



航空制造工程手册

《航空制造工程手册》总编委会 主编

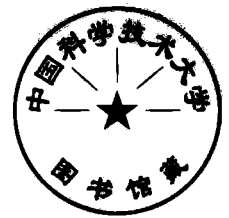
· 特种加工 ·

航空工业出版社

航空制造工程手册

特种加工

《航空制造工程手册》总编委会 主编



航空工业出版社

1 9 9 3

(京)新登字 161 号

内 容 提 要

本手册总结了特种加工技术在我国航空工业中应用的宝贵经验。在本手册中有选择地编写了一些在航空制造业中常用的特种加工方法：如电解加工、电火花加工、电火花线切割加工、激光加工、电子束加工、等离子喷涂技术、化学铣切、磨粒流加工、高压水喷射加工以及光化学加工等。此外，还介绍一些派生的工艺方法，如电解磨削、电解去毛刺、电火花磨削以及电火花强化等。

本手册以实用性、综合性、系统性、成套性与求实、求是、求新、求精为指导思想和原则，突出航空产品的制造特性，兼顾一般机械的制造共性，以实用为主，继承与发展并重，引用国外先进经验与数据，以期为航空工业的技术改造提供行之有效的支持技术。

编入本手册的各种加工方法包括基本原理、工艺设备、加工工艺、应用实例与技术安全等内容，可为航空工业第一线的工程技术人员选用各种特种加工方法提供有力的帮助，并为从事产品设计的技术人员与管理人员认识特种加工技术提供参考。

本手册可供机械制造工业广大科研人员、工程技术人员、技术工人和大专院校教师和学生参考。

航空制造工程手册

特种加工

《航空制造工程手册》总编委会 主编

责任编辑 丁立铭

© 1993

航空工业出版社

(北京市安外小关东里 14 号)

— 邮政编码：100029 —

全国各地新华书店经售

煤炭出版社印刷厂印刷

1993 年 12 月第 1 版

1993 年 12 月第 1 次印刷

开本：787×1092 毫米 1/16

印张：47.25

印数：1—2000

字数：1208 千字

ISBN 7-80046-680-9/TH·026 (平装)

ISBN 7-80046-681-7/TH·027 (精装)

定价：70.00 元 (平装) 85.00 元 (精装)

序

我国航空工业已走过了四十余年的历程,从飞机的修理、仿制到自行研制,航空制造工程得到很大的发展。在航空高科技产业的大系统中,航空制造工程是重要的组成部分之一。航空工业,就其行业性来讲,属于制造业范畴。航空制造工程的技术状况,是衡量一个国家科学技术发展综合水平的重要标志。航空制造工程的发展水平,对飞机的可靠性和使用寿命的提高、综合技术性能的改善、研制和生产成本的降低、甚至总体设计思想能否得到具体实现等均起着决定性作用。

航空制造工程已成为市场竞争的重要基础,要发展航空工业、并有效地占领市场,不仅要不断地更新设计,开发新产品,更重要的是要具备一个现代化的航空制造工程系统。在发达国家中,均优先发展航空制造工程,很多新工艺、新材料、新设备、新技术都是在航空制造工程中领先使用的,因此必须从战略高度予以重视,并采取实际而有效的措施加速它的发展。编写《航空制造工程手册》,就是为实现航空制造工程现代化的战略目标,在制造工程领域进行的基础性工作。

四十年来,我国航空工业积累了大量经验,取得了丰硕的成果,特别是改革开放以来,开扩了视野并有可能汲取更多的新科技信息。但是如何将这容量浩繁、层次复杂、学科众多的科学技术和经验汇集起来,使之成为我国航空工业、乃至国家的珍贵财富,是一项具有重大实用价值和长远意义的任务,为此航空航天部决定组织全行业的力量,统一计划、统一部署完成这项极其复杂的规模巨大的系统工程。大家本着继往开来的历史责任感和紧迫感,从1989年开始组织航空工业全行业制造工程方面造诣至深的专家、教授、学者,经过几年的努力陆续编写出版了这套基本覆盖航空制造工程各专业各学科的包括三十二个分册、几千万字的《航空制造

工程手册》。

编好这套手册是一项十分艰巨的工作。大家始终坚持求实、求新、求精、求是的原则，在确保鲜明航空特色的前提下，在总体内容上强调实用性、综合性、成套性；在表达形式上，以技术数据、图形表格、曲线公式为主；阐述扼要，结论严谨，力求使手册成为一部概念准确、数据可靠、文字简洁、编排合理、查阅方便，能为广大从事航空制造工程的科技人员提供有益指导和参考的工具书。

首次组织编纂大型手册，缺乏经验，还由于过去资料积累基础比较薄弱，新技术发展迅速和深度广度不断增加，使这项工作带有相当程度的探索性，因之错误与不足之处实为难免，恳切希望广大读者给予指正。对在这套手册编写过程中给予支持的单位和付出辛勤劳动，提供资料，参与编写，评审，出版的同志们表示衷心感谢。由于我国航空制造工程与世界水平尚存在较大差距，这套手册出版之后，还有不断求新、完善的必要，《航空制造工程手册》总编委会及其办公室是常设机构，将努力收集新的科技信息及这套工具书使用的情况和意见，为今后的修订提供依据，以求进一步完善和提高。

