

特种加工技术



类目：机械类

书名：特种加工技术

主编：孙秀艳 李乔 许选明

出版社：湖南大学出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5667-4179-0

使用层次：通用

出版时间：2025 年 7 月

定价：48.00 元

印刷方式：双色

是否有资源：有

机械类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革新理念教材



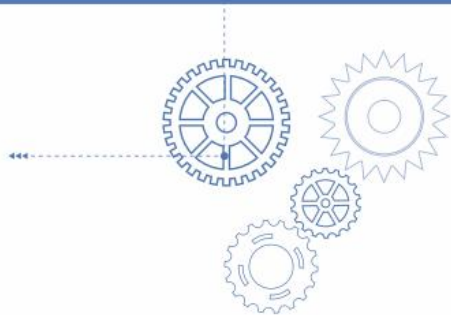
机械类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革新理念教材

特种加工技术

特种加工技术

特种加工技术

主编 © 孙秀艳 李 乔 许选明



主编 © 孙秀艳 李 乔 许选明

责任编辑：周紫燕
封面设计：熊语书装



湖南大学出版社

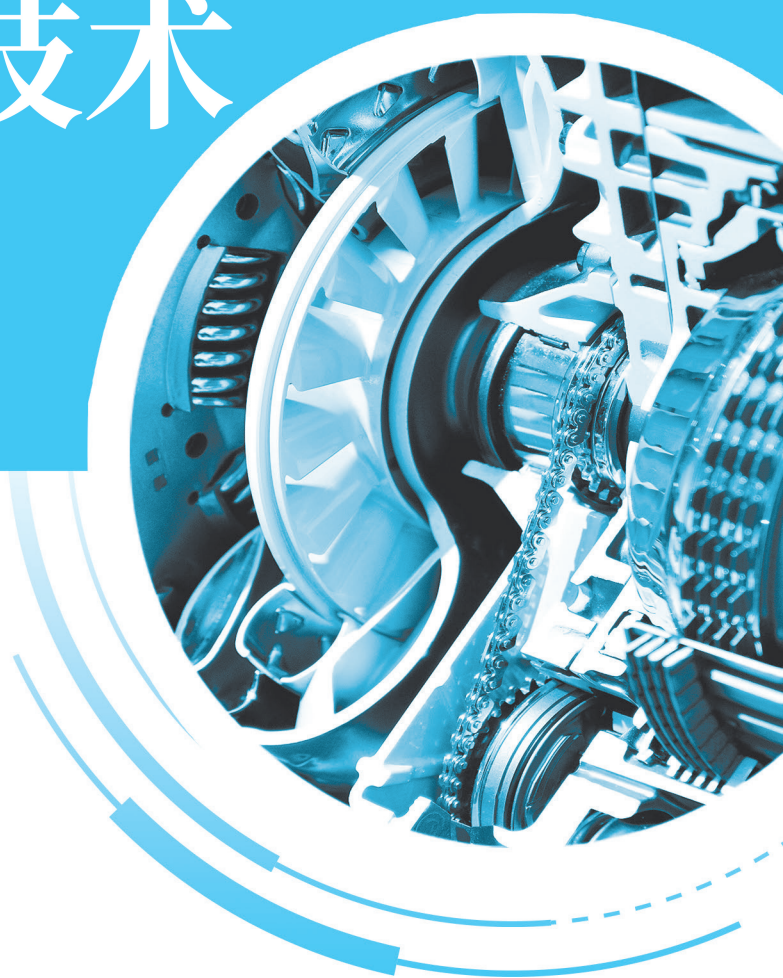
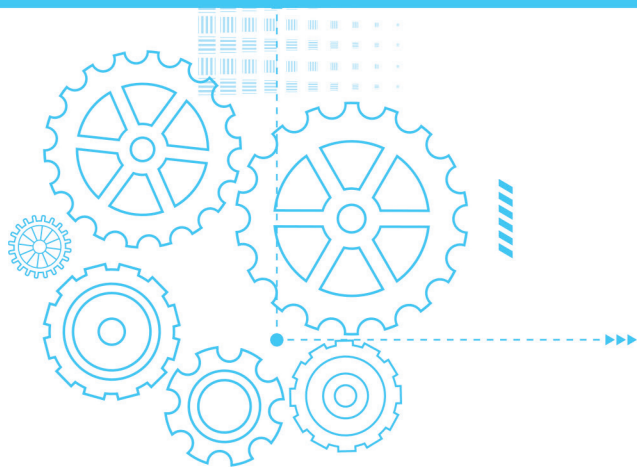
湖南大学出版社



机械类创新融合精品教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

特种加工技术

主 编 © 孙秀艳 李 乔 许选明



湖南大学出版社

· 长 沙 ·

图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术 / 孙秀艳, 李乔, 许选明主编.

长沙: 湖南大学出版社, 2025. 7. --ISBN 978-7-5667-

4179-0

I. TG66

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025AR5409 号

特种加工技术

TEZHONG JIAGONG JISHU

主 编: 孙秀艳 李 乔 许选明

责任编辑: 周紫燕

印 装: 唐山唐文印刷有限公司

开 本: 889 mm×1194 mm 1/16 印 张: 14.25 字 数: 319 千字

版 次: 2025 年 7 月第 1 版 印 次: 2025 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5667-4179-0

定 价: 48.00 元

出 版 人: 李文邦

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082

电 话: 0731-88822559(营销部), 88821174(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731-88822264(总编室)

网 址: <http://press.hnu.edu.cn>

电子邮箱: xiaoshulianwenhua@163.com

版权所有, 盗版必究

图书凡有印装差错, 请与营销部联系

前言

Preface

在现代制造业飞速发展的浪潮中,特种加工技术凭借其独特的加工原理和显著优势,在机械制造领域占据着愈发关键的地位。它突破了传统加工方法的诸多局限,为解决各种难加工材料、复杂型面、微小零件以及特殊要求的加工问题提供了行之有效的途径,成为推动制造业向高精度、高效率、智能化方向发展的重要力量。

本书旨在为院校机械类、材料类等相关专业的学生提供一本系统、全面且实用的特种加工技术教材,同时也可供从事机械制造、模具设计与制造、航空航天等领域的工程技术人员参考。

本书全面且深入地阐述了各类特种加工技术的基本原理、加工设备、工艺特点以及应用范围。在内容编排上,我们充分考虑了教学的逻辑性和实用性,从特种加工的概述入手,让读者对特种加工技术有一个宏观的认识和整体的把握,进而逐步深入到电火花加工、激光加工、射流加工、微纳加工、电化学加工、等离子体加工和超声加工等具体的加工技术。

本书具有以下鲜明特点:

内容新颖:紧跟特种加工技术的最新发展动态,使读者能够了解该领域的前沿技术和发展趋势。

实用性强:注重理论与实践的紧密结合,介绍了各种特种加工技术在实际生产中的应用,同时对加工过程中的工艺参数选择、质量控制等关键问题进行了深入分析,具有很强的针对性和指导性。

便于教学:每章开头设有学习目标,章末思考练习,方便教师组织教学和学生复习巩固所学知识。

由于特种加工技术发展迅速,且编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者和同行专家批评指正。

编 者

第 1 章	特种加工技术概述	1
1.1	特种加工技术及其发展趋势	2
1.2	特种加工技术的特点及分类	3
1.3	特种加工技术对材料可加工性和结构工艺性的影响	8
第 2 章	电火花加工技术	10
2.1	电火花加工的原理基础	11
2.2	电火花加工设备	15
2.3	电火花加工工艺规律	30
2.4	电火花加工工艺	46
2.5	电火花加工操作实例	60
2.6	特殊材料的电火花加工	66
2.7	电火花加工中应注意的一些问题	70
第 3 章	激光加工技术	72
3.1	激光加工的原理及特性	73
3.2	激光加工的应用	74
3.3	多轴 3D 打印	81
3.4	LDMD 的工艺规划	86
第 4 章	射流加工技术	97
4.1	水射流加工	98
4.2	磨料水射流加工	101



第 5 章 微纳加工技术 113

- 5.1 微细加工 114
- 5.2 纳米技术和纳米加工 130

第 6 章 电化学加工技术 145

- 6.1 电化学加工的原理、特点及分类 146
- 6.2 电化学加工设备 151
- 6.3 电化学加工的基本规律 154
- 6.4 电解加工 156
- 6.5 电解磨削 167
- 6.6 电解抛光 171
- 6.7 电铸、涂镀和复合镀加工 174
- 6.8 电化学加工典型训练实例 181

第 7 章 等离子体加工技术 183

- 7.1 等离子弧及其发生器 184
- 7.2 等离子弧加工的特点和种类 186
- 7.3 等离子弧切割 187
- 7.4 等离子弧焊接与喷涂 192

第 8 章 超声加工 195

- 8.1 超声加工的基本原理 197
- 8.2 典型超声加工系统的组成 201
- 8.3 超声加工的应用 206

参考文献 220

第 1 章

特种加工技术概述

学习目标

了解特种加工技术及其发展趋势。

掌握特种加工技术的特点及分类。

理解特种加工技术对材料可加工性和结构工艺性的影响。



1.1 特种加工技术及其发展趋势



1.1.1 特种加工技术的由来

众所周知,蒸汽机的发明效果是不可估量的。它使人类获得了一种把热能转化为机械能的机械装置,从而满足了人类对动力能源的需要。从那以后,工厂开始了大规模的生产,工厂工人取代了手工艺工人。所以说,蒸汽机带来了历史上具有伟大意义的第一次工业革命。然而,蒸汽机并不是发明出来就很快被应用到工业实际中来的,原因是气缸的制造精度不够。直到气缸镗床的研制和改进,蒸汽机的应用才得到推广。由此可见,加工方法和手段对新产品研发和社会经济发展所起的推动作用是十分巨大的。

从蒸汽机的使用到第二次世界大战,传统的切削加工方法几乎占据了整个机械加工行业。切削加工就是用切削工具(包括刀具、磨具和磨料)把坯料或工件上多余的材料层切去,使工件获得规定的几何形状、尺寸和表面质量的加工方法,如车削、铣削和磨削等。任何一种切削加工都必须具备三个基本条件:切削工具、工件和切削运动。切削工具有刃口,其材质必须比工件坚硬。

随着科学技术的进步和生产力的发展,工业、国防及航天航空业的技术产品均向高精度、高速度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压等方向发展。为了适应产品更新换代,自20世纪30年代以后,尤其是20世纪50年代以来,新材料的研制与开发(如硬质合金、耐热钢、金刚石、半导体等各种难加工材料)对加工制造技术提出了更高的要求。人们一方面通过研究高效的加工刀具和刀具材料、自动优化切削参数、提高刀具的可靠性、开发新型切削液和在线监控系统、研制新型自动机床等途径进一步改善切削状态,提高切削加工水平,解决了一些问题;另一方面则突破传统加工方法的束缚,不断探索,力图寻求新的加工方法。于是,一种本质上区别于传统加工方法的特种加工方法应运而生,并不断获得发展。其中,苏联科学家拉扎连科夫妇在研究开关触点受电火花放电腐蚀损坏的现象时,发现电火花放电所产生的瞬间高温对金属材料有熔化和气蚀作用,于是产生了一种新的金属加工方法——电火花加工。该方法开创了从加工机理和加工形式上脱离传统切削加工方法的先河,形成了现在统称的“特种加工(non-traditional machining, NTM)”技术,即利用电能、热能、光能和化学能等,在



