

第二十七篇 电物理加工

主 编 曹祖时

执 笔 胡庆生

目 录

第128章 电物理加工	128.4 超声波加工·····27-10
128.1 概述 ·····27-3	128.5 激光加工·····27-12
128.2 电火花加工 ·····27-3	128.6 等离子体加工·····27-14
128.3 电火花线切割加工 ·····27-6	128.7 带电粒子加工·····27-16

第二十七篇 电物理加工

主 编 曹祖时

执 笔 胡庆生

目 录

第128章 电物理加工	128.4 超声波加工·····27-10
128.1 概述 ·····27-3	128.5 激光加工·····27-12
128.2 电火花加工 ·····27-3	128.6 等离子体加工·····27-14
128.3 电火花线切割加工 ·····27-6	128.7 带电粒子加工·····27-16

第 128 章 电物理加工

128.1 概 述

电物理加工是直接利用电能或由电能转换的声、光、热能的物理作用对工件进行加工的各种工艺方法的统称。本手册第72章至第79章对利用电阻、电弧、电子束、离子束对工件进行焊接、切割、熔炼及热处理电焊机及工业电炉作了介绍。本章仅对电火花、超声波、激光、等离子体辐射等特种电物理加工工作介绍。它区别于常规机械加工的最大

特点是：加工工具和工件不直接接触，无切削力；工具材料的硬度不必高于工件的硬度。

由于电物理加工的某些领域，相对来说，是比较新的，例如电火花加工起始于40年代红宝石激光器产生振荡1960年才首次成功，等离子方法加工集成电路芯片开始于1978年所以此类加工方法及其加工设备还在不断发展中。几种电物理加工的性能和适用范围见表128-1。等离子技术涉及工件表面改性及材料成分变化将另作介绍。

表 128-1 各种电物理加工方法的比较和应用范围

加工方法	加工对象	加工精度(mm) 一般/最高	加工粗糙度 Ra 一般/最高	加工速度 一般/最高	主要适用范围
电火花成型加工	各种导电性的金属材料,如钢料、有色金属材料、硬质合金、聚晶金刚石等	0.05/0.005	$\geq 1.6/0.4$	30/3000mm ³ /min	各种模具及零件的三维型面加工,穿孔加工
电火花线切割加工		0.02/0.002	3.2,1.6/0.4	20/200mm ² /min	冲模及零件的二维型面加工
超声波加工	各种脆性金属与非金属材料	0.03/0.005	0.4/0.1	1/50mm ³ /min	非金属材料及脆性大难加工材料的加工与研磨
激光加工	任何材料	0.01/0.001	6.3/0.8	不高	精密小孔、小缝加工及成型切割
等离子加工		0.003/0.0005	—	—	LS1、VLS1、ULS1的芯片加工,特种合成

128.2 电火花加工

128.2.1 电火花成型加工

(1) 电火花成型加工的原理、特点和应用范围 电火花成型加工是在介质中利用成型电极和工件两极间高频脉冲性 $10^{-7} \sim 10^{-3}s$ 的短促的火花放电,在有限面积上集中了 $10^5 \sim 10^6 W/cm^2$ 的功率密度,从而使工件局部汽化和熔化,图128-1示出一次放电所产生的凹穴,无数凹穴的重叠便构成电火花加工的表面。加工电极表面的类似现象是造成电极损耗的原因。每次放电过程,是电力、磁力、热力、流动动力等综合作用下使工件和加工电极受电火花腐蚀的过程,它包括电离击穿、通道放电、熔化、气化热膨胀、抛出金属、消除电离恢复绝缘及

介电强度等阶段。图128-2示出电火花成型加工设备的基本构成。

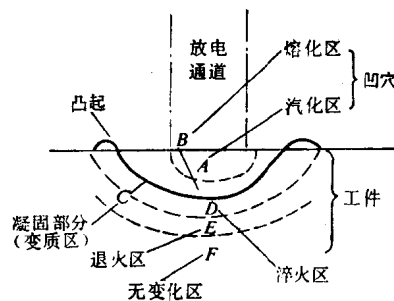


图 128-1 电火花放电产生的凹穴

利用电火花腐蚀现象对工件进行有精度和粗糙度要求的加工必须具备下列条件：

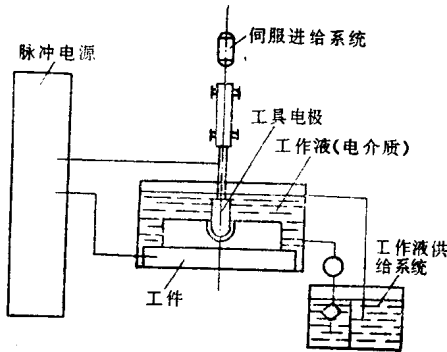


图 128-2 电火花加工设备示意图

(1) 火花放电必须有能产生脉冲能量的高频脉冲电源, 根据加工技术要求的不同一般脉冲电源的电参数应是可调的, 电压幅值在60~3000V之间, 脉冲数在每秒1000至10万之间。

(2) 电极与工件之间应保持一定的间隙, 根据加工规范的不同放电间隙约在0.01~0.2mm之间, 加工过程中为保持稳定放电间隙以保证加工正常, 必须设有自适应进给系统。

(3) 火花放电必须在有一定绝缘性能的介质中进行, 一般采用的加工介质是煤油、去离子水等。

电火花成型加工的特点是:

(1) 加工工件的精度仅取决于电极制造精度。机床本身的精度和工件残余内应力的消除程度, 因加工过程中没有切削力, 所以不会产生加工变形。

(2) 加工速度与工件和电极材料的电热物理性能(熔点、沸点、导热系数、电阻率等)所要求的粗糙度、脉冲电源和自适应进给系统的性能参数以及加工介质的特性等有关, 不受工件材料硬度、强度等机械性能的影响。

