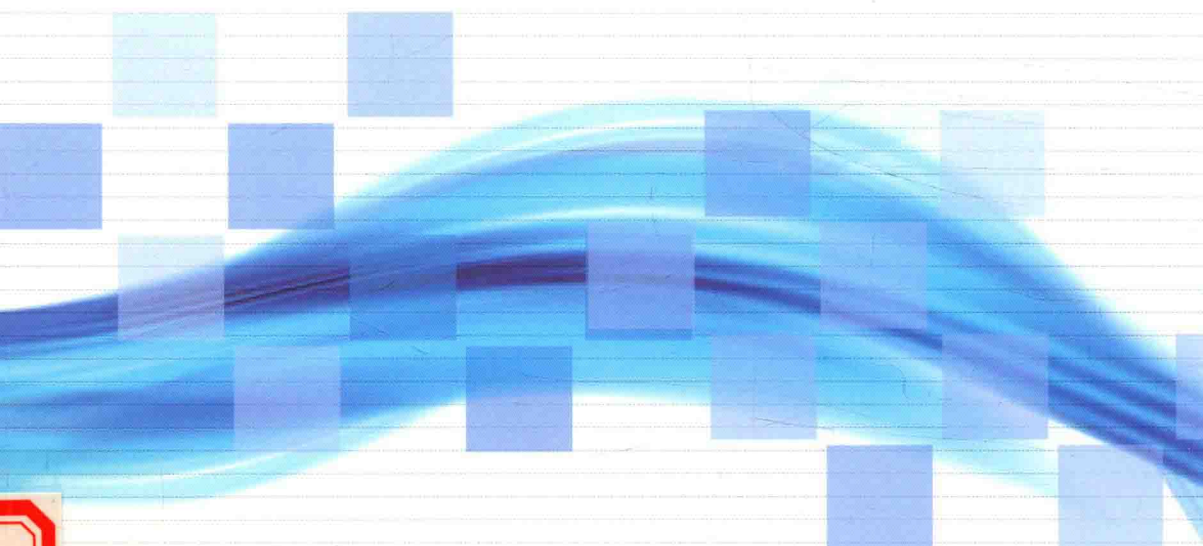



# 气固两相流多参数检测及 团聚机理研究与应用

周云龙 杨宁 郑建祥 李洪伟 著



 科学出版社

# 气固两相流多参数检测及 团聚机理研究与应用

周云龙 杨 宁 郑建祥 李洪伟 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者多年来从事气固两相流参数检测理论和试验研究工作所取得的研究成果的总结。全书共 7 章, 主要内容包括基于压力信号和图像信号的气固两相流流型识别、基于数字图像处理技术的气泡和颗粒行为特征参数检测、基于 PTV 法及光流法的气固两相流流场检测、基于黏附性颗粒流动模型的团聚流态化数值模拟、颗粒团聚行为及其参数检测。

本书可供工程热物理、热能工程、控制理论和控制工程、模式识别与智能系统、检测技术与自动化装置、测试计量技术与仪器、供热、供燃气、通风及空调工程等相关专业的科技人员、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

气固两相流多参数检测及团聚机理研究与应用/周云龙等著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-051273-4

I. ①气… II. ①周… III. ①气体—固体流动—热工测量—测量技术 IV. ①TK31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 321888 号

责任编辑: 任加林 / 责任校对: 王万红  
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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 16 3/4

字数: 323 000

定价: 72.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135120-2005 (BA08)

版权所有, 侵权必究

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

# 前 言

气固两相流作为重要的多相流形式之一，广泛存在于有色、冶金、建材、电力、化工、食品等许多行业。气固两相流动极其复杂，多相流被称为“难测流体”，也成为国内外科技工作者争相探索的热点课题。但许多两相流参数的检测技术和方法处于实验室应用研究阶段，这与两相流在工程领域的广泛性极其不适应。因此，发展多相流检测与分析的新技术，对实现流化床气固两相流动的机理分析、指导相关设备的设计和运行具有重要意义。

