

机械加工
工艺手册

第2卷

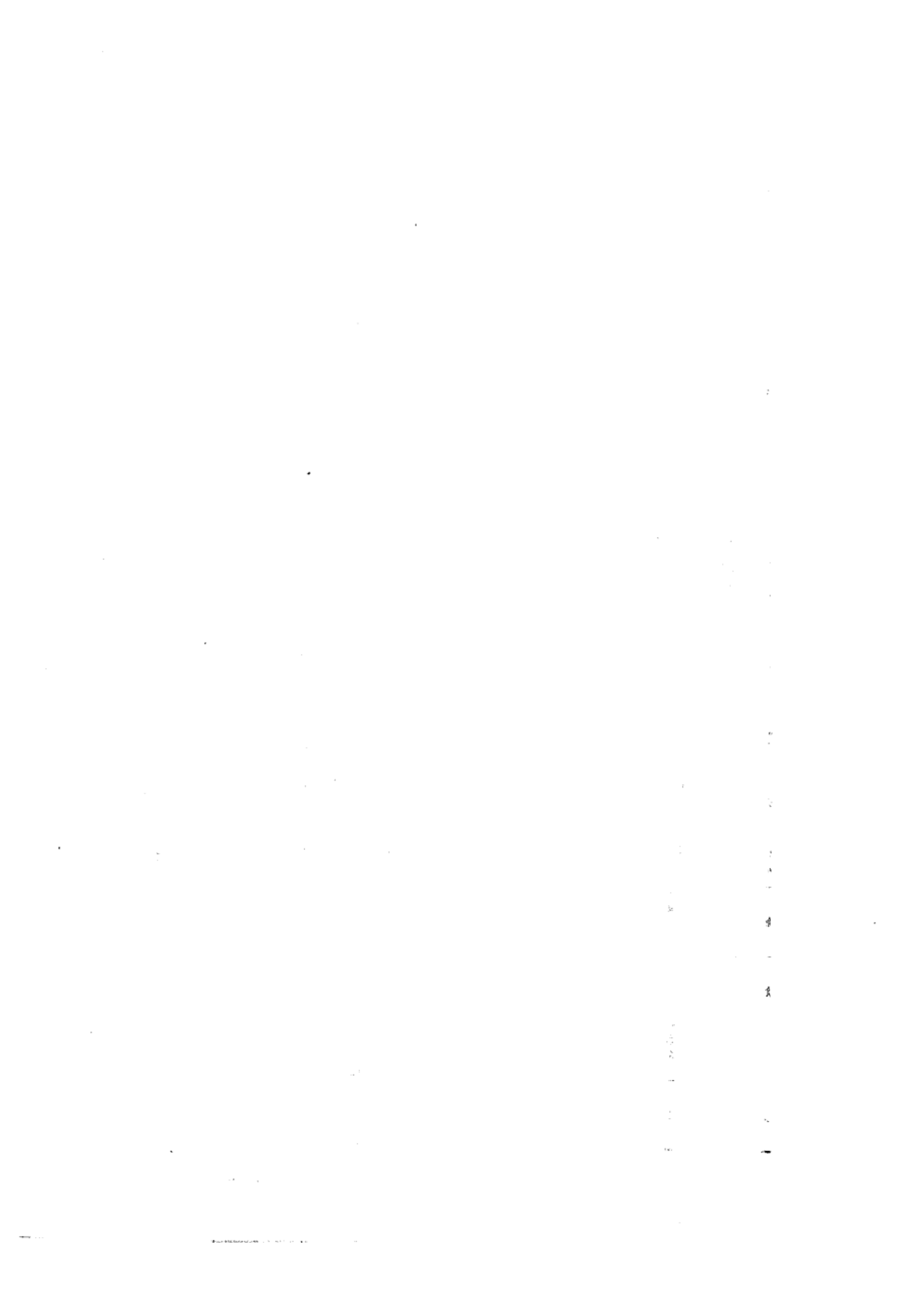
机械工业出版社

第15章 特种加工

主 编 赵家齐 (哈尔滨工业大学)
编 写 张学仁 (哈尔滨工业大学)
刘晋春 (哈尔滨工业大学)

主 审 奚绍申 (上海交通大学)
居乃仁 (苏州电加工机床研究所)
陈湛清 (上海交通大学)

责任编辑 何富源



第1节 概述

1 特种加工的定义及特点

特种加工是常规切削、磨削加工以外的一些新的机械制造加工工艺方法的总称。是指主要不是直接利用机械能，而是利用电、热、光、声、化学等其他能量来对工件进行尺寸或表面加工的一些方法。

由于主要不靠机械能来切削、磨削工件材料，因此特种加工的特点为：

1) 加工过程中工具和工件之间不存在显著的机械切削力，好多情况下工具并不与工件直接接触；

2) 加工用的工具硬度可以低于工件材料的硬度。

由于上述特点，特种加工的适用范围为：

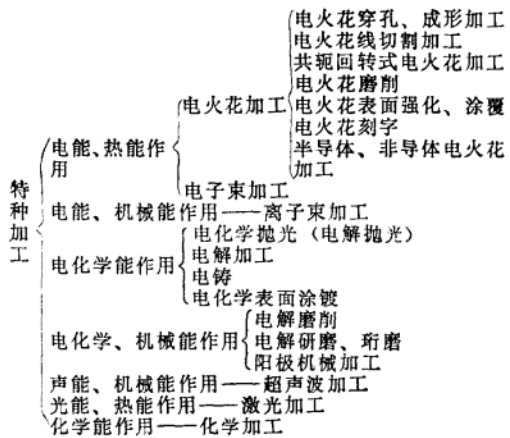
1) 加工任何硬度、强度、脆性的金属或非金属材料，如淬火钢、不锈钢、硬质合金、金刚石、石英和陶瓷等；

