

钻井利器故事之“液动潜孔锤”

王跃伟^{1,2,3,4}, 王文^{1,2,3,4}, 刘治⁵, 梁健^{1,2,3,4}, 高鹏举^{1,2,3,4},
薛倩冰^{1,2,3,4*}, 齐力强^{1,2,3,4}, 梁楠^{1,2,3,4}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000;
3. 中国地质学会定向钻井工程技术创新基地, 河北廊坊 065000;
4. 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 河北廊坊 065000;
5. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004)

摘要: 在各种钻探方法中, 液动冲击回转钻进具有效率高、质量好、回次长、事故少、成本低等优点, 而液动潜孔锤又是液动冲击回转钻进的技术核心。本文梳理了各种液动潜孔锤的结构特点及其与绳索取心钻具、孔底动力钻具相结合衍生的各种钻具, 简要介绍了这一技术的典型应用案例, 总结归纳了其下一步发展方向和技术难点, 以期普及液动锤的应用, 促进液动冲击回转钻进技术的进步。

关键词: 地质勘探; 岩心钻探; 冲击回转钻进; 液动潜孔锤; 绳索取心液动锤

中图分类号: P634 **文献标识码:** C **文章编号:** 2096-9686(2024)05-0169-07

The story of a drilling weapon: Hydraulic DTH hammer

WANG Yuewei^{1,2,3,4}, WANG Wen^{1,2,3,4}, LIU Zhi⁵, LIANG Jian^{1,2,3,4}, GAO Pengju^{1,2,3,4},
XUE Qianbing^{1,2,3,4*}, QI Liqiang^{1,2,3,4}, LIANG Nan^{1,2,3,4}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Langfang Hebei 065000, China;
3. Innovation Base for Directional Drilling Engineering, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China;
4. Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China,
Langfang Hebei 065000, China;
5. Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China)

Abstract: Among various drilling methods, hydraulic impact rotary drilling is characterized by its high efficiency, good quality, long cycle times, few accidents, and low costs. The hydraulic down-hole hammer is the technological core of hydraulic impact rotary drilling. This article organizes the structural features of various hydraulic down-hole hammers and explores the various drilling tools which derived from the combination of hydraulic down-hole hammers, wireline coring and downhole motor drilling tools. The typical application cases of this technology are briefly introduced, and the the future development direction and technical challenges are also summarized in order to popularizing the application and promoting the advancement of hydraulic impact rotary drilling technology.

Key words: geological exploration; core drilling; percussive rotary drilling; hydraulic DTH hammer; wire-line coring hydro-hammer

收稿日期: 2024-04-07; 修回日期: 2024-07-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.05.021

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“南方地区战略性矿产快速查证与技术支持”(编号: DD20230348)、“紧缺战略性矿产高效勘查智能化钻探技术支撑”(编号: DD20240121)

第一作者: 王跃伟, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 从事液动冲击回转钻探技术、取心钻具等地质钻探技术研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, yourvie@126.com。

通信作者: 薛倩冰, 女, 汉族, 1987年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探工艺技术与地质调查项目管理, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 913311690@qq.com。

引用格式: 王跃伟, 王文, 刘治, 等. 钻井利器故事之“液动潜孔锤”[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 169-175.

WANG Yuewei, WANG Wen, LIU Zhi, et al. The story of a drilling weapon: Hydraulic DTH hammer[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 169-175.

0 引言

钻探是人类直接获取地下实物信息的唯一技术方法^[1],广泛服务于资源能源勘探开发、水文地质工程地质勘查、大陆大洋科学钻探等领域。根据破碎岩石的方法不同,通常分为机械碎岩法、物理碎岩法和化学碎岩法等^[2]。物理碎岩法和化学碎岩法目前大多处于试验研究阶段,真正在生产实践中得到广泛应用的还是机械碎岩法。机械碎岩法中又根据钻头与地层的作用形式不同,分为冲击钻进、回转钻进以及将上述两种方法结合在一起的冲击回转钻进。目前在生产实践中使用最多的还是回转钻进(图1a)。

