

准噶尔盆地玛页1井长筒取心技术

曹龙龙^{1,2,5}, 张恒春^{1,2}, 王稳石^{1,2}, 闫家^{1,2}, 徐小龙³, 黄浩平⁴, 胡晨^{1,5}

1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;
2. 中国地质调查局深部地质钻探技术研究中心, 河北廊坊 065000;
3. 新疆油田公司勘探事业部, 新疆克拉玛依 834000;
4. 中国石油西部钻探克拉玛依钻井公司, 新疆克拉玛依 834000;
5. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083

摘要: 玛页1井是新疆油田股份公司在准噶尔盆地西部隆起乌夏断裂带部署的一口风险探井, 目的是探索风城组页岩油和常规高孔火山岩油藏的勘探潜力, 全井设计取心 275 m, 实际取心 445 m, 该井具有取心井段长、致密泥岩地层取心效率低、裂隙发育段易堵心等特点。针对该区域地层特点及玛页1井长井段取心面临的技术难点, 通过应用KT216型钻具长筒取心技术, 配套井底动力高转速驱动金刚石钻进工艺, 与邻井相比, 玛页1井长井段取心钻进综合效率提高 1.79 倍, 连续取心长度 445 m, 单回次取心长度 41.97 m, 创该区域历史最高纪录, 可为后续该区域长井段连续取心实施提供参考和借鉴。

关键词: KT型取心钻具; 长筒取心; 井底动力驱动取心; 金刚石取心钻头; 玛页1井; 准噶尔盆地

中图分类号: P634; TE24 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)05-0094-06

Long barrel coring technology for Well Maye-1 in Junggar Basin

CAO Longlong^{1,2,5}, ZHANG Hengchun^{1,2}, WANG Wenshi^{1,2}, YAN Jia^{1,2},
XU Xiaolong³, HUANG Haoping⁴, HU Chen^{1,5}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Deep Geological Drilling Technology Research Center, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China;

3. Exploration Division of Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang 834000, China;

4. Karamay Drilling Company of CNPC Western Drilling Company, Karamay Xinjiang 834000, China;

5. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Well Maye-1 is a venture exploration well deployed in the Wuxia fault zone of the Western uplift of Junggar Basin by Xinjiang Oilfield Company Limited. The purpose is to explore the prospecting potential of shale oil and conventional high porosity volcanic rock oil reservoirs in Fengcheng Formation. The designed coring length of the whole well was 275m with the actual coring length of 445m. The well is characterized with long coring interval, low coring efficiency in tight mudstone formation, easy core jamming in fracture developed sections, etc. In view of the formation characteristics in the area and the technical difficulties faced by the long coring interval of Well Maye-1, the long barrel core drilling process with the KT216 tool was applied in combination with diamond drilling at high RPM driven by bottom hole power. Compared with adjacent wells, Well Maye-1 had an increase of 1.79 times in comprehensive drilling efficiency over the long coring interval with the continuous coring length of 445m and the coring length per run of 41.97m, setting the record in the history of the area. It can provide reference for the subsequent implementation of continuous coring over long well sections in the area.

收稿日期: 2022-06-15; 修回日期: 2022-07-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.05.013

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“松辽盆地资源与环境深部钻探工程”(编号: DD20160209)、“苏皖赣地区页岩油气战略选区调查(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20201171)、“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(编号: DD20211421); 中国地质科学院勘探技术研究所科技项目“保压密闭取心技术方案设计及关键机构试验研究”(编号: YB202206)

第一作者: 曹龙龙, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 勘查技术与工程专业, 主要从事取心钻探和深部钻探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, 13833686142@163.com。

引用格式: 曹龙龙, 张恒春, 王稳石, 等. 准噶尔盆地玛页1井长筒取心技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 94-99.

CAO Longlong, ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, et al. Long barrel coring technology for Well Maye-1 in Junggar Basin[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 94-99.

