

油气开发中的多相流问题

吴应湘^{*}, 许晶禹^{*}, 李华^{*}, 钟兴福^{*}, 李东晖^{*}, 石在虹^{**}

^{*}中国科学院力学研究所, 北京 100190, yxwu@imech.ac.cn

^{**}中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 本研究系统阐述了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。文中还简略地介绍了中国科学院力学研究所在油气水多相流模拟实验、倾斜井多相流态、稠油减阻、油气水高效分离等方面的研究工作。

关键词: 油气开发; 多相流; 多相分离

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20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^[1]。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计算软件, 出现了通过简单的井底压力与产量的动态变化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, 与其他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。因此, 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仍是油气开采中有待解决的关键问题。同时, 随着海洋油气开采水下生产系统的提出, 以及二次采油、三次采油技术的广泛应用, 与多相增压、多相计量、多相分离相联系的多相流问题, 与水合物、结蜡、腐蚀、立管相关的多相流动保障问题, 与油藏变化、剩余油藏分布、驱油过程相联系的多相渗流问题和非牛顿多相流问题等变得越来越突出和重要, 使海洋石油开采的多相流问题成为涉及面最广、与生产实际关系最密切、物理现象最复杂、数学求解最困难的多相流问题^[2-9]。

本研究在较系统地阐述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等后,简略地介绍了中国科学院力学研究所在油气水多相流模拟实验、倾斜井多相流态、稠油减阻、油气水高效分离等方面的研究成果。

2 油气开发中多相流研究的主要内容

根据油田开发的实际情况和油田开发过程中面临的实际多相流问题,我们认为下列问题可能是未来需重点研究的内容。

(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、地质力学和岩土力学等学科领域,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,以及稠油和超稠油等不同的物理和力学性质,线性的Darcy渗透定律和传统的牛顿本构关系很难满足各种各样的实际流体和流动情况。如何根据不同的岩层特性和油品特性确定相应的渗透规律和非牛顿本构关系,进而建立相应的多相渗流模型,仍是油藏多相流问题研究的关键。

(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常三维多相渗流问题。由于该问题除涉及油藏储量分析和评估的所有内容外,还与油气水在地层的动态运移特性、地层渗透非均匀度与孔隙率的动态变化特性、油藏中油气水随含率变化引起的混合密度/混合黏度等物性参数的动态变化特性等。这些都是非常复杂的问题,其研究工作还处于起步阶段,建立合理的模型并寻求适当的求解方法成为当前研究工作的重点。

(3) 油田开采到一定阶段,往往需要采用注水、注汽、注聚合物等方法,以便增加地层能量,提高石油采收率。这时,不仅要了解油气水三相在地层多孔介质中的流动情况,还需考虑堵水剂、聚合物在多孔介质和裂缝介质中的运移。原则上,油气水三相在地层多孔介质中的流动可用达西定律控制,相间干扰可通过相对渗透率和毛管函数描述,堵水剂、聚合物的运移可由对流、扩散和吸附过程表征。实际工程中,堵水剂、聚合物的非牛顿特性明显,油气水、化学剂往往在高度非均质孔隙的裂缝性地层中流动。这些问题都给多相流理论模型的建立和求解带来新的挑战。解决该问题时,将综合运用渗流力学、油田化学、物理化学、数值计算等多学科理论知识,采用室内实验、理论分析、数值计算、矿场试验等手段,深入系统地研究低渗透油层注活性水驱油条件下各种流体的渗流机理,分析流体与流体、流体与固体界面的非平衡可变性及界面张力的变化,建立能够描述注活性水开发低渗透油层渗流力学机理的数学模型,为预测产量、含水、压力等动态指标变化提供理论基础,结合现场试验优选出合理的注入方式,最终形成一套能够经济有效地开发低渗透油层的理论方法和实际操作方案。

(4) 在调剖堵水与注水开采情况下确定生产井与注水井之间的流动关系是多相流研究遇到的具有挑战性的课题。这时,不仅需要考虑堵水剂在多孔介质和裂缝介质中不同的运移特性,还要考虑水介质在地层中局部流动的定向性以及由此带来的油气水含率变化的非均匀性

