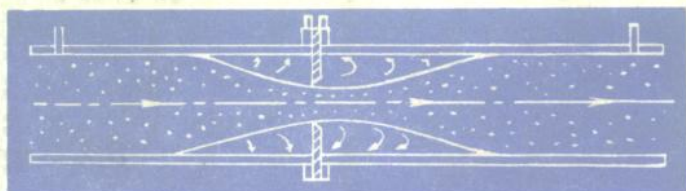


气液固

多相流测量

林宗虎 编著



中国计量出版社

气 液 固

多 相 流 测 量

林宋虎 编著

中国计量出版社

内 容 提 要

全书共分八章,较全面地论述了多相流的定义及分类,气液、气固、液固、液液等两相流体以及三相流体在稳定流动时的压力、温度、速度等参数的测量,多相流流量的直接、间接测量方法,各相含量、密度和传热系数等参数的各种测量方法和原理,并讨论了多相流体的局部参数和脉动参数的测量方法等,第八章介绍了两相流测量仪表的校准设备。

可供从事化工、石油、冶金、核能、采矿、电力、仪表、食品、粮食加工、医药等工业部门的计量测试人员和工程技术人员参考使用,也可作为大专院校有关专业师生参考书。

气液固多相流测量

林宗虎 编著

责任编辑 徐鹤

—*

中国计量出版社出版

北京和平里11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*

开本 850×1168/32 印张 9.25 字数 240千字

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数 1—7000

ISBN 7-5026-0070 1/TB·55

定价 2.80 元

前 言

多相流指的是多相物质共同流动的工况。这种流动工况在各种工程设备中是常见的。例如，在工业中采用的各式凝结器或蒸发器中广泛存在着气液两相流的流动和传热工况；在动力、水泥、冶金、采矿等工业中常用的管道气力输送和液力输送技术本身就是一种气体和固体颗粒共同流动以及液体和固体颗粒共同流动现象。这些都只是多相流的部分工程实例。

多相流的流动工况和传热工况是十分复杂的，无法用纯理论方法进行计算。因此，对于具有多相流工况的工程设备的研制和运转而言，测试技术是至关重要的。

多相流的测试参数比单相流的多得多，测试难度较大，因而各工业发达国家对多相流的测量技术都进行了大量研究工作，为适应科技发展的需要，我国也已开始对多相流测试进行研究。有关多相流测量技术的资料大多散诸于各种期刊和论文集中，已经出版的有关专著只有英国 Hewitt, G. F. 所著的“Measurement of Two-phase Flow”（1978年）一书。该书只对气液两相流的测量技术作了概要论述，未涉及其它形式多相流的测量方法。为加速多相流测量工作在我国深入开展，撰编此稿奉献给广大科技工作者。

本书较全面地论述了气固、气液、液固和液液等两相流以及三相流的测试方法，故题为《气液固多相流测量》。

全书共分八章，着重论述了两相流和三相流中的流量、压力、速度、温度、各相含量和传热系数等参数的测量方法。内容包括现有的多相流主要测试技术和作者多年的研究成果，可供动力、冶金、化工、制冷、石油、水泥、粮食加工、食品、医药等工业部门从事多相流工程设备的测量、研究和设计工作的科技人

员参考，也可作为大专院校师生的参考书及教材。

由于多相流测量技术初次编著成书，加以作者水平有限，书中一定存在不少错漏和欠妥之处，敬请读者批评指正。

西安交通大学能源系教授

林宗虎

1988年6月

目 录

第一章 多相流概论	(1)
第一节 多相流的定义及分类.....	(1)
第二节 多相流的流动结构.....	(4)
第三节 多相流的传热过程.....	(18)
第四节 多相流的脉动流动.....	(25)
第五节 多相流的主要参数及其计算式.....	(28)
第六节 多相流测量参数及其分类.....	(33)
第一章参考文献.....	(34)
第二章 多相流平均参数的测量	(36)
第一节 压力降测量.....	(36)
第二节 各相含量的测量.....	(43)
第三节 放热系数测量.....	(53)
第四节 传热恶化工况测量.....	(63)
第五节 液位测量.....	(66)
第六节 速度测量.....	(73)
第二章参考文献.....	(73)
第三章 两相流流量的直接测量方法	(75)
第一节 流量及其测量方法的分类.....	(75)
第二节 应用变液位法测量两相流流量.....	(76)
第三节 应用差压法测量两相流流量.....	(82)
第四节 应用力学法测量两相流流量.....	(111)
第五节 应用量热法测量两相流流量.....	(116)
第六节 应用静电场法测量两相流流量.....	(119)
第七节 应用涡轮流量计测量两相流流量.....	(120)
第八节 应用振动法测量两相流流量.....	(123)
第九节 应用弯头测量两相流流量.....	(125)
第十节 颗粒物料的流量测量.....	(129)