Key words: KT coring tool; long barrel coring; bottom hole power driven coring; diamond coring bit; Well Maye-1; Junggar Basin

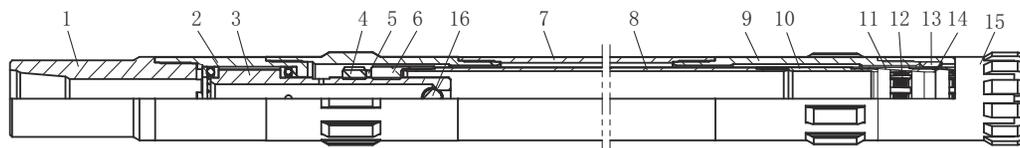
0 引言

玛页1井部署在新疆玛湖凹陷,目的是探索玛湖凹陷北斜坡带二叠系风城组页岩油和常规高孔火山岩油藏重大勘探领域的勘探潜力,开辟玛湖凹陷下二叠统碱湖碳酸盐页岩油新领域。该区域二叠系风城组云质类致密岩可钻性差、裂隙发育、回次取心进尺短、取心效率极低,邻井长井段取心平均机械钻速不足0.4 m/h,平均单回次进尺仅8.6 m,应用常规取心技术远不能满足玛页1井长井段连续取心的时效要求。为了缩短建井周期,实现致密岩地层取心提速,中石油西部钻探克拉玛依钻井公司应用中国地质科学院勘探技术研究所研发的KT216型钻具长筒取心技术^[1-2],配套井底动力高转速驱动孕镶金刚石钻头工艺^[3-5],大幅改善了风城组云质类致密

岩、泥岩地层的取心效率,累计取心进尺445.58 m,岩心采取率97.96%,实现平均回次进尺17.78 m,最长单回次进尺41.97 m。KT216型钻具长筒取心技术及配套工艺在玛页1井的成功应用,为该区域致密岩地层长井段高效取心开辟了新方法。

1 KT216型钻具结构及取心工艺

KT216型取心钻具属于双管单动取心钻具,由3大部分组成:悬挂机构、外总成和内总成。悬挂机构由上接头、轴承腔、轴承、心轴、锁母几部分组成,主要实现钻具内外管回转单动作用;外总成由外管、金刚石扶正器、钻头组成;内总成由内管接头、内管、短接、上下卡簧座以及卡簧组成,如图1所示。其规格参数如表1所示。



1—上接头;2—轴承腔;3—心轴;4—螺母;5—弹性垫圈;6—内管接头;7—外管;8—内管;9—扩孔器;10—内短节;11—上卡簧座;12—卡簧;13—扶正环;14—卡簧座;15—钻头;16—钢球

图1 KT216型带双扶正器取心钻具结构

Fig.1 KT216 core drilling tool structure with the double centralizers

表1 KT216型钻具规格参数

Table 1 Specification of KT216 drilling tool

型号	外筒规格	内筒规格	岩心直径	钻头外径
KT216	194	146	124	215.9

KT216型钻具配套的长筒取心技术体系,通过大陆科学钻探松科2井超千米连续取心应用验证并

优化完善,其在地质勘探大口径取心及油气勘探领域多次应用并取得明显成效。相比石油常规取心钻具川8-4型,同等 $\varnothing 215.9$ mm钻头直径时,岩心直径增加18.1%,钻头切削地层面积减少12.21%,理论碎岩体积小、效率更高。KT型钻具有单点和多点扶正结构,多筒联装的长筒取心钻具一般采用多点扶正结构,多筒之间采用金刚石扶正器连接,单筒到四筒自由组合实现10~42 m单回次取心进尺,三筒联装的长筒钻具结构如图2所示。



图2 KT216型钻具三筒联装的长筒钻具示意

Fig.2 Schematic diagram of the long barrel drilling tool assembled with three KT216 core barrels

