

改进的段塞流特性参数理论计算模型

刘 武* 张 鹏 武 玉 双

(西南石油学院石油工程学院) (华北油田采油五厂)

李 闽

(西南石油学院石油工程学院)

刘 武 张 鹏等:改进的段塞流特性参数理论计算模型,油气储运,2003,22(6) 40~43。

摘 要 段塞流特性参数的计算是油气混输管道工艺计算的基础。诸多研究成果表明,用平衡液膜简化法计算段塞流流动参数,其计算结果明显比试验数据的偏差大。在液膜高度渐变物理模型的基础上,用两相流水力学方程,推导了一个段塞流液膜区完全耦合的流动参数计算模型。在计算液塞区参数时,采用了一组综合流体物性、倾角、管径等因素的经验计算式,其中部分关系式经过 Tulsa 大学 TUFFP 数据资料分析,与现有半经验半理论的计算式相比,统计误差较小,准确度较高。利用改进的计算模型对某油田一段混输管道的段塞流特性参数进行了预测。

主题词 两相流 段塞流 特性参数 计算模型

一、前 言

在水平或微倾的油气混输管道中,段塞流是一种常见的两相流流型。尽管段塞流复杂,其特性目前仍不能完全被理解和广泛认同,但管内气液两相流的压力和持液率的计算是工程设计必不可少的内容。因此,20 世纪 70 年代以来,许多学者采用了不同的方法模拟段塞流流动特性,提出了各自的半经验半理论段塞流模型。这些模型大都是小管径、简单试验流体(如空气和水)和低压试验基础上建立的数学物理模型,应用于油气混输工艺计算中会产生很大的误差,甚至会得出错误的结论。解决这一问题较为有效的方法是根据生产数据优选现有的模型和关系式,或根据各个段塞流参数计算式的特点,

组合一种新的计算段塞流参数的混合模型。

表征段塞流的特性参数基本上可以分为以下 3 大类。

(1)液塞区参数:液塞持液率 H_{ls} 、液塞长度 L_s 、液塞平均运动速度 v_m 等。

(2)液膜区参数:液膜持液率 H_{lf} 、液膜/大气泡长度 L_f 、液膜速度 v_{lf} 、Taylor 气泡速度 v_{gf} 等。

(3)段塞单元参数:段塞频率 ω 、段塞单元长度 L_u 、段塞单元的平均持液率 H_l 。

二、液塞区参数计算式的确定

1、液塞持液率 H_{ls}

液塞持液率是流型转换的重要标志,也是段塞流特性参数计算模型中要用到的初始变量。2000

4, 谭羽非:枯竭气藏型天然气地下储气库注采动态数值模拟研究,哈尔滨建筑大学博士论文,1998。

参 考 文 献

1, 谭羽非 廉乐明等:国外天然气地下储气库的研究进展,油气储运,1997,16(12)。
2, 黄 海:地下储气库储气量的校核,石油规划设计,2001(1)。
3, Hagoort J: Fundamental of Gas Reservoir Engineering, New York Elsevier Science Publishers B. V. ,1992.

(收稿日期:2002-10-08)

编辑:刘春阳

年, Abdul-Majeed 在其垂直和倾斜两相段塞流模型中^[1]采用了以下计算式:

$$H_{ls} = \frac{v_{sg} \left(\frac{v_{BS}}{10 v_{sg}} \right)^{0.1}}{1.2 v_m + v_{BR}} \cdot \frac{1}{(1 + \cos \beta)^{0.35}} \quad (1)$$

$$v_{BS} = 0.333 v_d + 0.25 v_{BR} \quad (2)$$

$$v_{BR} = 1.4 \left(1 - \frac{D_B}{D} \right) \left[\frac{g\sigma(\rho_s - \rho_B)}{\rho_s^2} \right]^{0.25} \quad (3)$$

$$D_B = \sqrt{\frac{3\sigma}{g(\rho_s - \rho_B)}} \quad (4)$$

式中 v_m —— 气液相混合速度, m/s;

v_{sg} —— 气相折算速度, m/s;

