

判别液体流态的层流稳定性理论

何世明 *

罗德明

虞海生

刘崇建

(西南石油学院)

(西南石油地质局)

(华北石油管理局)

(西南石油学院)

何世明等. 判别液体流态的层流稳定性理论. 天然气工业, 2000; 20(5): 67 ~ 69

摘 要 准确判别井内液体的流态, 对钻井优化设计和施工、保证注水泥顶替质量是非常重要的。文中介绍了以层流稳定性现象理论为基础提出的 5 个使用较广的流态判别准则——雷诺数 (Re)、稳定性参数 Z 、稳定性参数 K 、稳定性参数 X 和稳定性参数 Y 。通过对这 5 个流态判别准则的分析与对比, 认为雷诺数、稳定性参数 Z 与 K 都存在不足, 而稳定性参数 X 、 Y 更具合理性。建议将稳定性参数 X 、 Y 进行推广, 使它们能够用于其它非牛顿液体圆管流、同心环空流、偏心环空流的流态判别。

主题词 流体 层流 稳定性 雷诺数 环形空间流动 钻井

自雷诺 1883 年进行了著名的圆管雷诺实验, 并从实验现象中发现层流与紊流间的临界状态可用临界雷诺数来进行判别以来, 许多学者都从不同角度提出了各种无因次的稳定性参数来进行流态判别。这些稳定性参数都是从具体流动的物理现象入手, 分析与物理现象相关的物理项, 从而得出判别流态的稳定性参数, 因此这些理论一般称为层流稳定性现象理论。虽然这些稳定性参数在数学上不是那么严密, 但是其物理意义相当清楚明了, 并且与实验结果吻合较好, 因此它们在工程中都得到了不同程度的应用。据层流稳定性现象理论提出的判别流态转变的准则主要有: 雷诺提出的雷诺数 Re 、瑞安和约翰逊提出的稳定性参数 Z 、汉克斯提出稳定性参数 K 、Mishra 和 Tripathi 提出的稳定性参数 X 、岳湘安以涡流模型为基础提出的稳定性参数 Y 等。下面评述这些流态判别准则, 及有待深入研究的课题。

雷诺数 (Re)

雷诺数的物理意义为惯性力与粘性力之比。大量的实验证明, 牛顿液体在圆管中流动时, 下临界雷诺数的值 (Re_{cd}) 为 2 100, 而上临界雷诺数则不是一个固定值, 它与实验条件有很大关系。所以一般采用下临界雷诺数作为判别流动状态的标准。对于石油钻井工程, 判断液体流动状态的方法, 一般均以临界雷诺数作为依据。临界雷诺数应该与流体流变性

和流道几何情况有关, 但在通常的应用中常认为临界雷诺数与流道几何情况无关, 即管流与环空流的临界雷诺数取为同一值 (事实上仅有牛顿液体、幂律液体管流的临界雷诺数值有实验依据。而环空流的临界雷诺数则属于外推)。

对于偏心环空雷诺数的研究, 是将偏心环空简化成窄缝流动, 引进形状参数“缝宽”来进行的。偏心后, 用于判别流态的偏心环空临界雷诺数值将如何变化, 目前还不清楚, 因此在应用时通常仍是将偏心环空临界雷诺数值取为相应液体的管流临界雷诺数值。这样处理即把管流临界雷诺数值推广应用于同心环空和偏心环空, 究竟合理与否, 有多大误差, 目前还未见到有关文献报导, 因此这方面还有待于进一步深入研究。(研究思路是配制相应液体在相应流道上做实验, 从而得出相应液体在同心、偏心环空下的临界雷诺数)

文献 [1] 中给出了管流、同心环空流和偏心环空流的雷诺数计算式。由雷诺数计算式可见, 在相同条件下, 偏心环空的雷诺数大于同心环空的雷诺数, 而且偏心度越大, 雷诺数越大。如果同心环空和偏心环空的临界雷诺数都取相同的值, 则偏心环空比同心环空更容易转化为紊流。但事实上, 在偏心环空各间隙处都发生完全紊流是比同心环空发生完全紊流要困难, 并随着偏心度的增大而增大。偏心环空中液体由层流转变到紊流时各间隙处流态的变化

*何世明, 讲师, 1966 年生; 1988 年毕业于西南石油学院钻井专业, 1991 年获硕士学位, 1998 年获石油工程博士学位; 现从事钻井工程、环空流体力学及井眼温度场方面的教学与科研工作。地址: (637001) 四川省南充市西南石油学院石油工程系。电话: (0817) 2642936。

是不一样的,实验研究指出,紊流将首先在偏心环空宽间隙处发生,以宽间隙处的流态转变与同心环空的流态转变相比是偏心环空比同心环空更容易转化为紊流。因此用偏心环空雷诺数来对整个偏心环空的流态转变进行判别欠妥,值得进一步研究。

