

# 王补宣论文集

(1992-2001)

RESEARCHES ON THERMAL SCIENCES

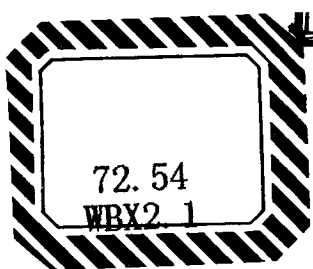
《王补宣论文集》编辑组

# 王补宣论文集

(1992 ~ 2001)

RESEARCHES ON THERMAL SCIENCES

《王补宣论文集》编辑组



机械工业出版社

我国工程热物理学科创始人之一、国际著名工程热物理学家和热工教育家、清华大学热能工程与工程热物理研究所所长、中国科学院院士王补宣教授,为我国科技教育事业人才培养和热科学研究做出了杰出贡献,其治学精神、科研方向一直代表着清华大学工程热物理学科乃至全国传热传质界的主导方向,对国内热工行业教学和科研有重要影响。本论文集精选王补宣院士和他领导的课题组近 10 年内的代表性论文 60 篇。这些论文既展现了王补宣院士近 10 年的主要科研活动与成就,又在一定程度上反映了当今热工和传热传质科研工作的某些主要动态与方向。可供高校工程热物理、热能动力工程、能源与环境、制冷、暖通空调等专业的师生,相关领域的科研人员以及工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

王补宣论文集: 1992~2001/《王补宣论文集》编辑组. —北京: 机械工业出版社, 2002.1

ISBN 7-111-01789-7

I. 王… II. 王… III. ①王补宣—文集②热学—文集 IV. 0551-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 002881 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 杨少彤 版式设计: 张世琴

封面设计: 姚毅 责任印制:

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm  $\frac{1}{16}$ ·32 印张·2 插页·800 千字

001—500 册

定价: 80.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527



中国科学院院士、清华大学教授王补宣

## 《王补宣论文集》 编辑组

组长：彭晓峰

成员：杨瑞昌 吕俊复 姜培学 李俊明（兼秘书）

# 为人至诚至善 为学至勤至精

## (代序)

春风化雨，气象万新。当我们以累累硕果和崭新面貌迈入 21 世纪之刻，也迎来了国际知名学者、我国工程热物理学科先驱和奠基人、著名热工学教育家王补宣院士 80 华诞和执教即将 60 年的喜庆佳日。王先生是我国传热传质学科的垦荒开拓者，更是学科发展百色春园的精心育花人。作为晚生后辈和学生，愿借此良辰吉时恭贺先生的杰出成就、恭祝先生健康长寿！

近 60 年的人才培养和科学研究生涯中，为中华民族的崛起和振兴不懈努力、付出了辛勤劳动，在社会主义教育事业发展和科技人才培养方面做出了杰出的贡献。他担任教育部热工教材编审委员会和国家教委热工课程教学指导委员会委员、主任委员 30 余年，担任国务院工科评议组成员和学科召集人十几年，兢兢业业为高校教材建设、教学改革、高教发展等奉献自己的才智，培育和造就了大批教学科研骨干、学术带头人。在科学研究上，先生更是誉满中外，尤其 20 世纪 80 年代后，不断开拓传热传质和工程热物理学科研究的新方向，始终站在学术的最前沿。他还积极推动和率领学术同仁迈向世界，使中国在国际学术界占据了应有的重要地位，发挥了应有的影响和作用。先生以其学术成就、大师风范和对中国传热传质学界学术发展所作的不可磨灭的贡献赢得了广泛的敬仰和爱戴。

有幸追随先生近 20 载，深深体会到最令人折服的还是先生高尚的品德、宽广的胸怀、严谨求实的治学态度和勇于探索开拓的科学精神，可以说“自强不息、厚德载物”的清华校训在先生身上得到了极好的体现。半个多世纪来，受过先生精心培育、热情关怀和无私帮助的人遍及我国整个热工动力界，包括学校、研究单位、企业和个人，现今仍直接面对稚气未脱的学生，完全没有国际大师和权威的架子，还经常不厌其烦地逐字逐句帮助同事、同行、学生、乃至不认识不熟悉的人修改文稿，给予无私的指导，帮助他们成才。朴实无华、真诚善良、和蔼可亲、循循善诱、诲人不倦、提携后人，这是业内人士对先生的一致评价。先生在科学上的严谨求实作风远近闻名。他的教材和教学总是精益求精、千锤百炼、语言生动、深入浅出、通俗易懂，对教材和教学的贡献有口皆碑，成为楷模典范；为了确定学科、研究方向或确认研究内容、技术的可靠性，先生甚至亲自深入工厂、工地、实验室调研、测试，落实每一个细节，常

