

水平管道油水两相流流型研究综述

蒋昌华

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 油水两相流动现象作为多相流领域的重要分支, 普遍存在于石油工业各个环节中。水平管道油水两相流流型的相关研究对于解决石油生产中的重要技术问题具有重要意义。简述了国内、外水平管道油水两相流流型研究的现状和发展方向, 介绍了流型划分的方法。分析了影响流型的各种因素和参数, 包括流速和相含率、油相黏度、管道直径和材质、入口形状、添加剂等。介绍了流型参数的测量方法和流型的识别方法, 分析了现有测量手段存在的不足。针对流型影响因素、测量方法、内部结构的研究, 指出了当前研究存在的问题和未来的研究方向, 为进一步开展水平管道油水两相流流型研究工作提供了参考。

关键词: 油水两相流; 流型划分; 影响因素; 流型识别

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2013)04-0365-009

作为多相流研究领域的重要分支, 油水两相流动现象普遍存在于石油工业的各个环节, 根据管道倾角的不同可分为垂直、倾斜以及水平油水两相流。在具体的流动过程中, 油水分相界面形式往往非常复杂, 其所呈现出的各种几何形状或流动形态被称为流型。流型反映了多相流动的特性, 这是多相流体管内流动的一个显著特点, 也是多相流研究中的重要课题之一^[1]。

随着石油开采不断向沙漠、海洋等地域拓展, 长距离集输管道网投资占工程总投资的比重不断上升, 相应的集输能耗占生产总能耗的比重也不断增大。实际生产中往往使用钢管输送, 水相由于密度大往往润湿管道底部, 容易导致管道内腐蚀、结垢甚至出现水合物堵塞。同时, 由于钢管内壁粗糙度较大, 输送原油时容易形成很大的管道压降导致输送困难。为此, 若能人为的控制管道内油水流动的流型, 比如避免水相和管道内壁过多接触或将原油包裹在

水中输送, 则可以延长管道的使用寿命并最大限度的降低运输成本。

因此, 水平管道油水两相流流型的相关研究成果能为解决石油生产中的重要技术问题提供参考, 并带来极大的经济效益。

1 流型分类

水平油水两相流流型研究最早始于 20 世纪 50 年代, 发展至今共经历了三个阶段, 即感性认识阶段、实验研究阶段以及解析分析和数值模拟阶段^[2]。

在感性认识阶段, 学者们在小尺寸的玻璃管或有机玻璃管内对水平油水两相流流型进行了一系列的实验研究。1959 年, T. W. F. Russell 等^[3]在矿物油-水两相流实验中, 观察到分散流、分层流和混合流 3 种流型。在随后的 20 世纪 60—70 年代, 相关研究逐渐展开, 但该阶段对流型的定义和判别主要依靠肉眼观察, 存在较

大的主观性。

20 世纪 80—90 年代,随着原油生产过程中油水混合物的出现,以美、英、法、德、以色列等国为首的西方发达国家的学者们掀起了油水两相流研究的高潮,流型研究进入实验研究阶段。1989 年, S. Arirachakaran 等人^[4]在直径为 25.1 mm 的水平管中,观察到分层流、混合流、环状流、间歇流和分散流 5 种流型,并给出了相应的流型图。1996 年, J. L. Trallero 等人^[5]通过对前人工作的总结,在矿物油-水两相流流型实验研究的基础上,提出了两大类 6 种具体的水平油水两相流流型(见图 1)。共分为分层流和分散流两大类,其中:分层流包括界面清晰的分层流(ST)、界面混合的分层流(ST&MI)流型;分散流包括上层水包油下层水的分散流(D o/w & w)、油包水(o/w)、上层油包水下层水包油的分散流(D w/o & o/w)以及水包油(w/o)流型。此外,1997 年, M. Nadler 和 D. Mewes 等人^[6]在内径为 59mm 的水平直管内发现了水层上的双层分散流(D w/o & D o/w & w)和水层上的油包水分散流(D w/o & w)这两种流型。2000 年, P. Angeli 等人^[7]利用自来水和煤油进行了水平油水两相流实验,观察到的流型与 Trallero 流型基本相同,但多定义了三层流流型(3-Layer)。同年, M. J. Melissa 等人^[8]以稠油和水为实验对象,在内径为 53 mm 的钢管内还发现了弹状流和环核流。1992—2002 年期间,以色列特拉维夫大学 N. Braune 教授等人^[9-10]全面总结了油水两相流的流动结构、流型转变机

