

# 棘爪机构伸缩式钻孔水力开采装置的设计与试验

王彧佼<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 高帅<sup>1,2</sup>, 孙友宏<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>, 赵富章<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 山东省地矿工程勘察院, 山东 济南 250014)

**摘要:** 钻孔水力采矿由于安全系数高、工程效益和生态环境保护好等优点在国外一直被研究和应用。我国相关的科研院所也正在开展研究。本文在分析研究国外钻孔水力开采装置的基础上, 研制了具有自主知识产权的棘爪机构伸缩式钻孔水力开采装置。该装置利用机械式伸缩水枪的方式扩大水力开采矿层的范围, 创新性地采用棘爪机构固定水枪的伸出角度, 从而提高单孔开采量, 降低开采成本。初步野外实验结果表明, 该装置结构设计合理、工作可靠性高, 可有效进行开采, 达到了预期的目标。

**关键词:** 钻孔水力采矿; 可伸缩钻孔水力开采装置; 棘爪机构

**中图分类号:** P634; TD856.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)11-0060-06

**Design and Experiment of Pawl Telescopic Hydraulic Borehole Mining Equipment/WANG Yu-jiao<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, GAO Shuai<sup>1,2</sup>, SUN You-hong<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, ZHAO Fu-zhang<sup>1</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Jinan Shandong 250014, China)

**Abstract:** Hydraulic borehole mining has been researched and used abroad due to the advantages of high safety factor, engineering benefit and good ecological environment protection. Some related research institutes in China are also carrying out this research. On the basis of analyzing the hydraulic borehole mining equipment in foreign countries, pawl telescopic mining equipment with independent intellectual property rights is developed. In order to increase the single hole mining volume and reduce the mining cost of this mining equipment, not only mechanical telescopic gun, but also pawl mechanism are innovatively used to secure the protrusion angle of the water gun to expand the area of hydraulic mining seam. The preliminary field experiments show that this pawl telescopic mining equipment has reasonable structure design with high work reliability, the expected target is achieved by the effectively mining.

**Key words:** hydraulic borehole mining; telescopic hydraulic borehole mining equipment; pawl mechanism

## 0 引言

随着人类社会的不断发展, 对各种资源的需求也越来越多。目前, 地表和浅部富矿日趋枯竭, 开采地下深部矿产和浅部不均匀的小矿、贫矿以及具有复杂水文和地质条件的矿产, 面临开采难度大、开采成本高的问题<sup>[1]</sup>。为了达到降低采矿成本、提高采矿效率的目的, 各国都在寻找新的高效、低耗并且采矿质量好的方法<sup>[2-5]</sup>。

钻孔水力开采方法是在穿过矿层的钻孔内, 用高压水射流破碎矿体<sup>[6]</sup>, 破碎下来的矿渣与循环水在孔底形成流动状态的液固两相的矿浆, 然后由举升设备将矿浆输送到地表, 矿浆经过沉淀分选即可

得到有用矿石, 水可以继续作为循环介质进行下一步开采。美国、俄罗斯等国家在钻孔水力开采领域研究较早, 已取得许多重要的研究成果。其中俄罗斯在“2007—2012年度俄罗斯研究和开发先进科学技术发展规划”中计划企业与高校联合进行相关矿产领域的开发与研究, 与之相关的开采装置也不断地被提出与改善<sup>[7-9]</sup>。该技术具有开采深度大、基建投资少、建矿周期短、成本低、安全、高效、环境污染小等优点<sup>[10-11]</sup>, 可以应用于金矿、煤矿、铁矿、金伯利岩、粘土矿、油页岩、石英砂等矿产<sup>[12-16]</sup>。2017年我国在南海成功进行了海洋水合物的试采, 我们可进一步研究该技术应用与海洋非成岩天然气水合

收稿日期: 2017-06-01; 修回日期: 2017-10-20

**基金项目:** 国家潜在油气资源(油页岩勘探开发利用)产学研用合作创新研究项目; 吉林省科技厅发展计划重点科技攻关项目“油页岩原位体积压裂工艺”(编号: 201602040011SF); 吉林省科技厅发展计划国际合作项目“海洋天然气水合物置换开采技术研究”(编号: 20170414044GH)

