

◆钻井完井◆

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2011.02.015

# 固井冲洗效率评价方法探讨

王广雷 吴迪 姜增东 谌德宝

(中国石油大庆钻探工程公司 钻井工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163413)

**摘要:**冲洗液是在注水泥浆前预先泵入的一段流体,用以冲洗附着在井壁和套管壁上的浮泥饼。但是目前就固井冲洗液的冲洗效率评价,国内外还没有形成统一的标准、方法和手段。在分析常用几种评价方法优缺点的基础上,根据旋转黏度计测量原理中转速与壁面剪切速率之间的关系,提出了一种新的冲洗效率评价方法。根据旋转黏度计的测量原理对旋转黏度计进行了改造,并确定了评价冲洗效率的试验步骤。利用改造后的旋转黏度计,根据评价试验步骤评价了3种固井冲洗液的冲洗效率,结果表明,该评价方法操作简单、人为误差小、对比性强、可重复性好、更客观实用,可以为现场施工提供有力的参考数据。但由于旋转黏度计构造的限制,无法精确测得冲洗效率,因此,需对该方法进行进一步改进。

**关键词:**固井; 前置液; 冲洗效率; 评价方法; 旋转黏度计

中图分类号: TE256<sup>+</sup>.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2011)02-0077-04

## Discussion of Evaluation Method of Cementing Flushing Efficiency

Wang Guanglei Wu Di Jiang Zengdong Chen Debao

(Drilling Engineering Technology Research Institute, Daqing Drilling & Exploration Engineering Company, CNPC, Daqing, Heilongjiang, 163413, China)

**Abstract:** The flushing fluid is a liquid pumped before cementing to flush the wellbore wall and mud cake adhesive on casing, while there is no standard evaluation method to evaluate the cementing flushing efficiency. On the basis of analyzing several evaluating methods, the paper described a new method for evaluating the flushing efficiency according to the relation between viscosimeter rotary speed and shear rate. The viscosimeter was modified based on the measuring principle, and the testing procedure was determined. Three different flushing fluids were evaluated using the proposed testing method. The results show that this method is simple with less human error, has good comparison and repeatability, and is more objective and practical which can provide useful reference for field application. However, due to viscosimeter's structure constraints, flushing efficiency cannot be measured accurately which requires further improvement.

**Key words:** well cementing; pad fluid; flush efficiency; evaluation method; rotary viscosimeter

固井施工中,冲洗液应用的是否合理直接关系到环空的冲洗效率,甚至会影响到界面的胶结强度和封固质量。因此,建立一种符合现场实际情况的冲洗效率评价方法至关重要。然而,国内外还没有形成统一的固井冲洗效率评价方法,并且现在一些常用的冲洗效率评价方法还存在着很大的不足,还不能完全为现场固井施工提供合理的

有效的指导。因此,笔者提出了一种新的冲洗效

收稿日期:2010-02-20; 改回日期:2011-01-18

作者简介:王广雷(1980—),男,黑龙江嫩江人,2002年毕业于大庆石油学院石油工程专业,2009年获大庆石油学院石油与天然气工程专业硕士学位,主要从事固井流体力学、固井前置液和特殊工艺井完井技术方面的研究工作。

联系方式:(0459)4892341, wangguanglei@cnpc.com.cn

率评价方法,该评价方法一方面可以量化冲洗效率;另一方面可以模拟现场固井施工的“剪切”冲洗;第三,可以和现场固井施工排量和环空井眼参数结合起来,更接近现场施工工况,便于指导现场施工。

## 1 冲洗效率常用的评价方法

目前,国内通常采用的冲洗效率评价方法主要有锥形瓶法、钻屑柱法、建立大型模拟井筒和旋转黏度计法等4种。

**锥形瓶法<sup>[1]</sup>** 锥形瓶法是最早使用的方法,比较原始,也相对简单。该方法的具体操作是:把10 mL钻井液放入锥形瓶,加入一定量的冲洗液,盖上瓶塞,摇动30 s,从瓶中倒出混合物,观察冲洗情况。该方法非常简单,但有明显的缺陷,测量不准确,摇动力量的大小因人、因时而异,可重复性差,该方法只用于粗略地评价冲洗效果,现已很少使用。

**钻屑柱法<sup>[1]</sup>** 称取500 g钻屑,并用钻井液包裹,装入玻璃筒内,注入一定量的冲洗液,使冲洗液流过钻屑柱,根据冲洗掉的钻井液的质量计算冲洗效率。该方法与锥形瓶法相比有很大的进步,可以计算冲洗效率,但还是不完善,试验过程也比较复杂。

**建立大型模拟井筒** 通过建立模拟井筒实现真实顶替过程,但该方法不能实际观察冲洗效果,而且试验规模很大,需要大功率的循环设备,不适合在室内评价冲洗液的性能。

**旋转黏度计法<sup>[1]</sup>** 该方法是使旋转黏度计的转筒外壁沾满钻井液,杯中装满冲洗液,转速设定在200 r/min,冲洗一定时间,观察冲洗效果。该方法可以直观地观测冲洗效果,但是不能定量表征冲洗效率,并且冲洗过程也与实际工况存在着较大的差距。因此,仍然不能指导现场施工。

虽然旋转黏度计法存在着很大的不足,但由于它操作简便、对比性强,因此在冲洗评价试验中被广泛应用。客观而言,旋转黏度计的测量原理中给出了转速与壁面剪切速率之间的关系,当转速为200 r/min时,壁面剪切速率为340 s<sup>-1</sup>,与井下壁面剪切速率接近,这也是采用旋转黏度计评价冲洗效果的理论依据。但测量原理中并没有对外筒壁上的剪切速率加以说明,分析发现二者之间存在较大的差距,因此用旋转黏度计外筒形成泥饼模拟冲洗效果

的方式是不可取的,而且冲洗效果只能观察,不能定量计算冲洗效率。

## 2 旋转黏度计改造及冲洗效率评价步骤

为了完善旋转黏度计法,进一步认识壁面剪切应力对泥饼冲洗所起到的效应,评价不同冲洗液对泥饼的冲洗效果,为科研生产提供可靠的依据,需要对该评价方法进行改进,并对旋转黏度计进行适当改造。

### 2.1 旋转黏度计改造

为了能够从力学角度评价不同冲洗液对各种钻井液的冲洗作用,充分利用旋转黏度计测量原理及可量化的特点,将转筒外壁形成泥饼改为内筒外壁形成泥饼,但是内筒形成泥饼后的旋转黏度计无法满足试验操作的要求,因此需要对内筒的形状和尺寸进行适当改造。

#### 2.1.1 内筒形状的确定

用旋转黏度计测量黏度时,内筒整个浸没在被测流体之中,液流对内筒产生的摩擦阻力由两部分构成:主要部分是柱面摩阻力矩,次要部分是端面附加力矩。为了优化内筒的形状,特别加工了两种形状的内筒:一种是两个端面都是平面的圆柱体,一种是平底带有60°锥角的锥顶封闭体。

通过实测发现,两端面为平面的内筒其附加力矩为柱面摩阻力矩的10.9%,而带有锥度的则只有6.4%。因此选择带有60°锥度的锥顶封闭体作为冲洗内筒以减小测量过程中的误差。

#### 2.1.2 内筒半径的确定

文献[3]明确指出,旋转黏度计内外筒半径的大小应该满足如下条件:

$$\frac{R_1}{R_2} \geqslant 0.9 \quad (1)$$

式中:  $R_1$  为内筒半径, mm;  $R_2$  为外筒半径, mm。

由于内筒壁形成泥饼后会有一层浮泥饼, 经过多次试验测试, 其厚度约为0.5 mm; 而作用在内筒表面的剪切应力  $\tau_w$  与偏转角度  $\varphi$  之间的关系可由下式计算:

$$\tau_w = C\varphi \quad (2)$$

式中:  $\tau_w$  为剪切应力, Pa; C 为仪器常数,  $C = \frac{C_0}{2\pi R_1^2 h}$ ;  $\varphi$  为偏转角度, ( $^\circ$ );  $C_0$  为扭簧常数;  $h$  为内筒高度, mm。

在不改变外筒尺寸的前提下, 考虑到内筒附加泥饼的厚度, 最终确定内筒的半径为 16 mm; 而改造后旋转黏度计的仪器常数 C 也相应地调整为 0.593 6 Pa/格。

## 2.2 冲洗效率评价步骤

1) 首先按照文献[3]的相关规定, 利用旋转黏度计测定冲洗液的流变参数;

2) 利用冲洗液相关的流变参数及相关的流体力学公式计算冲洗液在井下环空的壁面剪切应力  $\tau_w$ ;