本书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共 7 项，包括国家自然科学基金项目“基于流化床气固两相流型图像的多参数检测方法”（No.51276033）、吉林省科技发展计划项目“燃煤飞灰可吸入颗粒物聚团流化机理研究”（No.201101109）、吉林省科技发展计划项目“生物质与煤热解及混燃特性的研究”（No.200518）、吉林市科技发展计划项目“高温高湿度气固两相湍流时空特性及喷动机理应用研究”（No.201464055）、吉林市科技发展计划项目“浸没式顶吹结构内气固两相流动分离规律研究”（No.2013625013）、东北电力集团公司项目“增压流化床中水平埋管传热的试验研究”（No.98220200002239）和苏州拓维工程装备有限公司项目“旋风分离器内气固两相流数值模拟研究与结构优化设计”。到目前为止，课题组在气固两相流体参数检测方面发表学术论文 54 余篇，其中，SCI 收录 4 篇，EI 收录 10 篇，CPCI-S 收录 2 篇，中文重要期刊收录 20 篇，中文核心期刊收录 18 篇，授权国家发明专利 2 项。

结合上述项目，课题组深入开展了气固两相流体参数检测的研究工作。①在流型识别方面，首次将时频分析法、非线性分析法、混沌理论、多重分形技术、图像处理技术和人工神经网络应用到流型的动力学特性检测中，为实现气固两相流流型转换机理和流型的智能识别提供了一种新的、有效的在线监测诊断工具。②在气泡和颗粒行为特征研究方面，采用图像处理技术对稀相气固两相流动图像进行处理，选取气泡上升、聚结及分裂 3 种气泡图像序列，提取图像中颗粒的尺寸和个数等参数，从纵向、横向及截面积这 3 个不同角度来分析气固两相流中气泡、颗粒的变化规律，为深层次地研究气泡和颗粒的行为机理，研究气固两相流的流态化过程提供了有利的条件。③在气固两相流流场检测方面，从粒子特征匹配的角度，率先提出了一种基于粒子群算法优化 Hopfield 神经网络的粒子跟踪测速算法。首次将光流分析法引入气固两相流动的流场、速度场和等涡量场的检测，讨论了典型流型图像的流场和速度场的分布情况，从定量角度获得了不同流型垂直轴的上升和下落的平均速度及总体速度的空间分布特性。④在颗粒团聚行为研

究及参数检测方面,通过对颗粒黏结过程的表观结构特性和组织特性进行了分析,率先开发研制了多通道电导电路实验装置及电磁感应声卡信号采集装置。基于感应信号与测量相态参数的比例关系,进行了团聚结构水分含量和流量等相态参数的测量。首次建立了预报颗粒聚团发生率的关系式模型,在预报颗粒聚团现象时具有较高的表观速度识别率及较小的响应时间,实现了气固两相流聚团现象的快速预报。

本书是作者多年来在气固两相流参数检测方面所做的开创性工作的总结,对丰富和发展气固两相流检测技术具有重要的理论意义,同时对许多相关设备的安全、稳定和高效运行提供了技术指导,因此也具有重要的现实意义。此外,本书也可以作为同行开展此方面研究工作的参考。

本书作者所领导的课题组的各位同仁和研究生范振儒、宋连状、何强勇、李莹、彭颖、王芳、刘起超、赵盘、朱孝宇和吕远征等为本书付出了辛勤劳动,在此向他们表示衷心感谢!本书是作者所领导的课题组集体劳动的成果。

本书具体分工:前言和第2~5章由周云龙教授撰写,第1章由李洪伟副教授和杨宁讲师共同撰写,第6章由郑建祥副教授撰写,第7章由杨宁讲师撰写,全书由周云龙教授统稿。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足,恳请读者批评指正。

作者

2016年11月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 两相流的定义和分类	1
1.1.1 两相流的定义	1
1.1.2 两相流的分类	1
1.2 两相流的特点	2
1.3 两相流参数检测方法及分类	3
1.3.1 参数检测的主要方法	3
1.3.2 两相流参数的分类	3
1.4 气固两相流参数检测的研究	4
1.4.1 参数检测的工程背景及意义	4
1.4.2 参数检测的研究进展及现状	4
1.4.3 参数检测存在的问题	8
1.5 气固两相流典型设备及联系	9
1.5.1 气固两相流典型设备	9
1.5.2 流化床与喷动床的区别与联系	10
参考文献	11
第 2 章 基于压力信号的气固两相流流型识别	14
2.1 气固两相流的典型流型	14
2.1.1 气固两相流流型划分	14
2.1.2 气固两相典型的流型特征	16
2.1.3 流型识别中拟解决关键问题	17
2.2 实验系统及实验步骤	18
2.2.1 实验装置简介	18
2.2.2 实验步骤	19
2.3 实验参数的测量	20
2.3.1 信号的采集与压力传感器的选择	20
2.3.2 实验所观察到的流型	20
2.4 压力脉动信号的去噪处理	22
2.4.1 几种一代小波去噪基本原理	22
2.4.2 二代小波原理	25