说“差不多”妨碍了科学的精进，自己有时为弄清一个现象、证实一个结论，常常达到废寝忘食的地步。先生数十年的教育与科研生涯写下了孜孜不倦追求科学真理、不断探索开拓的光辉历程，在频繁的工作变动和行业转换中始终紧扣热工科学核心，万变不离其宗，充分借助交叉发展和创新研究方向、领域，以大师过人的睿智立足于学术的最前沿。

值此先生 80 华诞之际，愿以编辑出版这本学术文集作为献给先生的一份微薄之礼，也借此献给崇仰先生事业与人品的广大工程热物理学者、能源动力工程界和教育界同仁。文集精选收录了先生近十年主要研究方向和领域代表性学术论著共 60 篇，可以较全面地反映先生在科学研究上的开拓精神、严谨求实的治学态度，更能看出先生谦诚待人、诲人不倦、提携后辈的高尚品德。为人至诚至善，为学至勤至精，这是先生留给我们后辈的精神财富，相信如同先生的学术成就一样，会深入人心、激励后人勇攀高峰。

彭晓峰

于清华园

2001 年 9 月

# 目 录

为人至诚至善 为学至勤至精 (代序)

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第 1 篇 回顾和展望 (REVIEW AND PROSPECT)                                                                                                                   | 1   |
| 热物理和热工研究开发的进展与机遇                                                                                                                                    | 1   |
| FORCED-CONVECTION AND BOILING CHARACTERISTICS IN MICROCHANNELS                                                                                      | 5   |
| 前进中的“生物医学工程热物理”                                                                                                                                     | 39  |
| INTERNAL NATURAL, FORCED AND MIXED CONVECTION IN FLUID-SATURATED<br>POROUS MEDIUM                                                                   | 47  |
| 第 2 篇 对流传热传质 (CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER)                                                                                                    | 68  |
| 发热球体绕流的强迫对流传热试验研究                                                                                                                                   | 68  |
| REWETTING OF HOT SURFACES INDUCED BY CAPILLARY FLOW                                                                                                 | 74  |
| TURBULENT CONVECTION MASS TRANSFER OF WATER WITH INTERNAL<br>MASS SOURCES                                                                           | 86  |
| NUMERICAL SIMULATION OF FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER IN POROUS<br>PLATE CHANNELS USING THERMAL EQUILIBRIUM AND NON-THERMAL<br>EQUILIBRIUM MODELS | 98  |
| EXPERIMENTAL RESEARCH OF FLUID FLOW AND CONVECTION HEAT TRANSFER<br>IN PLATE CHANNELS FILLED WITH GLASS OR METALLIC PARTICLES                       | 112 |
| 第 3 篇 流动沸腾 (FLOW BOILING)                                                                                                                           | 127 |
| REWETTING AND FLOW FILM BOILING ALONG HOT SURFACE                                                                                                   | 127 |
| 沿平板具有微槽结构表面的流动沸腾传热实验研究                                                                                                                              | 135 |
| EFFECTS OF HEAT AND MASS TRANSFER ON THE RAYLEIGH-TAYLOR STABILITY<br>AND ITS APPLICATION IN CRITICAL HEAT FLUX                                     | 141 |
| 流体湿润性能对干斑扩展引起沸腾危机的影响                                                                                                                                | 148 |
| SIMILARITY SIMULATION FOR MARANGONI CONVECTION AROUND A VAPOR<br>BUBBLE DURING NUCLEATION AND GROWTH                                                | 154 |
| BOILING HEAT TRANSFER ON MACHINED POROUS SURFACES WITH STRUCTURAL<br>OPTIMIZATION                                                                   | 166 |
| 第 4 篇 流动凝结 (FLOW CONDENSATION)                                                                                                                      | 183 |
| 非共沸混合工质水平管内凝结换热折算因子的实验关联                                                                                                                            | 183 |
| 表面多孔涂层对强化凝结换热的影响                                                                                                                                    | 187 |

