

低剪率环空上返泥浆携屑的特点

杨 光 华

(桂林工学院建设工程系 541004)

摘 要 通过分析循环泥浆的流变特点、岩屑在层流泥浆中的滑沉规律及净孔条件,认为在大口径正循环钻进及清孔的条件下,由于上返泥浆是在低剪区运作,净孔条件的好坏主要取决于循环泥浆能否在低剪率下建立起足够高的有效粘度,故在施工的过程中,应重视测试和研究泥浆在低剪区的流变性能,合理设计泥浆的动塑比,注意控制泥浆的密度,以利改善净孔条件。

关键词 有效粘度;低剪率;携屑能力;环状空间;泥浆密度;滑沉速度

分类号 P634.62

在大口径工程钻探中,正循环钻进及清孔的传统工艺由于具有循环设备相对简单,便于操作和管理等优点,至今仍在相当数量的现场上被采用,作为施工口径小于1000mm的钻孔的重要施工方法。其突出的问题是由于环状间隙太大,而泵量受设备条件的限制,致使环空中冲洗液的上返流速较低,容易造成排屑困难和钻进效率低下,甚至引起事故。而在许多现场上这一问题解决得较好的实践及泥浆流变学的理论都说明,环空返速只要不是太低,仍是可以做到有效排屑的,关键是如何合理地控制泥浆的性能,来尽量提高和利用泥浆的机械携屑能力。本文试图通过分析泥浆在低剪率下的流变特点、岩屑在层流泥浆中的滑沉规律及净孔条件来探讨这一问题,以供参考。

1 环空上返泥浆的流态

环空液流的平均流速 V_a (cm/s) 可按下式计算:

$$V_a = 1273 Q_0 / (D_h^2 - D_p^2) \quad (1)$$

式中: Q_0 —环空流量, L/s; D_h , D_p —钻孔直径及钻杆外径, cm。

环空液流的剪率 r (s^{-1}) 为 $r = 12.73 V_a / (D_h - D_p)$ (2)

若设钻孔的口径为600~1000mm,钻杆外径为100~120mm,使用排量为180~200m³/h的砂石泵,由以上二式,可计算得环空流速大致为6.46~20.2cm/s,剪率仅为0.88~4.85s⁻¹,与岩心钻探和水井钻探相比,环空上返流速及剪率都很低。显然,在大口径正循环钻进及清孔的条件下,循环泥浆携屑性能的优劣,主要取决于泥浆在低剪率区的流变性能,而与中、高剪率区的流变性能关系不大。根据水力学原理,决定流体流态的因素是雷诺数Re,此时环空流体的雷诺数仍可引用幂律流体雷诺数公式^[3]计算:

$$Re = \frac{\gamma_m (D_h - D_p)^n V_a^{2-n}}{12^{n-1} K' [(2n'+1) / 3n]^{n'}} \quad (3)$$

1996年10月29日收稿。

作者简介:杨光华,男,1957年出生,工程师,探矿工程专业。

式中： γ_m —泥浆密度， g/cm^3 ； n' —幂律指数； K' —稠度系数， $dyn \cdot s^{n'}/cm^2$ 。

由于环空泥浆的工作状态是处在流变曲线上的低剪率区，而不是在通常的中、高剪率区，故上式中 n' 和 K' 都是泥浆在低剪区的幂律流变参数，应该根据泥浆的实际流变曲线在剪率 $r=5.11 \sim 511s^{-1}$ 的范围内选择两个较合适的点来确定。若所取两个点的剪率分别为 $r_1=5.11s^{-1}$ 和 $r_2=170.3s^{-1}$ ，则 n' 和 K' 可分别按下面二式计算：

$$n' = 0.6571g(\Phi_{100}/\Phi_3) \tag{4}$$

$$K' = 0.03\Phi_{100} \tag{5}$$

式中： Φ_3 —范氏粘度计转速为 $3r/min$ 时的读数； Φ_{100} —范氏粘度计转速为 $100r/min$ 时的读数。

2 低剪率环空上返泥浆的流动形态

在流态为层流的条件下，由于泥浆是具有结构的假塑性流体，在环空内上返时，有效粘度会随剪率的减小而增大，容易形成流核，使泥浆呈所谓“平板型”流动（图1）所示。流核的直径 d_k 与环空间隙的比值称为核隙比，若用 α 来表示，则其值为

