

热学微系统技术

THERMAL MICRO-SYSTEM TECHNOLOGY

刘静 编著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书围绕热科学前沿领域内近年来发展迅速的微系统技术,集中阐述一些典型微器件的基本原理及研究方法,并剖析了相应主题上若干可供探索的途径和新方向。全书注重推进微热学方法在若干高新技术领域中的独特应用。

本书可供热科学、物理、电子、机械、器件、材料、化工、生物技术与医学工程等领域的研究人员、工程师以及大专院校有关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

热学微系统技术 / 刘静编著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-020159-1

I. 热… II. 刘… III. 热学-微电子技术 IV. 0551 TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 169085 号

责任编辑:张 静 于宏丽 / 责任校对:张 琪

责任印制:赵德静 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

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>

天 时 彩 色 印 刷 有 限 公 司 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 1 月 第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 1 月 第 一 次 印 刷 印张:18

印数:1—2 500 字数:336 000

定 价:46.00 元

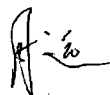
(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

序

热学微系统技术是热科学与微/纳米技术、物理、电子、机械、生物医学及信息技术等现代自然科学相交叉和融合的结果。在许多微系统技术中,热方法作为一种十分便捷地实现微/纳米功能器件的途径尤其引人注目,正显示出独特价值。这一主题近年来的发展相当迅速,已成为多个学科领域内人们共同关注的新生长点,也代表了热科学前沿领域中充满活力的一个学术方向。该书围绕作者所在热学微系统技术方面取得的一些最新进展,结合国际研究态势,系统地阐述了实现若干典型微热学器件的基本策略,特别注重剖析那些既有实用价值又颇具前瞻性科学意义的方法,有关内容取材广、信息量大、学科交叉性很强,兼有理论意义和实际参考价值。

当前,国内外在热学微系统技术方面正投入大量的人力、物力和财力展开协同攻关,对相应知识的需求十分迫切,但已有的相关信息大多散见于各类不同的专业期刊或文集。该书反映了当前热学微系统技术的一些前沿研究课题、成果及进展情况,并适时地指出了一些有待探讨的问题,是一本有别于传统热学范畴且内容新颖的学术著作,至今国内外与此题材相近的书籍还不多见。因此该书的出版将有助于促成热科学与微/纳米技术的相互交融,从而推动相应技术的发展。

本书作者刘静研究员长期立足国内,在热科学新兴交叉领域内多个层面的基础与应用研究上均取得了国内外有影响的成果。他有着多学科专业理论功底和丰富的学术实践经验,该书反映了作者及其学生在热学微系统技术探索中的一些耕耘成果和研究心得,对于该方向今后的研究工作富有启发性。为此,我很乐意向大家推荐。



2007年6月12日

中国科学院院士

前 言

热科学是一门经典而又充满活力的学科,对人类物质文明的进步贡献巨大。此方面堪称里程碑式的例子很多,如瓦特发明的蒸汽机将人类社会推进到工业革命时代、近代航空发动机的发明使得人类终能像鸟类一样翱翔于天空、火箭的应用则将人类带入航天时代。所有这些,无一例外都源自“热”的动力。法国工程师卡诺 1824 年将其发表的论文题目定为《论火的动力及产生这种动力的机器》,表达的正是这种最为直观的理念。今天,人类社会无论在科学发现和技术推进上都取得了翻天覆地的进步,新的学科如雨后春笋般涌现出来。然而,热科学的角色仍然一如既往地十分鲜明,只是其内涵和外延早已远远超越了最初的范畴,不变的是,热科学发挥作用的源泉仍然可以归结到“热”的“动力”上。其中,热学微系统技术正是借助于热效应或因热作用而引发的各种物理化学乃至生物效应所实现的一系列微/纳米技术应用,是热科学向当代前沿科技领域挺进的一个集中体现。

