

# 钻孔灌注桩泥浆流变性能评价方法探讨

于进洋<sup>1</sup>, 白晨光<sup>2</sup>, 张新明<sup>1</sup>, 郑秀华<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国建筑股份有限公司技术中心, 北京 101300)

**摘要:**粘度是评价钻孔灌注桩泥浆性能的重要参数之一。由于钻孔灌注桩桩径大, 泥浆循环速度低, 剪切速率低, 评价石油钻井和地质勘探泥浆流变性能的方法不适合评价钻孔灌注桩泥浆粘度。首先分析了钻孔灌注桩循环速度, 推出其剪切速率分布; 然后分析了旋转粘度计的剪切速率, 提出了低转速的粘度计更适合评价钻孔灌注桩泥浆; 最后推导出了塑性粘度、有效粘度和动切力的计算公式, 对准确评价钻孔灌注桩泥浆具有重要理论和实践意义。

**关键词:**钻孔灌注桩; 泥浆; 流变性能; 粘度; 剪切速率

**中图分类号:** TU473.1<sup>+</sup>4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2013)04-0075-03

**Discussion of Evaluation on Mud Rheological Property Used for Bored Pile/YU Jin-yang<sup>1</sup>, BAI Chen-guang<sup>2</sup>, ZHANG Xin-ming<sup>1</sup>, ZHENG Xiu-hua<sup>1</sup>** (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China State Construction Engineering Corp. Ltd. Technical Center, Beijing 101300, China)

**Abstract:** Viscosity is one of the important parameters to evaluate the mud property of bored pile. Because of the large pile diameter, low mud circulation velocity and low shear rate, the methods of evaluating mud rheological property of petroleum drilling and geological exploration is not suitable for evaluating bored pile. This paper firstly analyzes the circulation velocity of bored pile to calculate the shear rate distribution; then analyzes the shear rate of rotary viscometer and suggests that variable speed viscometer with low rpm is more suitable to evaluate the mud of bored pile; the plastic viscosity, effective viscosity and yield point formulation under low shear rate were finally deduced.

**Key words:** bored pile; mud; rheological property; viscosity; shear rate

泥浆是油气钻井和地质钻探的“血液”, 泥浆流变特性的研究在石油钻井和地质勘探中已很成熟, 但在工程钻孔灌注桩泥浆评价方面研究不足。由于钻孔灌注桩桩径大, 泥浆循环速度低, 剪切速率低, 评价石油钻井和地质勘探泥浆流变性能的方法不适合用来评价钻孔灌注桩泥浆。本文通过研究, 提出钻孔灌注桩泥浆流变特性剪切速率的分布, 并据此推荐适合工程钻孔灌注桩的粘度评价方法, 推导出低剪切速率下塑性粘度、有效粘度和动切力的计算公式<sup>[1]</sup>。

## 1 钻孔灌注桩泥浆流动特性分析

泥浆护壁钻孔灌注桩施工中, 泥浆工作状态有无循环、正循环、反循环等。泥浆不循环时, 泥浆的主要作用是稳定孔壁和悬浮钻渣; 当泥浆循环, 特别是正循环时, 携带钻渣是泥浆的功能之一, 其粘度和切力等流变参数是评价泥浆性能的重要指标。

钻孔灌注桩泥浆通常由清水、膨润土和少许的处理剂组成, 其流变特性可用宾汉塑性模式描述(方程 1 和方程 2), 评价泥浆的流变特性参数包括

有效粘度(也叫表观粘度)、塑性粘度、动切力和静切力。

$$\tau = \tau_d + \mu_p \gamma \quad (1)$$

$$\mu_e = \tau / \gamma = \mu_p + \tau_d / \gamma \quad (2)$$

式中:  $\tau$ ——剪切应力, Pa;  $\gamma$ ——剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $\mu_p$ ——塑性粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $\tau_d$ ——动切力, Pa;  $\mu_e$ ——有效粘度,  $mPa \cdot s$ , 有效粘度随剪切速率增加而降低。