$$\alpha = d_k / [2(D_h - D_p)] \tag{6}$$

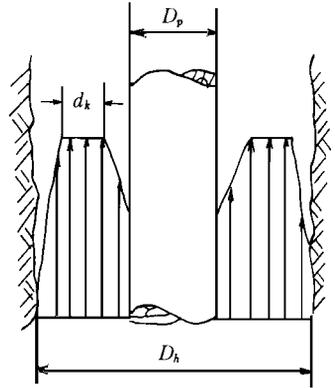


图1 环空层流流动
Fig. 1 Annular streamline flow

在中剪区，经精确的理论推导^[3]可得

$$\alpha^3/2 - 3\alpha/2 + 1 = 12\eta_s \cdot V_\alpha \cdot \alpha / [\tau_0(D_h - D_p)] \tag{7}$$

式中： η_s —塑性粘度， $10^{-1}Pa \cdot s$ ； τ_0 —动切力， $10^{-1}Pa$ ；其余同上。

令：
$$E = 12\eta_s \cdot V_\alpha / [\tau_0(D_h - D_p)] \tag{8}$$

则式(7)可写成

$$\alpha^3/2 - 3\alpha/2 + 1 = E \cdot \alpha \tag{9}$$

E 称为判别环空流体平板度的判别数。由式(8)和图2可知， E 值愈小， α 值就愈大，即上返泥浆的平板度愈高；反之平板度将降低。呈平板型层流流动的上返泥浆由于具有较高的有效粘度，质点的流线较稳定，可以避免岩屑在上升时出现翻流现象，故被认为较有利于携屑。上返泥浆的平板度越高，相对携屑能力就越强。

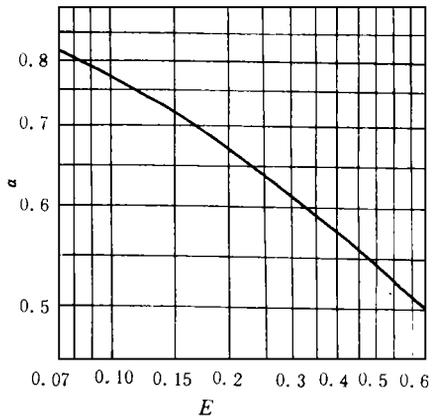


图2 $\alpha - E$ 关系曲线

Fig. 2 $\alpha - E$ connecting curve

对于大口径正循环钻进，由于环空上返泥浆的剪率是处在低剪区，式(7)中的 η_s 和 τ_0 也应从流变曲线的低剪区选择两个较合适的点，按宾汉模式确定。若同样选取 $(5.11, \tau_1)$ 和 $(170, \tau_2)$ 两个点，则 η_k ($10^{-1}Pa \cdot s$)和 τ_0 ($10^{-1}Pa$)可按以下二式计算：

$$\eta_k = 0.0309(\Phi_{100} - \Phi_3) \tag{10}$$

$$\tau_0 = 5.26\Phi_3 - 0.26\Phi_{100} \tag{11}$$

由式 (7) 知, 减小返速 V_α 或增大动塑比 τ_0/η_s , 都可以减小 E 值, 增大上返泥浆的平板度, 从而提高泥浆的载屑能力, 这是因为泥浆具有剪切稀释性, 环空返速愈低, 则有效粘度愈高; 而动塑比愈大, 则泥浆的剪切稀释性愈强, 在低剪率下建立起来的有效粘度也相对愈高。实验和计算都表明, 在大口径正循环钻进条件下, 由于上返流速较低, 而环状间隙又较大, 在使用泥浆的情况下, E 值往往都很小。显然, 偏低的上返流速 V_α 对于施工虽然有循环时间较长 (太低时, 甚至会携带不上岩屑) 的不利一面, 也有有利于增强上返泥浆的载屑能力的一面; 而在 V_α 已经偏低的情况下, 欲使低速上返的泥浆具有足够大的切力, 从合理配置水马力的角度考虑, 有效的办法只能是在不致引起泵压升高过多和在起下钻时产生过大压力激动的前提下, 采用足够大的动塑比。

