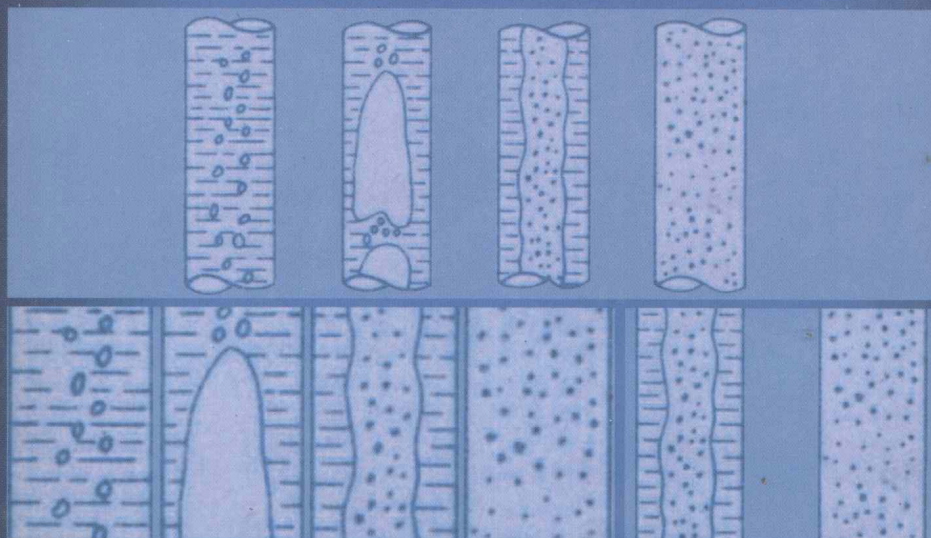


多相流体力学 理论及其应用

周云龙 洪文鹏 孙斌 著



科学出版社

www.sciencep.com

多相流体力学理论及其应用

周云龙 洪文鹏 孙 斌 著

国家自然科学基金资助项目(项目编号:50676017,50706006)

科学出版社

北京

内 容 简 介

作者在多年从事多相流体力学理论和试验研究工作中,取得了令人满意的创造性成果,本书为上述研究成果的总结。

全书共分10章,主要内容包括绪论、管内油气水三相流动的基本参数和基本方程、油气水三相流动特性研究、气液两相流动特性研究、水平管内油水两相流动特性研究、气液两相流型智能识别方法的研究、锅炉蒸发管内流动不稳定性的理论研究、锅炉蒸发管内流动不稳定性试验研究、液固两相流浆体水击压强与计算和气液两相绕圆柱流特性的研究。

本书可供工程热物理、热能工程、电厂热能与动力工程、建筑环境设备与工程等相关专业工程技术人员、工程设计人员阅读,也可作为高等院校相关专业的研究生教材、本科生选修教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多相流体力学理论及其应用/周云龙,洪文鹏,孙斌著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022712-6

I. 多… II. ①周…②洪…③孙… III. 多相流体力学-研究 IV. 0359

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第119868号

责任编辑:何舒民 张雪梅 / 责任校对:赵 燕
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年8月第一次印刷 印张:21 1/2

印数:1—2 000 字数:420 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

前 言

多相流动现象广泛存在于自然界和现代工业生产过程中,与人类的生活和生产密切相关。目前,在化工、石油、能源、冶金、环保和轻工等行业的许多生产设备中都涉及多相流动工况,而多相流学科是以多相流系统为研究对象,以工程热物理学为基础,与数学、力学、信息、生物、环境、材料、电子计算机等学科相互融合交叉而逐步形成和发展起来的一门新兴交叉学科。随着科学技术的迅速发展,多相流在科学研究、工业生产、环境保护以及人类生活中日益重要,使得多相流研究成为国内外极为关注的前沿学科。

