

抽油机井的气液两相流动

陈家琅 陈涛平 魏兆胜 编著



石油工业出版社

抽油机井的气液两相流动

陈家琅 陈涛平 魏兆胜 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书针对教学和油田生产的需要,综合了国内外的最新研究成果,系统地介绍了气液混合物在抽油机井及其地面管线中的流动规律、油套环空中液面的测试原理及井底压力的计算方法。为了便于利用计算机进行有关的水力计算,书中还介绍了油、气、水及其混合物的物性参数计算公式。

本书可作为石油院校有关专业的教科书,亦可供从事采油工程及油气集输等专业的现场技术人员、科研人员和院校师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

抽油机井的气液两相流动/陈家琅等编著. —北京:石油工业出版社, 1994. 5

ISBN 7-5021-1245-6

I. 抽…

II. 陈…

III. ①井 (石油天然气), 抽油机-气相-流动-研究

②井 (石油天然气), 抽油机-液相-流动-研究

IV. TE355

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油物探局制图印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开 12½印张 307 千字 印 1—1000

1994 年 6 月北京第 1 版 1994 年 6 月第 1 次印刷

定价: 9.60 元

前 言

抽油开采是目前原油生产中最普遍的采油方式,为了使广大院校师生和工程技术人员能够按油气两相流动规律进行抽油机井的设计计算、工况分析和生产管理,使抽油机井以最优工况进行生产,本书综合了国内外最新的研究成果,系统地介绍了气液混合物在抽油机井及其地面管线中的流动规律、油套环空中液面的测试原理及井底压力的计算方法。为了便于利用计算机进行有关的水力计算,书中还介绍了原油、天然气、水及其混合物的物性参数计算公式。

由于这方面的书籍目前还不多,所以希望本书能对有关的工程技术人员及院校师生有所裨益。

由于我们水平有限,书中难免有不当和错误之处,诚恳欢迎广大读者给予指正。

编著者

1994年1月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 气液两相流动的研究方法	(1)
第二节 气液两相流动的特性参数	(2)
第三节 气液两相流动的研究模型	(6)
第四节 环空气液两相流动的处理方法	(16)
参考文献	(17)
第二章 油管中的气液两相流动	(19)
第一节 铅直环空中气液两相的流动型态	(19)
第二节 阻力系数法	(28)
第三节 流动型态法	(35)
第四节 丹斯-若斯方法	(37)
第五节 奥齐思泽斯基方法	(42)
第六节 哈桑-卡比尔方法	(48)
第七节 安萨瑞方法	(54)
第八节 铅直非圆管中的气液两相向上流动	(64)
第九节 对铅直环空中气液两相流动压差计算方法的评价	(69)
参考文献	(70)
第三章 抽油泵中的气液两相流动	(72)
第一节 气液混合物流过抽油泵的能量方程式	(72)
第二节 抽油泵的扬程、功率和效率	(74)
参考文献	(84)
第四章 环空液面的测试原理	(85)
第一节 回声探测法	(85)
第二节 物质平衡法	(87)
参考文献	(99)
第五章 井筒中的压力分布	(100)
第一节 井筒中的物性分布	(100)
第二节 井底流压计算	(102)
第三节 井底静压计算	(125)
参考文献	(127)
第六章 集输管线中的气液两相流动	(129)
第一节 气体-牛顿液体两相水平管流	(129)
第二节 气体-非牛顿液体两相水平管流	(153)
第三节 气液两相倾斜管流	(160)
参考文献	(173)

第七章 油气水及其混合物的物性参数.....	(175)
第一节 原油、天然气和水的物性参数.....	(175)
第二节 油气水混合物的流变性参数.....	(185)
参考文献.....	(188)
参考书目.....	(189)

第一章 绪 论

随着油田开发的进展,抽油开采已成为目前原油生产中最普遍的采油方式。为了使抽油机井能够以最优工况进行生产,从而取得最佳经济效益,有必要掌握抽油机井生产系统中油、气、水混合物的流动规律。

在油、气、水混合物中,油与水是两种互不相溶的液体,所以抽油机井生产系统中应为气液多相流动。但是,由于油和水都是液体,它们流动的力学关系有类似之处,所以实践中常把它们作为液相来统一考虑。这样,便可以将抽油机井生产系统中油、气、水混合物的多相流动,简化为气液两相流动来进行研究。