2) 加工任何复杂、特殊的表面，如喷气涡轮发动机扭曲的叶片，各类冲压、成型模具表面，喷油嘴、喷丝板上的小孔和窄缝等；

3) 加工具有特殊要求的零部件，如细长零件、薄壁零件、弹性元器件等低刚度零件。

2 特种加工的分类

特种加工的分类还没有明确的规定，一般按所用能量和作用原理分类，具体分类如下：



3 几种常用特种加工方法性能和用途的对比

常用特种加工方法性能和用途的对比见表

表15-1-1 常用特种加工方法的对比

特种加工方法	可加工的材料	工具损耗率 最低/平均 (%)	加工速度 平均/最高 (mm ³ /min)	尺寸精度 平均/最高 (mm)	表面粗糙度 平均/最细 Ra(μm)	特殊要求	主要适用范围
电火花加工	任何导电的金属 材料，如 硬质合金、耐	0.1/10	30/3000	0.05/0.001	3.2/0.025		各种高硬度材料制成的零件、复杂的型孔、型腔、三维成形曲面、小孔、深孔、窄缝等的加工，如：各种模具、喷丝头、硬质合金、螺旋环规等
电火花线切割加工	热钢、磁钢、 不锈钢、淬火 钢、有色金属 与合金及稀有 金属等	较小 (可补偿)	30/260 (mm ² /min)	0.02/0.003	1.6/0.2		各种型孔、二维成形曲面、窄缝等的加工，如：冲模、挤压模、样板等
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.03	0.8/0.2	机床夹具、工件 需采取防 锈措施	各种复杂的二维、三维成形曲面、型腔、型孔和深孔的加工，如：膛线、叶片、机盒及产量较大的各类模具等
电解磨削		1/20	1/100	0.02/0.001	小于0.1		各种要求精度高、表面质量好并且由难加工材料（如硬质合金、淬火钢等）制成的零件的加工，如：硬质合金刀具、量具、轧辊等
超声波加工	任何硬脆的 金属和非金属 材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	1.6/0.05		石英、玻璃、陶瓷、锆、硅、硬质合金、氟化物等硬脆材料制品的加工和研磨
激光加工	任何材料	不损耗	瞬时加工速度 很高受功率 限制平均加工 速度不高	0.01/0.001			小孔、微孔、窄缝的加工及成形切割、剥蚀等。此外还可用于焊接、表面处理、热处理等

15-1-1.

第2节 电火花穿孔、成形加工

1 电火花穿孔、成形加工的原理

电火花穿孔加工主要是指加工各类通孔的冲模，电火花成形加工主要是指加工各类盲孔的型腔模，它们的基本原理和所用的机床设备是一样的，仅是工具电极和工件形状不一样。

电火花穿孔、成形加工原理和设备组成见图15-2-1。

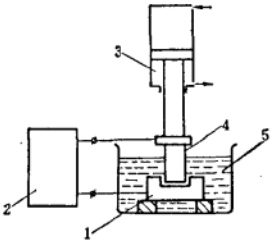


图15-2-1 电火花穿孔、成形加工原理及设备组成
1—工件 2—脉冲电源 3—自动进给调节装置
4—工具电极 5—工作液

电火花加工的原理是基于工具和工件（正、负电极）之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象来蚀除多余的金属，从而达到对尺寸和表面预定要求的目的。工件1与工具电极4分别接脉冲电源2的两输出端。自动进给调节装置3（此处为液压缸及活塞）使工具电极和工件间经常保持一个很小的放电间隙。当脉冲电压加到两个电极（工件和工具）上，便在当时条件下相对某一间隙最小处或绝缘强度最低处击穿工作液介质，在该局部产生火花放电，瞬时高温使工件和工具表面都蚀除掉一小部分金属，各自形成一个小凹坑，经过一段时间间隔，第二个脉冲电压又加到两极上，又会在当时极间距离相对最近处或绝缘强度最弱处击穿放电，又电蚀出一个凹坑。这样以很高频率连续不断的重复放电，工具电极不断地向工件进给，就可将工具的形状复制在工件上，加工出所需要的零件，整个表面将由无数个小坑所组成。

脉冲电源的作用是为电火花加工供给所需的能量。火花放电必须是瞬时的脉冲性放电才能用于加工。放电延续一段时间后，需停歇一段时间，放电

延续的时间一般为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s，这样才能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分，使每一次的放电分别局限在很小范围内。否则象持续电弧放电那样，使表面烧伤而无法用作尺寸加工，因此，电火花加工必须采用脉冲电源。

电火花加工必须在有一定绝缘性能的液体介质中进行，例如煤油或机械油等，又称工作液，它们必须具有较高的绝缘强度。工作液介质的作用是形成火花击穿放电通道，并在放电结束后迅速恢复间隙的绝缘状态，对放电通道起到压缩作用，使放电能量集中，能量密度高，帮助把电火花加工过程中产生的金属小屑和碳黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去，并且对电极表面有较好的冷却作用。通常采用泵和过滤器使工作液循环过滤。

因此，一台完整的电火花加工机床是由机床本体、自动进给调节系统、脉冲电源和工作液系统等组成的。

2 电火花穿孔、成形加工机床

2.1 我国电火花穿孔、成形加工机床的型号和标准

我国电火花加工（包括穿孔和型腔加工）机床的型号规定如下：

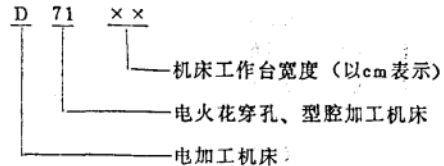


表15-2-1为电火花穿孔、成形加工机床的主要参数标准。

电火花穿孔、成形加工机床可按大小分为小型（D7125型以下），中型（D7125~D7163），以及大型（D7163型以上）；也可按精度等级分为标准精度型和高精度型；也可按工具电极自动进给调节系统的类型分为液压进给的或步进电机或直流伺服电机进给驱动的。随着模具工业的需要，国外已经大批生产微机三坐标数字控制电火花加工机床，以及带电库工具库且能自动更换电极工具的电火花加工中心。我国有些工厂也已研制生产出三坐标微机数字控制电火花加工机床。

表15-2-1 电火花穿孔、成形加工机床主参数标准(GB5290—85)

工 作 台	台 面	宽度 B	(mm)	200	250	320	400	500	630	800	1000	
		长度 L		320	400	500	630	800	1000	1250	1600	
	行 程	纵向 X		160		250		400		630		
		横向 Y		200		320		500		800		
	最大承载重量 (kg)			50	100	200	400	800	1500	3000	6000	
	T形槽	槽 数		3		5			7			
		槽 宽		10		12		14		18		
		槽间距离		63		80		100		125		
	主轴联结板至工作台面最大距离 H			300	400	500	600	700	800	900	1000	
	主 轴 头	伺服行程 Z		80	100	125	150	180	200	250	300	
滑座行程 W		150	200	250	300	350	400	450	500			
工 具 电 极	最大质量 (kg)	I 型	20		50		100		250			
		II 型	25		100		200		500			
	联 结 尺 寸											
工 作 液 槽 内 壁	长度 d	(mm)	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000		
	宽度 c		300	400	500	630	800	1000	1250	1600		
	高度 h		200	250	320	400	500	630	800	1000		

2.2 我国电火花成形加工机床主要型号与技术参数 (表15.2-2)

