

轴向振动对近水平孔管柱减摩及屈曲的影响*

徐保龙, 刘送永, 李洪盛

(中国矿业大学机电工程学院 徐州, 221116)

摘要 为了解决近水平长钻孔孔内管柱受压后摩阻增大甚至管柱屈曲变形的问题,提出了轴向振动减摩和防屈曲方法。首先,建立了轴向振动减摩的力学分析模型,分析了振动减摩的内在力学机制;其次,建立了振动减摩的有限元模型,研究了激振力、激振频率对于减摩效果的影响关系,并通过现场试验进行了验证。研究表明:单个振动周期内管柱与孔壁摩阻存在方向变换现象,降低了单个振动周期内的平均摩阻;激振力越大,减摩效果越好;轴向振动的幅值和频率达到一定门限值后能够有效防止管柱屈曲变形,降低管柱摆动;对于长为 200 m、直径为 89 mm 的通缆钻杆管柱,当激振力大于等于 5 kN 时,能够大幅度减小管柱与孔壁摩阻,防止管柱屈曲;平均摩阻与振动频率呈倒对数关系,随着激振频率的增大,平均摩阻先减小而后趋于稳定,当激振频率大于等于 6 Hz 后减摩效果趋于稳定。该研究结果对于减摩防屈曲钻具的研制以及钻孔工程施工具有指导意义。

关键词 轴向振动;管柱;摩阻;屈曲特性;影响因素

中图分类号 TH113.1;TD421.3

引言

近水平钻孔是煤矿巷道或工程隧道掘进前探测与治理瓦斯、水害等灾害的必要通道。近年来,近水平定向钻进技术在巷道(隧道)超前探中应用日益广泛,钻孔深度也越来越深^[1]。钻压通过采用孔口动力头向孔内压缩钻杆的方式来施加,受压管柱在孔内存在压缩变形,在重力以及定向孔弯曲等扰动下会发生屈曲变形,首先产生正弦屈曲,随着压缩程度的增加继而产生螺旋屈曲。屈曲行为会引起钻柱与孔壁摩阻的急剧增加,造成钻头钻压严重不够,产生“托压效应”^[2],钻进效率快速下降,限制了钻孔极限深度。另外,屈曲行为会引起套管下入困难,导致套管下不到位,严重时造成套管的损坏,为后期作业带来极大的困难。因此,降低管柱与孔壁的摩阻、防止屈曲行为的发生对于巷道(隧道)超前探钻孔的安全施工意义重大。

在孔内管柱力学研究方面:李浩等^[3]建立了软杆模型,对正常工况下的钻柱摩阻进行了分析与计算,但没有考虑钻柱受压变形与孔壁产生的摩阻;Xu 等^[4]通过现场试验和数值模拟,研究了煤矿井下近水平长钻孔管柱受压后轴向力的传递规律,提出了通过控制钻孔曲率半径来降低摩阻的方法。在钻

柱摩阻理论计算研究方面:Johancsik 等^[5]采用柔索模型研究了全井钻柱受力,但忽略了钻柱刚度和井眼弯曲;Sheppard 等^[6]提出采用悬链线法降低钻柱摩阻的方法,但没有考虑钻柱屈曲及受压变形与井壁产生的摩阻;Rocheleau 等^[7]用传递矩阵法进行二维井眼内大变形问题的微分方程求解;赵洪激^[8]在研究刚性杆模型时考虑了钻井液黏滞力和钻柱运动状态;帅建等^[9]在研究钻柱变形时将 2 个平面内钻柱与井壁的接触进行了耦合分析与计算;祖峰^[10]以弯曲圆管的钻柱摩阻力学模型为基础,对定向井的摩擦阻力进行了分析研究;Gong 等^[11]建立了一种预测连续油管屈曲变形的理论模型,应用虚功原理和最小势能方法得出了屈曲方程,分析了摩擦因数、井眼倾角对管柱屈曲特性的影响。由于井下工况的复杂性,理论计算难以获得符合工程实践的结果,井内钻柱摩阻研究方法逐渐向统计和有限元法发展^[12-13],如:董建华^[14]利用已有钻井数据和信息,应用统计学理论进行了摩阻的计算与预测;刘建勋^[15]根据实钻井眼轨迹和钻具组合,建立了全井钻柱的有限元模型,对多组大斜度井进行了动力学分析;邢翠翠^[16]运用非线性统计方法分析了钻柱模型,提出以多元非线性统计分析为基础预测丛式水平井摩阻方法的研究思路,确定了分段统计分析原则。在振动减摩研

