DOI: 10.3901/JME.2020.21.121

基于钻头-岩石碰撞的激振冲击系统的非线性动力学研究^{*}

廖茂林

(北京科技大学机械工程学院 北京 100083)

摘要: 为了提升旋转冲击钻井过程中轴向冲击的辅助破岩效果,设计了一套用于测试钻头与岩石之间激振碰撞的试验装置,通过对钻头的激振频率、激振振幅和施加的静态压力3项可控参数的调节,研究了该激振冲击系统的动力学行为演化规律,且试验测试结果与数值模拟结果具有很好的一致性。通过进一步的分岔分析和相平面分析发现,由于激振冲击系统具有典型的接触非线性结构,其动态响应也呈现出复杂的非线性特征,钻头在与岩石发生激振碰撞后,主要保持单周期的振动状态,但随着控制参数的变化,钻头与岩石之间在一个激励周期内的碰撞次数会不断改变;此外,钻头的振动状态还会经由倍周期分岔转变为双周期振动,但最终又会经由逆倍周期分岔或者折叠分岔重新回到单周期振动状态。由于钻头的振动状态直接决定了其轴向冲击力的大小,因而会影响其破岩效率;因此,为了获得破岩效率最高的一周期一次碰撞的钻头振动状态,应该采用较高的激振频率和振幅,但应该避免较高的静态压力,因为它将触发钻头的颤振,反而降低其破岩效率。

关键词: 动力学;非线性;振动冲击;分岔

中图分类号: TG156

Nonlinear Dynamics of a Vibro-impact System for Indenter-rock Interaction

LIAO Maolin

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: In order to promote the auxiliary effect of axial impact in rotary-percussive drilling, an experimental set-up for testing the indenter-rock interaction is developed, the nonlinear dynamics of this vibro-impact system is studied numerically and experimentally by varying three control parameters, including frequency and amplitude of excitation, and static force applied on the indenter, and the obtained experimental measurements and the numerical simulations show good agreements. Bifurcation analysis and phase-plane analysis indicate that the dynamic responses are mainly period-one motions with varied impact numbers, which can further develop into period-two motions via period-doubling bifurcations, but will go back to period-one motion via inverse period-doubling bifurcation or fold bifurcation. Since the vibration condition of the indenter determines the impact force, and thus the drilling efficiency, to obtain the most powerful percussion, the ideal vibration of the indenter is the period-one one-impact motion. Therefore, the high excitation frequency and amplitude are suggested, but the high static force should be avoided since it triggers harmful chattering for percussive drilling.

Key words: dynamics; nonlinear; vibro-impact; bifurcation

0 前言

随着对陆地深部地层的油气开发,钻头钻遇岩石的硬度也随之增加,造成了常规旋转钻井破岩效率的大幅降低。为此考虑将旋转钻井与冲击钻井相结合,形成旋转冲击钻井技术(简称旋冲钻)。这项

技术旨在利用冲击钻井的大冲击力来击碎坚硬岩石,以帮助旋转钻井对岩石的切削。相对于随意地叠加简单的轴向冲击,进一步考虑通过安装于钻头上部的轴向激振器来提供高频低幅大冲击力的轴向冲击,并通过对钻头轴向振动的振型控制,进一步激发旋冲钻的潜能,提升其对深部地层坚硬岩石的破碎能力。

在已有的相关研究中,国内外的学者们尝试了多种激振能量提供方法和激振控制方式来对旋冲钻进行设计。KOVALYSHEN^[1]设计了一种自激轴向

^{*} 国家自然科学基金(51904018)和中央高校基本科研业务费(FRF-TP-18-054A1)资助项目。20191225收到初稿,20200403收到修改稿

