

# 加聚合物型减阻剂环状流摩阻系数 新显式方程

李 雷<sup>1</sup> 代晓东<sup>1,2</sup> 郝勇超<sup>1</sup>

1. 中国石油大学胜利学院油气工程学院, 山东 东营 257000;

2. 中国石油大学国家大学科技园博士后工作站, 山东 东营 257100

**摘要:**向输油管道中加入聚合物型减阻剂是实现管道输送降本增效目标的有效方法。针对准确预测加入聚合物型减阻剂环状流摩阻系数的问题,通过对前期实验数据进行量纲分析和曲线拟合,基于边界层的对数速度分布和幂律分布推导了新显式方程。再采用最小二乘法对新显式方程进行校准,对加入聚合物型减阻剂的气液混合物进行摩阻系数预测,以减阻率为衡量标准,将计算结果与实验数据和 Al-Sarkhi 的计算结果进行比较,可知新显式方程对实验数据拟合度更好,并且随着气体表观速度的增大,减阻率预测值逐渐减小。

**关键词:**聚合物型减阻剂;环状流;摩阻系数;曲线拟合;最小二乘法

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.06.001

## New Friction Coefficient Explicit Equation of Annular Flow with Polymer Drag Reducer

Li Lei<sup>1</sup>, Dai Xiaodong<sup>1,2</sup>, Hao Yongchao<sup>1</sup>

1. College of Petroleum Engineering, Shengli College, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257000 China;

2. Post-Doctoral Working Station of National University Science Park, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257100, China

**Abstract:** Adding polymer drag reducer into the oil pipeline is an effective method to achieve the goal of reducing the resistance and consumption. In order to predict the friction coefficient of the annular flow with polymer drag reducer, the dimensional analysis and curve fitting were carried out through the previous experimental data, and the new explicit equation was derived based on the logarithmic velocity distribution and power law distribution of the boundary layer. Then, the equation was calibrated by the least square method, and the friction coefficient was predicted for the gas-liquid mixture with polymer drag reducer. Taking the drag reduction rate as scale standard, the calculation results were compared with the experimental data and the results of Al-Sarkhi, and it was found that the explicit equation had better experimental data fitting and the mean absolute percentage error is reduced to 0.062. The results

收稿日期:2018-01-19

基金项目:山东省高等学校科技计划项目“聚 $\alpha$ 烯烃油品减阻剂机械降解规律及其构效关系研究”(J16LC60);山东省博士后基金项目“抗剪切功能化纳米复合减阻剂开发、评价及应用基础研究”;东营市科技计划“功能化纳米复合减阻新材料合成与应用技术研究”(2017ZDCX08)

作者简介:李雷(1990-),男,山东东营人,助教,硕士,主要从事数值模拟工作。

also showed the predicted value of drag reduction rate decreased with the increase of superficial gas velocity.

**Keywords:** Polymer drag reducer; Annular flow; Friction coefficient; Curve fitting; Least square method

## 0 前言

专家预计,“十三五”末中国长距离输送油气管道总长度将超过  $16 \times 10^4 \text{ km}^{[1]}$ 。在控制成本的前提下,需要满足一定输送量的同时还必须保持一定的输送压力。总之,如何实现管道输送降本增效的目标是一个难题,而向输油管道中加入聚合物型减阻剂是解决该问题的有效途径<sup>[2]</sup>。摩阻系数的准确预测决定着其他设计参数,比如管路压降。在石油与天然气工业中,普遍存在管内气液两相流,由于气体速度较快,一般情况下均形成环状流<sup>[3]</sup>。因此,预测加入聚合物型减阻剂环状流摩阻系数具有重要意义。

