

震击型中空螺杆取心钻具钻进效率分析

韩泽龙, 宋 刚, 陈晓君, 李小洋, 牛庆磊, 邵玉涛

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:针对深海硬岩取心钻进过程中钻进效率低、取心率低、扰动大、事故率高等问题,本文以深海硬岩为研究对象,通过有限元数值分析软件,探究深海硬岩在回转、冲击复合工况下的破碎机理。研究结果表明:旋转冲击的破岩方式可有效的提高深海硬岩钻进效率;钻进取心过程中可优选 15~25 kN 钻压,凸台高度可优选 4~6 mm,此时钻进速度较快、获取岩心质量较高、能量利用率高;在震击部件强度允许的条件下,冲击频率越接近最优频率,钻进效率越高。

关键词:深海硬岩取心;震击型螺杆;钻进效率;冲击力;冲击频率

中图分类号:P634; TE242 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)03-0054-06

Analysis of drilling efficiency of shock hollow screw coring tool

HAN Zelong, SONG Gang, CHEN Xiaojun, LI Xiaoyang, NIU Qinglei, SHAO Yutao

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: This paper aims at the problems of low drilling efficiency, low core recovery, large disturbance and high accident rate during the coring process of deep-sea hard rock, discusses the fracture mechanism of deep-sea hard rock under the combined conditions of rotary and impact taking the deep-sea hard rock as the research object and using the finite element numerical analysis software. The results show that the rotary rock breaking method can effectively improve the drilling efficiency. In the drilling process, 15~25kN WOB and 4~6 mm boss height can be optimized. Under this condition, the ROP is faster, the core quality is higher, and the energy utilization rate is also higher. The closer the working frequency is to the optimal frequency, the more efficient the drilling will be as long as the strength of the jarring component allows.

Key words: deep-sea hard rock coring; shock-type screw; drilling efficiency; impact force; impact frequency

0 引言

科学钻探对解决人类社会所面临的资源、灾害和环境三大问题都有十分重要的意义,同时也是一项能带动相关工程技术发展的重大科学工程。开展科学钻探,不仅将促进我国地学基础理论研究走向国际前沿,还具有拉动我国钻探工程整体进步,提高其技术、学术水平和国际地位的技术意义^[1]。

在地球的构造组成中有一个重要的界面——

莫霍面。莫霍面是地球内部最接近地球表面的全球性分界面,获取莫霍面的岩心对研究地壳结构、地壳均衡状态与天然地震活动等均有重要的意义。随着人类对莫霍面探索的发展,开启了划时代的深海钻探计划,50年来,慢慢发展成国际大洋发现计划(IODP),该计划成为地球科学领域迄今规模最大、影响最深的国际大科学计划^[2]。我国迟至1998年才以参与成员的身份加入IODP,开启了中国大

收稿日期:2023-01-18; 修回日期:2023-03-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.03.007

基金项目:中国地质科学院勘探技术研究所所管科技项目“深海硬岩一体式震击型中空螺杆取心钻具研究”(编号:2020260002Q2000011);中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支持”(编号:DD20221721)

第一作者:韩泽龙,男,汉族,1993年生,工程师,石油与天然气工程专业,硕士,长期从事海洋钻探技术研究工作,河北省廊坊市金光道77号,785674682@qq.com。

引用格式:韩泽龙,宋刚,陈晓君,等.震击型中空螺杆取心钻具钻进效率分析[J].钻探工程,2023,50(3):54-59.

HAN Zelong, SONG Gang, CHEN Xiaojun, et al. Analysis of drilling efficiency of shock hollow screw coring tool[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 54-59.

洋钻探的发展历程^[3]。

随着大洋钻探计划的发展^[4-5],钻探深度不断加深,所钻遇的地层也愈发坚硬,钻进、取心效率较低,这导致钻探的成本大大增加^[6]。在大洋钻探常规钻探方式中,钻头破碎岩石所需的动力由船载钻机动力系统提供,但由于海水深度大,动力系统无法施加较快转速,同时扭矩在深孔中存在传输和利用效率低等问题,导致钻头在硬岩中机械钻速低、取心效率低^[7]。为了解决上述问题,部分专家和学者提出采用井下动力钻具的方式,提高井底转速、减少扭矩损失,实现加快钻进速度的目标,并进行了相关实验^[8-10]。

