

关于气液两相流流型及其判别的若干问题*

劳力云^{1,2} 郑之初¹ 吴应湘¹ 李东晖¹

¹ 中国科学院力学研究所应用流体力学研究室, 北京 100080

² 中国计量学院机电工程学院, 杭州 310034

摘要 气液两相流体系是一个复杂的多变量随机过程体系, 流型的定义、流型过渡准则和判别方法等方面的研究是多相流学科目前研究的重点内容. 本文就与气液两相流流型及其判别有关的研究状况进行了回顾和评述, 力图反映近年来气液两相流流型及其判别问题研究的状态和趋势.

关键词 气液两相流, 流型, 流型的识别

1 引言

气液两相流的宏观运动规律以及它与其他运动形态之间的相互作用是两相流体力学的主要研究内容之一. 气液两相流的研究, 是随着工业技术的需要而发展起来的. 特别是本世纪 40 年代后, 由于动力工程、化学工程、石化工程、原子能工程、航天工程以及环境保护工程的兴起和发展, 气液两相流的研究日益得到重视, 促使它形成为一门完整的应用基础学科^[1]. 广义而言, 气液两相流动属流体力学的研究范畴之一, 流体力学的基本方程也适合于气液两相流. 但由于在气液两相流中, 存在气液两相间的相互作用, 因此两相流动问题较单相流动问题要复杂得多, 两者间在本质特征上也有较大的不同. 气液两相流流型的复杂性和多样性就是显著区别于单相流动的特点之一.

两相流流型是两相流的结构形式. 对于流型形成机制及其特点的认识, 是两相流的机理及其规律研究的重要组成方面, 同时也直接关系到对两相流学科中其他问题的分析研究. 例如, 对于气液两相流问题的分析处理, 经常采用基于流型的方法, 即首先分清气液两相流的流型, 然后根据各种流型的特点, 分析其流动特性并建立关系式. 这种方法考虑了两相流的流型特征, 具有较强的针对性^[2].

流型研究在工程中也具有重要的应用价值. 在涉及到气液两相流动的管路系统设计时, 流动压降是基本参数之一, 而两相流压降与流型具有密切关系. 实验结果表明, 在相同的质量流量下, 不同流型下的流动阻力可以变化几倍甚至几十倍. 不同的流型, 将会使管道受到不同频率分布特性的作用力, 这将直接关系到管道结构的减振设计, 以确保管道系统的安全运行. 为了进行多相流动参数的监测和计量, 流型也是必须考虑的重要因素. 因为流型的变化往往会造

收稿日期: 2001-05-29, 修回日期: 2002-02-27

*“十五”期间国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2001AA413210)

成测量装置特性的显著改变。另外，不同的流型具有不同的传热、传质特性，这对于化工、动力等过程的工艺设计也至关重要^[3]。

气液两相流流型与两相间界面的形状及其组合变化密切相关，流型的发展与稳定往往是相对的（例如，在长距离管线中，由于沿程状态参数的变化，流型会发生改变^[4]），从而导致流型问题变得复杂。早期的研究者为了方便，常常用各单相流型（层流或湍流）的不同组合为描述多相流流型并以此建立计算模型或在此基础上根据质量流速、压力等参数进行修正以提高模型的精度。例如对于气液两相流的压降计算模型的研究就是如此^[5,6]。显然，这种流型描述方法比较粗糙。目前常用的流型分类方法是根据流动形态分类，这种分类方法比较直观，但流型确定容易受到观测者主观因素的影响。目前对于流型的分类方法还没有一个统一的标准，这是流型研究需解决的基本问题之一^[7]。另外，如何根据流动条件确定流型，以及如何在流动过程中实时地利用流动状态信息确定流型也是目前在流型研究及工程应用中迫切需要解决的问题。本文针对上述问题进行评述，以期反映近年来对于气液两相流流型问题的研究状态。

2 气液两相流流型的分类

由于目前在研究和应用中涉及的气液两相流大多数是管内流动，因此下面的讨论主要针对气液两相管流进行。

在气液两相流流动过程中，由于气、液两相均可变形，两相界面将不断变化，从而两相介质的分布状态也不断改变，所以流型极为复杂。同时，流型还与管道尺寸、管截面形状、管道角度、管道加热状态、所处的重力场、介质的表面张力、壁面及相界面间的剪切应力等因素有密切关系。因此总体而言，流型的种类是相当复杂繁多的。这使得不同的研究者，从不同角度对流型进行研究时，会给出流型的不同定义和划分。例如，对于垂直上升管中的流型划分就有几十种，如表 1 所示。又如，对于水平管绝热流动，在不同的液相流量下，Spedding 等^[9]提出的流型划分也有十余种，如表 2 所示。

从实际应用的简明性考虑，Oshinowo 等^[10~13]在综合发展了其他研究者结果的基础上，提出的几种常见流动条件下的流型划分，成为目前比较经常采用的流型划分，如表 3 所示（目前常用的几种主要流型的名称和简要描述见附录）。

尽管如此，由于流动条件变化的多样性以及研究角度的多样性，基于流动结构形态学上的流型划分方法有以下几个问题。

(1) 流型定义的模糊性 目前对于各种流型的定义只是建立于主观观察的结果上的，这样不可避免引入观察者主观因素的干扰。

(2) 流型定义的多样性 对于各种流型，目前还未建立起一套统一的且被公认的定义。

(3) 流型定义的定性特性 对于流型的判别只能定性判断，公认的定量判断方法还没有。

近年来，有些学者 (Barnea 等^[11,13]) 提出了从多相流中的流动介质的连续性出发进行流型的划分。即将介质的形态分别分为连续的 (continuous)、间断的 (intermittent) 和弥散的 (dispersed)。流型的要素就是不同介质及其形态的不同组合，如对于水平蒸发管中的流型，就可以图 1 所示的方式进行划分。

由于这种流型划分方法一方面考虑介质的连续性，便于将两相流问题与比较成熟的单相流流体力学相联系，另一方面又能将各种不同的流型归结为较少的几种模式，相互之间比较有明确的区别特征，简化了理论研究的对象，从而便于气液两相流的研究与应用。因此有希望为流型划分找到一条比较客观和完善的途径。

表 1 垂直上升管中的气液两相流型划分^[8]