本章就气液两相流动的研究方法、特性参数及研究模型等作一简介。

第一节 气液两相流动的研究方法

气液两相流动虽然比单相流动要复杂得多,但它与单相流动一样服从于流体力学的所有基本定律。所以在气液两相流动的研究中,也可以参考单相流动的研究方法。

一、经验方法

经验方法是从气液两相流动的物理概念出发,或者使用因次分析法,或者根据流动的基本微分方程式,得到反映某一特定的两相流动过程的一些无因次参数,然后依据实验数据整理出描述这一流动过程的经验关系式。

经验方法的一个显著的优点是使用方便。一般只要将所得的经验关系式用在与取原始实验数据相类似的情况下,就可以得到非常满意的结果。但是,如果不加选择地将经验关系式用于其它条件下,将有可能发生错误。况且,经验关系式对流动过程常是属于初步认识,很难从中得出更深层次的关系。

二、半经验方法

半经验方法是根据所研究的气液两相流动过程的特点,采用适当的假设和简化,再从两相流动的基本方程式出发,求得描述这一流动过程的函数关系式,最后用实验方法确定出函数关系式中的经验系数。

尽管半经验方法中有假设和简化存在,但由于该方法具有一定的理论基础,并辅以实验数据,所以目前工程计算中广泛采用这种方法。

三、理论分析方法

理论分析方法是针对各种流动过程的特点,应用流体力学方法对其流动特性进行分析,进而建立起描述这一流动过程的解析关系式。

理论分析方法所得的解析关系式常为微分或积分方程组,它们的求解一般要借助于电子计算机来进行。由于电子计算机和数值计算方法的飞速发展,理论分析方法正越来越受到人们的重视。

第二节 气液两相流动的特性参数

在进行气液两相流动研究时,除了要引用单相流动的参数外,还要使用一些两相流动所特有的参数。现将常用的气液两相流动的特性参数介绍如下。

一、流量

(一) 质量流量

单位时间内流过过流断面的气液混合物的质量,称为气液混合物的质量流量。其表达式为

$$G = G_g + G_l \quad (1-1)$$

式中 G ——气液混合物的质量流量, kg/s ;

G_g ——气相的质量流量, kg/s ;

G_l ——液相的质量流量, kg/s 。

(二) 体积流量

单位时间内流过过流断面的气液混合物的体积,称为气液混合物的体积流量。其表达式为

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

式中 Q ——气液混合物的体积流量, m^3/s ;

Q_g ——气相的体积流量, m^3/s ;

Q_l ——液相的体积流量, m^3/s 。

二、速度

(一) 实际速度

在气液两相流动中,各相介质的体积流量被该相在过流断面上所占的面积除,称为该相的实际速度,即

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

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

式中 v_g ——气相的实际速度, m/s ;

v_l ——液相的实际速度, m/s ;

A_g ——气相在过流断面上所占的面积, m^2 ;

A_l ——液相在过流断面上所占的面积, m^2 。

然而,实际上由式(1-3)和式(1-4)所求得的是气相和液相在所占过流断面上的平均速度,真正的实际速度应该是各相介质在各点的局部速度。

(二) 折算速度

由于在气液两相流动中,各相介质在过流断面上所占的面积不易测得,所以实际速度很难由式(1-3)和式(1-4)求出。为了研究方便起见,在两相流体力学中引入了折算速度。折算速度是假定管子的全部过流断面只被两相介质中的一相占据时的流动速度,即

$$v_{sg} = \frac{Q_g}{A} \quad (1-5)$$

$$v_{sl} = \frac{Q_l}{A} \quad (1-6)$$

式中 v_{sg} ——气相折算速度, m/s;

v_{sl} ——液相折算速度, m/s;

