

基于微凸体接触的钻柱纵向振动减摩阻

王 鹏¹, 倪红坚¹, 王瑞和¹, 沈忠厚¹, 李志娜²

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要: 基于微凸体接触变形理论, 建立钻柱纵向振动条件下钻柱与岩石间摩擦力的分析计算模型, 探索钻柱纵向振动减摩阻规律。结果表明: 钻柱纵向振动减摩阻的条件是钻柱相对于岩石运动速度小于钻柱纵振速度幅值, 且振动减阻效果随振动频率的增大而增强, 随振幅的增大呈现先增强后减弱的趋势, 存在最优振幅, 而随着钻柱与岩石间相对运动速度、相对法向压入量和摩擦系数的增大, 振动减摩阻效果趋于弱化; 钻柱振动频率、振幅、相对法向压入量、摩擦系数和钻柱与岩石间相对运动速度对振动减阻的影响作用依次降低, 其中振动频率、振幅和相对法向压入量为显著因子。

关键词: 钻井; 复杂结构井; 纵向振动; 减阻; 钻柱; 正交试验

中图分类号: TE 21 **文献标志码:** A

引用格式: 王鹏, 倪红坚, 王瑞和, 等. 基于微凸体接触的钻柱纵向振动减摩阻[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(1): 88-94.

WANG Peng, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Friction reduction research of drill-string longitudinal vibration based on asperity contact[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 88-94.

Friction reduction research of drill-string longitudinal vibration based on asperity contact

WANG Peng¹, NI Hongjian¹, WANG Ruihe¹, SHEN Zhonghou¹, LI Zhina²

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Based on asperity contact deformation theory, an analysis and calculation model of the friction between drill-string and wellbore rock was established, and the mechanism of friction reduction via exciting drill-string vibration longitudinally was studied. The results show that the criteria for friction reduction by vibrating drill-string longitudinally is that the relative sliding velocity of the drill-string on the wellbore rock should be less than the amplitude of the velocity of drill-string vibration. The friction reduction effect increases with the increase of the vibration frequency, and it increases firstly with the vibration amplitude then decreases, and there is an optimal amplitude. The friction reduction effect decreases with the increase of the drill-string movement velocity, the penetration depth of the asperity and the friction coefficient. The results of orthogonal testing indicate that the influence on friction reduction of vibration frequency, amplitude, penetration depth of the asperity, friction coefficient and the velocity of drill-string weakens in sequence, of which the vibration frequency, amplitude, and the penetration depth of the asperity are the most significant factors.

Keywords: drilling; complex structure well; longitudinal vibration; friction reduction; drill-string; orthogonal testing

收稿日期: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374234, 51174227); 国家“973”重大项目(2010CB226703-1); 中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(YCX2014008)

作者简介: 王鹏(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事井下系统、信息与控制方面的研究。E-mail: wangpeng_p@126.com。

通讯作者: 倪红坚(1972-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事石油钻井工具、高效破岩方法与技术、高压水射流理论与技术方面的研究。E-mail: nihj@upc.edu.cn。

钻柱与井壁岩石间的摩阻扭矩问题是钻井工程的基础性研究课题,定向井、水平井和大位移井等复杂结构井滑动钻进模式下的高摩阻问题限制了钻速的提高和极限延伸距离的增大^[1]。激发钻柱振动减摩阻技术是为解决复杂结构井滑动钻进存在的高摩阻问题,继而高效开发复杂油气层和海洋等油气资源而发展起来的一项新型钻井技术,其中以纵向振动减摩阻的应用效果最为显著^[2-4]。振动减摩阻技术已广泛应用于众多行业数十年,国内外学者在振动减摩阻理论模型方面做了大量研究。Matunaga等^[5]基于刚体库伦摩擦定律提出刚体滑移模型,认为振动改变了瞬时摩擦力的方向,使某一方向上的摩擦力分量减小;Broniec^[6]、Uribayashy^[7]、Littmann等^[8-10]通过实验研究了切向振动的减阻作用。但以上研究所采用模型均没有考虑表面接触变形的影响,导致计算出的摩擦力偏高。Tani^[11]指出描述具有小幅滑移的接触类型不能单纯使用刚体库伦摩擦模型,实验观察到当两个接触表面产生相对滑动时,表面上的微凸体将产生微偏移^[12-14],但这些微偏移模型中均没有考虑振动因素对摩擦的影响。在钻井行业,钻柱振动减摩阻技术研究重点在激振器的研制和现场试验,对钻柱振动减阻过程中摩擦力变化规律的研究较少。综上所述,钻柱振动摩擦力变化规律是激振器核心参数确定的依据以及后续配套工艺技术研究的基础,并决定着钻柱振动减摩阻的应用效果。笔者基于微观接触变形理论,建立滑动钻进模式下钻柱与岩石间纵向振动摩擦力的分析计算模型,对钻柱纵向振动减摩阻的规律进行研究。

