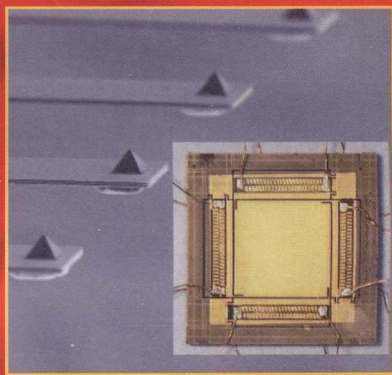




“十二五”国家重点图书出版规划项目  
21世纪先进制造技术丛书

# 微纳米制造技术及应用

· 张德远 蒋永刚 陈华伟 秦威 等 编著 ·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
21世纪先进制造技术丛书

# 微纳米制造技术及应用

张德远 蒋永刚 陈华伟 秦威 等 编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了微纳米制造领域涉及的各类加工技术及其应用特点。全书共7章:第1章介绍了微纳制造技术的应用和分类;第2章介绍了微细机械加工和基于高能束的微细加工技术;第3章阐述了各类表面成膜与改性技术;第4章介绍了光刻、刻蚀、键合封装等半导体加工工艺;第5章介绍了微纳压印加工的各种方法;第6章阐述了各种纳米结构自组装成形技术;第7章介绍了生物去除加工、生物约束成形、生物复制成形等新型微纳加工方法。

本书具有很强的针对性、实用性和指导性,可以作为机械工程、微系统工程、微电子等领域工程技术人员的参考资料,也可以作为高等院校机械工程、仪器科学与工程、材料科学、化学等专业本科生及研究生的教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

微纳米制造技术及应用/张德远等编著. —北京:科学出版社,2015  
(“十二五”国家重点图书出版规划项目:21世纪先进制造技术丛书)  
ISBN 978-7-03-045751-6

I. ①微… II. ①张… III. ①纳米技术 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 225206 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:桂伟利  
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年10月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:318 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

**主 编:**熊有伦(华中科技大学)

**编 委:**(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

张宪民(华南理工大学)

王 煜(香港中文大学)

周仲荣(西南交通大学)

王田苗(北京航空航天大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

查建中(北京交通大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

柳百成(清华大学)

王越超(中科院沈阳自动化所)

钟志华(湖南大学)

冯 刚(香港城市大学)

顾佩华(汕头大学)

冯培恩(浙江大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

任露泉(吉林大学)

黄 田(天津大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

黄 真(燕山大学)

江平宇(西安交通大学)

黄 强(北京理工大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

管晓宏(西安交通大学)

李泽湘(香港科技大学)

雒建斌(清华大学)

李涤尘(西安交通大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

谭建荣(浙江大学)

宋玉泉(吉林大学)

熊蔡华(华中科技大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

翟婉明(西南交通大学)

## 《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '谢有怡' (Xie Youyi). The characters are written in a fluid, cursive style.

华中科技大学

2008年4月

## 前 言

产品或系统的微型化是人们永恒的追求,从 13 世纪开始,制表工匠就开始尝试微小型化的工艺。20 世纪 50 年代前后,晶体管和集成电路的发明推动了半导体工艺的高速发展,“半导体芯片上集成的晶体管和电阻数量将每年增加一倍”的摩尔定律至今仍在持续。1959 年,著名物理学家 Richard P. Feynman 在其“*There’s Plenty of Room at the Bottom*”的演讲中首次提出微系统化的概念,微机电系统(MEMS)技术也随着硅压阻式压力传感器的开发登上制造技术史的舞台,并发展出深硅加工、阳极键合等多种微纳制造新技术。80 年代开始出现的表面工程技术在提高材料表面的物理和化学性能方面获得广泛的应用,在学术界逐渐出现了界面科学与技术这一新学科。近年来,各种仿生功能表面及其新型制造技术不断涌现,出现了仿生与生物微纳制造新方向。由此可见,微纳制造技术广涵于机械制造、表面工程、半导体工艺、微机电系统、仿生与生物制造等各个领域,其技术手段也随着相关学科的发展而不断丰富。