**作者简介:** 王彧佼, 男, 汉族, 1992年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, 1576762791@qq.com。

**通讯作者:** 陈晨, 男, 汉族, 1965年生, 副院长, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程钻凿技术与计算机模拟、油页岩地下原位钻采研究, 吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, chenchen@jlu.edu.cn。

物的开发。

## 1 伸缩机构设计

目前国内外大部分钻孔水力开采装置中,采用的是固定式水枪,高压喷嘴固定在装置外壁上<sup>[17]</sup>。这种装置在开采中存在以下不足:由于在地下空间中充满流体,高压水流从高压喷嘴射出之后,水射流的速度急剧衰减,破岩能力下降极快,破碎范围很小。致使单孔开采矿产量小,矿产开采成本提高。

因此需设计一种可以在径向伸出的机械式伸缩水枪,用于扩大水力开采矿层的范围,提高单孔开采量,降低开采成本。

### 1.1 伸缩机构设计依据

伸缩机构是钻孔水力开采装置的主要部分,它的质量、工作性能的好坏直接影响着开采效率、成本等。根据伸缩机构的设计目标,区别各个要求的主次关系,将各个方面的要求协调统一。

伸缩机构设计的主要依据如下。

(1)矿层条件:地层条件决定了钻孔水力开采工艺的适用性、合理性,不同的矿层条件选择合理的矿层工艺,才能提高采矿效率、减少采矿成本。

(2)矿浆提升方式:目前,钻孔水力开采中矿浆基本的提升方式有水力提升器(喷射泵)和气举提升器(空气升液器)两种,各种都必须在开采装置中留有矿浆提升的通道。

(3)使用条件:固液混合环境。

(4)开采矿层深度:15~1000 m。

(5)开采装置直径:300 mm。

(6)水枪伸出长度:0~3000 mm。

### 1.2 伸缩机构设计方案

通过分析曲柄滑块机构的运动特性和传力特性,根据伸缩机构的运动形式,参考已有扩底钻头的实际经验,完成了伸缩机构的设计。

图1为伸缩机构收缩状态,机构中推动杆和连杆、连杆和水枪以及水枪转轴均为铰接,可在垂直面内移动,此时的各部件的状态和功能如下。

(1)推动杆:是机构运动的起始动力来源,沿平行于开采装置轴线的平面上上下下运动,存在上限位置和下限位置,此时推动杆在上限位置,保证水枪收缩在开采装置内部。在后续的工作中,推动杆向下上移动,推动连杆转动。

(2)连杆:连杆是将推动杆的推力传递给水枪,

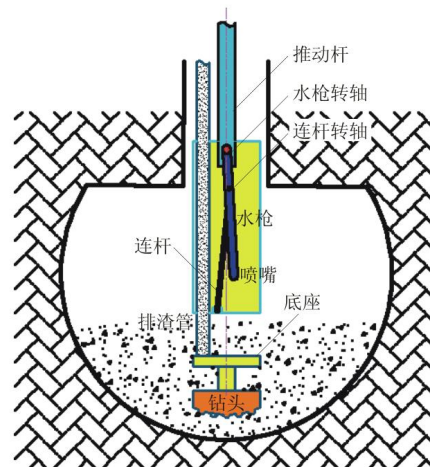


图1 伸缩机构收缩状态示意图

使水枪转动,但是它不能将推动杆的推力全部传递给水枪。推力的大小取决于传动角的大小,而传动角是不断变化的,因此传递给水枪的推力大小也是变化的。推动杆推动连杆后,连杆在平面内运动,可平移和转动。

(3)水枪:水枪是钻孔水力开采装置中的关键部件,图示的水枪围绕其转轴可在 $0\sim 90^\circ$ 范围内转动。水枪受力较复杂,包括水枪自身加水枪内部液体的重力、连杆给它的推力、转轴处的摩擦力以及移动时受到的液体阻力,由于水枪伸出速度很低,因此后两者可忽略。控制推动杆将推力传给连杆,连杆将推力传给水枪,水枪转动、伸出。

图2为伸缩机构伸出时的状态,此时高压冲洗液通过水枪及喷嘴进行喷射碎岩,同时装置以较低的速度转动,转动的速度取决于高压水射流的破岩时间。此时各个部件的状态和功能如下。