* 江苏省杰出青年基金资助项目(BK20211531);江苏省青年基金资助项目(BK20210516)

收稿日期:2022-10-22;修回日期:2023-02-08

究方面:Sola等^[17]提出了具备轴向往复振动功能的用于连续管钻进的减摩器,经过测试其具有减摩效果;Walter^[18]提出了水力振荡器的概念,经过现场应用取得了一定的效果;王力等^[19]开发了煤矿井下近水平钻轴向往复振动式水力振荡器,试验证明其在近水平长钻孔钻进中具有减摩效果;Newman等^[20]通过研究得出,轴向和周向的双向振动都能有效减少钻柱摩阻;Gee等^[21]通过有限元分析对振动减小摩阻进行了验证;Wang等^[22]提出了一种在平面振动下预测钻柱与井壁摩擦力的改进模型,结果表明,在底面施加面内振动后,滑动方向的摩擦因数显著降低。

为了给近水平钻柱减摩、开发防屈曲钻进工具以及为工程施工提供理论借鉴,笔者针对近水平超前钻探工况建立了振动减摩理论模型,分析了轴向振动减小孔内管柱摩阻的力学机理,通过有限元动力学模型验证了理论分析的正确性,研究了振动幅值、振动频率对管柱摩阻、屈曲特性、质点振动及管柱截面相轨迹的影响规律,并通过现场试验进行了相关验证。

1 轴向振动减摩理论

振动减摩机理分析示意图如图 1 所示,其中:P 为孔内管柱;H 为钻孔。为了便于分析,假设 H 以位移函数 $S_H(t)$ 往复振动,管柱 P 向孔内以定速度 V_{SH} 运动,管柱收到的摩擦力为 $F_p(t)$ 。

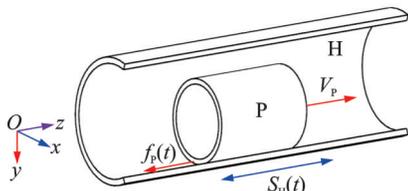


图 1 振动减摩机理分析示意图
Fig.1 Schematic diagram of vibration antifriction mechanism analysis

位移 $S_H(t)$ 可表示为

$$S_H(t) = a \cos(\omega t) \quad (1)$$

其中: a 为位移幅值; ω 为角速度。

对式(1)求导,可得振动速度的表达式为

$$V_H(t) = -a \sin(\omega t) \quad (2)$$

在 t_0 时刻,钻孔 H 的振动速度与管柱 P 的移动速度相当,此时二者之间摩擦力方向开始发生改变,振动减摩力学特性分析如图 2 所示,当时间 t 到达 B 点对应时刻后,钻孔 H 的振动速度低于管柱 P 的移

动速度,摩擦力方向再次发生变向。

联合式(1)和式(2), t_0 可以表示为

$$t_0 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{V_P}{a\omega}\right) \quad (3)$$

在一个振动周期内,管柱 P 受到的平均摩擦力为

$$F_a = F_{O_1A} + F_{BC} + F_{DE} \quad (4)$$

$$F_a = \frac{f_p}{T} (4t_0) = f_p \left(\frac{2}{\pi} \arcsin\frac{V_P}{a\omega}\right) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,一个周期内管柱所受摩擦力随着振动幅值及振动角速度的增大而减小。由于振动引起了摩擦力在一个振动周期内的部分时间区间摩擦力方向改变,从而降低了一个周期内的平均摩擦力。

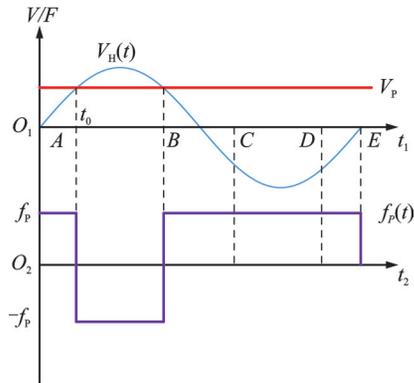


图 2 振动减摩力学特性分析图
Fig.2 Schematic diagram of propagation of elastic compression wave