然而,目前的教材和专著一般仅关注某一领域的微纳制造技术。例如,微纳米尺度制造工程专业图书多聚焦在微电子和微机电系统制造方面;表面工程专业图书多专注于传统大型零件的表面成膜与改性问题;微机械与微特种加工也有自成体系的教材和专著。本书力图融汇各个领域的微纳制造技术于一体,使读者通过阅读本书获得对微纳制造的全面认识;通过准确凝炼各种微纳制造技术的原理、工艺过程与应用特点,以及选择典型的应用实例,使读者可以深度了解相关加工工艺的现状和水平。因此,特别适合作为机械工程、仪器科学与工程、材料科学等方向的本科生专业教材和研究生微纳制造导论性教材。本书本质上是一个简明版的微纳制造工艺库,章节编排合理、逻辑清晰、通俗易懂,同时也可作为微纳制造及相关领域广大科技工作者的参考书。其中,有关超声振动微机械加工、生物加工成形相关内容,是作者三十余年科研工作的结晶,属原创性内容。在半导体加工工艺等方面列举的一些加工案例,也有不少是作者曾工作过的 Esashi 教授实验室的独创成果。当然,书中还有部分章节是在作者广泛阅读和参考大量图书和文献的基础上编写而成的。在使用他人论述或成果时,均力求列出明确的文献出处,方便读者延伸阅读,穷原竟委。

本书正是基于上述背景和理由编写而成。全书共 7 章,第 1 章介绍微纳制造的应用和分类,由张德远教授编写;第 2 章介绍微细机械加工和高能束加工的相关内容,由张德远教授和秦威博士合作编写;第 3 和 4 章分别介绍薄膜和半导体加工

工艺的相关技术,由蒋永刚副教授编写;第5章介绍微纳压印加工的各种方法,由陈华伟副教授编写;第6章讲述各种纳米结构自组装成形方法,由乐悦博士编写;第7章介绍生物去除加工、生物约束成形、生物复制成形等新型微纳加工技术,由陈华伟副教授和蔡军教授合作编写。全体作者共同参加了各章节的审阅和修改,张德远教授和蒋永刚副教授完成了最终的审校。

本书的部分内容是在国家自然科学基金项目研究成果的基础上编写而成,特别感谢国家自然科学基金重大项目(51290292)的资助与支持。

同时,对书中所引用文献的作者表示深切的谢意。在资料收集、图文修订过程中得到了实验室多位同学的大力协助,相关单位同仁也对本书内容提出了许多建设性意见,在此一并表示感谢。

作者

2015年7月



# 目 录

## 《21 世纪先进制造技术丛书》序

### 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微纳制造技术的应用	2
1.1.1 日常生活中的微纳制造技术	2
1.1.2 医疗器械中的微纳制造技术	3
1.1.3 国防产品中的微纳制造技术	4
1.2 微纳制造技术的发展趋势	4
1.3 微纳制造技术的领域划分	6
1.4 本书的主要内容及写作意图	9
参考文献	9
第 2 章 微细机械加工技术	11
2.1 微细切削加工技术	11
2.1.1 微细切削机理	11
2.1.2 金刚石刀具	18
2.1.3 微细超声椭圆振动车削加工	21
2.1.4 微细铣削加工	29
2.1.5 微细车铣复合加工	33
2.1.6 微细钻、攻加工	35
2.1.7 微细磨、研、喷加工	39
2.1.8 微型加工设备	44
2.1.9 微细切削加工的技术特点	47
2.2 微细电火花加工技术	50
2.2.1 微细电火花加工的原理	50
2.2.2 微细电极的在线制作	52
2.2.3 微细电火花加工装备	53
2.2.4 微细电火花切削加工	55
2.2.5 微细电火花线切割加工	57
2.3 微细高能束加工技术	59
2.3.1 微细激光加工	59
2.3.2 微细电子束加工	61