东北电力大学作者所领导的课题组先后在此研究领域承担了各类基金项目 10 项,其中包括:国家自然科学基金项目“气液两相横向冲刷管束的绕流特性”(No. 50676017)1 项;教育部科学技术研究重点项目“气液两相绕钝体旋涡脱落特性数值及试验研究”(No. 206037)1 项;吉林省科技发展计划项目“非圆截面微通道内气液两相流动特性”(No. 20060704)和“油气水三相流动特性与流量测量”(No. 963407)2 项;吉林省教育厅项目“石油工业油气水混输管道内三相流型智能识别方法”(吉教科合字[2004]13)和“管束间气液两相缝隙流动特性研究”(吉教科合字[2006]25)2 项;吉林市杰出青年基金项目“多特征融合的油气水多相流型识别方法研究”(No. 2006034)和“管壳式换热器内气液两相流体诱导管束振动的研究”(No. 2007027)2 项。到目前为止,在多相流体动力学理论方面,本课题组发表学术论文 55 篇,其中国际会议论文 2 篇,中文重要期刊 28 篇,中文核心期刊 18 篇,20 篇论文被 EI 收录,申请国家发明专利 3 项,国家实用新型专利 2 项。

近 30 年来,通过大量的理论、试验与数值计算工作,人们对两相流动的了解有了巨大进展,但无论从理论或试验而言,目前仍停留在对某些具体局部情况作较深的分析,或者在极度简化条件下对总体情况作一些粗略的预测,这是很不够的。因此,需要将这些特殊、具体、个别情况的了解逐步上升为一般、全面、系统的理性认识。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,数值计算的模拟得到了较大发展。

存在的问题主要是:对许多机理问题在试验和理论研究方面尚有待进一步深入;多相流理论体系还很不完善,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,数值计算方法尚不够成熟。随着现代工程的发展、科技的进步以及对于多相流体力学提出的一系列新的研究课题,多相流体力学必然会在不断取得新的研究成果下得到进一步的发展,以满足新时代发展的需要。

本书是作者多年来在多相流体力学理论及其应用方面所做的开创性工作的总结,对丰富和发展多相流体力学、多相流参数测量等有重要的理论意义,同时对指导许多相关设备的设计和安全、稳定和高效运行提供技术指导,因此也具有现实意义。此外,本书也可供开展此类研究工作的同行参考。作者所领导的课题组的各位同志和研究生蔡辉、蒋诚、陆军、石惠娴、赵雪峰、段晓宁、杨志行、刘巍、王强、王光培、武茂松等对本书付出了辛勤劳动,在此向他们表示感谢!在这个意义上讲,本书也是作者所领导的课题组集体的劳动成果。

本书前言、第3章至第5章、第7章至第9章由周云龙教授撰写,第1章和第10章由洪文鹏副教授撰写,第2章和第6章由孙斌副教授撰写。全书由周云龙教授统稿。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和不足,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多相流体定义及其分类	1
1.1.1 多相流体的定义	1
1.1.2 多相流体的分类	2
1.2 多相流体力学的发展及其工程应用	3
1.2.1 多相流体力学的发展历程	3
1.2.2 多相流体力学在现代化工程中的应用	6
1.3 多相流体力学基础理论的国内外研究现状与进展	9
1.3.1 油气水三相流动	9
1.3.2 气液两相流动	13
1.3.3 油水两相流动	15
1.3.4 气液两相流流型智能识别	19
1.3.5 高压汽液两相流动不稳定	21
1.3.6 液固两相流浆体水击	24
1.3.7 气液两相绕流特性	26
1.4 多相流体力学研究展望	29
参考文献	31
第 2 章 管内油气水三相流动的基本参数和基本方程	39
2.1 管内油气水三相流动的基本参数	39
2.2 管内油气水三相流动的基本方程	44
2.2.1 连续性方程	45
2.2.2 动量方程	45
2.3 双流体模型中液相物性参数的计算方法	46
参考文献	47
第 3 章 油气水三相流动特性研究	48
3.1 水平管内油气水三相流流型特性研究	48
3.1.1 概述	48
3.1.2 流型的识别方法	49
3.1.3 流型图	51
3.1.4 小结	52