振动钻具, FRANCA^[2]提出了旋冲钻作用下钻头与岩石的碰撞模型, SAZIDY 等^[3]采用了带阻尼的粘弹性岩石模型来模拟钻头激振冲击对岩石的影响, 而 WIERCIGROCH 等在旋冲钻的基础上, 进一步开展了共振增强钻井技术的研究, 即通过调节钻头的轴向激振参数来激发井下钻具组合的共振以最大限度地提高钻头的轴向冲击力^[4-12]。2015年, 美国国民油井华高公司采用旋冲钻系统在西非进行了现场试验, 与常规旋转钻井系统相比, 旋冲钻在坚硬地层的破岩效率平均提升超过1倍^[13]。在国内, 雷鹏等^[14]提出了自激振荡式的旋冲钻方法, 并通过大涡模拟分析了该旋冲钻工具的工作机制。管志川等^[15]基于有效利用直井底部的钻柱纵向振动能量实现钻井液增压的思路, 设计出了吸振式井下液压脉冲钻井装置。总体而言, 近年来旋冲钻技术发展迅速, 并逐渐被接受及应用。然而, 旋冲钻的理论体系还没有完全形成, 所研发的激振工具也存在各自的局限性, 有待进一步完善。因此, 本文旨在从非线性动力学的基础理论出发, 对钻头与岩石之间由于碰撞而引入的接触非线性问题开展深入研究, 以掌握其非线性动力学行为演化规律, 从而为旋冲钻工具的进一步研发提供理论指导。

1 钻头-岩石激振碰撞试验装置

钻头-岩石激振碰撞试验装置如图1所示, 其中图1a和图1b分别展示的是试验中使用的数据采集与控制系统和试验装置的照片, 图1c是基于以上这两部分整合而成的完整的试验系统结构图。图中的设备分别为: 1、用于提供静态压力的气缸, 它外接一套空气压缩机, 其气压的大小由

图中标号12的气压阀控制; 2和3分别为激振器的外部框架和激振器的激振体, 用于提供钻头轴向冲击的外部激励; 4、平行导轨, 用于无摩擦地移动激振器, 实现钻头与岩石的对接; 5、用于激振碰撞的岩石样本, 采用了强力胶水将其粘合在一块金属板上, 然后通过螺栓固定于支撑结构上; 6和7分别为减速滑轮组和直流电动机, 它们共同配合来旋转岩石, 以此来代替旋冲钻中的钻头旋转, 达到简化试验装置的目的, 这一设计是为后续耦合旋转与冲击两种不同破岩方式的试验研究做准备的, 但在本文的试验测试中, 将只聚焦于钻头对岩石的轴向冲击, 而暂时不考虑旋转的影响, 因此这两个部件在本文的试验中不会启动; 8和9分为加速度传感器和压力传感器, 用于测量钻头与岩石激振碰撞时, 钻头的加速度和激振力; 10和11分别为8和9两个传感器的电荷放大器; 它们通过图中标号13的I/O连接器连接到安装于计算机主机中的LabVIEW卡, 如图中标号14所示; 最终, 采集到的数据被展示在显示器的自编LabVIEW程序界面上, 如图中标号15所示。具体采集到的信号类型如图2所示, 其中图2a是输入的激振信号, 图2b是由压力传感器采集到的钻头与岩石碰撞时的接触力, 而图2c是由加速度传感器采集到的钻头加速度。结合图2b和2c可以看到接触力和加速度信号都会在每个激振周期内出现一次明显的双头尖峰, 而这也正是钻头与岩石发生碰撞的标志。

2 钻头-岩石的接触刚度测试

在开始进行激振碰撞试验之前, 还需要对岩石在钻头压入过程中受到的压力与压痕深度的关系进

图1 钻头-岩石激振碰撞试验装置^[16]

图 2 试验中采集的信号

行测试, 以此来得到钻头-岩石的接触模型, 并最终接触刚度的形式引入到数学模型之中, 以完成试验装置所对应的数学模型的建立。接触刚度测试采用 Instron 材料试验机来进行, 如图 3a~3c 所示, 将岩石样本放置于测试平台上, 将钻头固定于试验机的顶端, 并让其以恒定的速度 (0.1 mm/min) 向下移动而钻入岩石, 这一加载过程一直持续到所施加的载荷达到 3.0 kN 为止, 这是因为后续在开展激振冲击试验时, 最大的冲击载荷也将被控制在 3.0 kN 左右, 如图 2b 所示。在加载完成之后, 再使钻头以恒定的速度 (0.1 mm/min) 向上返回, 以此将所施加的载荷逐步

卸除, 当压力载荷重新回到 0 时, 钻头与岩石实现了分离, 这样就完成了一次钻头与岩石之间完整的接触过程, 即一个加载-卸载的循环。在测试过程中, 压力信号直接由 Instron 材料试验机内置的压力传感器测量得到, 而钻头压入岩石的深度由 LVDT 位移传感器测量得到。最终, 所得到的压痕深度-压力的关系曲线如图 3d 和 3e 所示, 它们分别展示的是细砂岩和石英砂岩的测试结果。其中, 对每种岩石重复进行了 10 次加载-卸载的循环, 而通过分析发现, 这 10 次测试可以分为 3 个阶段: 开压阶段(第 1 次测试)、压实阶段(第 2~5 次测试)和稳定阶段(第 6~10 次测试)。

图 3 钻头-岩石接触刚度测试

为了具体讨论这 3 个不同阶段的接触特征, 分别选取第 1、3、10 次测试的数据进行分析, 如图 4 所示。总体而言, 压痕深度-压力的关系曲线都为加载和卸载两段, 因而可以分别对它们进行拟合以得到加

载和卸载情况下的钻头-岩石的不同接触刚度, 分别记为 k_l 和 k_u 。在开压阶段, 如图 4a 所示, 加载段与卸载段的数据之间形成了明显的开口, 这意味着卸载时钻头与岩石分离的位置低于它们的初始接触位置, 即

钻头实现了在岩石中的钻进。而在压实阶段,拟合得到的 k_l 和 k_u 逐渐增加,即钻头沿着岩石已有压痕将其不断压实。而在接下来的稳定阶段,拟合得到的 k_l 和 k_u 则基本保持不变。在这3个不同的接触阶段之中,稳定阶段的 k_l 和 k_u 更适合来模拟激振碰撞测试时钻

头与岩石之间的接触关系,因为激振碰撞将使得钻头与岩石反复发生接触和分离,即进行了多次的加载-卸载循环;因此,本文将使用稳定阶段测得的 k_l 和 k_u 的平均值来作为钻头-岩石的接触刚度进行后续的数值模拟,其试验测试结果如表1所示。

图4 钻头-岩石不同接触阶段的压力-压痕深度的关系

表1 由试验数据拟合得到的接触刚度

岩石类别	接触刚度类别	开压阶段	压实阶段	稳定阶段	
				测量值	平均值
细砂岩	加载刚度 k_l /(kN/mm)	8.17	11.32	11.98	12.07
			11.29	11.77	
			11.62	11.73	
			12.43	12.43	
			11.34	12.45	
	卸载刚度 k_u /(kN/mm)	13.26	13.52	13.89	13.70
			13.42	13.82	
			13.39	14.06	
			13.60	13.60	
			13.71	13.12	
石英砂岩	加载刚度 k_l /(kN/mm)	3.03	16.81	30.96	32.73
			26.18	31.69	
			29.14	34.11	
			32.98	32.98	
			30.77	35.88	
	卸载刚度 k_u /(kN/mm)	37.88	37.80	40.00	40.64
			39.66	43.97	
			38.10	37.78	
			40.25	40.25	
			40.61	41.23	

3 激振碰撞系统的数学模型

基于搭建的激振碰撞试验装置和已经测量得到的钻头-岩石接触刚度,建立对应的数学模型,其目的是进行数值仿真,并与试验测试结果进行对比分析。由于本文聚焦于系统的轴向冲击振动,因此将试验装置简化为一个两自由度的物理模型。其中,钻头 m_1 和激振器 m_2 由一个并联的弹簧-阻尼组合($k-c$)连接,静态压力 F_b 作用于激振器,而钻头则受到激振力 $F_a \sin(\Omega t)$ 的作用;此外,钻头-岩石的接触模型采用(k_l, k_u)刚度组合来进行表征。具体的物理模型如图5所示。

根据建立的物理模型,进一步构建关于钻头轴向振动的数学模型^[17-18]

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_1 + c(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + k(X_1 - X_2) = F_b \\ m_2 \ddot{X}_2 + c(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + k(X_2 - X_1) + P_1 P_2 k_l (X_2 - X_p) + \\ P_1 (1 - P_2) P_3 k_u (X_2 - X_f) = F_a \sin(2\pi f t) \\ \dot{X}_3 = (P_1 P_2 + P_1 (1 - P_2)) \dot{X}_2 \end{cases} \quad (1)$$

图5 钻头-岩石激振碰撞系统的物理模型

式中, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为激振器、钻头、岩石压痕的位移;而如图4所示, X_p 、 X_f 分别为岩石在一个碰撞周期中的起始位置和终点位置; X_m 为岩石在加载和卸载过程中的最大压痕位置;并且 X_p 、 X_f 、 X_m 之间满足以下关系

$$k_l(X_m - X_p) = k_u(X_m - X_f) \quad (2)$$

此外, P_1 、 P_2 、 P_3 为Heaviside方程,通过它们的不同组合来划分钻头与岩石不接触、钻头对岩石接触加载、钻头对岩石接触卸载3种不同的状态,其具体可以表示为

$$\begin{cases} P_1 = H(X_2 - X_p) \\ P_2 = H(\dot{X}_2) \\ P_3 = H(X_2 - X_f) \end{cases} \quad (3)$$

4 激振碰撞的试验与仿真对比研究

根据所建立的试验装置和数学模型，分别开展试验测试和数值仿真研究，并对两方面结果进行对比分析。就所搭建的试验装置而言，试验中可以调控的参数共有 3 项，即激振频率、激振振幅、静态压力；因此，本节将分别对以上 3 项可控参数进行分析，探究其影响下的钻头-岩石激振碰撞系统动态响应的演化规律。可控参数的变化范围及试验装置中的主要参数值如表 2 所示。

表 2 参数的取值与范围

激振器 质量	钻头 质量	结构 刚度	结构 阻尼	激振 振幅	静态 压力	激振 频率
m_1 /kg	m_2 /kg	k /(kN/m)	c /[kN/(m/s)]	F_a /mV	F_b /N	Ω /Hz
265.0	3.0	68.85	2.45	300~ 600	120~ 360	50~120

4.1 激振频率的影响分析

首先，分析激振频率的变化对系统动态响应的影响。一方面，基于建立的数学模型进行数值仿真，选用表 1 中钻头与石英砂岩接触时的刚度组合，即($k_l=32.73$ kN/mm， $k_u=40.64$ kN/mm)，此外，激振振幅设定为 450 mV，静态压力设定为 200 N，然后将激振频率从 50 Hz 逐步增加到 120 Hz。最终由数值模拟所获得的钻头轴向加速度的时间序列如图 6c、6f、6i、6l 所示，它们分别对应于激振频率 50 Hz、70 Hz、100 Hz 和 120 Hz；相应地，绘制出这 4 个频率下的位移-速度相图，如图 6d、6g、6j、6m 所示。结合各个时间序列和相图可以看出，激振频率的变化将直接改变钻头的轴向振动状态，因此，激振频率对其演化规律的影响是较为显著的。

图 6 激振频率对钻头轴向振动状态的影响

另一方面,为了验证数值仿真结果的正确性,开展对应的试验研究,将激振振幅固定为 450 mV,静态压力设为 200 N;然后,通过 LabVIEW 控制激振频率,使其以 10 Hz 为间隔从 50 Hz 逐步增加到 120 Hz。并且,在每个激振频率下分别进行持续 30 s 的测试采样,以确保系统达到该激振频率下的稳定状态,从而消除在频率调整过程中系统呈现出的瞬态响应;相应地,在进行试验数据分析时,也忽略掉前 29 s 的数据而只考虑在第 30 s 内测得的数据。试验中测得的钻头轴向加速度信号如图 6b、6e、6h、6k 所示,其与数值仿真一样分别对应激振频率 50 Hz、70 Hz、100 Hz 和 120 Hz。通过相同激振频率下的时间序列的对比可见,虽然试验数据在低加速段出现了一定的噪声干扰,但其由于碰撞而形成的加速度尖峰是清晰可见的,并且试验测得的加速度幅值与数值仿真的结果也基本相同。因此,可以判定试验测试和数值仿真的结果具有较好的一致性,由此也证明了本文所提出的动力学模型的正确性。

