

·成果简介·

# 能源和动力工程中的重要理论基础

## ——多相流热物理

林宗虎

(西安交通大学,西安 710049)

[关键词] 多相流热物理,能源动力系统

### 1 多相流热物理学及其进展

在动力、化工、石油、冶金等工业设备中存在大量两种或两种以上不同相态或不同组分物质的混合流动现象,这种流动被称为多相流。对能源工程而言,较常见的有气(汽)液两相流、气固两相流、液固两相流、油气水或气液固三相流,以及油气水沙四相流等。多相流热物理是研究这种多相流及其传热传质规律的一门交叉学科。

多相流热物理的形成和发展是和工程技术的进展密切相关的。其中研究最早的为两相流及其传热。早先一些蒸汽轮船和蒸汽机车的锅炉爆炸事件促使人们去研究锅炉的水循环和传热问题。在19世纪末和20世纪初,已有一些论文论述了船用锅炉中的水循环和传热问题,但总的来说,有关论文数量不多,研究工作还处于启蒙阶段。

1950年后,由于工业技术的飞速发展,例如,动力工业中高温高压条件的采用和宇航工业及商用核电站的发展,促使多相流和传热研究工作的进一步展开。

近40年来,美、英、前苏联等工业发达国家建立了一系列功率为兆瓦级的试验台,不少试验都能用实物在运行压力下进行。同时,对多相流和传热也进行了较为深入的理论分析。对多相流的流动和传热机理、流型及其影响因素、流动时相的分布及阻力计算、流动时的动态不稳定性及传热问题均作了广泛的研究和分析,并得出了许多计算公式。总结多相流和传热的各种研究成果的专著也纷纷出版。这标志着多相流工程热物理已发展到一个新阶段,一

个逐步形成一门新学科的阶段。

近20年来,由于核电站事故的发生,促使各主要工业国对与核反应堆安全问题有密切关系的核反应堆的热力、水力状况进行了大量研究工作。在其他工业领域中,对于多相流和传热传质的研究工作都在向着增加研究参数、扩大研究范围和进行一些全尺寸部件的试验研究方向努力。对于管束中的多相流流型和流动阻力的研究也在增多,以适应各种换热设备,诸如废热锅炉、重沸器、列管式蒸发器以及其他液力输送和气力输送设备的研制开发需要。此外,人类对环保的日益重视也有力地促进了该学科的发展。

由上所述可见,多相流热物理研究的进展和工业的发展是密切相关的。工业发展不断向多相流热物理学科提出新的课题,而该学科研究工作的进展又进一步促进了工业的发展。

### 2 新型能源动力系统对多相流热物理研究提出的新课题

人类在21世纪面临的首要课题之一是能源和环保问题。化石能源资源的日益枯竭使人类力求对已有能源高效洁净的利用并开发新的能源。

根据我国能源发展方针,必须高效、充分和可靠地利用我国的能源。电能是能源利用的最佳形式。电力工业发展对国民经济和人民生活水平的提高至关重要。我国的能源结构以煤为主,且在很长时间内难以改变。火电和核电占我国发电装机容量的70%以上,火电中的80%—89%容量为煤电。因此在能源科学领域,以开发高效、洁净、可靠的火电和

国家自然科学基金资助项目。  
本文于2000年4月25日收到。

核电设备为主攻目标的研究工作具有十分重要的意义。这不仅可以显著节省宝贵的煤炭等能源资源,而且可有效地减轻燃料开发、运输和环保等方面的压力,是近50年乃至更远时期急需的能源与动力科研项目。

在火电方面,根据当前国际科学水平和发展趋势,有望成为21世纪新一代高效洁净可靠的大型燃煤发电机组的类型有超临界(25 MPa级)和超超临界(30—35 MPa级)变压运行机组、增压流化床蒸汽-燃气联合循环机组和整体煤气化燃气-蒸汽联合循环机理。这3种机组的研制成功与投入应用均可将机组发电效率提高到45%—48%或以上(而目前一般火电机组的发电效率均低于40%),并大大地减少排放物对环境的污染。如采用超超临界压力(30—35 MPa级)两次再热机组后与超高压(16 MPa)机组相比,发电效率可提高9.3%以上,可大量减少燃煤量,亦即减少了对环境的污染。采用增压流化床蒸汽燃气联合循环机组,燃煤时如加白云石脱硫并保持低床温,可比常规电厂减少50%的 $\text{SO}_2$ 排放量。采用整体煤气化燃气蒸汽联合循环机组,用煤和石灰石在气化炉中气化、除尘后输入燃气机发电,尾气再进入锅炉加热水产生蒸汽发电,可比常规电厂减少 $\text{SO}_2$ 排放量70%,减少 $\text{NO}_x$ 排放量60%,减少粉尘排放量90%。

在核电方面,我国已确定以发展压水堆核电站为主,开发新一代具有固有安全性的一体化模块式核电站,这也是核能利用领域的国际前沿性科研项目。

制约超临界压力(25 MPa级)和超超临界压力变压运行机组发展的理论基础主要有两方面因素:(1)先在受热管内工质方面必须研究由超临界状态变化到亚临界状态时管内两相流工质的传热恶化规律,发生流动不稳定性的规律和积盐规律,否则锅炉管将因传热恶化或流动不稳定性而发生爆管事故;(2)在炉内及燃烧方面必须研究低负荷燃烧时气、气液及气液固多相流化学反应动力学,以确保机组能在低负荷安全运行。