3.2	水平管内油气水三相间歇流—环状流转换的研究	53
3.2.1	理论模型	53
3.2.2	实验结果	55
3.2.3	小结	56
3.3	水平管内油气水三相泡状流—弹状流转换的研究	56
3.3.1	理论模型	56
3.3.2	实验结果	57
3.3.3	小结	59
3.4	水平管内油气水三相流动摩擦阻力压降特性研究	59
3.4.1	理论模型及分析	59
3.4.2	泡状流摩擦阻力降	60
3.4.3	环状流摩擦阻力压力降	62
3.4.4	小结	64
3.5	水平管内油气水三相环状流截面含气率的研究	64
3.5.1	理论模型	64
3.5.2	实验结果及讨论	65
3.5.3	小结	67
3.6	水平管内油气水三相分层流截面含气率的研究	67
3.6.1	理论模型	67
3.6.2	实验结果	69
3.6.3	小结	70
3.7	倾斜下降管内油气水三相流型及其转变特性研究	70
3.7.1	用时域压差波动信号区分流型	70
3.7.2	用压差波动的频域信号鉴别流型	72
3.7.3	流型图	75
3.7.4	流型转换界限	82
3.7.5	小结	83
3.8	倾斜下降管内油气水三相流截面含气率的计算	83
3.8.1	泡状流截面含气率的计算	83
3.8.2	分层流截面含气率的计算	84
3.8.3	环状流截面含气率的计算	88
3.8.4	小结	90
3.9	倾斜下降管内油气水三相流的摩擦阻力压降特性的研究	91
3.9.1	泡状流摩擦阻力压降	91
3.9.2	间歇流摩擦阻力压降	93
3.9.3	环状流摩擦阻力压降	94

3.9.4 小结	95
参考文献	95
第4章 气液两相流动特性研究	98
4.1 水平管中气液两相流的流动特性研究	98
4.1.1 水-空气双组分两相流流型图的绘制	98
4.1.2 流型转换边界的研究	99
4.1.3 环状流型下两相摩阻压降梯度计算方法的研究	99
4.1.4 小结	100
4.2 倾斜下降管内气液两相流动特性研究	100
4.2.1 两相流流型测量	101
4.2.2 两相流流型及其转变特性	103
4.2.3 两相流摩擦阻力特性	104
4.2.4 小结	108
4.3 螺旋管内气液两相流型及其转变特性研究	108
4.3.1 两相流流型测量	109
4.3.2 两相流流型图及分析	111
4.3.3 流型转换的理论分析和转换准则关系式	113
4.3.4 小结	114
4.4 螺旋管内气液两相流截面含气率试验研究和理论模型	115
4.4.1 截面含气率的试验结果及分析	115
4.4.2 截面含气率的理论模型	117
4.4.3 小结	118
4.5 螺旋管内气液两相摩擦阻力特性研究	119
4.5.1 螺旋管内气液两相摩擦阻力试验结果及分析	119
4.5.2 分流型计算气液两相摩阻压降	121
4.5.3 小结	124
参考文献	124
第5章 水平管内油水两相流动特性研究	126
5.1 流型及其转变特性	126
5.1.1 概述	126
5.1.2 流型的识别	126
5.1.3 流型图及流型转变分析	128
5.1.4 各流型的转变界限	131
5.2 摩擦阻力压降分析	138
5.2.1 概述	138
5.2.2 各流型下的摩擦阻力压降计算	139

