

电火花加工—— 学以致用

(日) 今井祥人 编著

(日) 铃木俊雄 河津秀俊 后藤昭弘 著

郭常宁 译

赵万生 审校

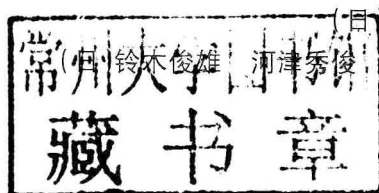
DIANHUOHUA JIAGONG XUEYIZHIYON



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电火花加工

——学以致用



今井祥人 编著
后藤昭弘 著
郭常宁 译
赵万生 审校



机械工业出版社

本书主要由基础篇和应用篇构成。基础篇对电火花加工的发展史、加工原理、电火花成形加工机床/电火花线切割加工机床的构成、加工条件、加工特性、加工控制等内容进行了介绍。应用篇通过加工实例介绍了进行实际电火花加工时所必须的步骤、自动化加工系统、加工技巧等。本书用实例介绍了电火花加工领域的新分支——微细电火花加工、电火花表面处理,以及如何利用网络向电火花加工机床用户提供服务。

本书适合电火花加工初学者、现场操作者、设计与工艺工程师及高等学校相关课程的本科生、研究生阅读。

使いこなす放電加工 (How best to utilize EDM) by Yoshihito Imai
(ISBN: 978-4-7741-4178-8 C3053)

Copyright © 2010 by Yoshihito Imai

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the publisher.

The Chinese edition Copyright © 2011 by China Machine Press

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2011-3211

图书在版编目 (CIP) 数据

电火花加工: 学以致用/ (日) 今井祥人编著; 郭常宁译.

—北京: 机械工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-111-35904-3

I. ①电… II. ①今…②郭… III. ①电火花加工 IV. ①TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 190638 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 周国萍 责任编辑: 周国萍 郑 铨

版式设计: 霍永明 责任校对: 肖 琳

封面设计: 路恩中 责任印制: 乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

148mm × 210mm · 5.75 印张 · 161 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-35904-3

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

策划编辑: (010) 88379733

社服 务 中 心: (010) 88361066

网络服务

销 售 一 部: (010) 68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

随着电火花加工方法在生产中的应用越来越广泛，电火花加工机床年产量的平均增长速度大大高于金属切削机床，越来越多的人加入到电火花加工技术的队伍中来。为了适应这种加工技术发展和应用的需要，电火花加工技术工作者推出了一些相关论著，但是适合初学者的用书还不多。

前几天，翻阅日本三菱电机今井先生等人日文版的最新专著《使いこなす放電加工》，感觉这本书的内容正是国内缺少的，于是有了翻译该书的想法。

译者多年前有过在日本留学和工作的经历，在日工作学习期间一直从事有关电火花加工方面的工作，曾经使用过三菱电机生产的电火花加工机床，对于三菱电机的电火花加工机床操作的便利性、界面的友好、查询功能，特别是对于通过网络进行技术支持，包括最新数据下载、修改、在线诊断、智能保养等颇有好感。这些功能不仅仅代表使用时的便捷，而且代表着最新网络技术在电火花加工机床中的应用。回国之后曾多次去书市，虽然看到不少关于电火花加工的书籍，但是缺少浅显易懂地介绍加工案例以及介绍加工技术与技巧并适合现场工作的初学人员使用的书籍。希望这本译书能对初学者有所帮助和启发。

译者

前言

日本的制造业构建了其他国家所无法模仿的、独特的先进生产技术，支持着日本经济发展至今。产品的加工方法是该生产技术的要素之一。伴随工业的发展，在应用切削加工和磨削加工等机械能的加工方法的基础上，电火花加工、激光加工、电子束加工等将热能集中到工件上使其熔融、汽化的热去除加工方法已进入实用阶段。

过去与电火花加工有关的工科学生和制造现场的技术人员，想对该加工方法进一步了解时，却发现没有总结性的，通俗易懂的书籍。

本书由电火花加工基础篇和应用篇组成。基础篇对电火花加工的历史和原理，电火花成形/电火花线切割加工机床的构成、加工条件、加工特性、加工控制等内容进行了介绍。应用篇在介绍电火花成形加工、电火花线切割加工的加工实例的同时，对实际加工所需的加工编程、工艺、自动化系统、加工技术等进行了讲解，并且对电火花加工的新领域——电火花微细加工、表面处理等实例，以及面向电火花加工机床用户的互联网服务进行了介绍。