对于层流,摩阻系数是雷诺数的函数,但是对于湍流,摩阻系数是相对表面粗糙度和雷诺数的复合函数。Blasius H<sup>[4]</sup>提出了第一个摩阻系数关系式,主要用于光滑管壁数据的曲线拟合,该方程的适用范围为雷诺数小于  $1 \times 10^5$ 。普朗特基于光滑管对数速度分布和实验数据推导出了一个更精确的方程<sup>[5]</sup>,该方程的适用范围为雷诺数大于 4 000,由于该方程是隐式方程,因此需要进行迭代求解。但最新研究表明,普朗特摩阻系数关系式的常数不适合外推至高雷诺数,因此 McKeon B J 等人<sup>[6]</sup>又提出了一个新式摩阻系数方程。Nikuradse J<sup>[7]</sup>对湍流管流进行了详细研究,提出了一个计算粗糙管壁摩阻系数的近似方程。许多学者也提出了多种适用于过渡粗糙区的公式<sup>[8]</sup>。自 21 世纪以来,针对摩阻系数的计算问题部分学者引入了隐式函数<sup>[9-10]</sup>。例如,针对计算管流和槽流中光滑/粗糙壁面湍流摩阻系数,Avci A 等人<sup>[9]</sup>提出了一个基于对数速度分布的显式方程,并且利用已发表文章中的实验数据确定了该模型的常量。Shyam SS 等人<sup>[11]</sup>基于神经网络方法,建立了一个计算塑性流体在层流/湍流条件下的摩阻系数的显式方法。Taler D<sup>[12]</sup>提出了最常用的光滑管摩阻系数的显式关系式。

将少量聚合物加入到输油管路中会显著降低管路的摩阻系数,一般将此类添加剂称为聚合物型减阻剂。一些研究人员对该现象进行了研究。例如,Manfield 等人<sup>[13]</sup>对多相流中减阻剂的减阻作用进行了综述。Oliver D R 等人<sup>[14]</sup>首次进行了气液两相流的减阻实验。Greskovich E J 等人<sup>[15]</sup>将聚合物型减阻剂引入多相流中,研究结果表明在气水段塞流中减阻率达到 40 %。

Al-Sarkhi A 等人<sup>[16]</sup>研究了在管内气水环状流中加入一种新型聚合物后在降低界面波方面的影响。

针对单相流中摩阻系数的计算,已经积累了大量的研究经验,但针对环状流摩阻系数的计算研究较少<sup>[17-19]</sup>。本文将通过对已公布的实验数据进行量纲分析和曲线拟合,基于边界层中对数速度分布和幂律分布推导一种适用于环状流的新显式方程。

## 1 摩阻系数预测模型

### 1.1 控制方程

在充满流体的均匀直径圆管中,流体粘滞效应导致的压力损失与管长成比例,压力损失可以通过达西公式来计算<sup>[20]</sup>:

$$\Delta p/L = f \frac{\rho}{2} \frac{u_m^2}{D} \quad (1)$$

式中: $\Delta p/L$  表示单位长度的压力损失,Pa/m; $\rho$  表示流体的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $u_m$  表示平均流速, $\text{m}/\text{s}$ ; $f$  表示摩阻系数; $D$  表示管道直径,m。

摩阻系数由某些参数确定,并且不是一个常量,例如输油管路的表征参数(直径、粗糙高度),流体性质(运动黏度),流体流速。可以将摩阻系数方程应用于不同类型的流动,包括层流,过渡区,光滑/粗糙管完全湍流和自由表面流。圆管层流摩阻系数方程为:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

式中: $Re$  为雷诺数。

加入聚合物型减阻剂,可以减少垂直于壁面方向上气液两相流的雷诺剪应力和速度脉动。对于不加入和加入聚合物型减阻剂的气液混合物摩阻系数  $f_m$ 、 $f_{MD}$  分别见式(3)和式(4):

$$f_m = \frac{(\Delta p/L)D}{(1/2)\rho_m u_m^2} \quad (3)$$

$$f_{MD} = \frac{(\Delta p/L)_D D}{(1/2)\rho_m u_m^2} \quad (4)$$

许多学者提出了两相流摩阻系数预测公式。例如,Al-Sarkhi<sup>[16]</sup>提出式(5):

$$f_{MD} = 3.36 \times 10^{-7} \frac{D_0}{D} \left( Re_m \left( \frac{V_{sg}}{V_{sl}} \right)^{0.5} \right)^{0.595} \quad (5)$$

