



2009-2010

*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

工程热物理
学科发展报告

工程热物理
学科发展报告

中国科学技术出版社





2009—2010

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

2009—2010 工程热物理学科发展报告/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,2010.4
(中国科协学科发展研究系列报告)
ISBN 978-7-5046-5006-1

I. ①2… II. ①中… ②中… III. ①工程热物理学—技术发展—
研究报告—中国—2009—2010 IV. ①TK121—12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 043188 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版。

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—62173865 传真:010—62179148

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

科学普及出版社发行部发行

北京凯鑫彩色印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:10.25 字数:240 千字

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:30.00 元

ISBN 978-7-5046-5006-1/TK·13

(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)

2009—2010
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	齐 飞	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	隋 军			

学术秘书 柯红缨

序

当今世界科技正处在一次新的革命性变革的前夜。人类迫切需要创新发展模式和发展途径,创新生产方式和生活方式,开发新的资源。这样的需求和矛盾,强烈呼唤着新的科学技术革命。而全球金融危机所带来的世界经济、产业格局的大变化,很可能会加快新科技革命的到来。学科创立、成长和发展,是科学技术创新发展的基础,是科学知识体系化的象征,是创新型国家建设的重要方面。深入开展学科研究,总结学科发展规律,明晰学科发展方向,对促进学科的交叉融合并衍生新兴学科,继而提升原始创新能力、加速科技革命具有重要意义。

中国科协自 2006 年开始启动学科发展研究及发布活动,连续完成了每个年度的学科发展研究系列报告编辑出版及发布工作。2009 年,中国科协组织中国气象学会等 27 个全国学会分别对大气科学、古生物学、微生物学、生态学、岩石力学与岩石工程、系统科学与系统工程、青藏高原研究、晶体学、动力与电气工程、工程热物理、标准化科学技术、测绘科学与技术、烟草科学与技术、仿真科学与技术、颗粒学、惯性技术、风景园林、畜牧兽医科学、作物学、茶学、体育科学、公共卫生与预防医学、科学技术史、土地科学、智能科学与技术、密码学等 26 个学科的发展研究,最终完成学科发展研究系列报告和《学科发展报告综合卷(2009—2010)》。

学科发展研究系列报告(2009—2010)共 27 卷,约 800 万字,回顾总结了所涉及学科近年来所取得的科研成果和技术突破,反映了相关学科的产业发
展、学科建设和人才培养等,集中了相关学科领域专家学者的智慧,内容深入浅出,有较高的学术水准和前瞻性,有助于科技工作者、有关决策部门和社会公众了解、把握相关学科发展动态和趋势。

中华民族的伟大复兴需要科学技术的强力支撑。中国科协作为科技工作者的群众组织,是国家推动科学技术事业发展的重要力量,应广泛集成学术资源,促进学科前沿和新学科的融合,推动多学科协调发展,广泛凝聚科技工作者智慧,为建设创新型国家做出新贡献。我由衷地希望中国科协及其所属全国学会坚持不懈地开展学科发展研究、学术史研究以及相应的发布活动,充分发挥中国科协和全国学会在增强自主创新能力中的独特作用,推动学科又好又快发展。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Shi Meng, positioned above the date.

2010年3月

前 言

中国科学技术协会从 2006 年起建立了学科发展研究及发布制度,对推进学科交叉、融合与渗透,促进多学科协调发展,充分发挥中国科协及所属全国学会的学术权威性起到了积极的作用。中国工程热物理学会有幸选入 2009 年度学科发展研究项目,在中国科协学会学术部的指导下,撰写《2009—2010 工程热物理学科发展报告》。中国工程热物理学会仍然由中国科学院院士周远任首席科学家,专家组成员包括学科领域的学科带头人和优秀青年科技工作者。工程热物理学是研究能量以热和功的形式转换过程的基本规律及其应用的一门技术科学,属于应用基础学科的范畴。它是能源高效低污染利用、航空航天推进、发电、动力、制冷等领域的重要理论基础。本报告重点回顾、总结和科学评价了近两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、发展低碳经济的重大需求,提出工程热物理学科发展的对策意见和建议。

