

油气井注水泥顶替机理研究进展

王瑞和 李明忠 王成文 方 群

中国石油大学(华东)

王瑞和等. 油气井注水泥顶替机理研究进展. 天然气工业, 2013, 33(5): 69-76.

摘 要 油气井固井时, 保持注水泥顶替界面的稳态, 不仅能减少水泥浆对钻井液的污染, 而且还可显著改善注水泥顶替效果。目前的注水泥顶替机理研究成果, 尚未建立描述在任意井斜角、偏心环空内的注水泥顶替界面变化数学模型, 对注水泥顶替设计的实际指导意义不大。为此, 在综述影响注水泥顶替效果的主要因素以及注水泥顶替理论研究现状的基础上, 重点分析了“平板流模型”和“Hele-Shaw 模型”两种理论在顶替机理研究中应用情况。平板流顶替模型将环空中的顶替看作一维轴向顶替, 且无法获得顶替界面在环空的整体形态, 只适用于直井内的注水泥顶替; Hele-Shaw 顶替模型是考虑轴向和周向速度的二维顶替模型, 能够追踪顶替界面在环空中发展情况, 有利于确定流体之间界面稳定的定量条件。两者相比, Hele-Shaw 顶替模型更接近注水泥顶替实际, 且不受井斜角的限制。因此, 积极开展基于 Hele-Shaw 模型的注水泥顶替理论研究具有重要的科学意义和应用价值。

关键词 固井 顶替 钻井液 水泥浆 平板流模型 Hele-Shaw 模型

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.05.013

Research progress in the cementing displacement mechanism

Wang Ruihe, Li Mingzhong, Wang Chengwen, Fang Qun

(China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 5, pp.69-76, 5/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In the course of cementing, to keep displacement interface steady can not only prevent cement slurry from being polluted by drilling fluids, but also improve cementing quality remarkably. However, the current research results are of little significance to guide cementing displacement designs in practice because no such mathematical models have yet been established for describing the displacement interface in the eccentric annulus suitable for wellbores with any deviated angle. In view of this, based on the analysis of the existing cement displacement theories as well as the main influencing factors on cementing quality, this paper discusses mainly the foundation of the slot flow model and the Hele-Shaw model and their applications respectively. The slot flow model is only used for cementing displacement in vertical wells because it only regards the displacement in the annular space as one-dimensional axial displacement so a full view of displacement interface in the annulus is inaccessible. The Hele-Shaw model holds that the displacement in the annulus is two-dimensional in both axial and circumferential directions, by which states about displacement interface in the annulus can be tracked and quantitative conditions on steady interface can be obtained. By comparison, the Hele-Shaw model is closer to the real practice of cementing displacement, especially in horizontal and highly deviated wells. So it is of application value and scientific significance to the theoretical research of cementing displacement mechanism based on the Hele-Shaw model.

Key words: cementing, displacement, drilling mud, cement slurry, Slot Flow Model, Hele-Shaw model

基金项目:国家自然科学基金“水热成型固井材料体系及其高温固化机理研究”(编号:51174226)。

作者简介:王瑞和, 1957 年生, 教授, 博士; 主要研究领域为油气井工程流体力学、岩石力学、破岩钻井新技术新方法。地址: (266580) 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号中国石油大学(华东)石油工程学院。电话: (0532) 86981203。E-mail: petroleumup@163.com

油气井固井是钻井过程的最后一道工序,是衔接钻井和采油的关键过程,固井是采用向环空注水泥的方法把裸眼井段内下入的套管串与地层之间进行有效的封闭^[1]。现场施工表明,地层封隔失效的关键因素是水泥浆没有完全替净钻井液,在套管与井眼之间的环空间隙内形成了连续的钻井液窜槽。水泥浆替净环空内的钻井液是保证固井质量的先决条件,但两相流体之间的顶替过程却非常复杂:注水泥顶替不能仅从两种液体之中任何一种液体的流速分布,就直接得出两种液体之间分界面的分布情况,它还与流体性能(流变特性和密度)之间的相互匹配、流体之间的相对流动状态以及流体混合时的相互反应等因素密切相关。另一方面,随着钻井技术的发展和油气勘探开发的需求,大斜度井和水平井逐渐取代直井成为主流井型,但大斜度井和水平井内的流体受力条件与直井不同,造成不同井型的注水泥顶替机理存在一定区别,致使直井所采用的一些顶替参数设计依据不适用于大斜度井和水平井。国内的注水泥顶替理论研究基础相对薄弱,发展缓慢,仍主要以平板流模型为基础,尚未涉及 Hele-Shaw 模型领域的注水泥顶替研究,笔者详细总结了“平板流模型”、“Hele-Shaw 模型”两种理论在顶替机理研究中应用情况,概括了注水泥顶替理论方面的研究成果。