2.4.3	一代小波与二代小波除噪比较	27
2.5	压力脉动信号的时频分析	28
2.5.1	时频分析	28
2.5.2	数据结果分析	29
2.6	压力脉动信号的非线性分析	33
2.6.1	非线性分析	33
2.6.2	数据结果聚类分析	36
2.6.3	数据结果递归分析	39
2.7	压力脉动信号的混沌特性和多重分形分析	41
2.7.1	混沌特性分析	42
2.7.2	多重分形分析	48
2.8	流型识别模式的分析与选取	52
2.8.1	人工鱼群基本理论	52
2.8.2	BP 神经网络	53
2.8.3	Elman 神经网络	54
2.8.4	人工鱼群算法优化 BP 网络的过程	55
2.8.5	统计特征参数	56
2.8.6	实验结果与分析	57
	本章小结	59
	参考文献	59
<b>第 3 章</b>	<b>基于图像信号的气固两相流型识别</b>	<b>62</b>
3.1	实验系统及实验步骤	62
3.1.1	实验装置简介	62
3.1.2	实验步骤	63
3.2	数字图像采集系统	63
3.2.1	高速摄影机系统	63
3.2.2	图像拍摄方式的选择	64
3.2.3	照明系统的选择	64
3.2.4	流化床气固两相流动图像的获取	65
3.2.5	流型图像的预处理	67
3.3	流化床气固两相流流型图像特征提取	70
3.3.1	流型图像的灰度直方图统计特征	70
3.3.2	流型图像的傅里叶变换纹理特征	72
3.3.3	流型图像的小波-分形特征	75
3.3.4	流型图像的多重分形特征	79
3.4	流型识别分类器的分析与选取	84

3.4.1	BP 神经网络模型	84
3.4.2	概率神经网络模型	86
3.4.3	遗传神经网络模型	87
3.4.4	神经网络模型在流型识别的应用	89
3.4.5	流型识别方法比较	90
	本章小结	91
	参考文献	91
<b>第 4 章</b>	<b>气泡、颗粒行为特征研究</b>	<b>94</b>
4.1	实验系统与实验步骤	94
4.2	气固两相流图像处理过程	96
4.2.1	图像去噪	96
4.2.2	纠正不均匀光照	99
4.2.3	图像二值化	99
4.2.4	粘连颗粒分割	102
4.3	浓相气固两相流气泡行为研究	105
4.3.1	气泡参数	106
4.3.2	气泡上升过程中的行为分析	107
4.3.3	气泡聚合过程中的行为分析	111
4.3.4	气泡分裂过程中的行为分析	113
4.4	稀相气固两相流动图像特征分析	116
4.4.1	固体颗粒标号	116
4.4.2	参数计算	117
4.4.3	气固混合比	118
4.4.4	体积空隙率	119
4.4.5	质量含固率	119
4.4.6	实验结果分析	120
4.5	误差来源分析	126
	本章小结	127
	参考文献	127
<b>第 5 章</b>	<b>气固两相流流场检测与分析</b>	<b>129</b>
5.1	基于特征相似度的 PTV 匹配算法	129
5.1.1	颗粒图像特征的提取	129
5.1.2	颗粒速度的测量	131
5.2	基于粒子群优化 Hopfield 网络的 PTV 匹配算法	134
5.2.1	能量函数的设计	134



