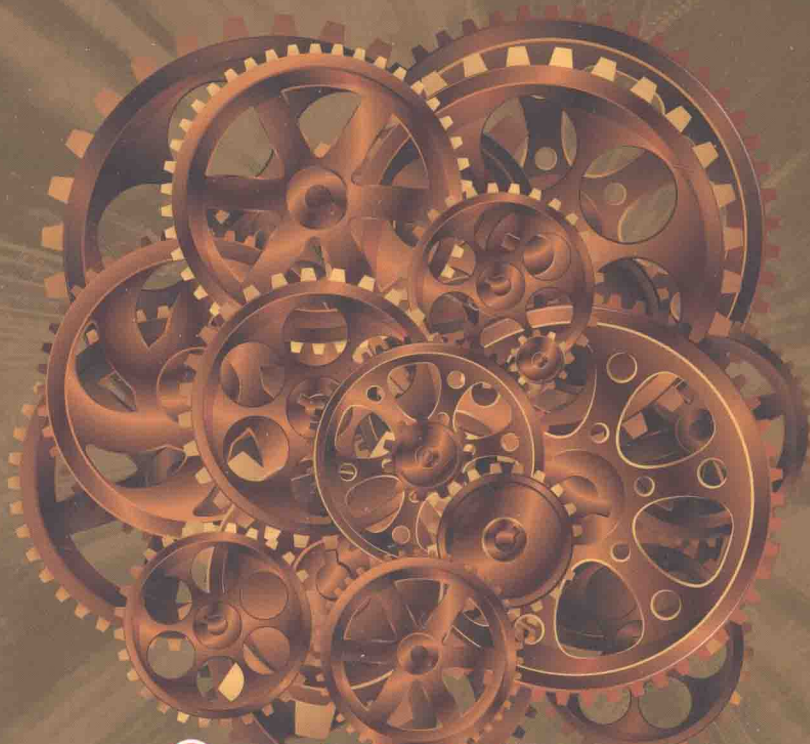


全国高等职业教育规划教材

特种加工技术

孙 捷 丁怀清 ◎ 主 编

TEZHONG JIAGONG JISHU

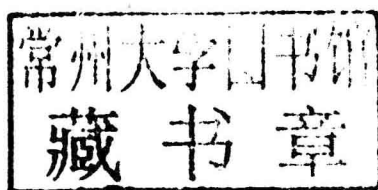


中央广播电视大学出版社

全国高等职业教育规划教材

特种加工技术

孙 捷 丁怀清 主 编



中央广播电视大学出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

特种加工技术 / 孙捷, 丁怀清主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2011.10

全国高等职业教育规划教材

ISBN 978-7-304-05255-3

I. ①特… II. ①孙… ②丁… III. ①特种加工—高等职业教育—教材 IV. ①TG66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 197968 号

版权所有, 翻印必究。

全国高等职业教育规划教材

特种加工技术

孙 捷 丁怀清 主编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 营销中心: 010-58840200 总编室: 010-68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 苏 醒

印刷: 北京博图彩色印刷有限公司

版本: 2011 年 11 月第 1 版

开本: 787×1092 1/16

责任编辑: 冯 欢

印数: 0001~3000

2011 年 11 月第 1 次印刷

印张: 14 字数: 213 千字

书号: ISBN 978-7-304-05255-3

定价: 27.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

编写人员

主 编：孙 捷 丁怀清

编 委：（以姓氏笔画为序）

王继红 王林志 方 彬 刘 钊

吴 言 李冬梅 李妹燕 肖学华

陈韦华 张建军 罗建航 段 勇

侯庆愉 郭 颖 高 凯 唐连三

曹建军 梁 强 焦春华 舒德凯

前 言

特种加工泛指用电能、热能、光能、电化学能、化学能、声能及特殊机械能等能量实现去除或增加材料的加工方法，亦称作“非传统加工”或“现代加工方法”。目前，特种加工技术被广泛应用于加工各种高硬度、形状复杂及微细、精密的工件。

