



能源动力中多相流热物理 基础理论与技术研究

林宗虎 郭烈锦 陈昕宽 徐通模 李海青 杨瑞昌 等 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn





能源动力中多相流热物理 基础理论与技术研究

林宗虎 郭烈锦 陈昕宽 徐通模 李海青 杨瑞昌 等 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书反映了国家自然科学基金重大项目“能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究”的主要研究成果。全书分五篇,分别论述了多相流界面与颗粒动力学及能质传输机理、汽液两相流与传热、高温气固两相流理论与技术、油气混输管路中的多相流动特性及流量测量以及多相流检测技术等内容。可供高等院校、科研院所和企业有关火电、核电、石油、化工等专业的师生、研究员和工程技术人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究/林宗虎等著. —北京:中国电力出版社, 2010.5

ISBN 978-7-5083-8708-6

I. 能… II. 林… III. 能源-动力工程-多相流体力学-热学-研究 IV. TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 055138 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 6 月第一版 2010 年 6 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 83.25 印张 2113 千字
印数 0001—2000 册 定价 280.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

Preface

随着我国经济的快速发展,能源动力供应和环保问题已逐渐成为制约我国经济持续发展的重要因素。我国发电总装机容量到 2010 年底预计将达 9 亿 kW,其中主要为火电。与国外发达国家相比,我国火电的主要问题是能耗高、污染大。由于我国火电机组中高效率、低能耗的高参数大容量火电机组相对较少,因而使我国火电煤耗比国际水平高很多。这样,不仅造成煤炭等资源的大量浪费,而且使环境受到严重污染。

为此,我国中长期科学与技术发展规划纲要(2006~2020)提出要优先发展煤炭清洁高效发电技术。其中包括要积极推广 300MW 等级大型循环流化床锅炉的应用,实施 600MW 等级大型循环流化床锅炉的示范工程、加快本土化步伐,要加快发展 600MW 及以上的超临界和超超临界机组,要优先发展大型油气田的勘探开发利用和要实现先进压水堆核电工程的设计、制造和建设的自主化等。这些能源动力工程中均含有一系列多相流热物理关键技术,要实现这些工程必须先对这些关键技术进行研究和解决。

在 20 世纪 90 年代后期,西安交通大学联合清华大学、东南大学、中科院工程热物理研究所和浙江大学,向国家自然科学基金委员会申报了题为“能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究”的自然科学基金重大项目并在 1998 年得到批准(批准号:59995460)。该项目由中国工程院院士、西安交通大学林宗虎教授主持,分下列五个子课题开展研究工作:①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(由清华大学杨瑞昌教授负责);②非线性多相流相界面动力学及能质传输机理与数理模型(由西安交通大学郭烈锦教授负责);③高温高压热负荷汽液两相流与安全传热规律的研究(由西安交通大学陈听宽教授负责);④高温气固两相流理论与技术研究(由中科院工程热物理研究所徐建中院士负责,西安交通大学徐通模教授和东南大学徐益谦教授参与);

⑤气液混输中的多组分多相流理论及测试技术研究（由西安交通大学林宗虎院士负责，浙江大学李海青教授参与）。

经课题组全体研究人员近五年的努力研究，获得了一系列创新研究成果。该项目全面超额完成了预定研究计划，总体上达到国际先进水平并获得了优等验收评价，不少成果将在新一代压水堆核电站和大型超临界火电机组等设计中得到应用。有关油气混输管路流动特性的研究成果，可供我国油气储运系统和油气混输管路设计时参考，所研制的多相流测量技术和仪表已在油田中得到应用。

这本著作反映了这项研究工作的主要成果。全书共由五篇组成，第一篇为多相流相界面与颗粒动力学及能质传输机理研究（作者为西安交通大学郭烈锦等），第二篇为汽液两相流与传热研究（作者为西安交通大学陈听宽、清华大学杨瑞昌等），第三篇为高温气固两相流理论与技术研究（作者为西安交通大学徐通模等），第四篇为油气混输管路中的多相流特性及流量测量研究（作者为西安交通大学林宗虎等），第五篇为多相流检测技术研究（作者为浙江大学李海青、西安交通大学郭烈锦等）。