5.2.2	基于 PSO 优化的 Hopfield 网络对颗粒进行匹配	136
5.3	光流分析的计算方法	141
5.3.1	光流算法概述	141
5.3.2	光流算法的基本原理	141
5.3.3	几种经典的光流算法	143
5.4	基于光流法的气固循环流化床流场测速	147
5.4.1	MQD 互相关算法	147
5.4.2	实验结果与分析	149
	本章小结	154
	参考文献	154
<b>第 6 章</b>	<b>颗粒团聚特性的数值模拟研究</b>	<b>156</b>
6.1	气固两相流颗粒团聚模型	156
6.1.1	黏附性颗粒气固两相流动中气相湍流的大涡模型	156
6.1.2	黏附性颗粒动力学	159
6.1.3	黏性颗粒系统碰撞应力	163
6.1.4	黏性颗粒系统碰撞热流通量	173
6.2	循环流化床内颗粒团聚流动特性的研究	174
6.2.1	数学模型、数值方法和边界条件	174
6.2.2	结果与讨论	176
6.3	喷动床内黏性颗粒气固两相流动特性的数值模拟研究	195
6.3.1	数学模型和边界条件	195
6.3.2	模拟结果与讨论	196
6.4	流化床内纳米颗粒气固两相流动特性的研究	211
6.4.1	数学模型、模拟参数和边界条件	211
6.4.2	结果与讨论	212
	本章小结	223
	参考文献	224
<b>第 7 章</b>	<b>颗粒团聚行为研究及参数检测</b>	<b>227</b>
7.1	颗粒团聚现象概述	227
7.1.1	团聚结构的定义及分类	227
7.1.2	颗粒团聚的原因	228
7.1.3	团聚结构的黏结增长过程	228
7.1.4	气固两相团聚行为机理研究的重要意义	229
7.2	颗粒团聚分散的主要途径	229
7.2.1	机械分散法	229

---

7.2.2	干燥分散法	230
7.2.3	静电分散法	230
7.3	团聚结构表观黏结特性	230
7.3.1	颗粒团聚实验平台	230
7.3.2	团聚结构分区域辨识	232
7.3.3	表观黏结特性研究	234
7.4	团聚结构相态参数检测	238
7.4.1	团聚结构水分分布状态测量	238
7.4.2	团聚结构流量分布状态检测	243
7.5	团聚结构快速预报模型	249
7.5.1	团聚结构快速预报实验平台	249
7.5.2	模型建立及结果分析	251
	本章小结	255
	参考文献	256

# 第 1 章 绪 论

两相流系统广泛存在于化工、石油、能源、冶金、环保、轻工等领域，而两相流学科是以两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渐发展起来的一门新兴学科。由于两相流动体系在自然界和工业过程中涉及领域的广泛性，以及其应用的重要性，近年来，国内外众多学者对其给予了极大关注，促使两相流领域的研究工作得到了迅速发展。气固两相流作为重要的多相流形式之一，两相之间的相互运动十分复杂，使得很多相关的参数很难测量或者测量误差很大。

## 1.1 两相流的定义和分类

### 1.1.1 两相流的定义

两相流的定义，首先要涉及相的定义。相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，各相之间具有明显可分的界面。

从宏观观点出发，可以把自然界的物质分为 3 种相，即气相、液相和固相。单相物质的流动称为单相流，如气体流或者液体流。两相流或多相流是指同时存在两种或多种不同相的物质的流动。

### 1.1.2 两相流的分类

工业中常见的两相流有气液两相流、气固两相流、液固两相流和液液两相流。

#### 1. 气液两相流

石油工业中的油气混输设备、原子能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、各式冷凝器和蒸发器等的工作过程中，都普遍存在气液两相流体的流动和传热现象。

#### 2. 气固两相流

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，以及煤的沸腾燃烧和石油的催化裂化都是气固两相流的实例。

### 3. 液固两相流

煤炭工业和冶金工业中煤的水力输送、矿石和矿料的水力输送，以及火力发电站锅炉的水力除渣管道中流动的水渣混合物，都是液固两相流的实例。

### 4. 液液两相流

处于开采中后期的陆上油田在含水量剧增后的油水混输、化工中的乳浊液的流动，以及萃取所需物质的过程都是液液两相流的实例。

在两相流研究中，也可以把物质分为连续介质和离散介质。气体和液体属于连续介质，也称连续相或流体相。固体颗粒、液滴和气泡属于离散介质，也称离散相或颗粒相。流体相和颗粒相组成的流动称为两相流动。当流体相是气体时，颗粒相可以是固体颗粒或液滴，或者两者都有；当液体相是液体时，颗粒相可以是固体颗粒、气泡或不溶于液体的另一种颗粒，或者其中两种或三种并存。这样定义的两相流动不仅包括了多相流体力学中所研究的流动，而且大大简化了数学模型，有利于两相流参数的计算。

