

美国 TULSA 大学石油工程系 定向钻井岩屑输送实验研究成果

张金昌

垂直孔钻进岩屑水力输送问题已被许多学者广泛研究过。而定向钻井岩屑水力输送的有关问题相对研究得比较少。曾经有人用内管直径 34 mm、外管直径 60 mm 的试验装置,用清水和 CMC 溶液作为冲洗介质,对 0°、45°和 60°三种钻孔倾角下的岩屑水力输送问题进行了试验研究。但由于使用的试验管段只有 3 m 长,在这样短的管段内根本不可能建立起稳定的液流流态,加之试验时液流流速又高达 3 m/s,与钻井液实际上返速度相差甚远,因此其试验结果的实用价值值得怀疑。

还有人曾经试图用纯理论的方法解决倾斜偏心环状空间岩屑的水力输送问题。由于这种理论分析方法没有以大量的反复试验作为基础,加之在分析过程中把井壁较低一侧的岩屑沉积层理想化了,因此这种方法的实用价值也很小。为了搞清定向及水平钻井过程中岩屑水力输送的基本情况,专门建立了一试验装置。用该装置可以建立起稳定的环空流态,因而可以对多种不同的钻孔倾角、钻杆柱转速、钻杆在孔中的偏心率以及多种冲洗液流速条件下的岩屑水力输送问题进行研究。

1 试验装置

试验装置如图 1 所示。它由下列主要部分组成:(1)独立的流体循环和固体岩屑注入系统;(2)能保证形成固液两相流稳定流态的足够长的环状空间试验管段;(3)有在重新循环之前将固液分离的有效手段;

(4)内管回转装置;(5)冲洗液流速控制和测量装置、固体颗粒注入速度和内管转速控制测量装置;(6)测算与冲洗液类型无关的岩屑平均输送速度和环空固相浓度的仪表装置;(7)试验管段倾角调节装置;(8)内管偏心率调节装置,该装置应保证内管在任何偏心率时能自由回转以使与实际钻进情况相符;(9)保证固液充分混合的岩屑注入系统;(10)能有效控制由岩屑沉积和管路严重堵塞引起的压力波动的卸荷阀。

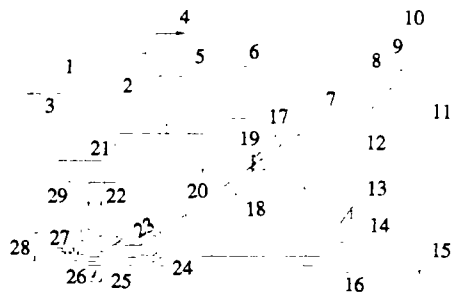


图 1 试验装置原理图

1—双作用柱塞泵;2—压力波动阻尼器;3—吸水管;4—氮气供给;5—背压阀;6—稳定室;7—内管对中器;8—回水弯头;9—回转器;10—A 形架;11—滑架;12—胶管;13—摆动臂;14—液流换位器及岩屑收集桶;15—绞车;16—泥聚箱;17—压力表;18—支撑梁;19—温度计及排气阀;20—玻璃钢管;21—流量计;22—岩屑循环管路;23—胶管;24—滑动底座;25—注射管;26—高压液流;27—螺旋输送机;28—螺旋输送机马达;29—岩屑箱

试验所需仪表包括:(1)记录内管转速的信号发生器及转速表;(2)电磁流量计,带有能保证试验环空段预选流量的自动卸荷

阀;(3)测量固体颗粒输送速度的两相传感器;用于检验流速传感器的计时器;(4)记录固体颗粒运动轨迹的双通道带式记录仪;(6)安装在环空间隙上的压力表和温度计;(7)用于标定上述仪表的其它电子仪表。