A ——过流断面的面积, m^2 。

显然, 折算速度一定小于实际速度。即

$$v_{sg} < v_g \quad (1-7)$$

$$v_{sl} < v_l \quad (1-8)$$

折算速度是一种假想的速度, 在实际的气液两相流动中是不存在的。

(三) 两相混合物的流量速度和质量速度

两相混合物在单位时间内流经过流断面的总体积与过流断面的面积之比, 称为两相混合物的流量速度, 又称两相混合物的流速。其表达式为

$$v = \frac{Q_g + Q_l}{A} \quad (1-9)$$

式中 v ——两相混合物的流量速度, m/s。

由折算速度的定义可知,

$$v = v_{sg} + v_{sl} \quad (1-10)$$

尽管两相混合物的流量速度和折算速度一样, 都是实际上并不存在的假想速度, 但它们的引入将为两相流动的计算提供方便。

两相混合物的质量速度表示单位时间内流过单位过流断面的两相流体的总质量, 即为 G/A 。

三、滑差和滑动比

(一) 滑差

在气液两相流动中, 由于气相和液相的性质差异, 它们的实际速度一般是不相同的, 二者的差值称为滑差或滑动速度, 即

$$\Delta v = v_g - v_l \quad (1-11)$$

式中 Δv ——滑差, m/s。

(二) 滑动比

气液两相流动中, 气相实际速度与液相实际速度的比值称为滑动比, 即

$$s = \frac{v_g}{v_l} \quad (1-12)$$

式中 s ——滑动比, 无因次。

四、含气率和含液率

(一) 质量含气率和质量含液率

单位时间内流经过流断面的两相流体总质量 G 中气相质量所占的份额, 称为质量含气率, 其定义式为

$$x = \frac{G_g}{G} = \frac{G_g}{G_g + G_l} \quad (1-13)$$

式中 x ——质量含气率, 无因次。

单位时间内流经过流断面的两相流体总质量 G 中液相质量所占的份额, 称为质量含液率, 即

$$1 - x = \frac{G_l}{G} = \frac{G_l}{G_g + G_l} \quad (1-14)$$

显然, 质量含气率和质量含液率之和为 1。

(二) 体积含气率和体积含液率

单位时间内流过过流断面的两相流体总体积 Q 中气相体积所占的份额, 称为体积含气率, 其定义式为

$$\beta = \frac{Q_g}{Q} = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \quad (1-15)$$

式中 β ——体积含气率, 无因次。

单位时间内流过过流断面的两相流体总体积 Q 中液相体积所占的份额, 称为体积含液率, 即

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

(三) 真实含气率和真实含液率

在两相流动的过流断面中, 气相的过流断面面积占总过流断面面积的份额, 称为真实含气率, 又称截面含气率或空隙率, 其定义式为

$$\phi = \frac{A_g}{A} = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (1-17)$$

式中 ϕ ——真实含气率, 无因次。

在两相流动的过流断面中, 液相的过流断面面积占总过流断面面积的份额, 称为真实含液率, 又称截面含液率或持液率, 即

$$1 - \phi = \frac{A_l}{A} = \frac{A_l}{A_g + A_l} \quad (1-18)$$

对于体积含气率 β 一定的气液两相流动来说, 如果气相流得快, 液相流得慢, 则气相所占的过流断面的面积就小, 真实含气率 ϕ 就小。气相比液相流得越快, ϕ 就越小。

(四) 质量含气率、体积含气率和真实含气率之间的关系

设气相介质的密度为 ρ_g , 液相介质的密度为 ρ_l , 则

$$G_g = \rho_g Q_g$$

$$G_l = \rho_l Q_l$$

根据质量含气率的定义, 有

$$x = \frac{G_g}{G} = \frac{G_g}{G_g + G_l} = \frac{\rho_g Q_g}{\rho_g Q_g + \rho_l Q_l}$$

将等号右边的分子、分母同除以 $\rho_g (Q_g + Q_l)$, 则得

$$x = \frac{\beta}{\beta + (1 - \beta) \frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (1-19)$$

同理可得

$$\beta = \frac{x}{x + (1 - x) \frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (1-20)$$

由此可以看出, 当气相密度和液相密度已知时, 可以容易地由 β 求 x , 反之亦然。一般情况下, $\rho_g \ll \rho_l$, 所以 x 与 β 并不呈线性关系。当 x 很小时, β 随着 x 的增加而急剧增加; 当 x