## 1.2 两相流的特点

两相流动是一种很复杂的运动，这种复杂性表现在气固两相流具有可变形的界面及不均匀的相分布状况，同时，气体的可压缩性也增加了两相流动的复杂性。因此，其物理特性和数学描述要比单相流复杂得多，具有以下特点。

### 1. 流型复杂多变

在两相流动中，流型与它每一个相的流量、热负荷、物性（密度、表面张力、传热系数和黏度等）及通道的几何形状和位置等因素均相关。因此，在两相流动中，必须先了解流动属于何种流型，才可能比较好地做出合适的理论模型，以进行流动特性和传热特性的研究。流型的变化使得流动的特性，如损失特性和传递特性，都相应地发生改变。

### 2. 存在相间相互作用

单相流不存在相间相互作用。但在两相流中，不仅有两相间的相互作用，而且对于不连续的相来说，各相内部也存在相互作用，这些都是两相流中面临的新问题。

### 3. 数学描述难度大

单相流中只有体积力，数学描述较易。在两相流中，相间摩擦、传热、传质和化学反应等都发生在微元表面上，相互作用加强；不仅描述多相流的守恒方程、

本构方程和边界条件数量多、形式复杂，而且方程组的非线性程度和耦合程度大大增加，这给多相流的数学描述提出了新的问题和要求。

## 1.3 两相流参数检测方法及分类

### 1.3.1 参数检测的主要方法

总结近年来国内外发表的相关文献，气固两相流参数的获取方法大体上可以分为三大类。第一类，把传统的单相流仪表和两相流测试模型组合的测量方法<sup>[1~4]</sup>；第二类，新型先进传感技术用于两相流参数检测的测量方法<sup>[5~10]</sup>；第三类，以计算机为硬件平台，采用基于软测量技术的软测量方法<sup>[11~16]</sup>。到目前为止，人们已经发展了许多基于不同原理的测量方法和测量系统，为气固两相流的理论研究和工业应用提供了强有力的测试手段。

气固两相流中存在一些重要参数，这些参数主要包括流型、流量、速度、密度、分相含率、压力、压力降和温度等。此外，参数还包括分散在两相流体中的液滴、颗粒和气泡的尺寸及分布情况。流化床与喷动床作为气力输送工业生产过过程中最典型的两种设备，存在着气泡搅动、颗粒运动及气固两相作用，是一个非线性瞬态系统，对于这样具有显著多尺度结构特点的化工对象，若想深入地研究其流动结构的行为本质和演化规律，就需要对气泡、涡流和颗粒团聚等结构的流动参数进行准确的检测测量。

### 1.3.2 两相流参数的分类

两相流主要参数，综合在两相流动设备和系统中的应用，通常分成以下3类。

#### 1. 直接与设计有关的参数

直接与设计有关的参数是用以提供稳态或事故状态下设计的极限数据，如压力降、分相含率、流量、传热系数、传质系数和临界热通量。

#### 2. 与系统研究有关的参数

与系统研究有关的参数是时间或空间的平均参数，是为了改进设计并对系统进行研究所需了解的参数，如流型、相浓度分布（局部分相含率）、速度分布、质量流量分布、气泡、液滴、颗粒尺寸及其分布和液膜厚度幅值分布等。

