

管内弹粘塑性液体流变特性研究

Mirza A. Dadash-Zade¹, 曹茹^{2*}

¹阿塞拜疆国立石油与工业大学 阿塞拜疆巴库

²阿塞拜疆国立石油与工业大学 甘肃天水

【摘要】许多流体动力学过程都与液体特性息息相关,而液体的机械和物理特性可以通过建立不同模型来描述,通过研究相关的模型,可以描述部分流体力学的过程。本文通过建立一个力学模型,定性分析不同系统中发生的形变过程,用来研究连续介质运动的封闭理论,特别是应力和应变之间的运动。常见的力学模型有:弹性模型、粘性模型和塑性模型,而力学模型是以胡克定律为理论依据,建立相关模型来显示弹性体的力学状态。实践表明,有更为复杂的流体不遵守这一定律,这些流体之一是弹粘塑性流体。本研究通过建立一个力学模型来描述液体的弹粘塑性特性。通过计算弹粘塑性流体的总应力,即计算弹性变形对应的应力与粘塑性阻的方程,用于计算部分管道的速度和给定液体的体积流量。计算表明,随着可压缩性的增加,液体的流速部分增加,从而在所提出的模型的基础上,使得在考虑体积弹性膨胀系数的情况下,模型仍具有积极的效果。

【关键词】弹性;粘塑性;弹性膨胀;变形;表面活性剂

【收稿日期】2024 年 5 月 10 日

【出刊日期】2024 年 6 月 20 日

【DOI】10.12208/j.aes.20240012

Rheological properties of elastoviscoplastic liquid in tubes

Mirza A. Dadash-Zade¹, Ru Cao^{2*}

¹Azerbaijan State University of Petroleum and Industry Baku, Azerbaijan

²Azerbaijan State University of Petroleum and Industry, Tianshui, Gansu

【Abstract】 Many fluid dynamic processes are closely related to the characteristics of liquids, and the mechanical and physical properties of liquids can be described by establishing different models, through the study of relevant models, part of the fluid dynamics process can be described. In this paper, a mechanical model is established to qualitatively analyze the deformation process occurring in different systems, which is used to study the closed theory of continuum motion, especially the motion between stress and strain. The common mechanical models are elastic model, viscous model and plastic model, and the mechanical model is based on Hooke's law to establish a relevant model to show the mechanical state of the elastic body. Practice has shown that there are more complex fluids that do not obey this law, and one of these fluids is an elastic-viscoplastic fluid. In this study, a mechanical model is established to describe the elasto-viscoplastic properties of liquids. By calculating the total stress of elasto-viscoplastic fluid, that is, the equation of calculating the stress corresponding to elastic deformation and viscoplastic resistance, it is used to calculate the velocity of some pipes and the volume flow of given liquid. The results show that with the increase of compressibility, the flow rate of the liquid partially increases. Based on the proposed model, the model still has a positive effect when the coefficient of volumetric elastic expansion is considered.

【Keywords】 Elasticity; Viscoplastic; Elastic expansion; Metamorphosis; Surfactant

1 引言

由于石油本身的物化性质,即其具有高粘性,

弹性和塑性流体的性质,并不能通过普通力学公式计算。本文通过建立相关力学模型,计算部分管道

*通讯作者:曹茹

的流量和速度，找到影响其生产效率的因素，采取相应措施，达到提高生产率的目的。

目前，在中国，阿塞拜疆以及其他国家，管内弹粘塑性液体流变特性的研究是一个活跃的研究领域。许多研究探索了这些流体的流动行为、材料表征和建模。在阿塞拜疆及其他国家，研究小组致力于开发先进的实验技术，例如微流体和流变光学，以研究微通道和弯曲几何形状中的流动行为。利用计算流体动力学(CFD)模拟来预测流动特性也引起了人们的关注。