5.2.3	钢管和有机玻璃管内摩擦阻力压降的比较	149
5.3	小结	151
	参考文献	152
第6章	气液两相流流型智能识别方法的研究	154
6.1	流型识别的研究概述	154
6.2	小波分析方法在流型特征提取中的应用	155
6.2.1	基于连续小波变换的压差波动信号特征	155
6.2.2	奇异性特征提取	159
6.2.3	流型特征提取的小波包方法	161
6.2.4	小结	164
6.3	混沌理论在流型特征提取中的应用	164
6.3.1	概述	164
6.3.2	混沌的研究方法	164
6.3.3	压差波动信号的混沌特征分析	168
6.3.4	流型特征向量的构造	177
6.3.5	小结	178
6.4	流型的神经网络识别模型	179
6.4.1	BP神经网络模型	179
6.4.2	Elman神经网络模型	187
6.4.3	径向基函数网络模型	190
6.4.4	概率神经网络模型	193
6.4.5	Kohonen神经网络的识别模型	196
6.4.6	小结	200
	参考文献	200
第7章	锅炉蒸发管内流动不稳定性的理论研究	205
7.1	概述	205
7.2	并联管内两相流密度波脉动线性均相模型	206
7.2.1	数学模型建立	206
7.2.2	系统状态空间表达式	208
7.2.3	理论预测与试验结果比较	210
7.2.4	小结	211
7.3	并联蒸发管内两相流密度波型脉动线性分相模型	212
7.3.1	数学模型建立	212
7.3.2	系统状态空间表达式	213
7.3.3	理论结果及其与试验结果的比较	217
7.3.4	小结	219

7.4	并联通道汽液两相流不稳定性的非线性数学模型	219
7.4.1	数学模型	219
7.4.2	模型求解以及与试验结果比较	223
7.4.3	小结	224
7.5	蒸发管内汽液两相流压力降型脉动集总参数非线性分析	224
7.5.1	模型建立	225
7.5.2	方程求解和分析	227
7.5.3	小结	228
	参考文献	229
第8章	锅炉蒸发管内流动不稳定性试验研究	232
8.1	概述	232
8.2	密度波型流量脉动的实验研究	236
8.2.1	密度波型脉动的特征及机理分析	236
8.2.2	各运行参数对密度波型脉动的影响	238
8.2.3	上升流动与下降流动密度波型脉动的比较	246
8.2.4	小结	248
8.3	压力降型脉动的试验研究	248
8.3.1	压力降型脉动特征及机理分析	248
8.3.2	各运行参数对压力降型脉动的影响	249
8.3.3	小结	255
8.4	热力型脉动试验研究	255
8.4.1	热力型脉动的特征和脉动机理	255
8.4.2	各运行参数对热力型脉动的影响	256
8.4.3	小结	256
8.5	起始点脉动试验结果	257
8.5.1	概述	257
8.5.2	起始点脉动特征及脉动机理	257
8.5.3	各运行参数对起始点脉动的影响	258
8.5.4	讨论与文献的比较	262
8.5.5	小结	263
	参考文献	264
第9章	液固两相流浆体水击压强与计算	269
9.1	概述	269
9.2	液固两相流浆体水击压强的计算方法	269
9.2.1	灰水混合物密度的计算	269
9.2.2	单相液体水击压强计算方法	270

9.2.3	液固两相流浆体水击压强的计算	271
9.3	考虑含气量变化液固两相流浆体水击压强计算方法	273
9.3.1	考虑含气量的浆体水击基本方程	273
9.3.2	气液固三相流浆体水击的计算方法	276
9.3.3	考虑气泡的存在对浆体水击波速的影响	278
9.4	工程计算	279
9.4.1	工程概况	279
9.4.2	灰浆回落速度的确定	281
9.4.3	浆体水击压强计算	283
9.4.4	降低浆击压强的措施	284
9.5	基于考虑含气量变化浆体水击模型的复合管道水击数值计算	285
9.5.1	数学模型	285
9.5.2	数值计算方法	287
9.5.3	工程实例	289
9.5.4	小结	292
	参考文献	292
第 10 章	气液两相绕圆柱流特性的研究	294
10.1	概述	294
10.2	气液两相流绕单圆柱流动数值计算模型	295
10.2.1	描述气液两相混物流动的一些基本参数	295
10.2.2	气液两相流绕流模型控制方程	297
10.2.3	气液两相流动的相间作用力	297
10.2.4	气液两相流紊流模型	298
10.2.5	气液两相绕流紊流方程的求解	302
10.2.6	数值计算结构与分析	304
10.2.7	小结	309
10.3	实验装置及实验结果与模拟结果比较	310
10.3.1	油气水三相流通用试验台	310
10.3.2	气液两相流基本参数的测量	311
10.3.3	两相流涡街脱落频率的采集与处理	312
10.3.4	旋涡脱落频率测量值与模拟结果的比较	314
10.3.5	小结	315
10.4	节距比对气液两相绕流管束流场特性的影响	316
10.4.1	节距比对涡量等值线的影响	318
10.4.2	节距比对斯特罗哈数的影响	319
10.4.3	节距比对两相流体作用力的影响	319