1 钻柱与岩石间摩擦力分析计算模型

1.1 钻柱与岩石间的接触

钻柱与井壁岩石的接触属于两个表面之间的接触,微凸体弹性变形摩擦理论认为真实物体的表面均可看成由若干微凸体组成,摩擦力由接触表面微凸体的切向变形产生。微观接触摩擦模型(如G-W接触模型^[15],W-A模型^[16]和分形接触模型^[17])均假设一个摩擦面为平面,另一个为由大量微凸体组成的粗糙面,摩擦接触发生在平面和微凸体之间且平面与微凸体之间的摩擦系数为库伦摩擦系数,同时考虑到钻柱表面比岩石表面光滑得多,将钻柱与井壁岩石的摩擦接触简化为如图1所示的平面钻柱和粗糙井壁岩石之间的摩擦问题。图1中 z_i 为井壁岩石上的第 i 个微凸体顶端距离钻柱的垂直距离, λ 为在法向力的作用下钻柱沿其外法线方向向井壁岩

石移动的距离。

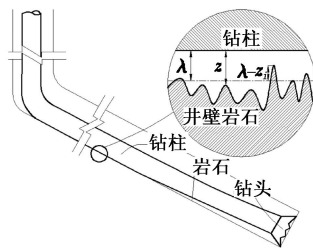


图1 钻柱与井壁岩石微观接触模型

Fig.1 Asperity contact model between drill-string and rock

1.2 基本假设

结合钻井实际工况,假设:①井壁岩石为向下无限延伸的半无限体,其表面由大量微凸体组成,微凸体基本形状为椭圆,通过改变椭圆长短半轴的比值模拟具有不同粗糙度的岩石表面;②井壁岩石表面所有微凸体的高度分布均一,且有同样的椭圆度,即图2中的 a 和 b 为常数;③任意一个微凸体的变形遵循Hertz接触理论;④钻柱包含滑动钻进和静止两种状态,只考虑钻柱在轴向上的动力效应,令钻柱以相对于井壁岩石的速度 v_0 沿其轴线(x 方向)向井底作匀速滑动;⑤钻柱上各点同时以速度 $v^* \sin(\omega t)$ 沿其轴线作正弦振动,初始相位为0,初始振动方向与 v_0 方向相同,其中 v^* 为振动速度幅值,mm/s, ω 为角频率,rad/s。

井壁岩石表面微凸体形状及其在法向载荷 P 作用下受到切向力 F 产生的变形如图2所示。

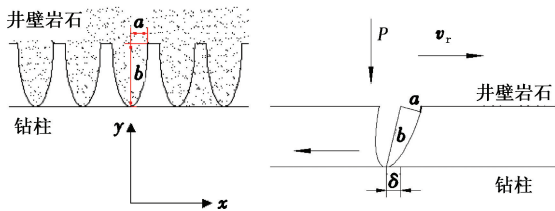


图2 弹性微凸体微观接触模型

Fig.2 Asperity contact model between rough surface and flat surface

1.3 振动条件下钻柱与岩石的摩擦力计算

如图1所示,当钻柱向井壁岩石压入 λ 位移时,产生的法向载荷^[18]为

$$P = CA \int_0^\lambda P_i dz = \frac{4CA\kappa\pi E'}{5k(2\varepsilon R)^{1/2}} \left(\frac{\lambda}{\kappa} \right)^{5/2}. \quad (1)$$

