

分岔管路内两相流动的研究进展

王立洋¹, 吴应湘², 郑之初²

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘 要

介绍了单分岔管路在实验研究、理论分析和数值模拟方面的研究现状, 并着重阐述了近年来发展起来的用于气-液和液-液分离的多分岔管路研究内容, 最后对今后一段时期内分岔管路内的两相流动研究及现场实际应用进行了展望。

关 键 词: 分岔管路; 两相流动; 相分配不均; 两相分离器

0 引 言

在石油、化工、核能等行业的输送管网内, 存在着大量如图 1 所示的分岔管路, 根据分支管路主管路的夹角, 分岔管路可以分为两类: 夹角为 90° 时称为“T”型分岔管路, 其余的统称为“Y”型分岔管路, 如图 1 所示。

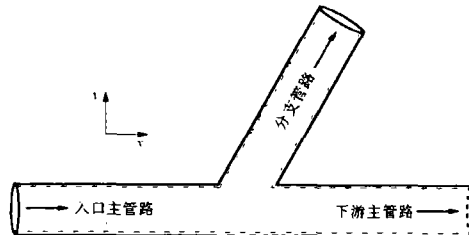


图 1 分岔管路的示意图

当两相介质经过这些分岔管路时, 一般都会发生相分配不均现象^[1], 即入口主管路、下游主管路和分支管路内流体混合物的组分比例互不相同。在管网输送过程中, 这种现象会导致严重的问题。例如, 在天然气管路中, 由于温度、压力等参数的变化, 管路内通常有凝析液出现, 管路内实际上是低含液率的气液两相流动。凝析液的存在不仅降低了管道的运输能力, 而且还可能产生水合物并导致冰堵等严重事件发生。为除去管路内的凝析液, 通常是沿管路安装一些液相捕集器。然而, 由于气液两相在许多分岔管路处的相分配不均现象, 一些液相捕集器内几乎没有接收到凝析液, 另外一些则可能已经处于超负荷状态。此外, 分岔接头处的这种相分配不均现象还可以用来进行两相分离。例如, 随着海洋石油开采日益受到重视, 减小分离器体积、提高分离效率成为海洋工程研究领域内的热点问题, 而采用包括分岔管路在内的这类管式分离器是主要方案之一, 在这方面许多学者已经开展了卓有成效的工作^[2-5]。

1 分岔管路两相流动的研究现状

影响分岔接头处相分配的因素有很多, 主要包括入口管路内的两相流型、混合流速、相含率、总流量配比、介质物性, 分支管路与主管路的夹角、管径、管径比、内部结构, 以及整个分岔管路的布置角度等^[6-8]。在过去的几十年里, 各国学者系统地研究了上述参数对分岔管路内的两相流动特性的影响。

1.1 两相流型

Buell 等^[9]研究了低压下入口流型对相分配的影响, 分岔管路水平布置, 管径为 37.6mm, 入口流型包括分层流型、波状流型、段塞流型和环状流型。作者发现, 随着液相速度的增大, 越来越多的气相将进入分支管路, 与 Rubel 等^[10]高压条件下水蒸气-水两相流动实验得到结论是一致的。Fujii 等^[11]以氮气和水作为实验介质, 比较系统地研究了流型对相分配的影响。实验中, 气、液两相的表观流速分别为 0.03~12.0m/s 和 0.05~0.50m/s, 入口流型包括分层流型、波状流型、柱状流型、段塞流型和环状流型, 后三种流型下与 Hwang^[12]、Ottens 等^[13]和 Hong & Griston^[14]的实验结果符合较好, 并发现只有当总流量配比 W_3/W_1 达到某一阈值时气相才开始进入分支管路。

在 Van Gorp 等^[15]的实验中, 以空气-水为实验介质, 整个 T 型管也是水平布置, 主管路和分支管路的直径分别为 38.1mm 和 7.85mm。入口管路内的流型主要有三种: 分层流型、波状流型和环状流型。如图 2 所示。作者发现波状流型下保持气相表观流速 V_G 不变, 增加液相流速 V_L 时气相分配比例将逐渐增大。环状流型下比较复杂, 当液相比例大于 0.23 时, 变化趋势与波状流型相一致。当液相比例低于这一数值时, 增加液相流速反而会减少进入分支管路内的气相流量。

