

# 海洋油气开发中的多相流技术

吴应湘<sup>1</sup>,李清平<sup>2</sup>,郑之初<sup>1</sup>,李东晖<sup>1</sup>,钟兴福<sup>1</sup>,高福平<sup>1</sup>

(1.中国科学院力学研究所,北京 100080; 2.中海石油研究中心,北京 100027)

## 摘 要

系统阐述了海洋油气开发中经常遇到的多相流动问题,如确定油藏量和油藏的分布与变化规律的多相渗流问题,油井中产液的变质量多相流问题,油井和立管的竖直与倾斜管多相流问题,油气水在管线中的水力与热力规律问题,输送管道系统提升泵和增压泵的性能、分离器的效率,混相流量的计量等问题。

文中还介绍了中国科学院力学研究所在油气水多相增压、多相计量、多相分离、稠油除砂、倾斜井多相流态等方面的研究工作。重点阐述了集离心、膨胀、重力分离原理为一体的新型油气水高效分离器的性能和特点,以及用 $\gamma$ 射线硬场层析成像方式来实现油气水混相流量测量方案。

**关 键 词:** 海洋石油; 油气开发; 多相流

## 1 引 言

油气开发中经常遇到多相流动问题,如油藏量的确定,油藏的分布规律和变化规律,油井中产液的流动状态,油气水在管线中的输送规律,提升泵和增压泵的性能,分离器的效率,混相流量的计量等。

多相流技术于上世纪50年代走进石油工业。早期的研究人员根据实验室试验中获取的气、液相体积流量,各相的物性参数,管径和管道倾斜度,管道进出口压力等绘出一组无量纲的经验流态分布图。在均匀混合液体质量和动量守恒方程的基础上,推导出稳态压降方程,依靠单相流动方程求解摩阻损失,使得混合雷诺数得到广泛运用<sup>[1]</sup>。同时,有的技术人员还采用经验放大系数的方法,计算由于存在第二相而增加的摩阻损失。80年代初,计算压降的经验公式与计算机的结合,戏剧性地给石油工程技术人员一种实用工具,开发出从管道一端到另一端压降的数值迭代技术,出现了通过简单内流性能关系而连接油井和油层段的工艺流程。遗憾的是,工程人员很快就认识到这种方法具有很多问题。经验流态分布图很不细致,以前较多采用流量(或表观流速)确定的流态分界点,与其它参数特别是管道的倾斜度有很大关系。各个流态的经验液体存积公式同样存在不足,均匀混合流模型过于简化。如果不建立实际的多相流模型,无论是通过实验室还是现场试验测试得到的数据,其精度都不能得到提高<sup>[2]</sup>。

过去的二十年中,管道的多相流研究取得了巨大进展。研究人员认识到进一步探讨管道多相流问题需要试验与理论的密切结合,需要先进的仪器设备及测量技术和计算机技术。采用先进的测量技术和计算机数据分析技术又保证了大量高精度的采集数据并加深了对多相流中复杂的动力学机理的认识,并因此改善了描述实际多相流现象的力学模型。在预示倾斜管中流动分界点的研究工作的推动下,稳态流动的力学模型得到了重大改进,这为各个多相流动流态模型的改进开辟了一条道路,使得各种流动模型可通过统一的标准流态分界点而连接在一起,且这些模型比前人的经验公式更加准确。

收稿日期: 2005-08-10

然而, 双流动转换准则和精确描述多相流动的稳态力学模型尽管能够分析复杂的非定常流动, 但常遇到模拟发散或整理出的数值结果与实际情况相差较大等问题。且由于多相流流态转换和力学模型的复杂性, 运用和掌握它们需要专门的训练, 即需要具有专业背景知识(熟悉各种假设、简化和模型推导过程, 了解各种限制条件, 掌握各种模型结果产生的影响)的专业人员来进行这项专门研究和计算<sup>[3]</sup>。