(3) 加工工件的粗糙度主要取决于电参数的选择和工件材料的性能。

电火花成型加工主要应用于各种模具加工, 包括塑料成型模、锻模、冲模等等, 以及各种难加工产品零件的加工, 如淬火后的零件、具有三维型面的零件等。

128.2.2 电火花成型加工机床

电火花成型机床系统包括机床主体、脉冲电源、控制系统等部分。机床主体主要由床身、工作台、加工油槽、立柱、主轴头、工作液循环系统和各种附件组成。

电火花成型机床的几种分类方法见表128-2。

表 128-2 电火花成型机床分类表

电火花成型加工机床	按主要尺寸参数分类	小型机床: 工作台宽 ≤ 250 mm, 电极重 ≤ 25 kg 国产代表型号为D6125
		中型机床: 工作台宽250~630mm, 电极重 ≤ 100 kg 国产代表型号DT140
		大型机床: 工作台宽630~1250mm, 电极重 ≤ 300 kg 国产代表型号D6185
		超大型机床: 工作台宽 > 1250 mm, 电极重 > 300 kg 国产代表型号DM71200
	按应用范围分类	通用机床 参见GB5290~5291—85
电火花成型加工机床		专用机床 如小孔加工机床 螺纹加工机床 航空发动机组件加工 专用机床
	按主结构形式分类	龙门式
		滑枕式
		立柱式
		悬臂式
电火花成型加工机床		台式
	按主轴头驱动源分类	液压式
		电机式
电火花成型加工机床	按空制功能分类	单轴伺服控制
		两轴数控联动
		三轴数控联动
		多轴数控
	按加工精度分类	普通型
电火花成型加工机床		精密型
		高精型

用户选用电火花成型机床的主要依据是：典型工件的尺寸、精度、粗糙度、型孔特征等。

电火花成型机床的发展方向是全微机控制的三轴及多轴联动、简化电极的自动化加工均将成为模具柔性制造系统的主要设备。

128.2.3 电火花成型加工用脉冲电源

(1) 对电火花成型加工用脉冲电源的要求

1) 脉冲波形应该是单向的，即没有负半波，这有利于减小电极损耗和利用极性效应。

2) 脉冲的主要参数，如电流峰值、脉冲宽度、

脉冲间隔等应有较宽的调节范围，以适应粗、中、精加工的需要。

3) 脉冲电压波形前沿应该较陡，以利于迅速击穿和提高脉冲频率，因此一般采用矩形及其派生的波形。

4) 稳定可靠，结构简单，操作维修方便。

(2) 脉冲电源的分类及其优缺点

电火花成型加工脉冲电源可按主要元件种类不同进行分类，并各有优缺点，见表128-3。

128.2.4 电火花成型加工用的自动控制系统

表 128-3 电火花成型加工用各种脉冲电源比较表

分 类	优 点	缺 点	用 途
弛张式脉冲电源(RC电路)	加工精度高,粗糙度低,线路简单可靠,成本低,操作维修方便	生产率低,电极损耗大,稳定性差	特殊材料加工和精密细微加工
电子管和闸流管式脉冲电源	比前者加工速度高,电极损耗小,加工稳定	脉冲参数调节范围小,不易获得大功率低损耗加工所需的长脉宽	可用于冲模加工,不适于型腔加工
晶闸管式脉冲电源	电参数调节范围大,功率大,效率高,过载能力强	频率较低,满足不了精加工要求,结构大	与中、大型电火花成型机床配套,适于大型模具粗、中加工
晶体管式脉冲电源	脉冲频率高,脉冲参数容易调节,波形好,易于实现多回路加工和适应控制等自动化要求	线路复杂,可靠性较低,输出功率介于弛张式和晶闸管式电源之间	加工高精度、低粗糙度的中、小型型腔模具
场效应管式脉冲电源	兼有晶闸管与晶体管式脉冲电源的优点,结构体积小,寿命长	场效应管元件靠进口、价格高	

电火花成型加工的自动控制系统，其主要作用是维持适宜的放电间隙、控制间隙中的电流密度、工作液的绝缘强度等。它包括两部分：调节间隙大小的自动进给调节装置和适应间隙变化的多因素自适应控制系统。

(1) 自动进给调节装置

自动进给调节装置必须具有较广的速度调节跟踪范围能快速消除短路，一般空载进给速度 $v_{d0} \approx$

100mm/min,短路回退速度 $v_{d0} \approx 200 \sim 300$ mm/min;要有足够的灵敏性；还应必要的稳定性、强的抗干扰能力。

目前常用的自动进给调节装置有伺服电机式、数控步进电机式、喷嘴-挡板式和电液伺服阀式等几种。

自动进给调节装置各种类型的构造不同，但其基本组成原理框图是一致的。见图128-3。

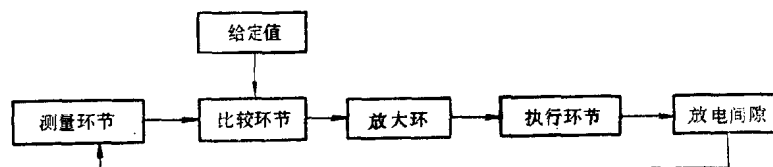


图 128-3 自动进给调节装置原理框图

(2) 自适应控制系统

电火花成型加工自适应控制系统是适应放电间

隙中多因素的变化, 保证高效稳定加工的控制系
统, 其原理框图见图128-4。

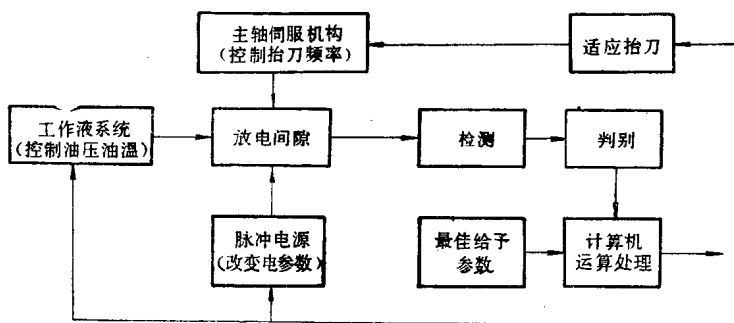


图 128-4 多参数自适应控制系统原理框图

128.2.5 电火花成型加工的工艺指标及其影响因素

(1) 主要工艺指标 电火花成型加工的主要工艺指标包括加工速度、电极损耗、表面粗糙度、加工精度和表面层变化等。

1) 加工速度 M_v 或 M_G

加工速度是指单位时间内工件被蚀除的体积 V 或重量 G , 即

$$M_v = \frac{V}{t} (\text{mm}^3/\text{min}) \quad \text{或} \quad M_G = \frac{G}{t} (\text{g}/\text{min})$$

通常加工的生产率可达到:

粗加工 ($Ra=12.6$) $200 \sim 1000 \text{mm}^3/\text{min}$

中加工 ($Ra=3.2$) $20 \sim 100 \text{mm}^3/\text{min}$

精加工 ($Ra \leq 0.8$) $< 20 \text{mm}^3/\text{min}$

2) 电极相对损耗率

电极相对损耗率是指电极绝对损耗量 V_d 与加工速度 M 的比值, 即

$$\gamma = \frac{V_d}{M} 100\%$$

一般情况下短脉冲精加工时 $\gamma = 20\% \sim 40\%$; 长脉宽粗加工时 $\gamma \leq 5\%$, 用石墨电极长脉宽粗加工时可使 $\gamma \leq 1\%$ 。

