



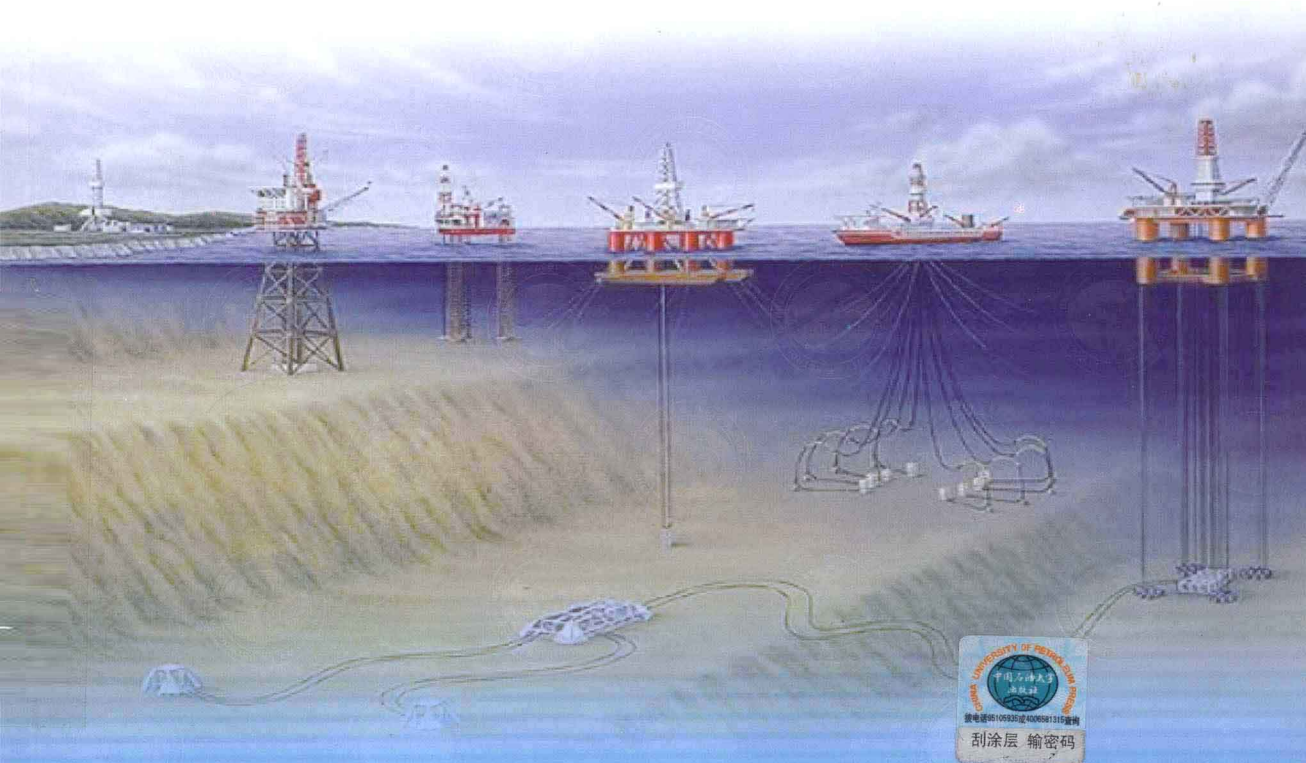
TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

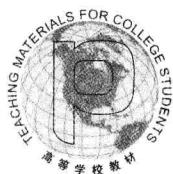
油气水多相管流

Oil, Gas and Water Multiphase
Flow in Pipelines

李玉星 冯叔初 主编



中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

油气水多相管流

李玉星 冯叔初 主编



中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油气水多相管流/李玉星,冯叔初主编. —东营:
中国石油大学出版社,2010.10
ISBN 978-7-5636-3257-2

I. 油… II. ①李…②冯… III. ①油层水—多相
流动 IV. ①TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 188659 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 油气水多相管流
作 者: 李玉星 冯叔初

责任编辑: 秦晓霞 (电话 0532—86981531)

封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180×235 印张: 26.75 字数: 534 千字

版 次: 2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

1997年,冯叔初教授根据油田地面工程及油气储运学科的发展为研究生开设了一门学位课——多相流动,并与李玉星教授在参考大量文献资料以及科研成果的基础上,共同编写了《多相流动》(初稿),于1999年校内出版。如今,作者在多年试用及总结研究成果的基础上,对教材重新进行了编写和完善,并公开出版。在教材的编写过程中,作者紧密结合目前的国内外发展情况,充分考虑石油储运专业的教学计划和课程设置,努力做到与国际接轨,与工程实践相结合。