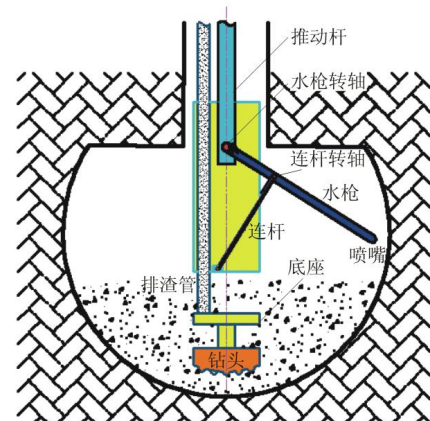


图2 伸缩机构伸出状态示意图

(1)推动杆:此时推动杆处于下限位置,在水枪工作时,推动杆一直处于下限位置,维持水枪的位

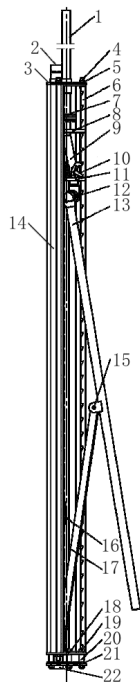
置。在开采结束后,推动杆向上运动,一直运动到上限位置,带动水枪收回到装置内部(如图1所示)。

(2)连杆:此时连杆一直支撑着水枪,在开采结束后,再带动水枪收回。

(3)水枪:水枪此时处于工作位置,可在 $0\sim 90^\circ$ 范围内固定在某一位置开采,旋转并不断破碎矿层。

## 2 棘爪机构伸缩开采装置

根据以上的设计思路,研制了一种棘爪机构伸缩钻孔水力开采装置<sup>[18]</sup>(如图3所示)。该装置主要工作系统为高压水射流输送系统、伸缩控制系统、水枪臂伸缩系统3个系统。高压水射流输送系统包括高压进水管1、偏心接管9、旋转接头12、水枪臂13及喷嘴;伸缩控制系统包括定位齿条6、滑块上板8、偏心接管9、棘爪10、滑块下板11、定位解锁杆16;水枪臂伸缩系统包括导向杆4、滑块上板8、偏心接管9、滑块下板11、旋转接头12、水枪臂13、水枪支撑轴15、支杆17、下固定板18。



1—高压进水管;2—排渣管;3—上挡板;4—导向杆;5—导向杆锁紧螺母;6—保护管;7—螺母;8—滑块上板;9—偏心接管;10—棘爪;11—滑块下板;12—旋转接头;13—水枪臂及喷嘴;14—保护管;15—水枪支撑轴;16—定位解锁杆;17—支杆;18—下固定板;19—下固定板连接螺栓及螺母;20—下固定板间隔管;21—第二下固定板;22—排渣管导向套

图3 棘爪伸缩开采装置结构原理图

开采装置的伸缩通过钻机的给进与提升动作实

现。当开采装置到达孔底后,下挡板支撑到孔底岩石上,此时滑块上板、滑块下板、旋转接头、水枪臂、支杆及底座构成四连杆机构,当钻机继续给进时,滑块上、下板沿导向杆向下运动,其由于齿条斜面作用,棘爪无法卡入齿条,水枪逐渐展开;当需要开采装置进行开采时,在低速回转的同时缓慢提升开采装置,此时,棘爪在弹簧力作用下卡入齿条,开采装置向上提升时,保证水枪展开角度固定;当开采结束即水枪展开至近最大角度时,定位解锁杆推动棘爪旋转一定角度,棘爪与齿条脱离连接,使开采装置解锁,此时钻机提升开采装置,水枪臂逐渐缩回,当水枪臂缩回至初始位置时,可将开采装置从孔内提出。棘爪机构工作原理见图4。