何文治

1992年8月28日

主要符号说明*

英文字母符号

<i>A</i>	原子量 (2); 工件放电面积 (3); 锥度角 (4);		<i>E</i>	电极电位 (2); 平衡电极电位 (2); 激光能量 (5); 浸蚀比 (6); 弹性模数 (6); 曝光量 (7);	V V J lx · s
<i>A₁</i>	夹具进出口通道截面积 (7);	mm ²	<i>E⁰</i>	标准电极电位 (2);	V
<i>A₂</i>	工件被加工处通道截面积之和 (7);	cm ²	<i>EF</i>	腐蚀系数 (7);	
<i>B</i>	宽度 (2), (3); 高速走丝机编程用 3B 格式中的分隔符号 (4); 亮度 (5);	mm cd/m ²	<i>e_s</i>	平动 (球动) 加工电极运动理论偏心量 (3);	mm
<i>B_s</i>	波美 (7);	(°)	<i>e_{as}</i>	平动 (球动) 加工电极运动实际偏心量 (3);	mm
<i>C</i>	电解液浓度 (2); 电容 (4);	%, g/L μF	<i>F</i>	法拉第常数 (2); 脉冲频率 (4);	C/mol Hz
<i>C_s</i>	叶片电极单面修正量 (3);	mm	<i>f</i>	聚焦镜焦距 (5); 扫描频率 (5);	mm Hz
<i>c</i>	比热 (2); 水激波的传播速度 (7);	J/kg m/s	<i>f_s</i>	有效脉冲频率 (3);	Hz
<i>D</i>	孔直径 (3); 铣切深度 (6); 腐蚀深度 (7); 喷嘴直径或射流直径 (7);	mm mm mm mm	<i>f_i</i>	第 <i>i</i> 次切割的加工量 (4);	mm
<i>D_s</i>	电火花磨削预孔直径 (3);	mm	<i>f_p</i>	脉冲频率 (3);	Hz
<i>d</i>	电火花磨削用 电极丝直径 (3); 电火花线切割 电极丝直径 (4); 电极丝偏移量 (4); 光束直径 (5); 压缩孔直径 (5); 喷嘴直径或射流直径 (7);	mm mm mm mm mm mm	<i>G</i>	工件蚀除质量 (3); 放电间隙 (3); 3B 格式中编程的计数方向 (4);	g μm
<i>d₀</i>			<i>G_{max}</i>	最大放电间隙 (3);	μm
			<i>g</i>	重力加速度 (2), (7);	m/s ²
			<i>H</i>	高度 (2); 电火花成形机主轴连接板至工作台面最大距离 (3);	mm mm

* 符号说明后面数字表示章序号

	工件在时间 t 内被蚀除的深度或长度 (3);	mm	L_m	材料熔化比能 (5);	J/cm^3
	工件厚度 (4);	mm	L_p	材料破坏比能 (5);	J/cm^3
H_i	第 i 次切割的电极丝偏丝量 (4);	mm	l	长度 (2);	mm
h	余量 (2);	mm		压缩孔长度 (5);	mm
	工具电极在时间 t 内损耗的长度 (3);	mm	M	体积克分子浓度 (2);	mol/L
	工件厚度 (4);	mm	m	重量克分子浓度 (2);	mol/L
	吊车速率 (6);	mm/min	n	原子价 (2);	
	喷射距离 (7);	mm		任意脉冲数 (3);	
I	电流 (2); (3);	A	P	加工循环次数 (7);	
	束流 (5);	mA		功率 (3);	W
	曝光强度 (7);	lx		激光束平均功率 (5);	W
I_s	短路电流 (3);	A	P_d	放电功率 (3);	W
i	电流密度 (2);	A/cm^2	\bar{P}_d	放电平均功率 (3);	W
	电流 (3);	A	P_e	电解液压力 (2);	Pa, MPa
i_d	放电电流 (3);	A		工作液冲液压力 (3);	Pa
\bar{i}_d	平均放电电流 (3), (4);	A		吹气压力 (5);	Pa
\hat{i}_d	峰值电流 (3), (4);	A		磨流介质挤压力 (7);	MPa
i_s	短路脉冲电流 (3);	A		喷嘴前的供水压力 (7);	MPa
J	视在电流密度 (3);	A/mm^2	Q	电量 (2);	C
	3B 格式中编程的计数长度 (4);	μm		流量 (2);	L/min, m^3/h
\bar{J}	平均电流密度 (3);	A/mm^2	q	工作液冲液流量 (3);	L/min
k	重量电化当量 (2);	$g/A \cdot s$		残余应力系数 (3);	
	影响叶片电火花加工精度的修正系数 (3);		R	电阻 (2), (4);	Ω
	型孔加工电极设计系数 (3);			半径 (4);	mm
	主轴伺服增益 (3);			化学铣切圆角 (6);	mm
L	工具阴极进给距离 (2);	mm		侧面腐蚀宽度 (7);	mm, μm
	间隙通道长度 (2);	mm	R'	样板内、外缘半径 (6);	mm
	工具电极工作部分长度 (3);	mm	R_a	表面粗糙度评定参数, 轮廓算术平均偏差 (3), (4), (7); (粗糙度 R 本书用正体);	μm
	孔深度 (3);	mm	R_{max}	表面粗糙度轮廓最大高度 (3), (4);	μm
	电感 (4);	H	R_y	表面粗糙度轮廓最大高度 (3), (4);	μm
	扫描步距 (5);	μm	r	半径 (2), (4);	mm
	工件铣切时下降距离 (6);	mm		参考平面与第二平面之间的距离 (4);	mm
L_B	材料气化比能 (5);	J/cm^3	R_z	微观不平度十点高度 (4);	μm