管中弹粘塑性液体的流变行为也引起了各个行业的极大兴趣，包括聚合物加工、石油开采和生物医学工程。弹粘塑性流体表现出独特的特性，结合了弹性、粘性和塑性行为，这使得它们在管中的流动特性与传统牛顿流体显著不同。了解并准确表征其流变特性对于优化这些行业的工艺设计、预测流动行为和提高产品质量至关重要。

研究管内弹粘塑性液体的流变特性同时具有重要意义。它可以开发精确的数学模型和模拟工具，帮助预测和控制这些流体的流动行为。这反过来又提高了工艺效率、降低了生产成本并提高了产品质量^[1]。此外，了解管中弹粘塑性液体的流变行为可以指导设计专门的装置和设备，以有效地处理这些复杂的材料。

所以，管内弹粘塑性液体流变特性的研究是中国油气田开采研究上的一个重要而活跃的领域。人们正在努力了解流动行为、表征材料并开发可靠的模型和模拟。本文通过建立弹性元件和粘塑性元件串联的模型，通过计算弹性变形对应的应力与粘塑性阻力引起的应力之和，建立力学模型，以更好地理解和控制各种工业过程中弹粘塑性流体的流动行为，对石油开采产生积极影响。

2 研究方法 with 模型建立

众所周知，各种液体的机械性能可以通过各种模型来描述。这些模型使得定性描述各种系统中发生的变形过程成为可能。我们注意到，为了构建介质运动的封闭理论，必须知道粒子的运动学和动态状态之间的关系，特别是可以使用力学模型来表达的应力和应变之间的关系。请注意，简单模型包括弹性模型、粘性模型、塑性模型。在这种情况下，需要使用胡克定律来表达弹性体的力学状态方程。然

而，还有更复杂的液体。这些流体之一是弹粘塑性流体。

在早期的作品^[1-8]中，提出了最简单的力学模型，说明了粘性、弹性和塑性体的力学状态方程。通过结合这些数据以及最简单的模型，可以描述各种复杂的环境。

因此，弹粘塑性介质可以通过弹性元件和粘塑性元件串联的模型来表征(图 1)。我们使用 Maxwell 模型,从图中可以看出在 $\sigma_T = 0$ 时,对于这种介质,总应力将是弹性变形对应的应力与粘塑性阻力引起的应力之和。

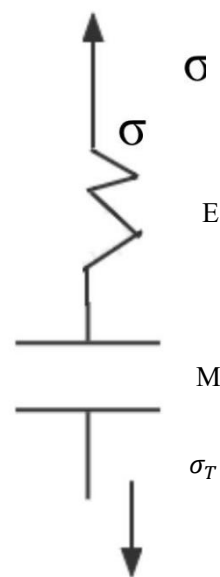


图 1 弹粘塑性流体力学模型

此研究是为了确定弹粘塑性流体在管道内的主要性质。随着凝析油井深度的增加，井底温度和压力显著升高，对冲洗液、油井水泥和非牛顿油的物理化学性质产生积极影响。

大量研究表明，一些与弹粘塑性介质有关的流体不遵守牛顿定律。变形行为具有反常弹粘塑性流体的最充分特征在于三个参数：可压缩性，结构粘度和极限剪切应力。

为了解决这个问题，我们考虑弹粘塑性流体在圆柱形管道中的直线静止运动。在这种情况下，在解决问题以及确定液压阻力时，不考虑初始部分所产生的影响。根据可压缩流体的线性运动定律，在一维运动中，流体膨胀的体积为：

$$\beta = -\frac{dV}{Vd\rho} \quad (1)$$

其中 β 为体积弹性膨胀系数, V 为可压缩液体的体积。由于

$$V = \frac{m}{\rho},$$

其中 m 为所考虑液体的质量, ρ 为可压缩流体的密度。所以,

$$dV = -\frac{md\rho}{\rho^2} \quad (2)$$

联立(1),(2), 可知

$$\beta = \frac{d\rho}{\rho d\rho} \quad (3)$$

故可以定义压力梯度为:

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{1}{\beta\rho} \frac{d\rho}{dx} \quad (4)$$

其中 $\frac{d\rho}{dx}$ 表示为压力梯度。

从而已知的 Shvedov-Bingham 博士的方程可以改写为:

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dr} + \tau_0 \quad (5)$$

其中 τ 为切向剪应力, τ_0 为初始剪切应力。

鉴于上述情况, 我们可以计算出作用在圆柱形流体单元上的力的平衡力为:

$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi r \tau dx \quad (6)$$

所以根据上面的式子, 我们求解压力梯度的最终方程和 Shvedov 方程:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2}{r} (\tau_0 - \mu \frac{dv}{dr}) \quad (7)$$

其中 $\frac{dv}{dr}$ 为剪切速度梯度。

联立(4)式求解得:

$$\frac{1}{\beta\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} = \frac{2}{r} (\tau_0 - \mu \frac{dv}{dr}) \quad (8)$$

其中: v ——流体速度;

为了确定管道中流体的运动, 我们求解以下速度方程:

$$dv = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{2\rho\beta} \cdot \frac{d\rho}{dx} r - \tau_0 \right) dr \quad (9)$$

在从核心半径 (r) 到管道半径 (R) 的范围内对

该方程进行积分, 我们得到以下表达式:

$$v = \frac{1}{\mu} \left[\frac{1}{4\rho\beta} \cdot \frac{d\rho}{dx} (R^2 - r^2) - \tau_0 (R - r) \right] \quad (10)$$

考虑到核心和环形空间的体积流量, 可以确定:

$$Q = Q_R - Q_K \quad (11)$$

其中: Q 为体积流量, Q_R 为流动核心的液体流量, Q_K 为流体在核心周围的环空中流动。

联立上式可得:

$$Q = \frac{\pi R^4}{2\mu} \left[\frac{1}{4\rho\beta} \cdot \frac{\Delta\rho}{L} \left(1 - \frac{\Delta p_0^4}{\Delta p^4} \right) + \frac{2\Delta p_0}{3L} \left(\frac{\Delta p_0^3}{\Delta p^3} - 1 \right) \right] \quad (12)$$

其中 R 为管道半径, Δp 为压力下降, μ 为动力粘度, Δp_0 为给定值时的压降半径为 (R) 的管道中的液体开始移动, L 为管道长度。

根据 Shchelkachev 教授的研究^[5], 我们有:

$$\Delta\rho = \rho_H - \rho_K = \rho_0 \beta \Delta p (1 + \beta \bar{p}), \quad (13)$$

$$\text{其中 } \bar{p} = \frac{p_H + p_K}{2}.$$

因此, 弹粘塑性流体的方程可以写成:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L} \left[\left(1 - \frac{\Delta p_0^4}{\Delta p^4} \right) (1 + \beta \bar{p}) + \frac{4\Delta p_0}{3\Delta p} \left(\frac{\Delta p_0^3}{\Delta p^3} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

其中: \bar{p} 为平均的压力, p_H 和 p_K 分别为初始压力和最终压力, ρ_H 和 ρ_K 分别为管道起点和终点的液体的密度, ρ_0 为大气条件下液体的密度。

当 $\beta = 0$ 时, 我们可以得到 Shvedov-Bingham 公式; 当 $\Delta p_0 = 0$ 时, 我们可以得到 Poiseuille 公式。

所提出的计算模型使得可以计算出许多参数, 即确定平均速度、摩擦水头损失、广义雷诺数。为了简化, 这个方程可以写成:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L} \left[(1 + \beta \bar{p}) - \frac{4\Delta p_0}{3\Delta p} \right] \quad (15)$$

根据 A.Kh.^[9]的研究结果, Zagenn 系数体积和弹性雷诺数的限制之内, 所以石油的为:

$$\beta_H = (7 \div 30) \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{am}}, \text{ 而水的是 } \beta_H = (2.7 \div 5) \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{am}}$$

