

新型固井冲洗液评价装置适用性分析

王乐顶¹, 杨远光², 谢应权², 唐 欣²

(1. 中国石油渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司, 天津 300280; 2. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川成都 610500)

摘 要:为了明确新型固井冲洗液评价装置的适用范围, 根据评价装置内筒外壁面处与固井环空壁面剪切速率相等的原理, 结合罗伯逊-斯蒂夫流变模式推导了冲洗液为牛顿、宾汉和幂律流体时其在内筒外壁处剪切速率的计算公式, 并分析了不同流变模式冲洗液内筒外壁面处剪切速率与固井环空壁面剪切速率的误差。分析结果为: 当冲洗液为牛顿流体时, 评价装置在内筒外壁面处的剪切速率与固井界面处相等, 不存在理论误差; 当冲洗液为宾汉和幂律流体时, 评价装置内筒外壁面处的剪切速率大于固井界面处, 且剪切速率增量与内外筒间隙和冲洗液流变性质有关; 当评价装置外内筒半径比限定在 1.04~1.20 时, 冲洗液为幂律流体且流性指数大于 0.6 或为宾汉流体且动塑比小于 1 Pa/(mPa·s) 时, 剪切速率相对误差在 10% 以内。研究结果表明, 评价装置外内筒半径比越小, 相对误差越小, 其适用范围越大。

关键词: 固井; 冲洗液; 评价装置; 适用性; 流变模式

中图分类号: TE256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2017)01-0073-05

Applicability of a New Device for Cementing Flushing Fluid Evaluation

WANG Leding¹, YANG Yuanguang², XIE Yingquan², TANG Xin²

(1. Downhole Technology Service Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300280, China; 2. Petroleum and Gas Engineering College, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: To clarify the application scope of an innovative evaluation device for cementing flushing fluid, a calculation model for shear rates of Newtonian, Bingham and power-law fluids on external wall of the inner barrel was established in accordance with the Robertson-Stiff rheological model and with consideration to the equivalent shear rate on external wall of the inner barrel and on annular sidewall in cementing. In addition, errors between the shear rate of the external sidewall of inner barrel and that of cementing annular sidewall under different rheological modes was analyzed. Research results showed that the shear rate at the inner wall of the device is equal to that at the cementing interface with no theoretical error for Newtonian fluids, while the shear rate of the inner cylinder wall is higher than that on the cementing interface, and the increase in shear rates is related to the inner and outer cylinder gap and rheological properties of the flushing fluids for Bingham and the power-law fluids. When the diameter ratio between the outer and inner barrel is 1.04~1.20 and the flushing power-law fluid flow indexes over 0.6, or plastic viscosity below 1.0 Pa/(mPa·s) for Bingham fluid, their relative error in the shear rate can be maintained less than 10%. Research results show the smaller ratio between external and internal barrels diameter would cause less relative error, and the application scope of the device would be more extensive.

Key words: cementing; flushing fluid; evaluation device; applicability; rheological mode

目前, 国内外对固井冲洗液的评价多采用旋转黏度计法^[1-6], 该方法由 Berg 于 1977 年首创。旋转黏度计法虽然应用广泛, 但模拟的剪切速率单一(模拟壁面剪切速率为 340 s^{-1}), 不能适应不同井身结构和环空返速下的剪切速率变化, 有很大的局限性和偏差, 而且外筒旋转时存在较大离心力, 与现场实际存在很大偏差, 不能准确反映冲洗液对固井界面

的冲洗效果^[7]。因此, 笔者基于固井环空壁面与评价装置内筒外壁面处剪切速率相等的原理, 研究出

收稿日期: 2016-03-27; **改回日期:** 2016-10-15。

作者简介: 王乐顶(1986—), 男, 山东菏泽人, 2011年毕业于东北石油大学石油工程专业, 2014年获西南石油大学石油与天然气工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事钻完井作业施工与研究。E-mail: wangding1899@163.com。

一种新的冲洗液评价方法及装置^[8-9],可用于室内评价油基钻井液和水基钻井液条件的固井冲洗液。为获得最佳评价效果,计算了常规流变模式冲洗液在评价装置内筒外壁处的剪切速率,分析了评价装置的适用范围及理论剪切速率与试验剪切速率间的相对误差,并对评价装置的结构进行了优化。