“多相流动”课程为油气储运工程专业的研究生学位课之一,其目的是使学生掌握油气水多相流动管路的基本知识、工艺计算方法和问题处理方法。通过学习,使学生较全面地掌握油气水的物性计算、流型判断、两相流基本方程、截面含气率计算、压降计算、段塞流、混输管路清管、多相计量、瞬态模拟技术等,培养学生解决混输管路流动问题的能力。

本书第一、第三、第四、第五、第六、第七、第十一章是根据冯叔初教授的讲稿整理编写的,其余由李玉星教授编写并统稿。其中很多资料来源于研究生的工作及成果。同时在教材编写过程中,得到了有关设计人员和生产运行人员的大力支持与帮助,他们为教材提供了许多宝贵意见及技术资料,使编者受益匪浅。同时,本教材还得到了许多领导和校友的关心和支持,在此一并表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,研究生王军、蔡晓华、王海燕做了大量辅助工作。

由于编者水平有限,教材中难免存在缺点和错误,恳请读者斧正。

李玉星 于青岛
2010年5月



第1章 绪 论	1
1.1 多相流应用领域	1
1.2 多相流动的分类	2
1.3 气液两相流的研究简况	3
1.4 多相流的基本术语和定义	6
第2章 流 型	15
2.1 流型测量方法	16
2.2 水平管中的流型	22
2.3 垂直管中的流型	33
2.4 倾斜管中的流型	36
2.5 通用气液流型判断模型	38
2.6 油水和油气水三相流型	57
第3章 气液两相流的基本水力学方程	74
3.1 单相流体一元流动的基本方程	74
3.2 分相流模型的基本方程	77
3.3 均相流模型的基本方程	80
3.4 两相流动方程和能量方程的对比	81
3.5 两相管流中机械能的损失	82
第4章 确定混输摩阻压降的经验方法	85
4.1 均相流模型	85
4.2 分相流模型	88
第5章 截面含气率的计算	98
5.1 均相流模型	98
5.2 非均相流含气率的计算方法	98



5.3	简化一维模型	100
5.4	变密度模型	103
5.5	漂移流动模型	105
5.6	滑动比法	109
第 6 章	加速压降	110
6.1	加速压降的基本关系式	110
6.2	分相流与均相流加速压降的比较	111
6.3	加速压降和摩阻压降的比较	112
第 7 章	环状流	116
7.1	理想的环状流	116
7.2	实际的环状流	123
第 8 章	段塞流	128
8.1	段塞流形成机理	128
8.2	段塞流的抑制方法	134
8.3	段塞流特性参数计算	146
第 9 章	常用水力计算流型模型	159
9.1	Mukherjee-Brill 两相流相关式	159
9.2	Xiao-Brill 模型	167
9.3	Eaton 压降算法	172
9.4	适用于低含液混输管道的三相水力模型	176
9.5	Zhang-Sarica 通用水力学模型	188
9.6	气体和非牛顿流体的两相流动	198
9.7	Zhang-Sarica 油气水三相通用水力学模型	204
第 10 章	混输管线的清管	213
10.1	清管分类与设备	213
10.2	混输管道的清管	217
10.3	混输管路清管过程参数变化	228
10.4	混输管路的清管模拟	234
第 11 章	混输管道的腐蚀及内防腐	247
11.1	腐蚀的起因及影响因素	247
11.2	典型流型下油气混输管道内腐蚀特征	251
11.3	湿酸性气体管道的内腐蚀	262
11.4	允许 CO_2 摩尔分数的确定	263
11.5	腐蚀环境中多相流管道管径确定的准则	264
11.6	管道内腐蚀的监测	265

11.7 内腐蚀的防止措施·····	266
第 12 章 多相混输泵 ·····	268
12.1 双螺杆泵工作原理与性能·····	271
12.2 双螺杆泵工作特性·····	273
12.3 双螺杆多相泵的回流·····	277
12.4 螺杆泵的设计·····	281
第 13 章 多相流计量 ·····	287
13.1 概述·····	287
13.2 传统多相计量装置·····	288
13.3 多相流计量的基本原理和方法·····	295
13.4 多相流量计的分类·····	306
13.5 主要多相流量计产品·····	310
第 14 章 段塞流捕集器 ·····	332
14.1 段塞流捕集器的作用与分类·····	332
14.2 捕集器设计原则·····	336
14.3 容器式段塞流捕集器工艺计算·····	337
14.4 管式段塞流捕集器工艺计算·····	346
第 15 章 多相混输瞬态技术 ·····	352
15.1 引言·····	352
15.2 气液混输管线瞬态模型概述·····	356
15.3 基于双流体模型的气液两相流瞬态模型的建立与数值求解·····	371
15.4 瞬态过程分析·····	394
15.5 常用商业瞬态模拟软件分析·····	402
参考文献 ·····	412

