

模具数控线切割 加工技巧与实例

MUJU SHUKONG XIANQIEGE
JIAGONG JIQIAO YU SHILI

周明贵 王 靓 编著



化学工业出版社

模具数控线切割 加工技巧与实例

MUJU SHUKONG XIANQIEGE
JIAGONG JIQIAO YU SHILI

周明贵 王 靓 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

TG76
Z781

图书在版编目 (CIP) 数据

模具数控线切割加工技巧与实例/周明贵, 王靓编著.
北京: 化学工业出版社, 2010.1
ISBN 978-7-122-07218-4

I. 模… II. ①周…②王… III. 模具-数控线切割
IV. ①TG76②TG481

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 219009 号

责任编辑: 李军亮

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京白帆印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 336 千字 2010 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

模具广泛应用于汽车、机械、电子、轻工、家电、通信、军工等领域产品的生产，其精度的高低往往决定着产品的生产质量。数控电火花线切割加工技术作为模具制造的重要加工方法，具有精密化和智能化加工的特点，特别适合于加工质量要求高、结构复杂的模具，目前已经广泛应用于模具制造企业中。

为了适应模具制造行业的快速发展，培养合格的模具数控电火花线切割加工技术人员，编著者在总结近二十年来从事数控电火花线切割加工的研究体会和实际经验的基础上，编写了本书，希望能为同行提供借鉴。

本书内容包括：数控线切割加工概述、线切割机床的精度检测与安全规程、数控线切割加工主要工艺指标及影响因素、数控线切割加工工艺、数控线切割手工编程、CAXA 数控线切割自动编程、模具线切割加工的技巧与实例、难装夹零件的线切割加工技巧、文字线切割加工实例、位图矢量化切割实例、齿轮和花键线切割加工实例、模具数控线切割加工中常见问题的分析与处理等。本书融合了编者多年实际工作中积累的经验，所引用的实例全部来自于生产实际，有较强的实用性。

本书可供从事模具制造的技术人员使用，也可供职业院校模具专业及相关专业的师生参考。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

2010 年 1 月

欢迎订阅化学工业出版社模具专业图书

书 名	书号	定价/元
金属压铸模具设计——全国高职高专工作过程导向规划教材	05704	26
中小型模具报价估算方法与实例	05776	28
冲压模具技术问答	01405	22
塑料模具技术问答	05782	28
模具制造技术问答	05431	28
冲压模具简明设计手册 第二版	04487	88
压铸模具简明设计手册	06580	89
模具识图	03684	32
模具钳工速查手册	03268	42
模具钢选用速查手册	03605	36
模具制造基础与加工技术	04761	38
多工位级进模设计标准教程	02799	38
模具制造工艺入门	02999	16
冲压模具设计及实例精解(附光盘)	02190	38
新编工模具钢 660 种	01467	48
注塑成型工艺分析及模具设计指导	03486	38
模具钳工操作技能	02189	35
冲压模具设计与制造技术指南	02950	36
模具专业课程设计指导丛书——模具制造工艺课程设计指导与范例	03267	22
模具专业课程设计指导丛书——冲压模具课程设计指导与范例	01923	32
模具专业课程设计指导丛书——塑料模具课程设计指导与范例	05132	29
UGNX 注塑模具设计入门与技巧 100 例(附光盘)	03952	38
UG 冲压模具设计与制造(附光盘)	01902	52
UG 注塑模具设计与制造(附光盘)	7697	48
Pro/E 冲压模具设计与制造(附光盘)	01942	55
Pro/E 注塑模具设计与制造(附光盘)	01459	56
模具工工作手册	00145	25
模具机械加工工艺分析与操作案例	01013	18
模具数控铣削加工工艺分析与操作案例	01048	22
模具数控电火花成型加工工艺分析与操作案例	01449	18
模具数控电火花线切割工艺分析与操作案例	01461	18
Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 模具设计基础与实例教程(附光盘)	00888	39

书 名	书号	定价/元
模具识图与制图——模具制造技术培训读本	9954	22
冲压工艺及模具——模具制造技术培训读本	9947	30
模具制造基础——模具制造技术培训读本	9909	20
模具加工与装配——模具制造技术培训读本	9956	30
塑料模具设计与制造过程仿真(附光盘)——模具制造技术培训读本	9961	48
冲压模具设计与制造过程仿真——模具制造技术培训读本	00447	48
冲模设计实例详解	9922	23
楔块模图册	9329	32
UG 注塑模具设计实例教程	00297	28
Pro/E 注塑模具设计实例教程	00337	28
Pro/E 模具数控加工实例教程	00738	32
UG NX4.0 注塑模设计实例——入门到精通	9352	38
UG NX4.0 级进模设计实例——入门到精通(附送光盘一张)	9738	38
高速冲压及模具技术	9708	35
模具设计及 CAD	8673	48
冲压模具简明设计手册	6233	66
锻造模具简明设计手册	8104	55
挤压模具简明设计手册	8237	33
注塑模设计与生产应用	6636	39
经济冲压模具及其应用	4639	24

以上图书由化学工业出版社 机械·电气分社出版。如要以上图书的内容简介和详细目录,或者更多的专业图书信息,请登录 www.cip.com.cn。如要出版新著,请与编辑联系。

地址:北京市东城区青年湖南街13号(100011)

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686)