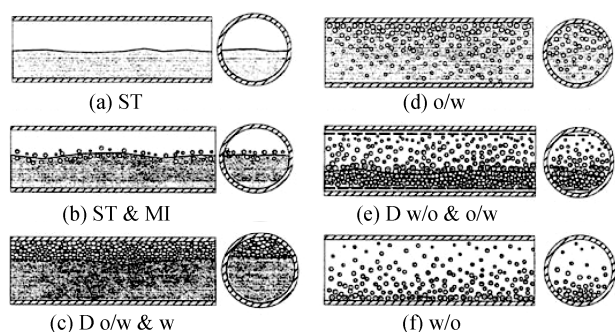


图 1 Trallero 流型分类

图片来源:文献[5]。

理、油水分层流动时界面的形状及计算等内容,并划分出 20 种具体的流型。本阶段以实验研究为主,通常采用电阻抗法结合高速摄影技术来了解油水两相流的流型特征,因而在一定程度上消除了流型辨识的主观性^{[11]9}。

近十多年来,学者对水平油水两相流流型的研究进入解析分析及数值模拟阶段。1998 年, N. Brauner^[12-13]在分析了两种不可混合液体的界面形状后,用双流体模型(Two Fluid Model)求解油水界面曲率,得到界面形状的确切解。2002 年,学者 T. S. Ng 和 C. J. Lawrence 等人^[14-15]用 Yong-Laplace 方程预测了油水均为层流的分层流动的边界形状,并用边界元法估算了该种流体的整体和局部流动特性。2003 年, H. Gao^[16]等人还尝试将计算流体力学技术应用于油水两相流的数值模拟中。此外,2004 年 J. Lovick 等人^[17],2006 年 O. M. H. Rodriguez 等人^[18],2007 年及 2012 年 Al-Wahaibi 等人^[19-21],2011 年 Anoop Sharma 等人^[22]都对水平油水两相流做了深入研究。与此同时,国内对水平油水两相流研究也开始起步,以中国石油大学和西安交通大学等院校师生为代表的学者在该领域取得了较大的进展。2000—2003 年间,陈杰等人^[23-25]实验研究了水平管内的油水两相流流型,对观察到的流型以及流型间的转化作了描述,并提出油水两相管流流型转换的新准则。穆虹^[26]于 2001 年利用高粘稠油进行掺水实验时发现了水核环状流、段塞流等过渡流型。蔡继勇^[27]在 2004 年提出了三层流流体模型,姚海元、宫敬^[28]等人在 2005 年以高黏度的油和水为介质,在内径为 25.7 mm,长 52 m 的水平不锈钢油水两相流实验环道内定义了不同流动条件下出现的 12 种流型,并绘制了流型图。2006 年,张丽娜^[2]在总结前人关于水平油水两相流流型分类的基础上,将流体分为牛顿流动流体和非牛顿流动流体两大类,并分别定义了两类流体下的流型。徐孝轩^[29]和许道振^[30]分别于 2007 年和 2011 年对国内外水平管内油水两相流的研究状况进行了综述,

同时指出了研究中存在的问题和研究方向，为今后的研究提供了参考。

综上所述，水平管道油水两相流流型研究随着石油工业的发展正蓬勃发展，在流型划分上，Trallero 提出了统一的水平油水混合流动流型划分方法，得到该领域许多学者的认同，即使在后续的研究中由于实验条件和研究重点的不同，不断有新的流型被发现，仍可视为对 Trallero 流型划分法的扩展和补充。

2 影响流型的参数

如前所述，在学者们的实际研究中，出现的流型少则两三种，多则 20 余种，如此悬殊的差异，除了有实验人员采用不同的观察或测量方法以及命名方式等主观原因，还有实验装置、油水物性、实验条件等客观原因。其中，主观原因可以通过类比和改进测量方法加以消除，但客观原因是无法避免的，因而对油水两相流流型的影响是主导性的。引入流体无因次量雷诺数 $Re = \rho v L / \mu$ 分析可知，流体的密度(ρ)、动力黏度(μ)、流场速度(v)和容器主要尺寸(L)对流型影响较大，结合实际情况，客观因素主要有以下几种：

- 1) 油相和水相的黏度、密度、油水界面张力、油水的乳化等；
- 2) 管道的几何形状、管径大小、管壁的粗糙度、管壁的浸润性、管道安装方式等；
- 3) 具体操作时油水混合物流速、分相含率、是否加入添加剂等。