3) 先称冲洗内筒质量( $m_0$ ), 再把冲洗内筒浸泡在钻井液中一定时间后, 取出称其质量( $m_1$ );

4) 取下旋转黏度计上的标准内筒, 换上粘有钻井液的冲洗内筒;

5) 把旋转黏度计上的外筒缓慢上推并悬挂, 切忌避免外筒壁刮碰冲洗内筒上的钻井液;

6) 把冲洗液倒入到旋转黏度计样品杯中并使

冲洗液液面略高于泥饼;

7) 启动外筒旋转并尽快调整旋转黏度计转子的档位, 使刻度盘上的读数乘以 C 尽量接近计算出的壁面剪切应力  $\tau_w$ ;

8) 保持这个档位持续旋转, 按照预定的程序和接触时间来冲洗;

9) 冲洗后停止旋转, 缓慢卸下外筒, 避免刮碰内筒上粘附的浆体;

10) 卸下冲洗内筒并称其质量( $m_2$ );

11) 根据以下公式来计算该冲洗液的冲洗效率  $\phi$ :

$$\phi = 1 - (m_2 - m_0) / (m_1 - m_0) \quad (3)$$

式中:  $m_0$  为内筒的原始质量, g;  $m_1$  为粘附钻井液后内筒的质量, g;  $m_2$  为冲洗后内筒的质量, g。

## 3 冲洗效率评价试验

利用改造后的旋转黏度计, 按照上述的试验操作步骤, 针对现场水基钻井液进行了各种类型冲洗液冲洗效率的对比评价试验<sup>[2]</sup>。表 1 为不同冲洗液的流变参数和环空壁面剪切应力。

表 1 各种冲洗液的流变参数及环空流变计算

Tabel 1 Rheological parameter of all flushing fluids and annulus calculation

| 冲洗液类型 | 密度/ $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ | $\phi 600/\phi 300/\phi 200/\phi 100/\phi 6/\phi 3$ | 排量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ | 钻头直径/mm | 井眼扩大率, % | 环空壁面剪切应力/Pa | 模拟旋转黏度计读数 |
|-------|-------------------------------------|---|--|---------|----------|-------------|-----------|
| I     | 1.50                                | 43/23/16/12/6/6                                     | 1.2                                    | 215.9   | 5        | 9.11        | 15.34     |
| II    | 1.02                                | 123/94/81/62/15/10/                                 | 1.2                                    | 215.9   | 5        | 36.68       | 61.79     |
| III   | 1.50                                | 98/70/56/39/14/12                                   | 1.2                                    | 215.9   | 5        | 25.00       | 42.11     |

注: 钻井液为乳液大分子钻井液, 其密度为 1.42 kg/L。

由表 1 可知, 不同物性(密度、流变性等参数)的冲洗液在特定的固井施工参数(顶替排量、环空间隙)下, 环空壁面剪切应力也存在着很大差异。根据式(2), 可将不同条件下的环空壁面剪切应力转化为旋转黏度计的读数(见表 1)。然后利用改造后的旋转黏度计来模拟特定条件下的环空壁面剪切压力进行冲洗效率评价, 结果见表 2。

从表 2 可以看出:

1) 冲洗液 I 在外筒转速达到 300~600 r/min 时接近理论计算出的环空壁面剪切应力, 在不同的冲洗时间内冲洗效率介于 75.0%~95.0% 之间; 冲洗液 II 在外筒转速达到 200~300 r/min 时接近理论计算出的环空壁面剪切应力, 在不同的冲洗时间内冲洗效率介于 29.6%~43.0% 之间; 冲洗液 III 在

外筒转速达到 300~600 r/min 时接近理论计算出的环空壁面剪切应力, 在不同的冲洗时间内冲洗效率介于 41.7%~58.0% 之间。

2) 在相同的冲洗时间内, 各类型的冲洗液在高剪切应力作用下的冲洗效率明显高于低剪切应力下的冲洗效率; 尤其是清水在高、低剪切应力下差异最大, 说明清水在低剪切应力条件下其冲洗作用明显降低。

3) 冲洗液 I 随着冲洗时间的增加, 冲洗效率也逐渐提高; 冲洗液 II、III 随着冲洗时间的增加, 冲洗效率变化不明显, 这是由于冲洗液 II、III 黏度较高, 粘附并滞留在界面处形成腊质层, 起不到有效的冲洗作用, 而且不易被清水替出, 很可能影响界面处水泥的胶结质量。