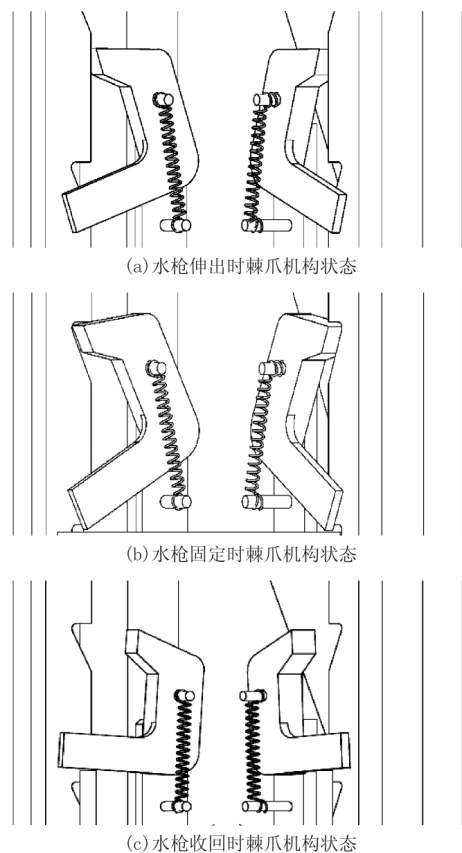


图4 棘爪机构工作原理图

## 3 配套系统

为配合孔底水力开采装置的使用,研制了专门的三通道水龙头、三通道钻杆及双壁钻杆等配套设备。

### 3.1 三通道水龙头

可伸缩开采装置进行水力破碎开采时,需向孔

底开采装置输送高压水,并采用气举反循环方式将孔底破碎的矿渣输送至地表,因此钻机水上水龙头需有高压水、高压空气及返浆三个通道,根据开采装置工作需要,研制三通道水龙头。进行气举反循环返浆时,矿浆对水龙头最上部弯管破坏严重,因此水龙头最上方返浆管法兰可拆卸,便于弯头损坏后更换;为防止矿浆进入高压空气管道,在水龙头的气通道设置气动单向阀。三通道水龙头技术参数:返浆通道内径为46 mm,高压水通道可输送20 MPa的高压水。三通道水龙头如图5所示。



图5 三通道水龙头

### 3.2 钻杆

为保证输送高压水及气举反循环的需要,研制了同轴三通道钻杆和双壁钻杆。三通道钻杆中心返浆通道内径为46 mm;双壁钻杆中心返浆通道内径为48 mm。三壁钻杆如图6所示。

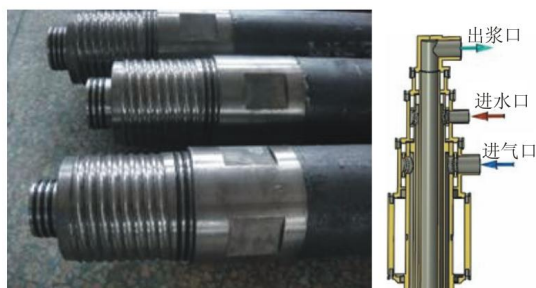


图6 三壁钻杆

## 4 可伸缩开采装置野外试验

### 4.1 野外试验现场布置

伸缩式钻孔水力开采装置开采试验在吉林省农安县国家油页岩原位开采先导试验基地进行。该基地位于松辽平原,为松辽盆地的一部分。地层由老到新分布有白垩系和第四系。

采用的试验设备有GK-5型全液动力头式钻机、BW-250型泥浆泵、5BS型砂石泵等设备,设

备连接如图7所示。

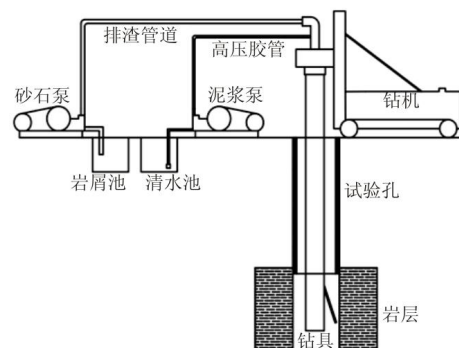


图7 可伸缩开采装置野外试验示意图

### 4.2 试验流程

为了试验安全性考虑,首先进行开采装置浅孔开采试验。由于试验孔较浅,无法实现气举反循环,因此采用泵吸反循环的方式进行排渣。在进行野外试验时将开采装置系统中的三重钻杆、气液混合器及双重钻杆取消,利用重新设计的试验转换接头将三通道水龙头与钻杆连接,继而连接可伸缩开采装置。

#### 4.2.1 可伸缩开采装置工作阶段

(1) 伸缩式水枪下放到孔底,等开采装置到达孔底后,缓慢伸出水枪,水枪中通入高压冲洗液,此时开采装置开始转动,水枪旋转切割矿层侧壁。水枪最大的展开角度是 $90^\circ$ ,此时水枪和开采装置互相垂直。