2.3.3 微细离子束加工 .....	65
2.4 典型件微细机械加工 .....	68
参考文献 .....	68
<b>第3章 表面成膜与增材制造技术 .....</b>	<b>72</b>
3.1 气体放电与等离子体 .....	72
3.1.1 等离子体的产生 .....	72
3.1.2 直流辉光放电 .....	74
3.1.3 高频放电 .....	75
3.2 表面物理气相沉积成膜 .....	75
3.2.1 蒸发镀膜 .....	76
3.2.2 溅射镀膜 .....	82
3.2.3 PVD技术特点与应用比较 .....	85
3.3 化学气相沉积成膜 .....	86
3.3.1 化学气相沉积 .....	86
3.3.2 热CVD .....	87
3.3.3 等离子体增强CVD .....	90
3.3.4 光CVD .....	92
3.3.5 原子层沉积 .....	93
3.3.6 金属有机化合物CVD .....	94
3.3.7 金属CVD .....	94
3.3.8 功能材料CVD .....	95
3.3.9 CVD技术小结 .....	97
3.4 表面化学液相沉积成形 .....	97
3.4.1 表面电镀与电铸 .....	97
3.4.2 表面化学镀 .....	100
3.4.3 溶胶-凝胶法 .....	103
3.5 3D打印技术 .....	104
3.5.1 3D打印技术的基本原理 .....	104
3.5.2 微电子器件喷印技术 .....	105
3.5.3 树脂3D打印成形技术 .....	105
3.5.4 金属3D打印成形技术 .....	106
3.6 表面涂装与热喷涂 .....	108
3.6.1 表面涂装概述 .....	108
3.6.2 特殊涂装工艺 .....	109
3.6.3 热喷涂 .....	110

3.7 表面改性技术 .....	112
3.7.1 表面氧化 .....	112
3.7.2 表面扩散 .....	114
3.7.3 离子注入 .....	116
3.8 表面成膜技术的典型应用 .....	117
3.8.1 飞机座舱玻璃和起落架中的镀膜 .....	117
3.8.2 玻璃微透镜阵列的模具成形 .....	119
参考文献 .....	120
<b>第4章 半导体工艺及封装技术</b> .....	<b>122</b>
4.1 常用半导体与功能材料 .....	122
4.1.1 硅及其化合物 .....	122
4.1.2 玻璃 .....	124
4.1.3 压电材料 .....	126
4.1.4 磁性材料 .....	128
4.1.5 形状记忆合金 .....	129
4.2 光刻技术 .....	130
4.2.1 光刻基本原理与过程 .....	130
4.2.2 掩膜板 .....	137
4.2.3 纳米级光刻技术 .....	138
4.2.4 特种图案化技术 .....	140
4.3 刻蚀技术 .....	141
4.3.1 刻蚀基本原理与关键参数 .....	141
4.3.2 等离子体刻蚀技术 .....	143
4.3.3 气相刻蚀技术 .....	151
4.3.4 湿法刻蚀技术 .....	152
4.4 微连接技术 .....	157
4.4.1 阳极键合 .....	157
4.4.2 直接键合 .....	159
4.4.3 金属键合 .....	161
4.4.4 玻璃浆料键合 .....	163
4.4.5 树脂键合 .....	163
4.4.6 等离子体辅助键合 .....	164
4.5 平坦化技术 .....	165
4.5.1 平坦化技术概述 .....	165
4.5.2 平坦化加工工艺 .....	165
4.5.3 化学机械抛光 .....	167

4.6	微系统封装技术	169
4.6.1	微系统封装的特点与类型	169
4.6.2	微系统封装的工艺流程	170
4.6.3	微系统封装的前沿技术	171
4.7	半导体集成加工范例:压力传感器	172
4.7.1	压阻式压力传感器	172
4.7.2	电容式压力传感器	174
4.7.3	硅谐振压力传感器	175
4.7.4	光纤式压力传感器	175
	参考文献	176
<b>第5章</b>	<b>微纳压印技术</b>	<b>181</b>
5.1	微纳压印原理与过程	181
5.2	热压印	182
5.2.1	热压印原理及主要工艺流程	182
5.2.2	热压印模板及基体材料的性能要求	183
5.2.3	热压印过程温压变化	185
5.3	紫外压印技术	186
5.3.1	紫外压印原理	186
5.3.2	紫外压印光刻胶	187
5.4	软刻蚀压印	188
5.4.1	微接触压印技术	189
5.4.2	毛细管微模板法	190
5.4.3	转移微模塑	191
5.4.4	溶剂辅助微模塑	191
5.5	大面积滚轴压印工艺	192
5.5.1	滚轴压印原理	192
5.5.2	滚轴压印光刻胶	194
5.6	微纳压印新技术	195
5.6.1	电场诱导微结构图形化工艺	195
5.6.2	分子印迹技术	196
5.7	微纳压印的应用	197
	参考文献	199
<b>第6章</b>	<b>纳米结构自组装技术</b>	<b>200</b>
6.1	概述	200
6.1.1	纳米结构自组装技术内涵	200
6.1.2	纳米结构自组装技术分类	201