表 2 冲洗效率评价试验数据  
Table 2 Flushing efficiency evaluating and testing data

| 冲洗液类型 | 外筒转速/r·min <sup>-1</sup> | 旋转黏度计读数 | 内筒原质量/g | 粘钻井液后质量/g | 冲洗后质量/g | 冲洗时间/min | 冲洗效率, % |
|-------|--------------------------|---------|---------|-----------|---------|----------|---------|
| I     | 600                      | 17.0    | 73.0    | 74.9      | 73.2    | 1        | 90.0    |
|       | 600                      | 17.5    | 73.0    | 75.1      | 73.1    | 2        | 95.0    |
|       | 300                      | 11.0    | 73.0    | 75.0      | 73.5    | 1        | 75.0    |
|       | 300                      | 12.0    | 73.0    | 75.2      | 73.4    | 2        | 82.0    |
| II    | 300                      | 66.0    | 73.0    | 75.2      | 74.5    | 1        | 32.0    |
|       | 300                      | 72.0    | 73.0    | 75.5      | 74.5    | 3        | 40.0    |
|       | 300                      | 71.0    | 73.0    | 75.3      | 74.3    | 5        | 43.0    |
|       | 200                      | 58.0    | 73.0    | 75.7      | 74.9    | 1        | 29.6    |
|       | 200                      | 63.0    | 73.0    | 75.8      | 74.8    | 3        | 36.0    |
|       | 200                      | 64.0    | 73.0    | 76.1      | 75.0    | 5        | 35.0    |
| III   | 600                      | 48.0    | 73.0    | 75.5      | 74.3    | 1        | 48.0    |
|       | 600                      | 50.0    | 73.0    | 75.6      | 74.2    | 3        | 55.0    |
|       | 600                      | 51.0    | 73.0    | 75.6      | 74.1    | 5        | 58.0    |
|       | 300                      | 36.0    | 73.0    | 75.4      | 74.4    | 1        | 41.7    |
|       | 300                      | 40.0    | 73.0    | 75.6      | 74.4    | 3        | 46.0    |
|       | 300                      | 38.0    | 73.0    | 75.5      | 74.3    | 5        | 49.0    |
| 清水    | 600                      |         | 73.0    | 75.1      | 73.5    | 2        | 76.0    |
|       | 600                      |         | 73.0    | 75.0      | 73.2    | 5        | 90.0    |
|       | 300                      |         | 73.0    | 74.9      | 74.4    | 2        | 26.0    |
|       | 300                      |         | 73.0    | 75.0      | 73.9    | 5        | 55.0    |

注: 冲洗液 I、II、III 的冲洗液效率为冲洗液冲洗后又用清水冲洗 1 min 后的冲洗效率。

4) 无论是在高剪切应力还是低剪切应力作用下, 冲洗液 I 均具有相对高的冲洗效率, 该冲洗液体系能够有效清除界面处的钻井液, 并且该冲洗液能够被清水在 1 min 内清除, 保证界面处不滞留冲洗液。

## 4 结 论

1) 提出了一种新的冲洗效率评价方法, 该冲洗效率评价方法操作简便、人为误差小、对比性强、可重复性好, 更客观更实用, 可以在固井前置液评价试验中推广应用。

2) 笔者提出的冲洗效率评价方法能够和现场冲洗液的流变参数、固井施工排量、环空井眼等参数结合起来, 模拟现场固井施工的“剪切”冲洗过程, 使室内试验数据对于现场施工更具有借鉴和指导意义。

3) 由于常用的旋转黏度计只限于六个档位的

转换, 因此笔者所提出的冲洗效率评价方法限定了冲洗效率的范围, 还无法给出冲洗效率的精确数值。因此, 建议对该方法进行进一步改进, 使其更完善、更精确。

## 参 考 文 献

- [1] 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 prepard fluid[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(6): 81-83.
- [2] 王广雷, 姜涛, 姜晓超, 等. 边混边注型抗高温固井隔离液的研制[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(4): 57-60.  
Wang Guanglei, Jiang Tao, Jiang Xiaochao, et al. A high temperature injecting-while-mixing cementing spacer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4): 57-60.
- [3] GB/T 19139—2003 油井水泥试验方法[S].  
GB/T 19139—2003 Procedure for testing well cements[S].