



旋冲钻井技术研究现状与展望

张诗达, 朱勇*, 高强, 苏红

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)



张诗达

摘要: 随着中国资源勘探开发面向深层、超深层发展以及对应急钻孔救援水平保障能力的更高需求,旋冲钻井技术成为高效钻井领域的研究热点。旋冲钻井技术相较于传统旋转钻井技术,具备硬岩地层钻进效率高、钻压调控灵活、黏滑振动强度低等优势,广泛应用于深海深地资源勘探开采、应急钻孔救援等领域,具有广阔的应用前景。现阶段,在复杂岩层以及多变工况等条件下,进一步提高旋冲钻进效率、降低成本成为深井、超深井钻井过程中面临的首要任务。文中首先介绍了旋冲钻井技术的基本概念及优势;其次,综述了液动和气动2种冲击器的研制情况及结构特点;再次,讨论了高效破岩机制的研究进展和优化策略;从次,阐述了钻进效率关键影响因素方面的研究成果;最后,基于旋冲钻井技术研究成果和面临的挑战,对其未来研究方向进行了分析和展望。

关键词: 旋冲钻井; 动力方式; 钻进效率; 破岩机理; 高效破岩

中图分类号: S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2024)05-0497-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.22.0299

张诗达,朱勇,高强,等.旋冲钻井技术研究现状与展望[J].排灌机械工程学报,2024,42(5):497-507.

ZHANG Shida, ZHU Yong, GAO Qiang, et al. Research status and prospect of rotary percussion drilling technology [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2024, 42(5): 497-507. (in Chinese)

Research status and prospect of rotary percussion drilling technology

ZHANG Shida, ZHU Yong*, GAO Qiang, SU Hong

(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: With the deep and ultra-deep development of resource exploration, as well as the higher demand for emergency drilling and rescue level guarantee capabilities, rotary percussion drilling technology has become a research hotspot in the field of efficient drilling. Compared with traditional rotary drilling technology, rotary drilling technology has advantages such as high drilling efficiency, low drilling pressure, and low stick-slip vibration intensity in hard rock formations. It is widely used in the exploration and exploitation of deep-sea resources, emergency drilling rescue and other fields. At present, under complex rock formations and variable working conditions, further improving the efficiency of rotary percussion drilling and reducing the costs have become the primary tasks faced in the process of deep and ultra-deep drilling. Firstly, the basic concept and advantages of rotary drilling technology are introduced. Secondly, the development and structural characteristics of hydraulic and pneumatic impactors are reviewed. Thirdly, the research progress and optimization strategies of efficient rock breaking mechanisms are discussed. Fourthly, the research results on key influencing factors of drilling efficiency are elaborated. Finally, based on the research achievements and challenges faced by rotary percussion

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-03-02; 网络出版时间: 2024-04-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1814.TH.20240423.1114.022>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1512402); 国家自然科学基金资助项目(52175052)

第一作者简介: 张诗达(1998—),男,河北邯郸人,硕士研究生(zhangshida@stmail.ujs.edu.cn),主要从事流体传动及智能控制研究。

通信作者简介: 朱勇(1986—),男,河南信阳人,副研究员,博士生导师(zhuyong@ujs.edu.cn),主要从事流体传动及智能控制研究。

drilling technology, the future research directions are analyzed and prospected.

Key words: rotary percussion drilling; power mode; drilling efficiency; rock breaking mechanism; efficient rock breaking

国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要提出要集中资源攻关深地深海、油气勘探开发、新发突发安全风险防控等领域关键核心技术。同时,国家科技部将深地钻探装备作为“十四五”国家重点研发计划高端重大装备国产化研制的核心任务之一。推动可靠、高效、智能国产钻井装备自主研制,提升应急钻孔救援保障能力和技术水平,对于深地资源勘探开采和应急钻孔救援施工具有重要的工程应用价值,有助于中国摆脱高性能钻机进口依赖,规避技术垄断风险^[1]。

随着中国资源勘探开发规模扩大和科技水平提升,钻井对象从浅层向深层、超深层发展,钻井工程面临的主要挑战在于:地质条件复杂、高温高压、可预测性低、投资成本高、钻探安全性差等。为解决钻井工程所遇到的难题,旋冲钻井技术受到钻井工作者的青睐。早在 20 世纪 50 年代,中国原地质部勘探技术研究所开始研究旋冲钻井技术,90 年代该技术在深井、超深井钻井中运用的比例越来越大^[2]。随着技术升级与创新,旋冲钻井技术成为钻进效率最高的技术方法之一^[3]。旋冲钻井技术具有传统钻井技术不可比拟的优越性,与其他钻井技术相比,旋冲钻井技术能够有效地利用坚硬岩石脆性大、抗剪强度低、不耐冲击的弱点,具备硬岩地层钻进效率高、钻井钻压小,黏滑振动强度低等优势^[4]。旋冲钻井技术在采矿^[5]、地质勘探^[6]、水文水井^[7]、石油钻井^[8]、地热钻井^[9]、应急抢险救灾^[10]以及工程施工^[11]等领域发挥重大作用。现阶段,随着旋冲钻井技术向着深海、极地、深层等极端领域的进一步拓展,考虑到钻井过程中复杂地质条件、多变工况载荷等问题,常规旋冲钻井技术难以满足低成本、高可靠、高效率的钻井需求。因此,如何提高深井、超深井钻进效率、降低成本已成为制约旋冲钻井技术的卡脖子难题。

文中介绍旋冲钻井技术基本概念和优点,对近年来国内外学者在冲击动力方式、高效破岩机制和钻进效率影响因素 3 个方面的研究现状及成果进行综述,指出旋冲钻井技术存在的问题,展望其未来的发展趋势和方向,为旋冲钻井技术的推广应用提供参考。

1 旋冲钻井技术简介

1.1 旋冲钻井技术概念

旋冲钻井技术是一种在冲击载荷和静压旋转共同作用下致使岩石大体积脆性破碎的破岩方法。旋冲钻井技术是在旋转钻井技术的基础之上发展而来,改变了传统切削和研磨碎岩方式,提高了钻井技术对坚硬及复杂地层的适应性^[12]。旋冲钻井技术的核心是冲击器,冲击器是一种依靠压缩空气能量或高压液流能量产生周期性高频冲击载荷的孔底动力机具。在整个钻井作业中,冲击器直接安装在井底的钻头或岩心管的正上方,用于推动活塞在垂直方向上反复碰撞运动,使得钻头产生周期性高频冲击力。冲击动载能够增大钻头钻深、有效扩张岩石裂隙,造成岩石大体积破碎。同时钻头在静压旋转作用下产生扭转剪切力切削岩石,显著提高岩石硬脆性、破碎性。岩石受到钻头的钻压、钻头旋转扭矩产生的水平推力以及周期性高频冲击动载的联合作用,发生剪切、破碎、变形、切割和磨损等^[13]。在动静组合载荷作用下,旋冲钻井技术更易使岩石破碎,具有更加高效的破岩效率。