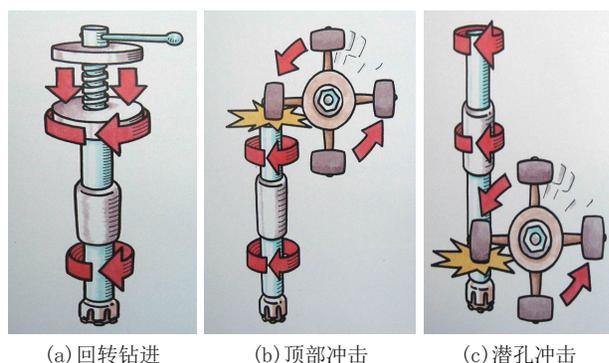


图1 回转钻进与冲击回转钻进示意

Fig.1 Schematic diagram of rotary drilling and percussive-rotary drilling

所谓冲击回转钻进,就是在回转钻进的基础上给钻头施加具有一定频率和能量的冲击载荷以提高钻进效率的钻进方法。施加冲击载荷的装置可以放在地面(图1b),也可以放在井下(图1c),但考虑随孔深增加能量损失也越来越大,通常将冲击载荷发生器放在井底,连接在钻头或岩心管的上部,该冲击载荷发生器称为潜孔锤,也叫潜孔冲击器。

潜孔锤是冲击回转钻进技术的核心,根据驱动潜孔锤的介质或方法不同,又可将冲击回转钻进分为液动冲击回转钻进、气动冲击回转钻进以及电动冲击回转钻进等^[3],相应的驱动工具则分别称为液动潜孔锤(或液动冲击器,简称液动锤)、风动潜孔锤(或气动冲击器,简称气动锤)及电动潜孔锤(或电动冲击器),目前受限于电池能量密度等因素,电动冲击器仅处于试验研究阶段。

使用液动锤钻进无需额外配套其他设备,基本不受背压影响,可适用深孔钻进,目前的使用深度

已达5000 m以深;而使用气动锤则需额外配套可提供较大压力的空压机,加上地下水压力的影响,使用深度通常只有几百米,如果在更深井使用,则需要成套的空压站,要花费高昂的设备费和动力费。

1 液动潜孔锤的发展历程

1.1 国外发展历程

19世纪60年代欧洲就已经开始了液动冲击回转钻进技术的研究,1887年德国工程师沃·布什曼得到英国授予的液动冲击钻井法专利权,标志着液动冲击回转钻进技术诞生。1900~1905年俄国工程师B.沃尔斯基在前人工作的基础上设计出几种用于石油钻井的液动潜孔锤,进行了关于液动锤的理论研究工作。到20世纪50年代,苏联、美国、加拿大等国都研制出了自己的液动锤,但并未获得广泛的推广和应用^[4]。

20世纪60年代初,美国潘美石油公司(Pan American Petroleum Co)成功研制出两种规格的液动锤并进行一些钻井试验。同期苏联钻井技术研究院成功研制出BBO-5A型液动锤,配 $\varnothing 145$ mm钻头在石油钻井中创下了2200 m的纪录。之后美国基本放弃了液动锤方面的研究,转而致力于气动潜孔锤的研究,并取得了一系列成果。苏联则继续坚持液动锤的研究,到70年代其用于岩心钻探的Г-7型和Г-9型液动锤已比较成熟,基本代表了当时的国际最高水平,但由于是具有弹簧的正作用液动锤,存在寿命短、参数调整繁琐等缺点^[5]。20世纪70年代日本也进行了液动冲击钻进技术研究,利根公司成功研制出WH-120N型气液双作用液动锤。

1.2 国内发展历程

我国液动潜孔锤研究大致可分为3个阶段。

1.2.1 起步研究阶段(20世纪50年代末—60年代)

国家“二五”时期钻探工作量大增,其中坚硬地层进尺占据一半,提高坚硬地层机械钻速成为突出问题。勘探技术研究所最早于1958年开始进行液动潜孔锤研究,1964年研制的YZ-89型液动潜孔锤在北京周口店进行试验,1966年在湖南省地质局408队某多金属矿试用,最大钻孔深度430 m,试验进尺400余米,在7~8级岩石中钻速明显提高。

1.2.2 蓬勃发展阶段(20世纪70—90年代)

在这一时期,包括地质、冶金、石油等多行业的高校、科研院所及生产单位均投入到液动潜孔锤的

研究中,代表性的有勘探技术研究所的YZ正作用系列、YS双作用系列、YQ复合作用系列以及SSC绳索取心液动锤系列,长春地质学院的SC系列射流式液动锤,冶金部探矿技术研究所的TK-A系列正作用液动锤,核工业华东地勘局264大队研制的Ye-2型双作用液动锤,河北省地质局综合研究队研制的ZF-56型和ZS-75型液动锤,云南省地质局研制的SX-54Ⅲ型射吸式液动锤等,都得到了一定的推广和应用^[6-9]。

