

# 垂直管气液两相弹状流流动特性研究进展

陈振瑜<sup>1</sup>, 李志彪<sup>2</sup>, 何利民<sup>1</sup>, 何衍军<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080;  
3. 中国石油大港石化公司, 天津 300280)

**摘要:** 详细介绍了国内外垂直管弹状流的研究进展情况。针对垂直管弹状流的形成机理、最小稳定液塞长度和 Taylor 气泡的运动进行了详细的论述。目的在于全面翔实地阐述垂直管弹状流的研究结果, 以期有效地指导实验研究及生产实际工作。

**关键词:** 弹状流; 形成机理; 液弹长度; Taylor 气泡

**中图分类号:** O359.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-9614(2005)04-0003-04

**Advance in the Investigation on the Hydrodynamic Characteristics of Gas-liquid Slug Flow in Vertical Pipes**

CHEN Zhen-yu<sup>1</sup>, LI Zhi-biao<sup>2</sup>, HE Li-min<sup>1</sup>, HE Yan-jun<sup>3</sup>

(1. College of Transport & Storage and Civil Engineering, University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. China Petroleum Dagang Petro-Chemical Co., Tianjin 300280, China)

**Abstract:** This paper reports in detail the development of investigation on the hydrodynamic characteristics of gas-liquid slug flow in vertical pipes and discusses mainly the mechanism of slug formation, the minimum length of the steady liquid slug and the motion of the Taylor bubbles. The purpose of this paper is to illustrate the result of the research on the slug flow in vertical tubes and to effectively guide experimental investigation and production practices in future.

**Key words:** slug flow; formation mechanism; liquid slug length; Taylor bubble

## 1 引言

弹状流是垂直上升管内常见的流型之一, 存在于比较宽广的流动参数范围内。在许多工业领域, 如油气井、油气运输管线、蒸汽发生器以及核反应堆中, 气液两相流在许多情况下是以弹状流的形式出现的。弹状流是液塞和充满整个管径的大气泡 (Taylor 气泡) 交替出现的, 间歇性和不稳定性是它的最主要特征。由于其流量波动和压力波动都非常大, 会给下游设备带来很大的影响。因此对弹状流的研究具有非常重要的意义。

## 2 形成机理研究

由于垂直管弹状流在工业应用中的重要地位, 有关学者对垂直管弹状流已经做了非常多的研究, 但是对其形成机理还没有统一的认识。有些学者认为气体流量的增大造成气泡逐渐合并, 最后形成弹状流; 有些学者认为是因为空隙率波的不稳定性导致气泡突然合并, 形成弹状流。

王跃社等(2001)<sup>[1]</sup>对垂直管弹状流的形成和发展进行了实验研究。该研究利用高速动态分析仪优良的可视化特性, 将 Weisman 针对水平管流型转化提出的转化过渡区的概念引入到垂直管多相流流型转化的研究中来, 并首次量化出转化过渡区的上、下边界。

研究发现其形成过程如下: 将少量气体以低速引入运动的液体中时, 气相被弥散成小气泡, 此时流态是泡状流; 随着气体流量增加, 液体中气泡密度也急剧增大, 当气泡尺寸大于临界尺寸 (在低压空气/水系统中为 1.5 mm) 时, 气泡开始聚集合并, 原有的泡状流型开始发生变化; 当圆顶状气泡形成时, 其尾迹的卷吸作用使得后续气泡相对速度提高, 碰撞也不断加剧, 气泡形状和轨迹变得杂乱无章, 这时流动由泡状流向弹状流过渡转化, 直至表征弹状流的弹状 Taylor 气泡形成, 整个气泡合并过程趋于终止, 弹状流形成。

