

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syzjts.201503012

# 横向振动对水平井眼中钻柱摩阻的影响研究

张会增<sup>1</sup>, 管志川<sup>1</sup>, 柯 珂<sup>2</sup>, 窦玉玲<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 3. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017)

**摘 要:** 激振力的幅值和频率是影响横向振动类减摩阻工具性能的主要参数, 利用自行研制的旋转激励载荷作用下摩擦力测试试验装置, 研究了激振力的幅值和频率对钢-石板平面摩擦副摩擦系数的影响规律。试验结果发现, 在激振频率为 5, 10 和 20 Hz 条件下, 与未施加激振力时的摩擦系数相比, 当激振力增加到 34.2 N 时, 钢-石板平面摩擦副的摩擦系数分别减小 21.6%, 29.0% 及 34.4%; 在激振力为 11.4, 22.8 和 34.2 N 条件下, 与未施加激振力时的摩擦系数相比, 当激振频率增加到 30 Hz 时, 钢-石板平面摩擦副的摩擦系数分别减小 22.8%, 27.4% 及 39.0%。研究结果表明: 在相同激振频率下, 钢-石板平面摩擦副的摩擦系数与激振力幅值呈线性负相关; 在相同激振力幅值下, 钢-石板平面摩擦副的摩擦系数与激振频率呈对数负相关。

**关键词:** 横向振动 钻柱摩阻 激振力 激振频率 摩擦系数

**中图分类号:** TE243 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)03-0061-04

## The Impact of Lateral Vibration on Friction of Drill String in Horizontal Wells

Zhang Huizeng<sup>1</sup>, Guan Zhichuan<sup>1</sup>, Ke Ke<sup>2</sup>, Dou Yuling<sup>3</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 3. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China)

**Abstract:** The amplitude and frequency of the exciting force are main factors which impact on performance of the lateral vibrating friction-reducing tools. Through measuring friction under the load of rotary exciting force with the self-developed testing unit, the impact of amplitude and frequency of the exciting force on the friction coefficient of plane friction pairs between steel and rock plate was diagnosed. The results show that friction coefficients reduced by 21.6%, 29.0% and 34.4% respectively when the exciting force increased from zero to 34.2 N at the frequency of 5, 10 and 20 Hz, and by 22.8%, 27.4% and 39.0% respectively, when the exciting frequency increased from zero to 30 Hz at the exciting force of 11.4, 22.8 and 34.2 N respectively. The study indicates that the friction coefficient of plane friction pairs between steel and rock plate has a negative linear relationship with the amplitude of the exciting force at the same exciting frequency, and a negative logarithmic relationship with the exciting frequency at the same exciting force.

**Key words:** lateral vibration; friction of drill string; exciting force; exciting frequency; friction coefficient

在水平井水平段钻进过程中, 钻柱由于重力作用与井眼的低边多呈面接触, 造成钻柱与井壁间的摩阻较大, 导致滑动钻进时加不上钻压, 机械钻速很低; 旋转钻进时扭矩很大, 易造成钻柱损坏, 并且还存在着较严重的套管磨损问题。如何有效地减小摩阻、增大给钻头施加的钻压, 以提高机械钻速及水平井眼延伸长度对于油气开发具有重要意义。

采用不同频率和振幅的振动来减小摩擦力的方

**收稿日期:** 2015-01-21; **改回日期:** 2015-04-28。

**作者简介:** 张会增(1985—), 男, 河南濮阳人, 2009年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 获学士学位, 在读博士研究生, 主要从事井下系统、信息与控制工程、井下工具研发等方面的研究。

**联系方式:** 18954253797, zhanghuizeng2005@126.com。

**基金项目:** “十二五”国家科技重大专项“西部山前复杂地层安全快速钻井技术”(编号: 2011ZX05021-001)、国家高技术研究发展计划(863计划)“海上大位移井钻完井关键技术开发与集成”(编号: 2012AA091501)资助。

