

面向二十一世纪热科学研究

MIANXIANG ERSHIYI SHIJI REKEXUE YANJIU

庆贺王补宣院士七十五寿辰论文集

论文编辑组 编著



高等教育出版社

106

面向二十一世纪热科学研究

——庆贺王补宣院士七十五寿辰论文集

论文编辑组 编著

编辑组组长：过增元

编辑组成员：华泽钊 张 政 方肇洪 虞维平 彭晓峰

编辑组秘书：李俊明 杜建华

高等教育出版社

103823

(京) 112 号

内 容 提 要

随着科学技术的飞速发展,各学科之间相互交叉、相互渗透,产生了许多与热科学和技术有关的前沿课题。本书是我国工程热物理界专家最近几年有关热科学前沿课题的研究成果的论文集,从该论文集可以了解我国热科学的研究现状。需要特别提到的是,我国工程热物理学科的奠基人之一、国内外知名学者王补宣院士为本书撰写了“我国传热研究的进展与展望”一文,展望了传热学的发展趋势。该书的出版不仅是献给王补宣院士 75 寿辰的厚礼,还必将极大地推动我国热科学的研究。

图书在版编目(CIP)数据

面向二十一世纪热科学研究:庆贺王补宣院士七十五寿辰论文集/论文编辑组编著.北京:高等教育出版社,1999
ISBN 7-04-007377-3

I. 面… II. 论… III. 工程热物理学-研究-文集 IV. T
K121-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 07732 号

面向二十一世纪热科学研究——庆贺王补宣院士七十五寿辰论文集
论文编辑组编著

2167/330

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
电 话 010-64054588
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

邮政编码 100009
传 真 010-64014048

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京地质印刷厂
开 本 787×1092 1/16
印 张 16.75
字 数 385 000

版 次 1999 年 9 月第 1 版
印 次 1999 年 9 月第 1 次印刷
定 价 28.80 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序

在科学技术日新月异、突飞猛进的今天，科学发展的突出特点是不同学科之间的交叉和相互渗透，科学与技术及学科之间的界限逐渐模糊，并不断地形成和开辟科学技术的新天地。能源、材料、电子信息、航天、环境、生物医学等科学技术领域的最新成果繁衍出许多和热科学与工程有关的前沿课题，工程热物理学科的发展面临着新的挑战，也呈现出新的机遇。在 21 世纪即将来临之际，如何抓住机遇，迎接挑战，无疑是我国工程热物理学科研究与未来发展的关键。

1997 年正值我国传热传质学界先驱和学术带头人、工程热物理学科奠基人之一、著名热工学教育家、国内外知名学者王补宣院士 75 寿辰。先生在过去数十年的教学与科研生涯中，为我国教育事业和科技人才培养做出了杰出的贡献。他担任国家教育部高等工业学校热工教材编审委员会和国家教委高等工业学校热工课程教学指导委员会委员、主任委员长达 30 余年，兢兢业业地为高校教材建设奉献自己的才智。在科学研究上，先生更是取得了誉满中外的成就。尤其是进入 20 世纪 80 年代后，他不仅自己开拓传热传质学和工程热物理学科研究的新方向，不断取得成果和进展，还积极推动和率领国内学术界同行向世界进军，使中国在国际学术界占据了应有的重要地位。在 21 世纪即将来临和先生 75 寿辰之际，先生的学生们为表达对先生培育之恩的感激，也为表达对先生学术成就和各方面杰出贡献的由衷敬佩，殷切地希望先生继续率领他们及国内同行以崭新的面貌跨入 21 世纪，为此拟题组织了一次题为“面向 21 世纪热科学研究”的专门学术交流会向先生祝贺。

这次活动不仅得到了先生海内外学生的热烈响应，也得到了国内同行的热情支持，他们积极投稿，并且有近 70 位同行出席交流，其中包括从美国、香港等地远道而来的学生。会议分五个专题：(1)微小尺度传热；(2)相变与强化传热；(3)热科学中的非线性与非平衡问题；(4)热物理实验与测试的新发展；(5)工业过程中的热物理问题。与会者以自由发言讨论为主要形式，针对这些热点和前沿问题发表了自己的见解，畅谈了在 21 世纪来临时如何迎接挑战，使科研工作更上一层楼。讨论会生动活泼，各抒己见，交流广泛，讨论深入。无论是组织形式还是实际收效，这次会议都是一般学术会议少有的，大家都觉得余兴未尽。的确，用这种方法表达学生、同行们对自己师长的敬仰和寿辰的庆贺，非常有特色，先生欣慰地看到了自己心血的结晶和工作的延续。

会议组织委员会根据研讨会讨论情况，整理发言稿并精选了这次活动征文共 39 篇学术论文编辑成册，以飨更多的同行和读者。文集反映了工程热物理同行，尤其是传热传质研究当今的一些主要研究方向和进展，同时不少文章对现今和未来的发展作出了分析。

