

· 学科进展与展望 ·

重大项目“新型低温制冷技术中的基础问题”取得重要进展

纪军¹ 刘涛¹ 吴剑峰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 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

[摘要] 国家自然科学基金重大项目“新型低温制冷技术中的基础问题”(编号 50890180)经过各参加单位的协同努力,顺利完成了研究计划,通过了国家自然科学基金委员会工程与材料科学部组织的结题验收。该项目已在国内外重要学术刊物和学术会议上发表论文 275 篇,其中:SCI 收录 106 篇,EI 收录 90 篇;出版专著 2 部;已授权发明专利 29 项,其中 10 项已得到实施;1 项成果通过省部级鉴定,已有 2 项成果获得产业化应用。在人才培养上取得显著成绩,多名青年骨干获得国内外学术荣誉。本项目成果将促进我国在制冷与低温技术研究领域的原始创新,并推动新型低温制冷技术在国民经济建设、高新技术和国家安全方面的应用。

[关键词] 低温制冷技术, 交变流动, 多元混合物系, 热驱动制冷

制冷与低温技术在促进我国国民经济建设、国防军事现代化以及推动科学技术发展中扮演着极其重要的角色,主要体现在:(1) 我国的能源需求随经济发展迅速增长,食品冷却以及空调制冷用能目前已达到总能耗的 25% 以上,而我国制冷行业在这一制冷温区大多缺乏独有的核心技术,需要消耗大量的财力从国外引进制冷技术和生产工艺线;此外,大量中低品位的热能未能得到有效利用,而热驱动制冷可以在此方面大显身手;(2) 深低温制冷技术在军事科技现代化中起着重要的支撑作用,它广泛应用于红外探测器成像、高温超导器件等许多现代低温电子器件的冷却,长期以来西方发达国家对我国实行封锁和禁运;(3) 在其他重要的应用领域方面,制冷与低温技术作为核心技术,在天然气液化工业、煤层气中甲烷回收、焦炉气中氢气回收、各种大型科学工程以及生物医学工程中起着关键性的支撑作用。因此,开展新一代低温制冷技术的重大研究对于我国的节能减排、开发清洁能源以及支撑高新技术的发展是十分迫切的。

为此,国家自然科学基金委员会工程材料科学部于 2008 年设立了重大项目“新型低温制冷技术中

的基础问题”,由中国科学院理化技术研究所吴剑峰研究员主持,中国科学院理化技术研究所、北京航空航天大学、中国科学院力学研究所、北京化工大学和浙江大学共 5 家单位共同承担,通过工程与材料科学、数理科学、化学科学等相关基础学科的交叉,利用热力学、传热传质学、声学、流体力学、非线性动力学以及化学工程、材料学等分支学科的基本原理,研究交变流动制冷、热驱动制冷以及利用环保混合工质等新型低温制冷技术中的动态、交变、多元多相介质的流动特性、传热传质机理、低温系统的能量转换过程以及高精度低温工质热物性基础数据、先进制冷循环构建等关键科学问题,旨在突破制约新型低温制冷系统难于进行准确定量设计的重大基础问题,并在研究方法和关键技术的源头创新上有所突破,为发展新一代高效、环保和具有高可靠性的低温制冷技术奠定理论基础和关键科学基础数据。

1 项目取得的创新性进展

经过各课题组 4 年的努力,项目取得的重要研究进展可概括为以下 4 个方面:

本文于 2013 年 6 月 6 日收到。

1.1 低温交变流动制冷系统中的能量传输及转换机制研究方面

发展了非均匀多时间步长时间积分方法,揭示了热声系统非线性起振和振荡过程特点以及板叠端部的复杂流动变化特性;发现了脉冲管制冷机中的第3直流,提出有效抑制热缓冲管中自然对流导致声流的方法;发展了热声双作用发电和制冷新流程;研制了高频驻波发动机驱动的脉冲管制冷机和20 K及10 K低温温区多路旁通结构的脉冲管制冷机原理样机。迄今已发表与录用SCI文章40篇,中文核心期刊文章61篇(其中40篇EI收录),国际会议文章39篇,申请国家发明专利26项;获得各种荣誉9项。培养毕业了博士28名,硕士23名,形成一支在国内外有一定影响力的稳定科研队伍。

1.2 大振幅、高频率可压缩交变流动低温传热机理研究方面

通过系统相似参数敏感性分析,获得了脉冲管制冷机系统中主要参数变化规律与敏感特性;提出了管内可压缩交变流动与传热的定量评价指标和速度环状效应系数;建立了浮力-交变流动的线性热声理论分析方法和2维理论模型;开发了可压缩交变流动的高精度计算程序。迄今共完成期刊论文35篇(其中SCI收录21篇,EI收录12篇),发表会议论文20篇,发明专利1项。已投SCI收录英文期刊论文5篇,正在审稿过程中。4年内共培养毕业研究生博士生6人、硕士生3名,出站博士后2人。

1.3 深冷多元混合物系相变传热和流动特性及其热力耦合机理研究方面

建立了高精度低温汽-液相平衡性质和 p - ρ - T 性质等测量装置,系统地获得了典型深冷多元物系的热物性、相变传热和流动数据,掌握了它们的基本特征和规律,对纯质和混合工质池沸腾与流动沸腾的各种物性影响因素进行了深入的研究,得到了相应的关联式,并成功实现将多元多相混合物的非均匀热质传输与热力过程的耦合规律用于系统流程和传热单元的优化设计,在承担“国家重大专项”任务中发挥了显著作用。已发表论文39篇(SCI源刊论文18篇),授权发明专利12项(另有已申请尚未授权的发明专利17项)。在项目实施过程中,培养博士生9人,硕士生7人,研究队伍快速成长,获得2012年度“全国工人先锋号”荣誉称号。

1.4 热驱动制冷系统的热转换理论及先进循环研究方面

提出了考虑能量品位的制冷能力的概念,阐明

了热驱动制冷循环高效化与多功能化的热转换理论规律;建立了热驱动制冷循环系统的构型方法;提出了新型的制冷循环;获得了水、氨和氢氟烃等传统制冷剂与离子液体新型工质对体系;建立了工质对的热物性模型。发表英文期刊论文30篇,国内核心论文13篇,授权发明专利17项,申请发明专利5项,出版专著2部,培养博士生14人,硕士生25人。

2 该项目的主要特点

(1) 该项目注重基础研究,取得显著研究成果。已发表学术论文275篇,其中SCI收录106篇,EI收录90篇。出版专著2部。

(2) 研究工作与国家重大需求相结合,注重技术创新。已授权发明专利29项,其中10项已得到实施。基于深冷多元混合物系相变传热和流动特性及其热力耦合机理研究成果,形成了具有自主知识产权的高低温环境试验箱技术和撬装式煤层/天然气液化装置技术。其中撬装式煤层/天然气液化装置技术还通过了13位院士等组成的专家组的省部级成果鉴定:实现重大技术创新,核心技术拥有自主知识产权,达到国际领先水平。两项技术现均已成功获得转化推广,与地方合作成立了2个高新技术企业,已取得直接经济效益超过3000万元。

(3) 项目组重视项目和国际层面的交流与合作。项目开展以来,项目层面组织了4次大型研讨及学术交流会,参会者每次均在40余人。除项目参加人员外,每次均邀请7—10位国内同行专家参加研讨,为项目研究提供咨询。各课题及各课题之间也组织了20余次的研讨和交流。项目期间,开展了广泛的国内外学术合作交流,有近300人次参加密切相关的国内学术交流会议,有近100人次参加领域内著名的国际学术会议。

(4) 项目注重梯队和青年人才的培养。许多青年骨干和研究生在会上作学术报告,近200人次的年轻骨干和研究生参加了项目内各种形式的研讨会,使他们得到很好的锻炼和提升。多位年轻骨干在项目进行期间晋升正高级专业岗位,众多年轻骨干和学生获得多种奖励,公茂琼获“中国青年科技奖”,汤珂获“国际制冷学会林德奖”,戴巍获中国工程热物理学会“吴仲华青年学者奖”和中国制冷学会“青年科技奖”,2人获得“吴仲华优秀学生奖”,1人获“中国科学院优秀百篇优秀博士论文”、20余位学生获得中国科学院等“院长优秀奖”、“国家奖学金”、多种冠名奖学金、“优秀毕业生”、“三好学生”等。

本项目成果将促进我国在制冷与低温技术研究领域的原始创新,并推动新型低温制冷技术在国民经济建设、高新技术和国家安全方面的应用。

3 思考与启示

该项目全面完成了预定的研究内容,达到了原定总体研究目标,取得了一系列创新性的研究成果,效果显著。以下几点体会将有益于未来国家自然科学基金重大项目的组织与管理:

(1) 工程技术学科应更多地关注从国民经济与国防建设实际需求中提炼基础性、关键性、战略性和共性基础问题,并系统、持续开展深入研究,使创新能落到实处,使创新具有持续性。

(2) 加强国际交流与合作,加强学科交叉,集中

力量解决最前沿、最紧迫的科学问题,提高我国在国际学术界的影响并发挥更大作用。

(3) 强化对取得成绩、具有持续创新能力和结构合理团队的稳定支持力度,以鼓励不断取得高水平重大研究成果。

(4) 要加强各课题间的交流与研讨,做到分工明确,互相促进,项目负责人、学术领导小组加强协调是项目成功实施的保证。

(5) 研究成果向实体经济领域和国防应用领域的转化具有重要的意义,应加强与实体应用领域的有效沟通,并通过基础研究成果迅速应用于技术领域,实现成果的转化。

Achievements of Major Project "Basic Issues in the New Cryogenics and Refrigeration Technologies"

Ji Jun¹ Liu Tao¹ Wu Jianfeng²

(1 *Department of Engineering and Materials, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085;*

2 Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190)

Abstract The Major project of the National Natural Science Foundation of China, "Basic issues in the new cryogenics and refrigeration technologies" (No. 50890180), has been successfully accomplished by all participating units with collaborative efforts. The achievements of this project have been checked and accepted by the Department of Engineering and Materials Science, the National Natural Science Foundation of China. With the support of this project, 275 articles were published in domestic and foreign academic journals and academic conference Proceedings. Among these articles, 106 were index by SCI, 90 by EI. Two academic books were also published. Twenty-nine invention patents were authorized based on the research achievements and 10 of these patents have been implemented. Furthermore, one achievement has been authenticated with the provincial and ministerial level. Significant achievements have been also made in personnel training. A certain number of young scientists received domestic and overseas academic honors. The research results of this project will promote domestic original innovation in the field of refrigeration and cryogenics technology, as well as the application in the national economic construction, high-tech and national security.

Key words cryogenics and refrigeration technologies, oscillating flow, multi-component mixtures systems, heat-driven cooling