和流量变化的强非线性。这些将不仅导致难以准确给出该物理过程的数学模型，而且经常由于井点的奇性使得模拟过程很难收敛。

(5) 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。

(6) 油气水从油藏流入井底和油气水在井筒中的流动是油气开采的两个基本流动过程。这两个流动过程通过井底压力变化将油藏工程与采油工程动态地衔接起来。通常用油井产量与井底流入的动态变化关系来体现。这种关系反映了油藏向油井的供液能力，与油藏压力、油藏物性、流体物性、完井重量、油层渗透规律等密切相关。目前工程上以测井的压力和流量为依据进行经验拟合，给出预测模型，但这样做其理论模型过于简化，与实际情况尚有较大距离。若能实现地层油气水多相渗流与井筒中油气水多相流的耦合求解，就有可能大幅度提高油井产量和产量变化趋势的预测精度。

(7) 由于大量水平井、丛式井的使用，倾斜井中油气水多相流动性能预测变得非常重要。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，只要油井有几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。因此，研究并建立有倾斜度的管道中的多相流动的力学模型，给出倾斜管道中油气水三相流型预测判断准则已成为多相流研究的一项重要任务。

(8) 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入蒸汽，采油平台下导管流等非常必要。现行的力学模型只能预示流态分界点，无法计算压力梯度。

(9) 对于油气井的生产系统设计与分析，准确的井筒多相流计算是核心与关键。目标主要为确定特定计算位置或整个井筒的温度、压力、流型、流速、流量、持液率、压力梯度、温度梯度等流动指标，或上述流动指标的沿程分布规律。目前关于油气井油气水三相流动的计算已有较多的实用方法，这些方法多是基于实验以及各异的流型划分而提出的，同时有各自的适用条件。而这些结果远远不能满足实际生产的需要。如目前用于斜直井、定向井和水平井井筒多相流动计算的较普遍的Beggs-Brill方法，虽可用于水平、垂直和任意倾斜气液两相管流动计算，但它是Beggs和Brill根据在长15 m，直径1英寸和1.5英寸的炳烯管中，用空气和水进行实验的基础上提出的，该模型所能预测的能力和精度可想而知。由于管道中多相流相似理论的限制，油气水三相流在不同管径中的水平、倾斜、竖直接流动基本规律（温度、压力、流型、流速、流量、持液率、压力梯度、温度梯度等沿程分布规律）的系统研究仍是必要的。

(10) 与稳态流动相比，油井中瞬变流动规律显得不那么重要，但它对石油生产和储运操作都将产生重大影响。现行的用于描述油井瞬态过程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。油井中的摩阻损失是在稳态化的假设下得到的，当油井中达到稳态流时，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可能的。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态流动变化，特别是瞬态流量变化提供改进的方法。

(11) 地面斜坡地域管道系统中的摩阻损失，流态判别，流体存积预测仍是尚未完全得到解决的问题。由于重力作用，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，且油气水在斜坡上升段和峡谷下降段的管道系统的流动特性会产生很大变化，流型和压降特性会有本质差别，因此需要进行详细研究。

(12) 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。所以,当油气水在水平管道和近似水平管道中混合流动时,需要精确的力学模型来描述其流动特性。

(13) 油气水多相流研究的另一集中领域是确定段塞流的产生和分布,段塞的长度、高度、频率、体积,以及改进计算汽团状流体存积,界面摩阻系数的力学模型。它们是海洋立管系统、采液输送动力系统和油气水处理系统设计的依据。虽然许多模型可用于预测压降和流型,如Taitai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。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。但该统一模型用于高压多相流体的可行性很少有人涉及。

(14) 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的影响是近年来油气水多相流研究的又一重要领域,因为它直接影响到混相输送的实现和生产系统的正常运营。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入口压力,利于高含水井的启动,实现未经处理产液的长距离输送;井口多相泵能减少井口压力,提高一口井或多口井的产量,能补偿高含水井立管液柱的背压,能实现长距离卫星油田的正常生产。

(15) 油气水高效分离始终是油田采液处理的核心和关键问题。特别是深海环境,要降低平台造价,就必须采用体积小、重量轻、分离效率高的油气水处理系统。另外,为提供石油采收率,我国目前正大量推广使用注聚合物开采,如何高效处理含聚合物采液,也成为世界性的难题。这就迫使人们寻求各种高效的离心、过滤、气浮、电脱水等新颖分离原理和方法,研制各种新型的油气水分离和含油污水处理设备。从而提出不同结果形式、不同分离原理的油气水多相流动和流场特性问题。

(16) 与油气水分离相关的另外两大难题是深海海底的油气水分离和油井井底的油气水分离。水下和井下油气水多相分离器能实现生产水的就地回注,不仅省去了将大量生产水提升到海面 and 地面所需的能量,还省去了海上注入海水的淡化处理和陆上注入含油污水的精细处理。但海底和井底高效分离器的研制必然带动很多油气水多相流问题的研究,如高压环境油气间的相变特性,高速旋流场中油水间的乳化特性,旋流管中的油水界面稳定性等新问题。