KT216型钻具可配套多种取心工艺,包括地表驱动与井底螺杆钻或涡轮钻复合驱动回转钻进^[6-8],地表驱动与井底液动锤、螺杆钻或涡轮钻复合驱动冲击回转钻进,根据井内工况或地层特点也可选择地表面驱动进行取心钻进。

2 玛页1井取心施工情况

2.1 取心要求

根据地质设计,玛页1井主要在风城组和佳木河组实施取心任务,地层岩性为深灰色泥质云质岩、云质泥岩、凝灰岩、砂岩,取心井径 $\Phi 215.9$ mm,取心井段4577~5031 m,设计取心进尺275 m,岩心直径 ≤ 100 mm,岩心采取率 $\geq 96\%$ 。

2.2 技术难点

(1)玛页1井取心层位中的风城组含大量云质致密岩硬度大,可钻性7~8级,该地层全面钻进中使用牙轮或PDC钻头平均机械钻速不足1 m/h,邻井风南14井应用常规方法在该地层取心机械钻速0.15 m/h,邻井J100XX井常规取心平均机械钻速 < 0.4 m/h。

(2)取心井段存在高角度裂隙发育、破碎地层,钻进中易发生岩心堵塞、磨耗现象,尤其高角度裂隙开裂后,形成的楔形状堵心形态解堵困难,严重影响机械钻速和回次进尺长度。

(3)玛页1井属于深井长井段连续取心,起下钻次数多,裸眼时间长,快速高效完成取心任务才能保证安全完井。

2.3 取心方法

2.3.1 取心钻具与钻头选型

玛页1井取心层位中有大段云质岩和云质泥岩,通过分析邻井取心资料,云质致密岩的可钻性差,常规取心工艺在该地层取心效率极低。针对玛页1井地层特性和长井段连续取心特点,配套井底动力高转速驱动的长筒工艺,优选孕镶胎块式热压金刚石钻头^[9-11],如图3所示。钻头结构上胎块式唇面强度高,在软硬互层不易崩齿,胎体硬度根据地层变化可选范围大,在强研磨性地层,选用大硬度胎体,反之亦然。在云质泥岩、泥质云质岩等致密岩地层选用HRC25~28;地层含砂量增大,研磨性增强时,为保证井底动力高转速驱动长筒取心钻进中钻头的寿命,选用胎体硬度HRC28~32^[12-14]。

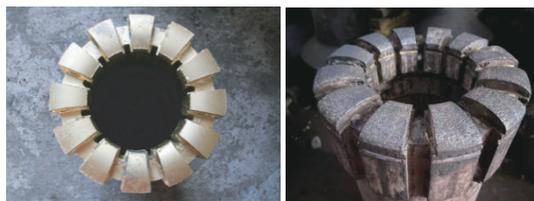


图3 $\Phi 215.9$ mm孕镶胎块式热压金刚石钻头

Fig.3 $\Phi 215.9$ mm impregnated block hot pressed diamond bit

2.3.2 取心技术措施

钻具组合: $\Phi 215.9$ mm孕镶金刚石钻头+KT216型长筒取心钻具+ $\Phi 172$ mm螺杆/ $\Phi 178$ mm涡轮钻具+ $\Phi 158.8$ mm钻铤+ $\Phi 165$ mm随钻震击器+ $\Phi 158.8$ mm钻铤+浮阀接头+ $\Phi 127$ mm钻杆柱。

钻进参数:钻压40~60 kN,顶驱转速15~20 r/min,排量23~25 L/s,可根据转盘扭矩适时调整钻压和排量,确保动力钻具在井底达到良好的运行状态。

根据玛页1井地层条件和钻井取心特点,在长筒取心技术实施过程中制定了以下关键技术措施。

(1)保持井眼通畅,确保取心钻具下入顺利。在距离井底50 cm时,以微小于正常钻进时的排量开泵建立循环,清洗井底,通过泵压和扭矩观察螺杆或涡轮钻具运行状态,待泵压和扭矩稳定后开始下放钻具进行树心。