表15-2-2 我国电火花成形加工机床主要型号与技术参数

机床型号	工作台纵、横行程 (mm)	主轴伺服行程 (mm)	最大工件质量 (kg)	最大电极质量 (kg)	X、Y坐标读数精度 (mm)	最大加工电流 (A)	最大电源功率 (kW)	最大生产率 (mm ³ /min)	最小电极损耗 (%)	表面粗糙度 Ra (μm)	备注	生产厂家
D7125	160×80	100		25	0.01	50	3.5	400	0.5	0.6		上海第八机床厂
D7125A	200×100	200	250	20		30	2.5	220	0.5	1.25		北京恒源电火花机床厂
D7132NC	250×320	250		50		50	6	400	<0.5	0.6	数控半闭环	上海第八机床厂
DL7132	200×120	250		50		50	6			0.63		营口电火花机床厂
DM7132	250×150	250	140	50	0.005	50		400	0.4	0.4	精密	宁江机床厂
DLM7132	200×100	120	570	35	0.01	80	10	>600	<1	1.25		北京骨峰机床厂
NH32	150×250	250	140	50	0.005	50		400	0.5	0.63	数控电源	北京恒源电火花机床厂
DG5432B	400×220	120			0.002	20	5.5			0.25	精密	宁江机床厂
A3C	200×300	250	400	25		40	4	500	<0.3	0.025	数控四轴	汉川机床厂 -Sodick
A3C-ATC	200×300	250	400	10		40	4	500	<0.3	0.025	数控四轴	
A3C-R												
A3C-R-ATC												

(续)

机床型号	工作台纵、横行程 (mm)	主轴伺服行程 (mm)	最大工件质量 (kg)	最大电极质量 (kg)	X、Y坐标读数精度 (mm)	最大加工电流 (A)	最大电源功率 (kW)	最大生产率 (mm ³ /min)	最小电极损耗 (%)	表面粗糙度 Ra (μm)	备注	生产厂家
A3C-S	200×300	250	200	50		50		>400	<0.5	0.4	精密	汉川机床厂
D7140	200×120	150		100	0.01	100	14	>6	<1.5	3.2		营口电火花机床厂
D7140S		130		20	0.005	100		>10	<1	1.25		镇江船用柴油机床厂
DM7140	300×200	250	600	100	±0.01	100	8	850	<1	0.63	精密	汉川机床厂
DM7140	200×300	250	570	100	0.01	80	8	760	<0.5	0.63	精密	泰安生建电加工机床厂
DM5440	200×300	160	570	100	0.01	80	8	600	<0.5	0.63	精密	北京恒源电火花机床厂
DM5440A	300×200	160		100		100		>800	<0.5	0.36	微控电源	上海虞电器机床厂
D6140K	100×260			15		100	13	>800	<1	0.8		上海第八机床厂
FE502G	280×420	160	800	200		100		>900	1	0.5	三轴数显	营口电火花机床厂
D6185	540×540	250		200		300	50	3000		2.5		汉川机床厂
DM7180	1000×700	300	1000	300	±0.01	200	10	2000	<0.3	0.63	精密	泰安生建电加工机床厂
D71125	500×600	350	12000	1000								北京市电加工研究所
DM71200			16000	2000	±0.01			2000	1	1.25	超大精密 聚晶金刚石	北京火花集团
BDJ-101	200×100	120				17.5	4			<2.5		上海第八机床厂
SPD250	250×150	220	500	50		30	3	320	0.3	0.6		台湾 OSCAR 公司
SPD2502C	10"×6"	8.5"	1100	110		50	5	513	0.3	0.6		台湾 YAWJET 公司
D7125	160×80	100		25	0.01	50		400	0.5	0.6		
M55KC7	450×350	350										
M55KC4	450×350	250										
HP-45	300×250	150		50		30		3g/min	0.2	0.33		
HP-60	350×300	180		70		50		5g/min	0.2	0.33		
HP-75	500×500	200		100		75		8g/min	0.2	0.33		
Y-700DC	600×500	300		300~1000		30A 50A 75A 100A		200 370 600 920	0.5 0.5 0.5 0.5	0.5 0.5 0.5 0.5		

2.3 国外电火花穿孔成形加工机床主要型号与技术参数 (表15·2-3)

表15·2-3 国外电火花穿孔、成形加工机床主要型号与技术参数

型号	工作台尺寸 (mm)	工作台纵、横行程 (mm)	最大电极质量 (kg)	主轴伺服行程 (mm)	工作台至主轴距离 (mm)	工作台最大速度 (mm/min)	最大电流 (A)	最大生产率 (g/min)	表面粗糙度 Ra (μm)	电极损耗 (%)	生产厂家
M25C6	500×200	250×200	30	250	180~430	1000	15	2.5	3~4	0.1	三菱公司 (日本)
M35C6	700×500	350×250	75	250	250~500	1000	30	4	5~8		

(续)

型 号	工作台尺寸 (mm)	工作台纵、 横行程 (mm)	最大 电极 质量 (kg)	主轴 伺服 行程 (mm)	工作台至 主轴距离 (mm)	工作台最 大速度 (mm/min)	最大 电流 (A)	最大生产率 (g/min)	表面粗 糙度 Ra (μm)	电极 损耗 (%)	生产厂家
M55C6	800×600	450×250	200	250	350~600	1000	60	3	3~4		三菱公司 (日本)
M75C6	1000×700	550×250	500	450	480~930	1000	120	16			
M85C6	1200×800	1000×600	500	450	450~900	1000	15 35 70 140	1.5 3 7 16			
M25KC7	500×350	250×200	30	250	200~450		35	3	0.3	0.1	
M35KC7	700×500	350×250	75	350	150~500		35	3			
M55KC7	800×600	450×350	200	350	250~600		70	7	0.4		
M65KC7	1000×600	700×500	200	350	250~600		70	7			
M85KC7	1200×800	1000×500	500	450	450~900		140	16			
DXC45	650×300	450×350	100	350	300~650		30 50 100	2.2 4.8 8	1~2	<1	
EDNC-22	450×240	220×120	25	250	200~450		30	2.8	0.2		牧 野 (日本)
EDNC-32	500×350	300×25	25	250	300~550		60	5.5	0.2		
EDNC-64	750×550	600×400	75	250	420~600		120	11	1		
EDNC-85	1000×700	800×500	150	350	400~750		240	25	1		
EDNC-106	1300×950	1000×600	200	450	450~900						
EDNC-156	2000×1000	1500×600	300	450	650~1100						
EPOC2	550×250	250×150	25	270							Sodick (日本)
EPOC3	600×300	300×200	25	250			40				
EPOC4	700×450	400×300	100	350			80				
EPOC5	700×500	460×390	100	320							
EPOC6	900×600	650×420	100	350							
A3R	600×300	300×200	25	250			40				
A4R	700×450	400×350	75	350			40 80				
A5R	700×450	460×390	25	320			40 80				
A6R	700×500	500×400	100	400			40 80				
A7C	1400×800	9500×500	300	450			40 80				
A10C	1900×800	1000×600	500	500			240 320				
AP1	360×220	200×120	15	100							
AP3	600×300	300×200	25	250			40				
AP3R	600×300	300×200	25	250			80				
H3	650×350	300×200	25	250			40				
H3R	650×350	300×200	25	250			80				
H4	760×510	400×250	100	350			80 240				
H5	800×560	460×390	100	320			240 320				
H6	1000×700	650×420	200	350			240 320				
H7	1550×950	700×500	300	450			240 320				
H10	1950×950	1000×600	500	500			240 320				
H-DS02S	500×300	250×220	25	250			30	3.5	0.3~ 0.4	< 0.1	日立公司 (日本)
H-DS10S	600×400	350×270	100	350			30	3.5	0.3~ 0.4	< 0.1	
H-DS20S	800×600	600×400	200	350			30	3.5	0.3~ 0.4	< 0.1	

