

山东科学技术出版社

吕砚山 张进明 著

气液两相流特征 参数的电子测量

气液两相流特征参数的电子测量

吕砚山 张进明 著

山东科学技术出版社

(鲁)新登字 05 号

气液两相流特征参数的电子测量

吕砚山 张进明 著

*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码 250002)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂临沂厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 4 插页 223 千字

1992 年 9 月第 1 版 1992 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—1000

ISBN 7—5331—0980—5/TP·11

定价:15.00 元

前 言

气液两相流广泛地存在于自然界和人类社会中。研究气液两相流的特性,并将之应用于发展国民经济和提高人们的生活水平,越来越受到学者们的重视。

在气液两相流的研究中迫切需要解决的一项难题就是测量。其所以迫切是因为没有第一手的数据,许多现象就难以认识,概念就难以建立,种种方程和模型也难以得到,要进行工程的优化设计和生产过程的自动控制是不可能的,而当前国民经济和科学技术的发展已经提出了急需解决这些问题的要求;其所以困难乃在于气液两相流需要测量的方面很多,包括流动参数(浓度、流量、压力等),传质、传热情况,流型以及特征参数(液滴和气泡的粒度分布、气泡速度和气含率、液膜厚度分布以及液体的停留时间分布等),并且还常常要求能够准确地给出许多参数的在线实时测量结果。考虑到测量对象处在复杂的运动状态,又常伴有传热、传质及化学反应同时并存的情况,这种测量的艰巨性是鲜而易见的。就当前水平而言,还没有一种理想手段足以完全解决气液两相流的全部测量要求。

多年来,国内外许多学者在解决这项难题上付出了艰苦的努力,做了大量的工作,发表了许多篇有见地的研究论文,给出了基于光学和电学等多种原理的测量方法和有关仪器设备。这些成果的综合应用,接近了使问题获得解决的目标。随着进一步提高测量精度,扩大测量范围,特别是实现能对工业生产过程进行自动地在线实时测量等要求的提出,需要进一步解决的问题还相当多。

在国内外同行们共同的努力之中,北京化工学院自动化系应用电测研究室自1983年开始与化学工程系合作,结合“精馏塔板的流体力学及传质性能研究”这一化工部科技发展计划项目,进行了气液两相流特征参数的电子测量技术研究工作。这项研究得到了国家自然科学基金的资助。1985年起,我们和日本东京理科大学电气工学科黑川研究室建立了密切的国际合作关系,共同研究这一课题。在传感器的机理分析、优化设计和信号处理等方面作出了成绩,研究成果通过了化工部的鉴定。在国内外学术刊物和学术会议上发表的多篇论文作为理论成果,获得了1988年国家教委科技进步二等奖。本书就是基于这些研究成果写成的。

写作本书的宗旨是,根据当前多相流研究和有关实际工作的需要以及还缺乏同类著作的情况,著者力求通过本书把有关气液两相流的液滴粒度及其分布、气泡参数(粒度及其分布、气含率和气泡运动速度)、液膜厚度以及液体停留时间分布等特征参数的电子测量技术——微机化自动在线实时测量系统,介绍给读者,并希望它能够起到应有的作用。

应当指出,尽管本书所介绍的内容是基于经过实践考验、较为成熟的东西,但难免会有一些错误或不妥之处。著者希望读者在阅读之余不吝赐教。

在上述研究和写作本书的过程中,承蒙日本仿真学会(JSST)会长、东京理科大学电气工学科主任黑川一夫教授和中国仪器仪表学会副理事长、清华大学电机系唐统一教授给予了指导和帮助。北京化工学院化学工程系傅举孚教授不仅从研究内容、设备条件等方面给予了支持和帮助,还请到了澳大利亚新南威尔士大学从事气液两相流研究的专家

C.J.D.Fell 教授亲临我们的研究室，对研究工作进行了指导；洪纯一和吴祥芝副教授、马润宇博士以及蔡建民、刘文庆、王鸿飞、张晏春等同志与著者密切合作，他们各自富有成效的工作，丰富了本书的内容；本书初稿中有关数学内容承北京化工学院数理系蒋中蠡副教授仔细审阅，提出了宝贵的意见；部分插图承北京电视技术研究所蔡英工程师绘制，著者向他（她）们深致谢意。