1982年地质部还专门组织了液动潜孔锤选型会,确定勘探技术所的YZ-54-Ⅱ型正作用、长春地质学院(现吉林大学)的SC-56型射流式、河北综合队的ZF-56型正作用液动锤为部支持技术进行扩大研究和生产试验,并多次举办液动冲击回转钻进技术培训班,相应技术产品迅速被施工单位认可,并在生产中取得良好的应用效果。

1.2.3 广泛应用阶段(20世纪90年代后期至现在)

勘探技术研究所于1997年开始进行YZX127型液动锤的研究,提出一种新型的双喷嘴复合结构,采用容积式工作原理,能量利用率大幅度提高,可以输出较大的冲击功,为在生产中应用打下良好基础^[10]。长春地质学院(现吉林大学)则在其独创的射流式液动锤的基础上继续深耕和优化,其KSC127型射流式液动锤与勘探技术所的YZX127型液动锤一起在中国大陆科学钻探中得到成功应用,并成为该工程的特色技术。

勘探技术所在YZX127型液动锤的基础上进行多年的持续优化,形成了系列化,目前YZX系列液动锤可覆盖 $\varnothing 54\sim\varnothing 311$ mm口径范围,SYZX系列绳索取心液动锤可覆盖 $\varnothing 54\sim\varnothing 216$ mm口径范围,在地质、煤炭、冶金、核工业等多领域取得了广泛的应用,近年来累计推广2600余套,累计进尺超过500万m,创造社会效益2亿元以上。

吉林大学在其射流式液动锤的基础上开展了大量仿真电算和理论研究,致力于开展高能射流式液动潜孔锤^[11-14]。西安石油大学等单位在射吸式液动锤基础上开展了大量研究,但受限于钻具寿命无法与钻头寿命匹配,尚未大规模推广应用。

2 液动潜孔锤有哪些优势?

如前所述,液动潜孔锤是液动冲击回转钻进的核心机具,由泥浆泵输出的高压冲洗液驱动其内部

的冲锤高频往复运动冲击铁砧,并将能量以冲击功的形式传递给钻头,加速碎岩。因此,采用液动冲击回转钻进具有以下优势。

2.1 钻进效率高

使用液动潜孔锤可以提高钻进效率,主要有以下几方面原因:首先,冲击载荷作用时间极短,岩石中的接触应力可在瞬间达到很大值,有利于岩石中裂隙扩展形成体积破碎,提高碎岩速度,另外产生冲击的同时钻头也一直承受轴向压力,改善了冲击功的传递条件,更加强了冲击效果。其次,高频冲击作用迫使岩石内部分子产生振荡,降低岩石强度的同时加剧了疲劳破碎。最后,使用液动潜孔锤往往需要更大的排量,高速冲洗液在冲刷岩石的同时也提高了孔底的清洗效果,减少重复破碎。

2.2 钻孔质量好

采用液动潜孔锤钻进往往需要更小的钻压和转速,降低了钻孔弯曲的强度。因此,采用液动潜孔锤钻进可形成体积破碎,与纯回转钻进的旋转式连续切削相比,钻头切削刃上阻力差更小,减少钻头产生的附加力矩。在钻进容易发生钻孔弯曲的软硬互层时,硬岩中应力集中程度更高,减少钻头上的钻速差和倾倒地力矩,降低钻孔弯曲强度^[15]。

2.3 回次进尺长

在取心钻进时,液动潜孔锤往往加在岩心管上部,在破碎地层进行取心钻进时,一旦发生岩心堵塞,液动潜孔锤产生的高频冲击就可直接作用于岩心管上,实现解堵的效果,提高回次进尺长度。

2.4 孔内事故少

与常规回转钻进相比,采用液动潜孔锤钻进需要较小的钻压和转速、较大的泵量,孔内冲洗干净,管材磨损较小,大大减少发生钻具折断、烧钻、埋钻、卡钻等孔内事故的风险。

2.5 施工成本低

采用液动潜孔锤钻进效率高,回次进尺长,纯钻进时间利用率高,施工周期短,相应消耗材料和人工投入也就少,降低了施工成本。

3 液动潜孔锤有哪些种类?