#### 3. 脉动参数

脉动参数是随时间变化的波动参数，如速度波动、压力波动、温度波动和相浓度波动等。

## 1.4 气固两相流参数检测的研究

### 1.4.1 参数检测的工程背景及意义

气固两相流作为重要的多相流形式之一,在我们的生产和生活中广泛存在,如自然界中的风沙现象、大气尘埃流。在有色、冶金、建材、电力、化工、食品等许多工业生产中,气固两相流体应用与工程研究十分广泛,如电力行业的煤粉输送和煤粉燃烧,石油化工行业的催化裂化和烟尘排放,有色行业的氧化铝输送,食品行业的面粉输送,建筑行业的水泥输送等都属于气固两相流的范畴<sup>[17]</sup>。气固流化床反应器是一种典型的两相流动体系,是呈现气流密集的稀相和颗粒聚集的密相共存的两相结构,涉及气固两相之间的运动过程十分复杂。该系统在很宽的操作范围内,呈现强的非线性和非平稳性,许多理论和技术问题,至今还不能很好地被认识和掌握,使得基础理论研究落后于应用研究。在多相流中,不仅相界面是时空随机可变的,而且存在明显的界面效应和相对速度,导致两相流体的流动特性极其复杂。若想认清多相流体的真实面目,获得概念、建立模型并实现过程的预测、设计和控制,那么在此之前,首先要解决的就是多相流体参数的检测问题。而参数检测的目的之一就是要更加准确、快速地表征两相流体的流动特性和传热特性等<sup>[18]</sup>。

随着科学技术的迅速发展,多相流动体系在国民经济和人类生活中的地位日益重要。由于气固两相流所涉及的范围越来越广泛,其应用的重要性也日渐明显,进而积极地推动了气固两相流领域的相关研究工作。由于两相流体的流动特性复杂多变,两相流参数检测难度比单相流体高许多。另外,市场上商品化的工业型仪表还很少,甚至许多两相流参数的检测技术或方法大都处于实验室研究阶段,这都不能满足两相流工程领域的广泛需求。为此,各国众多学者做了大量的研究工作以改善此种局面。近年来,蓬勃发展的高速摄影技术、计算机视觉理论及非线性信息处理理论等,给我们提供了流化床气固两相流体参数检测相关问题解决的新思路和新方法。这对发展多相流检测与分析技术,进一步分析两相流的运动机理,实现相关设备的优化设计和操作,提高对两相流体的监控水平具有重要意义。

### 1.4.2 参数检测的研究进展及现状

#### 1. 流型识别研究的进展和现状

流型用来描述两相流体的流动结构或形式,又称流态。在两相流型中,不同相间存在的相界面在时间和空间上是随机可变的,这就导致流型形式多种多样,

十分复杂。流型可以影响两相流体的流动特性和传热特性,通常情况下,对于两相流各种参数的准确测量往往依赖于对流型的准确定位。

流化床气固两相流流型的识别技术和方法与流化床信号检测技术和分析方法的发展密切相关。迄今为止,许多研究者采用过不同的方法来识别流型。周云龙等人<sup>[19]</sup>用压力波动法、压差波动法及数字图像法在气液两相流流型智能识别方面做了大量的研究工作,这对流化床气固两相流流型的识别提供了参考。葛李等人<sup>[20]</sup>在光学层析成像技术的基础上,提出了一种基于学习矢量量化神经网络的气固两相流流型识别方法。陈永国等人<sup>[21]</sup>应用时频分析的方法得到压力波动信号的伪 Margenau-Hill 时频分布图谱 PMH (pseudo margenau-hill time-frequency distribution),并基于各流型下不同的图谱,探索出一种识别流型的方法。李强伟等人<sup>[22]</sup>提出一种基于分形和模糊技术的气固流化床流型辨识的方法,将分形技术应用在气固流化床压力波动信号的分析中,提取出信号特征值 Hurst 指数,同时结合模糊识别,建立模糊识别函数,由此来区分气固流化床的不同流型。王晓萍等人<sup>[23]</sup>采用 Hilbert-Huang 变换 (HHT),提取出气固流化床压力脉动信号的各阶内禀模态函数 (IMF),提出了应用 IMF 中频段能量进行流化床流型识别的方法。林萍等人<sup>[24]</sup>以系统的概念将流化床内各点压力脉动信号看作流化床系统在不同位置的信息源,用互信息理论来研究各响应之间的信息传输关系,获取反映系统全面信息的信息传输量特征参数,研究该参数与流化床流型的关系。王晓萍等人<sup>[25]</sup>以压差、压力信号的算法复杂性  $C(n)$ 、涨落复杂性  $C_f$  作为特征参数,根据特征参数建立了单个传感器判别流型的隶属度函数。再对多个传感器的识别结果进行数据融合,最后得到了多传感器对不同流型的识别结果。黄轶伦等人<sup>[26]</sup>研究了气固流化床压力脉动时间序列的算法复杂性和涨落复杂性随表观风速的变化趋势,这两种复杂性参数对于流化床流型变化敏感,将其与多元统计分析中的距离判别方法相结合,实现了流化床气固两相流流型的识别。Monazam 等人<sup>[27]</sup>用压力脉动信号的转移速度的大小来实现流型识别。

## 2. 颗粒参数研究的进展和现状

作为气固两相流中的主要组成部分,颗粒在有限空间或者无限空间内流动时,由于受到流动空间、管道部件、流体浓度和颗粒沉积等各种因素的影响,因而其流动特性极为复杂,若不能准确掌握颗粒的流动机理,势必会对气力输送过程造成影响、导致设备故障。因此,开展颗粒的流动状态的多参数检测为优化设备运行、提高生产工艺提供了重要的依据。

迄今为止,许多研究学者采用过不同的方法对颗粒参数进行了测量。宋鼎等人<sup>[28]</sup>基于图像形态学算法提出一种气固两相流固体颗粒速度检测的主要方法,通过控制高速照相机 (CCD) 的图像采集间隔时间获取颗粒运动轨迹的模糊图像,建立速度参量与颗粒模糊轨迹长度的点扩展函数关系式,获取多层面不同空间内

的颗粒运动速度。石惠娴等人<sup>[29]</sup>通过 PIV 粒子图像测速仪对流化床内颗粒流动特性进行了系统的检测, 基于激光残余特性感应不同时刻激光的透射强度, 获得流化床内颗粒上升或下降的逐时速度分布曲线与颗粒浓度分布曲线, 研究发现颗粒的轴向速度沿着径向的整个截面总体上呈现环核状分布结构。Cui 等人<sup>[30]</sup>向流化床中混入不同种类的颗粒, 选用最可几分布模型对异质颗粒的流化状态进行了研究, 同时人为制造乳化相与颗粒相态, 基于相态本质特性的差异, 引入统计分析方法对相间作用机制进行了区分, 得到流型和临界速度的判别依据。Cody 等人<sup>[31]</sup>使用声发生技术检测流化床, 运用功率谱计算得到了不同气体、不同类型颗粒的颗粒温度, 并得出了颗粒运动的 Langevin 方程。通过颗粒温度的计算结果和机理模型, 发现能够从声信号中得到流化床中的静压、升速、黏度和气体的扩散常数等参数。Armour 等人<sup>[32]</sup>在小规模实验台上, 使用橄榄石颗粒作为实验材料, 研究由颗粒与管壁碰撞而产生的颗粒荷电现象, 利用静电测量方法推断出流动粉体的荷电趋势, 通过处理荷电信号提取出管道内颗粒的浓度信息。李晓华等人<sup>[33]</sup>通过信息相关理论提取流化床的颗粒浓度与压力脉动的时间序列信号, 对采集的信号进行非线性动力学分析, 同时结合复杂性算法从一个新的角度出发揭示了流化床的颗粒浓度分布规律。

### 3. 气泡参数的研究进展及现状

气力输送过程中, 固体颗粒的运动十分复杂, 经常伴随有循环流和腾涌现象, 其运动规律主要是由气泡决定的。气泡的生成、运动与破裂, 床层表现出强烈的非线性与复杂性, 使得稳定操作过程仍存在很多困难。气泡与颗粒间相互作用是决定气固两相流动过程的重要因素, 对气泡的运动特性参数进行检测一直是近年来的研究热点。

Antonio 等人<sup>[34]</sup>利用图像分析技术, 对流化床气固两相流的鼓泡床中气泡行为进行了研究, 并利用拉格朗日测速法和欧拉测速法检测到了气固流化床中气泡的尺寸、运动速度分布、空隙率和床层波动幅值等参数。Xue 等人<sup>[35]</sup>提出了两种基于高速摄影法的气固流化床中颗粒旋转速度的检测方法: 颗粒图像灰度互相关法和颗粒旋转方向识别法。实验结果表明这两种方法是可靠的, 并且有各自的最佳适用范围。Wu 等人<sup>[36]</sup>通过电导探针检测了气泡的运动参数, 考虑到气泡侧向运动及探针间距对气泡丢失造成的影响, 引入校正因子改进了双探针电导探头法以测量气泡的行为。向文国等人<sup>[37]</sup>以 VC++ 6.0 为开发平台, 结合 Intra 3D 技术, 研究流化床炉内粒子与气泡运动的三维动态可视化虚拟表示方法, 在流化床数值模拟仿真的基础上, 运用计算机图形学的理论和方法, 利用数字仿真的大量数据, 借助粒子运动系统的表示方法, 虚拟地表示出流化床气泡的运动。金涌等人<sup>[38]</sup>通过激光示踪法观察了固体颗粒在气泡作用下的不同运动方式, 测定了各种气泡直径下的尾涡更新长度和不同床层高度下颗粒的循环量。实验结果表明床内气泡体



积之比是随着气泡体积的增加而增大的。罗卫红等人<sup>[39]</sup>采用变色闪频法对流化床内气泡及物料的运动规律进行了研究,考察气泡对周围颗粒运动规律的影响,求得了颗粒的横、纵向的速度分布,粒子流线及轨迹的变化,探讨了气泡分裂及合并的诱导因素及尾涡生成的机理。

#### 4. 速度场研究的进展和现状

在两相流体速度的描述中,除了两相流混合体的平均速度外,还必须描述各个分相的流速,原因是两相流动中相间存在相对速度。为了方便起见,分相流速常以分相流量与管道总截面之比来表示该相的分相流速。

迄今为止,测量两相流中颗粒流速及流场的方法主要有激光多普勒测速法、分子示踪全场测速法、粒子示踪全场测速法和图像测速法等<sup>[40]</sup>。其中,当今较流行的流体动态速度场检测手段有 PIV 法和 PTV 法。PIV 法 (particle image velocimetry, 粒子图像测速技术) 要借助示踪粒子对多相流的流速与流场进行测定,实验设备昂贵,实验步骤复杂,计算烦琐<sup>[41]</sup>。PTV 法 (particle tracing velocimetry, 粒子跟踪测速技术) 只适用于观测区域内跟踪目标少,形状尽量规则、形变小的情况,否则会有较大的实验误差<sup>[42]</sup>。许联锋等人<sup>[43]</sup>应用 PIV 法的基本原理,对静止液体中的气泡运动速度场进行了分析,并对有关气液两相流测量问题进行了探讨。宫武旗等人<sup>[44]</sup>研究了两相流稀相微粒速度场的测量技术,改进了基于二进制图像分析算法的粒子图像速度场仪 (PIV) 的相关技术指标。宋鼎等人<sup>[28]</sup>提出一种基于图像处理技术的气固两相流固体颗粒速度测量方法,通过控制高速 CCD 的曝光时间获得颗粒的运动模糊图像,然后利用图像处理技术估计出模糊图像的点扩展函数 (PSF),并利用透镜成像原理建立运动模糊长度与颗粒运动速度之间的联系,最终获得颗粒的运动速度。朱佳琪等人<sup>[45]</sup>提出的图像测速法是以直流灯作为正面光源,采用高速 CCD 拍摄流化床内的二维颗粒运动图像,基于图像的互相关算法计算得到循环流化床内颗粒二维全场速度。石惠娴<sup>[29]</sup>利用粒子图像速度场仪 (PIV) 对循环流化床中颗粒流场进行了系统的实验研究,定量上获得了不同时刻颗粒轴向上升和下落的平均速度大小及沿床径向分布特性,还获得了总体上颗粒轴向速度沿床径向在整个截面内形成抛物线型的环核分布规律。周洁等人<sup>[46]</sup>利用光信号互相关方法对气固两相流中固体颗粒一维流速的测量进行了研究。

#### 5. 团聚结构参数检测的研究进展及现状

团聚现象是流化床操作过程中出现的基本现象。由于温度的升高和粒间力的作用致使颗粒成团而形成团聚,如果团聚物不加以控制,任其发展,则很可能形成结块,增加设备能耗,影响气力输送装置的正常运行。对团聚结构的参数检测是气固两相流中一项具有挑战性的工作。