3) 表面粗糙度

电火花加工后的表面是由无数极小的凹坑与凸起所组成, 利于保存润滑剂, 因此其润滑与耐磨性能优于机械加工表面, 而且没有方向性的刀痕, 但从直观上不如机械加工后的表面光亮, 因为电火花加工如要降低加工表面的粗糙度就必须很大地牺牲

加工速度, 所以通常所采用较为经济的粗糙度范围是 $Ra=0.8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 。

4) 加工精度

电火花加工的精度主要是指除机床本身精度外, 由于加工间隙 δ_j 、加工斜度 $\tan \alpha$ 、尖角半径等引起的加工误差。一般放电单边间隙为 $0.01 \sim 0.2 \text{mm}$, 甚至可达 0.5mm 。

穿孔加工尺寸精度可达 $0.05 \sim 0.01 \text{mm}$, 型腔加工尺寸精度可达 0.1mm , 电火花磨削精度可达 $\leq 0.02 \text{mm}$ 。

5) 表面变质层的厚度 δ

经电火花加工后工件表面会产生化学成分与组织结构都发生很大变化的表面变质层, 变质层中含有显微裂纹和残余应力, 硬度提高, 对原材料的耐高温强度和疲劳强度都是不利影响。表面变质层的厚度与加工规范有关, 一般粗、中规范加工的变质层厚度 $\delta \approx 0.1 \sim 0.5 \text{mm}$, 精规范加工的 $\delta \approx 0.01 \sim 0.05 \text{mm}$ 。

(2) 影响加工指标的因素

影响加工指标的因素很多, 它们错综复杂, 既有关联, 又有制约, 因此要获得一组较佳的加工指标必须根据具体工件具体分析, 各种主要影响因素的一般规律列于表128-4。

128.3 电火花线切割加工

128.3.1 电火花线切割加工的原理、特点和应用范围

电火花线切割加工的基本原理与电火花成型加

表 128-4 各种因素对工艺指标影响规律表

影响因素	工艺指标	加工速度 M	电极相对损耗率 γ	加工表面粗糙度 Ra	加工精度 $\delta, \text{tg}\alpha$	变质层厚度 δ
脉冲宽度 τ_k		$\tau_k \uparrow \quad M \uparrow$	$\tau_k \uparrow \quad \gamma \downarrow$	$\tau_k \uparrow \quad Ra \uparrow$	$\tau_k \uparrow \quad \delta, \uparrow$	$\tau_k \uparrow \quad \delta \uparrow$
脉冲间隔 τ_i		$\tau_i \downarrow \quad M \uparrow$	$\tau_i \uparrow \quad \gamma \uparrow$	$\tau_i \uparrow \quad Ra \downarrow$	—	—
峰值电流 I_m		$I_m \uparrow \quad M \uparrow$	$I_m \uparrow \quad \gamma \uparrow$	$I_m \uparrow \quad Ra \uparrow$	$I_m \uparrow \quad \delta, \uparrow$	$I_m \uparrow \quad \delta, \uparrow$
加工电压 $V_{H,L}$		—	—	—	$V_{H,L} \uparrow \quad \delta, \uparrow$	—
极性 精加工正 粗加工负		$M \uparrow$	$\gamma \downarrow$	$Ra \downarrow$ $Ra \uparrow$	$\text{tg}\alpha \downarrow$	—
电极材料 石墨 铜		—	—	当 τ_k 小 当 τ_k 大 $Ra \downarrow$	—	—
加工面积 A_s	当 A_s 小于临界值时 $M \downarrow$	$A_s \uparrow \quad \gamma \downarrow$	—	—	—	—
加工深度 H	—	—	—	—	$H \uparrow \quad \text{tg}\alpha \uparrow$	—
冲油压力 P	$P \uparrow \quad M \uparrow$	$P \uparrow \quad \gamma \uparrow$	—	—	冲油 $\text{tg}\alpha \uparrow$ 抽油 $\text{tg}\alpha \downarrow$	—
采用适当抬刀	$M \uparrow$	—	—	—	—	—

工的相同，其主要区别在于采用柔性的金属丝作为电极工具对工件进行线锯式的加工，具体来说有：

- 1) 不需要制作成型电极；
- 2) 工件轮廓预留加工余量可以极少；
- 3) 能够加工任何复杂平面形状的零件；
- 4) 电极丝是移动的，可不断更新或重复使用，可以用程序补偿方法消除损耗，因此电极损耗不会影响加工精度；
- 5) 采用去离子水或专用乳化液作为加工介质，无火灾危险，可以实行无人操作；
- 6) 自动化程度高，操作方便。

电火花线切割加工方法主要用于加工各种平面形状的冲模、样板、成型刀具、成型电极和各种特殊形状的零件。加工工艺性能与电参量等的关系参看表128-4所列。

128.3.2 电火花线切割加工机床

电火花线切割加工机床主要分为两大类：高速走丝线切割机床（见图128-5）和低速走丝线切割机床（见图128-6）。

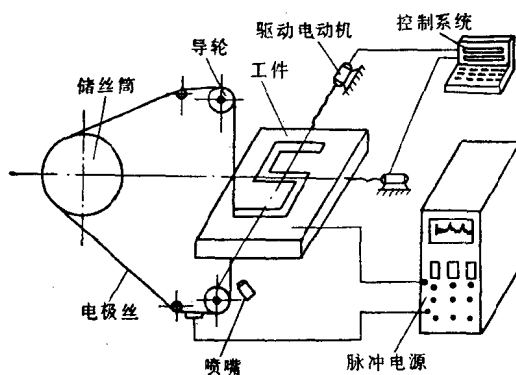


图 128-5 高速走丝线切割加工机床示意图

这两类机床的特点比较参见表128-5。

目前高速走丝线切割机床在国内已广泛采用，并成为加工冲模的主要手段。低速走丝线切割机床国内极少生产，主要生产国是瑞士和日本。瑞士产的机床精度高，但价格昂贵。

电火花线切割机床的系统构成包括：机床主

表 128-5 高、低速走丝线切割机床比较表

项 目	高速走丝线切割机床	低速走丝线切割机床
电极丝运行速度	5~10m/s	1~3m/min
电极丝直径范围	0.1~0.3mm	0.05~0.25mm
电极丝材料	钼, 钨钼合金	黄 铜
电极丝寿命	可重复利用至极限值	一次性使用
电极丝张力控制	一般无精确控制	有可调恒张力控制
加工介质	专用乳化液	去离子水
加工精度	±0.01~0.02	±0.002
机床精度	一般	高精
一般可达粗糙度	$Ra=1.6\mu m$	$Ra=0.32\mu m$
加工速度	$Ra1.6: 20\sim50mm^2/min$	$Ra1.6: 20\sim60mm^2/min$
	$Ra3.2: 80\sim160mm^2/min$	$Ra0.4: \geq 10mm^2/min$
机床价格	P	$\approx 10 \times P$