编辑电话:010-64519274

投稿邮箱:qdlca2004@163.com

目 录

第1章 概述	1	3.2.7 变频、进给速度的影响	32
1.1 数控线切割加工原理	1	3.3 电极丝对数控线切割工艺性能的影响	32
1.1.1 数控线切割加工的特点	1	3.3.1 电极丝直径的影响	32
1.1.2 数控线切割加工的应用范围	2	3.3.2 电极丝松紧程度的影响	32
1.1.3 数控线切割加工的机理	3	3.3.3 电极丝垂直度的影响	33
1.2 数控线切割机床的分类及特点	6	3.3.4 电极丝走丝速度的影响	34
1.2.1 数控线切割机床的分类	6	3.3.5 电极丝运行方向的影响	34
1.2.2 数控线切割机床的结构及控制特点	8	3.4 工作液对工艺指标的影响	35
1.2.3 数控线切割机床的特殊功能	16	3.5 工件厚度及材料的影响	36
1.3 我国数控线切割行业发展的前景	17	3.6 其他因素对数控线切割加工的影响	36
1.3.1 数控线切割的产生与发展	17	3.7 诸因素对工艺指标的相互影响	36
1.3.2 我国数控线切割加工技术的发展目标	18	第4章 数控线切割加工工艺	38
第2章 数控线切割机床的精度检测与安全规程	21	4.1 数控线切割加工流程及步骤	38
2.1 数控线切割机床的精度检测	21	4.1.1 数控线切割加工流程	39
2.1.1 几何精度及其检测	21	4.1.2 数控线切割加工步骤	39
2.1.2 数控精度及其检测	22	4.2 零件图样的工艺分析	39
2.1.3 工作精度检测	23	4.2.1 分析和审核零件图	39
2.2 数控线切割机床的安全规程	24	4.2.2 表面粗糙度和加工精度的分析	40
2.2.1 机床安装环境要求	24	4.2.3 常用材料及热处理的切割性能分析	40
2.2.2 安全操作	24	4.3 工艺准备	41
2.2.3 数控线切割机床的保养方法	25	4.3.1 电极丝准备	41
第3章 数控线切割加工主要工艺指标及影响因素	26	4.3.2 电极丝的安装	42
3.1 数控线切割加工工艺的一般规律	26	4.3.3 电极丝垂直找正	44
3.1.1 数控线切割加工切割速度及影响因素	26	4.3.4 工件准备	45
3.1.2 数控电火花线切割加工精度及影响因素	28	4.4 工件的装夹和校正	47
3.2 电参数对主要工艺指标的影响	30	4.4.1 工件装夹的特点	47
3.2.1 短路峰值电流的影响	30	4.4.2 工件装夹的一般要求	47
3.2.2 脉冲宽度的影响	31	4.4.3 常用夹具的名称、规格和用途	48
3.2.3 脉冲间隔的影响	31	4.4.4 工件的支撑方式	48
3.2.4 开路电压的影响	31	4.4.5 工件的正确装夹方法	50
3.2.5 放电波形的影响	32	4.4.6 工件的找正	52
3.2.6 电极性的影响	32	4.4.7 确定电极丝位置的方法	53
		4.5 加工参数的选择	54
		4.5.1 脉冲电源参数的选择	54
		4.5.2 速度参数选择	55
		4.5.3 工艺尺寸的确定	56

4.5.4	工作液的配制	56	7.1.2	凹模的加工技巧	112
第5章	数控线切割手工编程	57	7.1.3	凸、凹模同时加工技巧	113
5.1	数控线切割 3B 格式程序编制	57	7.1.4	多件凸、凹模的加工技巧	115
5.1.1	程序格式	57	7.1.5	动模和定模的加工技巧	116
5.1.2	直线的编程	57	7.1.6	顶针孔的加工技巧	117
5.1.3	圆弧的编程	59	7.1.7	斜顶孔的加工技巧	117
5.1.4	偏移补偿值的确定	60	7.1.8	电极的加工技巧	119
5.1.5	3B 格式编程实例	62	7.1.9	上、下异形模件的加工技巧	120
5.2	ISO 格式程序编制	65	7.1.10	天圆地方模件的加工技巧	122
5.2.1	程序格式	65	7.1.11	上、下异形圆弧过渡模件的加工技巧	123
5.2.2	准备功能 G 代码	66	7.1.12	斜齿轮模件的加工技巧	125
5.2.3	有关机械控制功能 T 代码	72	7.1.13	椭圆齿轮模件的加工技巧	127
5.2.4	辅助功能 M 代码	72	7.1.14	螺旋面的加工技巧	130
5.2.5	ISO 代码编程常用的其他代码	73	7.1.15	超行程模件的加工技巧	132
5.2.6	ISO 格式程序编制实例	73	7.1.16	大厚度模件的精密加工技巧	133
第6章	CAXA 数控线切割自动编程	75	7.2	模具数控线切割加工实例	134
6.1	数控线切割 CAD/CAM 软件简介	75	7.2.1	硅钢片冲模数控线切割加工实例	134
6.2	CAXA 数控线切割的操作界面	76	7.2.2	塑料模镶件数控线切割加工实例	136
6.2.1	绘图功能区	76	7.2.3	塑料模型芯数控线切割加工实例	136
6.2.2	菜单系统	76	7.2.4	挤出模具定型腔整体数控线切割加工实例	137
6.2.3	状态栏	81	7.2.5	注塑模定模座板数控线切割加工实例	138
6.3	图形绘制	81	7.2.6	压铸模数控线切割加工实例	140
6.3.1	基本曲线	81	第8章	模具特殊零件数控线切割加工	144
6.3.2	高级曲线	87	8.1	难装夹零件的数控线切割加工	144
6.3.3	曲线编辑	94	8.1.1	难装夹模件的装夹方法	144
6.4	加工轨迹	100	8.1.2	难装夹零件数控线切割加工实例	146
6.4.1	轨迹生成	100	8.2	文字数控线切割加工实例	157
6.4.2	轨迹跳步	103	8.2.1	绘制文字轮廓	157
6.4.3	取消跳步	103	8.2.2	数控线切割“北”字轮廓工艺参数的确定	159
6.4.4	轨迹仿真	103	8.2.3	加工轨迹的生成	159
6.4.5	查询切割面积	104	8.2.4	生成 4B 加工代码	162
6.5	后处理生成代码	104	8.2.5	4B 代码校核与传输	166
6.5.1	生成 3B 加工代码	105	8.3	位图矢量化切割实例	166
6.5.2	生成 4B/R3B 加工代码	106	8.3.1	双人舞位图矢量化	166
6.5.3	校核 B 加工代码	107	8.3.2	双人舞位图切割工艺参数的	
6.5.4	生成 G 加工代码	107			
6.5.5	校核 G 加工代码	107			
6.5.6	查看/打印代码	108			
6.5.7	粘贴加工代码	108			
第7章	模具数控线切割加工的技巧与实例	110			
7.1	模具数控线切割加工技巧	110			
7.1.1	凸模的加工技巧	110			

