

工程热物理学科发展现状与前景展望

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。工程热物理学科是能源利用领域的主要基础学科,其传统分支学科包括工程热力学、热机气动热力学与流体机械、燃烧学、传热传质、多相流等。为了满足持续发展的需求,人们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,形成了能源环境学、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。工程热物理学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。

工程热物理学科近年来的发展体现出以下特点:① 学科的交叉、综合已成为当代能源科学发展的基本趋势与特征;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;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。

1 工程热物理学科近年研究进展

在能源动力系统中能的综合梯级利用和 CO_2 控制原理与方法方面,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。

在红外热辐射光谱特性与传输机理研究方面,① 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 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 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,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 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 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。

在高效低阻气体强化传热技术及其应用方面,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、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管等气体在管内流动、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。

除此之外,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;应用同步辐射真空紫外光电质谱技术,建造了国内首台同步辐射燃烧实验装置,可应用于绝大多数气态和液态燃料火焰的研究,为理解化石燃料燃烧过程中有害污染物(包括多环芳烃、 NO_x 和 SO_x 等)的形成机理提供了依据;将同步辐射真空紫外单光子电离技术应用用于对低温等离子体放电过程中产生的各种中性物质(包括活性物质,如自由基等)的诊断;基本形成了太阳能热发电研究从基础理论、材料、关键器件、关键设备、系统集成、专用测量仪器仪表、关键设备性能测试与评价、太阳能热发电技术发电成本的经济环境评价等在内的一套完整的研究体系;提出了能源转换利用与 CO_2 分离一体化原理,强调在 CO_2 生成的

源头,即化学能的释放、转换与利用过程中寻找低能耗,甚至无能耗分离 CO₂ 的突破口,以“零能耗”取代“零排放”;在航空燃气涡轮发动机的关键部件——涡轮的研究中,建立并完善了对转涡轮设计体系,揭示了无导叶对转涡轮的基本流动机理,掌握了无导叶对转涡轮应用中的关键技术,建成了国内首座暂冲式短周期对转涡轮实验台;传热问题数值计算在高效精确与细化化方面取得显著进步;超常环境和极端参数下的传热传质研究取得重要成果,主要包括:大功率光电子与微电子器件冷却、涡轮叶片高效冷却技术、高超声速飞行器冷却与热防护、低温传热传质的研究、微重力传热研究等;针对传统传热学中只有传递速率(强化)而没有传热效率(优化)的概念,通过热学与电学的比拟,定义了描述物体传热能力的新物理量——火积、火积耗散函数、基于火积耗散的传热热阻,发展了火积耗散极值原理和最小热阻原理;在微通道两相流方面进行了微通道沸腾传热不稳定性抑制、微弱势差对微通道沸腾传热的影响、微气泡喷射沸腾传热、脉冲电压激励的微加热器气泡动力学行为研究;首创了多项水煤浆锅炉的燃烧关键技术,解决了高水分浆体燃料的强化传热和高效燃尽难题,独创了撞击式多级雾化水煤浆喷嘴,解决了高黏度非牛顿液-固两相流的高效雾化难题,开发了多种浆液燃料低 NO_x 燃烧器、水煤浆再燃脱硝技术、在线过滤器等设备和系统,提出了一整套关于水煤浆燃烧、流动、传热和气化的创新基础理论。

2 工程热物理学科发展趋势

近年来,中国工程热物理学科在面向国际学科前沿和注重原始创新的同时,继续结合国家重大需求,不断取得突破。未来将在以下方面重点发展。

(1) 研发和推广低碳能源技术,构建高效洁净的能源动力系统

近期以开发节能增效技术与资源化利用技术作为控制温室气体排放的主要措施,中期以大力发展可再生能源等替代能源为重点,远期以 CO₂ 捕获和封存(CCS)技术为主线。CO₂ 捕获和封存技术的难点在于 CO₂ 回收能耗过高,这不仅导致能源利用效率下降,且使 CO₂ 减排成本居高不下。国际上的 CCS 技术尚不能满足能源可持续发展的要求,需要寻求能够同时解决能量利用与 CO₂ 减排的“革命性”技术,并发展适合我国国情的温室气体控制技术路线。