1.2 旋冲钻井技术优点

相较于传统钻井技术,旋冲钻井技术具备钻进效率高、钻头寿命长和钻井质量高等优势,因此在钻井中广泛应用,其特征表现如下^[14]:

1) 钻进效率高。旋冲钻井是以冲击载荷为主、静压旋转为辅的碎岩工艺。钻头受到周期性冲击载荷与岩石接触瞬间爆发出的集中应力。硬地层在旋冲作用下更容易发生脆性破碎,导致大体积的岩石碎裂、裂隙扩张,提高钻进效率。此外,破岩过程中产生的岩屑颗粒较大,有利于岩屑录井。

2) 钻头寿命长。在旋转钻井中,破碎岩石主要靠钻压,钻压对钻头轴承寿命和牙轮寿命有很大影响,钻压大时,钻进效率低,钻头磨损程度大。而旋冲钻井中钻压是次要的,只起到对钻头的压持作用,轻压状态下钻头的磨损较少。同时,旋冲钻井依靠较大的冲击载荷将岩石击碎,减轻了钻头高载荷工作状态。岩石在旋冲作用下发生脆性断裂,而非研磨破碎,有效避免岩石可能发生的塑性变

形,改善钻齿的受力状态,更好地保护切削齿,钻头寿命增长。

3) 钻井质量高.由于冲击器对钻头进行高频冲击,破岩时间极短,岩石不会产生岩性变化,同时低钻压又改善了钻柱的受力,减轻钻柱弯曲,在钻头上不易形成偏斜力矩,此时钻头的稳固性更高,有效避免大钻压产生的井斜和钻柱疲劳损坏以及磨损,形成的井眼质量好且规整。

2 旋冲钻井技术发展概况

2.1 冲击动力方式

冲击动力方式是影响旋冲钻进效率的关键因素,按动力方式不同可分为液动、气动、电动、气液混合及机械作动等形式.目前,世界各国研制出的冲击器类型较多,但应用最广泛的是液动和气动2种类型。

液动冲击器又称液动冲击回转钻具、液动潜孔锤,其动力介质是高压水或泥浆.20世纪初,俄国工程师B·沃尔斯基首先设计出液动冲击钻具,距今已有上百年的历史^[15].然而,由于受到单次冲击功偏低、冲击频率高、钻井深度较浅、钻井直径小等因素制约,液动冲击器尚未被广泛应用于深井钻进领域.近年来,随着钻井深度不断增加,解决钻进效率低、成本高、钻头寿命短等难题成为深井钻进工程面临的迫切任务.液动冲击器因设备成本较低、结构简单、能量利用率较高、清除岩屑能力较强而再次引起了广泛关注.现阶段,美国 Terralog 公司、AWDS 公司、Smith Tool 公司、瑞典 LKAB 公司、德国克劳斯塔工业大学、加拿大 United Diamond 公司等液动冲击器方面的研究较为深入,以各类阀式冲击器的研制作为主要研究方向^[16]。

中国从20世纪90年代中期开始,原国土资源部勘探技术研究所、大庆油田钻井研究所、吉林大学等科研单位在冲击器理论和结构方面开展了大量研究,研发了多款液动冲击器,取得了丰硕成果.国内不断有多种类型的阀式液动冲击器问世,如图1所示,同时射流式、射吸式等液动冲击器相继被研制出,且成效显著^[17]。

气动冲击器又称风动冲击器、风动潜孔锤,其动力介质是压缩空气.考虑到硬岩地层具有可钻性差、耐磨性高等特点,旋转钻井易受钻压不够、钻进效率低、钻头磨损严重等因素制约,气动冲击钻井技术出现在钻井工作者的视野中,气动冲击器在钻

井工程中逐步投入应用^[18].气动冲击器具备介质密度相对较低、介质流动速度较高、气柱静压力较小等优点.当气动冲击器工作时,较低的介质密度致使井壁受到较小的压力;较高的风速能够高效地清除沉降在井底的岩屑,且避免岩屑出现重复破碎现象^[19].因此,气动冲击器能够快速地完成冲击破碎岩石的工作任务,研究结果表明,气动冲击器比液动冲击器的钻进效率提高了2~4倍^[20]。

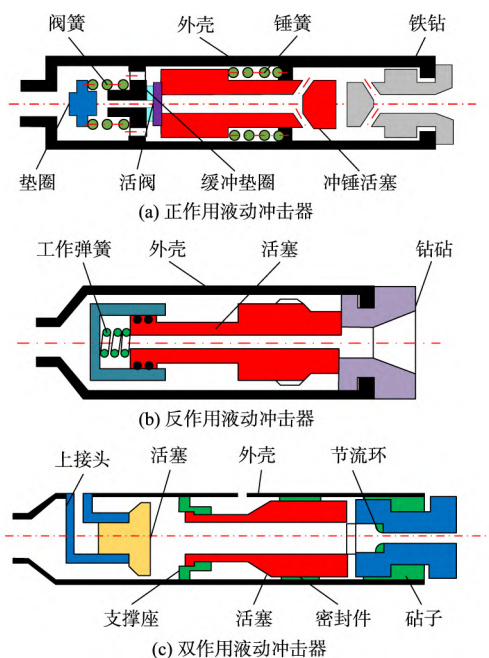


图1 液动冲击器
Fig.1 Hydraulic impactor

目前,国外气动冲击钻井技术发展较快,已经形成了以低密度冲洗介质为主要特征的一项综合性钻井新技术,成为干旱缺水和漏失地层钻探以及低压产层、地下水资源开发和工程钻井施工的主要技术方法^[21].现阶段,国外许多公司在气动冲击器方面的研究处于领先地位,其中有美国 Gerald 公司、Smith Tool 公司和 Ander-gauge 公司、加拿大 Cubex 公司等,其研制的气动冲击器、压缩机及配套钻具产品多样、型号齐全、适用范围广,在国际市场占有率方面占据领先地位^[22]。

中国从1958年开始研究气动冲击器及其钻井技术^[18].经过多年发展,嘉兴冶金机械厂、宣化风动机械厂、吉林大学等科研单位研制出多种类型、多种型号的冲击器.国内典型气动冲击器主要分为有阀式和无阀式2种,主要区别在于压缩空气在往复推动下实现的控制和调节是否由配气机构阀片进行系统控制,如图2所示。

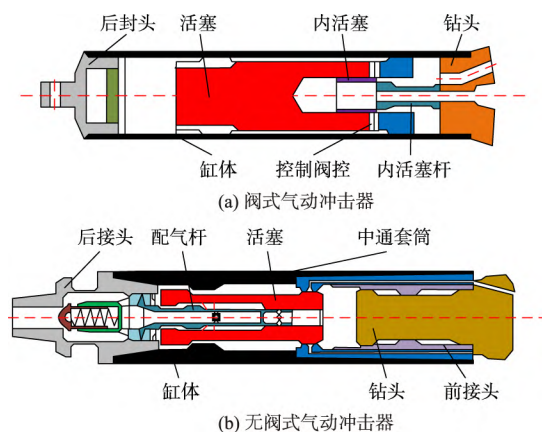


图 2 气动冲击器
Fig.2 Pneumatic impactor

近几年,气动冲击钻井技术的实验室试验和现场应用先后在新疆、四川油田和西南石油大学等地区和高校开展^[23].随着国内各科研机构的眼光越来越聚焦于气动冲击钻井技术,该项技术在理论研究和结构优化方面有了较大的突破和发展,且在深井和超深井中的应用率逐步升高^[24-25].