2001 年,作者曾出版了《微米/纳米尺度传热学》一书,该著作在随后的数年间相继被印刷 4 次,为学术界广泛采用;出于基础定位的考虑,这本著作的重点更多地放到对理论方法的阐述上,而就技术层面的剖析则较少着墨。无疑,科学研究的最终目的是服务社会,而体现一门学科价值的一个重要侧面还在于其实际应用上。正是出于这一考虑,作者一直期待着能够为推进热科学在微/纳米技术方面的应用尽些微薄之力。本书的出版算是对此愿望的部分实现。全书将围绕热学微系统技术这一因热科学与微/纳米技术相交融而促成的研究领域进行论述,以“热的动力”为主线,力求以点带面阐述一些典型的“由热效应引发的微/纳米技术”。不同于《微米/纳米尺度传热学》的是,本书强调先进技术的应用,旨在为读者提供热科学前沿领域中一些有启发性的案例。考虑到本书更多地定位在器件和应用层面,作者将尽可能避免引入数学公式,以增加相关内容的可读性,便于为不同领域的读者理解。

本书没有涵盖热学微系统技术领域的方方面面,主要以作者实验室前期开展的工作或关注的部分主题为线索展开。因此,许多国内外同行的优秀成果可能被遗漏或未能加以介绍,作者对此深表歉意。

本书成稿过程中,作者指导的多名研究生先后参与了其中一些内容的撰写和研究工作,他们有:李腾、吕永钢、白晓丹、曲小鹏、吴祖林、于丽娜、于天骅、桂林、邓中山、马坤全、项士海、杨阳、闫井夫等;我的同事周一欣研究员长期给予宝

贵的支持和帮助,并具体完成了一些试验研究工作;中国科学院院士周远先生曾参加一些问题的讨论,并在百忙之中为本书作序。作者在此一并对他们表示诚挚的感谢。本书部分研究工作得到国家自然科学基金的资助,有关内容还于作者在清华大学开设的研讨课上讲授,得到两届同学们的热情参与,作者对此也深表感谢。

限于作者水平,本书可能会存在一些疏漏,恳请读者批评指正。

刘 静

2007年6月于中关村

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 导言	(1)
1.2 常规热学微系统技术的研究范畴	(2)
1.3 微/纳尺度生物热学技术的研究范畴	(3)
1.4 热学微系统技术的国内外研究态势	(5)
1.5 微尺度生物热学研究的国内外态势	(6)
1.6 热学微系统技术的发展前景展望	(6)
1.7 生物热学微系统技术的发展前景展望	(8)
1.8 小结	(8)
参考文献	(9)
第 2 章 微/纳米器件的热学与流体加工技术	(10)
2.1 导言	(10)
2.2 MEMS 加工技术发展概况	(10)
2.3 自上而下及自下而上的微/纳米加工方式	(11)
2.4 MEMS 热加工技术	(14)
2.5 传统硅材料微加工技术中的热学问题	(15)
2.6 微尺度光刻技术中的热学控制问题	(16)
2.7 MEMS 粉末沉积热加工技术	(19)
2.8 微尺度热胶接技术	(22)
2.9 MEMS 加工中的热压塑技术	(22)
2.10 喷射微液滴的微尺度加工	(23)
2.11 基于微流体的加工方法	(24)
2.12 气泡微加工方法	(25)
2.13 微细电火花加工技术	(29)
2.14 加工微器件的软刻技术	(30)
2.15 MEMS 封装技术中的热应用	(30)
2.16 MEMS 热加工技术的发展趋势	(31)
2.17 低温加工技术	(32)
2.18 光学精密器件低温加工	(32)

2.19	生物工程低温加工	(33)
2.20	化学工程低温加工	(33)
2.21	机械工程低温加工	(34)
2.22	电子工程低温加工	(35)
2.23	冷冻干燥型微加工技术	(35)
2.24	低温微加工技术前景	(38)
2.25	生物微加工技术	(39)
	参考文献	(42)
第3章	纳米热流体技术	(47)
3.1	导言	(47)
3.2	纳米流体技术概念	(47)
3.3	基于纳米流体的热管	(48)
3.4	以纳米液滴为添加物的纳米流体	(49)
3.5	纳米金属流体	(50)
3.6	基于纳米颗粒控制纳米流体	(53)
3.7	纳米流体研究展望	(53)
	参考文献	(55)
第4章	微纳米流体器件技术	(57)
4.1	导言	(57)
4.2	微/纳米流体阀门概况	(57)
4.3	控制微/纳米流体的冰阀技术	(58)
4.4	冰阀器件的执行过程及影响因素	(59)
4.5	基于固液相变的蠕动泵	(63)
4.6	湿性电路中电信号的控制	(65)
4.7	微流体测量器件的制作	(70)
4.8	测量微流量的热阻式传感器	(71)
4.9	监测微流体参数的电阻抗法	(73)
4.10	经皮微针阵列式药物输运方法	(78)
	参考文献	(80)
第5章	微/纳米操作技术	(82)
5.1	导言	(82)
5.2	微/纳米操作技术概念	(82)
5.3	微/纳米操作的特点	(84)
5.4	基于机械效应的微操作技术	(85)
5.5	基于水力学效应的微操作技术	(85)
5.6	基于单一电学效应控制的纳米镊	(87)