希望本书的出版能对我国能源和动力工程的发展以及多相流体力学学术水平的提高有所裨益。与此同时，作者对国家自然科学基金会对此研究项目的资助和大力支持深表谢意。

由于本书作者较多，水平所限，疏漏之处在所难免，尚请读者批评指正。

作 者

2009年10月于西安

目 录

Contents

前言

第一篇 多相流相界面与颗粒动力学及能质传输机理研究

第一章 气液两相分层流界面不稳定性与界面波运动	3
第一节 前言.....	3
第二节 界面波稳定性的理论分析	11
第三节 管内气液两相流界面波的实验研究	22
第四节 界面波波形转变及其应用	35
第五节 结论	41
参考文献	42
第二章 气液两相流压力波及其传播特性研究	50
第一节 前言	50
第二节 气液两相流压力波数学模型与数值模拟	57
第三节 气液两相流压力波的实验研究	70
第四节 结论	92
参考文献	93
第三章 气液段塞流气弹区界面结构特性研究	97
第一节 前言	97
第二节 单气泡实验方法	98
第三节 单气泡实验结果分析	99
第四节 气弹区界面结构数理模型.....	106
第五节 气弹区界面结构的计算及其讨论.....	110
第六节 结论.....	119
参考文献.....	120
第四章 颗粒悬浮体多相流及其相分离现象研究	128
第一节 前言.....	128
第二节 悬浮体多相流的物理模型、数值方法和程序设计.....	143
第三节 组合弯管液固/气液固多相流实验研究	154
第四节 弯管液固两相流及相分离的数值模拟研究.....	165
第五节 布袋除尘器内气固两相流及数值模拟与袋室优化设计.....	182

第六节 结论	191
参考文献	193
第五章 管束间气液两相流动特性研究	200
第一节 前言	200
第二节 管束间单相流场的实验研究和数值模拟	206
第三节 管束间气液两相流场与气泡运动数值模拟	235
第四节 结论	251
参考文献	253
第六章 下降液膜的流动与换热特性研究	256
第一节 前言	256
第二节 具有运动边界流动与换热问题的数值模拟方法	263
第三节 下降液膜流动与换热特性的数值模拟	274
第四节 液膜厚度测量的实验研究	287
第五节 结论	290
参考文献	291

第二篇 汽液两相流与传热研究

主要符号、主要角标	302
第一章 自然循环过冷沸腾流动与传热研究	303
第一节 自然循环过冷沸腾净蒸汽产生点	303
第二节 自然循环过冷沸腾空泡率	311
第三节 自然循环过冷沸腾临界热流密度	329
第四节 自然循环过冷沸腾流动不稳定性	334
参考文献	345
第二章 核电站小破口失水事故瞬态特性研究	348
第一节 小破口失水事故概述	348
第二节 小破口失水事故试验系统动态特性研究	351
第三节 两相临界流试验研究	359
第四节 冷凝回流试验研究	370
参考文献	380
第三章 反应堆压力容器安注热冲击瞬态传热研究	381
第一节 安注过程传热特性试验研究	381
第二节 安注过程混合特性试验研究	389
第三节 高温高压安注过程瞬态传热试验研究	397
第四节 安注过程三维数值模拟研究	410
参考文献	417
第四章 研究堆冷中子源热虹吸循环系统特性研究	418
第一节 研究堆冷中子源装置	418