在旋冲钻井中,冲击器的质量优劣和水平对钻进效率影响较大.一方面,冲击器结构较为复杂,无法维持稳定的工作状态;另一方面,冲击器产生周期性高频冲击力,钻具容易受到额外振动导致疲劳失效.如果冲击器的质量跟不上施工需求或者其存在一定质量安全问题时,会导致其工作效率很低,甚至阻碍钻进工作进程.现阶段,冲击器仍然满足不了特殊工程领域长寿命、高可靠、高效率施工需求^[26].所以,有必要通过创新理论方法与攻克关键技术来提高冲击器的质量,旋冲钻井技术才能在深井、超深井硬岩钻进以及对钻进效率要求较高的应急钻孔救援等领域得到快速发展.

2.2 高效破岩机制

2.2.1 旋冲破岩方式研究

从单一静态或动态试验的岩石破裂特征关系、异同以及相应的最优加载参数开展的破岩研究已经趋于成熟^[27].例如:静态试验引用弹塑性力学的极限理论,研究压头压入岩石过程的机理;在霍普金森(split Hopkinson pressure bar, SHPB)或落锤装置上进行动态试验,研究冲击载荷下岩石的力学特性.随着研究学者们对深部开采岩石力学认识的不断深入,考虑到高频冲击载荷、深部围岩的三维高静应力、刀具与岩石之间的静摩擦及其他动力扰动等载荷条件,动静组合载荷破岩试验相关研究受到关注^[28].此外,旋冲破岩过程较为复杂,受多种因素

的影响,影响因素包括:钻压、冲击力、冲击频率、旋转扭矩、转速、钻井液密度等可控参数以及岩石的抗压强度、孔隙度、密度和地质条件等不可控参数^[29].钻井参数的研究阐明了钻井过程中的能量转换关系,反映了地层的实际破岩过程.研究人员将载荷条件、钻井参数、地质特征与破岩工具结构联系起来,开展了大量的理论分析、数值模拟以及试验研究工作,为深化旋冲钻井的破岩机理认识、优化钻具的结构设计、优化钻井参数以及提高钻进的机械钻速等方面提供理论指导和试验依据.

旋冲钻井技术的破岩研究主要表现在 2 个方面:① 鉴于破岩过程中复杂的动力学特性,旋冲破岩的研究大多基于复杂的材料模型,通过某种强度准则,精确反映材料的拉、压损伤、应变率效应、应变硬化、软化和破坏;② 钻井工具结构不同导致输出参数不同,如动态振幅、频率、波形等.在弹性力学、岩石破碎学、断裂力学等学科理论分析的基础上,研究人员通过数值模拟和试验结果获取钻进速度与钻井参数、动态应力与应变率之间的内在关系,以此揭示旋转冲击破岩机理.旋转冲击下岩石破碎试验研究成果如表 1 所示.

表 1 旋冲破岩研究成果
Tab.1 Research results of rock breaking of rotary percussion drilling

年份	研究单位及团队	研究成果
2020	中国矿业大学 LI 等 ^[30]	研究冲击功率、转速、推进力和钻头类型对钻进效率的影响规律
2020	中南大学 柳波等 ^[31]	探究破岩效率与旋转转速、冲击频率变化之间的关联关系
2020	中国石油大学 ZHANG 等 ^[32]	研究冲击载荷和切削速度对破岩性能的影响以及两者的耦合作用
2021	中国石油大学 胡思成等 ^[33]	基于 Drucker-Prager 准则,对比分析岩石力学性质在不同冲击幅值和冲击频率下的变化规律
2022	中国石油大学 刘永旺等 ^[34]	揭示不同工况下的钻压、转速、冲击力及冲击频率对钻头破岩性能的影响
2022	北京工业大学 XI 等 ^[35]	基于 Riedel Hiermaier Thoma 材料模型,研究旋转冲击动态振幅、频率和波形与地层侵入深度和侵蚀体积分数之间的关系
2022	西安工业大学 WANG 等 ^[36]	建立预测岩石三轴抗压强度、内摩擦角和黏聚力的新模型,探究钻削参数与 Hoek-Brown 准则中常数 m_i 的解析关系

2.2.2 高效破岩策略研究

在实践中,机械破岩面临的最大问题是破岩工具易磨损失效,且旋冲破碎极为困难.基于此,以岩石破碎机制研究为基础,工程界一般从 2 个方面进行攻关:一是强化破岩工具,包括对破岩工具的材质、形状和结构的改善;二是完善破岩方法,即对破碎岩石的方式进行改进.近年来,国内外高效破岩技术在理论上的发展以及高效破岩工具的设计皆取得

了不小的突破,其中 PDC (polycrystalline diamond compact, PDC) 钻头、孕镶钻头、螺杆钻具、涡轮钻具、射流辅助破岩工具等提速工具正逐步成为深井、超深井钻井提速的主力钻井装备。

1) 强化破岩工具.当钻进遇到坚硬、破碎岩层以及中等硬度的粗粒不均质岩层时,会出现钻头破岩效率低、寿命降低和易被腐蚀等问题.为弥补传统旋冲钻井技术在钻头的匹配性、地层的适应性等方面存在的局限性,基于钻头、钻井工具和井下动力钻具等常规钻井装备,研究人员针对结构与钻井工艺进行了优化创新。

