

固井工程中的流动问题¹⁾

刘东清^{*†} 周济福^{*} 李家春^{*}

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

[†](胜利石油管理局海洋钻井公司, 山东东营 257062)



刘东清, 男, 1965 年 3 月生, 1989 年毕业于石油大学(华东) 钻井专业, 获学士学位; 2000 年毕业于中国石油大学(华东) 石油工程学院油气井工程专业, 获硕士学位。一直从事固井施工和技术研究工作, 高级工程师, 胜利石油管理局科技拔尖人才, 中国石化集团学术技术带头人。先后有多篇论文在学术期刊上发表。现在读中国科学院力学研究所博士研究生, 研究方向为流体力学。

摘要 固井是油气井在建过程中的重要工程, 一般分下套管和注水泥两个过程。本文结合作者近年来的研究, 着重阐述了钻井液、前置液、水泥浆在环形空间中流动的流体力学问题, 包括: 高温高压下的水泥浆流变性、偏心环形空间中浆液的流动特性、钻井液-前置液和前置液-水泥浆界面的稳定性等, 介绍了国内外学者对这些问题的研究进展, 提出了今后应深入研究的问题。

关键词 固井, 非牛顿流体, 流变模式, 偏心环形空间, 界面稳定性

SOME PROBLEMS OF FLUID MECHANICS IN WELL CEMENTING IN PETROLEUM ENGINEERING

LIU Dongqing^{*†} ZHOU Jifu^{*} LI Jiachun^{*}

^{*}(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 1000800, China)

[†](Offshore Drilling Company, Sinopec Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257062, China)

Abstract Well cementing is an important operation in the construction of any oil well. After a section of the steel casing is inserted into the hole, a sequence of cement slurry is pumped down the inside of the tubing and coming back up through the annular gap, and then allowed to settle in the annulus. Several fluid mechanics problems are discussed in the present paper, such as, how to determine the mechanical models for describing rheological behavior of cementing slurry at high temperature and high pressure, the influences of eccentricities on slurry flow, and the stability of the interface between slurry and spacer. This paper briefly reviews the latest investigations on fluid mechanics problems, and some important directions for future researches are pointed out.

Key words well cementing, non-Newtonian fluid, rheological model, eccentric annulus, interface stability

1 前 言

固井是保证油气井继续钻进、保证完井后各种作业顺利进行的重要手段。固井技术开始于 1920 年,

上世纪 50 年代 API(American Petroleum Institute) 开始规范固井水泥标准, 同时流变学理论开始用于固井设计。上世纪 80 年代起, 计算机技术用于固井设备、工艺的研究。1990 年 API 重新规范了水泥

浆流变学的计算模式,使固井作业更加科学化。进入新世纪,人们提出现代固井技术的概念,高温高压固井技术、水泥浆体系设计技术、流变学理论、环空驱替理论及其应用、计算机模拟等新课题逐渐在实践中得到应用和发展。

所谓固井,是在已经钻成的井眼内下入一定尺寸的套管串,并在套管串与井壁形成的环形空间内注入水泥浆进行封固的工艺技术。一般分下套管和注水泥两个过程。井眼钻成后,起出钻具,下入一定尺寸的套管,井壁和套管外壁间形成一环形空间。一定数量的水泥浆从套管内泵入,驱替出泥浆。水泥浆注完后,再用钻井泥浆把水泥浆驱替到环形空间内,待水泥浆凝固后,部分或全部环形空间即被封固。如图 1 所示,这是一口井第二层套管固井后的示意图。

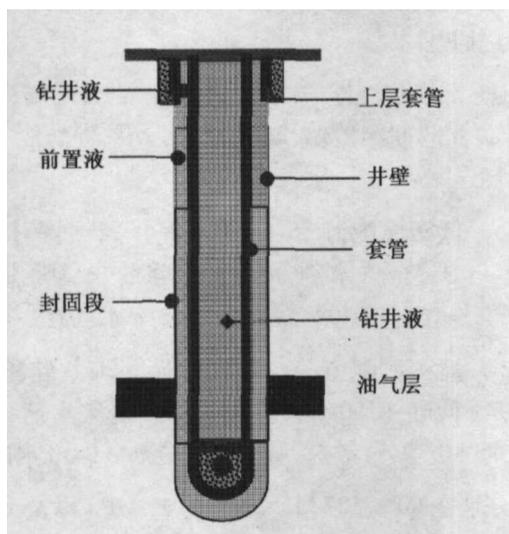


图 1 固井后示意图

固井的目的是利用凝固后的水泥环封隔疏松、易塌、易漏等复杂地层;封隔油、气、水层,防止层间的互串;形成油气通道;安装井口装置,控制油气流,以利于继续安全钻井或保证油气的长期生产。所以,无论油田勘探部门、采油部门,还是钻井服务承包商,对固井质量都特别关注。