第二节	冷中子源两相氢热虹吸循环系统模拟试验研究	424
第三节	两相热虹吸系统流动极限试验研究	434
第四节	冷包内沸腾含气率研究	437
第五节	闭式两相热虹吸回路的自调节性分析	442
	参考文献	448
第五章	300MW 亚临界 UP 型直流锅炉水冷壁爆漏研究	449
第一节	300MW 亚临界 UP 型直流锅炉	449
第二节	水冷壁管传热与阻力特性试验研究	452
第三节	水冷壁管热敏感性研究	466
第四节	水冷壁水动力特性计算研究	471
第五节	低质量流速水冷壁水动力特性分析	486
	参考文献	490
第六章	亚临界控制循环与自然循环汽包锅炉启动过程的模拟与优化	492
第一节	锅炉与启动系统	492
第二节	汽包锅炉启动过程的数学模拟	502
第三节	控制循环与自然循环汽包锅炉启动过程计算程序	517
第四节	汽包锅炉启动过程计算程序的计算与试验	523
第五节	锅炉启动过程中汽包应力及寿命分析	530
第六节	锅炉启动过程优化	539
	参考文献	547
 第三篇 高温气固两相流理论与技术研究 		
第一章	绪论	551
第一节	气固两相流动概述	551
第二节	连续相介质(气体)的基本属性	551
第三节	颗粒的基本属性	556
	参考文献	572
第二章	气固两相流的测量与实验研究	573
第一节	应用压差法测量气固两相流浓度	573
第二节	应用电容层析成像法测量气固两相浓度分布	579
第三节	平直管道内固体粒子扩散的实验研究	584
第四节	弯管内气固两相流动及沉积规律	587
	参考文献	596
第三章	循环流化床锅炉中的流动与传热	598
第一节	概述	598
第二节	循环流化床锅炉的炉内传热	601
第三节	循环流化床锅炉排渣技术	607
第四节	循环流化床的高温分离技术	613

参考文献	625
第四章 煤粉燃烧特性与燃烧新技术	627
第一节 煤粉燃烧的基本规律	627
第二节 四墙切圆燃烧炉内热力特性参数	640
第三节 旋流对冲燃烧炉内热力特性参数	653
第四节 旋流对冲燃烧新技术	677
参考文献	685
第五章 高温气固两相流数值模拟与计算方法	687
第一节 用谱方法数值模拟槽道内的气固两相流动	687
第二节 拟涡位移模型及气粒两相流动数值模拟	690
第三节 流化床中颗粒流化运动的直接数值模拟	694
第四节 四墙切圆燃烧炉内空气动力场数值模拟	700
第五节 旋流对冲燃烧炉内高温气固两相流数值模拟	707
参考文献	726
第四篇 油气混输管路中的多相流特性及流量测量研究	
第一章 管内油水两相流动特性研究	731
第一节 管内油水两相流研究进展	731
第二节 管内油水两相流基本流动参数	732
第三节 管内油水两相流的流型及其转变特性研究	734
第四节 管内油水两相流的理论模型研究	744
第五节 管内油水两相流摩擦阻力压力降研究	751
参考文献	760
第二章 管内油气两相流动特性研究	763
第一节 管内油气两相流研究进展	763
第二节 管内油气两相流的流型及其转变特性研究	765
第三节 管内油气两相流的截面含气率研究	788
第四节 管内油气两相流的摩擦压力降研究	793
第五节 管内油气两相段塞流的流动特性研究	798
参考文献	804
第三章 管内油气水三相流流动特性研究	809
第一节 管内油气水三相流研究进展	809
第二节 管内油气水三相流的流型及其转变特性研究	811
第三节 管内油气水三相流摩擦压力降研究	826
第四节 管内油气水三相流的段塞流流动特性研究	837
第五节 管内油—气—水三相流的段塞流理论预测模型研究	867
参考文献	881

第四章 管内各相流量增减及通球清管过程中的混合物瞬态流动特性研究	887
第一节 管内各相流量增减过程中的混合物瞬态流动特性研究进展.....	887
第二节 管内各相流量变化时的两相混合物瞬态流动特性试验研究.....	889
第三节 管内流量变化时的两相混合物瞬态流动特性的数值模拟研究.....	908
第四节 通球清管过程中的混合物瞬态流动特性研究进展.....	927
第五节 通球清管时管内瞬态过程的试验研究.....	929
第六节 通球清管时管内瞬态过程的数值模拟研究.....	932
参考文献.....	937
第五章 管路终端捕集器装置中的多相流计算	940
第一节 捕集装置的研究进展.....	940
第二节 段塞捕集器的类型及结构.....	941
第三节 管式段塞捕集器设计计算.....	946
第四节 容积式段塞捕集器设计计算.....	952
参考文献.....	958
第六章 管内多相流量测量技术研究	960
第一节 管内多相流量测量技术研究进展.....	960
第二节 分流分相式两相流量测量理论的建立.....	964
第三节 分流分相式两相流量计的工作原理和测量精度.....	967
第四节 其他多相流量测量技术的研究成果.....	988
参考文献.....	996

