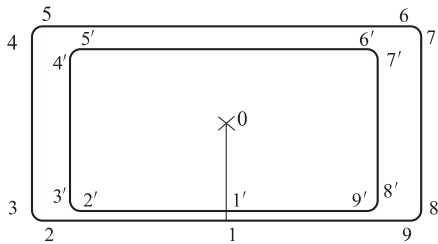


图 2-48 加工图形

加工程序如下:

1) 0	0	0 点坐标, 上平面由 0 点开始
0	-6000	切到 1 点坐标
L		0—1 为直线
0	0	0 点坐标, 下平面由 0 点开始
0	-5500	切割到 1' 点坐标
L		0—1' 为直线
A		第一段完毕
2) 0	-6000	第二段上平面由 1 切到
-9700	-6000	第 2 点
L		1-2 为直线
0	-5500	第二段下平面由 1' 切到
-7700	-6600	第 2' 点
L		1'—2' 为直线
A		第二段完毕
3) -9700	-6900	第三段上平面由 2 切到
-10000	-5700	第 3 点
C		2—3 为圆弧
-9700	-5700	圆心坐标为 (-9 700, -5 700)
W		顺圆
-7700	-5500	第三段下平面由 2' 切到
-8000	-5200	3' 点
C		2'—3' 为圆弧
-7700	-5200	圆心坐标为 (-7 700, -5 500)
W		顺圆

A		第三段完毕
4)	-10000 -5700	
	-10000 5700	
L		
	-8000 -5200	
	-8000 4200	
L		
A		第四段完毕
5)	-10000 5700	
	-9700 6000	
C		
	-9700 5700	
W		
	-8000 4200	
	-7700 4500	
C		
	-7700 4200	
W		
A		第五段完毕
6)	-9700 6000	
	9700 6000	
L		
	-7700 4500	
	7700 4600	
L		
A		第六段完毕
7)	9700 6000	
	10000 6700	
C		
	9700 6700	
W		
	7700 4600	
	8000 4200	
C		

	7700	4200	
	W		
	A		第七段完毕
8)	10000	5700	
	10000	-5700	
	L		
	8000	4200	
	8000	-5200	
	L		
	A		第八段完毕
9)	10000	-5700	
	9700	-6000	
	C		
	9700	-5700	
	W		
	8000	-5200	
	7700	-5500	
	C		
	7700	-5700	
	W		
	A		第九段完毕
10)	9700	-6000	
	0	-6000	
	L		
	7700	-5500	
	0	-5500	
	L		
	A		第十段完毕
11)	0	-6000	最后一段上平面由 1 点
	0	0	切到 0 点
	L		1—0 为直线
	0	-5500	最后一段下平面由 0 点
	0	0	切到 0 点
	L		1'—0 为直线

Q

程序结束

编制图 2-49 所示“上圆下方”的加工程序。

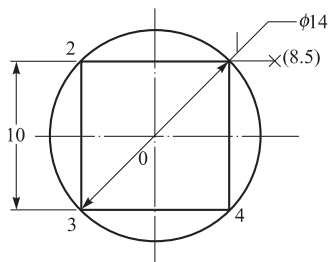


图 2-49 加工图形

加工程序如下：

1) 8000	5000	入切段上平面由 (8, 5)
6000	5000	切到 (5, 5)
L		直线
8000	5000	下平面也由 (8, 5)
5000	5000	切到 (5, 5)
L		直线
A		本段结束
2) 5000	5000	第一段上平面由 (5, 5)
-5000	5000	切到 (-5, 5)
C		逆圆弧
0	0	圆心为 (0, 0)
C		逆圆弧
5000	5000	下平面由 (5, 5)
-5000	5000	切到 (-5, 5)
L		直线切割
A		本段结束
3) -5000	5000	第二段开始
-5000	-5000	
C		
0	0	
C		
-5000	5000	

```

-5000    -5000
L
A
4) -5000    -5000          第三段开始
5000     -5000
C
0        0
-5000   -5000
5000    -5000
L
A
5) 5000    -5000          第四段开始
5000     5000
C
0        0
C
5000    -5000
5000     5000
L
A
6) 5000    5000          返回
8000     5000
L
5000     5000
8000     5000
L
Q          程序结束
    
```

4. ISO (G 代码) 指令编程

大部分慢走丝线切割机床多采用 ISO 代码编程, 为了与国际接轨, 我国部分线切割生产厂家已开始在快走丝线切割机床上采用 ISO 代码。以下介绍 ISO 代码编程。

(1) G 功能代码

1) 定义工件起点指令 (G92)。用于设置加工程序在所选坐标系中的起始点坐标, 其指令格式与数控铣削加工中的 G92 指令格式相同。作为钼丝穿丝点的坐标值, 一般为加工程序的起始点。

与数控铣削加工不同的是：对于线切割加工，在用 G54 ~ G59 设定的工件坐标系中，依然需要用 G92 设置加工程序在所选坐标系中的起始点坐标。例如，工件坐标系已用 G54 设置，加工程序的起始点坐标设置为 (10, 10)，用直线插补 (G01) 移动到点 (30, 30) 的位置，其程序为：

```
G54          建立工件坐标系
G90          绝对坐标编程（绝对坐标和相对坐标编程与数控铣削加工完全相同）
G92X10000Y10000  设定钼丝当前位置在所选坐标系中的坐标值为（10，10）。
G01X30000Y30000  直线插补移动到（30，30）
```