很大时, β 随 x 变化的幅度很小。

又因

$$Q_g = A_g v_g$$

$$Q_l = A_l v_l$$

所以式 (1—13)、(1—15) 和 (1—17) 可以变形为以下三式:

$$x = \frac{1}{1 + \frac{G_l}{G_g}} = \frac{1}{1 + \frac{A_l v_l \rho_l}{A_g v_g \rho_g}}$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{Q_l}{Q_g}} = \frac{1}{1 + \frac{A_l v_l}{A_g v_g}}$$

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{A_l}{A_g}}$$

将以上三式与滑动比定义式 (1—12) 联立, 可得

$$\phi = \frac{1}{1 + s \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (1-21)$$

$$\phi = \frac{1}{1 + s \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)} \quad (1-22)$$

由此可以看出, 真实含气率与质量含气率以及真实含气率与体积含气率之间的关系都受滑动比 s 的影响。而影响滑动比的因素很多且很复杂, 因此, 已知质量含气率或体积含气率后欲求真实含气率, 是一个比较困难的问题。对此曾有许多科学工作者进行了大量的实验研究工作。

五、两相混合物的密度

(一) 流动密度

单位时间内流过过流断面的两相混合物的质量与体积之比, 称为两相混合物的流动密度, 即

$$\rho' = \frac{G}{Q} \quad (1-23)$$

式中 ρ' ——两相混合物的流动密度, kg/m^3 。

两相混合物的流动密度反映两相介质在流动时的密度, 因而与两相介质的流动有关。它常用于计算两相混合物在管道中的沿程阻力损失与局部阻力损失。

两相混合物的流动密度与各相的密度 ρ_g 、 ρ_l 以及体积含气率 β 之间有以下关系:

$$\begin{aligned} \rho' &= \frac{G}{Q} = \frac{G_g + G_l}{Q} \\ &= \frac{\rho_g Q_g + \rho_l Q_l}{Q} \\ &= \beta \rho_g + (1 - \beta) \rho_l \end{aligned} \quad (1-24)$$

(二) 真实密度

真实密度表示两相混物流过某过流断面上的实际密度。在管道某过流断面上取长度为 ΔL 的微小流段, 此微小流段过流断面上两相混合物的真实密度应为此微小流段中两相介质

的质量与体积之比, 即

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{\rho_g \phi A \Delta L + \rho_l (1 - \phi) A \Delta L}{A \Delta L} \\ &= \phi \rho_g + (1 - \phi) \rho_l\end{aligned}\quad (1-25)$$

式中 ρ ——两相混合物的真实密度, kg/m^3 。

由式 (1-22) 知, 当 $v_g = v_l$ 时, $s = 1$, $\beta = \phi$, 此时两相混合物的流动密度与真实密度相等, 即

$$\rho' = \rho \quad (1-26)$$

当 $v_g > v_l$ 时, $\phi < \beta$, 因之 $\rho' < \rho$ 。

对气相密度 ρ_g 和液相密度 ρ_l 一定的两相混合物, 流动密度 ρ' 主要受体积含气率 β 的影响, 而真实密度 ρ 则受真实含气率 ϕ 的影响。所以真实含气率 ϕ 与体积含气率 β 之间的本质区别必然反映到真实密度 ρ 与流动密度 ρ' 之中。一般气相介质的密度 ρ_g 远比液相介质的密度 ρ_l 小, 所以 ϕ 越大时, 则存在于管道中的两相混合物越轻, 真实密度 ρ 越小; 反之, ϕ 越小, 则 ρ 越大。但是, β 不能表示这种特性。这是由于在一般情况下, 两相介质的实际流动速度并不相等, 所以流过管道的气相体积流量与两相总体积流量之比并不等于存在于管道内的气相体积与两相总体积之比, 因而两相混合物的流动密度 ρ' 与真实密度 ρ 也不相等。

在气液两相流动中, 由于气、液相介质之间的性质差异, 从而产生了两相介质之间的滑差 (即滑动速度), 并由此造成了真实含气率与体积含气率之间的区别, 以致两相混合物的流动密度与真实密度也有着本质上的差异。因此, 真实含气率 ϕ 、真实含液率 $1 - \phi$ 以及滑动速度 Δv 都是气液两相流动研究中重要的特性参数。