式中: $V_{sg}$  为气相速度, $\text{m}/\text{s}$ ; $V_{sl}$  为液相速度, $\text{m}/\text{s}$ 。

本研究的目的是针对加入聚合物型减阻剂的环状流,建立一个预测其摩阻系数准确度更高的新型公式。

## 1.2 数学模型

边界层中的对数速度分布和幂律分布是摩擦系数方程的基础,管内典型速度剖面见图1。

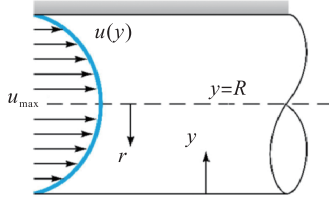


图1 管内典型速度剖面

重叠区中速度呈对数变化,该层称为对数重叠层<sup>[11]</sup>。

$$\frac{u}{u_{\tau}} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{yu_{\tau}}{\nu_1} \right) + B \quad (6)$$

式中: $u_{\tau} = \sqrt{\tau_w / \rho_1}$ 为摩擦速度, m/s;  $\tau_w$ 为壁面剪切力, MPa;  $k$ 为卡门常数,  $\nu_1$ 为流体的运动黏度,  $m^2/s$ ;  $B$ 为湍流流经光滑不渗透壁面的常量。假定速度分布为对数和幂律的组合<sup>[11]</sup>,则:

$$\frac{u}{u_{\tau}} = K \left( \ln \left( \frac{(R-r)u_{\tau}}{\nu_1} \right) + p \right)^N \quad (7)$$

式中: $y = R - r$ ,  $K$ ,  $N$ 为实验确定的常数。

假设式(7)中 $r=0$ ,最大速度可通过式(8)计算:

$$\frac{u_{\max}}{u_{\tau}} = K \left( \ln \left( \frac{Ru_{\tau}}{\nu_1} \right) + p \right)^N \quad (8)$$

由于计算环状流的摩擦系数前需要确定速度分布,因此为了获得管内平均流速,应对式(7)进行积分。但由于对该方程的积分较困难,因此假设平均流速 $u_m$ 是最大速度的一部分,尽管式(8)中针对各种流动的常量取值不同,但是平均速度仍具有相同的格式,因此平均流速可通过式(9)描述:

$$\frac{u_m}{u_{\tau}} = a \left( \ln \left( \frac{Re_m}{\beta} \right) \right)^b \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = \frac{16a_1^{-2}}{\left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1} \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)^{2b}} \sum_{i=1}^n \left[ f_{MDE_i} - \frac{8}{a_1 \left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1} \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)^{2b}} \right] = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_2} = 2 \sum_{i=1}^n \left[ f_{MDE_i} - \frac{8}{a_1 \left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1} \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)^{2b}} \right] \frac{16b}{a_1 a_2 \left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1}} \times \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)^{-2b-1} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n \left[ f_{MDE_i} - \frac{8}{a_1 \left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1} \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)^{2b}} \right] \frac{16b}{a_1 \left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1}} \times \ln \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right) e^{-2b \ln \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)} = 0 \quad (17)$$

式中: $u_m = V_{sl} + V_{sg}$ ,  $Re_m = \frac{u_m D}{\nu_1}$ 。式(8)中的 $\frac{Ru_{\tau}}{\nu_1}$ 项是雷诺对数函数的近似形式。

针对加入聚合物型减阻剂的气液混合物,利用量纲分析确定达西公式中的摩擦系数<sup>[11]</sup>:

$$f_{MD} = 8 \frac{\tau_w}{\rho_1 u_m^2} \quad (10)$$

引入 $\tau_w = \rho_1 u_{\tau}^2$ ,式(10)改写为:

$$f_{MD} = 8 \frac{u_{\tau}^2}{u_m^2} \quad (11)$$

将式(9)与式(11)联立得:

$$f_{MD} = \frac{8}{a^2 \left( \ln \left( \frac{Re_m}{\beta} \right) \right)^{2b}} \quad (12)$$