S	面积 (2);	cm^2	腐蚀速率 (6);	mm/min
	加工间隙 (3);	μm	电极电位 (6);	V
S	电极丝中心线在工件上扫过面积的总和 (4);	mm^2	V_0 喷嘴出口处水射流喷射速度 (7);	m/s
	抗蚀剂灵敏度 (5);	$\mu\text{m}/\text{cm}^2$	V_F 加工进给速度 (4);	mm/min
	延伸率 (6)	$\%$	V_E 电极体积损耗 (3);	mm^3/min
S_L	侧面加工间隙 (3);	μm	V_G 工件质量去除率 (3);	g/min
S_b	保护涂层下的切削宽度 (6);	mm	V_w 工件体积去除率 (3);	mm^3/min
T	温度 (2), (6);	$^{\circ}\text{C}$	V_S 切割速度 (4);	mm^3/min
	曝光时间 (7);	s	v 阴极进给速率 (2);	mm^3/min
T_0	材料蒸发温度 (5);	$^{\circ}\text{C}$	工具电极在时间 t 内损耗的体积 (3);	mm^3
T_m	材料熔化温度 (5);	$^{\circ}\text{C}$	切割速度 (5);	mm/min
t	时间 (2), (3);	s	v_1 金属阳极溶解速度 (2);	cm^3/min
	切割时间 (4);	min	W 重量去除量 (2);	g
	加工时间 (6), (7);	min	线架机构的附加运动坐标 (4);	
t_d	击穿延时 (3);	μs	工件在时间 t 内被蚀除的质量 (3);	g
t_e	放电时间 (3);	μs	W 能量 (3);	J
t_f	脉冲后沿 (3);	μs	电火花成形机主轴头滑座行程 (3);	mm
t_i	脉冲宽度 (3), (4);	μs	W' 重量去除率 (2);	$\text{g}/\text{A} \cdot \text{min}$
t_0	脉冲间隔 (3), (4);	μs	WB 电极丝张力 (4);	N
t_p	放电周期 (3);	μs	W_0 单个脉冲能量 (3);	J
t_r	脉冲前沿 (3);	μs	W_S 走丝速度 (4);	m/min
U	工作电压, 加工电压 (2), (3);	V	w 电火花加工过程控制额定量 (3);	
	线架机构的附加运动坐标 (4);		参考平面与工件底面之间的距离 (4);	mm
U_R	欧姆压降 (2);	V	工具电极在时间 t 内损耗的质量 (3);	g
U_s	主轴伺服进给参考电压 (3);	V	Z 电火花成形机主轴头伺服行程 (3);	mm
u	流速 (2);	m/s	电火花加工过程控制影响量 (3);	
	工件加工单面总余量 (3);	mm	3B 格式编程中的加工指令 (4);	
	工件送进速率 (7);	mm/min	Z_0 小孔电火花磨削余量 (3);	mm
u_e	放电电压 (3);	V		
\bar{u}_e	平均放电电压 (3);	V		
\hat{u}_e	开路电压 (3), (4);	V		
\hat{u}_e	空载电压峰值 (4);	V		
V	体积去除量 (2), (3)	mm^3		
	电压 (5);	V		
	线架机构的附加运动坐标 (4);			

希腊字母符号

α	温度系数 (2); 角度 (4);	(°)	疲劳极限 (3);	MPa
γ	比重 (2); 工件材料密度 (3);	g/cm ³ g/cm ³	σ_m 平均应力 (3); σ_r 残余应力 (3);	MPa MPa
Δ	加工间隙 (2); 阴阳模之间的单边配合间隙 (4); 切口截面锥度 (7);	mm mm	τ 脉宽系数, 脉宽比 (3); Φ 放电效率 (3); φ 相对放电时间 (3); 喷嘴的流速系数 (7)。	
δ	误差, 偏差 (2); 气泡层厚度 (2); 工件电火花穿孔深度 (厚度) (3); 切材厚度 (7);	mm mm mm		
δ_d	放电间隙	mm		
δE	分解电压 (2);	V		
δ_1	上切口的切缝宽度 (7);	mm		
δ_2	下切口的切缝宽度 (7);	mm		
ζ	超电压 (2);	V		
η	电流效率 (2);	%		
κ	电导率 (2);	$\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$		
λ	当量电导 (2); 阻力系数 (2); 激光波长 (5); 频率比 (3);	 μm 		
μ	流体动力粘度 (2);	Pa · s		
ρ	电阻率 (2);	$\Omega \cdot \text{cm}$		
Ω	立体角 (5);	Sr		
ω	体积电化当量 (2);	cm ³ /A · min		
θ	电极相对体积损耗 (3); 光束发散角 (5);	 rad		
θ_n	电极相对长度损耗 (3);			
θ_w	电极相对质量损耗 (3);			
γ	极间介质电导率 (3); 流体运动粘度 (2);	S/cm m ² /s		
σ	强度极限 (6); 表面残余应力 (7);	MPa MPa		

