

21 世纪多相流热物理学科的未来与挑战

Future and Challenge of Multi-Phase Fluid Thermal Physics in the 21st Century

郭烈锦

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室,教授 西安 710049)

一、多相流热物理科学的定义、应用范围与现状

多相流热物理是研究不同相态或不同组分的物质同时存在并具有明确分界面时的流体流动及其热、质传输过程规律的科学。在自然界的许多工业过程中,两相或多相物质混合流动是最常见和必须处理的现象或问题,通常把这种体系称为两相或多相体系,相应的流动即称为两相或多相流动。比较常见的是气(汽)液、气固、固液两相流还有两相以上的流动,如气液固三相流、油气水三相流,甚至油气水砂四相同时存在的流动。自然现象有如大气中云的飘移,雨珠、冰粒、雪花在大气中的运动,沙漠飞砂,江、河、海水表面波浪以及泥沙运动,地下油、气、水的运动,血液及其它流体的流动等只是两相及多相流动的几个例子。举凡动力工程、化学工程、石油工程、核能工程、采冶和金属炼制工程以及航天航海、生物与环保工程中都存在许许多多两相及多相流动体系,而且这些多相流动及其热、质传输过程大都直接制约整个生产或工艺流程的质量与安全可靠性。近半个世纪以来,由于上述工业领域的发展需要、多相流机理的研究和技术的开发日新月异,已形成一门新兴的学科。

正是由于多相流热物理学科的形成和发展是建立在上述众多的不同的传统行业的发展需要基础上的,诸如化工工程、机械工程、核工程、大气科学与空气溶胶科学等等行业,都有其解决多相流问题的独自的不同方法,并且在各自不同的行业中,研究者们都已取得丰硕的成果,限于问题过于广泛和复杂,研究者都有其知识与观点的局限性,尽管许多学者一直致力于建立统一理论及应用技术体系与方法,但至今为止仍未能将这些不同的传统行业中发展出来的解决多相流体系的方法和理论统

一起来,更未形成以严格精致的数学理论为基础,推导和构造出具有严密的内在联系与不同适用范围的具体应用技术方法与公式的完整科学体系。学科的进步和工业的发展均急需新的理论和技术的产生。

二、相关工业的现状与发展要求

长期以来乃至今后数十年间制约我国经济发展和社会进步的瓶颈仍然是能源不足、电力缺乏以及环境污染造成的日益严重的危害。而能源的开发、转换与传递过程大部分与多相流热物理紧密相关。

到 1993 年末,我国已拥有 1.8 亿千瓦发电设备总装机容量,其中火电装机容量为 1.25 亿千瓦,并且每年发电装备以 1 350 万千瓦(其中火电 1 170 万千瓦)的速度增长。我国电力工业已进入了大电网、大电厂、大机组、高参数、高电压、高自动化的发展新阶段,但我国火电机组与国外相比较,还有相当大的差距。1991 年我国电站平均供电标准煤耗为 424 克/千瓦时,而国际先进水平的煤耗为 320 克/千瓦时,节能的潜力很大,如何提高设备的热效率和运行的安全可靠已成为十分突出的问题。由于存在技术及其它方面的问题,非计划停运及非计划降低出力次数频多;由于燃煤品质的混杂不纯、燃烧及沸腾传热存在的问题等而引起的炉内结渣,炉膛出口热偏差过大已严重影响机组出力,造成了火电机组运行安全可靠性和发电效率低,甚至导致重大的爆炸事故。作为我国发电厂主力的 300 兆瓦、600 兆瓦发电机组,亚临界及超临界压力参数锅炉、汽轮机组及其辅助设备等一系列的国外引进技术尚待真正吸收和消化,并在此基础上进行改进、提高和创新。目前国内正在计划发展大功率塔式螺旋管圈直流锅炉调峰机组,其中两相流动与传热特性是急需研究的关键问题。在汽轮机方面,常规低压

冷凝透平最后几级工作在湿蒸汽区,核电站汽轮机的头几级也在高压低湿度区中运行。由于湿度的存在,导致效率降低,叶片和其它部件受到侵蚀。上述问题都涉及到复杂的多相流动及其传热问题。为了解决目前大型机组存在的运行安全可靠、效率低等问题,发展新型、适应能力强、热效率高的大机组,以达到热偏差小、煤质适应性强、具有优良的水动力特性等特点,研究和发展多相流及其传热传质方面的新技术新理论是关键中的关键。