另外, 随着水下生产系统的提出, 长距离多相混输成为需要迫切解决的问题。这是因为井口回压将随着管道长度的增加而增加, 油井产量随之下降, 自流距离缩短, 增加了人工提升需求, 进而要求在井口设置多相增压泵; 其次是管长增加, 还有可能形成段塞。段塞的蔓延、积聚及加速会使分离器液位骤升, 达到警戒位置甚至溢出, 使液体进入输气管道。段塞流造成的压力急剧变化会给整个输送系统带来很多麻烦。对管道起伏较大, 立管和大直径管道, 这样的问题更为严重。富气流中的段塞流问题比液流、富液流等严重。这些问题促使人们花大力气寻求更全面、更细致的多相流研究方法, 得到更能反映实际情况的多相流规律<sup>[4]</sup>。

## 2 海洋油气开发中起重要作用的多相流技术

原则上, 陆上油田与多相流有关的问题在海上油田都会遇到, 且由于海上油田环境条件的特殊性和复杂性, 使海上油气开发所设计的多相流问题更复杂、更困难、更具挑战性。

### 2.1 与油藏有关的多相流技术

(1) 油气藏储量分析和评估是油气开采的前提和条件。确定油藏储量属于多孔介质的多相渗流问题, 牵涉到流体力学、地质力学和土力学等学科领域, 是力学与地质、力学与工程相结合的一个典型问题。由于不同岩层中不同的渗透特性, 线性的Darcy渗透定律很难满足各种各样的实际情况。如何根据不同的岩层特性确定相应的渗透规律, 建立相应的多相渗流模型, 进而得到油藏的储量及其在地层中的分布, 仍是油藏多相流技术的关键;

(2) 油井的定位和开采方法的确定需要对油田储量分布的动态变化规律有清楚的了解, 进而提出不同岩层中非定常三维多相渗流技术。由于该技术的复杂性, 其研究工作还处于初级阶段, 建立合理的模型并寻求适当的求解方法成为当前该技术发展的重点。

### 2.2 与开采有关的多相流技术

(1) 由于描述水平油井的水库理论是在假定油井水平位置的压力恒定, 且忽略了两相流动特性的条件下推导出来的, 该理论无法预示水平部分相对较小的压差, 而该压差可以导致垂直油井中很大的压力误差。因此急需建立一个预示多相流态, 计算流体存积和沿水平部分在流动方向质量流量增大的压差模型;

(2) 绝大多数油气井是非垂直布置的, 通用的经验公式和现行的用来计算摩阻损失的力学模型都是从垂直管流试验中推导出来的, 只要油井有角度偏离垂直位置的倾斜度, 就会对流态产生较大的影响, 从而对流体存积和摩阻压力损失带来影响。现行多相流的力学模型必须经过适当修改后才能适合有倾斜和外伸的油井。因此, 建立稳态流动条件下有倾斜度的管道中的多相流动的力学模型依然是试井和测井的关键;

(3) 到目前为止, 还没有一个全面的力学模型用于计算下坡管段的多相流动问题。该问题的研究对向油井注水、注蒸汽、注聚合物, 对采油平台下导管中的流动等都非常必要。现行的力学模型只能预示流态分界点, 无法计算压力梯度;

(4) 随着二次采油和三次采油技术的使用, 注入液、采液和地层多孔介质间的多相渗流问题已成为一个重要的科学问题;

(5) 现行的双流动过渡准则仍有许多简化和限制性假设, 导致该准则在实际的多相流分析中并不实用。油井中的瞬变流量的计量虽不重要, 但它对石油生产和储运操作都将产生重大影响。油井中

的摩阻损失是在稳态的假设下得到的,当油井达到稳态流时,用当时记录到的表面压力数据分析瞬变油井运行过程是不准确的。因此需要建立瞬变井筒模型,为外插计算从储油层到油井表面的瞬变流量提供改进的方法。

### 2.3 与输送有关的多相流问题

(1) 水平和垂直管道中气液两相流动的稳态和瞬态流动特性研究:包括流态随气液比和压力的变化规律和发展情况;压降,阻力随流态的变化规律;相变及多相混输规律;段塞流的形成、发展和控制机理;

(2) 斜坡地域的管道系统中的摩阻损失,流态判别,流体存积的研究尚未完全得到解决。当管道的倾斜度发生变化时,多相流的流态和流动参数也将随之发生变化,斜坡上升段和峡谷下降段的管道系统的多相流动特性均需进行详细研究;