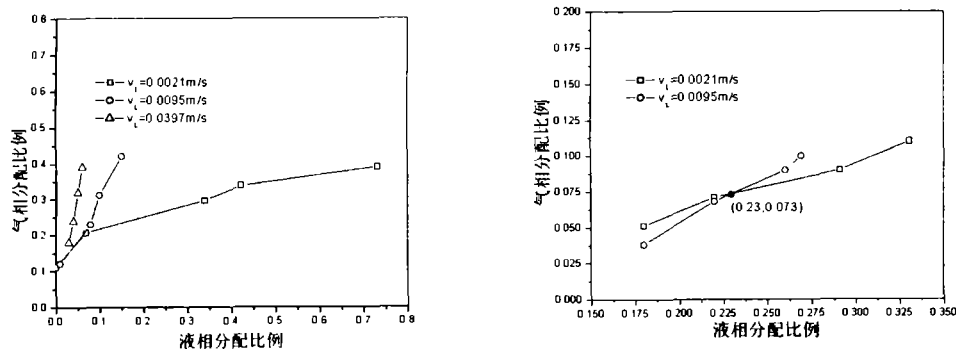


图 2 Van Gorp 等^[15]得到的空气-水相分配数据

1.2 分岔管路布置角度

在多数学者的研究中, 分岔管路的主管路和分支管路均为水平布置, 但是在实际管网中分支管路通常都是倾斜的。Seeger 等^[16]研究了非水平布置分岔管路内气液两相流动特性, 实验中主管路为水平布置, 分支管路有三种角度: 水平、垂直向上和垂直向下, 并分别给出了三种情况下计算气液相分配比例的经验关系式^[17]。

在 Azzopardi 等^[18]的实验中, 主管路水平布置, 分岔管路包括水平和垂直向上两种, 以研究分岔管路布置角度对相分配的影响。由图 3 可见, 分岔管路布置角度对相分配的影响十分显著。当分支管路位于水平面上时, 气液两相几乎是以相同的比例进入分支管路, 相分配不均现象并不明显。而当分支管路垂直向上布置时, 直至气相分配比例接近于 1 时液相才开始进入分支管路, 此时下游主管路出口处的控制阀门已几乎完全关闭。

目前为止, 几乎所有分岔管路内相分配特性的研究都是局限于气液两相流, 而有关液液两相流动的研究却非常有限。Yang 等^[19,20]分别在分支管路水平和垂直向上两种布置角度下进行了油水两相流动实验。图 4 为混合流速 0.75m/s、含水率 0.73~0.75 时两种 T 型管路下的相分配图。可以看出, 当分支管路垂直向上布置时, 在油相分配比例达到 0.55 后水相才开始进入分支管路, 油水两相之间发生了明显的分离现象。而在分支管路水平布置时, 分岔接头处的相分配要均匀得多。

1.3 管径比

对于气液两相流动, 通常认为管径比对相分配的影响表现在以下两方面:

- 分支管路直径减小后, 气液两相经过分岔接头的时分会相应缩短;
- 管径比减小后, 相同流量配比下分支管路内的压力会降低, 驱使更多的气液两相进入分支管路。

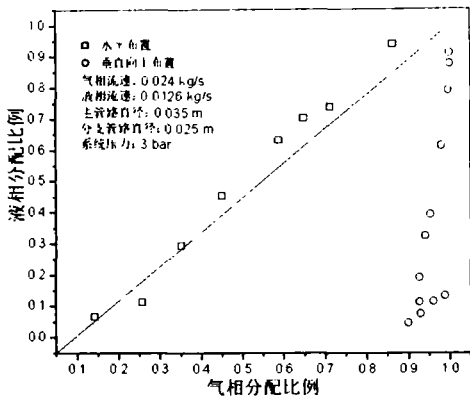


图3 气液相分配图

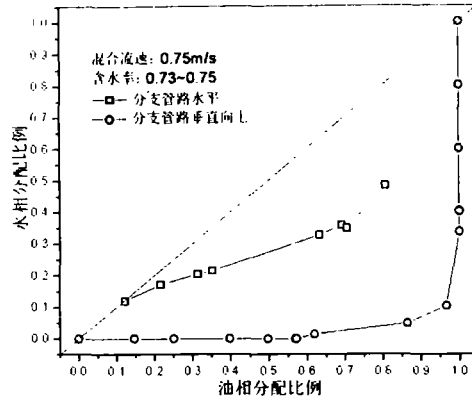


图4 油水相分配图

1.4 管径比

对于气液两相流动，通常认为管径比对相对分配的影响表现在以下两方面：

- c. 分支管路直径减小后，气液两相经过分岔接头的的时间会相应缩短；
- d. 管径比减小后，相同流量配比下分支管路内的压力会降低，驱使更多的气液两相进入分支管路。

Azzopardi^[21]实验中 T 型分岔管路的主管路直径为 38.1mm，分支管路/主管路管径比为 1/3、2/3 和 1 三种。入口管路内气液两相为分层流型和环状流型，系统压力介于 1.5 ~ 3.0bar 之间。在实验工况范围内，随着管径比的减小，更多的液相将继续沿主管路往下游流动。与此相反，Walters 等^[22]在实验中对管径比 0.2 和 0.5 两种情况比较后发现，前者在同样运行工况下进入分支管路内的液相比例明显大于后者。

1.5 内部结构

多数情况下，主管路和分支管路连接处不存在其他结构物。为了改善气液两相的分配不均匀性，Fouda & Rhodes^[23]在分岔接头处安装了导流板，在实验范围内取得了较好的效果。Butterworth^[24]研究了嵌入套管对气液两相流动的影响，主管路和分支管路的直径分别为 0.038mm 和 0.025mm，在分支管路内嵌入有外径 0.022mm 的管路，端口处呈 45° 楔形面（图 5）。嵌入管路可以自由转动，以研究楔形面与主流方形的夹角对两相分配的影响。实验中当入口管路内气液两相为环状流型时，图 6 中给出了三种情况下的相分配比例图。可以看出，当楔形面正对来流时，相同的气相配比下进入分支管路的液相明显较高，而楔形面背对来流方向时进入分支管路内的液相比例是最低的。

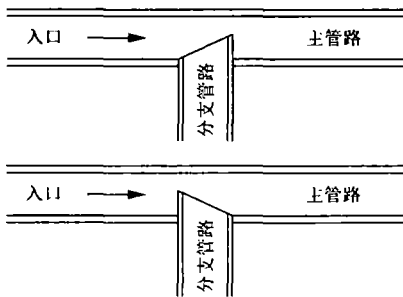


图5 分岔管路的示意图

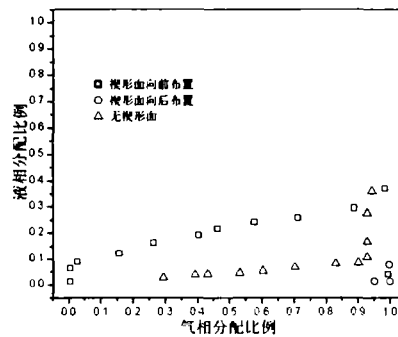


图6 气液相分配图

2 分岔管路作为分离器的实际应用

随着对分岔管路内的两相流动特性研究的逐渐深入，学者们认识到可以利用这种相分配不均现象进行两相分离。单个分岔管路作为两相分离器使用时，具有结构简单、尺寸紧凑、重量轻、压降损失

小、安全性高等优点,但是也存在分离效果较差且分离性能易受入口条件和运行工况影响等难以解决的问题。为此,学者们在单个分岔管路的基础上设计了不同结构的多分岔管路,试图进一步改善分离性能,以更好地应用于石油、化工以及核能等行业中。例如,Wren 等^[25]采用了图 7 所示的多分岔管路,气液分离实验结果表明:与单分岔管路相比,这种结构的多分岔管路可以获得更好的分离效果。