工程热物理学科是能源高技术创新的源泉和先导,两者紧密相连、相互促进,当代工程热物理学科发展在很大程度上引导着能源科学发展的趋势。近两年来,为应对全球气候变化,发展低碳经济以摆脱化石能源燃烧的依赖性和保证国家能源安全已成为共识,所有的发达国家以及主要发展中国家都积极发展低碳经济,现在低碳经济已经引导出一个全球的经济新格局。发展低碳经济的方向之一是发展低碳能源即清洁能源,包括风电、水电、太阳能也包括清洁煤,这些都与工程热物理的研究领域密切相关。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,努力推进节能和科学用能成为学科的指导思想和核心,加强研发和推广低碳能源技术,抓紧化石燃料的洁净技术。推进绿色经济、循环经济、低碳经济发展将成为工程热物理学科的发展战略重点。

本报告具体分工如下:周远院士、金红光研究员等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、齐飞教授负责燃烧学,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谋划了报告

的总体结构。学会副秘书长柯红缨高工担任学术秘书,负责项目管理工作。

时间紧,任务重,以及编写人员学识限制,还有待进一步完善,恳求专家学者批评指正。

中国工程热物理学会

2010 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、引言	(3)
二、工程热物理学科近年的最新研究进展	(3)
三、工程热物理发展趋势及展望	(16)
参考文献	(19)

专题报告

工程热力学科学技术发展研究	(23)
热机气动热力学与流体机械发展研究	(42)
燃烧学领域科学技术发展研究	(63)
传热传质学科发展研究	(85)
多相流科学技术发展研究	(102)

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report

Development and Prospect of Engineering Thermophysics	(135)
---	-------

Reports on Special Topics

Development of Engineering Thermodynamics	(146)
Development of Aero-Thermal Dynamics and Fluid Machinery	(147)
Development of Combustion	(148)
Development of Heat and Mass Transfer	(148)
Development of Multiphase Flow	(149)

综合报告

工程热物理学发展现状与前景展望

一、引言

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。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。

工程热物理学是能源利用领域的主要基础学科,工程热物理学的发展推动了能源科技的进步。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。能源与环境问题要求工程热物理学不断开拓与创新。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。

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。能源是经济和社会发展的物质基础。工业革命以来,世界能源消费剧增,煤炭、石油、天然气等化石能源资源消耗迅速,生态环境不断恶化,特别是温室气体排放导致日益严峻的全球气候变化,人类社会的可持续发展受到严重威胁。目前,我国已成为世界能源生产和消费大国,但人均能源消费水平还很低。随着经济和社会的不断发展,我国能源需求将持续增长。增加能源供应、保障能源安全、保护生态环境、促进经济和社会的可持续发展,是我国经济和社会发展的重大战略任务。可再生能源资源潜力大,环境污染低,可永续利用,是有益于人与自然和谐发展的重要能源。可再生能源开发利用受到世界各国高度重视,许多国家将开发利用可再生能源作为能源战略的重要组成部分,提出了明确的可再生能源发展目标,制定了鼓励可再生能源发展的法律和政策,可再生能源得到迅速发展。

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,努力推进节能和科学用能成为学科的指导思想和核心,加强研发和推广低碳能源技术,抓紧化石燃料的洁净技术,推进绿色经济、循环经济、低碳经济发展成为工程热物理学的发展战略重点。

二、工程热物理学近年的最新研究进展

工程热物理学是研究能量以热和功的形式转换过程的基本规律及其应用的一门技术科学,属于应用基础学科的范畴。它是能源高效低污染利用、航空航天推进、发电、动力、

制冷等领域的重要理论基础;近年来,它在信息、材料、空间、环境保护、先进制造技术、生命和农业等方面也发挥着越来越重要的作用。

工程热物理学近年来的发展体现出了以下研究特点:①学科的交叉、综合已成为当代能源科学发展的一个基本趋势与特征。工程热物理学科的各分支学科之间,以及工程热物理学科与不同学科之间,例如与化学、物理学、生物学、数学、材料科学、计算机科学以及信息科学等都在不断地交叉与综合;②随着经济与社会对能源科技的需求愈来愈高,特别是随着可再生能源发展和温室气体问题日益突出,工程热物理学科与社会、经济与环境等领域的渗透与综合更加强化,不同领域的渗透与综合成为学科发展的另一个主要趋势;③能源转化利用规律的探索还在不断深化:一方面不断拓宽或突破原有界限与假定;另一方面不断采用新理论、新方法和新手段;④工程热物理学科是能源高新技术创新的源泉和先导,两者紧密相连、相互促进,当代工程热物理学科发展在很大程度上引导着能源科学发展的趋势。