|                                                                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| CONDENSATION ON THE OUTSIDE SURFACE OF A SMALL/MINI DIAMETER<br>TUBE FOR VAPOR FLOWING THROUGH A HORIZONTAL ANNULUS SURROUND<br>BY AN ADIABATIC CONCENTRIC TUBE ..... | 193        |
| STUDY ON LAMINAR FILM-WISE CONDENSATION FOR VAPOR FLOW IN AN<br>INCLINED SMALL/MINI-DIAMETER TUBE .....                                                               | 203        |
| THE EFFECT OF SURFACE TENSION ON FLOW CONDENSATION IN VERTICAL<br>SMALL-DIAMETER TUBE .....                                                                           | 215        |
| 水平细圆管内气液两相流动界面形状的分析 .....                                                                                                                                             | 223        |
| 细竖管内流动凝结液膜的稳定性分析 .....                                                                                                                                                | 228        |
| 细圆管内流动凝结换热的流型研究 .....                                                                                                                                                 | 234        |
| <b>第 5 篇 薄液膜传热传质 (HEAT AND MASS TRANSFER FOR THIN LIQUID FILM) .....</b>                                                                                              | <b>240</b> |
| THERMAL NON-EQUILIBRIUM EFFECT ON STABILITIES OF FALLING LIQUID<br>FILMS .....                                                                                        | 240        |
| FALLING LIQUID FILM THICKNESS MEASUREMENT BY OPTICAL-ELECTRONIC<br>METHOD .....                                                                                       | 249        |
| EXPERIMENTAL STUDY ON THE DRYOUT HEAT FLUX OF FALLING LIQUID FILM .....                                                                                               | 257        |
| ON THE EFFECT OF THERMOCAPILLARITY FOR FALLING LIQUID FILM FLOW<br>WITH CONSIDERATION OF HUMIDITY CONDITION .....                                                     | 266        |
| THE EFFECT OF INTERFACIAL EVAPORATION ON HEAT AND MASS TRANSFER OF<br>FALLING LIQUID FILM .....                                                                       | 269        |
| 内凹气液界面毛细压力在界面蒸发中的作用 .....                                                                                                                                             | 277        |
| <b>第 6 篇 凝固与融化 (SOLIDIFICATION AND MELTING) .....</b>                                                                                                                 | <b>283</b> |
| FREEZING AND MOISTURE MIGRATION AROUND A CYLINDER BURIED IN<br>UNSATURATED POROUS MEDIA .....                                                                         | 283        |
| THE PENETRATION RATE OF SOLID-LIQUID PHASE-CHANGE HEAT TRANSFER<br>INTERFACE WITH DIFFERENT KINDS OF BOUNDARY CONDITIONS .....                                        | 290        |
| 含湿饱和和多孔介质冻结过程中壁面效应的影响 .....                                                                                                                                           | 297        |
| NATURAL CONVECTION MELTING AROUND A HORIZONTAL CYLINDER BURIED IN<br>FROZEN WATER-SATURATED POROUS MEDIA .....                                                        | 303        |
| INFLUENCE OF MARANGONI FLOW ON THE MELTING PROCESS .....                                                                                                              | 311        |
| 固体融化过程中不同流动与传热机理分析 .....                                                                                                                                              | 319        |
| <b>第 7 篇 多孔介质传热传质 (HEAT AND MASS TRANSFER IN POROUS MEDIA) .....</b>                                                                                                  | <b>323</b> |
| NON-DARCY NATURAL CONVECTION AROUND A HORIZONTAL CYLINDER BURIED<br>NEAR THE SURFACE OF A FLUID-SATURATED POROUS MEDIUM .....                                         | 323        |
| FORCED CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A VERTICAL ANNULUS FILLED WITH<br>POROUS MEDIA .....                                                                               | 333        |