2.1 流速和相含率

在油水水平流动过程中，流速可分为混合流速和分相流速，由于分相速度存在差异，还可以进一步演化出滑移速度和分相速度比；相含率包括含油率和含水率，当某一分相从分散相转化为连续相时，则称为反相。随着流速增大，流型从光滑分层流向完全分散流过渡，而相含率则是确定连续相的依据，因此这两个因素是确定流型的

最主要的因素。Al-Wahaibi 等人^[31]在研究分层流界面波实验时发现：随着两相表面流速的增加，波纹震荡幅度会越来越大；在光滑的分层流时，波纹的平均振幅会随输入油水比的提高而减小，波长则会随着滑移速度的减小而增长；而在界面出现混合层的分层流中，平均振幅和波长则和各层的分相相对速度和湍流程度存在函数关系。Y. V. Fairuzov 等人^[32]在用密度比和黏度比分别为 0.85 和 5.96 的原油和水做实验时发现：当输入含水率低于 3% 时，分层流将不会出现，即使含水率增大到 10%，原油层和水层也不会完全分离，总是有少量的水分散在油层中。K. Piela 等人^[33-34]在 16 mm 环形管道做反相实验时发现，如果先充满某一分相然后再注入另一分相，注入分相含率需高达 80% 才会发生反相现象，这比直接按预定配比同时注入方式到达反相时的分相含率要高出许多。与之对比的是，宫敬、王玮等人^[35]在内径为 25.4 mm 的水平钢管做稠油实验时发现，混合流速的增大使反相有提前发生的趋势，当含水率为 35%~55% 时，提高混合流速将直接引发反相。

2.2 油相黏度

在过去的实验研究中，学者们使用的油千差万别，从高粘原油到轻质提纯油等都被列为研究对象，黏度或高达上万厘泊或低至几厘泊。黏度对流型的影响主要体现在以下三个方面。

首先，黏度差异决定着某些流型是否能出现。M. J. McKibben 等人^[8]用黏度比高达上千甚至上万的西加拿大原油和自来水做实验时发现，在低速时不会出现重油和水的分层流动，水往往包裹着油团，类似于“信封状”在油相中流动；B. Grassi 等人^[36]通过油水黏度比约为 800 : 1 的实验发现普遍存在大的油核环状流和水包油分散流，只有少数的波状分层流，而不会出现光滑的分层流。

其次，黏度还影响流型的内部结构。许晶禹等人^[37]利用不同黏度的油做对比实验时发现，在注入水流量较低时，不同黏度油水系统中的持水

率存在较大的偏差; T. Al-Wahaibi 等人^[20]在研究分层流界面波振幅时发现, 对于低黏度的油, 最大振幅出现在滑移速度接近零的情况下, 而对于高黏度油, 只有水相速度高于油相速度时才会出现。

再次, 黏度差异还影响流型转换。宫敬、王玮等人^[35]发现高黏度油相的相位反转时远早于低黏度油; N. Yusuf 等人^[38]在研究中发现, 随着黏度的增高, 在油相速度较低时, 由分层流过渡到非分层流所需的水相速度增大了, 而在较高油相速度时则正好相反, 黏度的增高还使形成的泡状流和环状流增多, 双连续流出现的范围也扩大, 而当油的黏度下降时, 油包水分散流出现得也越早。

2.3 管道直径和材质

管道的直径对管内油水两相流的空间分布其起限定作用, 不同的材质则会造成管道内壁粗糙度和亲水性上的差异从而导致压降不同。P. Angeli 和 G. F. Hewit^[39]在钢管和有机玻璃管中分别对油水两相流进行测试发现: 由于管壁粗糙度不同, 钢管中的湍动比有机玻璃管中剧烈, 因而在相同流速下, 具有较大粗糙度的钢管使得流体以更高的湍流强度扰乱流型; 由于管壁润湿性不同, 在有机玻璃管中油相为连续相的流型范围比在钢管中宽很多, 这主要是油相更容易润湿有机玻璃管, 故使油相成为连续相更容易。T. K. Mandal 等人^[40]在对管径为 25 mm 和 12.5 mm 的透明丙烯酸甲酯管以煤油和水做对照研究时发现, 在大管道中普遍存在的三层流在实验小管道中并没有出现, 但在油速较高的情况下小管道内发现了从未见报道的“细溪流”, 并认为这样的差异是因为小管道中平衡接触角和表面张力的增加而造成的。G. Sotgia 等人^[41]在七根直径介于 21 mm 和 41 mm 的高硼硅管和有机玻璃管对比实验中发现, 相同材质的管道管径不同出现的流型也会不同, 类似的, 相同管径的不同材质管道中出现的流型也不同。许晶禹等人^[37]的有机玻璃管实验结果表明, 在相同的注入流量下, 和 50 mm 管相比,