固井设计和施工涉及油田化学、固体力学、弹性力学、材料力学、流体力学等很多基础学科,实际应用方面也是化学和力学的交叉,仍有许多机理问题需要解决和研究。本文从流体力学的角度,讨论固井注水泥过程中几个主要的流动问题,如:水泥浆的流变模式、环空中浆液的流动规律、水泥浆驱替前置液和钻井液的界面稳定性等。

2 高温高压下水泥浆的流变性

水泥浆的流变性是研究固井驱替的理论基础。一方面,它是研究注水泥和驱替钻井液过程中的循环磨阻损失的需要,另一方面,为提高驱替效率,改善固井质量,需要设计水泥浆最佳流型^[1]。随着石油勘探步伐的加快和钻井技术的发展,井深不断加大,固井水泥浆要承受的井内温度、压力越来越高,水泥浆高温高压下的流变性研究越来越迫切。但工业界的现场施工设计所使用的水泥浆流变学计算方法都没有考虑温度、压力的变化对水泥浆流变性的影响,以往的文献中也少有介绍^[2]。标准的现场黏度计只能在常压和低于 80°C~90°C 的温度下进行测量,所以不能很好地确定水泥浆流变性与压力和温度之间的关系。

2.1 压力对水泥浆流变性的影响

压力增加会加速水泥的水化,所以对水泥浆的流变性有影响。但限于测试手段的限制(不能模拟高压条件),早期研究一般认为,水的可压缩程度低,且黏度与压力关系不大,所以认为压力对水泥浆流动性质的影响可以忽略不计。然而,随着高温高压流变仪的出现,人们对油井水泥浆流变性有了新的认识:当温度恒定时,养护压力增大,水泥浆的塑性黏度、屈服值和表观黏度都增大,其原因是随压力增大,液相被压缩,使得水泥浆中固相分数增加,内磨阻增大。在低压($< 1 \text{ MPa}$)下,随温度增加表观黏度降低;在高压($\geq 2 \text{ MPa}$)下,随温度增加表观黏度升高。当固相含量增加时,水泥浆流变性对压力变得越来越敏感。

2.2 温度对水泥浆流变性的影响

温度对于水泥浆流变性有重要影响。温度主要通过其升降加速或延缓水泥的水化速度而影响水泥浆的流变性。一般情况下,水泥浆的塑性黏度和屈服值随温度的升高而减小,但减小的程度并非无限。当超过某一称为水泥浆平衡温度的温度点后,塑性黏度达到或接近一恒定值。温度对水泥浆流变性影响的大小在很大程度上取决于水泥浆的组分。如:某种水泥浆中含有水溶性聚合物(羟乙基纤维素),这种物质使间隙水的黏度提高,并使水泥浆的黏度明显增大。另一种水泥浆体系(包含分散剂和乳胶)更为复杂,塑性黏度首先在 25°C~45°C 之间以一定的比率下降,然后从 45°C~85°C 缓慢地升高。

固井现场使用的水泥浆往往受温度和压力的影响更复杂,在这种情况下要描述水泥浆体系的流变

性需要使用更复杂的流变模式。

2.3 水泥浆的流变模式

研究表明,水泥浆属于非牛顿流体,目前国内外大多采用宾汉(Bingham)模式

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dr} \quad (1)$$

或幂律(Power Law)模式

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (2)$$

来描述水泥浆的流变性^[1],其中 τ 为切应力, τ_0 为屈服应力, μ 为塑性黏度, n 为流型指数, k 为稠度系数, dv/dr 为剪切速率。

这两种模式均只包含两个参数,在一定的剪切速率范围内,均能很好地描述水泥浆的剪切应力和剪切速率之间的关系。但是,在较宽的剪切速率范围内,就存在着一些问题,两模式均不能充分地反映水泥浆的流变特性。如:对于既有屈服应力,又有假塑性的水泥浆体系,两种模式均不适用,特别是高温高压下更是如此,因为幂律模式不包含屈服值,且没有考虑到这样一种实际情况,即任何流体在高剪切速率下黏度趋近于一个非零值。因此,无论是在高剪切速率下,还是在低剪切速率下,幂律模式求得的剪切应力都偏低。虽然宾汉模式反映了屈服值和任何剪切速率下的极限黏度,可以克服上述缺点,但是,宾汉模式并不能适用于所有的水泥浆,当在线性坐标系中绘出流变曲线,测得的有些流变数据随着剪切速率的增高,有向剪切速率轴弯曲的趋势时,宾汉模式正好与幂律模式相反,无论在高剪切速率还是在低剪切速率下屈服值都偏高。

为了解决上述问题,人们提出了诸如卡森(Casson)

$$\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0} = \left(\sqrt{\frac{dv}{dr}} \right)^n \quad (3)$$

和赫切尔-巴尔克莱(Herschel-Bulkley)

$$\tau = \tau_0 + k \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (4)$$

等模式。卡森模式常用于钻井泥浆。赫切尔-巴尔克莱模式是带屈服值的幂律模式,通常称为屈服幂

律模式或修正幂律模式。此模式含有3个参数,可以较为充分地反映水泥浆在高温高压下的流变性,特别是掺有外加剂的水泥浆在高温高压下的流变特性不完全遵循二参数的宾汉模式和幂律模式,三参数的赫切尔-巴尔克莱模式更适合。此外,反线性、指数、双曲线以及对数等流变模式亦偶有应用。