近两年来,工程热物理学科获得多项国家奖项,标志着我国在工程热物理领域的研发水平不断提高,科技实力进一步增强。

(一)能源动力系统中能的综合梯级利用和 CO_2 控制原理与方法

针对能源动力系统能量利用效率低和环境污染严重的难题,以化工动力多联产系统、太阳能热化学利用系统、减排 CO_2 的能源动力系统为对象,研究能的综合梯级利用和 CO_2 控制原理及其方法,构建可持续发展的能源动力系统,推动工程热物理学科交叉的发展,满足我国节能减排的重大需求。在学科交叉与领域渗透的层面,以燃料化学能梯级利用为突破口,探索研究能源动力系统中能的综合梯级利用和 CO_2 控制原理与方法。首先,跨越卡诺定理的理论框架,不再局限于燃烧后热能的热力循环利用,而是从燃料化学能做功能力的有序释放、定向转化出发,将燃烧前化学能做功能力的利用与热力循环有机耦合,关注燃料化学能与物理能的综合梯级利用。其次,摒弃能源动力系统中能量利用与 CO_2 控制相互独立的格局,打破传统“先污染后治理”的链式模式,在化学能梯级利用基础上从源头捕集 CO_2 ,旨在同时破解能源高效利用与 CO_2 控制两大关键问题。

1. 创建燃料化学能梯级利用原理和 CO_2 一体化控制原理

针对经典的卡诺定理仅描述燃烧后热转功现象而不适用于燃烧前化学能转化问题,从认知燃料化学能做功能力的物理本质出发,研究了燃料转化反应中 Gibbs 自由能品位的变化特征,首次建立了燃料品位转化定理。它明确指出,燃料化学能的转化利用与 Gibbs 自由能品位和热能品位间的相互作用是密切相关的。该定理跨越了卡诺定理理论框架,揭示了燃料化学能做功能力梯级利用的潜力与规律。在此基础上,建立了燃料化学能与物理能综合梯级利用原理,其具体内涵包括:能的综合梯级利用基本原则;能的品位变化分析法;及燃料化学能逐级、定向释放机理。

进一步,从燃料转化的源头将化学能梯级利用与 CO_2 的富集有机结合,研究建立了能源动力系统中 CO_2 的一体化控制原理,其主要内涵包括:燃料化学能梯级利用与 CO_2 定向迁移的协同机理;Gibbs 自由能为驱动力的 CO_2 捕集机制及 CO_2 一体化控制原则。

该原理阐明了能量高效利用与 CO_2 低能耗分离之间的一体化机制和特性规律,为能源环境交叉学科的发展奠定了重要的理论基础。相关研究成果获本领域最高学术会议 ASME IGTI 最佳论文奖,这是中国学者率先在本领域最高学术会议获此殊荣。

2. 发现化学能和物理能综合梯级利用方法与热力循环

研究工作拓展了热能梯级利用原理及其热力循环。与日本和美国学者分别同时提出新颖的氢氧联合循环。通过建立程氏循环(STIG)的严格数学模型,给出了关键“尖端现象”的理论解释。另外,借助简捷比较法在国际上率先得出:“余热锅炉型联合循环的效率最佳压比近似于相应的纯燃气轮机的比功最佳压比”的科学论断。这些研究成果,对传统热力循环提出新的认识。本研究理论成果应用于国家 IGCC 示范电站的方案设计与分析,获得了电力部门的科技奖励。