本书作为一项研究理论成果，是在国家自然科学基金委员会的资助下完成的。在该书出版问世之时，著者怀着感激之情向国家自然科学基金委员会表示敬意。

著 者

1991 年 6 月

目 录

第一章 测量对象及其特征	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 气液两相流的流动状态	(2)
第三节 颗粒的平均尺寸和尺寸分布特性	(5)
第四节 特征参数及测量要求	(8)
第二章 液滴粒度的电子探针法测量技术	(10)
第一节 概述	(10)
第二节 电子探针法及其对喷射状态下筛板塔内液滴粒度分布的测量结果	(12)
第三节 传感器的物理和数学模型	(14)
第四节 实验结果及讨论	(25)
第五节 参数影响和优化设计	(28)
第六节 液滴粒度随机信号的处理	(30)
第七节 标定和干扰的防护	(36)
第八节 双探针法测量液滴粒度分布	(39)
第三章 气泡参数的电导探针法测量技术	(47)
第一节 概述	(47)
第二节 电导双探针传感器	(49)
第三节 气泡参数的测定	(52)
第四节 信号检测及处理电路	(58)
第五节 信号处理软件	(63)
第六节 标定方法及实验结果	(66)
第七节 三维电导探针法测量气泡参数	(70)
第四章 液膜厚度的电子测量技术	(75)
第一节 概述	(75)
第二节 电阻抗法测膜厚的基本原理	(76)
第三节 电阻抗传感器的数学模型	(77)
第四节 传感器的优化设计	(85)
第五节 电导模式的信号处理电路	(87)
第六节 电容模式的信号处理电路	(89)
第七节 微机化自动在线实时测量系统及其测试结果	(92)
第八节 标定方法	(94)
第五章 液体停留时间分布函数的测量技术	(95)
第一节 概述	(95)
第二节 光纤示踪法的工作原理	(98)

第三节	光纤示踪仪的硬件构成	(99)
第四节	光纤示踪仪的标定	(101)
第五节	数据处理软件	(102)
第六节	应用及测量结果	(106)
第六章	特征参数测量的其他方法	(108)
第一节	概述	(108)
第二节	液滴或其他颗粒粒度分布测量的激光光散射法	(110)
第三节	气泡和液滴粒度分布测量的毛细管光电法	(112)
第四节	气泡参数测量的光纤探针法	(115)
附录		(120)
一、	电子探针电路的计算机辅助分析程序	(120)
二、	液滴粒度的数据采集及处理程序	(123)
三、	双探针法计算概率密度函数的程序	(126)
四、	气泡参数数据处理程序	(127)
五、	液膜厚度测量系统信号处理程序	(133)
六、	停留时间分布数据采集处理程序	(137)
七、	光纤探针几何结构的优化设计程序	(140)
八、	主要符号	(146)
参考文献		(150)

第一章 测量对象及其特征

第一节 概 述

气液两相流是两相流（含气液两相流、气固两相流、液固两相流和液液两相流等类别）的一种。它是由气、液两相混合物构成的两相共存并相互作用的流动体。这种气液两相流现象，在自然界和人们的生活中是常见的。大气层中形态各异的种种云雾，地面上雷霆万钧的降雨过程，在这些司空见惯的现象中包含着夹带水滴的大气运动，这便是气液两相流之一例。江河湖海水面上蒸腾的水雾、高山悬崖峭壁间奔泻的瀑布，以及火山爆发、油气井喷的喷发流动物中也都不难看到气液两相流的存在。至于人们日常生活中，由于衣食住行而接触到气液两相流的情况更是比比皆是。

气液两相混合物在相接触设备（例如传质设备、搅拌设备等）和管道中的流动是化学工业和石油工业生产中大量存在的现象。在各种蒸发器、再沸器、冷凝器、气液反应器中都会遇到气液两相流动。在油田生产和油气输送过程中也离不开油、气作为两相在管道中流动。在能源工业中的大功率蒸汽透平和轻水反应堆核电站的湿蒸汽透平赖以工作的湿蒸汽两相流，动力机械中的各种燃料油发动机喷油系统中空气与雾化燃油混合物在燃烧室内的运动，锅炉汽水管路中存在的各种汽水比例下混合物的运动以及地热动力装置中热井管口的汽水混合物的运动等，都是气液两相流的重要体现。至于农业、畜牧、水产等行业的发展，目前在很大程度上有赖于风调雨顺，即需要有一定的大气流动（气液两相流之一）为条件。