其中

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad k = \begin{cases} a/b, & a < b; \\ b/a, & a > b. \end{cases}$$

式中, C 为表面参数,与单位面积接触的井壁表面微

凸体数目和表面之间的距离 z 有关, m^{-3} ; A 为据 Hertz 理论计算的表观接触面积, m^2 ; E' 为复合弹性模量; E_1 和 E_2 分别为钻柱和岩石的弹性模量; ν_1 和 ν_2 分别为钻柱和岩石的泊松比, MPa; k 为椭圆度; R 为椭圆接触的曲率和; a 和 b 分别为岩石表面微凸体在 x 和 y 方向的半轴长度, μm ; λ 为钻柱向岩石压入的位移, mm ; κ 和 ε 分别为椭圆积分变量 $e = (1 - k^2)^{1/2}$ 的第一类和第二类完全椭圆积分。

钻柱滑动过程中产生的总摩擦力^[14]为

$$F(t) = \mu P \left[1 - \left(1 - \frac{8G'\delta\kappa}{\mu\pi E'\varphi\lambda} \right)^{5/2} \right]. \quad (2)$$

其中

$$\frac{1}{G'} = \frac{1 - \nu_1^2}{G_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{G_2},$$

$$\varphi = \begin{cases} \left[\frac{4}{\pi}(2 - \nu_2) \right] \left[\left(1 - \frac{\nu_2}{e^2} \right) \kappa + \nu_2 \frac{\varepsilon}{e^2} \right], & a < b; \\ \left[\frac{4}{\pi}(2 - \nu_2) \right] \left[\left(1 - \nu_2 + \frac{\nu_2}{e^2} \right) \kappa - \nu_2 \frac{\varepsilon}{e^2} \right], & a > b. \end{cases}$$

式中, μ 为摩擦系数; G' 为复合剪切模量; G_1 和 G_2 分别为钻柱和井壁岩石的剪切模量, MPa; δ 为井壁岩石表面的微凸体沿 x 方向偏离其平衡位置的位移, μm ; φ 为常数因子, 与井壁岩石的泊松比 ν_2 和微凸体尺寸 a 和 b 有关。

井壁沿 x 方向(轴向)偏离其平衡位置的位移为

$$\delta = \int_0^t v_r(t) dt. \quad (3)$$

公式(1)~(3)给出了钻柱和井壁岩石间的摩擦力 F 与相对滑动速度 $v_r(t)$ 间的关系, 通过计算钻柱 t 时刻所对应的速度 $v_r(t)$ 即可求得钻柱与井壁岩石的瞬时摩擦力。由于滑动钻进模式下存在钻柱相对于井壁岩石静止和滑动两种状态, 分别对这两种状态进行讨论。

1.3.1 钻柱静止

$v_0 = 0$, 钻柱上各点只在其平衡位置附近振动。

钻柱运动合速度表示为

$$v_r(t) = v^* \sin(\omega t). \quad (4)$$

钻柱从静止开始振动, 当 $\delta = \delta_{\max}$ 时, 井壁岩石表面的微凸体开始滑动, 摩擦力变为 $F = F_0 = \mu P$, 该过程所对应的时间段为 $0 \sim t_1$, 将式(4)代入式(3)中进行积分, 得

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{\left(\frac{v^*}{\omega} - \delta_{\max} \right) \omega}{v^*}. \quad (5)$$

定义 $\delta_{\max}$ 为微偏移区域长度, $\delta_{\max}$ 表达式^[15]为

$$\delta_{\max} = \frac{\lambda \mu \pi E' \varphi}{8 \kappa G'}. \quad (6)$$

钻柱在一个振动周期过程中, 将经历沿 x 轴正向达到 $\delta_{\max}$ $\xrightarrow{1(\text{切向力卸载})} -\delta_{\max}$ $\xrightarrow{2(\text{切向力加载})} \delta_{\max}$ 的变化, 据式(2)将这两个过程所对应的摩擦力转化为 F 所在的坐标系^[18]分别为

$$1: F_1 = F_0 - 2\mu P \left[1 - \left(1 - \frac{4G'\kappa(\delta^* - \delta)}{\mu\pi E'\varphi\lambda} \right)^{5/2} \right]. \quad (7)$$