第1章 绪论

Chapter one

1.1 多相流应用领域

在许多工业领域,都会涉及多相流动的问题,例如石油、化工、核工业、航天工业和地热能工程领域,这些领域对多相流工艺计算以及相关的技术需求非常迫切,因此自1940年开始,世界各国的研究机构都开展了有关的技术研究,下面简要介绍多相流技术在不同工业领域的应用情况。

1) 石油与天然气工业

在石油与天然气工业中,多相流技术在油气开采以及输送领域具有广泛的应用,如井筒的流动以及地面的集输管路。特别是在油田地面集输系统中,广泛使用了油气混输管路。另外,由于陆上油气资源有限,人们将油气勘探和开采活动逐步转向海洋、极地、沙漠和滩海等地区。这些地区的自然环境恶劣,出于经济和环保的考虑,往往不宜就地安装气液分离器或同时铺设两条管线分别输送油、气,所以多相混输具有单相管路不可比拟的优点,其输送距离有增长的趋向。

据介绍,利用多相混输技术可以降低油气田开采费用10%~40%,经济效益显著。由于在生产过程中需要采用混输管线、分离器或段塞流捕集器、多相流量计以及多相泵等设备,因此在混输过程中管线的压力损失、管线内液量的多少以及设备的选型和尺寸的大小等都需要进行严格的计算和优化,许多国家的石油公司已投入了大量的人力和财力开展混输技术以及有关设备的研究。

2) 化学与工艺处理工业

化学与工艺处理工业同样会遇到多相流的问题,如反应器、蒸发器、冷凝器、沸腾换热器和精馏设备等。设备的选型除了需要确定连接管线的压力降以及管线内液体积液量外,还需要能量传递和质量传递的工艺计算模型,以确定流体与管壁之间的热量传递、气液界面之间的质量传递、流体在设备中的停留时间以及与反映效果有关的参数等。

3) 核反应器工业

核反应器工业研究多相流技术主要是从安全考虑。当失水事故(LOCA)发生

时,在散热器中部会发生水的沸腾蒸发,低温水需要注入散热器中部降温,因此会发生相反方向流动的多相流问题,通过对该散热器管内部水动力学与热力学研究,可以精确预测注水条件以及散热器中部的温度变化。

4) 地热能工程

在地热能工程领域,主要发生的是垂直立管内部以及地面集输系统管网的水和水蒸气两相流动,需要预测管线内压力、温度以及相态转换,特别是在段塞条件下如何防止意外事故的发生。

5) 航天工业

在航天失重条件下,在空间站的发电系统、能量储存系统、热力系统以及生活保障系统内会发生特殊的两相流动。在失重条件下,没有分层流动,管道内的流型基本是均相状态,不必考虑倾角的影响。目前,针对失重条件已经在抛物型空间仓以及自由跌落塔内开展了一系列实验测试,研究该条件下可能会发生的现象,取得混输的流动规律,从而用于航天工业系统的设计。

开展多相流技术的研究,对于以上所述工业的可靠性设计具有重要意义,本书的目的就是提供关于多相流的基本概念、知识以及原理,给出混输流动特性以及基本的模型,有助于研究人员以及设计人员开展进一步的工作。

1.2 多相流动的分类

“相”通常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,各相间有明显可分的界面。例如:空气是一相,水和水蒸气同处于某一系统中属两相,含盐水溶液是一相。两相在体系中共流称两相流。

在两相流动研究中,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和连续相,也可作为分散介质和分散相。如:液滴和气泡属于分散相,固体颗粒只能作为分散介质。按连续介质和分散介质组合方式的不同,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,依靠气体运送粮食,固体水合物输送天然气。

(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,石油天然气开采以及集输等。

(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,水加砂高速喷射金属切割。

(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,油田含油污水处理工艺流程的运动等。

在上述四类两相流动中,气液两相流动是最复杂的,这是由于:

(1) 气液共流中,其交界面的形状不断改变,无规律可循。

(2) 气相具有可压缩性。

(3) 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,有时还存在砂子。因此,石油沿管道的流动,尽管主要属于气液两相流动,实际上还包括液-液(油-水)甚至液-固(油、水-砂)的流动。应该说是最复杂的多相流动。本书先从问题的主要方面入手,即先讨论气液两相流的某些基本规律,然后再适度考虑液态油井产出物的液体中还存在油水两相的现实。一般将三相和三相以上的流动称多相流。

1.3 气液两相流的研究简况

从20世纪30年代开始,在美国一些研究生的论文中开始出现“two-phase”(两相流)这一术语,1943年俄国人Kosterin在其发表的论文《水平管内两相介质流动结构研究》中,首次采用“two-phase”术语。1966年据统计,共收集到8000余篇有关两相流的论文。1948—1966年期间,有关气液两相流的文章以成倍的速度增加,其主要原因是美俄两国都制订了庞大的发展核电站计划。气液两相流的研究直接和核电站的沸水反应器有关,其管路内的流动介质主要是水-水蒸气。

在早期的研究中,一般认为气液两相的流速相等,即采用均相流模型,混合物密度按气液比求得,并按单相流体求压降梯度。在锅炉设计中,习惯上用液体粘度代替气液混合物粘度,并据此计算气液混合物的雷诺数。这种均相流模型的计算方法有时和实验数据较吻合。例如锅炉受热立管进口处流速约为2 m/s时,在各种气液质量流量下,均有较好的计算结果。但在某些场合下,均相流模型会产生很大误差,如较高气液比的混合物通过锐孔板时的压降仅为均相流模型计算值的1/3,而气液混合物通过弯头时的压降可能高达均相流模型计算值的4倍以上。这就迫使许多人对流型、物理模型、数学模型等开展更深入的研究。

油气两相混输的研究起步较晚,约从20世纪50年代初期开始。美国的Martinielli和俄国的Armand是两位最早对气液两相流进行系统研究的学者。20世纪70年代北海石油的开采对油气混输技术起到了极大的推动作用。除了研究油气混输工

艺计算方法、开发稳态和非稳态模拟计算机软件外,还开发了多相流混输增压泵、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输送至环境较好的地域内进行加工处理,以降低开采成本。我国对多相流研究也十分重视,国家实验室、863 计划、973 计划、国家重大专项等均涉及此类课题的研究。

1.3.1 气液两相流实验研究的难度

与流体力学类似,气液两相流的研究也是从实验研究开始的,通过实验获取大量的实验数据,并得到经验关系式,这些经验关系式由于受到实验条件的限制,公式通用性一般较差(目前水力摩阻系数一般是通过经验公式计算得到的)。后来,逐渐发展到严格的理论模型,通过求解在一定边界条件下反映流动规律的流体力学方程组得到解析解。毫无疑问,这是一种最准确的方法,但是在大多数情况下,解析解是不容易推导出的(单相层流可以得到解析解)。

后来随着计算机的推广应用,人们采用数值算法来求解水力学模型。这种算法主要用于流体力学(CFD)和瞬态流动条件下的模型计算,需要复杂的程序代码,而且应用不方便,并且数值计算的可靠性以及闭合方程的确定仍具有很大的不确定性。

目前,研究和应用比较广泛的方法是模型方法。这种方法介于经验方法与严格的理论模型之间,通过对理论模型进行简化,结合某些参数的经验计算公式,得到工艺参数预测和计算的模型,达到设计应用的目的。

两相流动模型需要采用很多参数来描述,几乎是单相流体的两倍,同时流动结构复杂,因此,开展多相流动的模型研究具有很大的难度,表现在以下几个方面:

- (1) 气液两相管路中所遇到的变量多,在某些流型下流动很不稳定。
- (2) 某些参数很难测准,如流型、持液率及夹带率。
- (3) 气体具有可压缩性,气液之间的结构和作用形式复杂。

因此,根据实验数据提出完善的经验相关式需进行大量系统的试验。例如,常遇到的一些变量有:气液质量流量、含气率、气体密度、管路倾角等。若上述变量每相均取 9 个数据,则需进行 $5^9 \approx 200$ 万次实验。这还未考虑随管路压力、温度变化而导致的气液相间的传质和气液物性参数(密度、粘度、流量)的变化。此外,Hewitt 还指出:气液两相流需经历一个发展过程才能达到平衡状态,这就要求管路入口段要有几百(250~300)倍管道直径的长度,这在多数实验室是很难达到的。