(2)井底有掉块或残留岩心时需注意控制给进速度,确保岩心进入钻头通过卡簧位置后,可适当增加钻压和排量至钻进时正常参数。

(3)长筒取心加接单根需注意控制好钻台面上钻杆余留长度,保证钻柱在上提至零钻压时刚好可坐卡至井口,配合顶驱完成加接单根。

(4)割心时无需悬停磨心,停止顶驱回转,观察悬重直接上提钻具,卡断岩心。

3 应用效果分析

3.1 取心情况

玛页1井应用螺杆钻驱动取心钻进24回次,涡轮钻驱动取心钻进2回次,取心进尺累计445.58 m,获取岩心436.51 m(如图4所示),岩心采取率97.96%,平均机械钻速0.67 m/h,取心钻进累计用时61 d。其中,应用孔底动力 $\Phi 178$ mm涡轮钻具取

心试验2回次,相比螺杆钻机械钻速提高了20%。
取心钻进情况统计见表2。



图4 KT216型取心钻具获取的 $\text{\O}124\text{ mm}$ 岩心
Fig.4 $\text{\O}124\text{mm}$ cores obtained by KT216 coring tool

3.2 时效对比

玛页1井应用KT216型钻具与邻井风南X井应用石油常规取心钻具相比,机械钻速提高了71.8%,相比邻井长井段取心的J100XX井,机械钻速提高了97.87%,玛页1井应用长筒取心技术平均回次进尺17.78 m(应用涡轮钻具取心为技术试验,未应用长筒技术,不列入长筒取心指标统计),较J100XX井平均回次进尺提高了40.33%。玛页1井与邻井J100XX井长井段取心技术指标对比如表3所示。

3.3 效果分析

(1)KT216型钻具获取的岩心直径为124 mm,相比同规格石油常规取心钻具岩心直径大,从而钻头环状切削面积小,有利于提高钻头的碎岩效率^[15-16]。另一方面针对云质致密岩特点,井底动力驱动KT钻具配套金刚石钻进工艺,应用孕镶金刚石钻头高转速磨削钻进原理,提速效果显著^[17]。

(2)深井提钻取心过程中起下钻耗费大量时间,增加单回次进尺长度,减少起下钻时间,可有效提高综合钻探效率。KT216型钻具配套长筒取心技术,可根据井内情况适时调整钻具长度,在玛页1井上部裂隙发育段以双筒为主,下部较完整地层采用三筒或四筒联装的超长筒技术,单回次最大进尺41.97 m。玛页1井与邻井J100XX井长筒取心技术指标对比如图5所示,KT216型钻具长筒取心技术平均回次进尺、平均钻时、米进尺综合钻时[米进尺综合钻时=(回次纯钻进时间+井内循环、划眼时间+提、下钻时间及其他井口辅助时间)/回次进尺]3项指标均高于石油常规取心技术,优势明显。

(3)在风城组二段裂隙发育的破碎地层,为解决岩心堵塞频繁和岩心消耗问题,增加分流接头,优化钻具内部泥浆分流比例,调整钻具内筒泥浆过流量,

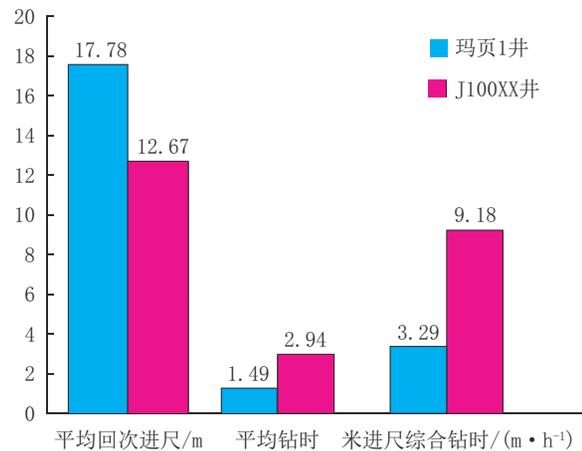


图5 玛页1井与邻井J100XX井长筒取心技术指标对比
Fig.5 Comparison of long barrel coring technical indexes between Well MaYe-1 and adjacent Well J100XX

