

第 12 章

利 用 热 能 的 特种加工

12.1 电子束加工 (EBM)

12.1.1 概述

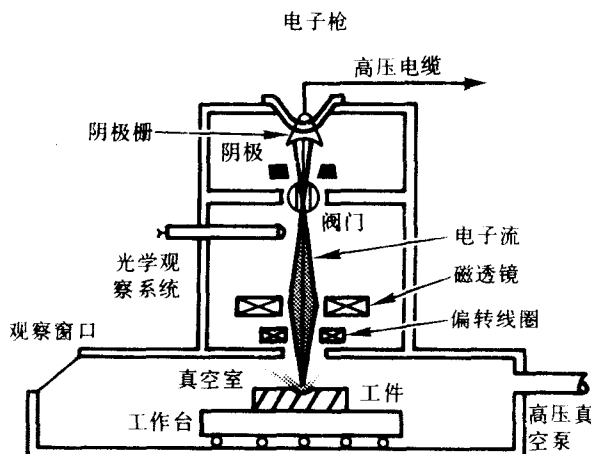


图 12.1-1 电子束加工示意图

(1) 原理

电子束加工是通过聚焦的高速电子流使工件的受冲击点熔化和汽化而去除材料的（见图 12.1-1）。为了避免电子束与气体分子接触而产生散射，加工应在真空中进行。电子从三极管电子枪发射，并在阳极处加速到四分之三的光速。电子与工件碰撞，其动能立即转变成热能。低惯性的电子束很容易被电磁场控制。磁透镜把电子束聚焦到工件上，在直径为 0.025mm 的焦点处可达到使任何材料都溶化和汽化的高能量密度 ($1.55 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$)。电子束的反应动作极快，这很有利于用计算机实现对电子束的偏转，以及焦点、强度和工件的移动进行三度空间的控制。观察窗口和光学跟踪系统可帮助电子束或工件导向。偏转线圈能对电子束在很小的面积上（约 6.4mm^2 ）按任何图形进行磁控和编程。

(2) 实际应用

电子束加工所达到的功率密度可汽化任何已知材料（见表 12.1-2 实例）。这就使它可用于如图 12.1-2 所示的各种加工。薄材料的微细加工、雕刻和钻孔是电子束加工的主要应用。在用多脉冲加工时孔的深径比能达到 100 比 1。由于对任何材料能在短时间内加工出高精度的微孔和狭槽，使它能生产一些结构独特的零件。图 12.1-3 和 12.1-4 表示用电子束加工钢和镍基合金的穿孔范围和速度。由于加工时无机械接触并适于自动控制，因而增强了

这种加工方法的能力。但需要在真空中进行，因此延长了加工循环时间。这种方法可用于在 0.025mm 的薄片（箔）上按每 25mm^2 加工 400000 个直径为 $2\mu\text{m}$ 的孔。或在 6.4mm 厚的材料上加工直径为 0.50mm 左右的孔，其钻孔速度比电火花加工和电解加工快若干倍。还可用于测流孔、拉丝模孔和喷嘴头孔的加工。

(3) 加工参数

表 12.1-1 电子束加工参数常用值

加速电压:	50~150kV
束电流:	100~1000 μA
功率:	0.5~60kW
脉冲时间:	4~64000 μs
脉冲频率:	0.1~16000Hz
真空度:	$10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ mm 汞柱}$
电子束最小斑点尺寸:	0.013~0.025mm
电子束偏转范围:	6.4mm^2
电子束强度:	$1.55 \times 10^5 \sim 1.55 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$
切割深度:	可达 6.4mm
最窄切缝:	0.025mm (对 0.025mm 厚的金属)
孔径范围:	0.025mm (厚度为 0.02mm 时) 1mm (厚度为 5mm 时)
孔的锥度:	一般 $1^\circ \sim 2^\circ$
孔对表面的倾斜度:	$20^\circ \sim 90^\circ$
切割速度:	见表 12.1-3 和表 12.1-4
材料去除速度:	可达 $40\text{mm}^3/\text{s}$ (见图 12.1-5)
穿透速度:	可达 0.25mm/s
钻孔速度:	可达 5000 个孔/s (如工件可快速传送时)
加工误差:	$\pm 0.025\text{mm}$ (孔径 3.2mm, 见图 12.1-6) $\pm 0.0013\text{mm}$ (孔径 0.013mm) 一般是 $\pm 0.025\text{mm}$, 最高是 $\pm 0.005\text{mm}$ 。其它为加工尺寸的 10%

(4) 材料去除速度和公差

材料的去除速度决定于工件材料的热特性和电子束加工装置的功率大小。如图 12.1-5 所示，使用 1kW 的功率时，能以 $15 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$ 的速度加工钨；而用同样的功率也能以 $3.9 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s}$ 的速度加工铝。典型的加工误差如图 12.1-6 所示，大约是槽宽或孔径的 10%。由于加工后的槽和孔带有锥度，因而限制了深宽比。若对脉冲电子束和整套工件的移动利用计算机控制，对薄片材料（包括陶瓷）的钻孔速度可达到每秒 5000 个孔。

电子束加工 (EBM) 12.1

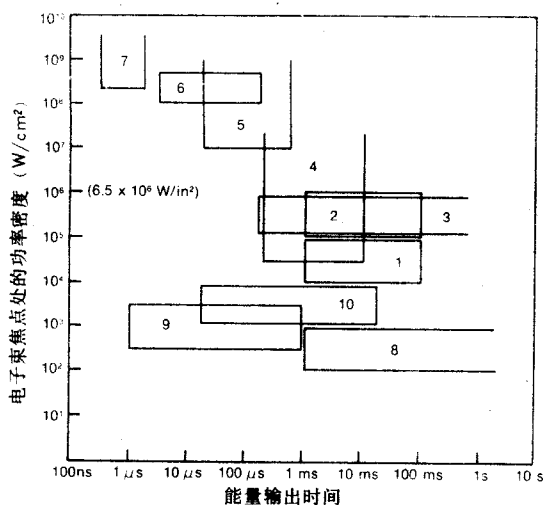
(5) 表面质量

小孔和切割表面的粗糙度约为 $Ra1\mu m$ 左右。短脉冲电子束可减小热影响区的大小。但在切割表面常有一薄层再铸层或热影响物质。已观察到此热影响物质可达到 0.25mm 的厚度。这种物质可能对高应力零件的整体结构性能带来损害，对于这样的零件来说，应将这种热影响物质去除或改变。

(6) 设备和工具

电子束加工机床采用几百瓦至 60000W 的功率容量和标准的或特殊容积的真空室（可达 $6 \times 9m$ 的容量）。特殊设备可包括房间大小的真空室，内有电子枪在数控定位工作台上移动。利用电子束的聚焦点小、能量密度高以及低惯性等精密加工能力，适于采用具有 40 比 1 放大率的光学扫描和控制系统。通常是同时控制电子束和工件的移动。对偏转射束和光点扫描以及脉冲控制适当编程，就可在工件上加工出复杂的几何形状。

(7) 加工特点



金属材料: 1. 淬火 2. 熔融转变 3. 焊接 4. 穿孔 5. 钻、铣 6. 雕刻 7. 精炼

塑料: 8. 聚合 9. 曝光 10. 穿孔

图 12.1-2 电子束的应用范围及其在各种技术中的典型功率密度和冲击时间 (J.Drew, Electron beam drilling influence of metallurgy on hole making operations, Metals park, OH: American Society for Metals, 1978, P.115)

电子束加工过程中产生的“切屑”是一些由飞溅出来的熔化物质凝固后形成的小圆珠或粉末。这些物质必须不断去除，以保持清洁。功率密度较高时，阴极寿命会缩短。为了安全起见，必须对电子束的二次辐射加以屏蔽。

