

# 基于蜗轮蜗杆伸缩方式的钻孔水力开采钻具设计

钟秀平<sup>1,2,3</sup>, 陈 晨<sup>1,2,3</sup>, 李 刚<sup>1,2,3</sup>, 潘栋彬<sup>1,2,3</sup>, 张 颖<sup>1,2,3</sup>, 沈国军<sup>1,2,3</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合工程实验室, 吉林 长春 130026; 3. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 钻孔水力开采技术具有建矿周期短、环保、采矿费用低、工作深度大等优势, 在我国贫矿、深部矿等资源的开发利用方面, 有广阔的应用前景。本文总结了传统水力开采钻具的工作特点, 分析了固定式喷嘴对开采效率的影响, 介绍了本课题组的研究成果, 并在此基础上研制了具有自主知识产权的基于蜗轮蜗杆伸缩方式的钻孔水力开采钻具, 该钻具实现了水力喷射装置的伸缩运动, 实现了靶距的可控调节, 从而增加了单孔采矿区域, 提高了开采效率。

**关键词:** 钻孔水力开采; 靶距; 蜗轮蜗杆; 伸缩式水力开采钻具; 水枪

**中图分类号:** TD85; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2018)11-0040-05

**Drilling Tool Design for Hydraulic Borehole Mining Based on Telescopic Manners of Worm and Worm Wheel/ZHONG Xiu-ping<sup>1,2,3</sup>, CHEN Chen<sup>1,2,3</sup>, LI Gang<sup>1,2,3</sup>, PAN Dong-bin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ying<sup>1,2,3</sup>, SHEN Guo-jun<sup>1,2,3</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of In-situ Conversion, Drilling and Exploitation Technology for Oil Shale, Changchun Jilin 130026, China; 3. Key Laboratory of Drilling and Exploration Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Hydraulic borehole mining provides the advantages of short construction period, environmental protection, low mining cost and great working depth, etc. It has a broad application prospect in the exploitation and utilization of the resources at poor and deep mines in China. In this paper, the characteristics of the traditional hydraulic drilling tools are summarized, the influence of the fixed nozzle on the mining efficiency is analyzed, and the research results are introduced. Based on this, a hydraulic borehole mining drill of independent intellectual property rights was developed according to the telescopic manner of the worm and worm wheel. The drilling tool allows the telescopic movement of the hydraulic jetting device and ensures the adjust of the target distance, thereby increasing the single hole mining area and improving the mining efficiency.

**Key words:** hydraulic borehole mining; target distance; worm and worm wheel; telescopic hydraulic drilling tool; water jet

## 0 引言

经过几十年的开采,我国浅部易开采的富矿已日益枯竭,资源的短缺导致了我国对外的能源依赖逐年增加,同时也制约了我国的经济发展<sup>[1-3]</sup>。因此,开采深部矿产资源和浅部不均匀的贫矿是我国矿产资源开采的发展趋势,但是开采上述矿产资源面临着技术难度大、开采成本高的问题,因此亟待发展一种高效、经济的开采技术来支撑上述资源的开

采利用<sup>[4-7]</sup>。钻孔水力开采技术是利用高压水射流冲击碎岩的一种采矿技术,该技术不需要剥离覆盖层,能够根据矿层的赋存位置选择性采矿,而且据相关理论和现有工程应用资料显示,与传统采矿方式相比,钻孔水力开采技术具有建矿周期短、环保、采矿费用低、工作深度大等优势,对于我国贫矿和深部矿产的开发,有广阔的应用前景<sup>[8]</sup>。

收稿日期:2018-07-27; 修回日期:2018-08-03

基金项目:国家自然科学基金面上项目“高压低温水射流作用下海底天然气水合物储层破岩过程与机理研究”(编号:41672361);省校共建项目,新能源专项“油页岩原位转化工程共性关键技术研究”(编号: SXGJSF2017-5);吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(编号: 20160204011SF)

作者简介:钟秀平,男,汉族,1993年生,吉林大学硕士研究生在读,地质工程专业,吉林省长春市西民主大街938号,664566360@qq.com。

通信作者:陈晨,男,汉族,1965年生,教授,博士生导师,从事岩土工程钻凿技术、基础工程设计、施工与计算机模拟研究及教学工作,吉林省长春市西民主大街938号,chenchen@jlu.edu.cn。