液动潜孔锤按结构原理不同,可分为单作用液动锤和双作用液动锤两大类,其中单作用液动锤又分为正作用液动锤和反作用液动锤,双作用液动锤往往被分为阀式双作用液动锤、射流式液动锤、射

吸式液动锤以及复合式液动锤(所谓复合式,就是将前述3种作用原理中的2种或以上应用到一起的双作用液动锤),如图2所示。

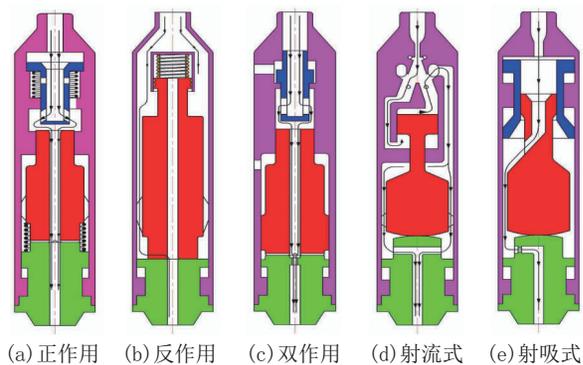


图2 五种液动锤结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of five types of hydraulic hammers

在液动潜孔锤的发展过程中,为了更好的服务于取心钻进,开始将液动潜孔锤与绳索取心工艺相结合,将液动锤集成到绳索取心外总成中便有了贯通式液动锤,将液动锤集成到绳索取心内总成上便有了绳索取心液动锤。也有同时与绳索取心钻具和螺杆钻具、涡轮钻具等井底动力钻具集成的三合一组合钻具。

3.1 正作用液动锤

正作用液动锤的典型结构如图2(a)所示,它是液体压力推动冲锤下行冲击、靠弹簧恢复原位,故称正作用。其主要优点是结构简单,可利用高压水锤作用获得较大的冲击能量,缺点则是在冲击过程中需要压缩弹簧储存抬锤力,冲击功损失较大。但在设计中如果能有效利用水击能量,合理设计复位弹簧参数,依然可以获得较大冲击功。其寿命受弹簧影响较大。

3.2 反作用液动锤

反作用液动锤的典型结构如图2(b)所示,与正作用相反,它是利用高压液体压力推动冲锤上行并压缩弹簧储存能量、靠弹簧储存的能量下行冲击做功,故称反作用。与正作用液动锤类似,它的结构也比较简单,对冲洗液的适应能力也强,加上可以利用冲锤的重力做功,可以获得较大的单次冲击功。但这需要依靠刚度较大的弹簧,寿命往往比正作用液动锤还要低。

3.3 阀式双作用液动锤

阀式双作用液动锤的典型结构如图2(c)所示,包括射流式、射吸式等双作用液动锤的下行冲击与上行复位均是靠液体压力推动,故称双作用。由于冲锤的正反冲程均由液体压力推动,阀式双作用液动锤往往没有弹簧零件,这就在一定程度上提高了液动锤的工作寿命。

阀式双作用液动锤通常设有节流环,冲程末端随着水垫作用增加在一定程度上降低了冲击功,密封数量较多,工作性能比较稳定可靠。

3.4 射流式液动锤

射流式液动锤是由我国独创的一种液动锤(图2d),工作时以一个双稳射流元件控制高压液体交替进入液动锤缸体上、下工作腔,从而推动腔内的活塞往复运动,与活塞相连的冲锤随之运动并冲击铁砧。该结构液动锤结构简单,零件少,特别是运动件少,只有一个活塞冲锤,并且可以通过调整射流元件的参数来调整液动锤的输出参数。由于没有弹簧、活阀等易损零件,其工作寿命较长,但射流元件受高压流体冲蚀较为严重,寿命也受到较大影响。由于其上下腔液体切换依靠的是射流元件的附壁作用,冲程末端未受水垫作用影响,可获得较大的末速度和冲击功,在液动锤研发中具有独特优势。

3.5 射吸式液动锤

射吸式液动锤也是我国首创的一种液动锤(图2e),其下部与阀式双作用液动锤类似,往往也需要设置一个节流环,上部则设有喷嘴,依靠喷嘴喷出的高速射流形成的卷吸作用降低上腔的压力,结合下部节流环的节流增压作用一起形成抬锤力。