第三节 气液两相流动的研究模型

气液两相流动的规律要比单相流动的规律复杂得多, 它不仅与两相介质存在的比例有关, 而且与两相介质分布的状况有关。即使是同样份额的气液质量比, 如果气液分布状况不同, 其流体力学特性也将大不相同。为了便于进行研究, 在气液两相流体力学中, 常采用简化的两相流动模型进行处理, 以便探讨其流动规律。这些常用的模型有流动型态模型、均相流动模型、分相流动模型和漂移流动模型等。

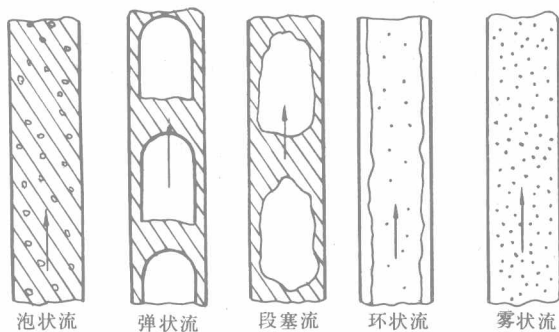


图 1-1 铅直管中气液两相的流动型态

一、流动型态模型

在气液两相流动中, 两相介质的分布状况是多种多样的。各相可以是密集的, 也可以是分散的。这种不同的分布状态, 称为气液两相流动的流动型态, 简称流型, 如图 1-1 和图 1-2 所示。

不同的流动型态具有不同的流动机理, 因此可以将气液两相流动分成几种典型的流动型态, 然后按照不同的

的流动型态分别研究其流动规律。这种处理方法即为流动型态模型处理法。简称流型模型。

气液两相流动的流动型态有多种多样, 界限也不十分清晰, 严格地讲各种流动型态之间

都是逐渐过渡的。但是在实际研究中，在一定的精度要求下，可以人为地将其划分为几种流动型态。并且认为，在每一种流动型态范围内，其流体力学特性是基本相同的。

流动型态的划分方法，目前有两类。第一类划分方法是根据两相介质分布的外形划分的，其划分结果如图 1—1 和图 1—2 所示。第二类划分方法是按照流动的数学模型划分的，分为分散流、间歇流和分离流三种。第一类划分方法所划分的结果较为直观，第二类划分方法所划分的结果便于进行数学处理。两类划分方法所划分的结果具有确定的对应关系。

第一类划分方法 第二类划分方法

泡状流	分散流
弹状流或团状流	间歇流
层状流（水平管中）	分离流
波状流（水平管中）	分离流
段塞流或冲击流	间歇流
环状流	分离流
雾状流	分散流

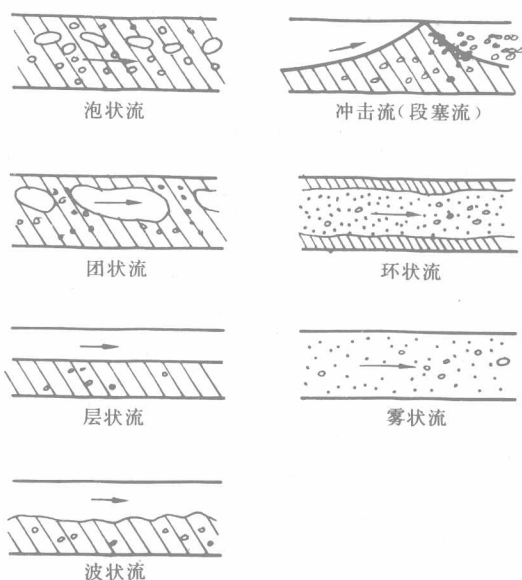


图 1—2 水平管中气液两相的流动型态

应该指出，在第一类划分方法中，也有人将铅直管中的流动型态划分为泡状流、段塞流、搅动流和环状流四种。

流动型态模型处理法在数学上是非常复杂的，计算量也十分庞大，在以前没有计算机辅助的情况下甚至是不可能研究的。由于它根据各种流型的特点分析其特性并建立相应的关系式，从而能深入地研究两相流动的实质，因此这种模型不仅具有普遍的意义，而且具有较高的精确性，是今后气液两相流动的研究方向。但是目前对流动型态模型的研究仍处在发展阶段，所以这种模型尚未在工程中获得广泛的应用。