希望对电火花加工有兴趣的朋友能够阅读本书，将电火花加工作为“日本制造的力量”进一步得到发展的手段加以灵活运用。

2010年2月

今井祥人

目 录

译者序

前言

基础篇 电火花加工基础知识

第1章 什么是电火花加工	2
1.1 电火花加工的历史	2
1.2 电火花加工的原理和特点	5
1.2.1 电火花加工方法概述	5
1.2.2 电火花加工的特点	7
1.3 电火花加工的过程控制	12
1.4 加工现象	15
参考文献	17
第2章 电火花成形加工机床	19
2.1 电火花成形加工法	19
2.1.1 电火花成形加工的原理	19
2.1.2 电火花成形加工技术的变迁	21
2.2 电火花成形加工机床的构成	21
2.2.1 机床的构成	21
2.2.2 加工电源及控制装置的构成	23
2.3 电火花加工条件和加工特点	27
2.3.1 与加工相关的影响因素	27
2.3.2 加工特性和加工条件	28
2.3.3 放电的分散和集中	29

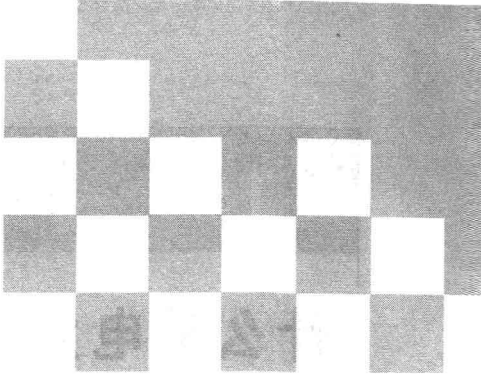
2.4 加工控制系统的特点	31
2.4.1 极间控制技术	31
2.4.2 抬刀控制技术	31
2.4.3 摇动加工技术	33
2.4.4 模糊适应控制技术	35
参考文献	39
第3章 电火花线切割加工机床	40
3.1 电火花线切割加工法	40
3.1.1 电火花线切割加工的原理	40
3.1.2 电火花线切割加工技术的变迁	41
3.2 电火花线切割加工机床的构成	42
3.2.1 机床的构成	43
3.2.2 加工电源与控制装置的构成	46
3.3 电火花线切割加工条件和加工特点	52
3.3.1 与加工相关的影响因素	52
3.3.2 微细精加工和防止电解腐蚀	55
3.4 加工控制系统的特点	58
3.4.1 防断丝控制技术	58
3.4.2 直线度控制技术	59
3.4.3 角部控制技术	60
参考文献	61

应用篇 从模具加工到表面处理

第4章 电火花成形加工	64
4.1 电火花成形加工方法	64
4.2 NC数据的生成与CAD/CAM的使用	72
4.2.1 电火花成形加工的NC数据	72
4.2.2 编程方法的发展	75
4.2.3 在加工机床上进行编程	76