寥寥数语，不成敬意，只是作个简单说明，以代序。

蔡睿贤 过增元 彭晓峰

1997-06-10

目 录

1. 我国传热研究的进展与展望.....	1	王补宣
2. 热力学、环境、能源与可持续发展.....	6	吕灿仁, 马一太, 王怀信, 杨 昭, 陈 东
3. HFC-134a 的热物性研究.....	12	朱明善, 韩礼钟, 史琳
4. 蒸汽压方程的研究进展.....	18	项红卫, 谭连城, 陈钟颀
5. 导热反问题与稳态热流测量.....	25	方肇洪, 解东来, 刁乃仁
6. 平壁随机导热分析.....	31	胡亚才, M. G. 捷曼尔, 朱梅芳, 姜周曙, 屠传经
7. 利用热线法原理测量半透明介质导热系数的新方法.....	40	张欣欣, 于帆, 高光宁
8. 微槽通道内液体核化的热力学特性.....	47	彭晓峰, 胡杭英
9. 微小空间内不同表面上的沸腾传热研究.....	53	林志平, 马同泽, 张正芳
10. 界面理论对微尺度流动与换热研究的启示.....	62	李俊明, 王补宣, 彭晓峰
11. 亚毫米级狭缝通道中液氮自然对流沸腾换热的实验研究.....	69	郭廷玮, 周远
12. 微槽内制冷工质 CFC-12 的流动沸腾研究.....	74	孙晗, 丁良士
13. 微尺度的热参数测试.....	78	顾毓沁, 朱德忠
14. 生物与食品材料低温保存中的玻璃化方法.....	85	陶乐仁, 华泽钊, 刘宝林
15. 微重力下双组分核态沸腾换热分析.....	93	柴立和, 彭晓峰
16. Flow in the microlayer under a vapor bubble in microgravity.....	100	D.M. Christopher, B.X. Wang, X.F. Peng
17. 重力和微重力场中均相核态沸腾单个蒸汽泡的生长模型.....	108	虞维平, 周晓东, 彭晓峰

18. 基于稳态实验数据评价《1996 膜态沸腾传热表》	114
陈玉宙, 陈海燕, 杨春生	
19. 滴状冷凝传热研究的进展	119
马学虎, 王补宣	
20. 蓄冷球内对称凝固问题的奇异摄动解分析研究	125
郑宗和, 杨敬, 韩英书, 张赫, 郭新川	
21. 多孔介质的非均匀性与传递过程的非平衡性	130
杜建华, 王补宣	
22. 毛细多孔介质渗流与微细槽道流动	135
雷树业	
23. 多孔介质中自然对流传热传质的非达西效应	141
陈宝明, 王补宣, 方肇洪	
24. 多孔介质干燥热物理过程研究的展望	148
施明恒	
25. 我国计算传热的研究状况和设想	151
张政	
26. 计算传热学的近代发展及展望	157
陶文铨	
27. 传热强化新概念	173
过增元, 李志信, 胡槐林	
28. 非等温二维平行壁面剪切流的非线性转换理论	179
杨立, 杜先之	
29. 对流换热准则方程形式的研究	186
王丰, 刘涛	
30. 流体脉动强化传热的实验研究	191
张志军, 王补宣	
31. 关于处理大 Knudsen 数条件下高温电离气体向颗粒传热的动力论方法	196
陈熙	
32. 颗粒相在气固多相流强化传热中的作用	203
岑可法, 骆仲泐, 周劲松, 高翔	
33. 回流区射流分级着火燃烧机制及工业应用	212
钱壬章	
34. 换热器热力学优化准则——驱动力均分原理	223
杨善让, 徐志明, 赵晓彤, 王建国, 陈福	
35. 火电厂热力系统焓分析通用程序设计	228
蔡琰, 吴存真, 陈勇	
36. 旋叶式汽水分离器中两相分离机理的研究	232
黄素逸, 陈韶华	

37. 蓄冷空调系统的探讨	238
陈则韶, 赵红玲, 程文龙, 方贵银	
38. 单吹瞬变技术的扩展及其精度研究	243
蔡祖恢, 李美玲, 罗行	
39. 多效溴化锂吸收式冷温水机的研究现状及展望	251
姜周曙, 胡亚才, M. S. 阿迪尔, 屠传经	

我国传热研究的进展与展望

王补宣

(清华大学, 北京, 100084)

摘 要

对传热学在我国的兴起与发展作些简要的综合回顾,特别是近 20 年来的主要进展,将有助于展望未来,为迎接 21 世纪前叶的机遇做好准备。

一、传热学的开拓是经济和社会发展的需要

自然界到处存在着温度差异和物质多样性与不均匀分布,这是地球生物圈内大气环流和能量自发传递的根本动力。传热学所研究的,是由温度差异引起的能量传递过程,包括有相变、物理化学或化学反应以及因组分浓度差异伴随发生物质迁移时的传热过程。随着生产的发展,现代工程设计和工艺过程中,经常遇到有关加热、冷却、蒸发、凝结、融化、凝固、隔热保温等各种各样的实际问题,使传热学迅速发展为当今技术科学中了解各种热物理现象和创新相应技术的主要基础学科。高温部件保护性冷却和干燥的技术进展充实了有传质耦合的传热学内涵。物质存在的千姿百态和物质世界的多样性,热只是物质运动形态之一,归属于物质分子无序运动的低位能量,其特征量为宏观统计性的“温度”高低。在改造客观世界的生产斗争中,势必会遇到热量传递的同时出现能的形式之间转化的复杂过程。于是,广义的传热学可被看作是“能量传递学”。这当然与能源、动力开发和节约利用密切相关。传热学还和材料的冶炼、熔铸和加工,核能利用和航天动力与热控制,信息器件的温控,生物技术与生物医学工程,环境净化与生态维护、农业工程化以及军事现代化等不同领域都有所牵涉。特别是当今高科技的迅猛发展,面临着温度场、速度场、浓度场、电磁场、光场、声场、化学势场等各种场相互耦合下的传热过程和温度控制问题^[1]。而计算机的逐步普及,计算方法和激光、红外等测试技术的继续改进,丰富了传热传质研究手段,加快了研究进程。