第五篇 多相流检测技术研究

第一章 概述	1001
第一节 多相流系统特点及参数	1001
第二节 多相流测量技术的发展现状和趋势	1002
参考文献	1004
第二章 参数波动的统计分析与非线性处理技术	1005
第一节 波动参数的小波及分形与混沌分析	1005
第二节 高阶统计量	1027
第三节 Hilbert-Huang 变换	1034
第四节 神经网络与模糊信息处理	1039
参考文献	1048
第三章 过程层析成像技术	1052
第一节 过程层析成像原理	1052
第二节 过程层析成像系统的构成与分类	1056
第三节 逆问题	1062
第四节 过程层析成像图像重建算法	1066
第五节 电容层析成像与电阻层析成像系统	1078

参考文献	1092
第四章 参数波动的混沌特性与多相流流型在线自动识别和可视化	1098
第一节 管内气液两相流压力压差波动的统计分析	1098
第二节 管内气液两相流压力、压差波动的混沌特性	1116
第三节 基于压力、压差信号的气液两相与多相流流型在线自动识别	1124
第四节 基于高阶统计量的流型辨识方法	1146
第五节 基于 Hilbert-Huang 交换的流型辨识方法	1156
第六节 基于过程层析成像技术的流型辨识方法及其流型可视化	1165
参考文献	1169
第五章 分相含率的在线测量	1172
第一节 两相与多相流分相含率在线测量	1172
第二节 气液固三相流固粒浓度与粒度的测量	1202
第三节 基于层析成像技术的气液两相流空隙率测量	1212
参考文献	1218
第六章 流量测量	1220
第一节 两相流流量测量	1220
第二节 三相流流量测量	1229
参考文献	1235
第七章 气液两相流界面波的测量与分析	1237
第一节 气液两相流界面波测量方法及理论	1237
第二节 双平行电导探针测量界面波的理论与实践	1239
第三节 实验装置和系统	1245
第四节 界面波特性的数据处理方法	1250
第五节 界面波随机信号的特性研究与分析	1254
参考文献	1292
第八章 气液两相流声效应与声扰动测量	1299
第一节 受激辐射声放大与“声激光”效应	1299
第二节 气液两相流泡状流特征参数的声测量	1307
参考文献	1317

第一篇

多相流相界面与颗粒动力学 及能质传输机理研究



作者：郭烈锦 陈 斌 高 晖 顾汉洋 李广军
王秋旺 黄 飞 等

第一章 气液两相分层流界面不稳定性与界面波运动

第一节 前言

一、波动的描述与界面波^[1,38,33,17,100,155,164~167]

波动是深入到工业生产、社会生活和尖端技术各个领域最广泛的科学论题之一，其特点之一就是人们可以在任何技术水平上来研究它。但什么是波，至今尚无一个能包括所有波动的精确定义，现有的各种定义均有其各自的局限性。概括地说，波是以可识别的传播速度从介质的一部分传到另一部分的任何可识别的信号，它可以是扰动的任何特征，只要能够清楚地认识并且能够准确地确定它在任何时间所处的位置；它可以畸变，其大小、速度均可改变，只要它仍是可识别的。

由于波的复杂性和在不同领域里不同的表现形式，波的分类和名称变得五花八门，惠瑟姆从波的数学描写角度区别了两类主要的波，具有一定的代表性。

第一类波称为双曲波，在数学上是用双曲型偏微分方程来表示的，其原型是波动方程

$$\varphi_a = c_0^2 \Delta^2 \varphi \quad (1-1-1)$$

可见，双曲波有一个精确的定义，它只依赖于方程的类型，而与其是否能求得显式解无关。

第二类波称为色散波，其特征不易确定。它起源于线性色散问题的描述。色散波的定义是根据解的类型，而非方程类型确定的。线性色散系统是指具有

$$\varphi = a \cos(Kx - \omega t) \quad (1-1-2)$$

这种形式的解的任何系统，其中角频率 ω 是波数 K 的一个确定实函数，相速度为 $\omega(K)/K$ ，如果这个相速度不是常数而是依赖 K 的，即 $\omega''(K) \neq 0$ ，则称这种波为色散波。