研究者	流 型 划 分
Gosline 1936	气泡流 弹状流 环状流 弥散液滴流
Cromer, et al 1940	气泡流 弹状流 乳沫状流 环状流
Bergelin 1949	气泡流 弹状流 环状流
Radford 1949	弹状流 混状乳沫流 管壁液膜流 雾状流
Galegar, el al 1954	鼓泡流 弹状流 搅拌流 半环状流 环状流
Calvert, et al 1955	鼓泡流 塞状流 混状流 波卷流 环状流 液滴夹带流
Govier, et al 1957	气泡流 塞状流 乳沫状流 波漪流 液膜流 雾状流
Duns, et al 1953	气泡流 弹状流 过渡流 环状流
Wallis 1969	气泡流 弹状流 环状流 液滴流
Govier, et al 1972	气泡流 弹状流 乳沫状流 环状流 雾状流
Oshinowo, et al.1974	气泡流 弹状流 乳沫状流 环状流 雾状流
Hewitt 1978	气泡流 弹状流 乳沫状流 液丝环状流 环状流
Spedding, et al 1980	气泡流 间断流 波状流 环状流 雾状流
Taitel, et al 1980	气泡流 弹状流 搅拌流 环状流 雾状流
Weisman, et al 1981	气泡流 塞状流 搅拌流 环状流
Vince, et al 1982	气泡流 弹状流 搅拌流 环状流
Mishima, et al 1984	气泡流 弹状流 搅拌流 环状流
Annunziato 1985	气泡流 弹状流 搅拌流 液丝环状流 环状流
Bilicki, et al 1987	气泡流 弹状流 乳沫状流 环状流 雾状流

表 2 水平绝热管中的流型 (管道内径 0.0935 m)^[9]

	增加液相流量				
	ST	ST	ST	ST+IW	B
增	ST+R	ST+R	ST+IW	S	PB
加	ST+RW	ST+RW	S	BTS+A	PF
气	ST+RW+D	ST+LRW+D	ST+BTS	A+RW	
相	F+D	ST+RW+D	ST+LRW+D	A+D	
流	A+D	F+D	F+D		
量	D	A+RW	A+RW		
		A+D	A+D		

注: A — 环状流 (annular), B — 气泡 (bubble), BTS — 中空气弹 (blow through slug), D — 液滴 (droplet), F — 液膜 (film), IW — 平缓波 (inertial wave), LRW — 大翻卷波 (large roll wave), PB — 气栓加气泡 (plug & bubble), PF — 气栓加泡沫 (plug & froth), R — 涟漪波 (ripple), RW — 翻卷波 (roll wave), S — 气弹 (slug), ST — 层状流 (stratified)

表 3 几种常见管道条件下的流型划分

管道条件	流型划分
水平绝热管 (Hewitt) ^[3]	气泡流 弹状流 层状流 塞状流 环状流 波状流
垂直上升绝热管 (Hewitt) ^[3]	气泡流 弹状流 搅拌流 环状流 液丝环状流
垂直下降绝热管 (Oshinowo 等) ^[10]	气泡流 弹状流 (塞状流) 环状流 乳沫状流 搅拌流 弥散环状流
倾斜上升绝热管 (Barnea) ^[11]	弥散泡状流 气泡流 波状流 弹状流 环状流
螺旋上升绝热管 (张鸣远, 陈学俊) ^[12]	波状流 弹状流 塞状流 环状流 分散泡状流

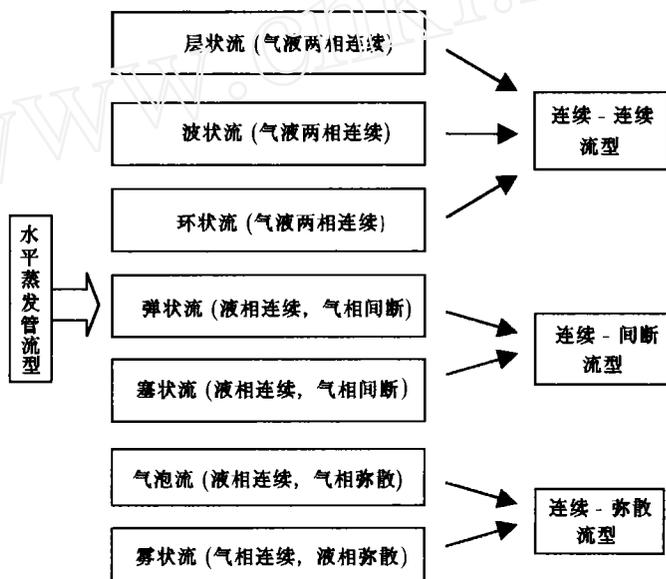


图 1 水平蒸发管气液两相流流型按介质的连续性进行划分

3 流型及其转换的理论判断

气液两相流流型问题的困难不仅体现在其定义与划分上, 出于类似的原因, 流型的识别及流型过渡准则的确定也有严重的困难. 尽管如此, 由于流型问题的重要性, 人们还是对此做了大量的工作.

3.1 流型图

流型图是用于流型识别及流型转换判断的重要工具之一. 早在 1949 年, Lockhart 等^[5]研究了不同的管内流动条件下的流动阻力问题. Baker^[14]在前人研究结果的基础上发展了流型判别的流型图方法. 同时代 Hoogendoorn^[15]针对水平管气液两相流也应用了这一方法. 其后, 出现了许多种不同条件下得到的流型图. 比较有代表意义的有 Mandhane 等, Taitel 等, Weisman 等, Lin 等 (水平圆管), Griffith 等, Govier 等, Taitel 等, McQuillan 等 (垂直上升管), Spedding 等, Weisman 等, Barnea 等 (垂直上升管到垂直下降管之间的各种倾斜管), 以及 Wambsganss (小尺度水平矩形管)^[11,16~28].

一般用气相表观速度和液相表观速度 (或以这两个参数为基础得到的其他折算参数) 构成流型图的坐标系, 如图 2 所示. 表 4 给出了一些典型的流型图所采用的坐标参数及其主要工况.