二、均相流动模型

均相流动模型简称均流模型，它是把气液两相混合物看成为均匀介质，其流动的物理参数取两相介质相应参数的平均值。这样便可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，采用了两个假定：

(1) 气相和液相的实际速度相等，即

$$v_g = v_l = v$$

因而滑差

$$\Delta v = v_g - v_l = 0$$

滑动比

$$s = \frac{v_g}{v_l} = 1$$

真实含气率与体积含气率相等，

$$\phi = \beta$$

所以真实密度和流动密度也相等，

$$\rho = \rho'$$

(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。此条件在等温流动中是精确成立的, 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, 由于均流模型计算简单, 使用方便, 因而工程中大量的气液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

对稳定的一维均相流动, 其基本方程式如下:

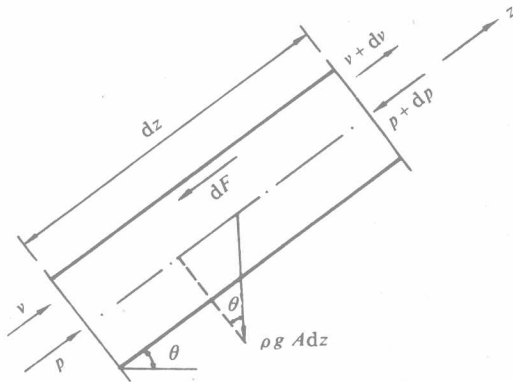


图 1-3 稳定的一维均相流动

根据动量定律, 得动量方程式

$$-Adp - dF - \rho g A dz \sin \theta = Gdv \quad (1-28)$$

3. 能量方程式

根据能量守恒定律, 有

$$d(gz \sin \theta + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}) + dE = 0 \quad (1-29)$$

式中, dE 表示单位质量两相混合物的机械能损失。

密度 ρ 可以用两相混合物的比容 v' 表示为

$$\rho = \frac{1}{v'} \quad (1-30)$$

所以

$$\frac{p}{\rho} = pv'$$

$$d(pv') = p dv' + v' dp$$

将上式代入式 (1-29), 得能量方程式

$$gdz \sin \theta + p dv' + v' dp + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + dE = 0 \quad (1-31)$$

上式还可写成压差的表达式

$$-v' dp = gdz \sin \theta + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + dE + p dv' \quad (1-32)$$

1. 连续方程式

根据质量守恒定律, 有

$$G = \rho v A = \text{常数} \quad (1-27)$$

2. 动量方程式

取一维流段 dz 来研究, 其直径为 D , 过流断面面积为 A , 如图 1-3 所示。今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 $-dF$ 。

式中, $p dv'$ 是单位质量的两相混合物对外所作的功。

(二) 均流模型摩擦阻力的折算系数

在按均流模型进行气液两相流动摩擦阻压差计算时, 常把两相流动摩擦阻力的计算与单相流动摩擦阻力的计算关联起来。为此常使用全液相折算系数、分液相折算系数或分气相折算系数。

1. 全液相折算系数

设水平管道内的两相流动为均匀流动, 管子直径为 D , 断面积为 A , 流段长度为 dz , 如图 1—4 所示。其速度 v 沿流程不变, 质量流量为 G , $G = G_g + G_l$ 。此时, 没有重位压差与加速压差。

由动量方程式 (1—28) 可知, 摩擦力 dF 与压差 $-dp$ 之间有如下的关系:

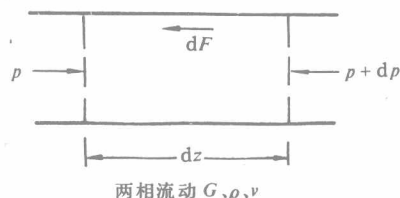


图 1—4 两相流动

$$dF = -dpA$$

而

$$\begin{aligned} dF &= \tau_w \pi D dz \\ &= f \frac{\rho v^2}{2} \pi D dz \end{aligned} \quad (1-33)$$

