

中图分类号: TG662
学科分类号: 080201

论文编号: 1028705 09-0110

硕士学位论文



活动模板微小群孔电解加工 技术研究

研究生姓名 孙 毅

学科、专业 机械制造及其自动化

研究 方 向 精密、微细特种加工技术

指 导 教 师 曲宁松 教授

南京航空航天大学

研究生院 机电学院

二〇〇九年三月

中图分类号: TG662

学科分类号: 080201

论文编号: 102870509-0110

硕士学位论文

活动模板微小群孔电解加工 技术研究

研究生姓名	孙毅
学科、专业	机械制造及其自动化
研究方向	精密、微细特种加工技术
导师姓名	曲宁松 教授

南京航空航天大学

研究生院 机电学院

二〇〇九年三月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Mechanical and Electrical Engineering

Multiple Micro-holes Produced by Electrochemical Machining with dynamic template

A Dissertation in
Mechanical Engineering

by

Sun Yi

Advised by

Prof. Qu Ningsong

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

Spring, 2009

承诺书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其它个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名： 3133

日 期： 2009.3.19

摘 要

电解加工 (*Electrochemical Machining, ECM*) 是利用金属在电解液中可以发生阳极溶解的原理, 将工件加工成形的一种技术。在电解加工过程中, 工件阳极金属不断失去电子成为离子进入到溶液当中, 工件材料的减少过程是以离子形式进行的, 由于金属离子的尺寸非常微小, 因此这种微溶解去除方式使得电解加工在金属微细制造领域有着广泛的应用前景。

本文以航空航天领域中使用的微小群孔结构为研究对象, 采用阴极模板双面电解加工微小群孔结构, 分析了该种加工方法的特点, 研究了阴极模板双面电解加工微小群孔的一些关键问题, 所完成的主要工作如下:

1、建立了双面照相电解电场数学模型, 并对阳极工件表面进行了有限元电场分析, 结果表明: 加工区域电场分布呈中间弱两侧强的态势, 绝缘层厚度愈厚, 电场分布愈均匀, 群孔锥度愈小; 阴极孔径愈大, 群孔锥度愈小。

2、设计了电解液循环系统和电解加工夹具, 制作了镀有铬层的阴极模板。

3、以群孔圆度误差、群孔尺寸均匀性以及群孔平均锥度作为评判群孔加工精度的标准, 研究了夹紧凸起间距、流道深度、绝缘层厚度、脉冲占空比、电解液压力等工艺参数对群孔加工精度的影响, 结果表明: 采用小的夹紧凸起间距、小的占空比以及高的电解液压力、适当的流道深度和绝缘层厚度, 均能提高群孔加工的尺寸均匀性以及群孔平均锥度; 在同等试验参数下, 阴极孔径越大, 加工出的群孔尺寸均匀性越好、平均锥度越小。

4、提出了采用弹性材料制作夹紧凸起的方法, 加工出的多孔径微小群孔具有更高的加工精度。

关键词: 微小群孔, 电解加工, 照相电解, 双面电解, 有限元

Abstract

Electrochemical Machining (ECM) is a processing technology, in which the metallic workpiece as anode is produced based on anodic dissolution in electrolyte. It appears to be a very promising metallic micro-manufacturing technology, because the process could machine the material ion by ion.

Methods of machining multiple micro-holes are described in the dissertation. The method to produce micro-holes by electrochemical machining with reused template is proposed. Key techniques of machining group holes are mainly investigated. The works have been done as follows:

1. Mathematical model of the Photographic ECM electric field has been established. Electric field distribution on the anode surface has been analyzed by using finite element method (FEM). The results show that the electric field distribution of the processing region is weak in the center while strong on both sides. The thicker the insulating layer is, the more uniformity of the electric field is and the smaller taper the holes are. With the same size insulating layer, the greater the cathode aperture is, the smaller taper the holes are.

2. An ECM system for electrolyte circulation has been established. The fixtures of ECM and chrome-plated layer cathode template have been designed and produced.

3. The roundness error, size uniformity, and average taper of multiple micro-holes have been used to characterize hole's machining accuracy. The effects of protruding space, duty cycle, electrolyte pressure, flow channel depth, and insulation thickness on machining accuracy have been investigated. Results indicate that the machining accuracy could be improved with smaller protruding space, smaller duty cycle and higher electrolyte pressure. Appropriate flow channel depth and insulation thickness are also necessary. Under the same experimental parameters, the greater the cathode aperture is, the better the processing accuracy is.