针对胜利油田海上油田固井常用水泥浆体系,作者开展了高温高压下水泥浆的流变实验。实验采用美国Chandler公司生产的7400型高温高压流变仪,该仪器专门用于高温高压条件下测量钻井液、水泥浆、压裂液等液体的流变性,适用于所有牛顿液体和非牛顿液体的测量,包括剪切相关和时间相关的液体。该仪器能够模拟钻井液、水泥浆等在环空中的流动状态,较之常压流变仪更真实和可靠,对现场施工具有重要的指导意义。

选用胜利油田3种有代表性的常用配方水泥浆,它们是:

1# 常规密度配方: G级水泥+1.2%降失水剂+0.8%分散剂+2.0%膨胀剂+1.0%缓凝剂+44%水灰比。

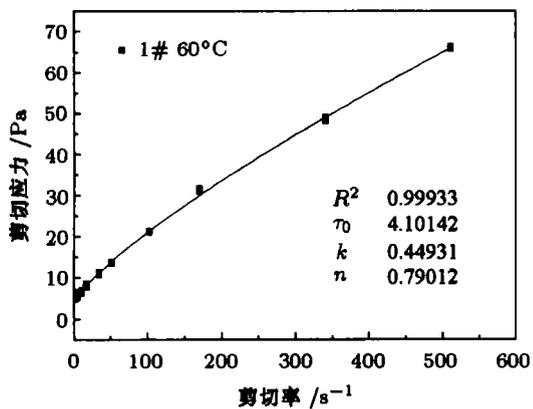
2# 低密度配方: G级水泥+25%漂珠+8%微硅+1.2%降失水剂+1.0%早强剂+1.0%膨胀剂+1.0%分散剂+1.0%缓凝剂+55%水固比。

3# 高密度配方: G级水泥+20%硅粉(120目)+5%微硅+150%铁矿粉+0.8%降失水剂+1.0%膨胀剂+0.8%分散剂+1.0%缓凝剂+29%水固比。

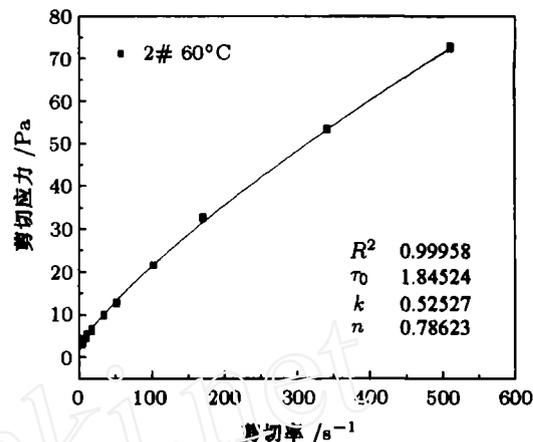
分别在60°C, 27 MPa, 90°C, 40 MPa以及120°C, 70 MPa等3种不同温度(对应于不同井深)和压力下进行流变实验,图2~图4给出了各配方在不同温压条件下,实验点数据和屈服幂律模式的拟合曲线及其流变参数和相关系数的平方 R^2 。由图可见,表征拟合曲线与实验点数据相关程度的相关系数的平方均大于0.99,说明屈服幂律模式基本可用来描述3种常用水泥浆的流变性。与此同时,利用宾汉、幂律、屈服幂律、卡森、反线性、指数、双曲线以及对数等模式拟合水泥浆流变曲线,优选水泥浆体系的最佳流变模式。表1按相关系数最大统计出了各配

表1 不同温压下各配方水泥浆的最佳流变曲线

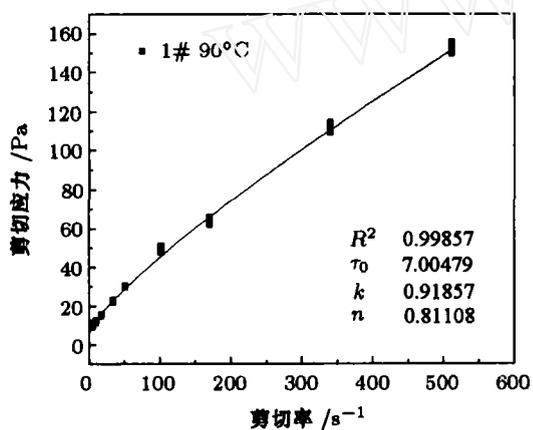
水泥浆配方	1号配方			2号配方			3号配方		
实验温度/°C	60	90	120	60	90	120	60	90	120
实验压力/MPa	27	40	70	27	40	70	27	40	70
最佳流变模式	屈服幂律	宾汉	屈服幂律						