当前,旋冲钻井工艺所选用的钻头通常有聚晶金刚石复合片钻头、硬质合金钻头、牙轮钻头等.PDC 钻头具备较高的钻速和耐磨性,随着钻头不断优化创新得到了广泛应用^[37].2020年,布拉德福德大学 MAZEN 等^[38]综合考虑钻头轮廓、钻头水力和岩石强度等因素,建立了 PDC 钻头性能预测数学模型来评估钻头性能和磨损.2020年,西南石油大学 YANG 等^[39]建立了 PDC 钻头复合钻进时的仿真系统,分析传动比、刀具布置和钻柱几何形状对刀具井底轨迹的影响,为钻头设计提供了参考.2021年,纽芬兰纪念大学 MOURA 等^[40]基于物理模型和数据驱动的经验模型,建立了一种钻进性能预测模型,并通过4种钻井方案,对该模型的适用性和准确性进行分析.2022年,常州大学 DENG 等^[41]利用改进钻压和水力参数位移,建立了 PDC 和牙轮钻头的旋转液压冲击比能模型,分析指出牙轮钻头结合液压冲击器的综合效率优于 PDC 钻头结合液压冲击器的综合效率.2022年,宜宾大学 YANG 等^[42]提出了一种垂直轮式 PDC 钻头结构,在变参数试验装置上对该钻头与常规 PDC 钻头进行破岩对比试验,验证了该钻头良好的提速效果。

井下动力钻具又称井底马达,作为钻进驱动系统的动力源,研究人员对电动钻具、涡轮钻具、螺杆钻具等井下动力钻具的研究主要从机械载荷下部件的疲劳和磨损、主动监测和避免有害振动、井身轨迹定向控制3个方面进行优化,以提高工具性能和钻井速率.2019年,西南石油大学田家林等^[43]基于旋冲螺杆原理设计了一种提速器,通过理论计算和现场试验,对提速器可行性及提速效果进行了验证.2019年,中国石油天然气集团西部钻探工程有限公司景英华等^[44]提出螺杆旋转配合井下冲击破岩工具的高速旋冲钻进模式,通过数值模拟和现场试验表明,增加钻头转速、冲击力和冲击频率,可以

提高破岩效率.为提高钻具对塑性岩石的破岩效率,2020年,中国石油化工股份有限公司张海平^[45]基于复合双驱钻井技术与旋冲钻井技术,设计了一种机械式旋转冲击钻井工具,实现螺杆复合钻进和高频冲击钻进双重功能,试验验证了该工具能够有效提高机械钻速.2022年,西南石油大学 TIAN 等^[46]设计了一种新型的螺杆钻具,建立了水平钻柱的动力学模型,研究钻柱系统的振动特性和工作机理.2022年,中石化中原石油工程有限公司甘心^[47]基于螺杆钻具和轴向冲击器一体化设计,研制了一种旋转切削与轴向冲击联合作用的机械式螺杆冲击器,与传统螺杆钻具相比,机械钻速提高了约20%。

2) 完善破岩方法.随着旋转冲击技术的不断发展,考虑到钻井工具常受到深井和超深井恶劣工作环境的影响,为解决钻进效率低、钻具寿命短等问题,钻井新型提速技术、新理念不断滋生,旋冲破碎岩石的方式不断得到改进和创新.通过结合高效破岩技术的辅助碎岩工具,旋冲钻井技术取得了重要进展并获得了广泛的应用.目前较为成熟的旋冲钻井技术主要有水力脉冲射流提速技术和超声波破岩提速技术、微波破岩提速技术、振动冲击提速技术和颗粒冲击提速技术等。

机械冲击与水力脉冲联合作用为硬地层钻井提速提供了一种辅助破岩技术手段.当水射流冲击岩石时,射流脉冲导致岩石疲劳断裂,产生或扩展微裂纹,裂纹在水射流压缩压力作用下,岩石开裂强度降低^[48].2017年,大庆钻探工程公司郑瑞强^[49]研制了一种机械冲击与水力脉冲相结合破岩的液动旋冲工具(如图3所示),能够有效提高破岩效率。

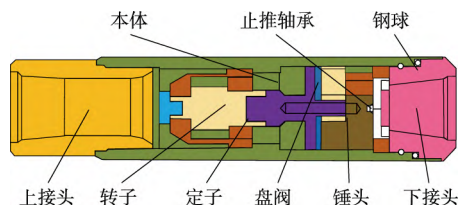


图3 液动旋冲工具结构示意图

Fig.3 Structure diagram of hydraulic rotary percussion tool

2019年,雷奥本矿业大学 STOXREITER 等^[50]通过高压流体喷射辅助旋转钻井系统进行试验,研究了流体和机械破岩过程的相互作用效果,探究不同钻井液和喷射液对钻进性能的影响,结果表明射流辅助旋转钻进可以提高破岩效率.2020年,慕尼黑工业大学 ECHT 等^[51]为改善硬质晶体岩石的钻进效率,采用一种特殊设计的海泡石钻井液的高压

流体喷射旋转钻井系统,试验证明,与没有喷射辅助的常规钻头相比,新型钻井系统的钻速提高了70%以上.2021年,斯特拉斯克莱德大学 XI 等^[52]提出了一种水力脉冲作用下岩石破裂的疲劳损伤数值模型,对疲劳裂纹和裂缝扩展进行模拟,研究表明,水力脉冲致使岩石破裂压力降低10%~18%.2021年,丹麦碳氢化合物研究和技术中心 MEDET-BEKOVA 等^[53]研究了高压射流对钻进破岩的影响,试验表明,高压射流钻孔可以改变岩石的局部机械性能,导致岩石强度性能显著减弱.2021年,切莱比大学 KARAKUL^[54]研究了不同岩石类型断裂韧性值在不同组成成分钻井液下的变化,试验表明,钻井液饱和度和化学成分对岩石断裂韧性和抗拉强度有显著的影响.

随着研究方向的扩展与科学技术的发展,新型钻井提速技术为提高深部及复杂岩性地层钻进效率提供有力支撑.2020年,西安建筑科技大学袁媛等^[55]建立初始裂纹的脆性岩石理论模型,得到微波照射参数与裂纹扩展半径的关系,验证裂纹扩展行为可以预测微波照射下岩石强度折减规律,对于指导微波辅助机械破岩工程实践具有重要借鉴.2021年,中国石油新疆油田分公司路宗羽等^[56]建立了超声波旋冲破岩模拟试验台,通过正交试验法和控制钻进参数变量法,对比分析超声波高频旋冲钻井技术与传统旋转钻井技术的提速效果.2022年,西南石油大学 ZHU 等^[57]基于粒子流代码,建立了反映花岗岩矿物成分和颗粒直径分布的数值模型,从颗粒直径、入射角和入射速度3个角度研究颗粒冲击辅助切割岩石的机理.

2.3 钻进效率影响因素

2.3.1 振动对钻进效率的影响

在钻井过程中,钻头与坚硬、脆性和节理岩石相互作用时,钻柱易产生自激振动.钻柱振动分为3种主要模式:轴向振动、横向振动(弯曲振动)和扭转振动.钻柱振动被认为是导致钻柱组件过早失效、钻头失效、井眼扩大、井眼轨迹恶化、钻头过度磨损、钻速降低、随钻测量工具精度降低和效率降低、钻柱损伤和井下事故的主要原因^[58].