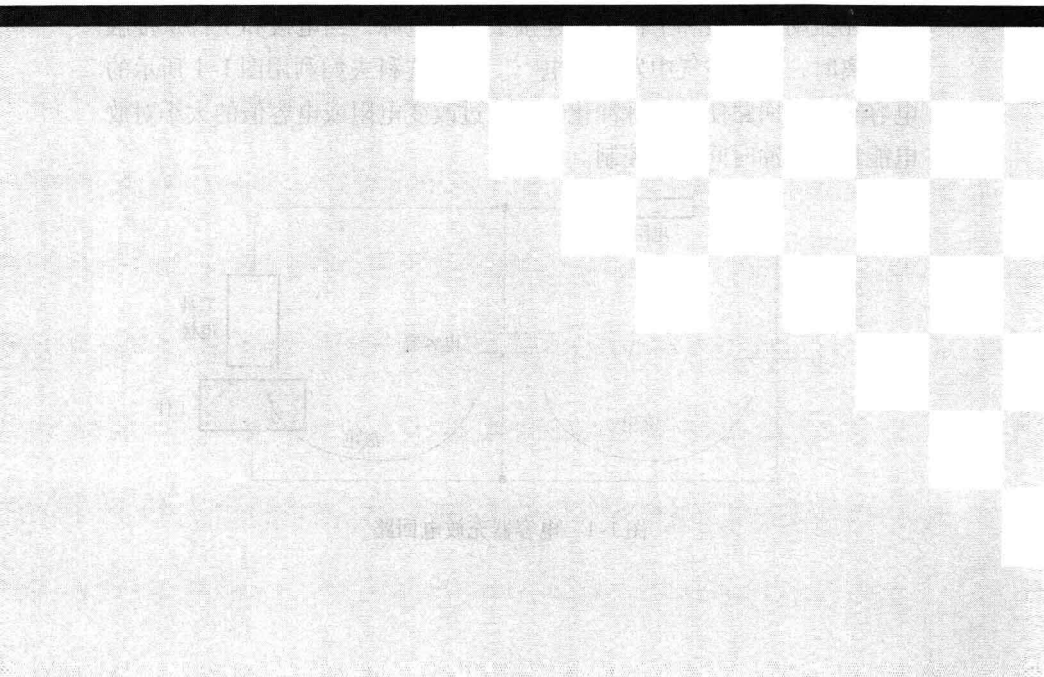
4.2.4 CAD/CAM 数据的使用	82
4.3 电火花成形加工机床的自动化、系统化	89
4.3.1 电火花成形加工前的工艺流程	89
4.3.2 辅助工序的高效化	90
4.3.3 编程作业的高效化	90
4.3.4 减少空闲时间	91
4.3.5 减少人为失误	92
4.3.6 自动化系统的效果	93
4.4 电火花成形加工的应用技术	95
4.4.1 各种工件的加工特点	95
4.4.2 工具电极材料的选择	97
4.4.3 工作液的选择	100
4.4.4 辅助作业要点	101
4.4.5 磁性底座的使用	103
4.4.6 摇动加工的要点	103
4.4.7 改善加工性能的要点	106
4.4.8 根据每个形状要素分割工具电极	108
第 5 章 电火花线切割加工	110
5.1 电火花线切割的加工方法	110
5.2 NC 数据的生成和 CAD/CAM 的使用	117
5.2.1 电火花线切割加工的 NC 数据	117
5.2.2 编程方法的发展	119
5.2.3 使用 CAD/CAM 生成 NC 数据	121
5.2.4 使用电火花线切割加工机床的功能生成 NC 数据	122
5.2.5 三维模型的使用	126
5.3 电火花线切割加工机床的自动化、系统化	129
5.3.1 电火花线切割加工的作业工序	129
5.3.2 准备作业的高效化	130
5.3.3 加工工序高效化	132
5.3.4 减少空闲时间	132

5.4 灵活运用电火花线切割加工的相关知识	134
5.4.1 各种工件的加工特点	135
5.4.2 电极丝的选择	136
5.4.3 高精度加工的要点	137
参考文献	147
第6章 电火花加工的新领域	148
6.1 微细孔电火花加工	148
6.1.1 微细孔电火花加工机床	148
6.1.2 微细孔电火花加工举例	149
6.1.3 异形孔加工实例	152
6.2 电火花表面处理	153
6.2.1 什么是电火花表面处理	153
6.2.2 MSCoating 的原理	153
6.2.3 MSCoating 涂层的特点	154
参考文献	166
第7章 使用互联网提供电火花加工技术支持	167
7.1 加工条件的下载服务	168
7.2 保养服务（智能服务）	169
7.3 未来展望	171
参考文献	172
附录 中日金属材料对照表	173



基础篇

电火花加工基础知识



第 1 章

什么是电火花加工

1.1 电火花加工的历史

电火花加工是 20 世纪 40 年代苏联科学家拉扎连科夫妇 (B. R. Lazarenko, N. I. Lazarenko) 利用电容的充放电发明的^[1]。而最初利用放电进行实际加工的是 20 世纪 30 年代美国人 V. E. Matulaitis 和 H. V. Harding。他们开发了叫做“Disintegrator”的电火花加工机床, 用这个加工机床将折断的丝锥从工件中取出。其方法是在振动的电极和工件之间连接上直流电源, 当电极和工件从接触点分离时, 则在空气中发生放电^[1]。拉扎连科夫妇利用图 1-1 所示的电容充放电回路使放电脉冲化, 并通过改变电阻或电容值的大小对放电能量或脉冲时间进行控制。