$\delta_{\max}$ 变为 $-\delta_{\max}$ (切向力卸载的 1 过程) 所对应的时间段为 $\frac{T}{4} \sim t_2$, 将式(4)代入式(3)中进行积分, 并令 $\delta = 2\delta_{\max}$, 计算得到 t_2 表达式为

$$t_2 = \frac{T}{4} + \frac{1}{\omega} \arccos \frac{\left(\frac{v^*}{\omega} - 2\delta_{\max} \right) \omega}{v^*}. \quad (8)$$

$$2: F_2 = -F_0 + 2\mu P \left[1 - \left(1 - \frac{4G'\kappa(\delta^* + \delta)}{\mu\pi E'\varphi\lambda} \right)^{5/2} \right]. \quad (9)$$

$-\delta_{\max}$ 变为 $\delta_{\max}$ (切向力加载的 2 过程) 所对应的时间段为 $\frac{3T}{4} \sim t_3$, 将式(4)代入式(3)中进行积分, 并令 $\delta = 2\delta_{\max}$, 计算得到 t_3 的表达式为

$$t_3 = \frac{3T}{4} + \frac{1}{\omega} \arccos \frac{\left(\frac{v^*}{\omega} - 2\delta_{\max} \right) \omega}{v^*}. \quad (10)$$

式中, F_0 为井壁表面所有微凸体均发生偏移后的最大摩擦力, 即库仑摩擦力, N; δ^* 为 F_0 对应的井壁表面微凸体偏移位移, μm ; T 为振动周期, s。

综上所述, 在钻柱静止即 $v_0 = 0$ 情况下, 一个振动周期内钻柱与井壁岩石之间的摩擦力变化如图 3 所示。

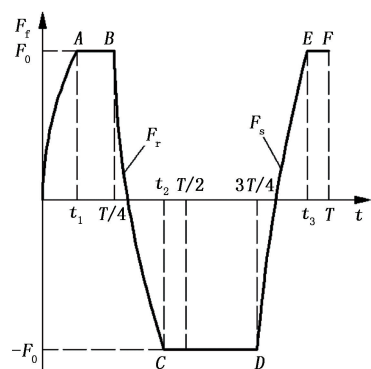


图 3 $v_0 = 0$ 时一个振动周期内钻柱与岩石之间的摩擦力变化

Fig. 3 Variation of friction between drill-string and rock in a vibration period under $v_0 = 0$

1.3.2 钻柱轴向滑动

钻柱轴向滑动时钻柱上各点的合速度为

$$v_r(t) = v_0 + v^* \sin(\omega t). \quad (11)$$

依据 v_0 和振动速度 $v^* \sin(\omega t)$ 关系,只有当速度 $v_r(t) = 0$ 并开始反向时,井壁表面微凸体的偏移位移 δ 才能够减小甚至反向,摩擦力才会减小并反向,产生减阻效果。钻柱和井壁岩石在一个振动周期内摩擦力变化如图 4 所示。

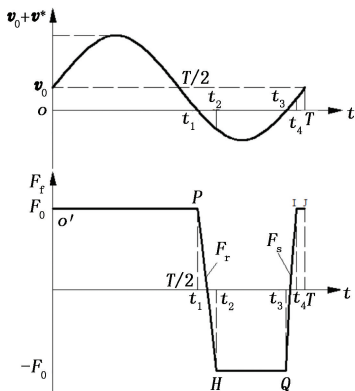


图 4 $v_0 < v^*$ 时一个振动周期内钻柱与井壁之间的摩擦力变化

Fig. 4 Variation of friction between drill-string and wall in a vibration period under $v_0 < v^*$