射吸式液动锤结构简单,易损件少,双作用联合抬锤则降低了工作的启动压力,液体在工作腔内畅通性好,能适应更大的泵量,较为有效地解决了液动锤研究应用中往往需要面对的“小口径不够吃,大口径吃不下”的问题。

3.6 复合式液动锤

图3所示是一种将射吸式液动锤与阀式双作用液动锤的优点相结合的复合式液动锤。该液动锤结构简单,工作稳定,有效减少了密封数量,取消了节流环,提高了能量利用率和冲击功,没有弹簧等易损件,喷嘴中流体速度也较小,工作寿命长。该结构液动锤目前广泛应用于地质钻探领域。



图3 复合式液动锤结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of composite hydraulic hammer

值得一提的是,该结构液动锤与射吸式液动锤均需要依靠活阀进行配流,可以算是阀式双作用液动锤的扩展与延伸。

3.7 贯通式液动锤

贯通式液动锤的典型结构如图4所示,是指液动锤内部具有一条上下完全贯通的中空通道,在实际使用中往往与绳索取心钻进工艺相结合。贯通式液动锤作为外岩心管的一部分直接与钻头相连,绳索取心钻具的内总成可由贯通式液动锤的中空

通道通过并到达钻头内台阶上部。与下面要讲的绳索取心液动锤相比,其主要优势,一是液动锤的冲击功可直接传递给钻头,减少了冲击功在岩心管传递过程中的巨大损失;二是液动锤的规格可以做的更大,能提供更大的冲击能量。限制其广泛应用的主要因素是其稳定性和寿命,一旦液动锤无法工作,往往需要提大钻进行更换,增加了辅助生产时间和劳动强度,降低了绳索取心工艺的优势。

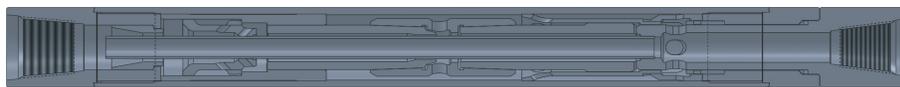


图4 贯通式液动锤结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of hollow-through hydraulic hammer

3.8 绳索取心液动锤

绳索取心液动锤的典型结构如图5所示,也是与绳索取心钻进工艺相结合的产物,兼有绳索取心工艺不需提大钻、纯钻时间长,以及液动锤工艺钻进效率高、岩心堵塞少的优越性。与贯通式液动锤不同的是,绳索取心液动锤是将液动锤集成到绳索取心钻具的内总成中,这种工艺在地质岩心钻探领域应用非常广泛。与贯通式液动锤相比,其优点是液动锤集成在内管总成上,每次提取岩心时都有机

会对液动锤进行检修和维护,减少了提大钻的风险。还有就是,位于内管总成上的液动锤产生的冲击功通过传功机构传递到外岩心管,最终再传递给钻头来辅助碎岩,一旦发生岩心堵塞,传功机构脱开,冲击功将无法作用到钻头上,而是全部作用在内岩心管进行解堵,特别是在破碎地层,能大幅度提高回次进尺,降低辅助生产时间,深受一线工作者青睐。



图5 绳索取心液动锤结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of wireline coring hydraulic hammer

3.9 三合一组合钻具

绳索取心+液动锤+螺杆马达三合一组合钻具结构如图6所示,在绳索取心液动锤的基础上,将螺杆钻具一起集成到内管总成上,从而也增加了螺

杆钻具不需全部钻柱回转或只需要低转速回转,扭矩损失少,钻柱风险低的优越性。该钻具因结构复杂、长度过长、成本高昂等原因并未在生产中得到大规模应用,比较适合在科学钻探中应用。



图6 绳索取心+液动锤+螺杆马达三合一组合钻具结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of "three-in-one" drilling tool

4 液动潜孔锤的应用与展望

4.1 YZX127型液动锤在中国大陆科学钻探中的应用^[16]

中国大陆科学钻探(CCSD)工程是国家重大科学工程, YZX127型液动潜孔锤通过在前导孔中的应用和改进, 得到了现场的一致认可, 并在主孔施工过程中成为主要钻进方法。

在科钻一井主孔施工阶段, YZX127型液动锤累计进尺2937.45 m, 平均效率达到1.14 m/h, 平均回次进尺7.90 m, 比不用液动锤分别提高228%和209%, 大幅度缩短了工程施工工期, 经济效益非常明显, 同时创造了当时5118.2 m的使用井深世界纪录, 并成为我国大陆钻探的特色技术。

