

石油工程 多相流体力学

国丽萍 刘承婷 刘保君 编著
韩洪升 主审

SHIYOU GONGCHENG DUOXIANG LIUTI LIXUE

中国石化出版社
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

石油工程多相流体力学

国丽萍 刘承婷 刘保君 编著
韩洪升 主审

中国石化出版社

内 容 提 要

本书从多相流模型出发,介绍了多相流动的基本概念、基本方程,水平、垂直、倾斜管中的流型及其各种情况下流型识别和判别方法,工程中常用于水平、垂直、倾斜管中多相混输的水力计算模型,多相流计量技术等。并结合在石油工业中的应用情况,增加了石油工程领域常用的多相流体流动理论及最新研究成果。

本书可作为石油高等院校相关专业的教材和油田生产相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程多相流体力学 / 国丽萍,刘承婷,刘保君编著;
韩洪升主审. —北京:中国石化出版社,2011. 8
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1133 - 4

I. ①石… II. ①国… ②刘… ③刘… ④韩…
III. ①石油工程 - 多相流体力学 IV. ①TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 165650 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式
或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 11 印张 268 千字

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前言

多相流体力学是以多相流体为研究对象，在工程热物理学的基础上，与数学、力学、信息、生物、环保、材料、电子计算机等多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。在石油行业中，多相流体是很常见的，如采出液中含有油气水三相，钻井过程中的泥浆为液固两相等。因此，多相流体力学在石油工业中应用广泛，是石油工程及其相关专业一门重要的专业课。本书从多相流模型入手，介绍其基本方程、各种管流中的流型及其判别方法、各种水力计算模型和多相流计量等内容。全书还增加了近年来多相流领域研究的新成果和新进展。

本书的第一章、第五章和附录由刘保君、马文国编写，第二章由马文国、刘保君编写，第三章由刘承婷、国丽萍编写，第四章由国丽萍、刘承婷编写，全书由国丽萍统稿、修改并定稿，韩洪升教授审阅。东北石油大学石油工程学院流体力学教研室为本书的编写提出了很好的建议，韩雪松等研究生也做了不少辅助工作。本书还得到了中国石化出版社的关心和鼎力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免会有一些疏漏和不足，恳请读者不吝批评指正，以便以后不断改进。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 多相流动的定义及其分类	(1)
第二节 多相流技术的发展及其在石油工业上的应用	(3)
第三节 多相流的基本术语与定义	(6)
第二章 多相流管流的基本方程	(12)
第一节 均相流模型的基本方程	(12)
第二节 分相流模型的基本方程	(19)
第三节 漂移流模型的基本方程	(23)
第三章 流型及流型识别	(26)
第一节 流型测定方法简介	(26)
第二节 水平管中的流型	(28)
第三节 垂直管中的流型	(39)
第四节 倾斜管中的流型	(42)
第五节 统一的流型判别方法	(50)
第四章 常用多相混输水力计算模型	(66)
第一节 摩擦阻力的压降分析	(66)
第二节 水平管流的常用方法	(75)
第三节 垂直管流的常用方法	(93)
第四节 倾斜管流的常用方法	(128)
第五节 局部阻力的计算方法	(148)
第五章 多相流的计量	(153)
第一节 多相流计量的方法	(153)
第二节 多相流流速测量技术	(154)
第三节 几种典型的流量计	(156)
参考文献	(162)
主要符号表	(164)
附录	(167)

第一章 绪 论

多相流体系广泛存在于化工、石油、能源、冶金、环保和轻工等很多行业领域，而多相流学科是以多相流系统为研究对象，在工程热物理学的基础上，与数学、力学、信息、生物、环保、材料、电子计算机等多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，多相流技术在科学研究、工业制造、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。

第一节 多相流动的定义及其分类

一、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。例如：空气是一相；水和水蒸气共处于某一系统时属于两相；含盐水溶液是一相。

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气、液、固混合流动。

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，它们之间也存在相界面，但相界面不是运动的，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；气体总是均匀充满整个容器，其形状和体积是由容器的体积和形状决定的，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，有时可能成为一种单相流体，如水与酒精的混合物；有时则不能，例如水和水银的混合。因此，各种液体的混合可能是单相流，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。