Moissis (1962)<sup>[2]</sup>认为: 由于小气泡之间的碰撞导致了气泡合并, 最终形成了直径与管径相似的大气泡, 从而形成了弹状流。泡状流只是一个过渡流型, 它给予小气泡足够的碰撞时间, 最后发展成弹状流。因为在空隙率为 0.25 ~ 0.30 时碰撞速度会急剧增加, 他们提出了一个弹状流形成的空隙率标准。Taitel 等 (1980)<sup>[3]</sup>也认为气泡的逐渐合并是弹状流的形成机理, 但他们认为如果气泡合并和气泡破裂由于流体的脉动而达到平衡的话, 分散泡状流可以保持下去。Hewitt (1990)<sup>[4]</sup>发现管道长度对弹状流的形成和空隙率没有影响, 这就暗示了整个管道中可以同时形成弹状流。Kapteyn (1989)<sup>[5]</sup>测量了泡状流的气泡尺寸和个数, 发现这两个参数在实验管道顶部和底部并没有区别, 因此认为气泡的破裂和合并不是弹状流形成的机

理。从另一个角度来说,直径小于 4 mm 的气泡集中在管壁附近,并没有形成气泡簇的趋势;即使空隙率增加到高达 35%,这些气泡仍只是简单地聚集在一起。在一定的空隙率下,整个管道气泡突然合并形成紊乱结构,此时气体速度稍微有些增加就会导致弹状流的出现。

Cheng 等(1998)<sup>[6]</sup>对泡状流到弹状流的转换做了进一步的研究。他们发现:(1)传统的弹状流在 150 mm 管径中不会出现,随着气体流量的增加逐渐过渡到块状流动。(2)气泡尺寸随着管段高度的增加而降低,而气泡出现的频率却随着管段高度的增加而增加。这说明在高气相速度下,气泡是破裂而不是合并。(3)在 150 mm 管径中,保持液相流量不变,增大气相流量,当观察到大的流体结构时,获得因子逐渐增加并超过 1.0,但是在保持气相流量不变、降低液相流量时,尽管已经观察到同样的转变且系统获得因子保持在 1.0 以上,却没有观察到如此明显的趋势,因此获得因子不能作为转换的判断依据。(4)在管径为 28.9 mm 的情况下,保持液相流量不变、增大气相流量将会导致弹状流突然产生,同时获得因子变换到大于 1.0。这一突然转变说明弹状流的形成是由于系统的不稳定性造成的,而不是气泡的逐渐合并。

孙宝江等(2000)<sup>[7]</sup>对大管径内的流型转换机理进行了研究,他们从空隙率波的不稳定性出发,揭示了泡状流中 Taylor 气泡的形成机理。同时,对空隙率波增长率曲线的测量和分析表明:空隙率波对一定频率的扰动具有最大增长率,因而具有最大增长率的空隙率波的频率成分在泡状流中迅速增长,并在管中形成越来越强的疏密波,使大量气泡准周期性地集中在空隙率波的波峰,并形成聚并;因此弹状流中 Taylor 泡的形成并非是逐个气泡碰并的渐变过程,而是在流型转换过程中由空隙率波驱动的瞬变过程。实验结果还表明:随着气液两相流量(或雷诺数)的增加,连续相或离散相均处于强湍流状态,使空隙率波产生的聚并机制遭到破坏;同时,流动中会出现大量气泡群组成的气团,随机地出现并分布在不同的径向位置,这种由大量气泡组成的气团并不能产生聚并或以较快的速度同周围的气泡发生碰并,形成与管径尺寸相当的泡,高雷诺数和剧烈的湍流运动抑制了 Taylor 泡的形成,随着含气量的上升,泡状流“失稳”后经过弹帽泡状流、弹帽沫状流,最后演化为块状流。

由于对形成机理的研究是各个学者在不同的工况和实验条件下进行的,因此所得结论不可避免地存在一定局限性。由此,对垂直管弹状流的形成机理还需要做进一步的研究,以便形成共识。