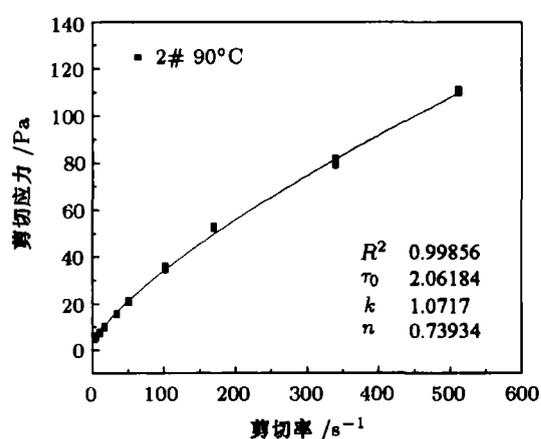
(a) 60°C, 27 MPa



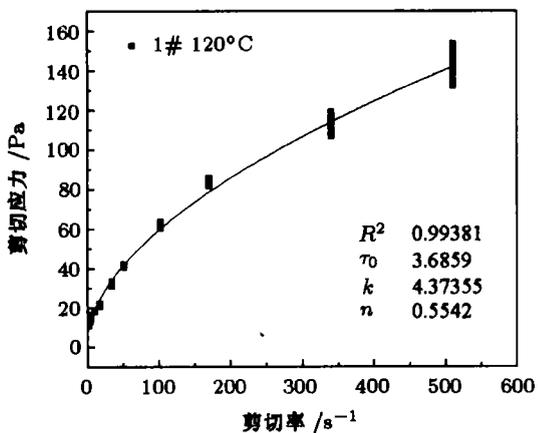
(a) 60°C, 27 MPa



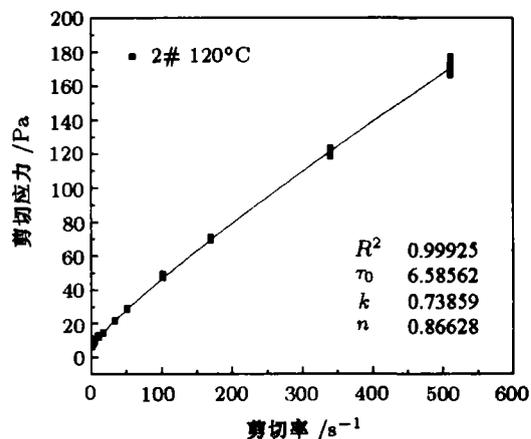
(b) 90°C, 40 MPa



(b) 90°C, 40 MPa



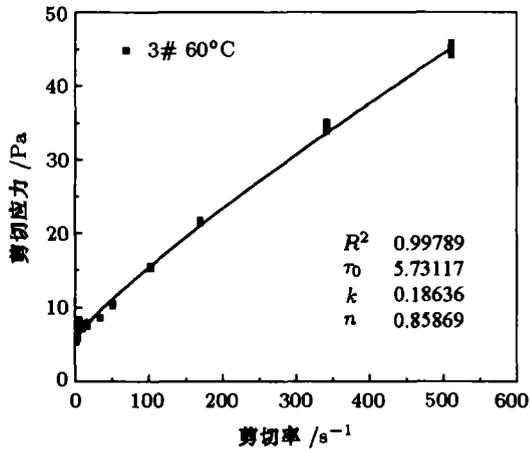
(c) 120°C, 70 MPa



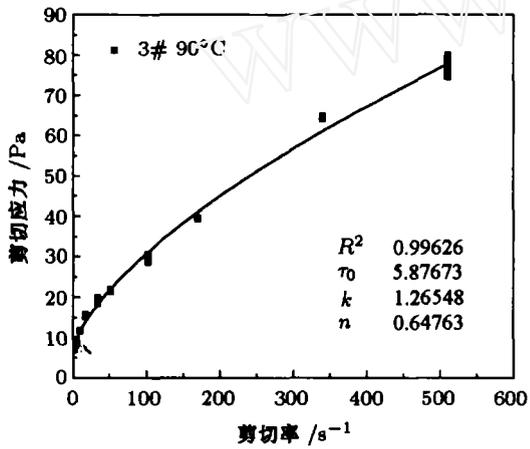
(c) 120°C, 70 MPa

图 2 1# 配方水泥浆时的流变拟合曲线

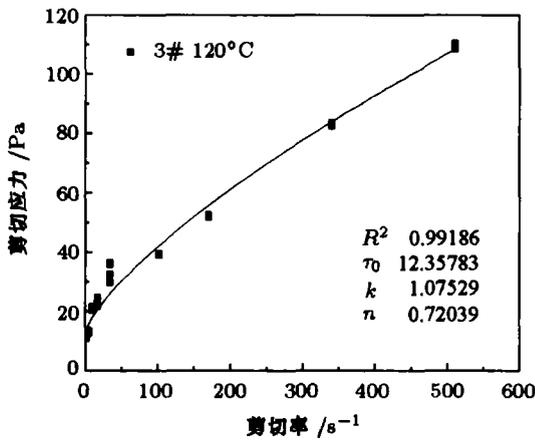
图 3 2# 配方水泥浆时的流变拟合曲线



(a) 60°C, 27 MPa



(b) 90°C, 40 MPa



(c) 120°C, 70 MPa

图4 3# 配水水泥浆时的流变拟合曲线

方在不同温压下的最佳流变模式, 可见, 虽然屈服幂律模式表现出较好的普适性, 但不能排除例外情形, 如: 在 90°C, 40 MPa 的条件下, 1# 水泥浆的最佳流变模式为宾汉模式。

