

## 气液二相流研究概述

马根娣 孙鸿元

(中国科学技术大学)

**主题词** 气液二相流; 流动型式; 经验方法; 分析方法; 唯象方法; 理论模型

气液二相流研究液体和气体(或蒸气)两相介质共存条件下的流动特性。二相体系可以是液体中含有气体或(蒸气)泡或者气体,(或蒸气)中含有液体微滴,也可能因其中气泡或液滴的聚并,两相间形成更复杂的分布状态。气液二相流是自然界、日常生活中常见的现象,在许多工程技术中广泛存在。随着现代技术的发展,不断涌现出大量的气液二相流问题。如石油的开采、运输和炼制;化学工业中各种炉、塔、床中的流动;金属的冶炼;喷气发动机喷嘴、雾化设备、喷雾干燥器以及核反应堆中各类管道中的流动等。实际应用的需要无疑是对科学研究的推动。石油工业发展的需要,推动了气液二相管道流动的研究。初期,研究重点是在压力降上,不怎么关心热传递,大部分是绝热性质的研究。随着空间技术和核能利用方面的进展,二相流的应用首先同热传递问题联系起来,这样,近期的研究就涉及加热二相流动。例如沸腾热交换和热力学临界点附近的流体传热问题已引起了研究者们极大兴趣。近30多年来,这方面已有大量的文献发表,[1]对此作了系统的叙述。当液体压力低于临界压力时,气泡形成并逐渐长大(称为“空化”)。气泡从生长到崩溃,对固壁面产生极大的破坏作用,严重地损害各种流体机械(如泵、船舶螺旋桨等)的性能,因此空化腐蚀早已是流体机械领域中的一个重要问题。有关这方面的研究,[2]作了总结。

气液二相流的研究不仅渗透到许多重要技术领域,而且也成为物理化学流体力学、地球流体力学等学科的共同基础。近30年里,二相流的研究异常活跃;现在,每年都有数以千计的文献发表,无论是理论还是实验都取得了重大进展,但仍然存在着相当大的不确定性。这正反映了气液二相流动的复杂性。如果想到单相湍流的问题还未完全解决,那么对二相流研究的这种现状也就不奇怪了。

气液二相流之所以比单相流复杂,主要是由于相交界面的存在。通过相交界面,两个相间存在着相互作用,包括质量、动量和能量的输运。与气固二相流动相比,气液二相流还要更复杂些。在气液二相流动中,即使气相介质与液相介质的质量比例相同,两个相之间的分布状况,仍可能是密集的或均散的,这与气固相似;但当密集时,可能有不同程度的聚并现象,例如小气泡并成大气泡或小液滴并成大液滴,甚至两个相截然分开。因此气液两相间的几何位形比气固两相的更加多样化,这必然影响到力学关系和传质传热性能的多变性。此

外, 复杂的因素还有: 流动经历的影响, 各种形式的非平衡态 (如相变中的成核现象), 少量杂质与微小瑕疵产生的巨大影响 (如发泡剂或较小的几何变化引起液体射流的早期分离), 以及与系统组元性质有关的波动现象等等。由于气液二相流动比较复杂, 影响因素很多, 因而有人称之为“不确定” (insecure) 的科学<sup>[3]</sup>。面对这种不确定性, 必然有多种多样的研究方法和理论模型随之发展。下面着重介绍气液二相流的研究方法和现行的几种理论模型; 对实验研究也作一些简单介绍; 基于流动状态对气液二相流问题的重要性, 本文将首先阐述这方面的研究; 最后指出本问题目前发展的大致趋势。

### I. 流动型式

气液二相流动的几何位形, 即两相间的界面分布状况, 称为“流动状态” (flow regimes), 或称“流动型式” (flow patterns), 也有叫“流动机构”的, 一般简称为“流型”。