8.3.2	确定	169
8.3.3	加工轨迹的生成	169
8.3.4	生成加工代码及传输程序	172
8.4	齿轮、花键数控线切割加工实例	175
8.4.1	绘制齿轮、花键图形	175
8.4.2	数控线切割齿轮、花键加工工艺的确定	178
8.4.3	加工轨迹的生成	180
8.4.4	生成 3B 加工代码	183
8.4.5	3B 代码校核与传输	186

第 9 章 模具数控线切割加工中常见

9	问题的分析与处理	187
9.1	断丝的分析与处理	187
9.1.1	高速走丝断丝	187
9.1.2	低速走丝断丝	188
9.2	短路的分析与处理	189
9.2.1	高速走丝短路	189
9.2.2	低速走丝短路	189
9.3	加工尺寸精度不良的分析与处理	190
9.3.1	机床的原因	190
9.3.2	材质的原因	191
9.3.3	电极丝的原因	191
9.4	加工表面精度不良的分析与处理	192
9.4.1	机床的原因	192
9.4.2	材质的原因	192
9.4.3	电极丝的原因	193
9.5	加工速度不良的分析与处理	193
9.5.1	高速走丝合理调整进给速度的方法	193
9.5.2	低速走丝合理调整进给速度的方法	194

9.6	斜度加工不良的分析与处理	195
9.6.1	机床的原因	195
9.6.2	工件材质的原因	196
9.6.3	电极丝的原因	196
9.7	过切不良的分析与处理	196
9.7.1	过切的状况与危害	196
9.7.2	过切的处理	196
9.8	复杂模具零件数控线切割开裂原因分析及改进措施	197
9.8.1	造成工件开裂的原因分析	197
9.8.2	改进措施	198
9.9	冲裁模数控线切割加工工艺中的若干问题和解决方法	200
9.9.1	尖角(或清角)切割法	200
9.9.2	拐点(或拐角)切割法	200
9.9.3	内圆弧切割法	200
9.9.4	二次(或多次)切割法	200
9.9.5	凸棱(或突出)切割法	200
9.9.6	大厚度大型凹模的切割加工	201
9.9.7	窄缝、薄壁零件的切割加工	201
9.9.8	凸、凹模数控线切割过程中变形与开裂的规律及解决措施	201
9.9.9	冲裁模快走丝数控线切割加工中夹丝的防止措施	203
9.10	高速走丝加工中电极丝的花斑现象分析与防止	207
9.10.1	“花丝”现象	207
9.10.2	“花丝”形成的物理过程分析	207
9.10.3	避免“花丝”的对策	207

参考文献	208
------	-----

第 1 章

概述

1.1 数控线切割加工原理

电火花线切割加工 (wire cut EDM, 简称 WEDM) 是比较常用的特种加工方法之一, 它是直接利用电能和热能进行加工的工艺方法。加工时, 电极丝与工件在 X、Y 及 U、V 两个方向同时有相对伺服进给运动及垂直方向的直线相对运动。因为这种方法是用一根移动着的金属线 (电极丝) 作为工具电极与工件之间产生火花放电对工件进行切割, 故称为线切割加工。由于现在的电火花线切割机床的工件与电极丝的相对切割运动都是采用了数控技术来控制, 所以称为数控电火花线切割加工或简称为数控线切割加工。

1.1.1 数控线切割加工的特点

① 它以直径为 $0.02\sim 0.38\text{mm}$ 的金属线为工具电极, 与电火花成形加工相比, 它不需要制造特定形状的电极, 省去了成形电极的设计和制造, 缩短了生产准备时间, 加工周期短。

② 电火花线切割加工是用直径较小的电极丝作为工具电极, 与电火花成形加工相比, 电火花线切割加工的脉冲宽度、平均电流都比较小, 加工工艺参数的范围也小, 属于中、精电火花加工, 一般情况下, 工件常接电源的正极, 成为正极性加工。

③ 电火花线切割加工的主要对象是平面形状, 除了在加工零件的内侧形状拐角处有最小圆弧半径的限制 (最小圆弧半径为金属线的半径加放电间隙), 其他任何形状都可以加工。

④ 电火花线切割加工是用电极丝作为工具电极与工件之间产生火花放电对工件进行切割加工的, 由于电极丝的直径比较小, 在加工过程中总的材料蚀除量比较小, 所以用电火花切割加工比较节省材料, 特别在加工贵重材料时, 能有效地节省贵重材料, 提高材料的利用率。

⑤ 在加工过程中可以不考虑电极丝的损耗。在高速数控线切割加工中, 采用低损耗的脉冲电源, 目前普遍使用钼丝作为电极丝材料, 通过对直径为 0.18mm 电极丝的使用发现, 在电极丝的使用寿命期间, 电极丝的直径损耗约为 0.02mm , 对单一零件来说, 电极丝的损耗就更小; 在低速数控线切割加工中, 采用单向连续的供丝方式, 在加工区总是保持新电极丝加工, 因而加工精度更高。