值得说明的是这两类波并非互不相容，有些波可同时具有这两类波的特性。还有一些波动，它们不属于这两类波的任一类。

这里所研究的波，指的是存在于气液两相分离流(分层流或环状流)中两相界面上的波动，亦即是存在于两种不同密度流体界面上的波，它属于色散波的范畴，其相速度 ($c = \omega(K)/K$)，一般要受到流量、压力、温度和实验段几何形状等因素的影响。

气液两相流与传热是 20 世纪 50 年代产生、近 50 年发展起来的一门新兴学科分支，在动力、化工、能源、制冷、石油、冶金等工业中均有广泛应用。在气液两相流领域，有许多问题有待于深入研究，其中界面波就是这样的一个方面。

气液两相流中界面波的存在，使得两相流的传热、传质及阻力特性发生很大的变化，因此对气液两相流界面波理论和实验的研究有着重要意义，具体表现在以下几个方面：

首先，严格地说，气液两相流是一种三维黏性流动，对其精确求解目前还存在很大的困难，常用的方法是利用简化模型对两相流进行研究（如均相流模型、分相流模型、漂移流模型和双流体模型）。但即使对于最简单的分层流或环状流，也由于气液两相界面的复杂性而

使方程的封闭发生困难，不得不依赖由实验数据得到的经验公式来封闭方程组，这就给计算结果带来很大局限性。因此，开展针对气液两相流界面波动特性的研究对于建立封闭的两相流控制方程组，对气液两相流体力学的数学理论化和系统化具有重大意义，也是计算两相流体力学进一步发展的基础或前提。

其次，气液两相流的流型和阻力特性对于工业生产设备的设计和运行可靠性有重要作用，而界面波的形成和发展与流型及阻力变化密切相关；在核反应堆失水事故和化工生产的降膜蒸发和汽提过程中，液泛现象对安全生产至关重要，而液泛的产生与气液界面大尺度扰动波的产生、运动、发展有着必然联系。对界面波的研究，可为解决这些难题提供具体的理论指导。

另外，在长距离油气水输运过程中，气液界面波动的存在，有可能引起管道及设备的振动，造成疲劳和损坏，影响安全生产；同时，在沸腾蒸发过程中，气液两相界面上的波动对于蒸发过程液膜的稳定性及能量的传输方式有很大的影响（如临界热负荷、烧干点等），因此，研究气液两相界面波动的规律对工业生产设备的安全可靠性和具有重要意义。

二、气液两相流界面波的国内外研究进展^[17,33,155]

气液两相流界面波的研究始于 20 世纪 50 年代，近年来经过各国学者的共同努力，已取得较大进展，但由于气液两相流动的复杂性和随机性，以及界面波变化的快速性，要较准确地测量界面波各个参数的瞬态特性，就要求界面波的测试系统精度高、响应快，这给界面波的深入研究带来较大困难。已有的研究仅局限于某些方面，本节通过对大量文献的分析综合，从以下几个方面进行概括总结。

（一）界面波的实验研究

表 1-1-1 从著者、实验段结构（管形）、测量方法、主要研究内容及主要结论、实验用工质及参数范围五个方面对界面波的实验研究现状进行概述。

表 1-1-1 界面波实验研究概况

作者年代	管形	测量方法	主要研究内容及主要结论	工质参数测量范围
Hanratty & Engen (1957) ^[31]	水平方管 25.4mm × 304.8mm	电导法	滚动波的产生	水—空气
Hanratty & Hershman (1961) ^[32]	水平方管 25.4mm × 304.8mm	电导法	研究黏性对滚动波形成的影响，黏性增大使滚动波的气速增大，给液体增添活性剂只影响滚动波的大小	水—甘油 空气 Re_g : 12 200~19 600 Re_l : 27~562 $\mu=0.035\sim0.06\text{Pa}\cdot\text{s}$ $\sigma=35\sim75\text{N/cm}$
Cohen & Hanratty (1965) ^[34]	水平方管 25.4mm × 304.8mm $L=6400\text{mm}$	电导法	界面波的产生及界面波理论的适用性 主要结论：入口扰动对波的产生没有多大影响；液体黏度越大，二维波越稳定	水—甘油 空气 Re_l : 87~247 Re_g : 5030~14 700
Miya et al (1971) ^[36]	水平方管 25.4mm × 304.8mm	双平行电导探针 $d=0.075\text{mm}$ $I=2.54\text{mm}$ 热膜探针： $0.1\text{mm}\times0.1\text{mm}$	界面滚动波的产生及壁面应力的变化 主要结论：随液膜厚度增大，壁面应力增大，在滚动波的前面有一个壁面应力突然减小的区域	水—空气 水：1.8~6.8g/s 气：0~9m/s