目 录

10.4.4	节距比对阻力系数的影响	322
10.4.5	小结	323
10.5	雷诺数和含气率对气液两相绕流管束旋涡脱落特性的影响	323
10.5.1	雷诺数对涡量等值线的影响	324
10.5.2	雷诺数和含气率对两相流体作用力的影响	324
10.5.3	涡街频率模拟结果验证	328
10.5.4	小结	330
	参考文献	330

第 1 章 绪 论

多相流系统广泛存在于化工、石油、能源、冶金、环保和轻工等各个工业领域,而多相流学科是以多相流系统为研究对象,以工程热物理学为基础,与数学、力学、信息、生物、环境、材料、电子计算机等学科相互融合交叉而逐步形成和发展起来的一门新兴交叉学科。随着科学技术的迅速发展,多相流在科学研究、工业生产、环境保护以及人类生活中日益重要,使得多相流研究成为国内外极为关注的前沿学科。

1.1 多相流体定义及其分类

1.1.1 多相流体的定义

在自然界中,物体的形态是多种多样的,最常见的有固态、液态和气态,处于固态的物体称为固体,处于液态的物体称为液体,处于气态的物体称为气体。

相的概念通常是指某一系统中具有相同成分及相同物理、化学性质的均匀物质部分,各相之间有明显可分的界面。因此,各部分均匀的固体、液体和气体分别称为固相物体、液相物体和气相物体,或统称为单相物体。

由于液体和气体具有流动的特性,两者一般统称为流体。因此,各部分均匀的气体或液体的单相物质的流动称为单相流。所谓两相流或多相流,是指同时存在两种或多种不同相的物质流动。例如,气体和液体的混合流动、气体和固体的混合流动、液体和固体的混合流动以及油气水混合流动。

要属于两相或多相流动,必须满足以下两个条件:一是必须存在相的界面;二是相界面必须是运动的。例如,气体在管道内流动,气体是气相,管道是固相,它们也存在相界面,但相界面是不动的,故它们不是两相流;气体和固体颗粒的混合流动也存在相界面,但相界面随固体颗粒的运动而运动,所以这种气体和固体颗粒混合流动是气固两相流。又如,水夹带着气泡在管子中流动,水和每个气泡之间都存在分界面,但是在流动过程中,每个气泡在水中的形状和位置随时在变化,小气泡有时还会合并成较大气泡,因而水和气泡的分界面随着流动是在不断变化的,属于气液两相流。所以,一般可将多相流定义为存在变动分界面的多种独立物质组成的流动。

固体、液体和气体的性质明显不同。固体具有一定的形状和体积;液体没有一定的形状,但有一定的体积且具有流动性;气体总是均匀充满全部容器,其形状和体积是由容器的形状和容积决定的,同时具有流动性。由上述可见,固体是无法与气体或液体混合成均匀的单相流体的,因此固体颗粒和气体或液体的混合流

动均属多相流。各种液体混合在一起,有时可成为一种单相流体,如水与酒精的混合物;有时则不能,例如水与水银的混合。因此,各种液体的混合流动可能是单相流,也可能是多相流。各种气体混合时都能混合均匀,成为一种单相气体,因此各种气体的混合流动均属单相流。