不产生切削力的情况下,以低于工件硬度的工具去除工件上多余的材料,达到“以柔克刚”的目的。

我国特种加工技术起步较早,20世纪50年代已设计研制出电火花穿孔机床。20世纪60年代末,上海电表厂的张维良工程师在阳极—机械切割的基础上,发明了我国独创的快走丝线切割机床,复旦大学也研制出了电火花线切割数控系统。但是由于我国原有的工业基础薄弱,特种加工设备和整体技术水平与国际先进水平仍有不少差距,每年仍需从国外进口相当数量的特种加工设备。

1.1.2 特种加工技术的发展趋势

(1)加大对特种加工技术的基本原理、加工机理、工艺规律、加工稳定性的研究力度,同时融合电子技术、计算机技术、信息技术和精密制造技术,使加工设备向自动化和柔性化方向发展。

(2)大力开发特种加工技术领域中的新方法,包括难加工材料、细微加工、特殊型面加工等方面,尤其是质量高、效率高、经济型的复合加工,并与适宜的制造模式相匹配,充分发挥特种加工技术的优势。

(3)某些特种加工方法的应用会造成环境污染,甚至影响操作人员的身心健康,必须加以重视,充分做好防污、治污工作,向绿色加工方向发展。

特种加工方法的广泛应用,使得机械制造技术不断面临新的挑战,也使得特种加工技术获得了新的发展机遇。随着各种新型材料的不断问世和新工艺的不断出现,特种加工技术正在以崭新的面貌出现在加工制造领域。



1.2 特种加工技术的特点及分类



1.2.1 特种加工技术的特点

特种加工技术无论在加工原理还是在加工形式上都与传统的切削加工有着本质的区别,主要体现在以下几点。



(1)加工时不是主要依靠机械能,而是采用其他能量(电能、热能、光能、化学能和电化学能等)去除工件上多余的材料;其与加工对象的力学性能无关,故可加工各种硬、软、脆、耐腐蚀、高熔点、高强度等金属或非金属材料。

(2)非接触加工,即加工时工具与工件不发生直接接触,工具与工件间不存在作用力,故可加工高耐磨、刚性低的工件和弹性工件。

(3)由于加工时工具与工件不发生直接接触,故热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小,可获得较低的表面粗糙度值,尺寸稳定性好。

(4)两种或两种以上的不同类型能量可以相互组合,形成新的复合加工,更突出其优越性,综合加工效果明显,且便于推广使用。

总体而言,特种加工可以加工任何硬度、强度、韧性、脆性的金属或非金属材料,且专长于加工复杂、细微表面或型腔零件。

1.2.2 特种加工技术存在的问题

虽然特种加工技术已解决了传统切削加工难以解决的许多问题,在提高产品质量、生产率和经济效益上显示出了很大的优越性,但目前仍存在一些问题与不足。

(1)有些特种加工原理(如超声波加工和激光加工等)还不是十分清楚,其工艺参数的选择和加工过程的稳定性均需进一步提高。

(2)有些特种加工技术(如电化学加工)在加工过程中会产生有毒的废渣和废气,若排放和处理不当会造成环境污染,影响人体健康。

(3)有些特种加工技术(如快速成形和等离子弧加工等)的加工精度和生产率还有待提高。

(4)有些特种加工技术(如电火花成形加工、电火花线切割加工等)只能加工导电材料,加工领域有待拓宽。

1.2.3 特种加工技术的分类

特种加工技术的分类国际上还没有明确规定,目前大多数是按能量形式、作用形式和加工原理进行分类,见表 1-1。



表 1-1 特种加工技术的分类

加工方法		主要能量形式	作用形式	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、汽化	EDM
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、汽化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	阳极溶解	ECM
	电铸加工	电化学能	阴极溶解	EFM
	涂镀加工	电化学能	阴极溶解	EPM
	电解磨削	电化学能、机械能	阳极溶解、机械磨削	ECG
高能束加工	激光束加工	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	电子束加工	电能、热能	熔化、汽化	EBM
	离子束加工	电能、机械能	切蚀	IBM
	等离子弧加工	电能、热能	熔化、汽化	PAM
物料切蚀加工	超声波加工	声能、机械能切蚀	切蚀	USM
	磨料流加工	流体能、机械能切蚀	切蚀	AFM
	液体喷射加工	流体能、机械能切蚀	切蚀	LJC
快速成形加工	光固化法	光能、化学能	增加材料	SL
	粉末烧结法	光能、热能		SLS
	叠层实体法	光能、机械能		LOM
	熔丝堆积法	电能、热能、机械能		FDM
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、汽化腐蚀	ECAM
	电解电火花磨削	电能、热能	阳极溶解、熔化、切削	MEEC
	电化学腐蚀加工	电化学能、热能	熔化、汽化腐蚀	ECP
	超声放电加工	声能、热能、电能	熔化、切蚀	USEC
	复合电解加工	电化学能、机械能	切蚀	CECM
	复合切削加工	机械能、声能、磁能	切削	CSMM
其他加工方法	化学加工	化学能	腐蚀	CM
	化学抛光	光能、化学能	光化学、腐蚀	OCM/OCC
	化学镀膜	化学能	腐蚀	CE

(1)电火花加工：通过工具电极和工件电极之间脉冲放电时的电腐蚀作用，对工件进行加工的一种工艺方法。电火花成形加工是模具制造中的一种重要加工手段，如各种孔、槽等的加工；电火花线切割加工适用于各种可切割样板、冲模及钼、钨或贵重金属等的加工。

(2)电化学加工：通过电化学反应去除工件材料或在其表面镀覆金属材料等的特种加工方法。其中电解加工适用于加工深孔、型腔和抛光等；电铸加工适用于形状复杂、精度高的空心零件，如波导管、注塑模具和薄壁零件等；涂镀加工适用于表面磨损、划伤和锈蚀等零件的加工，以恢复其尺寸，改善其表面性能。



(3)高能束加工：利用能量密度很高的激光束、电子束或离子束等去除工件材料的特种加工方法。其中激光束加工主要应用于打孔、切割、焊接和金属表面的激光强化；电子束加工有热型和非热型两种，热型加工是利用电子束将材料的局部加热至熔化点或汽化点，适用于打孔、切割槽缝及其他结构的细微加工，非热型加工是利用电子束的化学效应进行刻蚀及大面积薄层的微细加工等；离子束加工主要用于微细加工、溅射加工和注入加工等。

(4)物料切蚀加工：利用超声波、液体喷射和磨料流等材料切割成所需形状的特种加工方法。超声波加工是利用超声振动的工具在有磨料的液体介质中或干磨料中产生冲击、抛光及由此产生的气蚀作用去除材料，适用于成形加工、切割加工和超声清洗加工等；液体喷射加工是利用水或在水中加添加剂的液体，经水泵及增压器产生高速液体流，喷射到工件表面，从而达到去除材料的目的，可加工薄而软的金属及非金属材料，去除腔体零件内部毛刺，使金属表面产生塑性变形等；磨料流加工适用于去毛刺、表面清理、切割加工、雕刻、落料和打孔等。

(5)快速成形加工：快速成形加工(rapid prototyping machining, RPM)技术，是20世纪80年代末发展起来的新兴制造技术，是由三维CAD模型直接驱动的快速制造任意复杂形状三维实体的总称。它集成了CAD技术、数控技术、激光技术和材料技术等现代科技成果，是先进制造技术的重要组成部分。它可把复杂的三维制造转化为一系列二维制造的叠加，因而在不用模具和工具条件下生成任意复杂的零部件，极大地提高了生产率和制造柔性。

(6)复合加工：同时在加工部位上采用两种或两种以上不同类型能量组合去除工件材料的特种加工方法。例如，电解电火花加工(ECDM)和电化学电弧加工(ECAM)就是两种特种加工复合而成的新的加工方法。

(7)其他加工方法：包括化学加工、化学抛光和化学镀膜等。其中化学加工是利用化学溶液与金属产生化学反应，使金属腐蚀溶解，改变工件形状和尺寸的加工方法，适用于较大面积金属表面的厚度减薄加工，减薄厚度不宜过大，否则会影响加工效率。如航天工业中大型薄壁构件的内表面刻蚀；有选择地加工较浅或较深的腔体及凹槽，可加工各种徽章、招牌和商标等，但对工件窄缝、型孔等的加工精度及效率都较差；还可以进行化学下料，特别是加工栅板、圆盘、分频器、分度盘等。

常见特种加工方法的性能、工艺参数和用途见表1-2。



表 1-2 常见特种加工方法的性能、工艺参数和用途

加工方法	可加工材料	最低/平均 电极损耗/%	平均/最高 材料去除率/ (mm ³ /min)	平均/最高 尺寸精度/mm	平均/最高 表面粗糙度 值 Ra/μm	用途
电火花成形 加工	任何导 电金属材 料,如硬 质合金、 耐热钢、 不锈钢和 钛合金等	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	10/0.04	从微米尺寸的孔、槽到数米的超大型模具和 工件等,如圆孔、方孔、螺纹孔及冲模、锻 模、压铸模、拉丝模和塑料模等,还可以刻 字、表面强化、涂覆加工
电火花线 切割加工		较小 (可补偿)	20/200 ^①	0.02/0.002	5/0.32	切割各种冲模和塑料模等,可切割各种样板、 磁钢和硅钢片冲片,也可用于钨、钼、半导 体或贵重金属的切割
电解加工		不损耗	100/10000	0.1/0.01	1.25/0.16	从细小零件到超大零件及模具,如仪表微型 小轴、齿轮上的毛刺、涡轮叶片、炮管膛线、 各种异形孔、锻造模、铸造模,以及抛光、 去毛刺等
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	1.25/0.04	硬质合金等难加工材料的磨削,如硬质合金 刀具、量具、轧辊、深孔、细长杆磨削,以 及超精光整研磨和珩磨
超声波加工	任何脆性 材料	0.1/10	1/50	0.03/0.005	0.63/0.16	加工、切割脆性材料,如玻璃、石英、宝石、 金刚石、半导体单晶锗、硅等,可加工型孔、 型腔、深孔和槽缝等
激光束加工	任何材料	不损耗 无工具	瞬时去 除率高,但 受功率限 制,平均 去除率 不高	0.01/0.001	10/1.25	精密加工小孔、窄缝及成形切割、刻蚀,如 金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、喷丝板的小 孔、切割钢板、石棉、纺织品、焊接和热 处理
电子束加工					1.25/0.2	各种难加工材料上的微孔、窄缝、刻蚀、焊接, 应用在中、大规模集成电路和微电子器件中
离子束加工			很低	1.0/0.01μm	/0.01	对零件表面进行超精密、超微量加工,抛光、 刻蚀、镀覆等

① 电火花线切割加工的金属去除率用 mm²/min 为单位。



1.3 特种加工技术对材料可加工性和结构工艺性的影响



特种加工技术在机械制造业中的广泛应用对传统的机械制造工艺方法产生了很多重要影响，尤其是使零件的结构设计和制造工艺路线的安排产生了重大变革。

1.3.1 提高了材料的可加工性

在特种加工技术出现之前，诸如金刚石、宝石、玻璃和陶瓷等非金属材料，以及硬质合金、淬火钢和耐热钢等合金材料，采用传统的切削加工方法则很难加工甚至是无法加工，现在可以采用电火花、电解、激光等合适的特种加工方法对其进行加工，既可以满足生产要求又可以提高加工质量。如利用特种加工技术制造金刚石刀具、硬质合金刀具及模具等，极大地拓宽了材料的应用领域。材料的可加工性不再与材料硬度、韧性、脆性和强度等成直接、比例关系。例如，对电火花加工而言，淬火钢比未淬火钢更容易加工，更容易得到高的加工质量。

1.3.2 对零件结构工艺的影响

由于传统切削加工方法和加工工艺的限制，零件的某些结构存在一些缺陷。例如，复杂模具受到传统切削加工方法和加工工艺的限制不得不采用镶拼结构，这样就会造成应力较大且较集中，而采用电火花和线切割等加工方法则可以做成整体式，既可以避免应力集中造成的危害，又可以增大模具的整体强度。如喷气发动机涡轮可以用电火花加工得到扭曲叶片带冠整体结构；花键轴的齿根部分可以利用电解加工得到一定的圆角，以减少应力集中的程度。

1.3.3 改变了零件的典型加工工艺路线

从传统的切削加工角度来讲，除磨削之外，所有的机加工都必须在零件淬火工序之前进行，这是机加工工艺的基本准则，因为淬火后材料硬度大，机加工困难，加工质量差。若采用特种加工，如电火花成形加工、电火花线切割加工和电解加工等，则可以在淬火后加工，



而且加工质量好。例如，在淬火前加工在刀块上打小孔，淬火时容易产生裂纹和变形，而淬火后利用电火花打孔则能保证小孔的精度。

1.3.4 对加工工艺评价标准的影响

对于低刚度零件、微小孔、异形孔和复杂空间曲面，传统的切削加工方法由于切削力大、工具尺寸受限及刀具轨迹等原因会使加工困难甚至无法加工，而现在可以采用电火花加工、电解加工等合适的特种加工方法进行加工。特种加工技术中工具与工件不发生直接接触，没有宏观的切削力和工件的变形，非常适合低刚度零件的加工；工件的形状完全由工具的形状决定，适合异形孔和复杂空间曲面的加工；激光加工、电子束加工、离子束加工等方法可以加工微小孔，甚至加工纳米级材料。



思考练习 »

- (1)何谓特种加工技术？特种加工技术主要有哪些加工方法？
- (2)为什么特种加工技术能用来加工难加工的材料和形状复杂的工件？
- (3)特种加工技术对材料的可加工性和结构工艺性有哪些影响？

第 2 章

电火花加工技术

学习 目标

理解电火花加工的原理基础。

了解电火花加工的设备。

掌握电火花加工的工艺。

掌握电火花加工的方法。



2.1 电火花加工的原理基础



2.1.1 电火花加工的产生

在日常生活中,我们经常使用各种电器开关,尤其是当开关破损时,常常会伴随噼噼啪啪的声音,还时常见到蓝色的火花,开关处会出现小黑点,产生接触不良。1870年,英国科学家普里斯特利(Priestley)最早发现电火花对金属的腐蚀作用,1943年,苏联科学家拉扎连科夫妇率先对这种电腐蚀现象做进一步研究,从而发现了一种新的金属加工方法——电火花加工。

电火花加工又称电蚀加工或放电加工(EDM),其加工过程与传统的机械加工完全不同。它是利用工件电极与工具电极之间的间隙脉冲放电所产生的局部瞬时高温将工件表面材料熔化甚至汽化,逐步蚀除工件上的多余材料,以达到加工的目的。目前世界各国统称电火花加工为放电加工,简称电加工。

电火花加工是在一定的加工介质(工作液)中,通过工具电极和工件电极之间脉冲放电时的电腐蚀作用,对工件进行加工的一种工艺方法。电火花加工是模具制造中的一种重要加工手段。它利用电极和工件在工作介质(煤油)中进行小间隙的脉冲放电,使工件产生电腐蚀。由于电极和工件微观表面凹凸不平,工作介质中也混有杂质,在工件和电极间施加电压后所产生的电场强度分布很不均匀,距离最近且绝缘最差的部分最先被击穿而放电。经过连续多次的脉冲放电,最后把工件加工成与电极表面凹凸情况刚好相反的形状。

2.1.2 电火花加工的原理及特点

2.1.2.1 电火花加工的原理

图2-1所示为电火花加工的原理。进给装置2保证工件1与工具电极3之间具有一定的间隙,脉冲电源输出的脉冲电压加在工件与电极上,会使工件附近的工作介质4逐步被电离。当工作介质被击穿时,形成放电通道,产生火花放电。由于放电时间极短且发生在工件与电



极间距离最近的一点上,所以能量集中,引起金属材料的熔化或汽化,而且具有突然膨胀、爆炸的特性。爆炸力将熔化和汽化了的金属抛入工作介质中冷却,凝固成细小的圆球状颗粒。在泵 5 的作用下,循环流动的工作介质将电蚀产物从放电间隙中排出,并对电极表面进行较好的冷却。

一个物体无论采用何种加工方法,无论从宏观看上去是多么平整,但在微观表面上总是凹凸不平的。当工具电极与工件被接通电源后,两极间就建立起一个电场。电场强度取决于两极间电压和两极间距离。两极间距离越小,电场强度越大,所以工作介质最先在两极间最近点被击穿,形成放电通道,释放出大量的能量,工件表面被电蚀出一个小坑,一次脉冲放电随之结束,两极之间的电压急剧下降到接近于零,间隙中的工作介质又恢复到绝缘状态。此后,两极之间的电压再次升高,又在另一处绝缘强度较低(两极间距离最近、电场强度最大)的位置重复上述放电过程。经多次脉冲放电后,整个被加工表面由无数个放电小凹坑组成,如图 2-2 所示,电极的形状就被复制在工件上,最终达到加工的目的。

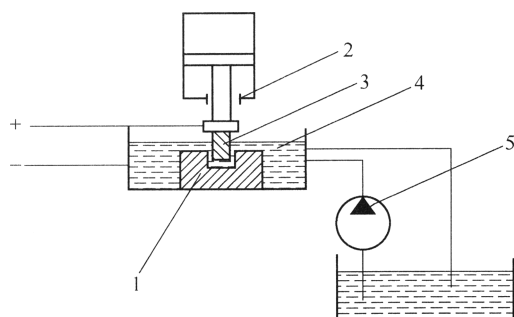


图 2-1 电火花加工原理图

1—工件 2—进给装置 3—工具电极 4—工作介质 5—泵

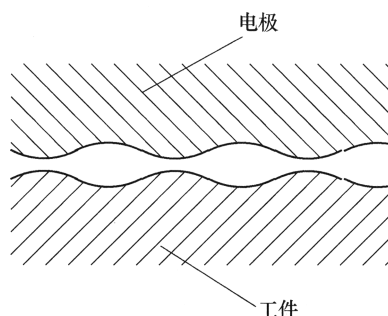


图 2-2 加工表面放大图

利用火花放电产生的电腐蚀效果来加工工件,必须解决以下几个问题。

(1)工具和工件之间必须保持一定的放电间隙,其间隙数值视具体的加工条件而定,一般为 $0.01 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。如果间隙过大,两极间电压可能无法击穿工作介质,无法产生电火花;反之,如果间隙过小,有可能引起短路,产生持续放电,烧毁工件。所以,需要一个伺服进给系统,来确保工件和电极之间的间隙保持一个合适的数值。

(2)火花放电必须是脉冲放电,一般脉冲宽度正常时间为 $t_i = 1 \sim 1000 \mu\text{s}$,而脉冲间隔停顿时间一般为 $t_o = 20 \sim 100 \mu\text{s}$,这样才能使放电产生的热量和腐蚀下来的金属材料被流动的工作介质带走,否则便会产生电弧放电,烧伤工件而无法达到加工的目的。所以,电火花加工需要脉冲电源。

(3)火花放电必须在一定的绝缘介质中进行(如煤油、乳化液和去离子水等),以利于产生脉冲性火花放电,同时带走放电产物并对工件进行冷却。因此,电火花加工需要工作介质循环系统。



2.1.2.2 电火花加工的特点

与传统的金属切削加工相比,电火花加工有如下优点。

(1)便于加工在传统切削加工中难以加工甚至是无法加工的材料,如淬火钢、硬质合金、耐热合金钢和模具钢等。因为在电火花加工中材料的蚀除是靠火花放电所产生的高热使工件材料熔化,材料的可加工性主要取决于材料本身的热力学性质,如熔点、沸点和比热容等,而几乎与材料的力学性能无关。无论材料的强度、硬度、塑性和韧性如何,都不影响加工,这样就可以突破传统切削加工刀具必须比工件硬度大的限制,实现“以柔克刚”。

(2)便于加工深孔、型腔及复杂形状的工件。因为电极与工件不发生直接接触,宏观作用力小,因此适宜加工低刚度零件和进行微细加工。

(3)电极材料不必比工件材料硬。目前电火花加工一般采用纯铜或石墨作为电极材料,大大降低了电极的设计与制造成本。

(4)直接利用电能和热能作为加工能源,便于实现加工过程的自动化。

由于电火花加工有其独特的优点,加之电火花加工的工艺技术不断提高,目前电火花加工已在模具制造、机械、航空、电子等领域用于解决一般切削加工难以解决的实际问题。

电火花加工也有以下的局限性。

(1)一般只能加工金属等导电材料。

(2)加工速度较慢,效率低。应尽可能先采用传统切削加工方法去除工件上的大部分余量,再进行电火花加工,以提高生产率。

(3)电火花加工中,电极也会损耗,影响加工精度。特别是在尖角和底面的电极损耗更大。但是近几年随着加工工艺技术的不断提高,粗加工的电极相对损耗率可以控制在0.1%以内。

(4)电蚀产物在排除过程中常会引起二次放电,形成加工斜度,进而影响加工精度。

2.1.3 电火花加工的常用术语

以下内容是根据中国机械工程学会电加工学会公布的材料编写的。

(1)放电加工:在一定的加工介质中,通过两极[工具电极(简称电极)和工件电极(简称工件)]之间的火花放电或短电弧放电的电蚀作用来对材料进行加工的方法称为放电加工。

(2)电火花加工:当采用电火花脉冲放电形式来进行加工时,称为电火花加工。

(3)电火花成形加工:一般指三维型腔和型面的电火花加工,用于非贯通的不通孔加工。

(4)放电:电流通过绝缘介质(气体、液体或固体)的现象。

(5)脉冲放电:脉冲放电是脉冲性的放电,这种放电在时间上是断续的,在空间上放电点



是分散的，它是电火花加工采用的一种放电形式。

(6)火花放电：工作介质被击穿后伴随着火花的放电，其特点是火花放电通道中的电流密度很大，瞬时温度很高。

(7)电弧放电：电弧放电是一种渐趋稳定的放电，这种放电在时间上是连续的，在空间上是完全集中在一点或在一点的附近放电。放电加工中如遇到电弧放电，常常会引起电极和工件的烧伤。电弧放电往往是放电间隙中排屑不良或脉冲间隔过小来不及消除电离、恢复绝缘，或脉冲电源损坏变成直流放电等所引起的。

(8)放电通道：又称电离通道或等离子通道，是工作介质被击穿后在两极间形成的导电等离子体通道。

(9)放电间隙：放电时两电极间的距离。它是加工电路的一部分，有一个随击穿而变化的电阻。在加工过程中，放电间隙则称为加工间隙，一般为 $0.01 \sim 0.5 \text{ mm}$ ，粗加工时间隙较大，精加工时间隙较小。

(10)电蚀：在电火花放电作用下，蚀除工件材料的现象。

(11)电蚀产物：工作介质中电火花放电时的生成物。它主要包括从两极上电蚀下来的金属材料微粒和从工作介质中分解出来的气体等。

(12)二次放电：在已加工面上，由于金属屑等的介入而进行再次放电的现象。

(13)击穿电压：放电开始或工作介质击穿时的瞬时极间电压。

(14)脉冲宽度(μs)：加到放电间隙两端的电压脉冲的持续时间。方波脉冲的脉冲宽度等于放电时间。

(15)放电时间(μs)：工作介质击穿后，放电间隙中通过放电电流的时间，也就是电流脉宽。

(16)脉冲间隔(μs)：两个电压脉冲之间的间隔时间。

(17)电参数：电火花加工过程中的电压、电流、脉冲宽度、脉冲间隔、功率和能量等参数称为电参数。

(18)峰值电流(A)：间隙火花放电时脉冲电流的最大值(瞬时)。虽然峰值电流不易测量，但它是影响加工速度和表面质量等的重要参数。在设计制造脉冲电源时，每一个功率放大管的峰值电流是预先计算好的，选择峰值电流实际上是选择几个功率管进行加工。

(19)极性效应：电火花加工时，即使正极和负极是同一种材料，但正负两极的蚀除量也是不同的，这种现象称为极性效应。一般短脉冲加工时，正极的蚀除量较大；反之，长脉冲加工时，则负极的蚀除量较大。

(20)正极性和负极性：工件接正极，工具电极接负极，称正极性；反之，工件接负极，工具电极接正极，称负极性，又称反极性。线切割加工时，所用脉宽较窄，为了增加切割速度，减少钼丝的损耗，一般工件应接正极，称正极性加工。



(21)脉冲电源：电火花加工设备的主要组成部分之一，它给放电间隙提供一定的电脉冲，是电火花加工时的能量来源，常简称电源。现在广泛采用的是晶体管脉冲电源和可控硅脉冲电源。

(22)伺服进给系统：电火花加工机床的重要组成部分，用作使工具电极伺服进给，自动调节，使工具电极和工件在加工过程中保持一定的放电间隙。

(23)工作介质：电火花加工时，工具和工件必须浸泡在有一定绝缘性能的液体介质中，此液体介质称为工作介质。一般将煤油作为电火花加工时的工作介质。由水、有机及无机化合物组成的乳化溶液，则作为电火花线切割加工时的工作介质。

(24)电火花加工表面：电火花加工过的由许多小凹坑重叠而成的表面。

(25)电火花加工表层：电火花加工表面下的一层，包括熔化层和热影响层。

(26)热影响层：简称 HAZ，它是位于熔化层下面的、由于热作用改变了基体金属金相组织和性能的一层金属。

(27)基体金属：位于热影响层下面的、未改变金相组织和性能的原来基体的金属。



2.2 电火花加工设备



2.2.1 机床型号、规格和分类

我国国家标准规定，电火花加工机床均用 D71 加上机床工作台面宽度的 1/10 表示。例如 D7132 中，D 表示电加工机床(若该机床为数控电加工机床，则在 D 后面加上 K，即 DK)，71 表示电火花机床，32 表示机床工作台的宽度为 320 mm。

世界上各个地区的电火花加工机床型号没有采用统一标准，而是由各个生产企业自行确定，如日本沙迪克(Sodick)公司生产的 A3R、A10R，瑞士夏米尔(Charmilles)技术公司的 ROBOFORM20/30/35，中国台湾乔懋机电工业股份有限公司的 JM322/430，北京阿奇工业电子有限公司的 SF100 等。

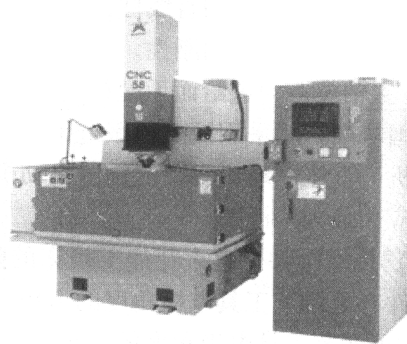
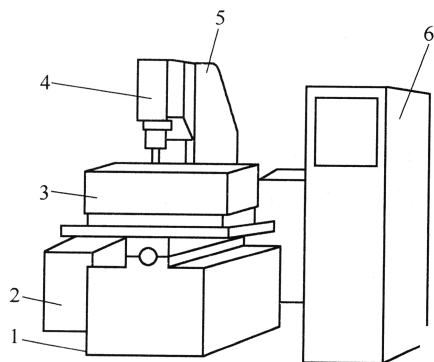
电火花加工机床按其大小可分为小型(D7125 以下)、中型(D7125~D7163)和大型(D7163 以上)；按其数控程度分为非数控、单轴数控和三轴数控。随着科学技术的进步，国外已经大批生产三坐标数控电火花机床以及带有工具电极库、能按程序自动更换电极的电火花加工中



心,我国大部分电加工机床厂现在也正开始研制生产三坐标数控电火花加工机床。

2.2.2 电火花加工机床的结构

电火花加工机床的种类很多,尤其是随着数控电火花加工机床技术的进步,许多新型数控电火花设备应运而生且品种繁多。虽然各机床厂家生产的设备型号、规格与技术性能均有所不同,但设备的基本结构都由机床主体、脉冲电源、自动进给调节系统、工作介质循环过滤系统和数控系统部分组成,如图 2-3 所示。



电火花机床的外观

图 2-3 电火花机床的结构

1—床身 2—液压油箱 3—工作液槽 4—主轴头 5—立柱 6—数控电源柜

2.2.2.1 机床主体

机床的机械部分都安放在机床主体上,主要用于夹持工具电极及支撑工件,并保证它们的相对位置,实现电极在加工过程中的稳定进给。机床主体由床身、立柱、主轴头及附件、工作台等部分组成。

(1)床身与立柱。床身和立柱是电火花机床的骨架,起着支撑、定位和便于操作的作用。因为电火花加工宏观作用力极小,所以对机械系统的强度无严格要求。但为了避免变形和保证加工精度,要求床身和立柱具有必要的刚度。

床身是机床的基础件,工作台、立柱和主轴头等均安装于床身之上。床身一般为刚性较高的箱体结构,以减少放电加工时电极的频繁抬起引发的强迫振动而导致床身和立柱的变形。床身下方应采用垫铁支撑,以免导轨精度受到地基变形的影响。立柱与床身的接合面要有很强的接触刚度。因为主轴头安装在立柱的导轨上,而主轴头上又挂有一定重量的电极,如果立柱与床身接合面的刚度不足,则势必引起立柱前倾,导致机床结构的变形。

(2)工作台。工作台坐落在床身之上,主要用于支撑、装夹工件,一般由一组刚性很强的



十字滑板组成,通过精密的滚珠丝杠副实现工作台纵横方向的移动,即手摇纵横方向的手轮,从而带动丝杠转动,丝杠又拖动台面运动,最终达到电极与工件间所要求的相对位置。工作台的种类有普通工作台和精密工作台。目前国内已应用精密滚珠丝杠、滚动直线导轨和高性能伺服电动机等结构,以满足精密加工的要求。

工作台上装有工作液箱。工作液箱必须具有很好的密封性,用以容纳工作液。为了保证加工过程的安全进行,加工时电极和被加工零件必须浸泡在工作液中,起冷却、排屑的作用,而且随着加工电流的加大,工作液高出零件上表面应更多,以保证放电气体的充分冷却,尤其是在大电流加工时,要杜绝放电气体带火星飞出油面。

(3)主轴头。主轴头是电火花加工机床的一个关键部件,主要用于控制工件与电极之间的放电间隙。

主轴头的质量直接影响加工的工艺指标,如生产率、加工精度和表面粗糙度。因此,主轴头除结构应满足机械要求之外,还必须满足以下几点。

- ①保证加工稳定性,维持最佳放电时间。
- ②放电过程中,当发现短路或起弧时,主轴头能迅速抬起,使电弧中断。
- ③保证主轴移动的直线性,以满足精密加工的要求。
- ④主轴应有足够的刚性。
- ⑤主轴应均匀进给而无爬行现象。

我国早期广泛采用液压伺服进给的主轴头,如 DYT-1 型和 DYT-2 型。目前普遍采用步进电动机、直流电动机和交流伺服电动机作为进给驱动的主轴头,尤其以直流电动机进给的主轴头应用最为广泛。

(4)机床附件。电火花加工机床的附件很多,常根据生产需要配置所需附件。常见的机床附件有可调节工具电极角度的夹头、平动头、油杯和永磁吸盘等。

①可调节工具电极角度的夹头。装夹在主轴下方的工具电极,一方面需要保证电极与工件间的垂直度(主要是通过夹头中的球面铰链来完成的),另一方面需要在水平面内进行调节与转动(主要靠主轴与工具电极安装面的相对转动机构来实现),然后采用螺钉拧紧即可,其结构如图 2-4 所示。

②平动头。电火花加工时,粗加工的放电间隙比半精加工的放电间隙要大,而半精加工的放电间隙比精加工的放电间隙又要大一些。当用一个电极进行粗加工时,将工件的大部分余量蚀除掉后,其底面和侧壁四周的表面质量很差,为了将其修光,就要转换参数逐挡进行修整。但由于半精加工和精加工参数的放电间隙比粗加工参数的放电间隙小,若不采取措施,则四周侧壁就无法修光。平动头就是为修光侧壁和提高其尺寸精度而设计的。

平动头是一个可以使电极产生向外机械补偿动作的工艺附件。当采用单电极加工型腔时,可以补偿上下两个电参数之间的放电间隙和表面粗糙度值之差,从而解决型腔侧壁修光的

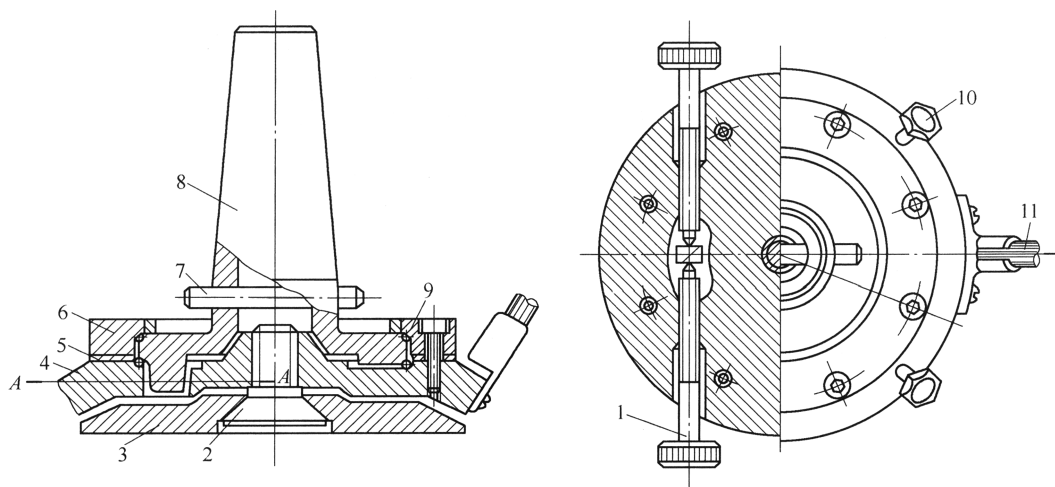


图 2-4 带垂直和水平转角调节装置的夹头

1—调节螺钉 2—球面螺钉 3—摆动法兰盘 4—调节找正架 5—调整垫 6—上压板
7—销钉 8—锥柄座 9—滚珠 10—垂直度调节螺钉 11—电源线

问题。

平动头的动作原理：利用偏心机构将伺服电动机的旋转运动通过平动轨迹保持机构转化成电极上每个质点围绕其原始位置在水平面内的平面小圆周运动，许多小圆的外包络线面积就形成加工的横截面积，如图 2-5 所示，其中每个质点运动轨迹的半径就称为平动量，其大小可以由零逐渐调大，以补偿粗加工、半精加工和精加工的电火花放电间隙之差，从而达到修光型腔的目的。

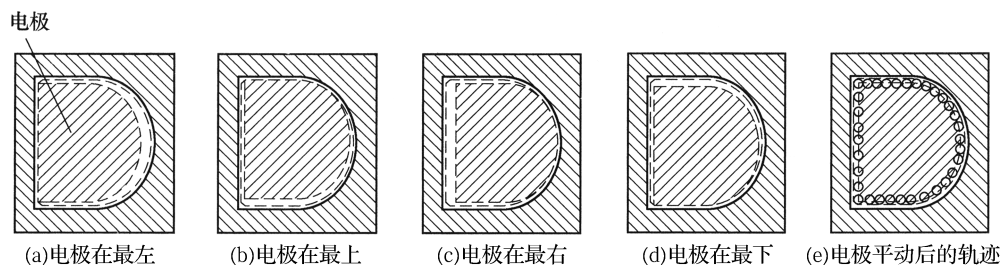


图 2-5 平动头的动作原理图

目前，电火花机床上安装的平动头有机械式平动头和数控式平动头两种，其外形如图 2-6 所示。机械式平动头由于有平动轨迹半径存在，无法加工有清角要求的型腔；而数控式平动头可以两轴联动，能加工出具有清棱、清角的型孔和型腔。

与一般电火花加工工艺相比，采用平动头电火花加工有如下特点。

- 可以通过改变轨迹半径来调整电极的作用尺寸，因此尺寸加工不再受放电间隙的限制。
- 用同一尺寸的电极，通过改变轨迹半径，可以实现转换电参数的修整，即采用一个电



(a)机械式平动头

(b)数控式平动头

图 2-6 平动头的外形

极就能由粗至精直接加工出一副型腔。

c. 在加工过程中,工具电极的轴线与工件的轴线相偏移,除了电极处于放电区域的部分外,工具电极与工件的间隙都不大于放电间隙,实际上减小了同时放电的面积,这有利于电蚀产物的排除,提高加工稳定性。

d. 工具电极移动方式的改变,可使加工表面的表面质量大有改善,特别是底平面处。

③油杯。油杯是工作液做强迫循环的一个重要附件,其结构如图 2-7 所示,在其侧面和底边上开有冲、抽油孔,目的是使电蚀产物得以及时排出。另外,工作液在电火花放电时会被分解而产生气体,若得不到及时排放则会产生“放炮”现象,造成工具电极与工件的位移。因此,油杯结构的好坏会直接影响加工效果,并给加工带来麻烦。所以,油杯的结构应满足以下三点。

a. 油杯要有适合的高度且不能在顶部积聚气泡,能满足加工较厚工件的电极伸出长度,在结构上应满足加工型孔的形状和尺寸要求。油杯的形状一般有圆形和长方形两种,都具备冲、抽油的条件。为防止在油杯顶部积聚气泡,抽油的抽气管应紧挨在工件底面。

b. 良好的刚度与加工精度,以保证密封性,防止漏油。根据加工的实际需要,油杯的两端面平行度误差不能超过 0.01 mm ,同时密封性要好,防止有漏油现象。

c. 如底部安装不方便,油杯底部的抽油孔可安置在靠近底部的侧面,也可省去抽油抽气管 7 和底板 5,直接将抽油孔安装在油杯侧面的最上部。

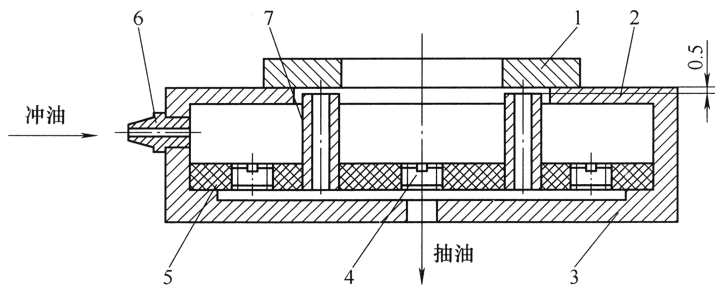


图 2-7 油杯结构图

1—工件 2—油杯盖 3—油杯体 4—油塞 5—底板 6—管接头 7—抽油抽气管

④永磁吸盘。由于电火花加工宏观作用力小,故采用永磁吸盘(图 2-8)吸牢工件即可进行



放电加工，其操作简单、吸附力大、便于工件装夹。永磁吸盘不用时，放在专用保管箱内，涂油防锈即可。

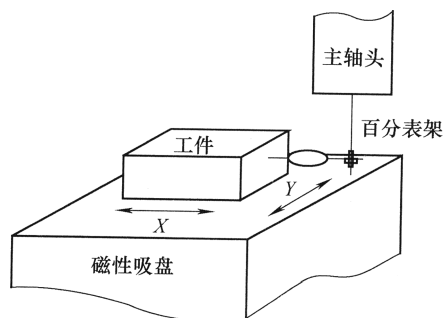


图 2-8 永磁吸盘

2.2.2.2 工作介质循环过滤系统

工作介质循环过滤系统是指用于电火花加工需要的工作介质储存、循环、调节、保护、过滤、再生及利用工作介质强迫循环、过滤来排除电蚀产物的装置。

电火花加工需要在工作介质中进行，目前应用最为普遍的工作介质是煤油，因其黏度低、排屑效果好同时价格相对便宜。另外，还有电火花专用油，加工效果较好，但价格偏高。只有在加工精密小孔时才选用水类介质工作液，如去离子水、蒸馏水和乳化液等。

电火花加工中的蚀除产物，一部分以气态形式抛出，其余大部分以球状固体微粒分散地悬浮在工作介质中，直径一般为几微米。随着电火花加工的进行，被蚀除的产物越来越多，充斥在电极和工件之间，或粘连在电极和工件的表面上。蚀除产物的聚集会与电极或工件形成二次放电，这就破坏了电火花加工的稳定性和加工速度，影响了加工精度和表面质量。为了改善电火花加工的条件，一种方法是使电极振动，以加强排屑作用；另一种方法是对工作介质进行强迫循环过滤，以改善电极和工件之间的间隙状态。

工作介质循环过滤系统包括工作液泵、储油箱、过滤器及管道等，如图 2-9 所示。它既能实现冲液，又能实现抽液。其工作过程是：储油箱的工作介质首先经过粗过滤器 1 和单向阀 2 被吸入到涡旋泵 3 中，此时高压油经过不同形式的精过滤器 7 输向工作介质槽。溢流安全阀 5 用于控制系统的压力，使之不超过 400 kPa，快速进油控制阀 11 用于快速进油。待油注满油箱时，可及时调节冲油选择阀 10，来控制工作介质的循环方式及压力。当选择阀 10 在冲油位置时，补油和冲油都通，这时油杯中油的压力由压力调节阀 8 控制；当选择阀 10 在抽油位置时，补油和冲油都不通，这时工作介质需穿过射流抽吸管 9，利用流体速度产生负压，达到抽油的目的。

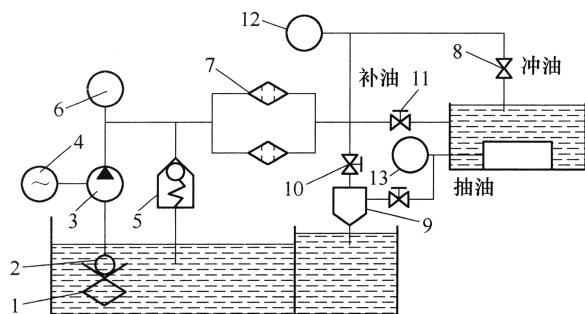


图 2-9 工作介质循环过滤系统油路

- 1—粗过滤器 2—单向阀 3—涡旋泵 4—电动机 5—安全阀 6—压力表
7—精过滤器 8—压力调节阀 9—射流抽吸管 10—冲油选择阀
11—快速进油控制阀 12—冲油压力表 13—抽油压力表

工作介质强迫循环方式有冲油方式和抽油方式两种,如图 2-10 所示。冲油方式比较容易实现,排屑冲刷能力强,一般经常采用,但电蚀产物会通过已加工区,进而影响加工精度;抽油方式虽然可以避免二次放电现象,提高加工精度,但是加工过程中产生的气体容易积聚在抽油回路的死角处,引起“放炮”现象,所以一般用得比较少。

以前曾广泛采用木屑、黄沙或棉纱作为工作介质的过滤器,虽来源广、价格便宜,但过滤能力有限,且每次更换时要浪费大量煤油,现已逐步被淘汰。目前广泛使用的是纸质滤芯,如图 2-11 所示。该滤芯具有如下优点:过滤精度高;更换方便,耗油少;过滤面积大,流量大,压力损失少;正常情况下可以连续使用 250~500 h,再经冲洗后可反复使用,成本大大降低。

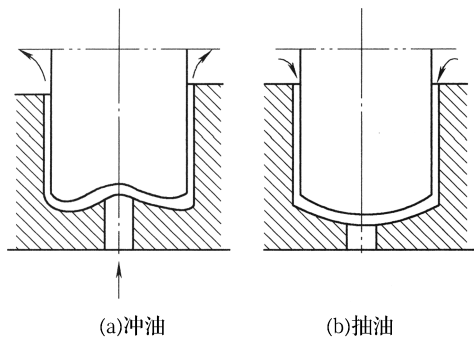


图 2-10 工作介质强迫循环方式

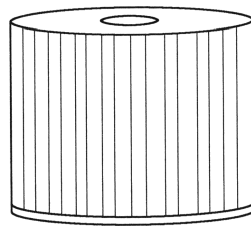


图 2-11 纸质滤芯

2.2.2.3 电火花加工的脉冲电源

在电火花加工过程中,脉冲电源的作用是把工频电流转变成频率较高的单向脉冲电流,向工件和工具电极间隙提供所需的放电能量,以蚀除多余的金属层。脉冲电源的性能直接关系到电火花加工的加工速度、表面质量、加工精度和工具电极损耗等工艺指标,因此脉冲电



源必须满足高加工速度、低电极损耗、加工过程稳定和脉冲参数便于调节的要求。如图 2-12 所示为其系统电路简图。

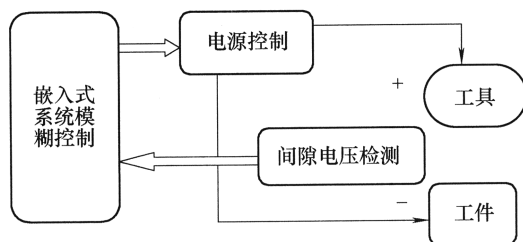


图 2-12 脉冲电源系统电路简图

(1)电火花加工用脉冲电源的要求。电火花加工的脉冲电源输入为 380 V、50 Hz 的交流电，其输出应满足如下具体要求。

①所产生的脉冲应该是单向的，最大限度地利用极性效应，以提高生产率，较少工具电极的损耗。

②火花放电必须是短时间的脉冲放电，使放电产生的热量来不及扩散，从而有效地蚀除多余金属层，提高成型性和加工精度。

③脉冲的主要参数(峰值电流、脉冲宽度、脉冲间歇等)有较宽的调节范围，以满足粗加工、半精加工和精加工的要求。

④有适当的脉冲间隔时间，使放电介质有足够的时间来消除电离并冲走金属颗粒，以免引起电弧，烧伤工件。

(2)晶体管式脉冲电源。晶体管式脉冲电源是近年来发展起来的以晶体管器件作为开关元件的用途广泛的电火花加工脉冲电源。其特点是输出功率大、电规准调节范围广、电极损耗小、脉冲波形好、易于实现多回路和自适应加工，适用于型孔、型腔、磨削等各种不同用途的加工。其工作原理是主振级产生一定频率的脉冲波形，其脉冲特性也决定着间隙的脉冲频率、脉冲宽度和脉冲间隔；放大级用于放大主振级信号，以推动功率级晶体管。晶体管前的电阻起限流和保护功率级的作用。

近几年随着微电子技术和元件制造技术的发展，人们多采用 V-MOS 管和 IG-BT 等集成芯片和组件的大功率开关元件代替一般功率晶体管，它们只需要很小的电流就可以推动 10~100 A 的电流和 100~500 V 的电压。为进一步提高有效脉冲利用率，达到高速、低耗、稳定加工的目的以及满足一些特殊需要，在晶体管式脉冲电源的基础上，派生出很多新型电源，如高低压复合脉冲电源、高频分组脉冲和梳形脉冲电源、多回路脉冲电源、等脉冲能量电源和自适应控制脉冲电源等。

目前普及型(经济型)电火花加工机床都采用高低压复合晶体管脉冲电源，中、高档电火花加工机床都采用微机数字化控制脉冲电源，而且内部存有电火花加工参数的数据库，可以通过



微机设置和调用各挡粗加工、半精加工和精加工参数。例如, 汉川机床厂和日本沙迪克公司的电火花加工机床, 其加工参数用 C 代码(如 C320)表示和调用, 三菱公司则用 E 代码表示。

2.2.2.4 自动进给调节系统

在电火花加工设备中, 自动进给调节系统占有很重要的位置, 其性能直接影响加工稳定性和加工效果。

电火花加工的自动进给调节系统主要包括伺服进给系统和参数控制系统。伺服进给系统主要用于控制放电间隙的大小, 而参数控制系统主要用于控制电火花加工中的各种参数(如放电电流、脉冲宽度和脉冲间隔等), 以便能够获得最佳的加工工艺指标。这里主要介绍伺服进给系统的作用、要求及伺服进给调节系统的组成, 对于参数控制将在下一节中具体介绍。

(1) 伺服进给系统的作用。电火花加工中伺服进给系统的作用是使工具和工件之间保持一定的放电间隙。间隙过大会引起短路而无法进行加工, 此时必须快速进给, 尽快达到合适的加工间隙; 间隙过小会引起短路而产生电弧放电, 烧伤工件, 此时必须快速退回, 切断电弧。在实际生产中, 放电间隙的变化与加工规准、加工面积和工件蚀除速度等因素有关, 很难依靠人工进给, 必须采用伺服进给系统。这种不等速的伺服进给系统也称为自动进给调节系统。

实际工作中, 自动进给调节系统中的电动机、工作台、工件、电路中的电阻和电感都有惯性滞后现象, 往往会产生“欠进给”或“过进给”, 甚至引起主轴的上下振动。为了更好地发挥伺服进给系统的作用, 必须对伺服进给系统提出一些必要的要求。

- ①有较广的速度调节跟踪范围, 以适应粗加工、半精加工和精加工的要求。
- ②有足够的灵敏度和快速性, 及时应对间隙变化并调整间隙。这就要求伺服进给系统的惯性、摩擦和放大倍数等尽量小。
- ③有必要的稳定性, 以提高抗干扰能力和避免执行机构的低速爬行现象。
- ④结构简单、工作可靠。

(2) 伺服进给调节系统的基本组成。电火花加工中的伺服进给调节系统主要由调节对象(即间隙)、测量环节、放大环节、比较环节和执行环节五部分组成。图 2-13 所示为伺服进给调节系统的基本组成。

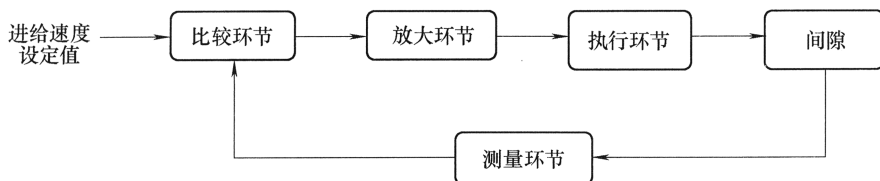


图 2-13 伺服进给系统的基本组成

- ①测量环节: 直接测量放电间隙的大小是极其困难的, 甚至是不可能的, 所以一般都是



测量与间隙成正比电参数,即间接测量。间隙的大小与间隙两端的电压有关,开路时电压最大,接近脉冲电源的峰值电压;而短路时电压为零。

②比较环节:作用是将测量的结果与预先根据粗加工、半精加工和精加工参数设定的值进行比较,计算差值,确定该进还是该退,进或退的速度又是多少。

③放大环节:由于测量环节的信号一般比较小,为了能推动执行机构,必须对信号进行放大。但要注意放大倍数不要太大,以免产生自激振荡。

④执行环节:作用是根据控制信号的大小及时调节工具电极的进给量,保证放电间隙。对执行环节的要求是:机电常数要小,以能快速反映间隙状态的变化;机械传动间隙要小、摩擦力要小,以提高系统的灵敏性;要有较宽的调节范围,以适应各种参数和工艺条件的变化。

2.2.2.5 电火花加工数控系统

(1)数控电火花机床的类型。数控系统规定,除了直线移动的 X 、 Y 、 Z 三个坐标轴系统外,还有三个转动的坐标系统,即绕 X 轴转动的 A 轴、绕 Y 轴转动的 B 轴和绕 Z 轴转动的 C 轴。若机床的 Z 轴可以连续转动但不是数控的,如电火花打孔机,则不能称为 C 轴,只能称为 R 轴。

根据机床数控坐标轴的数目,目前常见的数控机床有三轴数控电火花机床、四轴三联动数控电火花机床、四轴联动或五轴联动甚至六轴联动电火花加工机床。三轴数控电火花加工机床的主轴 Z 和工作台 X 、 Y 都是数控的。从数控插补功能上讲,又将这类机床细分为三轴两联动机床和三轴三联动机床。

三轴两联动是指 X 、 Y 、 Z 三轴中,只有两轴(如 X 、 Y 轴)能进行插补运算和联动,电极只能在平面内走斜线和圆弧轨迹(电极在 Z 轴方向只能作伺服进给运动,但不是插补运动)。三轴三联动系统的电极可在空间作 X 、 Y 、 Z 方向的插补联动(如可以走空间螺旋线)。四轴三联动数控机床增加了 C 轴,即主轴可以数控回转和分度。

现在部分数控电火花机床还带有工具电极库,在加工中可以根据事先编制好的程序自动更换电极。

(2)数控电火花机床数控系统的工作原理。数控电火花机床能实现工具电极和工件之间的多种相对运动,可以用来加工多种较复杂的型腔。目前,绝大部分电火花数控机床采用国际上通用的ISO代码进行编程、程序控制和数控摇动加工等,具体内容如下。

①ISO代码编程。ISO代码是国际标准化机构制订的用于数控编码和程序控制的一种标准代码。常用的电火花数控指令主要有 G 指令(即准备功能指令)和 M 指令(即辅助功能指令),具体见表2-1。



表 2-1 常用的电火花数控指令

代 码	功 能	代 码	功 能
G00	快速移动, 定位指令	G81	移动到机床的极限
G01	直线插补	G82	回到当前位置与零点的一半处
G02	顺时针圆弧插补指令	G90	绝对坐标指令
G03	逆时针圆弧插补指令	G91	增量坐标指令
G04	暂停指令	G92	制订坐标原点
G17	XOY, 平面选择	M00	暂停指令
G18	XOZ 平面选择	M02	程序结束指令
G19	YOZ 平面选择	M05	忽略接触感知
G20	寸制	M08	旋转头开
G21	米制	M09	旋转头关
G40	取消电极补偿	M80	冲油、工作介质流动
G41	电极左补偿	M84	接通脉冲电源
G42	电极右补偿	M85	关断脉冲电源
G54	选择工作坐标系 1	M89	工作介质排除
G55	选择工作坐标系 2	M98	子程序调用
G56	选择工作坐标系 3	M99	子程序结束
G80	移动轴直到接触感知	—	—

以上代码绝大部分与数控铣床和数控车床的代码相同, 只有 G54、G80、G82 和 M05 等代码是以前接触较少的指令。

a. G54 指令。一般的慢走丝线切割机床和部分快走丝线切割机床都有几个或几十个工作坐标系, 可以用 G54、G55 和 G56 等指令进行切换。在加工或找正过程中定义工作坐标系的主要目的是为了坐标的数值更简洁。这些定义工作坐标系的指令可以和 G92 指令一起使用。G92 代码只能把当前点的坐标在当前坐标系中定义为某一个值, 但不能把这点的坐标在所有的坐标系中都定义成该值。

如图 2-14 所示, 可以通过如下指令切换工作坐标系:

G92 G54 X0 Y0;

G00 X20 Y30;

G92 G55 X0 Y0;

这样通过指令, 首先把当前的 O 点定义为工作坐标系 0 的零点, 然后分别把 X、Y 轴快速移动 20 mm、30 mm 到达点 O', 并把该点定义为工作坐标系 1 的零点。

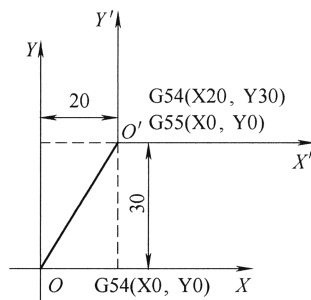


图 2-14 工作坐标



b. G80 指令。

含义：接触感知。

格式：G80 轴+方向

如：G80 -X；（电极将沿 X 轴的负方向前进，直到接触到工件，然后停在那里）

c. G82 指令。

含义：移动到原点和当前位置一半处。

格式：G82 轴

如：G92 X100；（将当前点的 X 坐标定义为 100）

G82 X；（将电极移到当前坐标系 $X=50$ 的位置）

d. M05 指令。

含义：忽略接触感知，只在本段程序中起作用。具体用法是：当电极与工件接触感知并停在此处后，若要移走电极，请用此代码。

如：G80 -X；（X 轴负方向接触感知）

G90 G92 X0 Y0；〔设置当前点坐标为(0, 0)〕

M05 G00 X10；（忽略接触感知且把电极向 X 轴正方向移动 10 mm）

若去掉上面代码中的 M05，则电极往往不动作，G00 指令不执行。

以上代码通常用在加工前电极的定位上，具体见下面的实例。如图 2-15 所示，ABCD 为矩形工件，AB、BC 边为设计基准，现欲用电火花加工一圆形图案，图案的中心为 O 点，O 到 AB 边、BC 边的距离如图中所标。已知圆形电极的直径为 20 mm，请写出电极定位于 O 点的具体过程。

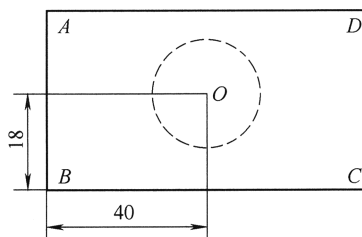


图 2-15 电极相对工件的定位

具体过程如下。

首先将电极移到工件 AB 的左边，Y 轴坐标大致与 O 点相同，然后执行如下指令。

G80 X+；

G90 G92 X0；

M05 G00 X-10；

G91 G00 Y38；（38 为一估计值，主要目的是保证电极在 BC 边下方）



G90 G00 X50;

