



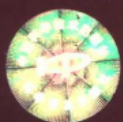
2007-2008

# 工程热物理

## 学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN ENGINEERING THERMOPHYSICS

中国科学技术协会 主编  
中国工程热物理学会 编著



 中国科学技术出版社



TK121/3  
:2007-2008  
2008

2007-2008

# 工程热物理

## 学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN ENGINEERING THERMOPHYSICS

中国科学技术协会 主编

中国工程热物理学会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

工程热物理学科发展报告:2007—2008/中国科学技术协会主编;  
中国工程热物理学会编著. —北京:中国科学技术出版社,2008.2

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-4865-5

I. 工... II. ①中... ②中... III. 工程热物理-技术发展-研究报告-  
中国-2007—2008 IV. TK121-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 017814 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京中科印刷有限公司印刷

\*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:9.75 字数:234 千字

· 2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:26.00 元

ISBN 978-7-5046-4865-5/TK·9

---

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、  
脱页者,本社发行部负责调换)

2007—2008  
工程热物理学科发展报告  
REPORT ON ADVANCES IN ENGINEERING THERMOPHYSICS

首席科学家 周 远

专 家 组

组 长 徐建中

副组长 金红光

成 员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 马重芳 | 王如竹 | 史 琳 | 吴玉林 | 杜建一 |
| 郑丹星 | 姚春德 | 姚 强 | 赵晓路 | 席 光 |
| 袁 新 | 谈和平 | 郭烈锦 | 顾 璠 | 黄 震 |

学 术 秘 书 柯红缨

# 序

基于我国经济社会发展和国际社会竞争态势的客观要求,党中央、国务院做出增强自主创新能力、建设创新型国家的战略部署。学科创立、成长和发展,是科学技术创新发展的科学基础,是科学知识体系化的象征,是创新型国家建设的重要方面,是国家科技竞争力的标志。在科学技术繁荣、发展的过程中,传统的自然科学学科得以不断深入发展,新兴学科不断产生,学科间的相互渗透、相互融合的趋势不断增强;边缘学科、交叉学科纷纷涌现,新的分支学科不断衍生,科学与技术趋向综合化、整体化。及时总结、报告自然科学的学科最新研究进展,对广大科技工作者跟踪、了解、把握学科的发展动态,深入开展学科研究,推进学科交叉、融合与渗透,推动多学科协调发展,促进原始创新能力的提升,建设创新型国家具有非常重要的意义。为此,中国科协在连续4年编制《学科发展蓝皮书》基础上,自2006年开始启动学科发展研究及发布活动。

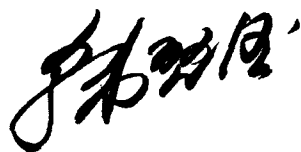
继2006年中国科协组织中国力学学会等30个全国学会开展30个相应一级学科发展研究,并编辑出版中国科协学科发展研究系列报告之后,2007年又组织了中国物理学会等22个全国学会,分别对物理学、天文学、海洋科学、生物学、管理科学与工程、水利、工程热物理、控制科学与工程、航天科学技术、核科学技术、石油与天然气工程、能源科学技术、安全科学与工程、园艺学、畜牧兽医科学、植物保护学、作物学、公共卫生与预防医学、城市科学、车辆工程等20个学科的发展状况进行了系统的研究,并编辑出版了学科发展研究系列报告(2007—2008)。在各分卷报告基础上,组织有关专家编撰了全面反映上述20个学科发展状况的综合报告——《学科发展报告综合卷(2007—2008)》。

中国科协是中国科学技术工作者的群众组织,是国家推动科学技术事业发展的重要力量,开展学术交流,活跃学术思想,促进学科发展,推动自主创新是其肩负的重要任务之一。开展学科发展研究及学科发展报告发布活动,是

贯彻落实科教兴国战略和可持续发展战略,弘扬科学精神,繁荣学术思想,展示学科发展风貌,拓宽学术交流渠道,更好地履行中国科协职责的一项重要举措。这套由21卷、600多万字构成的系列学科发展报告(2007—2008),对本学科近两年来国内外科学前沿发展情况进行跟踪,回顾总结,并科学评价近年来学科的新进展、新成果、新见解、新观点、新方法、新技术等,体现学科发展研究的前沿性;报告根据本学科发展现状、动态、趋势以及国际比较和战略需求,展望本学科的发展前景,提出本学科发展的对策和建议,体现学科发展研究的前瞻性;报告由本学科领域首席科学家牵头、相关学术领域的专家学者参加研究,集中了本学科专家学者的智慧和学术上的真知灼见,突出学科发展研究的学术性。这是参与这些研究的全国学会和科学家、科技专家劳动智慧的结晶,也是他们学术风尚和科学责任的体现。