1 新型冲洗液评价装置结构及原理

1.1 基本结构

新型冲洗液评价装置主要由岩心柱或钢柱、外筒、转换接头、传动装置、电机、框架、承托盘和浆杯等构成(见图1)。该装置通过电机驱动外筒旋转来带动冲洗液冲刷固定岩心柱或钢柱,通过调节外筒的转速和改变内外筒尺寸,使内筒外壁面与固井环空壁面的剪切速率相等。该评价装置在评价冲洗液冲洗效果的同时,还可以通过变换内筒材质(岩心柱或钢柱)评价冲洗液对固井界面的润湿反转情况,并依据评价结果对固井冲洗液的性能进行优化^[7]。

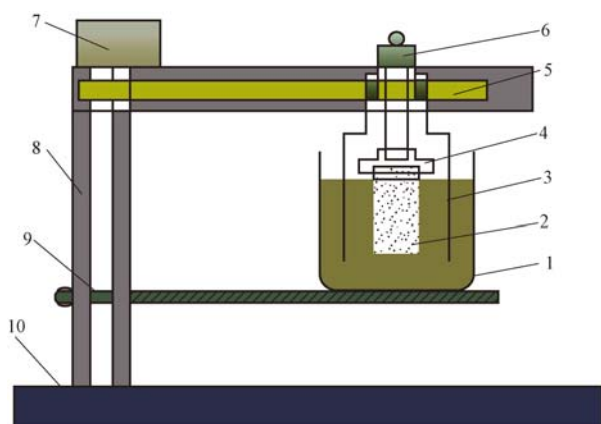


图1 新型冲洗液评价装置基本结构

Fig.1 Basic structure of the new device for flushing fluid evaluation

1. 浆杯;2. 岩心柱或钢柱;3. 外筒;4. 转换接头;5. 传动装置;
6. 转速调节档;7. 电机;8. 框架;9. 承托盘;10. 底座

1.2 评价原理

新型冲洗液评价装置通过2个同轴圆筒体之间的环形空间流动模拟冲洗液在套管和井壁之间环形空间内的流动(见图2),以二者剪切速率相等为理论依据,评价冲洗液的冲洗效率。固井作业时,可根据冲洗液评价结果优化固井施工参数(如冲洗液种类、冲洗时间和冲洗排量等)。

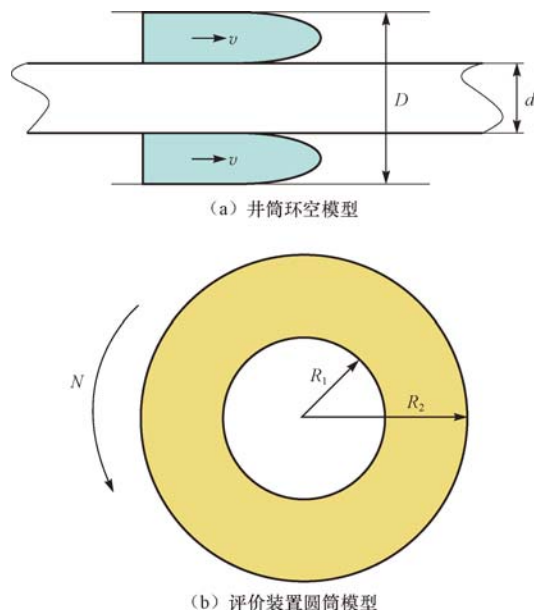


图2 新型冲洗液评价装置基本工作原理

Fig.2 Fundamental operation principles of the new device for flushing fluid evaluation

固井胶结界面处即套管与井眼环空壁面处的剪切速率为^[10]:

$$\gamma_h = \frac{12v}{D-d} \quad (1)$$

式中: γ_h 为环空壁面处剪切速率, s^{-1} ; v 为环空平均返速, m/s ; D 为井眼直径, m ; d 为套管外径, m 。

评价装置固定内筒外壁面处的剪切速率为^[11]:

$$\gamma_1 = \frac{0.20944NR_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (2)$$