图 4 中所对应的时间节点为

$$t_1 = \frac{T}{2} + \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{v_0}{v^*} \right), \quad (12)$$

$$\cos(\omega t^*) - \frac{\omega v_0}{v^*} t = 1 - \frac{2\omega \delta_{\max}}{v^*}, \quad (13)$$

$$t_2 = t_1 + t^*, \quad (14)$$

$$t_3 = T - \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{v_0}{v^*} \right), \quad (15)$$

$$t_4 = t_3 + t^*. \quad (16)$$

式中, t^* 为微凸体偏移 $2\delta_{\max}$ 所用的时间, s。

从以上分析可知,钻柱与井壁岩石之间的摩擦力在一个振动周期内数值和方向均发生了改变。摩擦力值的改变由井壁岩石表面的微凸体偏移位移 δ 引起,当 $\delta = 0$ 时,摩擦力的方向发生改变,导致 δ 发生变化的决定因素是 v_0 和 v^* 的关系,只有当 $v_0 = 0$ 或 $v_0 \neq 0$ 且 $v_0 < v^*$ 时,纵振才能诱发井壁表面上微凸体的微偏移,使摩擦力出现减小和变向的现象,而且随 v^*/v_0 增大,该过程在一个振动周期内持续时间所占比例增大。

2 振动减摩阻单因素影响规律

为分析振动频率、振动幅值、钻柱滑动速度、钻

柱向岩石的相对法向压入量和摩擦系数等因素对钻柱纵振减阻效果的影响,选取井壁岩石表面微凸体沿 x 和 y 方向上的半轴长度分别为 $a = 5 \mu\text{m}$ 和 $b = 100 \mu\text{m}$,复合弹性模量 $E' = 1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,复合剪切模量 $G' = 4.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.3$,表面参数 $C = 1 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ [19]。如无特别说明,振幅 $\frac{v^*}{2\pi f} = 15 \mu\text{m}$,振动频率 $f = 50 \text{ Hz}$,摩擦系数 $\mu = 0.6$,相对滑动速度 $v_0 = 10 \text{ mm/s}$,相对法向压入量 $\lambda/R = 0.04$,计算单位时间内钻柱与岩石之间的平均摩擦力 $F = \int_0^1 F(t) dt$ 与库伦摩擦力 F_0 之间的比值(即减阻效率),当该值小于 1 时表示具有减阻效果,比值越小振动减阻效果越显著。

2.1 振动频率

不同振幅下振动频率对摩擦力比值的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出,摩擦力比值随振动频率的增加而减小,即振动减阻效果随频率的增大而增强。当振动频率低于 5 Hz 时,不同振幅的减阻效果接近,振动频率为 80 ~ 300 Hz 时 15 μm 振幅所对应的摩擦力比值 F/F_0 最小,说明在研究设定条件下,15 μm 为较优振幅。

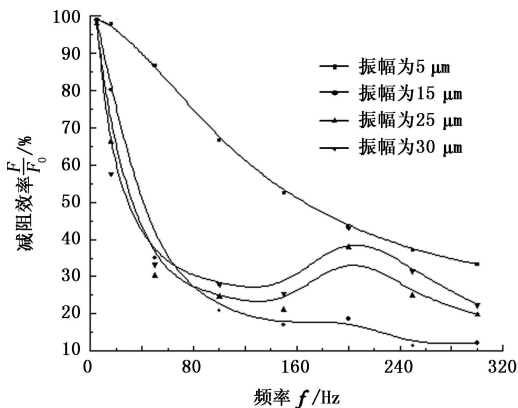
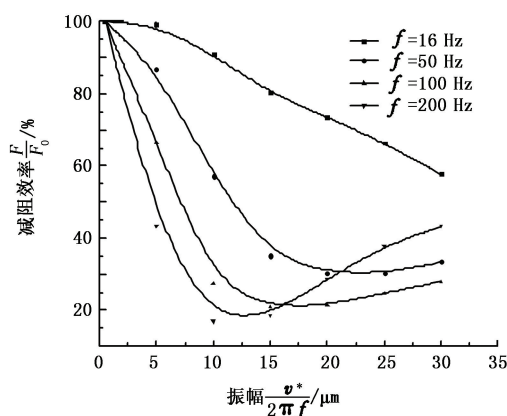


图 5 频率对摩擦力比值 F/F_0 的影响

Fig. 5 Influence of frequency on F/F_0

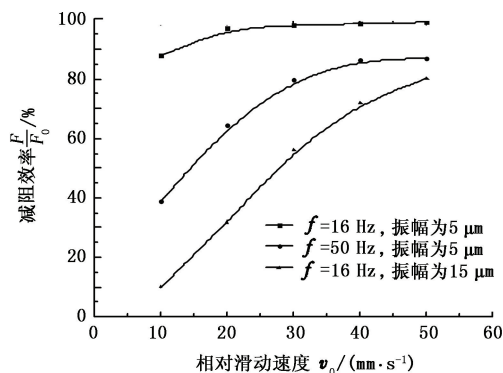
2.2 振幅

不同频率下振幅对摩擦力比值的影响如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随着振幅的增加,较低频率(16 Hz)所对应的摩擦力比值平稳减小,高频率(大于 50 Hz)对应的摩擦力比值呈先急剧减小后缓慢增加的趋势,说明存在最优振幅使摩擦力比值最小,且随着频率的增加,曲线的最低点逐渐向左移动,即最优振幅值逐渐减小。振幅小于 1 μm 或大于 30 μm 时,不同频率所对应的摩擦力比值相近,振动减阻效果接近。

图6 振幅对摩擦力比值 F/F_0 的影响Fig. 6 Influence of amplitude on F/F_0

2.3 相对滑动速度

钻柱相对井壁岩石的滑动速度对摩擦力比值的影响如图7所示。从图7中可以看出,随着相对滑动速度的增大,摩擦力比值逐渐增加,振动减阻效果变差。随着振幅或频率的增加,曲线斜率逐渐变大,说明钻柱相对井壁岩石的滑动速度对摩擦力比值的影响程度变大,振动减阻效果变好。

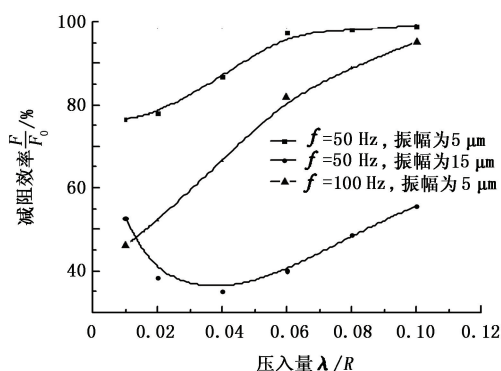
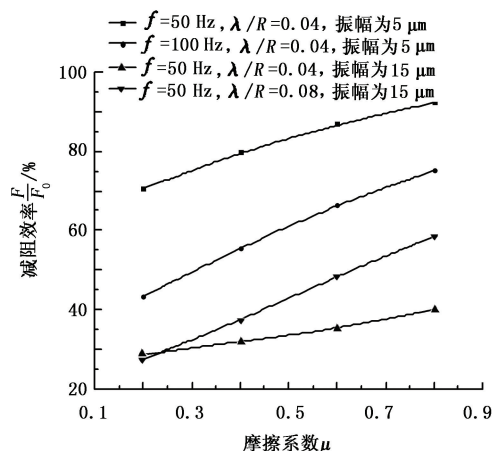
图7 相对滑动速度对摩擦力比值 F/F_0 的影响Fig. 7 Influence of relative sliding velocity v_0 on F/F_0

2.4 相对法向压入量

相对法向压入量对减阻效率的影响如图8所示。从图8中可以看出,随着 λ/R 的增加,摩擦力比值逐渐增加,振动减阻效果变好;50 Hz 和 15 μm 条件下摩擦力比值最小,且存在最优压入量约为 0.03 时摩擦力比值最小,即减阻效果最好。

2.5 摩擦系数

摩擦力比值随摩擦系数的变化如图9所示。从图9中可以看出,随着摩擦系数的增加,摩擦力比值逐渐增加,振动减阻效果变差;在同一滑动摩擦系数下,增加频率、增加振幅或减小压入量均可使摩擦力比值降低,振动减阻效果变好。