(3) 当油气水在水平管道和近似水平管道中混合流动时,需要一精确的力学模型来描述其流动特性。由于管道底部出现游离水时会导致管道的腐蚀问题,多相流态对预示管道中是否存在游离水显得非常重要。同时,油水混合流变特性和乳化特性(油包水或水包油)对管道中的摩阻损失有重要影响;

(4) 进一步改进多相流力学模型,提高近似汽团状流体存积,界面摩阻系数,斜管中Taylor气泡成长速度和精度,进而提高近似摩阻损失的精度。我们可以利用广泛的实验室和现场试验数据来验证并改进所建立的物理模型。例如Barnea提出的统一流态模型。已经在低压的空气/水混合管流试验中得到验证,但该统一模型用于高压多相流体的可行性很少有人涉及;

(5) 流态和压降可靠性预测。多相流研究的另一集中领域是可靠性预测模拟的开发,以确定段塞流的产生和分布、段塞流长度、高度、频率、体积、流态及压降的计算。虽然许多模型可用于预测压降,如Taital和Duklei模型, Beggs和Brill模型等,但这些模型的可靠性和准确性,特别是用于长距离,大口径管道的可靠性和准确性还没有得到证实。

### 2.4 与运营有关的多相流技术

(1) 平台上使用多相泵可以提高某些井采液的压力以便达到一级分离器的人口压力,利于高含水井的启动,实现未经处理产液的长距离输送;海底井口多相泵能减少井口压力,提高一口井或多口井的产量,补偿高含水井立管液柱的背压,实现长距离卫星油田的正常生产。所以,多相流体的泵输、增压的效果和性能,多相流动和流态对泵及泵性能直接影响到混相输送的实现和生产系统的正常运营,使得与多相泵有关的多相流技术成为海洋油气开采水下生产系统的关键技术之一;

(2) 水下多相分离器能实现生产水的就地回注,既减少输送量,又省去了注入海水的淡化处理,还减小了摩阻损失、背压、管道尺寸,可有效避免水合物的生成。同时,对低气液比的油井,即可将分离出的气回注地层以提高产量,还可节省平台上的天然气处理设施。可见,多相分离器是海洋石油水下生产系统中一举多得的关键设备,与紧凑、快捷、高效的多相分离器相关的多相流技术将成为研究的重点;

(3) 多相流的流量计量是一个远未解决但具有普遍意义的理论和技术问题。从理论上它牵涉到多相分支流动,多相流场反演,多相流场扰动,多相流态等问题;从生产上它牵涉到简化生产过程和改善工艺流程控制。所以石油公司和石油开发设计人员越来越多地谈论多相流测量和多相流量计量问题。一般认为,除非多相测量技术得到改进,否则无法知道无人值守的卫星平台,特别是先进的水下生产系统的生产过程中实际发生了什么。缺乏多相流测量系统,将来的油田提高采收率系统就无法有效地操作。从而使多相流计量问题变得越来越突出和重要;

(4) 多相混输时启动和停输的可靠性问题是一个典型的瞬态多相流动问题。要求得到局部和整体系统的稳态和瞬态流动压力与流动特性,为系统的安全提供运营参数。同时水合物、结蜡、乳状液的性质研究以及它们的形成机理和和预防措施也是流动保障技术研究的重点。

上述多相流问题已经吸引并将继续吸引越来越多的从事多相流技术、石油工程技术和海洋工程技术领域的专家、学者进行深入细致的研究。

### 3 业已开展的研究工作

近年来,中国科学院力学研究所与中国海洋石油总公司合作在与海洋石油开发有关的多相流方面做了大量研究工作,取得了较好的研究成果,下面仅作粗略介绍。

#### 3.1 多相流实验模拟准则

多相流动问题本身就是一种很复杂的流动现象,其控制变量远远多于单相流动,对其进行理论分析、数值计算和实验研究都远比单相流动要复杂、困难得多。多相增压、混相计量及其与之相关的多相流特性问题目前更是难以通过理论分析和数值计算的方法来解决,故不得不采用实验室模拟或现场试验测试来获取数据。实验模拟往往采用一定缩尺比例的实验装置,使用经济、方便、可视性好的实验介质来反映或体现客观实际情况或现象。对油气混输系统来说,如何在实验模拟中反映出多相流特性对多相增压泵和混相计量仪的影响?如何确定实验设备的尺度?如何确定实验介质与实际介质间的模拟关系?这些都是进行多相流实验模拟时必须回答和解决,但迄今尚未解决或尚未得到明确答案的问题。