1.3.2 气液混输管路的特点和处理方法

1) 气液混输管路的特点

与气液单相管路相比,油气或油气水多相流管路具有如下特点:

- (1) 流型变化多。

两相或多相流型较单相流多,且不统一。不同流型沿管路流动的能量消耗机理

不同,目前在理论上尚未完全解决。

(2) 存在相间能量消耗。

管路内各相的流速常不相同,相间存在能量交换和能量损失。例如,流速较高的气体常把部分液体拖带到气流中。被携带液体脱离液流主体需消耗能量,被气流吹成液滴或液雾需消耗能量,液雾进入气流、被气流加速需消耗能量。又如,管路沿线起伏,在低洼处积液量较多,气体的流通面积忽大忽小,气体忽而膨胀、忽而压缩,流动方向也随之而变,这些都使气液相间的能量消耗增加。

(3) 存在相间传质。

在两相或多相管路内,随压力、温度的变化,以及气液相流速的不同,气液相间常处于不平衡状态。因而,相间不断有质量交换,使气液在新条件下达到新的平衡状态。故管路的气液质量流量、组成、密度、粘度等参数沿管路不断地变化。气液质量流量的变化还影响流型和能耗的变化。

(4) 流动不稳定。

在气液两相管路内,气液各占一部分流通面积。当气液输量发生变化时,各相所占流通面积发生相应变化,这就需要较长时间才能重新达到稳定状态。在某些流型下,特别是段塞流型,管路各截面上的压力和气液流量常有激烈波动。严格地说,两相或多相流管路总是处于不稳定的流动状态。

(5) 非牛顿流体和水合物。

在油田的多相流管路内,油水混合物为非牛顿流体,其表观粘度随剪切历史和剪切强度而变化。在气田的多相流管路内,在高压、低温条件下管路内可能形成固态水合物。这使多相流管路的计算更趋复杂。

鉴于上述原因,两相或多相流管路应分段进行水力、热力、相平衡等耦合计算。非牛顿流体的管输的水力计算还不够成熟,对非牛顿流体的气液多相流研究更需深入。

2) 气液两相管路的处理方法

由于多相流动的复杂性,研究人员一般采取以下三种处理方法:

(1) 均相流处理模型。其特点有:① 气液两相速度相等;② 气液两相介质已达到热力学平衡状态。

(2) 分相流处理模型。其特点有:① 气液两相有各自的按所占流通面积计算的平均速度;② 气液两相间可能有质量的交换,但气液两相介质处于热力学平衡状态,相间无热量的传递。

(3) 流型处理模型。其特点有:根据管内气液比由小到大,将两相流的流型划分为气泡流、气团流、分层流、波浪流、段塞流和环状流、弥散流等数种。针对每一种流型,建立相应的水力计算模型。

1.3.3 本课程主要内容

石油多相管流与锅炉、核电站沸水反应器的气液两相管流的主要区别在于：

(1) 流动介质不同。石油属于多组分混合物，随压力、温度变化气液相变和相间的传质过程较单工质水要复杂得多。

(2) 管道长度不同。石油输送管道短的有几百米，长的可达数百千米，因而弯头、三通、阀门等引起的局部阻力在石油气液输送管路工艺计算中只占极次要的地位。本课程中不做重点内容介绍。

(3) 管道的作用不同。锅炉受热管吸热后，使水变为蒸汽，在换热器中蒸汽释放热量传给欲加热的工质并变成水。这些管道的温差较大，流动介质和周围环境进行换热，其水力计算和传热是密切相关的，故描述这类管道的教材常以“气液两相流动和传热”命名，而石油多相管流的温差较小，管内流体和周围环境间的热交换在研究中也不占主要地位。

根据以上差别，本课程的研究重点是针对石油天然气行业的地面集输系统，给出油气水在管道内的流动规律以及处理方法，并给出有关设备的原理以及选型计算等。

1.4 多相流的基本术语和定义

1.4.1 流量

1) 质量流量

单位时间内流过管路横截面的流体质量称为质量流量。对于气液两相管路，混合物的质量流量为：

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

式中 M ——混合物质量流量；

M_l ——液相质量流量；

M_g ——气相质量流量。

2) 体积流量

单位时间内流过管路横截面的流体体积(管输压力、温度条件下)称为体积流量。混合物体积流量为：

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

式中 Q ——混合物体积流量；

Q_l ——液相体积流量；

Q_g ——气相体积流量。

1.4.2 流速

1) 气相和液相速度

若气相所占管路截面面积为 A_g , 液相所占截面面积为 A_l , 则管路总面积

$$A = A_l + A_g$$

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、液相比体积;

w_g, w_l ——气、液相真实速度。

2) 气相和液相的折算速度

假设管路中只有气体和液体单独流动时所具有的速度, 也就是混合物中的任一相单独流过整个管路截面时的速度称为该相的折算速度。

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, $w_g > w_{sg}, w_l > w_{sl}$, 其相互间的关系在后面讨论。