(续)

型号	工作台尺寸 (mm)	工作台纵、 横行程 (mm)	最大 电极 质量 (kg)	主轴 伺服 行程 (mm)	工作台至 主轴距离 (mm)	工作台最 大速度 (mm/min)	最大 电流 (A)	最大生产率 (g/min)	表面粗 糙度 Ra (μm)	电极 损耗 (%)	生产厂家
Robofil100		220×160		80			64				CHARMIL- LES公司 (瑞士)
Robofil200		320×220		135			64				
Robofil400		450×320		175			128				
Robofil600		630×400		175			128				
2LC		300×200	60	200			50				
4LC		500×400	250	260			75				
5LC		1000×500	300	400			100				
AGIE TRON50	490×330	250×160		250							AGIE公司 (瑞士)
AGIE TRON100	630×500	350×250		350							
AGIE TRON200	800×630	500×300		500							
AGIE TRON300	1700×950	1000×500		600							
AGIE TRON400	2650×1300	1000×500		600							
DE-10A -10C	350×240	215×165	100	250	240~490		45	3.5	0.25	0.02	DECKEL 公司 (联邦德国)
DE-15A -15C	580×450	380×280	150	300	217~517		80	6	0.25	0.02	
DE-25A -25C	650×450	500×350	150	350	250~600		80	6	0.25	0.02	
BN-230PS	400×275	300×200	100	200	~610		30	300mm ³ /min	0.8	<0.1	ONA公司 (西班牙)
IN-360PS	650×400	500×300	250	300	~680		60	600mm ³ /min	0.8	0.1	
PN-460EO	1000×700	800×600	500	400	~835		60	600mm ³ /min	0.8	0.1	
SN-520PS	650×400	500×300	250	400	~660		120	1200mm ³ /min	0.8	0.1	
PN-520-S1	2000×1200	1500×1000	1000	400	~1100		120	1200mm ³ /min	0.8	0.1	
PN-720-S3	2000×1180	1250×750	3000	600	~1250		120	1200mm ³ /min	0.8	0.1	
PN-720A3	2500×1500	1500×1000	3000	600	~1500		120	1200mm ³ /min	0.8	0.1	

3 电火花加工用的脉冲电源

电火花加工用的脉冲电源发展很快, 种类也很多。最早出现的是RC脉冲电源, 而在60年代初期则出现了闸流管和电子管脉冲电源。60年代末期, 由于半导体电子元件的迅速发展, 出现了可控硅和晶体管脉冲电源。近年来, 由于要求和控制系统相结合, 出现了各种自适应控制的脉冲电源。

表15-2-4为电火花加工用的各类脉冲电源。

目前, 我国及国外都普遍采用方波(矩形波)脉冲电源, 为了改善、提高工艺效果, 在普通方波脉冲电源波形的基础上又派生出几种不同波形的脉冲电源, 主要有:

(1) 高低压复合波脉冲电源 是在原来80~100V方波的基础上, 同时(有的可稍提前)加上150~300V的高压方波, 使电极间隙的击穿率, 亦即火花放电率大为提高。此外, 由于峰值电压高, 所以, 放电间隙较大, 有利于排除蚀除产物, 因此也促使生产率和稳定性得到提高, 尤其在用钢电极加工钢模具时更为明显。

(2) 矩形波分组脉冲电源 为了获得较细的表面粗糙度而又兼有较高的加工速度, 可把原来的矩形波的脉宽和脉间大大减小至1~2 μs , 减小单个脉冲能量而提高放电脉冲的频率。但是, 为了防止连续放电转成电弧放电, 所以每隔一组小脉宽(约10~100个小脉宽, 10~200 μs)之后, 停歇一段时

表15-2-4 电火花加工用脉冲电源

类型	优点	缺点	应用范围
RC 脉冲电源	装置简单, 工作可靠, 易于制造, 维修方便, 加工精度较高, 表面粗糙度好	生产率低, 电能利用率低, 工作液绝缘性能和间隙状态对脉冲参数有影响, 稳定性差	目前主要用于电火花精微加工
阻流管脉冲电源	加工稳定, 加工精度高, 表面粗糙度好, 维修较为方便, 生产率比 RC 电源高, 电极损耗比 RC 电源低	脉冲参数调节范围较小, 较难获得大的脉冲宽度, 难以适应型腔加工, 电极损耗较大	仅适用于钢对钢等电火花穿孔加工, 目前已被晶体管脉冲电源替代
可控硅脉冲电源	可适应粗、中加工的需要, 生产率高。大能量、大功率加工时的线路比晶体管电源简单	精加工用脉冲电源的控制和调节不如晶体管方便	适用于电火花成形加工和穿孔加工, 主要用于大能量的粗、中电火花加工
晶体管脉冲电源	脉冲参数调节范围广, 可适应粗、中、精加工的需要, 易于实现电极低损耗, 生产率高 易于实现自适应控制和微机控制, 脉冲参数、波形等的调节范围非常广	大功率脉冲电源的线路比可控硅电源复杂	适用于电火花加工用各种情况下的脉冲电源, 除大功率电源有采用可控硅电源外, 一般均已采用晶体管电源

间(约5~20个小脉间, 即5~40μs), 便成为分组脉冲电源。

(3) 阶梯波脉冲电源 实践证明, 如果每个脉冲在击穿放电间隙后, 电压及电流逐步升高, 则可以在不降低生产率的情况下, 大大减少电极损耗, 这就是阶梯波脉冲电源(一般为前阶梯波)。近年来, 国外已研制出电流脉冲前沿可调的脉冲电源, 可以实现高效低耗。

4 电火花加工的工具进给调节系统

电火花加工时必须使工具和工件之间始终保持某一较小的放电间隙。间隙过大, 所加电压击穿不穿间隙, 形成开路, 不能实现电火花加工; 间隙过小, 形成短路, 也无法进行电火花加工。因此, 工具电极自动进给调节装置和系统是电火花加工机床的重要组成部分。

4.1 工具电极自动进给调节系统的类型

工具电极自动进给调节系统的类型与比较见表15-2-5。

4.2 喷嘴挡板式液压进给调节系统

国内目前大部分电火花机床采用这一系统。这种进给调节系统的原理见图15-2-2。

图中电机1 拖动油泵2 经过精滤油器5, 输出压力为 P_0 的油, 溢流阀3 可调整系统油压 P_0 的大小, 压力表4 指示压力 P_0 的值。压力油从精滤油