1 影响注水泥顶替效果的因素

在注水泥顶替过程中,环空的钻井液不能被替净主要是由注水泥顶替界面失稳造成的。水泥浆顶替钻井液的界面有以下几种形态:稳态、失稳和钻井液窜槽(图 1)。顶替界面失稳导致水泥浆与钻井液的混浆段长度增长,影响水泥浆的性能,从而改变水泥石的强度和渗透率等;当顶替界面进一步失稳,钻井液在环空内会形成连续的钻井液窜槽,引起层间封隔失效。影响注水泥顶替界面稳定性的因素大致可分为 3 类^[2]:井眼状况(如井眼尺寸的变化、井斜角和套管偏心等)、水泥浆和钻井液的性能参数、环空内的顶替流态。

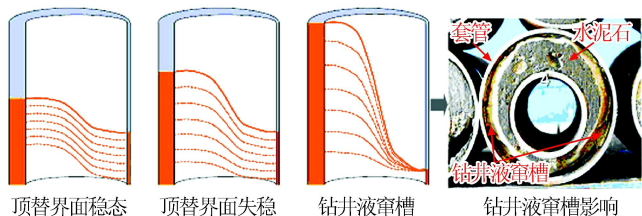


图 1 直井不同套管偏心度时顶替界面的形态图

1.1 井眼状况的影响

1.1.1 井眼尺寸变化

实际井眼的井径是不规则的,存在出现缩径或扩径现象。有学者采用 Fluent 软件中的多相流 VOF 模型,模拟了在“糖葫芦”井眼内的注水泥顶替过程,结果表明在井径突变的地方,水泥浆会形成原地流动而不能向前推进的旋流^[3]。

1.1.2 井斜角的影响

在相同注替条件下,大斜度井或水平井的注水泥顶替效果差于直井^[4],这主要由井斜角增大导致注水泥顶替界面伸长造成的。此外,随着井斜角增大,水泥浆析出的游离液聚集在环空高侧,水泥浆对钻井液的浮力减小,都对注水泥顶替和固井质量产生不利影响。

1.1.3 套管偏心的影响

井眼不规则的扩径、扶正器设计失效以及套管重力等原因都会造成套管串在井眼内偏心,偏心程度采用偏心度衡量。套管偏心引起环空各间隙宽度随周向角变化(图 2),由于流体流动受到的阻力与环空间隙的大小成反比,致使流体的流速、流量及流态在不同间隙处将发生变化(图 3),影响了顶替界面形态^[5]。数值模拟结果表明:在直井内,套管偏心不利于注水泥顶替界面的稳态,而在大斜度井或水平井内,套管偏心能一定程度上阻止由于流体密度差造成的水泥浆在环空窄间隙处的突进,有利于维持顶替界面的稳态^[4]。