4.2 SYZX75型绳索取心液动锤在岩金第一深钻中的应用^[17]

中国岩金勘查第一深钻ZK96-5钻孔由山东黄金集团有限公司组织实施, 山东省第三地质矿产勘查院负责施工。该孔施工中, 钻遇地层破碎, 岩心堵塞严重, 回次进尺甚至只有10~30 cm, 频繁捞取内管致使辅助时间大量增加。

采用SYZX75型绳索取心液动锤钻进后大幅度提高了回次进尺长度, 在破碎地层中效率可提高200%, 在地层相对完整后甚至将内管加长到4.3 m。同时, 钻头寿命可延长20 m左右, 钻进效率提高60%左右, 台月效率提高56%左右。

绳索取心液动锤的使用深度也在该孔得到了进一步突破, 该工艺在小口径岩心钻探领域的先进性和优越性得到了很好的展示, 同时也取得了良好的经济效益和社会效益。

4.3 YZX130型液动锤在地热井中的应用

某房地产开发商在大连旅顺组织实施一口温泉地热井, 设计井深3000 m, 完钻井径152 mm。在施工过程中钻遇岩层坚硬, 多为石英砂岩, 硬度在7级以上, 研磨性强, 进尺非常缓慢, 钻头磨损很快, 寿命较短。

对比使用YZX130型液动锤后近600 m进尺中采用不同工艺的钻进情况, 采用回转工艺平均时效0.48 m/h, 采用冲击回转工艺钻进平均时效0.92 m/h, 钻进时效相对回转钻进提高92%。采用回转钻进钻头平均使用寿命为28.32 m, 采用冲击回转钻进钻头平均寿命为60.38 m, 钻头寿命相对回转钻进提高113%。

4.4 液动潜孔锤技术展望

液动潜孔锤目前在小口径岩心钻探领域应用广泛, 且效益显著, 特别是绳索取心液动锤钻进工艺深受生产单位好评。但由于其在使用中较普通绳索取心钻具复杂一些, 在部分生产单位推广还存在困难。若要在更大范围内推广, 还需要进一步简化结构, 降低使用难度。

液动潜孔锤在工作排量上往往存在“小口径不够吃, 大口径吃不下”的难题, 在以后的研发中应进一步提高其排量适应性, 以适应不同工艺的钻进需求, 促进液动锤技术发展。

液动潜孔锤的工作寿命受冲洗液中固相含量影响较大, 目前在小口径岩心钻探领域寿命可达数百小时, 一方面是小口径岩心钻探使用无固相冲洗液越来越多, 另一方面则是其排量通常较小, 受冲洗液冲蚀作用也较小。而在大口径钻井领域, 全面钻进往往需要较大的排量来携带岩屑, 固相含量也大, 对液动锤内部结构冲蚀厉害, 严重影响了其工作寿命, 今后需要在这一方面开展深入研究。

液动潜孔锤在大口径钻探中推广应用还需要进一步提高其输出冲击功, 目前的大口径液动锤由于冲击功较小, 普遍无法像气动锤一样与球齿钻头配合使用, 降低生产成本^[18-19]。

参考文献(References):

- [1] 吴海霞, 蔡家品, 沈立娜, 等. 钻井利器故事之“金刚石钻头”[J]. 钻探工程, 2023, 50(2): 155-158.
WU Haixia, CAI Jiapin, SHEN Lina, et al. The story of a drilling weapon: Diamond bit [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2): 155-158.
- [2] 胥建华. 钻探工程概论[M]. 成都: 成都地质学院, 1989.
XU Jianhua. Introduction to Drilling Engineering [M]. Chengdu: Chengdu College of Geology, 1989.
- [3] 陆洪智, 鄂泰宁, 蒋国盛. 孔底电动冲击回转钻具的研制[J]. 煤田地质与勘探, 2009(4): 72-73.
LU Hongzhi, YAN Taining, JIANG Guosheng. Development of the well bottom electricity-driven percussive and rotating drill tool [J]. Coal Geology & Exploration, 2009(4): 72-73.
- [4] 菅志军, 张文华, 刘国辉, 等. 石油钻井用液动冲击器研究现状及发展趋势[J]. 石油机械, 2001, 29(11): 43-46.
JIAN Zhijun, ZHANG Wenhua, LIU Guohui, et al. Current status and developing trend of research on hydraulic hole hammer for oil drilling [J]. China Petroleum Machinery, 2001, 29(11): 43-46.
- [5] A. T. Киселев, И. Н. Круцир, 韩军智. 地质勘探回转冲击钻进[J]. 国外铀矿地质, 1984(1): 77-80.
A. T. Киселев, И. Н. Круцир, HAN Junzhi. Geological exploration

