

液动潜孔锤用于干热岩钻进的优化与试验

王跃伟, 李 宽, 张恒春, 齐力强, 杨泽英, 薛倩冰, 贾明浩

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:我国目前能源结构对化石燃料依赖度过高,在全球能源转型的大环境下,作为一种新型清洁能源,干热岩具有储量巨大、资源丰富、分布广泛等优势。针对干热岩勘探开发中高温硬岩钻进的技术难点,对YZX178型液动潜孔锤进行了结构优化,并在某干热岩井中进行了试验应用。试验结果证实了YZX178型液动潜孔锤用于干热岩等坚硬地层进行冲击回转钻进的可行性和高效性,获得了与螺杆钻具接近的机械钻速,且具有节能环保、安全性高、维护方便、节约成本、高温适应性强等优势,但仍需进一步解决其工作寿命与牙轮钻头相匹配的问题。

关键词:干热岩;冲击回转钻进;液动潜孔锤;高温硬岩钻进

中图分类号:P634.5+6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)06-0036-06

Optimization and test of hydraulic DTH hammers used in hot dry rock drilling

WANG Yuewei, LI Kuan, ZHANG Hengchun, QI Liqiang, YANG Zeying, XUE Qianbing, JIA Minghao

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

Abstract: At present, China depends highly on fossil fuels in the perspective of the energy structure. In the context of global energy transformation, as a new type of clean energy, hot dry rock has the advantages of huge reserves, rich resources and wide distribution. In view of the technical difficulties in drilling of high temperature hard rock in hot dry energy exploration and development, YZX178 hydraulic DTH hammer was optimized in terms of its structure and applied in hot dry rock wells. The results show that YZX178 hammer is feasible and efficient for drilling hard formation such as hot dry rock. It has the advantages of energy saving, environmental protection, high safety, convenient maintenance, cost saving and high temperature adaptability. However, more work needs to be done to solve the problem of matching the working life of the hammer and the roller bit.

Key words: hot dry rock; percussive rotary drilling; hydraulic DTH hammer; high temperature hard rock drilling

0 引言

资源与能源是人类发展永恒的主题,极大推动人类社会进步的历次工业革命都是新的能源品种发现基础上产生的^[1]。我国连续多年实现经济快速增长,同时对能源的需求也迅猛增长,2017年我国能源消费31.32亿吨油当量,占全球能源消费总量的23.2%,其中,煤炭在全部能源消费中占比

60%,石油占比19%,天然气占比7%,化石能源占比达86%,非化石能源仅占14%,能源结构严重失衡^[2]。化石燃料属于耗竭性能源,往往需要数百万年甚至更久才能生成,消耗速度远超生成速度,对化石燃料的过度依赖导致能源危机频发。同时化石燃料燃烧产生过多二氧化碳,能源消费产生的排放占全球排放总量的2/3^[3],是加快全球变暖的重要

收稿日期:2021-09-26; 修回日期:2022-08-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.06.005

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“青海共和盆地贵德—达连海地区干热岩资源调查评价”(编号:DD20211337)、“共和盆地恰卜恰干热岩试验性开发与评价”(编号:DD20190136)

第一作者:王跃伟,男,汉族,1985生,高级工程师,探矿工程专业,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,河北省廊坊市金光道77号,yourvie@126.com。

引用格式: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.

因素之一,给人类带来严峻挑战。

在应对气候变化和促进可持续发展的双重需求驱动下,全球能源转型正在发生深刻变化,我国更是提出了碳达峰碳中和的战略目标。干热岩是一种新型清洁能源,储量巨大,资源丰富,分布广泛,我国陆区地下3~10 km范围内干热岩资源量折合标准煤856万亿t。根据国际干热岩标准,以其2%作为可开采资源量计,约为2015年全国能源总消耗量的4000倍^[4]。目前我国干热岩勘探开发尚处于探索阶段,钻探是大多数能源勘探与开发中不可或缺的重要技术手段,干热岩钻进面临的较大难题是温度高、强度高、硬度大、研磨性强,采用常规回转钻进工艺方法,存在钻进效率低、钻井周期长、材料消耗大、钻进成本高等劣势。