就流型图而言, 目前还有下列问题: (1) 流型图中所体现出的决定流型的因素主要为气、

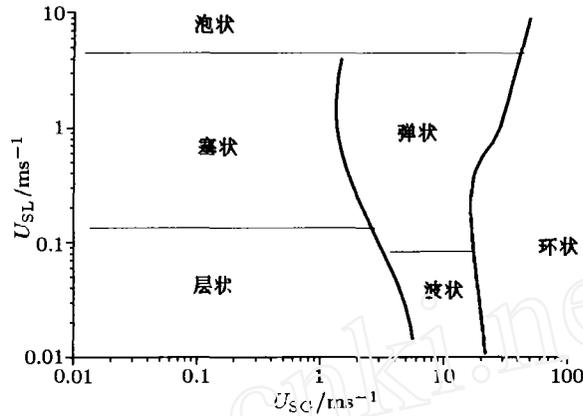


图 2 水平管的 Mandhane^[16] 流型图

表 4 几种典型流型图的坐标参数及主要工况 *

研究者	坐标参数	主要工况
Baker 1954 提出, Bell, et al 1970 年修正	$G_G/\lambda, G_L$	水平管道, 空气 - 水, 工作压力 0.1 MPa
Hewitt, et al 1969	$\rho_G(v_{SG})^2, \rho_L(v_{SL})^2$	垂直上升管道, 空气 - 水, 水蒸气 - 水, 工作压力 0.1 MPa
Mandhane, et al 1974	v_{SG}, v_{SL}	水平管道, 流道内径: 12.7~165.1 mm $\rho_G: 0.80\sim 50.5 \text{ kg/m}^3, \rho_L: 705\sim 1009 \text{ kg/m}^3$ $\mu_G: (1\sim 2.2)\times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ $\mu_L: 3\times 10^{-4}\sim 9\times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ $\sigma_L: (24\sim 103)\times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$
Weisman, et al 1979	$v_{SG}/\phi_1, v_{SL}/\phi_2$	水平管道, 内径: 25.4 mm, $\rho_G: 1.3 \text{ kg/m}^3,$ $\rho_L: 1000 \text{ kg/m}^3, \mu_L: 1\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1},$ $\sigma_L: 7\times 10^{-2} \text{ N/m}, v_{SL}: 0.305 \text{ m/s}$ 对于非标准状态的工质和管径需用 ϕ_1 和 ϕ_2 进行修正
Weisman, et al 1981	$v_{SG}/\phi_1, v_{SL}/\phi_2$	垂直上升管道, 内径: 25.4 mm, $\rho_G: 1.3 \text{ kg/m}^3;$ $\rho_L: 1000 \text{ kg/m}^3, \mu_L: 1\times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1},$ $\sigma_L: 7\times 10^{-2} \text{ N/m}, v_{SL}: 0.305 \text{ m/s}$ 对于非标准状态的工质和管径需用 ϕ_1 和 ϕ_2 进行修正
Barnea (1987)	v_{SG}, v_{SL}	管道角度及流动方向任意可变 标准状态: 空气 - 水, 工作压力 0.1 MPa, 流道 内径 25.4 mm, 其他工况与介质需修正.
Lin & Hanratty (1987)	v_{SG}, v_{SL}	水平管道, 管道内径: 25.4 mm 及 95.3 mm 介质: 空气 - 水 (两种管径下的流型分布差异较大)
Wambsganss, et al 1991	v_{SG}, v_{SL}	水平矩形绝热管道, 介质: 空气 - 水, 质量流量: $50\sim 2000 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$

* 表中 $\lambda = [(\rho_G/\rho_a)(\rho_L/\rho_w)]^{1/2}, \psi = (\sigma_w/\sigma_L) [(\mu_L/\mu_w)(\rho_w/\rho_L)]^{1/3}, \rho$ 为介质密度 (kg/m^3), v 为介质流速 (m/s), σ 相界面的表面张力 (N/m), ϕ_1, ϕ_2 为介质物性参数和管道直径决定的修正系数. 下标中, a 和 w 为表示空气和水, L 和 G 分别为气相和液相介质, S 为表观量.

液相的流速等几个主要参数, 其他影响流型形成的因素未得到体现, 使得根据流型图确定流型的可靠性受到影响. 这在流型转换时显得尤为明显. 例如, 我们在实验中发现, 非牛顿流体气液两相流型处于过渡阶段时, 所表现的实际流型不仅与表观流动速度值有关, 还与表观速度变化率的大小和方向有关. (2) 在流型图中流型转换表现为一些过渡区域, 在这些区域中流型是不确定的. (3) 大部分的流型图所依据的实验数据来自水 - 空气流动, 因此流型图的适用范围是有限制的. (4) 存在如此之多且相互之间往往不一致的流型图的事实也表明, 目前对于流型形成机制的研究还处于经验阶段, 要把所有的流型统一到一个流型图中还不可能 [22].

因此, 目前流型图的研究仍然是针对特定的流动条件和介质进行的, 但是涉及条件范围和介质种类扩大了, 如特殊结构管道或大口径管道, 微重力环境, 非牛顿流体以及各种热工质等 [29~34].

3.2 流型转换准则

3.2.1 水平流动

Taitel 等 [17] 根据大气压下空气 - 水的水平流动的流型实验结果, 将流型划分为层状流、泡状流、间断流和环状流四大类, 同时引入了一系列控制参数, 加上 Lockhart-Martinelli 参数 X 构成了流型转换的控制参数组, 对于水平及小倾角管道的流型转换判断具有较好的普适性, 其基本思路目前仍为其他研究者采用 [35]. 这些控制参数如下

$$\begin{aligned}
 F &= v_{SG} \left[\left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right) \left(\frac{1}{dg \cos \alpha} \right) \right]^{0.5} \\
 T &= \left[\left(\frac{dp}{dl} \right)_{SL} \frac{1}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \alpha} \right]^{0.5} \\
 Y &= \frac{(\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha}{\left(\frac{dp}{dl} \right)_{SG}} \\
 K &= F(Re_{SL})^{0.5}
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中 $\left(\frac{dp}{dl} \right)_{SG}$ 与 $\left(\frac{dp}{dl} \right)_{SL}$ 分别为气相流量和液相流量独自在同一流道内流动时的摩擦压力梯度 (Pa/m). α 为流道的倾角 (rad), d 为流道内径 (m). ρ 为介质密度 (kg/m^3), v 为介质流速 (m/s), g 为重力加速度 (m/s^2). 下标中, L 和 G 分别为气相和液相介质, S 为表观量.

Taitel & Dukler 提出的各流型间转换的机理与控制参数分别为:

(1) 层状流到间断流: 当气相通过波形交界面的波峰受到加速, 产生局部压力降, 使峰部同时受到抽吸作用. 当抽吸力的作用大于峰部的重力作用时, 波峰就会扩大. 波峰到达管道顶部并与管道接触, 构成弹状流.

(2) 波状流到环状流: 主要由 X 控制. 当气相速度比液相速度高得多时, 就产生这种过渡.

(3) 间断流到泡状流: 在弥散泡状流下, 气泡分散在连续的液相中. 当液相的湍流脉动效应大于气泡的浮力时, 阻止了气泡聚合到管道的顶部.