续表

作者年代	管形	测量方法	主要研究内容及主要结论	工质参数测量范围
Watanabe et al (1993) ^[36]	立式螺旋管螺旋直径 1000、500mm, 内径 25mm	嵌入式电导探针	环状液膜厚度特性 主要结论: 螺旋管内外侧液膜类型有很大不同, 且内外侧液膜厚度也不相同, 螺旋直径对界面波没有影响	水—空气 j_R : 20~53m/s j_L : 0.015~0.11m/s p : 0.11~0.13MPa
Bruno & McCready (1988) ^[37]	水平方管 25.4mm × 304.8mm $L=8500\text{mm}$	双平行电导探针 $d=0.127\text{mm}$ $I=2\text{mm}$	滚动波的产生 主要结论: 当 $Re_L > 200$ 时, 滚动波是由长波发展而来的; $Re_L < 100$ 时, 滚动波是由石油破碎的孤波发展而来的	水—空气 Re_R : 7500~25 200 Re_L : 61~740
Andritsos & Hanratty (1979) (1989) ^[38,39]	水平圆管 $\phi 25.2 \times 15500\text{mm}$ $\phi 95.3 \times 24 600\text{mm}$	双平行电导探针 测量液膜厚度	界面波的产生 主要结论: 区别出各种黏度条件下的界面波类型, 当 μ 在 0.001~0.014Pa·s 之间时, 增大黏度, 出现 2D 波的气速增大; $\mu > 0.016\text{Pa} \cdot \text{s}$ 时, 2D 波基本不存在	空气, 水—甘油 j_R : 0.5~60m/s j_L : 0.001~0.5m/s
Hagiwara et al (1989) ^[40]	水平圆管 $D=49.4\text{mm}$ $L=5930\text{mm}$	液膜厚度由电导探针测量, 壁面应力利用热膜测量, 气体扰动用丝线测量	界面波对气相和壁面应力的影响 主要结论: ①气相速度分布光滑, 类似单相流; ②在以波速为基准的坐标内, 气流是旋转的; ③大波通过时, 壁面应力增大; ④大波区域, 气流与界面有分离	水—空气 j_R : 0~14m/s j_L : 0.006 1~0.1m/s
Asali & Hanratty (1993) ^[41]	垂直圆管 $D=42\text{mm}$ $L=9000\text{mm}$	高速摄影法 电导法	液膜表面毛细波的成长	空气, 水和水—甘油 j_R : 20~60m/s Re_L : 78 100~168 000
Kang & Kim (1992) ^[42]	水平和近垂直方管 150mm×52mm $L=1700\text{mm}$	电导法 一极为 75mm×150mm 的铜板, 另一极直径为 0.075mm 的铂丝	气液两相流三维界面波结构及界面面积 主要结论: 界面面积随 j_L 、 j_R 增大而增大。垂直管中, 其主要受液相流量的影响, 但绝对增加量很小, 界面波的产生使得界面面积的增加对传热传质的影响可以忽略不计	水—空气 水: 0.44~1.1kg/(m·s) j_R : 0~12m/s
Kang & Kim (1993) ^[43]	水平和近垂直方管 150mm×52mm $L=1700\text{mm}$	电导法 一极为 75mm×150mm 的铜板, 另一极直径为 0.075mm 的铂丝	界面波产生对界面剪切应力的影响 主要结论: 界面应力不仅与波的振幅有关, 而且与波和界面的相对速度有关	水—空气 水: 0.44~1.1kg/(m·s) j_R : 0~12m/s
Fukano et al (1985) ^[44]	水平方管 10mm×40mm $L=4700\text{mm}$ 10mm×80mm $L=7100\text{mm}$ 40mm×40mm $L=7600\text{mm}$	电导法	气液两相流液膜破裂特性 主要结论: ① $j_R < 12\text{m/s}$ 时, 薄液膜上产生一种黏性液, 其波速比界面液体速度小; ② $j_R > 12\text{m/s}$ 时, 产生大的扰动波, 当液体流量很小时, 截面由于存在大振幅波而使液膜不会出现破裂现象	水—空气 j_R : 0~50m/s j_L : 0.006~0.4m/s