2 动力学有限元模型

为了进一步分析振动对于管柱减摩以及屈曲特征的影响规律,建立 200 m 管柱和孔壁的振动减摩防屈曲动力学有限元模型,如图 3 所示。管柱组合模型分为前部管柱、振荡器及后部钻柱。前、后管柱采用弹性体,振动短节、孔壁、孔底、推块及扶正器采用刚性材料,材料属性如表 1 所示。

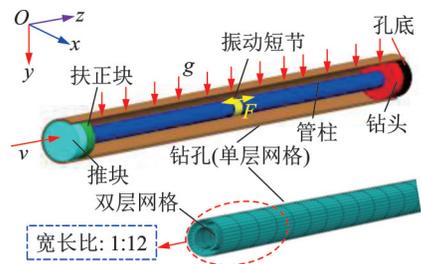


图 3 振动减摩防屈曲动力学有限元模型
Fig.3 Dynamic simulation model of vibration anti-friction and anti-buckling

表1 材料属性

Tab.1 Material properties

类型	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	摩擦因数	
				静	动
弹性体	0.28	7 850	213	0.3	0.25
刚性体	0.28	7 850	213	0.3	0.25

振动短节处于整体管柱中间位置,通过端部扩大头的销轴连接前、后部管柱,钻柱尺寸采用煤矿井下所用 $\phi 89$ mm 通缆钻杆尺寸,钻孔直径为122 mm,振动短节组成如图4所示。钻孔孔壁为刚体模型、固定约束,外力作用下不变形。管柱初始位置与钻孔同轴,施加重力约束,与扶正器和钻头粘结,三者受力后不分离,管柱与孔壁为自动接触约束。钻头与孔底也为自动接触约束,孔壁为固定端约束。振动短节由连接器与振动环构成,连接器通过ANSYS软件中的“Glue”功能与前部管柱和后部管柱粘结,在受到外部载荷后三者不分离。振动环嵌套在连接器的外圆上,能够来回滑动。钻柱采用双层网格扫略划分,钻孔采用单层网格扫略划分,网格宽长比为1:12,其他采用四面体网格。

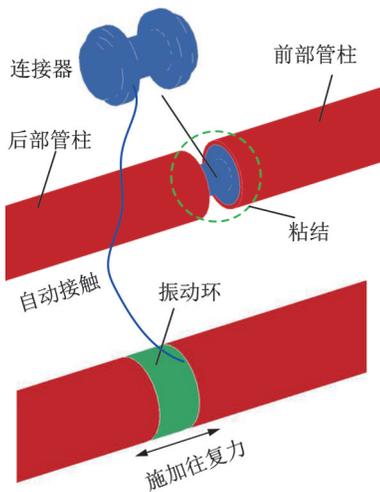


图4 振动短节组成示意图

Fig.4 Schematic diagram of vibration sub

推块开始时与扶正器有一定的间隙,给推块施加0.075 m/s的速度,该速度值参考了目前煤矿井下钻机的平均给进速度。给振动短节的振动环施加一定频率的激振力,保持频率不变,改变激振力分别为0,2 500,5 000和7 500 N。频率在0~1 s内为0,从1 s开始由2 Hz分3级增至8 Hz,激振频率加载曲线如图5所示。

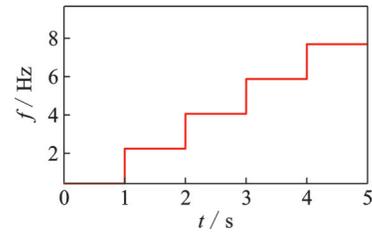


图5 激振频率加载曲线

Fig.5 Excitation frequency loading curve

3 模拟结果及分析

3.1 振动参数对管柱摩阻的影响

摩阻随时间变化如图6所示。由图6(a)可见,在压缩管柱的前2 s内,由于管柱在钻孔内弯曲程度不高,没有明显的托压发生和管柱的屈曲变形行为,管柱与孔壁之间的接触力较小,摩阻变化不大;从第2 s开始,由于管柱压缩到一定程度后开始与孔壁产生点接触,随着孔口给进力的持续增加,振荡器逐渐恢复到相对稳定接触状态;随着推块不断向孔内压缩管柱,加之钻压不能有效传递的影响,管柱屈曲程度越来越剧烈,孔内管柱与钻孔孔壁的接触力越来越大,平均摩阻由2 kN逐步升高至20 kN。