了解并掌握气液两相流的种种特性，使之为生产实践服务，以提高产品的数量和质量，改善人们的生活水平，是很有意义的。为此，必须对气液两相流进行测量。这里列举测量气液两相流特征参数的几例需求加以说明。例如，能够准确地测知在喷射工况下操作的气液两相接触设备内的液滴粒度及其分布，对于了解精馏塔这类石油、化工分离设备的流体力学特性及传质性能，进而改善工程设计或工艺操作，以获取更高的经济效益具有重要的作用；在燃气轮发动机、电站锅炉、内燃机、涡轮喷气发动机等动力机械的燃料燃烧过程中，如能掌握液雾中燃料液滴的平均粒度、粒度分布和空间分布，据以设法增大其总体表面积，就可提高传热、传质速率，加快燃烧过程，提高燃烧效率。在化工生产中，当沸腾床内运行在鼓泡区时，床内流体的动力特性几乎完全由气泡决定；气泡对鼓泡塔、生物发酵罐、流化床以及带搅拌的釜式气液反应器等化工设备的生产过程，也具有重要的影响。故在这些情形下，测知气泡大小及其概率分布等特性，是十分重要的。在压水核反应堆失水事故处理过程中，需将应急冷却水注入反应堆，以便在高温高压下部分汽化，部分以液膜形式带走芯棒热量。为合理设计核反应堆，以防液膜破裂造成重大事故，必须测知液膜厚度。而在筛板塔中，为了区分气液两相流的泡沫状态和喷射状态，测知液体的停留时间分布则是十分重要的。

第二节 气液两相流的流动状态

为了对气液两相流的特征参数进行测量,首先必须了解它们的流动状态,即流型。气液混合物在容器或管道中的流动是工业生产中气液两相流存在的常见情形。这里阐述的气液两相流动状态,主要针对在管道和在相接触设备中的气液两相流而言。

一、管道中的气液两相流动状态

当气液两相流在管道中流动时,根据流动条件的不同,可以产生不同的流型。流型不同,其特征参数及测量的要求随之而异。学者们对流型的描述和划分不尽相同,大致有以下几种情形。

1. 气液两相流在垂直管道中向上流动

在这种情况下,其典型的流型如图 1-1 所示。各流型的特点如下。

(1) 气泡流 (Bubble Flow): 气体以不同尺寸的小气泡形式离散在向上流动的液体中。显然,此时气体为离散相,而液体为连续相。随着气速的增加,气泡尺寸增大、个数增多。

(2) 柱塞流 (Slug or Plug Flow): 在气泡流中当气泡的浓度增高时,气泡聚合为直径接近于管内径的弹丸状气泡,其端部呈抛物线形。在这些弹丸状气泡之间可有带小气泡的液团。当气泡快速上升时,液体在气泡与管壁间的间隙中流动。

(3) 乳沫流 (Churn Flow): 当气流速度进一步增大时,柱塞流中的气泡速度亦增大并破裂、变形,和液体混合成为一种不稳定的湍动混合物。此时气液两相皆为离散相。

(4) 环状流 (Annular Flow): 液流沿着管道的内壁形成一层薄膜,而气流则在管道中央流动。这样,气液两相皆成为连续相。不过,在这种情形下,管道中央的气体通常还夹带着一些液滴一起流动。

(5) 束状环状流 (Wispy-annular Flow): 当液流速度增高时,环状流中气体夹带的液滴浓度增大,最终聚集成离散团的液滴束在管中央的气流中运动。而沿着管的内壁则是含气泡的液膜在流动。

上述各种流型各在什么条件下会出现,可以用流型图来判定。1969 年 Hewitt 和 Roberts^[1-1] 指出,沿垂直管道向上流动的气流两相流可按图 1-2 所示的流型图来判定其流型。图中横轴与纵轴分别表示气相表面动量通量 $\rho_G (V_G)^2$ 和液相表面动量通量 $\rho_L (V_L)^2$

2. 气液两相流在水平管道中流动

与在垂直管道中的情况稍有不同(但仍有其十分明显的对应性),在水平管道中气液两相流的流型如图 1-3 所示。各流型的特点如下。

(1) 气泡流 (Bubble Flow): 气体以大小不同的气泡形式分散在管道上部液体中流动,而液体则在管道下部连续地流动,气、液两相速度大致相等。当液速很大时,气泡可