(4) 层状流到波状流: 主要与液体表面张力及气液两相间的滑移速度有关, 根据 Kelvin-Helmholtz 稳定性理论给出过渡准则.

(5) 间断流到环状流: 当液面的平均高度超过管道高度的一半以上就发生这种过渡.

Taitel & Dukler 过渡准则与 Mandhane 的流型图吻合得相当好. 但是, 该方法不适合于高黏

性流体, 对于从间断流过渡到弥散泡状流时, 未考虑表面张力的影响 (而实验表明该因素是显著的), 另外, 人为规定液面的平均高度超过管道高度的一半以上就发生间断流到环状流的过渡, 也比较牵强。

Weisman 等^[18] 考虑到 Taitel & Dukler 准则的上述不足, 提出了另一类流型转换准则式。其所依据的实验数据来自 12 mm, 25 mm 和 51 mm 三种管径, 且覆盖了更加广泛的各种特性的流体。这些判据与 Weisman 自己的实验数据吻合很好, 但是普适性不如 Taitel & Dukler 准则。

3.2.2 垂直上升流动

Taitel 等^[22] 认为: 气泡流转换到弹状流是由于气相速度的增加, 达到一定程度后, 小气泡聚生成接近管径的大气泡, 从而导致弹状流的形成。流型变化的界限可由空隙率确定。而搅拌流产生的主要原因是, 在两个弹状气泡之间的液弹因太短而不能形成稳定的液相段。液弹周期性的形成和破碎使流动受到很大的扰动。搅拌流只能在某些区域才能观察到。从弹状流向搅拌流过渡决定于产生搅拌流所需的入口管道长度 L_e 。根据分析, L_e 可用下式表示

$$L_e = 40.6d \left[\frac{v_{SG} + v_{SL}}{\sqrt{gd}} + 0.22 \right]$$

而对于弹状流向环状流的转变, 是由于高速气体引起的。流型变化的界限条件为

$$\frac{v_{SG} \rho_G^{0.5}}{g\sigma(\rho_L - \rho_G)^{0.25}} = 3.1 \quad (2)$$

Golan 等^[36] 是较早开展对搅拌流研究的学者。他们提出的流型变化判据为

$$\frac{v_{SG}}{\sqrt{gd\rho_L/\rho_G}} > 0.189 + 0.011 \frac{v_{SL}}{\sqrt{gd}} \quad (3)$$

Weisman 等^[25] 通过实验数据整理, 提出的由气泡流向弹状流转换的判据为

$$\frac{v_{SG}}{\sqrt{gd}} > 0.45 \left(\frac{v_{SG} + v_{SL}}{\sqrt{gd}} \right)^{0.78} \quad (4)$$

对于搅拌流到目前为止还没有统一的认识。现在常以液相的湍流作用大到粉碎大气泡而形成泡沫为搅拌流的主要标志, 故搅拌流也称为乳沫状流或混状流。

对于弹状流向环状流的过渡, 一般都是根据经验公式进行判断。不过, Moissis^[37] 依据 Kelvin-Helmholtz 不稳定性判据, 分析了弹状流向环状流转变的条件, 则有较强的理论色彩。两个气弹之间液膜稳定的界限条件为

$$v_{SG} - v_{SL} = \left\{ \frac{\sigma k [\rho_L \coth(kh_m) + \rho_G]}{\rho_L \rho_G \coth(kh_m)} \right\}^{0.5} \quad (5)$$

式中 k 为波数, h_m 为液膜的平均厚度。根据理论和实验结果, 最不稳定的波数与液膜厚度之间的关系为: $k = \frac{\pi}{5h_m}$ 。由此可以确定弹状流转变成环状流的条件。

总体而言, 尽管目前对于气液两相流流型判断的理论方法进行了较多的研究, 但是由于流动机理缺乏深入的了解, 所建立的理论模型常常存在较大的误差。不同的研究者所得到的流型图或流型转换准则也不完全一致, 有时差异相当大, 以至于应用者无所适从。再者, 由于两相流系统的复杂性, 所涉及的工况条件与流体物性参数的多样性, 在目前还难以获得一个对各种流型都普适的理论模型, 使流动的本质特征得到揭示而大大简化流动模型, 获得简明且普适的

流型转换准则。退一步说,即使要应用现有的这些流型图和转换准则,还需得到分相流量等参数,而在实际工程应用中,往往是希望通过判断流型来实现对这些参数的检测。这就构成了应用这种方法进行流型判断的两难境地。

笔者认为,为了从本质上了解气液两相流动的机理,应对流型的结构性和随机性进行综合分析和认识。结构性体现为:流动条件和参数的变化引起流型的改变意味着结构性的变化,而这些条件和参数在一定范围内变化时,流动结构是基本稳定的。随机性则体现为:每种流型下,每个时刻流动状态参数都呈现为较强的不可预测性。这时候的流动规律在更多意义上是统计性的。结构性研究可以一方面从简化两相流动中各种不同因素间的相互作用入手,以便了解流型产生和转换的机理。例如,在微重力条件下,由于重力基本消失,气液两相流流型较常重力条件下得到大大简化^[34]。结构性研究的另一方面是对不同尺度或不同介质多相流动的相似参数进行研究,如果能够在一定的条件下获得与流型关联的无量纲准则数,就不意味实验研究的简化,同时意味着理论研究的突破^[4],这对于流型机理研究的意义将是不言而喻的。Bi等^[35]在对大量的气-液和气-固垂直上升管流流型进行总结比较后,就发现两者在流型和流型过渡准则上有着较好的相似性。

4 流型的在线识别

应用流型图或流型转换判据只能大致预测流型及其转换,但是不能准确获取流动状态的实时信息。而工程实际应用时,往往需要实时了解流型对系统运行状况的影响。此时,应用仪器设备直接识别管道内气液两相流的流型就自然而然成为人们的选择了。根据工作原理,流型实时识别方法可以分为两类。一类是根据两相流流动图像的形式直接确定流型,如目测法、高速摄影法、过程层析成像法等;另一类是间接方法,即通过对反映两相流流动特性的波动信号进行处理分析,提取出流型特征,进而识别流型。这种方法建立在随机信号处理技术的基础上,不仅具有设备简单、价格低廉的优点,还极有希望发展成为流型识别的客观方法^[38],因此受到众多研究者的关注,现已成为流型识别技术中的研究热点。这里主要针对后者进行综述。