表15-2-5 工具电极自动进给调节系统的类型与比较

调节系统类型	优点和缺点
液压进给调节	喷嘴挡板式 我国目前80%的电火花机床采用这一系统。优点是易于制造和维修, 成本低。缺点是性能差、占地面积大、噪声大、易漏油, 国外多不采用
	伺服阀式 国内只有少数高档机床采用这种系统。性能好而成本高, 制造维修不易
步进电机进给调节	国内外目前用于小型电火花加工机床。优点是结构简单, 占地面积小。缺点是负载能力小, 进给、响应速度低
伺服电机进给调节	国外大部分采用这一系统。优点是负载能力大, 调速速, 进给速度高, 反应灵敏。缺点是系统复杂, 成本高

器5 压出后分两路进入液压缸12, 一路由截止阀6 进入液压缸的下腔, 截止阀6 是防止活塞13 在没有压力油时自动下落的; 另一路经片式节流阀7 进入液压缸的上腔。液压缸上腔是和喷嘴8 并联的, 油经节流后的压力为 P_1 , 数值由压力表11 观察。机电转换器10 以挡板9 控制 P_1 的大小。挡板9 有三个典型位置 I、II、III。当挡板处于位置 I 时, 从喷嘴处流出的油流量最大, 节流阀7 处的压力降亦很大, 所以 P_1 为最小, 这样, 下油腔压力大于上油腔压力, 活塞13(主轴) 上升。当挡板处于最接近喷嘴端面位置 III 时, 油从喷嘴流出最少, 在节流阀处压力降亦小, 所以 P_1 较大, 接近工作压力 P_0 。由

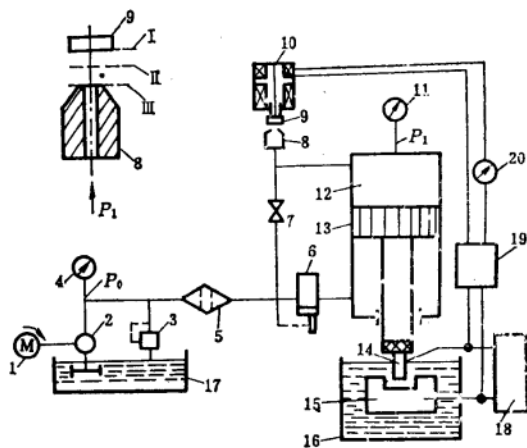


图15-2-2 喷嘴挡板式液压进给调节系统

- 1—电机 2—油泵 3—溢流阀 4—压力表 5—精滤油器
6—截止阀 7—节流阀 8—喷嘴 9—挡板 10—电机机械转换器
11—压力表 12—液缸 13—活塞 14—电极
15—工件 16—加工油箱 17—供油箱 18—脉冲电源
19—间隙测量及放大环节 20—控制电流毫安表

于下油腔的工作面积小于上油腔面积，活塞（主轴）向下运动。当活塞两端的压力和面积比成反比例时，活塞就静止不动。这相当于图中位置Ⅱ。挡板的位置随着电机机械转换器输入信号电流的大小而改变。因此只要控制输入到电机机械转换器的信号电流，就可控制主轴的进给和回升。

5 电火花加工的工具电极和工作液系统

5.1 电火花加工用的工具电极材料

电极材料必须是导电性能良好，损耗小，造型容易，并具有加工稳定、效率高、材料来源丰富、价格便宜等特点。常用电极材料有紫铜、石墨、黄铜、钢、铸铁等。

(1) 紫铜电极 它质地细密，加工稳定性好，相对电极损耗较小，适应性广，尤其适用于制造精密花纹模的电极。其缺点为精车、精磨等机械加工困难。

(2) 石墨电极 特别适用于在大脉宽大电流型腔加工中，电极损耗可做到小于0.5%，抗高温，变形小，制造容易，重量轻。缺点是容易脱落、掉渣、加工表面粗糙度较粗，精加工时易拉弧。

(3) 黄铜电极 黄铜电极最适宜中小规范情况下加工，稳定性好，制造也较容易，但缺点是电极的损耗率较一般电极都大，不容易使被加工件一次成形，所以一般只用在简单的模具加工，或通孔加工，取断丝锥等。

(4) 铸铁电极 是目前在国内被广泛应用的一种材料，主要特点是制造容易，价格低廉、材料来源丰富，放电加工稳定性也较好，特别适用于复合式脉冲电源加工，电极损耗一般达20%以下，对加工冷冲模最适合。

(5) 钢电极 钢电极也是我国应用比较广泛的电极，它和铸铁电极相比，加工稳定性差，效率也较低，但它可把电极和冲头合为一体，一次成型，可减少电极与冲头的制造工时。电极损耗与铸铁相似，适合“钢打钢”冷冲模加工。

5.2 电火花加工用的工具电极设计及制造

(1) 加工冲模的穿孔电极工具设计 设计和计算主要包括电极长度和电极的截面尺寸。

电极的有效长度（总长度减去不起加工作用的长度）通常取凹模型孔深度的2.5~3.5倍，当要求用一个电极加工几个凹模时，则电极有效长度应加长。实际“钢打钢”用的电极工具长度还要考虑装夹部分的长度等。

电极的截面尺寸与冲模所需的配合间隙大小，以及所采用的加工规范有关。

原则上电极的截面尺寸与凹模截面尺寸仅相差火花放电间隙，即电极的凸起部分应比凹模均匀缩小一个火花间隙值 δ （双边的缩小 2δ ），电极凹入部分则应比凹模上的尺寸增加一个放电间隙 δ 。图15-2-3所示的电极截面尺寸可按下列公式确定。

$$\text{电极尺寸: } A = a - 2\delta$$

$$B = b + 2\delta$$

$$C = c$$

$$R_1 = r_1 - \delta$$

$$R_2 = r_2 + \delta$$

式中 δ ——单边火花放电间隙

δ 的选择要根据凹模侧面粗糙度及相应的加工规范

来选定。表面粗糙度在 $Ra2.5\sim 6.3\mu m$ 时， δ 约在 $0.04\sim 0.015mm$ 之间（电规准的峰值电压高，脉冲宽度越宽， δ 就越大）。

实际上中型孔，凹模尺寸 a 、 b 、 c 、 r_1 、 r_2 等不只是基本尺寸，还包括公差。在设计电极时应取其中间公差尺寸。计算出电极的尺寸后，也应规定电极尺寸的制造公差，一般可取凹模型孔公差的 $1/2\sim 1/3$ 。

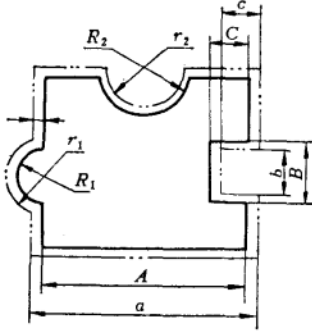


图15-2-3 型孔（凹模）和电极尺寸的关系

为了提高加工速度，常采用阶梯电极，将下部尺寸缩小 $0.1\sim 0.3mm$ ，具体办法是将电极工具的下端用化学腐蚀（酸洗）的方法均匀腐蚀去一定厚度，使电极工具成为阶梯形。这样刚开始加工时可用较小的截面、较大的规准进行粗加工，等到大部分留量已被蚀除、型孔基本穿透，再用上部较大截面的电极工具进行精加工，保证所需的模具配合间隙。

