DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2004.06.012

·成果简介·

重大项目"航天技术和信息器件中的微细尺度传热"取得重要进展

刘 涛[1] 纪 军[1] 过增元[2*] 李志信[2]

(1 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,北京 100085;
2 清华大学机械工程学院工程力学系,北京 100084)

[关键词] 微细尺度传热,航天技术,信息器件,微传感器

20世纪,人类在航天领域实现了飞天梦想,在信息领域取得了巨大的成功,极大地改变了人类的生活质量。随着科技的发展,微电子器件的集成度越来越高,航天器的小型化和微型化也成为航天技术发展的重要方向之一。然而,航天器越小、微电子器件的集成度越高,对散热的要求也越来越高。人们认识到,散热技术将严重影响微电子器件的发展和为电子机械系统(MEMS)的优化设计。为此,自20世纪80年代以来,国际传热界一直将微尺度传热作为研究热点之一。研究结果表明,微尺度条件下的流动与传热具有不同于常规尺度下的特点,所报道的研究结果不仅在定量上而且在定性上都存在差别。因此,不管是从学科发展,还是科技进步的需求,都对微细尺度传热的研究提出了迫切要求。

为此,国家自然科学基金委员会于1999年资助了工程与材料科学部和信息科学部交叉立项的重大项目"航天技术和信息器件中的微细尺度传热",同时,将高技术新概念新构思探索课题专项基金资助的重点项目"航天技术中的特殊传热问题研究"与该重大项目合并,由清华大学过增元院士主持,清华大学、中国科学院工程热物理研究所、大连理工大学等单位共同承担,以期揭示和总结微细尺度流动与传热的新的现象、特点和规律,研究新型微电子器件的自热特点和热电耦合分析方法以及新型微传感器的热优化分析和设计方法。

1 项目取得的创新性进展

经过课题组近5年的努力,该项目取得的主要研究进展可概括为以下几方面:

1.1 微细尺度流动与传热的尺度效应的分类

系统和深入地研究了单相微细尺度流动与传热的尺度效应及其物理机制,提出尺度微细化后,流动与传热的尺度效应的物理机制可分为两大类:一类是连续介质假定仍然适用,N-S方程和Fourier方程仍然成立,但由于尺度的减小导致物体的面体比增大,与表面积相关的影响因素的作用增强,与体积相关的影响因素的作用减弱,引起影响流动与传热的各种作用力(或影响因素)的相对重要性发生了变化,从而导致新的现象和规律;另一类是当尺度减小到与粒子的平均自由程相当时,Knudsen数 Kn 很大,此时,常规尺度下采用的连续介质假定、N-S方程、傅立叶定律等不再适用,需要考虑尺度减小导致 Kn 增大的稀薄气体等效应,从粒子运动的角度用统计的方法分析微尺度流动与传热的规律。而且,目前MEMS所涉及的微尺度传热属于第一类。

1.2 微尺度单相流动与传热的尺度效应及其物理机制

提出了在微米和毫米尺度上出现的"尺度效应"源于流体的可压缩性、表面粗糙度、表面力等的作用。微细圆管内的气体流动,流动可压缩性可使速度剖面偏离抛物分布而更加饱满,因此导致阻力系数的增加。流动阻力系数与Reynolds(雷诺)数的乘积不再是常数,而是当地Mach(马赫)数的函数。正因为如此,不可能出现流动充分发展的情况。而且,可压缩性使得压力功和粘性耗散的作用不能像常规尺度传热那样被忽略,换热将增强。对微米尺度的

* 中国科学院院士.

本文于2004年8月30日收到.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光滑管而言，不可压流动与传热与常规尺度相同，但是，随着相对粗糙度的增大，层流流动阻力显著增大，转捩也会提前。

在介质非连续性引起的尺度效应方面，证明对热完全气体流动，大尺度稀薄气体流动与微通道流动是相似的，稀薄气体流动与换热的研究结果适用于微通道流动，当气体压力大于1.013MPa时，热完全气体的条件不再满足，气体的稠密性将使流动阻力减小。对纳米通道来说，壁面粗糙度将影响滑移边界条件，取决于粗糙元高度与分子平均自由程之比的大小，壁面可处理为滑移、无滑移和负滑移边界条件。