钻柱振动是钻井作业中常见的、具有破坏性的现象.找出影响钻柱振动的主要因素,分析出能够有效避免因振动而导致钻井失效的方法和手段,对于提高深井钻进效率、降低钻井成本有重要意义.振动信号作为一种综合信息源,研究人员通过对振动信号进行处理,可间接获得钻孔过程和钻孔装置的实

时状态信息.2020年,印度理工学院 KUMAR 等^[59]用放置在钻机桅杆上的加速度传感器确定钻机在轴向和横向上的振动水平,通过机器振动和粗糙度指数映射来获得钻机操作方案.2020年,布德斯大学 KESSAI 等^[60]建立了岩石-钻头相互作用模型,研究了旋转钻井系统中以高频高振幅为特征的黏滑振动对钻头变形的影响.2022年,KESSAI 等^[61]基于有限元方法建立了钻柱轴向和径向的动力学模型,采用 Von Mises 公式计算模拟等效轴扭耦合应力以及雨流计数法转换应力时程数据,进一步估计旋转钻井系统工具在轴扭耦合振动下失效前的使用寿命.2022年,安卡拉阿提利姆大学 AMIR 等^[62]通过数值模拟分析3种控制方法(转速控制、钻压控制和增加钻柱底部的阻尼)对钻柱黏滑振动的影响规律,结果表明,钻压控制是缓解黏滑振动的最佳方法.

2.3.2 温度对钻进效率的影响

随着中国“双碳”目标的提出,地热能以及高原冻土独特资源逐渐被开发利用.然而在实际钻井工程中,低温钻井液与高温岩石以及钻井液与冻土之间均会发生热交换,这种传热效应会引起岩石中的热应力,进而会反作用于岩石,造成损伤.因此,有必要分析和解决环境与钻井液的传热问题,以提高钻进效率.2020年,中国石油大学 LI 等^[63]为探究钻井液温度、保温时间与冻土层的钻孔收缩规律,基于钻井液与地层传热过程中冻土力学性质的变化,建立了热-流-固耦合模型.2021年,中国石油大学 SONG 等^[64]以高温岩石与钻井液的换热过程为主要研究对象,模拟了机械冲击-传热耦合过程,结果表明,高温效应不仅降低冲击能的能量传递效率,同时会降低岩石强度.2021年,西南石油大学 ZHANG 等^[65]建立了钻井过程中井筒和地层的温度分布模型,研究钻井液密度、热导率、比热容和黏度随温度变化对钻井过程中井筒温度计算的影响.2022年,中国石油大学林日亿等^[66]基于能量守恒原理,并采用传递热阻方法建立了钻井液循环冷却过程的传热模型,进一步分析了入口温度、钻井液排量和循环时间对钻井液温度场分布的影响规律.

此外,钻井液作为钻井的“血液”,其黏度、携砂能力、润滑等性能优劣关系到钻速快慢和钻井成败.为满足低温或高温条件下钻井液的性能要求,对防漏堵漏、回收利用、井眼稳定以及钻井循环等其他钻井液方面的研究成果提出了更严苛的要求^[67-68].推动适用于不同钻井工况的钻井液的体系完善和

发展,有利于钻井工程在深海、极地、深层等极端领域的拓展,有力支撑旋冲钻井技术的推广应用。

3 结论与展望

旋冲钻井技术是一种是以冲击载荷为主、静压旋转为辅,造成岩石大体积脆性破碎的破岩方法。该方法兼具旋转钻井技术与冲击钻井技术的优势,具备更强的深井钻探能力和更高的自动化程度,被广泛应用于深海、深地、矿山、应急抢险等领域。在旋冲钻井工程中,一方面,高温高压的地质条件以及复杂多变的工况对旋冲钻井过程的可预测性、钻探安全性发起挑战;另一方面,随着钻井提速技术的优化发展、核心设备的配套研制,多功能、高集成的钻机设备被广泛投入应用,对装备的协同性与性能保持性提出了更高的要求。文中基于提高旋冲钻进效率和增强钻井设备可靠性的目的,介绍了旋冲钻井技术概念及其优势,进而对动力方式、破岩方式以及钻进效率影响因素研究进行归纳分析,在此基础上系统地讨论了高效破岩工具的研究成果、存在问题及解决措施,为旋冲钻井技术的创新发展提供了理论指导。

1) 液动冲击器由于起步较早,理论研究和应用推广都较为深入。气动冲击器起初由于动力源问题发展受限,在中国应用相对滞后。然而,与液动旋冲钻进相比,气动旋冲钻进具有独特的优点,其动力介质密度较低、气柱静压力较小,所以岩石更易被击碎且不会在钻井过程中造成重复性破碎,具有更高钻进效率。近年来,随着空压机技术和气动冲击器的创新发展,搭载气动冲击器的旋冲钻井技术有望在深井、超深井硬岩钻进以及对钻进效率要求较高的应急钻孔救援领域得到快速发展,但相关配套理论和工程应用规范仍有大量工作需要深入探索。

2) 旋冲钻进高效破岩机理经过多年理论攻关及现场实践,已逐渐趋于成熟并被用于指导实际工程,其各种配套冲击设备逐步更新换代、升级完善。但是,关于旋冲钻进驱动系统和新型驱动方式的研究还较为少见。旋冲钻进驱动系统需要同时实现往复回转与高、低频冲击的复合运动,涉及机械、电控、液压或气动等多物理场耦合作用,多物理场耦合作用下的旋冲复合驱动机理较为复杂,存在响应特性不明确、动态响应规律不确定、敏感影响因子不知晓等难题,尚需要进一步深入探究。

3) 旋冲钻进驱动系统是一种影响参数较多的

非线性耦合系统,要求能够适应复杂地质条件下未知岩层结构的变载荷工况,动态特性复杂多变,钻井过程中产生的动载荷通过钻杆传递到动力集成机构,易引起动力集成机构的振动和冲击,非线性振动危害严重,存在耦合振动诱因难以确定、振动形成机理探究困难等难题,有待进一步深入研究。

4) 旋冲钻井过程涉及不稳定的地层状况、多种动力源控制以及钻机启停控制等多种钻井工况。在不同工况下,钻井装备受到蠕变载荷、冲击载荷、交变载荷等多种复杂载荷作用,存在载荷作用位置难以确定、应力分布规律和变形分布规律不明确等难题。在极端工况下,关键装备可能出现刚度退化和变形增大现象,致使装备整体失效。为避免出现应力超过材料的疲劳极限情况,基于受载应力应变规律,探究关键装备疲劳失效规律尤为重要,尚需要进一步深入研究。