12.1.2 数据选择

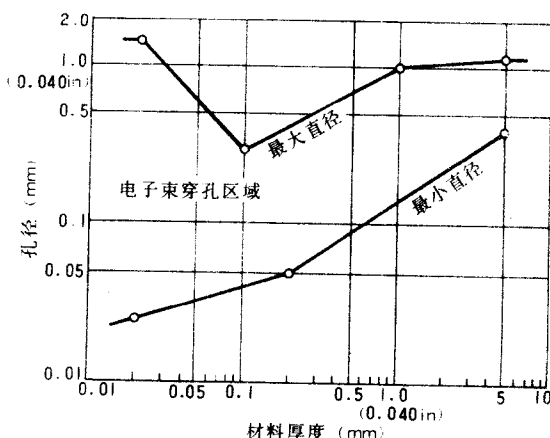


图 12.1-3 钢和镍合金的电子束穿孔范围 (J.Drew, P.118)

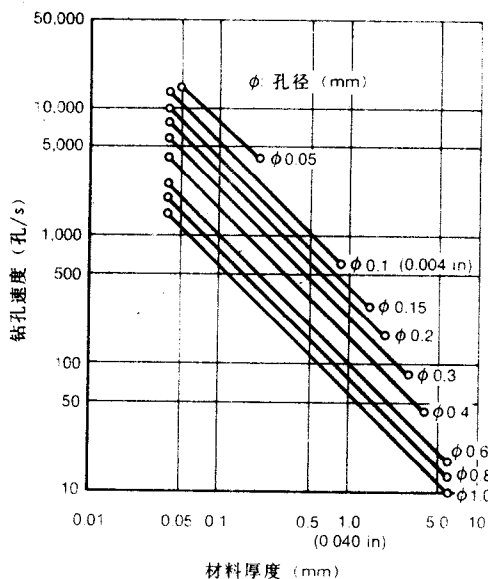


图 12.1-4 钢和镍合金的电子束穿孔速度 (J.Drew, P.119)

12.1 电子束加工 (EBM)

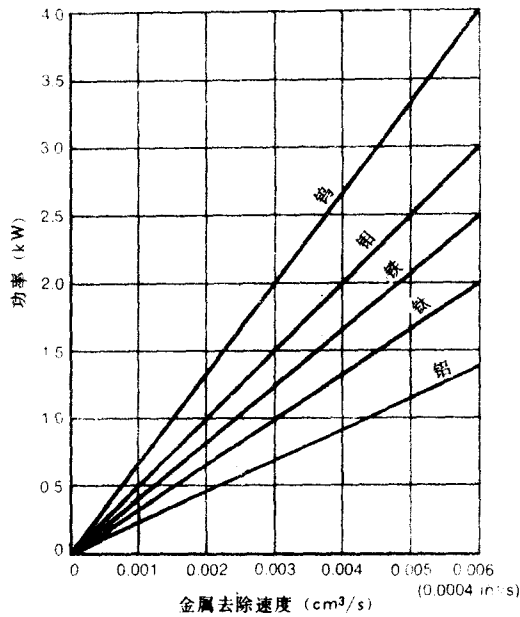


图12.1-5 金属去除速度和功率的关系。(假定切割效率为 15%)，(R.K.Springborn, ed. Nontraditional machining processes. Dearborn, MI: American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 1967, P.141)

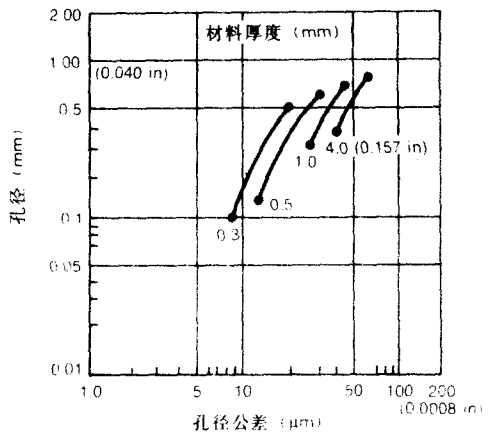


图12.1-6 孔的公差随孔的尺寸和材料厚度的变化关系。一般较深的孔公差较大。(J.Drew, Electron beam tackles tough machining jobs, Machine Design, 48 (February 26, 1976), P.96)

表 12.1-2 各种金属的热物理性质

性 质	材 料				
	铝	钛	铜	钨	铁
熔化温度 (°C)	660	1668	2610	3410	1536
沸腾温度 (°C)	2450	3260	5560	5930	3000
比 热 (cal/g/°C)	0.215	0.126	0.061	0.032	0.11
熔化热 (cal/g)	94.6	36.7	70.0	44.0	65.0
汽化热 (cal/g)	2517.6	2223.4	1340	1005.9	1514.8
比汽化能 (J/cm³)	3.54×10^4	5.07×10^4	7.46×10^4	1.0×10^5	6.28×10^4
汽化能量 ^① (对铝之比)	100	150	220	290	180

① 在相等时间内去除相等体积的相对能量。

表 12.1-3 各种材料的电子束钻孔

工件材料	工件厚度 mm	孔径 mm	钻孔速度 s	加速电压 kV	平均束电流 μA	脉冲宽度 μs	脉冲频率 Hz
400 系列不锈钢	0.25	0.013	<1	130	60	4	3000
氧化锌 Al_2O_3	0.76	0.30	30	125	60	80	50
钨	0.25	0.025	<1	140	50	20	50
90-10 钽钨合金	1.0	0.13	<1	140	100	80	50
90-10 钽钨合金	2.0	0.13	10	140	100	80	50
90-10 钽钨合金	2.5	0.13	10	140	100	80	50
不锈钢	1.0	0.13	<1	140	100	80	50
不锈钢	2.0	0.13	10	140	100	80	50
不锈钢	2.5	0.13	10	140	100	80	50
铝	2.5	0.13	10	140	100	80	50
钨	0.41	0.076	<1	130	100	80	50
石英	3.18	0.025	<1	140	10	12	50

资料来源: 摘自 R.K.Springborn, ed, P.143.

注: 成形孔的主要控制参数是脉冲宽度 (对孔深)、束电流 (对孔径) 和射束内的能量分布以及焦点相对于工件的位置。J.Drew, Farrel Company.

表 12.1-4 各种材料的电子束开槽

工件材料	工件厚度 mm	槽形或尺寸 mm	切割时间或速度		加速电压 kV	平均束电流 μA	脉冲宽度 μs	脉冲频率 Hz
不锈钢	1.57	矩形 0.2×6.35	5min	5min	140	120	80	50
淬火钢	3.18	矩形 0.46×1.83	10min	10min	140	150	80	50
不锈钢	0.18	宽 0.10	50mm/min	50mm/min	130	50	80	50
黄铜	0.25	宽 0.10	50mm/min	50mm/min	130	50	80	50
不锈钢	0.050	宽 0.10	100mm/min	100mm/min	130	20	4	50
氧化铝 Al_2O_3	0.75	宽 0.10	610mm/min	610mm/min	150	200	80	200
钨	0.050	宽 0.025	178mm/min	175mm/min	150	30	80	50

资料来源: 摘自 R.K.Springborn, ed, P.145.