3 岩屑的滑沉速度及孔眼净化条件

由于岩屑的密度一般都大于泥浆的密度, 环空中的岩屑在自重的作用下, 会相对于上返泥浆产生滑沉。显然, 为保证岩屑能上升到地面, 泥浆的上返流速 V_α 应大于岩屑的滑沉速度 V_s 。研判钻孔的净化条件, 首先要计算出岩屑在实际上返泥浆中的滑沉速度 V_s 。现有计算 V_s 的公式很多, 都有各自的适用范围, 但由于在进行具体计算时涉及的不确定因素较多, V_s 的精确计算目前事实上还做不到。对于正循环大口径钻进, 其环空泥浆的流态一般为很稳定的层流, 根据笔者在实验室条件下进行过的检验, V_s (cm/s) 值可按下面的经验公式^[3]作近似估计:

$$V_s = 3286.1 \varphi_p^2 (\gamma_r - \gamma_m) / \eta_A \quad (12)$$

$$\text{或} \quad V_s = 71.3 \varphi_p (\gamma_r - \gamma_m)^{0.667} / (\gamma_m^{0.333} \cdot \eta_A^{0.333}) \quad (13)$$

式中: φ_p —岩屑的等效直径, 等于具有等体积的球体的直径^[2], cm ; γ_r —岩屑密度, g/cm^3 ; γ_m —泥浆密度, g/cm^3 ; η_A —低剪区环空泥浆的有效粘度, $10^{-3} Pa \cdot s$ 。

η_A 的大小可直接在流变曲线上用图解法确定, 也可按下式计算:

$$\eta_A = \eta_b + 112.0 \tau_0 (D_h - D_p) / V_\alpha \quad (14)$$

式中各项的意义和计算方法同前。

按式 (12) 和 (13) 分别计算出 V_s 后, 将结果代入岩屑雷诺数公式^[3]进行验算:

$$Re' = 9.968 \times 10^5 V_s \cdot \varphi_p \cdot \gamma_m / \eta_A \quad (15)$$

若 $Re' < 1$, 应以按式 (12) 计算的结果为准; 若 $Re' = 10 \sim 1000$, 则以按式 (13) 计算的结果为准。最后按下式判断孔眼的净化能力:

$$R_T = (V_\alpha - V_s) / V_\alpha \quad (16)$$

R_T 称为岩屑的输送比, 在石油钻井中, 只要 $R_T \geq 0.5$, 即认为可保持井眼清洁。对于大口径正循环钻进, 只要 $R_T \geq 0.5$, 虽然由于 V_α 较低, 需要的循环时间可能较长, 也总能带上岩屑。从式 (12) 和 (13) 可以看出, 岩屑在循环泥浆中的沉降速度 V_s 与泥浆的有效粘度 η_A 是成反比的, 正反映了与前节相同的规律, 即泥浆在低剪率下建立起来的有效粘度愈高, 就愈有利于提高泥浆的载屑能力。此外, V_s 的大小还与泥浆的密度 γ_m 有关, 故还可通过适当提高泥浆的密度来改善净孔条件。

实例: 某现场施工的一批基桩孔, 直径均为 800mm, 均使用外径为 100mm 的钻杆, 砂石泵的泵量为 $200m^3/h$, 测其中 2 个钻孔的泥浆性能如下:

A孔: 密度 $\gamma_m = 1.21 \text{g/cm}^3$, 范氏粘度仪的6个读数分别为 $\Phi_{600} = 36$, $\Phi_{300} = 26$, $\Phi_{200} = 23$, $\Phi_{100} = 19$, $\Phi_6 = 13$, $\Phi_3 = 12$;

B孔: 密度 $\gamma_m = 1.12 \text{g/cm}^3$, 范氏粘度仪的6个读数分别为 $\Phi_{600} = 35$, $\Phi_{300} = 24$, $\Phi_{200} = 19$, $\Phi_{100} = 13.5$, $\Phi_6 = 6$, $\Phi_3 = 5$ 。

若取岩屑的密度为 2.5g/cm^3 , 等效直径为 0.4cm , 由上述各式计算得到的结果见表1。

表1 两孔泥浆的流变性能

Table 1 Flow characteristics of mud for two drilling holes

	$\tau_0/10^{-1} \text{Pa}$	$\eta_s/10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$	Re	$V_d/\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$	E	$\eta_A/10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$	$V_s/\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$	Re'	R_T
A孔	58.18	21.16	2.69	9.93	0.006	4615	0.015	8.64	0.99
B孔	22.7	26.265	169.9	9.93	0.0195	1825	2.79	687.9	0.71