目 录

主要符号说明

第 1 章 概 述

1.1 特种加工技术的发展	1
1.2 特种加工技术的特点	1
1.3 特种加工技术的分类	2
1.4 特种加工技术应用范围	3
1.5 特种加工技术在航空工业中的应用 及其发展趋势	7
1.6 本分册的内容	12

第 2 章 电解加工

2.1 概 论	13
2.1.1 分类及特征	13
2.1.2 应用范围	20
2.1.3 国内外应用现状及发展动态	21
2.2 电解加工基本原理	24
2.2.1 电解加工的电极反应	24
2.2.2 电解加工与法拉第定律	25
2.2.3 电解加工的极化效应	26
2.2.3.1 术语及常用电极的标准电极电 位	26
2.2.3.2 极化的形成及影响因素	29
2.2.3.3 极化与分解电压	29
2.2.3.4 极化与电流效率	29
2.2.3.5 分解电压与电流效率的测定方 法	31
2.2.4 阳极的活化、钝化和超钝化	31
2.2.5 极化对电解加工的影响	34
2.3 电解加工设备	34
2.3.1 总体论述	34
2.3.1.1 组成、分类和选型	34
2.3.1.2 设备主要规格的选取	36
2.3.1.3 电解加工设备的总体要求	38
2.3.2 机床	39
2.3.2.1 电解加工机床的组成、技术要求 及主要部件结构的选取	39

2.3.2.2 叶片电解加工机床	44
2.3.2.3 大型卧式单头电解加工机床	50
2.3.2.4 立式单头电解加工机床	50
2.3.2.5 电解磨削机床	51
2.3.3 电解加工电源及短路保护系统	54
2.3.3.1 基本要求	54
2.3.3.2 分类、特征及应用范围	55
2.3.3.3 可控硅整流电源及斩波器	56
2.3.3.4 快速短路保护系统	58
2.3.4 电解液系统	59
2.3.4.1 组成	59
2.3.4.2 功能及基本要求	60
2.3.4.3 电解液主泵	61
2.3.4.4 电解液槽	63
2.3.4.5 恒温系统	63
2.3.4.6 电解液净化装置	64
2.3.5 自动控制系统	65
2.3.5.1 组成及功能	65
2.3.5.2 加工间隙参数的采样和控制	66
2.3.5.3 加工循环的自动控制	67
2.3.5.4 电解加工控制系统类型	69
2.4 电解加工工艺	70
2.4.1 电解液	70
2.4.1.1 电解液的作用及对电解液的 基本要求	70
2.4.1.2 电解液的分类	70
2.4.1.3 几种常用的电解液	72
2.4.1.4 常用电解加工材料的电解液配 方	72
2.4.2 加工间隙	73
2.4.2.1 间隙的作用及其影响因素	73
2.4.2.2 间隙公式	73
2.4.2.3 间隙与电场、流场	74
2.4.2.4 间隙的分布与大小的选择	78
2.4.2.5 间隙的几何形状及概算	78
2.4.3 流 场	81
2.4.3.1 概 述	81

2.4.3.2	三种基础流场的分析	83	2.7.1.2	应用实例	139
2.4.3.3	平面与孔加工流场	84	2.7.2	电解抛光	142
2.4.3.4	叶片电解加工流场	85	2.7.2.1	用途、特点	142
2.4.4	工具阴极及夹具	86	2.7.2.2	基本工艺规律	142
2.4.4.1	工具阴极的分类	86	2.7.2.3	电抛光表面疵病、原因、质量 措施	144
2.4.4.2	工具阴极的设计	88	2.7.2.4	应用举例	146
2.4.4.3	工具阴极的制造	104	2.7.3	电解磨削	149
2.4.4.4	电解加工夹具	105	2.7.3.1	概述	149
2.5	提高电解加工精度的措施	107	2.7.3.2	电解液	151
2.5.1	混气电解加工	107	2.7.3.3	主要工艺参数	152
2.5.1.1	混气电解加工的特点	107	2.7.3.4	应用实例	154
2.5.1.2	混气腔的设计	109	2.7.3.5	电解磨削导电磨轮	158
2.5.2	脉冲电流加工	111	2.8	技术安全	159
2.5.2.1	原理、特点、应用范围	111	2.8.1	电解加工的环境污染及环境保护	159
2.5.2.2	脉冲电流加工的分类	111	2.8.1.1	电解液对环境的污染	159
2.5.2.3	脉冲电流加工工艺及实例	112	2.8.1.2	对大气的污染	160
2.6	电解加工在航空工业中的应用	115	2.8.2	电解泥的提炼	160
2.6.1	叶片加工	115	附 表		161
2.6.1.1	分类、特征、应用范围	115	第3章 电火花加工		
2.6.1.2	典型加工实例	117	3.1	概 述	167
2.6.1.3	叶片电解加工常见疵病、故障 及排除	119	3.1.1	分 类	167
2.6.2	整体叶轮加工	120	3.1.1.1	电火花成形穿孔加工	167
2.6.2.1	二维不变截面整体叶轮、定子叶 栅叶片型面加工	120	3.1.1.2	电火花磨削加工	168
2.6.2.2	变截面扭转整体叶轮型面加工	122	3.1.1.3	电火花线电极加工	168
2.6.2.3	疵病、故障及排除	123	3.1.1.4	电火花展成加工	168
2.6.3	小孔加工	124	3.1.2	机 理	169
2.6.3.1	分类、特征及参数	124	3.1.3	极间放电状态及检测	169
2.6.3.2	典型加工零件	125	3.1.3.1	电参数	169
2.6.3.3	加工故障及排除	127	3.1.3.2	脉冲分类	172
2.6.4	机匣加工	127	3.1.3.3	脉冲能量	172
2.6.4.1	加工方法概述	128	3.1.3.4	极间放电状态的检测	172
2.6.4.2	电解液及工艺参数选用	129	3.2	电火花成形加工设备	173
2.6.4.3	加工尺寸范围及加工精度	130	3.2.1	电火花成形加工机系列	173
2.6.5	电解加工的表面质量与疲劳强度	130	3.2.2	主机结构特点、形式、性能	175
2.6.5.1	电解加工表面质量的特点	130	3.2.2.1	主轴头	176
2.6.5.2	影响表面质量的因素及改善表面 质量的措施	131	3.2.2.2	工作台	177
2.6.5.3	电解加工对疲劳强度的影响及提高 电解加工零件疲劳强度的方法	134	3.2.3	电 源	178
2.7	其他类型电解加工工艺	137	3.2.3.1	脉冲电源	178
2.7.1	电解去毛刺及尖边倒圆	137	3.2.3.2	数控电源	179
2.7.1.1	原理及工艺	138	3.2.4	控制系统	180
			3.2.4.1	控制过程参数对工艺指标的影 响	180
			3.2.4.2	控制系统的目标	182