12.1 电子束加工 (EBM)

表 12.1-5 电子束加工的具体应用数据

材 料	加工形状 及 尺 寸	切割速度 或 时 间	加速电压 kV	平均束电流 μA	脉冲宽度 μs	脉冲频率 Hz
氧化铝 0.76mm 厚	孔径 0.3mm	30s	125	60	80	50
氧化铝薄片						
0.25mm 厚	孔径 0.076mm	10s	125	60	80	50
0.25mm 厚	槽宽 1mm	305mm / min	90	150	80	150
0.76mm 厚	槽宽 1mm	710mm / min	150	200	80	200
铁合金薄片 0.25mm 厚	孔径 0.025mm	< 1s	140	25	5	50
微型二极管划线	划线深度约 0.25mm	约 1524mm / min	110	7	12	50
聚酯带 0.038mm 厚	切 割	117m / min	110	600	—	连续
石英晶体 3.2mm 厚	出口直径 0.025mm	< 1s	140	10	12	50
蓝宝石晶体 0.66mm 厚	孔径 0.064mm	< 30s	110	20	9	50
蓝宝石晶体 0.66mm 厚	孔径 0.038mm 孔斜度约 2°	< 30s	110	20	9	50
硅片 0.25mm 厚, 镀金	划线深度 0.05mm	127mm / min	130	70	4	3000
铝 2.5mm 厚	孔径 0.127mm	10s	140	100	80	50
铝 5052 1.58~3.18mm 厚	开 槽	人工操作	130	15	500	300
铜 (OFHC)	切 割	约 1min	130	50	2.5	25000 (扫描器)
0.05mm 厚, 行波管栅极						
黄铜 0.25mm 厚	槽宽 1mm	50mm / min	130	50	80	50
黄铜, 箔栅极 0.10mm 厚	用飞点扫描器切割	约 3min	120	50	4	3000
淬火钢 3.18mm 厚	长方形 0.46 × 1.83mm	10min	140	150	80	50
高速工具钢	入口槽宽 0.20mm	—	120	30000	50000	3.3
4.76mm 厚	出口槽宽 0.18mm	—	120	30000	50000	3.3
钢钻头	孔径 0.36mm	约 3min	140	200	80	50
钢板, 0.18mm 厚	切 割	381mm / min	150	9000	2100	330
1.0mm 厚	切 割	762mm / min	150	9000	2100	330
不锈钢, 304	切割 (焊接 容器开口)	254~508 mm / min	130	5000	5300	35
6.35mm 厚						
不锈钢 (400 系列)	孔径 0.013mm	< 1s	130	60	4	3000
0.25mm 厚	入口槽宽: 0.76mm	—	150	7000	1000	3.3
不锈钢 410	出口槽宽: 0.25mm	—	150	7000	1000	3.3
6.35mm 厚						
钢, 不锈钢						
6.35mm 厚	孔径 0.5~1.0mm	3min	145	4000	2100	12.5
1.0mm 厚	孔径 0.13mm	< 1s	140	100	80	50
2.0mm 厚	孔径 0.13mm	10s	140	100	80	50
2.54mm 厚	孔径 0.13mm	10s	140	100	80	50
1.57mm 厚	矩形 0.2 × 6.35mm ± 0.006mm	5min	140	120	80	50
0.18mm 厚	槽宽 1.0mm	50mm / min	130	50	80	50
0.05mm 厚	槽宽 0.05mm	100mm / min	130	20	4	50
耐腐蚀高温镍基合金	孔径 5.0mm, 材料厚度 5.0mm	—	130	5000	5300	100
	孔径 2.54mm, 材料厚度 11.4mm	70s	130	5000	5300	100
钼, 垫片	孔径小于 0.05mm, 中心距为 0.13mm	< 1s	140	20	20	50
钨合金 (90 钨-10 钨)						
1.0mm 厚	孔径 0.13mm	< 1s	140	100	80	50
2.0mm 厚	孔径 0.013mm	10s	140	100	80	50
2.5mm 厚	孔径 0.013mm	10s	140	100	80	50
钼 100A 薄膜电阻	手动切割	—	100	20	9	1000
钨 0.25mm 厚	孔径 0.025mm	< 1s	140	50	20	50
0.4mm 厚	孔径 0.076mm	< 1s	130	100	80	50
0.05mm 厚	槽宽 0.025mm	178mm / min	150	30	80	50

(续)

12.2.1 概述

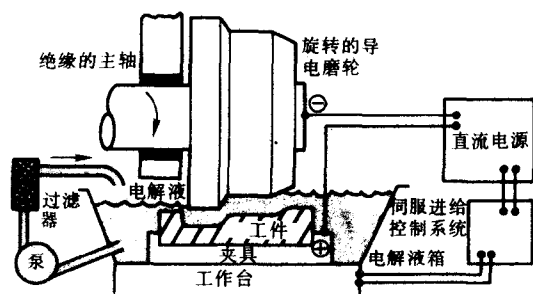


图 12.2-1 电火花磨削原理图

(1) 原理

电火花磨削是在旋转的工具和工件之间靠高度重复火花放电使导电材料蚀除的。用流动的电解液将旋转的工具与工件隔开 (见图 12.2-1)。电火花磨削和电火花加工类似, 只是电极做成磨轮的形状, 且电流通常较低。火花间隙用伺服系统来控制。绝缘的磨轮和工作台则与直流脉冲电源相连接, 一般情况是工件接正极。电流越大, 加工速度越快, 则粗糙度越低, 在工件中的热影响区越深。磨轮的损耗取决于电流密度、工件材料, 磨轮材料、电解液和边角形状。

(2) 实际应用

电火花磨削虽然加工速度低, 但是加工硬质材料 (如硬质合金成形刀具、淬硬的齿条或硬质合金不重磨刀片) 可获得较高的精度。对淬硬的镶拼模经常使用电火花磨削加工。由于它没有明显的切削力, 所以能对任何导电材料磨削脆弱形状或小间距的狭槽。由于铸铁中所含的砂粒会损坏磨轮, 所以通常不采用电火花磨削。

(3) 加工参数

表 12.2-1 电火花磨削加工参数常用值

电 源
类 型: 脉冲控制的直流电源
电 压: 30~400V
频 率: 200~500kHz
电 流: 0.5~200A

磨 轮

种 类: 石墨, 有时用黄铜

速 度: 30~180m/min

工 作 液: 滤过的碳氢化合物油类

火花间隙: 0.013~0.076mm

(4) 材料蚀除速度和公差

材料蚀除速度的范围是 $0.16 \sim 2.45 \text{ cm}^3/\text{h}$, 速度较高时, 表面粗糙度在 $Ra1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 的范围。圆角半径取决于使用的超切值, 其范围为 $0.013 \sim 0.13 \text{ mm}$ 。一般公差为 $\pm 0.005 \text{ mm}$, 最高公差为 $\pm 0.0013 \text{ mm}$ 。

(5) 表面质量

表面粗糙度随火花频率的增加而降低, 典型值为 $Ra0.4 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。工件表面的溶化、汽化和再凝固留下的热影响区, 其深度为 $2.0 \sim 0.05 \text{ mm}$ 。该热影响区引起硬度变化, 并影响到材料性质。因此, 对高应力情况下应用的零件需要去除或改变这种热影响区, 以保证最佳的表面完整性。