(17) 油气水多相流的流量计量是一个远未解决但具有普遍意义的问题。因油井产出的原油、伴生天然气和矿化水形成了一种相态和流型复杂多变的多相混合液,是一个多变量的随机过程,所以油气水流量计量理论上牵涉到油气水多相流的流型、相含率、相间迁移速度、油气相变、油水乳化问题,以及多相分支流动,多相流场的反演,多相流场扰动问题等。生产上油气水多相计量与简化生产过程和改善工艺流程控制密切相关,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。

(18) 油气水输送系统的流动安全保障是近年来石油公司特别关注的问题。它牵涉到多相混输时启动和停输的可靠性,水合物的形成与抑制,管道的腐蚀与防护,段塞的形成与控制等。理论上几乎涉及油气水多相流特性的全部内容,尤其是需要得到整个管输系统局部和整体稳态和瞬态流动的压力、流型、流速、流量、持液率、压力梯度等特性,为系统的安全提供运营参数。

3 我们已开展的研究工作

近年来,我们在油气水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,我们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^[5]:

如压降系数的相似关系为: $\varphi_p = D_p / D_{sp} = \varphi_p(Re_l, Fr, W, E, \rho_g / \rho_l, \mu_g / \mu_l, \chi)$

特征尺度和特征速度满足的模拟条件为: $\frac{(x_c)_1}{(x_c)_2} = \frac{(\sigma / \rho_l)_1^{1/2}}{(\sigma / \rho_l)_2^{1/2}}; \frac{(u_c)_1}{(u_c)_2} = \frac{(\sigma / \rho_l)_1^{1/4}}{(\sigma / \rho_l)_2^{1/4}}$

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 1974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^[6]。Barnea等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^[7]。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(图1)。为了显示倾斜角度的影响,我们定义的Froude数为:

$$Fr = \frac{v^2}{gD \sin \theta}, \text{ 式中 } \theta \text{ —— 为管道倾角 } (\theta \neq 0^\circ)。$$

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: $X = 1 - E_g \quad Y_1 = 81.68 - 493.72X + 1067.2X^2 - 816.98X^3$

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

限于篇幅，空隙率、阻力系数、压降等关系请参阅文献^[8]。

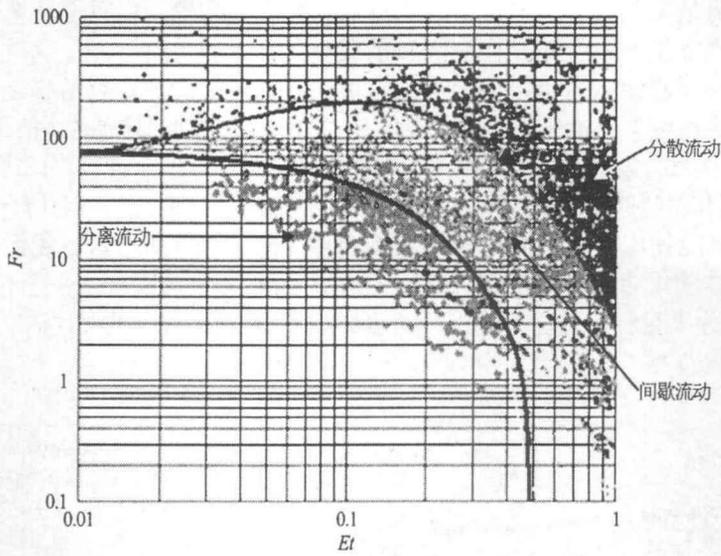


图1 倾斜管多相流型分布图

3.3 稠油减阻研究

由于我国原油的自身特点，再加上三次采油时聚合物的添加，致使开采出来的原油多数表现为非牛顿流体特性，因此对气体/非牛顿流体两相流动的研究已成为石油工业中多相流研究领域的重要内容。目前，国内外对气体/非牛顿流体的流动特性研究报道的较少，且研究主要采用实验数据回归的方法，给出水平管道内的相含率的预测及相应的压力降求解。在近期的工作中，我们针对水平流动时高黏流体管输时掺气减阻现象开展了研究工作，揭示了通气减阻的机理，提出了最佳通气量的概念；对不同影响因素进行了分析，给出了减阻发生时的判别公式，并给出最小阻力点的求解方程。理论模型深化了我们对于高黏流体管输时掺气减阻的物理机理和流动认识，提出的求解方程克服了现有模型的过分简化所导致的计算误差，为开展数值模拟工作提供了帮助。同时，该模型也可推广至水煤浆等非牛顿流体的管道减阻输送中。图2给出了理论模型与实验数据的对比^[10]。