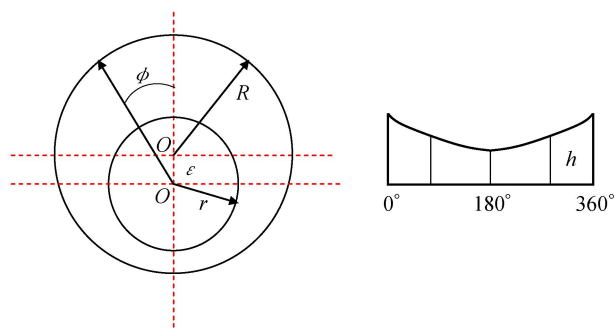


图 2 偏心环空几何特征示意图

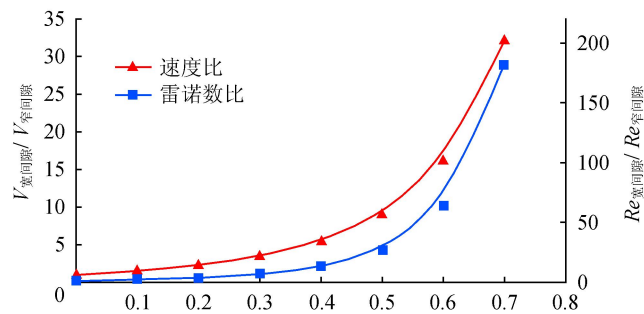


图 3 宽窄间隙流体的速度比、雷诺数分别与偏心度的关系图

1.2 水泥浆和钻井液的性能参数

影响注水泥顶替效果的流体性能参数有水泥浆和钻井液密度、动切力、稠度系数和流性指数等。在井斜角、套管偏心率等客观条件下,提高偏心环空注水泥顶替效果的问题最终归结为水泥浆、钻井液的流变学问题^[6],目前已有一些关于流体流变参数和密度差对顶替效果影响的研究和分析。固井研究者认为水泥浆的屈服值、密度和最终的塑性黏度比钻井液相应性能参数高时,有利于提高注水泥顶替效果^[7-9],这在直井固井中取得成功的应用,但在大斜度井和水平井中却受到限制。以密度差的影响为例,增大水泥浆和钻井液的密度差,有利于提高直井环空内注水泥顶替界面稳定性^[10];但在大斜度井和水平井偏心环空内,过高的密度差会造成水泥浆在低边指进,较低的密度差会造成水泥浆在高边指进^[4,11-12],二者都不利于顶替界面的稳定性,这是由套管偏心造成的环空阻力效应和密度差产生的重力差异综合作用的结果。

1.3 环空内顶替流态

在环空中,水泥浆塞流顶替钻井液的效果最好,但水泥浆稠化时间难以保证塞流顶替顺利完成;紊流顶替时各质点以较高的速度作不规则的运动,紊流旋涡在顶替界面处具有携带、冲刷和稀释作用,且环空各间隙处流体运动速度差别不大^[13-14],但是紊流顶替往往受到地层承压能力和机泵能力的限制。大斜度井和水平井的井眼垂向深度变化小,地层破裂压力窗口小,加之顶替时引起的压力波动较大,紊流顶替易导致地层破裂。因此,在大斜度井和水平井内主要采用水泥浆层流顶替钻井液。

综上所述,通过总结分析不同因素对注水泥顶替效果影响规律的研究方法和研究成果,可得:

1)目前,有关注水泥顶替机理的研究大多采用实验方法和利用工程数值模拟软件(如 Fluent)进行模拟,只对某些因素的影响规律作了定性研究,且没有考虑各影响因素之间的综合作用。另外,根据动力学相似原理要求,无论实验结果还是数值模拟结果都很难与现场施工参数相匹配。

2)大斜度井或水平井注水泥顶替机理与直井存在一定的差别,基于常规直井注水泥顶替的相关认识和经验,不适用于其他井型,因此对大斜度井和水平井的注水泥顶替机理研究提出迫切要求。

3)注水泥顶替优化设计需要以影响顶替界面稳定性各因素的综合作用为基础,通过不同因素之间的优化调整,获得稳态的顶替界面。因此,通过理论研究,建立一套能够描述任意井斜条件下、偏心环空中、非牛

顿流体之间顶替界面变化的数学模型,对指导注水泥顶替有重要意义。

2 注水泥顶替理论模型

有关注水泥顶替机理研究始于20世纪30年代。1967年,McLean^[15]等人确认在环空窄间隙处存在钻井液窜槽的可能,提出临界动切力的概念;Haut和Crook认为直井中的注水泥顶替主要由流体的黏度比、偏心率、顶替速度和密度差控制^[16-17];Lockyear,Guillot等人^[7-9]提出直井层流顶替时,利用顶替液和被顶替液的流变性差异和密度级差,可减少各级段塞之间的互相掺混,形成均匀顶替,这在直井的一维顶替数值模拟和固井现场施工中都得到验证^[10];Jakobsen等人通过实验分析了在偏心环空中,流体黏度比、密度差和紊流强度等因素对顶替的影响^[18]。顶替液的螺旋流动,可显著改善井径变化处以及偏心环空窄间隙处的钻井液顶替。固井领域的螺旋流顶替技术,最早是通过旋转套管来实现的,但旋转套管所需的扭矩较大,增加了作业风险,目前主要是借助旋流扶正器来实现螺旋流顶替^[19-22]。

注水泥顶替机理的理论研究一般从单一流体在环空中流动的基本规律出发,结合边界条件、初始条件以及两种流体在交界面处速度和应力的连续性条件等,追踪顶替界面在环空中发展的情况,确定流体之间界面稳定的定量条件。对给定环空内的注水泥顶替过程研究,每一种流体在柱坐标下的连续性方程(1)和运动方程^[23](2)~(4)有:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{ry})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right] + \rho g_r \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r u_\theta}{r} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right] + \rho g_\theta \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] + \rho g_z \quad (4)$$

式中 r, θ, z 分别为3个坐标系的径向、周向和轴向; $\vec{u}$ 为速度分量, $\vec{u} = (u_r, u_\theta, u_z)$; p 为压力; g 为重力加速度分量, $g = (g_r, g_\theta, g_z)$; r 为套管外径, cm; τ 为切应力, Pa。

目前,在注水泥顶替机理理论研究过程中,国内外

常借鉴的模型有平板流模型和 Hele-Shaw 模型。

2.1 平板流模型

套管偏心造成环空间隙随环空周向角(ϕ)变化,如图 2 所示。环空间隙宽度表示为:

$$h = \varepsilon \cos \phi + \sqrt{R^2 - \varepsilon^2 \sin^2 \phi} - r \quad (5)$$