表 12.2-2 电火花磨削的材料蚀除速度和表面粗糙度的关系

材料蚀除速度 cm^3/h	表面粗糙度 $Ra, \mu\text{m}$
0.82	3.2
0.49	1.6
0.03	0.4

(6) 设备

现已有各种尺寸系列的电火花磨削设备可以供应。这些设备具有变速传动、绝缘的磨轮主轴和控制工作台速度的伺服机构等。

(7) 加工特点

没有机械磨削作用。磨轮损耗是由于火花放电。损耗比范围是 $100:1 \sim 0.1:1$, 平均值为 $3:1$ 。

体积损耗比 = $\frac{\text{工作蚀除的体积}}{\text{磨轮损耗的体积}}$

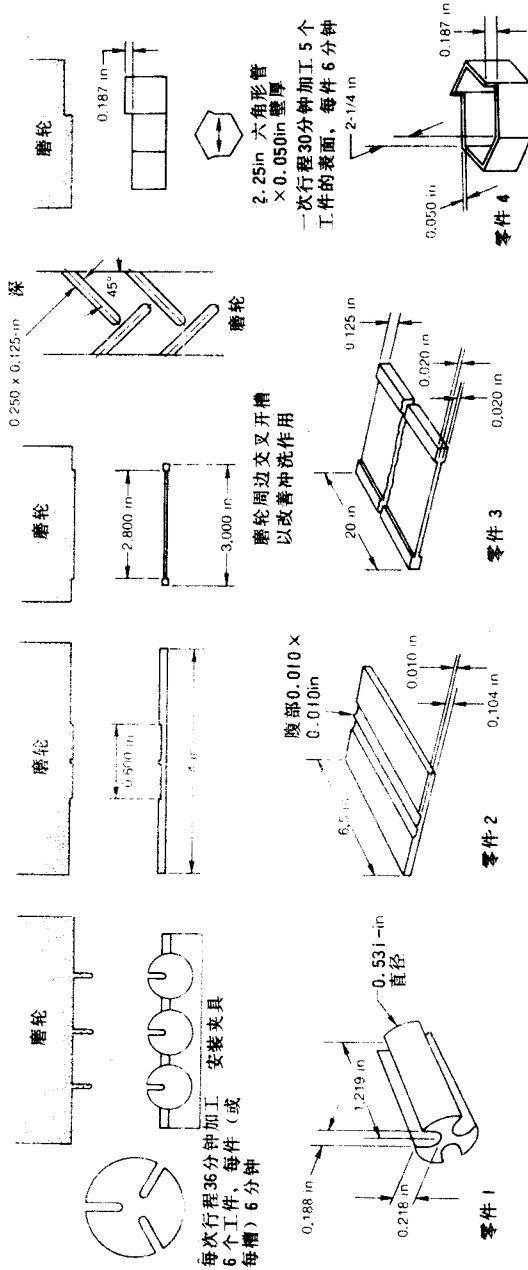
如希望获得小圆角, 就需要经常修整磨轮。磨小圆角比磨圆形或平面更容易使磨轮损耗。大约有一半的损耗比可能由于修整而引起。电解液必须加到工件与磨轮之间。因此, 接触表面通常浸在电解液中。

12.2 电火花磨削 (EDG)

12.2.2 具体应用数据

表 12.2-3 不锈钢电火花磨削的应用数据

零件 编号	不锈钢 型号	工 件			加 工 条 件					结 果			
		工件类型	加工 形状	加工形状 尺寸	速度 ^① r/min	电压 V	电流 A	电容 μF	脉冲 频率 kHz	磨削 速度 cm ³ /h	加工 时间 min	体 积 消耗比	表面 粗糙度 Ra, μm
1	303	圆棒: 13.5mm(直径) × 30.9mm(长)	3 槽	宽 4.77mm, 深 5.54mm, 底部呈半圆形	20	70	10	6	32	7.7	6	3:1	5
2	304	板条: 2.64 × 101 × 165mm	肋条	宽 15.2mm, 深 0.25mm, 中间腹部宽 0.25mm	20	70	0.5	0.5	32	0.98	44	3:1	1.5
3	304	板条: 3.18 × 76 × 508mm	2 槽	宽 71mm 深 0.5mm	20	70	2	2	130	2.56	400	6:1	1.5
4	304	六角形管: 57 × 1.27mm(壁厚)	表面, 端部 台阶切削	台阶深 4.75mm	34	80	8	2	32	—	30	—	3.1



① 磨轮直径为 300mm。图中 lin = 25.4mm

12.3.1 概述

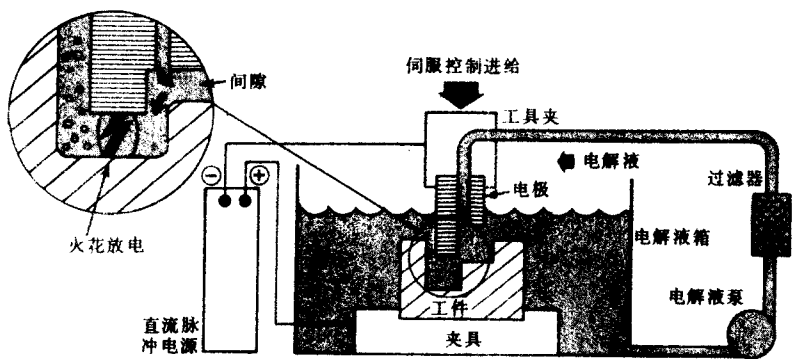


图 12.3-1 电火花加工原理图

(1) 原理

电火花加工是在工件和工具之间有电解液流动的情况下，由脉冲直流电源产生快速和重复的火花放电使导电材料去除（见图 12.3-1）。把做成一定形状的工具（电极）在伺服控制下向工件进给，当达到一定距离时便产生火花放电，电解液被击穿。每个火花放电的频率和能量由直流电源确定和控制。在电极进给时，由伺服控制来保持工具和工件之间具有稳定的间隙。油类电解液使汽化和冷凝的物质冷却和冲走，间隙又恢复到绝缘状态。表面粗糙度随频率的增加和电流的减小而降低。材料去除速度、表面粗糙度和超切量都随电流的增大或频率的降低（或较长的接通时间）而增加。常用的电极材料是黄铜、紫铜、铜-钨、钨丝和石墨。小火花间隙需要有较严格的公差控制和较低的加工速度。电蚀作用不仅在工件上，而且也在工具上产生。损耗比决定于电源的火花波形、电极材料和工具材料。当使用与标准极性（工件为正）相反的极性对钢进行电火花加工时，几乎可获得无损耗的加工参数组合。

(2) 实际应用

电火花加工可加工任何导电材料而不论其硬度如何。特别适于加工不规则的槽或型腔。电火花加工的应用范围从直径为 0.050mm 的小孔到 45t 重的汽车模具型腔都可以加工。由于无直接接触，所以能成功地加工精细的结构。当使用成型电极向工件进给，便可加工出三维形状。由于火花主要集中在

最高点和角部，所以加工不产生毛刺。多电极加工、自动修整、自动定位和数控，所有这些都有助于电火花加工提高功能。电火花加工常被用于制造工具和模具。还用于大批生产和半自动生产线中。电火花加工小孔或异型孔（与工件表面呈小夹角）也是常见的应用。在高强度和高硬度材料上可加工出狭槽（0.050~0.30mm）、蜂窝状型孔和一些脆弱部位。

(3) 加工参数

表 12.3-1 电火花加工参数常用值

可单独控制的参数	
开路电压:	50~300V
频率:	50~500kHz 或每个脉冲通断时间的等效占空因素规准
工作液种类:	碳氢化合物（石油）油类，去离子水、煤油、气体（干态）（见表 12.3-10）
工作液流动压力:	711mm 真空度到 482kPa 压力
电极材料:	石墨、铜、黄铜、锌-锡合金、钢、铜-钨合金、铜-石墨、银-钨合金、钨
伺服传动间隙	
灵敏度控制:	间隙:0.013~0.13mm
电容:	（在某些类型机床上）根据试加工确定
极性:	“标准”极性是工件为正、电极负（见表 12.3-8）
非独立的变量及结果	
平均电流:	0.1~500A（少数大型机床采用多回路 500A 电源，分开引线）
火花间隙:	0.013~0.13mm
超切量:	0.005~0.50mm/边

12.3 电火花加工 (EDM)

(续)

材料去除速度:	$0.05 \sim 24.6 \text{ cm}^3/\text{h}$
损耗比(工件蚀除对电极蚀除之比):	$0.5:1 \sim 100:1$ (见表 12.3-12)
表面粗糙度:	$Ra0.2 \sim 6.3 \mu\text{m}$
再铸层深度加热影响层厚度:	$0.0025 \sim 0.13 \text{ mm}$
圆角半径:	0.025 mm 或等于超切量
锥度:	$0.0005 \sim 0.005 \text{ mm/mm}$ / 边, 用适当工具可减少锥度

(4) 材料去除速度和公差

进给速度和材料去除速度的范围是 $0.0059 \sim 0.65 \text{ cm}^3/\text{h}/\text{A}$ 。圆角半径通常是 0.4 mm 。在正常情况下的加工误差可达 $\pm 0.025 \text{ mm}$ 。当仔细选择或改进加工条件时, 可重复达到加工误差 $\pm 0.005 \text{ mm}$ 。再铸层是可以控制的, 并可重复达到几微米。