研究传热传质的基本规律及其具体应用,计算给定条件下的传热传质的速率及其控制,寻求传热强化和削弱的技术途径,是传热学研究的主要任务。要求传热分析细微化和传热计算精确化,包括发现新的影响因素及其作用机理,不断完善学科体系,则是发展方向。日新月异的高技术开拓,使科学与技术的传统界线逐渐模糊,学科的人为分割和分化局面受到挑战,正在促进不同学科之间的交叉和趋向于新的组合与重整,形成新的学科前沿。传热学必须迎接挑战,抓住机遇,为改造自然环境、造福人类社会和促进我国社会主义经济发展与四个现代化建设做出新的贡献。

二、能源动力是推动传热学进取的传统领域

能源、材料和信息号称现代文明的三大支柱。材料,包括信息材料的制备与加工,需要能源供应的支撑,而材料与信息科技的发展又在改变着资源开发与利用的面貌。能源是为现代生产活动提供“粮食”。随着工农业规模的发展,传热学只是在 20 世纪初才从物理学的热学部分独立出来而形成专门的学科,开始自成系统地开拓与发展,以适应扩大能源供应量、提高能

源利用效率和节约能源消耗的需要。20 世纪前半叶,发生了两次世界大战,我国更经历了长达 8 年的残酷壮烈的抗日战争,与所有发展中国家一样,能源是我国经济和社会发展的战略重点。

20 世纪 50 年代初我国就把电力和交通列为两大先行官。20 世纪 80 年代初,制定了我国新能源对策的“开发与节约并重,近期要把节约放在优先地位”的总方针。二十多年来,在动力装备的大型化、核动力开发与安全性研究、飞行器的发射与回收以及热设备的节能等多方面积极开展了导热、对流、辐射和复杂几何形状及复杂边界条件耦合的传热过程的基础和应用研究,开拓了诸如流动沸腾^[2,3]、热流体学^[4]、强化传热^[5]、热管^[6]、气膜冷却^[7]等的研究,有了自建的核动力电站,也取得了某些明显的经济效益,并编著了一些适合国情的传热学基础教学用书^[8]。流动沸腾的研究^[3,9]为动力,包括核动力设备运行安全所需要,而膜沸腾的研究也对高速淬冷和金属材料表面改性的技术发展有重要意义^[2],但在粗放型经济增长方式下的我国能源利用效率只是从 1980 年的 28%提高到了 1995 年的 32%,仍然远低于发达国家,而且工业用能占全国用能的高达 2/3,生活用能只占 16%,表明工业节能的潜力极大。预计 2000 年时我国全年所需能源消费总量约 19 亿吨标煤,供需缺额达 4 亿吨标煤,要靠节能的技术进步和实际进展解决。为此,我国已制定和颁布了《节能法》,重申我国已制定的能源总方针,强调实现能源资源的优化配置与合理利用,期求从“粗放型”向“集约型”经济发展方式的根本转变,达到能源利用的最佳效益,促进国民经济向可持续增长的节能型发展,保护环境,保障社会发展,满足人民生活需求。强化传热传质和降低散热损失,可望在更高起点上考虑新材料、新工艺等高科技的已有进展,开发出高超紧凑式的多流体换热器,为中、低位工业余热利用、实施能源综合利用的“总能”系统,以及多能互补的“泛能”系统开创新局面。

高温电离气体传热与流动特性的研究^[10],对热等离子体的诊断、磁流体发电、电弧技术以及超细粉材料等离子体加工过程等的当前和未来发展是有意义的。核聚变在工业上的实现,有待于解决超高温等离子体在磁场或其他有效约束下脱离与壁面直接接触的特殊防护及其定量的控制。能源利用方式的任何更新,都会对传热分析带来新的具体问题。物质世界是可以认识的,但认识只能是渐进的积累。自然界还可能蕴藏有至今仍未知的大量分散的、非持续作用的潜在能源有待于发掘和开发利用。

三、环境和生态领域呼唤传热传质研究的渗透

20 世纪经历了战争破坏与和平生息的考验。资源、人口与环境成为当前国际社会的三大问题。近年来,我国工业的兴起、城市的扩大、人口的增长,使环境污染严重、生态平衡恶化。我国正在执行社会可持续发展的战略,将重点整治环境的净化,保障人民的生活健康。像大规模兴建核电站,必需考虑核废料处理的长期安全性问题。环境和生态领域已经为传热传质研究的应用渗透提供了广阔的新天地。

多孔介质中物质和能量输运是地球生物圈普遍存在着的现象。自然界的土壤、植物根茎叶、动物和人体皮层与神经组织均属多孔体。从超巨尺度的宏观角度来说,就连地貌也可算作随机起伏的多孔表面。除了致密的金属、岩石和一些塑料之外,几乎所有固体和类固体材料都不同程度地具有空隙性。流化床同样可被看作是松散性的多孔介质。地下表层中的石油、天然气和水构成复杂的多元体系,是能源资源勘测和开发的“地热储工程”对象。多孔介质传热传