式中: γ_1 为内筒外壁面处剪切速率, s^{-1} ; N 为外筒转速, r/min ; R_2 为外筒内半径, mm ; R_1 为内筒外半径, mm 。

在应用新型冲洗液评价装置评价冲洗液的冲洗效率时,通过调整外筒转速或改变外筒内半径和内筒外半径,使 γ_h 与 γ_1 相等。

2 不同流变模式下新型冲洗液评价装置的适应性分析

由评价装置的原理可知,新型冲洗液评价装置的核心部分在于内筒和外筒,对于如何确定二者的比例和尺寸,以及其评价不同流变模式冲洗液时的误差,需要进行理论推导和分析。笔者对不同流变模式(牛顿、宾汉和幂律模式)下新型冲洗液评价装置的适用性进行了分析,并计算了理论剪切速率与试验剪切速率的相对误差。

2.1 理论推导

假设评价装置外筒内半径为 R_2 , 旋转角速度为 ω , 内筒外半径为 R_1 , 高度为 h , 层流下各层液体旋转扭矩 M 为常数。取环形间隙半径为 x 的任意一层液体, 其角速度为 ω_x , 液层的侧面积 $S_x = 2\pi xh$, 旋转扭矩 $M_x = 2\pi x^2 h \tau_x$ 。

半径 x 处的剪切速率 γ_x 为:

$$\gamma_x = \frac{d\omega_x}{dx} = \frac{x d\omega_x}{dx} \quad (3)$$

对式(3)进行变换得:

$$d\omega_x = \frac{\gamma_x dx}{x} \quad (4)$$

因 $\tau_x = \frac{M_x}{2\pi x^2 h}$, 则

$$\frac{d\tau_x}{dx} = -\frac{2\tau_x}{x} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得:

$$d\omega_x = -\gamma_x \frac{d\tau_x}{2\tau_x} \quad (6)$$

当 $x=R_1$ 时, $\omega_x=0$, $\tau_x=\tau_1$; 当 $x=R_2$ 时, $\omega_x=\omega$, $\tau_x=\tau_2$ 。对式(6)进行积分可得:

$$\omega_x = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{-\gamma_x}{2\tau_x} d\tau_x \quad (7)$$

式中: x 为任一环形间隙半径, m; τ_x 为环形间隙半径 x 处液层的剪切应力, Pa; γ_x 为半径 x 处液层的剪切速率, s^{-1} ; τ_1 为内筒外半径处液层的剪切应力, Pa; τ_2 为外筒内半径处液层的剪切应力, Pa; ω_x 为环形间隙半径 x 处液层的角速度, rad/s; h 为内筒高度, m。

式(7)可用来评价该装置任一环形间隙半径处剪切速率与剪切应力和旋转角速度之间的关系。笔者选用可以描述牛顿、宾汉和幂律 3 种常规流变模式的罗伯逊-斯蒂夫模式对冲洗液不同流变模式下内筒外壁处的剪切速率进行了计算^[12]。

罗伯逊-斯蒂夫流变模式的剪切速率公式为:

$$\gamma = \left[\frac{\tau}{A} \right]^{\frac{1}{B}} - C \quad (8)$$

式中: A 为稠度系数, $Pa \cdot s^n$; B 为流性指数; C 为剪切稀释系数, s^{-1} 。

将式(8)代入式(7)得:

$$\omega = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left[C - \left[\frac{\tau}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \right] \frac{d\tau}{2\tau} \quad (9)$$

对式(9)进行积分, 并将 $\tau_1 = \frac{M}{2\pi h R_1^2}$, $\tau_2 = \frac{M}{2\pi h R_2^2}$ 代入得:

$$\omega = \frac{B}{2} \left[\frac{\tau_1}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \frac{R_2^{\frac{2}{B}} - R_1^{\frac{2}{B}}}{R_2^{2/B}} - C \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (10)$$

对式(10)进行变换并与式(8)联立得:

$$\left[\frac{\tau_1}{A} \right]^{\frac{1}{B}} = \frac{\left[2\omega + 2C \ln \frac{R_2}{R_1} \right] R_2^{\frac{2}{B}}}{B(R_2^{\frac{2}{B}} - R_1^{\frac{2}{B}})} = \gamma_1 + C \quad (11)$$