第三章参考文献	(142)
第四章 两相流流量的间接测量方法	(145)
第一节 两相流体密度测量方法	(145)
第二节 应用超声波法测量两相流流量	(155)
第三节 应用相关法测量两相流流量	(164)
第四节 应用脉动法测量两相流流量	(168)
第五节 应用电磁法测量两相流流量	(176)
第六节 应用绕流法测量两相流流量	(185)
第七节 应用皮托管和密度计组合测量两相流流量	(194)
第八节 应用其它组合式测量设备测量两相流流量	(196)
第四章参考文献	(197)
第五章 多相流局部区域参数的测量	(199)
第一节 局部区域速度的测量方法	(199)
第二节 局部区域各相含量的测量方法	(222)
第三节 液滴、气泡和颗粒尺寸的测量方法	(229)
第四节 管壁液膜厚度的测量方法	(231)
第五节 多管系统流量分配均匀性的测量方法	(239)
第六节 滑动比的测量方法	(242)
第五章参考文献	(242)
第六章 三相流测量	(244)
第一节 三相流的流速和密度	(244)
第二节 应用测量五个参数的方法测量三相流中 固相质量流量	(246)
第三节 应用测量容积流量、密度和导电系数的方法 测量固相质量流量	(247)
第四节 应用核磁共振法测量液相流量	(248)
第五节 应用三个不同性能的流量计测量三相流流量	(250)
第六节 含气石油的流量测量	(251)
第七节 铁矿浆中的磁铁矿石流量测量	(255)
第六章参考文献	(259)
第七章 多相流脉动参数的测量	(260)
第一节 速度脉动的测量	(260)
第二节 温度脉动的测量	(262)

第三节	压力脉动的测量	(266)
第七章	参考文献	(267)
第八章	两相流测量仪表的校准设备	(268)
第一节	概述	(268)
第二节	压力计和压力传感器的校准设备	(269)
第三节	热电偶的校准设备	(271)
第四节	测速管的校准设备	(272)
第五节	单相流体流量计的校准设备	(273)
第六节	液固两相流体流量计的校准设备	(279)
第七节	气液两相流体流量计的校准设备	(281)
第八节	固体颗粒物料流量计的校准设备	(284)
第九节	气固两相流体流量计的校准设备	(285)
第八章	参考文献	(286)

第一章 多相流概论

第一节 多相流的定义及分类

一 多相流的定义

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。

由于热力学上将物体中每一个均匀部分叫做一个相，因此，各部分均匀的固体、液体和气体可分别称为固相物体，液相物体和气相物体或统称为单相物体。

在固体、液体和气体中，液体和气体具有流动的特性，两者统称为流体。因此，各部分均匀的气体或液体的流动可称为单相流体的流动，或简称为单相流。

当物体各部分之间存在差别时，这一物体称为多相物体。例如，气体和液体的混合物、气体和固体的混合物以及液体和固体的混合物均属此例。多相物体的流动简称为多相流。

二 多相流的分类

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，同时也具有流动性。

由上所述可见，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。

多相流根据参与流动各相的数目一般可以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的称为气液两相流；气体和固体颗粒一起流动的称为气固两相流；液体和固体颗粒一起流动的称为液固两相流；两种不能均匀混合的液体一起流动的称为液液两相流。三相流可分为两种：气体、液体和固体颗粒一起流动的称为气液固三相流；两种不能均匀混合的液体和固体颗粒一起流动的称为液液固三相流。当然，也可以存在气体，多种不能均匀混合液体以及固体颗粒一起流动的工况，这种流动工况已超出三相流的范围，可以根据参与流动各相的数目另行命名。