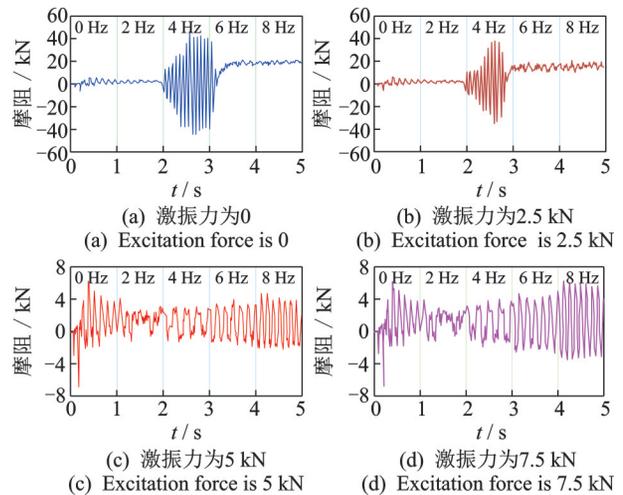


图6 摩阻随时间变化图

Fig.6 The relationship between friction and time

由图6(b)可见,施加大小为2.5 kN的激振力在托压发生后能够减少约5 kN的摩阻,但是减摩效果不明显,未能有效解决托压问题。由图6(c, d)可见,在仿真的第2~3 s时间内未出现振荡器的跳动,第3 s后未发生托压现象,最后摩阻降低至1 kN;当激振力达到5 kN时,弹性波能够完全从激振位置传递至孔底,整个管柱摩阻大幅度降低。由图6可以

看出,在一个振动周期内存在摩擦力变方向现象,因此降低了一个周期内的平均摩擦力。

对激振力幅值为 5 kN 和 7 kN 在不同频率下的平均摩阻进行统计,平均摩阻与激振频率的关系如图 7 所示。由图可见:平均摩阻随频率的增大而减小,对 $\phi 89$ mm 通缆钻杆,当频率大于 6 Hz 时摩阻趋于稳定;激振力越大减摩效率越好,减摩效率趋于平衡的频率越小;激振力越大,质点产生的振幅越大,则振动效果越好,减摩效果越明显。这与理论分析完全符合。

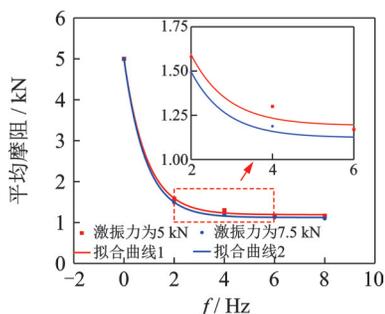


图 7 平均摩阻与激振频率的关系

Fig.7 The relationship between average friction and excitation frequency

3.2 振动参数对于管柱屈曲特性的影响

孔内管柱压缩特性如图 8 所示。由图可见,由于振荡使得钻压能够有效地传递,管柱与孔壁之间的接触力和摩阻都较低,管柱在相同压缩距离下未发生屈曲变形,所以管柱的轴向振荡可以有效解决管柱屈曲问题。但是对于激振力幅值为 0 和 2.5 kN 的工况,压缩相同的轴向位移所需要的孔口压缩力成数量级增加。激振力为 0 时,管柱在第 2 s 发生屈曲变形,最大压缩力接近 2 200 kN,然后压缩力随屈曲状态的演化而波动,第 3 s 后开始进入后屈

曲状态,孔口压缩力逐步趋于平稳上升趋势。同样的规律亦适用于激振力幅值为 2.5 kN 的工况,但有以下区别:①发生屈曲时最大孔口压缩力降低至 1 400 kN,下降幅度为 36.4%;②到达后屈曲状态的时间提前至 2.8 s 左右,这说明相对于激振力为 0 的工况,到达屈曲后行为状态时的管柱整体压缩程度减弱。