将 $\omega = \frac{2\pi N}{60}$ 代入式(11), 即得评价装置内筒外壁处的剪切速率:

$$\gamma_1 = \frac{0.20944N}{B \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{2}{B}} \right]} + \frac{2C \ln \frac{R_2}{R_1}}{B \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{2}{B}} \right]} - C \quad (12)$$

对式(12)进行分析以讨论不同流变模式下内筒外壁处的剪切速率。

1) 当 $B=1, C=0$ 时, 为牛顿流变模式, 评价装置内筒外壁处的剪切速率为:

$$\gamma_N = \frac{0.20944N}{1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2} \quad (13)$$

2) 当 $B=1, C \neq 0$ 时, 为宾汉流变模式, 评价装置内筒外壁处的剪切速率为:

$$\gamma_B = \frac{0.20944N}{1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2} + (b-1)C \quad (14)$$

其中

$$C = \frac{\tau_0}{\eta_b} \quad (15)$$

$$b = \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (16)$$

式中: τ_0 为宾汉流变模式下流体的动切力, Pa; η_b 为宾汉流变模式下流体的塑性黏度, $Pa \cdot s$ 。

3) 当 $B \neq 1, C=0$ 时, 为幂律流变模式, 评价装置内筒外壁处的剪切速率:

$$\gamma_M = \frac{0.20944N}{B \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{2}{B}} \right]} \quad (17)$$

2.2 冲洗液为牛顿流体

由式(13)可以看出, 当被测冲洗液为牛顿流体时, 评价装置内筒外壁面处的剪切速率仅与外筒转速有关, 而与被测冲洗液性质无关。通过观察可知, 式(13)经变形与式(2)相同, 即在冲洗液为牛顿流体时, 评价装置能够完全模拟实际固井中冲洗液对固井界面的冲刷, 并且可使二者的剪切速率完全相等, 理论上不存在误差。因此, 当待测冲洗液为牛顿流体或为近似牛顿流体时, 利用该装置评价不存在理

论误差。

2.3 冲洗液为宾汉流体

由式(14)可以发现,当冲洗液为宾汉流体时,评价装置内筒外壁面处的剪切速率包括冲洗液为牛顿流体时的剪切速率和由流体的动切力所引起的剪切速率2部分,因此可以将式(14)转化为:

$$\gamma_B = \gamma_N + (b-1) \frac{\tau_0}{\eta_p} \quad (18)$$

从式(18)可以看出,第二部分剪切速率除与动切力成正比外,还与评价装置的内外筒半径有关系。由于宾汉流体的动切力 τ_0 和塑性黏度 η_p 不随剪切应力和剪切速率变化,是恒定的值,属于流体的固有性质。所以在同一待测流体下,内筒外壁面处的剪切速率只与内外筒半径比有关系。表1为不同动塑比流体在不同外内筒半径比条件下,与牛顿流体相比剪切速率的增量。

表1 不同动塑比和半径比时评价装置剪切速率增量

Table 1 Increments of shear rates under different ratios of plastic viscosity and radii

动塑比	不同外内筒半径比下的剪切速率增量/ s^{-1}						
	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.24	1.28
1	3.97	7.89	11.76	15.58	19.34	23.05	26.71
2	7.95	15.79	23.52	31.15	38.68	46.10	53.42
3	11.92	23.68	35.28	46.73	58.01	69.15	80.13
4	15.89	31.57	47.04	62.30	77.35	92.20	106.84
5	19.87	39.47	58.80	77.88	96.69	115.24	133.55

由式(14)、式(18)和表1可以得出宾汉流体剪切速率增量有以下规律:1)当外筒、内筒半径及被测液体性质一定时,剪切速率增量为常数,与外筒转速无关;2)剪切速率增量与内外筒间隙有关,间隙越大剪切速率增量越大并随间隙增大呈线性增大;3)剪切速率增量与液体性质有关,随着液体动塑比增大近似呈线性增大。