5) 旋冲钻井系统具备多种功能的同时,其非线性耦合动力学模型不断复杂化,影响钻井系统动态特性研究的计算精确度和效率。为更好地模拟系统的动态特性,可基于不同动力学方法,构建岩石-钻柱-井壁-钻柱-钻井液等钻井系统的简化与精细化动力学模型,进而实现钻井系统的优化设计。

6) 在钻井监测方面,近年来,国内外学者对于岩石性质与钻井参数之间的关系进行了大量卓有成效的研究,为实际钻井参数控制提供了理论指导。随着钻井深度不断增加,由于地质环境愈加恶劣,为掌握地下真实可靠的地质情况,常规钻井取心费时费力,极大影响钻进效率。因而,如何能够实时、快速、准确地监测岩石的结构成分和岩层划分状况是钻井过程仍需要关注的问题。

目前旋冲钻井技术研究在相关配套理论和工程应用规范、旋冲复合驱动机理、动力机构耦合振动机制等方面有待进一步深入探索。

参考文献(References)

- [1] 汪海阁,黄洪春,毕文欣,等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil and gas well drilling technologies: progress and prospect [J]. Natural gas industry, 2021, 41(8): 163-177. (in Chinese)
- [2] 郭彤楼. 元坝气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(6): 748-760.

- GUO Tonglou. Gas accumulation conditions and key technologies of exploration and development in Yuanba gas field [J]. *Acta petrolei sinica*, 2019, 40(6): 748-760. (in Chinese)
- [3] LEI Qun, XU Yun, YANG Zhanwei, et al. Progress and development directions of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs [J]. *Petroleum exploration and development*, 2021, 48(1): 221-231.
- [4] KARPOV V N, PETREEV A M. Determination of efficient rotary percussive drilling techniques for strong rocks [J]. *Journal of mining science*, 2021, 57(3): 447-458.
- [5] DERDOUR F Z, KEZZAR M, KHOCHEMANE L. Optimization of penetration rate in rotary percussive drilling using two techniques: Taguchi analysis and response surface methodology (RMS) [J]. *Powder technology*, 2018, 339: 846-853.
- [6] 李华江, 张法星, 何平, 等. 切向进流旋流竖井涡室最高水位及其位置计算方法 [J]. *水利水电技术*, 2022, 53(12): 72-80.
- BO Huajiang, ZHANG Faxing, HE Ping, et al. Calculation method for the maximum value of the water level and location in the cyclone shaft with tangential intake [J]. *Water resources and hydropower engineering*, 2022, 53(12): 72-80. (in Chinese)
- [7] 胡晓东, 易普康, 丘阳, 等. 基于井场实测数据水击压力波波速特征分析 [J]. *水利水电技术*, 2023, 54(5): 95-104.
- HU Xiaodong, YI Pukang, QIU Yang, et al. Characteristic analysis of water hammer pressure wave velocity in field data [J]. *Water resources and hydropower engineering*, 2023, 54(5): 95-104. (in Chinese)
- [8] 叶金龙, 沈建文, 吴玉君, 等. 川深1井超深井钻井提速关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 121-126.
- YE Jinlong, SHEN Jianwen, WU Yujun, et al. Key technologies of drilling penetration rate improvement in ultra-deep well Chuanshen-1 [J]. *Petroleum drilling techniques*, 2019, 47(3): 121-126. (in Chinese)
- [9] 思娜, 叶海超, 牛新明, 等. 油气钻井技术在干热岩开发中的适应性分析 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(4): 35-40.
- SI Na, YE Haichao, NIU Xinming, et al. Analysis on the adaptability of oil and gas drilling technology in development for hot dry rocks [J]. *Petroleum drilling techniques*, 2019, 47(4): 35-40. (in Chinese)
- [10] 王四一. 冲击载荷侵入软岩特征分析 [J]. *煤矿安全*, 2022, 53(8): 62-68.
- WANG Siyi. Analysis on intrusion characteristics of soft rock under impact load [J]. *Safety in coal mines*, 2022, 53(8): 62-68. (in Chinese)
- [11] GUO Chaoke, YI Jingang. Modeling and experiments of rotary percussive drilling for robotic civil infrastructure rehabilitation [J]. *IFAC-papers on line*, 2017, 50(1): 9784-9789.
- [12] 宋泓钢. 液动冲击器旋冲钻井技术现状及发展趋势 [J]. *石油化工应用*, 2021, 40(12): 1-7.
- SONG Honggang. Present situation and development trend of rotary percussion drilling technology with hydraulic impactor [J]. *Petrochemical industry application*, 2021, 40(12): 1-7. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] AFEBU K O, LIU Y, PAPTATHEOU E. Machine learning-based rock characterisation models for rotary-percussive drilling [J]. *Nonlinear dynamics*, 2022, 109(4): 2525-2545.
- [15] 张伟, 黄开钊, 卢春华. 新型重力式冲击器工作原理与设计的研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(6): 176-181.
- ZHANG Wei, HUANG Kaizhao, LU Chunhua. Study on the working mechanism and design of a new type of gravity impact hammer [J]. *Coal geology and exploration*, 2017, 45(6): 176-181. (in Chinese)
- [16] 付加胜, 李根生, 田守增, 等. 液动冲击钻井技术发展与应用现状 [J]. *石油机械*, 2014, 42(6): 1-6.
- FU Jiasheng, LI Gensheng, TIAN Shouceng, et al. The current development and application of hydraulic percussion drilling technology [J]. *China petroleum machinery*, 2014, 42(6): 1-6. (in Chinese)
- [17] 郭占正, 徐立友, 孙冬梅, 等. 液压机械无级变速器动力连续换挡过程建模与仿真 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(8): 435-442.
- GUO Zhanzheng, XU Liyou, SUN Dongmei, et al. Modeling and simulation of continuous power shift process of hydro-mechanical continuously variable transmission [J]. *Transactions of the CSAM*, 2022, 53(8): 435-442. (in Chinese)
- [18] 董雪, 王立. 文丘里型导管对潮流涡轮机作用荷载和转速的影响 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(6): 38-43.
- DONG Xue, WANG Li. Effects of Venturi-type duct on imposed load and rotational speed of tidal current turbines [J]. *Advances in science and technology of*