4. The Flexible protuberances have been introduced to enhance the adherence between the workpiece and the fixture. The experimental results show that the machining accuracy of multi-diameter micro holes could be obtained with elastic clamping.

Keywords: multiple micro-holes, ECM, photographic ECM, double-sides ECM, FEM

符号索引

符号	物理意义	单位
i	加工电流密度	A/mm^2
Q	加工过程通过的电量	C
k	元素的质量电化学当量	$g/A \cdot s$
F	法拉第常数	C/mol
z	化合价	
η	电流效率	
A	相对原子质量	
t	加工时间	s
ω	体积电化学当量	$mm^3/A \cdot s$
v	工件蚀除速度	cm/s
ρ	加工间隙间的电阻率	$\Omega \cdot cm$
Δ_0	初始加工间隙	cm
y	电解加工深度	cm
S	群孔标准差	mm
D_i	某个孔小径	mm
$\bar{D}$	群孔平均直径	mm
N	群孔个数	
θ	微小孔的锥度	$^\circ$
D_1	微小孔的小径	mm
D_2	微小孔的大径	mm
T	工件厚度	mm
$\bar{\theta}$	群孔平均锥度	$^\circ$
θ_i	第 i 个孔的锥度	$^\circ$
U	阴、阳极之间的电压	V
U_R	间隙电解液中的电压降	V
γ	电解液电导率	$1/\Omega \cdot cm$
E	弹性模量	Gpa
I	截面的轴惯性矩	mm^4

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 微细加工技术	1
1.2.1 硅微细加工技术	1
1.2.2 LIGA 和准 LIGA 技术	2
1.2.3 微细机械加工技术	3
1.2.4 微细电解加工技术	4
1.2.5 微细电火花加工技术	5
1.2.6 激光微细加工技术	6
1.3 微小群孔结构及其加工方法	7
1.3.1 微小群孔结构的特点及应用	7
1.3.2 微小群孔结构的加工方法	8
1.4 课题的研究意义及主要内容	11
1.4.1 课题的研究目的及意义	11
1.4.2 课题的主要研究内容	12
第二章 活动模板电解加工理论基础	13
2.1 电解加工基础理论	13
2.1.1 法拉第定律	13
2.1.2 电极/溶液界面双电层	14
2.1.3 阳极极化	15
2.2 电解加工工艺原理及特点	16
2.2.1 电解加工电化学原理	16
2.2.2 电解加工的特点	17
2.3 阴极活动模板双面电解加工机理	18
2.3.1 阴极活动模板双面电解加工机理	18
2.3.2 影响阴极活动模板电解加工精度的因素	19
2.4 电解加工有限元电场分析	21
2.5 本章小结	24
第三章 活动模板电解加工工艺系统	25
3.1 电解加工装备	25

3.1.1 电解加工机床	25
3.1.2 电解加工电源	26
3.1.2.1 直流电源	26
3.1.2.2 斩波器	26
3.1.3 电解液循环系统	28
3.1.3.1 电解液系统	28
3.1.3.2 冲液方式设计	30
3.1.3.3 电解液流速和冲液压力的确定	31
3.1.3.4 电解液选择	33
3.2 电解夹具设计	34
3.3 阴极模板制作	35
3.3.1 模板材料	35
3.3.2 阴极模板制作	36
3.4 本章小结	37
第四章 多孔径微小群孔电解加工工艺研究	39
4.1 群孔加工试验介绍及分析	39
4.1.1 衡量群孔加工质量的标准	39
4.1.2 单面加工与双面加工方法的比较	40
4.2 多孔径微小群孔电解加工试验及分析	41
4.2.1 试验介绍	41
4.2.2 夹具状态对加工结果的影响	42
4.2.2.1 夹紧凸起间距对加工结果的影响	42
4.2.2.2 流道深度对加工结果的影响	44
4.2.3 绝缘层厚度对加工结果的影响	47
4.2.4 占空比对加工结果的影响	50
4.2.5 电解液压力对加工结果的影响	52
4.3 弹性夹紧状态多孔径微小群孔加工	54
4.4 本章小结	55
第五章 总结与展望	56
5.1 本文的主要结论	56
5.2 对本课题研究的展望	56