4.1 频域处理方法

早在1966年,Hubbard等^[39]就将水平管道气液两相流压力信号的功率谱分析结果应用于流型判别。他们假设气液两相流的随机压力信号是平稳的,通过压力信号的自相关函数求得功率谱密度函数(PSD)。为了便于比较,对功率谱密度函数进行了归一化后可得出结论(如图3所示)。

(1) 连续流(层状流和波状流)的PSD集中在零频率附近,即呈现出一定的直流特征,随频率增加幅度明显下降,见图3(a)。

(2) 弥散状流(气泡流、雾状流等)的PSD分布较平坦均匀,见图3(b)。

(3) 间断流(弹状流和栓状流)的PSD分布出现一个幅度明显的特征峰,见图3(c)。

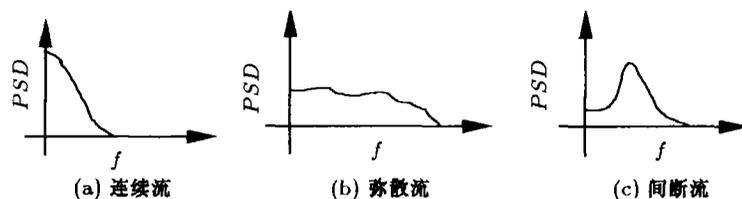


图3 压力信号功率谱密度(PSD)函数与气液两相流流型的关系

Matuszkiewicz 等^[40]利用类似方法对于气液两相流中气泡流流型到塞状流流型的转换进行分析预测, 所用于功率谱密度的分析信号是用电导探针所获得的局部空隙率信号, 管道直径为 40 mm, 液相流速为 0.18 m/s. 在不同的平均空隙率 $\bar{\alpha}$ 的条件下, 不同流型的谱分析呈现出以下的特征.

- (1) $\bar{\alpha} < 0.25$ 时, 气泡流流型, 谱分布的范围较宽见图 4(a).
- (2) $\bar{\alpha}$ 升高后出现混状流型, 谱分布的范围明显缩小见图 4(b).
- (3) $\bar{\alpha}$ 升高到 0.5 左右时, 出现塞状流流型, 在低频上出现了一些突出的频率分量见图 4(c).

由此出发, 他们得出结论, 当气泡流流型下, 空隙率信号具有较小的方差 (即分散性较小), 而在塞状流下, 空隙率信号呈现较大的方差.

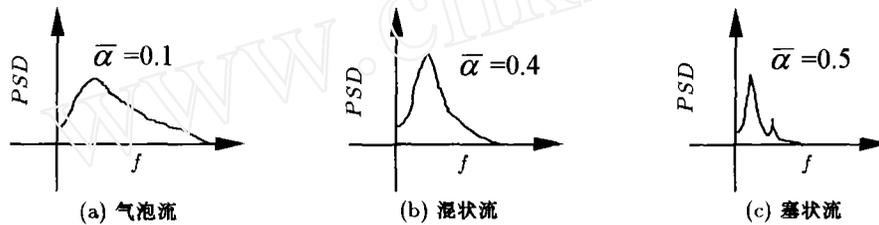


图 4 空隙率信号功率谱密度与气液两相流流型的关系

功率谱密度函数分析法的一个关键问题是, 功率谱密度分布不完全取决于流型, 而与流体流动速度的关系较大, 但流速一般难以预知. 尽管如此这种分析方法在预估流型转换上还是有效的^[41~43].

4.2 时间 - 频率域方法

功率谱密度分布所要求的随机信号的平稳性, 在许多两相流动场合不能很好地满足.

有些学者提出了基于小波 (wavelet) 分析的两相流信号处理方法, 用于进行流型辨识^[12]. 在对水平管道内所取的间距 50 mm 差压信号进行二进小波分析后, 差压信号被分解成了不同尺度上的能量, 用尺度密度 S_j ($j = 1, 2, 3, 4$) 表示. 4 种常见流型下其尺度密度的数量级如表 5 中所示. 它们具有如下特点: 气泡流的尺度密度

表 5 各种流型下尺度密度的数量级范围

流型	$\lg(S_1)$	$\lg(S_2)$	$\lg(S_3)$	$\lg(S_4)$
气泡流	-1~1	-1~1	-1~1	0~2
波状流	0~1	1~2	1~2	2~3
塞状流	0~1	1~2	2~3	2~3
弹状流	2	2	3	3~4

绝对值最小, 大多集中于 $10^{-1} \sim 10^1$ 数量级, 各尺度下的 S_j 相对变化不大. 波状流和塞状流两者的尺度密度的分布颇为相似, 它们的尺度密度均比对应于气泡流的要高出一个数量级. 另外, 同尺度下塞状流的 S_j 一般比波状流大 3~5 倍. 弹状流各尺度下的 S_j 都明显高于其它流型.

Bakshi^[44]借助于对局部空隙率信号的小波分析对气液两相流中气泡流的流型转变进行了研究, 实验结果分析表明, 气泡流中空隙率信号频率分布的不连续变化与流型转变密切相关.

Wigner-Ville 谱 (WVD) 分析方法是近年来兴起的一种用于瞬态信号分析的方法. 解析信号 $x(t)$ 的 WVD 谱的定义为: $W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)e^{-j\omega\tau}d\tau$, 它在一定意义上统一了时域和频域分析, 这表现在其本身同时表征了时频二维信息, 从而使频率的时间定位成为可能. 劳力云^[45]对内径分别为 40 mm 和 50 mm 的水平管道空气 - 水两相流的脉动差压信号进行了 WVD 分析, 结果表明在气泡流、塞状流和弹状流三种流型下的 WVD 分布有较为显著的不同. 在泡状流流型中, 频谱比较分散, 幅度信号能量在时频域中的分布比较均匀. 在塞状流流型

中,其信号能量基本集中在低频区间中,有时也出现一些较高的频率分布.在弹状流流型中,能量在时域、频域和幅值上都表现得比较离散,即呈现出明显的非平稳性.

4.3 幅值域处理方法

信号幅值域的处理指对信号幅度进行统计处理.所给出的结果可以反映信号幅度变化的分布规律.常用的参数有概率密度函数(PDF)、方差、均值等.由于气液两相流参数直接影响着流动信号的统计特性,对获得的气液两相流动体系中的常规信号如局部空隙率、压力、压力降、电导率、电容等信号在幅值域上进行统计处理,往往可以实现对流型、流量、空隙率和气泡直径等参数的检测估计.

