

# 环空宾汉流体流量对顶替效率的影响规律研究

尹虎 赵建国 李黔

(西南石油大学石油工程学院, 成都 610500)

**摘要** 固井时水泥浆常常采用宾汉流体模型, 因此许多学者对宾汉流体性质及流态做了大量的数值模拟研究, 然而排量对顶替效率的影响规律的数学解析方程推导还未见报道。本文根据宾汉流体在环空中的层流流动特性推导出了顶替效率与注水泥的排量关系式, 并且计算了不同流量情况下的顶替效率大小, 计算结果表明: 流量越大顶替效率越高, 并且呈现线性关系, 适当提高水泥浆的流量能够有效提高顶替效率, 推出的流量与顶替效率的关系式对固井工程设计具有较大的指导意义。

**关键词** 顶替效率 宾汉流体 环空 水泥浆 泥浆

**中图法分类号** TE257.6; **文献标志码** A

流体流量的大小决定着流体的速度分布, 流速决定流体的剪切应力分布<sup>[1]</sup>, 最终影响着流体的顶替效率, 而顶替效率影响着油气井的固井质量<sup>[2]</sup>, 在固井工程中对流体流动状态唯一可控的施工因素便为水泥浆的流量, 因此研究流体流量的大小对顶替效率的影响规律意义重大。许多学者对宾汉流体本身性质及不同流态对顶替效率的影响规律进行了研究<sup>[3—6]</sup>, 目前还未见流体流量对环空的顶替效率影响的具体规律和数学解析解研究, 本文在宾汉流体的基础上, 推导出了流体流量与环空顶替效率的关系式, 计算了不同流量情况下环空顶替效率的大小。

## 1 流体流动模型的建立

首先假设: ①直井、水泥浆与泥浆直接接触; ②泥浆和水泥浆均属宾汉流体, 层流顶替, 且顶替过程中壁面无滑移; ③忽略界面处的混掺、扩散及水泥浆、钻井液接触后的化学作用等因素对顶替流动的影响<sup>[7]</sup>; ④流体不可压缩、无热交换<sup>[8]</sup>。图1为

环空水泥顶替剖面图。其中  $R_1$  为环空内径,  $R_2$  为环空外径。

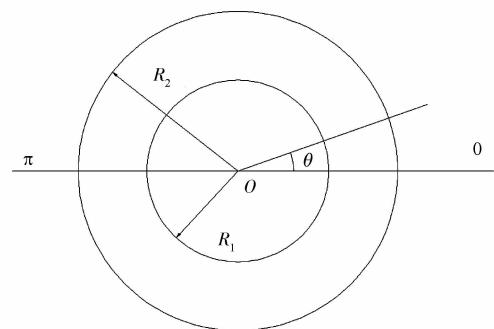


图1 环空水泥浆顶替剖面图

## 2 环空顶替效率与流量的关系式推导

由参考文献[9]可知, 顶替效率

$\eta_s =$

$$\frac{\int_0^{2\pi} (R_1 + R_2) \left[ \frac{\Delta p / \Delta L (R_2 - R_1) - 2 \tau_{oi}}{\rho g - \rho_1 g} + R_2 - R_1 \right] d\phi}{\int_0^{2\pi} (R_2^2 - R_1^2) d\phi} \quad (1)$$

式(1)中:  $R_1$  为环空内径, m;  $R_2$  为环空外径, m;  $\eta_s$  为顶替效率, %;  $\Delta p / \Delta L$  为压力梯度, Pa/m;  $\tau_{oi}$  为动

切力, Pa;  $\rho$  为水泥浆密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_1$  为泥浆密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, N/kg;  $\phi$  为剖面周向角, rad。