材料去除速度、表面粗糙度、再铸层和热影响层的厚度都随火花强度的增加而增加。见表 12.3-3。

电极的电蚀可表示为如下的损耗比 (可参见图 12.3-19):

$$\text{体积损耗比} = \frac{\text{工件去除体积}}{\text{电极消耗体积}}$$

或

$$\text{长度损耗比} = \frac{\text{加工深度}}{\text{电极消耗长度}}$$

圆角半径受火花持续时间所控制, 而锥度受电弧间隙中或液体中的切屑量所控制。

(5) 表面质量

表面特征是一系列小的重叠凹坑, 其大小随火花能量的增加和 (或) 火花频率的降低而增大。再铸层和热影响层在所有材料上都产生, 深度范围从 $0.002 \sim 0.13 \text{ mm}$ 。对于一些要求严格或疲劳敏感的表面, 应把这些变质层去除或变更。表面粗糙度的范围一般是 $Ra1.6 \sim 3.2 \mu\text{m}$ 。粗加工表面的粗糙度可达 $Ra12.5 \mu\text{m}$, 而采用比较昂贵或比较高级的方法可达到 $Ra0.05 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。表面残余应力层虽然很浅 (0.025 mm 以下), 但占抗拉强度的百分比很高。电火花加工表面的疲劳强度如无后道工序处理通常会显著降低。

(6) 设备

电火花加工设备可采用的尺寸范围很广。从只

有几安培容量的台式机床到高达 5000 A 容量的 $4 \times 5.5 \text{ m}$ 模具加工机床 (用 500 A 多回路电源组成)。

一般都采用自动控制或数控。自动进给、可交换电极的夹具和转塔式电极支架可用于电极的交换和加工过程的自动化。多电极和多回路电源提高了许多类型机床的生产率。订购设备通常都带有完整的系统, 因此电火花加工机床可以放在正规车间的任何地方。但应有排烟管道, 同时工具装备中还应提供一种排气装置。脉冲电源通常能对每次放电的通断时间和放电能量充分进行控制。

电火花加工 (EDM) 中的电火花磨削 (EDG) 方式在第 12.2 节的 EDG 中叙述, 而在第 12.5 节的 EDWC 中介绍线切割电火花加工。沿轨道运行的平动电蚀加工或行星式电蚀加工是近来新增的电火花加工功能。这种方法几乎可以用单电极把几何形状复杂的模具型腔定量地加以扩大。电极的运动范围如图 12.3-2 所示, 从简单的绕轨道运行的运动到复杂的垂直、偏心和各种轨道运动的组合。

(7) 加工特性

高质量的生产有赖于坚固的机床和夹具装置, 以便伺服机构能对间隙进行精密控制。

为了操作安全, 电火花加工通常是完全浸在电解液中进行, 加工中产生的气体和烟雾应注意排除。为了消除油类电解液对皮肤的刺激作用, 操作人员要有良好的卫生习惯, 彻底清洗并使用护肤膏。

12.3.2 数据选择

电火花加工参数的多种组合都可对导电工件进行加工。利用对某一特定设备和 (或) 系统的使用经验再加上对电极与工件材料的组合进行少数试验, 即可为操作者提供参考依据以提高预见性和加工效率。大多数设备制造厂对其设备可提供加工参数。这些数据往往是在标准条件下测得的^①。在实际应用中由于使用的材料不同、电解液不同或产品形状不同以及操作人员经验水平不同而与标准状态有所差异。表 12.3-2 中的步骤是作为选择电火花加工参数的合理步骤而推荐的。其他图表中的数据按表 12.3-3 中标注的有关名词术语列出。

^①瑞士标准 37550 和西德推荐标准 VDI3400 均建于 1979 年。

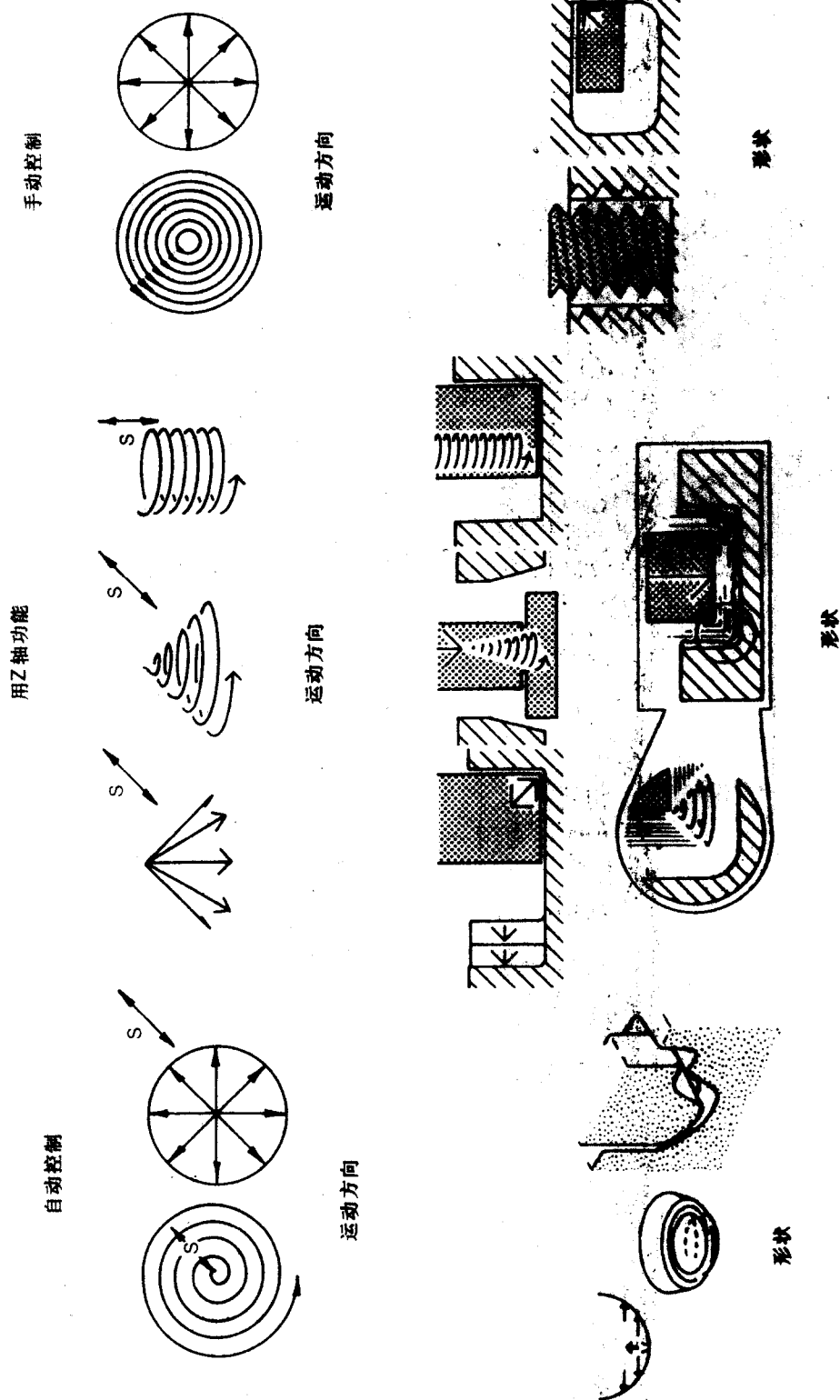
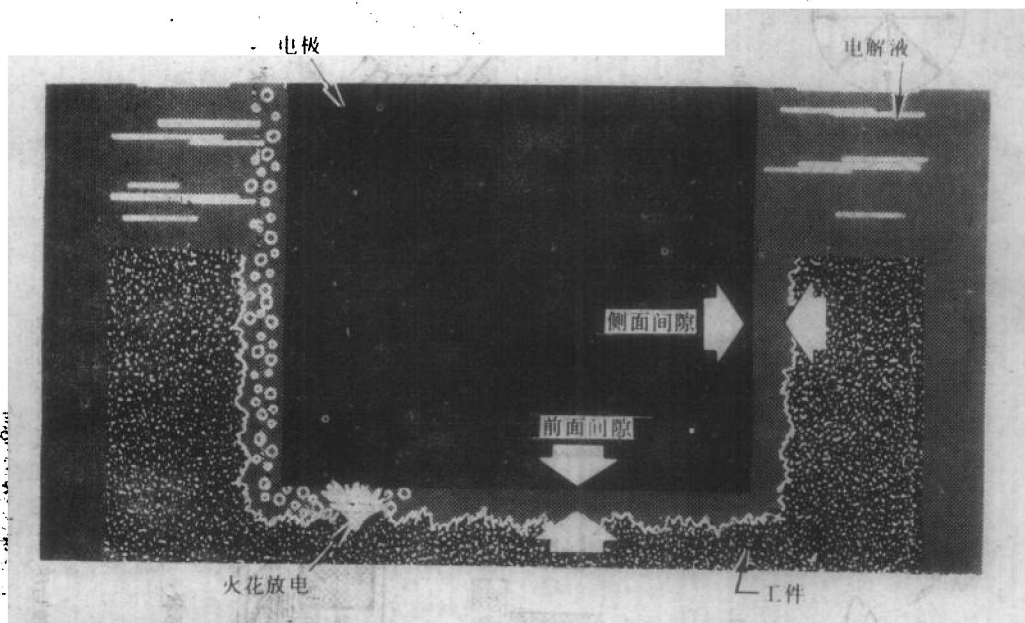