β —— 管道倾角, ($^\circ$);

v_{BS} —— 气泡流向段塞流流型转变的临界气体表观速度, m/s;

v_{BR} —— 气泡浮升速度;

D —— 管道直径, m;

D_B —— 分散气泡的直径, m;

v_d —— 液相折算速度, m/s;

ρ_B —— 液塞区分散气泡密度, kg/m^3 ;

ρ_s —— 液塞区液体密度, kg/m^3 ;

σ —— 液体表面张力, N/m。

2、液塞长度 L_s 的计算

1989 年, Scott^[2] 分析了管道末端液塞长度随管径的变化情况, 对试验数据进行了拟合, 采用加权平均法得出了计算水平管道平均段塞长度的关系式。

$$\ln(L_s) = -26.8 + 28.5[\ln(D) + 3.67]^{0.1} \quad (5)$$

当 $D < 0.0381 \text{ m}$ 时, 可以近似认为 $L_s = 30 D$ 。

3、液塞内分散气泡的速度 v_{DB}

1997 年, Abdul-Majeed 采用以下公式计算液塞内分散气泡的平均流速:

$$v_{DB} = 1.2 v_m + 1.4 \left(1 - \frac{D_B}{D} \right) \left[\frac{g\sigma(\rho_s - \rho_B)}{\rho_s^2} \right]^{0.25} \quad (6)$$

液塞内液体速度 v_{ls} 由气泡飘逸模型求出。用经验关系式计算出部分液塞区参数后, 可以建立流动参数之间的相互关系, 从而获得其它特性参数的值。

三、液膜区参数计算模型的建立

常见段塞流液膜区的物理模型有平衡液膜简化模型(I)和液膜高度渐变模型(II)两种。选择模型 I

进行计算的一些学者认为, 液塞尾部长度比液膜区的长度短一些, 当流体离开液塞后, 很快达到静水压力平衡, 液膜区特性完全与一般气液分层流相同, 具有液膜高度均匀一致、液膜含液率和液膜速度为定值的特点。但是, 在某些段塞流存在的区域, 用模型 I 预测出的段塞流特性参数比试验数据的偏差大许多。Scott、Kouba^[3] 等人指出, 平衡液膜的假设不合理, 因为气泡/液膜与液塞分离后时间太短, 不可能立即达到压力平衡, 液膜区中液膜高度、持液率、液膜速度应是逐渐变化的, 采用模型 II 计算水平管段段塞流的特性参数, 其偏差与试验结果相比可以减小到 20% 以内。利用段塞流液膜高度渐变物理模型, 在相关边界条件下, 推导了液膜区含液率、液膜速度、平均气泡长度等流动参数的计算方法。

液膜特性参数计算模型的建立基于以下假设:

(1) 液膜内不含小气泡, Taylor 泡不含小液滴。

(2) 气液相间无传质。

在上述两个假设条件下, 设 Taylor 泡的密度为 ρ_g , 液膜液体的密度为 ρ_f , 参照图 1, 考虑管段内液面高度 h_l 引起的静压作用, 根据质量和动量守恒定律, 得到描述液膜区气液相的偏微分方程。

(1) 连续方程

Taylor 泡:

$$\frac{\partial(\rho_g A_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_{gf} A_g)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

液膜:

$$\frac{\partial(\rho_f A_f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f v_{lf} A_f)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

(2) 动量方程

Taylor 泡:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(A_g \rho_g v_{gf}) + \frac{\partial}{\partial x}(A_g \rho_g v_{gf}^2) + A_g \frac{\partial p}{\partial x} = & -T_{gfw} \\ & -T_{gi} - g\rho_g A_g \sin \beta - g\rho_g A_g \cos \beta \frac{\partial h_l}{\partial x} \end{aligned} \quad (9)$$