试验使用的冲洗液流变参数值变化范围列于表 1,使用的冲洗液流变参数的平均值列于表 2。

表 1 试验参数取值范围

序号	参数名	取值范围
1	环空间隙长度/ft(m)	40(12.2)
2	环空尺寸/in×in(mm×mm)	5×1.9(127×48.2)
3	环空倾角/(°)	0,10,20,⋯,80,90
4	环空流量/gpm(m ³ ·s ⁻¹)	50,75,⋯,225(0.003, 0.045,⋯,0.014)
5	内管回转速度/r·min ⁻¹	0,50,100
6	内外管偏心率/%	+50,0,-50
7	固相颗粒尺寸(ASTM 标准)/in(mm)	0.25(6.35)
8	固相颗粒密度/lbm·ft ⁻³ (kg·m ⁻³)	
	干料	163.5(2619.3)
	在水中浸泡 5h 后	165.5(2651.3)
9	固相颗粒平均注入速度 /lb·min ⁻¹ (kg·s ⁻¹)	20(0.15)
10	冲洗液	
	紊流	清水 低粘度膨润土 泥浆
	密度/lbm·gal ⁻¹ (kg·m ⁻³)	8.335(998.7) 8.4(1006.5)
	临界流量/gpm(m ³ ·s ⁻¹)	5(0.0003) 50(0.003)
	层流	Carbopol 高粘度膨润土 泥浆
	密度/lbm·gal ⁻¹ (kg·m ⁻³)	8.45(1012.5) 8.5(1018.5)
	临界流量/gpm(m ³ ·s ⁻¹)	210(0.0132) 252(0.0159)
	层流或紊流	中粘度膨润土泥浆
	密度	与低粘度膨润土泥浆相同
	临界流量/gpm(m ³ ·s ⁻¹)	148(0.0093)

2 试验情况小结

试验用固体颗粒是在钻井现场采集的 Carthage 大理石钻屑。所有岩屑都根据 ASTM 标准程序筛选出来。总共进行了 242 次试验。下面分 3 个不同侧面来讨论所做的试验及试验结果。

2.1 试验管倾角对试验结果的影响

2.1.1 试验管垂直或接近垂直($\varphi\leq10^\circ$)

在该倾角范围内用 4 种不同的泥浆、不同的内外管偏心率、不同的钻杆转速和不同的液流速度共进行了 53 次试验。在相同的流速参数下进行了倾角为 10°及垂直状态的试验,试验结果表明倾角为 10°时岩屑移动速度及岩屑浓度与垂直孔相比相差无几。这表明在垂直孔钻进过程中井斜在 10°以内时将不会给钻孔清洗带来大的问题。

固体颗粒沿轴向的移动速度在偏心环空间隙较小一侧会明显减小,在层流态时尤为明显。这种现象与液流速度分布理论分析结果是一致的。倾斜角为 10°时,在流速比较低的情况下颗粒传送主要集中在环空较低的一侧。环空液流流速越高,固体颗粒分布就越均匀。

2.1.2 小倾角($20^\circ\leq\varphi\leq30^\circ$)

试验管倾角为 20°和 30°时共进行了 19 次试验。试验中观察到,在该倾角范围内,随着倾角的增大固体颗粒的运动状态也渐渐发生变化,但未发生任何异常情况。由于倾角的增大使颗粒的径向滑动速度增大,越

表 2 冲洗液的流变性

冲洗液类型	n	k /lbf s ⁿ ·ft ⁻¹ (dynes s ⁿ ·cm ⁻²)	θ_{600}	θ_{300}	A. V.	P. V.	Y. P./ lb·100ft ⁻²	V_B /ft·s ⁻¹ (m·s ⁻¹)
清水	1	1	2	1	1	1	0	0.85(0.26)
紊流 低粘度膨润土泥浆	0.68	0.00084(0.39)	8	5	4	3	2	0.70(0.21)
中粘度泥浆	0.61	0.00436(2.08)	26	17	13	9	8	未测量
层流 Carbopol	0.64	0.0059(2.712)	42	28	21	14	14	0.45
高粘度膨润土泥浆	0.61	0.0039(4.37)	55	36	28	19	17	0.35

注: θ_{600} 、 θ_{300} 为 V-G35 型范氏粘度计在 600 及 300 r/min 时的读数; n 、 k 为幂律指数, $\tau=k\dot{\gamma}^n$;A. V. 为表观粘度, $\theta_{600}/2$;P. V. 为塑性粘度 $\theta_{600}-\theta_{300}$;Y. P. 为屈服值, $\theta_{300}-P. V.$ (lb/100ft²); V_B 为 1/4 in 岩屑在静止液体中的平均沉降速度。