### 3 最小稳定液弹长度

弹状流中存在两种类型的液弹:稳定的长液弹及发展中的短液弹。液弹长度不仅对计算弹状流压降至关重要,而且也是弹状流模型中一个重要的输入参数。近年来,许多研究者在液弹长度方面做了大量的实验和理论研究,得出垂直上升流动中最小稳定液弹长度为  $8D \sim 25D$  ( $D$  为管径)。一般认为,稳定液弹长度是使液弹尾部液体速度达到充分发展所需要的长度。

垂直管弹状流最基本的特征就是气液交替流动。气是指 Taylor 气泡,液是指两个 Taylor 气泡之间的液弹。Taylor 气泡和液弹长度沿管道的发展可作如下解释:短液弹后面的气泡移动速度通常比长液弹后面的气泡移动速度快,因此它可以追上前面的气泡,在气泡结合过程中,液弹长度和 Taylor 气泡长度均增加;一旦所有的液弹尾部速度完全发展,并且液弹两端 Taylor 气泡传输速度相同时,气泡合并的情况就结束了。

Taitel 等(1980)<sup>[3]</sup>和 Brauner(1985)<sup>[8]</sup>指出完全发展的液弹长度等于 Taylor 气泡周围的液膜产生的液体被液弹完全卷吸的距离。他们得出垂直管中最小液弹长度是  $16D$ 。Shemer 等(1987)<sup>[9]</sup>应用氩泡技术使弹状流瞬时速度梯度可视化,得出竖直管中最小稳定液弹长度为  $20D$ 。

Pinto 等(1998)<sup>[10]</sup>在直径为 22 mm, 32 mm 和 52 mm 的垂直管中对 Taylor 气泡上升过程中的合并情况进行了研究。在其试验工况下,尾流区的液体都处于紊流状况,气泡周围的流态是层流或紊流。当气泡周围液膜的流态是紊流时,气泡间相互无影响的距离是  $5D$ ,当气泡间距离小于  $5D$  时,将会在上升过程中出现合并现象;当气泡周围液膜的流态是层流时,他们观察到两种情况:当气泡周围完全发展的液膜的平均速度和液弹的平均速度比值大于 25 时,将会观察到气泡合并,气泡间相互无影响的最小距离是  $10D$ ;如果比值小于 25 并且两气泡间的初始距离大于前面气泡的尾流区长度,气泡在上升过程中间距将会增大,不会出现气泡合并现象。

夏国栋等(2000)<sup>[11]</sup>研究发现,在充分发展的垂直上升弹状流中,平均液弹长度为  $16D \sim 20D$ ,可能出现的液弹最大长度约为平均液弹长度的 2 倍,最小稳定液弹长度为  $14D$ ,同时他还发现,最小稳定液弹长度与气液流速无关,只是管径的函数。

Talvy 等(2000)<sup>[12]</sup>在前人研究的基础上,利用数字图像处理技术对相邻两个 Taylor 气泡在静止液体中上升运动的相互作用进行了研究。他们发现即使在距入口长度增加到  $50D$  时,尾部气泡仍然受前面气泡尾

流区垂直速度场的影响,在其所能得到的最大距离( $60D$ ,测量距离上限)内,液弹后面气泡的运动速度一般比液弹前面气泡的运动速度快。也就是说此时还存在气泡合并现象,液弹长度还没有稳定下来。

由此可以看出,对于最小稳定液弹长度的研究还没有达到共识,只是在一定条件下得出了液弹长度的范围。同时,各研究者推荐的最小稳定液弹长度值差别较大。在任意给定的工况下(如气液相折算速度、管径、流体黏度及密度等),要想确定最小稳定液弹长度还需要做大量的工作。

#### 4 Taylor 气泡的运动

在弹状流中,大部分气体存在于 Taylor 气泡内,其运动速度是描述气液弹状流流动特性的一个重要参数,因此,对于 Taylor 气泡运动速度的研究具有非常重要的意义。