石油钻井与地质勘探用泥浆的流变性能常用流速旋转粘度计测量, 其转速和对应的剪切速率为 600、300、200、100、6、3 r/min 和 1022、511、340、170、10.22、5.11  $s^{-1}$ 。其流变参数计算如下:

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (3)$$

$$\tau_d = 0.511(\theta_{300} - \mu_p) \quad (4)$$

$$\mu_e = \theta_{600} / 2 \quad (5)$$

式中:  $\theta_{600}$ 、 $\theta_{300}$ ——分别为转速为 600 和 300 r/min 流速旋转粘度计读数。

研究分析表明, 当泥浆流动速度快, 剪切速率较高时, 更符合宾汉塑性模式, 其流变参数计算较为精确。钻孔灌注桩由于直径大, 泥浆流动速度低, 剪切

收稿日期: 2012-12-17

作者简介: 于进洋(1986-), 男(汉族), 山东人, 中国地质大学(北京)在读硕士研究生, 流体力学专业, 从事地热钻井、钻井水力学流变学研究, 北京市海淀区学院路 29 号, jyyu06@yahoo.com.cn。

速率低,其流变性能评价需要相应的技术。

钻孔灌注桩正循环钻进,泵量不足会影响钻进速度,使孔底岩屑增多,回转阻力增大;松散地层也会因泵量过大而冲垮孔壁甚至造成事故。因此,在非固结地层钻进时,泥浆上返速度不宜超过 0.17 m/s;而如稳定地层钢粒钻进时,泥浆上返速度一般取 0.25~0.5 m/s<sup>[2,3]</sup>。

与正循环钻进不同,钻孔灌注桩采用反循环钻进时不仅要求泥浆在钻杆内和钻头工作面有足够的流速使钻渣进入排渣口,同时还应考虑对孔壁的冲刷及节能等因素。国内外有关经验资料认为,钻杆内冲洗液上返速度在 2~4 m/s 为宜,孔底工作面冲洗液横向流速应达到 0.3~0.5 m/s(泥浆冲洗时为 0.3 m/s,清水冲洗时为 0.5 m/s);外环沿孔壁下流速度限制在 0.02~0.04 m/s,最大不超过 0.167 m/s<sup>[4~6]</sup>。

剪切速率与泥浆流动速度、钻孔直径和钻杆内外径有关。表 1 列出常用工程钻机及相应的钻孔直径和钻杆直径<sup>[3,7]</sup>。

表 1 常用工程钻机及钻孔直径和钻杆内外径

钻机型号	钻孔直径/mm	钻杆直径/mm	
		内径	外径
SPC-150	150~350	62	73
		74.9	89
		100.3	114
SPC-300	500~700	62	73
		74.9	89
		62	73
SPS-200	1100~2000	74.9	89
		100.3	114
		109	127
QJ-250	2500	150	180
MD-150	1500	204	216
MD-360	3600	342	406
MD-440	4400	383	457

### 1.1 正循环泥浆剪切速率

正循环时,泥浆在环空中的剪切速率计算如下:

$$\gamma_a = 4000v_a / (D - D_o) \quad (6)$$

式中: $\gamma_a$ ——正循环环空剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $v_a$ ——环空上返速度, m/s;  $D$ ——钻孔直径, mm;  $D_o$ ——钻杆外径, mm。