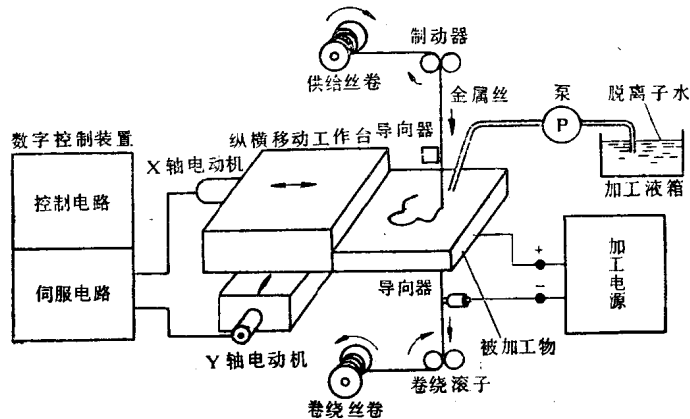


图 128-6 低速走丝线切割机床示意图

体, 脉冲电源, 数控及编程系统等。机床主体由床身、坐标工作台、运丝系统、工作液系统等部分。

线切割机床主体中的运丝系统是最具特点的核心部件, 它应有足够的刚性, 运丝平稳可靠, 最好应带有可调的恒速恒张力机构、可调开度机构和锥度切割机构; 坐标工作台应该有高精度和高灵敏度的导轨、丝杠传动付, 步进当量应 $\leq 0.001mm$, 整台线切割机都应符合精密机床的标准要求。

128.3.3 电火花线切割加工用脉冲电源

电火花线切割加工脉冲电源的特点是:

(1) 放电能量小, 高速走丝线切割加工峰值

电流一般在15~35A之间。

(2) 脉冲宽度窄, 高速走丝加工脉宽在0.5~64 μs 范围内, 低速走丝脉宽在0.1~80 μs 范围内。

(3) 脉冲重复频率高, 一般约为10~100kHz。

(4) 高速走丝线切割机的电源性能和电极丝损耗有关, 性能极好的电源, 能使切割10000mm²面积时的丝耗 $<0.001mm$, 用一般性能的电源, 在切割10000mm²面积时, 沿进给方向的丝耗可达0.02mm。

(5) 能适应切割不同材料、不同形状、厚度和不同精度的要求, 电源输出脉冲的电参数调节范围要广。

脉冲电源的形式种类很多,目前广泛采用的是晶体管方波电源、晶体管控制的RC式电源和分组脉冲电源。其特点和用途比较见表128-6。

表 128-6 各种线切割脉冲电源比较表

电源种类	特 点	用 途
晶体管方波脉冲电源	脉宽频率可调,结构简单,成本低,只能用于一般精度加工	用于一般精度的线切割机床
分组脉冲电源	高频短脉冲的频率很高,停歇时间内充分消除电离,使提高加工速度和降低粗糙度之间的矛盾得到兼顾	广泛用于高速和低速走丝线切割机床
晶体管控制的RC式电源	可以方便地控制单个脉冲能量,适于精加工	用于微精加工和低速走丝线切割机床

128.3.4 电火花线切割加工用控制系统

电火花线切割加工的控制系统主要是指坐标工作台的控制系统和进给控制系统。

坐标工作台控制系统是按加工要求自动控制对零件进行形状与尺寸加工,目前广泛采用的是数字程序控制系统和多功能通用计算机直接控制系统。其它尚有靠模仿型控制、光电跟踪控制等。

进给控制系统的作用是根据放电间隙的大小与加工状态自动控制进给速度,维持正常稳定的切割加工。

128.3.5 电火花线切割用加工介质

电火花线切割加工中所采用的加工介质品种很多,通常在高速走丝线切割加工中都采用专用乳化液,在低速走丝线切割加工中多采用去离子水。

(1) 专用乳化液

线切割专用乳化液,和一般机械加工中所用的不同,除具有一般乳化液的性能外,为适应电火花线切割加工的特点,它还具有爆炸剂、润滑剂、光亮剂、阻尼剂和络合剂等特有的性能。

目前常用的乳化液为DX-1、TM-1、TM-2、上海沪油、航天502系列乳化液等,均为水包油类乳化液。表128-7列出航天502系列乳化液的特点及用途

(2) 去离子水

低速走丝线切割加工所采用的去离子水,其电

表 128-7 航天502系统乳化液用途表

乳化液牌号	特 点 及 用 途
航天502-1	适用于大厚度线切割加工,对一般厚度切割可提高光度和速度
502-2	适用于低粗糙度的线切割加工
502-3	适用于高速线切割加工
502-4	适用于铜、铝等低熔点材料的线切割加工
502-5	适用于超硬合金线切割加工

阻率范围为 $10\sim 100\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$,电阻率过低或过高都会使加工效率降低。

去离子水是通过一套专用的纯水器中离子交换树脂的作用而产生的,若水的电阻率不够时,如系离子交换树脂已失效就应更换,在去离子水中还应添加各种添加剂和爆炸剂,以提高切割速度。

128.3.6 电火花线切割加工的主要工艺指标及其影响因素

(1) 加工速度 M_w 加工速度是指单位时间内切割的面积,单位为 mm^2/min 。切割各种不同粗糙度的加工速度水平列于表128-8,各种因素对加工速度的影响列于表128-9。

表 128-8 线切割加工速度水平

切割的粗糙度 $Ra(\mu\text{m})$	高速走丝切割 加工速度 $M_w(\text{mm}^2/\text{min})$	低速走丝切割 加工速度 $M_w(\text{mm}^2/\text{min})$
6.3	<260	200~300
3.2	20~100	100
1.6	20~50	20~60
0.8	<20	
0.4	<10	10

(2) 加工精度 精度一般包括:尺寸精度、形状精度、位置精度、切缝精度、表面粗糙度以及尖角和窄缝等形状精度。影响线切割加工精度的主要因素是:

1) 机床主体的综合精度和刚度,特别是坐标工作台和送丝系统的各项精度与刚性。

2) 控制切割轨迹的电气控制系统的精度。

表 128-9 各种因素对加工速度的影响

各种影响因素	切割加工速度 M_w (mm ² /min)
平均加工电流 I	$I \uparrow$ $M_w \uparrow$
脉冲宽度 τ_k	$\tau_k \uparrow$ $M_w \uparrow$
开路电压 u_i	$u_i \uparrow$ $M_w \uparrow$
电极丝直径 d	一般情况下 $d \uparrow M_w \uparrow$
走丝速度 v	低速走丝 $v \uparrow M_w \uparrow$ 高速走丝 $v < 5\text{m/s}$ 时 $v \uparrow M_w \uparrow$
电极丝材料	采用钨钼丝、黄铜丝 $M_w \uparrow$
工作液	采用502系列乳化液 $M_w \uparrow$

- 3) 脉冲电源的性能与稳定性。
- 4) 加工工艺参数及加工方法的合理选择。
- 5) 被加工件的材料、预加工状态、热处理情况。
- 6) 工件装夹调整的合理性。
- 7) 加工点气温环境因素。

128.3.7 其它形式的电火花加工

由于电火花加工的很多特点,可以解决许多其它加工方法难解决的问题,因此其应用范围迅速扩大,各种形式的电火花加工不断出现,目前已用于生产的有:

(1) 大型环形零件成型磨削加工 这种加工方法可用于航空发动机的环形蜂窝结构件、窄而深的大直径环槽等,精度可达 $\pm 0.02\text{mm}$, $Ra 1.6\mu\text{m}$ 的大型电火花成型磨削机床已投入生产使用。

(2) 共轭回转式电火花加工 工件与电极作共轭回转运动,可以内切回转,亦可外切回转,用于制造硬质合金螺纹环规、变模数齿轮等,精度可达 $2\sim 4\mu\text{m}$,粗糙度可达 $Ra 0.1\mu\text{m}$ 。

(3) 小孔的电火花穿孔和磨削 用于加工燃气轮机叶片冷却孔、航空发动机机匣及叶片上冷却孔、喷油嘴孔、化纤喷丝板上异形孔以及长径比大至 $50\sim 100$ 的特殊用途小孔等,加工小孔的最小直径可达 0.015mm ,加工精度可达 $5\sim 10\mu\text{m}$ 。

对精密小孔采用电火花磨削加工,最小可磨孔径为 $0.6\sim 0.8\text{mm}$,加工精度为 $\pm 3\sim 5\mu\text{m}$,粗糙度 Ra 可达 $0.08\mu\text{m}$ 。

(4) 超硬材料的电火花加工 超硬材料,如聚晶金刚石、立方氮化硼等在现代工业上已得到广泛应用,但加工难度很大,采用特种专用电源的电火

花加工方法取得了显著效果,目前北京市电加工研究所研制成功并已批量推广的专用设备已广泛应用于加工聚晶金刚石拉丝模和刀具。

(5) 齿轮电火花跑合 在彼此绝缘的两齿轮轴上加脉冲电压,在工作液中啮合转动,产生放电腐蚀,称之为电火花跑合。可提高齿轮的接触精度和使用寿命,并显著降低噪声。

(6) 电火花强化 这是利用气体中的放电现象将硬质合金或具有特殊物理、化学性能的材料熔渗到工件中的一种加工方法。电火花强化所需设备简单,却能使工件获得特殊性能,应用十分广泛。

(7) 各种复合形式的电火花加工 阳极机械切割是一种电解、电火花和机械作用的复合加工法,用于切割耐热合金钢、不锈钢等;超声-电火花复合加工可以用于穿孔、成型加工,提高加工速度,降低粗糙度等。

128.4 超声波加工

超声波是指超过人耳能听到的声音的上限 $16\sim 20\text{kHz}$ 的弹性波,它具有指向性好、直射性强、并能衍射和起透镜作用的波动现象。声音在气体中的传播速度为 $200\sim 500\text{m/s}$,在标准状态空气中声速为 331m/s ,在液体中为 $900\sim 1700\text{m/s}$,由于固体中存在剪切弹性,所以声波在固体中传播除纵波外还有横波。在固体中的纵波速度为 $3000\sim 6000\text{m/s}$,横波速度为 $1000\sim 3000\text{m/s}$ 。超声波在气体与液体、液体与固体等界面上反射损失小,媒介质中的能量难以泄漏到外界。超声波在液体中和在固体中的声阻抗比在空气中的大很多,因为声阻抗等于声压/粒子速度,声压又与粒子的位移和频率的乘积成比例,所以频率越高、粒子位移越小,声压越大。因而在液体中很容易发生 $1\text{气压}=35\mu\text{W}/\text{m}^2$ 以上的声压。利用超声波在声波阻抗不同的物质的表面会产生反射,而且又成脉冲状向一定方向反射超声波束,对声波阻抗不同组织的表面测定其反射出来的超声波就能测定组织的边界。在医用超声诊断装置上采用扫描超声波的光束,就能得到组织的图像。用相同的原理可以得到钢板、钢管及轴和各类壳体容器中夹杂、裂纹等缺陷的图像,在军事上用以探测潜艇和水雷,航运部门用以探测航道深度、形状和障碍物,以及渔业的鱼群探测。与其它加工方法结合运用有多种形式,例如超声波与电解结合,可使电解析出的金属从电极上落下,获得微细的金属

粉末；或破坏金属的钝化膜使金属与强酸的反应加快，这一般是利用它在液体中造成大于1气压的负压形成的气蚀所产生的力；利用同样的原理可使液体中的软质固体被破坏而变成微粒乳化液。超声波测厚仪已经成为商品。

128.4.1 超声波切削加工

超声切削、磨削一般采用的频率为16~30kHz，施加于超声换能器上的高频电流被换成双振幅为10~150 μ m的超声频振动，带动工具端部作相应的振动，工具端部使磨料对工件表面不断地冲击，使加工区的工件材料粉碎成微粒，并被循环的磨料悬浮液带走，通过工具端部形状的选择及不同的运动方式，就可使工件被加工成与工具相对应的形状或其它所希望的形状。超声波加工原理见图128-7。