二、多相流的分类

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。

在两相流研究中,把物质分为连续介质和分散介质。气体和液体可作为连续介质或连续相,也可作为分散介质或分散相。如:液滴和气泡属分散相。固体颗粒只能作为分散介质。按连续介质和分散介质不同的组合方式,两相流动可分为以下四类:

(1) 气体-固体颗粒的两相流动,称气-固两相流动。如气体除尘,散装运粮船只的装卸常靠气体运送粮食,天然气以固体水合物状态的输送。

(2) 气体-液体两相流动,称气-液两相流动。如锅炉沸腾管内水和水蒸气的共流,加热炉燃料油喷雾雾化,石油天然气混输等。

(3) 液体-固体颗粒两相流动,称液-固两相流动。如矿浆、煤浆的管道输送,就属于液固两相流动,水加沙高速喷射金属切割。

(4) 液体-液滴两相流动,称液-液两相流动。如石油乳状液的运动,油田含油污水流经工艺流程的运动等。

在上述四类两相流动中,气液两相流是最复杂的,这是由于:在气液共流中,其交界面的形状不断改变,无规律可循;气相具有可压缩性;随输送条件(压力,温度)的变化,气液相间产生蒸发,冷凝,即相间有质量传递。

按物质组分的不同,气液两相流又可分为两类,即:单组分气液两相流和多组分气液两相流。水和水蒸气共流属于典型的单组分气液两相流,从油井流至地面的石油,常为伴生气和液态原油两相,它是烃类和非烃类的复杂混合物,属多组分气液两相流。

油井产物中常含有水,有时还存在沙子。因此石油沿管的流动,尽管主要属于气液两相流,实际还包括液液(油-水)甚至液固(油-水-沙)的流动。应该说是最复杂的多相流动。一般研究先从问题的主要方面入手,即先讨论气液两相的问题。三相和三相以上的流动称为多相流。

还可以根据参与流动的各组分对多相流进行分类。以气液两相流为例,可以分为单组分气液两相流和双组分气液两相流。例如,水蒸气 and 水的组分是相同的,所以气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强的变化可发生质量传递,即部分液体能气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。

根据换热情况的不同,多相流还可以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。在有热量交换的多相流中,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是属于多相流的范畴。

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是含有少量空气。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。

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的尺寸不同,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烧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,如水泥浆、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于液固两相流的范畴。

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)。化工工程常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、气体和水外还夹有砂粒,这种流体的流动就属于四相流。

第二节 多相流技术的发展及其在石油工业上的应用

一、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。

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,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。但是总的来说,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发展,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液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章。在传热方面开展了对大容器沸腾的研究工作, 研究参数一般都在中压以下。1940 ~ 1950 年间, 不仅对双组分气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 年间, 直流锅炉开始采用。在这种锅炉蒸汽管中, 进口工质为温度低于沸点的水, 出口温度为过热蒸汽, 因而其中的流动和交换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毁现象。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毁, 也必须深入研究蒸汽含量高以及在热负荷高情况下的具有热交换的气液两相流问题。因而, 只考虑跟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机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, 研究参数就如高压、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。不少实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做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 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来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。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, 燃料产生的烟气的净化系统得到了研究和开发。其中, 煤烟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大,逐步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吹得上下翻滚,如沸水运动,所以也称沸腾燃烧。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)系列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的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,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联系的。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。

二、多相流体力学在石油工程中的应用

在现代石油工程中也存在一系列复杂的多相流体力学问题。诸如各种垂直和倾斜油井井筒中的油、气、水、砂四相流动问题,油气储运中的长距离油气混输问题和油气分离问题等。要提高采收率、降低采油成本和采用新的采油方法,如应用二氧化碳采油等,也必须研究多相流体力学理论。

三、石油多相流的研究简况和重要性

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。各国对注气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底层中的流动工况都进行了广泛的研究。

油气多相混输的研究起步较晚,约在 20 世纪 50 年代初期。70 年代北海石油的开采对油气混输技术起了极大的推动作用。除研究油气混输工艺计算方法开发稳态和非稳态模拟计算软件外,还开发多相流混输增压泵、多相流量计,其目的是延长混输管线的输送距离,把恶劣环境地域内所采的石油送至环境较好的地域内处理,以降低开采成本。我国对多相流研究也十分重视,如建设国家实验室、863 计划立项等。