Jones 等^[46]对 X 射线空隙率计得到的空隙率信号进行了概率密度函数(PDF)分析,空隙率的概率密度函数 $p(\alpha)$ 用统计值 $p(\alpha_i)$ 代替

$$p(\alpha_i) = \frac{\sum_j \Delta T_{ij}}{T \Delta \alpha_i}$$

其中 $\sum_j \Delta T_{ij}$ 为空隙率信号 $\alpha(t)$ 的值落在 α_i 与 $\alpha_i + \Delta \alpha_i$ 之间信号段长度的总和; T 为用于统计分析的空隙率信号 $\alpha(t)$ 的总长度.

实验结果发现, PDF 可用于辨识气液两相流的流型.流型与空隙率的 PDF 之间有以下关系

泡状流: PDF 在低 α 值上有一个单峰;

环状流: PDF 在高 α 值上有一个单峰;

弹状流: PDF 分别在低 α 值和高 α 值存在一个单峰.

Vince 等^[38]进一步用空隙率 PDF 的方差来进行流型判别. Song 等^[47]发现气泡流到弹状流的转换可以在空隙率信号 PDF 的形状上得到较好的反映. Elkow 等^[48], Lowe 等^[49]应用空隙率的 PDF 对微重力下的气液两相流流型进行识别.

通过空隙率信号实现流型识别是比较可靠的方法之一^[50],但获取空隙率信号并不容易.

应用压力降信号的幅值概率密度分布进行气液两相流的流型判别是应用较多的方法之一,主要应用于垂直管流型的判别^[51~54].在垂直管道上,取一定管段的差压信号,这个差压反映了该管段上气液两相流的体积含气率.对不同的流型,含气率的概率分布有明显区别,据此可以判断出流型.以差压信号代替空隙率信号显然比较简单方便.但压力降的大小及变化程度不仅与空隙率有关,还与压力、流速等关系密切,因此在应用中应对此加以考虑.

利用测得的气泡直径的 PDF 亦可用于进行气液两相流流型的判别.在一定流型工况下,气泡直径大小分布具有一定的统计规律^[55].泡状流时,气泡直径服从 Gauss 分布且其均值远小于管道的当量直径;环状流时,气泡直径同样服从 Gauss 分布,但其均值远大于管道的当量直径;弹状流和波状流时气泡直径的概率分布具有双峰性,每个峰呈现为近似的 Gauss 分布.由于这种识别方法以气泡的物理表现为依据,因此对流型的判别比较可靠.但气泡直径的测量比较困难.应用概率密度函数方法时,需要进行大量的运算比较.

4.4 其他方法

除了以上信号处理方法以外,在气液两相流流型识别中,也有研究者应用了模糊信息处理、模式识别、人工神经网络和分形等近年来发展迅速的现代信息处理方法.例如,应用模糊数学理论对垂直气液两相流的管壁压力降波动的概率密度分布进行处理,建立流型的模糊判据,使

流型的在线判别成为可能^[56]。也有人基于两相局部轴向压差信号的统计分析,由信号的概率密度函数和功率谱密度函数的数学特征构成特征向量组,由原始信号建立自回归模型,构造 Bayes 统计评判函数,在最小误差概率条件下,确定气液两相流的流型^[57]。Lin 等^[58]利用管道压力信号的相关特征对弹状流进行识别。Mi 等^[59,60]以反映空隙率变化的阻抗作为人工神经网络的输入,实现对于水平管和垂直上升管中流型的识别。还有些研究者^[61~63]从分形角度来认识气液两相流体系,从而产生了流型识别的分形方法。如 Kozma^[64]认为,对于温度波动信号,分形维数的标准差可以较好的反映流型特征,相应也产生了流型识别的分形方法^[65,66]。

值得注意的是,有些研究者综合应用一些现代信息处理技术,从多相流体系的常规信号提取流型特征,实现流型判别。如吴浩江等^[67]对管段差压信号利用小波分解-重构方法进行去噪处理后,应用分形理论提取特定流型对应的特征向量,用于训练人工神经网络,实现了对油-气-水水平管流流型的自动识别。

4.5 流型在线间接识别方法评述

由于气液两相流动过程参数的规律性呈现为统计意义上的规律性,因而在在线流型识别中所应用的信号处理方法大多为随机信号处理方法。具体所涉及到的技术包括谱分析、幅值统计分析、分形分析、模式识别、模糊信号处理和神经网络等具体技术。应用信号处理技术进行流型识别需要两个条件。(1)正确快速地获取信号,这个(些)信号的某些统计特征与流型之间有确定关系。(2)考虑到实际应用中进行流型识别往往有实时性的要求,因此需对被测信号能实现快速处理。事实上一方面通过理论和实验的大量研究,人们已经发现了两相流动参数与其他参数的随机波动之间的某些实质性联系^[68]。同样,两相流体系参数随机变化的信号中载有流型的信息。这就使得通过对两相流动常规信号的处理获得流型的信息成为可能。当然,继续深入探索这两者之间的关系将为利用信号处理技术实现流型在线识别提供坚实的理论基础^[69],因而是很有必要的。另一方面,现代电子技术、计算机技术及信号处理方法的发展,提供了快速处理随机信号的理论基础和技术条件。

在气液两相流动体系中,压力或差压是比较容易获得同时也是最重要的参数之一,压力或差压的测量已有许多成熟的方法和手段,其传感器是数量最大,品种最多,在工业部门中应用最广泛的传感器之一。在流动过程中,大多数压力或差压测量的目的是用于了解压力损失,测量流量以及掌握其它流动工况,比较关心的是静态值。对于其中的脉动信号则视为噪声。而正如前所述,在这种脉动中往往蕴涵许多流动体系中其它状态的信息。许多学者已注意到这一点^[12,66,68,69],并在气液两相流流型识别得到应用。

5 结束语

本文综述了国内外在气液两相流流型判断研究方面若干关键问题。对气液两相流流型的定义与划分、流型图、流型转换准则、流型的在线识别方法等方面的研究成果进行了总结和评述。笔者认为,对于气液两相流流型的识别研究,一方面应加强对流型的本质特征研究,以便得到比较明确、一致和可行的流型定义和划分方法;另一方面应该加强利用目前迅速发展的现代化的信息获取与处理手段,提取流型的动态特征,并与流体力学的有关理论相结合,在流型的在线识别技术上取得突破。