## 1 钻孔水力开采技术

### 1.1 钻孔水力开采技术的工艺

钻孔水力开采技术基于钻孔技术和水力学原理,先在目标区域钻进成孔,然后将高压水喷射装置即水枪下放到对应的矿层赋存位置,利用高压水射流的切割力破碎岩矿石,破碎的岩矿石与钻孔内的循环水混合形成矿浆,在提升装置的作用下,将矿浆提升至地表,在地表进行选矿等后续处理<sup>[9]</sup>。

### 1.2 钻孔水力开采的优势

(1)采矿成本低。钻孔水力开采技术无需剥离矿层的覆盖层,无需构建地下工作空间,采矿完成后无需进行大面积的场地恢复,因此,与传统开采方式相比,水力开采大大减少了采矿成本。据俄罗斯专家测算,建设一个相同生产能力的矿山,其建设费用只有传统矿山的 30%~50%,开采成本为传统矿山的 50%~60%<sup>[10]</sup>。

(2)对环境影响小。钻孔水力开采不需要大面积的剥离矿石覆盖层,开采过程中无需爆破工作,装卸运输矿石过程中由于水的作用无粉尘产生<sup>[11]</sup>。

(3)对矿层选择性好。开采不连续的矿层时,其经济效益不受影响。

### 1.3 传统水力开采的不足

高压水射流碎岩是钻孔水力开采技术的核心,高压水射流碎岩效率的大小直接决定了水力开采的效率。因此,如何提高水射流的碎岩效率是钻孔水力开采技术推广应用的关键。高压水射流碎岩的实质是水射流与岩石的相互作用,并由此引起岩石损伤破碎的过程<sup>[12]</sup>,在影响水射流碎岩的诸多因素中,输送射流介质的喷嘴与岩石之间的距离即靶距对水射流碎岩起着决定性作用,此领域的学者通过实验和数值模拟均证实了这一点(参见图 1~6)。

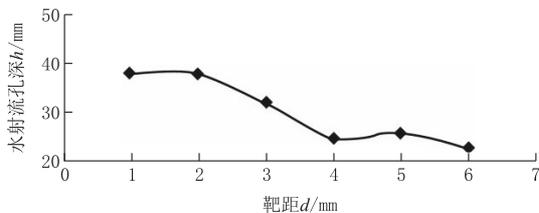


图 1 射流靶距对射孔深度的影响<sup>[13]</sup>

通过图 1 可以发现,当靶距 > 2 mm 时,水射流孔深大幅度减小,说明当靶距 > 2 mm 时,随着靶距的增大,射流介质的能量迅速降低,对岩石产生的冲击力也迅速减小。