因此, 水泥浆流变性的研究仍然具有重要意义, 特别是水泥浆内各组分物质随时间不断进行化学反

应, 导致其流变性随时间变化 [2]。但这方面的研究很少, 几乎没有可借鉴的工作。到目前为止, 人们所提出的水泥浆流变模式大多只能代表特定水泥浆体系在一定时间和一定混配速度下的水泥浆性能。

3 非牛顿浆液的环形空间流动

理想情况下, 套管与井眼中心应重合。但实际工程中, 套管与井眼中心往往有偏离, 如图 5 所示, 其中 R_1, R_2 分别为套管和井眼的半径, e 为偏心距, 偏心度定义为

$$\epsilon = \frac{e}{R_2 - R_1} \quad (5)$$

偏心度越大, 则环形空间 (简称环空) 中宽隙越宽, 窄隙越窄。偏心度为零时, 表示同心环空; 偏心度为 1 时, 套管与井壁一侧接触。

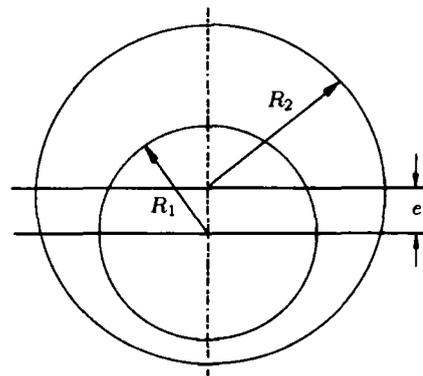


图5 偏心环空截面示意图

研究早期, 为了简化问题, 人们广泛研究同心环空的轴向流动。同时在偏心度不是很大的情况下, 同心环空流作为偏心环空流的理论简化模型, 它具有很大的理论价值。近年来, 许多学者、专家专门研究钻井液或水泥浆在同心环形空间中的流动规律与特点, 已经形成了环空流体力学这一新型分支学科。

随着油田开发力度的加大和石油钻井技术的发展, 定向井或丛式井增多, 人们有意识地将井眼钻成偏斜或水平的, 进而达到方便施工和提高原油产量的目的。在斜井或水平井的情况下, 由于重力作用, 套管会偏离井眼中心, 甚至可能触及底侧井壁。此时, 固井套管与井壁之间构成的水泥浆上返流道的横截面将不再是同心环空, 而是偏心环空。偏心环空将对钻井液和水泥浆的流动规律产生影响, 钻井环空水力学中惯用的同心环空假设也不再成立。由于黏性作用, 属于非牛顿液的钻井液、固井前置液和水泥浆在偏心环空中的轴向层流流动规律 (如

速度分布、压降和流量等), 与同心环空时有很大不同 [3]。于是, 固井工程便遇到了钻井液和水泥浆这类非牛顿流体在偏心环空中流动的复杂流动问题, 对这一问题认识和重视的程度, 将直接影响固井设计和现场固井施工的程序, 从而影响固井质量。因此, 研究钻井液、水泥浆偏心环空轴向流动具有更明显的理论意义和实用价值。

不少学者对偏心环空中的流动规律进行了研究。Heyda^[4] 用格林函数法对偏心环空中牛顿流体的轴向流速场进行了研究。Redberger 等^[5] 用上述方法求解了牛顿流体轴向稳定层流的无因次流量分布。Vaugh 等^[6] 将偏心环空处理成变高度的槽道, 研究了幂律流体的轴向定常层流。之后, Iyoho 和 Azar^[7] 改变了计算槽高的方法。Tosun 等^[8] 又把 Iyoho 的方法应用于牛顿和非牛顿流体的流量计算。Walton 和 Bittleston^[9] 研究了宾汉流体在偏心环空窄隙中轴向流动规律。Szabo 和 Hassager^[10] 分析了黏塑性流体在偏心环空中流动的几何特性, 随后又发布流体本身密度对同心环空中两种牛顿流体置换效率影响的研究结果。Bittleston 等^[11] 在提交世界石油工程师学会的文章中, 介绍了对油井一次注水泥过程中水泥浆驱替泥浆的研究, 用二维模型着重推导了定向井条件下, 偏心环空宽窄隙中的速度变化及质点运移规律。Frigaard^[12] 运用数值模拟方法对偏心环空流进行研究, 考虑浮力的影响, 分析了稳定流存在的条件。