5.7	基于电磁效应的微操作技术	(89)
5.8	基于单一磁学效应的微操作技术	(92)
5.9	基于声学效应的微操作技术	(92)
5.10	基于光学效应的光镊技术	(92)
5.11	基于冻结效应的微冰镊技术	(93)
5.12	基于冻融原理的微信号操纵技术	(97)
5.13	基于组合效应的微操作技术	(99)
	参考文献	(99)
第6章	光网络开关中的微热学控制技术	(104)
6.1	导言	(104)
6.2	光开关技术概况	(104)
6.3	主要光开关类型	(105)
6.4	基于热光效应的波导光开关	(108)
6.5	热光开关的主要优缺点及解决方案	(111)
6.6	热光效应光开关中的典型热学问题	(111)
6.7	喷墨气泡光开关	(114)
6.8	热微管光开关	(116)
6.9	液体光纤型光开关	(117)
6.10	热致动器驱动的光纤机械开关	(118)
6.11	空间加热型热光开关	(119)
6.12	冻融型光网络开关	(124)
	参考文献	(128)
第7章	芯片冷却与热管理中的微系统技术	(131)
7.1	导言	(131)
7.2	芯片发展趋势对冷却性能的要求	(131)
7.3	发展芯片冷却技术的主要途径	(136)
7.4	芯片冷却中的典型散热技术	(139)
7.5	热电制冷技术	(144)
7.6	热离子冷却	(146)
7.7	主动式气体制冷技术	(148)
7.8	液体金属芯片散热技术	(149)
7.9	基于 MEMS 的微制冷、制热系统	(152)
7.10	芯片冷却器中的材料与结构问题	(154)
7.11	芯片散热中的导热材料	(155)
7.12	芯片散热中的界面材料	(157)
7.13	芯片液冷方式中的流体工质材料	(158)

7.14	芯片冷却应用中的强化换热结构——固固换热方式	(159)
7.15	气固换热方式	(161)
7.16	固液换热方式	(163)
7.17	芯片冷却技术前景	(167)
	参考文献	(169)
第8章	基于微系统与纳米技术的功能服	(175)
8.1	引言	(175)
8.2	功能服概念及国内外研究现状	(175)
8.3	功能服的核心组成单元	(176)
8.4	功能服加工技术	(179)
8.5	纳米材料和技术在功能服中的应用	(180)
8.6	仿生技术在功能服中的应用	(181)
8.7	两类典型功能服	(181)
8.8	功能服前景展望	(182)
8.9	基于微纳机电技术的可穿戴式空调系统	(183)
8.10	空调服组成单元	(184)
8.11	基于微/纳米风扇阵列的空调服	(186)
8.12	空调服小结	(187)
	参考文献	(188)
第9章	微能源系统技术	(190)
9.1	引言	(190)
9.2	太阳能利用特点及光电池技术	(190)
9.3	典型燃料电池概况	(191)
9.4	生物质燃料电池概念	(193)
9.5	生物质产氢	(194)
9.6	利用光能的细菌电池	(195)
9.7	利用糖类产电的细菌电池	(199)
9.8	生物燃料电池技术	(201)
9.9	分解有机物作为能源的机器人	(205)
9.10	温差发电器件	(208)
9.11	微透平能源系统	(209)
9.12	基于同位素的微动力芯片	(210)
9.13	太空中的微能源技术	(214)
9.14	复合式微能源联合发电	(215)
	参考文献	(216)