参 考 文 献

- 1 陈学俊, 陈立勋, 周芳德. 气液两相流与传热基础. 北京: 科学出版社, 1995

- 2 陈之航, 曹柏林, 赵在三. 气液双相流动与传热. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 3 Hewitt G F. Measurement of two-phase flow parameters. London: Academic Press, 1980
- 4 吴应湘, 郑之初, 李东晖, 劳力云, 马艺馨. 油气混输系统的实验研究与实验模拟准则. 海洋工程, 1999, 17(4): 1~9
- 5 Lockhart R W, Martinelli R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem Eng Prog*, 1949, 45: 39~48
- 6 Chisholm D, Laid A D K. Two-phase flow in rough tubes. *Trans Am Soc Mech Engrs*, 1958, 80: 276~286
- 7 张宏建. 论利用状态信息获取生产过程参数的方法. 计量技术, 1995, 8: 403~405
- 8 陈琪. 小波分析技术在两相流流型辨识中的应用. [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1999
- 9 Spedding P L, Spence D R. Flow regime in two-phase gas liquid flow. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19: 245~280
- 10 Oshinowo T, Charles M B. Vertical two-phase flow. Part I. Flow pattern correlations. *Can J of Chem Eng*, 1974, 52: 25~35
- 11 Barnea D A. Unified model for predicting flow pattern transitions for whole range of pipe inclinations. *Int J Multiphase Flow*, 1987, 13(1): 1~12
- 12 张鸣远, 陈学俊. 螺旋管内气水两相流流型转换的研究. 核科学与工程, 1983, 3(4): 298~304
- 13 Hewitt G F, Khor S K, Pan L. Three-phase gas-liquid-liquid flow: flow pattern, holdups and pressure drops. In: Proc of Int Symp on Multiphase Flow, Beijing: International Academic Publishers. 1997. 1~19
- 14 Baker O. Simultaneous flow of oil and gas. *Oil Gas J*, 1954, 26, 7: 185~195
- 15 Hoogendoorn C J. Gas-liquid flow in horizontal pipes. *Chem Engng Sc*, 1959, 9: 205~217
- 16 Mandhane J M, et al. Flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipe. *Int J Multiphase Flow*, 1974, 1: 537~553
- 17 Taitel Y, Dukler A E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas liquid flow. *AIChE J*, 1976, 22: 27~45
- 18 Weisman J, et al. The effects of fluid properties and pipe diameter on two phase flow pattern in horizontal lines. *Int J Multiphase Flow*, 1979, 5: 437~462
- 19 Lin P Y, Hanratty T J. The effect of pipe diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes. *Int J Multiphase Flow*, 1987, 13: 549~563
- 20 Griffith P, Wallis G B. Two phase slug flow. *J Heat Transfer*, 1961, 83(3): 307~318
- 21 Govier G W, Aziz K. The flow of complex mixture in pipes. New York: Krieger. 1972
- 22 Taitel Y, Barnea D, Dukler A E. Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE J*, 1980, 26: 345~354
- 23 McQuillan K W, Whalley P B. Flow patterns in vertical two-phase flow. *Int J Multiphase flow*, 1985, 11: 161~175
- 24 Spedding P L, Nguyen V T. Regime maps for air-water two-phase flow. *Chem Engng Sci*, 1980, 35: 779~793
- 25 Weisman J, Kang S Y. Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines. *Int J Multiphase Flow*, 1981, 7: 271~291
- 26 Barnea D, Shoham O, Taitel Y. Flow pattern transitions for down-ward inclined two-phase flow: Horizontal to vertical. *Chem Engng Sci*, 1982, 37: 735~740
- 27 Barnea D, Shoham O, Taitel Y. Gas-liquid flow in inclined tubes: flow pattern transitions for upward flow. *Chem Engng Sci*, 1985, 40: 131~136
- 28 Wambsganss M W, Jerndrzejczyk J A, France D M. Two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel. *Int J Multiphase Flow*, 1991, 17(3): 327~342
- 29 Narrow T L, Ghiaasiaan S M, Abdel-Khalik S I, Sadowski D L. Gas-liquid two-phase flow patterns and pressure drop in a horizontal micro-rod bundle. *Int J Multiphase Flow*, 2000, 26: 1281~1294
- 30 Gradeck M, Lebouché M. Two-phase gas-liquid flow in horizontal corrugated channels. *Int J Multiphase Flow*, 2000, 26: 435~443
- 31 Zhao T S, Bi Q C. Co-current air-water two-phase flow patterns in vertical triangular microchannels. *Int. J. Multiphase Flow*, 2001, 27: 765~782

- 32 Ohnuki A, Akimoto H. Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air-water two-phase flow along large vertical pipe. *Int J Multiphase Flow*, 2000, 26: 367~386
- 33 Zurcher O, Favrat D, Thome J R. Development of a diabatic two-phase flow pattern map for horizontal flow boiling. *Int J Heat & Mass Transfer*, 2002, 45: 291~301
- 34 赵建福. 微重力条件下气 / 液两相流流型的研究进展. *力学进展*, 1999, 29(3): 369~382
- 35 Bi H T, Grace J R. Regime transitions: analogy between gas-liquid co-current upward flow and gas-solid upward transport. *Int J Multiphase Flow*, 1996, 22(Suppl.): 1~19
- 36 Golan L P, Stenning. Two-phase vertical flow in vertical tubes. *Proc Inst Mech Engrs*, 1970, 184(3C): 105~114
- 37 Moissis R. The transition froth slug to homogeneous two phase flows. *J of Heat Transfer, Trans ASME, Ser.C*, 1963, 85: 366
- 38 Vince M A, Lahey Jr. On the development of an objective flow regime indicator. *Int J Multiphase Flow*, 1982, 8: 93~124
- 39 Hubbard M G, Dukler A E. The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow. In: *Proc Heat Transfer & Fluid Mechanics Inst*, 1966. 100~121
- 40 Matuszkiewicz A. The bubbly slug flow pattern transitions and the instabilities of void fraction wave. *Int J Multiphase Flow*, 1987, 13: 199~217
- 41 李海青. 两相流多数检测及应用. 杭州: 浙江大学出版社, 1991
- 42 Albrecht R W, et al. Measurement of two-phase flow properties using the nuclear reactor instrument. *Prog Nucl Energy*, 1982. 37~50
- 43 Ruzicka M C, et al. Intermittent transition from bubbling to jetting regime in gas-liquid two phase flows. *Int J Multiphase Flow*, 1997, 23: 671~682
- 44 Bakshi B R, et al. Analysis of flow in gas-liquid bubble columns using multi-resolution methods. *Trans IChemE, Part A*. 1995, 73(8): 608~614
- 45 劳力云. 基于动态差压信号分析的两相流参数辨识方法研究: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1998
- 46 Jones Jr, Zuber N. The interrelation between void fraction fluctuation and flow patterns in two-phase flow. *Int J Multiphase Flow*, 1975, 2: 273~306
- 47 Song C H, et al. Investigation of bubble flow developments and its transition based on the instability of void fraction waves. *Int J Multiphase Flow*, 1995, 21: 381~404
- 48 Elkow K J, Rezkallah K S. Statistical analysis of void fluctuations in gas-liquid flows under *l*-G and μ -G conditions using a capacitance sensor. *Int J Multiphase Flow*, 1997, 23: 831~844
- 49 Lowe D C, Rezkallah K S. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals. *Int J Multiphase Flow*, 1999, 25: 433~457
- 50 Costigan G, Whalley P B. Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows. *Int J Multiphase Flow*, 1997, 23: 263~286
- 51 Tutu N K. Pressure fluctuations and flow pattern recognition in vertical two-phase gas-liquid flow. *Int J Multiphase Flow*, 1982, 8: 443~447
- 52 Tutu N K. Pressure drop fluctuations and Bubble-slug transition in vertical air-water flow. *Int J Multiphase Flow*, 1984, 10: 211~216
- 53 Matsui G. Automatic identification of flow regime in vertical two-phase flow using differential pressure fluctuations. *Nuclear Engng and Design*, 1986, 95: 221~231
- 54 张佑杰等. 用局部体积含气率概率密度分布识别流型. 第三届全国多相流检测技术学术讨论会论文集, 1990. 176~190
- 55 佟允宪等. 用气泡直径概率密度分布和气泡空间频率分析方法识别不可视通道内两相流流型. 第三届全国多相流检测技术学术讨论会论文集, 1990. 191~209
- 56 He M, et al. Flow pattern identification and correction in gas-liquid two-phase flow rate measurement using fuzzy criteria. In: *Proceedings of MICONEX86*, 1986. 182~192