⑥ 电火花线切割加工过程中的工作液一般为水基液或去离子水, 因此不必担心发生火灾, 可以实现无人加工, 但由于工作液的电阻率远比煤油小, 因而在开路状态下, 仍有明显的电解电流。

⑦ 一般没有稳定电弧放电状态。因为电极丝与工件始终有相对运动, 尤其是高速走丝电火花线切割加工, 因此, 数控线切割加工的间隙状态可以认为是由正常火花放电、开路和短路三种状态组成, 但常常是在单个脉冲内存在多种放电状态, 有“微开路”、“微短路”现象。

⑧ 电极丝与工件之间存在着“疏松接触”式轻压放电现象。近年来的研究结果表明, 当电极丝与工件到通常认为的放电间隙 (大约为 0.01mm) 时, 有的情况下并不发生火花放电, 甚至当电极丝接触到工件 (从显微镜中看不到间隙时), 仍然看不到火花, 只有当工件

将电极丝顶弯, 偏移一定距离(几微米到几十微米)时, 也就是当电极丝和工件之间保持一定的轻微接触压力时, 才发生正常的火花放电。有人认为, 在电极丝和工件之间存在着某种电化学产生的绝缘薄膜介质, 当电极丝被顶弯所造成的压力和电极丝相对工件的移动摩擦使这种介质减薄到可被击穿的程度, 才发生火花放电。

⑨ 现在的电火花线切割机床一般都是依靠微型计算机来控制电极丝的轨迹和间隙补偿功能的, 所以在加工凸模与凹模时, 它们的间隙可任意调节。

⑩ 电火花线切割加工是依靠电极丝与工件之间产生火花放电对工件进行加工的, 所以无论被加工的工件硬度如何, 只要是导体或半导体材料都能实现加工。而且随着电加工技术的进步, 一些非导电材料经过特殊处理也能进行数控线切割加工或电火花加工。

⑪ 现在大多数数控线切割机床具有四轴联动功能, 可以加工上下异形面、形状扭曲曲面体、变锥度和球形体等零件。而且有些机床增加了一个数控回转工作台附件, 将工件装在采用步进电机驱动的回转工作台上, 采取数控移动和数控转动相结合的方式编程, 可以加工出螺旋表面、双曲线表面和正弦曲面等复杂空间曲面。

1.1.2 数控线切割加工的应用范围

电火花线切割加工为新产品试制、精密零件加工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

适用于加工各种形状的冲模。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。模具的配合间隙、加工精度通常都能达到 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$ (快走丝机床) 和 $0.002 \sim 0.005\text{mm}$ (慢走丝机床) 的要求。此外, 还可加工挤压模、粉末冶金模、弯曲模、塑压模等。数控线切割加工模具所涉及的行业有以下几个。

- ① 机电行业 电动机的定转子冲片、电器柜和仪表箱的冲孔、弯折模。
- ② 电子仪表零件 开关、指针、接插件的落孔、落料、切口、弯折模和塑料模。
- ③ 家电行业 电视机、冰箱、洗衣机的注塑模。
- ④ 建材行业 型材挤压、拉伸模。
- ⑤ 粉末冶金 硬质合金等压铸模。
- ⑥ 轻工产品 缝纫机、自行车等零件成形模具。
- ⑦ 广告美工 字体、图案切割、面板加工。
- ⑧ 玩具制造 冲孔、落料、外形成形模具等。

(2) 加工特殊材料

切割某些高硬度、高熔点及贵重金属时, 使用机加工的方法有时是不可能的, 而利用数控线切割加工既经济又能保证精度。

(3) 加工零件

在新产品开发过程中, 需要单件的样品, 利用数控线切割在坯料上直接切割出零件, 例如试制切割特殊微电机硅钢片定、转子铁芯, 无需设计和制造出模具, 可大大缩短新产品开发周期并降低试制成本。另外, 修改设计、变更加工程序比较方便, 加工薄件时, 还可多片叠加在一起加工。在零件制造方面, 可用于加工品种多、数量少的零件, 形状特殊、难于机加工的零件, 材料试验样件, 各种型孔, 特殊齿轮、凸轮、样板等。采用偏摆电极丝法或偏摆刀具法(结合正弦规装夹), 可加工出具有精确廓形的成形车刀、铲刀、梳齿刀等。有些具有锥度切割的数控线切割机床, 还可以加工出“天圆地方”等上下异形面的零件。同时还

可进行细微加工、异形槽和人工标准缺陷的窄缝加工。

1.1.3 数控线切割加工的机理

图 1-1 为高速走丝电火花线切割加工示意图。由于在电火花放电中大多数情况下阳极腐蚀量远多于阴极,为此利用细钼丝作为工具电极进行切割,钼丝接高频脉冲电源的负极,工件接正极,即采用正极性加工。钼丝绕在储丝筒上,由三相多速异步电动机带动储丝筒运动,使钼丝作正反向交替移动,致使钼丝不断地进入和离开放电区域。为保证火花放电时钼丝不被烧断,必须向钼丝与工件之间浇注大量的工作液介质。当高频脉冲电源通电后,随着工作液的电离、击穿,形成放电通道,电子高速奔向正极,正离子奔向负极,于是电能转换为动能,粒子间的相互碰撞以及粒子与电极材料的碰撞,又将动能转换为热能。在放电通道内,正极和负极表面分别成为瞬时热源,达到很高的温度(1000~1200℃),使工作液介质汽化、热裂分解,金属材料溶化、沸腾、汽化。在热膨胀、局部微爆炸、电力、流体动力等综合作用下,蚀除下来的金属微粒随着钼丝的移动和工作液冲洗而被抛开放电区,于是在金属表面形成凹坑。在脉冲间隔时间内工作液消电离,放电通道中带电粒子复合为中性粒子,恢复工作液的绝缘性。由于工作过程是连续的,步进电机受控制系统的控制,使工作台在水平面沿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运动,从而合成各种曲线轨迹,工件就逐步被切割成各种形状。