阶梯部分的长度 l 一般为冲模刃口高度 h 的 $1.2\sim 2.4$ 倍，即 $l = (1.2\sim 2.4)h$ ，阶梯电极的单边缩小量（单面蚀除厚度） b 可按下式计算（图15-2-4）：

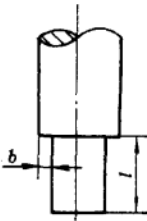


图15-2-4 阶梯电极

$$b \geq \delta_1 - \delta_2 + \Delta$$

式中 δ_1 ——粗加工单面火花放电间隙 mm

δ_2 ——精加工单面火花放电间隙 mm

Δ ——留给精加工的单面加工余量 ($\Delta = 0.02\sim 0.04mm$)

酸洗化学腐蚀液的配方见表15-2-6。

现以表中第2种腐蚀剂为例介绍配制过程及使用注意事项。

将水稍加热，加入氢氟酸、硝酸、搅拌均匀即可使用。

电极腐蚀前应先使用四氯化碳清洗油污，腐蚀时应不断搅拌腐蚀液，以提高腐蚀速度和减小锥度。如电极需要上粗下细的锥度，则在腐蚀过程中需多次把电极提出，提出的次数越多，锥度越大。腐蚀的时间应根据腐蚀速度和需腐蚀的厚度来确定，最好事先做些模拟试验，它和腐蚀液的温度和浓度有很大关系。腐蚀后的电极应用水清洗干净。

除用化学腐蚀法外，也可用电解法制造阶梯电极。

(2) 加工型腔的电极工具设计 型腔加工用的电极工具，不但要考虑横断面的形状与尺寸，还需考虑垂直断面的形状和尺寸，因为它不能象穿孔那样可通过加长电极靠增加进给深度来补偿电极的损耗。需采用多种工艺措施来保证型腔尺寸精度。设计、计算电极时，应根据有无平动而有所不同。

1) 无平动时设计型腔电极的要点：无平动加工型腔时，如果采用多电极加工，则电极损耗（主要是精加工时损耗较大）的影响较小，可以用更换新的电极来继续加工，抵消损耗的影响。但要注意电极的正确定位和最终加工深度的控制，而且每个电极的一致性要好。

如果采用单电极加工，则设计电极时要根据电极损耗比，在制造电极时预先加上电极损耗量。例如，如果工件（模具）是半球圆，则设计出修正后的电极将类似于半个椭圆球，其最大半径处（深度） $R' = (1 + \theta)R$ （ θ 为电极深度损耗比， R 为工件圆球半径）。

如果工件是一夹角为 α 、深度为 B 的斜锥面，则修正后的电极形状夹角变小为 α' ，高度 H 大于 B 的斜锥面。其关系为： $H = B(1 + \theta)$ ； $\tan \alpha' = B/H \tan \alpha$ ，其余形状，可依此类推。实际上在最后精加工前应对已损耗的电极作适当的光整形形。

2) 应用平动头加工时的电极设计：由于平动

表15·2-6 各种腐蚀剂配方及适用范围

腐蚀剂成分	配 方 种 类									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	数 量									
草 酸	—	—	—	—	—	40g	—	—	—	18%
硫 酸	—	—	50%	17%	18%	—	—	—	—	2%
硝 酸	100%	14%	50%	17%	10%	—	60mL	80mL	60mL	—
盐 酸	—	—	—	17%	10%	—	8mL	30mL	30mL	—
磷 酸	—	—	—	—	5%	—	2mL	—	30mL	—
氢氟酸	—	6%	—	—	2%	—	—	—	—	25%
双氧水	—	—	—	—	—	40mL	—	—	—	55%
蒸馏水	—	—	—	—	—	100mL	—	—	—	—
自来水	—	80%	—	49%	55%	—	—	—	—	—
腐蚀速度(mm/min)	0.06	0.01	0.007~0.01	0.01	0.007~0.01	0.04~0.07	0.003~0.05	0.01~0.015	0.02~0.03	0.08~0.12
腐蚀后表面粗糙度(μm)	Ra = 1.25~2.5	Ra = 1.25~2.5	Ra = 0.63~1.25	Ra = 1.25~2.5	Ra = 0.63~1.25	接近原来表面粗糙度	Ra = 0.63~1.25	Ra = 0.63~1.25	Ra = 0.63~1.25	Ra = 0.63~1.25
适用对象	紫铜 黄铜	T8A Cr12	紫铜 黄铜	铸 铁	钢(铜和铸铁也有良好效果)	钢、铸铁、铜均适用	工具钢 合金钢	工具钢 合金钢	工具钢 合金钢	最适宜于 工具钢

注：1.表中百分比(%)系按体积计算。
2.本表数据均系指在不加热情况下所得。

头在加工时水平方向有一偏心量(平动量) e ，所以连同单侧放电间隙 δ ，将使加工截面轮廓每边扩大 $(e + \delta)$ ，而且使模具的内四角尖角变圆。因此，电极设计制造时应缩小这一尺寸。

如果采用三向平动头(球动头)加工型腔，则在模具底部也将扩大 $(s + \delta)$ 尺寸。设计电极时应减小这一尺寸。

5.3 电火花加工用的工作液系统

电火花成形加工对工作液的基本要求是：有较高的绝缘性能；较好的流动性和渗透能力；能进入窄小的放电间隙；能冷却电极和工件表面，把电蚀产物冷凝、扩散到放电间隙之外去。此外还应对人体及设备无害、安全和价格低廉。目前，还没有一种液体介质能全面满足上述全部要求。在长期实践中，电火花加工时常采用煤油作为工作液。煤油系碳氢化合物，在火花放电时能分解出氢和游离碳黑微粒，这些游离碳在负极性加工时被吸附在带正电荷的工具电极表面上可以大大减少和补偿电极损耗。但是煤油的最大缺点是易燃和蒸发呛人的油烟，在大功率粗加工时常用机械油或掺入一定比例的机械油。

电加工界一直在努力研究用水或水基工作液来

代替煤油。在小面积精加工时如加工喷丝板上的小异型孔可用蒸馏水或去离子水或水中加入甘油、酒精等添加剂的水基工作液。但在大面积加工时效果还不如煤油。

工作液在电火花加工过程中需用油泵使之循环流动，此外还要用过滤装置把工作液中的电蚀产物——金属小屑和高温分解出来的碳黑过滤出去。为此，电火花加工时必须要有包括油泵、过滤装置及管道等工作液系统。