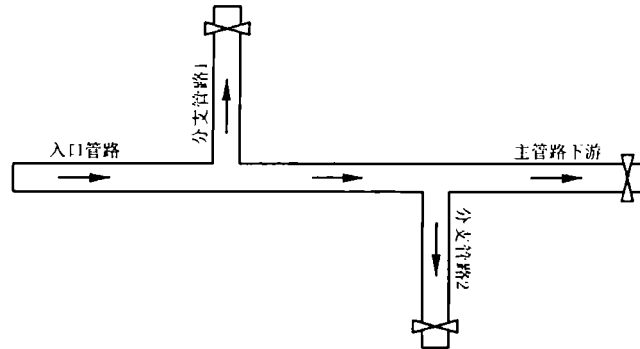


图 7 Wren 等^[25]采用的多分岔管路

此外,还有两种结构的多分岔管路已经在工业现场得到了应用,并取得了很好的效果。

2.1 气-液分离

近年来,分离器领域内的著名制造商 StatoilHydro 公司率先提出了管式分离器的概念,主要用于海上油气田的开发中,具有体积小、重量轻、分离速度快、分离效率高等诸多优点,并可显著降低分离过程中的压降损失,有利于提高油井的产量。图 8 所示为整个分离器的一个重要组成部分,即采用多分岔管路结构的新型气液分离器。它包括一根主管路、五根垂直管路和一根普通的旁路管线,主要用于脱除来液中的自由气体,这样不仅有利于后续的油水分离,而且还能起到消除来液中段塞的作用,保持工艺处理系统的平稳运行。如图 9 所示,现场试验中由于这种气液分离器有效地脱除了来液中的自由气体,使得经过气液分离后测得的混合密度值较分离前平稳很多。

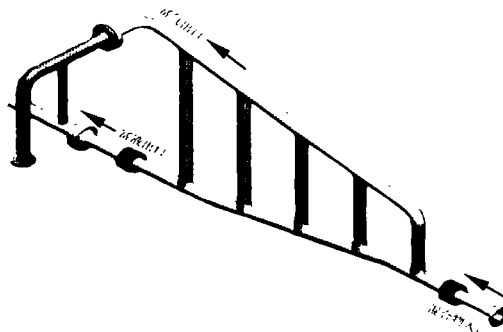


图 8 新型气液分离器

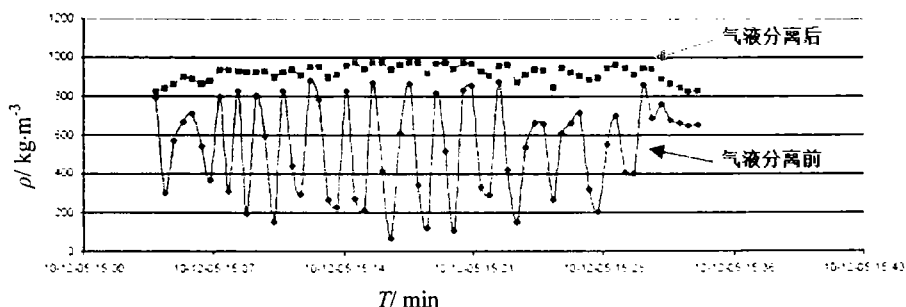


图 9 经过气液分离器后测得的混合密度波动情况

2.2 液-液分离

与国外相比,我国在海上油水分离器的研发方面起步较晚,但是近些年发展比较迅速。“十五”期

间, 在中国科学院和中国海洋石油总公司重大科技合作项目中, 力学所应用流体实验室承担了“海上油气混输技术研究”课题。在充分调研相关文献和实地考察国内主要油田的基础上, 课题组研发出了一种集离心、重力和膨胀等分离原理于一体的新型复合式油水分离器。在华北油田进行的现场试验表明, 分离器油出口的含水率控制在 0.5% 以下, 排水口处的含油率在 10.0ppm 左右, 取得了很好的分离效果。T 型多分岔管路(图 10)是复合式分离器的核心部件之一, 对提高分离性能起到了非常重要的作用。此外, 由于这种新型分离器具有结构紧凑、安装维护简便、压降损失小、分离效果好等优点, 因此还可以单独或者与其他分离设备组合用于旧分离系统改造、提高原油处理系统处理量或者改善其分离性能指标等作用。例如, 2008 年 9 月份在南海某平台的现场试验中, 通过将梯形多分岔管路与液液柱形旋流器相结合, 成功地将排海污水的含油率降到了环保部门规定的指标以下。因此, 这种新型的油水分离装置有望在未来的海洋油气开采中发挥更大的作用。