2) 快速定位指令 (G00)。在线切割机床不放电的情况下，使指定的坐标轴以快速运动方式从当前所在位置移动到指令给出的目标位置，只能用于快速定位，不能用于切削加工。例如：

```
G90G00X1000Y2000  使电极丝快速移动到（1，2）坐标的位置。注意 G00 指令有效时，一般还没有穿丝。
```

如果在 G00 指令中包含 X、Y、U、V，机床将按 X、Y、U、V 的顺序移动各坐标轴。

3) 直线插补指令 (G01) 格式为：

```
G01X _ Y _          平面二维轮廓的直线插补
G01X _ Y _ U _ V _  锥度轮廓的直线插补
```

与数控铣削加工不同的是，线切割加工中的直线插补和圆弧插补不要求进给速度指令。

4) 圆弧插补指令 (G02, G03)。指令格式与数控铣削加工中的圆弧插补指令格式完全相同，但应注意，数控线切割加工没有坐标平面选择功能，只有 G02 (或 G03) X _ Y _ I _ J _ 一种格式，其中 I、J 是圆心在 X、Y 轴上相对于圆弧起点的坐标。另外一个整圆不能只用一条圆弧插补指令来描述，编程时需要将圆分成两段以上的圆弧才行。

5) 镜像和交换指令 (G05、G06、G07、G08、G09、G10、G11、G12)。对于加工一些对称性好的工件，利用原来的程序加上上述指令，很容易产生一个与之对应的新程序，如图 2-39 所示。

```
G05 (X 镜像)          函数关系式：X = -X
G06 (Y 镜像)          函数关系式：Y = -Y
G07 (X、Y 交换)      函数关系式：X = Y  Y = X
G08 (X、Y 镜像)      函数关系式：X = -X  Y = -Y  即：G08 = G05 + G06
G09 (X 镜像、X、Y 交换)  即 G09 = G05 + G07
G10 (Y 镜像、X、Y 交换)  即 G10 = G06 + G07
G11 (X 镜像、Y 镜像、X、Y 交换)  即 G11 = G05 + G06 + G07
```

G12 (取消镜像) 每个程序镜像结束后都要加上该指令，具体如图 2-50 所示。

6) 线径补偿指令 (G40、G41、G42)。

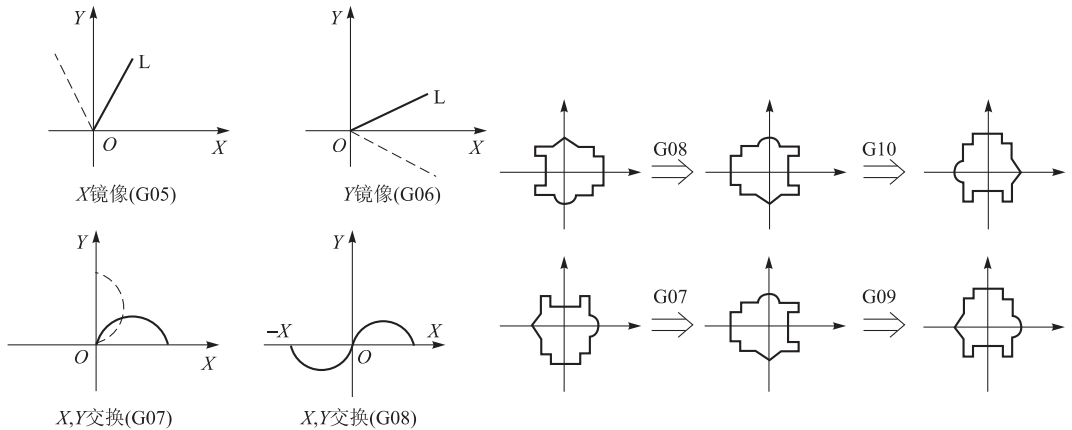


图 2-50 镜像和交换举例

指令的意义与数控铣削加工中的刀具半径补偿指令的意义完全相同，但指令格式不同。线径补偿的格式如下例：

G92X0Y0

G41D100

线径左补偿，D100 为补偿值，表示 100 μm ，此程序段需放在进刀线之前

G01X5000Y0

进刀线，建立线径补偿

G40

需放在退刀线之前

G01X0Y0

退刀线，退出线径补偿

7) 锥度加工指令 (G50、G51、G52)。线切割加工带锥度的零件一般采用锥度加工指令，G51 为锥度左偏加工指令，G52 为锥度右偏加工指令，G50 为取消锥度加工。这是一组模态加工指令，缺省状态为 G50。判断锥度的左、右偏的方法：以工件的底面为基准，假设人沿着加工方向走，左右手代表钼丝倾斜的方向。当钼丝向左手方向倾斜时，采用 G51；当钼丝向右手方向倾斜时，采用 G52。如图 2-51 (a) 所示，按顺时针方向切割，加工出上大下小工件，钼丝应向左手方向倾斜，所以采用 G51 (锥度左偏) 指令进行切割。如图 2-51 (b) 所示，按顺时针方向切割，加工出上小下大工件，钼丝应向右手方向倾斜，所以采用 G52 (锥度右偏) 指令进行切割加工。按逆时针方向进行线切割加工时，判断方法同上。如图 2-51 (c) 所示，按逆时针方向进行切割，加工上小下大工件应采用 G51 (锥度左偏) 指令。如图 2-51 (d) 所示，按逆时针方向进行线切割，加工上大下小工件，应采用 G52 (锥度右偏) 指令。

锥度加工与上导轮中心到工作台面的距离 S 、工件厚度 H 、工作台面到下导轮中心的距离 W 有关。进行锥度加工编程之前，要求给出 W 、 H 、 S 值，如图 2-52 所示。

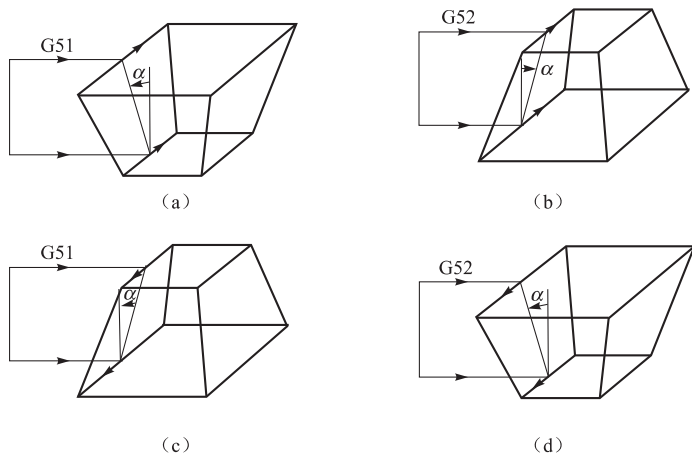


图 2-51 锥度加工指令的意义

(a) 顺时针方向加工 G51; (b) 顺时针方向加工 G52;
 (c) 逆时针方向加工 G51; (d) 逆时针方向加工 G52

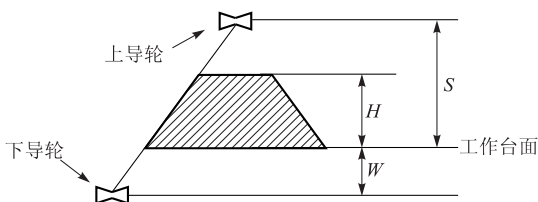


图 2-52 锥度线切割加工中的参数定义

格式:

G92X0Y0

W60000

工作台面到下导轮中心的距离 W 占 60 mm

H40000

工件厚度 $H = 40$ mm

S100000

上导轮中心到工作台面的距离 S

G52A3

在进刀线之前, 设定锥度为 3°

:

G50

G50 需放在退刀线之前

M02

8) 工件坐标系 (G54、G55、G56、G57、G58、G59) 可建立 6 个工作坐标系。G92 设定起始点坐标之前, 可以用 G54 到 G59 选择坐标系。

G92X0Y0	设定电极丝当前位置在所选坐标系中的位置为 (0, 0)
G54	建立 G54 坐标系, 原点为电极丝当前所在位置
G00X10000Y20000	在 G54 坐标系, 将电极丝快速移动到 (10, 20) 的位置
G55	建立 G55 坐标系
G92X0Y0	设定原点为电极丝当前所在位置, 即 G54 坐标系中 (10, 20) 位置

下面的程序如果不选择工作坐标系, 则当前坐标系被自动设定为本程序的工作坐标系。

9) 接触感知 (G80)。利用接触感知 G80 指令, 可以使电极丝从当前位置, 沿某个坐标轴运动, 接触工件, 然后停止。该指令只在“手动”加工方式时有效。

10) 半程移动 (G82)。利用半程移动 G82 指令, 使电极丝沿指定坐标轴移动指令路径一半的距离。该指令只在“手动”加工方式时有效。

11) 校正电极丝 (G84)。校正电极丝 G84 指令的功能是通过微弱放电, 校正电极丝, 使之与工作台垂直。在进行加工之前, 一般要先进行校正。此功能有效后, 开丝筒、高频钼丝接近导体会产生微弱放电。该指令只在“手动”加工方式时有效。

(2) M 功能代码

1) 程序暂停 (M00)。执行 M00 以后, 程序停止, 机床信息将被保存, 按“回车”键继续执行下面的程序。

2) 程序结束 (M02)。主程序结束, 加工完毕返回菜单。

3) 接触感知解除 (M05)。解除接触感知 G80。

4) 子程序调用 (M96)。调用子程序。

5) 子程序结束 (M97)。主程序调用子程序结束。

6) 转角控制开启 (M37)。

7) 转角控制关闭 (M39)。

8) 放电启动 (M84)。

9) 放电关闭 (M85)。

(3) 编程举例

1) 采用线径补偿加工一矩形凸块, 如图 2-53 所示。

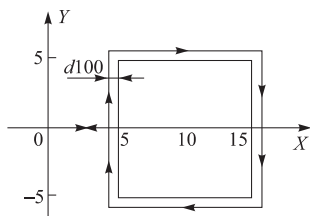


图 2-53 加工图形

G92X0Y0

G41D100

G01X5000Y0

G01X5000Y5000

G01 X15000Y5000

G01X15000Y - 5000

线径左补偿, D100 表示半径补偿值 = 钼丝半径 + 放电间隙 = 0.1 mm

设定进刀线, 并在进刀线程序段内建立线径左补偿

G01 X5000Y - 5000

G01 X5000Y0

G40 取消线径补偿

G01X0Y0 退刀线，并在退刀线程序段内取消线径左补偿

采用线径补偿切割时，进刀线和退刀线不能与程序的第一条边或最后一条边重合或平行。切多边形时进刀线应。切多边形时进刀线应该选择 45° 方向或垂直进刀，如果选择平行或重合或极小角度进刀，则容易出错。

2) 线切割加工带锥度的正方棱锥体工件，如图 2-54 所示。其程序为：

G92X0Y0

W60000 W60000 表示下导轮中心与工作台面之间的距离为 60 mm

H40000 H40000 表示工件厚度为 40 mm

S100000 S100000 表示上导轮中心到工作台面之间的距离为 100 mm

G520A4 G520A4 表示锥度为 4° ，形状为上小下大（顺时针方向切割）

G01X 000Y0 进刀线：建立锥度加工

G01X5000YS000 工件下表面的实际加工路径：直线插补

G01X15000Y5000

G01X15000Y - 5000

G01XS000Y - 5000

G01XS000Y0

G50 取消锥度加工

G01X0Y0 退刀线：执行取消锥度加工

M02

注意：对于方锥，由于棱角是一个复合角，如果复合角大于 6° 时，将不能加工。

5. 自动编程

编程人员根据零件图尺寸要求，利用计算机绘出要加工图形，由计算机自动生成线切割加工程序，传输给机床进行切割。当前市场上流行的软件主要有基于 DOS 开发的或 Windows 开发的，如 TCAD、AUTOP、CAXA、Y CUT 以及 ESPRIT、MasterCAM 等软件。不同的数控系统自动编程方法各有区别，不同的软件也各有特点，但它们产生的程序形式基本是上面所列几种，通常只需对相应的软件进行学习即可操作，这里不再叙述。

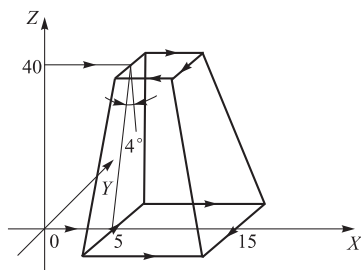


图 2-54 加工图形

2.3 快速成型制造技术

2.3.1 RPM 技术的产生与发展

随着全球市场一体化的形成,制造业的竞争日益激烈,产品开发的速度和能力已成为制造业市场竞争的实力基础。同时,制造业为满足日益变化的个性化市场需求,又要求制造技术有较强的灵活性,能够以小批量甚至单件生产而不增加产品的成本。因此,产品的开发速度和制造技术的柔性就变得十分关键。从技术发展角度,计算机科学、CAD 技术、材料科学、激光技术的发展和普及为新的制造技术的产生奠定了基础。然而在产品的设计完成到批量生产阶段之间,往往还要制造产品的原型样品,以便尽早地对产品设计进行验证和改进,但是按常规方法制作产品原型,一般需采用多种机床加工或手工造型,时间长达几周或几个月,加工费用昂贵。另外,对于某些复杂形状的零件和硬质合金材料,即使采用多轴 CNC 加工也还存在一些无法解决的问题。

在此背景下,20 世纪 80 年代末、90 年代初发展起来的快速成型技术(Rapid Prototyping & Manufacturing,简称 RPM),突破了传统的加工模式,不需机械加工设备即可快速地制造形状极为复杂的工件,被认为是近 20 年制造技术领域的一次重大突破。作为与科学计算可视化 and 虚拟现实相匹配的新兴技术,快速成型技术提供了一种可测量、可触摸的手段,是设计者、制造者与用户之间的新媒体。RPM 技术综合机械、电子、光学、材料等学科,可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转化为具有一定功能的原型或直接制造零件/模具,有效地缩短了产品的研究开发周期。它是当前世界上先进的产品开发与快速工具制造技术。

目前,全球范围出现了数十种 RPM 工艺技术,有数百家从事这项技术的开发、商品化生产和技术服务工作。1995 年 RPM 的市场增长率为 49%,1996 年 RPM 设备市场销售额已达 4.2 亿美元,1998 年达到 10 亿美元。

我国在国家自然科学基金委员会和科技部的支持下于 20 世纪 90 年代初进入 RPM 领域。清华大学、西安交通大学、华中科技大学、南京航空航天大学等单位对 RPM 设备、材料和软件方面进行了大量的研究,并先后完成了产品的开发和商品化工作,许多关键技术达到或领先国际先进水平。

由于各国十分重视快速成型技术,十分复杂的零部件已能用快速成型技术制造出来,企业应用该技术所取得的效益十分明显。有人将其称为继数控技术之后的制造领域又一场技术革命。

2.3.2 RPM 技术原理

传统的零件加工过程是先制造毛坯,然后经切削加工,从毛坯上去除多余的材料得到零

件的形状和尺寸，这种方法统称为材料去除制造。

快速成型技术彻底摆脱了传统的“去除”加工法，而基于“材料逐层堆积”的制造理念，将复杂的三维加工分解为简单的材料二维的组合，它能在 CAD 模型的直接驱动下，快速制造任意复杂形状的三维实体，是一种全新的制造技术。其基本过程如下：

1. 建立产品的三维 CAD 模型

设计人员可以应用各种三维 CAD 造型系统，包括 Solidworks、Solidedge、UG、Pro/E、CATIA 等进行三维实体造型，将设计人员所构思的零件概念模型转换为三维 CAD 数据模型。也可通过三坐标测量仪、激光扫描仪、核磁共振图像、实体影像等方法对三维实体进行反求，获取三维数据，以此建立实体的 CAD 模型。

2. 三维模型的近似处理

由三维造型系统将零件 CAD 数据模型转换成一种可被快速成型系统所能接受的数据文件，如 STL、IGES 等格式文件。目前，绝大多数快速成型系统采用 STL 格式文件，因 STL 文件易于进行分层切片处理。所谓 STL 格式文件即为对三维实体内外表面进行离散化所形成的三角形文件，所有 CAD 造型系统均具有对三维实体输出 STL 文件的功能。

3. 三维模型的 Z 向离散化（即分层处理）

将三维实体沿给定的方向切成一个个二维薄片的过程，薄片的厚度可根据快速成型系统制造精度在 0.05 ~ 0.5 mm 之间选择。

4. 逐层堆积制造

根据层片几何信息，生成层片加工数控代码，用以控制成型机的加工运动。在计算机的控制下，根据生成的数控指令，RP 系统中的成型头（如激光扫描头或喷头）在 X - Y 平面内按截面轮廓进行扫描，固化液态树脂（或切割纸、烧结粉末材料、喷射热熔材料），从而堆积出当前的一个层片，并将当前层与已加工好的零件部分黏合。然后，成型机工作台面下降一个层厚的距离，再堆积新的一层。如此反复进行直到整个零件加工完毕。

5. 后处理

对完成的原型进行处理，如深度固化、去除支撑、修磨、着色等，使之达到要求。快速成型工艺流程如图 2 - 55 所示。

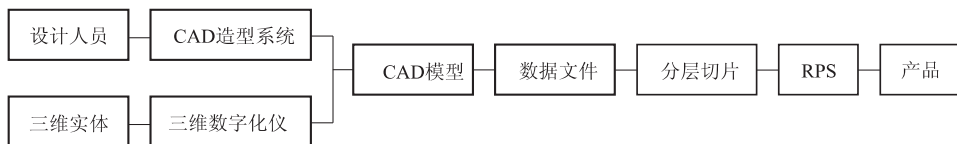


图 2 - 55 快速成型工艺流程

2.3.3 典型的RPM工艺方法

自从1988年世界第一台快速成型机问世以来,各种不同的快速原型工艺相继出现并逐渐成熟。目前快速原型方法有几十种,其中以SLA、LOM、SLS、FDM工艺使用最为广泛和成熟。下面简要介绍几种典型的快速原型工艺的基本原理。

1. 光固化成型法 (SLA, Stereo Lithography Apparatus)

光固化成型工艺,也称为光敏液相固化法、立体印制和立体光刻。该工艺是基于液态光敏树脂的光聚合原理工作的,这种液态材料在一定波长和功率的紫外光照射下能迅速发生光聚合反应,分子量急剧增大,材料就从液态转变成固态。

图2-56为SLA工艺原理图,液槽中盛满液态光敏树脂,氦-镉激光器或氩离子激光器发出的紫外激光束在偏转镜作用下,能在液体表面进行扫描,扫描的轨迹及光线的有无均按零件的各分层截面信息由计算机控制,光点扫描到的地方液体就固化。成型开始时,工作平台在液面下一个确定的深度,聚焦后的光斑在液面上按计算机的指令逐点扫描,即逐点固化。一层扫描完成后,未被照射的地方仍是液态树脂。然后工作台下下降一个层厚的高度,已成型的层面上又布满一层液态树脂,然后刮刀将黏度较大的树脂液面刮平,进行下一层的扫描加工,新固化的一层牢固地黏在前一层上,如此重复直到整个零件制造完毕,得到一个三维实体原型。

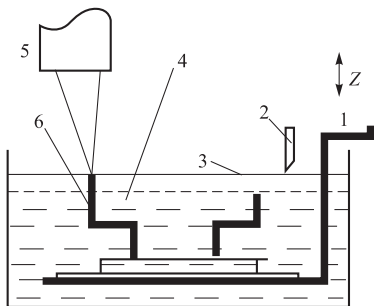


图2-56 SLA工艺原理图

1—升降台; 2—刮平器; 3—液面; 4—光敏树脂;
5—紫外激光器; 6—成型零件

SLA方法的工艺特点是: ①可成型任意复杂形状的零件; ②成型精度高, 可达到 $\pm 0.1\text{ mm}$ 的制造精度; ③材料利用率高, 性能可靠。

SLA方法主要用于产品外形评估、功能试验、快速制造电极和各种快速模具; 不足之处是所需设备及材料价格昂贵, 光敏树脂有一定毒性, 不符合绿色制造趋势。

2. 叠层实体制造法 (LOM, Laminated Object Manufacturing)

叠层实体制造法, 也称分层实体制造, 该工艺是利用背面带有粘胶的箔材或纸材相互黏结成型的。

图2-57为LOM工艺原理图。单面涂有热熔胶的纸卷套在供纸辊上, 并跨过支撑辊缠绕在收纸辊上。伺服电动机带动收纸辊转动, 使纸卷沿图中箭头所示的方向移动一定距离。工作台上上升至与纸面接触, 热压辊沿纸面自右向左滚压, 加热纸背面的热熔胶, 并使这一层纸与基板上的前一层纸黏合。 CO_2 激光器发射的激光束跟踪零件的二维截面轮廓数据进行切割, 并将轮廓外的废纸余料切割出方形小格, 以便于成型过程完成后的剥离。每切割完一个

截面，工作台连同被切出的轮廓层自动下降至一定高度，重复下一次工作循环，直至形成由一层层横截面黏叠的立体纸质原型零件。然后剥离废纸小方块，即可得到性能似硬木或塑料的“纸质模样产品”。LOM 工艺成型速度快，成型材料便宜，无相变，无热应力，形状和尺寸精度稳定，但成型后废料剥离费时。适合于航空、汽车等行业中体积较大的制件。

3. 选择性激光烧结法 (SLS, Selective Laser Sintering)

选择性激光烧结工艺是利用粉末状材料在激光照射下烧结的原理，在计算机控制下层层堆积成型的。

图 2-58 为 SLS 工艺原理图。加工时，将材料粉末铺撒在已成型零件的上表面，并刮平；用高强度的 CO_2 激光器在刚铺的新层上以一定的速度和能量密度按分层轮廓信息扫描出零件截面，材料粉末在高强度的激光照射下被烧结在一起，得到零件的截面，并与下面已成型的部分连接，未扫描过的地方仍然是松散的粉末；当一层截面烧结完后，铺上新的一层材料粉末，选择地烧结下一层截面，如此反复直到整个零件加工完毕，得到一个三维实体原型。

SLS 工艺的特点是取材广泛，不需要另外的支撑材料。所用的材料包括石蜡粉、尼龙粉和其他熔点较低的粉末材料。

4. 熔融沉积制造法 (FDM, Fused Deposition Modeling)

熔融沉积制造工艺是利用热塑性材料的热熔性、黏结性，在计算机控制下层层堆积成形的。

图 2-59 为 FDM 工艺原理图，其所使用的材料一般是蜡、ABS 塑料、尼龙等热塑性材料，以丝状供料。材料通过送丝机构被送进带有一个微细喷嘴的喷头，并在喷头内被加热熔化。在计算机的控制下，喷头沿零件分层截面轮廓和填充轨迹运动，同时将熔化的材料挤出。材料挤出喷嘴后迅速凝固并与前一层熔结在一起。一个层片沉积完成后，工作台下下降一个层厚的距离，继续熔喷沉积下一层，如此反复直到完成整个零件的加工。

FDM 工艺无需激光系统，因而设备简单，运行费用便宜，尺寸精度高，表面粗糙度好，特别适合薄壁零件。但需要支撑，这是其不足之处。

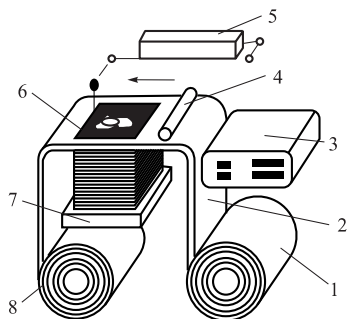


图 2-57 LOM 工艺原理图

1—供纸辊；2—料带；3—控制计算机；4—热压辊；
5— CO_2 激光器；6—加工平面；7—升降工作台；8—收纸辊

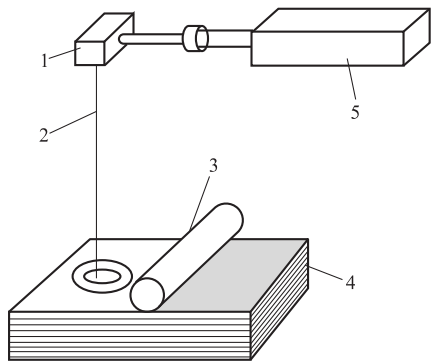


图 2-58 SLS 工艺原理图

1—扫描镜；2—激光束；3—平整辊；
4—粉末；5—激光器

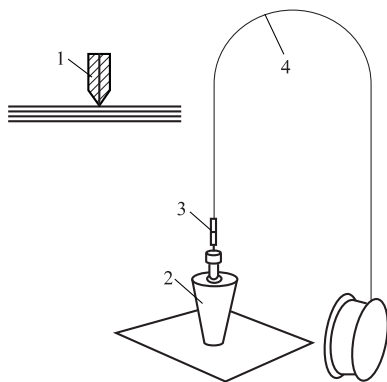


图 2-59 FDM 工艺原理图

1—喷头；2—成型工件；
3—喷头；4—料丝

2.3.4 RPM 技术的应用

如图 2-60 所示，RPM 技术在国民经济极为广泛的领域得到了应用，并且还在向新的领域发展。

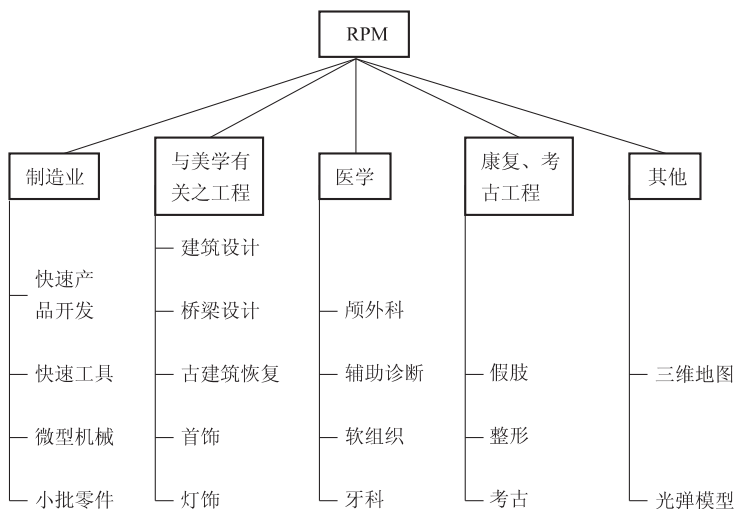


图 2-60 RPM 应用

1. 快速产品开发 (RPD)

RPM 在快速产品开发中的应用如图 2-61 所示。

RPM 在产品开发中的关键作用和重要意义是很明显的，它不受形状复杂程度的限制，

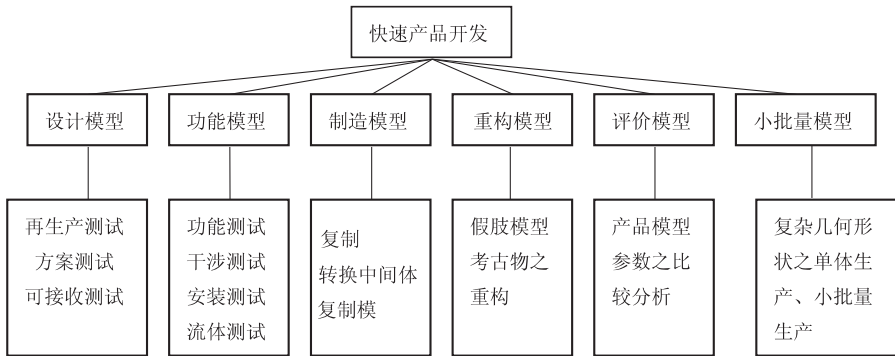


图 2-61 RPM 在快速产品开发中应用

可迅速地将显示于计算机屏幕上的设计结果变为可进一步评估的实物原型，根据该原型可对设计的正确性、造型的合理性、可装配和干涉性进行具体的检验。对于一些新产品，或像模具这样形状复杂、造价昂贵的零件，若根据 CAD 模型直接进行最终的加工制造，风险很大，有时往往需要多次返工才能成功，这不仅研制周期长，资金消耗也相当大。通过 RPM 原型的检验可将这种风险减小到最低限度。

采用 RPM 快速产品开发技术可减少产品开发成本 30% ~ 70%，缩短开发周期 50%。如德国一公司开发光学照相机机体，采用 RPM 技术从 CAD 建模到原型制作仅需 3.5 天时间，耗费 5 000 马克；而用传统的方法则至少需一个月，耗费 3 万马克。

2. RPM 在医学领域中的应用

在医学上，应用 RPM 技术进行辅助诊断和辅助治疗的应用也得到日益推广。如脑外科、骨外科，可直接根据 CT 扫描和核磁共振数据转换成 STL 文件，再采用各种 RPM 工艺技术均可制造出病变处的实体结构，以帮助外科医生确定复杂的手术方案。在骨骼制造和人的器官制造上，RPM 有着独特的用处，如人的右腿遭遇粉碎性骨折，则用左腿的 CT 数据经对称处理后可获得右腿粉碎破坏处的骨组织结构数据，通过 RPM 技术制取骨骼原型，可取代已破坏的骨骼，注以生长素，可在若干天后与原骨骼组织长为一体。这项技术已在清华大学等单位所掌握并开始应用。

3. 快速模具制造 (RT, Rapid Tooling)

随着多品种小批量时代的到来以及快速占领市场的需要，开发快速经济型模具越来越引起人们的重视。RT 技术无需数控铣削，无需电火花加工，无需专用工装，直接根据 RPM 原型可将复杂的模具型腔制造出来，是当今 RPM 技术的最大优势。RT 技术与传统模具制造技术相比，可节省 1/3 的时间和成本。图 2-62 为各种基于快速原型的 RT 技术示意图。由图可见，RT 技术可分为直接制模和间接制模两大类，各自又都有许多不同的工艺方法，范围