式(12)适用于 $2.4 \times 10^5 < Re_m < 4 \times 10^6$ 范围内的槽/管内湍流,同时也符合光滑管普朗特摩擦定律。在加入聚合物型减阻剂的气液混合物中 $D_0$ 、 $D$ 、 $V_{sg}$ 、 $V_{sl}$ 、 $u_m$ 和 $\nu_1$ 是重要参数。因此,利用这些参数和量纲分析可以推导出一些无量纲参数,分别为 $D_0/D$ 、 $(V_{sg}/V_{sl})^{0.5}$ 、 $Re_m$ 。另一方面,比较式(5)和式(12),本文提出参数 $a$ 和 $\beta$ 分别是 $D_0/D$ 和 $(V_{sg}/V_{sl})^{0.5}$ 的函数。将这些参数代入式(12)可得:

$$f_{MD} = \frac{8}{a_1 \left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1} \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)^{2b}} \quad (13)$$

式中:系数 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $b$ 由实验数据和最小二乘法得到。在该方法中,参数 $S$ 由式(14)定义:

$$S = \sum_{i=1}^n \left( f_{MDE_i} - \frac{8}{a_1 \left( \frac{D_0}{D} \right)^{-1} \left( \ln \left( a_2 \frac{Re_m}{(V_{sg}/V_{sl})^{-0.5}} \right) \right)^{2b}} \right)^2 \quad (14)$$

式中: $n$ 为实验数据编号; $f_{MDE}$ 为加入聚合物型减阻剂的气液混合物的实验摩擦系数。

最小二乘法中,参数 $S$ 对参数 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $b$ 分别求导如下:

同时联立式(15)~(17)求解,求得 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $b$ , $a_1 = 1.319 \times 10^{20}$ 、 $a_2 = 158$ 、 $b = -6.4$ ,将 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $b$ 代入式(13)得,加入聚合物型减阻剂气液混合物的计算摩擦系数 $f_{MDp}$ :

$$f_{MDp} = 6.02 \times 10^{-20} \left( \frac{D_0}{D} \right) \ln \left( 158 \times Re_m \left( \frac{V_{sg}}{V_{sl}} \right)^{0.5} \right)^{12.8} \quad (18)$$