质的基础性研究是形成交叉和边缘学科的一个潜在出发点^[11]。在自然科学基金资助下,多孔介质热湿迁移特性和自然对流、渗流和相变传热学多方面的研究取得了有所突破的进展^[12],包括对经典的有关“毛细滞后”现象的学说提出了挑战并作出新的解释^[13],多孔介质的渗流传热,因流速受限制,由温度梯度诱发自然对流的影响通常不容忽视,需要研究相耦合的“混合对流”简化而又实用可信的工程计算方法及其依据,探讨并检验了扩展达西流模型的适用性,分析计算了有内热源时的流型变化及其对传热的影响^[11]。采用孔隙-裂缝各相异性的双孔隙模型成功地再现了西藏羊八井地热热储开发史,为排水回流的方案提供了决策依据^[14]。运用多孔体模型,提出了改进型的生物传热的基本方程^[15],用以测算在体生物组织治疗时的温度场和制定测试在体组织热物性与血流速度的技术。针对冷冻开挖技术,尝试分析了非饱和含湿岩土的冻结与凝结传热耦合过程^[16]。土壤表层季节性的冻融过程将直接制约着土壤中的水、热迁移的规律,不仅给农业生产,而且给工程建设造成影响,特别是冻胀现象会出现破坏性的挤压应力,提出不考虑液相自然对流的经典 Stephen 问题和考虑液相自然对流时不同热边界条件下冻结或融化前沿的移动速度^[17]。

农业工程化,需要弄清土壤温度分布的动态变化规律,以有利于控制水分的需求和肥效,还将有助于最适时地施用杀虫剂和适当选定喷雾剂,对干旱和缺水地区实现节水农业和节能增产会有可观的经济效益。生态环境的研究也在促进“微气象学”研究的发展。

四、生命系统中的能量与物质传输的研究亟待开拓

生物工程和医学,涉及到生命活动及其自律调节,涉及到精神与物质、思维与感觉、信息传递与智力的演化。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。空气、水和日照是生命维持的三大要素,需要摄取有效养分、维持代谢作用和排泄有害物质。生命活动实际反应出生物体,特别是人体的温度,在中枢神经控制下通过增减组织间血液流量以及汗腺的发汗、寒颤等生理反应而具有自适应的调控本能。增减衣着和配备防护措施等行为是对生理调温反应的补充,以削弱所受体外环境气候的影响。生命体的热现象远比无生命“活力”时的复杂。对外界的感受和刺激还会造成心理因素的随机多变性,决定了活体输运过程本质的不定常性,使生化反应和迁移热物性数据测定的不确定性增大,只能具有概率统计性的意义^[18]。由于人体结构的脆弱性和脑功能的高度复杂性,医学仍然是以临床试验为主的实证性学科。在临床应用中,常根据局部温度的变异以诊断癌症,采取热疗或冷疗。近年来,生物工程中兴起了一个新的分支“生物组织工程学”,认为环境影响造成体温的变动主要局限在浅层组织,人体深部的温度基本上维持正常的 37℃,病理的状况实质上反映生命活力抗拒朝向无序演变,直至死亡的过程,或者是环境改变了细胞的生物信息,启动了基因组织隐性或显性的转变。生物传热的基本方程所描绘的,正是在体组织中的热传播,因此不涉及相变问题。生物传热的分析所必须面对的难题将是合理顾及血流影响的物理数学模型问题。血液具有非牛顿流体的属性,几乎所有生物组织和生物材料都表现为粘弹型性。由于对生物体,特别对人体进行实验,不容许危及被实验者的健康与生命,因此发展相应的数值模拟有着特殊的意义。但完整的人体热模型应包含大量生理的,甚至心理的主控因素,而在医疗上实用的局部温度预示,却可以把局部代谢热和血流率作为被动模型处理^[19]。重要的是对活体组织热物性、代谢热、

血流率数据库的积累与更新。

进展中的低温生物医学技术正在实现生物,包括人体器官和活体细胞与胚胎的长期存活。无论降温或者复温,这些组织都有耐变的适应问题,将涉及组织液的冻结而出现“冰晶化”和受热融化时对活组织的损伤、破坏作用。已发展出使用低温减冻保护和采用快速冷却使细胞组织“玻璃化”(非晶态固化)的高技术^[20]。这在本质上属于细胞水平的溶液冻、融传热传质过程特性的预示和控制。近年来,国际上对食品工业的研究热,也掀起了对食品原料的冷藏保鲜和生物制品的储备与储存问题的深化研究。

21 世纪可能是生物工程与仿生技术,包括信息处理技术大发展的世纪,也将是医疗保健水平亟需提高,以适应社会发展需求的世纪,要求生物医学工程传热传质的研究积极配合作出相应的科学储备。

五、微尺度传热的研究是高技术发展中又一个新兴前沿热点

计算机的小型化和微型化带动了微米、纳米技术的兴起。由于半导体材料以及未来的光、声计算机和生物智能型计算机等所使用的材料对温度的高度敏感性,芯片层叠技术发展又加剧了散热的“热障”问题,促使高兆位计算机、超高集成电路和微电子与光电子器件、微机械系统和微电子机械系统的开发亟需空间微尺寸管槽中的流动与传热特性的研究,以提供技术储备的可靠数据。计算机的高速化还使芯片受超高频率的冲击,大功率短脉冲激光加工技术同样遇到了时间尺度以纳秒、皮秒,甚至飞秒计的超快速过程,并引起所传输光子流能束与物质之间的相互作用问题。在这种超短促的高频下,芯片、薄膜材料与基座中会出现波动导热,强化传播中的热量在固体内部的穿透深度。除了空间和时间微尺度外,在航天技术中将遇到重力微尺度化而使自然对流严重削弱,以致消失的影响。

亚微米量级的微尺寸管槽中的流动与传热特性的研究,将为亚微米和微米级,以及今后亚纳米级的微机械系统,包括微型换热器和开发生物探针与微型医疗器件、微传感器和微执行器等提供可靠的新型冷却或加热的运行控制技术。通过几年来渐进的不断探索,确定了许多超常性质^[21]。微尺度的相变传热,不仅对微电子器件的冷却具有重要意义,也吸引着纳米颗粒材料和微孔型催化剂的制备和推动材料设计现实化的科技人员的注视,涉及到研究方向由传统的宏观向微观过渡的细观(介观)层次,触及非线性和热力学非平衡的考虑^[22]。毛细力引起热毛细现象,将削弱重力的作用影响。这方面的研究有待于更多的实验和理论工作。

六、结 束 语

本文试图从近年来国际和我国科技发展中传热研究的一些趋向,展望 21 世纪前期所将遵循的若干基本趋势,即:社会进一步的信息化,将加速科学技术的传播和普及,推动社会科学化和以知识经济作为时代特征的进程,将出现传热传质研究的新的机遇。21 世纪很可能出现材料科学分子设计的实用化和生物技术取得突破性的进展,也将继续寻求生存空间的跨越地球的界限。这表明,传热传质学正同时面临着微细尺度和超巨尺度的双重考验。

参 考 文 献

- 1 王补宣. 工程传热传质学:上册,下册. 北京:科学出版社,1982,1998

- 2 王补宣, 张能力, 彭晓峰. 固体表面上流动膜沸腾与液滴蒸发机理研究的新进展. 物理, 1992, 21(4): 208~209
- 3 Wang B X, Peng X F. Film boiling for liquid flowing with higher velocity. Int J Heat and Mass Transfer, 1992, 35(3): 675~682
- 4 过增元. 热流体学. 北京: 清华大学出版社, 1992
- 5 顾维藻, 神家锐, 马重芳等. 强化传热. 北京: 科学出版社, 1990
- 6 马同泽, 侯增祺, 吴文锐. 热管. 北京: 科学出版社, 1982
- 7 葛绍岩, 刘登瀛, 徐靖中等. 气膜冷却. 北京: 科学出版社, 1985
- 8 杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 9 林宗虎. 气、液两相流和沸腾传热. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- 10 陈熙. 高温电离气体的传热与流动. 北京: 科学出版社, 1993
- 11 王补宣. 多孔介质传热传质研究的意义和现状. 中国科学基金, 1991, 1: 32~34
- 12 王补宣. 多孔介质的传热传质. 清华大学学报, 1993, 32(SI): 1~12
- 13 Wang B X, Yu W P. The capillary hysteresis and its properties for unsaturated wet porous media. Int J Fluid Phase Equilibrium, 1992, 75: 197~212
- 14 王补宣, 胡柏秋. 非均一多孔介质中的水、热迁移研究. 工程热物理学报, 1993, 14(2): 166~170
- 15 王补宣, 王艳民. 生物传热的基本工程. 工程热物理学报, 1993, 14(2): 166~170
- 16 Bian W, Wang B X. Transient freezing and natural convection around a cylinder in saturated porous media. In: Proc 6th Int Symp on Transport Phenomena in Thermal Engineering, Vol. III. Seoul: 1993, 79~84
- 17 Ma J, Wang B X. The penetration rate of solid-liquid phase-change heat transfer interface with different kinds of boundary conditions. Int J Heat and Mass Transfer, 1995, 38(11): 2 135~2 138
- 18 王补宣. 前进中的生物医学工程热物理. 见: 科学前沿与未来: 第三辑. 北京: 科学出版社, 1998
- 19 王补宣, 蔡伟明, 吴郁龙. 组织间激光血卟啉治疗肿瘤瞬态温度场的理论和动物实验研究. 工程热物理学报, 1998, 9(2): 147~152
- 20 华泽钊, 任禾盛. 低温生物医学技术. 北京: 科学出版社, 1994
- 21 Peng X F, Wang B X. Liquid flow and heat transfer in microchannels with/without phase change. In: Heat Transfer 1994(Proc.of.IHTC-10). London: Taylor and Francis Pub Co, 1994, I: 159~177
- 22 Peng X F, Wang B X. Forced-convection and boiling characteristic in microchannels. In: Heat Transfer 1998(IHTC-11). New York: Taylor and Francis Pub Co, 1998, I: 372~392

热力学、环境、能源与可持续发展

吕灿仁 马一太 王怀信 杨 昭 陈 东
(天津大学热能工程系、热能研究所, 天津, 300072)

摘 要

本文从热力学宏观视野探讨生态系统和生态环境某些已经存在的问题。主要涉及因矿物燃料能源过量耗用引起的有害排放, 因使用工质不当引起的臭氧层破坏。文中对低公害和无公害代用工质、再生能源开发与运用热泵技术节能进行了回顾和展望, 最后原则性地提出了保护我国生态环境与可持续发展的对策。

一、热力学与生态平衡

按照热力学第二定律, 封闭的物质及能量系统具有自发的熵增倾向。一个生命有机体通过不可思议的能力来推迟趋向热力学平衡(死亡)或衰退, 唯一的办法就是从环境里不断地吸取负熵, 有机体就是依赖负熵为生的。如果生命能不断地从环境中获取它们所需要的负熵流, 生命就可能变得越来越有序, 从而实现由简单到复杂、由低级到高级的演替或进化。

对于生态系统也是这样。生态系统是由生物群落和环境组成的, 其在特定的时间、空间内进行物理—化学—生物活动。生态系统的营养动态过程就是能量从一部分转运至另一部分。太阳辐射能是生态系统的能量来源, 植物是生产者, 动物是消费者, 微生物是分解者。根据耗散结构理论, 任一生命层次的能量系统均是一种“耗散结构”。该系统在其能量转化过程中, 不断地从环境中吸取太阳辐射能, 使系统输入负熵流, 又通过植物的光合作用固定并积累能量, 用以形成有序的植物净生产量结构, 再通过种群的蒸腾作用和呼吸作用来不断地排出自身的熵产生, 然后以不可再利用的热形态耗散于环境之中。

处于一定时空范围内的生态系统, 都有其特定的能流和物流规律, 只有认识和遵守规律才能持续地取得丰富而又合乎要求的资源来发展生产和提高人民生活水平。要解决世界上面临的与环境有关的五大问题——人口、粮食、资源、能源和环境保护, 就必须以生态学的理论为指导, 按生态学的规律来办事。

破坏生态平衡的人为因素主要有以下三个方面:

(1)物种改变引起平衡的破坏。人类有意或无意地使生态系统中某一种生物消失或引进一种生物, 都可能对生态系统造成影响。

(2)环境因素改变引起平衡的破坏。一般指污染物质进入环境所造成的破坏。

(3)信息系统的破坏。许多生物在生存的过程中都能释放出某种信息流, 而污染物质可能会与其相互作用, 从而破坏自然界生物的正常生存。

二、生态环境与可持续发展

人类的环境在长期天体的、地质的演变过程中有相对的稳定性。环境的变化是以地质年代

为参考时间坐标的,各参量平均值的变化可以说是准静态的。但年平均温度在历史上有较大变化,曾出现多次的冰河期和温暖期。

大气参数中含有数量很少但对生态影响很大的组分,如臭氧和温室气体。

经典热力学研究可逆过程,它对环境或外界不产生任何影响。实际热力过程都有有害排放,产生热污染和大气污染,热设备的迅速发展和大规模应用使我们目前的环境偏离原定态,而且越来越加剧。人类活动每年消耗 100 多亿吨煤和石油,燃烧时与氧气化合约有 50 多亿吨 CO_2 排放到大气中去。人口的激增和森林锐减也使 CO_2 的浓度上升。

与热力学有关的某些生态环境问题如下。

1. 最高燃烧温度问题

动力循环希望高温热源的最高温度越高越好,超临界循环燃烧温度达 2 000 K,磁流体发电燃烧温度可达 3 000 K。但燃烧温度的提高不仅受到设备材料耐热性能的限制,也受到燃烧产物排放的限制,主要是氮氧化物 NO_x ,即 NO 和 NO_2 。这是燃料在高温燃烧反应过程中空气中的氮气和燃料中的氮化物与氧气反应生成的, NO 刺激人类中枢神经, NO_2 影响呼吸系统,都属有害排放。

燃烧火焰温度是影响 NO 生成量的主要因素,火焰温度越高, NO 就越容易生成。火焰温度在 2 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,氮可以在瞬间氧化成 NO ;火焰温度降到 1 500 $^{\circ}\text{C}$ 以下时,氮的氧化反应速度将显著减慢。在实际应用中,不能盲目提高燃烧温度,而要适当降低燃烧温度。

2. 全球变暖问题

根据观测,近百年来全球气候确在不断变化。20 世纪 80 年代的平均气温比 19 世纪 80 年代的平均气温上升了 0.58 $^{\circ}\text{C}$,海平面上升了 14 cm。温度变化不排除天文和地理的因素,但人类活动使得温室效应气体浓度上升是主要原因。

由于大量的化石燃料燃烧放热,直接的热污染仅可使地球温度上升 0.005 $^{\circ}\text{C}$ 。 CO_2 是化石燃料燃烧后的主要产物。1850 年以来,大气中的 CO_2 增加了 13%。冰川气泡分析可给出历史年代大气中 CO_2 增加的记录。

除 CO_2 外, NO_2 、甲烷、氯氟烃等其它气体也具有温室效应特性。其中 CO_2 对温室效应的贡献占 50%,甲烷占 20%,氯氟烃占 15%, N_2O 占 10%, O_3 占 5%。

对制冷剂有一环境参数——温室效应 GWP (Global Warming Potential) 值。它是以 R11 的温室效应能力为基数,并考虑气体分子的使用寿命定义的:

$$\text{GWP} = \frac{I_{f,i}/E_{r,i}}{I_{f,\text{R11}}/E_{r,\text{R11}}}$$

式中, I 为气体成分 i 的红外辐射, E 为气体成分 i 的释放率。

全球气候变暖亦是个混沌问题。若大气中 CO_2 的浓度加倍,不同的预测模型得出的地球表面温度升高在 0.6~3.3 $^{\circ}\text{C}$ 之间,差别较大。其影响因素也不单是温室效应,如本世纪 40 年代至 70 年代正是 CO_2 激增的时期,但同期的气温却有所下降。据分析,这也是因为这一时期的火山活动比较活跃,大量火山灰进入大气削弱了太阳辐射。另外,太阳活动的作用也不可忽视,其中主要是 76 年的世纪周期、22 年的磁周期和 11 年的黑子周期。