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称为气液两相混合物速度。

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

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为匀质流速。即 $w_l = w_g$ 时, 混合物的流速 $w_H = w_l = w_g$ 。

5) 气相和液相的质量流速

即气、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 ——气、液相密度。

1.4.3 滑脱(移)速度、滑动比和漂移速度

1) 滑脱速度 w_s

气相速度与液相速度之差。

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

2) 滑动比 s

气相速度与液相速度之比。

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

3) 气相漂移速度 w_{gD}

气相速度与匀质混合物流速之差。

$$w_{gD} = w_g - w_H \quad (1-13)$$

1.4.4 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(void fraction)。

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

质量含液率：

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

2) 体积含气率与体积含液率

体积含气率：表示气相体积流量与混合物体积流量之比。

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

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:

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

在文献中,截面含液率也常用 H_L 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占混合物的份额。求出三者的关系,可了解它们之间的联系和区别。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) 质量含气率与体积含气率间的关系。

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

相应的,有:

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

若已知质量含气率和管输条件下的气、液相比体积(或密度),可由 x 求 β 。

(2) 质量含气率与截面含气率的关系。

因为:

$$\varphi = \frac{A_g}{A_g + A_l}, \quad M_g = A_g w_g \rho_g = xM$$

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

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

所以:

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

相应的,有:

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

(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 当 $w_g = w_l$ 时, $\beta = \varphi$, 即匀质流动时, $\beta = \varphi$;
- ② 当 $w_g > w_l$ 时, $\varphi < \beta$, 即气相流速大时, 气体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, 故此时的截面含液率也称持液率, 也可用 H_L 表示。
- ③ 当 $w_l > w_g$ 时, $\varphi > \beta$, 水平和上倾管不会发生这种情况。

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{1}{\left(1 + \frac{A_l}{A_g}\right) \frac{w_l w_g}{w_g w_l}} = \frac{1}{\left(\frac{w_l}{w_g} + \frac{A_l w_l}{A_g w_g} + 1 - 1\right) \frac{w_g}{w_l}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{s}{\beta} - s} = \frac{1}{1 + s\left(\frac{1}{\beta} - 1\right)}\end{aligned}\quad (1-23)$$

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

1.4.5 用质量含气率表示的各种流速

1) 气相速度

按定义, 并由式(1-21)得:

$$w_g = \frac{xM}{\rho_g A \varphi} = \frac{xG}{\frac{x\rho_g \rho_l}{x\rho_l + (1-x)\rho_g s}} = G[xv_g + (1-x)v_l s] \quad (1-24)$$

$$w_g = \frac{xM}{\rho_g A \varphi} = \frac{Q_g}{A \varphi} = \frac{w_{sg}}{\varphi} \quad (1-25)$$

2) 液相速度

按定义, 并由式(1-22)得:

$$w_l = \frac{(1-x)M}{(1-\varphi)A\rho_l} = \frac{G(1-x)}{\frac{(1-x)s\rho_g \rho_l}{x\rho_l + (1-x)s\rho_g}} = \frac{G}{s}[xv_g + (1-x)s v_l] \quad (1-26)$$

$$w_l = \frac{(1-x)M}{(1-\varphi)A\rho_l} = \frac{Q_l}{A(1-\varphi)} = \frac{w_{sl}}{1-\varphi} \quad (1-27)$$

3) 匀质流速

匀质流动时, $s = 1$, $w_g = w_l = w_H$, 由式(1-24)或式(1-26)得:

$$\begin{aligned}w_H &= G[xv_g + (1-x)v_l] \\ &= xGv_g + (1-x)Gv_l = \frac{M_g v_g}{A} + \frac{M_l v_l}{A} = w_{sl} + w_{sg} = w\end{aligned}\quad (1-28)$$

所以, 匀质流动速度 = 气液混合物的速度。

4) 漂移速度

$$\begin{aligned}w_D &= w_g - w_H = G[xv_g + (1-x)v_l s] - G[xv_g + (1-x)v_l] \\ &= G(1-x)v_l(s-1) = w_{sl}(s-1)\end{aligned}$$