6 电火花加工的基本工艺规律

6.1 电火花加工的工艺指标

电火花加工的基本工艺指标有：

(1) 加工速度(V_{sp}) 在单位时间(min)内从工件上蚀除下来的金属体积(mm^3)或重量(g)称为加工速度，也称加工生产率。大功率脉冲电源粗加工时的加工速度大于 $500mm^3/min$ ，电火花精加工时通常低于 $20mm^3/min$ 。

(2) 表面粗糙度 电火花加工后的工件表面粗糙度沿用机械切削加工中的表面粗糙度。一般以算术平均偏差Ra表示，单位为 μm 。

(3) 放电间隙(加工间隙) 指电火花加工

时工具和工件之间产生火花放电的一层距离间隙，单位为mm，它的大小一般在0.01~0.5mm之间。粗加工时大，精加工时较小。加工时又分为端面间隙和侧面间隙，对穿孔或冲模加工来说又可分为入口间隙和出口间隙。

(4) 电极损耗和电极损耗率 电极损耗是电火花加工时工具电极的损耗量，以长度计单位为mm，以体积计单位为 mm^3 ，以重量计单位为g。电极损耗率是同一时间内电极的损耗量与工件损耗量之比(%)。损耗比小于1%时称低损耗加工。粗加工长脉宽负极性加工时可达到低损耗加工，精加工时电极损耗率较大，一般大于5%~10%。

电火花加工时的各基本工艺指标是由电火花加工的电规准决定的。

6.2 电火花加工的电规准

电火花加工的电规准或称电参数是指选用的电加工用量、电加工参数。主要是电脉冲的参数(图15.2-5)。

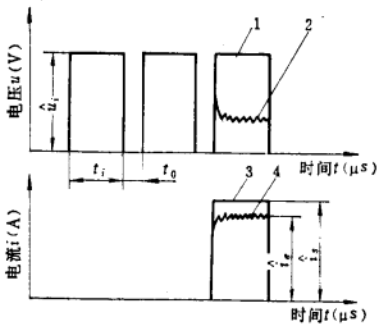


图15.2-5 方波脉冲电源电脉冲参数

1—空载(开路)电压波形 2—火花放电电压波形
3—短路电流波形 4—火花放电电流波形 t_i —脉宽 t_0 —脉间 \hat{u}_t —峰值电压 \hat{i}_s —峰值电流 i_s —短路峰值电流

(1) 脉冲宽度 $t_i(\mu\text{s})$ 简称脉宽，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。粗加工时可用较大的脉宽 $t_i > 100\mu\text{s}$ ，精加工时只能用较小的脉宽， $t_i < 50\mu\text{s}$ 。

(2) 脉冲间隔 $t_0(\mu\text{s})$ 简称脉间或间隔，是两个电压脉冲之间的间隔时间。

间隔时间过短，放电间隙来不及消电离和恢复

绝缘，容易产生电弧放电，烧伤工具和工件；脉间选得过大，将降低加工效率。

(3) 峰值电压 $\hat{u}_t(\text{V})$ 是间隙开路时电极间最高电压，等于电源的直流电压，一般晶体管方波脉冲电源的峰值电压 $\hat{u}_t = 80 \sim 100\text{V}$ ，高低压复合脉冲电源的高压峰值电压为 $175\text{V} \sim 300\text{V}$ 。峰值电压高时放电间隙大，生产率高，但成形精度稍差。

(4) 峰值电流 $\hat{i}_s(\text{A})$ 是间隙火花放电时脉冲电流的最大值(瞬时值)，虽然峰值电流不易直接测量，但它是影响生产率、表面粗糙度等指标的重要参数。在设计制造脉冲电源时，每一功率放大管的峰值电流是预先选择计算好的。每个50W的大功率晶体管的峰值电流约为 $2 \sim 3\text{A}$ ，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(实际上是选定几个功率管进行加工)。

6.3 电火花加工工艺规准

电火花穿孔及型腔加工时，选用的加工规准(脉宽、峰值电流等)与基本工艺指标(加工速度、表面粗糙度等)之间有一定的对应关系。在具体的加工条件下例如采用某种脉冲电源，某种工具、工件材料等时，通过大量实际加工，可以得出不同的脉宽、峰值电流对加工速度、表面粗糙度等的关系曲线或图表。根据这些工艺规律曲线，在实际加工模具或零件时，就可以选择合理的电火花加工规准。