液动冲击回转钻进技术是一种高效、优质、低耗的技术,相对常规回转钻进可大幅度提高机械钻速、

回次进尺和钻头寿命^[5-9]。液动潜孔锤是液动冲击回转钻进的核心技术之一,在孔内循环介质驱动下对钻头产生高频连续的冲击载荷,从而提高碎岩效率,不需要增加额外设备和动力即可实现硬岩地层快速钻进效果,同时利于井眼保直,是干热岩井钻进的较好选择。制约其在干热岩勘探开发中应用的因素主要有密封材料对高温环境的适应性,以及液动潜孔锤对全面钻进泵量的适应性等。

1 液动潜孔锤结构优化

1.1 YZX系列液动潜孔锤基本结构

YZX系列液动潜孔锤的基本结构延续了在大陆科学钻探工程中应用效果显著的双喷嘴复合式结构^[10-14],并在此基础上运用了水力学理论对喷嘴处的结构和整体流道进行计算和优化,提高了液动潜孔锤的工作稳定性。YZX系列液动潜孔锤的结构如图1所示^[15-17]。

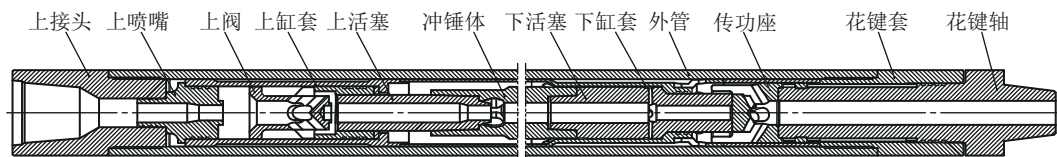


图1 YZX178型液动潜孔锤结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of YZX178 hydraulic DTH hammer

钻具下入井内未至井底时,上阀,上活塞、冲锤体、下活塞、传功座及花键轴(与钻头相连)在重力作用下皆处于下限位置,钻具下部通道顺畅,钻井液可直接排出,无法满足液动潜孔锤工作条件,确保冲孔和起下钻过程中钻具不出现空打情况,保证井内安全。钻头到达井底后,传功座进入下缸套并封闭内部通道,冲锤(包括上活塞、冲锤体和下活塞)下腔压力升高,建立起冲锤的下端面与上端面之间的压差,驱动冲锤上行。上阀在喷嘴处高速射流的卷吸作用下迅速上行,先于冲锤运动,到达其上限位置后等待冲锤上行。当冲锤到达上限位置时,上阀下端面与冲锤上端面形成密封,迅速关闭了冲锤中心通道,产生的水击作用推动上阀和冲锤一起下行。与此同时,冲锤下腔高压消失。上阀到达下限位置后,冲锤上端面与上阀下端面脱离,打开了冲锤中心的通道,冲锤在重力和惯性作用下继续下行,并冲击花键轴。中心通道打开后冲锤下腔恢复高压,并于冲击

完成后抬锤上行开始下一次冲击。

1.2 YZX178型液动潜孔锤高温适应性改进

干热岩地层温度通常在180℃以上,针对干热岩钻进高温硬岩工作环境,对原有YZX178型液动潜孔锤进行了耐温性改进。主要思路是提高采用O形圈的耐高温性能。

项目组广泛调研市场上现有O形圈耐温情况,找到了一种某公司生产的价格相对较低的进口材料制成的耐高温O形圈(以下简称“进口O形圈”),与目前液动潜孔锤常用的多种O形圈一起,利用WGZ型精密鼓风干燥箱(图2)进行了高温试验,温度设置为200℃。试验进行5.5 h后,常用的O形圈表面便出现了大量裂纹(见图3a),且在外力作用下非常容易发生断裂,完全失效;而进口O形圈50 h后性能依然良好(见图3b),且具有良好的拉伸能力。