在相同转速下,宾汉流体的剪切速率大于牛顿流体的剪切速率,只有当 $R_2/R_1=1.00$ 时,2种流体的剪切速率才相等,但是要将内筒外半径和外筒内半径加工成同一尺寸,难以实现。因此,只能通过分析不同内外筒半径比下宾汉流体相对于牛顿流体的剪切速率误差,对宾汉流体的剪切速率进行修正。在外筒转速为 300 r/min、不同外内筒半径比条件下,利用式(13)和式(14)计算牛顿流体与宾汉流体(动塑比为 $1.0 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$)的剪切速率,结果见

表2。为了方便测量,一般将内筒外半径 R_1 固定为 12.5 mm,即常规岩样的尺寸。因此,宾汉流体相对于牛顿流体的剪切速率增量只与外筒内半径有关。

表2 不同外内筒半径比下牛顿流体和宾汉流体的剪切速率
Table 2 Shear rates of Newtonian and Bingham fluids under different radii ratios

R_2/R_1	剪切速率/ s^{-1}		相对误差, %
	牛顿模式	宾汉模式	
1.04	832.83	836.81	0.48
1.08	440.43	448.32	1.79
1.12	309.81	321.57	3.80
1.16	244.64	260.21	6.37
1.20	205.63	224.97	9.40
1.24	179.71	202.76	12.83
1.28	161.25	187.96	16.56
1.32	147.47	177.79	20.56

由表2可知,外内筒半径比为 1.04~1.20 时,即外筒内半径为 13.0~15.0 mm 时,动塑比不大于 $1.0 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 的宾汉流体相对于牛顿流体的剪切速率相对误差小于 10%。由表1可知,随着动塑比增大,剪切速率增量也在增大,因此在评价动塑比大于 $1.0 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 的冲洗液时,应减小评价装置外内筒半径比,以减小误差。

2.4 冲洗液为幂律流体

当冲洗液为幂律流体时,利用分析宾汉流体的方法,同理可得幂律流体在内筒外壁处剪切速率的表达式:

$$\gamma_M = \frac{0.20944}{n_m} \frac{R_{2m}^{\frac{2}{n_m}}}{R_{2m}^{\frac{2}{n_m}} - R_{1m}^{\frac{2}{n_m}}} N \quad (19)$$

式中: n_m 为幂律流体的流性指数。

当式(19)中的 n_m 为 1 时, γ_M 即为牛顿流体在内筒外壁处的剪切速率。幂律流体在内筒外壁处的剪切速率与牛顿流体没有函数关系,影响其剪切速率的因素有:1)幂律流体的剪切速率与流性指数有关,流性指数越小,剪切速率越大;流性指数越接近 1,其剪切速率越接近牛顿流体;2)随着内外筒间隙增大,剪切速率增大;3)当内外筒间隙与冲洗液性质一定时,剪切速率与转速呈正比。

表3为不同流性指数幂律流体的剪切速率相对于牛顿流体的误差。

表 3 不同流性指数幂律流体在不同半径比下剪切速率的相对误差

Table 3 Relative error of the shear rate of power-law fluid with different radii ratios

R_2/R_1	不同流性指数下的剪切速率相对误差, %						
	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
1.04	0	0.43	0.97	1.67	2.60	3.92	5.92
1.08	0	0.84	1.89	3.25	5.08	7.68	11.66
1.12	0	1.22	2.75	4.74	7.44	11.28	17.21
1.16	0	1.58	3.57	6.16	9.68	14.73	22.56
1.20	0	1.91	4.34	7.51	11.82	18.03	27.71

由表 3 可知:流性指数为 1.0 时,为牛顿流体,此时剪切速率相对误差为 0;在流性指数大于 0.6 时,半径比在剪切速率 1.04~1.20 时的剪切速率相对误差在 8% 以内;半径比越小,剪切速率相对误差越小。因此,必须控制内外筒半径比,以提高测量精度。

综上所述,当冲洗液为宾汉流体或幂律流体时,可以按照笔者推导的公式计算出理论剪切速率与实际剪切速率的相对误差。当外内筒半径比控制在 1.20 以内时,冲洗液的流性指数大于 0.6 或动塑比小于 $1.0 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 时,可以直接套用牛顿流体的剪切速率公式,此时相对误差在 10% 以内,能够满足现场施工对计算精度的要求。因此,在设计冲洗液评价装置时,综合上述分析并考虑实际加工水平,将 R_2/R_1 限定在 1.04~1.20。