G80 Y+;

G92 Y0;

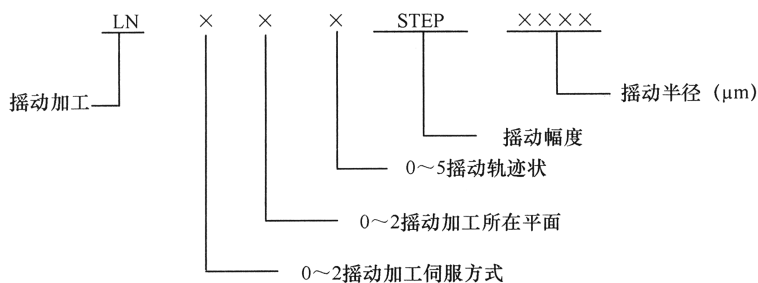
M05 G00 Y-2; (电极与工件分开, 2 mm 表示为一小段距离)

G91 G00 Z10; (将电极底面移到工件上面)

G90 G00 X50 Y28;

②平动与摇动。如前面所述, 普通电火花加工机床为了修光侧壁和提高其尺寸精度而添加平动头, 使工具电极轨迹向外可以逐步扩张, 即可以平动。对数控电火花机床, 由于工作台是数控的, 可以实现工件加工轨迹逐步向外扩张, 即摇动, 故数控电火花机床不需要平动头。具体来说, 摇动加工有以下作用: 可以精确控制加工尺寸精度; 可以加工出复杂的形状, 如螺纹; 可以提高工件侧面和底面的表面质量; 可以加工出清棱、清角的侧壁和底边; 变全面加工为局部加工, 有利于排屑和加工稳定; 对电极尺寸精度要求不高。

数控摇动的轨迹除了可以像平动头的小圆形轨迹外, 还有方形、菱形、叉形和十字形, 且摇动的半径可为 0~9.9 mm 范围内的任一数值。摇动的数控编程格式如下:



数控摇动的伺服方式共有三种, 如图 2-16 所示。

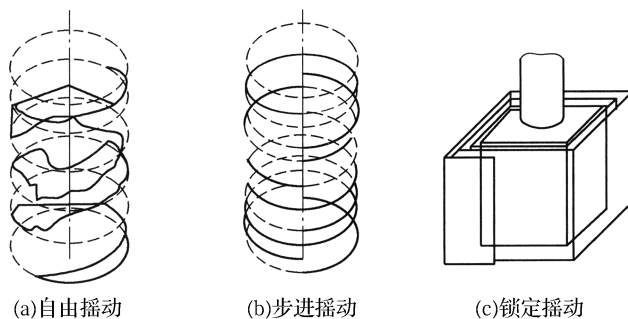


图 2-16 数控摇动伺服方式

a. 自由摇动: 选定某一轴向(例如 Z 轴)作为伺服进给轴, 其他两轴进行摇动运动, 如图 2-16(a)所示。例如:



G01 LN001 STEP30 Z-10;

G01 表示沿 Z 轴方向进行伺服进给；LN001 中的 00 表示在 X—Y 平面内自由摇动，1 表示工具电极各点绕各原始点作圆形轨迹摇动；STEP30 表示摇动半径为 30 μm ；Z-10 表示伺服进给至 Z 轴向下 10 mm 为止。其实际放电点的轨迹如图 2-16(a)所示，沿各轴方向可能出现不规则的进进退退。

b. 步进摇动：在某选定的轴向作步进伺服进给，每进一步的步距为 20 μm ，其他两轴作摇动运动，如图 2-16(b)所示。例如：

G01 LN101 STEP20 Z-10;

G01 表示沿 Z 轴方向进行伺服进给；LN101 中的 10 表示在 X—Y 平面内步进摇动，1 表示工具电极各点绕各原始点作圆形轨迹摇动；STEP20 表示摇动半径为 20 μm ；Z-10 表示伺服进给至 Z 轴向下 10 mm 为止。其实际放电点的轨迹如图 2-16(b)所示。步进摇动限制了主轴的进给动作，使摇动动作的循环成为优先动作。步进摇动用在深孔排屑比较困难的加工中，较自由摇动的加工速度稍慢，但更稳定，没有频繁的进给、回退现象。

c. 锁定摇动：在选定的轴向停止进给运动并锁定轴向位置，其他两轴进行摇动运动。在摇动中，摇动半径幅度逐步扩大，主要用于精密修扩内孔或内腔，如图 2-16(c)所示。例如：

G01 LN202 STEP20 Z-5;

G01 表示沿 Z 轴方向进行伺服进给；LN202 中的 20 表示在 X—Y 平面内锁定摇动，2 表示工具电极各点绕各原始点作方形轨迹摇动；Z-5 表示 Z 轴加工至 5 mm 处停止进给并锁定，X、Y 轴进行摇动运动。其实际放电点的轨迹如图 2-16(c)所示。锁定摇动能迅速除去粗加工留下的侧面波纹，是达到尺寸精度最快的加工方法。它主要用于通孔、不通孔或有底面的型腔模加工中。如果锁定后作圆轨迹摇动，则还能在孔内进行滚花和加工内花纹等。

摇动加工的编程代码各公司均自己规定。以汉川机床厂和日本沙迪克公司为例，摇动加工的指令代码参见表 2-2。

表 2-2 摇动加工指令代码

类型	摇动轨迹					
	无摇动	○	□	◇	×	+
自由摇动	000	001	002	003	004	005
	010	011	012	013	014	015
	020	021	022	023	024	025
步进摇动	100	101	102	103	104	105
	110	111	112	113	114	115
	120	121	122	123	124	125



续表

类型	摇动轨迹					
	无摇动	○	□	◇	×	+
锁定摇动	200	201	202	203	204	205
	210	211	212	213	214	215
	220	221	222	223	224	225

(3)数控电火花机床常见的功能。

①回原点操作功能。数控电火花在加工前首先要回到机械坐标系的零点，即 X 、 Y 、 Z 轴回到其轴的正极限处。这样，机床的控制系统才能复位，后续操作机床的运动不会紊乱。

②置零功能。将当前点的坐标设置为零。

③接触感知功能。让电极与工件接触，以便定位。

④其他常见功能如图 2-17 所示。

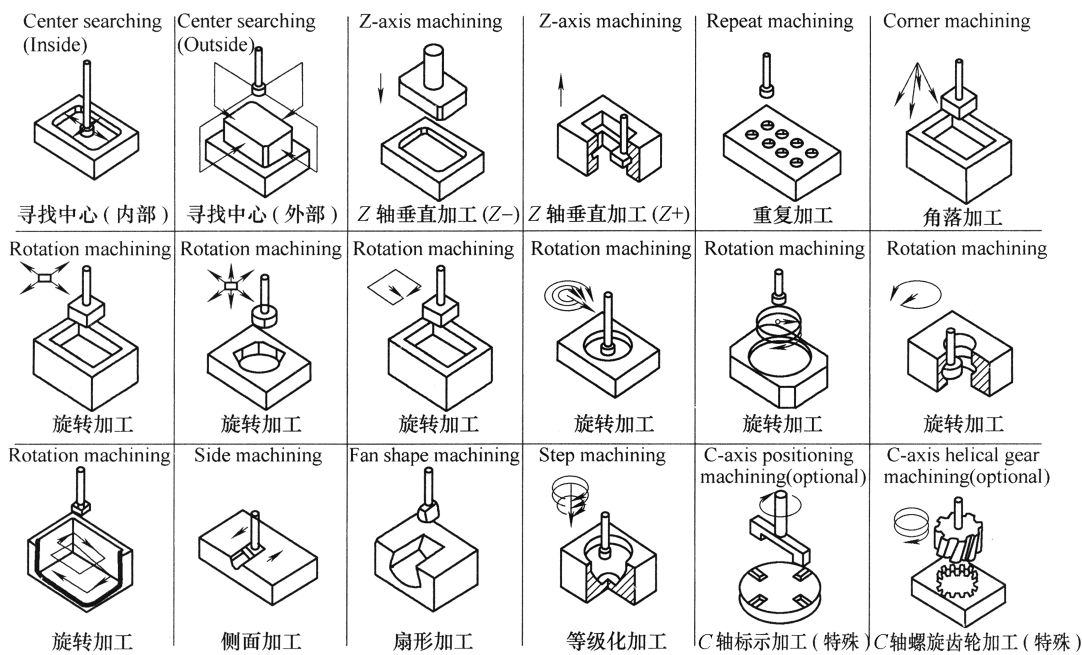


图 2-17 数控电火花机床的其他常见功能



2.3 电火花加工工艺规律



电火花加工的主要工艺指标有材料的电蚀量、加工速度、电极损耗、加工精度、表面质量和表面变化层及其力学性能等。影响工艺指标的因素有很多，诸因素的变化都将引起工艺指标的相应变化。

2.3.1 影响材料电蚀量的因素

2.3.1.1 极性效应对电蚀量的影响

在电火花加工过程中，工件和工具电极都会受到不同程度的电腐蚀，但由于所接电源的极性不同，两极的蚀除量也不同，即使是同种材料制成的正、负极（如采用钢作为工具电极加工钢材料），其电腐蚀程度也不相同，这种现象称为极性效应。当正极蚀除速度大于负极时，应将工件接在正极加工，称为正极性效应或正极性加工；反之，当负极蚀除速度大于正极时，则将工件接在负极加工，称为负极性效应或负极性加工，如图 2-18 所示。

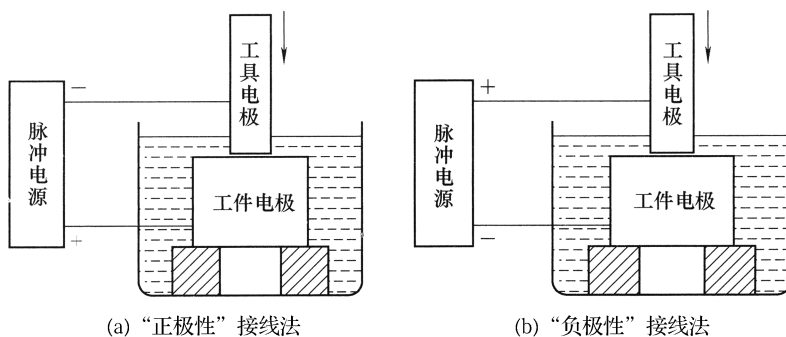


图 2-18 利用极性效应接线图

从提高生产效率和减少工具电极损耗的角度来看，极性效应越显著越好。极性效应不仅与脉冲宽度有关，而且还受电极及工件材料、加工介质（工作介质）、电源种类、单个脉冲能量等多种因素的综合影响，其中主要原因是脉冲宽度。

在电场的作用下，放电通道中的电子奔向正极，正离子奔向负极。在窄脉冲宽度加工时，由于电子惯性小，运动灵活，大量的电子奔向正极，并轰击正极表面，使正极表面迅速熔化



和汽化,而正离子惯性大,运动缓慢,只有一小部分能够到达负极表面,大量的正离子不能到达。因此,电子的轰击作用大于正离子的轰击作用,正极的电蚀量大于负极的电蚀量,这时应采用正极性加工。

在宽脉冲宽度加工时,质量和惯性都大的正离子将有足够的时间到达负极表面,而且由于正离子的质量大,它对负极表面的轰击破坏作用要比电子强,同时到达负极的正离子又会牵制电子的运动,故负极的电蚀量将大于正极,这时应采用负极性加工。