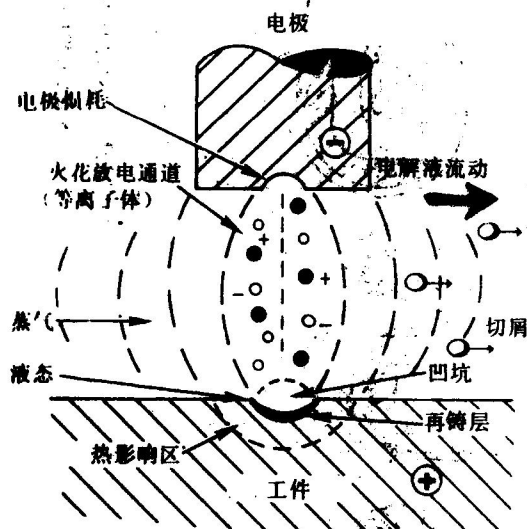
图 12.3-2 电火花加工中的沿轨道电蚀运动 (平动) 或行星式电蚀运动
S 表示进给方向 (引用自: Agielectron Corporation)

12.3 电火花加工 (EDM)

型腔加工一般原理图



火花放电形象图



电压和电流曲线简图

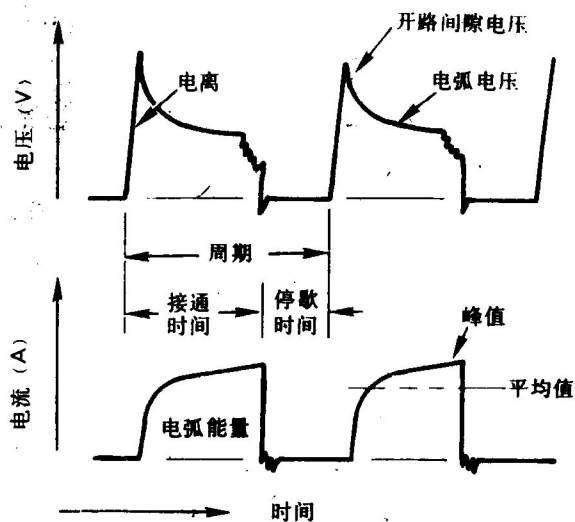


图 12.3-3 电火花加工参数的名词术语 (引自: Agietron 公司)

表 12.3-2 选择电火花加工参数的步骤

项 目	资 料
1. 材料种类、冶金状态和熔点	设计图纸和材料技术规格
2. 所需表面粗糙度 (如留有精加工余量也很小)	设计图 (只有当使用性能有需要时才考虑在关键工作区或表面去除再铸层和热影响层)
3. 被去除材料的体积	根据设计图和原材料形状计算待去除的体积 (cm^3)
4. 材料去除速度——初步的	图 12.3-4~12.3-6; 表 12.3-3 和 12.3-4
5. 加工时间估计	被去除的材料除以材料去除速度
6. 电极材料种类选择	表 12.3-5、12.3-6 和 12.3-12
7. 加工参数间的折衷选择	表 12.3-7, 应根据工件的复杂性、电极、成本、所需精度和质量, 在高去除速度与一般的或最低的损耗之间作出选择
8. 选择加工极性和开路电压	表 12.3-8
9. 选择特定的参数	图 12.3-7~12.3-11 和表 12.3-9 是对一种特定电极 (石墨) 与材料 (钢) 组合而给出的。至于其他材料与电极极性组合的类似曲线, 应由操作者用他的具体设备、控制和材料求出。许多电火花加工机床厂对其设备都备有资料, 图 12.3-12~12.3-15。对于钻孔, 见表 12.3-15 和图 12.3-22
接通时间——对粗加工和精加工	
电 流	
电 容	
材料去除速度	
表面粗糙度	
端部损耗	
角部损耗	
10. 电解液的选择	表 12.3-15; 图 12.3-16 和 12.3-17
11. 冲液及过滤	表 12.3-11 是保证高质量重复性的最重要的参数之一, 必须适合于工件形状、电极形状及火花间隙或超切。考虑使用沿轨道运行的电极 (图 12.3-2), 冲液情况愈是困难 (图 12.3-18) 愈会增加加工循环时间。循环电解液的滤清程度应随火花间隙的减小而提高。但冲液愈困难, 推荐最大滤清度为 $75\mu\text{m}$
12. 检查所选参数对使用设备的可用性	设备的额定容量和控制要点 (按电路类型可能要选电容)
13. 加工时间——精确的	根据第 9 项已修正的材料去除速度和第 3 项被去除的材料, 去除冲液孔的供给时间 (很小) 而加以修正。对于精加工, 当计算去除的材料时, 假如电极无角部损耗可获得非常近似的结果。可对冲液困难情况给出一个相乘系数
14. 超切——在电极和工件之间的侧面损耗——电极设计的修正量	图 12.3-12~12.3-15。随火花强度、材料去除速度和电压规准的增大而增加。每对工件-电极材料都有其固有的超切、电流、频率曲线关系
15. 损耗——由电极设计、行程设定和精细部分精度决定的一个修正量	图 12.3-19; 表 12.3-12。角部损耗通常是最重要或最要限制的损耗
16. 电极个数	对精细形状使用精加工电极。它又常被用作下一个零件的粗加工电极。使用的电极个数取决于损耗率和加工深度
17. 电压设定	图 12.3-20; 表 12.3-8。为了最大效率, 使用最低电压来获得平均电流
18. 选择电极的制造方法	往往是电加工最花费用的一项。有许多制造和加工方法的选择方案取决于电极材料的生产速度、形状或成本。表 12.3-13 和 12.3-14
19. 电极设计	见第 2、第 14、第 15、第 16 和第 18 项
20. 评定材料表面变质层范围: 再铸层和热影响层 (HAZ)	图 12.3-21。在再铸层下面的热影响层深度近似等于再铸层深度 (注: 如电火花加工的表面要受高应力、应力腐蚀或临界负荷, 应采取措施, 改善表面完整性)
21. 试加工	最好用选择的条件。对工件材料进行几次试加工, 以检验所得的超切值、去除速度、表面粗糙度和损耗比。这些数据就可及时对操作者提供特定条件下自备的可加工性能表

12.3 电火花加工 (EDM)