3 结论与建议

1) 冲洗液为牛顿流体时,评价装置内筒外壁面处的剪切速率与固井界面处相等,不存在理论误差。

2) 冲洗液为宾汉流体时,评价装置内筒外壁面处的剪切速率大于固井界面处,且剪切速率增量随着内外筒间隙和冲洗液动塑比增大呈线性增加。

3) 冲洗液为幂律流体时,评价装置内筒外壁面处的剪切速率大于固井界面处;剪切速率增量与流性指数有关,与稠度系数无关;流性指数越小,剪切速率越大;内外筒间隙越大,剪切速率越大;当内外筒间隙与冲洗液性质一定时,剪切速率与转速成正比。

4) 将评价装置内外筒半径比限定在 1.04~1.20,当冲洗液为幂律流体且流性指数大于 0.6 或为宾汉流体且动塑比小于 $1 \text{ Pa}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 时,其剪切速率与牛顿流体的相对误差在 10% 以内。

5) 对于新型冲洗液评价装置的应用范围和评

价效果需要现场施工进行验证,并根据验证结果进一步完善。

参 考 文 献

References

- [1] LU S, FOXENBERG W E. Double-emulsion spacer design for highly efficient invert emulsion[R]. SPE 151604, 2012.
- [2] MASERATI G, DATURI E, DEL GAUDIO L, et al. Nano-emulsions as cement spacer improve the cleaning of casing bore during cementing operations[R]. SPE 133033, 2010.
- [3] OSODE P I, OTAIBI M A, EL-KILANY K A, et al. Evaluation of nonreactive aqueous spacer fluids for oil-based mud displacement in open hole horizontal wells[R]. SPE 161914, 2012.
- [4] ARANHA P E, MIRANDA C R, CARDOSO W F, et al. A comprehensive theoretical and experimental study on fluid displacement for oilwell cementing operations[R]. SPE 150276, 2012.
- [5] CARRASQUILLA J, GUILLOT D J, ALI S A, et al. Microemulsion technology for synthetic-based mud removal in well cementing operations[R]. SPE 156313, 2012.
- [6] 张明霞, 向兴金, 童志能, 等. 水泥浆前置液评价方法总论[J]. 钻采工艺, 2002, 25(6): 81-83.
ZHANG Mingxia, XIANG Xingjin, TONG Zhineng, et al. General narration of the evaluation approach to the slurry's prepad fluid[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(6): 81-83.
- [7] 王乐顶, 王长在, 喻芬, 等. 固井冲洗液室内模拟评价方法研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(10): 54-57.
WANG Leding, WANG Changzai, YU Fen, et al. Research on evaluation method of laboratory simulation of cementing flushing fluid[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(10): 54-57.
- [8] 西南石油大学, 中国石油集团渤海钻探工程有限公司. 一种基于剪切速率相等原理的固井冲洗液评价装置: 201320710678. X[P]. 2014-05-14.
Southwest Petroleum University, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited. Well cementation flushing fluid evaluating device based on shearing rate equivalence principle: 201320710678. X[P]. 2014-05-14.
- [9] 西南石油大学, 中国石油集团渤海钻探工程有限公司. 一种基于剪切速率相等原理的固井冲洗液评价装置及方法: 201310562538[P]. 2014-01-29.
Southwest Petroleum University, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited. An apparatus and method was evaluated based on the principle of cementing a shear rate equal to rinse: 201310562538[P]. 2014-01-29.
- [10] SAASEN A, SVANES K, OMLAND T H, et al. Well cleaning performance[R]. SPE 87204, 2004.
- [11] 李克文, 沈平平. 原油与浆体流变学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 22-105.
LI Kewen, SHEN Pingping. Rheology of crude oil and slurry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 22-105.
- [12] 王乐顶. 页岩气水平井固井前置液体系研究及应用[D]. 西南石油大学, 2014.
WANG Leding. Research and application of flushing fluid for shale gas horizontal well cementing[D]. Southwest Petroleum University, 2014.

[编辑 刘文臣]