- water resources, 2023, 43(6): 38-43. (in Chinese)
- [19] 张晨, 赵钰, 吴何洪, 等. 潜孔冲击器结构性能参数优化研究[J]. 石油机械, 2019, 47(11): 32-37.
ZHANG Chen, ZHAO Yu, WU Hehong, et al. Optimization of structural parameters of DTH hammer [J]. China petroleum machinery, 2019, 47(11): 32-37. (in Chinese)
- [20] 李必智, 张强, 赵江鹏, 等. 空气冲击钻在大口径采动井施工技术研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(1): 9-12.
LI Bizhi, ZHANG Qiang, ZHAO Jiangpeng, et al. Research on construction technology of air percussion drilling in large-diameter mining well [J]. Coal technology, 2021, 40(1): 9-12. (in Chinese)
- [21] 袁新梅, 孙起昱, 王爱芳, 等. 旋冲钻井技术及装备的发展现状和展望[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(3): 7-10.
YUAN Xinmei, SUN Qiyu, WANG Aifang, et al. Presentstate and perspectives about the technique of rotating and percussive drilling [J]. Oil field machinery, 2007, 36(3): 7-10. (in Chinese)
- [22] 潘国军, 吴鑫焱, 罗显文, 等. 油气混输泵纯气输送下倾斜端面上游泵送机械密封稳态性能[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(12): 1203-1209.
PAN Guojun, WU Xinyi, LUO Xianwen, et al. Steady state performance of upstream pumping mechanical seal with tilt seal face of oil-gas mixture pump in gas transportation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2021, 39(12): 1203-1209. (in Chinese)
- [23] 张维民. 中国潜孔冲击器的发展历程[J]. 凿岩机械气动工具, 2015(4): 12-21.
ZHANG Weimin. The development course of DTH hammer in China [J]. Rock drilling mechanical and pneumatic tools, 2015(4): 12-21. (in Chinese)
- [24] 沈南北, 缴健, 龚政, 等. 空气射流动力学特征与冲沙作用试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 56-62.
SHEN Nanbei, JIAO Jian, GONG Zheng, et al. Experimental study on dynamic characteristics and sand flushing of aerated jet [J]. Advances in science and technology of water resources, 2023, 43(1): 56-62. (in Chinese)
- [25] 芦三强, 乔时雨. 跌流竖井结构优化及其气压特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 24-29.
LU Sanqiang, QIAO Shiyu. Structure optimization and numerical simulation of air pressure characteristics of a plunging flow dropshaft [J]. Advances in science and technology of water resources, 2023, 43(6): 24-29. (in Chinese)
- [26] ZHANG Heng, NI Hongjian, HUANG Bin, et al. Research on discrete element modeling and numerical simulation of cutting rock behavior under impact load [J]. Energy science and engineering, 2022, 10: 2420-2436.
- [27] 叶绍干, 葛纪刚, 侯亮, 等. 基于遗传算法的轴向柱塞泵配流盘密封环结构多目标优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 441-450.
YE Shaogan, GE Jigang, HOU Liang, et al. Multi-objective optimization of cylinder/valve-plate sealing ring in axial piston pump based on genetic algorithm [J]. Transactions of the CSAM, 2022, 53(1): 441-450. (in Chinese)
- [28] 李夕兵, 宫凤强. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 846-866.
LI Xibing, GONG Fengqiang. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 846-866. (in Chinese)
- [29] OPARIN V N, TIMONIN V V, KARPOV V N, et al. Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary-percussion drilling technology improvement [J]. Journal of mining science, 2017, 53(6): 1043-1064.
- [30] LI Hongsheng, LIU Songyong, CHANG Huanhuan. Experimental research on the influence of working parameters on the drilling efficiency [J]. Tunnelling and underground space technology, 2020, 95: 103174.
- [31] 柳波, 倪鹏, 谭孝刚, 等. 钻机旋冲钻孔过程中破岩效率的研究[J]. 机电工程, 2020, 37(7): 801-805.
LIU Bo, NI Peng, TAN Xiaogang, et al. Research on rock breaking efficiency of rotary punching drilling rig [J]. Journal of mechanical and electrical engineering, 2020, 37(7): 801-805. (in Chinese)
- [32] ZHANG Heng, NI Hongjian, WANG Zizhen, et al. Optimization and application study on targeted formation ROP enhancement with impact drilling modes based on clustering characteristics of logging [J]. Energy reports, 2020, 6: 2903-2912.
- [33] 胡思成, 管志川, 路保平, 等. 锥形齿旋冲及扭冲的破岩过程与破岩效率分析[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 87-93.
HU Sicheng, GUAN Zhichuan, LU Baoping, et al. Rock breaking process and efficiency analysis of conical cutting teeth under rotary and torsional impact [J]. Petroleum drilling techniques, 2021, 49(3): 87-93. (in Chinese)

- [34] 刘永旺, 魏森, 管志川, 等. 旋转冲击钻井方法硬岩破岩钻进特性的实验研究 [J]. 实验技术与管理, 2022, 39(5): 44-48.
LIU Yongwang, WEI Sen, GUAN Zhichuan, et al. Experimental study on drilling characteristics of hard rock breaking by rotary percussion drilling method [J]. Experimental technology and management, 2022, 39(5): 44-48. (in Chinese)
- [35] XI Yan, WANG Wei, FAN Lifang, et al. Experimental and numerical investigations on rock-breaking mechanism of rotary percussion drilling with a single PDC cutter [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2022, 208: 109227.
- [36] WANG Haoteng, HE Mingming, ZHANG Zhiqiang, et al. Determination of the constant m_i in the Hoek-Brown criterion of rock based on drilling parameters [J]. International journal of mining science and technology, 2022, 32: 747-759.
- [37] HUANG Kuilin, YANG Yingxin, LI Gao, et al. Torsion and vibration reduction mechanism of roller PDC hybrid bit [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2022, 208: 109491.
- [38] MAZEN A Z, MUJTABA I M, HASSANPOUR A, et al. Mathematical modelling of performance and wear prediction of PDC drill bits: impact of bit profile, bit hydraulic, and rock strength [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2020, 188: 106849.
- [39] YANG Yingxi, YANG Yan, REN Haitao, et al. Research on the working mechanism of the PDC drill bit in compound drilling [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2020, 185: 106647.
- [40] MOURA J D, XIAO Yingjian, YANG Jianming, et al. An empirical model for the drilling performance prediction for roller cone drill bits [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2021, 204: 108791.
- [41] DENG Song, YANG Shuo, CHI Yudie, et al. Bit optimization method for rotary impact drilling based on specific energy model [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2022, 218: 110977.
- [42] YANG Yan, YANG Yingxin, REN Haitao, et al. Experimental study on motion and mechanical characteristics of the vertical wheel in the rock-breaking process [J]. Petroleum science, 2022, 305: 231.
- [43] 田家林, 杨应林, 朱志, 等. 基于旋转螺杆提速器的井下动力特性 [J]. 石油学报, 2019, 40(2): 224-231.
TIAN Jialin, YANG Yinglin, ZHU Zhi, et al. Downhole dynamic characteristics of an actuator based on rotary screw [J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(2): 224-231. (in Chinese)
- [44] 景英华, 袁鑫伟, 姜磊, 等. 高速旋转冲击钻井破岩数值模拟及现场试验 [J]. 中国石油大学学报, 2019, 43(1): 75-80.
JING Yinghua, YUAN Xinwei, JIANG Lei, et al. Numerical simulation and field experiment on rock breaking in high speed rotary percussion drilling [J]. Journal of China University of Petroleum, 2019, 43(1): 75-80. (in Chinese)
- [45] 张海平. 机械式旋转冲击钻井工具结构设计与试验 [J]. 石油机械, 2020, 48(12): 9-14.
ZHANG Haiping. Structural design and test of mechanical rotary percussion drilling tool [J]. China petroleum machinery, 2020, 48(12): 9-14. (in Chinese)
- [46] TIAN Jialin, GUO Linpeng, SONG Haolin, et al. Characteristic analysis and experimental study of rotary impact screw drilling tool [J]. Petroleum science and technology, 2022, 40: 1-21.
- [47] 甘心. 页岩气钻井用机械式螺杆冲击器结构设计与应用 [J]. 吉林大学学报, 2022, 52(4): 1215-1222.
GAN Xin. Structural design and application of mechanical PDM impactor used in shale gas wells [J]. Journal of Jilin University, 2022, 52(4): 1215-1222. (in Chinese)
- [48] MMKABC E, XRL B, ZQWAD E, et al. Mechanical properties, failure behaviors and permeability evolutions of fissured rock-like materials under coupled hydro-mechanical unloading [J]. Engineering fracture mechanics, 2021, 254: 107929.
- [49] 郑瑞强. 液动旋冲工具的研制 [J]. 石油机械, 2017, 45(1): 30-33.
ZHENG Ruiqiang. Development of hydraulic rotary impact tool [J]. China petroleum machinery, 2017, 45(1): 30-33. (in Chinese)
- [50] STOXREITER T, PORTWOOD G, GERBAUD L, et al. Full-scale experimental investigation of the performance of a jet-assisted rotary drilling system in crystalline rock [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2019, 115: 87-98.
- [51] ECHT T, STOXREITER T, PLANK J. Impact of the drilling fluid system on the effectiveness of a high pressure jetting assisted rotary drilling system [J]. Heliyon, 2020, 6: e04179.
- [52] XI Xun, YANG Shangdong, MCDERMOTT C I, et al. Modelling rock fracture induced by hydraulic pulses [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2021, 54(8): 3977-3994.