定义环空流速不均匀度为

$$\delta = \frac{V_w}{V_n} \quad (6)$$

其中, V_w, V_n 分别为宽、窄隙处的最大流速。 δ 越大, 则环空中宽隙与窄隙的流速差别越大, 速度分布越不均匀。笔者运用 FLUENT 软件对水泥浆屈服幂律流体在相同流量、不同偏心度下的流动规律进行了数值模拟, 结果表明: 环空的偏心度对速度分布的影响非常明显, 偏心度越大, 环空流速分布越不均匀。如图 6, 图 7, 当偏心度增大时, 流动的不均匀性变大, 因平均速度 (V) 不变, 则宽隙的最大速度亦增加, 偏心度为 0.4 时, 宽隙的最大速度约为平均速度的 2.2 倍。但偏心度继续增加时, 最大速度增长趋势变缓, 当偏心度大于 0.6 时, 最大速度增加已经不明显; 而宽、窄间隙中的最大速度比则随着偏心度的增加持续增大, 且偏心度较大时, 流动的不均匀度陡增, 这说明窄隙中的流速明显降低, 浆液主要通过宽隙流动。这种情况对固井工程非常不利,

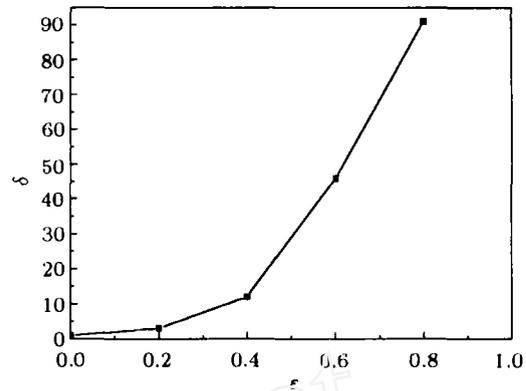


图 6 偏心度对环空流速分布不均匀度的影响

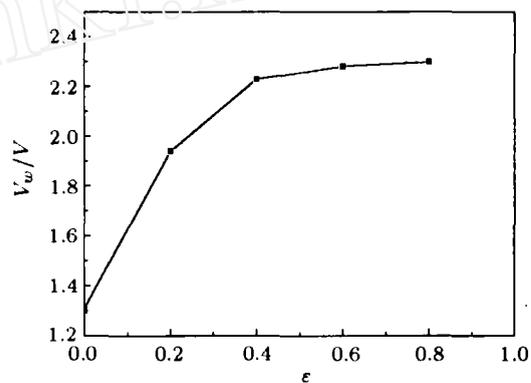


图 7 偏心度对宽隙最大流速与环空平均速度比的影响

应尽量避免。

浆液的平均环空返速也是影响流动不均匀度的主要因素。图 8 表示偏心度分别为 0.2, 0.4 两种情况下, 不同环空返速 (V) 对不均匀度影响的数值结果。可以看出, 在某一偏心度条件下, 随着流速的增加, 流动不均匀度逐渐降低, 流动逐渐变得均匀, 大偏心度时的流动不均匀度随返速降低更明显。所以, 在偏心度越大的情况下, 越应尽量提高水泥浆泵速。

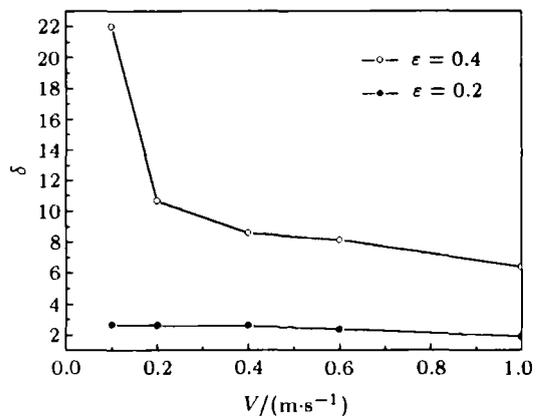


图 8 流动速度对偏心环空流动不均匀度的影响规律

现场发现,提高水泥浆的环空返速往往有利于提高固井质量.在因机械或地层原因,不可能提高环空返速时,通过在水泥浆前注入一段轻质流体或低密度水泥浆有时也能达到不错的效果.据此推测,环空中的湍流很可能有利于固井质量的提高,因为上述两种途径都将提高流动的雷诺数.但由于湍流的复杂性,人们以往对偏心环空中非牛顿流体流动的研究大多局限于层流阶段.

4 环空流体驱替界面的稳定性

油气井固井工程中,环空上返的钻井液、前置液、水泥浆间存在两层界面,即钻井液-前置液界面、前置液-水泥浆界面,如图9所示.它们的稳定性对固井质量有重要影响^[15].前者不稳定将使钻井液污染前置液,从而影响前置液的功效,后者不稳定将导致前置液与水泥浆相互掺混,从而增加泥浆段长度,降低水泥环的胶结质量,影响固井质量.

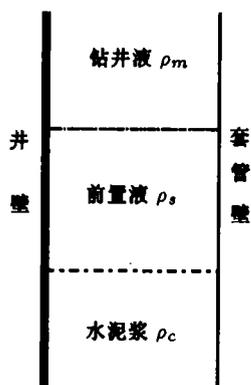


图9 环空中钻井液、前置液、水泥浆及其界面示意图

常见的界面不稳定性主要有两类:一类是不同密度的流体在重力或惯性力作用下的界面不稳定性,即 Rayleigh-Taylor 不稳定性.根据该稳定性理论,在重力场中,要保持两层流体界面的稳定,必须满足上层流体密度小于下层流体的密度^[14~16].因此,在固井工程中,钻井液、前置液和水泥浆密度之间应满足如下关系

$$\rho_m < \rho_s < \rho_c \quad (7)$$

其中 ρ_m , ρ_s , ρ_c 分别为钻井液 (drilling mud)、前置液 (spacer)、水泥浆 (cement slurry) 的密度.

即使如此,水泥泵的起停仍然可能使上述两界面不稳定,因为水泥泵突然启动将使环空上返浆液获得向上的加速度,该加速度的方向由密度大的流体指向密度小的流体,其作用恰好与重力加速度的作用相反.因此,施工过程中,应尽量避免开关泵的次數,开泵时亦应缓慢加大排量.

另一类是两流体间存在有切向速度差时,造成交界面上扰动的发展,例如风在水面会刮起大的波浪,此即 Kelvin-Helmholtz 不稳定性^[17].对于偏心环空中的密度分层流动,由于宽窄隙的流速有差异,且分层流体的流变性也不相同,则界面间可能存在有切向速度梯度,因而可导致该界面的不稳定.

作者借助于 FLUENT 软件,利用 VOF 方法对偏心环空内的前置液-水泥浆界面演化过程进行了数值模拟,模拟的环空区域为井筒长 10 m,外径 0.112 m,内径 0.089 m,分析了速度及偏心度等对界面稳定性的影响.

模拟结果表明,偏心度不为零时,由于宽窄隙的速度差异,前置液-水泥浆界面发生倾斜,从而产生一尾迹,当尾迹变长断裂时,两相流体互相掺混,界面“失稳”,驱替效率大大降低.如偏心度为 0.4 时,在低速条件下,界面不失稳,驱替可以有效进行.随着速度的增加,界面开始倾斜,并于窄隙处出现尾迹,速度达到 0.4 m/s 时,尾迹发生间断,界面失稳(图 10).但 $V = 2$ m/s 时,上返流动达到湍流状态,此时虽然界面倾斜角度较大,但是没有出现失稳现象(图 11),驱替效率也较高,且当 $V = 3$ m/s 时,界面形状及驱替效率已相差不大.这说明流动达到湍流后,速度的继续提高对驱替效率的提高影响不

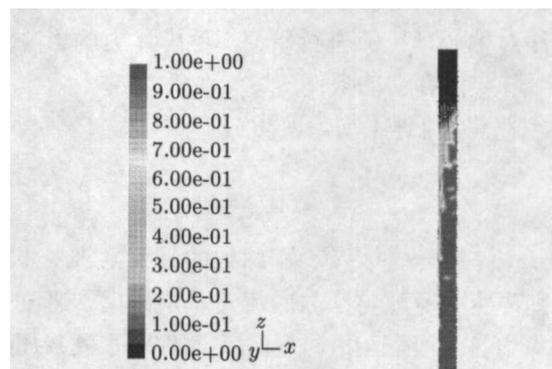


图 10 $\epsilon = 0.4$, $V = 0.4$ m/s 的前置液-水泥浆界面

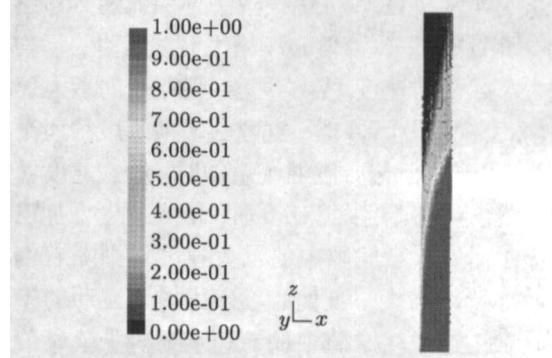


图 11 $\epsilon = 0.4$, $V = 2.0$ m/s 的前置液-水泥浆界面

大. 这可能是因为, 湍流的脉动有利于使速度分布趋于比层流均匀化. 因此, 现场注水泥作业不应过分强调提高流量, 只需要达到足够的雷诺数, 能使整个环空充分湍流, 就可以达到满意的注水泥结果.

偏心度对界面稳定性影响很大. 在偏心度为零时, 界面较稳定, 只是在速度较高时略有波动, 此时固井质量容易保证. 而随着偏心度的增加, 驱替界面将产生倾斜, 直至产生尾迹, 界面失稳. 这主要是因为偏心时速度分布不均匀, 偏心度越大, 速度差异越明显, 界面就越不稳定, 驱替效率也越差. 这已经为许多学者从理论及实验方面得到了证明. 由于在工程实际中存在水泥浆的脱水固化现象, 难以采用低速的层流驱替, 而高速的湍流驱替也受到工程装备的限制, 因此降低套管的偏心度是保证驱替界面稳定、提高驱替效率的有效手段.