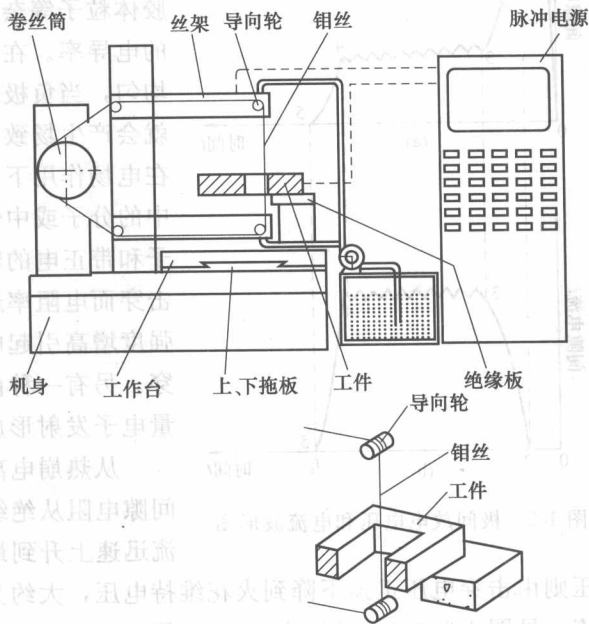


图 1-1 电火花线切割加工原理图

以上所述的过程,主要是火花放电对工件进行加工,那么,火花放电时,工件表面的金属是怎样被蚀除下来的?只有了解这一微观过程,才有助于掌握电火花线切割加工的速度、加工精度、表面粗糙度、电极丝损耗等各种基本规律,进而对脉冲电源、控制系统、供液系统、走丝机构、切割台等提出合理的要求。从大量试验资料来看,每次电火花腐蚀的微观过程都是电场力、磁力、热力、液体流动力、电化学和胶体化学等综合作用的过程。这一过程大致可分成以下四个连续阶段:极间介质的电离、击穿,形成放电通道;介质热分解、电极材料溶化、汽化热膨胀;电极材料的抛出;极间介质的消电离。

(1) 极间介质的电离、击穿,形成放电通道

图 1-2 (a) 为矩形波脉冲放电时电压与时间的关系图,图 1-2 (b) 为矩形波脉冲放电时电流与时间的关系图。0~1 为电压上升段;1~2 为击穿延时段;2~3 为电压下降、电流上升段;3~4 为火花维持电压与电流段;4~5 为电压、电流下降段。

当脉冲电压施加于电极丝与工件之间时,在图 1-2 (a) 中 0~1 和 1~2 段,两极之间立即形成一个电场。电场强度与电压成正比,与距离成反比,随着极间电压的升高或是极间距离的减小,极间电场的强度也将随之增大。由于电极丝和工件的微观表面是凸凹不平的,极

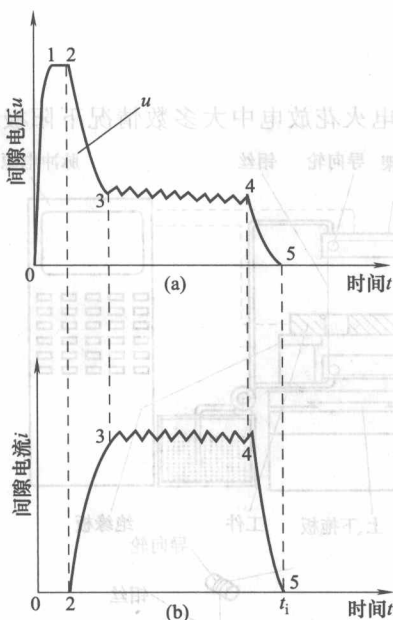


图 1-2 极间放电电压和电流波形图

电压则由击穿电压迅速下降到火花维持电压, 大约为 $20\sim 30\text{V}$, 电流则由零上升到某一峰值电流, 见图 1-2 (a)、(b) 中的 2~3 段。

放电通道是由数量大体相等的带正电的正粒子和带负电的电子以及中性粒子组成的等离子体。正、负带电粒子相向高速运动相互碰撞, 产生大量的热, 使通道温度相当高, 但分布是不均匀的, 从通道中心向边缘逐渐降低, 通道中心温度可高达 10000°C 以上。电子流动形成的电流同时又产生磁场, 磁场又反过来对电子流产生向心的磁压缩效应, 电子流动又同时受周围介质惯性动力压缩效应的作用, 使通道瞬间扩展受到很大阻力, 故放电开始阶段通道截面很小, 而通道内由高温热膨胀形成的初始压力可达数十兆帕。高压高温的放电通道以及随后瞬时金属汽化形成的气体 (以后发展成气泡) 急速扩展, 产生一个强烈的冲击波向四周传播。在放电过程中, 同时伴随着一系列派生现象, 其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应及频率范围很宽的电磁辐射和核爆炸冲击波等。

关于通道的结构, 通常认为是单通道, 即在一次放电时间内只存在一个放电通道; 有人认为可能是多通道, 即在一次放电时间内可能存在几个放电通道。近期实验表明, 单个脉冲放电时有可能出现多次击穿, 即在一个脉冲内间隙击穿后, 有时产生短路或开路, 接着又产生击穿放电。另外, 也出现通道受某些随机因素的影响而产生游动, 因而在某个脉冲周期内先后会出现多个电蚀坑现象。