|                                                                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 地热田中的热质传递及动态响应研究 .....                                                                                                                                | 342        |
| 非均一多孔介质中的水热迁移研究 .....                                                                                                                                 | 348        |
| 多孔介质自然对流中温度梯度与浓度梯度的相互耦合 .....                                                                                                                         | 353        |
| A MODEL FOR THE THERMAL CONDUCTIVITY OF UNCONSOLIDATED POROUS MEDIA<br>BASED ON CAPILLARY PRESSURE-SATURATION RELATION .....                          | 358        |
| 2D THERMAL LATTICE-BOLTZMANN APPROACH FOR FORCED FLOW AND<br>CONVECTIVE HEAT TRANSFER THROUGH PACKED BEDS WITH IMPERMEABLE<br>BOUNDING SURFACES ..... | 363        |
| BOILING HEAT TRANSFER ON SURFACES COATED BY POROUS WICK WITH<br>OPEN CHANNELS .....                                                                   | 369        |
| <b>第 8 篇 生物热物理 (BIOLOGICAL THERMOPHYSICS) .....</b>                                                                                                   | <b>375</b> |
| 生物传热基本方程的研究 .....                                                                                                                                     | 375        |
| 直角坐标系中的第二类热边界条件下一维生物组织温度场的稳态分析解及<br>实验研究 .....                                                                                                        | 380        |
| A STEADY-STATE METHOD FOR MEASURING THE THERMAL CONDUCTIVITY AND<br>BLOOD FLOW VELOCITY BIOTISSUE IN VIVO .....                                       | 385        |
| <b>第 9 篇 测试技术 (MEASURING TECHNIQUES) .....</b>                                                                                                        | <b>390</b> |
| MEASUREMENT OF TRANSIENT BOILING CURVES OF WATER DURING REWETTING<br>OF A VERTICAL CIRCULAR TUBE .....                                                | 390        |
| CARS 光谱测温技术应用于燃油炉火焰温度场的测量 .....                                                                                                                       | 398        |
| 饱和含湿多孔介质自然对流传热传质的电化学方法实验研究 .....                                                                                                                      | 402        |
| <b>第 10 篇 微尺度传热传质 (MICROSCALE HEAT AND MASS TRANSFER) .....</b>                                                                                       | <b>407</b> |
| EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON LIQUID FORCED CONVECTION HEAT<br>TRANSFER THROUGH MICROCHANNELS .....                                                   | 407        |
| FLOW BOILING OF BINARY MIXTURES IN MICROCHANNELED PLATES .....                                                                                        | 419        |
| FRICTIONAL-FLOW CHARACTERISTICS OF WATER FLOWING THROUGH<br>RECTANGULAR MICROCHANNELS .....                                                           | 429        |
| HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF WATER FLOWING THROUGH<br>MICROCHANNELS .....                                                                         | 440        |
| 微槽结构和工质对槽内流动沸腾的影响 .....                                                                                                                               | 453        |
| V 形微槽内沸腾液体的流动阻力特性 .....                                                                                                                               | 457        |
| “WALL-ADJACENT LAYER” ANALYSIS FOR DEVELOPED-FLOW LAMINAR HEAT<br>TRANSFER OF GASES IN MICROCHANNELS .....                                            | 462        |
| CONVECTIVE HEAT TRANSFER FOR IN COMPRESSIBLE LAMINAR GAS FLOW IN<br>MICROPASSAGE WITH CONSTANT WALL TEMPERATURE .....                                 | 473        |

---

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第 11 篇 换热器 (HEAT EXCHANGERS) .....                                                                                               | 479 |
| 换热网络的同步综合设计 .....                                                                                                                | 479 |
| COOLING CHARACTERISTICS WITH MICROCHANNELED STRUCTURES .....                                                                     | 487 |
| STUDY ON IMPROVED PERFORMANCE OF PLATE HEAT EXCHANGER WITH<br>PACKED BEADS AND MINI-LONGITUDINAL CHANNELS ON PLATE SURFACE ..... | 499 |

# 第1篇 回顾和展望

## (REVIEW AND PROSPECT)

### 热物理和热工研究开发的进展与机遇<sup>①</sup>

**关键词：**热物理和热工；工程热物理；能源节约和综合利用；生态环境和生命系统中的热物理，高技术发展中面对的微细尺度化

#### 引言

兴起中的“工程热物理”，归属技术科学，成为沟通热物理研究和热工技术开发的桥梁，曾被原苏联学者称为“物理热工学”，也曾在我国使用过“热物理工程学”，亦即运用物理学知识进展、深化热工问题的分析研究，容许按工程学分析处理的方法抓主要矛盾和矛盾的主要方面做渐近的合理假设，推动相关工程技术的开发创新。工程热物理的数值模拟计算要严肃对待物理模型的可信性。传统的划分方式认为：科学发现是为了认识世界，工程技术是为了改造世界，正确认识世界才能合理改造世界，但并不排斥在改造世界的过程中改进和丰富对客观真实的认识。于是，在国际上又把热物理和热工合称为“热科学与工程”。在世纪更替之际，对工程热物理在我国的兴起以及热物理和热工的开拓进展作些回顾与展望，或将有助于迎接 21 世纪前叶的发展机遇。

#### 工程热物理的开拓是经济发展和社会进步的需要

工程热物理是技术科学中担负着为技术创新提供所涉及的热物理问题分析计算的科学依据的重任，并正在向不同工程技术领域不断渗透<sup>[1]</sup>。

热、电（磁）、光、声、化学反应与核反应，和在外力作用下的整体机械运动都是物质运动的基本形式，表征不同形式的能量。热运动是指物质内部分子的无序运动，所具能量属低位级别，并与宏观统计性的特征量“温度”高低有关。自然界到处存在着温度差异和物质多样化及其分布不均匀的浓度差异，而温度差异又常引起物质扩散，是地球生物圈内大气环流和物质与能量自发传递的根本动力。原则上，任何温度差异都可以作为能源开发利用，只是温差越小，开发的技术难度越高，经济竞争性越低。尚待开发的海洋能，不仅限于波浪携带的机械运动能。海水表面与深层间的温差能，还有与温度分布有关的盐分差异引起扩散迁移能。在一定条件下运动形态又可以相互转换，但物质与运动的总量保持不变，而且照例会引起从有序向无序运动的蜕化，伴随着能位降低而“发热”。因此，热物理现象是普遍存在