1.1.2 多相流体的分类

多相流根据参与流动各相的数目一般可分为两相流和三相流两类,其中尤以两相流为最常见。两相流可以分为四种:气体和液体一起流动称为气液两相流;气体和固体颗粒一起流动称为气固两相流;液体和固体颗粒一起流动称为液固两相流;两种不能均匀混合的液体一起流动称为液液两相流。三相流可分为三种:气体、液体和固体颗粒一起流动称为气液固三相流;两种不能均匀混合的液体和固体颗粒一起流动称为液液固三相流;石油、天然气和水一起流动称为油气水三相流。当然,也存在气体、多种不能均匀混合的液体和固体颗粒一起流动的工况,这种流动可以根据参与流动各相的数目另行命名。

还可以根据参加流动的各组分对多相流进行分类。以气液两相流为例,可分为单组分汽液两相流和双组分汽液两相流。例如,水蒸气 and 水的组分是相同的,所以汽水混合物的流动属于单组分汽液两相流;空气和水的组分是不同的,所以空气和水混合物的流动属于双组分气液两相流。单组分汽液两相流在流动时根据压强的变化的不同会发生相变,即部分液体能汽化为蒸汽或部分蒸汽凝结为液体;双组分汽液两相流则一般在流动时不会发生相变。

根据换热情况的不同,多相流还可分为与外界无加热或冷却等热量交换过程的绝热多相流和有热量交换的多相流。在有热交换的多相流中,伴随着流动过程常会发生单组分工质的相变(即液体汽化成蒸汽或蒸汽凝结成液体)。

多相流在自然界、工程设备乃至日常生活中都是广泛存在的。自然界中常见的夹着灰粒、尘埃或雨滴的风,夹着泥沙奔流的河水以及湖面或海面上带雾的上升气流等均为多相流的实例。在日常生活中常见的烟雾、啤酒夹着气泡从瓶中注入杯子的流动过程以及沸腾的水壶中水的循环也都属于多相流的范畴。

严格地说,即使在一般认为是单相流体的液体和气体中也往往含有另一相的成分在内。例如,当温度降低时,含于气体中的水蒸气就会凝结,使气体带有微量水分。又如在水流中几乎也总含有少量空气。但是,在这些情况下,由于气体或液体中所含另一相数量微小,所以仍可看作单相流体。

在工程设备中,多相流工况也是经常遇到的。在动力、核能、化工、石油、制冷、冶金等工业中就存在各种气液两相流工况。例如,在核电站、火力发电站中的各种沸腾管、各式气液混合器、气液分离器、各种热交换设备、精馏塔、化学反应设备、各式冷凝器及蒸发器等都广泛存在气液两相流体的流动和传热现象。

气固两相流工况在工程中也是常见的。在动力、水泥、冶金、粮食加工和化工

等工业中广泛应用的管道气力输送就是一种气固两相流。气力输送中应用气体输送的固体颗粒是多种多样的,有煤粉、水泥、矿石、盐类、谷类以及面粉等。虽然气力输送的固体颗粒品种和颗粒尺寸不同,但从本质上看都属于气固两相流的范畴。此外,在采用流化床燃烧的锅炉中,炉膛流化床上空气和燃料颗粒的流动工况以及煤粉锅炉炉膛中的流动工况也都是气固两相流工况。

液固两相流在工程中的典型例子为水力输送。水力输送广泛见用于动力、化工、造纸以及建筑等工业。在这些工业中,用水力沿管道输送的有各种固体颗粒,如烟煤、泥煤、矿料、矿石、盐类等;也有用水和各种细颗粒混合成浆状输送物进行输送的,如水煤浆、纸浆及建筑材料浆等。其他,像火力发电厂锅炉的水力除渣管道中流动的水渣混合物也属液固两相流的范畴。