25 mm 管中的油水速度比要大得多。

2.4 入口形状

在生产实际中, 管道的连接方式通常为 Y 形连接或 T 形连接, 因而油水两相流的入口形状就存在差异, 由于油水会在入口处发生混合, 故入口形状通常影响液滴的大小和分布, 从而对流型和管道压降产生影响。T. Al-Wahaibi 等人^[42]在做油水双连续流实验时发现, T 形接口时出现的混合层位置要比 Y 形接口更高, 并认为这是由于 T 形口发生混合时程度更剧烈所致, 如果混合流速增加, 二者的差异也更加明显。T. Balakhrisna 等人^[43]还研究了管道突然收缩或膨胀的情况, 发现流型经过突变管段时发生了显著的变化, 在水平流路扩张后, 高黏性的油水中的环核流仍然存在, 在油路收缩时油核的厚度也会相应减小, 并认为这对防止管壁结垢有重要意义。

2.5 添加剂

随着三次采油技术的应用与推广, 越来越多的表面活性剂、聚合物等被注入油井中。表面活性剂溶解于水中以后, 能降低水的表面张力, 并提高有机化合物的可溶性; 聚合物能增加水相黏度和降低水相渗透率, 因而二者会对管道内油水两相流流型造成重大影响。H. Shi 等人^[44]在做添加了油脂类化学品表面活性剂的油水两相流实验时发现表面活性剂加强了油水的混合从而改变了管道内油水分布。Al-Wahaibi 等人^[45]用减阻聚合物 (Magnafloc 1011) 在内径为 14 mm 的丙烯酸管中做实验时发现, 聚合物的掺入对界面波有明显的抑制作用从而导致分层流出现的范围被扩展, 段塞流出现的范围被压缩, 油水界面高度和持水率也随着聚合物的浓度增加而相应增加。M. Al-Yaari 等人^[46]和 N. Yusuf 等人^[47]也通过不同实验条件得出了类似的结论, 前者发现连续的分散流出现的区域被显著的压缩, 后者发现加入聚合物后环状流消失, 取而代之的是双连续流。

K. Piela 等^[48]发现加入表面活性剂后反相点位置发生了改变,但临界浓度依然和注入体积分数成线性关系。此外 K. H. Ngan 等人^[49]还发现添加甘油会使得反相时所需的含油率增高,而且一旦发生反相,液滴的平均直径也会减小。

综上所述,影响水平管道油水两相流流型的因素是复杂多样的,对于一定黏度比的油水两相流,流速和相含率是最主要因素,其他各因素在生产实际中的地位和作用则不尽相同,需要具体问题具体分析。同时,由于影响因素过多,某一因素的改变可能导致另一因素也跟着变化,因而很难根据某一因素对流型的影响做定量的分析。由此,学者们的实验结论是区域性的,应用范围有限,故而在实际应用中要善于抓住主要矛盾,选择几个最重要的影响因素进行综合分析进而指导应用实践。

3 流型识别方法

开展流油水两相流流型研究的最终目的之一,是通过测量流型特征参数辨识出管内流型,进而指导生产实践,因而流型参数测量是识别的基础。与实验条件下的理想模型相比,实际生产中测量条件往往更复杂,因而对测量方法和手段也提出了更高的要求。

3.1 流型参数测量方法

目测法和高速摄像法是最常用最直接的测量方法。目测法借助透明管道或非透明管段上的透明窗口,直接用肉眼观察管内两种液体的流动状态。该方法要求油品透明度较高且流速不能太快,且带有很大的主观性,不同的观察者对同一流型可能得出不同的结论,因而目测法虽然简单、经济但不可靠。高速摄像法是目测法的延伸,通常采用高速相机或摄像机记录透明窗口中流体的流动状态。相比于目测法,该方法能够记录管内流动状态和发展演变过程,因而更加精确可靠。但它所得到的二维平面图像难以充分反映三维空间上的油水流动结构,此外,该方法对光照有较高