文献[1]所给的关系式在钻井工程中得到了广泛应用,但有以下几个问题。

(1)它们反映了液体在管内、环空流动的综合情况,而未反映出各层流体的相互关系。

(2)层流过渡到紊流时,不是一开始就发生在管内、环空的整个断面上,而是首先从某一层液体开始,然后逐渐扩展到整个管内、环空。

(3)计算非牛顿流体雷诺数时使用管壁处的视粘度,由于该处的视粘度最小, Re 值最大,而实际情况是,管壁处流体速度为零,不易呈现紊流流动,即用 Re 表示某层液体的流动状态是不完全的;

(4)在推导同心环空、偏心环空雷诺数时,使用了沿阻力表达式:

$$h_f = \frac{L}{D_e} \frac{v^2}{2g}$$

取当量直径 $D_e = D_o - D_i$,但是,同心环空流中还有其它的当量直径表达式^[2],而使用 $D_e = D_o - D_i$ 得出的结果误差可能最大,但由于其简单,因此应用较广。

(5)用偏心环空雷诺数来判别偏心环空完全紊流与同心环空相比与事实不符。在偏心环空宽间隙先发生局部紊流,而窄间隙“滞后”于宽间隙发生紊流。或可能为层流及滞流区。因此不能用偏心环空综合雷诺数来对整个偏心环空断面的流态进行判别。

由于综合雷诺数在判断流态方面的上述缺陷,因此瑞安和约翰逊^[3]在1959年提出用稳定性参数 Z (或分层雷诺数)作为判别流体流动状态的标准。

稳定性参数 Z (或分层雷诺数)

瑞安和约翰逊提出的稳定性参数 Z 是以局部稳定性理论为基础导出的,局部稳定性理论认为流场中存在这样的一些点,其流动稳定性最弱,最易于产生紊动涡。若这些点开始产生紊动涡,便认为流动已由层流转变成紊流。(最易产生紊动涡的点发生紊流,但不能说明整个流动能够完全紊流,只能认为整个流动的部分区域产生局部紊流)。

瑞安和约翰逊将一小扰动施加于运动方程,考察紊动能量的产生与耗散,提出了以二者之比所定

义的一维流动稳定性参数。

$$Z = \frac{r}{w} \frac{du}{dx}$$

牛顿流体在圆管内作层流运动时,管内断面流速分布是抛物线形状。在管中心,液层速度梯度、剪切应力都为零,而速度最大;在管壁处,液层速度梯度与剪切应力达到最大,而速度为零。因此在管中心和管壁处 Z 值都为零, Z 值的最大值必在管中心和管壁之间的某一点处,即可用它来确定紊流的初始点,基本方法是找到 Re 的最大点。引用了牛顿流体圆管流动的临界雷诺数值2100, Z 值小于808,流体处于层流, Z 值大于808,并不能肯定流体完全进入紊流。

自稳定性参数 Z 值提出后,国内外学者已把该参数发展到非牛顿流体、同心环空流和偏心环空流中。

稳定性参数 K

稳定性参数 K 是美国学者Hanks^[5]在1969年将运动方程中动量变化率分解成瞬时增加率、动量传递率变化和角动量变化率。认为紊流的产生与发展的关键取决于角动量与剪应力之间的平衡,其稳定性参数为:

$$K = \frac{|\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{v})|}{|\nabla \cdot \mathbf{v}|}$$

K 值在形式上更具一般性, Z 值仅使用于一维情形,而 K 可用三维情形。

稳定性参数 K 也是一个局部稳定性参数,它是空间流场位置的函数,适用于任何与时间无关的纯粘性流体在任意几何空间中的层流流动。使用参数 K 来判别流动状态的基本思路是:对于某一特定流场,在过流断面的某一位置处,将出现 K 的最大值 K_{\max} ,当 K_{\max} 达到某一临界值 $K_{\max c}$ 时,流动状态将开始由层流转变为紊流;可用 $K_{\max c}$ 来判别流动状态,当 $K_{\max} < K_{\max c}$ 时流动为层流,而当 $K_{\max} > K_{\max c}$ 时流动为紊流。Hanks已经表明,对于牛顿流体圆管轴向流,取临界雷诺数 $Re_c = 2100$ (是由实验得出),则可得 $K_{\max c} = 404$ 。Hanks进一步指出 $K_{\max c} = 404$ 基本上与流体性质无关(这还有待于进一步的实验证实)。将Hanks的稳定性参数扩展到非牛顿管流,同心环空流和偏心环空流的工作已由后来的研究完成。