希望中国科协所属全国学会坚持不懈地开展学科发展研究和发布活动,持之以恒地出版学科发展报告,充分体现中国科协“三服务、一加强”的工作方针,不断提升中国科协和全国学会的学术建设能力,增强其在推动学科发展、促进自主创新中的作用。

中国科学技术协会主席

A stylized, cursive handwritten signature in black ink, likely belonging to the President of the Chinese Association of Science and Technology.

2008年2月

# 前 言

中国科学技术协会决定自 2006 年起,将《学科发展蓝皮书》的编制工作进一步拓展为学科发展研究及发布活动,在三年内陆续启动所有相关学科的相应活动。经过中国科学技术协会评审,工程热物理学科有幸被纳入 2007 年度全国 20 个学科发展研究项目之一。中国工程热物理学会在中国科协学会学术部的指导下,高度重视这一工作,由学会副理事长、中科院院士周远任首席科学家,并成立以工程热物理学科领域的学科带头人和一线之间学者组成专家组。深入调研,采用多种形式进行专题研究,进行了为期半年多的调查与研究工作,保证按时高质量的完成《2007—2008 工程热物理学科进展报告》。

本报告回顾、总结和科学评价了近年工程热物理学科的新发展、新成果、新见解、新观点、新方法、新技术等;研究分析工程热物理学科发展现状、动态和趋势,以及国际比较、战略需求,提出研究方向,展望工程热物理学科发展目标和前景;针对国家节能减排的重大需求,提出工程热物理学科发展的对策意见和建议。

工程热物理学科的发展推动能源科技的进步。工程热物理学科为各种能源动力技术的发展提供理论支撑和源泉,由于蒸汽机发明和热力学理论的建立,才找到从化石能源转化为功的办法,带动了世界第一次产业革命和资本主义的发展。仅仅石油的发现并没有迎来石油时代,而是利用石油的内燃机的发明和推广应用才使人类进入石油时代。内燃机和蒸汽轮机的出现与发展为现代社会的机械化、电气化创造了条件,燃气轮机发动机和火箭发动机的发展,则为高速航空与宇宙年代奠定了基础。

工程热物理学科面临新的机遇与挑战。工程热物理学科将推动世界能源结构发生第三次大转变,从以化石燃料为主的能源系统转向化石燃料、核能、可再生能源等不断变化的多元化结构,最终将建立以可再生能源为主的可持续发展能源系统。在这个多元化的漫长的过渡过程中,需要加强自主创新,需要新的思维,需要年轻人的创造性,需要物理学、化学、环境、生物科学等基础科学的积极介入,需要多学科交叉。

本报告具体分工如下:周远院士、金红光研究员、隋军副研究员负责综合

报告的撰写,全体编委参与了讨论修改。金红光研究员负责工程热力学,席光教授负责热机气动热力学与流体机械,姚春德教授负责燃烧学,马重芳教授负责传热传质学,郭烈锦教授负责多相流。学会理事长徐建中院士对报告的撰写提出了宝贵的意见,并亲自修改了综合报告。学会杜建一副秘书长和柯红缨同志担任了项目管理工作。

由于首次编写学科发展报告,经验不足,所掌握的资料有限,难免存在各种各样的不足之处。诚望各界同仁批评指正。

中国工程热物理学会

2008年1月



# 目 录

|          |           |
|----------|-----------|
| 序 .....  | 韩启德       |
| 前言 ..... | 中国工程热物理学会 |

## 综合报告

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 工程热物理学科发展现状与前景展望 .....    | (3)  |
| 一、概述 .....                | (3)  |
| 二、近年我国工程热物理学科的进展 .....    | (6)  |
| 三、当前工程热物理学科发展的国内外比较 ..... | (17) |
| 四、我国工程热物理学科前景展望 .....     | (21) |
| 参考文献 .....                | (25) |