- [53] MEDETBEKOVA M, CHRISTENSEN F, AMOUR F, et al. High pressure jet drilling effect in chalk and alteration of local geomechanics properties surrounding the radial hole [J]. *International journal of mechanical sciences*, 2021, 191: 105954.
- [54] KARAKUL H. Investigation of fracture properties of rocks under drilling fluid saturation [J]. *Environmental earth sciences*, 2021, 80(15): 1-16.
- [55] 袁媛, 邵珠山. 微波照射下脆性岩石裂纹扩展临界条件及断裂过程研究 [J]. *应用力学学报*, 2020, 37(5): 2112-2119.
YUAN Yuan, SHAO Zhushan. Study on critical conditions and fracture process of brittle rock under microwave irradiation [J]. *Chinese journal of applied mechanics*, 2020, 37(5): 2112-2119. (in Chinese)
- [56] 路宗羽, 郑珺升, 蒋振新, 等. 超声波高频旋冲钻井技术破岩效果试验研究 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(2): 20-25.
LU Zongyu, ZHENG Junsheng, JIANG Zhenxin, et al. An experimental study on rock breaking efficiency with ultrasonic high-frequency rotary-percussive drilling technology [J]. *Petroleum drilling techniques*, 2021, 49(2): 20-25. (in Chinese)
- [57] ZHU Xiaohua, HE Ling, LIU Weiji, et al. The mechanism of particle impact-assisted rock cutting in hard brittle granite [J]. *Arabian journal for science and engineering*, 2022, 47: 11915-11928.
- [58] MOHARRAMI M J, MARTINS C, SHIRI H. Nonlinear integrated dynamic analysis of drill strings under stick-slip vibration [J]. *Applied ocean research*, 2021, 108: 102521.
- [59] KUMAR R, MURTHY V M S R, KUMARASWAMIDHAS L A. Performance analysis of rotary blast-hole drills through machine vibration and coarseness index mapping—a novel approach [J]. *Measurement*, 2020, 165(8): 108148.
- [60] KESSAI I, BENAMMAR S, DOGHMANE M Z, et al. Drillbit deformations in rotary drilling systems under large-amplitude stick-slip vibrations [J]. *Applied sciences*, 2020, 10(18): 1-17.
- [61] KESSAI I, BENAMMAR S, DOGHMANE M Z. Dynamic failure analysis and lifetime estimation of tool-string in rotary drilling system under Torsional-Axial coupled vibrations [J]. *Engineering failure analysis*, 2022, 134: 106037.
- [62] AMIR N S, KUTLUK B A, MEHMET E. Modelling and controlling of drill string stick slip vibrations in an oil well drilling rig [J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2022, 216: 110759.
- [63] LI Yang, CHENG Yuanfeng, YAN Chuanliang, et al. Influence of drilling fluid temperature on borehole shrinkage during drilling operation in cold region [J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2020, 190: 107050.
- [64] SONG Hengyu, SHI Huaizhong, CHEN Zhenliang, et al. Numerical study on impact energy transfer and rock damage mechanism in percussive drilling based on high temperature hard rocks [J]. *Geothermics*, 2021, 96: 102215.
- [65] ZHANG Zheng, XIONG Youming, PU Hui, et al. Effect of the variations of thermophysical properties of drilling fluids with temperature on wellbore temperature calculation during drilling [J]. *Energy*, 2021, 214: 119055.
- [66] 林日亿, 于程浩, 杨恒林, 等. 超深水平井钻井液循环温度场模拟计算与分析 [J]. *石油与天然气化工*, 2022, 51(3): 91-97.
LIN Riyi, YU Chenghao, YANG Henglin, et al. Temperature field simulation and analysis of drilling fluid circulation in super deep horizontal wells [J]. *Oil and gas chemical industry*, 2022, 51(3): 91-97. (in Chinese)
- [67] ZHANG Zheng, WEI Yongqi, XIONG Youming, et al. Influence of the location of drilling fluid loss on wellbore temperature distribution during drilling [J]. *Energy*, 2022, 244: 123031.
- [68] 孙金声, 王宗轮, 刘敬平, 等. 南极地区低温钻井液研究进展与发展方向 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(5): 1005-1011.
SUN Jinsheng, WANG Zonglun, LIU Jingping, et al. Research progress and development direction of low-temperature drilling fluid for Antarctic region [J]. *Petroleum exploration and development*, 2022, 49(5): 1005-1011. (in Chinese)

(责任编辑 谈国鹏)