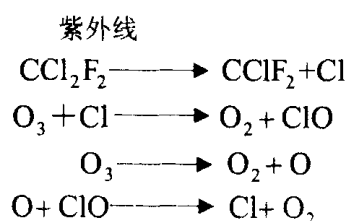
如何减缓全球变暖是一个有很大难度的问题。能量利用主要是燃烧化石燃料,而燃烧的直

接产物就是CO₂，因此途径只能从减少燃料用量(节能)和提高能源有效利用率入手。如目前联合循环的发电效率已达55%，本世纪末将达60%。

3. 臭氧层的破坏问题

从本世纪30年代开始，氟利昂化合物作为制冷剂得到了广泛应用。这是氟利昂化合物优良的物理化学性质所决定的。它们一直作为安全制冷剂而著称于世，其中首屈一指的要属R12。随着制冷和热泵装置中使用氟利昂制冷剂数量的逐年上升，人们开始注意到氟利昂制冷剂的大规模生产和应用已经对人类赖以生存的生态环境产生了不利的影响。

1974年Molina和Rowland提出了一个假说，认为由于氟利昂的大量使用，并且由于氟利昂非常稳定，当它们挥发到大气中以后很长时间内不会被自然界分解，而一直扩散到平流层，在大气层20~50 km的高度与臭氧层相遇。由于在平流层受到强烈太阳紫外线照射，含氯的氟利昂分子便分解出游离的氯原子，而氯原子可以催化分解臭氧分子。在反应中氯原子被不断地放出，所以分解反应不断进行，以致引起臭氧浓度剧烈降低，使得臭氧层被破坏。反应方程式如下：



由于臭氧层保护地球表面不受太阳强烈的紫外线照射，其破坏后将影响生物圈的动植物界，特别是会使人类皮癌患者增多。另外，含溴氟利昂R12b1、R13b1中的溴原子对臭氧层也构成较大的威胁。目前，全世界的氟利昂产量已达每年百万吨数量级，它们最终的去向就是扩散到大气中去，前景令人担忧。这种大气污染可称为“臭氧破坏势”(ODP)。近年来的观测结果表明上述假说是正确的，大气中的氟利昂含量在增加，臭氧浓度在降低。

氟利昂在大气中浓度增加的另一个副作用是“温室效应”。本来地球表面的温室效应的典型来源是大气中的二氧化碳，但大多数氟利昂也有类似的特性。氟利昂对于温室效应起了推波助澜的作用。表1给出了几种氟利昂对臭氧层的破坏势ODP和温室效应GWP值。

国际社会对于氟利昂的环境污染问题已经敲起了警钟并已有协议。1984年10月联合国通

表1 几种制冷剂的臭氧破坏势和温室效应相对比值

制冷剂	分子式	沸点/℃	ODP	GWP	大气中寿命/年
R11	CFCl ₃	23.7	1.00	0.4	65
R12	CF ₂ Cl ₂	-29.8	0.90	1.0	120
R13	CF ₃ Cl	-81.5	0.45	2.4	400
R14	CF ₄	-128.0	0.00	>3.0	—
R22	CHF ₂ Cl	-40.8	0.05	0.07	20
R113	C ₂ F ₃ Cl ₃	47.7	0.80	0.3~0.8	90
R114	C ₂ F ₄ Cl ₂	3.5	0.60	0.5~1.5	180
R115	C ₂ F ₅ Cl	-38.0	0.30	1.0~3.0	380

过了“特伦多备忘录”，要求各国大量减少氟利昂的产量和需求。1985 年 3 月联合国通过了“维也纳公约”，进而在 1987 年 9 月又通过了“蒙特利尔协定”，确切提出要限制生产和销售 R11、R12、R113、R114 和 R115 等二类 8 种 CFC 的产量，到 1998 年其产量要逐步降低到 1986 年生产水平的 50%，并在 21 世纪初尽可能地取消这类产品。1990 年伦敦修正案将控制物质增加到七类 100 余种，其中 8 种 CFC 限制物质到 2000 年完全停止使用。部分 HCFC 如 R22 称为过渡物质可以用到 2050 年。1992 年哥本哈根修正案又将上述期限提前到 1996 年和 2030 年。我国已经正式加入蒙特利尔协议，并积极参加有关国际合作。我国氟利昂制冷剂的产量占世界总产量的 2% 强，随着制冷和热泵行业的迅速发展，目前我国仅电冰箱一项已有每年 1 200 万台的生产能力，低公害和无公害工质的需求量与日俱增，也已面临着紧迫的课题。

人们从热力学、传热学、安全性和成本等方面对制冷和热泵循环的理想工质提出了各种要求。虽然世界上有成百万种单质和化合物，但在诸因素都权衡考虑之后，可供制冷和热泵选择的物质数量是不多的。氟利昂制冷剂约有四五十种，其中绝大部分适用于制冷工况，仅少数适合热泵工况。对于中高温热泵来说，至今尚缺少一种理想的工质。

混合工质肯定是在近期内能见到实效的研究方向。重点将是在 R22、R142b、R152a 等工质中寻找共沸或非共沸混合工质。有应用前景的是 R22/R142b 和 R22/R152a 混合物。当两组比例相当时，R22/R142b 的臭氧破坏势 $ODP < 0.05$ ，温室效应为 $GWP < 0.15$ ；R22/R152a 的臭氧破坏势 $ODP < 0.05$ ，温室效应为 $GWP < 0.1$ ，对环境的影响很小。热泵的工作温度较高，当蒸发温度高于 5℃ 时，像 R22 或 R142b 等与润滑油部分溶解的工质也变为完全互溶。这些混合工质在热泵工作温度范围内与润滑油的溶解性良好，润滑系统不必做大的改动。特别是，这些工质人们已经应用了几十年，对它们的毒性试验等已有较多数据，不必花费太大的投资即可推广应用。这些工质在我国都有生产基地，推广应用 R22/R142b 和 R22/R152a 等混合工质代替有害工质 R12 适合我国国情。从长远发展看，应采用自然界可接受的物质，如氨、CO₂、烷烃、水等，以彻底解决发展和环境的矛盾。

从热力学角度来观察生态环境与可持续发展，可以认为小系统熵的不变或减少是以大系统熵的增加为代价的，小定常流也只有一个大的定常流中才能存在。对于地球本身来说，最大

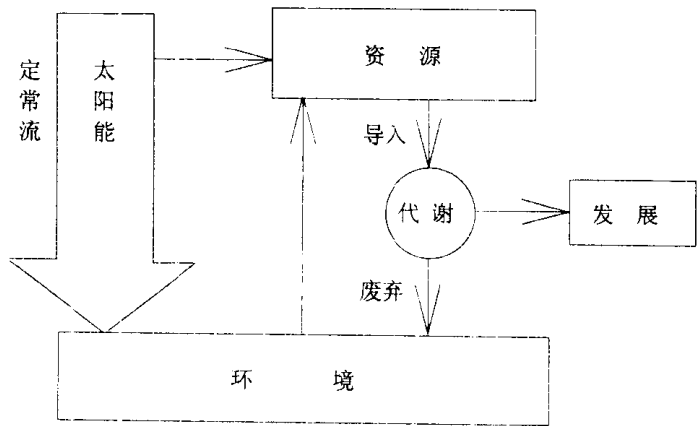


图 1 环境、能源与可持续发展的关系

的定常流是太阳能。人类所有的活动，地球生物圈的存在和发展，绝大多数是以太阳能的耗散

为代价的。这些活动的发展将不断从低级走向高级，但对资源利用规模或速率将趋于一个极限，以使地球上熵增的速率不超过太阳能所给的补偿，获得可持续发展，如图 1 所示。

小系统的发展应服从大系统的利益，为了可持续发展，不能以大系统的大量熵增来换取小系统的局部熵减。对资源的盲目开采和非有效利用，对生态平衡的破坏和有害物的随意排放，是图小利而遗患子孙的事。

三、能源与节能技术

人类越来越大量地消耗矿物能源并因而诱发了严重的生态环境问题(气候变暖和酸雨等)。酸雨之害已经明显，据我国 77 个城市统计，降水 PH 值年均值范围为 3.84~7.54，低于 5.6 的城市占 48.1%，有 81.6% 的城市出现过酸雨。全球气候变暖可能已引起持续干旱，增加灾害性气候发生的频率。一些研究认为，它的全部后果远没有表现出来，等人们把其中的因果关系完全搞清楚再来想办法，可能为时已晚。可以预期，21 世纪必将看到的全球共识是像今天保护臭氧层一样，大规模和严格削减温室气体排放。为此，开发再生能源（或新能源）和节能技术在 21 世纪会得到很大的推动。

再生能源（太阳能、风能、水能、地热能、海洋能、生物质能等）一个共同的缺点是能量密度较低和不稳定，能源装备的投资较常规能源高，是一种资金密集项目。长期以来，再生能源的研究多集中在技术方面，较多着眼提高效率的可能性，大部分是探索和技术储备性的研究。虽然其运行费用可能较低，但迄今为止，综观国内外，再生能源或新能源之所以未能大规模地替代矿物能源的根本原因（除特殊条件外，如边远地区、海岛、牧区或因政治不稳定而常规能源供应中断与失调的地区），是在社会经济上难以和常规能源竞争。即使实施一些奖励政策，也将限于国家财政，而所要求的社会市场经济条件尚处在起步阶段，大规模的应用和替代尚有待于全球的共识和推动。

能源利用率低和能源利用不合理使大量能源资源流失。热力学为改进这种局面已奋斗了近 200 年，效果不错，但仍有大量的工作。从一些工业先进国家对能量的最后消耗形态中可以看出（参见表 2）。在各种能量消耗的最后物理形态中，以热消耗为最大，且以小于 100℃ 的热

表 2 1973 年一些国家全部能量最后消耗形态分配(%)

	美	英	加拿大
A. 热*	58	65	69
(a)<100℃	(35)	(55)	(39)
(b)>100℃	(23)	(10)	(30)
B. 功	38	30	27
(a)交通运输	(31)	(27)	(24)
(b)管道运输	(3)		
(c)工业	(4)	(3)	(3)
C. 电	4	5	4
合 计	100 (100)	100 (100)	100 (100)

*热形态中包括：取暖、热水、制冷空调、烹调、加热（包括电加热）等。