图8 压入量 λ/R 对摩擦力比值 F/F_0 的影响Fig. 8 Influence of normal pressure intake λ/R on F/F_0 图9 摩擦系数对摩擦力比值 F/F_0 的影响Fig. 9 Influence of friction coefficient μ on F/F_0

3 正交试验

单因素对摩擦力比值的影响可在一定程度上反映振动减摩擦阻规律,而实际工况下这些因素共同存在,不可能相互分离。为了进一步分析不同因素共同作用下的纵振减摩擦阻效果及各因素之间的交互作用,采用正交试验法,选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表进行数值试验^[20],因子水平及试验结果分别见表1和图10。

表1 因子水平表

Table 1 Factors and levels table

因子	一	二	三	四
A	20	80	140	200
B	5	11	17	25
C	15	25	35	45
D	0.02	0.04	0.06	0.08
E	0.1	0.3	0.5	0.7

注:A为振动频率 f , Hz; B为振幅 a , μm ; C为相对滑动速度, mm/s ; D为相对法向压入量 λ/R ; E为摩擦系数 μ 。

以摩擦力比值 F/F_0 作为考察指标,对正交试

验结果进行数据直观分析和方差分析,得到各因素的影响作用的大小依次为振动频率、振幅、相对法向压入量、摩擦系数和相对滑动速度,同时由于因子 A 的 F/F_0 大于 $F_{0.975}(3,3)=15.44$, B 和 D 因子的 F/F_0 均大于 $F_{0.95}(3,3)=9.28$,说明因子 A 和 B 、 D 分别在显著性水平 0.025 与 0.05 上是显著的,其他因子不显著。对于显著因子,通过比较各个水平下的数据均值,得到因子 A 、 B 和 D 分别取三水平、四水平和一水平为好。其他因子不显著,水平可任取。

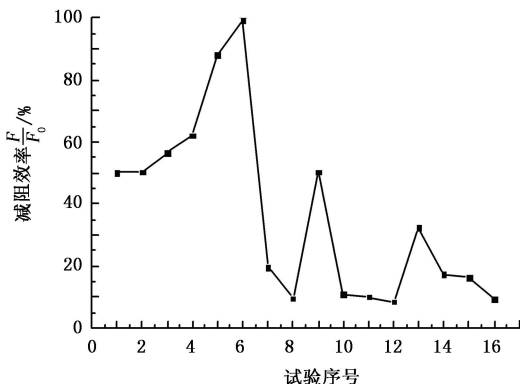


图 10 正交试验结果

Fig. 10 Results of orthogonal experiment

依据上述分析结果,针对钻井工程问题,可以通过改变激励器的激励频率、振幅、钻柱与井壁岩石的接触力和摩擦系数等因素减小摩擦系数比值,提高振动减摩阻效果。在特定工况下,激励频率和振幅均存在最优值,可通过现场试验进行标定;钻柱与井壁岩石间的接触力与井斜、钻具结构和钻柱屈曲有关,在井眼轨迹确定的前提下,尽量使用轻钻具进行加压,同时尽量减小钻柱的屈曲,以减小钻柱与井壁岩石之间的法向接触力,提高振动减阻应用效果;振动减阻效果随着摩擦系数的减小变好,因此可通过提高钻井液的润滑性减小钻柱与井壁岩石间的摩擦系数,提高振动减摩阻效果。在以上各个因素中,由于振动频率、振幅和相对法向压入量是显著因素,在振动减摩阻施工中针对不同工况可考虑优先调整这几个因素。

4 结 论

(1)滑动钻进过程中,当钻柱相对于岩石运动速度小于钻柱纵振速度幅值时,纵振诱发井壁岩石表面微凸体产生微偏移,使摩擦力出现减小和变向的现象,而且随着振动速度幅值与相对滑动速度的比值的增大,该过程在一个振动周期内所占的时间比例增大,纵振减阻效果变好。

(2)振动减阻效果随振动频率的增大而增强,随振幅的增大则呈现先增强后减弱的趋势,存在最优振幅,而随着钻柱与岩石间相对运动速度、相对法向压入量和摩擦系数的增大,振动减摩阻趋于弱化。