表2 KT216取心钻具在玛页1井取心技术指标

Table 2 Coring technical index of KT216 coring tool in Well MaYe-1

驱动方式	回次数	井段/m	进尺/m	心长/m	岩心采取率/%	机械钻速/(m·h ⁻¹)
顶驱+螺杆	24	4577.34~5012.34	426.81	417.74	97.87	0.67
顶驱+涡轮	2	5012.34~5031.11	18.77	18.77	100.00	0.94
合计	26		445.58	436.51	97.96	0.67

注:本文仅论述常规取心,所有参数指标统计均不包含密闭取心

表3 玛页1井与J100XX井取心技术指标对比

Table 3 Comparison of coring technical indexes between Well MaYe-1 and Well J100XX

井名	取心井段/m	总进尺/m	回次数	平均回次进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
玛页1井	4577.34~5012.34	426.81	24	17.78	0.67
J100XX井	3458.83~3820.58	253.48	20	12.67	0.34

既充分清理岩心管内壁与岩心环状间隙岩屑渣,减小岩心入筒阻力,又避免过量泥浆冲蚀碎裂岩心。针对易堵心的高角度楔形裂缝发育井段,严格控制钻进参数,应用“小规程参数”,即一定范围内减小钻压、泥浆排量和转速,精准控制钻进参数。以上技术措施的应用,均有效缓解了岩心堵塞对回次进尺长度和机械钻速的影响^[18-20]。

4 结论

(1)井底动力高转速驱动KT钻具的长筒取心技术,充分发挥了孕镶金刚石钻头在致密硬岩地层高转速磨削钻进的性能优势,明显改善了玛页1井云质致密岩地层取心效率。同时,井底动力驱动取心钻进中全井段钻柱低速回转,稳定性高,减少了对井壁的干扰和破坏,保证了风城组裂隙发育井段安全钻进。

(2)长筒取心技术实施中,要根据地层及钻进工艺灵活调整长筒策略,长筒钻具的多支点扶正机构使钻具刚性增大、通过性受限,从单筒到多筒入井应采取“循序渐进”原则,钻遇复杂地层时,要及时优化钻具筒数和钻进参数,建议风城组二段的高角度裂隙发育地层,采用双筒组合及“小规程参数”较为合理。

(3)在深井及超深井长井段连续取心钻进中,长筒取心技术减少了起下钻和井口辅助时间,显著提高了综合钻探效率,节省了钻井成本,减轻了工人劳动强度,并且随着井深与取心长度的增加,经济效益愈发明显。KT216型长筒取心技术为深井及超深井长井段连续取心提供了一种经济、高效的方法。

参考文献(References):