根据常用钻孔直径和钻杆尺寸及上返速度计算得正循环环空剪切速率,见表 2。

由表 2 可以看出,在满足上返速度要求的情况下,环空间隙越小正循环环空内剪切速率越大,相反环空间隙越大正循环剪切速率越小。表 2 中显示的

表 2 正循环环空内剪切速率

钻孔直径/mm	钻杆直径/mm		正循环环空剪切速率/ $s^{-1}$		
	内径	外径	上返速度/( $m \cdot s^{-1}$ )		
			0.17	0.25	0.5
150	62	73	8.83	12.99	25.97
	74.9	89	11.15	16.39	32.79
350	62	73	2.45	3.61	7.22
	74.9	89	2.61	3.83	7.66
	100.3	114	2.88	4.24	8.47
600	74.9	89	1.33	1.96	3.91
	100.3	114	1.40	2.06	4.12
1000	74.9	89	0.75	1.10	2.20
	100.3	114	0.77	1.13	2.26
1500	74.9	89	0.48	0.71	1.42
	100.3	114	0.49	0.72	1.44
2000	74.9	89	0.36	0.52	1.05
	100.3	114	0.36	0.53	1.06
	109	127	0.36	0.53	1.07
	150	180	0.37	0.55	1.10

正循环环空剪切速率较小,当孔径超过 350 mm 后,其剪切速率  $< 10 s^{-1}$ 。

### 1.2 反循环泥浆剪切速率

钻孔灌注桩采用反循环钻进时,反循环钻杆内剪切速率由下式计算:

$$\gamma_p = 2000v_p / D_p \quad (7)$$

式中: $\gamma_p$ ——反循环钻杆内剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $v_p$ ——泥浆在钻杆内的上返速度, m/s;  $D_p$ ——钻杆内径, mm。

分别取泥浆在钻杆内上返速度 2 和 4 m/s 时,计算反循环钻杆内剪切速率,见表 3。

表 3 反循环钻杆内剪切速率

钻杆尺寸/mm		剪切速率/ $s^{-1}$	
内径	外径	上返速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	
		2	4
74.9	89	53.40	106.80
100.3	114	39.88	79.76
113	127	35.40	70.80
150	180	26.67	53.33
204	216	19.61	39.22
342	406	11.70	23.39
383	457	10.44	20.89

由表 3 可以看出,在满足上返速度要求的情况下,钻杆内径越小反循环钻杆内剪切速率越大。其剪切速率一般不会超过  $100 s^{-1}$ 。

综上正循环和反循环,钻孔灌注桩循环泥浆流动剪切速率一般不大于  $100 s^{-1}$ ,处于低剪范围内。

## 2 泥浆流变性能评价方法

粘度的评价方法很多,漏斗粘度计和旋转粘度

计是工程泥浆比较常用的粘度测量仪器。漏斗粘度计因其测量方法简便而成为最常用的粘度测试仪器,测量结果称为漏斗粘度,用时间  $s$  表示。漏斗粘度与其它流变参数结合在一起,共同表征泥浆的流变性。漏斗粘度不能像从旋转粘度计测得的数据那样作数学处理,也无法与其它流变参数进行换算。漏斗粘度只能用来判别在作业期间各个阶段粘度变化的趋向,它不能说明泥浆粘度变化的原因,也不能作为对泥浆进行处理的依据。

旋转粘度计有两速、六速,十二速和无级变速等。两速型旋转粘度计用 600 r/min 和 300 r/min 这 2 种固定的转速测量泥浆的剪切应力,它们分别相当于  $1022 s^{-1}$  和  $511 s^{-1}$  的剪切速率。六速粘度计是石油钻井和地质勘探最常用的多速型旋转粘度计,其 6 种转速如下:600、300、200、100、6 和 3 r/min。十二速旋转粘度计比六速旋转粘度计多出 6 挡,即 60、30、20、10、2、1 r/min。可连续变速粘度计转速从 1 ~ 600 r/min ( $1.703 \sim 1022 s^{-1}$ ) 无级可调。粘度计转速  $N$  和剪切速率  $\gamma$  对应关系为  $\gamma = 1.703N$ ,见表 4。

表 4 旋转粘度计转速和与之对应的剪切速率

转速 (r·min <sup>-1</sup> )	100	60	30	20	10	6	3	2	1
剪切速率 /s <sup>-1</sup>	170.3	102.2	51.1	34.07	17.03	10.22	5.11	3.407	1.703