虽然干热岩地层温度一般在180℃以上,但通常正常钻进时循环温度 ≥ 150 ℃,上述试验结果表



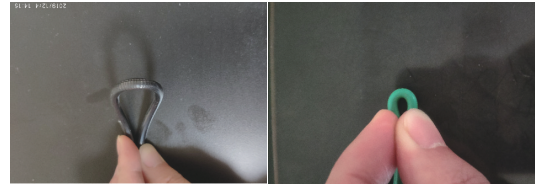
图2 WGZ型精密鼓风干燥箱

Fig.2 WGZ type precision blast drying oven

明,在YZX178型液动潜孔锤中采用的进口O形圈完全可以满足干热岩钻进耐温要求。

1.3 YZX178型液动潜孔锤泵量适应性改进

包括YZX系列液动潜孔锤在内的很多液动潜



(a) 国产O形圈(5.5 h) (b) 进口O形圈(50 h)

图3 国产O形圈与进口O形圈200℃高温环境放置后性能对比
Fig.3 Performance comparison between domestic O-rings and imported O-rings after placement in the high temperature environment of 200°C

孔锤,其泵量适应性往往存在“小口径不够吃,大口径吃不了”的情况,针对提高大口径液动潜孔锤的泵量适应性,项目组提出一种砧阀式结构,可以通过调节砧阀的阀孔大小来满足不同的泵量输入条件,或在相同泵量条件下降低工作压降,同时还可以明显降低水垫效应,提高能量利用率,其结构如图4所示。

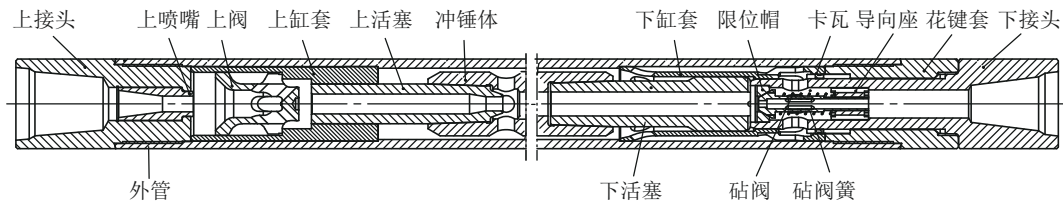


图4 砧阀式液动潜孔锤结构

Fig.4 Structure of the hammer with the valve in the anvil

液动潜孔锤不工作或液动潜孔锤下腔压力不足以顶开砧阀簧时,限位帽与砧阀头之间通过锥面形成密封;液动潜孔锤工作时在冲击发生前的冲程后半程,随冲锤组件的高速运动,压缩液动潜孔锤下腔工作介质,导致下腔压力升高,砧阀组件受到高压作用砧阀压缩砧阀簧沿导向座下移,限位帽与砧阀头间的通道打开,快速提高了中间通道的过水面积,部分液体分流经中心通道流过,迅速降低下腔压力,从而消除或大大降低水垫效应对冲击功的影响,提高液动潜孔锤输出的冲击功。而在抬锤过程,由于下活塞区压力降低,砧阀在砧阀簧的弹性力作用下上行,部分或全部封闭过水通道,加速抬锤。

1.4 YZX178型液动潜孔锤室内试验

YZX178型液动潜孔锤在我所液动冲击回转钻进试验室进行了室内试验(见图5),最大输入泵量达1800 L/min,与干热岩钻进生产实践中所用泵量较为匹配。



图5 YZX178型液动潜孔锤室内试验

Fig.5 YZX178 hammer laboratory test

试验结果表明, YZX178型液动潜孔锤通过调整阀孔大小可以适应 800~1800 L/min 的超大泵量范围, 均能获得较好的工作状态。在相同泵量条件下, 随着阀孔孔径增大, 液动潜孔锤工作压降进一步降低。部分性能参数如表 1 所示。

表 1 YZX178型液动潜孔锤性能参数

Table 1 YZX178 hammer performance parameters	
项 目	技术参数
钻具外径/mm	178
钻孔直径/mm	216
钻具长度/mm	2720±50
钻具质量/kg	415±10
冲锤行程/mm	30~60
自由行程/mm	25~32
冲击频率/Hz	7~15
冲击功/J	200~400
工作泵量/(L·min ⁻¹)	800~1800
工作压降/MPa	2.5~4.0(清水介质)

2 YZX178型液动潜孔锤用于干热岩钻进试验

YZX178型液动潜孔锤配合牙轮钻头在某干热岩井进行了钻进试验, 试验于井深 2030.46 m 时开始, 试验井段为 2030.46~2041.04 m。主要目的是验证其在干热岩钻进中的提速效果, 并探索较优工艺参数。