3.2.4.3 控制方式分类	182	3.4.4.1 电火花加工表面粗糙度	244
3.2.4.4 控制功能	182	3.4.4.2 电火花加工表层	247
3.2.5 工作液及其循环过滤系统	186	3.4.4.3 电火花加工表层的物理性能	250
3.2.5.1 工作液的作用	186	3.4.4.4 电火花加工表面缺陷的避免	254
3.2.5.2 常用工作液	187	3.4.4.5 电火花加工表面后置处理	255
3.2.5.3 添加剂	187	3.4.5 电火花加工速度和加工稳定性	256
3.2.5.4 工作液循环系统	188	3.4.5.1 电火花加工速度的表示方法	256
3.2.5.5 工作液的过滤	188	3.4.5.2 影响加工速度的因素	257
3.2.6 辅助设备及附件	190	3.4.5.3 加工稳定性	260
3.2.6.1 电极夹头	190	3.5 电火花强化	261
3.2.6.2 平动头	190	3.5.1 电火花表面强化原理	261
3.2.7 数控电火花成形机	191	3.5.2 电极材料	262
3.2.7.1 主控制系统	191	3.5.3 电火花表面强化层特性	262
3.2.7.2 机械系统与运动控制	192	3.5.3.1 强化层厚度	262
3.2.7.3 电 源	194	3.5.3.2 强化层表面形貌	262
3.2.7.4 辅助控制功能	196	3.5.3.3 强化层的显微硬度	262
3.3 工具电极	196	3.5.3.4 强化层的红硬性	263
3.3.1 工具电极形式	196	3.5.3.5 强化层的耐磨性及耐蚀性	263
3.3.2 工具电极材料	197	3.5.3.6 强化层的残余应力	263
3.3.2.1 工具电极常用材料	197	3.5.4 电火花强化工艺	264
3.3.2.2 电极材料的选择	199	3.5.5 影响电火花强化层厚度的因素	265
3.3.3 工具电极损耗	202	3.6 电火花磨削	269
3.3.3.1 电极损耗定义	202	3.7 电火花加工实例	271
3.3.3.2 影响电极损耗的因素	204	3.7.1 整体叶轮叶片电火花加工	271
3.3.4 工具电极设计与制造	206	3.7.1.1 加工方案	271
3.3.4.1 工具电极设计	206	3.7.1.2 电极设计	272
3.3.4.2 工具电极的制造	211	3.7.1.3 加工工艺	273
3.3.5 工具电极的安装	214	3.7.2 栅网小孔的整体电火花加工	273
3.3.5.1 工具电极的工艺基准校正	214	3.7.3 小孔电火花加工在航空发动机中 的应用	274
3.3.5.2 工具电极的装夹	215	3.7.3.1 航空发动机喷嘴的加工	274
3.3.5.3 工具电极对工件的找正	217	3.7.3.2 航空发动机叶片等零件 小孔加工	275
3.4 电火花加工工艺	220	3.7.4 伞齿轮精锻模电火花加工	276
3.4.1 电火花加工工艺类型	220	3.7.4.1 技术要求	276
3.4.1.1 电火花穿孔加工	220	3.7.4.2 加工要点	277
3.4.1.2 型腔电火花加工	225	3.7.5 叶轮注射模电火花加工	277
3.4.1.3 电火花加工规范	231	3.7.5.1 技术要求	277
3.4.1.4 精密、细微零件电火花加工	235	3.7.5.2 加工前准备	278
3.4.2 不同材料电火花加工特点	239	3.7.5.3 加工要点	278
3.4.2.1 金属材料的热物理性能	239	3.7.6 工艺美术品凹模型腔电火花加 工	278
3.4.2.2 其他材料电火花加工特点	240	3.7.7 电火花磨削加工实例	279
3.4.3 电火花加工精度	241	3.7.7.1 弹簧夹头磨削	279
3.4.3.1 加工精度概念	241		
3.4.3.2 影响电火花加工精度的因素	242		
3.4.4 电火花加工表面完整性	244		