本文基于井下动力螺杆取心钻具,提出增加震击的方式进行提速,该钻具在钻进过程中给钻头提供一个周期性的轴向冲击力,形成复合冲击破岩的钻进模式,同时螺杆钻具采用中空式的结构,可在内部投入绳索取心钻具,实现快速高效地获取海洋深部硬岩岩心,并依据研究结果,制定了震击型中空螺杆取心钻具的设计方案及施工参数,为我国即将投入运营的国产大洋钻探船提供技术储备。

1 结构及工作原理

1.1 基本结构

震击型中空螺杆取心钻具的结构如图1所示,该工具主要分为2部分:(1)螺杆传动机构,其结构与常规螺杆钻具基本一致,分为定子与转子,内部为带有螺旋线的转子,外部为带有相对螺旋线的定子,在钻井液的驱动下,转子发生旋转并传递给下部钻头^[11-12],但与常规螺杆钻具有2处不同,一是该工具转子为大通径中空结构,内部可安装绳索取心钻具,实现绳索取心;二是万向节部分为一体式挠性轴中空万向节。(2)震击机构,安装在钻具下端,震击静套与螺杆外壳体通过螺纹连接,震击动套与螺杆传动轴连接,其配合的结构为凸轮结构,在工具运行过程中,震击静套冲击震击动套,为钻头提供周期性轴向冲击力。

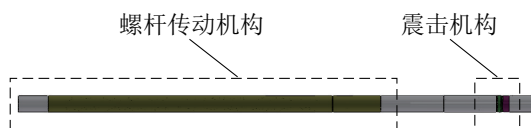


图1 震击型中空螺杆取心钻具

Fig.1 Shock hollow screw coring tool

震击型中空螺杆取心钻具在钻进过程中提供轴向周期性冲击,针对花岗岩、玄武岩等岩石具有较强的破坏作用^[13-15],可提高岩石的破碎效率,加快机械钻速,该钻具内部可安装绳索取心工具,当钻进深度较大时,可采用绳索取心的方式,避免提钻取心,节省施工时间,降低施工成本。

1.2 工作原理

震击机构的结构及原理如图2所示,上部为震击静套,如图中紫色部件所示,与震击型中空螺杆外壳体通过螺纹连接,下部为震击动套,如图中绿色部件所示,与震击型中空螺杆传动轴通过螺纹连接,震击动套与静套之间为凸轮啮合,在钻进过程中,传动轴沿顺时针旋转,带动震击动套顺时针旋转,震击静套在钻压的作用下持续与震击动套接触,在震击动套与震击静套之间凸轮的作用下,定子外壳发生小位移的抬升,当定子外壳抬升至最高点时,由于凸台机构存在台阶并具有一定的高度差,定子外壳失去支撑后迅速下落,对震击静套产生轴向冲击作用,产生一个轴向的冲击力,冲击力传递到钻头直至地层。

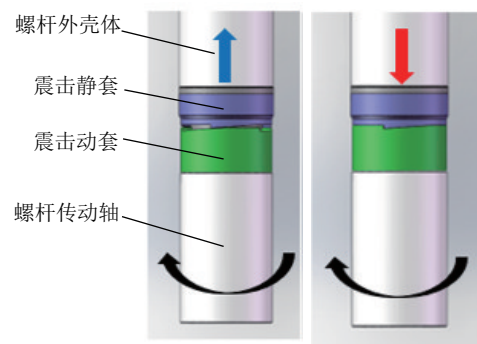


图2 震击机构结构及原理

Fig.2 Structure and principle of shock mechanism

2 震击破岩影响参数力学分析

复合冲击钻进钻头破碎岩石的过程具有轴向冲击和旋转切削两种特性。井底岩石在轴向冲击力作用下可形成破碎坑,岩石破碎过程中受力的状态发生了变化,需对螺杆钻具冲击机构及其产生的冲击力进行分析,并通过有限元计算软件分析钻进效率,指导震击机构的设计。

震击型中空取心螺杆中震击部件有3个关键参数:震击冲击力,震击过程中产生的扭矩损失,冲击

频率。针对这3个关键参数进行力学行为分析。

2.1 震击冲击力分析

震击机构中具有凸轮结构,钻具在运行过程中定子外壳会发生小位移的抬升,假设抬升过程钻杆柱上升获得的势能在震击过程中能全部转换成动能,并在冲击过程中转化为冲击力。

钻进过程中存在钻柱中性点,在中性点以上钻杆柱受拉伸,在中性点以下受压缩^[16],可将抬升钻柱的重量近似的用钻压来等量,震击机构不同状态下简化的受力图如图3所示,凸轮高度差为 h ,钻具重力为 M ,地层对钻头的支持力为 F_{zc} ,转动过程中产生的摩擦力为 f ,冲击发生时接触时间为 s 。