流型的变化往往意味着动量和热量输运方式的变化。只有首先明确是属于哪一种流型, 才能谈得上采取什么样的处理方法。因此, 流型是一个非常重要的研究课题。研究人员为确定各种流型的特征和相互间的界限已经做了大量的工作, 这在 [4—7] 中有很好的论述。流型的划分是相对的, 在一定的精度要求下可以人为地区分为若干种。基本的流型有如图 1 所示的四种: ①泡状流 (Bubbly flow), 即离散的气体 (或蒸气) 泡弥散在连续液体流中; ②塞状流 (Slug flow), 即圆柱状的气泡和液体块交替地穿过管道中的指定位置; ③环状流 (Annular flow), 即液相以环状形式沿管壁流动, 气相在中心流动; ④雾化流 (Mist flow), 即离散的液滴弥散在连续的气相中。有些研究者把流型分得更细, 例如弥散环状流、搅拌塞状流等, 这些不过是基本流型的转换或综合形式而已。图 2 说明流型对传

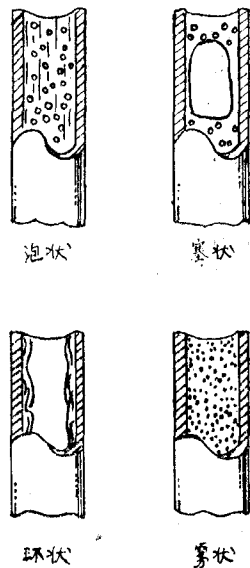


图 1 四种基本流型<sup>[1]</sup>

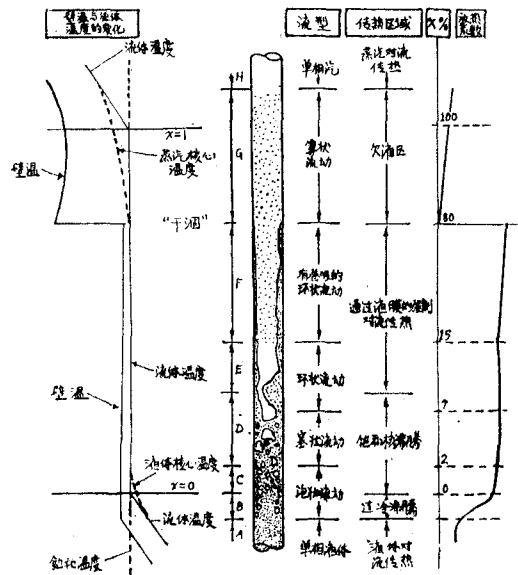


图 2 铅直水管的流型与传热工况关系图<sup>[15]</sup>

热、动量输运的影响。由此可见, 随着干度  $x$  的增加, 由泡状流变为塞状流-雾化流。Hosler<sup>[6]</sup>总结了流型的研究, 列出了表格。

早先流型的描述仅限于定性,很大程度上依赖于观察者的判断能力。Hubbard & Dukler<sup>[3]</sup>定量地划分流型,发现管道壁面压力波动频谱可作为划分流型的合适的参量。企图用局部参量来确定流型的研究迄今尚未取得成熟的结果。因为正如前面所述,影响流型的因素很多,除去流体力学参数外,还有热力学参数的影响,特别是一些不易确定的因素,例如气相形成的方法和方式,流体动力平衡和热平衡的破坏和建立,介质中的杂质成分等等。尽管如此,目前仍在大力研究,以期用有限的局部流动参数确定流型界限。使用最多的是流型图。严格确定流型必须采用多元坐标系。一般只选择适当的二元坐标系,就是用两个限定的流动参数或组合参数为坐标参数,在平面中将不同的流型范围表示出来。最通用的坐标是液体流量率对气体流量率。水平绝热管道中最早使用的是 Baker 流型图。后来 Madhane 提出的水平管道新流型图,适应性更为广泛<sup>[9,10]</sup>。

除流型图外还有各种流型转换的其它判别法,其判别条件可分为四类:流量率为控制参量;流量率和干度为控制参量;量纲分析;其它分析与经验方法。详见[1] Ch.6。

流型图及其转换判据虽已研究得很多,但至今得到的结果基本上是基于绝热模型假设。对于沸腾二相流动,由于流动的非定常性、非均匀性和非平衡态,流型连续不断地变化着,没有确定的判据能系统地加以描述。遇到这种工程实际中的复杂情况,目前借助于热力学平衡态和定常条件下测定的流型,然后审慎地根据趋向作一些适当修正,改变流型界限。