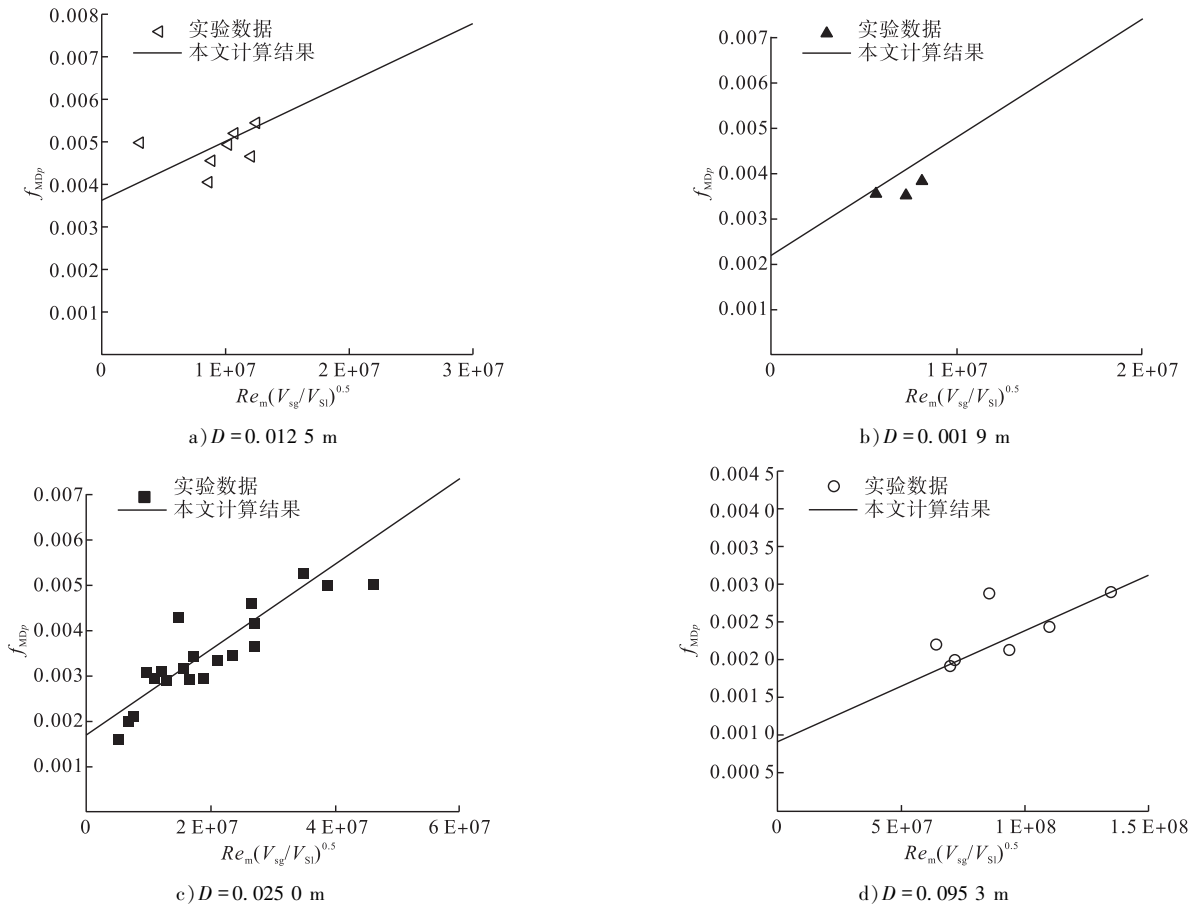


图2 不同管径对应的 $f_{MDp}$ 与 $f_{MDE}$

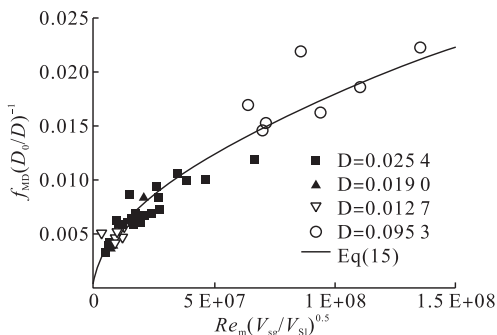


图3  $f_{MD}(D_0/D)^{-1}$ 预测值与实验数据的对比

## 2 结果分析

针对加入聚合物型减阻剂的气液混合物,利用Al-Sarkhi( $f_{MDAL}$ )计算 $f_{MDp}$ 和摩擦系数,并与 $f_{MDE}$ <sup>[17]</sup>相比较,结果见图4。 $f_{MDp}$ 和 $f_{MDE}$ 之间的拟合度要好于 $f_{MDAL}$ 和 $f_{MDE}$ 。计算结果的平均绝对百分比偏差与标准差见表1,同

## 1.3 模型的验证

不同管径对应的 $f_{MDp}$ 与 $f_{MDE}$ 见图2。针对不同直径的输油管路,利用式(16)计算加入聚合物型减阻剂的气液混合物混合摩擦系数 $f_{MDp}$ ,并且基于图2中的实验数据<sup>[17]</sup> $f_{MDE}$ 验证计算结果。此外,引入参数 $f_{MD}(D_0/D)^{-1}$ 与实验数据进行对比,计算结果与实验数据拟合度较好,见图3。