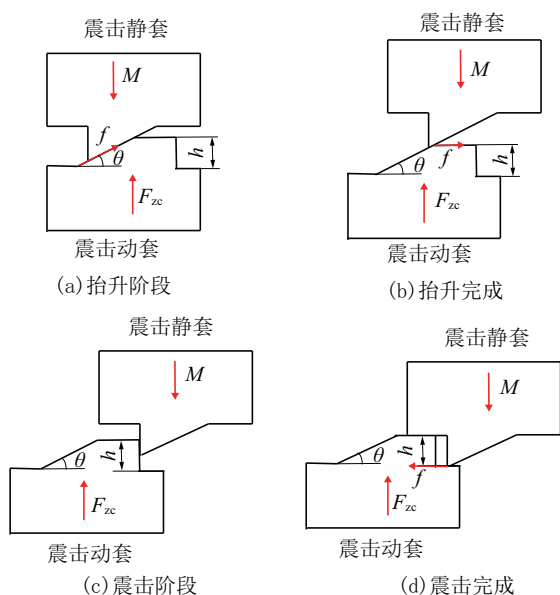


图3 震击机构不同状态下简化受力

Fig.3 Schematic diagram showing the force under different states of the shock mechanism

当上部定子突然失去静套支撑时突然下落,近似的认为钻柱进行自由落体运动,依据万有引力定律以及牛顿第二定律,钻柱在冲击前的速度为:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (1)$$

$$v = gt \quad (2)$$

根据动量守恒定律可得:

$$Mv = Ft \quad (3)$$

联立式(1)、(2)、(3),可得理论冲击力为:

$$F = \frac{M\sqrt{2gh}}{s} \quad (4)$$

2.2 震击过程中损失扭矩分析

受力状态如图3所示,震击部件为凸台结构,抬升震击静套时会产生摩擦力,该摩擦力会消耗部分井下动力钻具的扭矩,需要对震击产生的扭矩损失进行受力分析,优化结构。

假设接触面之间的摩擦系数为 μ ,震级机构台阶直径为 R ,当上部钻具连接的静套处于抬升阶段时,产生的扭矩损失为:

$$F = R(\mu Mg \cos \theta + Mg \sin \theta) \cos \theta \quad (5)$$

当上部钻具移动到凸台的水平处,上部钻具连接的静套水平运动,此时产生的扭矩损失为:

$$F = R\mu Mg \quad (6)$$

2.3 冲击频率分析

如图4所示,钻头的冲击频率对钻头切削齿破碎岩石的效率存在一定的影响^[17-18],当冲击频率较小时,震击产生的破碎区域相互独立,不能形成连续破碎;当冲击频率较大时,震击产生的破碎区域部分重合,能量利用率低。震击的最佳频率为震击对岩石产生的影响区域刚好相连,不产生重叠,此时才是最佳震击频率。

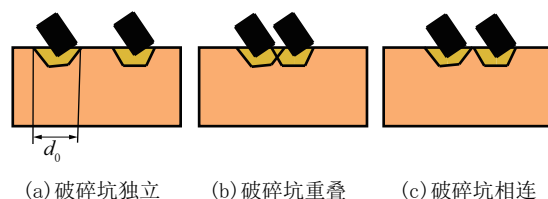


图4 冲击碎岩示意

Fig.4 Schematic diagram of impact rock damage

根据图中PDC单个切削齿与岩石相互作用模型中各点的几何关系,假设最外侧切削齿每一次冲击完成后可影响区域的尺寸 d_0 ,根据合理冲击频率分析,切削齿线速度和冲击频率之间的关系为:

$$v_0 = fd_0 \quad (7)$$

切削齿线速度与钻具回转转速之间的关系为:

$$v_0 = \frac{2\pi Dn}{60} = \frac{\pi Dn}{30} \quad (8)$$

联立式(7)、(8),可得合理冲击频率为:

$$f = \frac{\pi Dn}{30d_0} \quad (9)$$

3 震击力参数优化

对复合冲击破碎岩石效率采用有限元软件进行

分析,模型分为两部分,上部为PDC取心钻头,依据常用钻头参数拟采用四刀翼取心钻头,PDC复合片直径13.44 mm,为减少模型计算量,建模过程中去除与切削地层无关的刀翼模型,仅保留PDC切削齿,并忽略破碎岩石过程中切削齿的损伤,PDC切削齿采用刚体模型,且给定其密度为 $7.08 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。下部为地层岩石模型,在中心处对网格进行局部细化,可以更好的观察到应力应变波及区域,减少计算量^[19],当岩石单元失效后即从岩石中删除,忽略其失效后对后续切削的影响。岩石样本的弹性模量选择75 GPa,泊松比为0.12,抗压强度为150 MPa。PDC齿与岩石接触属性为通用接触,岩石网格细化区域内部单元之间自接触,所有接触之间的

摩擦因数均为0.2。下部岩石区域的底部和四周进行固定,对PDC切削齿施加60 r/min的转速,分别计算不同钻压和震击频率下的钻进效率。

3.1 钻压对岩石破碎效果的影响

钻进过程中钻压对于瞬时产生冲击力的大小具有十分重要的影响,当钻压大时,瞬时冲击力较大,对岩石破碎影响波及范围较大,后续钻头破碎岩石所需的能量较少,可以高效的破碎岩石。

不同钻压震击破碎岩石的纵向波及范围界面如图5所示,凸台高度均设置为5 mm,结果显示随着钻压增大,纵向波及距离增大,但慢慢趋于稳定,当钻压处于15~25 kN时,纵向波及距离基本一致。

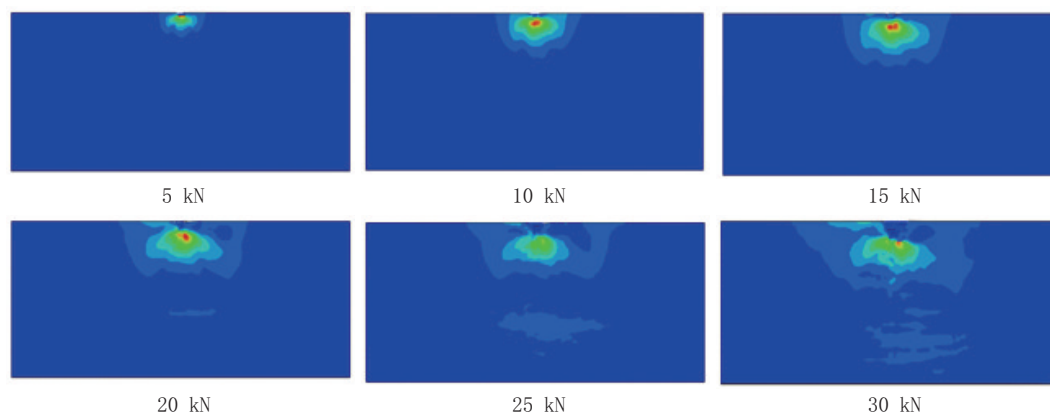


图5 震击破碎岩石的纵向波及范围结果

Fig.5 Longitudinal ripple extent interface result plot of shock fractured rock

花岗岩为硬脆性岩石,破碎过程中发生脆性损伤破坏,在横向上发生大面积破坏,当凸台高度一定时,横向破坏波及面积局部放大图如图6所示,随着钻压的增大,横向波及面积增大,但取心钻进过程中需获得岩心质量较好的岩心,岩心要保障完整不破碎,横向波及面积较大会影响岩心质量。

震击破碎岩石横向及纵向波及情况如图7所示,在钻进过程中,为保障较快的钻进效率同时获得质量较好的岩心,可优选15~25 kN钻压,纵向波及距离较大,横向的波及距离处于较优的状态,可有效的增加破岩效率。

3.2 震击机构凸台高度对岩石破碎效果的影响

当钻压设置为15 kN,转速设置为60 r/min,分析计算结果如图8所示,随着凸台高度的增加,震击状态对岩石破碎的水平波及范围不断增大,但竖直

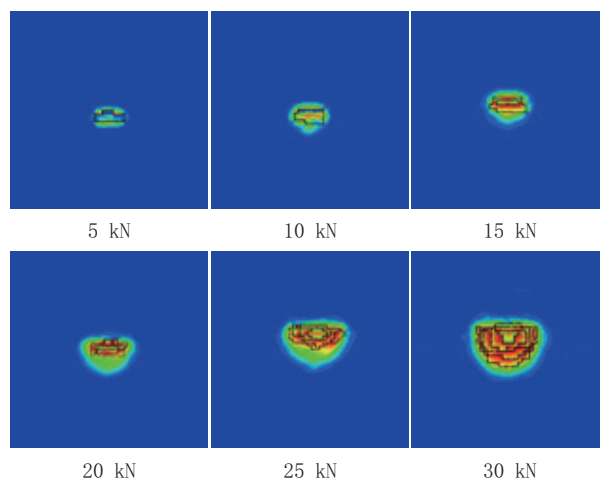


图6 横向破坏波及面积局部放大图

Fig.6 Local magnification of the area affected by the lateral damage

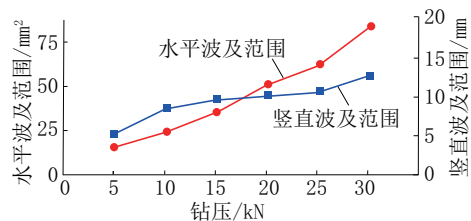


图7 不同钻压震击碎岩的影响

Fig.7 Effects of different drill pressures on crushed rock

波及距离基本不变,后续优化过程中可考虑震击机构材料特性、加工难易程度,可优选4~6 mm凸台高度,在破碎效率提高的同时获取较高质量的岩心。

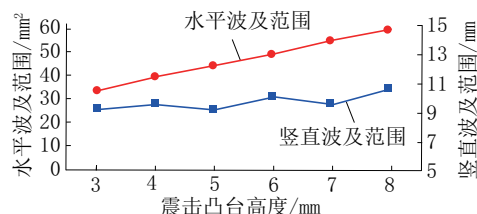


图8 不同震击凸台高度对碎岩的影响

Fig.8 Influence of different boss heights on crushed rock

3.3 震击频率对岩石破碎效果的影响

震击频率对岩石破碎效果具有一定的提升作用,在理论计算过程中得出最优震击频率为7 Hz,考虑到震击机构的可靠性及耐久性,选取0~5 Hz进行分析,如图9所示,随着震击频率的增加,相同时间内钻进的深度也随之增加,后续对螺杆震击部件进行设计过程中考虑震击机构结构的可靠性以及耐久性,可增加震击频率,提高取心钻进作业效率。

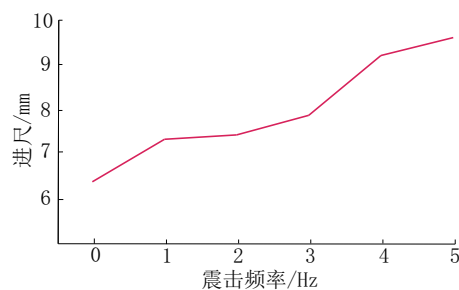


图9 不同频率碎岩的影响

Fig.9 Effects of different frequencies on crushed rock

4 样机试制及测试

该钻具最终方案制定震击部件台阶高度5 mm,震击凸台数设置为3个,并完成样机试制。如图10

所示,该钻具于2022年7月12—16日在山东东营刁口试验场进行陆地可行性试验,进行了1个回次的取样试验,在投入取心钻具后,采用25 L/s的泵排量进行测试,螺杆可正常工作,螺杆钻速70 r/min,震击频率为3.5 Hz,在15 kN钻压下,震击型中空螺杆取心钻具工作良好。



图10 震击螺杆陆地可行性试验

Fig.10 Land feasibility test of shock screw

5 结论与认识

(1)钻进取心过程中,震击型中空螺杆取心钻具破碎岩石的轴向波及范围随着钻压增大而增大,但轴向波及范围在增长到一定程度时增速减缓,钻进取心过程中为获取质量较好的岩心并提高钻进效率,需根据实际情况优选15~25 kN的钻压,以提高能量利用率。

(2)碎岩效率随着凸台高度增加而增加,但较高的凸台高度会损失一定的扭矩,同时较高的凸台高度会造成获取岩心质量的下降,本研究中认为凸台高度为4~6 mm区间,可满足震击提速需求的同时获得较好质量的岩心。

(3)碎岩效率随着震击频率的增加而增加,但震击频率的增加对震击机构寿命存在一定的影响,优化设计过程中在满足使用可靠性的基础上可适当提高震击频率,增加钻进取心效率。

参考文献(References):

- [1] 朱永宜,王稳石,张恒春,等.我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J].地质学报,2018,92(10):1971-1984.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun. et al. Implementation overview of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and technical systems of core boring[J]. Acta