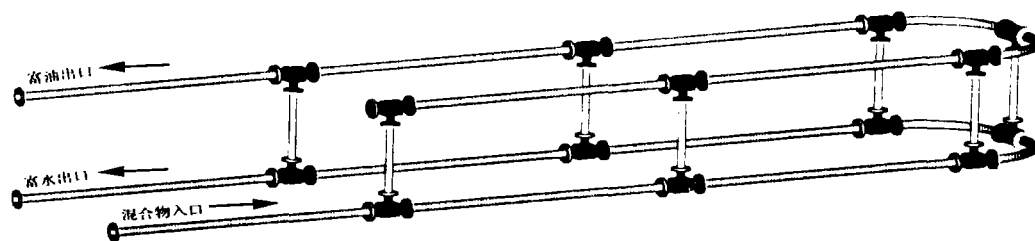


图 10 新型油水分离器

3 结 语

本文对分岔管路内两相流动的研究现状进行了综述, 并着重介绍了分岔管路作为多相分离器的应用情况:

① 在单分岔管路的气液两相流动方面, 学者们开展了大量的室内实验、理论分析和数值模拟工作, 对各种影响因素进行了比较充分的研究。但是, 由于多相流动本身所具有的复杂性, 目前在机理方面的研究还有待进一步深化。

② 目前单分岔管路内两相流动的研究主要集中于气液两相流动, 而对于液液两相流动的研究则相对很少, 尤其是缺乏机理性的研究工作。为了更全面地了解分岔管路内的两相流动特性, 需要在这方面继续开展大量的研究工作。

③ 单分岔管路虽然已有作为分离器使用的实例, 但是其分离性能通常不能满足工业上的要求。因此, 应该根据具体的分离介质、来流工况和运行条件等设计出合理的多分岔管路装置, 以达到高效、快速、安全分离的目的。

在当前的形势下, 加快海洋石油开发是我国面对能源挑战的重要举措。研发适合海上石油开采的新型管式分离设备, 具有很高的实际应用价值。单(多)分岔管路分离装置作为管式分离器的重要形式之一, 将成为未来一段时期内新型分离器研发的重点。

参考文献:

- [1] HONG K C, Two phase flow splitting at a pipe tee [J] . J. Petroleum Technology. 1978, 30: 290 – 296.
- [2] MORIKAWA Y, KONDO T. HIRAMOTO T. Pressure drop and solids distribution of air – solids mixture in a horizontal unsymmetric branches [J] . Int. J. Multiphase Flow, 1978, 4: 397 – 404.
- [3] HWANG S T, SOLIMAN H M. Phase separation in dividing two-phase flow. Int. J. Multiphase Flow, 1988, 14: 439 – 458.
- [4] AZZOPARDI B J. T junctions as phase separators for gas liquid flows: possibilities and problems [J] . Chem. Eng. Res.