气液两相流还可以根据气液两相的组分而分为单组分气液两相流和双组分气液两相流。例如，水蒸气和水的组分是相同的，所以汽水混合物的流动属于单组分气液两相流；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。单组分气液两相流在流动时根据压力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；双组分气液两相流则一般在流动时不会发生相变。

三 自然界和工程中的多相流

多相流在自然界、工程设备及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都是多相流的实例。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，含于气体中的水蒸汽就会凝结，使气体中带有微量水分。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

一相的数量微少，所以仍看作单相流体。

在工程设备中，多相流工况也是经常遇到的。在动力、化工、制冷、石油、冶金等工业中就存在各种气液两相流工况。例如，在原子能发电站、火力发电站中各种沸腾管、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、蒸发器以及其它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，一切颗粒状固体物质都可看作两相物体，因为它是由固体颗粒和位于固体颗粒之间的气体构成的。固体颗粒除了可用气体进行气力输送外，还可用其它方法输送，这在下面讨论测量固体颗粒流量问题时再加以讨论。

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。其它象火力发电站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为其工程实例。

有时在工程中还存在三相流的工况。例如，在浆状流体中，除去固相和液相外，还存在气相（空气）。此外，在油田开采出来的原油中，除去原油和气体外还带有水。这些流体的流动工况都属于三相流的范畴。

第二节 多相流的流动结构

多相流的流动结构是十分复杂的。在气液两相流和液液两相流中分别存在气液两相分界面和液液两相分界面，这些分界面的形状和在两相流中的分布情况是随着流动过程随时在变化的。在气固两相流和液固两相流中，虽然由于固体颗粒的外形是固定的，因而气固两相分界面和液固两相分界面的形状不会发生变化，但是，由于在流动过程中，固体颗粒在两相流体中的分布情况是随时在变化的，因此两相分界面的分布情况也是在不断变化的。由于多相流中各相的分界面是多变的，致使多相流的流动结构不仅是多种多样的而且其变化常带有随机性。

在单相流中是不存在流动各相的分界面的，流动结构比较简单，因此，多相流中存在多变的各相分界面也正是多相流有别于单相流的主要特征之一。

多相流的流动结构除去受到各相工质物性的影响外，还受到压力、各相流量、受热状况和管道布置方式及几何形状等因素的影响。下面将以气液两相流、气固两相流、液液两相流和液固两相流的典型流动结构为例来讨论多相流的流动结构。