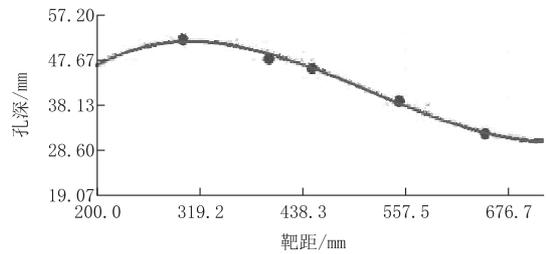


图 2 靶距与冲孔深度的关系曲线<sup>[14]</sup>

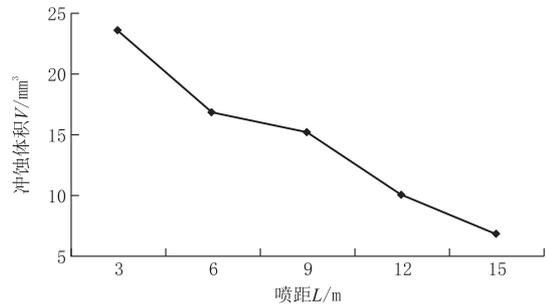


图 3 水射流喷射距对破岩效果的影响<sup>[15]</sup>

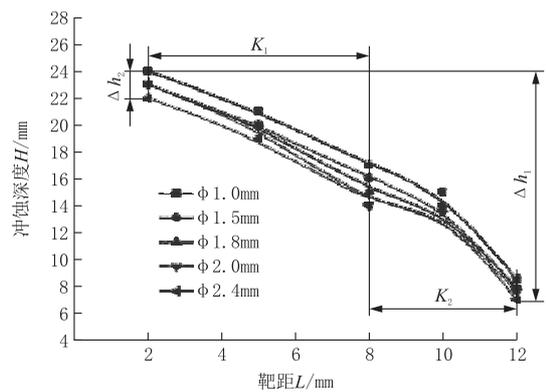


图 4 淹没状态下冲蚀深度与靶距的关系<sup>[17]</sup>

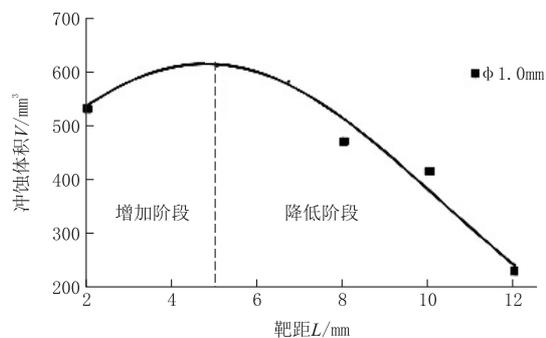


图 5 淹没状态下冲蚀体积与靶距的关系<sup>[17]</sup>

由图 2 可知,冲孔深度随着靶距呈现增大后减小的趋势,这是由于靶距过小时,从喷嘴喷射出的射流介质得不到充分的加速,使岩石表面只受到水射流冲击压的作用,而没有产生冲蚀作用,这说明冲孔深度随靶距的变化存在最优值。

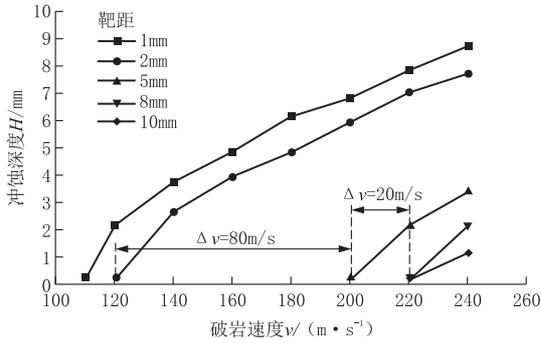


图6 淹没状态下不同靶距下最低破岩速度变化图<sup>[17]</sup>

由图3(图中带空心圆的线为实验数据,带黑点的线为计算数据)可知,水射流破岩的体积、冲孔的深度随着靶距的增加均出现了明显的下降,尤其是当喷距为15 mm时,较喷距为3 mm破岩的体积下降了72%,这说明对水力开采而言,合理的控制靶距对采矿的生产效率至关重要。

高压水射流经由钻孔冲蚀岩体时,由于钻孔长、孔径小,大量水体滞留在钻孔内,射流将不可避免地处于淹没状态,从而形成淹没射流<sup>[16]</sup>。淹没射流状态下,由于破碎的岩屑与水混合形成的矿浆以及撞击岩石后返回的水的阻力作用,喷距对碎岩效果的影响更加显著。

由图4~6可以看出,在淹没射流状态下,冲蚀深度随靶距的增加急剧减小,靶距为12 mm时,相比于靶距2 mm,冲蚀深度已经下降了63%;冲蚀体积随靶距呈先增大后减小的趋势,存在着最优值,当靶距超过5 mm后,冲蚀体积也呈现出急剧减小的趋势;而所需的水射流初始速度则随着靶距的增加大幅增加,而要实现水射流初始速度的提高,势必会对水射流装备提出更高的要求,同时,也会大大增加能耗。

目前,传统水力开采钻具的高压水喷射装置采用固定式喷嘴,这种钻具在水力开采的过程中,钻具处于淹没状态,随着开采的进行,喷嘴距离矿体的距离会逐渐增加,通过上述分析,当靶距超过对应的最优值时,矿石的破碎体积会快速的大幅下降,直至射流水对岩石的打击力不足以破碎岩石,这就大大地限制了单孔的开采半径,降低了单孔的生产量。因此,设计可伸缩式水力喷射装置对于提高钻孔水力开采的生产效率、扩大钻孔水力开采的适用范围、推动钻孔水力开采的技术发展,具有十分重要的意义。