参考文献..... 58

致谢..... 61

攻读学位期间发表的学术论文..... 62

图表索引

图 1.1 浅沟槽的干法刻蚀	2
图 1.2 LIGA 技术的工艺流程.....	3
图 1.3 LIGA 技术制造的微结构.....	3
图 1.4 超精密车削加工的结构	3
图 1.5 高频脉冲电解加工的微结构	4
图 1.6 微细电解加工的微结构	5
图 1.7 微细电火花加工的微结构	6
图 1.8 激光加工的金属微结构	7
图 1.9 采用机械钻削方法获得的微小孔.....	8
图 1.10 电火花反拷法加工群电极流程示意图.....	9
图 1.11 微细电火花群孔加工.....	10
图 1.12 电射流群孔加工	10
图 1.13 掩膜微细电解加工工艺流程图	11
图 1.14 掩膜微细电解加工出的微细结构	11
图 2.1 STERN 双电层模型.....	14
图 2.2 三种典型的阳极极化曲线	15
图 2.3 电解加工原理简图	16
图 2.4 电解加工成型原理示意图	17
图 2.5 活动模板电解加工示意图	18
图 2.6 模板电解孔加工示意	20
图 2.7 电场分析的数学模型	21
图 2.8 不同绝缘层厚度的有限元电场分析.....	22
图 2.9 不同阴极孔径的有限元电场分析.....	23
图 3.1 电解加工机床	25
图 3.2 直流电源	26
图 3.3 斩波器功能操作流程图中.....	27
图 3.4 试验所用斩波器外观	28
图 3.5 电解液系统示意图	28
图 3.6 SV 立式不锈钢多级离心泵	29
图 3.7 试验所用电解液槽	30

图 3.8 正流式加工	30
图 3.9 正流式冲液加工的群孔	31
图 3.10 侧流式加工	31
图 3.11 三种电解液的 H-I 曲线	33
图 3.12 不同电解液加工的群孔结构	34
图 3.13 试验夹具简易示意图	35
图 3.14 试验所用夹具	35
图 3.15 工具阴极制作流程	37
图 3.16 工具阴极模板	37
图 3.17 PCB 钻铣床	37
图 4.1 微小孔结构及其锥度	40
图 4.2 加工方式不同对群孔精度的影响	41
图 4.3 采用 4 组与 6 组凸起夹紧的夹具	42
图 4.4 简支梁结构	43
图 4.5 夹紧凸起行数不同加工出的多孔径群孔	43
图 4.6 凸起行数对群孔尺寸均匀性的影响	44
图 4.7 凸起行数对群孔平均锥度的影响	44
图 4.8 流道深度对群孔圆度的影响	45
图 4.9 流道深度对群孔尺寸均匀性的影响	45
图 4.10 流道深度不同下加工出的多孔径群孔	46
图 4.11 流道深度对群孔平均锥度的影响	47
图 4.12 绝缘层厚度对群孔尺寸均匀性的影响	48
图 4.13 绝缘层厚度对群孔平均锥度的影响	48
图 4.14 绝缘层厚度对群孔圆度误差的影响	48
图 4.15 绝缘层厚度不同下加工出的多孔径群孔	49
图 4.16 占空比对群孔尺寸均匀性的影响	50
图 4.17 占空比对群孔平均锥度的影响	50
图 4.18 占空比对群孔圆度误差的影响	50
图 4.19 占空比不同加工出的多孔径群孔	51
图 4.20 电解液压力对群孔尺寸均匀性的影响	52
图 4.21 电解液压力对群孔平均锥度的影响	52

图 4.22 电解液压力不同加工出的多孔径群孔..... 53

图 4.23 电解液压力对群孔圆度误差的影响..... 54

图 4.24 电解液压力为 0.2MPa 时的部分孔..... 54

图 4.25 弹性夹紧状态下加工的微小群孔..... 55

表 3.1 环氧玻璃布覆铜板（FR-4）性能指标..... 36

表 4.1 凸起行数对群孔圆度误差的影响..... 44

表 4.2 不同流道深度下对应的电解液流速..... 45

表 4.3 不同流道深度下群孔平均孔径 47

第一章 绪论

1.1 课题背景

随着现代科学技术和工业制造技术的发展，高新技术产品逐渐向多功能、超精密、微小化方向发展，微小尺寸结构的应用日益广泛。微小群孔阵列作为一种典型的微细结构，在机械电子、仪器仪表、航空航天、光学及纺织等行业的使用越来越多，如航空航天惯性陀螺中的仪表元件、高速打印机喷嘴板、光导纤维连接器、化纤喷丝板、航空发动机高压压气机空气导管内的阻尼衬套、加力燃烧室的防振、隔热屏、高压涡轮机的前轴阻尼筒和后轴阻尼环等。