此外,基于燃料化学能与物理能综合梯级利用原理,构建了中低温太阳能与化石燃料品位互补的能量释放新方法:以中低温太阳热能驱动替代燃料的吸热反应,转化为高品位的太阳能燃料;然后通过燃烧和热力循环,实现太阳热和替代燃料的共同高效利用。这一方法通过替代燃料化学能释放的品位转化机制,在燃料化学能逐级、有序转化的同时显著提升了中低温太阳热能的品位。它不仅改变了化石燃料直接燃烧的做法,而且革新了太阳能简单光热发电的方式。进一步,通过研制国际首套中低温太阳能吸收—反应器(5kW),试验验证了中低温太阳能品位提升方法与机理,并发明了中低温太阳能与甲醇裂解互补的发电系统。该系统可使太阳能净热发电效率达到 35%,比德国宇航实验室提出的高温太阳能与天然气重整发电系统高 5 个百分点,比传统太阳能单独热发电系统效率高 15~20 个百分点。

本研究解决了太阳能热发电系统中成本高、效率低的工程应用难题,引领了国际上太阳能中低温热化学与化石燃料互补研究的新方向,并得到国际著名学者的好评。

3. CO_2 一体化控制方法及其能源动力系统创新

研究发明了替代燃料生产与 CO_2 捕集一体化方法和系统。以替代燃料—动力多联产系统为对象,探索燃料转化过程中化学能梯级利用规律与含碳组分的转化与迁移特征,首次提出了适度转化的方式,并发现了其中的含碳组分富集现象,进而提出了替代燃料生产与 CO_2 捕集一体化方法:取消合成气成分调整过程(而非调氢以追求平衡碳氢比),采用未反应气部分循环(而非全循环以追求合成高转化率)。这样,使原料中能够低能耗转化的组分先适度转化为化工产品,而难以转化的组分(未反应气)再作为发电燃料,实现燃烧前燃料化学能的梯级利用。该方法变革了近一个世纪的化工生产全转化模式,为解决能源动力系统 CO_2 减排能耗高的问题提供了一个新途径。

基于 CO_2 捕集一体化方法,研究提出了煤基甲醇(二甲醚)—动力多联产系统。该系统具有无合成气成分调整、未反应气部分循环、未反应气脱碳的集成特点。本研究提出的回收 CO_2 的多联产系统已成为中、欧合作建设的国内首套大规模 CCS 示范项目的主要备选技术路线之一。

4. 无火焰化学链燃烧的动力系统

在燃料化学能与物理能综合梯级和控制 CO_2 一体化原理基础上,将化学链燃烧与

CO₂ 分离有机结合,发现了燃烧中高浓度富集 CO₂ 的新现象,提出零能耗分离 CO₂ (无气相分离过程的 CO₂ 控制)的新方法。在燃烧中将化学能梯级利用与 CO₂ 分离一体化,实现了燃料化学能高效转化利用与低能耗分离 CO₂ 的有机结合,是对传统动力系统中 CO₂ 控制方法的革新。

基于该方法,提出了“无火焰化学链燃烧”的发电系统,这是国际上首次提出的零能耗分离 CO₂ 的革新性动力系统,被美国能源部称之为革命性突破。另外,本研究还深入地开展了天然气、氢、煤气等多种燃料的化学链实验及系统研究,探索了化学链燃烧的反应特性,揭示了固体材料内部微观结构和特征。“无火焰化学链燃烧”捕获 CO₂ 的研究开辟了一条控制温室气体的新途径,引领了国际能源环境研究新方向。

研究成果已初步形成能的综合梯级利用和 CO₂ 控制理论体系,为我国急需发展的太阳能热化学利用、洁净煤技术(IGCC、多联产)等提供了理论支撑与方法,特别是“化学链燃烧 CO₂ 捕集”成为国际上能源动力系统捕集 CO₂ 的三种主要方法之一,为建立热力学、环境学的交叉学科作出了一定贡献,促进了工程热物理学科的发展。共发表 200 余篇学术论文,其中 SCI 收录 43 篇, EI 收录 145 篇, ISTP 收录 25 篇。SCI 他引 436 篇次,他引总次数 1375 篇次。国际学术会议大会特邀报告 16 次,国际重要学术会议最佳论文奖 4 次,省部级自然科学奖和科技进步奖 5 项。国际能源机构 IEA 在有关报告中将化学链作为化石能源零排放的首要新方向。