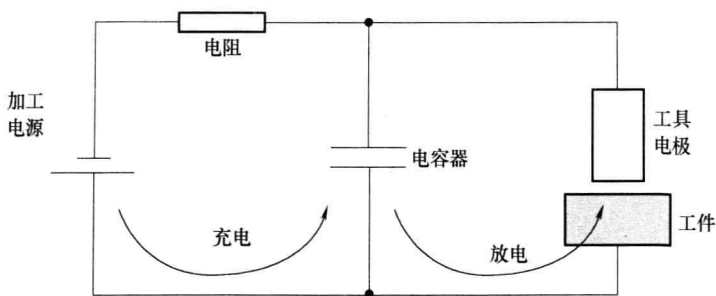
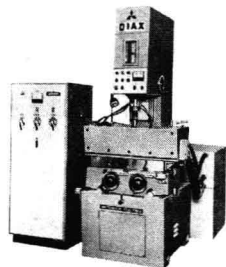
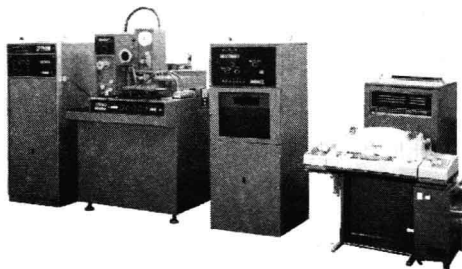


图 1-1 电容器充放电回路

欧、美、日以这个发明为契机对电火花加工进行了研究与开发,开始了电火花加工机床的产业化应用。最初的电火花加工机床产品是电火花成形加工机床,它只能使用特定形状的工具电极加工与该电极相对应的形状。此后,由于数控装置的出现,产品化的电火花线切割加工机床问世。这种加工机床将细金属丝作为工具电极,在卷送细金属丝的同时,按照事先设计好的形状进行驱动、控制加工。三菱电机的第一代电火花加工机床如图 1-2 所示。电火花成形加工机床(DM-201)于 1964 年使用半导体晶体管的脉冲电源后实现了产品化;电火花线切割加工机床(DWC50H-DNC)于 1974 年装载小型计算机后实现了产品化。从第一代电火花加工机床到现在,经历了许多技术革新,加工机床性能有了大幅度的改善。例如:电火花成形加工机床的电极进给控制在经历了应用液压、伺服电动机+滚珠丝杠、直线电动机几个阶段后,加工深度和加工精度以及加工速度有了很大提高。此外,加工电源由最初的电容回路向晶闸管电源、晶体管电源的方向发展,实现了减小电极损耗、改善加工速度和节能的功效。此外,对于加工控制,随着模糊控制理论以及工件或工具电极的 3D 数据模型的利用,实现了高适应性的加工控制^[2-6],使得复杂形状加工的放电状态能够保持常态稳定,致使加工速度、加工精度有了很大改善。将电火花加工机床与工件或电极的自动交换装置进行组合,使得模具加工向着单元化/系统化方向发展,并使得利用网络进行维护维修服务成为可能^[7]。这些技术进步在加工现场都取得了显著效果。



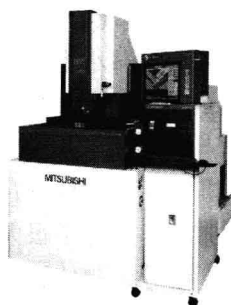
成形电火花加工机床(DM201)



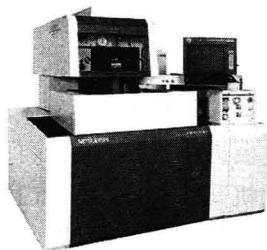
电火花线切割加工机床(DWC50H-DNC)

图 1-2 第一代电火花加工机床(三菱电机)

类似技术在电火花线切割加工机床上也同样取得了很大进步。由于采用双极性回路的加工电源^[8]对工作液的离子进行了控制，抑制了因电解现象所引起的工件表面腐蚀，使得硬质合金材料等的加工成为可能。图 1-3 所示为三菱电机最新的电火花成形加工机床（EA8PV ADVANCE）和电火花线切割加工机床（NA1200P）。关于这些加工机床的特长，在后面章节中将会涉及。



电火花成形加工机床(EA8PV ADVANCE)



电火花线切割加工机床(NA1200P)