制约增压流化床蒸汽燃气联合循环机组发展的理论基础除管内气液两相流体动力学外,主要有高增压(炉膛压力可高达1.6 MPa)流化床燃烧时的多相流化学反应动力学、热力学、高增压流化床燃烧时的炉内传热传质学 and 高温高压多相流的高效多相分离除尘机理等机理研究。

制约整体煤气化燃气,蒸汽联合循环发电机组

发展的理论基础除管内气液两相流体动力学外,主要有气化装置中高压气化时的不完全氧化过程的反应动力学和煤气净化装置中的多相流动力学问题。

制约新一代具有固有安全性的一体化模块式核电机组发展的主要基础理论为反应堆事故工况下的瞬态两相流动和传热特性,非能动安全排热系统的流动与传热特性以及一体化直流蒸发器及核汽轮机中的两相流流动与传热规律等。

综上所述,发展这些高效可靠的新型电力机组的关键科学问题应为有关多相流体力学与热力学和多相流传热传质学等多相流热物理学基础理论问题。

此外,在国内外的石油探测和开采过程中发现在海洋和沙漠中储藏大量石油和天然气。这些石油和天然气开采后往往要经过上千公里的长距离管道运输才能到达储罐,石油和天然气开采后可以采用先分离再用管道运输的方法,也可采用先混合运输再在管道终端再分离的运输方法。前者需用两根管道分别输送油和气,后者仅需一根管道进行油气混合输送。后者的初投资费比前者可节省约40%,但存在混输过程中可能发生的影响正常输送的段塞流等不稳定油气多相流工况和混输管路中的油气各相流量的在线测量问题。因此,为了采用高效经济的油气长距离管道混合输送技术,也必须对粘性较大的油气混输多相流热物理基础理论进行研究并开发出新型的多相混输管的流量在线测量方法。

上述这些有关的多相流热物理基础理论研究在国外尚未得到很好研究,在国内基本上属空白。

### 3 我们的主要研究任务及预期进展

我们提出的“能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究”课题已在1999年被国家自然科学基金委员会批准为国家自然科学基金重大项目。

这一项目将以新一代大型电站锅炉,核反应堆及蒸汽发生器、流化床、石油天然气高效开采和储运等设备中的复杂多相流与传热传质问题为具体研究对象,同时对上述具体工业应用中带共性的基本现象及其时空变化特性进行重点研究,以便得出具有普遍意义的多相流热物理理论,取得深入系统的成果,既为上述工业发展提供扎实的理论基础,又为建立多相流热物理新的学科体系作出贡献。

本项目以西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室为核心,联合清华大学、东南大学和中国科学院工程热物理研究所以及浙江大学等单位中具有

某方面优势的人员参加本项目的研究工作。这样可以充分发挥各单位的优势,有机结合,协同攻关,在研究内容方面分为以下5个子课题。

第1个子课题名为自然循环过冷沸腾及多维汽液两相流动与传热规律的研究。这一课题主要是针对新型核动力堆循环方式转换中瞬态汽液两相流与安全传热特性,流动不稳性等进行研究的。

第2个子课题名为高压高温高热负荷瞬态汽液两相流与安全传热规律研究。这一课题是针对大型电站锅炉及其他动力装置在超临界压力变压变负荷运行和频繁启停等复杂条件下的瞬态汽液两相流与安全传热规律进行研究的。此外,还将进行大型核电站反应堆失水事故过程及其安全传热特性研究。

第3个子课题名为高温气固两相流动理论与新技术研究。这一课题主要是针对新型动力设备中的循环流化床和高温分离器的流动和传热特性进行研究的。具体将研究气固两相流的相间相互作用模型和颗粒的扩散与凝聚机理、气相湍流对细微固粒运动的作用力、循环流化床内高温气固两相流传热机理、锅炉及分离器内的气固两相流动规律等问题。

第4个子课题名为油气混输中多组分多相流理论与测试技术研究。这一课题主要针对油气混输管路中的多相流特性及在线测量技术进行研究的。其具体研究内容包括:油气多相混合物在各种布局的

混输管中的流型及其转变界限、压力降、持液率及其他稳态流动特性,多相混合物在混输管路启动、停用和通球清管过程中的瞬态流动特性,混输管路中的数理模型和数值计算程序研究和混输管路油气多相混合物的组分和各相流量测量技术等。

由于上述4个子课题的多相流和传热问题都是非线性多相流动和传热问题,在宏观上有其同一性,因而第5个子课题名为非线性多相流相界面动力学及能质传输与数理模型研究。这一课题主要以多相流内部结构不均匀性和状态多值性等非线性问题为主要研究对象,拟通过研究对前述4个子课题中的非线性问题进行专门系统研究,以期得出普遍规律,并引入新的数学物理方法,为建立多相流热物理学科新体系,解决各类多相流热物理问题提供科学依据和理论指导。

这一项目在理论上以多相流与传热瞬态特性、非线性多相流相界面动力学、能质传输机理与测量控制新方法为主要研究方向,属国际前沿课题。通过本项目有望建立新的多相流热物理学科体系,对发展多相流热物理学科有重要意义。

这一项目在工业应用上以新型电站锅炉、核反应堆及蒸发器、石油天然气高效混输等过程中的复杂多相流与传热传质问题为重点研究对象,研究成果可为上述工业发展提供坚实的理论基础。

## AN IMPORTANT AND BASIC THEORY OF ENERGY ENGINEERING ——MULTIPHASE FLOW THERMOPHYSICS

Lin Zonghu

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Key words** multiphase flow thermophysics, energy and power system