由于钻孔灌注桩剪切速率一般不大于  $100 s^{-1}$ ,因此旋转粘度计评价泥浆的流变性能时,应该在转速 < 60 r/min 时进行测试更合理,流变参数的计算利用低剪切速率读数。因此,建议对于钻孔灌注桩(包括地下连续墙),选用十二速或可无级变速旋转粘度计。

### 3 钻孔灌注桩旋转粘度计泥浆流变性能评价及参数计算

在石油钻井和地质勘探泥浆中,是用六速旋转粘度计测得的 600 r/min 和 300 r/min 的刻度盘读数求得有效粘度、塑性粘度和动切力的。由于钻孔灌注桩孔径大,泥浆在循环过程中处于低剪速率范围内,高转速情况下计算公式不适用。需要利用低转速读数计算钻孔灌注桩泥浆有效粘度  $\mu_e$ 、塑性粘度  $\mu_p$  和动切力  $\tau_d$ 。根据前面分析,建议使用六速旋转粘度计时,分别用 100 和 6 r/min 读数;用十二速旋转粘度计和无级变速时用 30 和 6 r/min 读数。

$$\mu_e = \tau/\gamma$$

$$= 0.511\theta_N / (1.703N) \times 1000$$

$$= 300\theta_N / N \tag{8}$$

式中: $N$ ——旋转粘度计转子的转速, r/min;  $\theta_N$ ——旋转粘度计转速为  $N$  时的刻度盘度数。

利用(8)式可将任意剪切速率(或转子的转速)下测量得的刻度盘度数换算成有效粘度,旋转粘度计在钻孔灌注桩常用的转速的换算系数见表 5。

表 5 粘度计刻度盘度数换算成有效粘度的换算系数

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	60	30	20	10	6	3	2	1
换算系数	5	10	15	30	50	100	150	300

如针对于钻孔灌注桩的低剪情况下,十二速粘度计采用 60 r/min ( $102.2 s^{-1}$ ) 及以下转速的计算数据合理。如利用 30 r/min 和 3 r/min 测量读数可推导钻孔灌注桩流变参数的计算公式:

$$\mu_e = 10\theta_{30} \text{ 或 } \mu_e = 100\theta_3 \tag{9}$$

$$\mu_p = (\tau_{N_2} - \tau_{N_1}) / (\gamma_{N_2} - \gamma_{N_1})$$

$$= 0.511(\theta_{N_2} - \theta_{N_1}) / [1.703(N_2 - N_1)]$$

$$= 0.511(\theta_{30} - \theta_3) / [1.703(30 - 3)]$$

$$= 0.01111(\theta_{30} - \theta_3) \tag{10}$$

$$\tau_d = \tau - \mu_p \gamma$$

$$= 0.511\theta_{N_2} - 0.511(\theta_{N_2} - \theta_{N_1}) \times 1.703N_2 / [1.703(N_2 - N_1)]$$

$$= 0.511(\theta_{N_1}N_2 - \theta_{N_2}N_1) / (N_2 - N_1)$$

$$= 0.568\theta_3 - 0.0568\theta_{30} \tag{11}$$

### 4 结论

钻孔灌注桩泥浆剪切速率在正循环和反循环过程中都较低,正循环一般不超过  $10 s^{-1}$ ,反循环则低于  $100 s^{-1}$ ;石油钻井和地质勘探使用六速旋转粘度计在高剪切速率下评价泥浆流变性能,不适用于钻孔灌注桩。十二速和无级变速旋转粘度计的低剪切速率更适合评价钻孔灌注桩泥浆流变特性。

### 参考文献:

- [1] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 山东东营:中国石油大学出版社, 2001. 57 - 71.
- [2] 编写组. 桩基工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995. 614 - 636.
- [3] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,1993. 438 - 456.
- [4] DZ/T 0155 - 95, 钻孔灌注桩施工规程[S].
- [5] JGJ 4 - 80, 工业与民用建筑灌注桩基础设计与施工规范[S].
- [6] 李世京,等. 钻孔灌注桩施工技术[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- [7] 张保义. 桩工机械——中国建筑机械化四十年[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.