## II. 研究方法

二相流的研究方法主要是在广泛实验的基础上,根据流体力学理论建立模型,通过计算机取得流动参量之间的函数关系,作为工程设计的依据。近来在计算机辅助下建立包括流动、传热、传质的数学模型,直接通过计算得到结果,并由试验对模型作必要的修正。

Hewitt<sup>[11]</sup>把二相流的研究方法分成经验方法、分析方法和唯象方法。下面详细讨论并总结各自的优缺点。

1. 经验方法 方法的步骤是:①收集试验或现场中的数据;②对系统变量建立任意或半任意的相关方程;③使用任意常数或任意函数使方程能够拟合实际数据;④根据③得来的方程去预测其它情况。

经验方法主要优点是使用直接、简单。但由于在拟合方程时所用的数据范围有限,所以

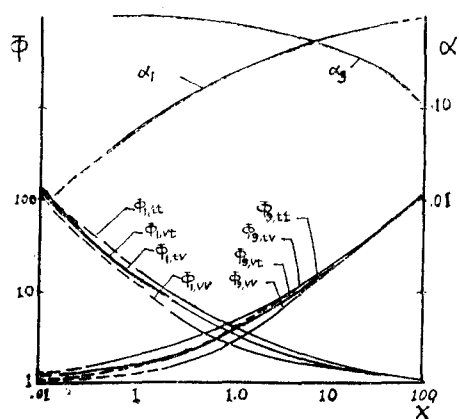


图3 参量  $\phi$  和体积分数  $\alpha$  随参量  $X$  的变化<sup>[1]</sup>

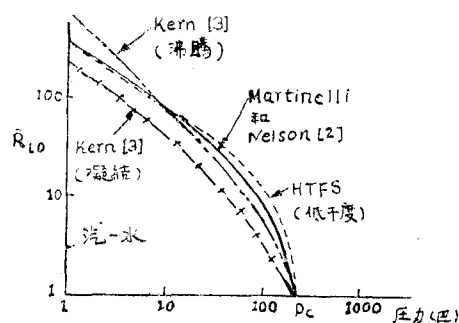


图4 几种关系曲线的比较<sup>[11]</sup>

得到的预测关系式精度受到限制, 外延推广会有很大的误差。如某些干涸 (dryout) 关系, 外推预测得到的干涸流量可能比管道中液体全部蒸发量还大。尽管其局限性很明显, 但它还是目前绝大多数设计计算的基础。应用本方法的典型代表有 Kern<sup>[12]</sup>, Martinelli 等<sup>[13,14]</sup>, Baroczy<sup>[15]</sup>, Chisholm<sup>[16]</sup>, Grant<sup>[17]</sup> 和 Friedel<sup>[18]</sup> 等。其中以 Kern 关系式和 Martinelli 关系式最为著名, 至今为设计部门广泛使用。

Lockhart & Martinelli<sup>[13]</sup> 对水平管内二相流提出一种通用处理法, 其基本特点是令

$$(dp/dz)_T = \phi_s^2 (dp/dz)_S \quad (1)$$

下标  $T$  表示二相流,  $S$  表示单相流, 可为气相或液相。按流体力学方法计算液相和气相压力降  $\Delta p_l$  和  $\Delta p_g$ , 求出  $X = (\Delta p_l / \Delta p_g)^{1/2}$ , 计算液、气分别经过同一管道时的雷诺数  $Re$ , 确定单相层流或湍流, 查曲线图 3 得  $\phi_s$ , 由式 (1) 得二相流的压力梯度。实际使用时需加修正因子。图 4 是在高压汽-水系统中 Martinelli-Nelson 关系与其它关系及实验数据的比较。

2. 分析方法 分析方法试图从基本原理出发推导二相流控制方程, 主要步骤是: ①对每相和界面条件建立局部瞬时方程; ②用平均方法得到瞬时空间平均方程、局部时间平均方程和时间空间平均方程; ③把平均方程简化到要求的程度 (如含有相间相互作用项的多流体方程), 以此来求解实际问题。Delhay 对本方法作过系统的总结 (见 [1] Ch.5)。

考虑管道流动的  $n$  相混和物的第  $i$  相典型平均方程为:

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \varepsilon_i A) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_i u_i \varepsilon_i A) = -\dot{m}_{i1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{动量方程} \quad & -\varepsilon_i \frac{\partial p}{\partial z} - g \rho_i \varepsilon_i \sin \alpha - \frac{\tau_{i0} p_{i0}}{A} + \frac{1}{A} \sum_{s=1}^n \tau_{is} p_{is} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i u_i \varepsilon_i) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_i u_i^2 \varepsilon_i A) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{能量方程} \quad & \frac{\partial}{\partial t} (A \varepsilon_i \rho_i U_i) + \frac{\partial}{\partial z} (A \varepsilon_i \rho_i U_i u_i) \\ & = -p \left( \frac{\partial}{\partial t} A \varepsilon_i + \frac{\partial}{\partial z} A \varepsilon_i u_i \right) + q_{i0} + \sum_{s=1}^n (E_{is} + q_{is}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\rho_i$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $u_i$  和  $U_i$  分别是  $i$  相的密度、体积分数、速度和内能;  $A$  是管道横截面积;  $z$  是轴向距离;  $p$  是压力;  $\dot{m}_{i1}$  是每单位管长第  $i$  相质量减少率;  $q_{i0}$  是每单位管长通过管壁输给  $i$  相的热量;  $q_{is}$  是每单位管长  $s$  相和  $i$  相之间交换的热能;  $E_{is}$  是  $s$  相和  $i$  相之间由于机械相互作用交换的能量率;  $\tau_{i0}$  和  $\tau_{is}$  是壁面和界面上的剪切应力, 它们与  $p_{i0}$  和  $p_{is}$  对应。方程 (4) 是 Hughes<sup>[19]</sup> 给出的一个广义形式的能量方程。

分析方法较严密, 所得关系式更有普遍性。借助于现代计算技术, 无疑是一个行之有效的方法。但对所得的平均方程如不作某些简化, 没有谁能轻而易举地运用。并且上述这组平均方程还不是封闭的, 要能求解, 预测诸如相含量  $\varepsilon_i$  和压力变化这样一些参量, 还需知道一些相关关系, 如壁面及界面的剪切力和质量、能量的传递项等。显然, 只有当这些相关关系有一定的物理基础或有更大的普遍性时, 分析方法才能给出超过经验方法的改进。

从事本方法的典型代表有 Delhay<sup>[20]</sup>, Ishii<sup>[21]</sup>, Hughes<sup>[19]</sup> 及 Drew & Lahey<sup>[22]</sup>。

Delhaye<sup>[23]</sup>给出了一些例子,例如他处理铅直管中的空气-水的泡状流,通过定常、常压力梯度的充分发展的流动假设,并通过适当选择涡扩散,计算了空隙分数分布剖面。对于泡状流,该分布剖面是径向位置和轴心处空隙分数的函数。

3.唯象方法 唯象方法试图从物理上透彻地了解存在的现象,并据此建立模型。其主要步骤是:①按相界面分布方式确定流型;②详细地观察现象,并行使相应的测量手段;③建立理论或半理论的物理模型来描述局部现象;④综合局部模型,得到对整体系统的描述;⑤运用整体模型进行预测、设计。

本方法的主要优点是,能在物理上深刻地了解现象,描述的真实性得到了改善,为把所建立模型外延到不同系统开辟了较好的途径。但模型的正确选择取决于对物理本质的深刻认识,而这种认识却难以用规格化的方式表达,在常规设计中,也往往显得过分地依赖于数据资料。

唯象方法在许多方面取得了成功,典型的应用:有 Taite & Dukler<sup>[24]</sup>关于流型的工作;Moissis & Griffith<sup>[25]</sup>关于铅直柱塞流的工作;Stuhmiller等<sup>[26]</sup>最近关于泡状流的工作。Hewitt<sup>[11]</sup>预言环状流动,用扩散和直接碰撞相结合的模式描述液滴沉积过程,得到很理想的预测结果。他指出,在环状流唯象模型中,虽然精度更高更完善的结论有待进一步研究,然而即使相对低水平的改进,在预言上仍然能得到相当大的好处。