(2) 介质热分解、电极材料熔化、汽化热膨胀

极间介质一旦被电离、击穿, 形成放电通道后, 脉冲电源使通道间的电子高速奔向正极。电能变成动能, 动能通过碰撞又转变为热能。于是在通道内正极和负极表面分别成为瞬时热源, 达到很高的温度。通道高温将工作液介质汽化, 进而热裂分解汽化, 如水基工作液热分解为氢气和氧气甚至原子等。正、负极表面的高温除使工作液汽化、热分解汽化外, 也使金属材料熔化甚至沸腾汽化。这些汽化后的工作液和金属蒸气瞬间体积猛增, 在放电间隙内成为气泡, 迅速热膨胀并产生爆炸。观察电火花线切割加工过程可以看到气泡冒出, 同时有

间距离又很小, 因而极间电场强度是很不均匀的, 两极间离得最近的突出点或尖端处的电场强度最大。

液体介质中不可避免地含有如金属微粒、碳粒子、胶体粒子等杂质, 也有一些自由电子, 使介质呈现一定的电导率。在电场作用下, 这些杂质将使极间电场更不均匀, 当负极表面某处的电场强度增加到一定程度时, 就会产生场致电子发射, 由负极表面向正极逸出电子。在电场作用下电子高速向正极运动, 并撞击工作液介质中的分子或中性原子, 产生碰撞电离, 形成带负电的粒子和带正电的粒子, 导致带电粒子雪崩式增多, 使介质击穿而电阻率迅速降低, 形成放电通道。这种由于电场强度增高引起电子发射形成的间隙击穿称为场致发射击穿。另有一种由于负极表面温度高, 局部过热而引起大量电子发射形成的间隙击穿称为热击穿。

从热崩电离开始到建立电离通道的过程非常迅速, 间隙电阻从绝缘状态迅速降低到几分之一欧姆, 间隙电流迅速上升到最大值, 大约在几安培到几百安培, 间隙

黑色的工作液流出,并可听到轻微而清脆的爆炸声。电火花线切割加工主要靠热膨胀局部微爆炸,使熔化、汽化的金属材料抛出蚀除,此过程相当于图 1-2 (a)、(b) 中的 3~4 段的前期。

(3) 电极材料的抛出

通道和正负极表面放电点瞬时高温时工作液汽化和金属材料熔化、汽化,热膨胀产生很高的压力;通道中心的压力最高,使汽化了的气体体积不断向外膨胀,形成气泡;气泡上下、内外的瞬时压力并不相等,压力高处的熔融金属液体和蒸气就被挤排、抛出而进入工作液中,这一过程相当于图 1-2 (a)、(b) 中的 3~4 段的后期。

由于表面张力和内聚力的作用,使抛出的材料具有最小的表面积,冷凝时凝聚成细小的圆球颗粒。实际上熔化和汽化的金属在被抛离时,向四处飞溅,除绝大部分抛入工作液中收缩成小颗粒外,还有一小部分飞溅镀覆、吸附在对面的电极表面上。这种相互飞溅镀覆及吸附的现象,对电极丝的损耗起到减少和补偿的作用。

总之,材料的抛出是热爆炸力、电动力、流体动力等综合作用的结果,对这一复杂的抛出机理的认识还在不断地深化。

(4) 极间介质的消电离

随着脉冲电压的结束,脉冲电流也迅速降为零,如图 1-2 (a)、(b) 中 4~5 段标志着一脉冲放电结束,但此后仍应有一段间隔时间,使间隙介质消除电离,即放电通道中的正、负带电粒子复合为中性粒子,恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度,以及降低电极表面的温度等,以免下次总是重复在同一处电离击穿而导致电弧放电,从而保证在别处按两极相对最近处或电阻率最小处形成下一放电通道。

在加工过程中产生的电蚀产物如金属微粒、气泡等如来不及排除、扩散出去,就会改变间隙介质的成分,并降低绝缘强度。放电时产生的热量不及时传出,带电粒子的自由能不易降低,将大大减少复合概率,使消电离过程不充分,结果将使下一个脉冲通道始终集中在某一部位,使金属局部表面过热而破坏消电离过程,这样火花放电将恶性循环,转变为有害的电弧放电。

由此可见,为了保证电火花线切割加工过程的正常进行,在两次脉冲放电之间一般要有足够的脉冲间隔时间,这一脉冲间隔时间的选择,不仅要考虑介质本身消电离所需的时间,还要考虑电蚀产物排离放电区域的时间,此外还应留有余地,使击穿、放电点分散、转移,否则易形成电弧。

图 1-3 为放电过程中四个阶段放电状态示意图。

图 1-4 为电极丝与工件之间的放电情况示意图。

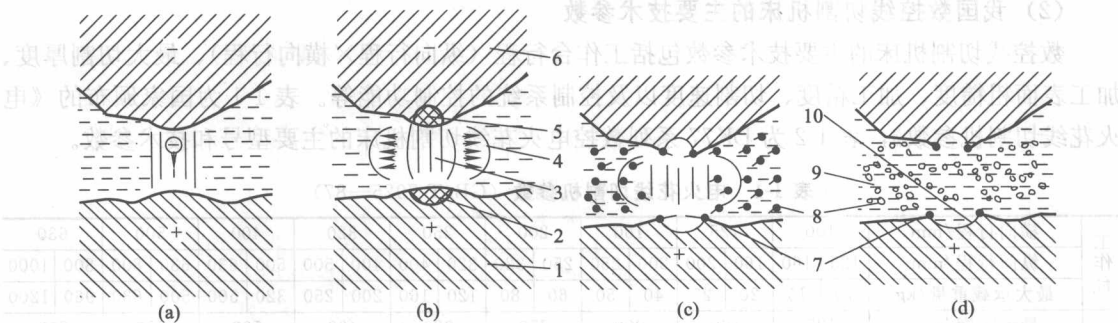


图 1-3 放电间隙状态示意图

1—正极; 2—从正极上熔化并抛出金属的区域; 3—放电通道; 4—气泡; 5—在负极上熔化并抛出金属的区域;
6—负极; 7—翻边凸起; 8—在工作液中凝固的微粒; 9—工作液; 10—放电形成的凹坑

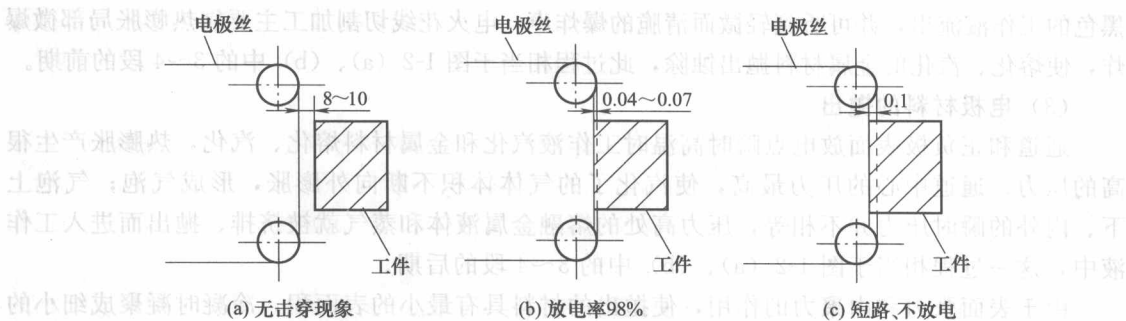


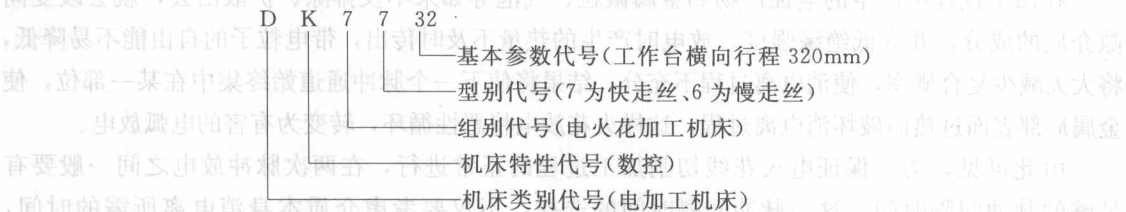
图 1-4 电极丝与工件之间的放电情况 单位: mm

1.2 数控线切割机床的分类及特点

1.2.1 数控线切割机床的分类

(1) 数控线切割机床的型号

① 国内生产的数控线切割机床 我国自主生产的数控线切割机床型号的编制是根据 GB/T 15375—94《金属切削机床 型号编制方法》的规定进行的，机床型号由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成，它表示机床的类别、特性和基本参数。现以型号为 DK7732 的数控线切割机床为例，其型号中各字母与数字的含义如下：



② 国外生产的数控线切割机床 国外生产的数控线切割机床的厂商主要有瑞士和日本两国。其主要的公司有：瑞士阿奇夏米尔公司、日本三菱机电公司、日本沙迪克公司、日本FANUC公司、日本牧野公司。国外机床的编号一般也是由一系列代码加基本参数代号来编制，如日本沙迪克公司的A系列/AQ系列/AP系列，三菱机电公司的FA系列等。

(2) 我国数控线切割机床的主要技术参数

数控线切割机床的主要技术参数包括工作台行程（纵向行程×横向行程）、最大切割厚度、加工表面粗糙度、加工精度、切割速度以及控制系统的控制功能等。表 1-1 为国家颁布的《电火花线切割机参数》，表 1-2 为 DK77 系列数控电火花线切割机床的主要型号和技术参数。

表 1-1 电火花线切割机参数 (GB/T 7925—87)

工作台	横向行程/mm	100		125		160		200		250		320		400		500		630	
	纵向行程/mm	125	160	160	200	200	250	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1000
	最大承载重量/kg	10	15	20	25	40	50	60	80	120	160	200	250	320	500	500	630	960	1200
工件尺寸	最大宽度/mm	125		160		200		250		320		400		500		630		800	
	最大长度/mm	200	250	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1000	1000	1250	1250	1600
	最大切割厚度/mm	40、60、80、100、120、180、200、250、300、350、400、450、500、550、600																	
	最大切割锥度/(°)	0、3、6、9、12、15、18(18 以上, 每档间隔增加 6)																	

表 1-2 DK77 系列数控电火花线切割机床的主要型号及技术参数

机床型号	DK7716	DK7720	DK7725	DK7732	DK7740	DK7750	DK7763	DK77120
工作台行程/mm	200×160	250×200	320×250	500×320	500×400	800×500	800×630	2000×1200
最大切割厚度/mm	100	200	140	300 (可调)	400 (可调)	300	150	500 (可调)
加工表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	2.5	2.5	2.5	2.5	6.3~2.5	2.5	2.5	2.5
加工精度/mm	0.01	0.012	0.012	0.015	0.02	0.02	0.02	0.025
切割速度/(mm^2/min)	70	80	80	100	120	120	120	120
加工锥度/(°)	3~60, 各厂家的型号不同							
控制方式	各种型号均有单板(或单片)机或计算机控制							

(3) 数控线切割机床的分类

① 按走丝速度分类 根据电极丝的运行速度不同,电火花线切割机床通常分为两类:一类是高速走丝电火花线切割机床(WEDM-HS),其电极丝做快速往复运动,一般走丝速度为8~10m/s,电极丝可重复使用,加工速度较慢且快走丝容易造成电极丝抖动和反响时停顿,使加工质量下降,高速走丝电火花线切割机床是我国生产和使用的主要机种,也是我国独创的电火花线切割加工模式。图1-5是高速走丝数控线切割机床。另一类是低速走丝电火花线切割机床(WEDM-LS),其电极丝做慢速单向运动,一般走丝速度低于0.2m/s,电极丝放电后不再使用,工作平稳、均匀、抖动小,加工质量好,且加工速度较快,是国外使用的主要机种。图1-6是低速走丝数控线切割机床。高速走丝数控线切割机床与低速走丝数控线切割机床的比较见表1-3。



图 1-5 高速走丝数控线切割机床

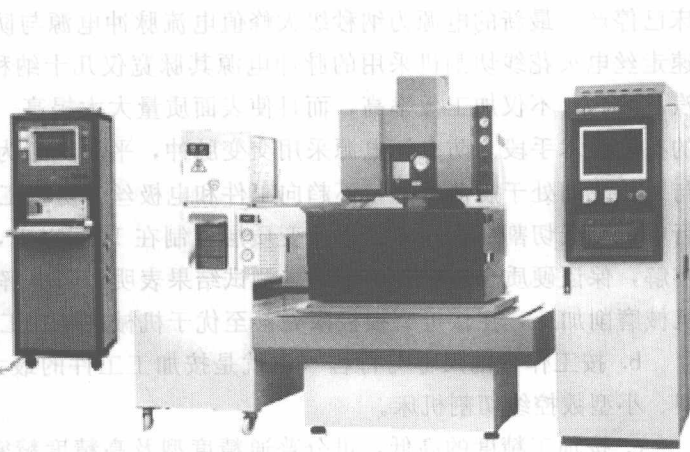


图 1-6 低速走丝数控线切割机床

表 1-3 高速走丝数控线切割机床与低速走丝数控线切割机床的比较

比较项目	高速走丝数控线切割机床	低速走丝数控线切割机床
走丝速度/(m/s)	常用值 8~10	常用值 0.001~0.25
电极丝工作状态	往复供丝,反复使用	单项运行,一次性使用
电极丝材料	钼、钨钼合金	黄铜、钢、以钢为主体的合金或镀覆材料、钼丝

续表

比较项目	高速走丝数控线切割机	低速走丝数控线切割机
电极丝直径/mm	0.03~0.25, 常用值 0.12~0.20	0.003~0.3, 常用值 0.2
工作电极丝长度/m	200 左右	数千
穿丝换丝方式	只能手工	可手工, 可全自动
电极丝振动	较大	较小
运丝系统结构	简单	复杂
脉冲电源	开路电压 80~100V, 工作电流 1~5A	开路电压 300V 左右, 工作电流 1~32A
单面放电间隙/mm	0.01~0.03	0.01~0.12
工作液	数控线切割乳化液或水基工作液	去离子水, 有的场合用电火花加工专用油
导丝机构形式	普通导轮, 寿命较短	蓝宝石或钻石导向器, 寿命较长
机床价格	便宜	昂贵
切割速度/(mm ² /min)	20~160	20~240
加工精度/mm	0.01~0.04	0.002~0.01
表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	1.6~3.2	0.1~1.6
重复定位精度/mm	0.02	0.002
电极丝损耗	均布于参与工作的电极丝全长	不计
切割最大厚度/mm	600	400
最小切缝宽度/mm	0.04~0.09	0.0045~0.014
工作环保	较脏/有污染	干净/无害
操作情况	单一/机械	灵活/智能
驱动电机	步进电机	直线电机

② 按其他方式分类

a. 按机床配置的脉冲电源类型分类 按机床配用的脉冲电源类型, 可分为 RC 电源、晶体管电源、分组脉冲电源及自适应控制电源机床。目前, 单纯配用 RC 电源的数控线切割机已停产, 最新的电源为纳秒级大峰值电流脉冲电源与防电解 (AE) 脉冲电源。先进的低速走丝电火花线切割机采用的脉冲电源其脉宽仅几十纳秒, 峰值电流在 1000A 以上, 形成汽化蚀除, 不仅加工效率高, 而且使表面质量大大提高。防电解电源是解决工件“软化层”的有效技术手段。防电解电源采用交变脉冲, 平均电压为零, 是在工作液中的 OH^- 电极丝与工件之间处于震荡状态, 不趋向工件和电极丝, 防止工件材料的氧化。采用防电解电源进行电火花线切割加工, 可使表面变质层控制在 $1\mu\text{m}$ 以下, 避免硬质合金材料中钴的析出和溶解, 保证硬质合金模具的寿命。测试结果表明, 防电解电源加工硬质合金模具寿命已接近机械磨削加工, 在接近磨损极限处甚至优于机械磨削加工。

b. 按工作台的尺寸与行程 (也就是按加工工件的最大尺寸) 的大小, 可分为大型、中型、小型数控线切割机床。

c. 按加工精度的高低, 可分普通精度型及高精度精密型两大类数控线切割机床。绝大多数低速走丝数控线切割机床属于高精度精密机床。

1.2.2 数控线切割机床的结构及控制特点

(1) 高速走丝数控线切割机床的结构特点

高速走丝数控线切割机床 (图 1-7) 主要由机床、脉冲电源、控制系统三大部分组成。机床由床身、工作台、走丝系统组成。

① 床身 床身一般为铸铁材料制作, 是工作台、绕丝机构及丝架的支撑和固定基础,