第 10 章 低温生物学中的微系统技术	(219)
10.1 导言	(219)
10.2 微量细胞的低温保存	(219)
10.3 快速检测生物样品活性的降温动力学曲线方法	(223)
10.4 检测生物样品活性的电阻抗方法	(225)
10.5 用于快速筛选最佳低温保存程序的生物芯片技术	(229)
10.6 微流道式芯片结构	(231)
10.7 点样式芯片结构	(233)
10.8 生物样品最佳低温保护剂浓度的筛选	(236)
参考文献	(240)
第 11 章 肿瘤纳米医学与微创手术中的热学方法	(241)
11.1 导言	(241)
11.2 肿瘤纳米热疗技术	(241)
11.3 磁性微/纳米颗粒的作用原理与特点	(242)
11.4 磁性微/纳米颗粒的种类及其制作方法	(246)
11.5 磁性微/纳米颗粒的导入方法	(249)
11.6 外加磁场的参数选择及热疗仪的设计	(250)
11.7 肿瘤治疗效果	(252)
11.8 纳米肿瘤热疗温度场预示	(253)
11.9 基于纳米颗粒的射频适形治疗	(254)
11.10 在体研究	(257)
11.11 肿瘤纳米热疗前景	(257)
11.12 纳米冷冻治疗方法	(258)
11.13 基于血管介入式加热的微创性全身热疗方法	(263)
参考文献	(269)

第 1 章 绪 论

1.1 导 言

热学微系统技术是热科学与微/纳米技术、生物医学及信息技术等现代自然科学相交叉和融合的结果。这一领域近年来的发展十分迅速,已成为多个学科范畴内极具前景的新增长点。热学微系统技术的内涵十分广阔,凡是具有热学功能或借助于热学方法实现的微系统技术均可归属到这一范畴。其研究的立足点总是与当前世界科技发展的前沿和重大实际需求紧密结合的,事实上,整部热学微系统技术发展的历史就是一部交叉科学发展的历史,正是在与其他学科交相辉映和协同发展的进程中,热学微系统技术自身的研究内涵不断得到丰富。特别是,在当今科学技术突飞猛进的形势下,热学微系统技术的发展更显得绚烂多姿。

热学微系统技术植根于大量科学技术领域,其赖以发展的学术动力来自热科学,而热科学研究中最基本的物理参量是温度,所有热过程发生的前提是介质内出现温度梯度,因此,可以认为,对由温度变化引起的各种物理、化学、生物效应实现的应用技术的微/纳米化,均称为热学微系统技术。从这种意义上讲,热学微系统技术交叉学科可以用 Micro Thermal System-X 予以一般性的概括,这里,X 代表了各种可能的情况。该定义的外延实际上是相当广阔的,有关内容在当前最主要的各个重大科技研究领域如:生物医学、能源、环境、信息、纳米技术等中,都能找到热学微系统技术的身影。因此,客观地说,要完整地勾画出热学微系统技术领域的全貌实际上相当困难,但也正因如此,更凸显该学科所具有的巨大发展空间。结合当今世界科技发展的态势进行剖析,可以看到,近、中期内热学微系统技术领域内比较典型的交叉问题研究均可归结到三大类方向上,它们分别是与生命科学相结合而产生的生物热学微系统技术,以及由于微/纳米科技时代的到来而催生出的微/纳米热学器件与系统,也包括热科学与其他一些高新技术领域相融合而提炼出的新兴微/纳米学术研究方向。从各方向所涉及的共同基础科学问题看,上述第三个方向又基本可融合在前两者的范畴内,因此,本章内容主要以前两方面内容为主介绍热学微系统技术的概况,其中参考引用了作者在文献(国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,2006)中执笔的一部分内容。

1.2 常规热学微系统技术的研究范畴

当代热科学研究正全面融入到各类微/纳米科技发展的潮流中,由此促成了微/纳米传热学科的建立,热学微系统技术是此方面涌现出的前沿技术的核心体现。图 1.1 反映的是一些典型微系统技术所涉及的对象、尺度和研究范畴。近年来,自然科学与工程技术发展的一个重要特点已集中体现在微型化上,这其中一个重要的原因是因为传统尺度上(人类自身所能感知的空间和时间尺度)的物理现象、技术应用及其规律相对得到认识,人们的注意力逐渐转向那些发生在小尺度和/或快速过程中的现象及器件上来,尤其是微/纳电子机械系统技术的飞速发展更极大地推动了这一研究热潮,微小热学器件以其价格低廉和性能卓越而对世人产生了不可阻挡的诱惑力(刘静,2001)。微电子机械系统是指那些特征尺寸在1mm 以内但又大于 $1\mu\text{m}$ 的器件,它融电子与机械元件于一身,并且要通过集成电路制造中的批量加工方法制成,借助于该技术,迄今已成功制成的微小机械器件包括尺寸远小于1mm 的压力、流动传感器及加速计、换热器、空气透平、电子马达、微透平燃烧室等(Tien et al., 1998)。微米器件又由许多纳米量级的单元组成,甚至不少器件本身就在纳米尺度内,相应地,“纳米技术”则指的是利用一些新技术如激光束、离子束及电子束研磨技术等所实现的材料超精细加工技术,其定义可为“0.1~100nm 尺度起关键作用的技术”。纳米器件进一步推进了微电子机械系统的小型化。