### III. 理论模型

二相流的基础理论依然是详细描述每一相运动的经典流体力学的形式。可惜从基本方程(如 Navier-Stokes 方程)出发进行严格推导,这种方法应用于二相流,统计所有研究例子,是毫无希望的工作。因此不得不去发展通常是近似的组合的概念,既抱有希望又带有疑虑地把它们应用于一定范围内貌似相似的问题。这样的方法是以限制了真实性的假设为依据的。是否能有一个把问题复杂性简化成适用于所有应用的统一的方法,这是值得怀疑的。因而多种多样的理论分析模型的发展是必然的。总结已有的研究资料,在气液二相流中目前应用的理论模型主要有:均匀流模型;分离流模型;连续介质模型(如 N-S 方程)等。

1.均匀流模型 这是将两相看成为一种均匀介质,这种介质具有均一的流动参数,其物理特性参数是气液两相介质的相应参数的平均值。因此可以按单相介质处理其流体力学问题。它适用于两相介质流量和流速较大、压力较高的情况,适用于泡状流型和雾状流型。但对某些变量(如环形雾状流中的压力降)提供了合理结果的同时,对另一些内容(如环形流中的干涸)的预测给出荒谬的结论。

2.分离流模型 它在分析方法中有时称为双流体或异相流(Heterogeneous flow)模型。各相性质不同,如有其独立的温度、密度和速度等物理参数,并且各自满足某种形式的质量、动量和能量守恒方程。在建立守恒方程时,可以在限定范围内对一些项进行取舍。特别是处理相间相互作用项时,如何选择纯属主观臆断,很难说哪种方案最恰当,唯一的判据是对分析的特定目的的实用。当然,力求形式简单,方程简化有实验基础,数学上是相容的、可靠的,这是选择方案的基本原则。

此模型现多用于分层流动和环状流动,对流态化、雾化环状流、逆向流动和某些喷嘴流动等特殊情况处理结果令人满意;也作为解决“系统”问题的主要方法。分离流模型的主要缺点是:需要解一组复杂的方程组;方程的形式需随流动状态的发展而变化;为了考虑各种

流动状态, 相互作用项及相关关系要求有大量的实验输入; 三维流场用本模型处理太复杂。应用本模型的典型工作有[27—31, 42]。

3. 连续介质模型 对二相流来说, 最彻底的方法是把每一相作为一种连续介质, 得到对三维流场的详尽描述。这样就要涉及两组矢量的连续性和动量(如 N-S) 方程, 加上边界的及体现质量传递和表面张力作用的界面条件。然而, 即使所有界面形状都知道(通常并非如此), 除了几个特例之外, 这也还是一件十分吃力的工作。这种方法可能具有更大的严密性, 但是它的应用不可避免地受到限制。迄今取得成功的有绕单泡或液滴的流动, 或悬浮颗粒体系作漂移、无旋或剪切流动。这方面的典型工作有[32—39]。

#### IV. 实验研究

60年代以来, 气液二相流实验技术已有了显著进步。最早的实验包括诸如用照相显示技术得到定性的资料, 或者用 $\gamma$ 射线一类技术测定空隙比这样一些定量资料。近期发展了各种探针, 如等动力探针(Isokinetic probe), 热线风速仪, 电探针以及精密热偶等技术。这些探针的运用获得了速度场、空隙分布等二相流方面更细致的资料。

1. 显示技术 这部分的光学技术主要有前后向照明、阴影仪和纹影仪及全息技术。其中最先进的是激光显示技术。通过光学显示可以深入细致地认识二相流的物理图像, 如挟带流动中液滴的产生与沉积, 每种流型的流动特性, 确定流型的转换, 流动分布, 气泡或液滴的轨迹, 液膜表面波, 干涸以及不稳定性的开始, 气泡区域的位置大小等等。