- Geologica Sinica, 2018, 92(10):1971-1984.
- [2] 葛知潜. 进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展[J]. 科学通报, 2018, 63(36):3877-3882.
- JIAN Zhimin. Towards the scientific frontier of deep-sea research—Progress of China's participation in ocean drilling[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36):3877-3882.
- [3] 中国大洋钻探学术委员会. 中国加入国际大洋钻探计划的5年总结(1998-2002)[J]. 地球科学进展, 2003, 18(5):656-661.
- Science Committee of ODP (China). Chinese participation in ODP: A five-year (1998-2002) summary[J]. Advance Earth Sciences, 2003, 18(5):656-661.
- [4] 汪品先. 大洋钻探五十年:回顾与前瞻[J]. 科学通报, 2018, 63(36):3868-3876.
- WANG Pinxian. Fifty years of scientific ocean drilling: review and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36):3868-3876.
- [5] 田军, 拓守廷. 新十年科学大洋钻探——照亮地球的未来[J]. 自然杂志, 2015, 37(4):239-250.
- TIAN Jun, TUO Shouting. New decadal scientific ocean drilling: Illuminating Earth's past, present, and future[J]. Chinese Journal of Nature, 2015, 37(4):239-250.
- [6] 刘协鲁, 陈云龙, 阮海龙, 等. 海底硬岩钻探的现状与前景分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):72-78.
- LIU Xielu, CHEN Yunlong, RUAN Hailong, et al. Status and prospect of subsea hard rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):72-78.
- [7] 李福建, 王志伟, 李阳, 等. 大洋钻探船深海钻探作业模式分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(5):320-326.
- LI Fujian, WANG Zhiwei, LI Yang, et al. Technical analysis of deep-sea drilling operation modes for ocean drilling ship[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(5):320-326.
- [8] Miyazaki E, Shinmoto Y, Kyo M, et al. Development of turbine driven coring system for hard rock sampling[C]. Offshore Technology Conference, 2014.
- [9] Cornel E.J.R, Susan E.H, Tobias W.H, et al. Integrated ocean drilling program expedition 376 preliminary report[DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/376/. 2018.
- [10] Kazuyasu W. Coring technology to be applied in IODP NanTro-Scize[C]. Oceans 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, 2008.
- [11] 苏义脑. 螺杆钻具研究及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.
- SU Yinao. Research and Application of screw Drilling Tools[M]. Beijing: Petroleum industry press, 2001.
- [12] 李明谦, 黄继庆. 螺杆钻具的应用现状及未来发展建议[J]. 石油机械, 2006, 34(5):73-77.
- LI Mingqian, HUANG Jiqing. Application status and future development suggestions of screw drilling tools[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(5):73-77.
- [13] 杨达, 陈宝义, 曹宏宇, 等. 基于冲击载荷的硬质合金球齿碎岩机理研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):142-152.
- YANG Da, CHEN Baoyi, CAO Hongyu, et al. Study on rock fragmentation mechanism of carbide spherical teeth based on impact load[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):142-152.
- [14] 王占江, 张德志, 张向荣, 等. 蓝田花岗岩冲击压缩特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5):797-802.
- WANG Zhanjiang, ZHANG Dezhi, ZHANG Xiangrong, et al. Testing study on shock compression for lantian granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5):797-802.
- [15] 薛永明, 单启伟, 戴兵, 等. 不同损伤程度花岗岩在冲击荷载作用下的动态力学特性[J]. 有色金属工程, 2020, 10(3):54-61.
- XUE Yongming, SHAN Qiwei, DAI Bing, et al. Dynamic mechanical properties of granite with different damage degrees under impact loading[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(3):54-61.
- [16] 高德利. 钻柱力学若干基本问题的研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(1):24-35.
- GAO Deli. Some basic problems of elastic drillstring mechanics[J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 1995, 19(1):24-35.
- [17] 胡柳青, 李夕兵, 赵伏军. 冲击荷载作用下岩石破裂损伤的耗能规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2):2304-2308.
- HU Liuqing, LI Xibing, ZHAO Fujun. Study on energy consumption in fracture and damage of rock induced by impact loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(S2):2304-2308.
- [18] 李夕兵, 宫凤强, 高科, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2):251-260.
- LI Xibing, GONG Fengqiang, GAO Ke, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2):251-260.
- [19] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- SHI Yipin, ZHOU Yurong. Detailed Examples of ABAQUS Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

(编辑 王文)