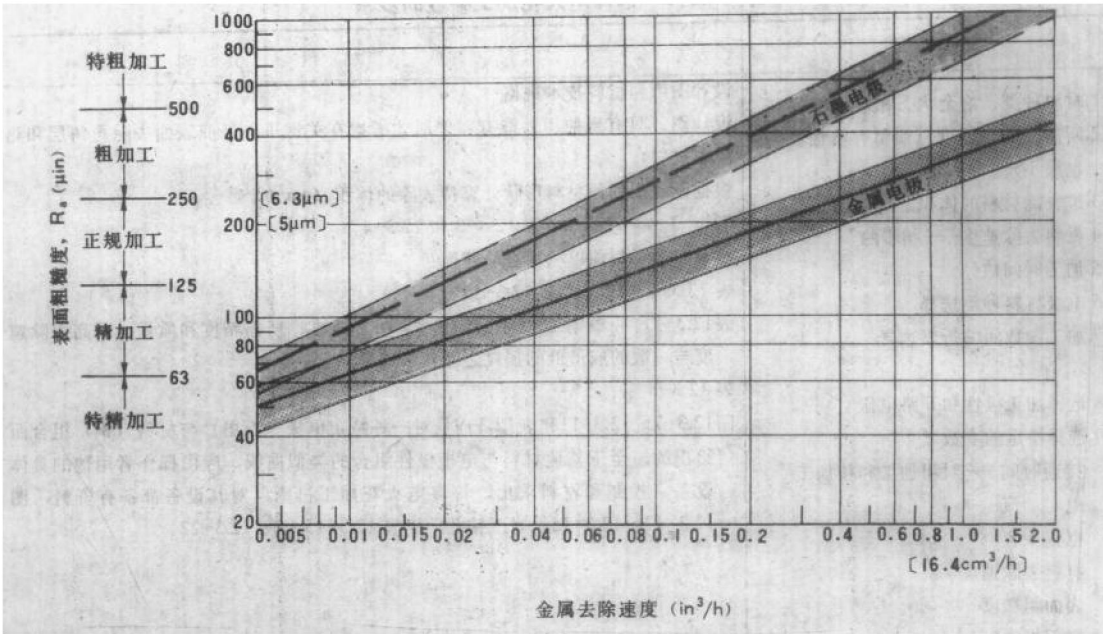


图12.3-4 采用石墨电极或金属电极进行电火花加工时的材料去除速度和表面粗糙度的关系 (改绘自: G.Bellows, Surface integrity from electrical discharge machining of superalloys, report R72AEG236, general Electric Company, 1972.P.18)

表12.3-3 电火花加工的金属去除速度与表面粗糙度及预计再铸物质的关系

加工等级	表面粗糙度 $R_a, \mu\text{m}$	金属去除 速度 cm^3/h	预计的再铸物质	
			常用值 mm	最大值 mm
特精加工	<1.6	<0.05	<0.0056	0.014~0.015
精加工	1.6~3.2	0.05~0.30	0.0056~0.0071	0.025~0.033
常规加工	3.2~6.3	0.30~6.9	0.0071~0.011	0.056~0.084
粗加工	6.3~12.5	6.9~24.6	0.011~0.017	0.14~0.23
特粗加工	>12.5	>24.6	>0.017	~0.36

表 12.3-4 电火花加工的金属去除速度

电 流 A	金属去除速度 ^①	
	石墨电极 cm^3/h	金属电极 cm^3/h
25	24.6	12.3
50	49.2	24.6~29.5
100	90.1	44.2~72.1
200	147.5	②
400	262.0	②

注: 对于 20A, 一般粗略估计的参考值为 $16.4 \text{ cm}^3/\text{h}$

①以钢件为准

②石墨一般用于高电流加工时

表 12.3-5 电火花加工用电极材料的一些物理性质

电极材料	溶 点 $^{\circ}\text{C}$	沸 点 $^{\circ}\text{C}$	从室温加热到使 1 cm^3 金属汽化的热量 cal/cm^3	热导率 $\text{Ag}=100$ %	电导率 $\text{Ag}=100$ %	热膨胀 每 $^{\circ}\text{C} \times 10^{-6}$	强 度 MPa	弹性模数 $\text{kPa} \times 10^6$
铜	1083	2580	12740	94.3	96.5	16.0	241.5	124.2
石墨	①	4000 以上	大约 20000	30.0	0.1	4.5	34.5	5.93
钨	3395	5930	22680	29.6	48.1	4.6	4140	351.9
铁	1535	2800	16900	16.2	16.2	15.0	276	186.3

资料来源: E. I. Shobert. II. What happens in EDM. Manufacturing Engineering, 77 (july 1976) .P.39

①在大气压下熔化之前即升华或汽化。

表 12.3-6 电火花加工用电极材料的选择

电极材料	指导原则 (见附注)	形 状	精加工角 部损耗率	精加工端 部损耗率	相对 成本	可加工 性 能	推荐的应用	不推荐的应用
石墨	①	块、杆、管、型棒	5 : 1	到 100 : 1	低	最好	工具加工	
铜	②	型棒、杆、片、线、 管、锻件、冲压件	1 : 1	2 : 1	中	较好	孔、槽	高精度和 精细形状
铜-石墨	③	块、杆、	2 : 1	4 : 1	中	良好	一般应用	
黄铜	④	和紫铜相似	0.7 : 1	1 : 1	低	好	孔和型腔	高精度
锌合金	⑤	铸件、压铸件	0.7 : 1	2 : 1	低	较好	锻模型腔	孔
钢	⑥	所有形状	1 : 1	2 : 1	低	最好	通孔	硬质合金
铜-钨	⑦	型棒、扁平块、 薄片、杆、线、管	3 : 1	8 : 1	中	尚可	槽、硬质合金	大面积
银-钨	⑧	烧结件	8 : 1	12 : 1	高	尚可	小槽、孔、 复杂精细形状	大面积
钨	⑨	线、杆、带状	5 : 1	10 : 1	高	差	小孔	不规则孔

①石墨：电火花加工速度快；电极损耗最小；容易加工；呈现极好的加工稳定性；工件表面产生的粗糙度与石墨的颗粒大小和密度有关；旋转的石墨电极可产生小于 $Ra1.0\mu m$ 的表面粗糙度。有许多不同规格的石墨可以采用。很容易用导电性粘结剂固定到工具柄上。需要良好的电解液流动条件。

②铜：可产生小的表面粗糙度；对无损耗电火花加工最好；容易加工或精压成形；损耗率低。

③铜-石墨：兼有两种材料的最好特性（比石墨的导电性更好和强度更高）。在较差的冲液条件下能很好地加工。

④黄铜：损耗比铜高；但易于加工，比较经济，适用于许多作业；不适用于加工硬质合金。

⑤锌-锡合金：由于容易在金属模中浇铸，故使用于需要许多相同电极进行大批生产的场合；能压铸和压印到一个现成的型腔中；对复杂形状的重复制造比切削加工容易，再熔化后可重新使用；不适用于精细形状；通常损耗比较大。

⑥钢：对材料的去除速度低；适合于有分型线相配的加工；有较大的热影响层；容易加工；但对某些钢材，其损耗比不能令人满意。

⑦铜-钨：具有较低的损耗及较好的精加工特性；可以钎焊并具有较好的刚性；用于紧公差尺寸、精细形状和低损耗的场合；可用来加工硬质合金；在开槽加工中使用；金属去除速度比石墨低；成本较高；当加工钢时，电极采用正极性；模制的铜-钨电极可用于复杂形状或重复性生产中。

⑧银-钨：能耐角部损耗；对于精细形状或细小部分的加工很好；比铜-钨的损耗低；去除速度比铜-钨高；成本较高；一般限于加工复杂的硬质合金模具。

⑨钨：具有高强度，这使它最适合于加工直径小于 $0.25mm$ 的孔；成本高，但损耗小。

12.3 电火花加工 (EDM)