计算结果分析: 两孔环空上返泥浆的 E 值分别仅为 0.006 和 0.015 , 表明平板度均很高, 流态呈近乎塞流的层流; 岩屑输送比 R_T 分别达 0.99 和 0.71 , 均远大于 0.5 , 说明两个钻孔的上返泥浆对于等效直径 φ_p 不大于 0.4cm 的岩屑均具有足够的携带能力; 两孔泥浆的动塑比分别为 2.75 和 0.86 , 在中剪区的有效粘度大致相当, 而在 1.7s^{-1} 的剪率下有效粘度分别为 $4.615 \text{Pa}\cdot\text{s}$ 和 $1.825 \text{Pa}\cdot\text{s}$, 显示 A 孔泥浆的剪切稀释性能和在低剪率下的携屑能力要远优于 B 孔泥浆。现场上的实际情况是 B 孔经常下钻不到底, 而 A 孔则基本没有这种现象。

由此例可以看出, 动塑比这项指标对泥浆携屑性能的影响确实是很大的。需要指出的是, 式 (12)、(13) 在用于实际计算时, 它们的系数可能需要根据具体情况作适当的校正。

4 结 语

显然, 在大口径正循环钻进条件下, 为保证上返泥浆具有足够的携屑能力, 应该特别注重测试和研究现场泥浆在低剪率下的流变性能, 合理设计泥浆的动塑比和密度。为此, 应尽量使用优质泥粉配浆, 可采取加入水化性能好且比重较大的水泥灰、添加高分子聚合物和设法提高循环系统的除砂能力等措施来调节泥浆的密度和动塑比, 这些都被证明是可提高上返泥浆的载屑能力的有效办法。

参 考 文 献

- 1 黄汉仁, 杨坤鹏, 罗平亚等. 泥浆工艺学原理. 北京: 石油出版社, 1981. 37~43
- 2 [法] 石油与天然气勘探开发工会. 钻井泥浆与泥浆流变学手册. 北京: 石油出版社, 曾祥霖译, 1984. 35~41
- 3 张绍槐. 喷射钻井理论与计算. 北京: 石油出版社, 1986. 51~64

CHARACTERISTICS OF SOLIDS CARRIED BY ANNULAR RETURN SLURRY AT LOW SHEAR RATE

Yang Guanghua

(Department of Construction Engineering, Guilin Institute of Technology)

Abstract According to the study of flow characteristics of circulating slurry, sinking pattern of solids in streamline flow slurry, and clearance conditions of drill hole, it is concluded that clearance of drill hold depends on sufficient real viscosity of circulating slurry at low shear rate. Accordingly, special attention should be paid to the study of flow characteristics of slurry at low shear rate during the drilling process. A key method for improving clearance of drill hole is to set appropriate of slurry. Meanwhile, the density of slurry should also be properly controlled.

Key words real viscosity, low shear rate; solid-carrying capacity; outside clearance; mud density, slip-setting rate

丹霞奇景——“天斧砂宫”

在甘肃兰州市安宁区仁寿东面, 有一处鲜为人知的神奇世界——“天斧砂宫”。

顾名思义, “天斧砂宫”就是在砂岩之中, 由自然造化而形成酷似宫殿建筑的丹霞地貌景观。这里有富丽堂皇、布局协调、规模宏大的“宫廷建筑群”; 有高大雄伟、形体怪异的“风蚀塔”; 有栩栩如生的“金蟾”、“河马”、“白蛇”; 还有令人生畏的“铁牢”……

丹霞地貌是砂岩类岩石分布区特有的一种地貌景观。形成这种地貌景观的砂岩类岩石一般层理不发育, 多呈厚层状。因此, 由其形成的地貌景观整体感强。

据地质工作者考察, 兰州市安宁区仁寿山东边的丹霞奇景, 由黄土、胶结非常疏松的红色砂砾岩以及地质时代非常古老(约 6 亿年前)的皋兰群深色结晶片五个部分组成, 再加上常年风沙雨水的侵蚀, 就逐渐形成了“天斧砂宫”这一丹霞奇景。

千百年来, 这绚丽多姿的地貌景观, 被人们涂上神秘色彩, 流传下来许许多多美丽动人的神话传说, 令人神往和赞叹。历史进入 19 世纪后, 一些中外地理、地质学家才纷纷来这里考察研究, 著书立说, 揭开了这神奇世界的面纱。目前, 这里正被列为甘肃“十大景观”之一, 成为丝绸古道上一颗璀璨的明珠。

(山 水)