---

6.2 定向诱导自组装技术 .....	202
6.2.1 Langmuir-Blodgett 膜自组装技术 .....	202
6.2.2 层层自组装技术 .....	205
6.2.3 真空抽滤自组装技术 .....	209
6.2.4 界面诱导自组装技术 .....	210
6.2.5 磁场诱导自组装技术 .....	211
6.3 模板辅助自组装技术 .....	213
6.3.1 纳米孔道阵列辅助自组装技术 .....	213
6.3.2 自然结构辅助自组装技术 .....	214
6.4 纳米结构自组装技术的发展趋势 .....	217
参考文献 .....	218
<b>第7章 微纳生物加工成形</b> .....	<b>222</b>
7.1 生物加工成形内涵 .....	222
7.2 生物去除加工 .....	223
7.2.1 生物去除加工原理 .....	224
7.2.2 生物去除加工工艺过程 .....	224
7.3 生物约束成形 .....	226
7.3.1 生物约束成形模板种类 .....	226
7.3.2 生物约束成形工艺 .....	230
7.3.3 小结与展望 .....	236
7.4 生物复制成形 .....	237
7.4.1 生物表面复制成形 .....	238
7.4.2 生物表面缩放成形 .....	242
7.5 生物组装成形 .....	244
7.5.1 生物微粒连接成形 .....	244
7.5.2 生物密排组装成形 .....	246
7.5.3 生物阵列化组装成形 .....	247
参考文献 .....	250

# 第 1 章 绪 论

制造技术是直接创造财富的基础,是国民经济得以发展和制造业本身赖以生存的主体技术,国际上将生物、信息、材料、制造并称为 21 世纪的四大科学技术<sup>[1,2]</sup>。这四大支柱科学在制造体系上形成了如图 1-1 所示的关系,原材料的进步需要材料科学(主体为非生命材料)和生物科学(主体为生命材料)的支撑,原材料经人工转化为先进产品需要制造科学和信息科学的支撑。

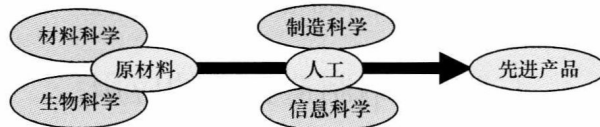


图 1-1 支撑产品制造的支柱科学

受信息科学、材料科学、生物科学的影响,现代制造技术的发展有两大趋势:一是向着自动化、柔性化、集成化、智能化等方向发展,使现代制造成为一个系统,即现代制造系统的自动化技术;另一个是寻求固有制造技术的自身微细加工极限,探索有效实用的微纳制造技术,并使其能在工业生产中得到应用,已经成为 21 世纪制造技术必须解决的问题之一<sup>[3~6]</sup>。如表 1-1 所示,从支撑技术、制造形式、制造级别等方面分析可以看出,制造技术作为各个时代的核心基础技术,从手工制造的农业时代、机械制造的工业时代、电子制造的信息时代正在向生物/微纳制造的纳米时代发展,现代制造技术正在使产品越来越趋向高精度、微型化、多级化方向发展,这一趋势给国民经济、人民生活和国防军事等带来了深远的影响,微纳制造技术成为 21 世纪的关键制造技术。

表 1-1 制造技术的历史阶段

分析方面	农业时代	工业时代	信息时代	生物/纳米时代
主体时间	1750 年以前	1750~1970 年	1970~2020 年	2020~2050 年
支撑技术	农业技术	工业技术	信息技术	生物/纳米技术
制造形式	手工加工成形	机械加工成形	集成电子制造	生物/微纳制造
制造级别	cm 级结构加工	mm 级零件装配	微纳二维加工	微纳多级组装