## 2 本课题组的研究成果

针对上述问题,本课题组研究设计了3种水力喷射装置可伸缩式水力开采钻具,按设计思路,可分为机械控制式和电控单动式。机械控制式有弹簧夹头锁紧式和棘爪锁紧式,其设计的基本思路是在高压水管的带动下,通过四连杆机构的运动实现水枪的伸缩,水枪臂设计长度2870 mm,水枪摆动角度可达90°,较固定式水力喷射装置,单孔开采直径扩大了5 m以上,弹簧夹头控制式利用弹簧夹头的抱死锁紧功能实现水枪角度的固定,棘爪控制式利用棘爪的自锁功能实现水枪伸出角度的固定<sup>[18-19]</sup>。电控单动式采用步进电机通过滚珠丝杠带动连杆机构控制水枪的伸缩,通过单动步进电机驱动单动装置实现水枪的轴向回转,从而达到电缆不随钻具回转而转动的目的,保证了电缆工作过程中不受破坏,电控单动式的水枪臂长度为1250 mm,水枪摆动角度同样可达90°,单孔开采直径较固定式水力喷射装置扩大2.5 m<sup>[20]</sup>。

## 3 本文提出的设计方案

在本课题组前期工作的基础上,本文提出了适用于浅部采矿的基于蜗轮蜗杆控制的可伸缩式水力开采钻具(见图7、图8)。

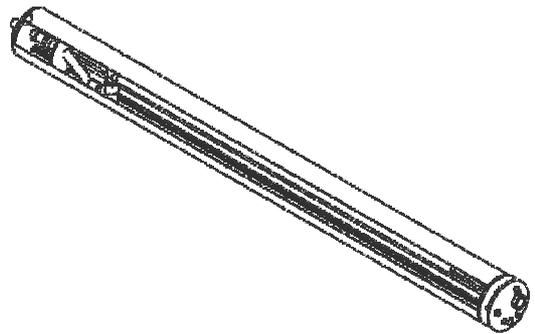
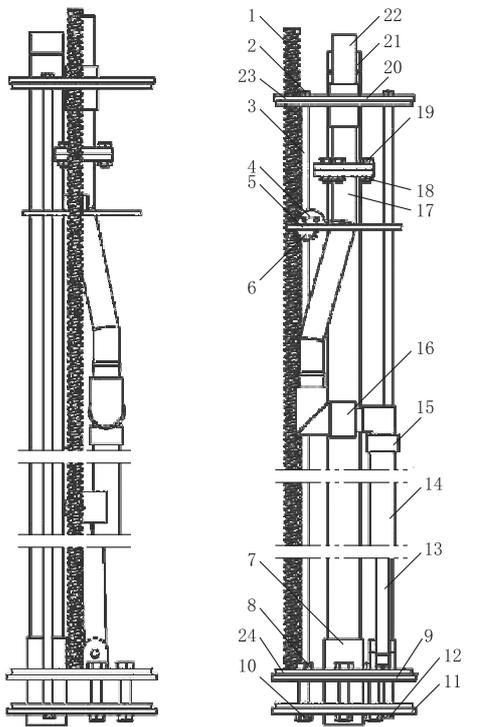


图7 钻具整体示意图

本装置由高压水输送系统、水枪伸缩系统和排渣系统3部分组成。其中,高压水输送系统由高压水管、偏心接管、直角接头、水枪高压旋转接头及水枪组成。高压水管的顶端与地表高压水源连接,高压水管的底端通过偏心接管锁紧螺栓与偏心接管连接;偏心接管、直角接头、水枪高压旋转接头及水枪顺次密封连接;水枪伸缩系统包括蜗杆、滑动板、蜗轮、蜗轮护板、顶端盖、导向杆、导向杆上锁紧螺母、



1—蜗杆;2—导向杆上锁紧螺母;3—导向杆;4—蜗轮护板;  
5—滑动板;6—蜗轮;7—排渣管导向套;8—底端盖连接螺  
栓;9—底端盖连接螺母;10—第一底端盖;11—第二底端  
盖;12—导向杆下锁紧螺母;13—顶杆;14—水枪;15—直角  
接头;16—水枪高压旋转接头;17—偏心接管;18—偏心接  
管锁紧螺母;19—偏心接管锁紧螺栓;20—顶端盖;21—排  
渣管;22—高压水管;23—蜗杆上轴承;24—蜗杆下止推轴  
承