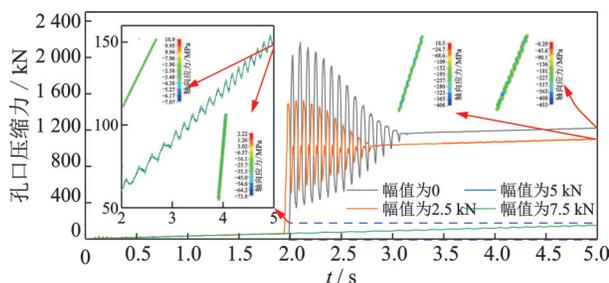


图 8 孔内管柱压缩特性

Fig.8 Compression characteristics of pipe string in hole

对于激振力幅值为 5 kN 和 7.5 kN 的工况,仿真时间范围内整体管柱未发生屈曲变形行为,其动力学演变为轴向逐步压缩,平均孔口压缩力随轴向压缩位移的增大呈直线型增长,最大不超过 200 kN。

3.3 振动参数对质点位移的影响

4 种仿真工况下,在管柱中间任取一相同位置、相同编号的节点,对其各个方向的位移进行统计,各方向位移与时间的关系如图 9 所示。在 x 方向上:对于激振力为 0 和 2.5 kN 工况,在 2 s 后开始出现位移,先增大然后趋于稳定,在稳定之前存在局部振荡现象;激振力为 0 时的工况位移比激振力为 2.5 kN 工况大,最大为 16.5 mm,已经达到了钻孔的孔壁;对于激振力为 5 kN 和 7.5 kN 工况,其 x 方向位移基本不随时间变化而变化,且 2 条曲线重合。

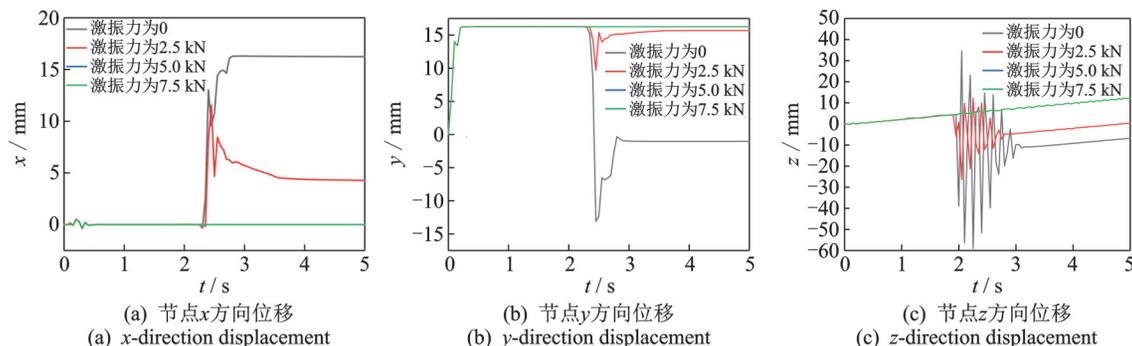


图 9 各方向位移与时间的关系

Fig.9 Relationship between displacement and time in each direction

在 y 方向上:所有工况下位移都是先增大至 16.5 mm,即达到下孔壁;对于激振力为 5 kN 和 7 kN 工况,位移增加至 16.5 mm 后不再变化,且 2 条曲线近似于重合;对于激振力为 0 和 2.5 kN 工况,在 2.3 s 后开始出现位移波动,具有沿着 y 方向的反方向振荡的趋势,激振力幅值为 0 时的工况位移最后稳定在 0 附近;对于激振力为 2.5 kN 的工况, y 向位移最后稳定在 15 mm 左右。

在 z 方向上:前 1.8 s 内对于所有工况位移都是先增大至 5 mm 左右,即纯轴向压缩状态;1.8 s 后,对于激振力 5 kN 和 7 kN 工况,位移增加至 33 mm 后不再变化,且 2 条曲线近似于重合;对于激振力为 0 和 2.5 kN 工况,在 1.8 s 后开始出现位移波动,具有沿着 z 方向的反方向振荡的趋势,在 3 s 后逐步趋于稳定上升趋势。