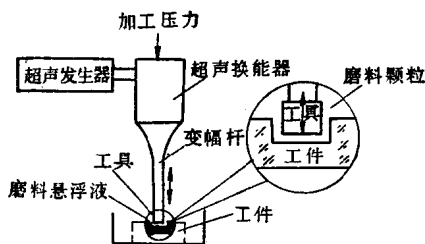


图 128-7 超声波加工原理

超声波加工设备，由于工具有磨损，故加工尺寸和形状精度容易发生变化，且对脆度小于1的材料很难加工。设备的加工压力可调，有液压式、弹

簧式、电磁式及天平式多种加压方式。

超声波切削加工的主要工艺性能指标为加工速度、加工精度和表面质量。

加工速度随着工具振幅的增大而增大，但振幅受超声波加工机功率、变幅杆及工具材料疲劳强度的限制，同时对应不同振幅，要选择单位面积最佳静压力。一般来说，工具振幅愈大，加工材料愈硬，单位面积最佳静压力愈大。磨料硬度越高，粒度越粗，加工速度越大。但磨料平均粒度 d_0 与工具的双振幅 2ξ 之比对加工速度有一最佳值。在加工玻璃、硬质合金、陶瓷时的 $2\xi/d_0$ 比值为0.6~0.8。工作液的热传导性能、粘度、密度、比热及表面张力也影响加工速度，并常随磨料对工作液的重量比的增加（即磨料悬浮液浓度）而提高加工速度。但浓度过高会影响工件的碎除效果，加工速度反而降低，最佳浓度通常在0.5~1.0之间，根据试验确定。

加工精度除与机床的运动精度（包括横向运动和加工深度）及工具的精度有关外，还与磨粒尺寸、工具磨损有关。例如在良好的机床及工具精度条件下采用 $240^\circ\sim 280^\circ$ 磨料时，最高精度可达 $\pm 0.005\text{mm}$ 。

被加工表面的粗糙度和工件的材料及采用的磨料粒度有关。图128-8示出加工表面粗糙度和磨料粒度的关系。

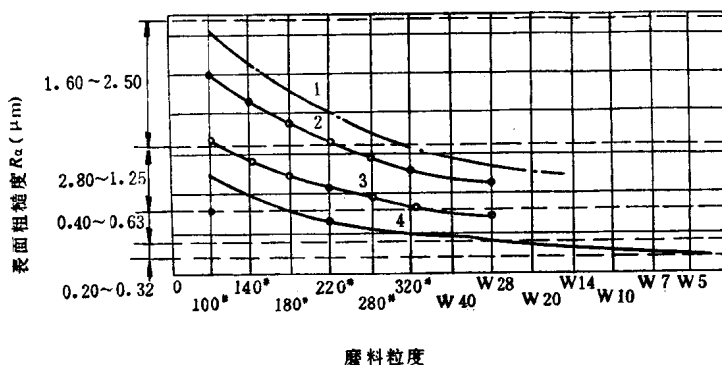


图 128-8 加工表面粗糙度和碳化硼磨料粒度的关系

1—玻璃 2—硅材料 3—陶瓷质工具材料 4—硬质合金

超声加工对加工材料的适应性以材料的脆度 t_x

衡量

$$t_x = \frac{\tau}{\sigma}$$

式中 τ ——剪切应力

σ ——断裂应力。

超声加工特别适宜于加工脆性度 $t_x > 2$ 的各种脆性材料。例如，玻璃、石英、陶瓷、硅、锗等材料的穿孔、切割、开槽、及金刚石拉线模的打孔及孔型研磨；对于脆度在1~2之间的材料，例如，硬质合金、

淬火钢及钛钢的加工也是相宜的。

用超声波加工半导体材料时,比用一般机床加工可提高材料利用率和提高生产率4~8倍。且能加工一般机床所不能加工的项目,例如把硅片切割成 $\phi 1.5$ 的小圆片或加工 $\phi 1$ 的圆穴及圆孔。对硬质合金模具的加工、表面抛光也取得良好效果。

128.4.2 超声波焊接加工

这种焊接不需另外加热,又不用焊料,是一种无污染的清洁焊接。焊接时压力小,故工件变形小,焊接热影响区小,对工件性能影响小,因而广泛用于半导体集成电路及大规模集成电路引线的焊接。一般采用60kHz焊接电源。设备能自动把0.03mm左右的细线,一面送出、一面就将其跨焊于硅片出线端点及引线架之间,实现高可靠及高效率的焊接加工。较新的集成电路芯片的倒装焊接法也采用超声波焊接,可实现多点同时焊接,焊接效率更高,不会产生前一方法偶然会出现的断线事故。此种焊接结构的结合强度高,因此可以提高可靠性。超声波焊还可用于箔式变压器的出线焊接及铝质电屏蔽的焊接。焊接时在焊点有热固性塑料、在热及压力作用下被排挤到焊点外围,使焊点坚固,且在焊点周围形成的塑料圈可以防止焊接面氧化,因而具有很高的可靠性。

128.4.3 超声波清洗

超声波用于清洗已非常广泛,如硅片清洗已成为集成电路芯片及大功率晶闸管等的关键工艺,钟表、照像机零件的清洗、手术医疗器械的清洗,光学仪器、照相机及眼镜镜片的清洗等均已成为这些部门的常规工艺。超声波清洗设备也采用换能器,在结构上有采用置入清洗容器内的投入式、插入式及内罐式;还有换能器置于清洗容器之外的粘接式。目前已能做到在液体中发生 $1\text{mW}/\text{m}^2$ 的超声波,为了提高清洗效果,常把换能器制成有聚焦性能的四面型换能器,这种换能器可发生 $0.2\text{W}/\text{m}^2$ 的超声波。

128.4.4 超声波加工用的换能器

用于加工的超声波换能器大致分为二类:一类是超音频电压与转换机构的速度成正比,电磁式换能器及磁致伸缩式换能器均属此类;另一类是超音频电压与转换机构的位移成正比,压电式换能器及电致伸缩换能器属于此类。磁致伸缩换能器采用氧化亚铁等烧结而成的铁氧体制成,在20~50kHz范围内效能是很好的。压电换能器一般采用X切割的水晶体。电致伸缩换能器早期用的是钛酸钡,目

前多采用电-机械偶合系数大、效率高的锆钛酸铅,压电型换能器也被它所替代。在高温条件下,则采用能在500℃工作的铌酸铅。

128.5 激光加工

128.5.1 激光加工装置及其特点

装置简图见图128-9。激光器输出的高强度激光,经过透镜聚焦,在焦点处的功率密度高达 $10^7\sim 10^{11}\text{W}/\text{cm}^2$,与以往的加工方法比是最高的一类,温度可达到摄氏万度以上。加上激光具有波长一致、单色性好、相位一致、方向性好等特性,因而激光加工具有许多特点。