为了较好地回答和解决上述问题,作者对气液两相管道流动进行的相似性分析,得出了一些对两相流动的理论分析、数值计算和实验模拟有一定指导意义的结果<sup>[5]</sup>:

压降系数的相似关系为

$$\varphi_{tp} = D_{tp} / D_{s,pl} = \varphi_{tp}(Re_l, Fr, W, E, \rho_g / \rho_l, \mu_g / \mu_l, \chi)$$

特征尺度和特征速度满足的模拟条件为

$$\frac{(x_c)_1}{(x_c)_2} = \frac{(\sigma / \rho_l)_1^{1/2}}{(\sigma / \rho_l)_2^{1/2}}; \quad \frac{(u_c)_1}{(u_c)_2} = \frac{(\sigma / \rho_l)_1^{1/4}}{(\sigma / \rho_l)_2^{1/4}}$$

液相物性参数满足的模拟条件为

$$(g\mu_l^4 / \rho_l \sigma^3)_1 = (g\mu_l^4 / \rho_l \sigma^3)_2 = G = \text{constant}$$

#### 3.2 倾斜管多相流研究

现有的多相流研究大多数是针对水平管和垂直管的,对倾斜管内多相流的研究相对较少。Gould 1972年研究了水平管、垂直管以及45°倾斜管内的气-水两相流动,得到了45°倾斜管两相流态的一些结果<sup>[6]</sup>。Barnea等人1980年进行了-10°到+10°范围的倾斜管多相流研究,发现不同倾角间的流动状况有很大差别<sup>[7]</sup>。倾斜管多相流最显著的特征是分层流到间歇流的过渡位置对倾斜角度非常敏感,倾角仅有0.25°时就有显著影响,这也解释了为什么文献中经常出现水平管流型观察的不一致性。我们对倾斜管两相流进行系统研究,得到了倾斜管多相流的流型、空隙率、阻力系数、压降等基本规律,并引用他人关于倾斜管多相流的实验数据对上述规律进行了检验。

通过对无量纲参数制作的流型图的比较,我们发现Fr是最为重要的自变量。这样,我们以Froude数Fr的对数为纵坐标,入口体积含液率 $E_l = Q_l / Q$ 的对数为横坐标,绘制出倾斜管多相流的流型分布图(见图1)。为了显示倾斜角度的影响,我们定义的Froude数为