2. 宏观量的测量 早期的测量目的是确定管道末端的空隙率或动量通量, 用快闭阀来采集管道截面的流体。

3. 液膜的测量 管壁上液膜全部气化叫做干涸。在冷却设备中要防止出现干涸。环状流或雾化环状流很可能引起干涸, 因此这种流型极其重要。液体环形膜的厚度、速度分布等参量应该首先加以确定。测量膜的方法很多, 有测量电容、电导探针及抽样等技术。其中电导探针占有重要地位。用它测量两电极之间的液膜电导率。管道中两电极可以装在壁面上平行环或壁面上两相距点上。Krasniakova 1952 年用环的方法测量了两环之间的平均液膜厚度。1963 年 Hewitt 和 Lovegrove 发现 Krasniakova 的测量值比实际小 30%, 因为她没有考虑界面波的影响。两点式电极也有许多人使用。1964 年 Moeck<sup>[40]</sup> 在一管束上使用了 36 对电极。

4. 放射线测量技术 放射线测量技术是一种透视技术, 可以测量流型及空隙比。1969 年 Schrock<sup>[41]</sup> 总结了这方面的工作。

5. 局部探针设备 限于篇幅, 仅列各种探针设备于下: ①热线风速仪或热膜风速仪; ②等动力样品探针(Isokinetic sample probe); ③电探针, 包括电导探针、电容探针、时间区域反射器(Time-domain reflectometer) 和散射分析器。此外还有光探针、精密热偶、阻力圆盘(或杆)与透平仪表等。

气液二相流的实验研究详见[1] Ch.12。关于液滴速度与浓度的测量见[43, 44]。

#### V. 总结与展望

经验方法、分析方法和唯象方法是研究气液二相流的基本方法。经验方法有局限性, 误差较大, 从发展眼光看, 必将被逐步淘汰; 但它在工程发展上使用简单、方便, 加上其它方法有待发展, 所以还会使用好些年。分析方法很严密, 但纯粹的分析方法适用性很小。通过对物理现象的透彻理解, 并用简单的模式去描述, 唯象方法是较好的预言方法。分析方法和

唯象方法的结合,构成一种特殊分析方法,很可能在不久的将来作为一个主要方法而居优势。利用从分析方法发展的理论体系来说明唯象模式,并沟通各模式间的关系;而利用唯象方法获得一些相关关系,使得分析方法有更丰富而可靠的实验基础,更具普遍性。

在理论进展中,目前最活跃的方面是分离流(双流体)模型,它对不少实际问题(特别是那些有很确定的流型的问题)的描述是有潜力的,也许在这方面将有更大的成功,特别是在三维问题方面。因为现代计算技术使我们有可能去处理所有的联立方程。当然,理论分析需要有实验支持,因而实验方法必须得以发展。

实验研究方面,随着现代实验技术的发展,对局部流动参数(速度、液滴与气泡尺寸、温度、浓度等)的测量和对局部现象的观察这类工作会大大加强。据此会建立更多更好的唯象模型,这无疑将会使预测精度有长足的进步,也会为工程设计人员提供更有用的模型。

总之,现代工业、技术的飞速发展,一方面不断提出气液二相流的许多研究课题,另一方面又为研究者们提供了不断更新的计算技术和实验手段,加速对那些“不确定”性规律的认识,如用局部参数确定流型,从理论上确定相关关系,对非稳定、非平衡态问题的研究和三维流场的分析计算等。可以肯定,在今后许多年中,气液二相流仍将是引人注目的课题。