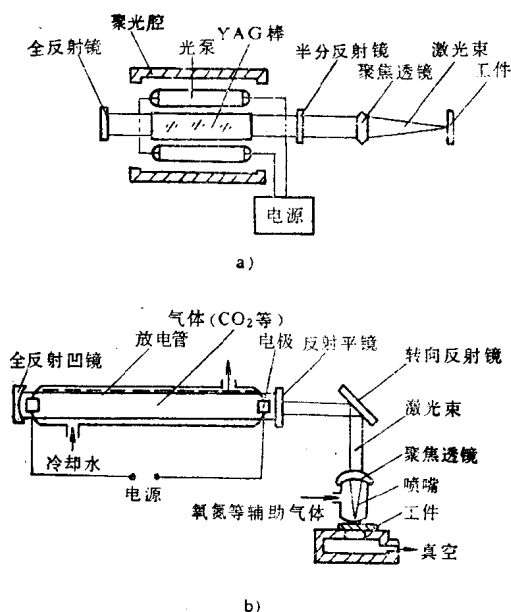


图 128-9 激光加工设备示意图

a) YAG固体激光器加工设备 b) CO₂气体激光器加工设备

1) 利用激光所能达到的高功率密度,任何材料都可被瞬时熔化、汽化。可对高熔点及难加工的材料,如钨、钼、钛、硬质合金、耐热合金及宝石、金刚石、玻璃、陶瓷等硬脆材料进行打孔、切割、焊接及热处理。

2) 可利用光学系统将激光聚焦成微米级的光点,进行微细加工。

3) 可将工件置于加工机适当距离外进行非接触加工,无工具损耗问题。

4) 加工速度快,加工条件选择适当时,对材料的热影响小,使加工变质层及热变形均很小。

5) 可利用激光聚焦和光栏作用, 加工各种异形孔, 还可利用转向反射镜, 对手工操作难以达到的部位进行加工。

明物质进行加工。

用于加工的激光器的品种和特性见表128-10。

128.5.2 激光打孔

6) 激光波长选择适当时, 可以透过玻璃等透

激光打孔一般采用YAG固定激光器。钟表用的

表 128-10 激光器的种类和特性

种 类	激光工作物质	基 体	活性离子	波 长	输出形式	输出能量或功率	主要用途
固 体	红宝石	Al_2O_3	Cr^{+3}	$0.694\mu m$	脉冲	几个~几十个焦耳	打孔、焊接
	YAG (掺钕钇铝石榴石)	$Y_3Al_5O_{12}$	Nd^{+3}	$1.065\mu m$	脉冲	几个~几十个焦耳	打孔、焊接
					连续	100~1000W	焊接、刻槽
	钕玻璃	玻 璃			脉冲	几个~几十个焦耳	打孔、焊接
气 体	二氧化碳	CO_2-He-N_2	CO_2	$10.63\mu m$	脉冲	几个焦耳	划片、切割
					连续	几十~几千瓦	切割、焊接、热处理

宝石轴承是厚0.3mm、直径0.04mm的直孔形轴承。打孔速度约10~12个孔/s。在激光加工的应用中激光打孔应用最多。化学纤维用的喷丝头上加工的孔、孔型各异, 喷气发动机用的喷嘴导孔都可采用激光加工。拉线用聚晶模可用数控调节聚晶位置, 再用

激光在不同位置去除不同量的聚晶料, 便可制成所需孔型。

基本的打孔方式有: 单脉冲式打孔、冲击式打孔和打眼式, 它们所采用的激光系统和所打孔的规格范围见表128-11。

表 128-11 不同激光打孔方式所打孔的规格

项 目	打 孔 方 式		
	单脉冲式	冲 击 式	打 眼 式
激光系统型式	单脉冲基模激光系统	低阶模激光器	低阶模激光器
孔直径(mm)	0.02~0.25	0.1~1.0	0.4~5
深度与直径比	2:1~6:1	2:1~15:1	
最大深度(mm)	1.5	6	10
孔的允差(μm)	10		20
孔的斜度		$15^\circ \sim 90^\circ$	$15^\circ \sim 90^\circ$
激光脉冲能量(J)	0.1~10	2~30	2~5
激光脉宽(ms)	0.1~0.4	0.2~1.0	0.2~0.5
激光峰值功率(kW)	20~50MW/cm ²	10~30	10
激光重复频率(Hz)	20	5~50	40~100
激光束位置	光束轴在孔轴中心	光束轴在孔轴中心	激光焦点沿材料上的一个圆旋转

128.5.3 激光切割

一般采用 CO_2 激光器, 它的切缝窄, 约在0.1~0.5mm之间, 一般是在聚焦部分伴以喷吹气体的情况下进行切割, 这样可提高加工效率, 即时吹走加工碎屑, 切断表面较光滑, 激光入射边的塌角较

小, 切割边缘质量较好。适用于切割机械强度高、熔点高的金属板材, 如钛板、钼板及高强度钢等; 也可在惰性气体保护下切割非金属材料, 包括陶瓷、玻璃以及厚纸板、地毯、西服裁剪及皮革切割等。采用计算机数控技术可进行二维或三维成形切割,

在计算机控制下, 已能以60m/min的速度正确裁剪衣料, 裁剪式样可根据市场需要作迅速改变。

切割的厚度与激光器的输出功率、吹气压力、聚焦质量、材料性质等有关。切割速度也与材料性质有关, 随激光功率和吹气压力的增加而增加, 随

切割厚度的增加而降低。目前已能切割厚22mm的不锈钢板和40mm的钛合金板。

CO₂激光器切割一些金属及非金属的参量见表128-12及表128-13。

YAG激光器在配上微机定位、移位及测量系统

表 128-12 二氧化碳激光器对金属材料的切割速度

材 料	厚 度 (mm)	切 割 速 度 (m/min)	激 光 输 出 (W)	喷 吹 气 体
铝	12.7	0.5	6000	空气
	13	2.3	15000	
碳素钢	3	0.6	250	O ₂
	6.5	2.3	15000	空气
	7	0.35	500	O ₂
热处理钢	25	1.1	10000	N ₂
	45	0.4	10000	N ₂
不锈钢	2	0.6	250	O ₂
	4	0.43	500	O ₂
	13	1.3	10000	N ₂
钛合金	1.46	1.2	400	空气
	5	3.3	850	O ₂