当前，特种加工技术已成为先进制造技术的重要组成部分，主要体现在两个方面：一是计算机技术、信息技术、自动化技术等特种加工中已获得广泛应用，逐步实现了加工工艺及加工过程的系统化集成；二是特种加工能充分体现学科的综合性和交叉性，学科（声、光、电、热、化学等）和专业之间不断渗透、交叉、融合，因此特种加工技术本身同样趋于系统化集成的发展方向。发达国家早已十分重视特种加工技术的发展，例如，日本把特种加工技术和数控技术作为跨世纪发展先进制造技术的两大支柱。特种加工技术在某种程度上已成为衡量一个国家先进制造技术水平和能力的重要标志。

为了适应特种加工技术迅速发展及应用的需要，也为了满足市场化对此类人才的大量需求，近年来我国已有越来越多的工科院校陆续开设特种加工这门课程，还开设了各种短期培训班。本书的主要内容包括特种加工技术概述和各种特种加工技术的原理及应用，具体内容在书中都作了详细讲述。

本书主要具有如下几个特点：

（1）简单实用，通俗易懂。本书以例题和图示的形式来讲述各种特种加工技术的原理及应用，将一个个深奥的加工原理讲述得详细而且浅显易懂。让人很容易明白各种加工技术的整个过程和原理等。

（2）内容新颖，涵盖全面。本书中涵盖了目前社会中主要应用的各种特种加工技术，并且都是结合最新的技术研究成果得来的理论成果，可供广大工科院校的学子们作以再研究与学习，争取再上一个技术新台阶。

（3）实例多，实践性较强。本书中列举了大量操作实例，以详细讲述各种特种加工技术操作中常用的、关键的操作方法，并附有一些加工实例及加工中

实际能运用的加工程序。

本书可作为广大工科院校高职高专机械、模具、数控技术加工及应用等专业的教材及电火花、线切割机床操作工的职业培训用书，也可作为从事相关行业技术人员的参考书。

特种加工技术所涉及内容较为广泛，但由于时间仓促，收集的资料有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者给予批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 特种加工技术概述	1
1.1 特种加工的起源与发展	1
1.2 特种加工的概念及分类	1
1.2.1 特种加工的概念	1
1.2.2 特种加工的分类	2
1.3 特种加工的特点及未来发展趋势	3
1.3.1 特种加工的特点	3
1.3.2 特种加工的发展趋势	3
1.4 特种加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响	4
第 2 章 电火花加工的原理及应用	6
2.1 电火花加工的原理、特点及分类	6
2.1.1 电火花加工的原理	6
2.1.2 电火花加工的特点	8
2.1.3 电火花加工的分类	9
2.2 电火花加工机床及其组成	10
2.2.1 电火花加工机床概述	10
2.2.2 国产电火花穿孔、成型加工机床的型号规格	10
2.2.3 电火花加工机床的组成	11
2.3 电火花加工工艺规律	32
2.3.1 影响加工速度的主要因素	32
2.3.2 影响电极损耗的主要因素	36
2.3.3 影响表面粗糙度的主要因素	42
2.3.4 影响加工精度的主要因素	42
2.3.5 电火花加工表面变化层和机械性能	43
2.3.6 电火花加工的稳定性	45
2.3.7 合理选择电火花加工	46
2.4 电火花加工的实际应用	47
2.4.1 电解加工	47
2.4.2 电铸加工	53
2.4.3 刷镀(涂镀)加工	54
2.4.4 复合镀加工	57