来越多的固体颗粒滑向环空较低的一侧,最终导致岩屑沉积层的形成,在流速低时尤其如此。固体颗粒的运动状态呈现两种不同的形式。环空流速低时($< 2 \text{ ft/s}, 0.61 \text{ m/s}$),沉积岩屑层开始形成。该层岩屑通常很薄($< 1/8 d_0$)且很不稳定,在内管回转且环空流态为紊流时尤其如此。

一般来说,岩屑一进入循环系统就移向环空较低一侧,进入环空中段液流高速区后又被卷起,这一过程循环往复交替出现。这种现象在环空流速比较低时特别明显。在环空流速比较高时($> 2.5 \text{ ft/s}, 0.76 \text{ m/s}$),岩屑颗粒不能形成稳定的沉积层。多数颗粒成团状或柱状通过环空较低一侧被输送出去,形成的岩屑柱有时会充满整个环状空间。在层流和紊流状态下都有可能形成岩屑柱并导致环空内冲洗液激烈的紊流流动。

在更高流速($> 3 \text{ ft/s}, 0.91 \text{ m/s}$)状态下,既没有岩屑沉积层形成也没有岩屑柱形成。岩屑在环空中被平滑地输送出去。这种现象被泥浆管路设计者们描述为“多相流”,这时固相颗粒沿径向的浓度梯度很明显。试验中还观察到在紊流状态下固体颗粒呈波浪形运动。在此项研究中用来区分层流和紊流的临界雷诺数就是通过这种肉眼观察的方法来判别的。

2.1.3 临界倾角($40^\circ \leq \varphi \leq 50^\circ$)

在该倾角范围内共进行了 96 次试验。试验中观察到在此倾角范围内固体颗粒被迫滑向环空较低一侧,其运动状态发生了急剧变化,我们把该倾角范围称之为临界倾角。一般来说,在倾角为 40° 、环空流速低于 $2.5 \text{ ft/s} (0.76 \text{ m/s})$ 时,形成岩屑沉积层。在倾角为 50° 、环空流速低于 $3 \text{ ft/s} (0.91 \text{ m/s})$ 时,形成沉积层。紊流流动和内管回转有使岩屑沉积层不稳定的趋向。试验中还观察到,内管回转会引引起岩屑沉积层沿环空圆周方向摆动。

岩屑进入循环系统后,立刻象子弹一样

沿轴向抛出,但很快就沉积在环空较低一侧。在层流状态下,实际上只有在沉积层形成之后,使环空面积减小从而使环空流速增加到足够大时,岩屑颗粒才可能随环空液流被输送出去。在岩屑沉积层形成之前,所有岩屑都是随岩屑沉积层一起被传送的。在紊流状态下,岩屑进入系统并沿轴向抛出之后,始终有部分岩屑颗粒在较高一侧环空中随液流移动,在沉积层形成之前也是如此。冲洗液流速较高时($> 3 \text{ ft/s}, 0.91 \text{ m/s}$),没有明显的岩屑沉积层形成,多数岩屑是以岩屑柱的形式被传送出去的。虽然有时也有岩屑沉积层形成,但由于固体颗粒的不规则螺旋运动,其形态极不稳定,形成不了连续的沉积层。沉积层厚度极不均匀且经常变化,沉积和浮起交替进行。这是由于岩屑沉积后环空截面积减小流速增大,从而使沉积层表层岩屑又随液流传送。沉积层减薄之后流速减慢,又使更多的岩屑沉积下来。这一过程循环往复交替进行。因此这种状态被称之为准平衡状态。

在临界倾角范围内,岩屑输送状态的一个特点是环空较低一侧有岩屑沉积层形成,另一个特点是沉积层在重力作用下有沿环空壁下滑的趋势。试验中观察到泥浆泵一旦停止工作,整个沉积层就象雪崩一样滑下堵住试验管下段环状空间。这对实际钻井工作来说是非常危险的。除非在提下钻之前将所有的井内岩屑都排除干净,否则就会导致埋钻事故。