至于液液两相流,可用化工中的乳浊液流动工况及石油工业中的油水混合物为其工程实例。

在工程中还存在不少三相流的工况。例如,在浆状流体中,除存在固相和液相外,有时还含有气相(空气)。化学工程中采用的各种气液固三相流化床工况中有气体、液体和固体颗粒一起流动。在油田开采出来的原油中,除去原油和天然气外还带有水。这些流体的流动工况都属于三相流的范畴。在油田开采出来的流体中,有时除原油、气体和水外还夹有沙粒,这种流体的流动就属于四相流。

1.2 多相流体力学的发展及其工程应用

1.2.1 多相流体力学的发展历程

多相流体力学是研究多相流体在绝热流动或具有热交换流动时的力学的科学,因而其形成与发展过程和流体力学以及传热学等学科的发展关系密切,并且这些学科的发展都和世界经济与工程技术的进展有着密切的关系^[1]。

以动力工程和核电方面的气液两相流为例,自18世纪瓦特发明蒸汽机以来,动力工程得到了飞速的发展。但在初期,因缺乏气液两相和沸腾传热方面的知识曾发生过不少工业事故。气液两相流和传热学正是在不断总结经验教训、不断进行研究的過程中逐步形成的。

早先一些采用蒸汽锅炉和蒸汽机作为动力的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的水循环和传热问题,有的还论及了气液两相流流动时的流量脉动(流动不稳定性)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。直到20世纪30年代,根据生产发展的需要,气液两相流体的流动和传热研究工作才日益展开,发表的论文也日益增多。

在1930~1940年间发表了一些研究气液两相流体流动不稳定性以及锅炉水

循环中气液两相流动问题的重要文献。在传热方面开展了对大容积沸腾的研究工作,研究参数一般都在中压以下。1940~1950年期间,不仅对双组分气体液两相流的流动阻力进行了研究,而且还将研究工作深入到具有热交换的单组分气液两相流领域,研究参数也逐渐趋向高压。

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参数的应用和宇航工业及商用核电站开始发展,促使气液两相流和传热的研究工作进一步展开。1950~1960年期间,直流锅炉开始采用。在这种锅炉的蒸发管中,进口工质为温度低于沸点的水,出口工质为过热蒸汽,因而其中的流动和换热工况与一般自然循环锅炉蒸发管中蒸汽含量较少的湿蒸汽流动和换热工况大不相同。在直流锅炉蒸汽含量极高的蒸发管段中,当炉膛中的高温火焰在管外对其加热时,会发生传热恶化和管子烧损现象。此外,在核电站中,蒸汽发生器的蒸发管所受到的加热热负荷要比锅炉中的高几倍乃至几十倍。为了避免蒸发管等换热面烧损,也必须深入研究蒸汽含量高以及热负荷高情况下的具有热交换的气液两相流问题。因而,只考虑整根蒸发管中气液两相流的平均特性已不能满足工程发展的需要,必须掌握更详细的气液两相流体的流动结构形式和传热特性知识以推动工业的发展。在此期间,对于气液两相流的流型及传热恶化等问题进行了较为深入的研究,研究参数进入高压、超高压乃至超临界压力。

近40年来,美、英、俄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实际运行压力下进行。对气液两相流的流动和传热机理、流型及其影响因素、流动时相的分布及各种阻力计算、流动时的动态不稳定性及沸腾传热以及强化传热等问题作了广泛的研究和分析,并得出了一系列相应计算式。总结两相流和传热的各种研究成果的专著也大量出版,这标志着气液两相流已发展到一个崭新的阶段。

近20多年来,由于核电站事故的发生,各主要工业国对与核电站安全问题密切相关的核反应堆的热力、水力状况进行了大量研究工作,在此基础上编写了不少计算机程序以预测和监控核反应堆正常运行和发生事故时的热力和水力工况。