液膜:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(A_f \rho_f v_{lf}) + \frac{\partial}{\partial x}(A_f \rho_f v_{lf}^2) + A_f \frac{\partial p}{\partial x} = & -T_{fiw} \\ & -T_{fi} - g\rho_f A_f \sin \beta - g\rho_f A_f \cos \beta \frac{\partial h_l}{\partial x} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 T_{gfw} —— Taylor 泡与管壁的剪切应力, N/m^2 ;

T_{fiw} —— 液膜与管壁的剪切应力, N/m^2 ;

T_{gi} —— Taylor 泡与气液界面的剪切应力, N/m^2 ;

T_{fi} ——液膜与气液界面的剪切应力, N/m^2 ;
 A_g ——气体所占截面面积, mm^2 ;
 A_f ——液体所占截面面积, mm^2 。

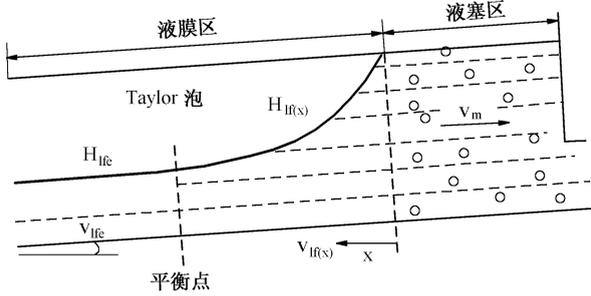


图 1 液膜高度渐变物理模型

在以 Taylor 泡前沿速度 v_{BF} 移动的坐标系内, 可以将气液相流动视为稳态流动。相对于气泡前沿的液膜速度 v_{lf} 和气泡速度 v_{gf} 为:

$$v_{lf} = \{v_{BF} - v_{lf}(x)\} \quad (11)$$

$$v_{gf} = \{v_{BF} - v_{gf}(x)\} \quad (12)$$

$$v_{BF} = 1.2 v_m + 0.35 \sqrt{gD \sin \beta} (1 + \cos \beta)^{1.2} \quad (13)$$

式中 $v_{lf}(x)$ ——距平衡点 x 处的液膜速度;
 $v_{gf}(x)$ ——距平衡点 x 处的气膜速度;
 v_{BF} ——液塞后面大气泡头部的前沿速度^[4]。

展开式(9)和式(10)中的偏导项, 并代入式(6)和式(7), 考虑气液两相流动是一个稳态过程, 消去压力梯度和与时间有关的各项, 得到:

$$\rho_f v_{lf} \frac{dv_{lf}}{dx} - \rho_g v_{gf} \frac{dv_{gf}}{dx} + g(\rho_f - \rho_g) \cos \beta \frac{dh_l}{dx} = F \quad (14)$$

$$F = -\frac{T_{fw}}{A_f} + \frac{T_{gw}}{A_g} + T_{gi} \left(\frac{1}{A_f} + \frac{1}{A_g} \right) - g(\rho_f - \rho_g) \sin \beta \quad (15)$$

将 A_f 和 A_g 表示为液面高度 h_l 的形式, 简化式(14), 推导得出:

$$\frac{dv_{lf}}{dx} = \frac{F - g(\rho_f - \rho_g) \cos \beta \frac{dh_l}{dx}}{\rho_f v_{lf} + \frac{\rho_g v_{gf}^2 A_f}{A_g v_{lf}}} \quad (16)$$

结合式(16), 从图 1 可以看出, 当 $x=0$ 时, 液膜含液率等于液塞含液率, 液膜速度等于液塞速度, 即 $v_{lf}|_{x=0} = v_{ls}$ 。在液膜区内, 随着 x 值的增大, 液膜含液率和液膜速度不断减小。当 x 增大到某一数值后, 随着 x 值的增大, 液膜含液率和液膜速度保持不变, 这一点称为平衡点, 相应的液膜含液率和液膜速