① 本文作者：王补宣，原载《物理与工程》，第 10 卷，第 6 期，1~4 页，2000 年。

的自然趋向。随着生产的发展和追求规模效益,现代工程设计和工艺过程中,势必经常遇到有关加热、冷却、相变、温控等各种各样的热工问题<sup>[2,3]</sup>,工程热物理的兴起顺应着经济发展和社会进步的实际需要,并从中得到不断的充实和丰富。

1900年,普朗克在导出炽热物体辐射的能谱式时,提出了量子学说,产生了量子理论,与相对论的创立成为20世纪最杰出的两项重大科学发现。20世纪上半叶经历了两次世界大战,迎来了后半个世纪的相对平稳和繁荣,促进了科技创新的蓄势待发与突飞猛进,形成“知识爆炸”。但人口激增,地球资源有限,急剧的工业化也造成了对能源动力供应与材料开发的苛求,使生态环境恶化。社会的发展从常规的工业化走向信息化,开始显示出知识经济时代的曙光。当前日新月异的高技术发展,使科学与技术的传统界限逐渐模糊,学科的人为分割和分化面临更多的挑战,推动着原有学科走向交叉和组合与重整。这种开拓趋向,将是今后不断形成新的学科前沿的主流。可以展望21世纪,它将继续深化和推动社会信息化,促进空间能源和资源的开发利用,推动生物和仿生技术的积极开拓。工程热物理也将面对需要,探索解决温度场、流速场、浓度场与电磁场、光场、声场、化学势场等不同特征量的场分布相互耦合情况下更复杂的能量与物质传输和温度控制问题的新机遇。计算机的普及和高容量化,计算方法与新型测试技术的不断改进,将丰富工程热物理开拓研究的手段和加快研究发展的进程。

### 能源动力和工艺节能与温控是推动热工开拓进展的传统领域

能源被喻为现代化生产的“粮食”。蒸汽机的出现促进了产业革命。20世纪由蒸汽机到内燃机、汽轮机、燃气轮机、喷气推进机和火箭等动力机械的更新换代,从常规的蒸汽动力和内燃动力到核动力开发,推动着人类社会工业化的加速发展。20世纪50年代,我国就把电力和交通作为工业建设的两大先行官。能源供应不足,曾长期制约了我国经济发展的速度。20世纪80年代初,明确了能源是我国经济和社会发展的战略重点,并且制定了“开发与节约并重,近期要把节约放在优先地位”的能源对策总方针。20年来,在动力设备的大型化、核动力开发与安全性研究、飞行器发射与回收以及增大电力供应和热设备与工艺节能等多方面展开了热物理基础和应用的研究,取得了工程热物理的积极开拓和明显的经济效益。但在粗放型经济增长方式下的能源利用效率只是提高到大约33%,仍远低于发达国家,而且工业用能所占全部用能量的份额高达2/3,生活用能仅占了16%。这表明工业节能的潜力巨大<sup>[4]</sup>。我国已制订并颁布了《节能法》,强调能源的优化配置与合理的集约型利用,要从设备节能走向更高层次的系统节能,提出要重视建筑隔热、通风、采暖、制冷、空调等综合的系统节能。并将逐步调整能源供应结构,使能源利用多样化,促进国民经济的可持续增长,保障社会发展,满足人民生活水平不断提高的需求。

能源开发与利用状况的改善,体现着科学技术整体水平的提高。人均用能量常被用来衡量一个国家或地区综合实力的强弱。优化热物理过程和降低能耗,可望在更高起点上考虑新材料、新工艺和信息等高新技术监控已有的进展,为中低位工业余热利用、实施“总能”系统以至多能源互补、综合利用的“泛能”系统开创新局面。所谓“能源危机”应科学地理解为开发应用技术上已成熟的、常规使用的化石能源资源有枯竭而引起难于供应之虑。21世纪将使新能源面临着新的大发展机遇。例如,拟议中的以同步轨道卫星在地球大气层外全天候地接收太阳能发电,借助微波方式传至地面,将使太阳辐射能成为21世纪真实的洁净替代