图15.2-6~图15.2-13是用晶体管方波脉冲电源、峰值电压为80V，用紫铜或石墨电极(+)加工钢(-)时的一组工艺规律曲线。

1) 紫铜(+)、钢(-)时工件蚀除速度与脉宽、峰值电流的关系见图15.2-6。

2) 紫铜(+)、钢(-)时表面粗糙度与脉宽、峰值电流的关系见图15.2-7。

3) 紫铜(+)、钢(-)时侧面放电间隙与脉宽、峰值电流的关系见图15.2-8。

4) 紫铜(+)、钢(-)时电极损耗率与脉宽、峰值电流的关系见图15.2-9。

5) 石墨(+)、钢(-)时工件蚀除速度与脉宽、峰值电流的关系见图15.2-10。

6) 石墨(+)、钢(-)时表面粗糙度与脉宽、峰值电流的关系见图15.2-11。

7) 石墨(+)、钢(-)时表面粗糙度与脉宽、峰值电流的关系见图15.2-12。

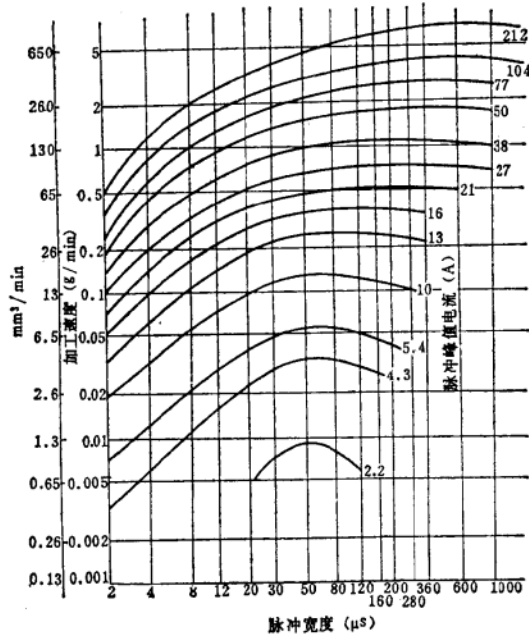


图15-2-6 铜 (+)、钢 (-) 时蚀除速度与脉宽、峰值电流的关系

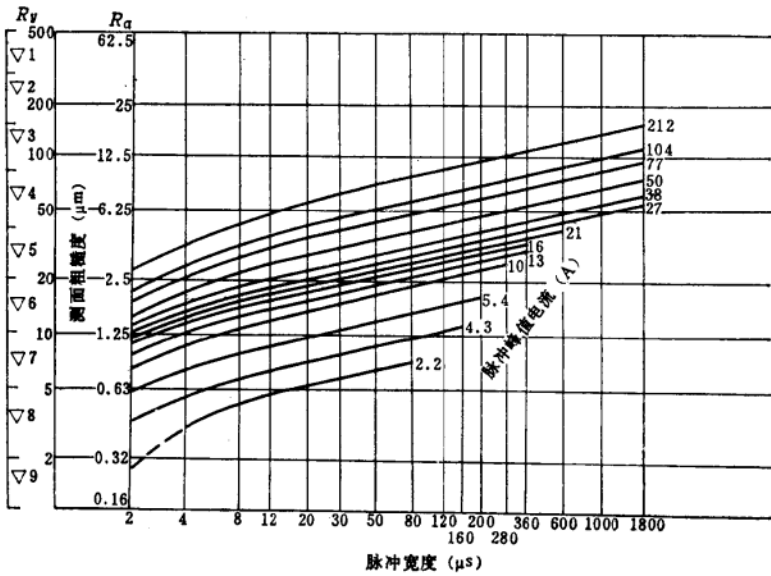


图15-2-7 铜 (+)、钢 (-) 时表面粗糙度与脉宽、峰值电流的关系

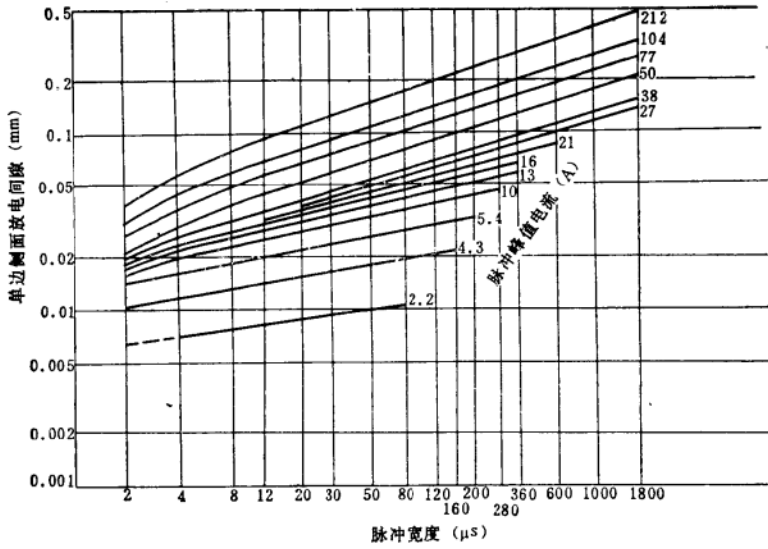


图15-2-8 铜 (+)、钢 (-) 时侧面放电间隙与脉宽、峰值电流的关系

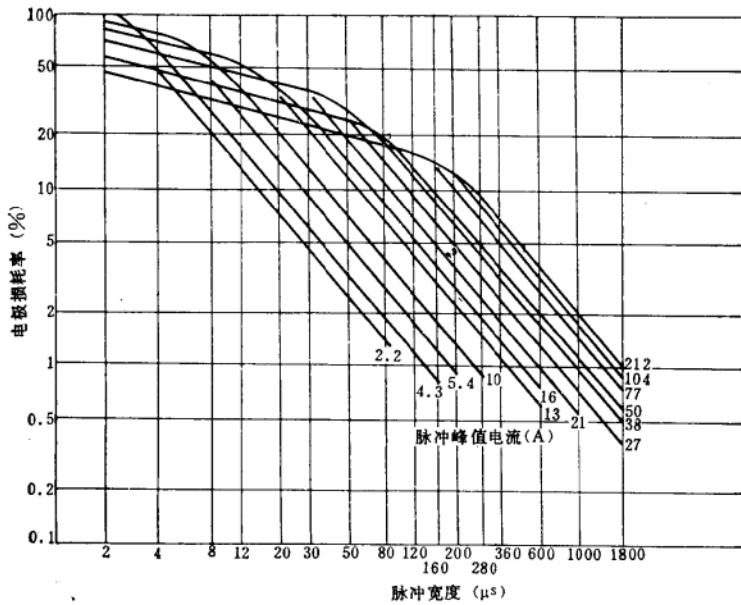


图15-2-9 铜 (+)、钢 (-) 时电极损耗率与脉宽、峰值电流的关系

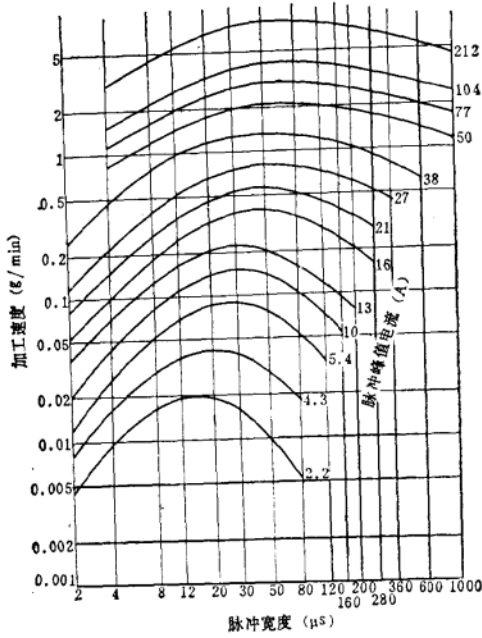


图15-2-10 石墨(+)、钢(-)时蚀除速度与脉宽、峰值电流的关系

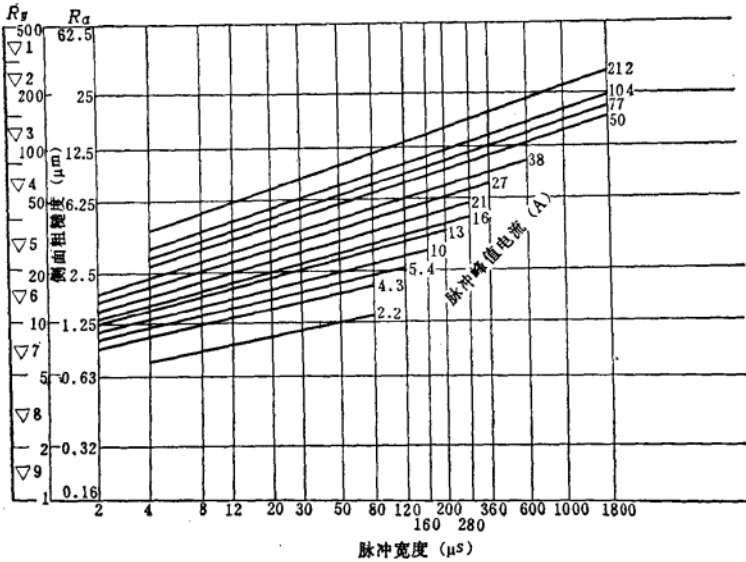


图15-2-11 石墨(+)、钢(-)时表面粗糙度与脉宽、峰值电流的关系