图 8 钻具结构示意图

导向杆下锁紧螺母、直角接头、水枪高压旋转接头、水枪、顶杆和第一底端盖,蜗杆上轴承安装在顶端盖的轴承槽内,蜗杆下止推轴承安装在第一底端盖的轴承槽内;蜗杆底端安装在蜗杆下止推轴承内,上端穿过蜗杆上轴承向外延伸;滑动板焊接在偏心接管上,滑动板与保护管的侧壁呈垂直布置,在滑动板一侧开设有蜗轮槽;蜗轮通过蜗轮轴安装在蜗轮槽内并与蜗杆啮合;导向杆为两根,分别穿过顶端盖、滑动板和第一底端盖上的预留孔,并用导向杆上锁紧螺母和导向杆下锁紧螺母固定在顶端盖与第一底端盖之间;水枪和第一底端盖上分别焊接有顶杆连接槽;顶杆通过顶杆连接槽安装在水枪和第一底端盖之间,并用销钉固定;蜗轮护板位于蜗轮两侧并焊接在滑动板上;排渣系统包括顶端盖、排渣管、排渣管导向套、第一底端盖、第二底端盖、底端盖连接螺母以及底端盖连接螺栓,保护管的顶端与顶端盖连接,保护管的底端与第一底端盖连接,第一底端盖通过

底端盖连接螺栓与第二底端盖连接;排渣管导向套依次贯穿第一底端盖和第二底端盖,并通过螺纹连接在第一底端盖上;排渣管下端与排渣管导向套螺纹连接,排渣管上端穿过顶端盖上的通孔向外延伸。

应用此钻具进行水力开采的工作过程如下:

(1)布置钻机,按所需的直径和深度钻进成孔;

(2)将钻具下放至矿层所处的位置,控制钻机的主动钻杆以较低的速度回转带动水力开采钻具回转,同时,接通地表高压水源,开始进行水力碎岩,在反循环的作用下,破碎的岩屑与水混合形成的矿浆经排渣管返排至地表;

(3)当返排上来的矿浆中所含的岩屑明显减少时,说明此时水力开采形成的破碎区半径已经超过了最优靶距甚至达到了极限靶距,此时通过人力或者机械装置驱动蜗杆正向回转,使蜗轮沿着蜗杆向下运动,从而带动滑动板向下滑动,在连杆机构的带动下,水枪向外伸出一定角度,达到所需角度后,控制蜗杆停止转动,就可以实现水枪伸出角度的固定,继续破碎岩石;

(4)如果因工程需求或出现意外需要提钻时,要将伸出的水枪收回,此时,只需反向转动蜗杆,使蜗轮沿着蜗杆向上运动,由连杆机构带动水枪收回。

此水力开采钻具相比于传统的水力开采钻具具有以下优点:

(1)该水力开采钻具的水枪臂设计长度为 2500 mm,水枪最大伸出角度为  $90^\circ$ ,避免了淹没射流造成的高压水能量急剧减弱的问题,增加了单个钻孔水力开采的区域,从而提高了钻孔水力开采的采矿效率;

(2)该机械式伸缩水枪的伸出角度由蜗杆和蜗轮相互配合控制,可以无级调节,增加了钻具对地层的适应性;

(3)该机械式伸缩水枪伸出收回通过蜗杆、蜗轮等控制,因此水枪可在任意需要的时候收回,避免了当孔内有突发情况时,水枪不能收回造成钻具无法提升的问题。

#### 4 结论

(1)根据我国矿产资源的分布特点和开采趋势,钻孔水力开采技术适用于深部矿产和浅部不均匀矿、贫矿的开采。

(2)靶距对水射流碎岩有很大的影响。随着靶

距的增加,水射流碎岩的体积、冲孔深度和碎岩效果呈先增大后减小的趋势,存在着最优靶距,当喷嘴到岩石表面的距离超过最优靶距时,破岩体积、冲孔深度和破岩效果大幅下降。

(3)采用蜗轮蜗杆控制的伸缩式水力开采钻具,可以实现随着水力破碎半径的逐渐增加,水枪及时伸出,从而保证合适的靶距,以实现增加单孔采矿区域,提高开采效率的目的。

### 参考文献:

- [1] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
- [2] 王运敏.金属矿采矿工业面临的机遇和挑战及技术对策[J].现代矿业,2011,27(1):1-14.
- [3] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
- [4] 张海军,陈宗林,陈怀利.深部开采面临的技术问题及对策[J].铜业工程,2010,(1):25-28.
- [5] 胡社荣,彭纪超,黄灿,等.千米以上深矿井开采研究现状与进展[J].中国矿业,2011,20(7):105-110.
- [6] 曹新元,王家枢,马建明,等.我国大宗矿产贫矿资源利用现状、问题与对策[J].中国矿业,2007,(1):5-9,13.
- [7] 甘经超,王淑秋.我国贫矿的选矿现状及发展方向[J].矿业快报,2011,(S1):112-119.
- [8] 陈晨.钻孔水力开采工艺——开采地下矿产的新方法[J].世界

地质,1998,(4):86-88.