人类对自然物质的认识和改造能力经过漫长历史的发展,已经达到微纳米尺度。目前国际上已经开始了基因组、量子计算机、超导、碳纳米管与石墨烯等前沿

科技竞争。在工业界也展开了微纳制造工业前沿的竞赛,如微创医疗器械、物联网、智能装备、新能源等领域。正因为微纳米技术处于关系到各国未来发展的重要地位,所以各发达国家不断地投入巨资争夺微纳米技术的战略制高点,从而导致制造和材料学科前沿研究对象由传统尺度转向微纳米尺度,工业产品开发的层次由传统宏观层次转向微纳观层次。

微纳制造从狭义上看是对制造的可控尺度达到微纳米级的制造,从广义上看是对制造的认识尺度达到微纳米级的制造。因此,在人类科技视野已经达到微纳米尺度的今天,微纳制造几乎关系到整个制造领域,必须用全新的微纳米视野和手段去认识与改造传统制造技术。这必然会导致微纳米尺度世界中各个学科的强烈交叉和汇聚。随着不断的深化发展,很有可能会导致学科体系、工业部门、社会形态的重新组合和本质变化,新的工业革命很可能会由此发生<sup>[7]</sup>。

## 1.1 微纳制造技术的应用

微纳制造技术主要用于微系统制造和一些常规尺度产品的微纳加工中。常规尺度产品中关键的微结构特征需要微纳制造技术来实现,这些微结构特征加工质量的好坏直接关系到产品的总体性能。由于常规制造技术的微细加工能力的局限,使产品总体尺寸难以小型化,限制了产品功能的进一步提升。

### 1.1.1 日常生活中的微纳制造技术

司空见惯的日用品也需要微纳制造技术,如白炽灯的灯丝就是微孔拉丝而成(图 1-2);航空与汽车燃油喷嘴喷孔孔径一般为  $\phi 0.3\text{mm}$  左右,其微细加工精度和表面质量直接关系到喷油雾化质量和燃烧效率(图 1-3);光盘刻录过程实质上是微激光器件在光盘表面的微纳制造过程(图 1-4);喷墨打印机的阵列化喷孔是通过微刻蚀加工出来的(图 1-5)。随着越来越多的机电产品小型化,对微纳制造技术的需求也越来越广泛。

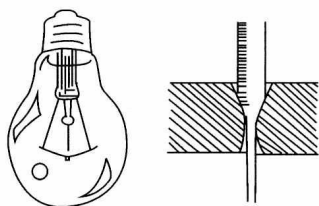


图 1-2 细灯丝拉丝模具微孔

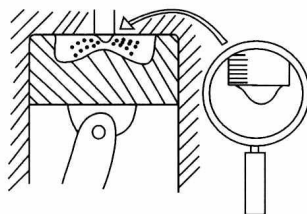


图 1-3 燃油喷嘴微喷孔

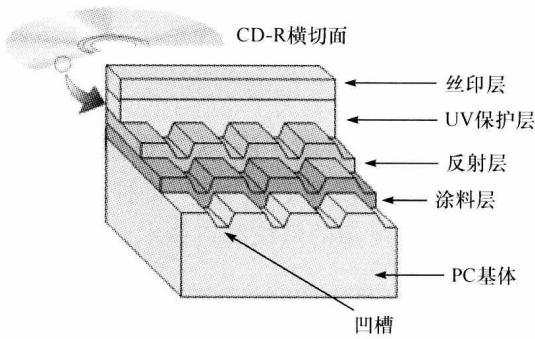


图 1-4 光盘刻录的微光路系统

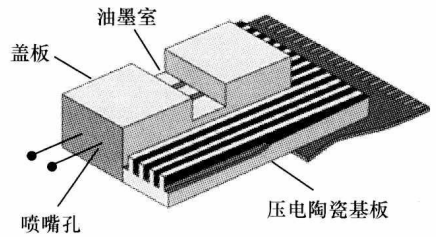


图 1-5 喷墨打印机的微喷头

### 1.1.2 医疗器械中的微纳制造技术

医疗分析设备中需要各种微观操作工具,如细胞分选操作的流式细胞仪(图 1-6)、细胞注射操作的细胞注射仪等,其中关键的微流体控制部件需要微纳制造技术来实现。目前,由于整个分析系统的微细集成度不高,导致整体尺寸较大,不便携,也不利于微量精密分析。