表 128-13 二氧化碳激光器切割非金属材料的速度

材 料	厚 度 (mm)	切 割 速 度 (m/min)	激 光 输 出 (W)	喷 吹 气 体
石 英	3	0.43	500	N ₂
陶 瓷	1	0.392	250	N ₂
	4.6	0.075	250	N ₂
玻 璃 钢	1.5	0.491	250	N ₂
	2.7	0.392	250	N ₂
有机玻璃	20	0.171	250	N ₂
	25	15	8000	空气

后可对薄膜电阻采用U型切槽、C型切模的精细调节电阻模式获得所需的高精度电阻。

128.6 等离子体加工

20世纪20年代发现电弧放电中存在一种带电粒子团的振动, 这种现象被称为“等离子体振动”, 同时把产生这种现象的媒质称为等离子体。等离子体是一种包含有异号电荷的有两种或两种以上带电粒子团, 其中至少有一种在进行着热运动, 并在宏观上表现为中性。在等离子体中带电粒子的距离应比

它们间相互能施加作用的距离大, 或者说, 一个带电粒子周围的库伦电荷受异号电荷遮蔽需要的最小距离, 这一距离称德拜长度 h 。

设 n 、 T 、 e 、 h_B 及 ϵ_0 分别为等离子体(电子或离子)密度、电子温度、电子电荷、玻尔兹曼常数及真空中的介电常数(如都以MKS单位制表示时, 则 n 为 cm^{-3} , T 为K, h 为cm), 可用下式表达德拜长度。

$$h = (\epsilon_0 h_B T / e^2 n)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 6.90 (T/n)^{\frac{1}{2}}$$

等离子体可分为高温等离子体、热等离子体和冷等离子体,并可用于不同加工。

128.6.1 高温等离子体

高温等离子体的温度在1keV (1.1千万度K)或更高,主要用于研究热核聚变。高温氦氟等离子体被约束的时间越长,等离子体温度越高,一般中子产额也越高,这方面的研究和开发是探索可控聚变核反应新能源的需要。高温等离子体还具有X射线的性能,通过改变气体类别、装置结构参数可以获得所需要的X射线强度及能量范围(一般在0.5keV~1meV),此种X射线可用来观察包括活细胞结构在内的各种细微结构。

128.6.2 热等离子体

温度为30000~40000K,比化学反应及电弧产生的温度都高。自1974年出现第一个原始的等离子炬以来,已发展有用于熔炼锆、钛、钒、钼等耐高温材料的等离子熔炼炉;用于切割不锈钢和钴钢的等离子切割机;等离子金属涂敷技术也已用于高温阀门的阀件表面涂敷,硬质合金的喷涂层既耐高温,又耐冲刷,因而提高了阀门性能。此种技术也被用于磨损件的局部修补;并可利用等离子体熔化及快速固化技术制备多种耐高温、耐磨损、耐腐蚀的超细粉末,例如在 10^4K/s 的冷却速度下可获得 $50\sim 500\text{\AA}$ 的SiC微粒。还可用于制造 TiO_2 、 TiN 、 Al_2O_3 、 ZnO 、 NbN 、 BN 、 Si_3N_4 等,其中 TiO_2 已用此法形成工业生产;在低压电容器的制造中也有用喷涂法在端面喷上导电层使各层连结的加工技术。

128.6.3 冷等离子体

1. 用于表面改性,对金属、非金属材料进行不同的冷等离子体处理,以改善材料或部件的耐磨性、耐腐蚀性及湿润性等。主要的处理方法有以下几种:

1) 离子注入机法 例如,对航空用轴承部件注入特定离子,可提高耐磨性及使用温度,且加工温度低,不会引起超过允差的变形。离子注入机还被用于集成电路制造的掺杂工艺。在集成电路制造中注入的是 B^+ 、 P^+ 、 As^+ 离子以及 Sb^+ 离子。

2) 电晕或等离子体法 利用离子氮化炉,充入 $1\sim 10\text{Torr}$ 的氮或氨的气氛,使在阴极(铁或钢)、阳极(铁或镍)间施加300~1200V直流电压,产生辉光放电,使氮、氨等离子化,和阴极铁反应而在铁材料表面形成氮化物层,从而可提高工件表面硬度。在强辉光放电的氮等离子气氛中放置钛、锆、铬、镍、钼、钽、钨等金属片,因这些金属片的氮

化,如钛、锆氮化而在其表层生成 TiN 及 TiN 层,表层硬度便显著增加;也可在表层渗入铬、镍来提高产品耐腐蚀性,并改善耐温性;渗入钼、钽、钨可提高耐温性。这种技术可用于制造优质锯条,锯条本体由低碳钢制成,而齿部可用等离子法渗入铬及镍。图128-10所示为锯条渗铬、镍装置的原理图。

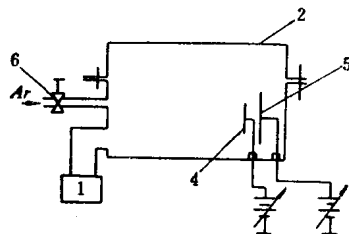


图 128-10 锯条渗铬、镍装置原理图

1—抽真空系统 2—真空室 3—可调节电源 4—工件 5—铬、镍电极
6—进气调节阀

3) 离子镀膜法 目前具有较高性能的弧源的氮化钛镀膜机已广泛用于金属装饰件的表面镀氮化钛。镀层的色泽有近似真金的、有多色彩的、也有黑色的。镀层牢固,不易褪色,并耐磨损。用于加工刀具刃具时,可延长它们的使用寿命,提高切削能力。根据工具、工件的尺寸和镀膜的不同要求,镀膜机的弧源有1~8个不等。为提高生产率也有制成双工作室的,二个工作室共用一套电源、气源及抽真空设备。

2. 用于物质的化学合成 可以合成一些无机化合物,例如合成硅的氢化合物。用类似的方法可以制成B、Ge、P、As的氢化合物;也可以合成一些有机化合物,包括金属有机化合物的聚合。

3. 去毒、净化与灰化 灰化法是利用冷等离子体将生物灰化,分析生产含有的物质;或从血液中回收示踪物质,此种方法可避免渗杂。去毒则主要用于有机磷除虫剂的去毒。

4. 提高有机材料的“湿润性” 等离子体被用于有机薄膜材料的粗化,以提高有机材料表面对液体介质的吸附能力。

5. 等离子体沉积膜及刻蚀 采用不同的专门设备可在硅片表面沉积不同性质的膜,有的具有高的击穿强度、有的具有高介电系数、有的则有优良的导通性能,这种技术已广泛用于LSI、VLSI、