法已经在很多领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>,从20世纪80年代开始,振动技术被引入到钻井领域以减小钻井过程中钻柱与井壁间的摩擦<sup>[3]</sup>。目前,国内外研究主要集中在利用轴向振动或冲击减小钻柱摩擦阻方面,并已研制出相应的振动类减阻工具<sup>[4-15]</sup>,而对于横向振动对钻柱摩擦阻的影响研究很少。为此,笔者设计了旋转激振力作用下平面摩擦副摩擦力测试试验装置,研究了激振力幅值和频率对钢-石板平面摩擦副摩擦系数的影响规律,以期为横向振动类减阻工具的研制及振动参数的选择提供依据。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验装置

在进行室内模拟试验时,将钻柱与井眼接触简化为平面接触,设计的模拟试验装置如图1所示,它由牵引装置、摩擦力测量及数据采集装置、振动摩擦副组成。

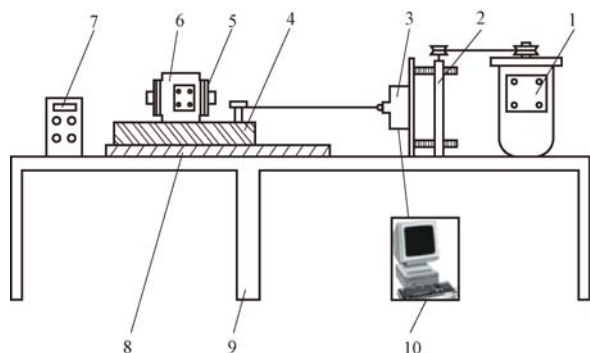


图1 试验装置基本结构

Fig.1 Schematic diagram of experiment unit

1. 电动机;2. 螺纹丝杠装置;3. 拉(压)力传感器;4. 上振动平面;
5. 激振器偏心块;6. 单轴惯性式激振器;7. 变频器;
8. 下振动平面;9. 振动台;10. 数据采集系统

牵引装置包括电动机及螺纹丝杠装置,电动机带动螺纹丝杠装置拉动上振动平面在下振动平面上做匀速直线运动。

摩擦力测量及数据采集装置使用应变式拉(压)力传感器测量拉力(即试验中的摩擦力),使用连接有数据采集板卡的计算机对试验数据进行采集与处理。

振动摩擦副是该试验装置的关键部分,主要包括上、下振动平面,一个单轴惯性式激振器和一个调频器。上振动平面材料为Q235A钢,下振动平面材料为花岗岩,下振动平面固定在振动台上,上振动平面在牵引装置带动下在下振动平面上匀速滑动,上、

下振动平面构成一对平面接触摩擦副。单轴惯性式激振器固定于上振动平面上,由一个电动机及安装在电动机轴两端的偏心块组成,电动机带动偏心块旋转产生的离心力即为试验中的旋转激励载荷。

### 1.2 测量原理

试验过程中,设定激振力的幅值及频率后,牵引装置带动上振动平面和激振器在下振动平面上进行匀速滑动,通过测量摩擦力的变化来研究旋转激励载荷对平面摩擦副摩擦力的影响。

激振力的计算公式为:

$$F = mr\omega^2 \cos(\theta/2) \quad (1)$$

式中:  $F$  为激振力, N;  $m$  为偏心块质量, kg;  $\omega$  为旋转角速度, rad/s;  $\theta$  为偏心块之间的角度, ( $^\circ$ )。

激振力是绕电动机轴旋转的,其幅值可以通过改变偏心块质量和角度进行调节(见图2),偏心块角度为  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  和  $120^\circ$  时,对应的激振力分别为  $F$ ,  $0.866F$ ,  $0.707F$  和  $0.500F$ 。激振频率可以通过与单轴惯性式激振器连接的调频器进行调节,调频器可在频率  $0 \sim 50$  Hz 范围内无级调节,对应的激振力幅值调节范围为  $0 \sim 1\,994$  N。

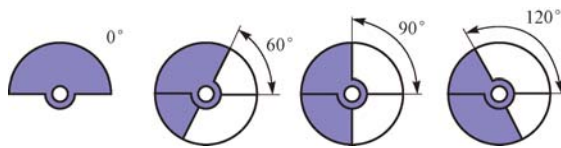


图2 可调偏心块旋转角度示意

Fig.2 Schematic diagram of rotating angle of adjustable eccentric block

### 1.3 试验方法

- 1) 测量激振力为0时的摩擦力。
- 2) 保持激振力幅值不变,改变激振频率,研究激振频率对摩擦力的影响。
- 3) 保持激振频率不变,改变激振力幅值,研究激振力幅值对摩擦力的影响。