图 1-3 最新电火花加工机床

迄今为止，颠覆常识的核心技术或新的加工技术开发也在不断取得进展，毛利尚武将这些新加工技术归纳于图 1-4^[9]。例如：对于电火花加工来说，尽管一般情况下认为非导电材料的加工是不可能的，但是对于 $\text{Si}_3\text{N}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、氧化锆、氧化铝、陶瓷等材料都有加工的可能性。虽然电火花加工被认为是去除加工，但是沉积加工、表面处理也被证实是可行的^[11]。关于图示核心技术（a）~（d）和新加工技术，在应用篇中将做介绍。

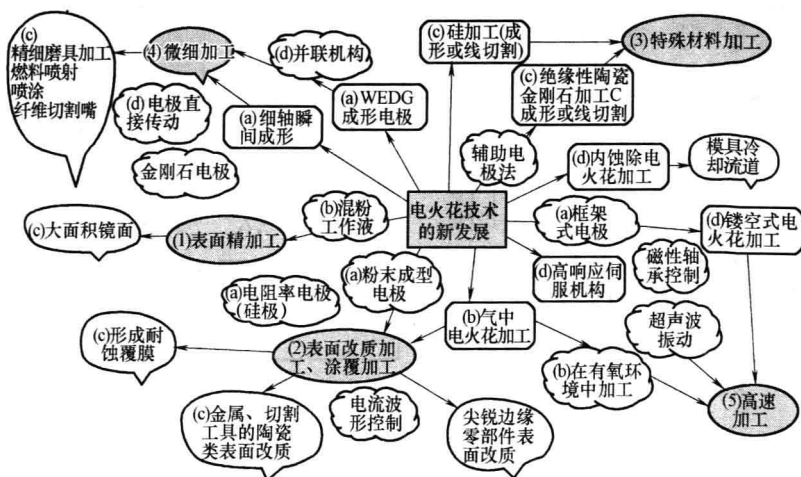


图 1-4 电火花技术的新发展

核心技术：(a) 工具电极 (b) 加工环境气体 (c) 加工对象 (d) 电极驱动机构

1.2 电火花加工的原理和特点

1.2.1 电火花加工方法概述

电火花加工的概念可表示成如图 1-5 所示。将工具电极和工件相对放置在工作液中，如果使二者之间发生放电，则产生热加工；由于放电柱中心温度可达 $6000 \sim 7000\text{K}$ ，工作液中产生的放电能量密度高，被熔化、汽化的金属就容易去除。此外，工作液还具有冷却工具电极和工件的作用，在一般情况下可以使用绝缘油或去离子水作为工作液。实际加工过程为：

- 1) 发生放电；
- 2) 汽化、熔化作用；
- 3) 汽化爆炸；

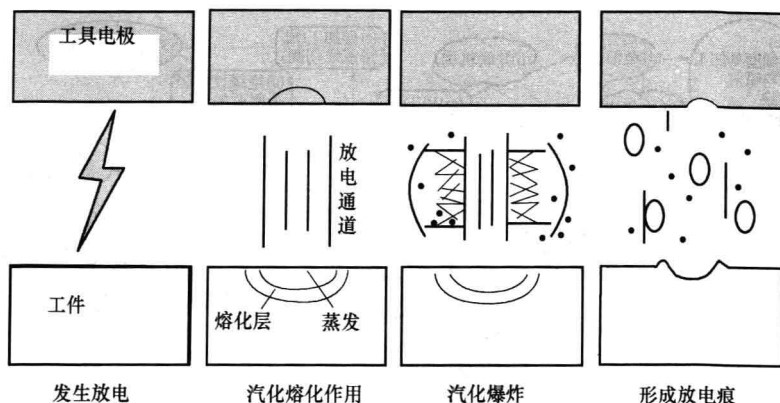


图 1-5 电火花加工的概念

4) 形成放电痕。

上述过程每秒重复发生数千次到数百万次，因此加工可以连续进行。

加工形状的生成如图 1-6 所示，在去除工件材料的同时，将电极不断进给，这样就可将电极形状复制到工件上。由于是热的及非接触式的复制加工，对高硬度材料和无韧性的材料也能进行高精度、复杂形状的三维加工。图 1-7 所示为典型的电火花加工方法。电火花成形加工（图 1-6）是将切削加工成形的铜或石墨电极的形状复制在工件上。电火花线切割加工是将直径 $0.02 \sim 0.3\text{mm}$ 的黄铜丝（更细的丝一般使用钨丝）作为工具电极，像线锯一样进行加工。电火花铣削