3.7.7.2 偏心钻套磨削	279	4.2.2.1 机床的分类	292
3.7.8 外支承弹性环深窄槽电火花加工	279	4.2.2.2 机床型号系列和参数表	293
3.7.8.1 加工对象	279	4.2.2.3 机床的组成	294
3.7.8.2 工艺性分析	279	4.2.3 机床主机	294
3.7.8.3 电火花加工方案	279	4.2.3.1 机床主机主要部件的结构	294
3.7.8.4 工艺措施	280	4.2.3.2 导轮组合件	296
3.7.9 滑油导管深盲孔电火花加工	280	4.2.3.3 机床电器控制	298
3.7.9.1 加工对象	280	4.2.3.4 夹具类型、结构及特点	300
3.7.9.2 工艺性分析	280	4.2.3.5 附件	301
3.7.9.3 工艺装备	280	4.2.3.6 机床精度检验要求	303
3.7.9.4 加工工艺	281	4.2.4 脉冲电源	303
3.7.10 液压伺服阀节流孔电 火花加工	281	4.2.4.1 脉冲电源的分类	303
3.7.10.1 加工对象	281	4.2.4.2 几种波形的参数范围及 加工性能	304
3.7.10.2 工艺性分析	281	4.2.4.3 几种典型脉冲电源电路	306
3.7.10.3 工艺措施	281	4.2.4.4 自适应控制脉冲电源	307
3.8 生产技术安全	281	4.2.5 数控系统	308
3.8.1 电气安全	281	4.2.5.1 数控系统的类型	308
3.8.2 火灾的防止	282	4.2.5.2 程序控制系统	309
3.8.2.1 电火花加工中火灾产生 的条件	282	4.2.5.3 计算机群控系统	309
3.8.2.2 电火花加工中火灾的预防	282	4.2.5.4 微型计算机数控系统 (CNC)	309
3.8.2.3 初期火灾的扑灭	284	4.2.6 机床的使用条件及其安装要求	314
3.8.3 有害气体及通风净化	284	4.2.6.1 机床的使用条件	314
3.8.3.1 电火花加工中有害气体 的产生及组成	284	4.2.6.2 机床的安装	315
3.8.3.2 有害气体对人体的危害	285	4.2.7 工作液和电极丝	315
3.8.3.3 通风净化	285	4.2.7.1 工作液	315
第4章 电火花线切割加工		4.2.7.2 电极丝	316
4.1 概 述	287	4.2.8 基本工艺规律	318
4.1.1 工作原理、分类及特征	287	4.2.8.1 工艺指标的评定	318
4.1.2 低速走丝机和高速走丝机的 加工机理	288	4.2.8.2 常用工件材料的种类及加工 性	319
4.1.2.1 低速走丝机的放电特点	288	4.2.8.3 影响工艺指标的因素	320
4.1.2.2 高速走丝机的“疏松接触式”放 电过程	288	4.2.9 加工工艺	323
4.1.3 高速走丝和低速走丝线切割对比	289	4.2.9.1 对工件图纸进行审核与分析	323
4.1.4 工艺特点和适用领域	290	4.2.9.2 工艺准备	325
4.1.4.1 工艺特点	290	4.2.9.3 工件的加工	329
4.1.4.2 适用领域	290	4.2.10 程序编制	331
4.1.5 工艺指标及影响因素	290	4.2.10.1 编程细则	331
4.2 高速走丝电火花线切割加工	292	4.2.10.2 编程前的准备工作	332
4.2.1 工艺特点	292	4.2.10.3 手工编程	332
4.2.2 机床概况	292	4.2.10.4 自动编程	333
		4.2.11 应用实例	348
		4.2.11.1 锥度零件的加工	348
		4.2.11.2 航空零件加工	348