续表

作者年代	管形	测量方法	主要研究内容及主要结论	工质参数测量范围
Sangulli et al (1992) ^[45]	水平方管 25.7mm ×304.8mm L=9000	双平行电导探针 测量液膜高度	界面波的转变和发展, 认为界面二维波首先经历一个指数增长的区域, 然后再经历一个线性增长区而长大	空气 水—甘油分层流
Akai et al (1980) ^[46]	水平方管 48mm× 18mm L=16 000mm	接触探针	气液两相流的界面波特征 主要结论: 给出了两相流的波形图, 实验表明在波动区域气相最大速度平面随气相速度增大, 向上壁面移动, 而界面区域则呈现出紊流流体通过粗糙表面的特征	空气—汞 分层流范围 $Re_l: 0 \sim 10^4$ $Re_g: 3 \times 10^4$
Jurman & Mc-Cready (1989) ^[47] Peng et al (1991) ^[48] Jurman et al (1989) ^[49]	水平方管 300mm ×25.4mm L=9000mm	双平行电导探针 $d=0.13\text{mm}$ $I=2\text{mm}$ 高速动态分析仪	界面孤波的产生 主要结论: 给出了各种黏度条件下的波形图。指出一般情况下, 波频率 f_w 在 10Hz 左右, 界面上的孤波是从界面上具有较大振幅及厚度比值的波发展而来的	空气 水—甘油 $Re_g: 9850 \sim 19\ 140$ $\mu: 0.0088 \sim 0.030\text{Pa} \cdot \text{s}$ $Re_l: 0 \sim 100$
Shi & Kocamusta-faogullari (1994) ^[50]	水平圆管 $D=50.3\text{mm}$ L=15 400mm	双平行电导探针 $d=0.25\text{mm}$ $I=3.5\text{mm}$	界面波参数变化规律的研究, 系统研究了界面液膜高度、波速、波长以及界面剪切应力的变化规律	水—空气 $j_g: 0.85 \sim 31.67\text{m/s}$ $j_l: 0.014 \sim 0.127\text{m/s}$
Taylor et al (1963) (1968) ^[51,52]	垂直管 $D=31.75\text{mm}$ L=6706mm	高速摄影法 电导法	气液两相向上环状流中大扰动波的运动及频率特性 主要结论: 波速随气液流量的增大而增大, 波的频率对气相速度的变化不敏感, 而与液相流量成正比	水—空气 气: 300lb/h 水: 210lb/h
Nedderman & Shearer (1963) ^[53]	垂直圆管 $D=31.75\text{mm}$ L=6096mm	高速摄影法	垂直管内向上流动过程中界面大扰动波的运动和频率特性 主要结论: 频率与 Taylor et al (1963) 结果相差较大, 但界面波速度则相差无几	空气—水 $Re_g: 3300 \sim 180\ 000$ $Re_l: 0 \sim 1500$
Chu & Dukler (1974, 1975) ^[54,55]	垂直管 $D=50.8\text{mm}$ L=4270mm	双平行电导探针	垂直向下流动中界面波的波动结构, 对界面进行了分类研究	空气—水 $Re_l=7560$ $Re_g=113\ 600$
Nencini & Andreusi (1982) ^[56]	垂直管 $D=24\text{mm}$	双平行电导探针 $d=0.06\text{mm}$ $I=3\text{mm}$	垂直向下气液两相流流动过程中的大扰动波特性	空气—水 $j_g: 28\text{m/s}$ $Re_l: 875 \sim 3500$
Karapantsios et al (1989) ^[58]	垂直管 $D=50\text{mm}$ L=2800mm	双平行电导探针 $d=0.5\text{mm}$ $I=2\text{mm}$	垂直自由下降液膜界面波特性	水 $Re_l: 509 \sim 13\ 090$