整体稳定性参数 X

整体稳定性参数 X 是Mishra与Tripathi^[6]在

1971 年提出来的。他们认为流态转变过程分为以下几个阶段:首先是二维波的形成,接着是三维波、紊动点的形成,最后紊动点发展到整个流体。紊动点的形成是一个局部现象,并且实验已观察到形成的紊动点与最大的动能变化率点是一致的。尽管不稳定性的发展关键取决于局部条件,但是速度剖面和流体的流变性仍对其有影响。因此,流体单位体积内的平均动能和管壁处的剪切应力是控制从层流到紊流转变时的重要因素,并且当紊动发生时,两者之比对所有纯粘非牛顿流体都是相同的。整体稳定性参数 X 定义如下:

$$X = \frac{\text{流体单位体积内的平均动能}}{\text{管壁剪切应力}}$$

整体稳定性参数 X 与局部稳定性参数 Z 、 K 相比,由整体稳定性参数 X 所确定的圆管广义临界雷诺数与实验值吻合较好,而局部稳定性参数 Z 、 K 所确定的广义临界雷诺数在低的流型指数 n 或高的 Hedstrom 数下与实验值有较大差异;对于 Z 、 K_{\max} 值, Z 、 K_{\max} 值各自低于 808、404,则流动为层流,而当 Z 、 K_{\max} 值分别大于 808、404 时,并不能说明流体完全进入紊流,因此 Z 、 K 值仅是紊流发展的起始点; X 值是从流动紊流的整体来考察流动的流态,因此从物理意义上讲更具合理性。

稳定性参数 Y

稳定性参数 Y 是岳湘安与陈家琅^[7]于 1987 年提出的,他们从紊流产生与发展机理入手,分析了单一流体微团的受力,认为决定流体由层流向紊流转变的因素为动能变化率及粘滞应力变化所做功率。因此稳定性参数 Y 定义为:

$$Y = \frac{\text{动能变化率}}{\text{粘滞应力变化所作功率}}$$

上式未涉及到具体的流场及流体的本构方程,因此具有普适性。可以认为对于某一特定的流动问题,应有一个恒定的临界值 Y_0 存在;当 $Y < Y_0$ 时,流体的流动处于层流状态;而当 $Y > Y_0$ 时,流体的流动则处于紊流状态。并且认为对纯粘流体(牛顿、非牛顿), Y_0 应具有相同值。据他们的研究得到流体在圆管中流动的稳定性参数临界值 Y_0 为 640,对于某一特定的流体,可以根据 Y_0 来确定其在圆管中的广义临界雷诺数。

目前该稳定性参数 Y 仅用于了幂律、卡森、宾

汉流体的圆管一维流动,对于其他流体、环空流应用该参数进行流态判别还有待于进一步研究。

结 语

在这几种以层流稳定性现象理论为基础提出的流态判别准则中,稳定性参数 X 、 Y 的定义比稳定性参数 Z 、 K 的定义更具合理性;由它们确定的广义临界雷诺数与实验结果相比, Z 、 K 值所确定的广义临界雷诺数在低的流型指数 n 或高的赫斯德数 (Hedstrom) 下与实验结果不符,而 X 、 Y 所确定的与实验结果一致,且 Y 值确定的广义临界雷诺数与实验结果的吻合度比 X 的更好。目前,雷诺数、 Z 值和 K 值已推广到了非牛顿流体圆管流、同心及偏心环空流中,而稳定性参数 X 、 Y 的应用仅限于幂律、宾汉、卡森流体的圆管一维流动。因此建议将稳定性参数 X 、 Y 进行推广,使它们能够用于其它非牛顿液体圆管流、同心环空流、偏心环空流的流态判别。

符 号 说 明

D_o 为环空外径; v 为平均流速; D_i 为环空内径; ρ 为速度矢量; D_e 为当量直径; ρ 为液体密度; g 为重力加速度; τ_w 为壁面剪切应力; h_f 为沿程阻力; τ 为剪应力张量; L 为流道长度; ∇ 为矢性微分算子; r 为管道半径; λ 为沿程阻力系数; u 为速度分布; x 为与流速垂直方向的坐标。

参 考 文 献

- 1 黄逸仁编. 非牛顿流体流动及流变测量. 成都: 成都科技大学出版社, 1993
- 2 Adam T. Bourguynne Jr 等著, 徐云英主译. 实用钻井工程. 北京: 中国石油天然气总公司情报研究所, 1989
- 3 Ryan N W, Johanson M M. Transition from laminar to turbulent flow in pipes. AICHE J, 1959; 5(4): 433
- 4 刘崇建, 刘绘新. 判别液体流态准数 Z 值的讨论. 西南石油学院学报, 1983
- 5 Hanks R W. A Theory of laminar flow stability. AICHE J, 1969; 15(1): 25
- 6 Mishra P, Tripathi G. Transition from laminar to turbulent flow of purely viscous non - newtonian fluids in tubes. Chemical Engineering Science, 1971; 26: 915
- 7 岳湘安, 陈家琅. 非牛顿流体流动的稳定性参数及其应用. 水动力学研究与进展, 1987; 2(3): 114