能源。地面上的太阳能热发电,也可望使用反射聚焦使到达地面的太阳能流密度成倍地浓集,从而提高动力装置的运行效率和降低发电成本。自然界还蕴藏有至今仍不清楚或尚难开发利用的大量分散或者非连续性的潜在能源。比如火山行将爆发前所蓄积的巨大能量,如能予以人工疏导,可化解天灾而又造福人类。物质世界是可认识的,但认识只能是渐进地积累。人类正是在不断改善生存环境的斗争中积极地进取。

科学的探索和成果开拓总会趋向两极的分化,以满足不同需求。20世纪在某些方面迅速大型化的同时,也谋求小型、轻型、紧凑化。例如,从核动力反应堆到核武器就经历着小型、轻型化的技术突破。在能源集中开发与供应基地建设的同时,正在出现建立分散补充热、电、气、冷多功能灵活联供的小型化能源中心的发展趋向,以缩短资金回收期,并有利于防止污染源集中而危害生态环境。于是,小型化的高技术新型发动机,例如热离子机和温差直接发电机等设想,由于投资风险的减轻,又引起新的研究开发的兴趣。信息材料、超导材料、生物与仿生材料等的实用化都对有效工作的温度范围有极其严格的苛求,这将促使温控技术的创新发展。除非真能实现有争议的“冷聚变”,否则要开发高能核聚变成为实际可用能源,就必须解决超高温等离子体脱离与壁面材料直接相接触的有效防护性冷却措施。

### 生态环境和生命系统中的热物理研究亟待开拓

工业的兴起和城市化的扩大,使我国的环境污染严重、生态平衡恶化,出现酸雨和土壤盐碱化和沙漠化。我国正在执行可持续发展的战略,重点在整治环境污染,保障人民的生活健康。所以环境和生态领域召唤工程热物理研究的渗透。例如,兴建大规模的核电站必须考虑核废料长期安全存放的释热问题和核辐射泄漏的大气扩散问题;工业与城市废水和废液被注入地下或排往江河湖泊,由于有温度梯度引起自然对流而出现污染源的扩散及其治理问题等等。大型和巨型热电站的运行,无论常规的冷水塔水冷或者空冷,都会有集中的热污染,改变就近的大气环境,影响局部地区的“微”气象。

多孔介质中物质与能量的输运是地球生物圈内普遍存在的自然现象。土壤和生物组织都是天然的多孔介质。除了非常致密的金属、某些塑料和岩石,所有的固体或者类固体都程度不同地具有空隙性。土壤表层季节性的冻融过程将直接制约土壤中水、热、湿迁移的动态规律,不仅给农业生产,也给工程基础设施造成影响,特别是冻胀现象会出现破坏性的挤压力。经典的达西渗流定律和毛细滞后学说现已受到科学质疑,正经受实践的考验<sup>[3]</sup>。在农业工程化过程中,揭示土壤温度的动态变化,弄清这个温度-时间关系的影响因素及其影响程度,将有助于控制水份的需求和肥效,从而调控植物生长的速率,还将有助于最适时地施用杀虫剂。搞清日照、气流传热作用下的植物所需水量的供应关系,还将有望利用在排灌水中添加抑制剂降低蒸发率,这对干旱和西部与北部缺水地区实现节水和节能农业将产生可观的社会经济效益。农牧产品及其加工处理,包括谷物干燥、果蔬的人工催熟和贮存保鲜,不但依靠气流,还会依靠辐射的耦合,以优化热、湿迁移的生态环境。农作物的生长造成地面起伏式的粗糙变化,将影响气流和辐射,干扰温度分布和水份蒸发。冷表面层的长期稳定将引起封冻,需要研究破坏其稳定性的方法与技术。就连城市公园的设置和绿化,也会对城市气候产生影响。

21世纪预计是生物工程与仿生技术大发展的时代,也将是医用器具高性能和多功能化,极具高科技商业竞争的时代。这要求生物医学工程热物理研究的积极配合,作好相应的科学储备<sup>[5]</sup>。生命系统是典型的开放系统,离不开与赖以生存的环境进行物质和能量的交换。生

命活动实际反映出生物体,特别像人体在中枢神经控制下通过血液流动、呼吸换气、汗腺发汗、寒颤等生理反应所具备的自适应调控本能。增减衣着或配备防护措施,是调温反应的补充,以削弱受体环境的影响程度。对外界的感受和刺激还会造成心理因素的随机多变性,使生化反应的迁移热物性数据测定的不确定性明显增大,只能有概率统计性的意义。总之,生命体总耦合着热物理现象,但其定量分析远比非生命体的因素难得多。兴起中的生物组织工程认为病理的状况将是环境改变了表层细胞传给器官的生物信息,启动了基因组织隐性或显性的转变,医疗正是要纠正、修补、回复自适应的调控本能。进展中的低温生物医学技术<sup>[6]</sup>正在实现生物材料的长期存活,相应的降温 and 复温都有生物活体耐变的适应问题,需要防止组织液受冻结而出现冰晶化和受热融化时的损伤破坏作用。