核电在我国也正在迅速发展。国家计划在2015年全国核电装机达到3000万千瓦。我国已开展如何提高核电站反应堆固有安全性问题的研究,并在研制具有更高安全性的AC600新型核反应堆。这些研究的一个共同特点是利用和提高自然循环的能力。以保证在事故停堆后,利用自然循环带走堆芯中的剩余热量。在核潜艇上采用这种新堆型,可以满足作战隐蔽性需要,在停止主泵工作后,依靠自然循环带走热量,继续安全运行,从而降低整个潜艇的噪声。另外,国家正在全力研制新型50兆瓦核动力装置,其一体化直流蒸汽发生器中急待解决的一个主要问题是汽液两相流及其不稳定性。因此,汽液两相流动特性和传热特性研究也是发展核电站及其他核动力装置中的一个关键问题。

在煤燃烧和流态化工程特别是煤的清洁燃烧利用中,存在着大量的气固两相流动及其传热问题,如流化床燃烧、煤粉火炬燃烧、烟气净化和各种煤气化、液化反应器工作的过程,都和复杂气固两相流动的无序结构与传热密切关联。在湍流流场中复杂颗粒的运动左右着煤的燃烧和传热传质过程,煤粉锅炉技术、流化床锅炉技术以及煤气化技术中,这个现象表现得尤为突出。各种动力机械内气固或液固两相流中结渣、腐蚀、磨损等问题直接影响到设备的效率、安全性和寿命。研究气固两相流的新技术新理论,以及气液固多相流传热传质基本规律是十分迫切的任务。

我国石油、天然气虽有一定储量,但随着大批量的开采,目前东部各大油田都已进入劣质、难采阶段,新的大型油田大多处于沙漠或海洋区域,油田生产中正在研究和采用的许多新的技术都急切依赖于油气水多相流基本规律的掌握;油气水三相流的长距离混合输送和流量在线测量技术已成为制约石油工业发展和企业经济效益的难题。“八五”末,我国油田大部分进入中、高含水期开采阶段,特别是东部油田绝大多数主力油田含水量达到80%以上,有些甚至高达90%。这样一来,一个突出的矛盾是已建地面工程已与之不相适应,迫切需要解决大量采出液的高效处理新方法、新技术。在节能与环保、采矿、制药、造纸、食品加工等工业领域,也广泛存在多相流混合与分离过程,但目前的技术都十

分原始,效率很低,急待研究多相流混合与分离方面的新技术新理论,以提高资源利用率和劳动生产率。非牛顿流体具有不同于普通牛顿流体的特殊流动和传热特性,这方面的研究工作愈来愈受到国际工业界和科学界的重视。积极开展非牛顿多相流流动和传热特性研究,对提高有关设备的热效率和工作可靠性具有重要意义。

此外,随着冶金、宇航、大型微电子设备和大型计算机的发展,对冷却技术的要求愈来愈高,利用相变传热可以获得很高的冷却效果,因此用射流冲击形成汽化冷却或蒸发冷却使散热得到强化的技术正在受到各国的重视。

三、多相流热物理研究发展趋势

由于多相流动非常复杂,所以它目前仍然是一门实验性很强的学科,它在应用上涉及许多领域,在内容上涉及流体力学、热力学、传热传质学、物理化学、燃烧学等许多基础学科,国内外对多相流动及其传热规律的研究十分广泛,目前研究水平大致是对大多数工程问题可以通过试验研究得到认识和解决,对某些问题在理论上有了比较清楚的了解,数值计算的模拟已得到较大发展;在测试方面,已尝试采用各种可能的方法(光、电、磁、力、声等)。存在的问题主要是:对许多问题在试验和理论方面尚存在有不一致的构思、设计和认识,多相流理论体系还很不完整,适用范围宽、精度高、便于实用的多相流测试技术还有待进一步开发,数值计算方法亦尚不成熟。

当前的发展趋势大致是:在多相流基础理论研究方面,趋向于利用数学模型进行工况模拟,再以较少的试验结构去验证和修正,使之部分地代替试验研究,并取得更广泛的研究效果。

在汽液两相流方面须深入研究:气泡运动、喷雾和液滴运动,气液分离理论与技术、两相流声波及激波的传播;两相流湍流、相界面传输、多组份两相流、微重力场两相流;微槽道内的两相流动与传热;两相流不稳定性、瞬态两相流、受热沸腾临界热负荷、干涸后传热及传热恶化、瞬态传热等,以及多孔介质中的两相流及沸腾传热、射流冲击传热、相分离机理等。

在气固两相流方面须深入研究:质点运动规律;湍流扩散、流体相与分散相相互作用、固体粒子与固体表面相互作用机理;粒子在冷却壁面上的沉淀规律;两相自然射流、非等温射流、带有燃烧或气化反应的射流;固体粒子的沉降与凝聚、固体粒子分析以及磨损磨蚀的机理;电场、磁场和微波场中的多相流,爆炸激波下的两相流,以及稀相与密相两相流的机理。