在石油工业方面,自20世纪30年代开始采用注入高压湿蒸汽开采稠油以来,这种方法已成为开采稠油和提高采油率的一种主要热力采油方法。各国对注汽井中注入的高压汽水混合物沿井深流动时的压力、温度、蒸汽干度和流量的变化规律及在储油地层中的流动工况都进行了广泛的研究。特别在近30年来,当石油、天然气生产逐步由陆地向沙漠及海洋扩展,油井中采出的原油、气体和水的多相混合物的长距离可靠输送和分离等一系列多相流问题逐渐成为研究热点,并取得了一系列成果。此外,多相流泵的机理研究和开发,大量深层油气储量的开采技术,以及提高已开采油田采收率的措施等均与多相流体力学有关,并已成为近年来的研究重点。

在多种工业中得到广泛应用的多相流化床系统也是多相流体力学的一个重要应用实例。这种流化床系统首先在20世纪20年代能源工程中用于将煤直接液

化成液体燃料。在此系统中,煤粉与油浆在高温高压下与氢反应。在第二次世界大战中,德国应用此方法生产机动车燃料油和航空汽油。第二次世界大战后,从煤中直接生产液体燃料的方法因石油产量增多而逐渐停用。

1950年后,气液固三相流化床系统用于有机化学或聚烯烃反应过程,其工业应用包括生产山梨醇、丁二醇、乙烯聚合等。1968年,三相流化反应器首次在美国用于渣油加氢和固体催化剂以生产轻质油。1973年后,由于能源危机,国际上重新对合成燃料发生兴趣。在美国开发了多台较大容量的将煤直接液化为液体燃料的三相流化床装置。1980年后,这种生产装置因原油价格降低而再次停用。但在进入21世纪后,由于油气资源紧缺,在国际上,特别是以煤为主要能源的国家中,以煤生产液体燃料的工程装置有进一步更新发展的趋势。

能源危机促进了煤的应用范围的扩大,同时为了减少污染、改善环境,燃煤产生的烟气的净化系统得到了研究和开发。其中,烟气湿净化系统就是一种三相流化床系统。此外,三相流化床系统还用于生物化学技术,包括废水处理和发酵等方面。

由于三相流化床系统的广泛工业用途,近几十年来对三相流化床系统中气液固三相流体的流型、压力降计算,三相组分或流量的计算,三相流体的流动不稳定性以及三相流体的传热、传质过程都进行了一系列研究,取得了一定成果,并随着三相流化床工程应用范围的扩展,逐渐成为多相流体力学中的研究热点。

在动力工程中,多相流化床主要用于锅炉的流化床燃烧。在这种锅炉中,空气经布风板均匀进入炉膛下部并向上流动。作为燃料的煤从进料口进入后,一面燃烧一面被上升空气流吹得上下翻滚,如沸水运动,所以也称为沸腾燃烧。这种流动实质上是一种有化学反应的气固两相流动。近30年来,由于这种燃烧方式可燃用劣质煤,可减少燃烧产生的烟气中氧化氮的含量,有利于环保,因而对其流动和传热过程进行了一系列研究,促进了气固两相流体力学的发展。

在叶轮机械方面,对于夹带固体颗粒的气体流过各种气固两相风机(例如锅炉引风机、排粉机等)系统的叶片和弯道时的气固两相流特性以及气固两相流对材料磨损特性的影响等方面进行了研究。此外,还对于火电站和核电站大型汽轮机中湿蒸汽两相流的流动特点,湿蒸汽中高速水滴对汽轮机末尾几级长叶片的撞击力学过程,以及叶片材料破坏机理进行了研究。研究成果对改进气固两相风机和蒸汽轮机的设计和运行都发挥了作用。

在其他工业领域中,对多相流和传热的研究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试验的方向努力。对于管束中的流动结构形式和流动阻力的研究也在增多,以适应废热锅炉、重沸器、列管式蒸发器以及其他热交换设备发展的需要。

综上所述,可见多相流体力学的进展与工业的发展是密切相关的。工业发展不断向多相流体力学的研究提出新课题,而多相流体力学研究工作的进展又进一步促进了工业的发展。