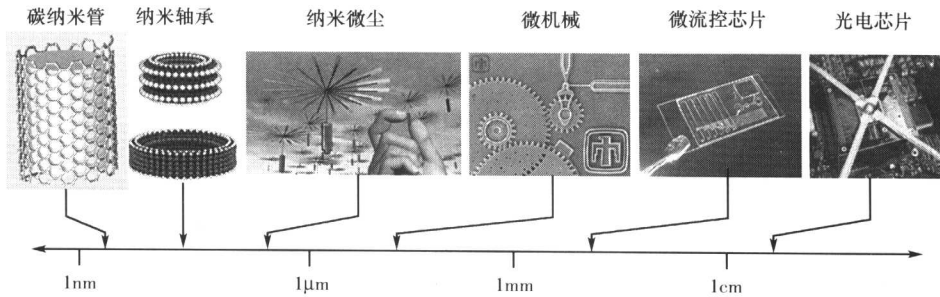


图 1.1 几类典型微系统对象及核心元件的尺度范围

由于现代制造与应用技术的持续进展,“微机械”或“纳机械”的尺寸已被超乎寻常地降低,而同时它们却保持了与原有器件相同甚至更好的性能,各种令人惊异的成就比肩接踵。一些真正分子意义上的机器如转子、齿轮、开关、闸门、转栅、马达等已经能够在实验室制造出来。微/纳米技术的影响涉及相当广阔的领域如仪器、医疗及生物系统、机器人、设计、导航及计算机等。世界范围内的许多著名大学均将微/纳电子机械系统及其学科基础纳入其教学与科研项目之中,并且,为适应

该领域显著的学科交叉特性及持续发展的需要,许多大学建立了一些跨系、跨学院的合作项目(刘静,2001;Tien et al.,1998)。不少国家和地区的一些重要政府项目均对微/纳米技术的发展及其相关研究给予了大力支持,美国在21世纪初则更是明确地将纳米技术列入其国家第一优先发展计划,我国各行业近年来在此领域内也取得大量引人瞩目的成就。所有这些情形都说明了微/纳米技术及其相关研究的战略意义(白春礼,2001;张立德等,2001)。而微米/纳米尺度传热学正是微/纳米科学中最为重要的学科基础之一,由此实现的热学微系统技术在大量的工业领域都有重要应用价值。

在所有微电子机械或纳米器件的设计、制造及应用中以及在一些极端环境下,热学和流动问题均显得突出而重要(刘静,2001;Tien et al.,1998),由于此时任何一个物理过程中的物质和能量运输均发生在一个受限制的微小几何结构中,这期间必然涉及流动和/或能量的转换,而任何不可逆输运过程中能量的耗散必然有一部分是以热的形式体现的,在许多微米/纳米器件应用场合,热学信号正成为其中独特而有效的用以控制器件运行的重要手段,这实际上成为开发热学微系统技术的重要途径。现在,微/纳米尺度下的流体与热学器件已逐步进入商业化发展阶段,但可得到的器件仍在少数,微/纳尺度器件体积和重量的减少正在促成一些新的工程应用,其有可能或者已经开辟出新的市场,并为有关基础探索提供崭新的研究手段。

可以看到,热学微系统技术广泛交叉于热科学(如热物理、热力学、流体力学、热测试技术等)、物理(凝聚态物理等)、电子(计算机、微电子、微系统等)、器件、机械(微电子机械加工等)、材料(新材料制备、测量、热评价)、化工(微流体、微分析)、生物学工程(微泵、微传感器、微医疗仪器等)、仪表、生物信息与控制(生物芯片)等学科,也因此受到众多领域专家的关注。同其他学科一道,热科学方法在微/纳米科技进步中的角色也是无可替代的,正是在与各相关学科的相互配合和协同发展下,微米/纳米科技才得以不断进步。目前,热学微系统技术研究已成为发展一些创新科技的前沿和制高点,它同时更是热科学向重大应用领域纵深发展的必然。