3 个方向的位移变化能够反映管柱的孔内状态,尤其是 x 和 y 方向位移振荡越大,说明孔内管柱越不稳定,越容易屈曲,增大激振力幅值能够大幅度减少管柱质点的位移振荡。

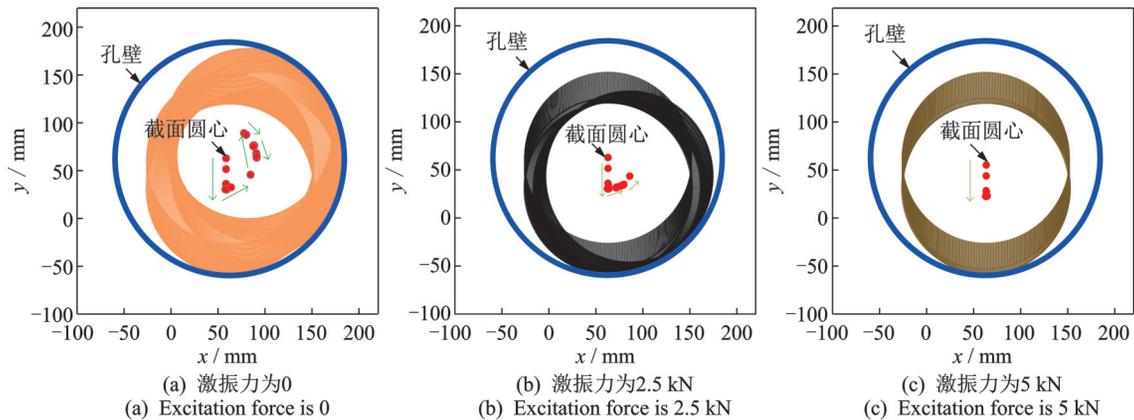


图 10 管柱截面运动轨迹

Fig.10 Trajectory of the pipe string section

3.4 振动参数对管柱截面轨迹的影响

由于激振力 5 kN 和 7 kN 的工况下质点的 x 和 y 向位移相同,因此对于 0, 2.5 和 5 kN 这 3 种工况,选取上述节点所在的管柱截面,得到管柱截面运动轨迹如图 10 所示。对于激振力为 0 的工况,管柱先在重力作用下下降,屈曲变形开始发生后,先往右上偏转再往右下偏转,整个仿真阶段内轨迹相几乎充满了右半圆;对于激振力为 2.5 kN 的工况,管柱先在重力作用下下降,屈曲变形开始发生后,先往右上偏转,整个仿真阶段内轨迹相几乎充满了右下半圆;对于激振力为 5 kN 的工况,管柱先在重力作用下下降,降至下孔壁后不再变化。

相轨迹图可以反映仿真时间内管柱在钻孔内径向运动的稳定性,正常情况时钻柱截面在重力作用下下沉至下孔壁后则紧贴下孔壁,如果发生屈曲变形时轨迹相会逐步占据孔内更大的空间,占据的空间越大说明管柱的变形越剧烈,由此产生的摩阻越大,管柱在孔内的摆动也越大。

4 试验验证

为了进一步验证理论分析与仿真规律的正确性,结合笔者研制的 $\phi 89$ mm 通缆水力振荡器室内测试和现场试验数据^[19]进行分析。室内测试系统如图 11 所示。水力振荡器通过手动夹持器固定在监测台上,水与水力振荡器之间的接头加工有螺纹孔,用以安装压力变送器。压力变送器能够将振荡器上端的水压变化转化成电阻变化,进而引起数据采集卡电流的振荡,电流的振荡通过示波器显示出来,观察示波器波形变化即可得出振荡器的振动频率。经过测试,泥浆泵排量在 150, 250, 300 和 350 L/min



图 11 室内测试系统

Fig.11 Trajectory of the pipe string section

时对应的频率分别为 3, 8, 11 和 15 Hz。

现场试验地点为淮河能源张集煤矿-600 疏水巷, 10#孔采用 ZDY12000LD 钻机、BLY460 泵车及 $\phi 89$ mm 通缆定向钻具等配套设备进行施工。