## 专题报告

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 工程热力学科学技术发展研究 .....    | (29)  |
| 热机气动热力学与流体机械发展研究 ..... | (49)  |
| 燃烧学科学技术发展研究 .....      | (68)  |
| 传热传质学发展研究 .....        | (92)  |
| 多相流科学技术发展研究 .....      | (114) |

## ABSTRACTS IN ENGLISH

### Comprehensive Report

|                                                             |       |
|-------------------------------------------------------------|-------|
| Development and Prospect of Engineering Thermophysics ..... | (137) |
|-------------------------------------------------------------|-------|

### Reports on Special Topics

|                                                                |       |
|----------------------------------------------------------------|-------|
| Development of Engineering Thermodynamics .....                | (142) |
| Development of Aero-Thermal Dynamics and Fluid Machinery ..... | (143) |
| Development of Combustion .....                                | (143) |
| Development of Heat and Mass Transfer .....                    | (144) |
| Development of Multiphase Flow .....                           | (145) |

# 综合报告



# 工程热物理学科发展现状与前景展望

## 一、概述

### (一) 学科发展

热学与工程实际有着十分密切的联系,但在 20 世纪 60 年代以前却没有成为一个独立的学科。40 年代后期以来,发达国家社会与经济的迅猛发展,特别是对航空航天动力的迫切需求,使得这些国家投入了空前的人力、物力和财力,系统、深入地研究在这些动力装置中复杂的能量转换过程,提高动力装置的性能和经济性成为当务之急。与其他的动力装置比较,航空发动机和航天的推进动力内部过程包括流动、传热传质和燃烧现象以及它们的集成,由于高温、高压、高速和化学反应交织在一起,这个过程极为复杂,研究的难度也大为提高。60 年代初期,吴仲华先生提出了工程热物理学科的概念,并在许多老一辈科学家共同努力下,于 1978 年创立了中国工程热物理学会。

工程热物理学是一门研究能量以热的形式转化的规律及其应用的技术科学,它研究各类热现象、热过程的内在规律,并用以指导工程实践。工程热物理学有着自己的基本定律:热力学的第一定律和第二定律、Newton 力学的定律、传热传质学的定律和化学动力学的定律。在这些定律和反映其本质的基本方程的基础上,需要根据研究对象的不同特点,在特别设计的实验装置上进行多种细致、可靠、定量的试验,以发现其特有的规律和基本特征,为设计提供理论依据和计算方法,并在工程实践加以应用、验证和不断完善。由此可见,作为一门技术科学学科,工程热物理学的研究既包含知识创新的内容,也有许多技术创新的内容,是一个完整的学科体系。

工程热物理学科是能源利用领域的主要基础学科。能源是可以直接或经转换提供人类所需的光、热、电、动力等任一形式能量的载能体资源。能源科学是研究能源的生成、开发、转化、利用、节约等规律及其与环境、社会等方面的相互关系。能源科学内涵丰富,研究对象广泛,是一门综合性强、涉及面广、与国民经济密切相关的学科。特别是工程热物理和电能转换与利用,在人类社会及其生产力发展中具有特殊的重要地位。前者为当代能源利用领域的主要基础学科,也是动力、环境、航空航天、信息、海洋、先进制造技术等领域的重要科学与科技支撑。后者则为几乎所有国民经济所依靠的技术科学和必不可少的支持技术。

工程热物理学科的发展推动能源科技的进步。工程热物理学科为各种能源动力技术的发展提供理论支撑和源泉,由于蒸汽机发明和热力学理论的建立,才找到从化石能源转化为功的办法,带动了世界第一次产业革命和资本主义的发展。仅仅石油的发现并没有迎来石油时代,而是利用石油的内燃机的发明和推广应用才使人类进入石油时代。内燃机和蒸汽轮机的出现与发展为现代社会的机械化、电气化创造了条件,燃气轮机发动机和火箭发动机的发展,则为高速航空与宇宙年代奠定了基础。