- tion rotary percussion drilling [J]. World Nuclear Geoscience, 1984(1):77-80.
- [6] 向震泽. TK-56型正作用液动冲击器[J]. 地质与勘探, 1983, (6):65-69.
XIANG Zhenze. TK-56 positive-acting hydraulic impactor [J]. Geology and Prospecting, 1983, (6):65-69.
- [7] 华东地勘局二六四大队. Ye-2型冲击回转钻试验概况[J]. 放射性地质, 1980(3):266-268.
The 264th Brigade of East China Geological and Exploration Bureau. Overview of the Ye-2 percussion-rotation drilling test [J]. Radioactive Geology, 1980(3):266-268.
- [8] 周延勋. 射吸式和阀式冲击器的对比试验[J]. 地质与勘探, 1984(7):67-69.
ZHOU Yanxun. Comparative test between suction-type and valve-type impactors [J]. Geology and Prospecting, 1984(7):67-69.
- [9] 王人杰, 苏长寿. 我国液动冲击回转钻探的回顾与展望[J]. 探矿工程, 1999(S1):140-145.
WANG Renjie, SU Changshou. Review and prospect of hydraulic impact rotary drilling in China [J]. Exploration Engineering, 1999(S1):140-145.
- [10] 谢文卫, 苏长寿, 宋爱志. 新型高冲击功液动潜孔锤的研究[J]. 探矿工程, 1998(6):33-34.
XIE Wenwei, SU Changshou, SONG Aizhi. Research on new type of high impact energy hydraulic down-the-hole hammer [J]. Exploration Engineering, 1998(6):33-34.
- [11] 李发东. KSC-127射流式液动锤在科钻一井中的应用分析[J]. 地质科技情报, 2006(6):107-111.
LI Fadong. Application of the KSC-127 jet hydro-hammer in Well CCSD-1 [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2006(6):107-111.
- [12] 菅志军, 殷琨, 蒋荣庆, 等. 增大液动射流式冲击器单次冲击功的试验研究[J]. 长春科技大学学报, 2000(3):303-306.
JIAN Zhijun, YIN Kun, JIANG Rongqing, et al. The research on increasing impacting energy of hydro-efflux hammer [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000(3):303-306.
- [13] 彭视明. 射流式液动锤增设蓄能装置的数值分析与实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.
PENG Jianming. A numerical and experimental study of liquid jet hammer with energy-saving mechanism [D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [14] 张鑫鑫. 高能射流式液动锤理论与实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
ZHANG Xinxin. Theoretical and experimental study on fluidic hammer with high impact energy [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [15] 殷琨, 王茂森, 彭视明, 等. 冲击回转钻进 [M]. 北京: 地质出版社, 2010.
YIN Kun, WANG Maosen, PENG Jianming, et al. Peicussive-rotary Drilling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [16] 谢文卫. 大陆科学钻探液动锤深孔应用研究与实践 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2010.
XIE Wenwei. The research and practice of hydro-hammer in continental scientific drilling program [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2010.
- [17] 董海燕. 绳索取心液动锤在中国岩金勘查第一深钻的应用和最新进展 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(10):9-12.
DONG Haiyan. Application of wire-line coring hydraulic hammer in the first deep drilling of rock gold exploration and the breakthrough [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(10):9-12.
- [18] 王跃伟, 李宽, 张恒春, 等. 液动潜孔锤用于干热岩钻进的优化与试验 [J]. 钻探工程, 2022, 49(6):36-41.
WANG Yuewei, LI Kuan, ZHANG Hengchun, et al. Optimization and test of hydraulic DTH hammers used in hot dry rock drilling [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):36-41.
- [19] 郭强, 翁炜, 袁文真, 等. 射流式液动冲击器在ZK01-2井提速应用研究 [J]. 钻探工程, 2021, 48(10):56-61.
GUO Qiang, WENG Wei, YUAN Wenzhen, et al. Use of the jet-type fluid hammer for increasing ROP at Well ZK01-2 [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10):56-61.

(编辑 王文)