式中 τ_w ——流体与管壁之间的切应力;

f ——范宁 (Fanning) 摩阻系数。

另外, 假设一种情况, 设管道的 D 、 A 和 dz 不变, 通过管道的质量流量仍为 G , 但流体为单一的液体, 没有气相, 如图 1—5 所示。显然, 此时的流体密度为 ρ_0 , 速度为 v_0 。

于是, 流体与管道的摩擦力为

$$\begin{aligned} dF_0 &= -dp_0 A \\ &= f_0 \frac{\rho_0 v_0^2}{2} \pi D dz \end{aligned} \quad (1-34)$$

将这种流动情况与前述的两相流动相比较, 并定义这两种情况下的摩擦力的比值, 亦即压差比值, 为全液相折算系数, 以 ϕ_o^2 表示:

$$\begin{aligned} \phi_o^2 &= \frac{dF}{dF_0} = \frac{dp}{dp_0} \\ &= \frac{f \frac{\rho v^2}{2} \pi D dz}{f_0 \frac{\rho_0 v_0^2}{2} \pi D dz} \\ &= \frac{f \rho v^2}{f_0 \rho_0 v_0^2} \end{aligned} \quad (1-35)$$

这样, 两相压差便可以由全液相压差求得

$$dp = \phi_o^2 dp_0 \quad (1-36)$$

全液相折算系数 ϕ_o^2 可以用实验方法确定。

2. 分液相折算系数

再假设一种情况。设管道的 D 、 A 和 dz 仍与两相流动管道的相同, 但通过管道的流体为单一的液体, 而且其质量流量等于两相流动中液相的质量流量 $G_l = G(1-x)$, 如图 1—6 所示。

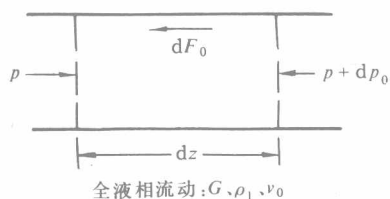


图 1—5 全液相流动

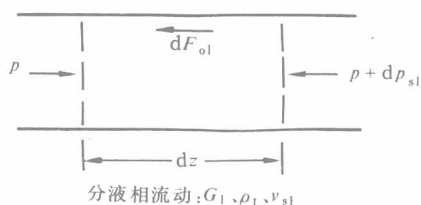


图 1 6 分液相流动

显然，此时的流体密度为 ρ_l ，速度为 v_{sl} 。于是，流体与管道的摩擦力为

$$\begin{aligned} dF_{ol} &= -dp_{sl}A \\ &= f_{sl} \frac{\rho_l v_{sl}^2}{2} \pi D dz \end{aligned} \quad (1-37)$$

将这种情况与前述的两相流动比较，并定义这两种情况下摩擦力的比值，亦即压差的比值，为分液相折算系数，以 ϕ_l^2 表示：

$$\begin{aligned} \phi_l^2 &= \frac{dF}{dF_{ol}} = \frac{dp}{dp_{sl}} \\ &= \frac{f \frac{\rho v^2}{2} \pi D dz}{f_{sl} \frac{\rho_l v_{sl}^2}{2} \pi D dz} \\ &= \frac{f \rho v^2}{f_{sl} \rho_l v_{sl}^2} \end{aligned} \quad (1-38)$$

这样，两相压差便可以由分液相压差求得

$$dp = \phi_l^2 dp_{sl} \quad (1-39)$$

3. 分气相折算系数

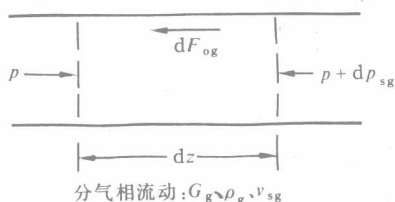


图 1—7 分气相流动

再假设另一种情况。设管道的 D 、 A 和 dz 仍与两相流动管道相同，但通过管道的流体为单一的气体，而且其质量流量等于两相流动中气相的质量流量 $G_g = Gx$ ，如图 1—7 所示。