(2) 当矿层被开采到一定空间大小时,伸缩水枪的开采效率也会大大下降,此孔的开采任务完成。

#### 4.2.2 提升至地表阶段

(1) 开采任务完成后,水枪先收回到开采装置内部。水枪由水平位置旋转到开采装置内部时,水枪与开采装置大约处于平行状态。

(2) 当水枪收回到开采装置内部之后,利用卷扬机或者钻机将开采装置提到地表。

### 4.3 开采试验及分析

进行试验是为了使钻孔水力开采装置能够在设计的试验参数下破碎井内岩层,并形成稳定的采空区;伸缩式钻孔水力开采装置的水枪能够在孔内顺利完成伸出和收回动作。一共进行两次试验。现场试验如图8所示。两次试验的喷嘴及工艺参数如表1所示。

第一次试验完成后,利用潜水泵将钻孔内矿浆

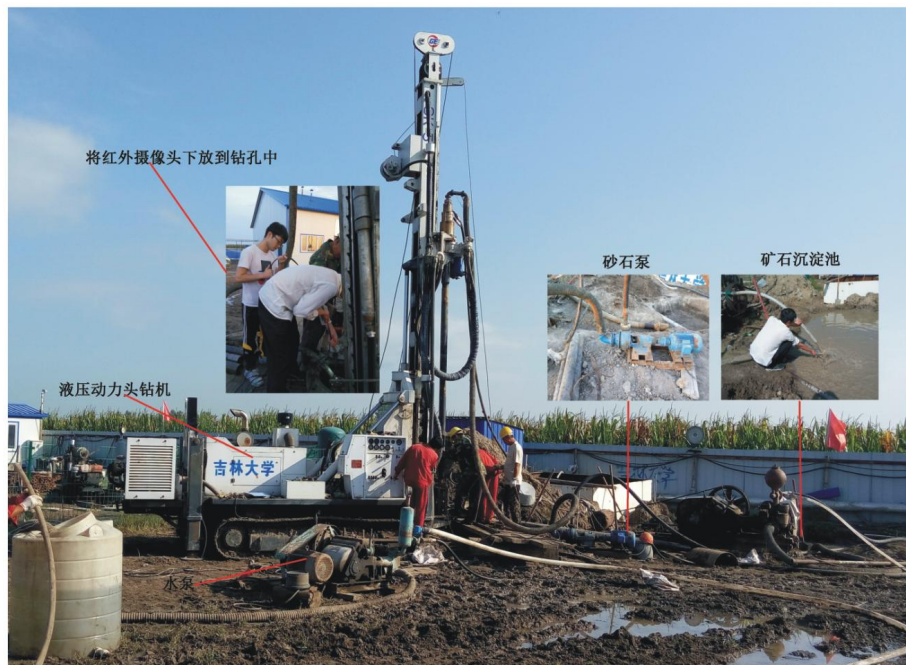


图8 可伸缩装置开采试验现场图

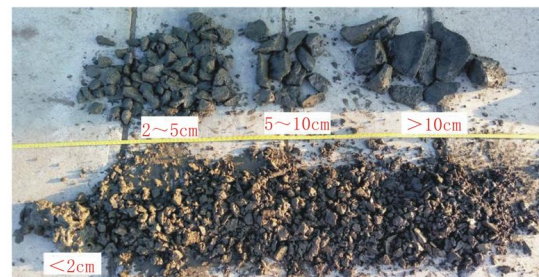
表1 试验的喷嘴及工艺参数

试验次数	喷嘴内径/ mm	泵压/ MPa	流量/( $L \cdot \min^{-1}$ )	喷嘴出口流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )
1	4.2	4	52	62.7
2	6.4	4	145	75.1

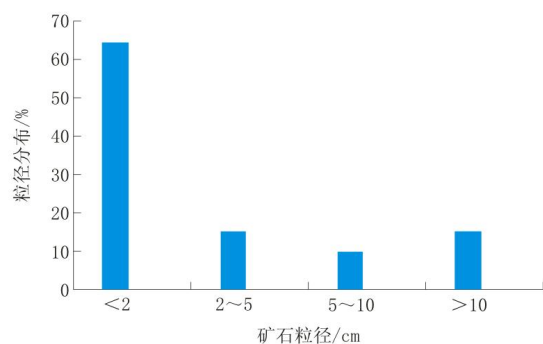
抽干,下入摄像头观察破碎情况。根据摄像资料显示和提钻时开采装置底部残留的大块泥岩分析,孔壁无大面积破碎情况,喷嘴破碎岩石效果差,仅能将岩石沿原有裂隙剥离,没有达到满意的破碎效果。并且较多的泥岩从孔壁剥离,从孔底输送到地表的矿石粒径不均匀,大于5 cm的矿石在90%以上,其中部分矿石体积较大。