的要求,油水界面非常复杂时,光线会形成多重反射和折射,使得图像模糊不清,在管道中心位置和流速很高时尤为严重。

鉴于高速摄像法的各种缺陷,学者根据油水具有不同的电学、光学等物理特性开发出许多其他方法与高速摄像法相结合来进行测量,如侵入式的电探针法^[7,50]、非侵入式的激光探针法^[51]、伽马射线密度计法^[52-53]、层析成像法^[54]等。随着技术的发展,近年来越来越多新的测量手段也应用于流型测量,2010年,W. Kumara 等人^[55-56]利用粒子图像测速技术(PIV)和激光多普勒测速技术(LDA)研究水平管流并比较了二者的优缺点。2011年,M. J. Da Silva 等人^[57]研制出了一种“微侵入式”的电容式丝网传感器用于测量管内油水分布,2012—2013年,R. G. Morgan 等人^[58-59]利用激光诱导荧光法和粒子测速仪成功捕获了管内油水流动形态。

3.2 流型识别

流型识别方法包括两类。一类是通过绘制流型图进行直接判断,另一类是通过反映两相流流动特性的参数的统计分析来获取流动状况基本特征继而判断出流型。

流型图法的具体过程是先完成流型实验,然后取不同的参数坐标,把各种流型按照所取参数进行区分,标注在图上,所得到的区界图就是流型图,后续识别时只要测量出对应的参数就可以查询流型图得出当前的流型。其中,坐标参数常选取相对容易测量的量,例如 Trallero 流型图选取的参数为水相折算速度-油相折算速度以及混合流速-输入体积含水率。这种方法的缺点在于,一旦实验条件发生改变就得重绘流型图,无法用一种普适的二维坐标流型图来标识所有的流型变化,造成了目前流型图表达形式繁多,因此越来越多的学者引入无量纲数作为坐标参数。此外,由于目前大多数流型图都是基于少数实验介质,在一定参数范围内得到的实验结果,因此它们的

适用性是有条件的, 但仍不失为识别流型变化趋势的一种重要参考。

第二类方法中常用的有概率密度函数法(PDF)、软测量方法、非线性分析法、分形理论法、信息融合法等。P. Poesio 等人^[60]研究油水间歇流时发现, 不同实验条件下油滴长度的概率密度分布呈近似的正态分布; D. P. Chakrabarti 等人^[61]在研究流型从水相为连续相过渡到油为连续相的过程中, 发现不同流型时电导探针信号的概率密度图像在坐标图上有明显的向左边移动趋势。马龙博等人^[62]基于压差波动信号, 提出 Hilbert-Huang 变换和支持向量机相结合的流型识别方法, 用于水平油水两相流流型的识别, 并最终对分层流及分散流取得了较好的流型识别效果。金宁德等人^[63]根据电导传感器对高含水敏感和电容传感器对低含水敏感的测量特性, 采用非线性时间序列的递归图分析方法, 从递归图纹理特征提取了不同流量和含水率流动条件下的水平油水两相流流型特征, 进而取得了对集流型仪器测量通道内水平油水两相流流型识别。刘再斌、吴锡令^[64]利用电磁测井技术, 将水平管道内较复杂的油水两相流型简化为几种简单的分布模型, 从而将流型识别转化为模型识别, 然后利用有限元法分析电磁响应规律, 从而实现流型识别。此外, 以神经网络、小波变换、模式识别、时频域分析和多尺度等方法为代表的基于现代信号处理技术的流型识别方法发展很快, 越来越多的学者尝试将其应用于油水两相流流型的辨识^{[11]14}。

综上所述, 虽然国内、外对油水两相流流型识别的研究比较重视, 使用了诸多方法, 但总体来说还处在实验探索阶段, 真正应用到实际生产中的测量方法还较少。因此, 对油水两相流流动参数测量的方法还需拓展和改进, 对流型特性参数的统计分析研究还亟待加强。

4 存在的问题与研究方向

对于当前的水平管道油水两相流流型研究,

学者们在流型划分上趋于统一, 且越来越专注流型内部结构和变化规律的研究, 在测量方法和流型辨识上也取得了较大的进展, 但仍然存在以下不足:

1) 对流型影响因素的研究还有待完善。当前研究中很少涉及实际生产中使用的大管径, 比如油井中普遍使用直径为 125mm 的钢管, 输油管线口径通常大于 400mm, 因此需要进一步研究大管径对流型的影响; 温度对流型的影响尚不明确, 目前尚缺少井下高温和严寒条件下管线低温输油时管内流型的实验数据; 高含蜡高粘易凝原油很少被选作研究对象, 若开展该方面的研究或可对含蜡高粘原油的输送及流动保障技术提供更多的理论指导。

2) 对流型测量方法的研究还待改进。目测法和高速摄影法都需要透明管段或透明窗口, 实际应用时受限, 侵入式的测量手段对小管径管道流型结构有较大的破坏作用, 因而引入各种新的微侵入式和非侵入式的方法是今后测量的趋势。

3) 对流型内部结构的研究还待加强。虽然在宏观上水平管道内油水流型已比较统一, 但从微观角度来看, 对各流型内部结构研究还不够深入, 其中对分层流中波纹和分散流中液滴的深入研究或将会对流型辨识提供更多有意义的参考。

参考文献

- [1] 王海琴. 水平管油-水两相和油-气-水三相流动特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008: 1.
- [2] 张丽娜. 油水两相水平管流动规律研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005: 11.
- [3] Russell T W F, Hodgson G W, Govier G W. Horizontal pipeline flow of mixtures of oil and water[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1959, 37(1): 9-17.
- [4] Arirachakaran S, Oglesby K D, Malinowski M S. An analysis of oil/water phenomena in horizontal pipes[C]. Oklahoma: SPE Production Operations Symposium, 1989.
- [5] Trallero J L, Brill J P. A study of oil/water flow patterns in horizontal pipes[J]. SPE Production & Facilities, 1997, 12(3): 165-172.
- [6] Nadler M, Mewes D. Flow Induced Emulsification in the

- Flow of Two Immiscible Liquids in Horizontal Pipes[J]. Int J of Multiphase Flow, 1997, 23(1): 55-68.
- [7] Angeli P, Hewitt G F. Flow structure in horizontal oil-water flow[J]. Int J of Multiphase Flow, 2000, 26(7): 1117-1140.
- [8] McKibben M J, Gillies R G, Shook C A. A laboratory investigation of horizontal well heavy oil-water flows[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000, 78(4): 743-751.
- [9] Brauner N, MoalemMaron. Flow Pattern Transitions in Two-Phase Liquid-Liquid Flow in Horizontal Tubes [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1992, 18(1):123-140.
- [10] Brauner N. Modelling and Control of Two-Phase Phenomena: Liquid-Liquid Two-Phase Flow Systems [EB/OL]. [2013-07-26].<http://www.eng.tau.ac.il/~brauner/brauner.Pdf>.
- [11] 宗艳波. 倾斜及水平油水两相管流流动特性测量[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [12] Brauner N, Rovinsky J, Moalem Maron. Determination of the Interface Curvature in Stratified Two-Phase Systems by Energy Considerations [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1996, 22(6):1167-1185.
- [13] Brauner N, Moalem Maron, Rovinsky J. A Two-Fluid Model of Stratified Flows With Curved Interfaces [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1998, 24:975-1004.
- [14] Ng T S, Lawrence C J, Hewitt G F. Interface shapes for two-phase laminar stratified flow in a circular pipe[J]. Int J of Multiphase Flow, 2001, 27(7): 1301-1311.
- [15] Ng T S, Lawrence C J, Hewitt G F. Laminar stratified pipe flow[J]. Int J of Multiphase Flow, 2002, 28(6): 963-996.
- [16] Gao H, Gu H Y, Guo L J. Numerical study of stratified oil-water two-phase turbulent flow in a horizontal tube[J]. Int J of Multiphase Flow, 2003, 46(4): 749-754.
- [17] Lovick J, Angeli P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows[J]. Int J of Multiphase Flow, 2004, 30(2): 139-157.
- [18] Rodriguez O, Oliemans R. Experimental study on oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes[J]. Int J of Multiphase Flow, 2006, 32(3): 323-343.
- [19] Al-Wahaibi T, Angeli P. Transition between stratified and non-stratified horizontal oil-water flows. Part I: Stability analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(11): 2915-2928.
- [20] Al-Wahaibi T, Smith M, Angeli P. Transition between stratified and non-stratified horizontal oil-water flows. Part II: Mechanism of drop formation[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(11): 2929-2940.
- [21] Al-Wahaibi T, N. Yusuf, Y. Al-Wahaibi, et al. Experimental study on the transition between stratified and non-stratified horizontal oil-water flow[J]. Int J of Multiphase Flow, 2012, 38(1): 126-135.
- [22] Sharma, A., A. Al-Sarkhi, C. Sarica, et al. Modeling of oil-water flow using energy minimization concept[J]. Int J of Multiphase Flow, 2011, 37(4): 326-335.
- [23] 陈杰, 孙红彦, 梁志鹏, 等. 水平管内油水两相流流型的实验研究[J]. 油气储运, 2000, 19(12): 27-31.
- [24] 陈杰. 水平管油水管流动规律研究[D]. 北京: 石油大学, 2001.
- [25] 陈杰, 于达, 严大凡. 油-水两相流流型转换研究[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 355-364.
- [26] 穆虹. 油-水水平管流实验研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2001.
- [27] Cai Jiyong, Srdjan Nesic. Modeling of water wetting in oil-water pipe flow[C]. NANC 04663, 2004.
- [28] 姚海元, 宫敬. 水平管内油水两相流流型转换特性[J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1649-1653.
- [29] Xu X X. Study on oil-water two-phase flow in horizontal pipelines[J]. Journal of petroleum Science and Engineering, 2007, 59(1-2): 43-58.
- [30] 许道振, 张国忠, 赵仕浩. 水平管油水两相流研究进展[J]. 油气储运, 2011, 30(9): 641-645, 658.
- [31] Al-Wahaibi T, Angeli P. Experimental study on interfacial waves in stratified horizontal oil-water flow[J]. Int J of Multiphase Flow, 2011, 37(8): 930-940.
- [32] Fairuzov Y V, Perdro A, Jorge V, et al. Flow pattern transitions in horizontal pipelines carrying oil-water mixtures: Full-scale experiments[J]. Journal of Energy Resource Technology Transactions of the ASME, 2000, 122(4): 169-176.
- [33] Piel K, Delfos R, Ooms G, et al. Experimental investigation of phase inversion in an oil-water flow through a horizontal pipe loop[J]. Int J of Multiphase Flow, 2006, 32(9): 1087-1099.
- [34] Piel K, Delfos R, Ooms G, et al. On the phase inversion process in an oil-water pipe flow[J]. Int J of Multiphase Flow, 2008, 34(7): 665-677.
- [35] Wang W, Gong J. Experiment Research of Phase Inversion in Mineral Oil-Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipe[J]. Journal of Energy Resource Technology Transactions of the ASME, 2009, 131(0430014).
- [36] Grassi B, Strazza D, Poesio P. Experimental validation of theoretical models in two-phase high-viscosity ratio liquid-liquid flows in horizontal and slightly inclined pipes[J]. Int J of Multiphase Flow, 2008, 34(10): 950-965.
- [37] Xu J Y, Wu Y X, Feng F F, et al. Experimental investigation on the slip between oil and water in horizontal pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 33(1): 178-183.
- [38] Yusuf N, Al-Wahaibi Y, Al-Wahaibi T, et al. Effect of oil viscosity on the flow structure and pressure gradient in

- horizontal oil-water flow[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2012, 90(8): 1019-1030.
- [39] Angeli P, Hewitt G F. Drop size distributions in horizontal oil-water dispersed flows[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(16): 3133-3143.
- [40] Mandal T K, Chakrabarti D P, Das G. Oil water flow through different diameter pipes: Similarities and differences[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2007, 85(A8): 1123-1128.
- [41] Sotgia G, Tartarini P, Stalio E. Experimental analysis of flow regimes and pressure drop reduction in oil-water mixtures[J]. Int J of Multiphase Flow, 2008, 34(12): 1161-1174.
- [42] Al-Wahaibi T, Angeli P. Onset of entrainment and degree of dispersion in dual continuous horizontal oil-water flows[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(4): 774-781.
- [43] Balakhrisna T, Ghosh S, Das G, et al. Oil-water flows through sudden contraction and expansion in a horizontal pipe: Phase distribution and pressure drop[J]. Int J of Multiphase Flow, 2010, 36(1): 13-24.
- [44] Shi H, Cai J, Jepson W P. Oil-water two-phase flows in large-diameter pipelines[J]. Journal of Energy Resource Technology-Transactions of the ASME, 2001, 123(4): 270-276.
- [45] Al-Wahaibi T, Smith M, Angeli P. Effect of drag-reducing polymers on horizontal oil-water flows[J]. Journal of petroleum Science and Engineering, 2007, 57(3-4): 334-346.
- [46] Al-Yaari M, Soleimani A, Abu-Sharkh B, et al. Effect of drag reducing polymers on oil-water flow in a horizontal pipe[J]. Int J of Multiphase Flow, 2009, 35(6): 516-524.
- [47] Yusuf N, Al-Wahaibi T, Al-Wahaibi Y, et al. Experimental study on the effect of drag reducing polymer on flow patterns and drag reduction in a horizontal oil-water flow[J]. International Journal of heat and fluid flow, 2012, 37: 74-80.
- [48] Piela K, Djojorahardjo E, Koper G J M, et al. Influence of a surfactant or salt on phase inversion in a water-oil pipe flow[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2009, 87(11A): 628-635.
- [49] Ngan K H, Loannou K, Rhyne L D, et al. Effect of glycerol addition on phase inversion in horizontal dispersed oil-water pipe flows[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(4): 628-635.
- [50] Xu W F, Xu L J, Cao Z, et al. Normalized least-square method for water hold-up measurement in stratified oil-water flow[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 27(SI): 71-80.
- [51] Chakrabarti D P, Das G, Das P K. Identification of stratified liquid-liquid flow through horizontal pipes by a non-intrusive optical probe[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(7): 1861-1876.
- [52] Soleimani A, Lawrence C J, Hewitt G F. Spatial distribution of oil and water horizontal pipe flow[C]., Houston, USA: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1999.
- [53] Kumara W, Halvorsen B M, Melaaen M C. Single-beam gamma densitometry measurements of oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes[J]. Int J of Multiphase Flow, 2010, 36(6): 467-480.
- [54] Hasan N M, Azzopardi B J. Imaging stratifying liquid-liquid flow by capacitance tomography[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18(5-6): 241-246.
- [55] Kumara W, Elseth G, Halvorsen B M, et al. Comparison of Particle Image Velocimetry and Laser Doppler Anemometry measurement methods applied to the oil-water flow in horizontal pipe[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(2): 105-117.
- [56] Kumara W, Halvorsen B M, Melaaen M C. Particle image velocimetry for characterizing the flow structure of oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(15): 4332-4349.
- [57] Da Silva M J, Santos dos E N, Hampel U, et al. Phase fraction distribution measurement of oil-water flow using a capacitance wire-mesh sensor[J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(10402010).
- [58] Morgan R G, Markides C N, Hale C P, et al. Horizontal liquid-liquid flow characteristics at low superficial velocities using laser-induced fluorescence[J]. Int J of Multiphase Flow, 2012, 43: 101-117.
- [59] Morgan R G, Markides C N, Zadrzil I, et al. Characteristics of horizontal liquid-liquid flows in a circular pipe using simultaneous high-speed laser-induced fluorescence and particle velocimetry[J]. Int J of Multiphase Flow, 2013, 49: 99-118.
- [60] Poesio P. Experimental determination of pressure drop and statistical properties of oil-water intermittent flow through horizontal pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1523-1529.
- [61] Chakrabarti D P, Das G, Das P K. The transition from water continuous to oil continuous flow pattern[J]. AIChE Journal, 2006, 52(11): 3668-3678.
- [62] 马龙博, 张宏建, 周洪亮, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换和支持向量机的油水两相流流型识别[J]. 化工学报, 2007, 58(3): 617-622.
- [63] 金宁德, 李爽, 张煜, 等. 水平油水两相流测井仪器测量通道内流型识别[J]. 动力学与控制学报, 2009, 57(2): 283-288.
- [64] Liu Z B, Wu X L. Flow pattern identification in oil wells by electromagnetic image logging[J]. Petroleum Science, 2012, 9(3): 303-309.

Review of the Study on Oil-water Two Phase Flow Patterns in Horizontal Pipelines

Jiang Changhua

(School of Instrumentation & Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: As an important branch of the field of multiphase flow, the phenomena of oil-water two-phase flow widely exists in each aspect of the oil industry. The study of oil-water two phase flow patterns in horizontal pipelines is of great significance to solve the important technical problems in oil production. In this paper, the domestic and international research history of the oil-water two phase flow patterns in horizontal pipelines have been summarized, and the division methods of flow patterns were introduced. The major factors and parameters affecting the flow patterns have been analyzed, including velocity and phase holdup, viscosity of oil phase, the diameter and material of pipe, entrance shape and additives. Several measurement methods for flow pattern parameters and flow pattern identification methods were introduced, and the disadvantages of the existing measurement methods were also analyzed. The existing problems and direction in the research were proposed for the oil-water two phase flow pattern study in the future, including the further study of influencing factors, measurement methods and internal structure of the flow pattern.

Key words: oil-water two phase flow; flow pattern classification; influencing factor; flow pattern identification