度称为平衡液膜含液率 H_{lfe} 和平衡液膜速度 v_{fe} 。平衡点之后的液膜区保持平衡液膜含液率和平衡液膜速度不变, 平衡点同所有边界一样, 以平移速度 v_i 运动。

用 Euler 法或四阶 Runge-Kutta 法对式(16)进行积分, 可以得到计算段 Δx 内液膜的平均速度。

Δx 内平均液面高度为:

$$(h_l)_{av} = h_l + \frac{dh_l}{dx} \frac{\Delta x}{2} \quad (17)$$

Δx 内液膜平均含液率为:

$$(H_{lf})_{av} = \left[2 \cos \left(1 - 2 \frac{(h_l)_{av}}{D} \right) \frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - (h_l)_{av} \right) \right] \times [D(h_l)_{av} - (h_l)_{av}^2]^{0.5} \frac{4}{\pi D^2} \quad (18)$$

Taylor 泡平均速度为:

$$(v_{gf})_{av} = v_i - (v_i - v_m) \frac{1 - H_{ls}}{1 - (H_{lf})_{av}} \quad (19)$$

假设液塞单元是稳定的, 对于液相运用质量平衡公式, 有:

$$v_d L_u = v_{ls} H_{ls} L_s + v_{lf} H_{lf} L_f \quad (20)$$

L_f 是 x 的函数, 迭代求解过程中满足式(20)的各计算段之和 $\Sigma \Delta x$, 就是要计算的平均液膜长度。

段塞单元压降计算^[5] 式为:

$$-\left(\frac{dP}{dx} \right) = \rho_u g \sin \beta + \frac{1}{L_u} \left[\frac{T_{sw} L_s}{A} + \frac{(T_{fw} + T_{gw}) L_f}{A} \right] \quad (21)$$

式中 T_{sw} ——液塞与管壁的剪切应力, N/m^2 ;
 ρ_u ——一个段塞单元的流体平均密度, kg/m^3 。

计算模型的边界条件可以描述为:

$$\begin{aligned} v_{lf} |_{x=0} &= v_{ls} \\ v_{gf} |_{x=0} &= v_{DB} \\ H_{lf} |_{x=0} &= H_{ls} \end{aligned} \quad (22)$$

由式(14)~式(20)求解液塞段至平衡点的液膜含液率和液膜速度等参数, 循环求解的约束条件有以下两个。

(1) 液膜含液率大于平衡液膜含液率。

(2) 式(20)不成立。

四、改进模型计算步骤

在已知管径 D 、坡度 β 、气液物性参数和初始流量的情况下, 计算段塞流特性参数的步骤如下。

(1) 用 Taitel & Dukler^[6] 或 Xiao 流型判断方法^[5], 确定气液两相流是否处于段塞流区域。

(2) 对于管内段塞流, 用式(1)~式(6)计算出液塞区 H_{ls} 、 L_s 等参数, 由式(13)计算 v_{BF} 。

(3) 按分层流计算方法, 用联合动量方程^[7] 计算 H_{lfe} 、 v_{fe} , 作为液膜高度渐变模型计算的初值。

(4) 给液膜长度一个增量, 由式(14)~式(20)逐次计算各段液膜区特性参数, 直到不满足两个约束条件之一。

(5) 用式(21)计算段塞单元的压降。

五、算 例

西部某油田一段油气混输管道, 管内径为 259 mm, 管道倾角为 3° , 平均压力为 1.0 MPa, 平均温度为 44°C , 产油量为 $0.0082\text{ m}^3/\text{s}$, 原油相对密度为 0.86, 标准状况下天然气输量为 $3.87\text{ m}^3/\text{s}$, 相对密度为 0.8, 试计算段塞流特性参数。经两相流工艺计算软件 TFTCS 计算, 液塞、Taylor 泡/液膜长度分别为 81.94 m 和 781.9 m, 管道单位长度压降为 0.72 kPa/m , 液塞、平衡液膜持液率分别为 0.538、0.169, 液膜区平均持液率为 0.213, 与清管集液量反算的截面持液率基本一致。液膜高度、速度、含液率与距平衡点的距离之间的关系见图 2~图 4。

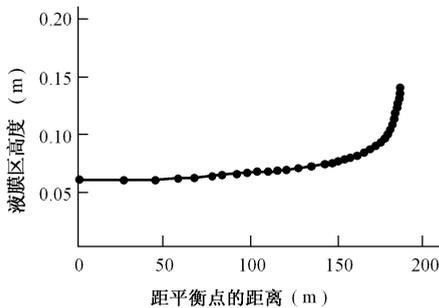


图 2 液膜高度变化曲线

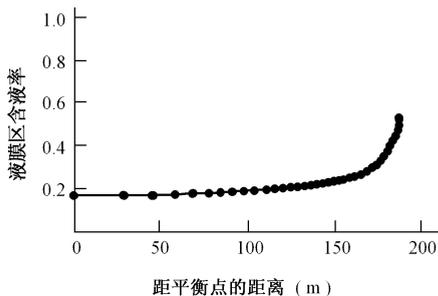


图 3 液膜区含液率变化曲线

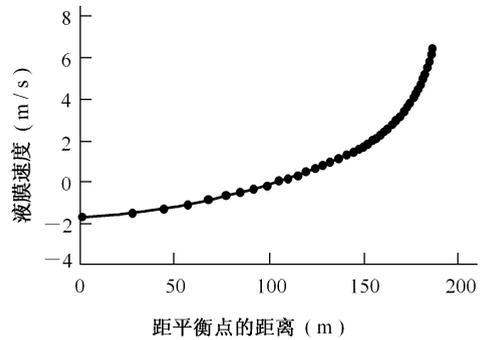


图 4 液膜速度变化曲线

综上所述可以得出以下结论。

(1) 在由一系列以恒定平移速度运动的相同单元组成的假设条件下, 提出了一个水平或小倾角管油气两相段塞流的理论计算模型, 用实例对部分参数进行了计算。计算结果在理论上适合于段塞流特性参数的预测。

(2) 基于 UNIT CELL 模型的共同点, 都需要用经验关系式求液塞区流动参数, 计算式的选择直接影响到特性参数和压降计算的准确度。依据文献的最新资料对相关计算式进行了筛选, 并给出了液膜区参数的耦合算法。

(3) 算例计算表明, 段塞流液膜速度、高度、液膜区含液率等特性参数, 随着距平衡点距离的增加, 其值随之增大, 越靠近液塞区附近, 变化幅度越明显, 与采用的液膜高度渐变物理模型的特点相吻合。

参 考 文 献

1. Abdual-Majeed G H & Ali-Mashat A M: A Mechanistic Model for Vertical and Inclined Two-Phase Slug Flow, SPEJ., 2000, 27 59~67.
2. Scott S L, Shoham O & Brill J P: Prediction of Slug Length in Horizontal Large-diameter Pipes, SPEPE, 1989 (Aug), 4, 335~340.
3. Scott S L & Kouba G E: Advances in Slug Flow Characterization for Horizontal and Slightly Inclined Pipelines, SPE 20628, 1990.
4. Hasan A & Kabir C: Two Phase Flow in Vertical and Inclined Annuli, Int. J. Multiphase Flow, 1992, 8 273~293.
5. Xiao J J, Shoham O & Brill J P: A Comprehensive Mechanistic Model for Two phase Flow in Pipeline, SPE 20631, 1990.
6. Taitel Y & Dukler A E: A model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Flow, AIChE J., 1976, 22(1) 47~55.
7. 冯叔初等: 油气集输, 石油大学出版社(东营), 1994.

(收稿日期: 2002-08-12)

编辑: 刘春阳