配合 YZX178型液动潜孔锤钻进的钻头为史密斯 8 1/2 ST RJ2952, 钻具组合为: $\varnothing 215.9$ mm 牙轮 $\times 0.25$ m + YZX178型液动潜孔锤 $\times 2.73$ m + $\varnothing 172$ mm DC $\times 82.42$ m + 411 \times 4A10 接头 $\times 0.50$ m + $\varnothing 114$ mm HWDP $\times 56.50$ m + 4A11 \times 410 接头 $\times 0.50$ m + $\varnothing 127$ mm DP。

试验开始前在井口进行了动作试验, 确保液动潜孔锤可正常工作后方可下井。液动潜孔锤到井底后先以防空打状态循环 1 个周期以上方可开始钻进, 钻头跑合时采用钻压 ≥ 20 kN, 泵量为 1440 L/min, 立压显示 7.5~8.0 MPa, 转盘转速 56 r/min, 正常钻进时钻压基本维持在 30~40 kN。

井深 > 2039 m 后钻速明显变慢, 立压与最开始相比减少 1 MPa。由于钻速较慢, 适当加大钻压并在 40~60 kN 范围内调整钻压, 但效果仍然不如钻压 30~40 kN 时好。钻至 2041 m 时钻时已超过 1 h, 由于这是 YZX178型液动潜孔锤在干热岩井第一次

应用, 担心其冲击功过大给钻头带来过大损伤而引发井内事故, 不得不提钻。

液动潜孔锤提出井后再次进行井口试验, 液动潜孔锤仍然可以正常工作。钻头除掉了一个水眼外, 牙齿及保径基本无磨损, 轴承完好, 亦无崩齿现象。图 6 为钻头入井前和出井后情况对比。



(a) 入井前 (b) 出井后

图 6 钻头入井前及出井后情况对比

Fig. 6 Comparison of drill bits before tripping-in and tripping-out of the well

3 液动潜孔锤用于干热岩钻进试验效果分析

YZX178型液动潜孔锤首次在干热岩井中成功应用, 初步显示了其在干热岩等坚硬地层钻进的可行性和高效性, 且与螺杆钻具相比具有一定优势。

3.1 具有一定高效性

液动潜孔锤试验中考虑到其冲击功较大, 可能对牙轮钻头的轴承造成损害, 故在液动潜孔锤试验中采用了性能相对更为优秀的进口史密斯钻头。由于缺乏经验导致提前提钻, 采用液动潜孔锤钻进进尺较少, 仅只试验了一个回次。在机械钻速方面, 液动潜孔锤 + 牙轮钻头的钻进工艺与螺杆 + 牙轮钻头接近, 差异较小。表 2 为采用牙轮钻头钻进的相邻 3 个回次钻速情况。

图 7~图 9 为采用牙轮钻头钻进的相邻井段钻时对比情况, 其中 3K06 回次采用螺杆 + 牙轮钻头钻进工艺, 提钻后钻头磨损很轻, 1978~2028 m 井段平均钻时为 36.13 min/m; 3K08 回次采用液动潜孔锤 + 牙轮钻头钻进工艺, 提钻后钻头基本没有磨损, 2031~2041 m 井段平均钻时为 39.03 min/m; 3K09 回次采用螺杆 + 牙轮钻头钻进工艺, 提钻后钻头磨损很严重, 外径磨至 207 mm, 截取前半段钻头尚未有较大磨损的 2041~2091 m 井段, 平均钻时为 40.70 min/m。

表2 相邻井段不同钻进工艺机械钻速对比

Table 2 Comparison of mechanical drilling rates between different drilling processes in adjacent well sections

回次	钻进工艺	钻头型号	井段/m		进尺/m	纯钻时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)
			自	至			
3K06	螺杆+牙轮	SMD637HDY	1923.72	2028.38	104.7	64:35	1.62
3K08	液动潜孔锤+牙轮	ST RJ2952	2030.46	2041.04	10.58	7:25	1.43
3K09	螺杆+牙轮	HFT637HDY	2041.04	2171.43	130.4	94:10	1.38