此外,为了更加清楚地展示激振频率的变化对系统动态响应演化规律的影响,绘制如图 6a 所示的分岔图。具体而言,针对不同频率下的钻头轴向加速度的时间序列,以所分析的数据段内的第一个激振周期内的加速度峰值为起点,然后以一个激振周期为时间间隔顺次取点,从而获得该激振频率下钻头轴向加速度的频闪映射;再将所有的加速度频闪映射的结果按激振频率组合在一起,就构成了如图 6a 所示的关于激振频率的分岔图,而图 6a 中的黑点和红点分别对应了数值仿真中的结果和试验测试中的结果。

最后,综合分析图 6 中各个子图可知,在给定的激振频率范围内,首先出现的钻头轴向振动状态为 1 个激励周期内与岩石发生 4 次碰撞(为了表述方便,将其记为 Period-1-Imapct-4,即 P-1-I-4,以后类似表述皆按此方式执行),如图 6b~6d 所示。而随着激振频率的增加,一个激励周期内钻头与岩石的碰撞次数开始发生变化,在激振频率为 70 Hz 时表现为 P-1-I-3 的振动状态,如图 6e~6g 所示。然后,在经倍周期分岔后钻头的轴向振动状态出现了周期加倍的现象,即需要两个激励周期才能完成一次完整的振动,具体振型表现为在第一个激励周期内,钻头只与岩石碰撞一次,而在紧接着的第二个激励周期内,钻头将与岩石接连碰撞 2 次,并按照此规律进行周期性重复,这种振动状态可表示为 P-2-I-3,如图 6h~6j 所示。之后,随着激振频率的继续增加,新的倍周期分岔使得钻头振动变得更为

复杂,直到最后折叠分岔的出现,才使得钻头的振动状态又重新变回到单周期振动,即为如图 6k~6m 所示的 P-1-I-1 状态。综上所述,由于钻头与岩石之间激振碰撞的存在,本系统呈现出了典型的接触非线性特征,其动力学行为的演化规律也充分证明了这一点。

4.2 激振振幅的影响分析

其次,分析激振振幅对系统动态响应的影响。首先还是先进行数值仿真,此时考虑的是激振振幅的影响,因此,将激振频率设定为 120 Hz,静态压力还是设定为 200 N,然后将激振振幅的变化区间设为 300~600 mV;此外,此处选用钻头与细砂岩的接触组合($k_l=12.07$ kN/mm, $k_u=13.70$ kN/mm),由此所获得的钻头轴向加速度的时间序列如图 7c、7f、7i、7l 所示,它们分别对应于激振振幅为 300 mV、400 mV、500 mV 和 600 mV;也相应地绘制出其位移-速度相图,如图 7d、7g、7j、7m 所示。接着,在进行对应的试验测试时,将岩石样本换为细砂岩,并也将激振频率固定为 120 Hz,静态压力固定为 200 N;然后,通过 LabVIEW 来调节激振振幅,使其以 50 mV 为间隔从 300 mV 逐步增加到 600 mV,其余试验测试与数据处理方法与激振频率测试时的保持一致,得到的试验数据如图 7b、7e、7h、7k 所示,而进一步组合形成的关于激振振幅的分岔图如图 7a 所示。

综合分析图 7 中各个子图可知,在给定的激振振幅的变化范围内,钻头的轴向振动状态始终保持了单周期振动,但在激振振幅较低时,为 P-1-I-2 振动,而随着激振振幅增加到接近 400 mV 时,变化为 P-1-I-1 的振动状态。因而,对激振振幅的调节也会对钻头的轴向振动状态产生影响。

此外,在图 6a 和图 7a 所展示的分岔图中都出现了一系列向上的阶梯状突变,即钻头轴向加速度幅值出现了不连续的增加。比较不同阶梯段所对应的时间序列和相图可知,它们虽然都是单周期振动,但一个激励周期内钻头与岩石之间的碰撞次数却减少了。而由于碰撞会使得能量被消耗在钻头与岩石的加载和卸载的过程中;因而,碰撞次数的减少就使得更多的能量被有效地转化为了钻头轴向冲击的动能,于是增强了钻头在碰撞时的冲击力。这一观点也与文献[4]中数值仿真结果所揭示的现象相契合,即在钻头存在的各种轴向振动状态中,P-1-I-1 由于把单个激励周期内所有的外激能量都集中于与岩石的唯一一次碰撞中,因而钻头能获得最大的轴向加速度,即最大的冲击力,从而能最大程度地提升破岩效率。