Taylor 气泡运动的信息同截面含气率和压降都有关系。Moissis 等(1962)<sup>[2]</sup>测量了固定塑料“气泡”尾流区的速度曲线,模型的不足之处是塑料模型的固定边界不能代替气泡的自由界面。除此之外,实验中的流动状况与气泡在真实弹状流中相对管壁的运动不同。Nakoryakov 等(1989)<sup>[13]</sup>利用电气化学探针对垂直流体中的瞬时速度曲线进行了更广泛的研究,得到了轴向和径向速度曲线。他们发现 Taylor 气泡后面混合区的矢量环对弹状流的流体结构影响非常大。Shemer 等(1987)<sup>[9]</sup>利用氢泡技术对垂直弹状流中 Taylor 气泡后面的速度场进行了可视化研究。他们认为液塞中存在2个区:一个是环状流进入液弹的混合区,另一个是速度完全发展的区域。他们发现 Taylor 气泡的速度与它前面的最大瞬时速度值有关。

Kawaji 等(1997)<sup>[14]</sup>利用 PDA(Photochromic Dye Activation,对光反应染色激活)技术和 VOF(Volume of Fluid)方法对垂直管中气液弹状流的结构进行了实验研究。他们发现,当 Taylor 气泡向侧向运动时,阻力会降低,这对于解释 Taylor 气泡在垂直弹状流中加速合并很重要。

Nigmatulin 等(1997)<sup>[15]</sup>利用静态图片和录像胶卷对垂直向下弹状流中 Taylor 气泡的形状进行了研究。他们发现气泡波动的振幅与气泡长度成反比,并且对于长气泡,只有在气泡底部才能看到波动出现;气泡底部界面的稳定性也与气泡长度有关,气泡越长,气泡底部越不稳定,但此时液膜在接近底部时是等厚的;短气泡有一个稳定的球形底部。

Bugg 等(1998)<sup>[16]</sup>对垂直管中 Taylor 气泡在静止液体中的上升进行了数值模拟。他们证实了对 Taylor 气泡上升的数值模拟重要特征进行数值模拟的可行性。

该模型可以很好地预测气泡终极速度、液膜厚度和液膜平均速度。

Plonsky 等(1999)<sup>[17]</sup>利用数字图像处理技术对单个 Taylor 气泡的运动进行了详细的研究,得到了 Taylor 气泡的水力参数,如气泡形状、气泡尖部和底部的速度以及由于水力压力梯度造成的气泡延长等。他们发现,气泡底部做着准周期的摆动。他们对各种流动工况下的摆动频率进行了测量,同时,还把人们所接受的滑脱系数的值与气泡前面的速度曲线形状有关这一假设推广到入口区域未完全发展的弹状流中,得到了气泡外形和由于压缩性气泡长度对气泡传输速度的影响。他们还对 Taylor 气泡运动的瞬态特征进行了研究。当气泡底部摆动的频率接近常数时,它们的幅值随着气泡长度和液体速度的增加强烈增加,未完全发展弹状流中气泡后面的速度分布控制着气泡的加速。Plonsky 等(1999)<sup>[18]</sup>对 Taylor 气泡的运动和它前面的速度场之间的关系做了研究,结果表明 Taylor 气泡的传输速度与它前面液体的最大局部速度有关。

夏国栋等(2000)<sup>[19]</sup>利用势流理论对垂直上升弹状流中 Taylor 气泡的上升速度进行了研究,给出了液体速度分布对气泡上升速度的影响,导出了气泡头部方程,提出了液体流动为层流和紊流时气泡上升速度的表达式。模拟结果与实验数据的对比表明:当表面张力影响较小时,用一级近似可以较好地描述液体速度分布对 Taylor 气泡上升速度的影响。同时,他们还选用数值计算模型对垂直管静止液体中 Taylor 气泡在比较宽广的物性参数范围内进行了模拟,研究了物性对 Taylor 气泡的头部形状、下降液膜厚度、气泡尾部形态和气泡上升速度的影响。