在试验中,要调节电动机的转速,使两振动平面间的相对速度较小,从而由平面摩擦引起的振动较为微弱,同时摩擦生热较少,两平面间的温度变化很小,因此,可以忽略由摩擦引起的振动以及摩擦副表面温度变化对试验结果的影响。

### 1.4 稳定性测试

在正式试验前,对试验装置进行稳定性测试,在激振频率为10 Hz时,分别测量激振力为5.7,

11.4 和 17.1 N 时的摩擦力, 每组数据测量 3 次, 结果如图 3 所示, 3 组数据最大偏差分别为 1.8%, 3.2% 及 3.0%, 因此可以认为该试验装置的性能是稳定的。

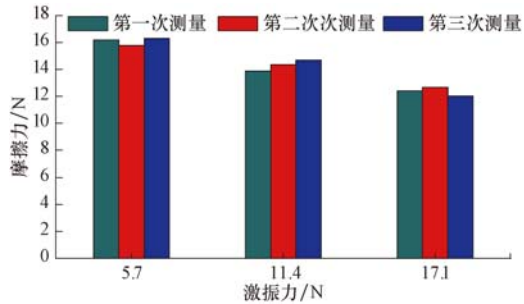


图 3 试验装置稳定性测试

Fig. 3 Stability testing of experiment unit

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验结果

试验中, 参振重量为上振动平面与激振器重量之和(约 114 N), 上振动平面与下振动平面间的接触面积为 387 cm<sup>2</sup>, 两振动平面间的相对滑动速度为 0.16 cm/s。

图 4 为钢-石板平面摩擦副摩擦系数与激振力幅值的关系曲线。由图 4 可以看出, 随着激振力的增大, 摩擦系数逐渐减小, 且摩擦系数与激振力近似呈线性负相关。在激振频率为 5, 10 和 20 Hz 条件下, 相对于未施加激振力时的摩擦系数(0.259), 当激振力增至 34.2 N 时, 钢-石板平面摩擦副的摩擦系数分别减小 21.6%, 29.0% 和 34.4%。

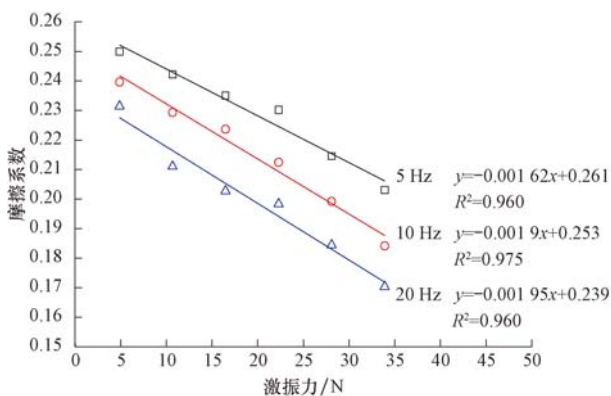


图 4 钢-石板平面摩擦副摩擦系数随激振力的变化曲线

Fig. 4 Change of the friction coefficient of plane friction pairs with the exciting force for steel-rock plate

图 5 为钢-石板平面摩擦副摩擦系数与激振频率的关系曲线。由图 5 可以看出, 随着激振频率的

增大, 摩擦系数逐渐减小, 激振频率小于 15 Hz 时, 摩擦系数减小较快, 当激振频率超过 15 Hz 后, 摩擦系数减小速率变慢, 且摩擦系数与激振频率近似呈对数负相关。在激振力为 11.4, 22.8 和 34.2 N 条件下, 相对于未施加激振力时的摩擦系数(0.259), 当激振频率增至 30 Hz 时, 钢-石板平面摩擦副的摩擦系数分别减小 22.8%, 27.4% 和 39.0%。

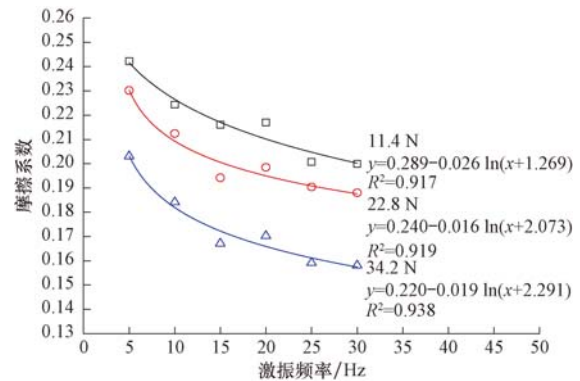


图 5 钢-石板平面摩擦副摩擦系数随激振频率的变化曲线

Fig. 5 Change of friction coefficient of plane friction pair-swth the exciting frequency for steel-rock plate

### 2.2 试验结果分析

精细的试验研究表明: 干摩擦运动并非连续平稳的滑动, 而是粘着与滑动交替发生的过程<sup>[13]</sup>。图 6 为滑块在粗糙表面上滑动时的受力简化示意图, 则摩擦力  $F_f$  的计算公式为:

$$F_f = \mu T = \mu[G - F \sin(2\pi ft)] \quad (2)$$

式中:  $F_f$  为摩擦力, N;  $\mu$  为摩擦系数;  $G$ , 为滑块的重力, N;  $F$  为激振力, N;  $f$  为激振力频率, Hz;  $t$  为时间, s。

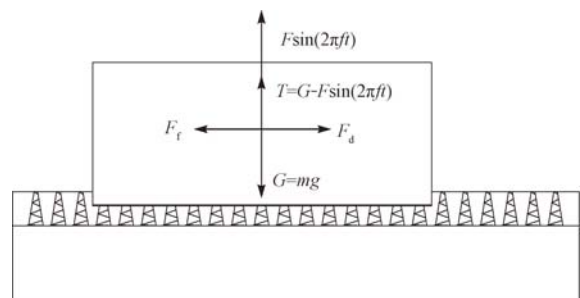


图 6 滑块简化受力模型

Fig. 6 Simplified model of external force on slider

一个振动周期内滑块的粘着-滑动过程如图 7 所示。在 OA 段, 拉力小于摩擦力, 滑块处于静止状态; 在 AB 段, 激振力使滑块作用于下平面的正压力减小, 摩擦力小于拉力, 滑块由静止开始加速滑动,

在 B 点,摩擦力等于拉力,滑块速度达到最大值;在 BC 段,摩擦力大于拉力,滑块速度不断减小,在 C 点滑块速度变为零;在 CD 段,摩擦力大于拉力,滑块处于静止状态;当到达 D 点时,下一个振动周期开始,滑块又开始运动,在每个振动周期内粘着-滑动交替进行。当激振力增大时,更小的拉力即可以使滑块滑动,即减小了摩擦力,宏观上表现为摩擦系数减小;当激振频率增大时,粘着-滑动的周期变短,单位时间内滑动的时间变长而粘着的时间缩短,平均摩擦力减小,当激振频率增大到一定数值时,粘着与滑动的界限越来越模糊,平均摩擦力变化越来越小,宏观上表现为摩擦系数减小的速率变慢。

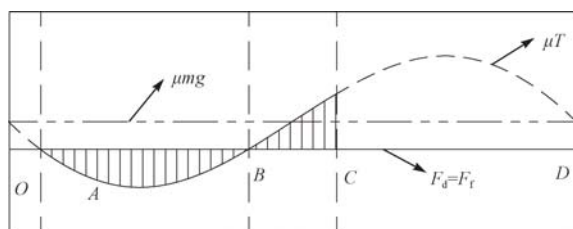


图 7 粘着-滑动分析

Fig. 7 Adhesion-sliding analysis

另一方面,激振力的方向是旋转的,激振力的水平分量亦有利于滑块粘着-滑动的发生。

### 3 结 论

1) 为了研究横向振动对摩阻的影响规律,设计了平面摩擦副在旋转激振力作用下摩擦力测试装置,通过试验分析了激振力的幅值和频率对钢-石板平面摩擦副摩擦系数的影响规律,结果表明,横向振动可以减小钢-石板平面摩擦副的摩擦系数。

2) 在相同激振频率下,钢-石板平面摩擦副的摩擦系数与激振力呈线性负相关;在相同激振力下,钢-石板平面摩擦副的摩擦系数与激振频率呈对数负相关。

3) 在进行横向振动类钻柱减阻工具设计时,为取得良好的减阻效果,在钻柱能承受的激振力范围内应优先选择较大的激振力,激振频率建议不小于 15 Hz。

### 参 考 文 献

#### References

[1] 闻邦椿,李以农,张义民,等. 振动利用工程[M]. 北京:科学出版社,2005:3-12.  
Wen Bangchun, Li Yinong, Zhang Yimin, et al. Vibration utilization engineering[M]. Beijing: Science Press, 2005: 3-12.

[2] 瓦伦丁 L 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及应用[M]. 李强, 雒建斌, 译. 北京: 清华大学出版社, 2011: 220-221.  
Valnin L Popov. Contact mechanics and friction physical principles and applications[M]. Translator: Li Qiang, Luo Jianbin. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 220-221.

[3] Dellinger T B, Roper W F. Reduction of the frictional coefficient in a borehole by the use of vibration: US, 4384625[P]. 1983-05-24.

[4] Newman K R, Burnett T G, Pursell J C, et al. Modeling the affect of a downhole vibrator[R]. SPE 121752, 2009.

[5] 王鹏, 倪红坚, 王瑞和, 等. 调制式振动对大斜度井减摩阻影响规律[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(4): 93-97.  
Wang Peng, Ni Hongjian, Wang Ruihe, et al. Influence laws of modulated vibration on friction reduction in inclined-wells[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 38(4): 93-97.

[6] 王谊, 施连海. 水力脉动冲击钻井工具初步研究实验[J]. 石油钻探技术, 2006, 4(2): 51-52.  
Wang Yi, Shi Lianhai. Study of a hydraulic-pulse-percussion drilling tool and its trial[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(2): 51-52.

[7] McCarthy J P, Stanes B, Rebellon J E, et al. A step change in drilling efficiency: quantifying the effects of adding an axial oscillation tool within challenging wellbore environments[R]. SPE 119958, 2009.

[8] 管志川, 刘永旺, 魏文忠, 等. 井下钻柱减振增压装置工作原理及提速效果分析[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(2): 8-13.  
Guan Zhichuan, Liu Yongwang, Wei Wenzhong, et al. Down-hole drill string absorption & hydraulic supercharging device' working principle and analysis of speed-increasing effect[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(2): 8-13.

[9] Zheng Shunfeng, Jeffres B, Thomer H V, et al. Method and apparatus to vibrate a downhole component: US, 6907927[P]. 2005-06-21.

[10] Walter B. Acoustic flow pulsing and method for drilling string: US, 7059426[P]. 2006-06-13.

[11] Eddison A M, Haredie R. Downhole flow pulsing apparatus: US, 6279670[P]. 2001-08-28.

[12] 李玮, 闫铁, 张志超, 等. 高频振动钻具冲击下岩石响应机理及破岩试验分析[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(6): 25-28.  
Li Wei, Yan Tie, Zhang Zhichao, et al. Rock response mechanism and rock breaking test analysis for impact of high frequency vibration drilling tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 25-28.

[13] 易灿, 李根生, 范红康. 井下振动减摩器的设计及试验研究[J]. 石油矿场机械, 2003, 32(6): 42-44.  
Yi Can, Li Gensheng, Fan Hongkang. The design and experimentation of vibrational friction-reducing generator for down hole drilling[J]. Oil Field Equipment, 2003, 32(6): 42-44.

[14] 陈朝伟, 周英操, 申瑞臣, 等. 连续管钻井减摩技术综述[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 29-31.  
Chen Chaowei, Zhou Yingcao, Shen Ruichen, et al. Overview of drag reducing technologies in coiled tubing drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 29-31.

[15] 倪红坚, 王瑞和, 王鹏. 一种激发钻柱振动的钻井工具: 中国, 2012102560282[P]. 2014-11-05.  
Ni Hongjian, Wang Ruihe, Wang Peng. Drilling tool for stimulating vibration of drill column: CN, 201210256028 [P]. 2014-11-05.

[编辑 陈会年]