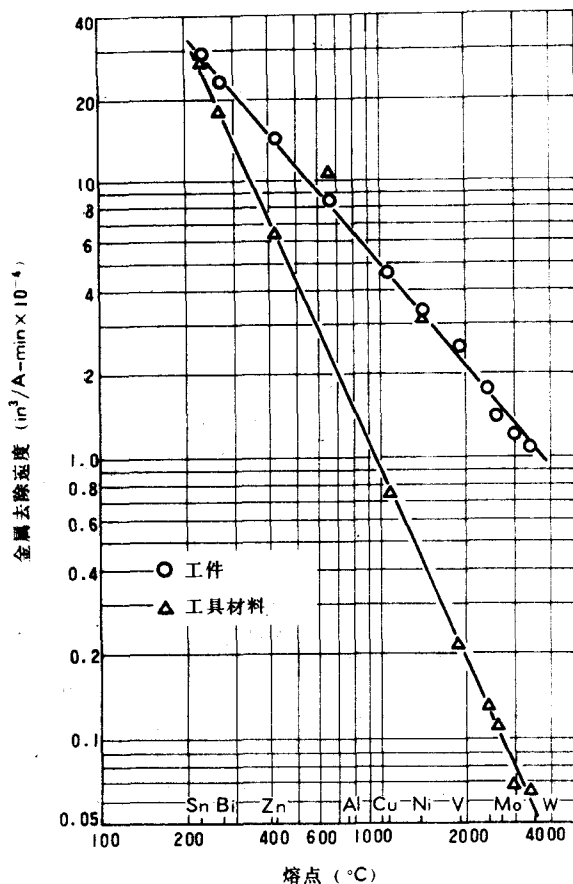


图12.3-5 金属平均去除速度与熔点的关系
(L. J. Quackenbush and W. N. Lawrence, Electrical discharge machining for the 70's, Ann Arbor, MI: University of Michigan, 1971.P.19)

表 12.3-7 电火花加工参数之间的调整情况

情况 A	情况 B
材料去除速度高	材料去除速度低
表面粗糙度大	表面粗糙度小
频率低（长脉冲周期）	频率高（短脉冲周期）
放电能量大（高安培和长接通时间）	放电能量小（低安培和短接通时间）
放电间隙大	放电间隙小
超切量大	超切量小
电极损耗适中	电极损耗小

表 12.3-8 电火花加工的极性和开路电压选取指南

项 目	电极（工具）极性 ^①		
	负	正	
金属去除速度	中~快	中~低	
加工与损耗之比	中	高~无损耗 ^②	
表面粗糙度:			
钢	好~粗	好~极好	
其他材料	好(决定于其他参数)	好(决定于其他参数)	
工件材料	电极材料	电极极性 ^①	开路电压(V)
钢	钢	正	< 270
钢	铜钨	正	< 100
钢	石墨	正	< 100
钢	铜	正	< 150
钢	铜	负	< 270
铜	铜钨	正	< 100
铜	铜	负	< 100
硬质合金	铜钨	负	< 270

注：该指南随供电单元的特性和为获得理想的平均电流和加工速度所需的电压而变化。

①“常规极性或标准极性”通常是指工件为正，电极为负。但从出现固体电路控制后（约1970年），有些著作与此相反，特别是对某些实践证明其损耗率较低的材料。

②“无损耗”电火花加工是在某些工件材料和电极材料组合所获得的损耗比为100:1或更小时的加工参数特定配合。

表 12.3-9 脉冲时间、停歇时间与占空系数的关系换算表

脉冲时间 μs	停 歇 时 间 μs			
	2	2	2	2
2	2			
3	3	2		
4	4	2		
6	6	3	2	
12	12	6	3	
25	25	12	6	2
50	50	25	12	3
100	100	50	25	6
200	200	100	50	12
400	400	200	100	25
800	800	400	200	50
1600	1600	800	400	100
近 似 占 空 系 数				
	50%	66%	80%	95%

资料来源：Poco Graphite, Decatur, Tx.

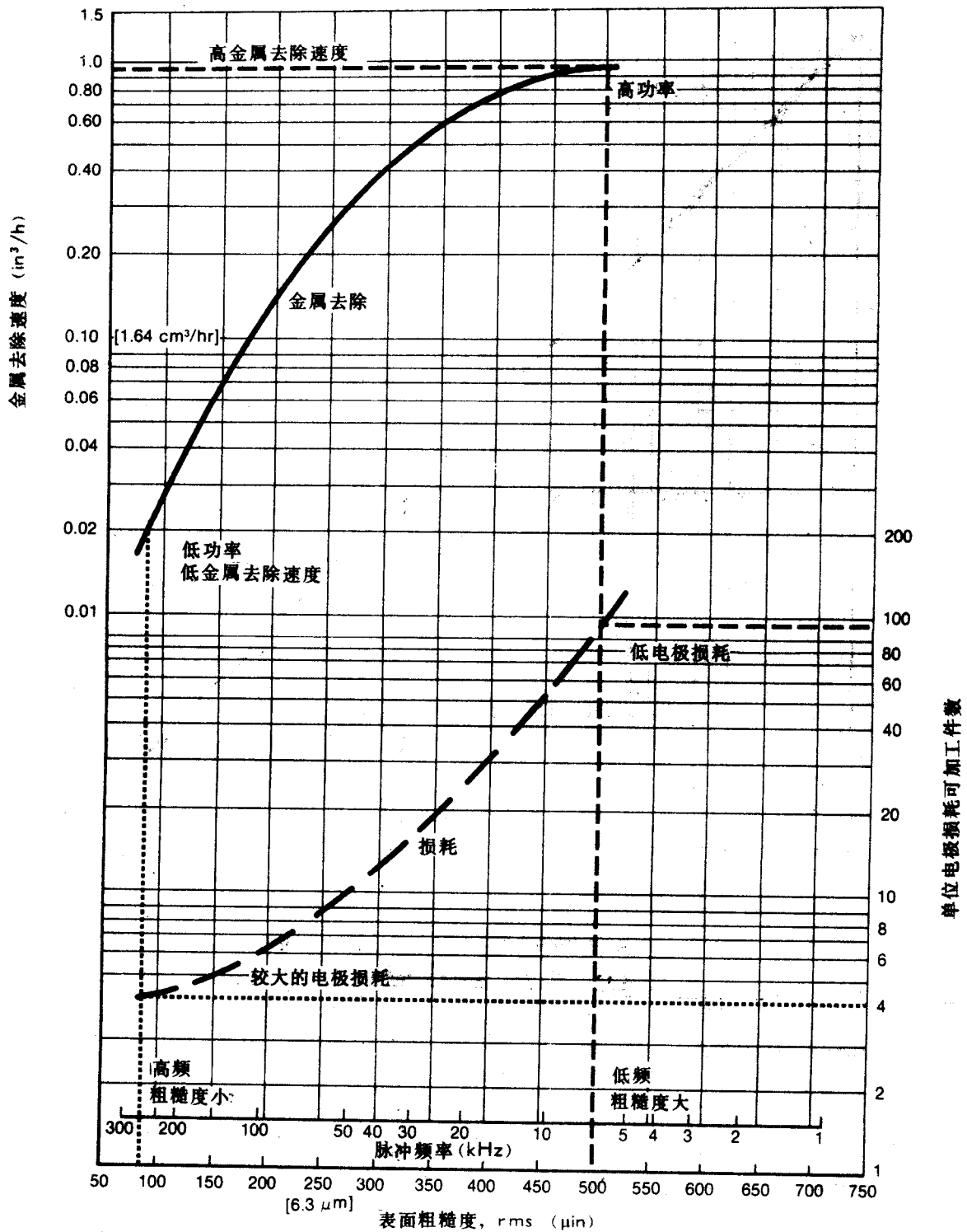


图 12.3-6 电火花加工工艺参数的相互关系 (引自: Poco Graphite, Inc.)