(下转第5页)

对哲学体系也带来了巨大的冲击,可能成为产生变革的持久的动力,无疑将在人类探索自然的实践中起着开阔眼界、解放思想的作用。从哲学上说,混沌研究很可能有助于消除对于统一的自然界确定论和概率论两套对立描述体系之间的鸿沟,深化对于偶然性和必然性这些哲学范畴的认识,而相干结构和自组织现象及图形生成的研究则为量变引起质变、有序和无序的相互转换提供了活生生的丰富事例,同时简单性与复杂性、局部与整体、有限与无限等重要的哲学概念、范畴和基本内容受到非线性科学发展的冲击,需要重新认识和深化。非线性科学将通过一系列重大发现和成果直接影响人们的思维方法,从而推动哲学的变革。

有人认为,非线性科学将成为继量子力学、相对论之后的又一次新的科学革命。即使可能不至于此,但至少我们确信,非线性科学所引入的基本概念,对自然科学、人文科学乃至哲学领域产生了深刻的影响,并将会持久地影响人类科学的进程。

三、对 策

1. 提倡跨学科合作 非线性科学是横跨多种学科门类的新兴领域,它的发展实际上是多种学科的相互渗透、相互促进和综合的过程,只从一门学科的专门知识出发,就很难全面、正确、快速地掌握自然界运动的规律。需要在正确的认识论和方法论

的指导下,由多种学科的专家协同作战、共同研究,采取百家之长,集思广益,发挥学科间的杂交优势,鼓励新概念和新方法在不同学科之间的推广和应用,以促进非线性科学的发展。

2. 培养中青年综合型科研人才 培养从事非线性科学研究的中青年科研人才是刻不容缓的,它将直接影响到我国下世纪科学技术的发展能否跟踪世界先进水平。我国需要培养一代从学校起就了解线性与非线性、确定论与随机论,熟悉非线性现象和基础研究方法的年轻人,他们应当跨越学科界限,具有扎实的数理基础,掌握计算机操作与计算方法,既具有综合本领又具有分析能力,既能从整体、全局观察事物的本质,又能熟练地解决具体的实际问题,而这些能力单从学校学习是不够的,还需要积极参与具体的科研实践才能逐步达到。

3. 宽松的管理原则 非线性科学是正在迅速发展的基础研究领域,而基础研究是没有特定商业目的的、非赢利的、以创新和探索知识为目标的研究,因而对非线性科学研究不能有急功近利的指导思想,对它过早地提出实用要求只会起到阻碍学科发展的作用,这里重要的是鼓励人们去发现和认识未知的现象和规律,而这正是人类认识和改造自然的活动中最关键的一步。因而对于非线性科学的管理原则应是不作具体要求和设时间限制的,不应急于评价,同时却应该公开并鼓励国际间广泛的交流。

(责任编辑 王宏章)

(上接第9页)

在数学模型与数值计算方面须研究:多相流理论模型、基本控制方程与闭合条件、离散化方法及离散化方程求解、计算程序和多相流诊断技术及专家系统。

在机理性研究的基础上,发展包括影响因素在内的比较全面、预测结果比较准确的大型成套两相流与传热应用软件,为工程设计和自动控制等提供依据。加强基础理论与工程应用相结合的研究,也是目前多相流动研究的一个重要方面。

在非牛顿流体与油气水三相流方面须研究:非牛顿流体多相流的流动、输送、分离与传热特性;油气水超长距离混合输送问题;油、气、水、砂的气液、液固分离技术;油井井芯内流型转变及压力、温度沿井深变化规律;液固两相流中流动、结渣、腐蚀和磨损机理;气液固三相流动传热强化及除垢机理;多相多组分流体混合与分离新理论与新技术;非约束性流道内多相流体流动与传热特性等。

除了针对火电、核电、石油、化工等常规工业发展的要求开展上述多方面稳态和瞬态过程的两相与多相流动与传热传质过程规律外,为适应航天、航海、微电子、智能化机器制造工业、新材料工业的发展,必须有前瞻性地开展复杂、超常、特殊过程中的两相与多相流动、传热的新理论新方法,解决超高热负荷、超高能密度、微重力等恶劣条件下的器件冷却问题。

在多相流测量新技术方面须研究:多相流多维空间流场和激光测量技术;多相流场高速动态分析与图象处理技术;多相流中密相系统参数测量和颗粒示踪技术;汽液两相流各种特性参数无干扰测量技术;汽液、气固两相微波检测原则与应用技术;煤燃烧气化中气固两相流多媒体测量技术;油气水多相流在线流量计量技术等。

(责任编辑 王宏章)