式中 ε 为偏心距, cm; R 为井眼内径, cm。

因此,整个偏心环空可看作是由无数个变宽度的平板组成。平板流模型研究的是流体在环空某周向角处两平板间的流动特性,它将整个流场视为由沿轴向流动且速度不同的层流体组成^[24]。

为顺利推导平板流模型,做出的简化和假设:

①假设注水泥顶替流态为层流,这与现场顶替主要采用层流以及关于层流理论的研究相对成熟有关。②假定钻井液和水泥浆之间有明显的界面,不存在界面上的混掺。忽略流体的触变性、静态和动态的泥饼沉积和冲刷以及流体之间的化学反应等。③忽略周向和径向速度,认为只存在轴向的速度变化。④假设流体是不可压缩的,不考虑顶替过程中温度的影响。

在某周向角两平板间建立坐标系,如图 4 所示。因此,流体轴向运动方程(4)可简化成:

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \cos \beta \quad (6)$$

式中 τ_y 为切应力, Pa; $\partial p / \partial z$ 为流动方向压力梯度, Pa/m; ρ 为流体密度, kg/m³; β 为井斜角, (°)。

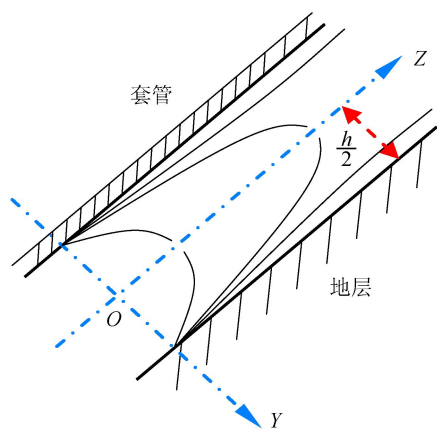


图 4 平板流模型图

在平板流模型的基础上,结合描述水泥浆和钻井液流变性能的宾汉模式,以注水泥顶替界面处应力耦合、速度连续性以及环空壁面上的速度无滑移为定解条件,廖华林^[24]推导了不同井斜角条件下,小井眼偏心环空内水泥浆层流顶替钻井液的速度分布,确定了各间隙处的钻井液开始被顶替流动的条件,认为通过增加水泥浆动切力、减小钻井液动切力、增加钻井液与

水泥浆密度差、提高套管的居中度均有利于保证水泥浆把大小各间隙处钻井液顶替干净;郑永刚^[25-26]采用变宽度的平板流模型,结合流体本构方程以及环空任意间隙处的压力平衡关系,研究了非牛顿流体分别在垂直、倾斜及水平圆管和偏心环空中层流顶替的理论,通过数值求解,得到了在某一时刻不同顶替条件下在不同宽度的环空间隙内顶替界面的形状;贺成才^[27]用不稳定流研究了一维顶替两相流动机理,建立顶替模型,得出在垂直井中通过降低水泥浆的流性指数,提高稠度系数,顶替界面会逐渐平缓。

郑永刚等人的研究得到了随时间变化,顶替界面在环空某周向角环空间隙内分布情况的微分方程,方程包括流变参数、密度、井斜角、驱动压差等因素,综合考虑了各个因素对顶替影响的共同作用,这是利用实验和工程数值模拟软件研究顶替所不具备的。但得到的顶替界面仅局限于环空某周向角处的两平板间,不能推导出顶替界面在环空中的整体形态,进而无法确定顶替界面保持稳态的定量条件。从模型自身使用范围考虑,平板流模型只考虑了水泥浆在井眼轴向方向对钻井液的顶替。在直井内,水泥浆对钻井液的顶替主要在井眼轴向上,但在大斜度井或水平井内,由于流体之间的密度差形成静液压差,导致流体存在沿环空周向的流动。周向速度可实现偏心环空各间隙流体的交流,有效减小窄间隙处钻井液的滞留,有利于冲刷和携带近井壁处的钻井液,是提高注水泥顶替效果的重要因素。因此,平板流模型适用于直井内注水泥顶替理论的研究,不符合大斜度井或水平井内注水泥顶替实际情况。

2.2 Hele-Shaw 模型

2.2.1 Hele-Shaw 注水泥顶替理论模型推导

Hele-Shaw 模型经常用于化学工程、水利工程、石油工程中多孔介质流体流动问题,研究的是在间距很小的两块无穷大平板之间流体的二维流动特性(见图 5; M 、 L 和 H 分别为 Hele-Shaw 模型的长度、高度和宽度,三者之间的关系为 $L > M \geq H$; v_1 和 v_2 表示在 Hele-Shaw 模型内流体的速度特征),可进行两相流体之间界面稳定性的分析。套管下入井眼之后,环空间隙宽度远小于环空周向长度;环空中水泥浆封固段的长度短则几百米,长则上千米,其远大于环空周向长度;另外,大斜度井内流体的环空径向速度与轴向速度和周向速度相比,可以忽略^[28]。因此,从环空尺寸特征和环空内流体速度特征分析,Hele-Shaw 模型非常

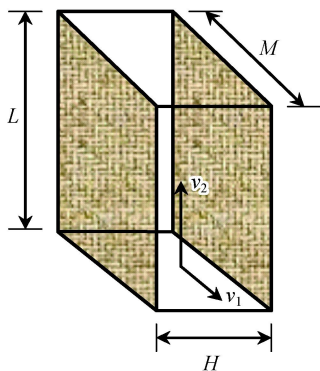


图5 Hele-Shaw 模型图

适合处理大斜度井环空内的流场问题,积极开展基于Hele-Shaw模型的大斜度井注水泥顶替理论研究具有重要的科学意义和应用价值。

2002年,Bittleston等利用Hele-Shaw模型对大斜度井注水泥顶替进行研究^[28]。根据环空特点,给出了一些基本认识和假设,与平板流模型相比,主要不同之处在于:①取一套管立柱井眼环空为研究对象,该长度范围内,井眼尺寸是规则的。②钻井液和水泥浆的流变特性符合赫巴模式,且属于剪切稀释性的流体。③当考虑两种流体在顶替界面处扩散造成混掺时,通过平流扩散方程求取界面处两相流体的浓度分布来表征注水泥顶替界面特征;当假设钻井液和水泥浆不发生混掺时,通过顶替界面运动方程追踪界面发展情况。④顶替过程中,注水泥顶替流量不随时间变化。以此为基础,将运动方程(2)~(4)进行无因次化处理、尺度变换,在径向上对速度取平均值,消去径向速度等一系列处理,最终得到Hele-Shaw顶替模型为:

$$\nabla S_k = -f_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(H\bar{c}_k) + \frac{\partial}{\partial \phi}(H\bar{v}c_k) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(H\bar{w}c_k) = 0 \quad (k=1,2,\dots) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial \phi} = H\bar{w} \\ \frac{\partial \psi}{\partial \zeta} = -H\bar{v} \end{cases} \quad (9)$$

式中 ∇ 为哈密顿算子; (ϕ, ζ) 为建立在环空轴向和周向方向的无因次坐标系; t 为无因次时间; k 表示流体分类; $(\bar{v}, \bar{w})$ 是流体 k 分别在 (ϕ, ζ) 方向的平均速度; $\bar{c}_k$ 是流体沿径向方向的平均浓度; ψ 是流函数; H 表示随 (ϕ, ζ) 变化,环空无因次半宽度,如果在 ζ 方向上,井眼和套管的几何尺寸不变,则有 $H=1+e(\zeta)\cos\pi\phi$; $e(\zeta)$ 为偏心率。

S 是由流体的本构方程(符合赫巴模式)得到:

$$\begin{cases} \vec{S} = \frac{[\chi(|\nabla\phi|) + \tau/H]}{|\nabla\phi|} \nabla\phi & |S| \leq \frac{\tau}{H} \\ |\nabla\phi| = 0 & |S| \leq \frac{\tau}{H} \end{cases} \quad (10)$$

$$|\nabla\phi| = \begin{cases} 0 & \chi \leq 0 \\ \frac{H^{m+2} \chi^{m+1}}{\kappa^m (m+2) (\chi + \tau/H)^2} \left(\chi + \frac{m+2}{m+1} \frac{\tau}{H} \right) & \chi > 0 \end{cases} \quad (11)$$

S 表示某种赫巴流体在压力梯度下沿矩形槽流动的特性,模型中的式(7)实质是在间距为 $2H$ 的矩形槽内的泊肃叶流动。当压力梯度小于流体在环空中的屈服值时,即 $|S| \leq \tau/H$ 时,流体不流动,有 $|\nabla\phi|=0$ 。 τ 为流体屈服应力; m 为流体流性指数的倒数; χ 表示克服流体屈服应力之后,用于驱动流体运动的动力。由于流体的剪切稀释特性, $\chi = \chi(|\nabla\phi|)$ 是一个增函数。 f 由下式表示:

$$f = \nabla \left(\frac{\mu \cos\beta}{St^*}, \frac{\mu \sin\beta \sin\pi\phi}{St^*} \right) \quad (12)$$

St^* 是Stokes数,表示为:

$$St^* = \frac{\mu^* w^*}{\rho^* g (d^*)^2} = \frac{\tau^*}{\rho^* g d^*} \quad (13)$$

式中 W^* 是流体平均流速,轴向和周向的无因次速度是通过 w^* 定义;注水泥顶替时,选取较大的流体密度作为参考密度 ρ^* ;平均剪切速率下,钻井液和水泥浆受到剪切应力作用,选择二者中大的剪切应力作为 τ^* , d^* 是全井段环空间隙均值的一半。

为进行模型求解,确定了Hele-Shaw顶替模型的定解条件。在环空宽间隙处和窄间隙处有:

$$\begin{cases} \psi(0, \zeta, t) = 0 \\ \psi(1, \zeta, t) = 1 \end{cases} \quad (14)$$

这是通过流函数的定义和流函数在环空分布的对称性得到。在环空的入口0和出口 Z 处,假设注水泥顶替只发生在环空轴向方向,于是有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial \zeta}(\phi, 0, t) = 0 \\ \frac{\partial \psi}{\partial \zeta}(\phi, Z, t) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

2.2.2 Hele-Shaw 顶替模型研究进展

Hele-Shaw模型是考虑环空流体轴向和周向速度的二维流动模型。与平板流模型相比,Hele-Shaw模型作为基础模型,应用于大斜度井或水平井环空内非牛顿流体流动特性以及注水泥顶替理论研究更具优势;Hele-Shaw顶替理论模型能够描述整个环空内注水泥顶替界面形态,追踪两种流体之间顶替界面的发展动态,有利于确定保持注水泥顶替界面稳态的定量

条件;另外,模型建立过程中,以赫巴流型作为非牛顿流体的流变模式,由于赫巴模式既可反映有屈服特性又有剪切稀释性的流体,增大了该模型的适用范围和精度。Hele-Shaw 顶替模型有助于为注水泥顶替优化设计提供理论依据,在国外已有了初步的发展。

2002 年, Bittleston 等人^[28]第一次详细推导了 Hele-Shaw 顶替模型,并采用数值方法求解不同的井眼条件下顶替的情况,分析了环空窄间隙钻井液窜槽产生的过程,并初步得到了通过因子合理优化调整可获得稳定顶替界面的结论;2004 年, Pelipenko 和 Frigaard^[29]研究上述模拟,分析了方程(7)中流函数解的存在性和唯一性,为采用该模型解决顶替问题的可行性提供了理论支持,同时求解了当偏心度很小(包括偏心度为 0 的情况)时顶替界面发展的理论解;他们采用增广拉格朗日方法求解流函数^[30],与本文参考文献[29]中理论解相比较,分析了偏心度变化对顶替界面稳定性的影响;2009 年, Malekmohammadi 等人^[31]利用建立的实验装置分别模拟了垂直井和水平井在偏心环空窄间隙内流体的顶替过程,讨论密度差、黏度以及偏心度对顶替结果的影响,将实验结果与 Hele-Shaw 模型的预测结果进行了比较,二者存在较好的一致性;2010 年, Carrasco-Teja 等人^[32]研究了偏心环空条件下水平井顶替规律,采用数值方法(增广拉格朗日方法和通量校正传输法)求解 Hele-Shaw 顶替模型,并对浮力效应、偏心度以及流变参数的数值解进行了分析。

目前,以 Hele-Shaw 模型为基础的顶替理论研究已取得了一定成果,但仍然存在许多的问题。如为研究方便,在用 Hele-Shaw 模型研究顶替时通常认为井眼条件是规则的,即不存在变井径以及井斜角变化的现象;流体泵入环空的速度假设是恒定的;在钻井液之前,经常设计 3~4 种流变性质不同的段塞来辅助顶替,但通常简化为水泥浆直接接触顶替钻井液。旋转套管是提高顶替效率的重要措施,但 Hele-Shaw 模型还没有对在有套管旋转情况下的顶替理论进行研究。此外,在对该模型数值求解的速度和精度方面仍需进一步的完善。国内的注水泥顶替理论研究基础相对薄弱,发展缓慢,仍主要以平板流模型为基础,尚未涉及 Hele-Shaw 模型领域的注水泥顶替研究。以 Hele-Shaw 模型为基础,针对井眼环空和注水泥顶替实际情况,开展更加细致的研究,将是 Hele-Shaw 顶替模型进一步发展的方向,也将进一步完善注水泥顶替机理的研究。

3 结论

1)注水泥顶替时,保持顶替界面的稳态,可有效防

止钻井液对水泥浆的污染,避免钻井液窜槽,改善注水泥顶替效果。注水泥顶替界面稳定性的主要影响因素有井眼状况、流体性能参数以及顶替流态。但无论是实验方法还是软件的数值模拟,只能对单一因素的影响规律作定性研究。因此,开展不同井斜、偏心等复杂条件下,非牛顿流体之间注水泥顶替界面变化的理论模型研究,对优化注水泥顶替设计具有重要的意义。