显然，此时的流体密度为 ρ_g ，速度为 v_{sg} 。于是，流体与管道的摩擦力为

$$\begin{aligned} dF_{og} &= -dp_{sg}A \\ &= f_{sg} \frac{\rho_g v_{sg}^2}{2} \pi D dz \end{aligned} \quad (1-40)$$

类似地，分气相折算系数 ϕ_g^2 为

$$\begin{aligned} \phi_g^2 &= \frac{dF}{dF_{og}} = \frac{dp}{dp_{sg}} \\ &= \frac{f \frac{\rho v^2}{2} \pi D dz}{f_{sg} \frac{\rho_g v_{sg}^2}{2} \pi D dz} \\ &= \frac{f \rho v^2}{f_{sg} \rho_g v_{sg}^2} \end{aligned} \quad (1-41)$$

这样，两相压差便可以由分气相压差求得

$$dp = \phi_g^2 dp_{sg} \quad (1-42)$$

我们知道， f_o 、 f_{sg} 和 f_{sg} 都是单相流动的范宁系数，很容易求得。所以引入折算系数的实质是将求解两相流动的范宁系数 f 与摩擦压差 dp 的问题转化为求折算系数的问题。只要用实验方法求得任意一个折算系数，就可以根据这个折算系数去求两相流动的 f 和 dp 。

三、分相流动模型

分相流动模型简称分流模型。它是把气液两相流动看成为气、液相各自分开的流动，每相介质都有其平均流速和独立的物性参数。因此需要建立每一相介质的流体动力特性方程式。这就要求预先确定每一相占有过流断面的份额（即真实含气率）以及介质与管壁的摩擦力和两相介质之间的摩擦阻力。为了取得这些数据，目前主要是利用试验研究所得的经验关系式。近年来，随着计算流体力学的发展，有些数据已可以通过数学模型用解析计算求得。

分流模型的基本假设是：

(1) 两相介质分别有各自的按所占断面计算的断面平均流速；

(2) 虽然两相介质之间可能有质量交换，但两相之间是处于热力学平衡状态，压力和密度互为单质函数。

分流模型适用于层状流、波状流和环状流。

(一) 连续方程式

对稳定的一维分相流动，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 1—8 所示。根据质量守恒定律，有

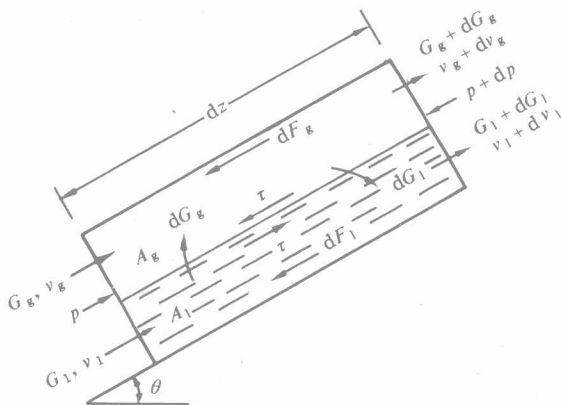


图 1—8 稳定的一维分相流动

$$G = \text{常数} \quad (1-43)$$

$$dG_g = -dG_l \quad (1-44)$$

$$\begin{cases} G_g = Gx = \rho_g v_g A_g \\ G_l = G(1-x) = \rho_l v_l A_l \end{cases} \quad (1-45)$$

$$(1-45a)$$

$$\begin{cases} dG_g = Gdx = d(\rho_g v_g A_g) \\ dG_l = Gd(1-x) = d(\rho_l v_l A_l) \end{cases} \quad (1-46)$$

$$(1-46a)$$

(二) 动量方程式

设液相沿流程为蒸发过程，则气相的动量方程式为

$$\begin{aligned} pA_g - (p + dp)A_g - dF_g - \tau - \rho_g g A_g dz \sin \theta \\ = (G_g + dG_g)(v_g + dv_g) - G_g v_g - v_l dG_g \end{aligned}$$

将上式化简，忽略高次微量，则得

$$-A_g dp - dF_g - \tau - \rho_g g A_g dz \sin \theta = G_g dv_g + v_g dG_g - v_l dG_g \quad (1-47)$$

式中 dF_g ——气相与管壁接触部分的摩擦阻力；

τ ——气液界面上的切应力。

同样，液相的动量方程式为