- Design, 1993, 71, 273 – 281.
- [5] AZZOPARDI B J, COLMAN D A, NICHOLSON D. Plant application of a T junction as a partial phase separator. Chem [J] . Eng. Res. Design, 2002, 80: 87 – 96.
- [6] ORANJE L. Condensate behavior in gas pipelines is predictable [J] . Oil and Gas Journal, 1973, 39-44.
- [7] HWANG S T, SOLIMAN H M, LAHEY R T. Phase separation in dividing two-phase flows [J] . Int. J. Multiphase Flow, 1988, 14 (4): 439-458.
- [8] DAS G, DAS P K, AZZOPARDI B J. The split of stratified gas-liquid flow at a small diameter T-junction [J] . Int. J. Multiphase Flow, 2005, 31: 514-528.
- [9] BUELL J R, SOLIMAN H M, SIMS G E. Two phase pressure drop and phase distribution at a horizontal tee junction [J] . Int. J. Multiphase Flow, 1994, 20, 819 – 836.
- [10] RUBEL M T, TIMMERMAN B D, et al. Phase distribution of high pressure steam water flow at a large diameter tee junction [J] . J. Fluids Eng, 1988, 116, 592 – 598.
- [11] FUJII T, TAKENAKA N, NAKAZAWA T, ASANO H. The phase separation characteristics of a gas-liquid two-phase flow in the impacting T-junction [A] . Proceeding of the 2nd International Conference on Multiphase Flow [C] . Kyoto, Japan, 1995, 627 – 632.
- [12] HWANG S T. A study on phase separation phenomena in branching conduits [D] . Ph.D Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 1986.
- [13] OTTENS M, de SWART A, et al. Gas – liquid flow splitting in regular, reduced and impacting T-junctions [J] . Impaintisitica Italiana, 1995, 8, 23 – 33.
- [14] HONG K C, GRISTON S. Two-phase flow splitting at an impacting tee [J] . SPE Production and Facilities, 1995, 10, 184 – 190.
- [15] Van GORP C A. Two-phase pressure drop and phase distribution at a reduced horizontal tee junction: The effect of system pressure [D] . Master Thesis, University of Manitoba, 1998.
- [16] SEEGER W, REIMANN J, MULLER U. Phase separation in a T-junction with a horizontal inlet [A] . The 2nd International Conference on Multiphase Flow [C] . London, England, 1985, 13 – 26.
- [17] SEEGER W, REIMANN J, MULLER U. Two-phase flow in a tee junction with a horizontal inlet, Part I: phase separation [J] . Int. J. Multiphase Flow, 1986, 12 (4): 575 – 586.
- [18] AZZOPARDI B J, SMITH P A. Two-phase flow split at T junctions: effect of side arm orientation and downstream geometry [J] . Int. J. Multiphase Flow, 1992, 18 (6), 861 – 875.
- [19] YANG L, AZZOPARDI B J, BELGHAZI A. Phase separation of liquid-liquid two-phase flow at a T-junction [J]. AIChE Journal, 2006, 52 (1), 141 – 149.
- [20] YANG L, AZZOPARDI B J. Phase split of liquid-liquid two-phase flow at a horizontal T-junction [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2007, 33 (2): 207 – 216.
- [21] AZZOPARDI B J. The effect of the side arm diameter on the two-phase flow split at a T junction [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1984, 10 (4): 509 – 512.
- [22] WALTERS L, SOLIMAN H M, SIMS G E. Two-phase pressure drop and phase distribution at reduced tee junction [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1998, 5 (24), 775 – 792.
- [23] FOUA A E, RHODES E. Two-phase annular flow stream division in a simple tee [J]. Trans. Instrn. Chem. Eng., 1974, 52, 354 – 360.
- [24] BUTTERWORTH D. Unresolved problems in heat exchanger design – Interflow 80 [C] . The Fluid Handling Conference, Harrowgate, 1980.
- [25] WREN D, AZZOPARDI B J. The phase separation capabilities of two T-junctions placed in series [J] . Trans. IChemE, Part A, 2004, 82(A3): 364 – 371.

Research Progress Two-Phase Flow Inside Bifurcated Pipes

WANG Li-yang¹, WU Ying-xiang², ZHENG Zhi-chu²

(1. CNPC Offshore Engineering Co., Ltd., Beijing 100176, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract

The research progress of two-phase flow inside single bifurcated pipe is presented in the aspect of indoor experiments, theoretical analyses and numerical simulations. Moreover, the applications of multi-bifurcated pipes in separating gas-liquid and liquid-liquid two-phase flow are also discussed in details. Finally, the development trend of two-phase flow inside bifurcated pipes and their industrial applications are proposed.

Key words: bifurcated pipes; two-phase flow; phase maldistribution; two-phase separator

作者简介

王立洋 男, 1980年生, 博士, 现从事多相流动方面的研究工作。

吴应湘 男, 1956年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究流体力学和海洋工程力学。

郑之初 男, 1939年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为流体力学。