能源与环境问题要求工程热物理学不断开拓与创新。世界能源结构在 20 世纪初开始发生第二次大转变:从煤炭转向以石油为主。许多国家在五六十年代,正是依靠充足、廉价的石油能源,实现了经济的高速增长。20 世纪能源科技得到了空前发展,以化石燃料为主的能源结构成为人类的生存与发展的支柱。但大量使用化石能源也给地球环境造成了严重危害,使人类赖以生存的地球空间受到了空前的威胁。另外,1973 年发生的世界石油危机,也使人们逐渐认识到现有的能源结构系统不可能长久维持下去,全世界已探明的石油、天然气、煤炭等化石燃料的可采资源总量,只够使用一、二百年。为了满足持续发展的需求,人们不断探索能量转换利用的新概念、热物理过程的新原理以及能源利用的新途径,在传统能源科学基础上不断开拓新的研究热点和新学科分支,如能源环境学、能源经济学、新能源学科(包括太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能、氢能以及核能等)等。

工程热物理学面临新的机遇与挑战。从人类利用能源和动力发展的历史看,古代人类几乎完全依靠可再生能源,太阳能、风能、生物质能、水能的利用可以追溯遥远的历史,但仅仅是分散、粗放的使用,人工或简单机械已经能够适应农耕社会的需要。近代以来,蒸汽机的发明唤起了第一次工业革命,而能源基础成为以煤为主的化石能源,从小规模的发电技术,到大电网,支撑了大工业生产相应的大规模能源使用。石油、天然气在内燃机、柴油机中的广泛使用,奠定了现代交通基础,燃气轮机的技术进步使飞机突破声障,这些进一步适应了高度集中生产的需要,更新的包括核裂变、核聚变等原子能技术可以为现代大工业提供进一步支持。但是化石能源过度使用,造成严重环境污染,而且化石能源资源终将枯竭,严重地威胁着人类的生存和发展,要求人类必须再主要地使用可再生能源,预示着人类必将再次进入可再生能源时代,一个与过去完全不同的可再生能源时代,是建立在当代高新技术基础上创新发展起来的崭新时代。面对这个时代的召唤,工程热物理学的发展既要适应可再生能源分散的特点,又要能为大工业发展提供能源,需要构建分布与集中供能有机结合的新型能源系统。在这个过程中,工程热物理学的发展和能源科学技术进步对人类社会将产生重大影响,将会出现许多伟大的变革,包括能源科技的重大发展。一些新的能源利用方式,如新型动力机械、新型发电技术、新的能源等,将应运而生。为迎接新的可再生能源时代,工程热物理学将推动世界能源结构发生第三次大转变,从以化石燃料为主的能源系统转向化石燃料、核能、可再生能源等不断变化的多元化结构,最终将建立以可再生能源为主的可持续发展能源系统。在这个多元化的漫长的过渡过程中,需要加强学科创新,特别是自主的原创,需要新的思维,尤其是年轻人的创造性,更需要物理学、化学、生物科学等基础科学的积极介入,需要多学科交叉。

## (二) 国家需求

我国为世界上人口最多、经济快速增长的发展中国家。我国现代化面临人口、资源、环境的巨大压力,而能源和这三个制约因素密切相关,被确定为经济发展的战略重点。我国是世界上最大的煤炭生产和消费国,庞大的能源系统以煤炭为主,且相当长时期内不会有大的改变。能源问题是社会与经济发展的一个长期制约因素,关系全局的主要能源问题如下。

### 1. 能源需求增长迅速,供需矛盾尖锐

经过多年发展,中国一次能源生产能力已仅次于美国,居世界第二位。但是,随着经济高速发展,对能源的需求也在大幅度增加,能源紧缺成为抑制我国经济健康发展的重要瓶颈。2005 年我国能源的进口量约为 26950 万 t 标煤,供需矛盾日益尖锐。世界能源的利用状况统计数据以及能源利用区域现状和预测指出,未来 20 年内,化石能源仍然占据能源消耗的主要地位,同时新能源以及可再生能源逐步增加。预测中国总的能源消耗量将持续一段较长时间的高增长期,至 2030 年,世界范围内,能源消耗的年增长率为 1.8%,而中国为 3.5%,高于其他国家尤其是 OECD(经济合作组织)国家;我国的能耗在全世界总能耗的比例将由现在约 14% 上升至约 20%,约为 60 亿 t 标准煤。能源供需矛盾将是我国长远发展过程中持续、突出的问题。2020 年以后,常规能源生产与能源总需求的缺口将继续扩大,保证清洁、经济、充足、安全的能源供应是我国发展长期的重大瓶颈,为解决这一问题,必须依靠包括工程热物理学在内的有关能源学科创新思路,开拓面向未来的新能源技术。