该项目获得了 2009 年度国家自然科学奖二等奖。

(二) 红外热辐射光谱特性与传输机理研究

随着太阳能利用、红外探测、航空航天、激光等高新技术的迅猛发展,遇到了大量与红外热辐射紧密相关的基础问题。如多层介质内耦合换热、高温颗粒系内热辐射传递的多尺度分析等,亟须了解红外辐射的光谱特性、方向特性和传输机理。

1. 多层吸收/散射性介质内瞬态耦合换热

提出射线踪迹节点分析法,建立了多层介质辐射与导热瞬态耦合换热模型;揭示了脉冲激光在半透明材料中产生温度响应的传输机理。发现透明界面下非入射面上只有一个温度峰值,提出了介质内出现温度峰值的充要条件。

2. 半透明介质内热辐射反问题

提出并实现了半透明介质内多参数群的同时反演;建立了三维温度场的辐射测量反演方法;提出了湍流时均温度场的多波长反演方法,发现了湍流脉动对时均吸收系数和时均温度场反演的影响规律。

3. 微尺度辐射换热

揭示了外场辐射作用下半透明微粒内部辐射吸收的分布规律,从机理上解释了入射辐射在光滑粒子内汇聚的“透镜现象”,发现吸热峰值可处于微粒内部的奇异现象弥散介质内热辐射光谱特发现吸热峰值可处于微粒内部的奇异现象。理论上解释了超短脉冲辐射下材料表面温度响应曲线的间断现象。发现了微粒内部温度不均匀对辐射各向异性的影响规律。

4. 弥散介质内热辐射光谱特性实验及分析方法

提出了可供燃用国产动力煤的锅炉炉膛设计计算关联式。构造了判断假散射特性的物理模型,为热辐射数值算法中特有的误差源分析提供了依据。在国际上率先提出了高温弥散介质内热辐射分析的多尺度概念和计算方法。

5. 梯度折射率介质内热辐射传递机理与特性

介质的组分、密度、温度的非均匀性导致介质折射率连续变化,产生折射率梯度。从理论上导出了以空间坐标为自变量的多维梯度折射率介质辐射传递方程,建立了较完整的分析梯度折射率介质内热辐射传递的理论体系。揭示了梯度折射率影响热辐射传递的三个层次作用机理,发现并解释了光线弯曲导致的特殊热辐射效应。

本项目系统研究了红外辐射光谱特性与传输机理。科学价值体现在:①建立了多维梯度折射率介质内热辐射传递的理论体系;构造了判断辐射数值算法中假散射特性的物理模型。为计算热辐射学分支学科的建立作出了贡献;②揭示了半透明介质/微粒内的耦合传热机理,发现了表面及内部温度场的奇异现象;建立了多参数群联合反演方法,发现了湍流脉动对时均温度场的影响规律。提出了热辐射分析的多尺度概念,奠定了大空间弥散介质系跨尺度分析的理论基础。

本项目发表论文 210 篇,其中 SCI 收录 99 篇,EI 收录 134 篇(含 SCI、EI 双检 92 篇),被收录的论文中影响因子大于 1.5 的 58 篇。出版研究生教材 1 本;获软件著作权 5 项。论著被 37 个国家和地区的 870 余位学者正面他引 863 次;国外专著他引 21 次;SCI 他引 289 次,其中引文影响因子大于 1.5 的 120 次。8 篇代表作 SCI 他引 71 次。项目组成员应邀在国际会议上作邀请报告 5 次。部分成果已用于:太阳能多光谱利用、锅炉过热器超温爆管分析、卫星光学系统设计;并为导弹等军事目标红外特征分析提供重要的理论指导。

该项目获得了 2009 年度国家自然科学基金二等奖。

(三) 高效低阻气体强化传热技术及其应用

气体换热设备是化工、空分、制冷等重大装备中实现热量传递的重要装置,由于气体导热系数低、密度小,在各类气体换热器中,强化气体侧换热是提高换热器效率、降低生产成本、缩小设备体积和节约能源的重要途径。