四、多相流研究的难度

与流体力学类似,气液两相流的研究也是从实验开始的,并逐步向理论研究方面发展。应该指出气液两相管流的实验研究具有相当的难度,这是因为气液两相管路中所遇到的变量多,在某些流动形态下流动很不稳定,参数很难测准。

因此,根据实验数据提出完善的经验相关式需要进行大量的系统实验,例如,常遇到的某些变量:①气液质量流量;②含气率;③气体密度;④管路倾角等。若上述变量每项均取5个数据,则需取 5^9 次实验(约200万次)。这还未计及随管路压力、温度变化气液相间有传质和气液物性参数(密度、黏度、流量)的变化。此外,Hewitt还指出:气液两相流需经历一个发展的过程,才能达到平衡状态,这就需要管路入口段需几百倍(250~300倍)管道直径的长度,这在多数实验室是很难达到上述要求的。

第三节 多相流的基本术语与定义

一、流量

(1) 质量流量:单位时间内流过管路横截面积的流体质量称为质量流量,对于气液两相管路,混合物质量流量为:

$$M = M_l + M_g \quad (1-1)$$

(2) 体积流量:单位时间内流过管路横截面积的流体体积(管路状态)称体积流量。对于气液两相管路,混合物体积流量为:

$$Q = Q_l + Q_g \quad (1-2)$$

式中 M_g 、 M_l ——气相和液相质量流量;

Q_g 、 Q_l ——气相和液相体积流量。

二、流速

(1) 气相和液相流速:若气相所占管路横截面积为 A_g ,液相所占截面为 A_l , $A = A_l + A_g$ 。气相速度:

$$w_g = \frac{Q_g}{A_g} = \frac{M_g v_g}{A_g} \quad (1-3)$$

液相速度:

$$w_l = \frac{Q_l}{A_l} = \frac{M_l v_l}{A_l} \quad (1-4)$$

式中 v_g 、 v_l ——气相和液相比容;

w_g 、 w_l ——分别为气液相真实速度。

(2) 气相和液相的折算速度:假定管子中只有气体和液体单独流动时所具有的速度,即混合物中的任一相单独流过整个管道截面时的速度称该相的折算速度。

气相折算速度:

$$w_{sg} = \frac{Q_g}{A} = \frac{M_g v_g}{A} \quad (1-5)$$

液相折算速度:

$$w_{sl} = \frac{Q_l}{A} = \frac{M_l v_l}{A} \quad (1-6)$$

显然, w_g 大于 w_{sg} , w_l 大于 w_{sl} , 其相互间关系在后面讨论。

(3) 气液两相混合物速度: 混合物体积流量与流通截面积之比。

$$w = \frac{Q}{A} = \frac{Q_l}{A} + \frac{Q_g}{A} = w_{sl} + w_{sg} \quad (1-7)$$

(4) 匀质流速: 气液混合均匀, 气液相流速相同时的混合物速度。即: $w_l = w_g$ 时, 混合物的流速, 以 w 表示。

$$w = w_l = w_g$$

(5) 气相和液相的质量流速: 气相或液相质量流量与管路流通截面之比。

气相质量流速:

$$G_g = \frac{M_g}{A} = \frac{Q_g \rho_g}{A} = w_{sg} \rho_g \quad (1-8)$$

液相质量流速:

$$G_l = \frac{M_l}{A} = \frac{Q_l \rho_l}{A} = w_{sl} \rho_l \quad (1-9)$$

混合物质量速度:

$$G = \frac{M}{A} = \frac{M_g + M_l}{A} = G_g + G_l = w_{sg} \rho_g + w_{sl} \rho_l \quad (1-10)$$

式中 ρ_g 、 ρ_l ——分别为气相和液相密度。

三、滑脱(移)速度、滑动比和漂移速度

(1) 滑脱速度: 气相速度与液相速度之差。

$$w_s = w_g - w_l \quad (1-11)$$

(2) 滑动比: 气相速度与液相速度之比。

$$s = \frac{w_g}{w_l} \quad (1-12)$$

(3) 漂移速度: 气相速度与混合物匀质流速之差。

$$w_d = w_g - w \quad (1-13)$$

四、含气率与含液率

1. 质量含气率与质量含液率

质量含气率: 气相质量流量与混合物质量流量之比。在水-蒸汽系统中也称干度, 在核反应堆工程中称空泡份额或空泡率。

$$x = \frac{M_g}{M} = \frac{G_g}{G} \quad (1-14)$$

则质量含液率:

$$1 - x = \frac{M_l}{M} = \frac{G_l}{G} \quad (1-15)$$

2. 体积含气率和体积含液率

体积含气率：表示气相体积流量与混合物体积流量之比。

$$\beta = \frac{Q_g}{Q} \quad (1-16)$$

则体积含液率：

$$1 - \beta = \frac{Q_l}{Q} \quad (1-17)$$

3. 截面含气率与截面含液率

截面含气率：气相流通面积与管路总流通面积之比。

$$\varphi = \frac{A_g}{A} \quad (1-18)$$

类似，截面含液率表示为：

$$1 - \varphi = \frac{A_l}{A} \quad (1-19)$$

文献也常用 H_i 表示。

截面含气率(或截面含液率)有时也指某一管段内气体或液体所占流道的体积份额。

4. 三种含气率之间的关系

三种含气率以不同的方式表示管流混合物内气体所占混合物的份额。求出三者的关系，可了解它们间的联系和区别。在设计两相流管路时，常已知欲输送的气、液质量流量，即质量含气率常为已知数。

1) 质量含气率与质量含气率之间的关系

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g} = \frac{xMv_g}{xMv_g + (1-x)Mv_l} = \frac{xv_g}{xv_g + (1-x)v_l} \quad (1-20)$$

相应的

$$1 - \beta = \frac{(1-x)v_l}{xv_g + (1-x)v_l}$$

若已知质量含气率和管输条件下的气、液相比容(或密度)，可由 x 求 β 。

2) 质量含气率与截面含气率的关系

$$M_g = A_g w_g \rho_g = xM$$

$$A_g = \frac{xM}{w_g \rho_g} = \frac{xMv_g}{w_g}$$

$$A_l = \frac{(1-x)M}{w_l \rho_l} = \frac{(1-x)Mv_l}{w_l}$$

则

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{A_g}{A_g + A_l} = \frac{\frac{xM}{w_g \rho_g}}{\frac{xM}{w_g \rho_g} + \frac{(1-x)M}{w_l \rho_l}} = \frac{x}{x + \frac{(1-x)w_g \rho_g}{w_l \rho_l}} = \frac{x}{x + (1-x)s \frac{\rho_g}{\rho_l}} \\ &= \frac{x\rho_l}{x\rho_l + (1-x)s\rho_g} = \frac{xv_g}{xv_g + (1-x)sv_l} \end{aligned} \quad (1-21)$$

相应的

$$1 - \varphi = \frac{(1-x)s\rho_g}{x\rho_l + (1-x)s\rho_g} = \frac{v_l}{xv_g + (1-x)sv_l} \quad (1-22)$$

3) 体积含气率与截面含气率的关系

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} = \frac{1}{1 + \frac{A_l w_l}{A_g w_g}}; \quad \varphi = \frac{A_g}{A_g + A_l} = \frac{1}{1 + \frac{A_l}{A_g}}$$

由上可知:

(1) $w_g = w_l$ 时, $\beta = \varphi$, 即匀质流动时, $\beta = \varphi$ 。

(2) $w_g > w_l$ 时, $\varphi < \beta$, 即: 气相流速大时, 在管路中占流动截面减小, 液相所占流动截面增多, 这种现象称持液现象, 故截面含液率也称持液率。

(3) $w_l > w_g$ 时, $\varphi > \beta$, 水平和上倾管不会发生这种情况。

$$\varphi = \frac{1}{\left(1 + \frac{A_l}{A_g}\right) \frac{w_l w_g}{w_g w_l}} = \frac{1}{\left[\frac{w_l}{w_g} + \frac{A_l w_l}{A_g w_g} + 1 - 1\right] \frac{w_g}{w_l}} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\beta} - s} = \frac{1}{1 + s\left(\frac{1}{\beta} - 1\right)}$$

由于 $\frac{w_g}{w_l} = s$ 很难确定, 故很难有 x 或 β 求得 φ 。

五、用质量含气率或截面含气率表示的各种流速

(1) 气相流速: 按定义, 并由式(1-21)得:

$$w_g = \frac{xM}{\rho_g A \varphi} = \frac{xG}{\frac{x\rho_l \rho_g}{x\rho_l + (1-x)\rho_g s}} = G[xv_g + (1-x)v_l s] \quad (1-23)$$

$$w_g = \frac{xM}{\rho_g A \varphi} = \frac{Q_g}{A \varphi} = \frac{w_{sg}}{\varphi} \quad (1-24)$$