1.3 微通道和微结构内的对流和相变传热传质

研究了微通道与微结构内的传热传质机理，提出了"贴壁层"模型，根据气体输运理论，导出气体粘度和导热系数在贴壁层内的变化规律。基于这一贴壁层模型，求得通道不同截面形状和不同边界条件下气体层流流动阻力系数和Nusselt数 Nu 随 Kn 的增大而减小，比传统的考虑壁面速度滑移和温度跃迁的分析简便。揭示了气体输运性质在贴壁层内的变化规律及其对流动与换热的影响；揭示了微细管内流动凝结换热主要受界面张力或者剪切力的控制，成功地实测了水的降膜表面向空气蒸发的薄膜厚度动态图谱，揭示出微薄降液膜的波动最终将发展为混沌特性。实测了表面蒸发降液膜厚度变化情况，研究了波动相界面"毛细诱导"蒸发的特性，从热力学平衡性澄清了文献中对弯曲内凹液面热力学特征关系Kelvin式的误导，揭示出近壁区因素对核沸腾的决定性影响，并提出一种强化沸腾传热的微细结构。对薄液膜和弯月面蒸发换热、稳定性、工质极性、壁面粗糙度、界面力等进行了理论和实验研究，揭示了空间尺度和工质极性等对薄液膜形成的影响机制。发展了微小型多槽道热管的蒸发、凝结、流动的数理模型。

1.4 微尺度导热和辐射特性

改进了Holland热导率模型，数值预报了薄膜超晶格材料的热导率，指出界面对声子的散射极大地影响薄膜的热导率。发现亚微米器件中的电子温度和声子温度不相等的热力学非平衡现象，为亚微米和深亚微米半导体器件的热电耦合分析和优化设计提供了理论支持。研究了微腔热辐射的特性及其对微腔结构微器件热特性的影响，指出当间隙达到纳米或辐射波长的尺度时，近场辐射将起主要作用，从而给出了微器件微腔尺寸设计不可过分求微的设计理念。

1.5 微器件和微传感器的研究与开发

在进行基础研究的同时，项目组成员充分利用学科交叉的优势，进行了新型微器件和微传感器的研究与开发，主要有：

(1)微热板式阵列气体传感器。提出了微热板的设计、分析方法和制造技术，研制了微热板式阵列气体传感器，在国际上首次报道了该传感器中气敏二氧化锡薄膜上的微裂纹及其对器件性能的影响，分析了微裂纹产生原因并给出了抑制方法。微热板式阵列气体传感器提高了对气体的选择性，增强了分析混合气体的能力，可基本满足不同环境的气体检测警报的需要。

(2)微型热扫描量热卡计。在微热板的基础上，设计和加工了微型热扫描量热卡计，与传统量热卡计相比，其耦合效率高，响应速度快，通过检测卡计吸收的热量和升高的温度可获得卡计的热容。

(3)沟道有热、电通道的绝缘体上硅MOSFET器件(DSOI)。提出了一种可抑制自热影响的沟道有热、电通道的绝缘体上硅MOSFET器件(DSOI)，与常规的SOI器件相比，DSOI器件沟道下方的埋层被体硅所代替，埋层上单晶硅孔的存在减小了SOI器件的热阻。因此这种结构既保留了原SOI器件源漏电容较小的特点，又有利于器件的散热。同时，由于DSOI器件沟道下方没有埋氧，沟道与衬底之间是导通的，因而可以消除SOI器件的浮体效应，从而具有良好的性能。

(4)微测辐射热计。提出了一种利用非晶硅晶体管作为热敏感元件的新型室温红外探测器。它不同于一般热敏电阻(无源器件)的概念，而是一种利用有放大作用的器件(有源器件)作为热敏元件的微测辐射热计。实际测量结果表明，与国外其他结构的室温红外探测器相比，具有响应频率高、噪声等效温差小和热时间常数小的优点。

(5)气体微惯性器件。提出了双向合成喷气体陀螺的构想，采用合成喷设计的气体陀螺，无机械部件，使用寿命长。依据所测量的角速度的范围，可设计不同规格的气体陀螺，测量范围宽。同时，利用微尺度自然对流的研究成果，对热对流气体加速度计进行了优化设计，并发明了可同时提高灵敏度和线性度的四桥臂均布置温度传感器的热对流硅微加速度计。