- 57 鲁钟琪, 王名坚. 统计模式识别在气液两相流流型识别和流型转换研究中的应用. 第二届全国多相流检测技术学术讨论会论文集, 1988. 433~447
- 58 Lin P Y, Hanratty T J. Detection of slug flow from pressure measurement. *Int J Multiphase Flow*, 1987, 13: 13~21
- 59 Mi Y, Tsoukalas L H, Ishii M. Application of multiple self-organizing neural networks: flow pattern classification. *Trans Am Nucl Soc*, 1997, 77(1): 114~116
- 60 Mi Y, Ishii M, Tsoukalas L H. Flow regime identification methodology with neural networks and two-phase flow models. *Nucl Eng & Design*, 2001, 204(1): 87~100
- 61 Argoul F, et al. Wavelet analysis of turbulence reveals the multifractal nature of the richardson cascade. *Nature*, 1989, 338: 51~53
- 62 Roger Baker. Multi-phase flow moves on. *Chem*, 1989, 2: 35~36
- 63 Yamada M, et al. Othonormal wavelet expansion and its application to turbulence. *Prog Theor Phys*, 1990, 83(5): 819~823
- 64 Kozma R, Kok H, et al. Characterization of two-phase flows using fractal analysis of local temperature fluctuations. *Int J Multiphase Flow*, 1996, 22(5): 953~968
- 65 Saether G, et al. The fractal statistics of liquid slug lengths. *Int J Multiphase Flow*, 1990, 16: 1116~1126
- 66 Franca F, et al. The use of fractal techniques for flow regime identification. *Int J Multiphase Flow*, 1991, 17(3): 545~552
- 67 Wu H, Zhou F, Wu Y. Intelligent identification system of flow regime of oil-gas-water multiphase flow. *Int J Multiphase Flow*, 2001, 27(3): 459~475
- 68 Fan L T, Neogi D, Yashima M. Stochastic analysis of a three-phase fluidized bed: fractal approach. *AIChE J*, 1990, 36(10): 1529~1535
- 69 Fan L T, Kang Y, Neogi D, Yashima M. Fractal analysis of fluidized particle behavior in liquid-solid fluidized beds. *AIChE J*, 1993, 39(3): 513~517

附 录

目前常用的几种气液两相流的主要流型名称和及其简要描述。

气泡流 (或泡状流)(bubble (or bubbly) flow). 气相以分离的气泡散布在连续的液相内, 在水平或倾斜管气泡趋于沿管道顶部流动。

塞状流 (或栓状流)(plug flow). 栓塞状的气泡分布于连续的液相内, 气栓趋向于沿管道顶部流动。出现在水平或倾斜管中。

分层流 (或层状流)(stratify flow). 气液流量均较小时, 液相在下部气相在上部开流动, 两相间有较光滑的界面。只在水平管或小角度倾斜管中出现。

波状流 (wavy flow). 只在水平管或小角度倾斜管中出现。气液分层面上沿流动方向呈现波浪形。

弹状流 (slug flow). 在液相中有弹形气泡列的流动。在垂直上升管中, 气弹可由气泡聚集形成; 在水平管中, 当波增长到与管道顶部表面接触, 将位于管道上部的气相分割成气弹而形成。

环状流 (annular flow). 气体 (夹带有液滴) 在管道中心流动形成气核, 液体形成液膜沿管壁向前流动。在水平管或倾斜管中, 液膜不一定连续地环绕整个管壁。

搅拌流 (或混状流 / 乳沫状流)(churn flow). 气体在液相中以混乱搅动的状态进行流动。

液丝环状流 (wispy-annular flow). 在这种流型中, 管壁上液膜较厚且含有小气泡, 被中心部分气核从液膜带走的液体在气核内形成不规则的长纤维形状。

ON THE GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW REGIMES AND THEIR RECOGNITION METHODS*

Lao liyun^{1,2} Zheng Zhichu¹ Wu Yingxiang¹ Li Donghui¹

¹Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

² China Institute of Metrology, Hangzhou 310034, China

Abstract Gas-liquid two-phase flow is one of the most commonly occurring types of flow. Several research areas such as the mechanistic studies, parameter measurements and industrial applications of the two-phase flow are strongly influenced by the flow regime. Therefore it is of great importance that the research of flow regimes and particular efforts have been given to methods of flow pattern recognition. Studies on the gas-liquid two-phase flow regime in recent years have been reviewed in this article. The definition and classification of each flow regime, the flow regime map, flow pattern transition criteria and the methodology of flow regime recognition were focused.

Keywords gas-liquid two-phase flow, flow regime, summary, flow pattern determination

*The project supported by the Hi-Tech Research and Development Program of China (2001AA413210)