电解加工（Electrochemical Machining, ECM）是基于电解过程中的阳极溶解原理并借助于成型的阴极，将工件按一定形状和尺寸加工成型的一种工艺方法^[1]。材料的去除过程是以离子尺度进行的，因此电解加工的这种以离子去除的微溶解的减材方式非常适合微细结构的加工^[2]。采用电解加工方法制造微小群孔结构对于提高微小群孔结构的加工精度和加工效率具有重要意义。

1.2 微细加工技术

微细加工是微细结构的实现基础和技术关键，是当今制造业最为活跃的研究方向之一^[3]。微细加工技术除了主要加工尺度集中在微米级外，对于零件的表面质量，加工影响区和残余应力等也有严格的要求，并逐步向纳米尺度领域拓展^[3,4]。

在微小型化技术领域，依据微机械的特征尺寸可将其划分为 0.001~1 μm 的纳米机械，0.001~1mm 的微型机械和 1~10mm 的微小型机械^[5]；相应地依据零件特征尺寸可分为纳米尺度(0.1~100nm)、微米尺度(0.1~100 μm)和介于宏微之间的中间尺度(0.1~100mm)^[6-8]。目前，微细加工技术主要包括硅微细加工技术、超精密机械加工、LIGA 和准 LIGA 技术以及特种微细加工技术等。

1.2.1 硅微细加工技术

硅微细加工技术，它来源于集成电路加工技术，是 IC 制造技术的扩展技术，它是微传感器、微执行器以及微机电系统（MEMS）的关键加工技术^[9]。硅微细加工技术主要是指以硅材料为基础制作各种微机零部件^[10]，它是由集成电路的二维平面加工工艺发展而成的微三维加工技术，其主要内容有：体硅微细加工技术，表面硅微细加工技术和键合技术。这些技术在实际应

用过程中还要借助于集成电路加工工艺，如光刻、扩散、离子注入、外延和淀积等技术。体硅微细加工技术以单晶硅材料为加工对象，通常利用硅腐蚀的各向异性来制造各种几何结构，再通过键合技术将两部分硅的微结构结合在一起形成机电装置。当腐蚀剂为液体时所进行的腐蚀称为湿法腐蚀，腐蚀剂为气体时则称为干法腐蚀，图 1.1 为浅沟槽的干法刻蚀。表面硅微细加工技术是以硅片为基体，利用微电子技术中的氧化、沉积、光刻、腐蚀等工艺，在硅片表面上形成多层薄膜图形，然后把下面的牺牲层腐蚀掉，以保留上面的微结构图形^[11]，其特点是可以充分利用集成电路工艺中大量成熟的工艺技术，缺点是加工出的微结构深度比较小^[12]。固相键合技术，简称键合技术，是指不用液态粘连剂而将两块固体材料连接在一起而且键合过程中材料始终处于固相状态的一种加工方法，主要包括静电键合和直接键合两种。

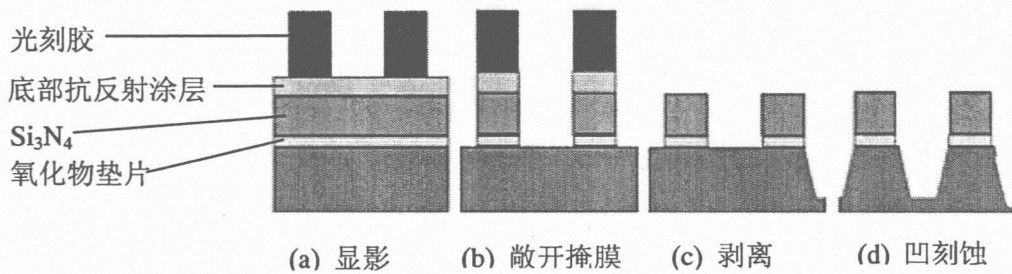


图 1.1 浅沟槽的干法刻蚀

1.2.2 LIGA 和准 LIGA 技术

为了能够产生高深宽比的三维微结构，八十年代末德国卡尔斯鲁尔核研究中心W. Ehrfeld 教授等人首次提出了LIGA技术^[13]，又称为X-ray-LIGA。其后，美国H.Guckel等人在以后的几年里研究并提出了使用深紫外光代替同步X射线的准LIGA技术^[14]。LIGA和准LIGA技术已成为制造高深宽比金属微结构件的主要方法。