2.5 电火花加工的操作实例	58
2.5.1 加工规准转换.....	58
2.5.2 加工实例	60
第3章 电火花线切割加工的原理及应用	66
3.1 电火花线切割加工原理、特点及适用范围.....	66
3.1.1 电火花线切割加工的原理.....	66
3.1.2 电火花线切割加工的特点.....	67
3.1.3 电火花线切割加工的适用范围.....	68
3.2 电火花线切割加工设备	69
3.2.1 机床本体	70
3.2.2 脉冲电源	72
3.2.3 工作液循环系统.....	75
3.3 电火花线切割控制系统和编程技术.....	75
3.3.1 线切割控制系统.....	75
3.3.2 线切割数控编程要点.....	78
3.3.3 ISO 代码的手工编程方法	81
3.3.4 自动编程	83
3.4 影响线切割工艺指标的因素.....	85
3.4.1 线切割加工的主要工艺指标.....	85
3.4.2 电参数的影响.....	86
3.4.3 非电参数的影响.....	87
3.4.4 合理选择电参数.....	88
3.4.5 合理调整变频进给的方法.....	88
3.5 线切割加工工艺及其扩展应用.....	91
3.5.1 电火花线切割加工工艺.....	91
3.5.2 线切割工艺的扩展应用.....	92
3.6 线切割加工的操作实例	96
3.6.1 数控快走丝电火花线切割操作实例.....	96
3.6.2 数控慢走丝电火花线切割操作实例.....	101
第4章 电化学加工的原理及应用	103
4.1 电化学加工原理、特点及分类.....	103
4.1.1 电化学加工的基本原理.....	103
4.1.2 电化学加工的特点.....	109
4.1.3 电化学加工的分类.....	110
4.2 电化学加工设备及其组成.....	110

4.2.1 直流电源	111
4.2.2 电解加工机床	111
4.2.3 电解液系统	112
4.3 电化学加工工艺及规律	113
4.3.1 电化学加工的生产率及其影响因素	113
4.3.2 电解加工时的电极反应	116
4.3.3 电化学加工的表面质量和加工精度	117
4.4 电化学加工的应用	117
4.4.1 电解加工	117
4.4.2 电铸成型	120
4.4.3 电解磨削	122
4.5 电化学加工的操作实例	123
第 5 章 超声波加工的基本原理及应用	125
5.1 超声波加工的原理与特点	125
5.1.1 超声波加工的基本原理	125
5.1.2 超声波加工的特点	126
5.2 超声波加工设备及其组成	126
5.2.1 超声波发生器	126
5.2.2 声学部件	127
5.2.3 机床	132
5.2.4 磨料工作液及其循环系统	133
5.3 影响超声波加工的各种因素	133
5.3.1 加工速度及其影响因素	133
5.3.2 加工精度及其影响因素	134
5.3.3 表面质量及其影响因素	135
5.4 超声波加工的广泛应用	136
5.4.1 型孔、型腔加工	136
5.4.2 切割加工	136
5.4.3 复合加工	137
5.4.4 超声清洗	140
5.5 超声波加工的操作实例	141
5.5.1 超声波加工方孔	141
5.5.2 超声波旋转加工小深孔	142
第 6 章 激光加工的原理及应用	144
6.1 激光加工的原理与特点	144

6.1.1 激光的产生原理.....	144
6.1.2 激光的特性.....	147
6.1.3 激光加工的原理和特点.....	148
6.2 激光加工的基本设备及其组成.....	149
6.2.1 激光器.....	149
6.2.2 激光器电源.....	150
6.2.3 光学系统.....	150
6.2.4 机械系统.....	151
6.3 激光加工的基本规律.....	151
6.3.1 激光照射面的能量分布.....	151
6.3.2 影响激光加工的主要因素.....	152
6.4 激光加工的应用.....	155
6.4.1 激光打孔.....	155
6.4.2 激光切割.....	155
6.5 激光加工的操作实例.....	158
6.5.1 激光加工操作训练的目的和内容.....	158
6.5.2 LWS—400 型多功能激光加工机床主机组件及工作原理.....	158
6.5.3 LWS—400 型激光焊接系统操作步骤.....	159
6.5.4 CNC 系统软件简介.....	159
6.5.5 激光焊接与激光打标加工操作训练.....	160
第 7 章 其他特种加工技术.....	162
7.1 电子束加工技术.....	162
7.1.1 电子束加工的原理.....	162
7.1.2 电子束加工的特点.....	163
7.1.3 电子束加工装置.....	163
7.1.4 电子束加工的应用.....	164
7.2 离子束加工技术.....	166
7.2.1 离子束加工的原理.....	166
7.2.2 离子束加工的分类.....	166
7.2.3 离子束加工的特点.....	167
7.2.4 离子束加工装置.....	168
7.2.5 离子束加工的应用.....	169
7.3 等离子体加工技术.....	171
7.3.1 等离子体加工的基本原理.....	171
7.3.2 材料去除速度和加工精度.....	172
7.3.3 等离子体加工的设备 and 工具.....	173

7.3.4 等离子体加工的应用	173
7.4 挤压珩磨技术	174
7.4.1 挤压珩磨的基本原理	174
7.4.2 挤压珩磨的工艺特点	175
7.4.3 挤压珩磨的应用	176
7.5 水射流切割技术	176
7.5.1 水射流切割的基本原理	176
7.5.2 材料去除速度和加工精度	177
7.5.3 水射流切割的设备和工具	178
7.5.4 水射流切割的应用	178
7.6 磁性磨料研磨加工和磁性磨料电解研磨加工	179
7.6.1 磁性磨料研磨加工的基本原理	179
7.6.2 磁性磨料加工的设备和工具	180
7.6.3 磁性磨料加工的应用	180
第8章 难加工零件的特种加工技术	182
8.1 铝合金微弧氧化表面陶瓷化处理技术	182
8.1.1 微弧氧化后表面陶瓷层的功能和用途	183
8.1.2 微弧氧化表面处理技术的工艺特点	184
8.1.3 微弧氧化工艺及设备的原理	185
8.1.4 微弧氧化过程的机理——电极间反应的探讨	185
8.1.5 微弧氧化技术在铝、镁、钛等合金中的应用前景	186
8.2 小深孔、斜孔、群孔零件的特种加工	187
8.2.1 航天、航空发动机典型孔件加工实例	187
8.2.2 小深斜孔、群孔加工工艺及其机床设备	188
8.3 排孔小方孔筛网的特种加工	190
8.3.1 排孔、多孔的加工	190
8.3.2 小方孔筛网的加工	191
8.3.3 电解加工小孔	192
8.4 薄壁、弹性、低刚度零件的特种加工	194
8.4.1 蜂窝结构、薄壁低刚度工件的电火花磨削	194
8.4.2 弹性、低刚度细长杆的电火花磨削	196
8.5 微细表面、零件的电火花加工	198
8.5.1 微轴和微孔电火花加工	198
8.5.2 窄槽(人工裂纹)、异形微细孔二维表面的电火花加工	201
8.5.3 三维立体表面和零件的电火花微细加工	202

第9章 特种加工中的安全和环保技术	204
9.1 特种加工中的安全与环保技术.....	204
9.1.1 电火花加工中的安全、防火技术.....	204
9.1.2 电化学加工中的技术防护和环境保护	206
9.2 特种加工中的绿色加工和节能技术.....	209
9.2.1 加工过程的无害化.....	210
9.2.2 采用节能技术.....	210
9.2.3 采用可回收、再利用技术.....	210
参考文献	211

第 1 章 特种加工技术概述

1.1 特种加工的起源与发展

20 世纪 40 年代, 由于材料科学、高新技术的发展和激烈的市场竞争、发展尖端国防及科学研究的急需, 不仅新产品更新换代日益加快, 而且产品要求具有很高的强度重量比和性能价格比, 并正朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。为此, 各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现, 对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如, 各种难切削材料的加工; 各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工; 薄壁、弹性元件等刚度、特殊零件的加工等。对此, 采用传统加工方法十分困难, 甚至无法加工。于是, 人们一方面通过研究高效加工的刀具和刀具材料、自动优化切削参数、提高刀具可靠性和在线刀具监控系统、开发新型切削液、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, 并解决了一些问题; 另一方面, 冲破传统加工的特种加工应运而生, 并不断获得发展。后来, 由于新颖制造技术的进一步发展, 人们就广义上来定义特种加工, 即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上, 从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆等的非传统加工方法统称为特种加工。

1.2 特种加工的概念及分类

1.2.1 特种加工的概念

随着社会生产的需要和科学技术的进步, 20 世纪 40 年代, 前苏联科学家拉扎连柯夫妇研究开关触点遭受火花放电腐蚀损坏的现象和原因, 发现电火花的瞬时高温可使局部的金属熔化、气化而被腐蚀掉, 开创和发明了电火花加工。至此, 人们初次脱离了传统加工的旧轨道, 利用电能、热能, 在不产生切削力的情况下, 以低于工件金属硬度的工具去除工件上多余的部分, 成功地获得了“以柔克刚”的技术效果。后来, 由于各种先进技术的不断应用, 产生了多种有别于传统机械加工的新加工方法。这些新加工方法从广义上定义为特种加工 (Non-Traditional Machining, MTN), 也被称为非传统加工技术, 其加工原理是将电、热、光、声、化学等能量或其组合施加到工件被加工的部位上, 从而实现材料去除。

1.2.2 特种加工的分类

特种加工的分类还没有明确的规定，一般按能量来源和作用形式以及加工原理可分为表 1-1 所示的形式。

表 1-1 常用特种加工方法的分类表

特 种 加 工 方 法		能量来源及形式	加工原理	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	金属离子阳极溶解	ECM (ELM)
	电解磨削	电化学能、机械能	阳极溶解、磨削	EGM (ECG)
	电解研磨	电化学能、机械能	阳极溶解、研磨	ECH
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	EFM
	电镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPM
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光打标记	光能、热能	熔化、汽化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	LBT
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、汽化	EBM
离子束加工	蚀刻、镀膜、注入	电能、动能	原子撞击	IBM
等离子弧加工	切割（喷镀）	电能、热能	熔化、汽化（涂覆）	PAM
超声波加工	切割、打孔、雕刻	声能、机械能	磨料高频撞击	USM
化学加工	化学铣削	化学能	磨蚀	CHM
	化学抛光	化学能	磨蚀	CHP
	光刻	光能、化学能	光化学腐蚀	PCM

在发展过程中也形成了某些介于常规机械加工和特种加工工艺之间的过渡性工艺。例如，在切削过程中引入超声振动或低频振动切削，在切削过程中通以低电压大电流的导电切削、加热切削以及低温切削等。这些加工方法是在切削加工的基础上发展起来的，目的是改善切削的条件，基本上还属于切削加工。

在特种加工范围内，还有一些属于减小表面粗糙度值或改善表面性能的工艺，前者如电解抛光、化学抛光、离子束抛光等，后者如电火花表面强化、镀膜、刻字、激光表面处理、改性、电子束曝光和离子束注入掺杂等。

随着半导体大规模集成电路生产发展的需要，上述提到的电子束、离子束加工，逐渐演变成近年来提出的纳米级超精微加工，即所谓原子、分子单位的加工方法。

1.3 特种加工的特点及未来发展趋势

1.3.1 特种加工的特点

特种加工与传统的机械加工相比,有着不同的特点,主要表现在以下几个方面:

(1) 特种加工主要不是依靠机械能,而是用其他能量(如电、化学、光、声、热等)去除金属材料。

(2) 加工过程中工具和工件之间不存在显著的机械切削力,故加工的难易与工件硬度无关。

(3) 各种加工方法可以任意复合、扬长避短,形成新的工艺方法,更突出其优越性,便于扩大应用范围。如目前的电解电火花加工(ECDM)、电解电弧加工(ECAM)就是两种特种加工复合而形成的新加工方法。

正因为特种加工工艺具有上述特点,所以就总体而言,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、微细表面和低刚度的零件。

1.3.2 特种加工的发展趋势

当前,国际上对特种加工技术的研究及应用主要表现在以下几个方面:

(1) 微细化。当前,国际上对微细电火花加工、微细超声波加工、微细激光加工、微细电化学加工等的研究方兴未艾,特种微细加工技术有望成为三维实体微细加工的主流技术。

(2) 应用领域正在拓宽。特种加工的应用领域正在逐渐拓宽。例如,非导电材料的电火花加工,电火花、激光、电子束表面改性等。

(3) 广泛采用自动化技术。当前特种加工技术的主要发展趋势是充分利用计算机技术对特种加工设备的控制系统、电源系统进行优化,建立综合参数自适应控制装置、数据库等,进而建立特种加工的AD/CAM和FMS系统。用简单工具电极加工复杂的三维曲面是电解加工和电火花加工的发展方向。目前已实现用四轴联动线切割机床切出扭曲变截面的叶片。随着设备自动化程度的提高,实现特种加工柔性制造系统已成为各工业国家追求的目标。