### 2. 能源结构不合理,优质能源短缺

我国是世界上以煤炭为主要能源的少数国家之一,偏离当前世界能源消费以油气燃料为主的基本趋势和特征。1997 年我国一次能源的消费构成为:煤炭占 73.5%,原油占 18.6%,天然气占 2.2% 和水电占 5.7%。煤炭高效、洁净利用的难度远比油、气燃料大得多。而且我国大量的煤炭是直接燃烧使用,用于工业锅炉、窑炉、炊事和采暖的煤炭占 47.3%,用于发电或热电联产的煤炭只有 38.1%,而美国为 89.5%。

我国终端能源消费结构也不合理,电力占终端能源的比重明显偏低,国家电气化程度不高:1998 年一次能源转换成电能的比重只有 32.6%,世界发达国家平均皆超过 40%,有的达到 45%;1997 年人均生活用电 101.4 kW·h,约为美国消费量的 2%,至今仍有 5000 万人尚未用上电。

### 3. 效率低下,浪费惊人

能源效率是指终端用户使用能源得到的有效能源量与消耗的能源量之比。我国能源从开采、加工与转换、贮运以及终端利用的能源系统总效率很低,不到 10%,只有欧洲地区的一半。通常能源效率是指后三个环节的效率,约为 30%,比世界先进水平低约 10 个百分点。单位产品的能耗与国际先进水平相比,有较大差距。根据 2005 年的统计数据,几种高耗能产品能耗的国际比较(中国:国际先进水平),火电供电煤耗 370 gce/(kW·h):312 gce/(kW·h);钢可比能耗值 714 kgce/t:610 kgce/t;水泥综合能耗 153.0 kgce/t:127.3 kgce/t;乙烯综合能耗 986 kgce/t:629 kgce/t。我国能源利用率低的主要原因是由于能源科技和管理水平落后,还因终端能源以煤为主、油、气与电的比重较小的不合理消费结构所致。我国能源效率很低,能源系统的各个环节都有很大的节约能源的潜力。

### 4. 环境影响更加严重,减排治污、保护生态刻不容缓

我国能源环境问题的核心是大量直接燃煤造成的城市大气污染和农村过度消耗生物质能引起的生态破坏,还有日益严重的车辆尾气的污染。

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国。燃煤释放的  $\text{SO}_2$ , 占全国排放总量的 85%,  $\text{CO}_2$  占 85%,  $\text{NO}_x$  占 60%, 烟尘占 75%。我国酸雨区由南向北迅速扩大, 已超过国土面积的 40%。1995 年酸雨沉降造成的经济损失为 1165 亿元, 占 GNP 的 1.9%。燃烧化石燃料产生大量温室气体, 对全球气候变化产生了重大影响, 由此引发的  $\text{CO}_2$  减排问题需要革命性的技术突破。我国农村人口多、能源短缺, 且沿用传统落后的用能方式, 带来了一系列生态环境问题: 生物质能过度消耗, 森林植被不断减少, 水土流失和沙漠化严重, 耕地有机质含量下降等。

根据瑞士达沃斯世界经济论坛公布的“环境可持续指数”, 在全球 144 个国家和地区的排序中, 中国竟然位居第 133 位。世界银行根据目前发展趋势预计, 2020 年中国因燃煤污染导致的疾病需付出经济代价达 3900 亿美元, 占国内生产总值的 13%, 发达国家在工业化中后期出现的污染公害已经在我国普遍出现。

### 5. 能源安全问题突出, 全球战略势在必行

能源安全是指能源可靠供应的保障。首先是石油天然气供应问题, 油、气是当今世界主要的一次能源, 也是涉及国家安全的重要战略物质。我国石油、天然气资源相对少, 人均石油探明剩余可采储量仅为世界平均值的 1/10。从 1993 年起, 我国已成为石油净进口国, 随着石油供需缺口逐年加大, 不断增加石油进口将是大势所趋。但大量从国外进口石油, 有可能引起国际石油市场振荡和油价攀升, 油源和运输通道也易受到别国控制。另外, 保障大电网的安全稳定与优化经济运行是能源安全的另一个重大问题。近几年发生在我国与世界各大电网的灾难性大停电事故表明: 大型电力系统事故将给广大供电区内的经济活动和社会生活造成交通中断, 停机停电, 工业设备受损, 通讯设施瘫痪等严重危害, 甚至还可能引起金融流通受损害, 计算机信息丢失, 医疗手术过程中断等灾难性后果。