LIGA技术(德文Lithographic, Galvanoformung, Abformung的缩写)是一种综合的三维超微细加工工艺，是进行非硅材料三维立体微细加工的首选工艺^[15]，它由深度同步辐射X射线光刻、微电铸和微塑铸三大主要工艺构成，即首先利用同步辐射X射线光刻技术光刻出所要求的图形，然后利用电铸方法制作出与光刻胶图形相反的金属模具，再利用微塑铸制备微结构。

LIGA技术制作金属微结构的工艺流程图如图1.2所示，主要包括涂胶—X射线深度光刻—显影—微电铸成型—去胶等步骤。采用LIGA技术可以加工任意截面形状的结构，能够制造出厚度达1500 μm 、深宽比大于500、侧壁垂直度达89.9度以上金属三维立体结构，是微细加工技术的重要加工手段。图1.3(a)是用LIGA技术制作的衍射光栅，间距5.3 μm ，高度28 μm ，有效面积60 $\times$ 60mm^[16]；图1.3(b)是用LIGA技术制作的镍铁合金微齿轮系统^[17]。

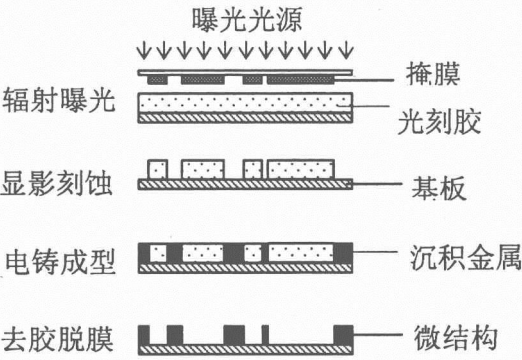
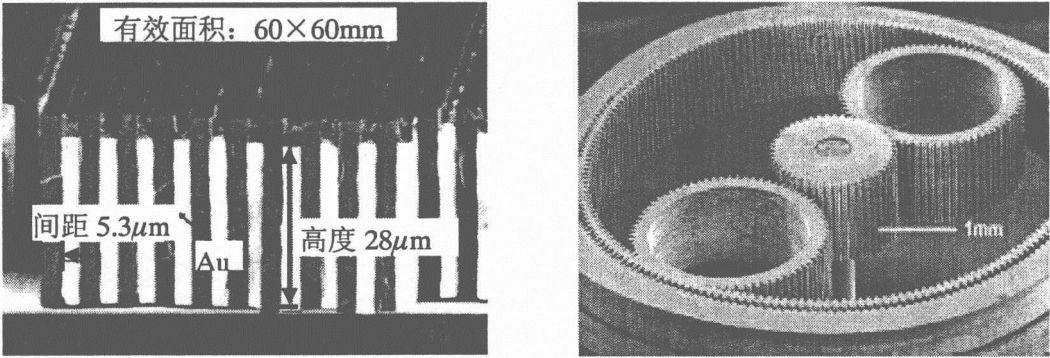


图 1.2 LIGA 技术的工艺流程

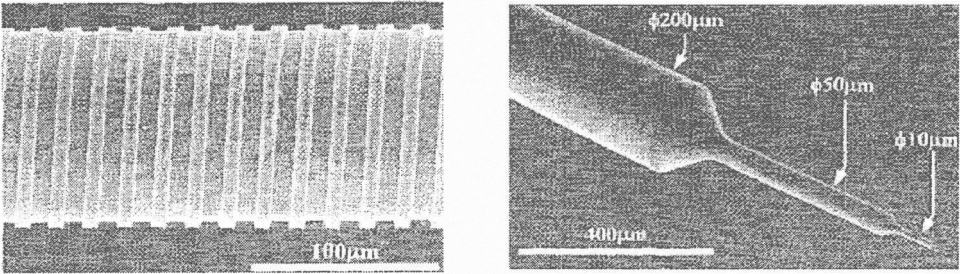


(a) 衍射光栅微结构 (b) 微齿轮系统

图 1.3 LIGA 技术制造的微结构

1.2.3 微细机械加工技术

微细机械加工技术是利用刀具改变材料形状或破坏材料表层，以切屑形式去除来达到所要求的形状。也就是说，从被加工表面取出一微量的表面层，包括超精密切削、超精密磨削以及超精密特种加工等^[18]。微细机械加工的主要特点在于可实现复杂三维形体的加工，已成功地制作出尺寸 10~100μm 的微小三维构件^[9]。图 1.4 (a)、(b) 分别为日本学者 Y.Yamagata 用精密车削技术加工出的直径 100μm 铝合金螺纹以及轴端直径为 10μm 的阶梯轴^[19]。