- [1] 朱永宜,王稳石,张恒春,等.我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J].地质学报,2018,92(10):1971-1984.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Implementation overview of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and technical systems of core boring[J]. Acta Geologica Sinica, 2018,92(10):1971-1984.
- [2] Zhu Yongyi, Wang Wenshi, Wu Xiaoming, et al. Main technical innovations of Songke Well No.2 Drilling Project[J]. China Geology, 2018,1(2):187-201.
- [3] 曹龙龙,朱永宜,王稳石,等.松科2井三、四开次取心钻头技术对策与应用效果[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(S1):213-216.
CAO Longlong, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Technical measures of coring bit for the third and fourth intervals of Well Songke-2 and the application effects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(S1):213-216.
- [4] 朱永宜.KZ型单动双管取心钻具的研制与应用[J].石油钻探技术,2006,34(3):19-22.
ZHU Yongyi. Development and application of KZ single rotary and double tube core barrel[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006,34(3):19-22.
- [5] 王稳石,朱永宜,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探项目取心钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):28-31,38.
WANG Wenshi, ZHU Yongyi, JIA Jun, et al. Coring drilling technology in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(9):28-31,38.
- [6] 闫家,王稳石,张恒春,等.松科2井带涡轮钻具取心钻进探索[J].钻采工艺,2019,42(1):31-34,3.
YAN Jia, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Practice of turbo-drill core drilling in Well SK-2[J]. Drilling & Production Technology, 2019,42(1):31-34,3.
- [7] 朱芝同,伍晓龙,董向宇,等.松辽盆地页岩油勘探大口径取心技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):45-50.
ZHU Zhitong, WU Xiaolong, DONG Xiangyu, et al. Large diameter coring technology for shale oil exploration in Songliao Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):45-50.
- [8] 闫家,朱永宜,王稳石,等.松科2井涡轮钻具取心钻进现场试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(S1):217-220.
YAN Jia, ZHU Yongyi, WANG Wenshi, et al. Field test of core drilling with turbo drill in Well Songke-2[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(S1):217-220.
- [9] 王稳石,张恒春,闫家.科学超深井硬岩取心关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):9-12.
WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, YAN Jia. Key technology of coring in hard rocks for scientific ultra-deep drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(1):9-12.
- [10] 杨凯华,王达,张晓西.科学深钻金刚石钻头的结构与性能分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):30-33.
YANG Kaihua, WANG Da, ZHANG Xiaoxi. Analyses on structure and performance of diamond bits in scientific drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005,32(S1):30-33.
- [11] 朱永宜,王稳石.松科一井(主井)取心钻进工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(9):1-5,10.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi. Coring drilling technology in

- Well-1 (main shaft) of Songliao Scientific Drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(9):1-5,10.
- [12] 邓元洲,冯明,刘彬,等. 钻井取心技术现状及进展[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(12):253-254.
- DENG Yuanzhou, FENG Ming, LIU Bin, et al. Status and progress of drilling coring technology[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(12):253-254.
- [13] 王稳石,隆东,闫家,等. 松科2井二开大口径同径取心钻进技术[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京:地质出版社, 2015:749-754.
- WANG Wenshi, LONG Dong, YAN Jia, et al. Large diameter and same diameter coring drilling technology in the second spud of Well SK-2 [C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Eighteenth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2015:749-754.
- [14] 孙吉伟,沈立娜,杨甘生,等. 孕镶金刚石钻头的局部体积破碎研究[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5):232-238.
- SUN Jiwei, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Study on local volume breakage of diamond-impregnated bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5):232-238.
- [15] 庄生明,吴金生,张伟,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-4孔取心钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9):126-129.
- ZHUANG Shengming, WU Jinsheng, ZHANG Wei, et al. The core drilling technology used in the Borehole WFSD-4 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):126-129.
- [16] 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.
- [17] 孟庆鸿,张恒春,胡郁乐,等. 防泥包钻头的优化设计与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(1):71-73.
- MENG Qinghong, ZHANG Hengchun, HU Yule, et al. Optimum design and application of balling-preventing bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1):71-73.
- [18] 孙庆仁,申胡成,杨新斌,等. 松科1井南孔钻井取心技术[J]. 石油钻采工艺, 2007(5):8-12.
- SUN Qingren, SHEN Hucheng, YANG Xinbin, et al. Nan-kong well drilling and coring technology for Songke 1 well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007(5):8-12.
- [19] 张恒春,王稳石,李宽,等. KT178型取心钻具在共和干热岩钻井中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(2):29-34.
- ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, LI Kuan, et al. Application of the KT178 core tool in Gonghe hot dry rock exploratory wells[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):29-34.
- [20] 潘晓毅,秦建新,谢德龙,等. 金刚石钻头井底流场CFD模拟研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(4):34-38.
- PAN Xiaoyi, QIN Jianxin, XIE Delong, et al. CFD simulation of diamond bit's bottomhole flow field[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016, 36(4):34-38.

(编辑 李艺)