- [9] 陈晨,张祖培.钻孔水力开采技术[J].中国矿业,1998,(6):40-43.
- [10] 陈晨,孙友宏.油页岩开采模式[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):26-29.
- [11] 汤凤林,Чихоткин В.Ф.,蒋国盛,等.加强钻孔水力开采技术研究,拓宽探矿工程创新发展空间[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(9):1-8.
- [12] 王瑞和,倪红坚.高压水射流破岩钻孔过程的理论研究[J].石油大学学报(自然科学版),2003,(4):44-47,148.
- [13] 陈树亮,黄炳香,徐杰,等.高压水射流冲孔基本规律的实验研究[J].煤矿开采,2017,22(4):1-3,38.
- [14] 李倩.高压水射流在松软煤层中钻深长孔的实验研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [15] 倪红坚,王瑞和,葛洪魁.高压水射流破岩的数值模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2004,(4):550-554.
- [16] 黄小波,卢义玉,夏彬伟,等.淹没射流旋转割缝技术在突出煤层掘进中的应用[J].煤炭科学技术,2012,40(3):70-73,117.
- [17] 刘佳亮,司鸽,张宏.淹没状态下高压水射流破岩效率分析[J].中国安全科学学报,2012,22(11):23-29.
- [18] 陈晨,赵嵩颖,李刚,等.一种基于弹簧夹头控制伸缩水枪:中国,CN104018839A[P].2014-06-21.
- [19] 王彧佼,陈晨,高帅,等.棘爪机构伸缩式钻孔水力开采装置的设计与试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):60-65.
- [20] 陈晨,李刚,高帅,等.一种用于钻孔水力开采的电控单动伸缩钻具:中国,CN104018838A[P].2014-06-21.

(上接第36页)

### 3 结语

(1)多维冲击钻井提速工具有效地结合了轴向冲击和扭转冲击,实现了多维高效破岩,从而提高了机械钻速。

(2)PDC钻头在配合多维冲击钻井工具破岩的过程中得到了高效利用,能提高钻头的施工作业寿命。

(3)通过对多维冲击钻井工具辅助破岩机理的研究,在结构上进行不断优化,是多维冲击钻井技术未来的研究方向和实现钻井提速的重要途径。

### 参考文献:

- [1] 倪红坚.一种多维冲击钻井工具:中国,CN201611232670.1[P].2016-12-28.
- [2] 倪红坚.一种多维冲击器:中国,CN201611232677.3[P].2016-12-28.
- [3] 雷鹏,倪红坚,王瑞和,等.自激振荡式旋冲工具在深井超深井

中的试验应用[J].石油钻探技术,2013,41(6):40-43.

- [4] 鄢松意,陶瑞东,陈建华,等.自激振荡式旋转冲击钻井工具在大港板深19-64井的应用[J].石油钻采工艺,2012,34(6):114-116.
- [5] 郑军辉,付堂兵,李保伦,等.多维冲击钻井技术在准葛尔盆地的应用[J].化学工程与装备,2017,(7):71-72.
- [6] 石晓刚,郑义平,张抒夏,等.多维冲击工具在新疆油田中佳7井的应用[J].新疆石油科技,2018,28(2):16-17.
- [7] 陶兴华.冲击旋转钻井破岩特点分析[J].钻采工艺,1996,19(3):1-3.
- [8] 孙起昱,张雨生,李少海,等.钻头扭转冲击器在元坝10井的试验[J].石油钻探技术,2010,38(6):84-87.
- [9] 杨先伦,宋建伟,何世明,等.扭转冲击破岩效果影响因素评价[J].石油矿场机械,2014,43(9):4-8.
- [10] 李思琪,闫铁,李玮,等.PDC钻头扭转冲击破岩机理及试验分析[J].长江大学学报(自科版),2015,12(2):48-51,65.
- [11] 卢玲玲,何东升,张伟东,等.扭转冲击器研究及应用[J].石油矿场机械,2015,44(6):82-85.
- [12] 韩飞,黄印国,秦建兵,等.衡转矩钻井工具在长庆油田的应用[J].石油矿场机械,2016,45(3):83-85.
- [13] 牟海维,王瑛,韩春杰.钻柱的粘滑振动规律分析[J].石油机械,2011,39(3):67-69.