-600疏水巷10#孔钻孔轨迹如图12所示。浅孔段钻效为3~4 m/h,给进表压平缓上升。孔深为380 m、给进表压升至5 MPa时钻进效率下降至2 m/h;孔深为425 m、给进表压升至6~6.5 MPa时钻进效率下降至1.5 m/h。全部起钻后,在螺杆马达后面100 m处安装水力振荡器,重新下钻至孔底进行试验。试验总进为9 m,因遇掉块卡钻事故而终孔,终孔位置上下位移为20.7 m,左右位移为245 m。试验期间调整了不同的排量来获取不同的激振频率。

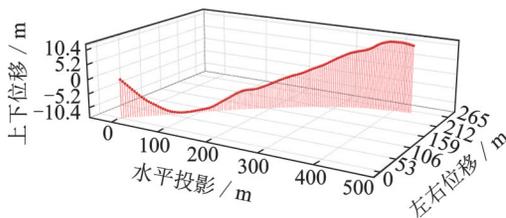


图12 -600疏水巷10#孔钻孔轨迹

Fig.12 10# Hole drilling trajectory in -600 drainage roadway

考虑作用力与反作用力的关系,根据振动影响孔底200 m左右管柱分析,将安装水力振荡器后的给进力与225 m时的给进力差值视为管柱前200 m的摩阻,摩阻与频率的关系如图13所示。由图可知,前200 m管柱与孔壁摩阻随激振频率的增加先减少,而后趋于稳定,曲线的整体趋势与仿真数据吻合,但是在数值上存在误差,实际值大于仿真分析值。其原因主要如下:

1) 摩擦因数的差异,实际钻进过程中摩擦因数跟破碎煤岩特性、冲洗液配比及岩粉水化等有很大关系;

2) 实际钻进过程中钻孔是弯曲的,增大了钻柱与孔壁的接触力,导致了摩阻的增大;

3) 实钻中钻孔弯曲段存在岩粉沉积现象,增大了摩阻阻力,但在仿真中未考虑此因素;

4) 试验采用的水力振荡器为节流活塞式结构,

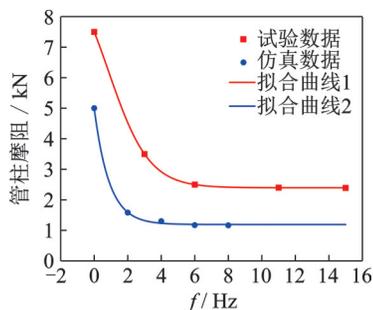


图13 摩阻与频率的关系

Fig.13 Relationship between friction and frequency

通过排量改变激振频率时,节流活塞的压降也随之改变,从而进一步改变了激振力大小,造成低频时试验值与仿真值的差值比高频时大;

5) 低频时激振力幅值减小,振动影响的管柱长度减小,增大了管柱与孔壁之间的摩阻。

5 结 论

1) 减摩效果与激振力幅值和激振频率有关。对于长为200 m、直径为89 mm的通缆钻杆管柱,激振力大于等于5 kN时,能够大幅度减少管柱与孔壁摩阻,平均摩阻随激振频率的增大先减小而后趋于稳定,激振频率大于6 Hz后减摩效果趋于稳定。仿真结果与试验结果吻合较好。

2) 轴向振动的幅值和频率达到一定门限值后,在降低管柱摩阻的同时能够有效防止管柱屈曲变形,降低管柱在孔内受限空间内的摆动。对于长为200 m、直径为89 mm的通缆钻杆管柱,激振力增加至5 kN后不再发生屈曲变形。

3) 揭示了轴向振动对于孔内管柱摩阻和屈曲行为的影响机制,量化了激振力幅值、激振频率与减摩效率和钻柱屈曲的影响关系,有利于减摩防屈曲钻具的研制及工程施工。

参 考 文 献

- [1] 石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 Years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 1-34. (in Chinese)
- [2] 徐保龙,姚宁平,王力,等.煤矿井下硬岩定向钻进孔底水力加压技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(2):31-35,43.
XU Baolong, YAO Ningping, WANG Li, et al. Hole-bottom hydraulic pressurization technology for directional drilling in hard rock in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 31-35, 43. (in Chinese)
- [3] 李浩,姚宁平,张杰,等.煤矿井下近水平定向钻具摩擦阻力分析[J].煤炭科学技术,2013,41(2):87-90.
LI Hao, YAO Ningping, ZHANG Jie, et al. Analysis on fractional resistance of horizontal directional drilling tools in underground mine[J]. Coal Science and Tech-