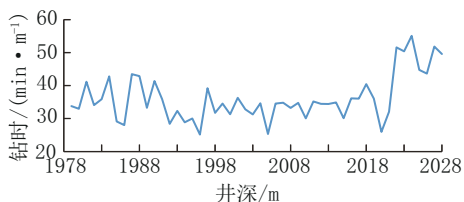


图7 3K06回次1978~2028m井段钻时曲线

Fig.7 Drilling time curve of 3K06 run over of 1978~2028m well section

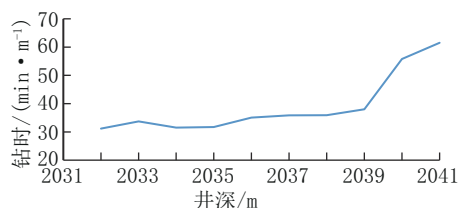


图8 3K08回次2031~2041m井段钻时曲线

Fig.8 Drilling time curve of 3K08 run over of 2031~2041m well section

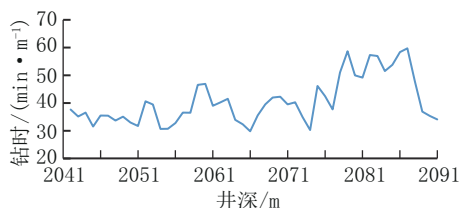


图9 3K09回次2041~2091m井段钻时曲线

Fig.9 Drilling time curve of 3K09 run over of 2041~2091m well section

3.2 与螺杆钻具对比的优势

由于缺乏相关经验,本次液动潜孔锤应用于干热岩钻进试验回次及进尺均较少,但取得的数据基本证明,在机械钻速方面,液动潜孔锤+牙轮钻头钻进与螺杆+牙轮钻头钻进十分接近,均能在较大程度上提高干热岩等硬岩地层机械钻速。与螺杆钻具相比,液动潜孔锤钻进有以下技术特点或优势。

(1)液动潜孔锤钻具耐高温性能更强。O形圈

目前是限制液动潜孔锤高温适应性的唯一零件,通过室内试验证实,进口材料制成的O形圈可在200℃高温环境放置50h而保持良好的工作性能。螺杆钻具中的定子普遍采用橡胶材料,目前国产螺杆钻具普遍耐温小于150℃,虽然可通过进口橡胶材料等措施提高其温度适应性,但整体成本过高,限制了其在干热岩钻进中应用。而YZX178型液动潜孔锤仅需要几个O形圈,每个O形圈成本不到10元,与钻具整体成本相比成本基本没有增加。另外,在保证加工精度的前提下,可摆脱对橡胶材料的依赖从而实现金属密封,更适应干热岩的高温条件。

(2)采用液动潜孔锤钻进需要更小的工作压降。螺杆钻具的工作压降普通在5MPa左右,而液动潜孔锤钻进所需压降只有其50%左右,输入功率也随之降低一半,在绿色节能方面具有一定优势。

(3)采用液动潜孔锤钻进需要更小的转速。采用液动潜孔锤钻进所需转速较小,往往只需要40~70r/min,而螺杆钻具本身提供的转速将近200r/min,较高的转速同时也增加了钻头的磨损速度,降低了钻头的寿命。

(4)液动潜孔锤方便更换易损件。目前液动潜孔锤基本可以连续工作60h以上,出井后仅需要现场更换易损件即可重新下井,继续使用,使用非常方便,且使用成本较低。而根据现场应用情况,螺杆钻具寿命大多在150h左右,之后需要送回到厂家重新注胶翻新,增加了运输和维护成本,且现场需要配置多套螺杆钻具。

4 总结与展望

YZX178型液动潜孔锤首次在干热岩钻井中成功应用,初步展示了其应用于干热岩等高温坚硬地层钻进的可行性和高效性。液动潜孔锤在干热岩钻井中应用,其机械钻速与螺杆钻具接近,均能在较大程度上提高机械钻速,且具有节能环保、安全性高、