综上所述, 我国面临能源和环境双重巨大压力, 是经济和社会发展的长期瓶颈, 是始终必须高度重视的重大问题。能源发展、保护环境、节能减排对我国至关重要, 是确保清洁、经济、充足、安全能源供应的根本出路。大量研究和历史经验表明, 解决能源与环境问题的根本途径是依靠科学技术进步, 因此工程热物理等相关学科将承担起我国国民经济发展的能源与环境重大需求, 努力推进节能减排和科学用能成为学科的指导思想和核心, 而抓紧化石燃料的洁净技术, 大力开发可再生能源和新能源技术成为工程热物理学科的发展战略重点。

## 二、近年我国工程热物理学科的进展

工程热物理是一个体系完整的应用基础学科, 就其主要研究领域应属技术学科, 每一个分支学科都有坚实的理论基础和应用背景。工程热力学与能源利用分学科的基石是热力学第一、第二定律, 目的是为从基本原理上考虑能源利用和环境问题提供理论与方法, 其他分支学科在热力学定律基础上, 拥有各具特色的理论和应用基础。热机气动热力学与流体机械分学科的理论基础是牛顿力学定律, 传热传质分学科的理论基础是传热、传质定律, 燃烧学分学科的理论基础是化学反应动力学理论等。

## (一) 工程热力学与能源利用分学科

工程热力学是研究各种形式能量之间相互转换和合理利用的原理与应用的学科。其普适性和实用性奠定了其在工程热物理学学科的基础位置,它与工程热物理其他各分支学科密切相关。工程热力学的重要性使得其一直作为能源科学基础学科的主要研究方向。热力学基础与热物性、能的综合梯级利用、制冷循环与热声制冷/热声发电、可再生能源与温室气体控制等研究内容代表着工程热力学与能源利用与前沿。上述方向既包含传统的研究领域,也有新近得到快速发展的新方向。

### 1. 工程热力学基础与热物性

计算统计热力学与分子模拟是研究宏观现象及特性的微观机制及规律的有力工具。在这个领域主要有两方面进展:一是分形理论等新的分析手段的引进,取得了好的效果;另一方面,计算统计热力学及分子模拟研究开始向实用化迈进。引入分形理论等新方法,对不同条件下的液体分子、气体分子、汽液界面特性进行研究,得到与直接用分子动力学模拟方法相一致的结果,证明了分形理论在对流体流动进行分子模拟的实用性和有效性。运用计算统计热力学及分子模拟还可以对冷喷涂过程、流体输运系数及流体分子和固壁间关系等工程问题加以研究,得出在微尺度下,流体表现出与宏观尺度下不同的特性。

热物性学在科学研究和国民经济建设方面应用极其广泛,居于非常重要的基础地位。它为相关的科学发现和理论创建奠定基础。有关热物性的主要研究方向包括热物性基本方程,物质宏观热物性与微观结构,固体非平衡态热物理性质,流体热力学性质与相平衡,新工质、介质,热物性测试,热物性数据库等。近年来在新型替代工质、新的化学品体系的热物性研究方面取得了许多成果,为上述领域的发展提供了重要的基础物性数据。

### 2. 制冷循环与热声技术

为满足国家节能减排的重大需求,各种余热驱动、低温余热利用以及大温差的制冷循环研究不断深入,吸收、吸附式制冷循环,复叠式制冷循环以及水基有机混合物相变蓄冷等新型蓄能技术被广泛研究。热声理论得到快速发展的同时,热声制冷和热声发电技术在实验、应用方面的研究进展很快。

制冷与低温工程是现代工业和生活环境的重要组成部分和技术,制冷循环是其研究重点。制冷循环通过消耗机械能、热能等外部能量,将热能由低温处传输到高温处,输出低于环境温度冷量。制冷机的需求不仅在于传统的民用空调供冷,而且在于食品、化工等各种过程工业的发展。消耗电力的压缩式循环是制冷机主要和常用的构成方式,而热驱动的吸收、吸附式制冷循环,例如溴化锂吸收式制冷循环和氨水吸收式制冷循环在热能利用方面也发挥着越来越大的作用。