(2) 液相速度: 按定义, 并由式(1-21)得:

$$w_l = \frac{(1-x)M}{(1-\varphi)A\rho_l} = \frac{G(1-x)}{\frac{(1-x)s\rho_g \rho_l}{x\rho_l + (1-x)s\rho_g}} = \frac{G}{s}[xv_g + (1-x)sv_l] \quad (1-25)$$

$$w_l = \frac{(1-x)M}{(1-\varphi)A\rho_l} = \frac{Q_l}{A(1-\varphi)} = \frac{w_{sl}}{1-\varphi} \quad (1-26)$$

(3) 匀质流体: 匀质流动时, $s=1$, $w_g = w_l = w$, 由式(1-23)或(1-25)

$$\begin{aligned} w_h &= G[xv_g + (1-x)v_l] \\ &= xGv_g + (1-x)Gv_l = \frac{M_g v_g}{A} + \frac{M_l v_l}{A} = w_{sl} + w_{sg} = w \end{aligned} \quad (1-27)$$

则匀质流动速度 = 气液混合物速度。

(4) 漂移速度:

$$\begin{aligned} w_d &= w_g - w = G[xv_g + (1-x)v_l s] - G[xv_g + (1-x)v_l] \\ &= G(1-x)v_l(s-1) = w_{sl}(s-1) \\ &= w_{sl}\left(\frac{w_g - w_l}{w_l}\right) = w_{sl}\frac{w_s}{w_l} = (1-\varphi)w_s \end{aligned} \quad (1-28)$$

上式表示漂移速度和滑脱速度的关系。

六、两相混合物密度

(1) 流动密度：单位时间内流过管截面混合物质量与体积之比。

$$\rho_f = \frac{M}{Q} = \frac{Q_g \rho_g + Q_l \rho_l}{Q} = \beta \rho_g + (1 - \beta) \rho_l \quad (1-29)$$

(2) 真实密度：在 Δ_l 管长内气液混合物质量与体积之比。

$$\rho = \varphi \rho_g + (1 - \varphi) \rho_l \quad (1-30)$$

(3) 匀质密度：气液相混合均匀，其实的混合物密度和匀质密度，以 ρ 表示。

由式(1-30)，式(1-20)，式(1-21)可知：

$$\rho = \frac{x \rho_l \rho_g + (1 - x) s \rho_l \rho_g}{x \rho_l + (1 - x) s \rho_g}$$

匀质流动时， $s = 1$ ，则

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{x + (1 - x)s}{xv_g + (1 - x)sv_l} \\ \rho &= \frac{1}{xv_g + (1 - x)v_l}; \\ v &= xv_g + (1 - x)v_l \end{aligned} \quad (1-31)$$

由式(1-19)，用 β 取代 x ，可得

$$\rho = \beta \rho_g + (1 - \beta) \rho_l = \rho_f$$

故流动密度 = 匀质密度。在匀质流模型中常用于压降计算；真实密度常用于举升气液混合物消耗能量的计算。

此外，匀质流动时， $\beta = \varphi$ ， $\rho = \rho_f$ 。

七、压降梯度

压降梯度用 dP/dl 表示。两相管路的压降梯度由摩阻损失、加速损失和重力损失三部分组成。在整理和关联两相流实验、实测数据时，常用下述四项单相管路的压降梯度关联。

(1) 全液相压降梯度：把管路内的气液混合物全部当液体对待。

$$-\left(\frac{dP}{dl}\right)_0 = \frac{\lambda_0 w^2}{2D} \rho_l = \frac{\lambda_0 G^2 v_l}{2D} = c \left(\frac{GD}{\mu_l}\right)^{-n} \frac{G^2 v_l}{2D} \quad (1-32)$$

相应的雷诺数为 $Re_{l0} = \frac{wD\rho_l}{\mu_l} = \frac{GD}{\mu_l}$ ；摩阻系数采用 Blasius 方程形式： $\lambda_0 = \frac{c}{Re_{l0}^n}$ 。

(2) 全气相压降梯度：把管路内的混合物全部看作气体。

$$\begin{aligned} -\left(\frac{dP}{dl}\right)_{g0} &= \frac{\lambda_{g0} w^2}{2D} \rho_g = \frac{\lambda_{g0} G^2 v_g}{2D} = c \left(\frac{GD}{\mu_g}\right)^{-n} \frac{G^2 v_g}{2D} \\ \lambda_{g0} &= \frac{c}{Re_{g0}^n}; \quad Re_{g0} = \frac{GD}{\mu_g} \end{aligned} \quad (1-33)$$

(3) 分液相压降梯度：认为管路内只有液相流动，其质量流量和流速分别为：

$$M_l = (1 - x)M; \quad G_l = (1 - x)G。$$

则:

$$-\left(\frac{dP}{dl}\right)_l = \frac{\lambda_l (1-x)^2 G^2 v_l}{2D} = c \left[\frac{(1-x)GD}{\mu} \right]^{-n} \frac{(1-x)G^2 v_l}{2D} \quad (1-34)$$

$$\lambda_l = \frac{c}{Re_l^n}; \quad Re_l = \frac{(1-x)GD}{\mu_l}$$

(4) 分气相压降梯度: 认为管路内只有气相流动, 其质量流量和流速分别为:

$$M_g = xM; \quad G_g = xG$$

$$-\left(\frac{dP}{dl}\right)_g = \frac{\lambda_g x^2 G^2 v_g}{2D} = C \left(\frac{xGD}{\mu_g} \right)^{-n} \frac{x^2 G^2 v_g}{2D} \quad (1-35)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{Re_g^n}; \quad Re_g = \frac{xGD}{\mu_g}$$

八、其他两相流研究中的常用参数

Lockhart - Martinelli 参数: 定义为

$$x = \left[\frac{(\frac{dP}{dl})_l}{(\frac{dP}{dl})_g} \right]^{\frac{1}{2}}$$

由式(1-34)、式(1-35)可知

$$x = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{\frac{2-n}{2}} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{\frac{n}{2}} \left(\frac{v_l}{v_g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Chisholm 物性参数定义为

$$\Gamma^2 = \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^n \frac{v_g}{v_l}$$

由式(1-32)、式(1-33)可知

$$\Gamma^2 = \frac{(\frac{dP}{dl})_{g0}}{(\frac{dP}{dl})_{l0}}$$

第二章 多相流管流的基本方程

第一节 均相流模型的基本方程

均相流动模型简称均流模型，它是把气液两相混合物看成均匀介质，其流动的物理参数取两相介质相应参数的平均值。因此可以按照单相介质来处理均流模型的流体动力学问题。

在均流模型中，采取了以下两个假定：

(1) 气相和液相的速度相等，即：

$$w_g = w_l = w$$

因而滑差

$$\Delta w = w_g - w_l = 0$$

滑动比

$$s = \frac{w_g}{w_l} = 1$$

真实含气率与体积含气率相等($\varphi = \beta$)，所以真实密度与流动密度也相等($\rho = \rho_f$)。

(2) 两相介质已达到热力学平衡状态，压力、密度等互为单值函数。此条件在等温流体中是成立的，在受热的不等温稳定流动中是基本成立的，在变工况的不稳定流动中则是近似的。

均流模型的使用情况是：对于泡状流和雾状流，具有较高的精确性；对于弹状流和段塞流，需要进行时间平均修正；对于层状流、波状流和环状流，则误差较大。但是，大量的两相流动计算图表目前都是用均流模型作出的。

一、均流模型的基本方程式

对于稳定的一维均相流动，其基本方程式包括连续方程式、动量方程式和能量方程式。

1. 连续方程式

根据质量守恒定律，有

$$M = \rho w A = \text{常数} \quad (2-1)$$

2. 动量方程式

取一维流段 dz 来研究，其直径为 D ，过流断面的面积为 A ，如图 2-1 所示。

现沿流动方向建立动量方程式。首先分析作用在该流段上的力：质量力为重力沿 z 方向的分力 $-\rho g A dz \sin \theta$ ；表面力有压力 $pA - (p + dp)A$ 和切力 $-dF$ 。

根据动量定律，得动量方程式：

$$-Adp - dF - \rho g A dz \sin \theta = M dw \quad (2-2)$$