维护方便、节约成本、高温适应性强等优点。

液动潜孔锤的工作寿命受钻井液等诸多因素影响较大,尤其钻井液中固相颗粒在高速射流作用下对阀和活塞等易损件的冲蚀作用。提高液动潜孔锤工作寿命,更好地与牙轮钻头寿命相匹配,是其应用于干热岩开发中急需解决的问题,建议从以下3方面进行相关研究:一是优化钻井液流动通道,降低钻井液喷射速度,减少对液动潜孔锤相应零件的冲蚀;二是优化液动潜孔锤易损件材质,以提高其工作寿命;三是开展易损件表面硬化工艺研究,使其具有外硬内韧的特性。

参考文献(References):

- [1] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,2020,27(1):1-9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [2] 方圆,张万益,曹佳文,等.我国能源资源现状与发展趋势[J].矿产保护与利用,2018(4):34-42.
FANG Yuan, ZHANG Wanyi, CAO Jiawen, et al. Analysis on the current situation and development trend of energy resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4): 34-42.
- [3] 张所续,马伯永.世界能源发展趋势与中国能源未来发展方向[J].中国国土资源经济,2019,32(10):20-27,33.
ZHANG Suoxu, MA Boyong. Development trend of world energy and future development directions of China's energy[J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(10): 20-27, 33.
- [4] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-459.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 449-459.
- [5] 殷琨,蒋荣庆.发展中的冲击回转钻进技术[J].探矿工程,1997(5):53-55.
YIN Kun, Jiang Rongqing. On-going percussive-rotary drilling technology[J]. Exploration Engineering, 1997(5): 53-55.
- [6] 杨甘生.冲击回转碎岩机理探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):19-21.
YANG Gansheng. Discussion on rock broken mechanism of percussive-rotary drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(2): 19-21.
- [7] 常玉军,殷琨.冲击回转碎岩机理试验研究[J].探矿工程,2001(4):62-64.
CHANG Yujun, YIN Kun. Research on the percussive rotary rock fragmentation mechanism [J]. Exploration Engineering, 2001(4): 62-64.
- [8] 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.
- [9] 甘心.钻井提速用振动冲击工具研究进展[J].钻探工程,2021,48(2):85-93.
GAN Xin. Advances in vibration impactors for drilling acceleration [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 85-93.
- [10] 苏长寿,谢文卫,杨泽英.系列高效液动潜孔锤的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(3):27-31.
SU Changshou, XIE Wenwei, YANG Zeying. Study and application of high efficiency hydro-hammer [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(3): 27-31.
- [11] 苏长寿.液动潜孔锤技术现状及发展设想[J].探矿工程,2003,30(1):28-30.
SU Changshou. Status quo of the hydro-hammer technique and its development prospect [J]. Exploration Engineering, 2003, 30(1): 28-30.
- [12] 谢文卫,苏长寿,孟义泉.YZX127型液动潜孔锤的研究及应用[J].探矿工程,2003(S1):276-281.
XIE Wenwei, SU Changshou, MENG Yiquan. Application of and research on YZX127 hydro-hammer [J]. Exploring Engineering, 2003(S1): 276-281.
- [13] 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):31-32.
XIE Wenwei, SU Changshou, SONG Aizhi. Research on new hydro hammer with high impact energy [J]. Exploration Engineering, 1998(6): 31-32.
- [14] 谢文卫.大陆科学钻探液动潜孔锤深孔应用研究与实践[D].武汉:中国地质大学(武汉):2010.
XIE Wenwei. Research and application of hydraulic hammer in CCSD[D]. Wuhan: Chinese University of Geoscience, 2010.
- [15] 王跃伟,杨泽英,谢文卫,等.YZX130型液动潜孔锤研究及其在WFSD-4孔中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):143-145.
WANG Yuewei, YANG Zeying, XIE Wenwei, et al. Research on YZX130 hydraulic hammer and its application in WFSD-4 well [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 143-145.
- [16] 王跃伟,刘秀美,李得新,等.YZX108型液动潜孔锤的研制与试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):85-88.
WANG Yuewei, LIU Xiumei, LI Dexin, et al. Development and test of YZX108 hydraulic DTH hammer [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(8): 85-88.
- [17] 王跃伟,陆洪智,齐力强,等.多参数液动潜孔锤测试平台的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):54-59.
WANG Yuewei, LU Hongzhi, QI Liqiang, et al. Development of the multiparameter hydraulic down hole hammer test bench [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11): 54-59.

(编辑 李艺)