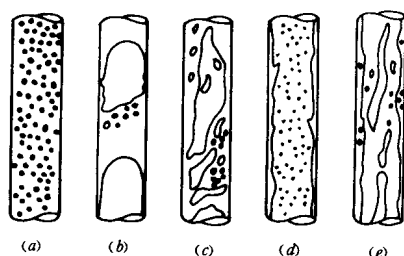


图 1-1 气液两相流在垂直管道中向上流动时的流型

(a) 气泡流; (b) 柱塞流; (c) 浮沫流;
(d) 环状流; (e) 束状环状流

在整个连续的液相中离散、流动。

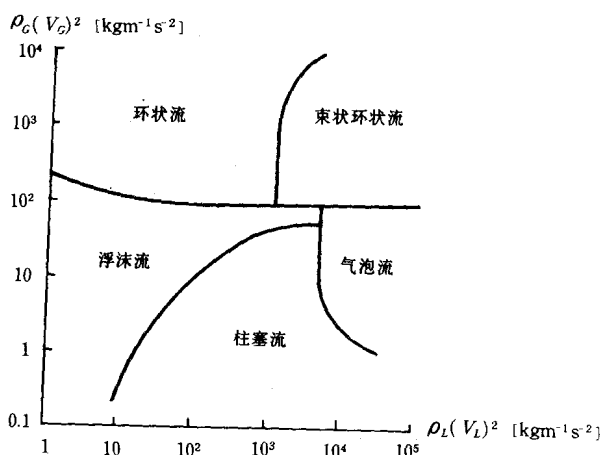


图 1—2 Hewitt 和 Roberts 流型图

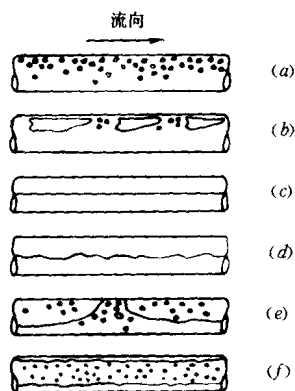


图 1—3 气液两相流在水平管道中的流型

(a) 气泡流; (b) 气柱流; (c) 层流; (d) 波状流; (e) 团状流; (f) 环状流

(2) 气柱流 (Plug Flow): 由小气泡聚合成弹丸状的气柱, 但与在垂直管中不同的是, 它沿着管道的上部成柱塞式流动。

(3) 层流 (Stratified Flow): 气液两相流完全分层, 液流沿管道下部, 而气流则沿管道上部流动。显然, 此时气、液两相皆为连续相。

(4) 波状流 (Wavy Flow): 当层流中的气体速度增大时, 则在气液两相的界面上形成若干波浪而变成波状流。车速越大, 波浪也越高。

(5) 团状流 (Slug Flow): 此时高速的气流把液流的波浪冲刷掉, 而气流则夹带着较大的泡沫团周期性地液面上快速流过。

(6) 环状流 (Annular Flow): 存在于高速气流的情况下, 与在垂直管中的情况相类似的是, 在管中央的气体中夹带有液滴而流动。其不同的是, 由于重力作用的结果, 在管内壁上形成的液膜, 底部较厚而顶部则较薄。

在水平管道中流动的气液两相流, 可按 1974 年由 Mandhane⁽¹⁻⁶⁾ 给出的流型图 (图 1-4) 判定其流型。图中横轴和纵轴分别表示表观气速 V_{SG} 和表观液速 V_{SL} 。

二、相接触设备中的气液两相流动状态

相接触设备是工业生产中另一类常见的重要设备。例如化工中用以蒸馏、吸收、洗涤、增减湿以及气液的直接接触换热等过程的气液接触设备 (板式塔、填料塔等), 以及用以进行制备均匀混合物、促进传质传热和某些化学反应的搅拌设备等。在这些设备中, 随着流动条件的不同, 气液两相流也会产生不同的流动状态, 从而提出不同的测量要求。下面以筛板塔为例说明。

由于测试方法和实验设备条件的不同, 筛板塔中塔板上的气液两相流动状态的确定, 至今尚无统一的结论。例如, G.E.Ho, R.L.Maller 和 R.G.H.Prince⁽¹⁻¹⁰⁾ 在直径约为 100mm

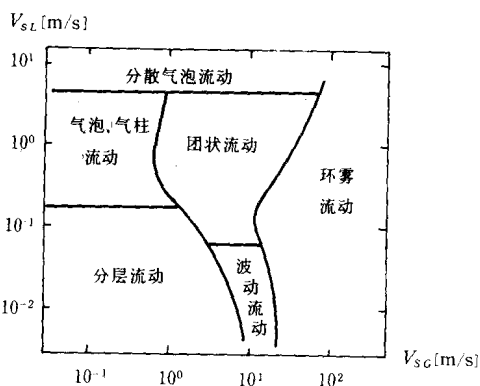


图 1—4 Mandhane 流型图

的小塔中观察到某一液体负荷下，随着气速的增加，可依次出现四种不同的气液接触状态：自由鼓泡、蜂巢状鼓泡、泡沫和喷射。而 P.A.M.Hofhuis 和 F.J.Zuiderweg^{〔1-11〕} 则在直径为 1000mm 的筛板塔中发现，随着气液负荷的不同，会出现乳化、自由鼓泡、混合泡沫及喷射四种状态。马润宇^{〔1-9〕} 在截面为 1200×600mm 的大型筛板塔中所做的实验研究表明，塔板上随操作条件的不同，可出现自由鼓泡、蜂巢状鼓泡、泡沫和喷射四种状态。

尽管如此。但对筛板塔而言，泡沫状态和喷射状态这两种状态最具实际意义。在泡沫状态下，两相流中的液体是以连续相方式由塔板入口逐步推进到塔板出口堰，然后溢流至降液管中。由塔底入口进入塔内的气体则以离散的气泡形式穿过在塔板上连续流动的液流。

在喷射状态下，液体由上游降液管流入塔板后，在第一排筛孔处即有部分液体被高速气流曳带、破裂，形成离散的液滴，朝下游方向斜上方抛出。因液滴群中各液滴的初速度不同，故形成不同的抛射弹道，高速者可直达下游降液管或飞抵上层塔板，低速者则落回塔板的后排筛孔处。塔板入口的液流依次被若干排筛孔完全雾化后，再往后的筛孔排可能出现干板情况，或者由下落的液滴提供再次雾化的液体来源。在喷射状态下抛射液滴的情形如图 1-5 所示。

对于在筛板塔中液滴形成的机理，据 G.E.Ho^{〔1-10〕} 等人的研究可归纳为以下三种情形：

1. 在泡沫状态下，由于液层中的气泡内压大于大气压力，当其上升到表层破裂时会形成小滴并向上抛出。这种液滴尺寸较小，一般数量级为 100 μ m 左右，其终端速度大都小于塔内表观气速，故多被上升气流夹带到上层塔板。

2. 在气泡破裂的瞬间使液滴表面出现陷穴，陷穴迅速闭合时会弹出较大液滴，但其抛射速度不大。

3. 在喷射状态下，由于气体高速通过筛孔形成脉冲喷射气流，液体受到气流摩擦力的作用，被拉扯成膜片、系带以至破裂形成液滴。这种液滴的尺寸分布较宽，其抛射速度介于孔速和表观气速之间，例如当孔速为 25m/s、表观气速为 2.5m/s 时，液滴抛射速度约为 6~10m/s。

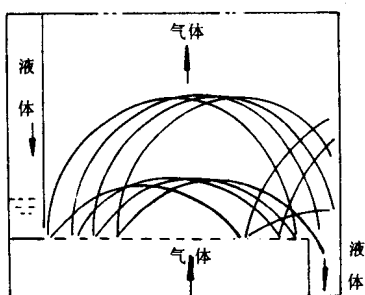


图 1-5 液滴抛射示意图

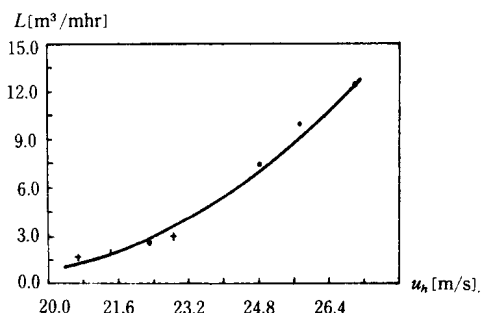


图 1-6 泡沫——喷射状态关系曲线

根据在泡沫状态和喷射状态下液体运动方式不同，从而造成液体的停留时间分布的差异，可用以判定这两种不同的状态。例如，泡沫状态下，在下游测得的平均停留时间必较上游为长（不考虑倒流及死区等）；而喷射状态下，则可能出现相反情况。（关于测定液体的停留时间分布的方法，详见第五章）

图 1-6 表示 1988 年马润宇^{〔1-9〕} 给出的筛板塔中泡沫——喷射状态转变点的关系曲线。图中 u_h 表示筛孔气速。 L 表示液流强度。

第三节 颗粒的平均尺寸和尺寸分布特性

与两相流的一定流动状态相适应，会出现各种不同形式的气泡和液滴。如果涉及到气固和液固两相流，则还会有各种固体颗粒。鉴于本书中所提供的测量手段，从原理上对于它们的测量是同样适用的，为了研究方便，在这里将它们统称之为颗粒。这些颗粒的平均尺寸和尺寸分布对两相流有重要的影响，是测量中必须解决的问题。

一、平均尺寸

颗粒的形状并非完全为圆球形，但根据第二章第四节和第七节中所介绍的，液滴由于表面张力作用，在所测粒径范围内基本上可以认为是球形。气泡的情形也可这样认识（详见第三章）。因此，它们的尺寸就可以直径（或粒度、粒径）衡量。至于推广到固体颗粒，其形状当然是不规则的。这时所谓粒径一般指按体积折算成的直径而言。

颗粒的平均直径指对一种颗粒群而言。其意义为用一个假想的尺寸相同的均匀颗粒群去替代实际的尺寸不同的非均匀颗粒群，条件是保持它们的某种特征量不变。由此，可产生若干不同的定义。常用的定义如下：

1. Sauter 平均直径 (D_{32} 或 SMD)

其定义为：当用一个直径均为 D_{32} 的均匀颗粒群来替代原不均匀颗粒群时，使两种情况下的总体积和总表面积之比不变。据此，设实际颗粒群的总体积为 V_{pr} ，总表面积为 S_{pr} ，任一颗粒的直径为 D ，颗粒群中最大颗粒的直径为 D_{max} ，颗粒数的增量为 dN ，则有

$$V_{pr} = \frac{\pi}{6} \int_0^{D_{max}} D^3 dN \quad (1-1)$$

$$S_{pr} = \pi \int_0^{D_{max}} D^2 dN \quad (1-2)$$

$$\frac{V_{pr}}{S_{pr}} = \frac{\int_0^{D_{max}} D^3 dN}{6 \int_0^{D_{max}} D^2 dN} \quad (1-3)$$

再令均匀颗粒群的总体积和总表面积分别为 V 和 S ，颗粒数仍为 N ，从而有

$$V = N \cdot \frac{\pi}{6} (D_{32})^3 \quad (1-4)$$

$$S = N \cdot \pi (D_{32})^2 \quad (1-5)$$

$$\frac{V}{S} = \frac{1}{6} (D_{32}) \quad (1-6)$$

按定义可求得 D_{32} 的一般表达式为

$$D_{32} = \frac{\int_0^{D_{max}} D^3 dN}{\int_0^{D_{max}} D^2 dN} \quad (1-7)$$

2. 总体积和颗粒总数不变的平均直径 (D_{30})

其定义为：以平均直径为 D_{30} 的均匀颗粒群替代不均匀颗粒群，使两者的颗粒总数和总体积保持不变。据此，实际颗粒群的总体积为

$$V_{pr} = \int_0^{D_{max}} \frac{\pi}{6} D^3 dN \quad (1-8)$$

而均匀颗粒群的总体积为

$$V = \frac{\pi}{6} (D_{30})^3 \cdot N \quad (1-9)$$

在式 (1-8) 和 (1-9) 中, dN 是颗粒数的增量, N 为颗粒总数。考虑到两种情况下的粒子数相等, 即 $N = \int_0^{D_{max}} dN$ 则根据定义不难求得

$$D_{30} = \left[\frac{\int_0^{D_{max}} D^3 dN}{\int_0^{D_{max}} dN} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1-10)$$

3. 质量中间直径 (MMD)①

其定义为: 在直径 MMD 以上或以下, 颗粒的累积质量百分数相等, 即各占 50%。据此, 质量中间直径可以由颗粒的质量频率分布数据直接求出。

二、尺寸分布

在一般情况下, 由于两相流的颗粒群中各颗粒的尺寸是不均匀的, 故除了需知颗粒的平均尺寸之外, 还必须掌握颗粒的尺寸分布。颗粒的尺寸分布是针对在一定的空间上若干时间间隔内的颗粒统计数字而言。虽然现在尚难于从理论上准确地建立这种尺寸分布的具体表达式, 而大多需借助于实验数据的经验关联, 但基于物理规律就这些颗粒尺寸分布的一般规律而言, 可有四种数学表达式供作参考。它们是: Rosin-Rammler 分布函数 (简称 R-R 分布函数); 带上限的对数正态分布函数; 正态分布函数以及对数正态分布函数。在采用这些表达式时, 都认定实际的颗粒群中其颗粒尺寸的分布是连续的。下面对这四种表达方式加以介绍。

1. R-R 分布

其表达式为

$$V = \exp \left[- \left(\frac{D}{\bar{x}} \right)^K \right] \quad (1-11)$$

式中: V 表示大于颗粒直径 D 的颗粒体积占颗粒总体积的百分数 (或称大于直径 D 的粒子累积容积百分数); D 为颗粒直径; K 为表征颗粒群中颗粒尺寸分布特性的参数, K 值越大, 粒子尺寸分布就越均匀, 当 K 为无穷大时, 颗粒就变成单一尺寸的了; $\bar{x}$ 为特征尺寸, 它表示大于这个尺寸的粒子体积占总体积的 36.8%, 此由式 (1-11) 可知, 当 $\bar{x} = D$ 时, $V = 0.368$ 。

通常, 对这种 R-R 分布还以 V 对 D 的一次导函数形式来表示, 即

$$\frac{dV}{dD} = - \frac{K}{\bar{x}} \left(\frac{D}{\bar{x}} \right)^{K-1} \exp \left[- \left(\frac{D}{\bar{x}} \right)^K \right] \quad (1-12)$$

为观察方便, 在图 1-7 中画出了 $-\frac{dV}{dD}$ 与 D 的关系曲线。由此图可以看出, 横轴上 $\bar{x}$ 右边曲

① Mass Medium Diameter

线下的面积占总面积的 36.8%，而左边则占 63.2%。

对于按这种 R-R 分布的颗粒群，可求得其 Sauter 平均直径为

$$D_{32} = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 - \frac{1}{K}\right)} \quad (1-13)$$

式中：Γ 为伽玛函数。

总体积和颗粒总数不变的平均直径为

$$D_{30} = \frac{\bar{x}}{\left[\Gamma\left(1 - \frac{3}{K}\right)\right]^{\frac{1}{3}}} \quad (1-14)$$

质量中间直径为

$$\text{MMD} = (0.693)^{\frac{1}{K}} \cdot \bar{x} \quad (1-15)$$

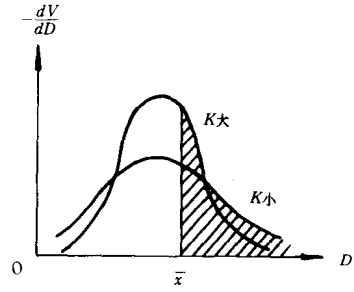


图 1-7 R-R 分布曲线

2. 上限对数正态分布函数

上限对数正态分布函数为对数正态分布函数的改进形式，其容积频率分布函数的表达式为

$$\frac{dV}{dY} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-16)$$

式中：

$$Y = \ln\left(\frac{aD}{D_{\max} - D}\right) \quad (1-17)$$

σ 为表征液滴尺寸离散程度的参数或称标准偏差；a 为尺寸参数，其意义为最大颗粒直径与 D_{30} 之差与 D_{30} 之比，即

$$a = \frac{D_{\max} - D_{30}}{D_{30}} \quad (1-18)$$

由式 (1-16) 与式 (1-17) 还可将容积频率分布函数表示为

$$\frac{dV}{dD} = \frac{D_{\max}}{\sqrt{2\pi}\sigma D (D_{\max} - D)} \exp\left\{-\left[\frac{\ln\left(\frac{aD}{D_{\max} - D}\right)}{\sqrt{2}\sigma}\right]^2\right\} \quad (1-19)$$

对于按上限对数正态分布的颗粒群，其颗粒的 Sauter 平均直径为

$$D_{32} = \frac{D_{\max}}{1 + a \left[\exp\left(-\frac{\sigma^2}{2}\right) \right]} \quad (1-20)$$

总体积和颗粒总数不变的平均直径为

$$D_{30} = \frac{D_{\max}}{\left[1 + 3a \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right) + 3a^2 \exp(2\sigma^2) + 3a^3 \exp\left(\frac{9}{2}\sigma^2\right)\right]^{\frac{1}{3}}} \quad (1-21)$$

质量中间直径为

$$\text{MMD} = \frac{D_{\max}}{1+a} \quad (1-22)$$

3. 正态分布 (Gauss 分布) 函数

正态分布函数的容积频率分布函数表达式:

$$\frac{dV}{dD} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{D-\bar{x}}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1-23)$$

式中: $\bar{x}$ 为尺寸参数, 在数学上称作期望值, 它决定了分布的位置, 且在很大程度上决定了平均尺寸; σ 为标准偏差, 它决定了分布的宽度。

正态分布函数曲线如图 1-8 所示。在尺寸带 $(\bar{x}-\sigma)$ 至 $(\bar{x}+\sigma)$ 范围内, 曲线围成的面积为 68.3%。

4. 对数正态分布函数

此函数是由正态分布函数演变而来, 即把正态分布函数中的各参数取对数后得到。其相应形式为

$$\frac{dV}{dD} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln D - \ln \bar{x}}{\ln \sigma}\right)^2\right] \quad (1-24)$$

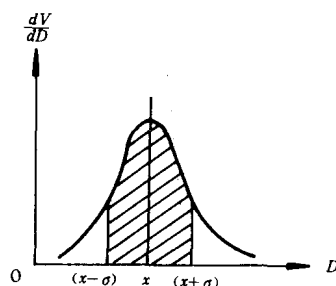


图 1-8 正态分布曲线

第四节 特征参数及测量要求

在本章第二节中已经说明, 根据流动条件的不同, 气液两相流可有不同的流型。流型不同, 标志其形态的特征参数和测量要求随之而异。特征参数意为表征具有一定流型的气液两相流中某相物质的面貌和行为的若干机械性物理量。例如, 在筛板塔内喷射状态下, 气体为连续相而液体为分散相时, 液滴的面貌和行为是一种极需得知的重要问题。由此提出了测量液滴粒度及其分布的要求。在气液混合搅拌器中, 常常是液体为连续相而气体则以气泡形式作为离散相。这时, 气泡的面貌及行为就变成了突出的问题。由此, 产生了测量气泡的大小及其分布的要求。此外, 还常常伴随要求测知气泡的运动速度和气含率。

如果在气液两相流中, 气液两相均为连续相时, 例如在水平或垂直管道中处于环状流型下, 管道内壁上所形成的薄层液膜情况, 极受人们关注。这时, 测量这层液膜的厚度及其分布成了首要解决的问题。