## 参 考 文 献

- 1 Hsu Yih-Yun, Transport Processes in Boiling and Two-Phase Systems, Hemisphere Publishing Corporation (1976) .
- 2 Hammit F. G., Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw-Hill Inc. (1980) .
- 3 Wallis G. B., Review-theoretical models of gas-liquid flows, *J. Fluid Eng.*, 104 (1982): 279.
- 4 Vor J.H., Flow patterns of two-Phase flow—a survey of literature, T. I. D. 1154, Columbia Univ., New York (1960) .
- 5 Clarvonia A. A., A review of the published literature pertaining the annular, Two-phase flow of liquid and gaseous media in a pipe, AD-2080-40, Purdue Univ., Lafayette, Ind. (1958) .
- 6 Hcsler E. R., Flow patterns in high pressure two-phase (steam-water) flow with heat addition, WAPD-TW-658, Westinghouse Co. Pittsburgh, Pa. (1967) .
- 7 Gouse S. W., An index to the two-phase gas-liquid flow literature, pat II, pat III, Rept. No. DSR-87344 and 9834-5 (1964, 1966) .
- 8 Hubbard M. G., Dukler A. E., The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow, *Heat Trans. Fluid Mech. Inst.*, Stanford Press (1966) : 100—121.
- 9 郑洽余, 鲁钟琪, 流体力学, 机械工业出版社 (1980) : 第十一章.
- 10 连桂森, 多相流动基础, 全国物理化学流体力学学习班教材 (1983) : 上册 § 2.1.
- 11 Hewitt G. F., Two-phase flow and its applications: past, present, and future, *Heat Trans. Eng.*, 4, 1 (1983) : 67—79.
- 12 Kern D. Q., Process Heat Transfer, McGraw-Hill, New York (1950) .
- 13 Lockhart R. W., Martinelli R. C., Proposed correlation of data isothermal two-phase, two-component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.*, 45, 1 (1949) : 39—48.
- 14 Martinelli R. C., Nelson D. B., Prediction of pressure drop during forced-circulation boiling of water, *Trans. ASME*, 70 (1948) : 695—702.
- 15 Baroczy C.J., A systematic correlation for two-phase pressure drop, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 62, 64 (1966) : 232—249.
- 16 Chisholm D., Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16 (1973) : 347—358.
- 17 Grant I. D. R., Flow and pressure drop single and two-phase flow on the shell-side of segmentally baffled shell-and-tube heat exchangers, in advances in thermal and mechanical design of shell-and-tube heat exchangers, NEL Rept. 590 (1975) .
- 18 Friedel L., Improved pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow, *3R Int.*, 18, 7 (1979) : 485—492.

- 19 Hughes E. D., Microscopic balance equations for two-phase flow models, *Nucl. Eng. Des.*, **54** (1979) : 239—259.
- 20 Delhaye J. M., Equations fondamentales des écoulements diphasiques, CEA-R3429 (1968) .
- 21 Ishii M., Thermo-fluid dynamic theory of twophase flow, Eyrolles, Paris (1975) .
- 22 Drew D. A., Lahey R. T., Application of general constitutive principles to the derivation of multidimensional two-phase flow equations, *Int. J. Multiphase Flow*, **5** (1979) : 243—264.
- 23 Delhaye J. M., Two-phase flow and heat transfer in the power and process industries, Hemisphere, Washington, D. C. (1981) : Ch. 2.
- 24 Taitel Y., Dukler A. E., A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, *AIChE J.*, **22** (1976) : 47—55.
- 25 Moissis R., Griffith P., Entrance effects in a two-phase slug flow, *J. Heat Transfer* (Feb. 1962) : 29—39.
- 26 Stuhmiller J. H., Ferguson R. E., Wang S. S., Two-phase flow regime modelling, Paper 36, Third CNSI Specialist Meeting on Transient Two-Phase Flow, California Inst. of Technology, Pasadena (1981) .
- 27 Wallis G. B., One Dimensional Two-Phase Flow, McGraw-Hill (1969) : Ch. 11.
- 28 —, Richter H. J., Kuo J. T., The separated flow model of two-phase flow, Electric Power Research Institute Report EPRI (1976) : 275.
- 29 Crowe C. T., Numerical models for gas-particle flow, Keynote paper, ASME Symp. on Polyphase Transport Technology, San Francisco (1980) .
- 30 Alper R. L., Mathews M. K., Calculation of large-scale flow fields induced by droplet sprays, *ibid* (1980) : 115—127.
- 31 Bouré J. A., Mathematical modeling and the two-phase constitutive equations, European Two-phase Flow Group Meeting, Haifa (1975) .
- 32 Clift R., Grace J. R., Weber M. E., Bubbles, Drops and Particles, Academic Press (1978) .
- 33 Bretherton F. P., The motion of long bubbles in tubes, *J. Fluid Mech.*, **10** (1961) : 166—188.
- 34 Haber S., Hetsroni G., The dynamic of a deformable drop suspended in an unbounded Stokes flow, *ibid*, **49** (1971) : 257—277.
- 35 Ardron K. H., One-dimensional two-fluid equations for horizontal stratified two-phase flow, *Int. J. Multiphase Flow*, **6** (1980) : 295—304.
- 36 Dukler A. E., Fluid mechanics and heat transfer in vertical falling film systems, *Chem. Eng. Progr. Symp. Ser.*, **56** (1960) , 30.
- 37 Hewitt G. F., Analysis of Annular two-phase flow: application of the Dukler analysis to vertical upward flow in tube, AERE-R 3680 (1961) .
- 38 Levy S., Healzer J. M., Prediction of annular liquid-gas flow with entrainment-occurrent vertical pipe flow with no gravity, EPRI Report (1980) : 1409.
- 39 蔡树棠、刘一心, 热力学理论与空化现象, *应用数学和力学*, **4**, 6 (1983) : 737.
- 40 Moeck, E. O., The design instrumentation, and commission of the water-air-fcg experimental rig (WAFER) , APPE-1, Chalk River (1964) .
- 41 Schrock, V. E., Radiation attenuation techniques in two-phase flow measurements, ASME Symp. on Two-Phase Flow Instrumentation (1969) : 24—35.
- 42 Richter H. J., Separated two-Phase flow model: application to critical two-phase flow, *Int. J. Multiphase Flow*, **9**, 5 (1983) : 511—530.
- 43 Franz, Durst, Review-combined measurements of particle velocities, size distributions, and concentrations, *Tran. ASME*, **104** (1982) : 284—297.
- 44 Lee S.L., Aspects of suspension shear flows, *Adv. in Appl. Mech.*, **22** (1982) .
- 45 陈之航、曹柏林、赵在三, 气液双相流动和传热, 机械工业出版社 (1983) : 85.