医疗微创手术与微诊断中用的微手术刀、微操作工具、内窥镜(图 1-7)等微创

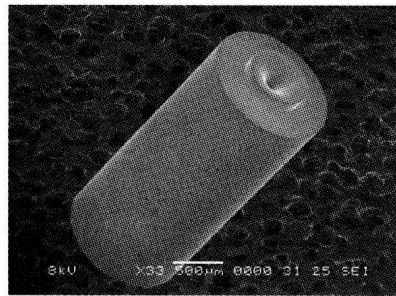
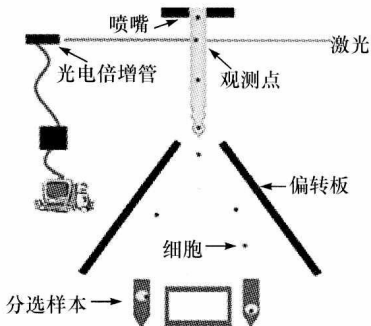


图 1-6 流式细胞仪的原理及微喷嘴结构

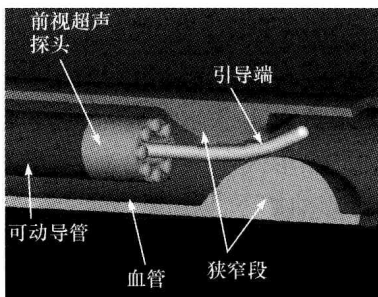


图 1-7 插入血管的探测器<sup>[8]</sup>



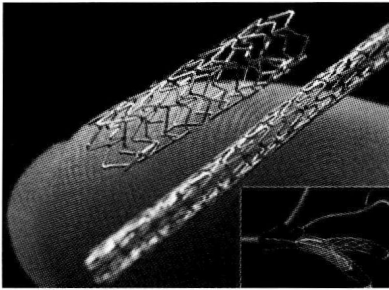


图 1-8 血管支架的弹性微结构

医疗器械的制造都需要精准、安全的微纳制造技术来实现。人工组织或器官中的微器件、微结构及微系统中,如人工心脏中的微泵、血管支架的弹性微结构(图 1-8)、人工肝组织的多级血管通道等都需要表面加工、特种加工、增材制造等大量复杂的微纳制造技术。

### 1.1.3 国防产品中的微纳制造技术

国防中对微纳制造技术的需求由来已久,对微纳制造技术水平和加工质量的要求也很高。许多关键部件的微细加工水平往往决定了整机战技效能水平,这也成为国际上武器装备性能提升与技术竞争的焦点之一。航空航天机载设备中的敏感元件、发动机隔热结构中的微孔阵列(图 1-9)、兵器炮弹引信中的微器件(图 1-10)等都存在微孔、超薄筋、微机构等难点,这些部位的微纳制造质量直接影响整机性能。

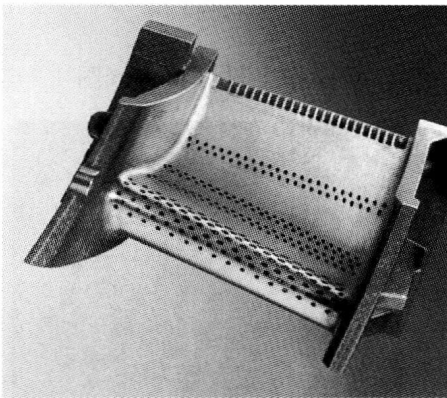


图 1-9 航空发动机叶片的气膜孔

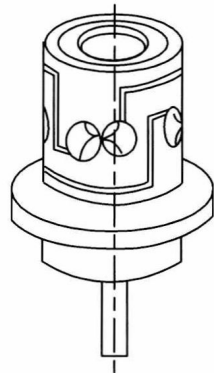


图 1-10 挠性陀螺的薄壁筋

## 1.2 微纳制造技术的发展趋势

随着科学技术的发展,传统产品的微细加工技术正在向集成化、复合化、智能化的先进微纳制造技术方向发展,从而使传统产品形式不断向精细化、微型化、微系统化方向发展。微纳制造技术的发展趋势可归纳如下。

### 1. 传统产品的小型化、集成化、高性能化

传统产品的器件小型化、系统集成化可使产品性能产生突飞猛进的提升,并能