### 高技术发展中面对的微细尺度化是热物理研究的新兴前沿热点

热物理研究的工程问题通常处理的空间尺度约为  $10^{-3} \sim 10^1 \text{m}$ , 地热和石油开采可达  $10^2 \sim 10^3 \text{m}$  量级, 航天器的发射可达远离地面的  $5 \times 10^5 \text{m}$  量级。计算机的兴起和小型、微型化以及微电子、光电子器件的急速发展, 带动了微米、纳米加工技术的兴起, 促进了微细结构如计算机的超高集成电路、微型器件、微机械系统与微电子机械系统的迅猛开发。这种微细化尺寸的空间, 对于气体将产生“稀薄性”效应, 亦即介质连续性假设有待修正。大气压力下空气的分子平均自由径约  $0.1 \mu\text{m}$ , 可见光波长小于  $1 \mu\text{m}$ , 超薄材料或涂层已可薄到  $1 \mu\text{m}$  左右, 超级抛光表面的粗糙度或空穴尺度已可小于  $500 \text{nm}$ , 氢原子直径大约  $0.1 \text{nm}$ 。小于  $1 \text{mm}$  的微米量级, 还远不能与微观层面相混淆, 不能单纯使用分子运动论。微米量级仍处于由宏观向微观过渡的“细观”层面, 仍须考虑分子群体的相互作用, 包括边壁的表面力和相际界面效应, 出现一些有别于熟悉的由宏观法则所预示的“超常性”。空间尺度微细化后, 重力对流体影响削弱、直至消失, 趋近于航天失重情况下因微重力、零重力引起流体浮升力的消失, 气、液相变也将由重力主控型转向表面张力主控型, 使蒸气泡形成、跃离、运动的动力学机制为之改观。壁面不平整度(粗糙率)对流体流动的影响扩大, 而且在非常薄的贴壁层内流体的行为也会受到壁面固体分子的干扰作用, 使流体的粘性和导热系数发生变异。就连传统的、作为热物理基本宏观统计量“温度”, 在空间尺度微细化后如何正确定义和测定也成了争议的问题。在微尺度条件下, 还将涉及光子、声子、电子等的耦合作用, 使问题涉及非线性化、非局域平衡性等复杂现象。这些, 都有待于热物理的研究开拓, 提高到对实际认识的更高和更深层次。

机遇与挑战总是相孪生的, 本文只是概略地展望工程热物理将在新世纪科技进步的挑战中获得众多的发展机遇。

### 参 考 文 献

- 1 王补宣. 面临新世纪机遇的工程热物理. 世界科技与发展, 1998, 20 (5): 68 ~ 70
- 2 王补宣. 工程传热传质学上册. 北京: 科学出版社, 1982
- 3 王补宣. 工程传热传质学下册. 北京: 科学出版社, 1998
- 4 王补宣. 节能, 能源百科全书. 北京: 中国大百科全书出版社, 1997, 247 ~ 249
- 5 王补宣. 前进中的生物医学工程热物理. 科学前沿与未来, 1998, 第三辑: 104 ~ 116
- 6 华则钊, 任禾盛. 低温生物医学技术. 北京: 科学出版社, 1996

# FORCED-CONVECTION AND BOILING CHARACTERISTICS IN MICROCHANNELS<sup>⊖</sup>

## ABSTRACT

A sequence of experiments was conducted to investigate the fluid flow and heat transfer characteristics in microchannels with/without phase-change in last few years. More attentions have been paid to understand the flow boiling heat transfer performance and phase-change transition mechanism in microchannels. In these experiments, the single-phase and flow boiling heat transfer of pure water, pure methanol and water-methanol binary mixtures flowing through eight rectangular and six triangular microchannels were observed and measured. The microchannel size, geometrical configuration, and mole fraction of water-methanol binary mixtures were experimentally found to have critically significant impact on single-phase forced-convection, on flow boiling, especially nucleate boiling, and on bubble formation and growth in microchannels. A physical model accounting for the effect of channel size was proposed to theoretically analyze the single-phase gas flow and heat transfer through microtubes. For flow boiling and nucleation in microchannels, two new concepts "evaporating space" and "fictitious boiling" were proposed to explain the unusual phase-change transport phenomena. A dimensionless number and related criterion, for determining the phase transition in microchannels, were derived theoretically. The dynamical analyses of the system indicated that nucleate boiling in microchannels is almost impossible, and the nature of this transport phenomenon is found to be thermodynamic nonequilibrium.