$$Fr = \frac{v^2}{gD \sin \theta},$$

式中 $\theta$ 为管道倾角( $\theta \neq 0^\circ$ )。

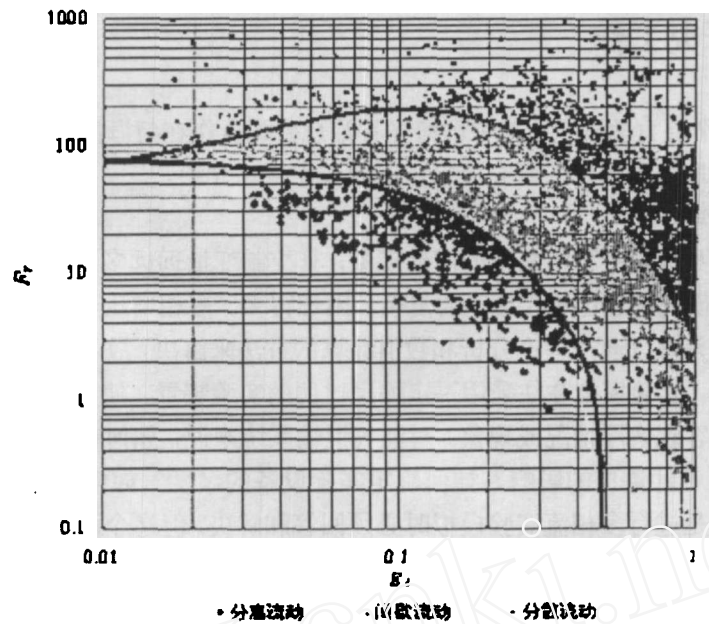


图1 倾斜管多相流型分布图

对分离流动（包括层状流、波状流和环状流）： $Fr \leq Y_1$ ；对间歇流动： $Y_1 < Fr \leq Y_2$ ；对分散流动： $Fr > Y_2$  以及  $Fr > Y_1$ 。其中： $X = 1 - E_s$ ， $Y_1 = 81.68 - 493.72X + 1067.2X^2 - 816.98X^3$

$$Y_2 = 76.87 + 2102.4X - 13123X^2 + 28662X^3 - 27156X^4 + 9451.4X^5$$

限于篇幅，空隙率、阻力系数、压降等关系请参阅文献<sup>[8]</sup>。

### 3.3 多相分离技术研究

油气水分离是实现海洋石油开采分相输送和油气混相输送的重要工艺环节。由于海洋采油平台或海底水下生产系统的操作空间和承载重量都受到严格限制，这就要求在平台或海底使用的油气水分离器结构简单、体积小、重量轻、分离效率高、容易安装维护、安全可靠、能适应多相流各种流态、能抵抗段塞流对其产生的剧烈扰动。这是传统的重力式分离器很难达到的技术指标。因此开发一种小型、高效、快速的油气水分离设备，既可节省平台空间又能提高工作效率，对在建和将建的海上油气田、特别是采用混输方式的海上油气田具有十分重要的意义。

为了研制出能使用于海上油田的高效油气水分离技术，我们确定了集重力、离心、膨胀为一体的组合式高效分离方案，期望达到分离后油中含水小于1%，水中含油小于40mg/L的精细分离目标。现已研制出分离器样机（见图2）。目前正准备进行该分离器的陆上油田现场试验，然后再逐步应用到海上平台和海底<sup>[9]</sup>。

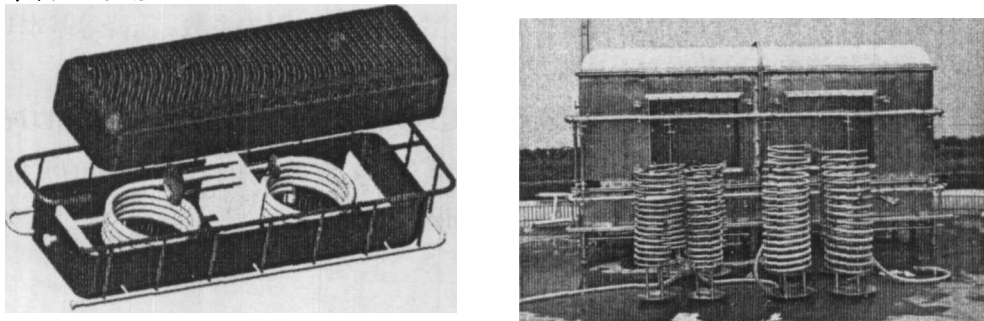


图2 油气水三相分离器结构示意图和样机

### 3.4 多相计量技术研究

三相计量仪用户要求的最原始的信息就是油/气/水三相的流量。根据定义,要得到质量流量,必须给出各相的瞬时速度、各相所占据的管道截面积和密度。这样多相流量测量就转化为测量各单相流量  $\alpha v_g \rho_g$ ,  $\beta v_w \rho_w$  和  $\gamma v_o \rho_o$ , 然后得到总质量流量  $M$ :

$$M = \alpha v_g \rho_g + \beta v_w \rho_w + \gamma v_o \rho_o \quad (1)$$

为了动态、实时、快速、准确给出各相的截面含率、各相的速度、和各相的密度,使用  $\gamma$  射线的硬场成像技术具有较大优势。这是因为硬场成像是通过像素来确定流场相分布的拓普结构,从而可以准确地得到管道截面相含率,且相与相之间的界面可以很清楚;其次是硬场成像可直接进行混相计量,省去分离系统,使结构变得简单;第三是使用成像系统可以实现对多相流型的实况显示,便于流动监控;第四是硬场成像几乎不受流型影响,对油气水的含量没有严格限制。经过仔细调查、分析、探讨、研究,我们提出了基于双能  $\gamma$  硬场五源旋转成像的油气水多相流量计量技术的研究方案(见图3)。