2.3.1.2 覆盖效应对电蚀量的影响

工件材料在被放电腐蚀的过程中,工件的电蚀产物就会通过工作介质被转移到工具电极表面上,形成一定厚度的覆盖层,这种现象被称为覆盖效应。

在油类介质中加工时,覆盖层主要是石墨化的碳素层(俗称炭黑),因其具有很好的耐蚀性,所以对电极表面具有一定的保护作用,同时也具有补偿电极损耗的作用。尤其是在大电流加工中,这种补偿作用尤为明显,只是覆盖层的厚度和均匀性很难把握,容易使电极尺寸增大,影响工件的加工精度。碳素层的生成条件主要有以下几点。

(1)要有足够高的温度。电极上待覆盖部分的表面温度不低于碳素层的生成温度,但要低于熔点,以使碳粒子烧结成石墨化的耐蚀层。

(2)要有足够多的电蚀产物,尤其是介质的热解产物——碳粒子。

(3)要有足够的时间,以便在这一表面上形成一定厚度的碳素层。

(4)一般采用负极性加工,因为碳素层易在阳极表面生成。

(5)必须在油类介质中加工。

在乳化类介质中加工时,不会产生覆盖层,但会出现另一种覆盖现象——镀覆现象,即在工具电极表面形成致密的电镀层,同样可以起到减少和补偿电极损耗的作用。产生这种镀覆层的一个重要条件是必须在具有一定离子量的导电水溶液中进行加工,同时工具电极必须接负极。

合理利用覆盖效应,有利于降低电极损耗,甚至达到电极无损耗,这样可以大大降低加工工具电极的成本。但是,由于覆盖层的厚度和均匀性均很难控制,一旦出现过覆盖现象,就会使电极尺寸增大,反而破坏了工件的加工精度。影响覆盖效应的主要因素有以下几点。

(1)脉冲参数与波形的影响。增大脉冲放电能量有助于覆盖层的生长,但对半精加工和精加工有相当大的局限性;减小脉冲间隔有利于在各种电规准下生成覆盖层,但若脉冲间隔过小,正常的火花放电有转变为破坏性电弧放电的危险。此外,采用某些组合脉冲波加工,有助于覆盖层的生成,其作用类似于减小脉冲间隔,并且可大大减小转变为破坏性电弧放电的危险。

(2)电极对材料的影响。用铜电极加工钢时覆盖效应较明显,但用铜电极加工硬质合金工件则不大容易生成覆盖层。

(3)工作介质的影响。油类工作介质在放电产生的高温作用下生成大量的碳粒子,有助于



碳素层的生成。如果用水作为工作介质,则不会产生碳素层。

(4)工艺条件的影响。覆盖层的形成还与间隙状态有关。如工作介质脏、电极截面面积较大、电极间隙较小、加工状态较稳定等情况均有助于生成覆盖层。但若加工中冲油压力太大,则覆盖层较难生成。这是因为冲油会使趋向电极表面的微粒运动加剧,而微粒无法粘附到电极表面上去。

在电火花加工中,覆盖层不断形成,又不断被破坏。为了实现电极低损耗,达到提高加工精度的目的,最好使覆盖层的形成与破坏的程度达到动态平衡。

2.3.1.3 电参数对电蚀量的影响

电火花加工过程中腐蚀金属的量(即电蚀量)与单个脉冲能量和脉冲效率等电参数密切相关。

单个脉冲能量与平均放电电压、平均放电电流和脉冲宽度成正比。在实际加工中,击穿后的放电电压与电极材料及工作介质的种类有关,而且在放电过程中变化很小,所以单个脉冲能量的大小主要取决于平均放电电流和脉冲宽度的大小。

由此可见,要提高电蚀量,应增加平均放电电流、脉冲宽度及提高脉冲频率。但在实际生产中,这些因素往往是相互制约的,并影响到其他工艺指标,应根据具体情况综合考虑。例如,增加平均放电电流,加工表面的表面粗糙度值也随之增大。

2.3.1.4 金属材料对电蚀量的影响

正负电极表面电蚀量分配不均除了与电极极性有关外,还与电极的材料有很大关系。当脉冲放电能量相同时,金属工件的熔点、沸点、比热容、熔化热和汽化热等越高,电蚀量将越少,越难加工。导热系数大的金属,因能把较多的热量传导、散失到其他部位,故降低了本身的蚀除量。因此,电极的蚀除量与电极材料的导热系数及其他热学常数等有密切的关系。

2.3.1.5 工作介质对电蚀量的影响

(1)工作介质的作用。

电火花加工时,工具和工件间的放电间隙必须浸泡在有一定绝缘性能的液体介质中,此液体介质称为工作介质。工作介质的主要作用如下。

①在一次火花放电之后能尽快恢复放电间隙的绝缘状态,以便形成下一次火花放电。这就要求工作介质必须具有一定的绝缘强度。

②有利于电蚀产物的顺利排出,以免产生二次火花放电甚至是电弧放电。

③对工具电极和工件表面有冷却降温的作用,以免因局部过热而产生积炭和烧伤等现象。

(2)工作介质的特点。如要保证工作介质具有上述作用,则工作介质必须具有以下特点。



①黏度低。只有低粘度的介质才能保证其良好的流动性和冷却性，同时有利于电蚀产物的顺利排出。

②高闪点、高初馏点。闪点高，不易起火，可保证安全生产；初馏点高，不易汽化，损耗少，有良好的环保作用。

③绝缘性好。绝缘性好能尽快恢复放电间隙的绝缘状态，缩短加工时间，提高效率。

④氧化稳定性好，寿命长，性价比高。

(3)常用的工作液介质。我国电火花成形设备所使用的工作介质仍以煤油为主。煤油的性能比较稳定，粘度低、密度小、绝缘性较好，符合电火花加工的基本要求。同时，煤油价格低廉，因此被广泛使用。但煤油的缺点也是显而易见的，尤其是它的闪点低(大约 46°C)，使用中往往因为疏忽而导致火灾，所以电火花加工设备必须配备灭火设施。另外，煤油易挥发，容易产生对人体有害的气体，所以安放电火花加工设备的车间必须具备良好的通风设施。

在粗加工时，要求速度快，放电能量大，放电间隙大，故常选用机油等粘度大的工作介质；在半精加工和精加工时，放电间隙小，往往采用煤油等粘度小的工作介质。

采用水作为工作介质是值得注意的一个方向。用各种油类以及其他碳氢化合物作为工作介质时，在放电过程中不可避免地产生大量炭黑，严重影响电蚀产物的排除及加工速度，这种影响在精密加工中尤为明显。若采用酒精作为工作介质，因为炭黑的生成量减少，上述情况会有好转。所以，最好采用不含碳元素的工作介质，而水是最方便的一种。此外，水还具有流动性好、散热性好、不易起弧、不燃、无味、价廉等特点。但普通水是弱导电液，会产生离子导电的电解过程，这是很不利的，目前还只在某些大能量粗加工中采用。

在精密加工中，可采用比较纯的蒸馏水、去离子水或乙醇水溶液来作为工作介质，其绝缘强度比普通水高。

2.3.2 影响加工速度的主要因素

电火花加工的加工速度是指在一定的电参数下，单位时间内工件被蚀除的体积 V 或质量 m 。一般常用体积加工速度 $v_w = V/t$ (单位为 mm^3/min) 来表示。有时为了测量方便，也用质量加工速度 $v_m = m/t$ (单位为 g/min) 来表示。

在规定的表面质量、规定的相对电极损耗下的最大加工速度是电火花机床的重要工艺性能指标。一般电火花机床说明书上所指的最高加工速度是该机床在最佳状态下所达到的，在实际生产中的正常加工速度大大低于机床的最大加工速度。

影响加工速度的因素分为电参数和非电参数两大类。电参数主要是脉冲电源输出波形与参数；非电参数包括加工面积、深度、工作介质、冲油方式、排屑条件及电极材料和加工极性等。



2.3.2.1 电参数的影响

电火花加工时选用的电加工参数主要有脉冲宽度(μs)、脉冲间隙(μs)及峰值电流等参数。

(1)脉冲宽度对加工速度的影响。单个脉冲能量的大小是影响加工速度的重要因素。对于矩形波脉冲电源,当峰值电流一定时,脉冲能量与脉冲宽度成正比。脉冲宽度增加,加工速度随之增加,因为随着脉冲宽度的增加,单个脉冲能量增大,使加工速度提高,如图 2-19 所示。但若脉冲宽度过大,加工速度反而下降。这是因为单个脉冲能量虽然增大,但转换的热能有较大部分散失在电极与工件中,不起蚀除作用。同时,在其他加工条件相同时,随着脉冲能量过分增大,蚀除产物增多,排气、排屑条件恶化,间隙消电离时间不足导致拉弧,使加工稳定性变差等,因此加工速度反而降低。

(2)脉冲间隔对加工速度的影响。在脉冲宽度一定的条件下,脉冲间隔越小,加工速度越高。图 2-20 所示为用纯铜电极加工钢件的脉冲间隔与加工速度的关系。因为脉冲间隔减小导致单位时间内工作脉冲数目增多、加工电流增大,故加工速度提高;但若脉冲间隔过小,则会导致放电间隙过小,来不及消除电离,引起加工稳定性变差,加工速度反而降低。

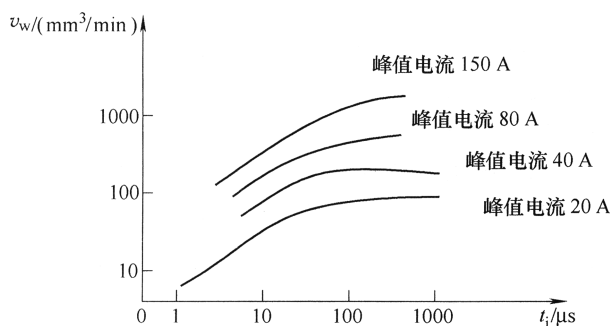


图 2-19 脉冲宽度与加工速度的关系

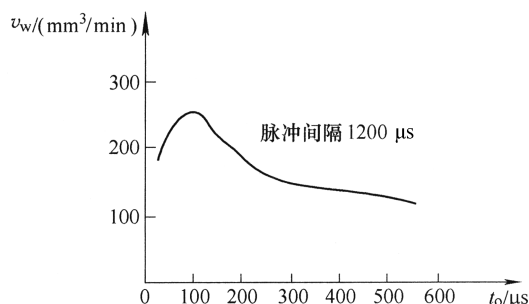


图 2-20 脉冲间隔与加工速度的关系

在脉冲宽度一定的条件下,为了最大限度地提高加工速度,应在保证稳定加工的同时,尽量缩短脉冲间隔时间。带有脉冲间隔自适应控制的脉冲电源,能够根据放电间隙的状态,在一定范围内调节脉冲间隔的大小,这样既能保证稳定加工,又可以获得较大的加工速度。

(3)峰值电流对加工速度的影响。当脉冲宽度和脉冲间隔一定时,随着峰值电流的增加,加工速度也增加,如图 2-21 所示。因为加大峰值电流,等于加大单个脉冲能量,所以加工速度也就提高了。但若峰值电流过大(即单个脉冲放电能量很大),加工速度反而下降。此外,峰值电流增大将降低工件表面质量,增加电极损耗。在生产中,应根据不同的要求,选择合适的峰值电流。

应根据工件的加工要求合理选择电参数。电参数的配置是否合理,将直接影响加工的各项工艺指标。选用电参数的最终目的是为了保证工件的加工尺寸和表面质量要求。选择电参数时,基本上要考虑电极数目、电极损耗、工作介质处理、工件表面质量、加工面积和加工