(a) 直径 100μm 螺纹 (b) 轴端直径 10μm 的阶梯轴

图 1.4 超精密车削加工的结构

1.2.4 微细电解加工技术

电解加工（Electrochemical Machining, ECM）是利用金属在电解液中可以发生阳极溶解的原理，将工件上多余的材料蚀除掉，材料的去处过程是以离子尺度进行的，金属离子的尺寸通常小于十分之一纳米，因此电解加工的这种以离子去除的微溶解的减材方式非常适合微细结构的加工^[2]。微细电解加工技术利用电化学微溶解原理，使工件材料被溶解蚀除，从而达到对零件的形状、尺寸和加工精度要求。微细电解加工具有以下特点：加工过程中工具与工件不发生直接接触，工具电极无损耗；加工效率高，加工表面质量好；工件表面不会产生加工应力、变形以及热影响区^[1,20,21]。

加工间隙是影响电解加工精度的核心工艺参数^[1]。目前，提高电解加工精度可以通过采取脉冲电源、辅助阳极、低浓度电解液、减小加工电压、振动进给加工等措施来改善^[22-25]，并取得了较好效果。

近些年来，欧洲、美国、韩国及日本等国家对于微细电解加工技术进行了大量的研究，取得了长足的进展。图 1.5 所示为各国科学工作者利用微细电解方法加工的微细结构。波兰学者 Kozak 和美国学者 Rajurkai 等研究了成型电极下不同形状特征脉冲电解加工的复制精度，并利用简单柱状电极的数控运动进行了成形加工，如图 1.5（a）所示^[20]。南京航空航天大学的徐惠宇等针对微细电解加工的特点，设计研制了微细电解加工机床，利用自制的夹具和阴极加工出了具有辐射状微细群缝结构的工业产品，如图 1.5（b）所示^[26]。

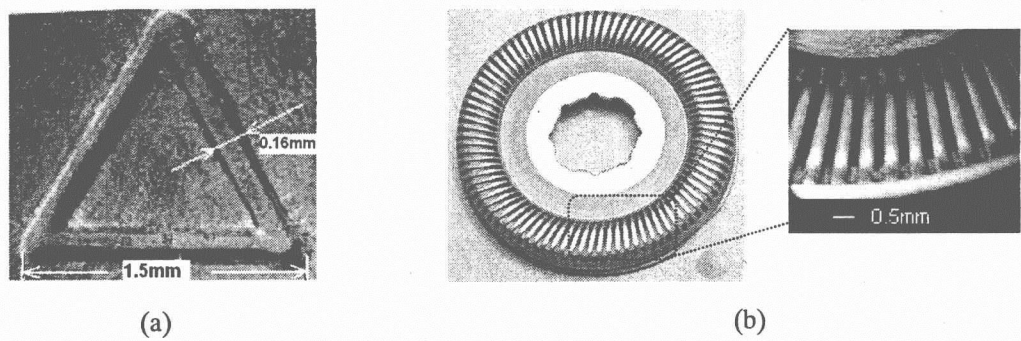


图 1.5 高频脉冲电解加工的微结构

日本的 Chikamori 等使用低浓度电解液、低的加工电压和脉冲电源，并采取脉冲宽度期间微量加工进给，脉冲间隙期间抬刀冲液的方法进行微细电解加工，电极采用压电陶瓷驱动，可以达到较高的加工精度，但加工效率较低，图 1.6（a）是采用此方法加工得到的微方孔^[27]。德国的 Förster 等利用工具电极在进给方向上的振荡运动加快了电解产物的排出，提高了微细电解加工的成型精度，并使用三维成型电极加工出如图 1.6（b）所示的复杂形腔，振荡频率为 50Hz，振幅为 200 μm ^[28]。