1.3 微/纳尺度生物热学技术的研究范畴

正如为大多数领域内学者们所逐渐认同的那样,21世纪是生物学的世纪,如今很难找到一门完全独立于生命科学的学科,对此的涉足和探索已经成为当代各门学科取得重大进展的关键契机之一。作为揭示自然界物质运动规律的最基本的学科之一,微尺度热科学在揭示生命热机理并将其应用于医学生物学实践方面正起着越来越重要的作用(刘静,2001),这在未来一些年代内可能会集中体现为应用热学方法对单个离体或在体细胞的控制上。种种生物热学技术均涉及大量的微米/纳米尺度传热传质问题,因为从本质上讲,温度对生命系统的影响同时体现在

纳米(分子)及微米(细胞)尺度(Rubinsky, 1997),而这种影响又反映到组织的宏观尺度上。图 1.2 反映了生物学世界所涉及的各尺度典型对象(不同种类生物学对象的具体尺寸会与此图有所差别,这里仅表示相对情况)和相应的生物医学研究范畴(Farkas, 2003),由于所有的生物学对象都是热和湿的载体,可以预见的是,热学微系统与微/纳流体技术在生命科学研究中会有很大的发展空间。当前,微尺度热科学在生物医学工程上的角色可归纳为(刘静, 2001):研究生命系统内的细观和微观传热问题,揭示各种热物理因素对生命系统在微尺度水平上的影响规律,并将有关成果充分地应用于临床实践。微尺度生物传热传质学的工程背景可在大量的生物材料和微小生命个体的保存、血液冷冻干燥、低温外科、高温肿瘤热疗和基因疗法、分子热操纵、可移植生物材料中的热限制问题、显微热诊断、温控药物输送等中找到,就是在许多现代最为先进的生物技术中以及一些新型疾病的诊断和治疗方面,热学微系统技术所能发挥的关键作用也已见端倪,开展此方面的研究既富有重大的现实意义,又具有深厚的学术内涵,因而业已成为国际学术界和产业界竞相关注的前沿。其研究必将对理解生命过程的设计、生物对象对各种冷热环境的响应,以及大量的医学临床应用产生重要的影响。

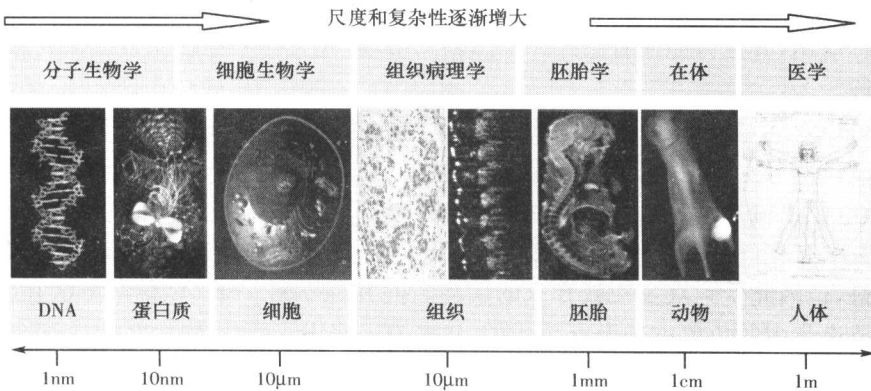


图 1.2 生物学世界所涉及的对象、尺度和研究范畴 (Farkas, 2003)

微尺度生物热学科方向的研究势必涉及:对从细胞、亚细胞层次到组织、器官直至整个生命个体内的热量和质量传输现象进行定量研究;对疾病热诊断与治疗中所体现出的人体器官、系统的各种宏观、细观和微观上的正常和异常热生理机理、生命热现象物理本质乃至传统医学技术等加以热学解释和阐明,并应用合适而有效的数学物理方法对其进行描述,以及将热科学手段应用于生物技术及医学临床实践;对各种物理、化学因子作用于人体时所产生的微热学效应进行考察,对在微传热、传质过程中具有重要医学意义的各种生物热学数据进行在体或离体测试并建立相应的微型化低成本测试仪器,以及发现新的生物热学现象