# REVIEW ON GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW

Ma Gen-di Sun Hong-yuan  
(University of Science and Technology of China)

## Abstract

This survey concentrates on current efforts on gas-liquid two phase flow. Flow patterns, three main alternative (empirical, analytical, and phenomenological) approaches and several theoretical models for the prediction of two-phase flow are reviewed. Experimental research technique is introduced simply. Finally, the promising future development in this area is prospected.

**Keywords** *gas-liquid two-phase flow; flow patterns; empirical approach; analytical approach; phenomenological approach; theoretical models*

---

## 雪的力学性能

**提要** 对季节性积雪的力学性能的研究,主要目的是应用于雪崩的释放和雪崩的控制。但也应用于一些不甚重要的问题,如运载工具在雪上的运动,雪的清除,雪上建筑等。这项研究工作主要需要:①本构方程,即应力张量同运动之间的关系;②断裂判据,它限制本构方程的有效范围。二者都可以根据连续统理论和结构理论的观点来得到。借助现代连续统理论,可以研究雪的非线性特性和对应力及应变历史的强烈依赖关系。当引进热力学量时,可以更深入地了解变形和断裂过程。大的初始变形率可引起小的耗散、弹性行为和脆性断裂,而当耗散机制可以发展时,会发生塑性断裂。结构理论的优点在于可从物理上直接深入了解变形机制,其缺点则是只能考虑宏观地作用于雪样上的简单应力状态。详细叙述了不同的方法:对于低密度雪,链(一系列承受应力的冰粒)的概念或颈部增长模型(考虑冰粒间的键中的应力集中);对于高密度雪,孔隙崩塌模型(雪被理想化为含有空气穴的材料)。应用结构本构方程来计算雪的应力波。所记录的声发射指出了晶粒间的键的断裂,这些声发射可用来构造本构方程。结构破坏理论以串联的微元来模拟脆性断裂,其中最弱的链环引起整个物体的断裂;而并联的微元模拟塑性断裂,其中一个微元的断裂仅导致应力的重新分布,并且仅在载荷增加到充分大之后才导致整个破坏。在这种方法中,链环强度的统计分布起着重要的作用。湿雪(含液态水的雪)的力学同干雪的力学有相当大的差别。干雪的变形受冰粒和键的(缓慢的)蠕变和滑动所支配,湿雪的增密主要由于冰粒受压接触时(迅速的)受压融化过程所引起。

董务民译自: Salm B., *Rev. Geophys. & Space Phys.*, **20**, 1  
(1982); 1—19. 参 76