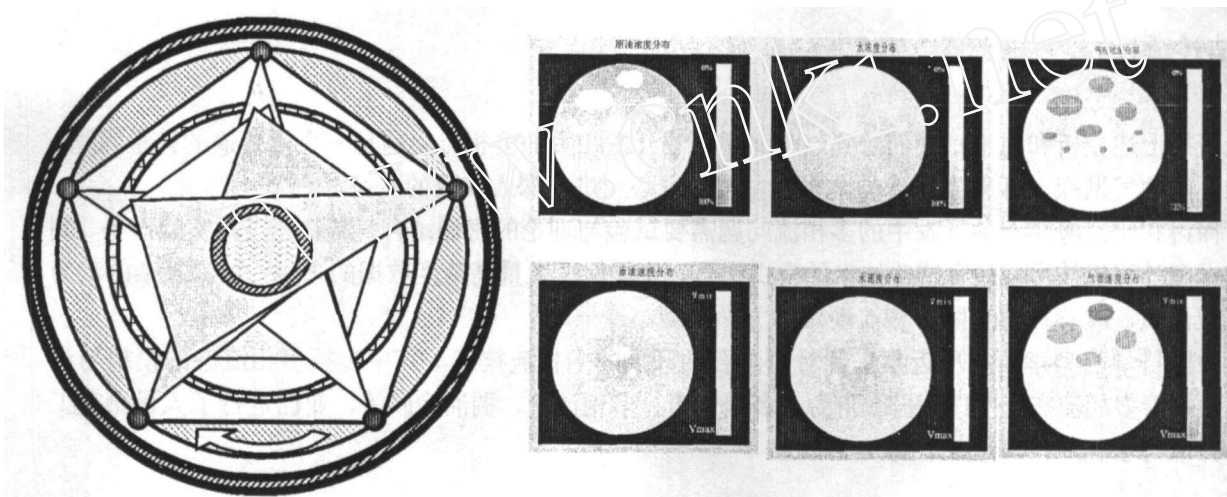


图3 射线源分布以及相含率成像示意图

得到多相流的层析成像图像后,就可通过相关关系和浓度关系得到各像素上油、气、水的速度分布和含率分布,再根据管道数据和测得的各像素上油、气、水的密度,根据温度和压力修正后即可进行流量计算:

$$M_{g(o,w)} = \sum_{k=1}^N M_{g(o,w)k} = \sum_{k=1}^N A_k \alpha_{g(o,w)k} V_{g(o,w)k} \rho_{g(o,w)k} \quad (2)$$

式中  $N$  为总的像素数,  $k$  为像素编号,  $A_k$  为第  $k$  像素的面积,  $\alpha_{g(o,w)k}$ 、 $V_{g(o,w)k}$ 、 $\rho_{g(o,w)k}$  分别为第  $k$  像素的油气水含率,速度和密度。比较式(2)与式(1)我们发现,用其它测量方法得到的是管道截面各相平均速度、密度和含率(各3个值)的流量,而用成像方法,得到了用  $3N$  个值算出的流量。可见使用成像方法测量多相流量可以极大地提高测量精度。

### 3.5 稠油除砂技术研究

在钻井和采油过程中,砂砾经常造成卡钻、设备磨损、输送系统堵塞等危害。随着油田的开发,对砂害的治理越来越重视。在地面除砂中,旋流除砂是一项比较有效的分离技术,其优点在于旋流器结构简单,具有较好的固液分离效果,能够适应油田连续性生产,无运动部件,易于操作和维护,投资费用低而得到广泛应用。但旋流分离器一般只能分离两相(气固、液固、气液),对气液固三相混合物,其分离效率会受到影响,所以对含气情况必须先除气后除砂。十五期间,为实现海上油气混输工艺的特殊要求,并作为混相增压的配套技术(增压泵前加除砂器预防泵叶片的磨蚀),我们在原旋流分离除砂技术的基础上,研制了能用于海上平台的稠油除砂技术,对大于80目的砂,除砂效率能达到96%(见下表)。