国内外现有的气体强化传热技术虽然可以在不同程度上强化传热,但普遍使气体阻力增加的百分数大于气体传热增加的百分数,制约了高性能气体换热器的研发和应用。因此,探求新的气体强化传热理论和技术发明,将传热与阻力性能进行一体化设计的高效低阻气体强化传热技术一直是国际强化传热领域的具有挑战性的研究课题。

在国家“973”项目、国家自然科学基金等的支持下,突破传统气体强化传热技术的约束,采用传热学基本原理分析、数值模拟与实验相结合的方法,对高效低阻的气体强化传热理论及相关技术进行了深入而系统的研究,揭示了在气体流动阻力增加较小的条件下,能使传热得到显著强化的物理机制,提出了在气体流动阻力增加较小条件下,能有效强化气体传热的新思想,发明了中心被堵的波纹型纵向内翅片管以及开缝按“前疏后密、等热

阻”原则布置的开缝翅片等气体在管内流动、与气体在管外流动时的高效低阻气体强化传热技术,实现了气体传热增加的百分数大于其阻力增加的百分数。

利用关键技术发明,研制开发了中心被堵的波纹型纵向内翅片管和前疏后密开缝翅片几何参数的设计软件,以及气体换热器整体设计优化软件。针对不同行业,设计开发了 60 余种不同参数的压缩机中冷器、气体冷却器等高效低阻气体换热器产品,并实现了产业化,所设计开发的换热器产品性能均达到或超过国外同类产品,取得了显著的经济和社会效益。

本项目形成了具有自主知识产权的新型气体强化传热技术。项目组成员应邀在国际会议作特邀报告 8 次,担任 7 个国际学术期刊的副主编或编委,提高了我国在该领域的国际学术地位和学术影响。项目的有效实施降低了气体换热器的运行能耗,推动了气体强化传热理论和技术的进步,并为企业和高校培养了一批科技人才。

该项目获得了 2009 年度国家技术发明二等奖。

(四)油气集输的节能减排和安全高效关键工艺及装备

我国油气田生产还处于高能耗、高排放、低效率阶段,油气集输的成本占油田生产总成本的 30% 以上。因此,如何简化油气集输工艺流程、提高其节能减排和安全可靠性是新油气田建设和老油气田二次开发的重大挑战。由于我国油气藏的特殊性和开发模式的自有特点,不能照搬国外先进工艺技术,亟待自主解决能满足低能耗、低排放、高效率、高安全与可靠性的油气集输的关键工艺及装备。本项目历时十多年,开展了油气集输关键工艺所涉及的理论和技术研究,发明了油气集输的流动在线测量与控制、除沙与除湿相分离、高效加热等关键工艺和装备,实现了油气集输的高效、安全和节能减排。

针对该领域国内外均缺乏有效的实验研究设备和方法等问题,自主设计搭建了专门用于油气集输关键工艺与装备研发与验证的实验装置;发明了油气集输工艺中的油气水多相流流型在线识别仪和相含率在线测量仪;发明了油气集输工艺中严重段塞流控制与消除方法,从根本上消除了严重段塞流,实现了最优节流;发明了油气集输工艺中的螺旋管流除沙器和天然气超音速旋流除湿器;发明了油气集输工艺中的新型油气混输相变加热炉,使加热效率提高了 20%~30%,排污减少 30%。以上关键技术发明,解决了直接造成油气集输过程高能耗、高排放和低效率的油气水流动在线监测与控制、油气净化和分离、高效加热等关键技术难题,开发了先进的流型在线识别仪和相含率在线测量仪、螺旋管流除沙器和天然气超音速旋流除湿器,以及 3 大类 2 个系列 40 多个品种规格的油气混输相变加热炉等油气高效集输工艺中所必需的仪器、装置和关键装备,满足了油气集输工艺过程中的低能耗、低排放、高效率、高安全与可靠性要求,实现了油气集输的高效、安全和节能减排,并简化了油气集输的工艺流程。

该项目获得了 2009 年度国家技术发明二等奖。

(五)同步辐射真空紫外光电离质谱技术

进入 21 世纪以来,通过将同步辐射真空紫外光电离和分子束质谱技术相结合,发展出了应用于燃烧诊断学的同步辐射真空紫外光电离质谱 (SVUV-PIMS) 技术,促进了