2)传统注水泥顶替理论研究所依据的平板流模型,只研究了水泥浆在轴向方向上对钻井液的顶替,且无法获得顶替界面在环空的整体形态,对进行直井的注水泥顶替机理研究具有借鉴意义,但不适用于大斜度井或水平井内注水泥顶替机理研究。

3)以 Hele-Shaw 模型为基础建立的在环空轴向与周向方向的二维顶替模型,能够追踪注水泥顶替界面在环空内的变化情况,确定流体之间界面稳定的定量条件,为注水泥顶替优化设计,尤其是在大斜度井和水平井中,提供了理论依据。Hele-Shaw 顶替模型在国外已有了初步的发展,国内尚未出现该方面的研究。但仍有许多问题亟待解决,是大斜度井和水平井注水泥顶替机理研究的前沿。

参 考 文 献

- [1] 张明昌.固井工艺技术[M].北京:中国石化出版社,2009:1-3.
ZHANG Mingchang. Cementing technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2009: 1-3.
- [2] 廖华林.用数据库统计分析固井质量影响因素[J].天然气工业,2006,26(8):78-80.
LIAO Hualin. Analysis of influential factors of oil well cementing by use of database statistics [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 78-80.
- [3] 王斌斌,王瑞和,步玉环.不同流态下水泥浆环空顶替的数值模拟研究[J].钻井液和完井液,2010,27(3):76-83.
WANG Binbin, WANG Ruihe, BU Yuhuan. Numerical simulation on cementing displacement in different flow patterns [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(3): 76-83.
- [4] 李明忠,王成文,王长权,等.大斜度井偏心环空注水泥顶替数值模拟研究[J].石油钻探技术,2012,40(5):40-44.
LI Mingzhong, WANG Chengwen, WANG Changquan, et al. Numerical simulation of cement displacement in eccentric annulus at highly deviated wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5): 40-44.
- [5] 刘崇建,黄柏宗,徐同台,等.油气井注水泥理论与应用[M].北京:石油工业出版社,2001:295-297.
LIU Chongjian, HUANG Bozong, XU Tongtai, et al.