热声技术方面在热声理论、热声制冷和热声发电方面的研究进展很快。介观热力学理论较好阐释了热声系统有别于传统热力学循环的工作机理,明确了对流动的交变特性产生影响的流体雷诺数、物性、声学雷诺数、温度梯度等相关因素及其影响规律。我国研制的两级斯特林型脉冲管制冷机可以达到 16 K 左右的制冷温度,今后将探索工作频率在 100 Hz 以上的更高频脉冲管制冷机的工作机理。在室温温区,研制的行波热声制冷



机,在 $-22^{\circ}\text{C}$ 时有 300 W 的制冷量,行波热声制冷机部分的制冷系数在 1.5 左右。

### 3. 能的综合梯级利用

分布式能源系统作为能的梯级利用技术的典型代表,在基本原理、关键技术和系统集成等全方位开展研究,为该技术产业化示范奠定了基础。研究进展主要体现为:在概念层面上明确了分布式能源系统的类型划分并归纳了若干典型系统,在原理层面上确定了分布式能源系统的集成原则和评价准则,揭示了系统设计工况与全工况的特性规律;在关键技术层面上,在微小型燃气轮机总体设计技术、冷热电联产系统动态特性与建筑动态负荷的耦合技术、热机余热与环境资源的耦合技术等方面取得进展;在系统层面上开拓了化石燃料与可再生能源互补、能源与资源整合的新一代与环境相容的冷热电联产系统等。分布式供能技术在国家“十一五”科技计划的支持下正在进行基础理论、关键技术和工程示范的全方位研究,将推动该技术在我国的快速发展,为工业和建筑领域节能减排提供重要技术支撑。

能的综合梯级利用理论不断完善和发展。当前能源学科与环境、化工等领域的广泛交叉,一方面要求新的热力循环不断拓宽或突破原有界限,另一方面又要不断发展新的热力学理论、开创新概念、提供新方法。近年来,我国学术界提出的化学能与物理能综合梯级利用原理拓展了能的梯级利用原理,揭示了化石燃料与太阳能互补的间接燃烧能量释放新机理,并进行了一系列化学能与物理能综合梯级利用系统集成创新与开拓。上述研究从理论上准确量化地描述了燃料化学能梯级利用方法,表达出燃料最大作功能力与物理能最大作功能力的耦合性,并前瞻性地指明燃烧反应化学能品位的多层、分级的高效转化是实现总能系统燃料化学能梯级利用的关键,从而从热力学原理上建立了化工、动力等多领域渗透的能量转化利用研究理论体系框架,引导了热力循环与总能系统研究的新方向。

### 4. 可再生能源与温室气体控制

可再生能源与温室气体控制是能源与环境领域研究的重要主题,太阳能热利用和物质转换是工程热力学在可再生能源领域的重要研究对象。我国太阳能热利用总量已经处于世界领先,太阳能热水器的生产和应用居世界首位。太阳能热发电是太阳能利用的国际研究前沿。太阳能热发电是将太阳辐射能聚集起来加热工质,经热交换器产生过热蒸汽,再由蒸汽驱动汽轮机带动发电机发电。该技术的发展方向是提高蒸汽温度与压力以提高热电转换效率和增大单机容量以改善经济性能,主要困难在于太阳辐射功率密度低且具有不连续性及不稳定性。大规模太阳能热发电要解决大面积能量的聚集、转化与储存等一系列科学技术问题。我国近年来经过对塔式、槽式、碟式等多种太阳能热发电形式的前期探索研究,开展了光量子等效温度和黑体辐射光谱有效能等基础理论研究,储备了如高密度辐射流太阳能接收及中高温热能转换等关键技术,并已经启动国家太阳能热发电技术专项研究,研究太阳能电站总体设计技术、太阳能电站用定日镜和吸热器技术等关键技术,为我国太阳能热发电示范电站提供关键技术、材料和工艺,使我国在太阳能热发电这一从根本上解决未来能源问题的高技术领域步入世界先进行列。太阳能光催化分解水制氢研究在催化剂、制氢设备和制氢系统等方面取得实验进展。太阳能燃料转换