图 7 激振振幅对钻头轴向振动状态的影响

4.3 静态压力的影响分析

最后, 分析静态压力的变化对系统动态响应演化规律的影响。在进行数值仿真时, 选用钻头与石英砂岩接触时的刚度组合 ($k_t = 32.73 \text{ kN/mm}$, $k_u = 40.64 \text{ kN/mm}$), 并将激振频率设定为 90 Hz , 激振振幅设定为 450 mV , 然后将静态压力的变化区间设为 $120 \sim 360 \text{ N}$, 由此得到的钻头轴向加速度的时间序列如图 8c、8f、8i、8l 所示, 它们分别对应于静态压力 140 N 、 200 N 、 280 N 和 360 N ; 而图 8d、8g、8j、8m 则为与之对应的位移-速度相图。接着, 在进行试验测试时, 也将激振频率固定为

90 Hz , 激振振幅固定为 450 mV ; 然后, 通过调节气压阀来控制静态压力, 其余试验测试步骤与数据处理方法也与激振频率测试时保持一致, 最终得到的试验数据如图 8b、8e、8h、8k 所示, 而进一步组合形成的关于静态压力的分岔图则如图 8a 所示。

综合分析图 8 中各个子图可知, 在低静态压力的情况下, 由于出现了一个倍周期和逆倍周期的分岔点组合, 钻头的轴向振动状态在小范围内 ($126 \sim 140 \text{ N}$) 出现了双周期振动, 如图 8b~8d 所示; 而除此之外, 其余参数范围下的钻头振动状态则均为单周期振动。此外, 随着静态压力的不断增加, 钻头

的轴向振动冲击被逐渐抑制,主要表现为不断加强的震颤现象;这是因为此时较大的静态压力限制了钻头在与岩石分离后的进一步向上回弹,使得钻头

不得不以较小的冲击力去持续碰撞岩石;因而从图8a也可以看出钻头的轴向加速度在随着静态压力的增大而不断减小。

图8 静态压力对钻头轴向振动状态的影响

5 结论

(1) 为了对旋转冲击钻井技术中钻头的高频低幅大冲击力的轴向振动进行深入研究,设计了一套基于钻头-岩石碰撞的激振冲击系统的试验装置,并分别开展了钻头-岩石的接触刚度测试和激振碰撞试验。通过对试验测试数据与数值仿真结果的对比分析,验证了所提出的数学模型的正确性。

(2) 讨论了激振频率、激振振幅和静态压力 3

项可控参数对系统动态响应演化规律的影响。通过分岔分析和相平面分析发现,激振冲击系统的动态响应会呈现出复杂的非线性特征。钻头在与岩石发生激振碰撞后,虽然将主要保持单周期的振动状态,但随着控制参数的变化,钻头与岩石在一个激励周期内的碰撞次数会不断发生改变,钻头的单周期振动状态还会经由倍周期分岔转变为双周期的振动状态;之后,随着控制参数的进一步变化,或者经由逆倍周期分岔,或者经过折叠分岔又将重新回到单周期的振动状态。

(3) 钻头的轴向振动状态决定了其轴向冲击力的大小, 从而会直接影响其破岩效率。结合试验测试和数值模拟的结果发现, 一个激振周期内, 钻头与岩石的碰撞次数越多, 钻头的轴向冲击加速度幅值越小, 这是因为碰撞会使得大量能量被消耗在钻头与岩石的加载和卸载的过程中。因此, 在钻头存在的各种轴向振动状态中, P-1-I-1 振动由于把单个激振周期内所有的外激能量都集中于与岩石的唯一一次碰撞中, 因而钻头能获得最大的轴向加速度, 即产生出最大的轴向冲击力, 从而可以最大程度地提升钻头的破岩效率。而为了获得钻头的 P-1-I-1 振动状态, 根据试验测试和数值模拟的结果分析, 建议采用较高的激振频率和较高的激振振幅, 但同时要避免施加较高的静态压力, 因为它将触发钻头的颤振, 反而造成破岩效率的降低。