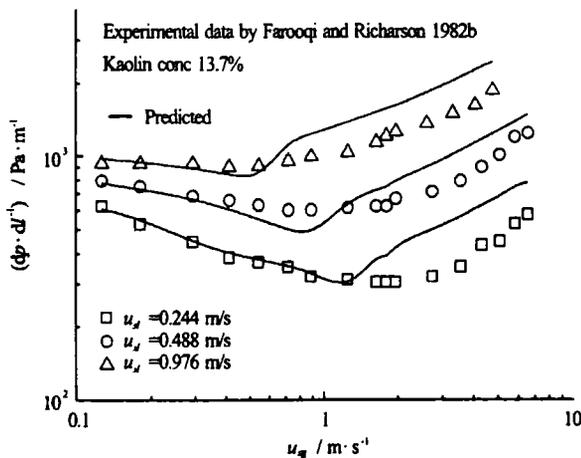


图2 理论模型与实验数据的对比

3.4 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，对在建设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深海水下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40 mg/L的精细分离目标。现已研制出分离器样机（图3），进行了大量陆上油田现场试验，取得了良好效果^[9]。

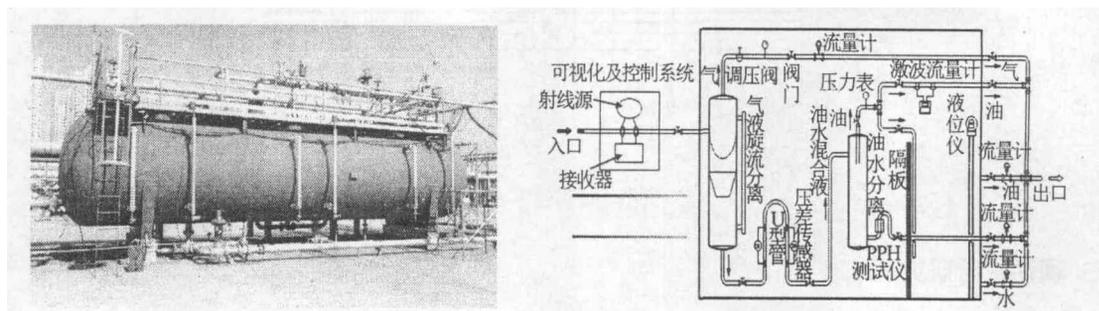


图3 用于平台和海水下的油气水三相分离与计量装置

4 结论和讨论

根据以上分析和讨论，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支的多相流技术进行了大量研究工作，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。

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. 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, 1991. 171-180.
- 3 Larsen, M., Hustvedt, E., Hedne, P., et al. 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., et al. Simultaneous computation within a sequential process simulation tool. Modeling, Identification and Control, 1989, 10(4): 203-211.
- 5 吴应湘, 郑之初, 李东晖, 等. 油气混输系统的实验研究与实验模拟准则. 海洋工程, 1999, 10(4): 1-9.

- 6 Gould, T.L., et al. Two-Phase Flow Through Vertical Inclined, or Curved Pipe, J. P. T., 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. 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. 见: 应用力学进展论文集. 祝贺郑哲敏先生八十华诞应用力学报告会, 2004.
- 10 Xu, J.-y., Wu, Y.-x. Li, H., et al. Study of drag reduction by gas injection for power-law fluid flow in horizontal stratified and slug flow regimes. Chem. Eng. J., 2009. 147: 235-244.

Multiphase Flows in Oil and Gas Exploitation

WU Ying-xiang, XU Jing-yu, LI Hua, ZHONG Xing-fu, LI Dong-hui, SHI Zai-hong

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China 100190, yxwu@imech.ac.cn)

Abstract: Multiphase flows problems encountered frequently in oil and gas exploitation are systematically elaborated in this article. These problems include rules to determine the distribution and change of reservoir in multiphase seepage, variable mass flow of production liquid in oil wells, multiphase flow problems caused by vertical and inclined riser and oil wells, the hydraulic and thermodynamic law of oil-gas-water in pipelines, the performance of lift pump, booster pump and efficiency of separator in transportation pipeline system, miscible flow measurement, etc. Besides, research work concerned about simulation test in oil-gas-water multiphase flow, multiphase flow structures in inclined wells, drag reduction of heavy oil, high efficient separation of oil-gas-water conducted by Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science is also presented briefly in this article.

Key words: oil and gas development, multiphase flow, multiphase separation