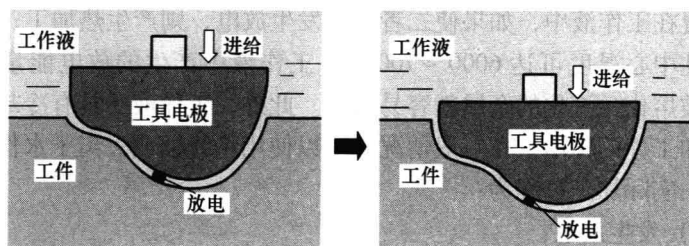


图 1-6 制作加工形状

加工是用简单形状电极（管状电极等）代替成形电极，利用数控使电极进行扫描，从而加工出复杂形状（2.5 维形状）^[13]。



图 1-7 典型的电火花加工方法

另外有人根据电火花线切割加工的原理提出线电极电火花磨削（WEDG）加工的方法，使得微细工具电极的制作变得容易，从而实现了微细电火花加工。图 1-8 ~ 图 1-11 分别表示电火花成形加工、电火花线切割加工、电火花铣削加工和微细孔电火花加工的实例。在微细孔加工实例中，为了便于理解如图 1-11 所示的微细加工，采用磁支撑执行器高速驱动微细电极，在直径 0.5mm 的活动铅笔芯上进行放电，所加工出的直径为 0.08mm 的两排孔。

1.2.2 电火花加工的特点

由电火花加工的原理可知，与机械加工相比具有以下特点：

优点：

- 1) 只要是导电性材料，则加工与工件硬度无关。
- 2) 受加工形状限制少（复杂形状、沟槽、深孔等）。
- 3) 即使是薄壁工件、脆性工件也可以加工。
- 4) 可加工小圆角或异形形状。
- 5) 可直接加工曲面。
- 6) 加工精度可达 $\pm 0.001\text{mm}$ ，精加工表面粗糙度可达 $Rz\ 0.0005\text{mm}$ 。

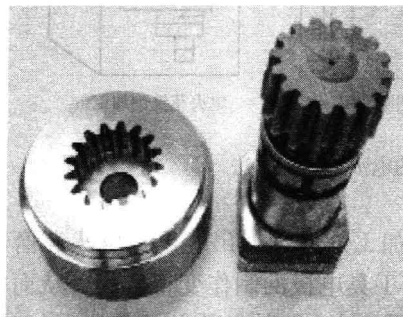
工具电极：铜钨

工件：钢 (SKD61)

表面粗糙度： $Rz3.0\mu\text{m}$, $Ra0.46\mu\text{m}$

收缩范围：0.07mm/单边

加工时间：15h



齿轮加工

工具电极：铜 (2根)，直径8mm

工件：钢 (STAVAX)

表面粗糙度： $Rz0.5\mu\text{m}$, $Ra0.08\mu\text{m}$

加工深度：1mm

加工时间：50min/个



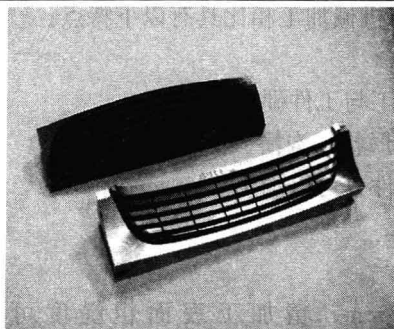
透镜模具形状抛光加工

工具电极：石墨 (2根)

工件：钢 (S55C)

表面粗糙度： $Rz12\mu\text{m}$, $Ra1.8\mu\text{m}$

加工时间：28h (包括粉末加工)



汽车前隔栅加工

工具电极：铜

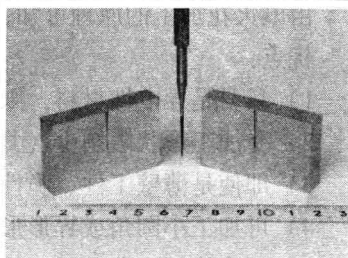
工件：钢 (NAK80)

表面粗糙度： $Rz1.0\mu\text{m}$, $Ra0.15\mu\text{m}$

收缩范围：0.07mm/边

长度：20mm

加工时间：1h50min



微细孔加工

图 1-8 电火花成形加工实例