Hout 等(2002)<sup>[20]</sup>利用粒子图像测速仪(PIV)对静止液体中由于 Taylor 气泡向上运动而引起的速度场进行了实验研究。他们测量了气泡前部、液膜中和尾流区的速度场。研究发现:气泡运动对它前面液体的影响限制在  $x/D < 0.5$  ( $x$  为轴向距离)。Taylor 气泡周围下降液膜在其终点达到速度最大值。在  $x/D < 2$  的尾流区,下降环状液膜与上升的气泡底部液体混合产生复杂的紊流流态,平均速度图形是一个严格的环状矢量图。在  $x/D < 2$  时,平均轴向速度方向在中心是向上的,而在管壁则是向下的。当  $2 < x/D < 5$  时,平均速度图是一个方向相反、强度较小的矢量图形,平均速度随着  $x/D$  的增加而减弱。当  $x/D > 12$  时,平均速度就可以忽略不计了。与平均速度相反,在最后的测点位置(大约  $50D$ )处仍能检测到瞬时速度。正像 Talvy 等(2000)<sup>[13]</sup>所指出的那样,对于 Taylor 气泡尾流区瞬时和平均速度场的分析使我们对后一气泡在

前面气泡尾流区中的传播更为清楚。

Bugg 等(2002)<sup>[21]</sup>对黏性流体中 Taylor 气泡周围的速度场进行了数值计算和实验研究。他们利用 PIV 在 9 mm 的管径中得到了气泡前部、下降液膜和尾流区 0.152 mm 的空间分辨率。在下降液膜的下部,速度曲线外形和黏性下降液膜理论的分析结果吻合得较好。同时,尾流区也表现出了层流的规律性和重复性,气泡对于它周围静止液体的影响非常有限。在气泡前部  $D/3$  处,液体的速度降到不足气体速度的 5%。在气泡尾部 0.77  $D$  处,尾流区的速度降低到气泡速度的 10%。

对 Taylor 气泡运动及其周围的速度场所进行的研究中,大部分实验都是在静止液体中进行的,而对连续流动液体中 Taylor 气泡的运动的的研究较少,需要做进一步研究。

赵越超等<sup>[22]</sup>总结了近年来强烈段塞流消除方法的试验研究进展情况,对实验和生产过程中所提出和应用的多种消除方法进行了归纳,重点对节流法和注气举升法的原理及优缺点进行了分析。

## 5 结束语

综上所述,由于气液两相弹状流在实际工程应用中的重要作用,有关弹状流的研究已经引起人们的高度重视,但迄今为止,在理论研究方面尚缺乏统一的认识,在实验研究方面还缺乏广泛的实验数据以验证和评价模型的正确性,所以有必要对此进行更深入系统的研究。

## 参考文献

- [1] 王跃社,刘磊,周芳德.圆管内油气水三相弹状流的生成和发展.西安交通大学学报,2001,35(1):5-9.
- [2] MOISSIS D, GRIFFITH P. Entrance effects in a two-phase slug flow. J. Heat Transfer, Trans. ASME 1962, C2.
- [3] TAITEL Y, BARNEA D, DUKLER A E. Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. AIChE Journal, 1980, 26(3):345-354.
- [4] HEWITT G F. Non-equilibrium two-phase flow. In Proc. 9th int. heat transfer conf., Jerusalem lecture. Jerusalem, Israel. 1990.
- [5] KAPTEYN C. Measurements on Concentration Waves in Bubbly Liquids: [PhD Thesis]. University of Twent. 1989.
- [6] CHENG H, HILLS J H, AZZOPARDI B J. A study of the bubble-to-slug

transition in vertical gas-liquid flow in columns of different diameter. Int. J. Multiphase Flow, 1998, 24(3):431-452.