## INTRODUCTION

The rapid increase of practical engineering applications, as for micro-devices, micro-systems, advanced material designs, and micro-manufacturing, is creating a strong demand for better understanding of microscale transport phenomena and causing a noticeable extension of thermal science and heat transfer research from traditional research areas or macroscale to microscale. Single-phase convection and boiling of liquids in microchannels and/or microstructures, as one of the very important topics in microscale transport phenomena research area, have unique significance in the development of new technologies and devices for control of energy transfer and other advanced applications requiring very compact and extremely large heat-flux heat exchangers. As noted by Yang and Zhang (1992), and Tien et al. (1994), the investigations, including theoretical analyses and experimental observations in the open literature, conducted in recent years have shown that microscale transport processes have dramatically distinct thermal fluid flow, heat transfer, and other thermal transport as compared to conventional situations.

---

⊖ Authors: X.F. Peng (彭晓峰) and B.X. Wang (王补宣), Published in Proceedings of 11th IHTC, Kyongju, 1998, Taylor and Francis, Vol. 1 (Keynotes), 371 ~ 391, 1998.

Tuckermann and Pease (1981, 1982) and Tuckermann (1984) demonstrated that the electronic chip was able to be effectively cooled by means of water flow in microchannels fabricated on the circuit board on which the chips are mounted, and the dissipated heat flux was up to the order of over  $10^7 \text{ W/m}^2$  while the surface temperature was maintained at the level of less than  $130^\circ\text{C}$ . These conclusions greatly promote researchers and engineers to understand the characteristics of the related transport phenomena and/or develop new technology for practical engineering applications. Actually, as a high performance cooling technology, microchannels and/or microchanneled structure are utilizing in the development of ultra large scale integrated circuits, spacecraft thermal control and other high technology fields, so as to dissipate high density heat generation at low operating temperature. This technology is also rapidly being extended to other applications because of the tremendous capacity of this type of system for heat removal. As a sequence, great attention has been paid to the investigation on the heat transfer in microchannels/microstructures since early 1980's. Due to very small characteristic scale having dimensions ranging from several hundred to 0.1 microns, the single-phase fluid flow and heat transfer in microchannels and microstructures exhibit significantly different characteristics from those in conventional-sized channels. This was described by many investigations available in open literature in which substantial experimental observations/data and theoretical evidences were provided (Wu and Little, 1983, 1984; Goldberg, 1984; Keyes, 1984; Mahalingam, 1985; Kishimoto and Ohsaki, 1986; Koh and Colony, 1986; Hwang et al, 1987; Nayak et al, 1987; Mahalingam and Andrews, 1988; Tien and Kuo, 1988; Samalam, 1989; Sasaki and Kishimoto, 1986; Harley et al, 1989a, 1989b; Schubert et al, 1989; You, 1989; Philips, 1990; Weisberg et al, 1990, 1992; Hoopman, 1990; Little, 1990; Choi, 1991; Choi et al, 1991; Pfahler, 1991; Pfahler et al, 1990a, 1990b, 1991; Lin and Pesano, 1991; Xin and Shi, 1992; Zhang and Xin, 1992; Peng and Wang, 1993a, 1993b, 1993c, 1993d, 1994a, 1994b, 1994c, 1994d; Wang and Peng, 1994; Lin et al, 1994). A brief review was made by Peng and Wang (1994b) to discuss the research trends and achievements on this subject in last few years prior to 1994. Some emphases were addressed on their research on the fluid flow and heat transfer in microchannels with/without phase change.

In recent four years, the fluid flow and heat transfer in microchannels and microstructures were interested by much more scientists and engineers. Yu et al (1995) experimentally investigated the flow of single-phase fluids in microtubes. They found that the Reynolds analogy was not applicable and developed an analogy by considering the turbulent eddy interacting with the walls as a frequent event causing a direct mass transfer and thermal energy exchange between the turbulent lumps and the wall. Rujano and Rahman (1995) numerically investigated the hydrodynamically- and thermally-developing laminar flow and heat transfer processes in microchannel cooling passages in the silicon substrate of a high-heat-flux electronic device. Goodson et al (1995) employed a microchannel heat sink in CVD diamond for laser-diode arrays, and theoretically predicted the heat transfer performance. Yin and Bau (1995) developed 3-D model to simulate the heat transfer of microchannel heat exchanger combined with fluid flow in the channels. They found that there exist an optimum geometry minimizing the heat transfer resistance. Kuan (1996) experimentally evaluated the heat transfer performance, and compared their results with the prediction of Yin and Bau (1995). Tonkovich et al (1996) and Roy and Avanic (1996) developed some