和热学规律等问题。本方向所涉及的一些微热学、生物学及医学技术方面的方法和概念在各自学科领域内均具有突出的崭新性,是多学科共同的前沿,所有这些内容和目标必将丰富和发展热科学的理论体系,尤其可望给医学生物技术的现代化带来一些全新的命题和概念,并直接对疾病诊断与治疗类热学仪器的研制和走向临床奠定基础,有关突破和创新会带动相关领域的前进,对医学技术现代化具有重要的意义。

1.4 热学微系统技术的国内外研究态势

热学微系统技术的研究是与实际应用密切相关的。微尺度热学和流体器件覆盖了一个十分广阔的领域,如固液薄膜、半导体器件、光学器件、超导器件、芯片冷却装置、微电子机械系统、生物芯片、微传感器、激光加工、医学工程、生命科学等,蕴含了许许多多的创新机遇,其发展态势突出地表现为基础理论与实用器件的发明和应用交相辉映。

当前,微/纳尺度器件的应用正处于积极的探索之中,系统也会变得越来越复杂,因而人们对微/纳尺度下的基本传热和流动过程中存在的理论和实验技术,以及相应的微热器件制造方法的需求也就与日俱增(刘静,2001)。与基础研究并列的是,在这一领域内还需要建立更好的设计工具,以使微流体及热系统的完整模拟成为可行,这类系统应包括设计和过程建模以及对器件流体力学、热行为、结构变形及其性能等的数值模拟。迄今,在有关热学微系统技术的相关理论与计算研究方面,研究者们提出了一系列有效方法,它们包括从量子分子动力学到连续介质模型的各种措施,而且,不少跨尺度研究的开展也如火如荼,但比较适合于热学微系统技术研究的理论仍十分缺乏;而在实验技术方面,一些特殊测量方法的空间、时间和/或能量的分辨率极限正被逐渐打破,新方法也层出不穷,这些进展使得微米/纳米(包括微秒、纳秒甚至更短)尺度下的热学问题研究正成为可能,但具有良好适应性的微/纳米热测试技术仍亟待开展;与此同时,一些新型功能流体的热学改进研究也得到了重视,促成了一些理论分析与实验工作的开展;另一方面,从微观粒子(如电子、光子、声子、原子及分子等)运动的角度理解传统热科学中的宏观现象如温度、压力和应力、热和流体流动等,对于更好地认识这些现象具有非常重要的意义。为适应微/纳米科技迅速发展的需要,深入系统地研究其中的基础和应用热学问题具有十分重要的意义。

不难看出,自21世纪开始,国际热科学领域新的前沿问题——热学微系统技术研究,正显露其强大的生命力。可以预计的是,在未来的几年中,该领域的研究将由于微/纳米技术的提升而进入高潮,微/纳尺度热学问题将会得到更为完整的认识,所考察的对象也将进一步趋向复杂化及多样化上,相应的微/纳米传热理论则逐步趋于成熟,所有这些进程将促成一系列新的应用技术的建立。

1.5 微尺度生物热学研究的国内外态势

定量化研究是生命科学取得进步的重要标志,热科学方法与技术的引入,使得生命热现象、热问题的解决取得了长足进展,许多过去从生理学角度看来至为复杂的生物热学问题一经引入热科学的有关概念后,往往可以获得非常清晰而明确的认识,日新月异的热技术的应用已为生命科学及医学科技的进步注入了新鲜的血液。热物理在一些重大生物医学工程问题上的得心应手和独特地位,从一开始就引起世界各国的高度重视,被认为是临床医学中的关键技术。国家自然科学基金委近年来也一直将此作为优先发展领域,早在1997年就曾以“生命科学中的热物理问题”为主题举办过一次香山科学会议。并在随后的数年内支持了两项重点基金项目;另一方面,近年来国内外在生物传热方面的基金申请数目也呈上升趋势,显示出这一领域的吸引力。