2.1.4 大倾斜角($60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$)

在 60° 、 70° 、 80° 、 90° 四种倾斜角共做了 74 次试验。试验表明,岩屑一进入循环系统几乎立刻就沉积下来。但这时即使停泵沉积层也不滑下。试验中还观察到沉积层在内管回转作用下沿环空切线方向摆动。致使环状空间一侧沉积层较厚另一侧较薄。此外,内管的回转作用会把沉积层表面的岩屑连续搅起使之混入沉积层上方的液流中。

在紊流状态下此现象尤为明显。此时岩屑呈两种状态输送,一种是位于沉积层表面附近很薄的一层岩屑紧密地滚在一起沿轴向在沉积层表面向前跳跃滑动;另一种是松散分布于液流中的岩屑颗粒随液流沿轴向方向平滑地向前移动。

2.2 内管偏心率对岩屑输送效果的影响

用水作为冲洗介质在 0° (垂直孔)、 40° 、 50° 和 90° (水平孔) 倾角状态下, 对不同偏心距情况下的岩屑输送效果进行了多次试验。试验中观察到垂直孔钻进时岩屑输送状态几乎不随偏心率变化。与同心环状空间相比, 唯一的区别是在偏心环空间隙较小的一侧岩屑颗粒的运动速度有明显的降低。而环空间隙较大的一侧岩屑颗粒的运动速度相应增加, 正负作用相互抵消, 总流量保持不变。

试验中还观察到对于倾斜孔内外管同心时环空间隙较低一侧的岩屑沉积层厚度最小。当内管相对于外管向较低一侧偏离时, 岩屑沉积速度要稍快一些。这与理论分析结果是一致的。在上述偏心状态下, 岩屑沉积层的轴向输送速度也最低。

2.3 冲洗液粘度和流态对岩屑输送效果的影响

为了确定冲洗液粘度和流态对岩屑输送效果的影响程度, 在 0° 、 40° 和 80° 三种倾角状态下做了有针对性的试验。冲洗液粘度对岩屑运动状态的影响与环空流态有关。层流流动时, 岩屑在高粘度冲洗液中要比在低粘度冲洗液中沉积得慢。在高粘度冲洗液中岩屑沉积层也较薄。然而在紊流流动时, 高粘度冲洗液比低粘度冲洗液中的岩屑沉积层要薄一些。但两种冲洗液中岩屑的沉积速度却几乎相同。这说明在紊流状态下岩屑的沉积速度与冲洗液粘度无关。

如前所述, 紊流时岩屑的运动特点是在环空较低一侧岩屑以团状呈波浪形运动状态。在层流时, 试验中没有观察到这种波浪

形运动状态。以上讨论是针对倾斜孔而言的。对于垂直孔钻进, 与紊流相比较, 层流时将有更多的岩屑颗粒靠近井壁移动。这与层流流动速度分布呈尖峰状而紊流流动速度分布呈平板状是一致的。

3 试验曲线及分析

根据试验数据绘制了 3 类试验曲线, 即: (1) 反映循环系统中岩屑总浓度 C_w 与相关参数的关系曲线; (2) 岩屑颗粒平均输送速度 V_p 与相关参数的关系曲线; (3) 岩屑沉积层厚度 δ 与环空外径 d_0 之比值 τ_B 与相关参数的关系曲线。

3.1 岩屑浓度 C_w 曲线

岩屑浓度 C_w 是衡量冲洗液输送岩屑效果的一个指标。冲洗液中岩屑浓度越低表明输送效果就越好。图 2、3 分别表示层流态和紊流态 C_w 随钻孔倾角的变化曲线。从曲线图中可以看出, 钻孔倾角比较小时无论是层流态还是紊流态, 各种冲洗液的输送效果都很好。泥浆性能不同而流态相同时, 粘度高的泥浆比粘度低的泥浆输送效果要好。然而在钻孔倾角比较大的情况下, 处于紊流态的低粘度泥浆与处于层流态的高粘度泥浆的岩屑输送效果同样好。冲洗液流速越高, 钻孔清洗效果就越好。对所有的钻孔倾角、泥浆类型和环空流态都是如此。

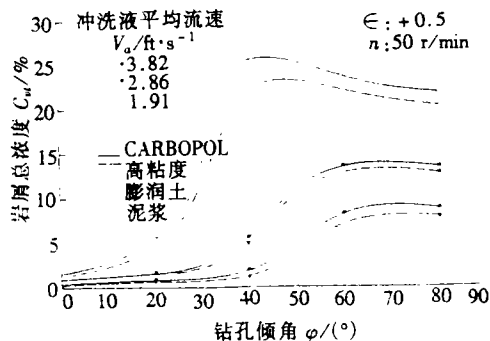


图 2 层流态岩屑浓度随钻孔倾角变化曲线

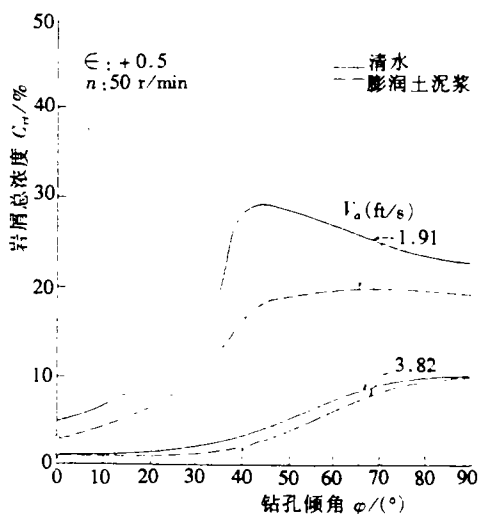


图3 紊流态岩屑浓度随钻孔倾角变化曲线

倾斜角在 $0 \sim 35^\circ$ 范围内, 偏心率 ($\pm 50\%$) 对 C_w 的影响很小。负偏心(钻杆相对于钻孔轴线向环空较高一侧偏离)要比正偏心的影响大些。将偏心环空和同心环空进行比较, 同心环空的输送效果好。在环空流速较高时其差距更为明显。倾斜角为 35° 和 55° 曲线时, 偏心率对输送效果的影响很不稳定, 相应的浓度曲线彼此交叉变化没有规律。当倾斜角大于 55° 、偏心率为 $+50\%$ 时, 其岩屑的输送效果最差, 在环空流速较低时就更差。在不同偏心率、不同液流状态下内管回转对 C_w 的影响极其微小。

3.2 岩屑输送速度 V_p 曲线

V_p 曲线是以 V_p/V_a (岩屑在环空中实际上升速度与冲洗液环空理论流速之比) 为纵坐标, V_a 为横坐标绘制的。定向孔钻进时, 由于岩屑沉积层使环空有效截面积减小, 在相同流量情况下实际环空流速要比理论环空流速高。因此这样绘制的 V_p 曲线没有实际意义, 这里从略。

3.3 τ_B 曲线

图4、5所示是冲洗液流速、粘度、钻孔倾角及环空偏心率对岩屑沉积层厚度 δ 与钻孔直径 d_0 之比的影响程度。可以看出环

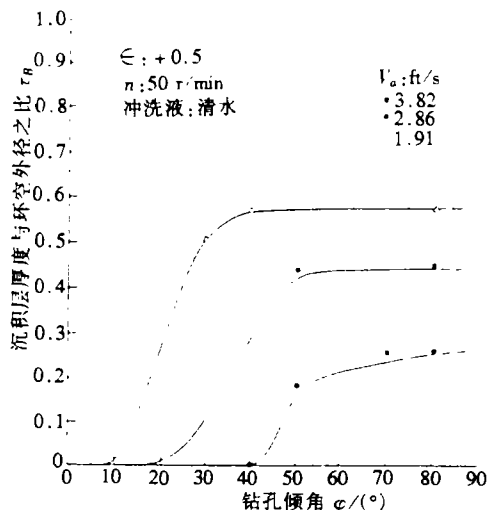


图4 层流态岩屑沉积层厚度随钻孔倾角的变化曲线

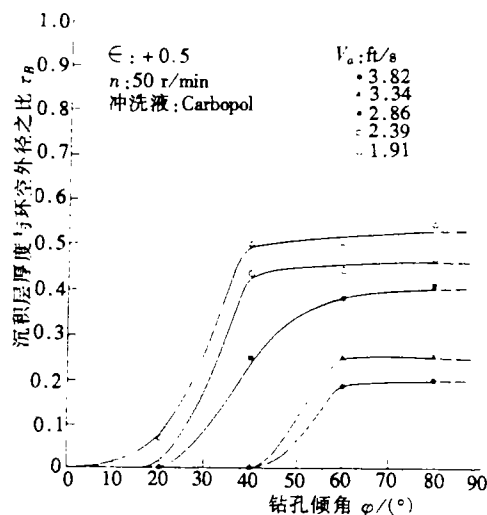


图5 紊流态岩屑沉积层厚度随钻孔倾角的变化曲线

空流速越高, 沉积层厚度就越小。随着钻孔倾角的增大, 沉积层厚度也逐渐增加。倾角大于 60° 时, 沉积层厚度基本保持不变。层流时岩屑开始沉积时的环空流速略高于紊流时岩屑开始沉积的流速。这是由于具有扁平状速度分布的紊流流动有利于环空较低一侧岩屑向前移动的结果。在两种流动状态下, 用较高粘度的泥浆岩屑沉积层厚度就小一些。流速低时, 粘度对输送效果的影

响要更大一些。与同心环空和负偏心环空相比,当内管偏向钻孔较低一侧(正偏心)时,岩屑沉积层厚度最大。这是由于重力分离作用在沉积层形成之后降低了环空流速所致。

4 结论

(1)定向钻井过程中影响冲洗液携带能力的主要因素是环空流速、钻孔倾角和泥浆流变性。

(2)其它参数一定时,冲洗液岩屑携带能力随钻孔倾角的增大而降低。试验中观察到的冲洗液中岩屑浓度随钻孔倾角的增大而增加证明了这一点。

(3)环空流态一定时,携带能力随泥浆粘度的增加而增大。低粘度膨润土泥浆在紊流态时的携带能力与高粘度膨润土泥浆在层流态时的携带能力相当。就输送效果来讲,紊流比层流好。这一点与我们在垂直孔钻进过程中获得的经验是一致的。同时也表明使泥浆具有一定的粘度对提高岩屑携带能力也是有益的。非牛顿幂律流体由于其本身的特性即使在层流状态下其速度分布也比较扁平。这一特点对提高倾斜孔钻进冲洗液的携带能力同样有效。

(4)定向孔钻进过程中,钻杆回转对岩屑输送效果影响很小。曾经有人认为这种影响只是在紊流时才比较小,而在层流时还是比较大的,不管钻孔倾角多大均如此。从

理论上讲这种观点似乎有道理,因为钻杆回转所产生的离心力有把岩屑抛向环空液流高速区的趋向。但实际上在倾斜孔钻进过程中,这种作用被岩屑在重力作用下离析沉淀作用降到了最低程度。

(5)钻杆相对于钻孔中心线的偏心率对岩屑沉积层厚度及岩屑浓度有一定程度的影响。其它参数相同时,同心环空比偏心环空输送效果好。倾斜角小于 35° 时,负偏心环空比正偏心环空的输送效果差。倾斜角大于 35° 时,正偏心环空比负偏心环空的输送效果差。

(6)倾斜角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间时,偏心率对输送效果的影响极不稳定。我们称该倾角范围为临界倾角。因为在该倾角范围内,随着岩屑沉积层厚度的增加,在重力作用下沉积层会沿井壁向下滑。一旦发生这种现象,就会堵塞环空通道,严重时会发生埋钻事故,或者使钻具下不到孔底。

(7)偏心率对垂直孔钻进岩屑输送效果影响很小。

5 参考文献

- [1] Iyoho, A.W. Drilled - cuttings transport by Non - Newtonian drilling fluids through inclined Eccentric Annuli. Ph. D. dissertation, U. of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, 1980.
- [2] Tomren, P.H. et al. An experimental study of cuttings transport in directional wells. SPE 12123, 1983.

注:本文为作者根据在美国 TULSA 大学进修时收集的有关资料整理完成的。