尽管 20 世纪 60 年代中叶人们已经认识到环空窄隙中存在窜槽的可能, 认识到驱替过程中获得稳定流动的益处, 但至今还不能确切知道稳定流何时出现. 1990 年以后人们开始较精确地分析黏塑性流体环空窄隙的流动^[9,10], 但也只局限在单一流体的二维流动. 由于驱替的数学模型是三阶非线性偏微分方程, 理论求解难度较大, 而实验研究也受实验条件及资金的限制, 无法对驱替过程进行各种不同条件的精确模拟. 采用现代计算技术, 模拟偏心环空中的三维非牛顿流动, 将有力促进固井理论和技术的发展.

5 结束语

固井工程涉及力学的许多方面, 其中的流体力学问题主要包括: 钻井液、前置液、水泥浆的流变性; 浆液的环空流动特性; 两层界面的稳定性等. 虽然已经取得不少研究成果, 但是关于水泥浆最佳流型和前置液科学配方的设计、偏心环空中非牛顿流体的湍流流动、偏心环空中两层界面在湍流情形的稳定性等还有待于更深入的研究, 如: 非牛顿水泥浆流变特性与时间的关系、遵循不同流变模式的非牛顿流体在不同偏斜度条件下的流动规律、湍流驱替提高驱替效率的机理、湍流时界面稳定的原因等.

致谢 感谢中国石油大学孙宝江教授和高永海博士在本文实验和计算方面给予的帮助; 同时感谢中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院石油钻井研究所丁士东博士及其实验室同志们给予的大力支持.

参 考 文 献

1 王伟, 黄柏宗. 高温高压下水泥浆的流变性及其模式. 油田化学,

- 1994, 11(1): 18~21 (Wang Wei, Huang Bozong. Mathematical models for describing rheological behavior of cement slurries at high temperatures and high pressures and methods of determining parameters in them. *Oilfield Chemistry*, 1994, 11(1): 18~21(in Chinese))
- 2 丁岗, 刘东清. 油井水泥工艺及应用. 石油大学出版社, 2000 (Ding Gang, Liu dongqing. *Oil Well Cement Craft and Application*. Petroleum University Press, 2000(in Chinese))
- 3 王海阁, 朱明亮. 屈服假塑性流体偏心环空流动的基本特征. 钻采工艺, 1997, 20(6): 5~12(Wang Haige, Zhu Mingliang. Specialities of the robertson-stiff fluids in eccentric annuli. *Oil Drilling and Production Technology*, 1997, 20(6): 5~12 (in Chinese))
- 4 Heyda JFA. Green's function solution for the case of non-concentric circular cylinders. *J Franklin Inst*, 1959, 267: 25~34
- 5 Redberger PJ, Charles ME. Axial laminar flow in circular pipe containing a fixed eccentric core. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1962, 40: 148~151
- 6 Vaughn RD. Axial Laminar Flow of Non-Newtonian Fluids in Narrow Eccentric Annuli, SPE1418, 1965. 277~280
- 7 Iyoho AW, Azar JJ. An Accurate Slot Flow Modle for Non-Newtonian Flowthrought Eccenteic Annuli. SEP12615, 1981. 566~572
- 8 Tosun I. Axial laminar in an eccontric annulus: An approximate solution. *Aiche J*, 1984, 30: 877~878
- 9 Walton IC, Bittleston SH. The axial flow of a Bingham plastic in a narrow eccentric annulus. *J Fluid Mech*, 1991, 222: 39~60
- 10 Szabo P, Hassager O. Flow of viscoplastic fluids in eccentric annular geometries. *J Non-Newtonian Fluid Mech*, 1992, 45: 149~169
- 11 Bittleston SH, Ferguson J, Frigaard IA. Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well. *J Engng Math*, 2002, 43: 229~253
- 12 Frigaard IA, Pelipenko S. Effective and Ineffective Strategies for Mud Removal and Cement Sluury Design. SPE80999, 2003
- 13 Lockyear CF, Ryan DF, et al. Cement channeling: how to predict and prevent. *Drilling Engineering*, SPE19865, 1990. 201~208
- 14 谢正桐, 李家春, 王丽丽. R-T 界面不稳定性及湍流混合的大涡模拟. 计算物理, 2002, 19(2): 108~114 (Xie Zhengtong, Li Jiachun, Wang Lili. Large eddy simulation of R-T instability and turbulent mixing. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2002, 19(2): 108~114 (in Chinese))
- 15 Wang Lili, Li Jiachun, Xie Zhengtong. Large-eddy-simulation of the 3dimensional Rayleigh-Taylor instability in incompressible fluids. *Science in China (Series A)*, 2002, 45(1): 95~106
- 16 Wang Lili, Li Jiachun. Fluid mixing due to Rayleigh-Taylor instability in a time-dependent acceleration history. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2005, 10: 571~577
- 17 王继海. 二维非定常流和激波. 北京: 科学出版社, 1994 (Wang Jihai. *Two-dimensional Unsteady Flow and Shock Waves*. Beijing: Science Press, 1994 (in Chinese))