

# 油水两相管流理论的研究进展

徐广丽 张国忠

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院)

徐广丽等. 油水两相管流理论的研究进展. 油气储运, 2010, 29(2): 81-85.

**摘要:**综述了油水两相流动分层流型压降理论和分散流型压降理论的研究进展。对于分层流型压降理论,着重介绍了研究相对较成熟的双流体模型,其关键在于油水两相界面摩阻因数的计算;对于分散流型压降理论,介绍了均相流模型,其关键在于油水两相混合液粘度的计算。分析了油水两相管流理论研究存在的问题,提出了针对实际生产需求亟待开展的理论研究方向。

**关键词:**油水两相管流;压降;分层流;分散流;双流体模型;均相流模型

油水两相流动规律研究始于20世纪初石油工业中稠油的减阻输送技术,因检测手段的限制,研究进展比较缓慢。油水两相的密度比较接近,在流动过程中易发生质量和动量交换,油水混合液在管道中的流动状态不断变化,使得油水两相管流压降规律的研究极为复杂。已开展的油水两相管流压降理论研究可归结为分层流型的压降理论和分散流型的压降理论两个方面。

## 1 分层流型压降理论

对于分层层流,考虑界面作用,可在整个流场区域中求 N-S 方程的解析解。Kurban 等人<sup>[1]</sup>与 Moalem 等人<sup>[2]</sup>分别对油水两相界面平坦、界面弯曲的情况进行了求解。对于分层紊流,解析方法难以适用,不少学者提出了其他理论。

### 1.1 双流体模型

20世纪70年代,Taitel和Dukler首先提出了界面平滑的两相分层流的双流体模型<sup>[3]</sup>。假定油水两相各自流动,两相间存在剪切应力;对两相分别建立动量方程,并将两相动量方程合并,得到式(1)。其中,剪切应力项的求解是该理论的关键,通常采用经验关系式进行计算。

$$f = \begin{cases} \frac{16}{Re} & Re < 1500 \\ \left\{ -3.6 \lg_{10} \left[ \left( \frac{6.9}{Re} + \left( \frac{e}{3.7D_h} \right)^{1.1} \right) \right] \right\}^{-2} & Re > 1500 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f$ 为油水两相与管壁的摩阻因数; $Re$ 为雷诺数; $e$ 为管壁粗糙度,m; $D_h$ 为水力直径,m。

$$\tau_o \frac{S_o}{A_o} - \tau_w \frac{S_w}{A_w} \mp \tau_i S_i \left( \frac{1}{A_o} + \frac{1}{A_w} \right) + (\rho_w - \rho_o) g \sin \beta = 0 \quad (1)$$

式中: $\tau_o$ 为油相与壁面的剪切应力, $N/m^2$ ;  $\tau_w$ 为水相与壁面的剪切应力, $N/m^2$ ;  $\tau_i$ 为油水两相界面的剪切应力, $N/m^2$ ;  $S_o$ 为油相的湿周,m;  $S_w$ 为水相的湿周,m;  $S_i$ 为油水界面的湿周,m;  $A_o$ 为油相所占的流通面积, $m^2$ ;  $A_w$ 为水相所占的流通面积, $m^2$ ;  $\rho_o$ 为油相的密度, $kg/m^3$ ;  $\rho_w$ 为水相的密度, $kg/m^3$ ;  $g$ 为重力加速度, $m/s^2$ ;  $\beta$ 为管路的倾角,上倾为正。

当水相速度大于油相速度时,式(1)中第三项取负;反之,式(1)中第三项取正。

#### 1.1.1 油水两相与管壁的剪切应力

在单相管路的研究中,Taitel等人通过摩阻因数计算管内流体与壁面间的剪切应力,认为摩阻因数与管内流体的雷诺数有关,采用勃拉休斯(Blasius)公式的形式表示(式(2))。众多学者<sup>[4-15]</sup>采用该方法计算了油水各相与管壁间的剪切应力。

$$f = \begin{cases} \frac{64}{Re} & Re < 2000 \\ \frac{0.3164}{Re^{0.25}} & Re > 2000 \end{cases} \quad (2)$$

Haland等人<sup>[16]</sup>认为,当管内流体处于紊流流态时,管壁粗糙度对摩擦阻力有一定影响。

作者简介:徐广丽,在读博士生,1984年生,2006年硕士毕业于中国石油大学(华东)油气储运专业,现主要从事成品油管道携水机理研究。

电话:18953255536。E-mail:530xugl@163.com

当管内流体处于层流流态,式(2)和式(3)的系数不同于紊流流态的情况,但剪切应力的计算结果并无不同,这是因为后者剪切应力公式的系数是前者的4倍。

Ullmann 和 Brauner<sup>[5]</sup>在2006年的研究结果表明:在同一管路中流动的两相流体之间存在相互作用,采用单相流体的壁面剪切应力公式表述两相流体与壁面的剪切应力,不能反映出流体间的相互作用,因而引入 sign 函数对剪切应力公式进行修正。

### 1.1.2 油水两相界面的剪切应力

Neogi 等人<sup>[17]</sup>与 Taitel 等人<sup>[18]</sup>先后提出了油水两相界面的剪切应力公式(式(5)和式(6))。两者在形式上有区别,但本质上并无差别,后者通过引入两相速度差的绝对值定义界面剪切应力的方向。

$$\tau_i = f_i \frac{\rho(u_o - u_w)^2}{2} \quad (5)$$

$$\tau_i = f_i \frac{\rho(u_o - u_w) |u_o - u_w|}{2} \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为流动速度较大相的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $u_o$ 为油相的速度,m/s;  $u_w$ 为水相的速度,m/s;  $f_i$ 为两相界面的摩阻因数。

Trallero<sup>[19]</sup>1995年研究指出:在油水两相界面存在界面波动,忽略界面波动、假设界面平滑计算出的剪切应力不够准确。他认为:界面剪切应力由平滑界面剪切应力和波动界面剪切应力两部分组成,前者采用式(5)进行计算;后者则采用经验因数表示界面波动对界面剪切应力的影响,以粘度比为29.6、密度比为0.85的矿物油与水作为试验介质,通过大量试验数据得经验因数为0.073。

2006年,Ullmann 和 Brauner<sup>[5]</sup>考虑两相流体间的相互作用对界面剪切应力公式进行了修正。

#### 1.1.2.1 界面摩阻因数的计算

油水两相流的相间表面张力及密度差比气液两相流小得多,油水两相界面的剪切现象与气液两相界面应有显著不同。目前,相对于气液两相流而言,对油水两相界面剪切应力的研究十分落后,诸多学派尚未达成共识。

1991年,Brauner<sup>[20]</sup>在研究油水两相环状流时提出,油水两相界面波动较小,相对平滑,因而界面粗糙度较小,将界面波动视为长幅平滑波, $B$ 取经验因数为1.0,即采用速度较大相与壁面的摩阻因数计算界面摩擦阻力。摩阻因数公式为:

$$f_i = \begin{cases} Bf_o & u_o > u_w \\ Bf_w & u_o < u_w \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f_o$ 为油相与壁面的摩阻因数; $f_w$ 为水相与壁面的摩阻因数; $B$ 为经验因数。

1994年,Neogi 等人<sup>[17]</sup>在分析油气水三相分层流时,采用式(7)计算油水界面的摩阻因数。他们认为气相的存在使油水界面波不能再视为长幅平滑波,而应视为二维波,并采用水平三相管流装置进行试验,得出  $B$  的取值范围在0.8~1.0之间。

1995年,Taitel 等人<sup>[18]</sup>在研究油气水三相分层流时提出:油水界面的摩阻因数最小等于0.014,若油相与壁面的摩阻因数大于0.014,油水界面的摩阻因数等于油相与壁面的摩阻因数。

可见,不同学者关于油水两相流界面摩阻因数的研究结果存在一定差异,对油水两相界面的相互作用在认识上尚存在很多不足。

#### 1.1.2.2 水力直径的计算

计算剪切应力时,首先要计算油水两相与壁面的摩阻因数,这就需要依据管内流体的雷诺数判断其流态,而雷诺数的计算离不开水力直径。水力直径的计算相对成熟,Brauner 等人<sup>[10]</sup>提出的理论得到广泛认可。

1998年,Brauner 等人<sup>[10]</sup>认为油水两相界面对于速度较大相而言,类似于固定壁面;而对于速度较小相而言,类似于自由界面。也即当油相速度大于水相速度时,界面对于油相而言是“固定的”,对于水相而言是“自由的”或“运动的”,计算公式如下:

$$\begin{aligned} D_o &= \frac{4A_o}{(S_o + S_i)}, D_w = \frac{4A_w}{S_w} & u_o > u_w \\ D_o &= \frac{4A_o}{S_o}, D_w = \frac{4A_w}{(S_o + S_i)} & u_w > u_o \\ D_o &= \frac{4A_o}{S_o}, D_w = \frac{4A_w}{S_w} & u_o = u_w \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $D_o$ 为油相的水力直径,m; $D_w$ 为水相的水力直径,m。

#### 1.1.3 双流体模型的无量纲化

基于油相速度大于水相速度,对式(1)进行整理并引入无量纲参数,将其进行无量纲化和简化处理,可得:

$$\begin{aligned} &(\tilde{D}_o)^{-n_o} (\tilde{u}_o)^{2-n_o} \frac{\tilde{S}_o}{\tilde{A}_o} - X^2 (\tilde{D}_w)^{-n_w} (\tilde{v}_w)^{2-n_w} \frac{\tilde{S}_w}{\tilde{A}_w} \\ &+ (\tilde{D}_o)^{-n_o} (\tilde{u}_o)^{2-n_o} \left(1 - q \frac{\tilde{v}_w}{\tilde{v}_o}\right)^2 \tilde{S}_i \left(\frac{1}{\tilde{A}_o} + \frac{1}{\tilde{A}_w}\right) \\ &+ 4Y = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\tilde{D}_o$ 为无量纲油相的水力直径; $\tilde{D}_w$ 为无量纲水相的水力直径; $\tilde{u}_o$ 为无量纲油相的速度; $\tilde{u}_w$ 为无量

纲水相的速度;  $\tilde{A}$  为无量纲油相的截面积;  $\tilde{A}_w$  为无量纲水相的截面积;  $\tilde{S}_o$  为无量纲油相的湿周;  $\tilde{S}_w$  为无量纲水相的湿周;  $X^2$  为洛-马参数;  $Y$  为下倾参量;  $q$  为油水两相流量比;  $n_o$ 、 $n_w$  为取决于流型的常数。

由式(9)可以看出,两相流体模型流动特性取决于三个无量纲参数:两相流量比  $q$ 、下倾参量  $Y$  以及洛-马参数  $X^2$ 。首先假定一个无量纲的水相高度  $\tilde{h}$ ,由假定的水相高度  $\tilde{h}$  计算两相的无量纲湿周、面积和直径;由两相流量计算无量纲速度、下倾参量和洛-马参数,并代入式(9)检验,直至方程成立为止。将得出的无量纲水相高度  $\tilde{h}$  代入油相或水相的动量方程可计算出管道的压力降。

## 1.2 其他模型

郑永刚等人<sup>[21-22]</sup>在研究输油管道掺气减阻时,引入平板流模型研究圆管分层流的流动规律,将圆管流抽象成无穷多个中心面通过圆管轴心线的平板流,建立圆管分层流模型,提出了圆管分层流研究的新思路。但是,平板流模型只能近似地研究圆管分层流,结果相对比较粗糙。

贺成才<sup>[23]</sup>从流体力学的 N-S 方程出发,对圆管两相分层层流相互作用进行了严格分析,得到一组假定条件下完整描述两相圆管分层流的数学方程,可为两相圆管分层流的直接模拟提供参考。

20世纪80年代以来,在两相分层流的研究中应用了 CFD 技术。该技术首先被用于水平管中气液两相分层流的处理,而后研究者做出大胆假设,将其应用于油水两相分层流的研究中。Elseth 等人<sup>[24]</sup>采用 VOF 模型模拟了油水两相分层流,然而模拟结果与实测结果符合并不好。之后,Gao 等人<sup>[25]</sup>再次采用 VOF 模型对水平管油水两相分层流进行数值模拟,同时分区采用不同的紊流模型:在旺盛紊流区域采用 RNG 模型,在近壁面区域采用低雷诺数模型。模拟结果与实测结果吻合较好,说明 CFD 技术可以用于分层紊流的油水两相流的数值模拟。顾汉洋等人<sup>[26]</sup>采用同样的模型、更优化的计算方法对水平管油水两相分层紊流流动进行了数值模拟,将结果与文献数据进行对比,吻合良好,进一步证实了 CFD 技术在解决这一问题上的有效性和准确性。

对于平板两相分层流的研究,主要有五种模型:第一,假设某一连续相的运动动力仅来自于另一连续相,认为两平板间无再循环现象的“牵引模型”;第

二,将油相和被牵引的水相看作独立的两相,认为两连续相存在再循环的“双层模型”;第三,假设两相界面处速度比为  $K$  的“速度比模型”;第四,在界面附近设立一个“近界面距离”,并假设界面处速度比为  $K$  的“近界面速度比模型”<sup>[27]</sup>;第五,假设界面处剪切应力之比为  $K$  的“剪切应力比模型”<sup>[28]</sup>。前两种模型以界面处速度和界面处剪切应力均连续为前提,模拟结果往往使油相在近界面处的流动速度过大,速度梯度过小;第三种和第四种模型的假设缺少充足的试验依据;平板两相分层流的相关研究大多基于第五种模型来开展。

孙津生等人<sup>[29]</sup>在油水两相平板分层流实验中发现,两相界面处的剪切应力并不连续,为此,在油水分层流动系统中,不能假设界面处剪切应力连续。他们采用剪切应力比模型,通过在两相界面处剪切应力间增加参数  $K$  作为边界条件,选定  $K$  为两相流体粘度比的平方;采用引入参数  $K$  后的速度分布模型的计算结果与试验数据进行比对,吻合较好,证实了剪切应力比模型的正确性。董建伟等人<sup>[30]</sup>利用剪切应力比模型,讨论了油水两相分层层流流动的速度分布规律,得出油相流速分布在最大值附近与试验结果有偏差,于是对剪切应力比模型进行了修正,将水相分为拖拽和返流两段,所得模型与试验数据较接近。剪切应力比模型能否移用到圆管油水两相流中,目前尚未开展相关研究,值得尝试。

## 2 分散流流型压降理论

对于油水两相分散流,通常将两相混合液看成一种均匀的单相流体来处理。根据油水比判断分散状态是 O/W 型还是 W/O 型;根据连续相的不同,求得混合液的粘度;采用 Blasius 方程计算摩阻压降。这就是所谓的“均相流模型”。该模型假设两相间无滑移,且阻力作用机理一致,按照单相管路的摩阻压降公式计算其摩阻压降,即:

$$-\frac{dp}{dx} = \lambda_m \frac{\rho_m u_m^2}{D} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_m$  为两相管流与管壁的摩阻因数,根据 Blasius 假设,可表示为  $\lambda_m = CRe^{-n}$ ;  $\rho_m$  为两相管流的平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $D$  为管内径,  $\text{m}$ ;  $u_m$  为两相管流的平均速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

### 2.1 两相混合液平均密度

通常将 Dukler 等人在气液两相流研究中提出

的各相份额加权平均的方法,应用到油水两相混合液平均密度的求解中:

$$\rho_m = \rho_o \epsilon_o + \rho_w (1 - \epsilon) \quad (11)$$

式中: $\epsilon_o$ 为油相的体积分数。

## 2.2 两相混合液粘度

影响油水两相混合液粘度的因素很多,例如连续相粘度、分散相体积分数、油品物性、界面张力、掺混程度等,同时受热力条件、剪切条件的影响。将油水两相混合液看作一种均匀介质时,学者们提出了不同的两相混合液粘度的经验公式。

1906年,Einstein<sup>[31]</sup>基于试验研究结果提出了第一个油水两相混合液粘度的经验公式,认为混合液粘度只与连续相粘度以及分散相体积分数有关:

$$\mu_m = \mu_c (1 + 2.5 \eta) \quad (12)$$

式中: $\mu_m$ 为混合液的粘度,mPa·s; $\mu_c$ 为连续相(油)的粘度,mPa·s; $\eta$ 为分散相(水)的体积分数。

式(12)仅适用于分散相(水)的体积分数小于0.15的稀混合系统。随后,有学者对分散相体积分数稍大的两相混合液分散系统中的Einstein粘度方程进行修正,例如Guth公式、Vand公式和Monsen公式<sup>[28]</sup>等,其中,前两个公式适用于分散相体积分数小于0.40的情况,后一个公式适用于分散相体积分数小于0.50的情况。

1993年,Pal<sup>[32]</sup>建立了水平管道内水为连续相的混合液粘度关系式,他认为:混合液粘度除了与连续相粘度、分散相体积分数有关外,还与分散相粘度有关,指出层流流态下两相混合液分散系统的粘度大于紊流流态下的情况。同年,Chen<sup>[33]</sup>提出油水两相间的界面张力对油水两相混合液的粘度也有影响,给出了油为连续相时的混合液粘度计算式:

$$\mu_m = \left[ \frac{(\rho_w - \rho_o) u_m^4}{g \sigma} \right]^{0.25} \left( \frac{\mu_w}{\mu_o} \right) \quad (13)$$

式中: $\sigma$ 为油水两相间的界面张力,N/m。

以上述及的两相混合液粘度计算公式均未考虑油水掺混程度的影响。1996年,Pan等人<sup>[34-35]</sup>提出了受掺混程度影响的两相混合液粘度的计算公式:

$$\mu_m = (1 - c_m) [(1 - \epsilon_w) \mu_o + \epsilon_w \mu_w] + c_m \mu_c \epsilon_c^{-2.5} \quad (14)$$

式中: $c_m$ 为掺混程度系数,取0~1; $\epsilon_w$ 为水相体积分数; $\epsilon_c$ 为连续相体积分数。

1998年,蔡继勇等人<sup>[36]</sup>研究了垂直管道内的油水两相流动,综合考虑了温度、压力、含水率等因素的影响,由试验结果回归得到混合液粘度的经验公式,并对油为连续相和水为连续相的不同情况加以

区分。

2000年,Pal<sup>[37]</sup>指出:表面活性剂可以有效增大油水两相混合液内分散相的含量,于是引入了有效体积浓度的概念,用以描述油水两相混合液的粘度,式(15)。该式计算精度较高,得到了广泛认同,但计算过程非常繁琐。

$$\mu_m^{-0.4} \left( \frac{2\mu_m + 5k}{2 + 5k} \right)^{-0.4} = 1 - k_o \epsilon_d \quad (15)$$

式中: $k$ 为分散相与连续相的粘度比; $k_o$ 为表面活性剂的影响系数; $\epsilon_d$ 为分散相体积分数。

另外,一些学者将Dukler等人在气液两相流研究中提出的各相份额加权平均的方法,应用到油水两相混合液粘度的求解中:

$$\mu_m = \mu_o \epsilon_o + \mu_w (1 - \epsilon_o) \quad (16)$$

$$\frac{1}{\mu_m} = \frac{\rho_o \epsilon_o}{\rho_m \mu_o} + \frac{\rho_w (1 - \epsilon_o)}{\rho_m \mu_w} \quad (17)$$

可见,基于不同的试验条件,由于研究者对于油水两相混合液粘度的认识尚存在一定差异,因此总结的经验公式均有一定的使用条件和范围,普遍性不强,通常存在一定的误差,许多学者正进一步研究油水两相混合液粘度的计算公式。

综上所述,对于油水两相分层流流型,双流体模型是较为成熟的研究成果,从开始借鉴单相管流剪切应力的经验公式,到考虑界面波动和两相间相互作用之后对单相管流经验公式进行修正,双流体模型理论研究经历了由浅及深,不断完善的过程。在双流体模型中,界面摩阻因数的计算公式均基于某些试验条件推导获得,有一定的适用范围,且其修正也很不统一。若能通过大量试验数据总结得到一个形式简单、合理统一的界面摩阻因数计算公式,可以使双流体模型得到很好的完善。平板油水两相流模型能否移用到圆管油水两相流的研究中,值得深入探讨。CFD技术的引入和应用促进了油水两相分层流的深入研究。均相流模型以单相管流经验公式为基础,通过油水混合液粘度和摩阻因数相关公式计算压降,误差较大。

对于油水两相分散流流型,均相流模型应用比较广泛,其关键在于混合液粘度的准确计算。目前,不同学者对混合液粘度的计算在认识上存在很大差异,现有经验公式各自都有特定的使用范围和条件;而且由于试验设备和流动介质存在差异,研究成果的可比性较差。总而言之,只有对油水两相流型和压降规律有足够的认识,才能提出合理的压降预测

模型,从而为油水两相流的长距离管道运输提供理论支持。

#### 参考文献:

- [1] Kurban A P, Angeli P, Tasis M. Stratified and dispersed oil-water flows in horizontal pipes [C]. The 7th International Conference on Multiphase Production, Cannes, France, 1995.
- [2] Moalem Maron D, Rovinsky J, Brauner N. Analytical prediction of the interface curvature and its effects on stratified two-phase flow characteristics [J]. Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, 1995(1): 163-170.
- [3] Taitel, Dukler A E. A model for prediction flow regime transition in horizontal and near horizontal gas-liquid flow [J]. AIChE, 1976, 22(1): 47-55.
- [4] 齐建波, 张黎明, 檀伟, 等. 气液分层流相间摩擦系数计算模型比较[J]. 油气储运, 2007, 26(12): 25-29.
- [5] Ullmann A, Brauner N. Closure relations for two-fluid models for two-phase stratified smooth and stratified wavy flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(1): 82-105.
- [6] 刘夷平, 杨维林, 王经. 气液界面摩擦因子对分层流向段塞流过渡的影响[J]. 高校化学工程学报, 2006, 20(6): 888-892.
- [7] 魏建光, 汪志明, 王小秋. 水平圆管油水两相变质量分层流压降计算[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(5): 61-64.
- [8] 曹学文, 林宗虎, 梁法春, 等. 水平管气液两相分离流相间水力摩擦系数计算[J]. 油气田地面工程, 2002, 21(1): 87-88.
- [9] 陈杰, 冯传令, 蔡一全, 等. 油水两相分层流动的压降研究[J]. 油气储运, 2001, 20(9): 37-40.
- [10] Brauner N, Moalem M D, Rovinsky J. A two-fluid model for stratified flows with curved interfaces[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1998, 24(6): 975-1004.
- [11] 谢翠丽, 宋新见, 郑永刚. 界面作用对气液两相分层流的影响[J]. 油气储运, 1998, 17(4): 53-57.
- [12] 李玉星, 冯叔初. 多相流气液相间水力摩擦系数关系式评价[J]. 油气储运, 1998, 17(11): 13-16.
- [13] Wang Liyang, Wu Yingxiang, Zheng Zhichu, et al. Oil-water two-phase flow inside T-junction [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2): 147-153.
- [14] Ullmann A, Zamir M, Ludmer Z, et al. Stratified laminar countercurrent flow of two-liquid phases in inclined tubes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(10): 1583-1604.
- [15] Ullmann A, Zamir M, Gat S, et al. Multi-holdups in co-current stratified flow in inclined tubes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(10): 1565-1581.
- [16] Hadziabdic M, Oliemans R V A. Parametric study of a model for determining the liquid flow-rates from the pressure drop and water hold-up on oil-water flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(12): 1365-1394.
- [17] Neogi S, Lee A, Jepson W P. A model for multiphase (gas-water-oil) stratified flow in horizontal Pipeline [C]. SPE 28799, 1994.
- [18] Taitel Y, Barnea D, Brill J P. Stratified three phase flow in pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(1): 53-60.
- [19] Trallero J L. Oil-water flow patterns in horizontal pipes [D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1995: 41-88.
- [20] Brauner N. Two-phase liquid-liquid annular flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1991, 17(1): 59-76.
- [21] 郑永刚, 方铎, 李桂芬. 圆管中气液分层流及减阻规律[J]. 成都科技大学学报, 1996, 91(3): 89-94.
- [22] 郑永刚, 谢翠丽, 姚泽西. 非牛顿流体在圆管中层流-紊流分层流动规律[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(3): 1-4.
- [23] 贺成才. 圆管分层流的数值模拟[J]. 油气储运, 2002, 21(6): 8-19.
- [24] Elseth G, Kvandal H K, Melaaen M C. Measurement of velocity and phase fraction in stratified oil/water flow [C]. International Symposium on Multiphase Flow and Transport phenomena, Antalya, Turkey, 2000: 206-210.
- [25] Gao Hui, Gu Hanyang, Guo Liejin. Numerical study of stratified oil-water two-phase turbulent flow in a horizontal tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(4): 749-754.
- [26] 顾汉洋, 高晖, 郭烈锦. 水平管油水两相分层紊流流动的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 810-812.
- [27] 刘昌文, 刘杰, 王仕康. 油水两相分层流流动速度分布的激光诊断[J]. 流体力学试验与测量, 2000, 14(2): 83-87.
- [28] 董大勇. 平板间液液分层流动速度分布及界面特性研究[D]. 天津: 天津大学, 1997: 9-20.
- [29] 孙津生, 张吕鸿, 李鑫钢, 等. 液液分层流动系统速度分布及界面剪切力研究[J]. 化学工程, 2002, 29(1): 33-36.
- [30] 董建伟, 唐晓寅, 黄磊. 油水两相分层流流速分布计算分析[J]. 后勤工程学院学报, 2006, (22)(4): 54-57.
- [31] 冯叔初, 郭揆常, 王学敏. 油气集输[M]. 东营: 石油大学出版社, 1988: 192-193.
- [32] Pal R. Pipelines flow of unstable and surfactant-stabilized emulsions [J]. AIChE, 1993, 39(11): 1754-1764.
- [33] 王玮, 宫敬, 刘鑫. 油气水三相流压降理论研究进展[J]. 油气储运, 2006, 25(11): 1-7.
- [34] Pan L, Jaynti S, Hewitt G F. Flow Patterns, phase inversion a pressure gradient in air-oil-water flow in a horizontal pipe [C]. In: Proc. 2nd Int. Conf. Multiphase Flow, Kyoto, Japan, 1995.
- [35] Pan L. High pressure three-phase (gas-liquid-liquid) flow [D]. UK, London: Imperial College, 1996: 26-45.
- [36] 蔡继勇, 陈听宽, 罗毓珊. 垂直上升管内油水乳状液流动特性的研究[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 94-98.
- [37] Pal R. Viscosity-concentration equation for emulsion of nearly spherical drops [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 231(1): 168-175.

(收稿日期: 2009-04-17)