- nology, 2013, 41(2): 87-90.(in Chinese)
- [4] XU B L, LIU S Y, LI H S. Drill string's axial force transfer law in slide directional drilling in underground coal mine[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 130: 104701.
- [5] JOHANCSIK C A, FRIESEN D B, DAWSON R. Torque and drag in directional wells-prediction and measurement [J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36(6): 987-992.
- [6] SHEPPARD M C, WICK C, BURGESS T. Designing well paths to reduce drag and torque[J]. SPE Drilling Engineering, 1987, 2(4): 344-350.
- [7] ROCHELEAU D N, DAREING D W. Effect of drag forces on bit weight in high-curvature well bores [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1992, 114(3): 175-180.
- [8] 赵洪激. 水平井钻柱摩擦力的计算[J]. 石油钻采工艺, 1995, 17(3): 6-11.
ZHAO Hongji. Calculation of friction force of drilling strings in horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995, 17(3): 6-11.(in Chinese)
- [9] 帅健, 蔡强康, 吕英民. 大斜度井中钻柱的有限元分析[J]. 石油机械, 1995, 23(3): 30-35.
SHUAI Jian, CAI Qiangkang, LÜ Yingmin. Finite element analysis of drillstring in high deviating holes [J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(3): 30-35.(in Chinese)
- [10] 祖峰. 定向井钻柱摩擦阻预测与应用[J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(6): 9-11.
ZU Feng. Friction prediction of drilling stem in directional well and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23(6): 9-11.(in Chinese)
- [11] GONG Y C, AI Z J, SUN X, et al. The effects of boundary conditions and friction on the helical buckling of coiled tubing in an inclined wellbore[J]. PLoS One, 2016, 11(9): e0162741.
- [12] 李子丰. 油气井杆管柱力学研究进展与争论[J]. 石油学报, 2016, 37(4): 531-556.
LI Zifeng. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 531-556.(in Chinese)
- [13] 李子丰, 蒋恕, 阳鑫军. 油气井杆管柱力学研究现状和发展方向[J]. 石油机械, 2002, 30(12): 30-33.
LI Zifeng, JIANG Shu, YANG Xinjun. Current status and developing trend of mechanical study of rod and pipe strings in oil and gas wells [J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(12): 30-33.(in Chinese)
- [14] 董建华. 基于统计学习的非线性多向接触钻柱摩擦阻分析[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
- [15] 刘建勋. 大斜度井全井钻柱动力学数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [16] 邢翠翠. 浅层丛式水平井多元非线性统计分析钻柱摩擦阻预测方法[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [17] SOLA K I, LUND B. New downhole tool for coiled tubing extended reach[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable. Houston: SPE, 2000.
- [18] WALTER B. Acoustic flow pulsing apparatus and method for drill string: USA, 10/614258 [P]. 2003-07-08.
- [19] 王力, 徐保龙, 王毅, 等. 井下定向钻进用小直径通缆水力振荡器的研制[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 30-35, 41.
WANG Li, XU Baolong, WANG Yi, et al. Development of small diameter hydraulic agitator with cable for directional drilling in underground coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 30-35, 41.(in Chinese)
- [20] NEWMAN K, BURNETT T, PURSELL J, et al. Modeling the affect of a downhole vibrator[C]//SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition. The Woodlands: SPE, 2009: 1-10.
- [21] GEE R, HANLEY C, HUSSAIN R, et al. Axial oscillation tools vs. lateral vibration tools for friction reduction-what's the best way to shake the pipe?[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. London: SPE, 2015.
- [22] WANG P, NI H J, WANG R H, et al. Research on the mechanism of in-plane vibration on friction reduction [J]. Materials, 2017, 10(9): 1015.



第一作者简介:徐保龙,男,1988年2月生,博士生。主要研究方向为高效破岩机理、钻探机械动力学。曾发表《Drill string's axial force transfer law in slide directional drilling in underground coal mine》(《Tunnelling and Underground Space Technology》2022, Vol. 130)等论文。

E-mail: tb20050022b4@cumt.edu.cn