根据第一次试验出现的问题,对钻孔水力开采喷嘴角度进行了修改,同时采用大泵量、高压力进行第二次试验。第二次试验结束后,可以发现输送到地表的矿石粒径减小很多。此次试验的矿石粒径<2 cm的占60%以上。如图9所示。

通过2次试验,表明伸缩式钻孔水力开采能够顺利展开和收回,并能够将破碎后的岩屑携带到地表,且返上来的岩屑尺寸表明破碎效果良好,整套开采工具在技术上具有可行性。同时,从试验结果可以看出,钻孔水力开采喷嘴角度对高压水射流碎岩有很大的影响,同时采用大泵量、高压力进行开采,可以形成粒径更小并且更加均匀的矿物颗粒,经计算开采效率可以达到8 t/h,与传统开采方式相比有



(a) 矿石粒径分布试验现场图



(b) 矿石粒径分布柱状图

图9 破碎矿石粒径分布

明显提升。

## 5 结论

(1) 研制了棘爪机构伸缩式水力开采装置。该装置采用连杆机构控制水枪的运动轨迹,棘爪机构锁定水枪的伸出角度,使水枪前端的喷嘴与矿层能

够时刻保持较优的破碎距离,扩大矿层开采范围,以提高开采效率,开采效率可以达到8 t/h。

(2)通过对棘爪机构伸缩水枪野外现场试验可以表明,该装置能够在矿层中顺利完成水枪连续伸出破碎矿层和水枪回收的各项动作,工作所需空间小、不易卡在孔底。验证了该套装置在技术上的可行性。

(3)通过分析开采矿石的粒径分布可以看出,粒径 $<2\text{ cm}$ 的矿石颗粒占到60%以上,表明大多数颗粒具有适合于水力传动的尺寸。说明该开采装置具有较好的开采效果。

### 参考文献:

- [1] 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, 17(4): 85-87.
- [2] 傅春, 颜恩锋. 采矿新技术——钻孔水力开采技术[J]. 矿冶工程, 2004, 24(4): 7-8.
- [3] 裴江红, 廖振方, 唐川林. 钻孔水力开采提升设备实验分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 19-23.
- [4] 裴江红, 廖振方. 钻孔水力采矿中气举模型的建立[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 373-376.
- [5] 王维, 陈晨, 王馨靓, 等. 水射流破碎油页岩应力波效应的数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S3): 343-348.
- [6] 陈晨, 张祖培, 王森. 吉林油页岩开采的新模式[J]. 中国矿业, 2007, 16(5): 55-57.
- [7] 阿里克谢. 拉科夫卡煤矿钻孔水力开采方法研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2013.
- [8] Н. И. 巴比切夫, А. Н. 尼古拉耶夫. 深孔水力开采工艺——开发矿产资源的新方法[J]. 国外金属矿山, 1995, (12): 33-40.
- [9] В. Л. Колибаба, 江天寿. 矿石和上覆岩层塌落时的钻孔水力开采工艺[J]. 国外地质勘探技术, 1997, (3): 36-39.
- [10] 杨林, 唐川林, 张风华. 地下矿产钻孔水力开采技术及其应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 662-665.
- [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] 温继伟. 油页岩钻孔水力开采用射流装置的数值模拟与实验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2014.
- [13] Jiwei Wen, Chen Chen, Ziwei Qi, et al. Research to Break Oil Shale with High Pressure Water Jet Based on Bionic Nozzle[J]. Procedia Engineering, 2014, 73: 264-268.
- [14] 陈大勇. 钻孔水力开采喷嘴性能测试实验台研制与圆柱形喷嘴参数优化研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2012.
- [15] 唐良广, 冯自平, 李小森, 等. 海洋渗漏型天然气水合物开采的新模式[J]. 能源工程, 2006, (1): 15-18.
- [16] 乌效鸣, 胡郁乐, 杨倩云, 等. 钻孔水力采矿研究方法的探讨[J]. 探矿工程, 2002, (6): 24-26.
- [17] 陈晨, 高帅, 李刚, 等. 一种基于棘爪锁紧机构的伸缩水枪: 中国, CN201410280791. 8[P]. 2015-12-30.