生物热学微系统技术作为极具发展前景的新兴交叉学科之一,既是传统生物热学赖以拓展和取得重大进展的生长点,也是建立诸多先进生物医学技术的关键工具。

细胞尺度的热学和流体问题研究一直是诸多领域关注的重要课题,也已取得一定进展,但相应的基础与应用研究远远落后于临床实践,原因一方面是工程手段的介入远远不够,同时又缺乏完备的科学基础如细胞水平上的传热传质学和非平衡热力学规律远未得到认识,另一方面在实施微尺度生物传热与传质测量方面的困难也阻碍了该学科的进展。不过,随着各种微米/纳米科学研究的协同发展,这种进程有望得到推进。归纳起来,热激蛋白、热耐受性、抗冻蛋白、高温酶的形成、蛋白质变性、分子构象、生物芯片制造与应用中的热设计、PCR技术中在加热与降温过程中DNA双链的解链与复制机制、细胞及微循环系统内的传热传质问题等应该是近期内热学微系统技术与生命科学联手并有望取得进展的几个重要课题(刘静,2001),对应地,可能会促成一些新型热学微系统技术的建立。在略大一些尺度范围,如发生在微循环血管内的传热与传质对于药物的输送、基因转导、生物信息传递等也具有重要意义,此外,生物体表薄膜的热问题,以及研究和应用这些规律的微电子机械系统的设计和制造等都是近年来涌现出的新问题。可以预见,结合微系统技术手段揭示生命现象必将是一个激动人心的领域。

1.6 热学微系统技术的发展前景展望

在过去数十年间,对一些工业器件中微尺度热现象的发现,要求采用一系列新的研究手段。由于微/纳米器件所带来的巨大经济效益,使得微质量和能量输运现

象研究成为一个异常重要的领域。今后应全力开拓制造出新型的高性能、低价位的微/纳米热学器件,与此同时,也应及时有效地拓展微/纳米技术在热科学领域中的应用。

热学微系统技术领域内的研究工作,应围绕“微/纳米技术”的全球发展态势,就当前一些典型微/纳米材料与器件的设计、制造和应用中所涉及的重要热学问题展开,通过热科学(热物理、热力学、流体力学、热测试技术等)的理论探讨、数值模拟、实验研究及设计制造手段达到;为微/纳米科技的持续进展增加热科学方面的储备,为新型微/纳米热学器件的研制开发提供相应依据,为微/纳米技术在热科学方面的应用开辟新的途径。相关研究将起到丰富和发展热科学理论体系的作用,也会给微/纳米科技领域引入一些新的命题和概念,并提供相应的研究手段,有关突破和创新会推动相关科学技术的进步。

在今后的一段时期内,可以开展的一些重要研究方向涉及(国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,2006;刘静,2001):

(1) 以典型微/纳米材料与器件(微/纳米颗粒、窄线、薄膜及其组合体)的设计、制造和应用为主线,提出和建立新的理论方法、实验技术及加工手段。

(2) 需发展出微/纳米材料、结构及器件的热学控制手段,为微/纳米技术在热科学领域的创造性应用开辟新的途径。

(3) 由于研究微/纳米尺度传热学最关键的环节之一在于发展先进的实验手段,为此,应进一步发展出针对微/纳尺度上物体的尺寸、形貌及热物理信息的热探测技术与仪器,在超快速、高精度温度测量方面建立新的热测试方法,在此基础上可探索出一些热学特性得以增强的功能纳米固体及液体材料。

(4) 围绕一些现实具体的应用技术开展微/纳米热学研究,也有助于在若干环节上取得突破,如今后应着力解决微/纳米器件中的产热问题及计算机芯片散热技术,研制出一批新型的超高能流密度微/纳尺度换热器,满足随着芯片集成度进一步向极限推进而提出的散热需求。

(5) 针对当前能源技术中出现的新动向,还应就微能源及动力装置(如微燃气透平、微型制冷机、微型火箭发动机及燃料电池等)中的传热传质问题展开研究,建立新的理论与实验技术。

(6) 围绕极端情况下的微传热问题,可望开辟新的研究方向。比如,在低温水平下,具有常规尺寸的材料内的传热问题尤其会体现出更为明显的尺度效应,而此类研究在以往开展不够,今后应适时启动一批相关工作,以促成一系列低温微系统技术的建立。

总之,“微/纳米科学与技术”是一项系统工程,而其中的热学微系统技术研究是极为重要的学科分支之一。此方面,可形成跨专业的微/纳米热学联合研究,以便更好的推动各项工作的深入。