时也表明了利用式(16)计算的精度。减阻率 $DR$ 定义为使用聚合物型减阻剂 $DRP(f_{MDp})$ 的摩擦系数减少值与不使用聚合物型减阻剂 $DRP(f_m)$ 的摩擦系数之比值:

$$DR \% = \frac{f_m - f_{MDp}}{f_m} \times 100 \quad (19)$$

式中: $f_m$ 和 $f_{MDp}$ 分别利用式(3)与式(18)进行计算。

将与气体流速和液体流速对应的减阻率变化量分别与图5~6中的实验数据<sup>[16]</sup>进行比较。结果表明本研究得出的结果与环状流(高 $V_{sg}$ )中的实验数据拟合度较好。

表1 基于平均绝对百分比误差与标准差对比 $f_{MDp}$ 和 $f_{MDAL}$

项目	平均绝对百分比误差	标准差
$f_{MDAL}$	0.103	0.09
$f_{MDp}$	0.062	0.089

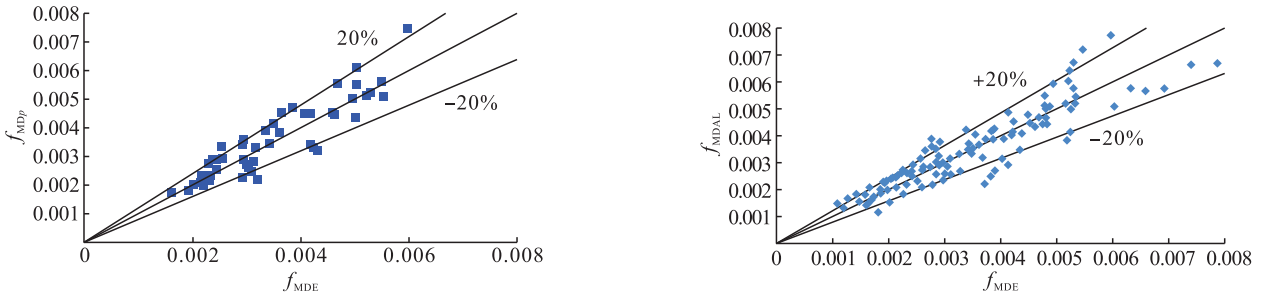


图 4 随  $f_{MDE}$  增大的  $f_{MDp}$  与  $f_{MDAL}$  的对比

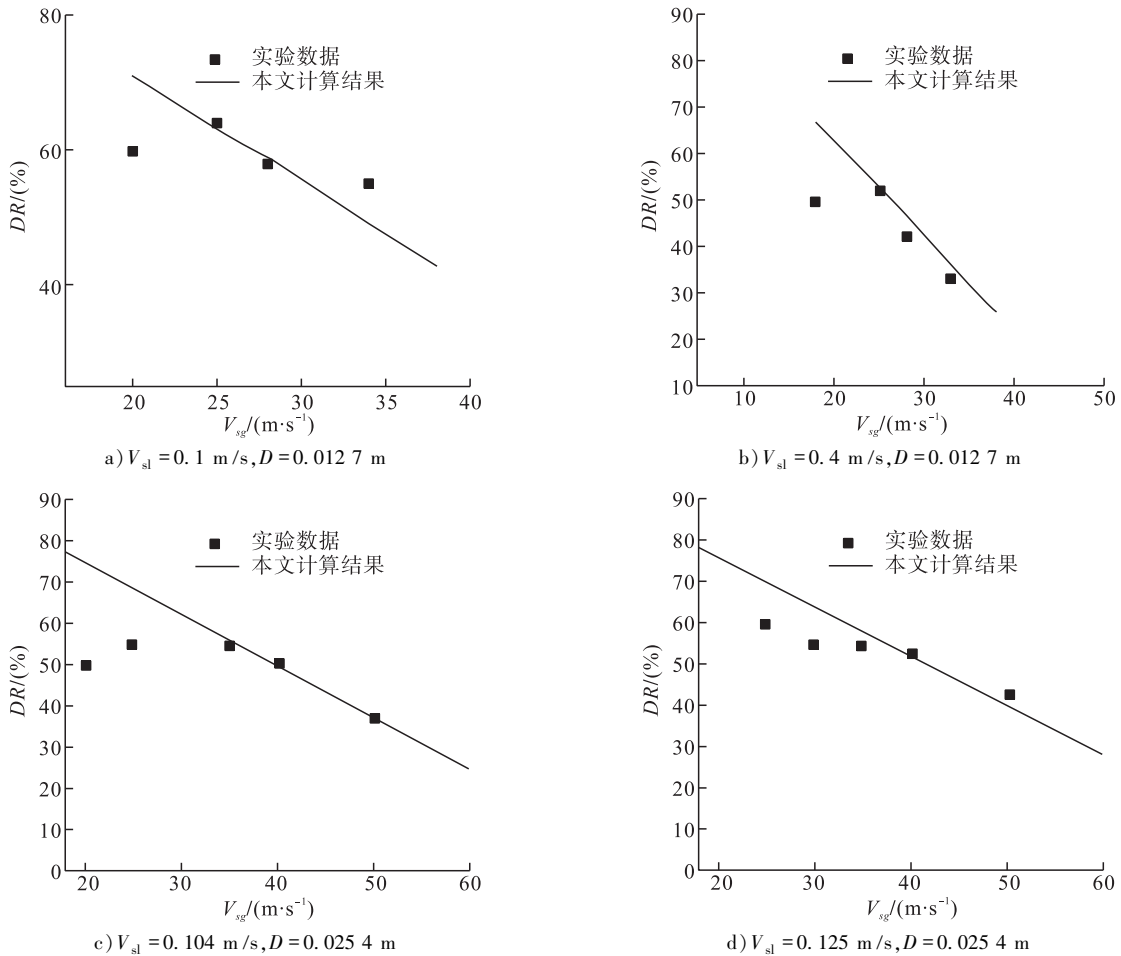