与上述特征参数的测量密切相关, 还有一个流型的判定问题, 也要基于测量加以解决。例如筛板塔中气液两相流的流型测定。这个问题, 自从本世纪 60 年代开始出现了大孔径筛板, 且生产不断强化之后, 备受国内外学者们的注意。因此, 在所研究测量的特征参数之中, 还应包含液体的停留时间分布, 以便据以判定流型。

这些测量要求的解决, 可以采用多种测量方法按其工作的物理基础划分为非电测量方法和电气测量方法两大类。前者包括光学、热学、机械等方法, 详见于第六章; 后者, 电气测量方法更准确地说应称之为非电量的电气测量方法, 实施这种方法, 具有熟知的诸如测量准确、灵敏、反应迅速、方法简便且便于控制等优点, 特别是由于被测量能以电气信

号来反映，极便于采用电子技术乃至电子计算机来进行处理，从而实现自动在线实时测量，这是电子测量方法之所以备受重视的原因所在。

第二章 液滴粒度的电子探针法测量技术

第一节 概 述

在液滴或其他颗粒的粒度测量技术中,电测法由于具有一些明显的优点而备受人们的重视。多年来,国内外许多学者在这方面做了大量的研究工作。电测方法中当前应用较广,并且行之有效的方法之一是电子探针法。电子探针法中就所用探针的根数而言,可分单电子探针法(简称单探针法)和双电子探针法(简称双探针法)。单探针法的实质是令待测的液滴或固体颗粒与作为检测元件的探针发生碰撞,使探针产生一电脉冲信号反映粒度大小。而双探针法则是通过测量液滴的脉冲速率函数,计算出反映粒度分布的概率密度函数。不论对单探针法或双探针法,所检测的液滴必须具有一定的导电性,这在很多情况下,是能够满足的要求(详见本章第四节)。双探针法将在本章第八节专门介绍,第一节至第七节着重介绍单探针法,为叙述方便,以下将它称作电子探针法。

对电子探针法的研究可以追溯到 A.C.Guyton^[2-7]的工作。1946 年,他报告了设法让一团云雾通过一根管子,使雾中小的颗粒带有静电,然后再高速喷射到一根检测用的导线上。当颗粒撞击此导线时,即产生一电脉冲信号。它的研究表明,脉冲信号的幅值 U_{om} 与颗粒带电量有关,而后者则与颗粒粒度 D 的平方成正比。

J.M.Geist, J.L.York 和 G.G.Brown^[2-1]改进了 Guyton 的测量方法。1951 年他们提出了在一根由金属丝构成的探针上,使之具有一定的正电位,令待测的金属小球或导电液滴碰撞此探针,使之输出电脉冲。他们用粒径为 $500 \sim 6340 \mu\text{m}$ 的水滴的测量结果是 $U_{om} \propto D^{1.6}$ 。还发现 U_{om} 与加到探针上的电压成正比;大小相同的颗粒碰撞探针上的不同位置时所产生的 U_{om} 有差异:越靠近针尖, U_{om} 越大。他们认为这是由于探针电荷分布不均匀造成的。Geist 等人还对同样大小的水、丙酮、酒精液滴和钢球、锡球进行了测试,发现具有相同粒度的导电水滴和金属球撞击探针时所产生的 U_{om} 仅有微小的差别,而不导电的酒精、丙酮液滴所产生的 U_{om} 则小的多。这表明导电颗粒撞击探针所产生的响应基本上与材质无关。

Geist 等人的测量装置框图,如图 2—1 所示。J.D.Parker 和 R.J.Grosk^[2-2]以及 D.F.Tatterson^[2-3]试图通过改变探针形状来解决上述 U_{om} 受碰撞位置影响的问题。他们采用一金属小球构成球形探针,从而使球面上电荷均匀分布。Parker 和 Grosk 将球形探针用于测量管道内雾流中的液滴粒度分布,其装置框图如图 2—2 所示。此法存在的问题是液滴易在小球周围累积形成大滴或液层,导致测量误差。

此后, J.A.Gardiner^[2-4]、W.M.Steen 和 A.Chatterjee^[2-5]又对针形探针进行了研究。Gardiner 等曾在探针尖端套以一段塑料管,试图避免在这段电荷密度较大的部位进行采集,以杜绝误差,但效果不明显。Steen 和 Chatterjee 的研究结果还表明: $U_{om} \propto D^2$ 。这一点和 Guyton 的结果相同。Steen 和 Chatterjee 的说明是:当 D 远大于探针直径时, $U_{om} \propto D$; 而当 D 与探针直径相近时,则 $U_{om} \propto D^2$ 。