由式(1)可知, 在环空外径、环空内径、密度、泥浆动切力在井底为常数, 因此压力梯度直接影响着顶替效率的大小。根据参考文献[10]所述: 由于钻完井工程中的流量很小, 因其压力梯度公式比较精确, 其中式(3—108)可知

$$\Delta p =$$

$$\frac{\left\{ 24 \eta_B Q - 8\pi \tau_0 \left[ 2 \sqrt{\frac{(R_2^2 - R_1^2)^3}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}} - (R_1^3 + R_2^3) \right] \right\} \Delta L}{3\pi \left[ R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 + R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right]} \quad (2)$$

式(2)中:  $\eta_B$  为塑性黏度, Pa·s;  $Q$  为流量, m<sup>3</sup>/s。

式(2)可推出压力梯度  $\Delta p/\Delta L$  与流量  $Q$  的关系式

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{24 \eta_B Q - 8\pi \tau_0 \left[ 2 \sqrt{\frac{(R_2^2 - R_1^2)^3}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}} - (R_1^3 + R_2^3) \right]}{3\pi \left[ R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right]} \quad (3)$$

由式(1)、式(3)可以得出顶替效率

$$\eta_s =$$

$$\frac{\int_0^{2\pi} (R_1 + R_2) \left\{ \frac{24 \eta_B Q - 8\pi \tau_0 \left[ 2 \sqrt{\frac{(R_2^2 - R_1^2)^3}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}} - (R_1^3 + R_2^3) \right]}{3\pi \left[ R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right]} + R_2 - R_1 - 2\tau_{oi} \right\} d\phi}{\int_0^{2\pi} (R_2^2 - R_1^2) d\phi} \quad (4)$$

对式(4)积分整理可得

$$\eta_s = \frac{\frac{24 \eta_B Q - 8\pi \tau_0 \left[ 2 \sqrt{\frac{(R_2^2 - R_1^2)^3}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}}} - (R_1^3 + R_2^3) \right]}{3g\pi(\rho - \rho_1) \left[ R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right]} + \frac{2 \tau_{oi}}{3g(R_2 - R_1)(\rho - \rho_1)} + 1}{(5)}$$

对比式(3)、式(4)可知, 式(4)中仅有流量为变量, 其余的参数均为常数。因此在其他参数为常数的情况下, 环空顶替效率仅受到流量的影响。

### 3 流量对顶替效率的影响实例分析

设初始数据: 环空外径  $R_2 = 0.10795$  m, 环空外径  $R_1 = 0.06985$  m, 塑性黏度  $\eta_B = 0.03$  Pa·s,  $\tau_0 = 6$  Pa,  $\tau_{oi} = 30$  Pa,  $\pi = 3.14$ ,  $g = 9.8$  N/Kg,  $\rho = 1300$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_1 = 1200$  kg/m<sup>3</sup>。将数据代入式(5)整理得

$$\eta_s = 11.8714Q + 0.0769 \quad (6)$$

对不同流量情况下的顶替效率进行了计算, 计算结果如图2所示。

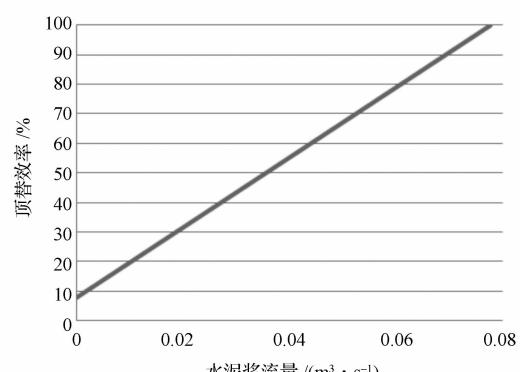


图2 流量与顶替效率关系图

由图2可知, 环空顶替效率随着水泥浆的流量增加而提高, 理想情况下, 当流量增加到一定时水泥浆的顶替效率可超过100%, 由于本公式适用于与宾汉流体层流状态, 因此流体速度有限制, 而流体速度又决定了水泥浆的流量, 由参考文献[10]可知