- [7] 孙宝江,颜大椿.垂直气-液两相管流中的流型转换机制与控制.北京大学学报(自然科学版),2000,36(3):382-388.
- [8] BARNEA D, BRAUNER N. Hold-up of the liquid slug in two phase intermittent flow. Int. J. Multiphase Flow, 1985, 11(1):43-49.
- [9] SHEMER L, BARNEA D. Visualization of the instantaneous velocity profiles in gas-liquid slug flow. PhysicoChem, Hydrodynam, 1987, 8(3):243-253.
- [10] PINTO A M F R, PINHEIRO M N C, CAMPOS J B L M. Coalescence of two gas slugs rising in a co-current flowing liquid in vertical tubes. Chemical Engineering Science, 1998, 53(16):2973-2983.
- [11] 夏国栋,刘亮,马重芳,等.气液两相弹状流动的试验研究——液弹长度及 Taylor 气泡长度份额.北京工业大学学报,2000,26(2):35-38.
- [12] TALVY C A, SHEMER L, BARNEA D. On the interaction between two consecutive elongated bubbles in a vertical pipe. Int. J. Multiphase Flow, 2000, 26:1905-1923.
- [13] NAKOPYAKOV V E, KASHINSKY O N, PETUKHOV A V, et al. Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow. Exp. Fluids, 1989, 7(8):560-566.
- [14] KAWAJI M, DEJESUS J M, TUDOSE G. Investigation of flow structures in vertical slug flow. Nuclear Engineering and Design, 1997, 175:37-48.
- [15] NIGMATULIN T R, BONETTO F J. Shape of Taylor bubbles in vertical tubes. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1997, 24(8):1177-1185.
- [16] BUGG J D, MACK K, REZKALLAH K S. A numerical model of Taylor bubbles rising through stagnant liquids in vertical tubes. Int. J. Multiphase Flow, 1998, 24(2):171-181.
- [17] POLONSKY S, BARNEA D, SHEMER L. Averaged and time-dependent characteristics of the motion of an elongated bubble in a vertical pipe. Int. J. multiphase flow, 1999, 25:795-812.
- [18] POLONSKY S, SHEMER L, BARNEA D. The relation between the Taylor bubble motion and the velocity field ahead of it. Int. J. Multiphase Flow, 1999, 25:957-975.
- [19] 夏国栋,刘亮,马重芳.垂直上升弹状流中 Taylor 气泡上升速度的研究.北京工业大学学报,2000,26(4):58-62.
- [20] VAN HOUT R, GULITSKI A, BARNEA D, et al. Experimental investigation of the velocity field induced by a Taylor bubble rising in stagnant water. Int. J. Multiphase Flow, 2002, 28:579-596.
- [21] BUGG J D, SAAD G A. The velocity field around a Taylor bubble rising in a stagnant viscous fluid-numerical and experimental results. Int J Multiphase Flow, 2002, 28(5):791-803.
- [22] 赵越超,彭汉修,吴大亮,等.强烈段塞流消除方法的试验研究进展.管道技术与设备,2004(2):1-4.

(上接第2页)

## 4 结束语

以寻求输量最大为目标,用公认的方法对采用密闭输送方式顺序输送 2 种油品,并且全线只有一个混油“界面”的格拉管道工况优化问题进行了研究。在寻求最优调节方案中,采用了上游调节优先,先停运泵机组、后分配节流压力的方法。搜索解算了油品更替过程中“界面”处于管道各特殊点时满足工艺约束条件的最大

可行输量,给出了此输量下的工况调节方案。

## 参考文献

- [1] 蒲家宁.军用输油管线.北京:解放军出版社,2002.
- [2] 中国石油天然气管道工程有限公司.格尔木-拉萨成品油输送管道改造工程初步设计(汇报提纲).2002.
- [3] 蒋仕章.管道顺序输送分析计算与运行优化研究:[学位论文].重庆:中国人民解放军后勤工程学院,2003.
- [4] 蒋仕章,蒲家宁.顺序输送新压能平衡方程与工况分析.油气储运,2004,23(6).