开辟构建高效、洁净的新型煤炭利用技术能源动力系统是工程热力学与能源利用学科的重要发展方向,其中化工-动力多联产系统以及分布式供能系统能够大幅度改善能源系统的节能与环保性能,具有非常好的发展前景,是学科发展的热点。化工-动力多联产系统是通过系统集成把化工生产过程和动力系统有机耦合在一起,在完成发电、供热等能量转换利用功能的同时,生产替代燃料或化工产品,从而同时满足能源、化工以及环境等多功能、多目标综合的能源利用。分布式供能系统与当前集中供能系统互补是未来能源系统的发展方向。分布式供能技术发展的战略目标是在能源综合梯级利用原理指导下,掌握多能源互补、考虑系统全工况性能的分布式供能系统集成方法,突破燃料化学能释放、循环耦合、全工况集成等理论方法,进一步通过攻关,建立一

批分布式供能示范工程,研发一批适合分布式供能技术的核心动力设备,解决燃气轮机设备研制中的关键技术,掌握具有自主知识产权的燃气轮机技术。

(2) 大力发展风能等可再生能源

风力发电是当今新能源发电中技术最成熟、最具有大规模开发条件和商业化前景的发电方式。风电的科学发展,必须紧紧围绕科技创新,通过基础研究与工程实际相结合,国外技术与中国实际相结合,努力实现产、学、研三者的成功对接,从而不断提高我国的设计水平和研发实力,培养出自己的既掌握风电理论又具有风电工程设计实践经验的复合型人才,才能使我国风电研究得到健康发展。

(3) 能源可再生转化利用的理论研究

① 太阳能规模制氢与燃料电池耦合系统及其内部多相多物理及化学过程的理论及关键技术。根据太阳能光催化和生物质热化学规模制氢技术以及质子交换膜和固体氧化物燃料电池各自的特点,对其进行耦合,并针对耦合系统内部的复杂多相多物理过程理论及关键技术开展深入研究,以实现最终实现高效、洁净、便捷利用太阳能的目标;② 高效低成本规模化的储氢理论与技术。氢气的储存和运输是氢能发展的“瓶颈”,研究高效低成本规模化的储氢理论与技术,全面实现以氢为能源载体、储氢材料为载能材料、燃料电池和微型燃气轮机为用氢装置的制氢、储氢、用氢一体化技术突破,将为能源可持续发展开辟全新的道路;③ 燃料电池多尺度复杂结构中多相多组份热质传输与电化学反应耦合的基本问题。燃料电池内与电化学反应耦合的复杂传输过程的数学模拟还不完善,需要多方面的共同努力,这不仅依赖于多孔介质内多相传输理论的突破,还依赖于对燃料电池内部微观结构和传输过程等相关信息的掌握程度。

(4) 实施能源、资源与环境一体化理论与技术

能源的可持续发展是工程热力学与能源利用学科发展的目标。实施可持续能源发展战略,就是要在能源、资源与环境一体化原则指导下,建立稳定、经济、清洁、可靠、安全的能源保障体系,协调好资源、环境和经济发展的关系。摒弃传统的“链式串联”模式,走出一条资源、能源与环境相容的发展新模式。新的发展模式的关键在于开拓可持续能源新渠道和实施能源多元化战略,尝试解决能源利用与环境相容协调的难题,包括温室气体控制、能源资源综合利用等发展方向。能源资源综合互补需要研究不同品质能源、资源的互补利用新方法,揭示多种能源、资源互补利用过程不可逆损失减小的科学本质,提出互补利用过程中燃料化学能转化与释放的热力学分析方法;分析互补利用过程,能源、资源综合梯级利用的特殊规律,以及开拓能源、资源互补的新型能源动力系统。

特别值得注意的是,工程热物理研究已不只是停留在宏观问题的层面,也在向微观领域进发。如今,各种微动力装置和热设备应运而生,微、纳尺度下特有的种种现象提出了一系列有趣的研究课题,这将是工程热物理学发展的一个崭新的方向,也是其今后蓬勃发展的重要方面。

注:本文摘编自《工程热物理学发展报告(2006-2010)》。(中国工程热物理学会 编著,北京:中国科学技术出版社,2010.)

(责任编辑 齐志红)