(3)钻柱振动频率、振幅、相对法向压入量、摩擦系数和钻柱与岩石间相对运动速度对振动减阻的影响作用依次降低,其中振动频率、振幅和相对法向压入量为显著因子。

参考文献:

- [1] 李克向. 我国滩海地区应加快发展大位移井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(3): 1-3.
LI Kexiang. The development of extended reach drilling technology should be accelerated in beach areas in China [J]. Oil Drilling and Production Technology, 1998, 20(3): 1-3.
- [2] KEN N, TIMM B, JOHN P, et al. Modeling the affect of a down-hole vibrator[R]. SPE 121752, 2009.
- [3] SKYLES L P, AMIRASLANI Y A, WILHOIT J E. Converting static friction to kinetic friction to drill further and faster in directional holes [R]. IADC/SPE 151221, 2012.
- [4] 石崇东, 党克军, 张军, 等. 水力振荡器在苏 36-8-18H 井的应用[J]. 石油机械, 2012, 40(3): 35-37.
SHI Chongdong, DANG Kejun, ZHANG Jun, et al. Application of hydraulic oscillator in Su-36-8-18H well[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(3): 35-37.
- [5] MATUNAGA S, ONODA J. A novel method of friction force reduction by vibration and its application to gravity compensation: proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Dallas, Apr 13-15, 1992[C]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.
- [6] BRONIEC Z, LENKIEWICZ W. Static friction processes under dynamic loads and vibration[J]. Wear, 1982, 80(3): 261-271.
- [7] URIBAYASHI K, SHIMIZU S, YUASA K, et al. Friction force reduction of conduit guided wire by vibration: proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, Oct 2-4, 1994[C]. Piscataway: IEEE, 1994.
- [8] LITTMANN W, STORCK H, WALLASCHEK J. Reduction of friction using piezoelectrically excited ultrasonic vibrations: proceedings of the Conference, Newport Beach, Mar 5-7, 2001[C]. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001.

- [9] LITTMANN W, STORCK H, WALLASCHEK J. Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: superposition of longitudinal oscillations [J]. *Archive Applied Mechanics*, 2001, 71(8):549-554.
- [10] LITTMANN W, WALLASCHEK J, MRACEK M, et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(1/8):379-383.
- [11] TANI K. Friction models for a mobile machine using piezo vibration: Int Workshop Advanced Motion Control, MIE, Mar 18-21, 1996[C]. Piscataway: IEEE, 1996.
- [12] HAGMAN L A, OLOFSSON U. A model for micro-slip between flat surfaces based on deformation of ellipsoidal elastic asperities-parametric study and experimental investigation. [J]. *Tribology International*, 1998, 31(4):209-217.
- [13] OLOFSSON U. Cyclic micro-slip under unlubricated conditions[J]. *Tribology International*, 1995, 28(4):207-217.
- [14] COURTNEY PRATT J S, EISNER E. The effect of a tangential force on the contact of metallic bodies: proceedings of the Royal Society, Jan 29, 1957[C]. London: The Royal Society Publishing, 1957.
- [15] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces: proceedings of the Royal Society, Dec 6, 1966[C]. Lond: The Royal Society Publishing, 1966.
- [16] WHITEHOUSE D J, ARCHARD J F. The properties of random surface of significance in their contact: proceedings of the Royal Society, Mar 31, 1970[C]. Lond: The Royal Society Publishing, 1970.
- [17] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. *Journal of Tribology*, 1991, 113(1):1-11.
- [18] OLOFSSON U, HAGMAN L A. A model for micro-slip between flat surfaces based on deformation of ellipsoidal elastic asperities[J]. *Tribology International*, 1997, 30(8):599-603.
- [19] 弗杰尔 E, 霍尔特 R M, 霍斯拉德 P, 等. 石油工程岩石力学 [M]. 邓金根, 蔚宝华, 王金凤, 译. 2 版. 北京:石油工业出版社, 2012.
- [20] 茆诗松, 周纪芃, 陈颖. 实验设计[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.

(编辑 李志芬)