(收稿日期 2000 - 05 - 05 编辑 韩晓渝)

LAMINAR FLOW STABILITY THEORY FOR DISTINGUISHING LIQUID FLOW REGIME

He Shiming (Southwest Petroleum INstitute) , Luo Deming (Southwest Petroleum Geology Bureau) , Yu Haisheng (Huabei Petroleum Administration) and Liu Chongjian (Southwest Petroleum Institute) .
NATUR. GAS IND. v. 20 ,no. 5 ,pp. 67 ~ 69 ,9/ 25/ 2000. (ISSN 1000 - 0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT:Accurately distinguishing the flow regime of the liquid in well is very important for optimizing drilling design and operation and guaranteeing cement replacement quality. In this paper , the common five criteria for distinguishing flow regime—Reynolds number (Re) and stability parameters (Z) , (K) , (X) and (Y) , are presented on the basis of the laminar flow stability theory. Through analysis and comparison of the five criteria for distinguishing flow regime , it is considered that the Roynolds number and stability parameters Z and K are all unperfect , but the stability parameters X and Y are relatively rational. The authors suggest spreading the stability parameters X and Y , enabling them to be used for distinguishing the flow regime of the circular pipe flow , concentric annular flow and eccentric annular flow of other non-Newtonian liquids.

SUBJECT HEADINGS: Fluid , Laminar flow , Stability , Reynolds number , Annulus flow , Drilling

He Shiming (*lecturer*) , born in 1966 , graduated in drilling engineering from the Southwest Petroleum Institute in 1988 and received his Master s degree in 1991 and Doctor s degree in petroleum engineering in 1998. Now he is engaged in the teaching and researching works on drilling engineering , annulus fluid mechanics and borehole temperature field. Add: Department of Petroleum Engineering of Southwest Petroleum Institute , Nanchong , Sichuan (637001) , China Tel: (0817) 2642936

A STUDY OF THE MATHEMATICAL MODEL OF GAS PERCOLATION FLOW THROUGH LOW-PERMEABILITY RESERVOIR AND ITS CALCULATION METHOD

Li Tiejun and Li Yun (Southwest Petroleum Institute) . *NATUR. GAS IND.* v. 20 ,no. 5 ,pp. 70 ~

72 ,9/ 25/ 2000. (ISSN 1000 - 0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT:The distribution of the low-permeability gas reservoirs in China is very wide and their reserves amount to 80 % of the reserves of the total gas reservoirs in China according to an incomplete statistics. Obviously , developing this kind of gas reservoirs is of an important practical significance , but up to now , the low-permeability data have been interpreted by adopting the conventional gas reservoir theory in general and the ideal results have not been obtained often due to the particularities the low-permeability gas reservoirs have but the conventional ones have not , such as tight rocks , extremely low permeability and gas percolation flow with slippage effect , etc. In view of this situation , a corresponding mathematical model is set up on the basis of investigating and studying a vast amount of the foreign and domestic literatures and the practical calculation and starting from studying the specific property of the gas percolation flow in low-permeability reservoirs. Through special processing of the coefficients and interior and exterior boundary conditions in the equation , a non-linear difference equation which solution is acquired by Newton s iteration method is obtained. The model and the calculation method in the paper can be fit in better with the measured data of the gas well through processing the data of one well in central Sichuan. As a result of this work , an effective method for solving this kind of problems is found out and this achievement is easy to be spread to the multidimension and multiphase model.

SUBJECT HEADINGS:Low-permeability pools , Reservoir rock , Gas field development , Slippage , Mathematical model , Sichuan basin

Li Tiejun (*associate professor*) , born in 1964 , graduated in mathematics from Sichuan University in 1985 and received his Master s degree in oil and gas field development in 1996. Now he is engaged in teaching work and the researching work on numerical simulation. Add: Department of Computer Science , Southwest Petroleum Institute , Nanchong , Sichuan (637001) , China Tel: (0817) 2643345

A COMPARISON OF THE METHODS FOR CALCULATING NATURAL GAS DEVIATION FACTORS USED FOR METERING

Zhang Fuyuan (Natural Gas Metering and Detection Center of Southwest Oil and Gas Field Branch) .
NATUR. GAS IND. v. 20 ,no. 5 ,pp. 73 ~ 76 ,9/ 25/