一 气液两相流的流动结构

试验研究表明，在垂直上升管中的气液两相流，其基本流动结构有下列五种：细胞状流动结构、弹状流动结构、块状流动结构、带纤维的环状流动结构和环状流动结构。

图 1-1 是这五种流动结构的示意图。由图可见，这五种流动结构分别具有下列特点。

(一) 细胞状流动结构

细胞状流动是最常见的流动结构之一。其特征为在液相中带有散布的细小气泡。直径小于 1 mm 的气泡是球形的，直径大于此值的气泡，其外形是多种多样的。

(二) 弹状流动结构

弹状流动结构由一系列气弹组成。气弹端部呈半球状而尾部是平的。在两气弹之间夹有小气泡，气弹与管壁之间的液膜是往下流动的。

(三) 块状流动结构

块状流动结构是由于气弹破裂而形成的。此时，气体块在液流中以混乱状态进行流动。

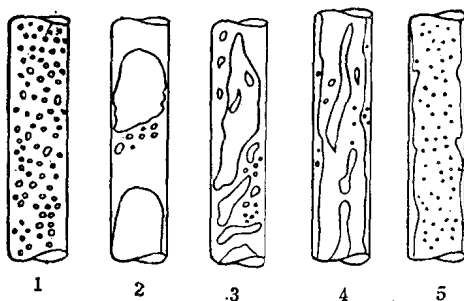


图 1-1 垂直上升气液两相流的流动结构

1—细泡状流动结构 2—弹状流动结构 3—块状流动结构
4—带纤维的环状流动结构 5—环状流动结构

(四) 带纤维的环状流动结构

在带纤维的环状流动结构中，管壁上液膜较厚且含有小气泡。被中心部分气核从液膜带走的液滴在气核内形成不规则的长纤维形状。这种流型常在高质量流速时出现。

(五) 环状流动结构

在环状流动结构中，管壁上有一层液膜，管子中心部分为气核。在气核中带有因气流撕裂管壁液膜表面而形成的细小液滴。

在加热管道中，当管壁温度高到足以使管壁液膜全部汽化时，则环状流动结构就发展成为只有在气相中含有细小液滴的雾状流动结构。

图 1-2 是气液两相流在直管中垂直向下流动时的流动结构示意图。由图可见，气液两相作垂直下降流动时的细胞状流动结构和作垂直上升流动时的细胞状流动结构不同，前者细胞集中在管子核心部分而后者则散布于整个管子截面上。当液相流量不变而使气相流量增大，则细胞将聚集成气弹，形成具有下降弹状流动结构的气液两相流。垂直下降气液两相流也可形成下降流动的环状流动结构。当气相及液相流量小时，管壁上有一层向下流动的液膜，管子中心部分为向下流动的气核，这种流动结构称为带下降液膜的环状流动结构。如液相流量增大，气泡将进入液膜，形成带含泡下降液膜的环状流动结构。当气液两相流量都增大时会出现向下流动的块状流动结构。当气相流量继续增大，气液两相流可具有管壁上有下降液膜，管子中心部分为带液滴的下降气核的环状流动结构。这种环状流动结构和垂直上升气液两相流的环状结构相近，但流动方向相反。

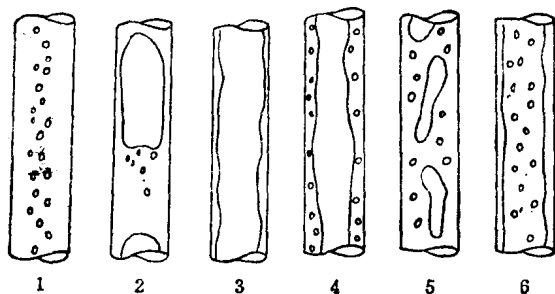


图 1-2 垂直下降气液两相流的流动结构

- 1—细胞状流动结构 2—弹状流动结构 3—带下降液膜的环状流动结构
4—带含泡下降液膜的环状流动结构 5—块状流动结构 6—环状流动结构

气液两相流体在水平管中的流动结构比在垂直管中的更为复杂，其主要特点为所有流动结构都不是轴对称的，这主要是由于重力的影响使较重的液相偏向于沿管子下部流动造成的。

试验研究表明，气液两相流在水平管中流动时，其基本流动结构有下列六种：细泡状流动结构、柱塞状流动结构、分层流动结构、波状流动结构、弹状流动结构和环状流动结构。

图 1-3 是这些流动结构的示意图。由图可见，这些流动结构分别具有下列特点。

1 细泡状流动结构

水平管中的细泡状流动结构和垂直管中的不同，由于重力的影响，细泡大都位于管子上部。

2 柱塞状流动结构

当气相流量增加时，小气泡合并成气塞，形成柱塞状流动结构。柱塞倾向于沿管子上部流动。

3 分层流动结构

当气液两相流量均小时会发生分层流动结构。此时气液两相之间存在一平滑分界面，气液两相分开流动。

4 波状流动结构

当气相流量较大时，气液两相分界面上会出现流动波，形成波状流动结构

5 弹状流动结构

当气相流量再增大时，气液两相流的流动结构可以从波状转变为弹状流动结构。此时，气液分界面由于剧烈波动而在某些部位直接和管子上部接触，将位于管子上部的气相分隔为气弹形成弹状流动结构。在水平流动时，气液两相流的气弹都沿管子上部流动。

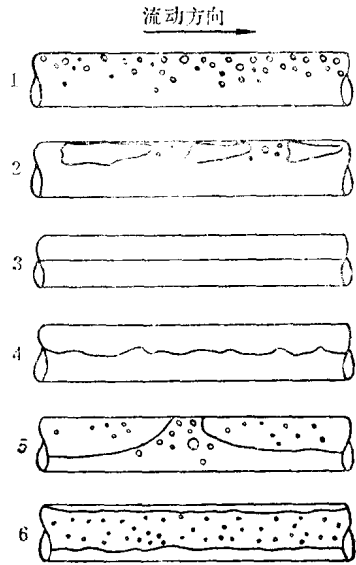


图 1-3 水平气液两相流的流动结构

1—细泡状流动结构 2—柱塞状流动结构 3—分层流动结构 4—波状流动结构 5—弹状流动结构 6—环状流动结构

6 环状流动结构

在水平流动时，气液两相流的环状流动结构出现于气相流量较高的工况。水平流动时的环状流动结构和垂直上升时的环状流动结构相近，管壁上有液膜，管子中心部分为带液滴的气核，但由于水平流动时重力的影响作用，下部管壁的液膜要比上部管壁的厚。

二 液液两相流的流动结构

液液两相流的流动结构和气液两相流的相近，但是，由于此时两相的粘性、密度以及两相分界面上的张力和气液两相流的不同，因而在流动结构上也存在一定的差别。

图 1-4 示有比重为 0.851 的油和水在垂直上升管中混合流动时的各种流动结构。随着油流量的增大，油水两相流逐渐由图示的细泡状流动结构、弹状流动结构，块状流动结构转变为零状流

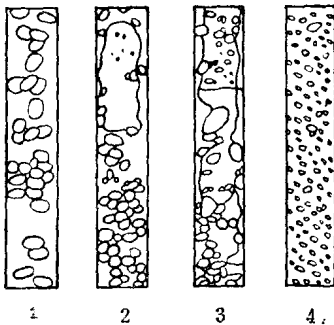


图 1-4 垂直上升油水两相流的流动结构

1—细泡状流动结构 2—弹状流动结构
3—块状流动结构 4—雾状流动结构

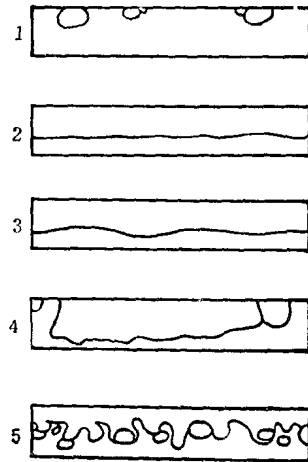


图 1-5 水平油水两相流的流动结构

1—细泡状流动结构 2—分层流动结构
3—波状流动结构 4—弹状流动结构 5—混合状流动结构

动结构。在图中呈细泡及弹状结构的工质为油，在雾状流动结构中，雾滴的工质为水。

图 1-5 是油水两相流在水平管中的各种流动结构示意图。当水流量较大而油流量较小时，油水两相的流动结构为细泡位于管子上部的细泡状流动结构。当水流量和油流量均小时，油水两相的流动结构为油在上面水在下面的分层流动结构。当水流量及油流量增大时，油水分界面发生波动，形成波状流动结构。当水流量再增大时，形成弹状流动结构。当水及油的流量均较大时，油水两相形成混合状流动结构。

图 1-5 所示的流动结构是油水两相密度相差较多时的流动结构。当液液两相的密度相近时，两相流动结构中的两相分布情况要比图 1-5 所示的均匀。

三 气固两相流的流动结构

气固两相流的流动结构也是很复杂的，不仅受到气固两相的物性、各相的含量、流速、压力变化以及管道形状和布置方式的影响，而且还受到固体颗粒尺寸的影响。

垂直上升气固两相流一般可以分为两类，即处于流化床工况的气固两相流和处于气力输送工况的气固两相流。

在流化床中，固体颗粒堆置在能使气体自下而上流过的床身上形成床层。当气体自下而上流入床层而流速又较低时，床层中的固体颗粒是静止的。这样的流动工况称为固定床流动工况。随着流速的增加，流体在床层两端的压力降也将增大。当床层两端压力降达到和床层物料的重量相等时，固体颗粒不再能保持静止状态。部分颗粒向上移动，造成床层膨胀，空隙加大。由于此时固体颗粒在气流作用下也转变成处于类似流体的运动状态，所以称为已处于流化状态。这种工况下的气固两相流就称为处于流化床工况的气固两相流。

由固定床工况刚转变为流化床工况的流动状态称为临界流化工况。此时的流化床称为临界流化床。临界流化床的床层均匀而平稳。