我国的特种加工技术起步较早。20世纪50年代中期我国工厂已设计研制出电火花穿孔机床,60年代末上海电表厂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,上海复旦大学研制出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有不小差距,每年还需从国外进口300台以上高档电加工机床。

1.4 特种加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响

上述各种特种加工工艺的特点以及逐渐广泛的应用,引起了机械制造工艺技术领域内的许多变革,例如对材料的可加工性、工艺路线的安排、新产品的试制过程、产品零件的结构设计、零件结构工艺性好坏的衡量标准等产生一系列的影响。

(1) 提高了材料的可加工性。以往认为金刚石、硬质合金、淬硬钢、石英、玻璃、陶瓷等是很难加工的。现在已经广泛采用的由金刚石、聚晶(人造)金刚石制造的刀具、工具、拉丝模具,可以用电火花、电解、激光等多种方法来加工。材料的可加工性不再与硬度、强度、韧性、脆性等成直接、反比关系,对电火花、线切割加工而言,淬硬钢比未淬硬钢更易加工。

(2) 改变了零件的典型工艺路线。以往除磨削外,其他切削加工、成形加工等都必须安排在淬火热处理工序之前,这是一切工艺人员决不可违反的工艺准则。特种加工的出现,改变了这种一成不变的程序格式。由于它基本上不受工件硬度的影响,而且为了免除加工后再引起淬火热处理变形,一般都先淬火而后加工。最为典型的是电火花线切割加工、电火花成形加工和电解加工等都必须先淬火、后加工。特种加工的出现还对工序的“分散”和“集中”产生了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例,由于特种加工时没有显著的切削力,机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾。因此,即使是较大的、复杂的加工表面,往往宁可用一个复杂工具、简单的运动轨迹、一次安装、一道工序加工出来,这样做工序比较集中。

(3) 试制新产品时,采用光电和数控电火花线切割,可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮(包括非圆齿轮、非渐开线齿轮),微电机定子,转子硅钢片,各种变压器铁芯,各种特殊、复杂的二次曲面体零件。这样可以省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具以及二次工具,大大缩短了试制周期。

(4) 特种加工对产品零件的结构设计带来很大的影响。例如,花键孔、轴,枪炮膛线的齿根部分,从设计观点为了减少应力集中,最好做成小圆角,但拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利,容易磨损,所以刀齿只能设计与制造成清棱清角的齿根,而用电解加工时由于存在尖角变圆现象,可加工出小圆角的齿根。又如各种复杂冲模如山形硅钢片冲模,过去由于不易制造,往往采用拼镶结构,采用电火花、线切割加工后,即使是硬质合金的模具或刀具,也可做成整体结构。喷气发动机涡轮也由于电加工而可采用整体结构。

(5) 对传统的结构工艺性的好与坏需要重新衡量。过去认为盲孔、方孔、小孔、窄缝等是工艺性很“坏”的典型,工艺、设计人员非常“忌讳”,有的甚至认为是“禁区”。特种加工的采用改变了这种现象。而且,对于电火花穿孔和电火花线切割工艺来说,加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔,喷丝头小异形孔,涡轮叶片大量的小冷却深孔,窄缝,静压轴承、静压导轨的内油囊型腔,采用电加工后则变难为易。过去淬火前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺,淬火后这种工件只能报废,现在则可用电火花打孔、切

槽进行补救。相反有时为了避免淬火开裂、变形等影响，故意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火之后，这在不了解特种加工的审查人员看来，将认为是工艺、设计人员的“过错”，其实是他们没有及时进行知识更新，不了解特种加工的产生和发展使这种工艺安排已经成为可能。