(4) 基于目前已有的研究基础, 在下一步的工作中, 将重点开展钻头的旋转运动与其轴向冲击振动之间的耦合建模, 以得到能准确模拟旋冲钻系统运行特征的动力学模型, 并在此基础上, 启用本试验装置中预留的可实现岩石旋转的部件, 实现对旋冲钻的完整试验模拟研究。

参 考 文 献

- [1] KOVALYSHEN Y. Self-excited axial vibrations of a drilling assembly: modeling and experimental investigation[C]// 47th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium, June 23-26, 2013, San Francisco, CA, USA, 2013.
- [2] FRANCA L. A bit-rock interaction model for rotary-percussive drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48: 827-835.
- [3] SAZIDY M, RIDEOUT D, BUTT S, et al. Modeling percussive drilling performance using simulated visco-elasto-plastic rock medium[C]// 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium, June 27-30, 2010, Salt Lake City, UT, USA, 2010.
- [4] PAVLOVSKAIA E, HENDRY D, WIERCIGROCH M. Modeling of high frequency vibro-impact drilling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 91: 110-119.
- [5] WIERCIGROCH M. Resonance enhanced drilling: Method and apparatus: UK, WO2007141550[P]. 2007-05-18.
- [6] CAO Q, WIERCIGROCH M, PAVLOVSKAIA E, et al. Bifurcations and the penetrating rate analysis of a model for percussive drilling[J]. Acta Mechanica Sinica, 2010, 26(3): 467-475.
- [7] AJIBOSE O, WIERCIGROCH M, PAVLOVSKAIA E, et al. Drifting impact oscillator with a new model of the progression phase[J]. Journal of Applied Mechanics, 2012, 79: 061007.
- [8] AJIBOSE O, WIERCIGROCH M, AKISANYA A. Experimental studies of the resultant contact forces in drillbit-rock interaction[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 91: 3-11.
- [9] WIERCIGROCH M, KAPITANIAK M, VAZIRI V, et al. Resonance enhanced rotary drilling actuator: UK, WO2016142537A3[P]. 2016-11-07.
- [10] LIAO Maolin, ING J, PAEZ CHAVEZ J, et al. Bifurcation techniques for stiffness identification of an impact oscillator[J]. Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2016, 41: 19-31.
- [11] LIAO Maolin, ING J, SAYAH M, et al. Dynamic method of stiffness identification in impacting systems for percussive drilling applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 80: 224-244.
- [12] WIERCIGROCH M, VAZIRI V, KAPITANIAK M. RED: Revolutionary drilling technology for hard rock formations[C]// SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, March 14-16, 2017, Hague, Netherlands, 2017.
- [13] POWELL S, GARCIA A, BAROCIO H, et al. Percussion drilling system combined with hybrid PDC bit increases ROP and interval drilled on Taoudenni basin well in Mauritania[C]// SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, March 13-17, 2015, London, England, UK, 2015.
- [14] 雷鹏, 倪红坚, 王瑞和, 等. 自激振荡式旋转冲击钻井工具水力元件性能分析与优化[J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 175-180.
LEI Peng, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Performance analysis and optimization for hydraulic components of self-oscillating rotary impact drilling tool[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 175-180.
- [15] 管志川, 张洪宁, 张伟, 等. 吸振式井下液压脉冲发生装置[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 618-622.
GUAN Zhichuan, ZHANG Hongning, ZHANG Wei, et al. Equipment and technique for improving penetration rate by the transformation of drill string vibration to hydraulic pulsating jet [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 618-622.

- [16] SAYAH M. Nonlinear time series analysis applied to resonance enhanced drilling[D]. Aberdeen: University of Aberdeen, 2015.
- [17] LIAO Maolin, SU Yinao, ZHOU Yingcao. Oscillation reconstruction and bifurcation analysis of a drillbit-rock vibro-impact system[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2017, 27(1): 1750013.
- [18] LIAO Maolin, LIU Yang, PAEZ C J, et al. Dynamics of vibro-impact drilling with linear and non-linear rock[J]. International Journal of Mechanic Sciences, 2018, 146: 200-210.

作者简介: 廖茂林, 男, 1986 年出生, 博士(后), 讲师。主要研究方向为机械振动、非线性动力学。

E-mail: liaomaolin@ustb.edu.cn