可以看出, 随着体积弹性膨胀系数的增加, 液体的流速增加。根据可压缩流体的性质, 在某些情况下, 弹性比粘塑性更占主导地位。

3 结论

在中国关于管内弹粘塑性液体流变特性研究涉及聚合物加工、采矿作业和石油钻探等方面。他们

强调了了解此类流体的流变特性对于优化工业流程并确保管道内高效流动的重要性。为了解并准确表征其流变特性对于优化这些行业的工艺设计、预测流动行为和提高产品质量至关重要。所以通过计算本构方程,将应力或应变率与材料特性和流动条件联系起来,建立流变模型,通过对这些模型与对管中弹粘塑性通量进行的流变测试获得的经验观察和测量结果进行比较,证明其可靠性和适用性。

如果所提出的流变模型准确地捕获了观察到的流动行为并与实验数据表现出良好的一致性,则表明该模型充分代表了材料特性和流动条件。该验证为模型预测各种场景或工艺条件下管中弹粘塑性液体流动行为的能力提供了信心。它还证实弹性、粘性和塑性成分之间的相互作用已有效地纳入模型中。

此外,成功的模型验证证明了所提出的用于工艺优化和设计的流变模型的可靠性。它使工程师和科学家能够就选择适当的操作条件和设备规格做出明智的决策,以实现预期的结果。因此,从模型验证中得出的结论可以为管内弹粘塑性流体的优化加工提供见解,从而提高效率、成本效益和产品质量。

此外,模型验证有助于全面了解材料行为、流动机制和基础物理学。通过将模型预测与实验观察进行比较,研究人员可以确定其流变模型的局限性和需要进一步改进的领域。这使他们能够完善和增强模型,纳入额外的复杂性或考虑最初未考虑的因素。从这种迭代中得出的结论可以产生更准确和通用的流变模型,能够捕获管中弹粘塑性液体的更广泛的流动行为。

总之,模型验证是管内弹粘塑性液体流变特性研究论文的一个关键方面。从该验证过程中得出的结论突出了所提出的流变模型准确预测观察到的流动行为并反映弹性、粘性和塑性成分之间复杂相互作用的能力。这些结论确立了模型的可靠性和适用性,有助于工艺优化、设计改进以及对材料行为和流动机制的更深入理解。提出了考虑体积弹性膨胀系数的弹粘塑性流体模型。该模型是弹粘塑性流体

领域最早的工作之一。所获得的结果也可用于考虑多种技术流程。获得了一个方程来确定管道截面上的速度分布和给定液体的体积流量。随着可压缩性的增加,液体流量部分增加,这在某些实际情况下具有积极的影响,这些流变建模方面的创新可以更好地理解和控制各种工业过程中弹粘塑性流体的流动行为。

参考文献

- [1] Dmitriev, N.M., Kadet, V.V. *Hydraulics and Oil and Gas Fluid Mechanics*. Izhevsk, 2020.
- [2] Salavatov, T.Sh., Mustafaev, A.A., Dalashzade, M.A., Mamedova, E.V. *Gas Lift Well Study and Start-up Procedures*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 204; 108832.
- [3] 李伟, 王明. 石油与天然气工程中的流体力学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2021; 350 页.
- [4] 张华, 刘军. 深井钻探技术研究 [J]. *石油学报*, 2020, 41(4); 52-60.
- [5] 陈刚, 赵磊. 气举采油技术的进展 [J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6); 925-932.
- [6] Johnson, K., & Lee, R. (2022). *Advances in Petroleum Physics: Implications for Exploration and Production*. *Petroleum Science and Technology*, 40(2), 112-125.
- [7] Zhang, H., & Liu, Y. (2021). *Recent Developments in the Rheology of Filled Viscoelastic Fluids*. *Rheologica Acta*, 60(3), 315-327.
- [8] Pugh, T., & Smith, J. (2020). *Advances in Gas Lift Well Start-Up Procedures*. *Journal of Petroleum Engineering*, 27(4), 245-258.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS