

小口径深孔钻探管柱扭转振动特性分析

胡坤生¹, 肖冬顺¹, 周治刚¹, 姚震桐², 项洋^{*1}

(1. 长江岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 在小口径深孔取心钻探领域中,除了传统的提钻取心方法外,绳索取心工艺、螺杆马达孔底动力工具等钻进方法也被广泛地应用,不同的钻具组合与钻杆柱一起组成了长细比很大的柔性杆件,在钻进过程中产生复杂的振动,极大地影响了钻探工程的安全性。目前,以钻井工程为代表的管柱振动理论已经发展出了很多成熟的分析方法,但是针对小口径深孔钻探的垂直孔身结构、金刚石钻头磨削岩层、特别是选择不同钻具组合和钻进方法时,相关的管柱扭转振动特性研究依然不足。有限元分析方法适用于求解边界条件复杂的问题,用于钻探管柱的振动特性分析有很好的效果。基于ANSYS软件,选取适用于小口径深孔钻探的多种典型钻具组合,建立相应的有限元分析模型,求解孔深、钻压等因素与管柱扭转振动特性之间的关系,并给出了不同孔深条件下可能引起管柱共振的临界转速求解方法。该研究可在钻具组合选择、转速选择和管柱安全性评价等方面为小口径深孔取心钻探工程提供一定参考。

关键词: 小口径深孔钻探; 钻具组合; 管柱力学; 扭转振动特性分析; 管柱安全

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)03-0030-07

Torsional vibration characteristics analysis of pipe string in small diameter deep hole

HU Kunsheng¹, XIAO Dongshun¹, ZHOU Zhigang¹, YAO Zhentong², XIANG Yang^{*1}

(1. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan Hubei 430010, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In the field of small diameter deep hole coring drilling, in addition to the traditional lifting and coring methods, drilling methods such as wireline coring technology and screw motor bottom hole power tools are also widely used. Different bottom hole assembly (BHA) and drill strings together form flexible rods with a large slenderness ratio, which generate complex vibrations during the drilling process, profoundly affecting the safety of drilling engineering. At present, many mature analysis methods have been developed for the theory of pipe string vibration represented by drilling engineering, but research on the torsional vibration characteristics of pipe strings is still insufficient for the vertical hole structure of small diameter deep hole drilling, diamond bit grinding of rock layers, and especially when selecting different BHA and drilling methods. The finite element analysis method is suitable for solving problems with complex boundary conditions, and has good results in analyzing the vibration characteristics of drilling strings. Based on ANSYS software, a variety of typical BHA suitable for small diameter deep hole drilling are selected, and corresponding finite element analysis models are established to solve the relationship between factors such as hole depth, weight on bit, and the torsional vibration characteristics of the pipe string. A solution method for the critical rotational speed that may cause the joint vibration of the pipe string under different hole depths is given. This study can provide some reference for small diameter deep hole coring drilling engineering in terms of BHA selection, rotational

收稿日期: 2022-11-21; 修回日期: 2023-03-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.03.004

基金项目: 长江设计集团有限公司自主创新项目“多功能定向勘察钻机研发和孔底动力取芯技术研究”(编号: CX2020Z27)

第一作者: 胡坤生, 男, 汉族, 1980年生, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利水电工程地质勘察工作, 湖北省武汉市解放大道1863号, 617451751@qq.com。

通信作者: 项洋, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 硕士, 主要从事水利水电工程地质勘察工作, 湖北省武汉市解放大道1863号, 387839060@qq.com。

引用格式: 胡坤生, 肖冬顺, 周治刚, 等. 小口径深孔钻探管柱扭转振动特性分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 30-36.

HU Kunsheng, XIAO Dongshun, ZHOU Zhigang, et al. Torsional vibration characteristics analysis of pipe string in small diameter deep hole[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 30-36.

speed selection, and string safety evaluation.

Key words: small diameter deep hole drilling; BHA; pipe string mechanics; torsional vibration characteristics analysis; safety of pipe string

0 引言

在钻探工程中,由钻杆单根相连组成的管柱有着重要的地位,它把地表设备输出的运动和能量传递给孔底钻具,实现连续破碎岩石和钻孔延伸^[1-3],同时管柱也是泥浆运输的通道,管柱工作性能的好坏,对钻探工程的成败至关重要。深孔中的管柱是一个上部受拉、下部受压的细长柔性杆件,它在钻井液、地表设备、孔底岩石和井壁等的作用下,产生复杂的受力变形和约束振动^[4-6],给钻进工作带来不利影响。钻杆柱的振动与钻杆失效直接相关,当管柱的振动频率接近其固有频率时,就会引起共振,产生很大的冲击力,损伤钻杆,严重时还会造成孔内事故^[7-11]。管柱的振动形式包括横向振动、纵向振动和扭转振动,对于小口径岩心钻探,一般采用垂直孔身结构和金刚石钻头,孔底钻具运动相对平稳,管柱以扭转振动为主。因此,对小口径深孔钻探中的管柱扭转振动特性进行分析,是管柱安全性评价工作的一个重要方面。

为研究钻孔内的管柱振动规律,一些学者应用数学和力学等基础学科的理论及方法,结合仿真分析、模拟试验和现场试验等方法进行综合研究,在管柱振动理论方面做了大量的工作,形成了很多成熟的分析方法,其中有限元方法适用于求解边界条件复杂的问题,用于分析钻探管柱振动问题有很好的效果^[12-14]。王明杰^[15]建立了钻柱轴向-扭转-横向耦合振动的三维有限元模型,研究了超深井钻柱动力学特性及其动态安全性。结合钻头-地层相互作用特点,提出了综合考虑钻柱粘滑-涡动特征的统一激励模型,很好地反映了引起钻柱粘滑和涡动的激励机制,实现了两种振动形式的相互转换。结合现场测量数据反演了钻头激励统一模型中的地层影响参数,发现在泥岩含量较多的地层中钻进时,钻柱较易发生粘滑振动,地层影响系数取高值;在砂岩含量较高的地层中钻进时,钻柱较易发生涡动,地层影响系数取低值。此外,他还利用动态安全系数法对不同钻柱结构的动态安全性进行了评价,给出了对应的施工参数优选图版。Feng等^[16]考虑BHA偏心、钻

井液阻尼、钻头-岩石相互作用等因素,建立了钻柱轴向、扭转和横向耦合振动的有限元模型,并利用降阶法求解了该模型,研究了钻压、转速、岩石强度和BHA偏心对钻柱动力学特性的影响。杨尧焜等^[17]建立了大位移井钻柱纵向-扭转-横向三维耦合振动的有限元模型,研究了钻压和转速等因素对耦合振动的影响。模拟结果表明,钻压越大,井下钻柱耦合振动频率幅值越大;转速越高,振动周期越小。现场实验表明,高钻压、转速下的钻柱振动较低钻压、转速下的振动明显加强。Moraes等^[18]考虑钻头-岩石的相互作用、钻柱与井壁的接触、钻柱质量偏心、钻井液作用力等耦合因素,利用集中质量模型研究了钻柱轴向-扭转-横向的充分耦合振动,讨论了正常钻进、跳钻-粘滑共存、跳钻-涡动共存3种现象的发生条件,研究了钻柱长度和地面转速对上述3种现象的影响并提出了相应的减振措施。总的来看,这些分析方法多是基于石油钻井工程而建立,用于大直径的、多种振动形式和边界条件复杂的管柱振动特性分析中,能取得很好的效果,但是对于小口径岩心钻探,特别是选择不同钻具组合和钻进方法时,相关的管柱扭转振动特性研究依然不足。

综上所述,本文在前人研究的基础上,应用ANSYS软件,建立了不同钻具组合下的管柱有限元模型,研究管柱扭转振动特性和钻具组合、钻进方法、钻孔深度、钻压和转速之间的关系。相关分析方法和结论对开展小口径深孔管柱安全性评价和钻探工艺、规程参数选择有一定的参考意义。

1 管柱扭转振动机理分析

扭转振动指管柱绕其中心线左右反复扭转的现象,类似于钟表内的扭簧带动摆轮振动。扭转振动发生时,管柱的各个截面之间产生交变剪切应力,降低管柱的稳定性和寿命,严重时会发生反复的应力扭断杆件和钻头切削刃断裂事故,在小口径深孔钻探中,扭转振动最严重的表现为憋钻和粘滑行为。假设管柱为各个截面相同的细长圆形直杆,在扭矩作用下发生扭转振动,如图1所示。

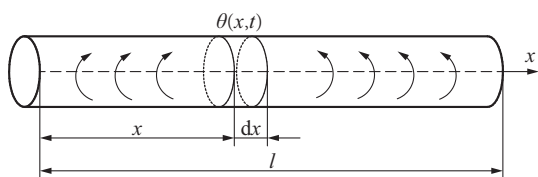


图1 管柱扭转振动示意

Fig.1 Schematic diagram of torsional vibration of pipe string

管柱的扭转振动方程为:

$$\frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

令 $a = \sqrt{G/\rho}$, 得方程通解为:

$$\theta(x, t) = (A \sin \omega x + B \cos \omega x)(C \sin \omega t + D \cos \omega t) \quad (2)$$

式中: x ——某一横截面的坐标位置, m; t ——某一时刻, s; $\theta(x, t)$ ——坐标 x 处微元段长度的钻杆柱在 t 时刻的角度变量, ($^\circ$); G ——剪切模量, Pa; ρ ——密度, kg/m^3 ; A, B, C, D ——积分常数; ω ——频率, rad/s 。

代入钻杆柱的边界条件, 在孔口处, 有 $x=0, \theta=0$, 代入式(2)得 $B=0$ 。在钻杆和钻铤的交界面

上, 钻杆上的扭矩是由钻铤传递的, 所以有:

$$GI \left[\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right]_{x=l} = J_{\text{铤}} \omega^2 [\theta(x, t)]_{x=l} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 令 $\theta=0, B=0$ 得:

$$GI \omega a \cos \omega a l = J_{\text{铤}} \omega^2 \sin \omega a l \quad (4)$$

从而得到钻杆柱扭转固有频率振动频谱方程:

$$\tan \omega a l = \frac{I}{J_{\text{铤}} \omega} a = \frac{J_{\text{杆}}}{J_{\text{铤}} \omega l} a \quad (5)$$

式中: l ——钻杆柱长度, m; I ——钻杆横截面惯性矩, m^4 ; $J_{\text{杆}}$ ——钻杆质量惯性矩, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; $J_{\text{铤}}$ ——钻铤质量惯性矩, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

2 管柱模型的建立和求解

2.1 模型参数

绳索取心、提钻取心和孔底动力取心等钻进工艺被广泛应用于小口径深孔钻探中。依此特点, 选取如图2所示的(a)、(b)、(c)和(d)4种钻具组合作为建模的物理对象, 并且结合钻探工程的实际工况, 给予相应的工作速度范围, 亦即管柱的激振频率范围。

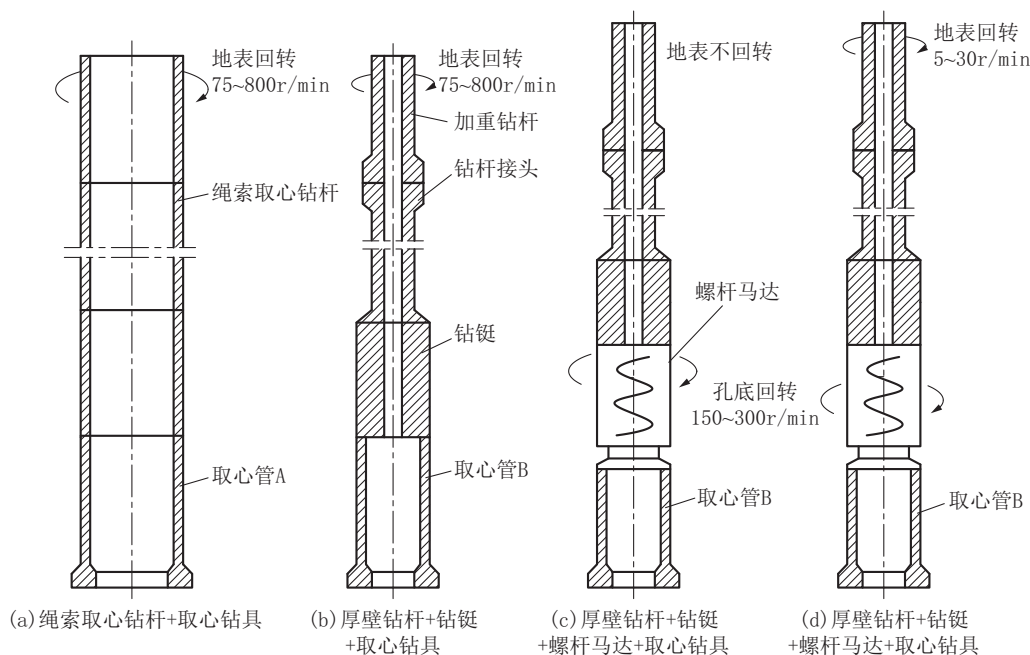


图2 不同工作状态下的钻具组合

Fig.2 BHA under different working conditions

在此基础上, 重点考察选取不同钻具组合、不同钻孔深度(500、1000、3000、4000 m)、不同钻压(10~

20 kN) 和不同转速时, 钻孔内管柱的扭转振动特性。要求钻进地层坚硬完整、金刚石钻头工作平稳,

采用钻铤加压时,中和点落在钻铤上,中和点一般位于钻铤全长的80%左右。管柱几何参数见表1所示,密度为 7850 kg/m^3 ,弹性模量为 200 GPa ,泊松比 0.3 ,泥浆密度取 1.05 g/cm^3 。

表1 管柱的几何参数

Table 1 Geometric parameters of pipe string

参数项	参数值/mm
钻杆外径	91
钻杆内径	79.8
单根钻杆长度	3000
取心管A外径	91
取心管A内径	79.8
取心管A长度	3000
加重钻杆外径	60.3
加重钻杆内径	46.1
单根加重钻杆长度	9000
钻铤外径	89
钻铤内径	38.1
单根钻铤长	9150
取心管B外径	89
取心管B内径	77.8
取心管B长度	4500

2.2 基本假设

考虑到实际钻探工作的复杂性,为方便建模和求解,对孔内管柱做出如下假设:

(1)管柱轴线与井眼重合,为一竖直线。

(2)管柱由钻杆、钻铤、螺杆马达和岩心管组成,横截面为一圆环,螺杆马达转化为等效质量和刚度相同的圆柱体,钻头和岩心管视为一体,忽略钻杆接头、螺纹和钻头处等变截面处的尺寸影响。

(3)管柱材料为各向同性,应力应变关系始终保持线性。

(4)忽略管柱与井壁的摩擦,泥浆的阻尼效应,仅考虑其浮力作用。

(5)考虑轴向力,忽略扭矩,转速均匀。

(6)不考虑横向振动和纵向振动。

2.3 单元选取和网格划分

从ANSYS单元库中选择PIPE单元类型,PIPE单元为单轴三维弹性直管单元,单元考虑了应力刚度和大变形的影响,可以承受拉伸、压缩、扭转和弯曲,而且能够模拟管内及管外的流体的力学影

响,单元的每个节点有6个自由度,包括沿着3个坐标轴方向的平动和绕3个坐标轴的转动,因此非常适合作为钻探管柱的模型。以单根管柱为一个单元,管柱的两端为单位节点,再输入表1中的数据,设置单元长度为管柱的实际长度,横截面输入钻杆、钻铤等的内外径,最后赋予材料参数,即可建立图2中不同钻具组合的管柱有限元模型(见图3)。

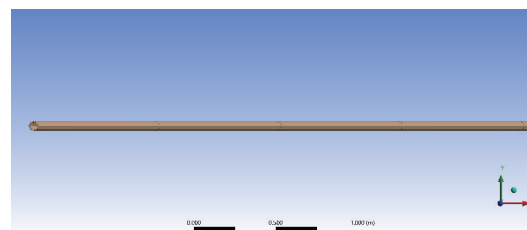


图3 管柱有限元模型

Fig.3 Finite element model of pipe string

2.4 边界条件设置和求解

根据模态分析的原理,系统的振动特性只与系统的刚度和质量分布有关,但当物体受到外载荷作用和高速旋转时,其刚度会发生改变。因此,在模态分析前先对管柱施加外载荷和运动约束,先改变钻杆柱的刚度,再计算得到相应刚度条件下的模态参数。管柱在孔内受到多种载荷作用,对模型加载时主要考虑重力、泥浆浮力、孔底对钻头压力和地表设备轴向力的影响^[19-24]。此外,由于仅考察扭转振动,所以在空间中只允许管柱绕轴线转动而约束其他5个自由度。

以钻具组合(a)为例,取钻孔深度500 m,钻压20 kN,地表转速800 r/min,对管柱有限元模型的施加载荷和运动约束,调整长径比例后如图4所示。

建立不同钻具组合的有限元模型,设置边界条件,求解,得到不同工作状况下,管柱扭转振动的前10阶固有频率。

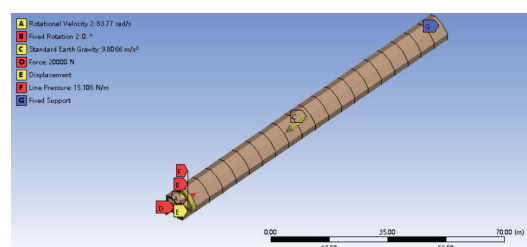


图4 边界条件约束

Fig.4 Boundary condition constraints

3 扭转振动特性分析

3.1 钻压对固有频率的影响

选定钻具组合(a),孔深500 m。首先取恒定转速75 r/min,依次选择大小为10、15和20 kN三个钻压;再取钻压20 kN,恒定转速800 r/min,得到钻杆柱1到10阶的固有频率如表2所示,可知在10 kN的钻压变化范围内,钻杆柱固有频率的变化幅度十分小,而转速的变化则对管柱振动特性产生的影响更是轻微。

3.2 孔深对固有频率的影响

再选取钻具组合(a),钻压和转速分别设置为20 kN和800 r/min不变,在500、1000、3000、4000 m不同深度条件下,求解得固有频率如图5所示。

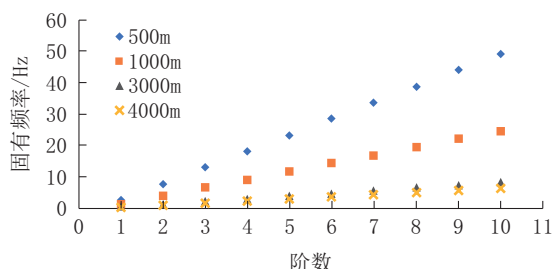


图5 不同孔深条件下钻具组合(a)的固有频率

Fig.5 Fixed frequency of BHA (a) at different depths

由图5可知,随着孔深的增加,钻杆柱固有频率逐渐减小,但减小的幅度逐渐缩小;在浅孔,钻杆柱不同阶数的频率分布较为分散,但在3000 m以深的深孔,各阶频率则变得相对集中。

3.3 临界转速分析

由表2可知,对相同阶数的固有频率,绳索取心工艺与其他3种工作状态的钻具组合有较大区别,这是由绳索取心钻具的质量和刚度分布规律所决定的。

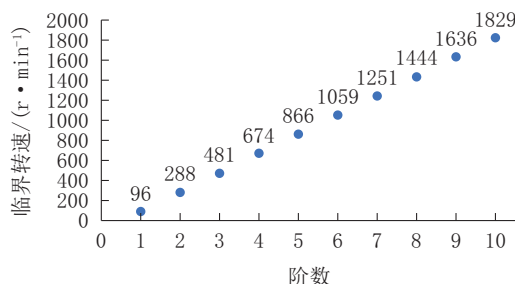
采用金刚石钻头钻进时,管柱的激振频率由其转速决定,两者有如下的关系式:

$$n=60f_i \quad (6)$$

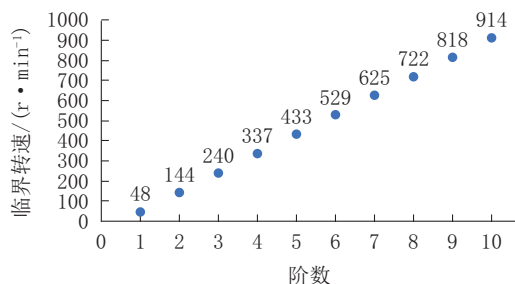
式中: n ——转速, r/min; f_i ——扭转振动的第*i*阶固有频率。

因此,将管柱扭转振动的固有频率按公式(6)换算成相应的转速,则此转速就是引起钻杆柱共振的

度条件下的各阶临界转速如图6所示。



(a) 孔深500 m时的临界转速



(b) 孔深1000 m时的临界转速

图6 钻具组合(a)的各阶临界转速

Fig.6 Critical speed of each order of BHA (a)

由图6趋势可知,孔深较小即在浅孔钻进时,各阶临界转速分布相对分散,这时候只要选择合适的转速区间,就可以有效地避免共振发生;而在管柱长度较大时,即进行数千米深孔钻进时,临界转速集中在低速段,易发生共振,这时应该尽可能地开高转速,以免管柱失效破坏。

4 结论

(1) 钻压和转速对管柱各阶固有频率影响不明显。管柱的各阶固有频率随着其长度的增加而减小,但减小的幅度随着孔深的延长而趋缓。

(2) 建立了基于ANSYS软件的小口径深孔钻探管柱扭转振动特性分析方法,用于确定可能导致管柱共振的临界转速,从而为钻具组合优化、转速选择和减振措施采取提供参考。

(3) 小口径钻探的振动及其影响因素十分复杂,分析方法是在一系列假设条件下建立的,与实际情形有出入,还需要结合实际工况进一步研究分析。

临界转速,由此可得到4种钻具组合在不同孔深条件下的临界转速。钻具组合(a)在500和1000 m深

表 2 扭转振动的前十阶固有频率								
Table 2 First ten order fixed frequency for torsional vibration								
钻具组合	深度/m	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
(a)	500	20	75	1.6049	4.8146	8.0243	11.234	14.444
	1000	20	75	0.80243	2.4073	4.0122	5.617	7.2219
	3000	20	75	0.26748	0.80243	1.3374	1.8723	2.4073
	4000	20	75	0.20061	0.60182	1.003	1.4043	1.8055
	500	10	75	2.586	7.7582	12.93	18.102	23.275
	500	15	75	2.586	7.7582	12.93	18.102	23.275
	500	20	75	2.5861	7.7582	12.93	18.103	23.275
	500	20	800	2.5861	7.7582	12.93	18.103	23.275
(b)	500	20	75	1.0349	3.983	7.437	10.988	14.562
	1000	20	75	0.61218	2.0118	3.5904	5.2352	6.9049
	3000	20	75	0.24082	0.72912	1.2315	1.7468	2.2712
	4000	20	75	0.18515	0.55793	0.93654	1.3216	1.712
(c)	500	20	地表 30	1.0867	3.9714	7.3337	10.805	14.309
	1000	20		0.6351	2.0359	3.5905	5.212	6.8612
	3000	20		0.24484	0.73882	1.2426	1.7564	2.2783
	4000	20		0.18755	0.5642	0.94473	1.3299	1.7194
(d)	500	20	地表 30+螺杆 800	1.0867	3.9714	7.3337	10.805	14.309
	1000	20		0.6351	2.0359	3.5905	5.212	6.8612
	3000	20		0.24484	0.73882	1.2426	1.7564	2.2783
	4000	20		0.18755	0.5642	0.94473	1.3299	1.7194
钻具组合	深度/m	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
(a)	500	20	75	17.653	20.863	24.073	27.283	30.492
	1000	20	75	8.8267	10.432	12.036	13.641	15.246
	3000	20	75	2.9422	3.4772	4.0122	4.5471	5.0821
	4000	20	75	2.2067	2.6079	3.0091	3.4103	3.8115
	500	10	75	28.447	33.619	38.791	43.963	49.135
	500	15	75	28.447	33.619	38.791	43.963	49.135
	500	20	75	28.447	33.619	38.791	43.963	49.136
	500	20	800	28.447	33.619	38.791	43.963	49.136
(b)	500	20	75	18.133	21.67	25.065	27.737	29.895
	1000	20	75	8.586	10.273	11.963	13.654	15.345
	3000	20	75	2.8016	3.3359	3.8729	4.4117	4.9517
	4000	20	75	2.1065	2.5039	2.9034	3.3044	3.7065
(c)	500	20	地表 30	17.822	21.332	24.824	28.257	31.454
	1000	20		8.5234	10.193	11.866	13.541	15.218
	3000	20		2.8058	3.3373	3.8715	4.4077	4.9453
	4000	20		2.1125	2.5083	2.9061	3.3055	3.7061
(d)	500	20	地表 30+螺杆 800	17.822	21.332	24.824	28.257	31.454
	1000	20		8.5234	10.193	11.866	13.541	15.218
	3000	20		2.8058	3.3373	3.8715	4.4077	4.9453
	4000	20		2.1125	2.5083	2.9061	3.3055	3.7061

参考文献(References):

- [1] 鄢泰宁. 岩土钻掘工艺学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.
YAN Taining. Geotechnical Drilling Technology [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [2] 赵国珍, 龚伟安. 钻井力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988.
ZHAO Guozhen, GONG Weian. Fundamentals of Drilling Mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988.
- [3] 胡郁乐, 张惠. 深部地质岩心钻探关键技术[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
HU Yule, ZHANG Hui. Key Techniques of Deep Geological Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [4] 胡郁乐, 张惠. 钻探信息测试技术与工程案例[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
HU Yule, ZHANG Hui. Drilling Information Testing Technology and Engineering Cases [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2021.
- [5] 马明, 蒋国盛, 孙志峰. 水利水电钻探手册[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
MA Ming, JIANG Guosheng, SUN Zhifeng. Hydropower Drilling Manual [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2021.
- [6] 孙云志, 卢春华, 肖冬顺, 等. 水利水电工程大顶角超深斜孔钻探技术与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
SUN Yunzhi, LU Chunhua, XIAO Dongshun, et al. Drilling Technology and Practice of Ultra-deep Oblique Holes with Large Top Angle in Hydraulic and Hydropower Projects [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [7] 舒晓勇. 2000m 水井钻机的钻杆仿真研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.
SHU Xiaoyong. Simulation research on drill pipe for 2000 meter water well rig [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2003.
- [8] 胡中伟. 钻柱振动模态分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
HU Zhongwei. Model analysis of drill stem vibration [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [9] 张明明. 岩心钻探中钻杆扭转振动特性分析及其应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
ZHANG Mingming. Analysis of torsional vibration characteristics of drill pipe in core drilling and related applications [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [10] 井丹丹. 水平井钻柱振动规律的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
JING Dandan. The research of rule on drill string vibration of horizontal well [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [11] 赵大军, 吴金发. 隧道工程勘察水平孔钻进钻具的运动与受力分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(11): 12-18, 24.
ZHAO Dajun, WU Jinfa. Analysis of movement and force of horizontal drilling tools for tunnel engineering investigation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11): 12-18, 24.
- [12] 张巨川, 段隆臣, 王洪波, 等. 基于 ANSYS 的煤田地质勘探钻杆振动模态分析[J]. 煤炭科学与技术, 2009, 37(8): 64-66.
ZHANG Juchuan, DUAN Longcheng, WANG Hongbo, et al. Analysis on drilling rod vibration mode of coalfield geological exploration based on ANSYS [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(8): 64-66.
- [13] 苏凯, 孙友宏, 贾瑞. 基于有限元法的钻杆柱纵向振动分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(12): 52-56.
SU Kai, SUN Youhong, JIA Rui. Study on longitudinal vibration of drilling pipe based on finite element method [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(12): 52-56.
- [14] 江进国, 舒晓勇, 韦念龙, 等. 基于 ANSYS 软件的钻杆扭转振动分析[J]. 探矿工程, 2003(S1): 176-178.
JIANG Jinguo, SHU Xiaoyong, WEI Nianlong, et al. Drilling pipe torsional vibration analyses with ANSYS software [J]. Exploration Engineering, 2003(S1): 176-178.
- [15] 王明杰. 超深井钻柱动力学特性分析及动态安全性评价[D]. 上海: 上海大学, 2016.
WANG Mingjie. Drilling dynamic characteristics analysis and dynamic safety evaluation for ultra-deep well [D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.
- [16] Feng T, Vadali M, Ma Z, et al. A finite element method with full bit-force modeling to analyze drillstring vibration [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2017, 139(9): 091016.
- [17] 杨尧煜, 蒋宏伟, 袁志平. 大位移井井下钻柱耦合动力学分析研究[J]. 钻采工艺, 2018, 41(5): 1-4.
YANG Yaokun, JIANG Hongwei, YUAN Zhiping. Analysis on downhole tubular coupling dynamics in extended reach drilling [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(5): 1-4.
- [18] Moraes L P P, Savi M A. Drill-string vibration analysis considering an axial-torsional-lateral nonsmooth model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 438: 220-237.
- [19] 张震. 旋挖钻机钻杆失效研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
ZHANG Zhen. Failure of the drill pipe rotary drilling rig [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [20] 翁炜, 黄玉文, 胡继良, 等. 旋挖钻机钻杆失效形式分析及制造工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, 32(10): 42-43, 53.
WENG Wei, HUANG Yuwen, HU Jiliang, et al. Analysis on rotary drill rod failure and producing technology [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(10): 42-43, 53.
- [21] 梁健, 郭宝科, 王志刚, 等. 绳索取心复合钻柱的动力学行为研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(7): 34-40.
LIANG Jian, GUO Baoke, WANG Zhigang, et al. Dynamics behavior of compound drill string for wire-line coring [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(7): 34-40.
- [22] 王定贤, 曹钧, 刘俊鹏, 等. 钻杆转动过程的 ADAMS 动力学仿真[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1): 87-90.
WANG Dingxian, CAO Jun, LIU Junpeng, et al. ADAMS dynamics simulation of drill stem in rotating course [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(S1): 87-90.
- [23] 曹彦伟, 李谦. 一种同轴双向回转模式的钻具结构设计及振动模拟[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 83-92.
CAO Yanwei, LI Qian. Structural design and vibration simulation of a coaxial contra-rotary drilling tool [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 83-92.
- [24] 苏阳阳. 螺杆桩机钻杆动力学分析与动态设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
SU Yangyang. Dynamics analysis and dynamic design research [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

(编辑 荐华)