(6)液滴振荡型微PCR芯片。聚合酶链式反应(polymerase chain reaction (PCR))是实现DNA扩增的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

生物技术。通过空间与时间的转换，采用单一液滴往返通过变性、退火和延伸三个温度区的振荡方式实现多个循环(包含变性、退火和延伸)串联的微流控型 PCR 芯片的功能，从而将芯片的体积大大缩小，反应物的用量大大减少。尺度的减小使热惯性减小，可实现快速升降温，从而使 DNA 扩增的准确率提高，实现所要求的扩增数目所需的时间大大缩短。

2　项目的主要特点

(1)充分发挥项目学术领导小组的作用，并征询同行专家的意见。项目负责人每年组织学术交流，并随时检查各课题的进展情况。特别是针对中期检查时专家组提出的意见，在后期研究中重点解决各课题交叉的问题，使各课题间的交流与合作迈上了新的台阶。

(2)项目选题顺应科技发展的需求，属于该领域的前沿，研究成果显著。项目执行期间在国内外期刊和国际会议上发表学术论文 309 篇，其中国际期刊 61 篇，国内期刊 164 篇，国际会议 83 篇。在所发表的论文中，被 SCI 检索 72 篇，被 EI 检索 128 篇。

(3)发挥学科交叉优势，使理论研究与技术研究互相结合。课题组在微气体惯性器件、微传感器、新型微电子器件以及微 PCR 芯片等方面取得了创新成果，申请了 11 项发明专利(已授权 3 项)和 2 项实用新型专利(已授权 1 项)。

(4)按照学科发展以及国家需求的实际情况，适时调整研究计划，增加了新的研究内容，取得了很好的效果。比如，关于微气体流动、含纳米颗粒的流体的传热、薄膜导热机理等，使项目的理论研究成果更丰富、更系统。关于液滴振荡型 PCR 芯片的研究适应了 2003 年 SARS 给我国卫生系统提出的准确快速地检测病毒的需求。

(5)开展了广泛的国际合作与交流。组织国际学术会议 1 次，应邀在国际学术会议上作特邀报告 4 次，分组报告 80 次。与美国、日本、德国、加拿大、韩国、新西兰等国的著名学者进行了合作与交流，促进了该项目研究的顺利完成，提升了我国学者在国际上的学术地位。

(6)培养了微细尺度传热领域的中青年后备人才。项目执行期间，培养了中青年学术骨干，其中大连理工大学以项目的研究为基础建成了新的博士点。项目组培养了 2 名博士后，16 名博士，35 名硕士。

该项目在微细尺度传热领域所取得的理论研究成果以及在微器件和微传感器方面取得的技术创新成果，总体上处于国际先进水平，在国际上产生了重要影响，为推动微细尺度传热的学科发展和我国在相关领域的科技进步发挥了重要作用。

3　项目管理的思考与启示

该项目取得了显著的理论与技术创新成果，总结几年来的实施过程，有如下几点体会将有益于未来重大项目的组织与管理：

(1)选题要有前瞻性，而且要符合国家科技发展的需求。特别是学科交叉项目，要选择不同学科共同关注的关键科学问题。

(2)项目实施过程中，要加强各课题、各学科间的交叉与融合，并根据科技发展和国家发展的现实情况，适时合理地调整研究计划。

(3)在重视基础理论研究的同时，发挥学科交叉优势，将理论成果应用于技术研究，发展创新的技术成果。

(4)充分发挥项目负责人和学术领导小组的作用，并听取同行专家的建设性意见，保证重大项目的研究顺利进行。

ACHIEVEMENTS OF MAJOR PROJECT "MICROSCALE HEAT TRANSFER IN ASTRONAUTIC TECHNOLOGY AND MICROELECTRONIC DEVICES"

Liu Tao[1]　Ji Jun[1]　Guo Zengyuan[2]　Li Zhixin[2]

(1 *Department of Engineering and Material Sciences*, *NSFC*, *Beijing* 100085;

2 *Department of Engineering Mechanics*, *School of Mechanical Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084)

Key words　microscale heat transfer, astronautics technology, microelectronic devices, micro sensors

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net