之广，足以使人们根据产品规格、性能要求、精度需要、成本控制、交货期限来选择合适的技术路线。

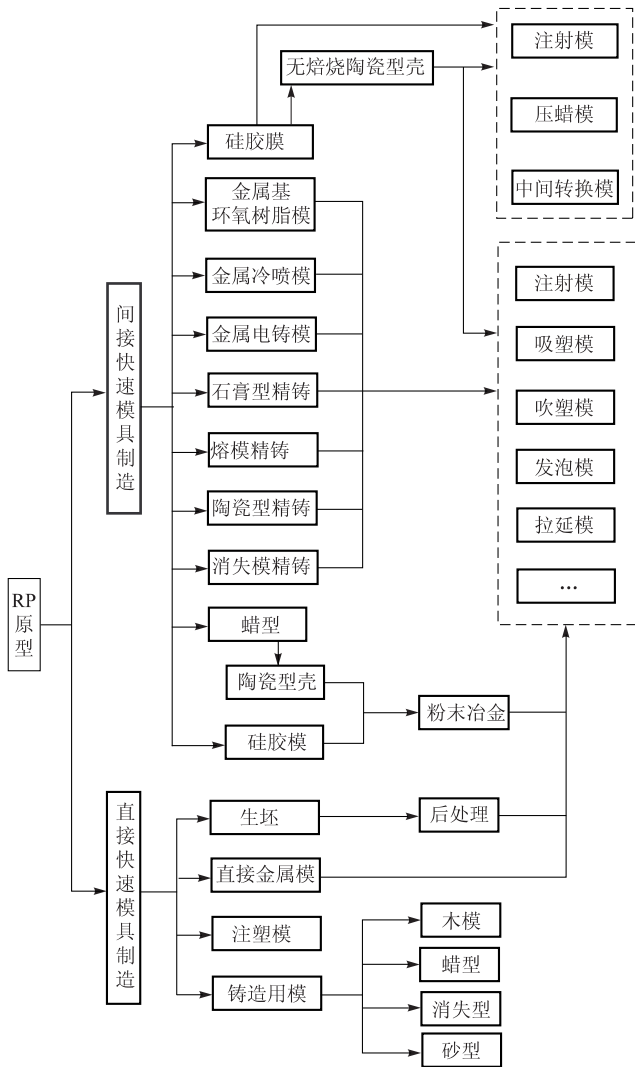


图 2-62 快速模具制造工艺路线

(1) 间接制模

间接制模是指利用 RPM 技术首先制造模芯，然后用此模芯复制软质模具，或制作金属硬模具，或者制作加工硬模具的工具。相对于直接制模来说，间接制模技术比较成熟，常用的技术方法和工艺有如下几种。

1) 硅橡胶浇注法。硅橡胶浇注法是以 RPM 原型为母模, 采用硫化的有机硅橡胶制作硅橡胶软模。其工艺过程为: 对 RPM 原型进行表面处理, 并在原型表面涂洒脱模剂; 将原型放置在模框内并进行固定, 同时在真空室对硅橡胶进行配置混合; 抽去气泡, 向已准备好的模框内浇注混合的硅橡胶液; 待硅橡胶固化后开模, 取出原型, 便得到所需的硅橡胶模。这种 RT 工艺方法可不考虑增设模具拔模斜度, 有较好的切割性能, 用薄刀片就可容易地将硅橡胶切开。因此用硅橡胶来复制软质模具时, 可以先不分上下模, 整体浇注出模具后再由预定的分模面将其切开, 取出原型, 即可得到上下模。目前高温硫化硅橡胶模可作为压铸模, 铸造如锌合金这样的金属件, 寿命可达 200 ~ 500 件。

2) 树脂浇注法。树脂浇注法是以液态环氧树脂作为基体材料, 将 RPM 原型进行表面处理并涂洒脱模剂, 选择设计分型面, 然后进行环氧树脂浇注, 取出原型后, 便得到所需软质模具。环氧树脂模的制作工艺简单, 成本低廉, 传热性好、强度高, 适合于注塑模、吸塑模等模具, 其寿命可达 3 000 件。

3) 精密铸造陶瓷型模具。其工艺过程为: RPM 原型→复制硅橡胶或环氧树脂软模→移去母模原型→利用软模浇注或喷涂陶瓷浆料并硬化→浇注金属形成金属模→金属模型腔表面抛光→加入浇注系统和冷却系统→批量生产用注塑模具。

4) 电铸法制作金属模。工艺过程: RPM 原型→复制软模→移去母模原型→在软模中浇注石蜡石膏模型→石蜡石膏模型表面金属化处理→电铸、形成金属硬壳→制作背衬→加入浇注系统和冷却系统→作为注塑、压铸模具。

5) 金属熔射喷涂法制作金属模。工艺过程: RPM 原型表面处理→原型表面喷涂雾状金属、形成金属硬壳→制作背衬→加入浇注系统和冷却系统→作为注塑、压铸模具。所制作的模具力学性能好, 可以作为工作压力较高的模具。

6) 熔模铸造制作模具。工艺过程: RPM 原型→制作蜡模压型→蜡模→利用蜡模熔模铸造制成金属模。

(2) 直接制模

随着 RPM 技术的发展, 可用来制造原型的材料越来越多, 性能也在不断改进, 一些非金属 RPM 原型已有较好的机械强度和热稳定性, 可以直接用作模具。如采用 LOM 工艺的纸基原型, 坚如硬木, 可承受 200 ℃ 的高温, 并可进行机械加工, 经适当的表面处理, 如喷涂清漆、高分子材料或金属后, 可作为砂型铸造的木模、低熔点合金的铸模、试制用的注塑模及熔模铸造用的蜡模成型模。若作为砂型铸造木模时, 纸基原型可制作 50 ~ 100 件砂型, 用作蜡模成型模时可注射 100 件以上的蜡模。

利用 SLS 工艺烧结由聚合物包覆的金属粉末, 可得到金属的实体原型, 经过对该原型的后处理, 即高温熔化蒸发其中的聚合物, 然后在高温下烧结, 再渗入熔点较低的如铜之类的金属后可直接得到金属模具。这种模具可用作吹塑模或注塑模, 其寿命可达几万件, 可用于大批量生产。