表1 除砂效率

实验前加入砂	粒径组成	20-40目	40-60目	60-80目	<80目
	质量(g)	2017	0	0	0
一级分离器	粒径组成	20-40目	40-60目	60-80目	<80目
	质量(g)	1674	171.5	19.5	64.5
二级分离器	粒径组成	20-40目	40-60目	60-80目	<80目
	质量(g)	0	4	0	0
捕集器	粒径组成	20-40目	40-60目	60-80目	<80目
	质量(g)	0	0	0	0
分离出砂总重			1933.5 g		
除砂效率			约96%		

## 4 结论和讨论

根据上述分析和讨论, 我们看到, 与海洋石油开发相关的多相流问题是一个很普遍的科学问题, 涉及到从油气勘探、开采到储运的全过程, 需要也必须进行深入细致的研究。

探讨和研究海洋石油开发中的多相流问题需要试验与理论的密切结合, 需要先进的实验设备、测量技术和计算机技术。只有这些技术的有机结合, 才能保证大量高精度数据的采集, 加深复杂的动力学机理认识, 改善描述实际多相流现象的力学模型。

中国科学院力学研究所近年来针对海洋石油开发的多相流技术, 其中包括多相流态的模拟与识别、倾斜管多相流态/空隙率/压降/阻力、多相分离、多相计量、稠油除砂等, 业已进行了大量研究工作, 并取得了相应研究成果。

## 参 考 文 献

- 1 盖德·希特斯洛尼主编, 鲁钟琪等译. 多相流动和传热手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- 2 Bendiksen K H, Malnes D, Moe R, Nuland S, The dynamic two-fluid model OLGA: Theory and application. SPE Production Engineering, May 1991: 171~180.
- 3 Larsen M, Hustvedt E, Hedne P, Straume T. Petra. A novel computer code for simulation of slug flow. SPE Annual Tech. Conf. and Exhib. 38841, Texas, Oct. 1997.
- 4 Endrestol G, Sira T, Ostenstad, M, Malik T, Meeg M, Thrane J. Simultaneous computation within a sequential process simulation tool[J]. Modeling, Identification and Control, 1989, 10(4):203~211.
- 5 吴应湘, 郑之初, 李东晖, 劳力云. 油气混输系统的实验研究与实验模拟准则[J]. 海洋工程, 1999, 17(4):1~9.
- 6 Gould T L et al. Two-phase flow through vertical inclined, or curved Pipe[J]. JPT, 1974, (8).
- 7 Barnea D, Shoham O et al. Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes, Int. J. Multiphase Flow, 1980: 217~225.
- 8 石在虹. 倾斜管多相流研究及分层配汽器研制[D]. 北京: 中国科学院力学研究所博士学位论文, 2003.
- 9 吴应湘, 郑之初, 李东晖. 海洋石油工业中的多相计量和多相分离技术研究[A]. 应用力学进展论文集[C]. 祝贺郑哲敏先生八十华诞应用力学报告会, 2004.

## Multiphase Flow Problems in Offshore Gas and Oil Development

WU Ying-xiang<sup>1</sup>, LI Qing-ping<sup>2</sup>, ZHENG Zhi-chu<sup>1</sup>, LI Dong-hui<sup>1</sup>, ZHONG Xing-fu<sup>1</sup>, GAO Fu-ping<sup>1</sup>

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

2. Research Center of China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China)

### Abstract

Multiphase flow problems involved in offshore gas and oil development are described in this paper, such as the multiphase flow in porous media in determining the oil reserves, the distribution and variation of oil deposit; the multiphase flow with changeable flux in horizontal, vertical and inclined oil wells; hydrodynamic and thermodynamic properties of oil/gas/water multiphase flows in pipelines; and multiphase bumping, multiphase metering and multiphase separating in transportation pipelines.

The research developments achieved in oil/gas/water multiphase pumping, multiphase metering, multiphase separating, dense oil desanding, and multiphase well logging are also presented in the paper.

**Key Words:** offshore oil; gas and oil development; mult; phase flow