- Theories and applications of oil and gas well cementing [M]. Beijing: China Petroleum Industry Press, 2001: 295-297.
- [6] 陈家琅, 黄匡道, 刘永建, 等. 定向井固井注水泥顶替效率研究[J]. 石油学报, 1990, 11(3): 98-105.
- CHEN Jialang, HUANG Kuangdao, LIU Yongjian, et al. Displacement efficiency of cementing in directional wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(3): 98-105.
- [7] LOCKYEAR C F, HIBBERT A P. Integrated primary cementing study defines key factors for field success [J]. Journal of Petroleum Technology, 1989, 41(12): 1320-1325.
- [8] LOCKYEAR C F, RYAN D F, GUNNINGHAM M M. Cement channeling: How to predict and prevent [J]. SPE Drilling Engineering, 1989, 5(3): 201-208.
- [9] COUTURIER M, GUILLOT D, HENDRIKS H, et al. Design rules and associated spacer properties for optimal mud removal in eccentric annuli [C]// paper 21594-MS presented at the CIM/SPE International Technical Meeting, 10-13 June 1990, Calgary, Alberta, Canada. New York: SPE, 1990.
- [10] 杨建波, 邓建民, 冯予淇, 等. 低速注水泥时密度差对顶替效率影响规律的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(5): 62-65.
- YANG Jianbo, DENG Jianmin, FENG Yuqi, et al. Numerical simulation of effect of density difference on displacement efficiency at low cement slurry velocity [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5): 62-65.
- [11] 郑永刚. 定向井层流注水泥顶替的机理[J]. 石油学报, 1995, 16(4): 133-138.
- ZHENG Yonggang. Displacement mechanism of laminar flow cementing in deviated wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(4): 133-138.
- [12] 郑永刚, 方铎, 郝俊芳. 水平井注水泥的理论与实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(1): 19-23.
- ZHENG Yonggang, FANG Duo, HAO Junfang. A theoretical and experimental study of cementing for horizontal well [J]. Journal of Hydrodynamics, 1996, 11(1): 19-23.
- [13] 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[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 119-122.
- GAO Yonghai, SUN Baojiang, LIU Dongqing, et al. Numerical simulation on stability of cement displacement interface in annulus [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 119-122.
- [14] 何世明, 罗德明, 虞海生, 等. 判断液体流态的层流稳定性理论[J]. 天然气工业, 2000, 20(5): 67-69.
- HE Shiming, LUO Deming, YU Haisheng, et al. Laminar flow stability theory for distinguishing liquid flow regime [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(5): 67-69.
- [15] MCLEAN R H, MANRY C W, WHITAKER W W. Displacement mechanics in primary cementing [J]. Journal of Petroleum Technology, 1967, 19(2): 251-260.
- [16] HAUT R C, CROOK R J. Primary cementing: The mud displacement process [C]// paper 8253-MS presented at the Annual Technical Conference and Exhibition, 23-26 September 1979, Las Vegas, Nevada, USA. New York: SPE, 1979.
- [17] HAUT R C, CROOK R J. Laboratory investigation of light weight, low-viscosity cementing spacer fluids [J]. Journal of Petroleum Technology, 1982, 34(8): 1828-1834.
- [18] JAKOBSEN J, STERRI N, SAASEN A, et al. Displacement in eccentric annuli during primary cementing in deviated wells [C]// paper 21686-MS presented at the SPE Production Operations Symposium, 7-9 April 1991, Oklahoma City, Oklahoma, USA. New York: SPE, 1991.
- [19] 舒秋贵. 油气井固井注水泥顶替理论与技术综述[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(12): 85-87.
- SHU Qiugui. Review of theory and technique about cement displacement [J]. West-China Exploration Engineering, 2005, 17(12): 85-87.
- [20] 蒋世全. 偏心环空流场的研究与应用[D]. 南充: 西南石油学院, 1994.
- JIANG Shiquan. Research and application about eccentric annular flow field [D]. Nanchong: Southwest Petroleum Institute, 1994.
- [21] 舒秋贵. 在旋流扶正器作用下环空液体流动规律的实验研究[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(10): 55-57.
- SHU Qiugui. Experimental research on the flow field in the annular by the action of cyclone centralizer [J]. West-China Exploration Engineering, 2005, 17(10): 55-57.
- [22] 舒秋贵. 在旋流扶正器作用下环空流场旋流衰减规律研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 57-60.
- SHU Qiugui. Research on the helical flow attenuation law in annular flow field by the action of cyclone centralizer [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(9): 57-60.
- [23] 李兆敏, 蔡国琰. 非牛顿流体力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 55-56.
- LI Zhaomin, CAI Guoyan. Non-Newtonian fluid mechanics [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1998: 55-56.
- [24] 廖华林, 李根生, 张树坤. 小井眼层流注水泥顶替机理分析[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(6): 30-32.
- LIAO Hualin, LI Gensheng, ZHANG Shukun. Theoretical analysis of cementing displacement mechanics of laminar flow for slim-hole [J]. Petroleum Drilling Techniques,

- 2003,31(6);30-32.
- [25] 郑永刚.非牛顿流体流动理论及其在石油工程中的应用[M].北京:石油工业出版社,1999.
- ZHENG Yonggang.The Non-Newtonian fluid flow mechanics and application in the petroleum industry[M].Beijing: Petroleum Industry Press,1990.
- [26] 郑永刚.偏心环空注水泥顶替机理研究[J].天然气工业,1995,15(3);46-50.
- ZHENG Yonggang.A study of cement displacement mechanism during cementing in eccentric annulus[J].Natural Gas Industry,1995,15(3);46-50.
- [27] 贺成才.小井眼固井一维顶替流理论研究[J].石油钻采工艺,2002,24(3);5-7.
- HE Chengcai.Study on one-dimensional displacement flow mechanism in slim hole cementing [J].Oil Drilling and Production Technology,2002,24(3);5-7.
- [28] BITTLESTON S H, FERGUSON J, FRIGAARD I A. Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well: Laminar non-Newtonian displacements in an eccentric annular Hele-Shaw cell[J].Journal of Engineering Mathematics,2002,43(2-4);229-253.
- [29] PELIPENKO S, FRIGAARD I A.Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well-part ,steady state displacements[J].Journal of Engineering Mathematics,2004,48(1);1-26.
- [30] PELIPENKO S, FRIGAARD I A.Two-dimensional computational simulation of eccentric annular cementing displacements[J].IMA Journal of Applied Mathematics,2004,69(6);557-583.
- [31] MALEKMOHAMMADI S, CARRASCO-TEJA M, STORREY S, et al.An experimental study of laminar displacement flows in narrow vertical eccentric annuli[J/OL].Journal of Fluid Mechanics,2010,649;371-398[2010-04-13].
<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=7480964>.
- [32] CARRASCO-TEJA M, FRIGAARD I A, SEYMOUR B. Cementing horizontal wells;Complete zonal isolation without casing rotation[C]// paper 114955-MS presented at the CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference,16-19 June 2008, Calgary, Alberta, Canada. New York;SPE,2008.

(修改回稿日期 2013-03-11 编辑 凌 忠)