图 5 对比不同气体表面流速  $V_{sg}$  和管径  $D$  条件下的减阻率  $DR$  估算值与实验数据

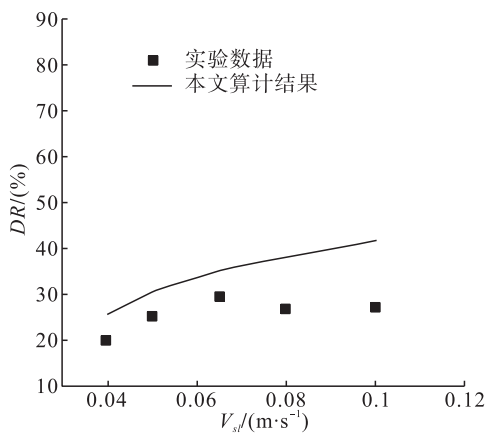


图 6 当  $V_{sg} = 38 \text{ m/s}$ ,  $D = 0.0127 \text{ m}$  时, 对比不同液体流速 ( $V_{sl}$ ) 下的  $DR$  估算值与实验数据

### 3 结论

1) 针对加入聚合物型减阻剂的环状流, 通过对已发布的实验数据使用量纲分析和曲线拟合, 推导了预测其摩擦系数的新显式方程, 该方程基于边界层的对数速度分布和幂律分布, 计算结果与实验数据对比表明两者的拟合度较好。

2) 比较本文计算结果和 Al-Sarkhi 的计算结果, 可知  $f_{MDp}$  和  $f_{MDE}$  之间的拟合度要好于  $f_{MDAL}$  和  $f_{MDE}$ 。针对环状流(高流速), 将对应于气体表面流速  $V_{sg}$  的减阻率  $DR$  变化量与实验数据进行比较, 本文计算结果与实验数据之间的拟合度较好, 并且减阻率  $DR$  随着气体表面流速  $V_{sg}$  的增加而逐渐减小, 新显式方程可用于准确预测环状流

摩阻系数,有助于加强对管道输送能力的控制。

参考文献:

- [1] 天工. 科技支撑中国油气管道建设升级[J]. 天然气工业, 2014, 34(11): 114.  
Tian Gong. Technology Supports China in Oil-Gas Pipeline Construction and Upgrading [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (11): 114.
- [2] 倪先锋. 锦州 25-1 南油气田海底输油管道减阻增输技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2013.  
Ni Xianfeng. Research on the Drag Reduction and Transportation Increasing Technology in Jinzhou 25-1S Oil and Gas Field Subsea Pipelines [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [3] Al-Sarkhi A. Effect of Mixing on Frictional Loss Reduction by Drag Reducing Polymer in Annular Horizontal Two-Phase Flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 39: 186 - 192.
- [4] Blasius H. Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen [J]. Flüssigkeiten, 1913, 131: 1 - 41.  
Blasius H. The Similarity of Stationary Channels [J]. Fluid, 1913, 131: 1 - 41.
- [5] Prandtl L. Führer durch die Strömungslehre [J]. Zeitschrift Naturforschung Teil A, 1949, 4: 317.  
Prandtl L. Guide to Flow Mechanism [J]. Nature, 1949, 4: 317.
- [6] Mckee B J, Zagarola M V, Smits A J. A New Friction Factor Relationship for Fully Developed Pipe Flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 538 (1): 429 - 443.
- [7] Nikuradse J. Laws of Turbulent Flow in Smooth Pipes [J]. Regularity of Turbulent Flow in Smooth Pipes, 1932, 62: 112 - 127.
- [8] Moody L F. An Approximate Formula for Pipe Friction Factors [J]. Trans ASME, 1947, 69: 1005 - 1006.
- [9] Avci A, Karagoz I. A Novel Explicit Equation for Friction Factor in Smooth and Rough Pipes [J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131 (6): 061203.
- [10] Wood D J. An Explicit Friction Factor Relationship [J]. Civil Engineering, 1966, 36: 60 - 61.
- [11] Shyam S S, Walid H S, Anvar K. Explicit Calculation of the Friction Factor in Pipeline Flow of Bingham Plastic Fluids: A Neural Network Approach [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58 (1): 99 - 106.
- [12] Taler D. Determining Velocity and Friction Factor for Turbulent Flow in Smooth Tubes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 105: 109 - 122.
- [13] Gyr A, Bewersdorff H W. Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives [J]. Fluid Mechanics & Its Applications, 1995, 2011, (12): 132 - 137.
- [14] Oliver D R, Young-Hoon A. Two-Phase Non-Newtonian Flow. Part I: Pressure Drop and Holdup [J]. Transactions IChemE, 1968, 46 (a): 106 - 115.
- [15] Greskovich E J, Shrier A L. Pressure Drop and Holdup in Horizontal Slug Flow [J]. AIChE Journal, 1971, 17 (5): 1214 - 1219.
- [16] Al-Sarkhi A, Soleimani A. Effect of Drag Reducing Polymers on Two-Phase Gas-Liquid Flows in a Horizontal Pipe [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82 (12): 1583 - 1588.
- [17] 苑伟民. 摩阻系数方程对比研究[J]. 天然气与石油, 2014, 32(6): 21 - 24.  
Yuan Weimin. Comparative Study on Friction Factor Equations [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (6): 21 - 24.
- [18] 徐嘉爽, 唐 恂, 李海润. 基于 SPS 软件的原油管道水力摩阻分析[J]. 天然气与石油, 2013, 31(1): 13 - 16.  
Xu Jiashuang, Tang Xun, Li Hairun. Analysis on Hydraulic Friction in Crude Oil Pipeline Based on SPS [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (1): 13 - 16.
- [19] 魏振堃, 蒋 明, 李国栋. 管线沿程摩阻系数计算的研究历程及发展趋势[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2016, 30(7): 59 - 63.  
Wei Zhenkun, Jiang Ming, Li Guodong. Study Course and Development Trend of Pipeline Friction Factor Calculation [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2016, 30 (7): 59 - 63.
- [20] Al-Sarkhi A, Nakla M E, Ahmed W H. Friction Factor Correlations for Gas-Liquid/Liquid-Liquid Flows with Drag-Reducing Polymers in Horizontal Pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37 (5): 501 - 506.