$$v = \frac{Re \eta_B}{\rho DF(\xi)} \quad (7)$$

式(7)中:  $V$  为流体速度, m/s;  $Re$  为雷诺数, 1;  $D$  为环空间隙, m;  $F(\xi)$  为常量, 1。

众所周知,层流分界线雷诺数  $Re \leq 2320$ ,并且环空间隙  $D = R_2 - R_1 = 0.0381\text{ m}$ ,由参考文献[10]计算得  $F(\xi) = 0.42$ ,则由式(7)可知  $v = 3.3457\text{ m/s}$ ,则排量

$$Q = v\pi(R_2^2 - R_1^2) = 0.07117\text{ m}^3/\text{s} \quad (8)$$

从式(6)、式(8)可算出在层流条件下的最大顶替效率为 92.1742%,因此,为更进一步提高顶替效率可采用过渡流或者是紊流流态<sup>[11]</sup>。

## 4 结论

(1)本文推出了环空宾汉层流的顶替效率与流量的关系式,在宾汉层流条件下它们满足线性关系,随着流量的增加顶替效率提高。

(2)为提高固井质量需设定合适的水泥浆流量,以提高泥浆的顶替效率,对固井工程具有重要的指导意义。

(3)水泥浆在宾汉层流条件下,对提高环空顶替效率有限,因此在注水泥时可以采用过渡流或者紊流流态,以提高环空顶替效率。

## 参 考 文 献

1 李兆敏,王渊,张琪.宾汉流体在环空中流动时的速度分布

- 规律.石油学报,2005;23(2):87—91
- 2 彭明旺,夏宏南,陶谦,等.利用壁面剪应力提高固井水泥浆顶替效率的研究与应用.断块油气田,2006;13(6):68—70
  - 3 Hanks R W,Brigham Y U. On the flow of bingham plastic slurries in pipes and between parallel plates. Society of Petroleum Engineers Journal,1967;SPE 1682:342—346
  - 4 郑永刚,郝俊芳.固井中水泥浆顶替泥浆的运动规律研究.西部矿探工程,1995;7(3):29—31
  - 5 韩树江,艾池,孙玉学.提高斜直井固井顶替效率.大庆石油学院学报,1995;19(2):120—122
  - 6 孙宝江,高永海,刘东清.水泥浆流变性分析及其环空流动的数值模拟.水动力学研究与进展,2007;23(3):317—324
  - 7 高永海,孙宝江,刘东清,等.环空水泥浆顶替界面稳定性数值模拟研究.石油学报,2002;26(5):119—122
  - 8 Melrose J C, Savins J G, Foster W R, et al. A practical utilization of the theory of bingham plastic flow in stationary pipes and annuli. Petroleum Transactions. AIME,1958; SPE876—G:316
  - 9 冯福平,艾池,杨丰宇,等.偏心环空层流顶替滞留层边界位置研究.石油学报,2010;31(5):858—862
  - 10 陈家琅,刘永建,岳湘安.钻井液流动原理.北京:石油工业出版社,1997
  - 11 张兴国,许树谦,陈若铭,等.紊流顶替和接触时间对顶替效率的影响.西部矿探工程,2005;2:74—75

# The Study of Influence Regular of Flow of Bingham Fluid on Displacement Efficiency

YIN Hu<sup>1</sup>, ZHAO Jian-guo, LI Qian

(Petroleum Engineering Institute of Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China)

**[Abstract]** The cementing slurry often uses the Bingham model. Then many scholars do a large number of studying of numerical simulation to the property and flow state of Bingham. But, there is not a report about a regular of the influence of flow on displacement efficiency with any mathematical equations. The mathematical equation is developed between displacement and flow according to the characteristic of flowing of Bingham fluid in annular. And the data of displacement efficiency under different flow conditions is computed. The results show that the more flow the higher displacement efficiency and they have a linear relationship. Improving the flow can improve the displacement degree. The relationship of flow and displacement efficiency has an important guide to the design of cementing engineering.

**[Key words]** displacement efficiency      Bingham fluid      annular      cementation slurry      drilling fluid