4.2.11.3 模具及成形电极加工	348	4.3.9.1 ISO 代码编程	396
4.2.11.4 超厚零件线切割加工	351	4.3.9.2 命令词和命令程序	406
4.2.11.5 异形孔喷丝板的加工	353	4.3.9.3 自动编程	409
4.2.11.6 回转端面曲线型面的加工	353	4.3.10 应用实例	423
4.3 低速走丝电火花线切割加工	354	4.3.10.1 集成电路引线框架冷冲模	423
4.3.1 机床概况	354	4.3.10.2 高精度粉末冶金模和挤压模	425
4.3.2 机床主机	355	4.3.10.3 成形刀具和电火花成形加工用电 极	427
4.3.2.1 机床主机主要部件	355	4.3.10.4 零件加工	428
4.3.2.2 高精度机床的结构特点	357	4.3.10.5 超行程工件的加工	429
4.3.2.3 机床精度检验要求	358		
4.3.2.4 主要技术规格	358	第5章 高能束加工	
4.3.3 脉冲电源	358	5.1 激光加工	431
4.3.3.1 电源特点	358	5.1.1 概 述	431
4.3.3.2 常用电路形式	360	5.1.1.1 激光的产生	434
4.3.3.3 实用电路举例	362	5.1.1.2 激光特性	435
4.3.4 数控系统	363	5.1.1.3 激光加工原理	437
4.3.4.1 系统组成	363	5.1.1.4 激光加工的特点	441
4.3.4.2 几项通用标准	364	5.1.1.5 激光加工的分类	441
4.3.4.3 计算机数控 (CNC) 装置	366	5.1.1.6 激光加工的应用	441
4.3.4.4 伺服进给方式	369	5.1.2 激光加工设备	443
4.3.5 机床的使用条件及其安装要求	372	5.1.2.1 加工设备的组成及功用	443
4.3.5.1 机床的使用条件	372	5.1.2.2 激光器	444
4.3.5.2 机床的安装	372	5.1.2.3 主光路	447
4.3.6 工作液和电极丝	372	5.1.2.4 机床本体	450
4.3.6.1 工作液	372	5.1.2.5 辅助系统	453
4.3.6.2 电极丝	374	5.1.2.6 国内外激光加工设备举例	456
4.3.7 机床的工作精度检验及影响工艺指 标因素	376	5.1.3 激光加工工艺	459
4.3.7.1 机床的工作精度检验	376	5.1.3.1 激光打孔工艺	460
4.3.7.2 影响切削速度的因素	376	5.1.3.2 激光切割工艺	476
4.3.7.3 影响表面粗糙度和表面变质层的 因素	377	5.1.3.3 激光表面改性工艺	495
4.3.7.4 影响加工精度的因素	378	5.1.4 激光加工应用实例	502
4.3.8 加工工艺	381	5.1.4.1 激光打孔应用实例	502
4.3.8.1 加工过程	381	5.1.4.2 激光切割应用实例	508
4.3.8.2 减少工件材料变形的措施	382	5.1.5 安全与防护	512
4.3.8.3 多次切割	383	5.1.5.1 激光的危害	512
4.3.8.4 加工条件的选择	385	5.1.5.2 安全防护	514
4.3.8.5 锥度切割	391	5.2 电子束加工	517
4.3.8.6 断丝故障和加工缺陷及其解决 办法	393	5.2.1 概 述	517
4.3.8.7 改善表面层质量的其他措施	395	5.2.1.1 电子束加工的基本原理	517
4.3.8.8 断芯的自动处理	395	5.2.1.2 电子束加工的分类	518
4.3.9 程序编制	396	5.2.1.3 电子束加工的特点和应用	518
		5.2.2 电子束加工设备	518
		5.2.2.1 电子束焊机	520
		5.2.2.2 电子束打孔机	520

5.2.2.3	电子束曝光机	524	5.3.4.2	除油工序	563
5.2.2.4	电子束铣切机	527	5.3.4.3	表面粗化(喷砂)工序	564
5.2.2.5	电子束加工设备常用故障及产生原因	527	5.3.4.4	预热工序	564
5.2.2.6	电子束加工设备的维护和保养	527	5.3.4.5	等离子喷涂工序	564
5.2.3	各种电子束加工方法及工艺特点	530	5.3.4.6	涂层加工工序	565
5.2.3.1	电子束焊接(参见《焊接》分册)	530	5.3.5	等离子喷涂工艺参数	565
5.2.3.2	电子束打孔	530	5.3.5.1	等离子喷涂过程的重要参数	565
5.2.3.3	电子束表面改性处理	535	5.3.5.2	等离子喷涂的工艺参数选择	565
5.2.3.4	电子束熔炼	538	5.3.5.3	等离子喷涂常用材料的工艺参数表	567
5.2.3.5	电子束曝光	539	5.3.6	等离子喷涂涂层性能与质量控制	567
5.2.3.6	电子束铣切	548	5.3.6.1	涂层性能分类	567
5.2.3.7	电子束镀膜	549	5.3.6.2	涂层性能及测试	567
5.2.3.8	电子束加工中的缺陷及产生的原因	550	5.3.6.3	涂层质量的控制	575
5.2.4	电子束加工应用实例	551	5.3.7	等离子喷涂新技术	576
5.2.4.1	喷气发动机燃烧室罩打孔	551	5.3.7.1	真空等离子喷涂(VPS)技术	576
5.2.4.2	化纤喷丝头打孔	551	5.3.7.2	惰性气氛等离子喷涂	578
5.2.4.3	人造革打透气孔	552	5.3.7.3	水等离子喷涂	578
5.2.4.4	电子束表面熔化处理应用实例	552	5.3.8	等离子喷涂涂层应用	579
5.2.4.5	带材的电子束退火	553	5.3.8.1	涂层应用范围及经济技术效益	579
5.2.5	电子束安全防护	553	5.3.8.2	等离子喷涂涂层分类及其典型应用	580
5.3	等离子喷涂技术	554	5.3.8.3	涂层的去除	585
5.3.1	等离子喷涂原理、分类及特点	554	5.3.9	等离子喷涂常见故障及排除方法	586
5.3.2	等离子喷涂设备	555	5.4	等离子弧焊接与切割	587
5.3.2.1	等离子喷涂设备的组成	555	5.4.1	等离子弧焊接	587
5.3.2.2	喷枪	555	5.4.1.1	等离子弧焊接的原理、分类和特点	587
5.3.2.3	送粉器	556	5.4.1.2	等离子弧焊接设备	588
5.3.2.4	直流电源	557	5.4.1.3	等离子弧焊接工艺	592
5.3.2.5	控制系统(控制柜)	558	5.4.2	等离子弧切割	594
5.3.2.6	热交换器	559	5.4.2.1	等离子弧切割的原理及特点	594
5.3.3	粉末材料	559	5.4.2.2	等离子弧切割设备	595
5.3.3.1	等离子喷涂粉末材料的要求	559	5.4.2.3	等离子弧切割工艺	597
5.3.3.2	粉末材料的发展	560	第6章	化学铣切加工	
5.3.3.3	MMoCrSi和MCrAlY粉末的化学成分	561	6.1	概述	600
5.3.3.4	几类粉末材料的熔点、密度和显微硬度	561	6.1.1	化学铣切加工的基本原理	600
5.3.3.5	粉末材料的质量保证	562	6.1.2	化学铣切加工的分类	600
5.3.4	等离子喷涂工艺流程	563	6.1.3	化学铣切加工的基本特征	600
5.3.4.1	凹切工序	563	6.1.3.1	化学铣切加工的特点	600
			6.1.3.2	化学铣切加工的优点及局限性	601

6.1.4 化学铣切加工的常用术语	601	用	637
6.2 化学铣切加工设备及工装	602	6.6.3 加工锥度工件	639
6.2.1 化学铣切加工设备	602	6.6.4 用于铣切难于机械加工的材料	639
6.2.1.1 溶液槽	602	6.6.5 化学铣切加工在挤压型材上的应用	640
6.2.1.2 涂敷保护涂料的设备和固化设备	602	6.7 技术安全	640
6.2.1.3 刻型设备	602	6.7.1 人身技术安全	640
6.2.1.4 测试设备	602	6.7.2 烟雾的处理	642
6.2.2 化学铣切加工工装	605	6.7.3 腐蚀溶液再生技术的应用	642
6.2.2.1 化学铣切样板	605	6.7.4 腐蚀溶液的中和处理	644
6.2.2.2 化铣样板的设计和制造标准	605	第7章 其他特种加工	
6.2.2.3 样板侧向腐蚀量的计算	606	7.1 磨粒流加工工艺及设备	646
6.3 铝及铝合金的化学铣切	609	7.1.1 概述	646
6.3.1 铝及铝合金化学铣切加工的分类	609	7.1.1.1 加工原理	646
6.3.2 铝及铝合金化学铣切加工的一般要求	609	7.1.1.2 工艺特点及应用	646
6.3.3 铝合金化学铣切加工工艺	610	7.1.2 加工设备、磨流介质和夹具(限制器)	648
6.3.3.1 清洁处理	610	7.1.2.1 加工设备	648
6.3.3.2 涂敷保护涂料并固化	613	7.1.2.2 磨流介质	651
6.3.3.3 刻型	614	7.1.2.3 夹具(限制器)	652
6.3.3.4 化学铣切加工	615	7.1.3 工艺参数选择指南	656
6.3.3.5 去污处理	619	7.1.3.1 磨流介质参数的选择	656
6.3.3.6 去除保护层	619	7.1.3.2 挤压力的合理选择	659
6.3.4 铝合金化学铣切缺陷及排除方法	620	7.1.3.3 其他影响因素	662
6.3.5 提高铝合金化学铣切加工表面质量的途径	622	7.1.3.4 加工参数选择实例	662
6.3.6 影响铝合金化学铣切加工的主要因素和加工疵病产生的原因及其预防措施	623	7.1.3.5 机床故障与加工缺陷分析	663
6.3.7 化学铣切加工对铝合金机械性能的影响	626	7.1.4 磨粒流加工后的表面质量	665
6.4 其他金属材料的化学铣切加工工艺	629	7.1.5 磨粒流工艺应用实例	666
6.4.1 不锈钢和镍基合金化学铣切加工工艺	629	7.2 高压水射流切割技术	672
6.4.2 钛合金化学铣切加工工艺	631	7.2.1 纯水射流切割原理、工艺特点及应用	672
6.4.3 其他合金的化学铣切腐蚀加工工艺规范	633	7.2.1.1 纯水射流切割原理	672
6.5 化学铣切保护涂料	634	7.2.1.2 纯水射流切割工艺特性	674
6.6 化学铣切加工在航空航天工业中的应用	635	7.2.1.3 纯水射流切割的应用	676
6.6.1 去除结构中的废重	635	7.2.2 磨料水射流切割原理、切割参数及应用	678
6.6.2 化学铣切加工在整体结构中的应		7.2.2.1 磨料水射流切割原理	678
		7.2.2.2 影响水射流切割质量的因素	681
		7.2.2.3 磨料水射流切割的应用	685
		7.2.3 高压水射流切割系统	689
		7.2.3.1 纯水射流切割系统的组成	689
		7.2.3.2 磨料水射流切割系统	691
		7.2.3.3 高压水射流切割机	692
		7.2.4 高压水射流技术的发展和新型射	

流	696	7.3.2 光化学加工主要工艺过程及要点 ...	702
7.2.4.1 高压水射流的发展概况	696	7.3.2.1 掩膜版制作	703
7.2.4.2 新型射流	697	7.3.2.2 零件表面预处理	707
7.2.4.3 高压水射流技术的应用前景	699	7.3.2.3 抗蚀层制作方法	707
7.3 光化学加工	700	7.3.2.4 化学腐蚀与电成形	716
7.3.1 概 述	700	7.3.2.5 除 胶	724
7.3.1.1 加工原理	700	7.3.3 光化学加工应用实例	724
7.3.1.2 工艺特点	701	参考文献	731
7.3.1.3 分类及应用范围	701		