

深部地热钻探中硬塑性泥岩地层钻头应用研究

王勇军^{1,2}, 梁伟^{*1,2}, 张涛^{1,2}, 杜志强³, 王磊³, 佟铮^{1,2}

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东德州 253072;

2. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 山东德州 253072;

3. 山东省德水新能源有限公司, 山东德州 253072)

摘要: 深部地热钻探中, 通常会钻遇硬塑性泥岩, 严重影响钻探施工效率。以雄安新区深部地热钻探工程实例为基础, 深入分析硬塑性泥岩机械钻速低的原因, 研究制定钻头的优化改进方案。实践应用证明: 针对地层岩性特征设计的个性化PDC钻头配合螺杆钻具, 可以有效提高硬塑性泥岩地层机械钻速; 使用三棱形非平面复合片和三角形复合片等异形复合片可以有效提高PDC钻头的抗冲击能力、提高钻头在含砾石地层的使用寿命, 同时也可以提高硬塑性泥岩地层机械钻速。探索出了一套适用于深部地热钻探中硬塑性泥岩地层钻进的钻头应用方案。

关键词: 深部地热钻探; 硬塑性泥岩; PDC钻头; 异形复合片; 螺杆钻具

中图分类号: P634.4; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)03-0092-07

Research on bit application of hard plastic mudstone formation in deep geothermal drilling

WANG Yongjun^{1,2}, LIANG Wei^{*1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, DU Zhiqiang³, WANG Lei³, TONG Zheng^{1,2}

(1. The Second Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Lubei Geo-engineering Exploration Institute), Dezhou Shandong 253072, China;

2. Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy Exploration and Reinjection, Dezhou Shandong 253072, China;

3. Shandong Deshui New Energy Co., Ltd., Dezhou Shandong 253072, China)

Abstract: Hard-plastic mudstone is usually encountered in deep geothermal drilling, which seriously affects the drilling efficiency. Based on the example of deep geothermal drilling project in Xiong'an New Area, this paper deeply analyzes the reasons of low mechanical drilling rate in hard plastic mudstone, studies and forms the scheme of optimized and improved bit. The practical application proves that the mechanical drilling rate in hard plastic mudstone formation can be effectively improved by using the personalized PDC bit according to the lithology characteristics of the formation combined with the screw drilling tool. The impact resistance of PDC bit can be effectively improved by using special-shaped compacts such as triangular prismatic and triangular and the service life in gravelly formations can thereupon be increased, in addition, the mechanical drilling rate in hard plastic mudstone formation can also be increased. At last, a drill bit application scheme suitable for hard plastic mudstone formation in deep geothermal drilling is made.

Key words: deep geothermal drilling; hard plastic mudstone; PDC bit; special-shaped compacts; screw drilling tool

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-03-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.03.012

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“雄安地热清洁能源调查评价”(编号: DD20189112); 山东省地矿局地质勘查和科技创新项目“大口径深部钻探完井技术研究”(编号: KY201946); 山东省地矿局地质勘查引领示范与科技攻关项目“高温地热超深孔勘查取心钻探关键技术研究与应用”(编号: KY202219)

第一作者: 王勇军, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 勘查技术与工程专业, 从事深部资源钻探技术研究工作, 山东省德州市大学东路1499号, wyjed511@sina.com。

通信作者: 梁伟, 男, 汉族, 1972年生, 高级工程师, 从事水工环地质和地热资源勘查研究工作, 山东省德州市大学东路1499号, 21483126@qq.com。

引用格式: 王勇军, 梁伟, 张涛, 等. 深部地热钻探中硬塑性泥岩地层钻头应用研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 92-98.

WANG Yongjun, LIANG Wei, ZHANG Tao, et al. Research on bit application of hard plastic mudstone formation in deep geothermal drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 92-98.

0 引言

地热是蕴藏在地球内部的热能,具有储量大、分布广、绿色低碳、可循环利用、稳定可靠等特点,是一种现实可行且具有竞争力的清洁能源。开发利用地热资源可减少温室气体排放、改善生态环境,已经成为能源结构转型的新方向,对我国调整能源结构、保障能源安全和实现“双碳”目标具有重要意义^[1-3]。

近年来,地热资源的勘探与开发利用逐渐向深部发展,在深部热储盖层中通常发育有硬度高、且具有塑性的泥岩,称为硬塑性泥岩,此类地层的钻进效率很低,严重影响钻探施工效率,影响深部地热资源勘探与开发利用的推进,提高硬塑性泥岩地层钻进效率迫在眉睫。

钻头是否满足地层钻进需求是影响钻进效率的关键因素。本文以雄安新区深部地热钻探项目为依托,针对硬塑性泥岩特征开展钻头应用研究,并在工程实践中优化改进,总结经验教训,有利于提高深部地热资源钻探施工效率、推动深部地热资源勘探与开发利用。

1 钻探施工中遇到的问题分析

自 2017 年以来,山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院)在雄安新区先后完成了 4 眼深度超过 4000 m 的地热资源勘探井^[4]。已完钻的 4 眼地热勘探井,在热储盖层——古近系中下部地层中钻遇了多层硬塑性泥岩,钻效很低。

前期施工的 D17 井二开井径为 311.2 mm,上部

地层主要为泥岩和粉细砂岩,采用钢齿牙轮钻头钻进至 1420 m 时,钻头磨损严重、进尺寿命较短,此时所钻地层为古近系东营组底部砾岩。随后换用 437 系列镶齿牙轮钻头,牙齿形状为偏顶勺形,在古近系东营组砾岩、沙河街组泥岩、砂岩及砾岩地层中,转盘回转钻进机械钻速约为 0.9~2.2 m/h,其中,泥岩段机械钻速较低、含砾及砂岩段机械钻速较高。钻进至 1602 m 时机械钻速骤降,钻井液循环正常、转盘回转扭矩降低,上返极少细粒状硬质泥岩和粘泥团,加大钻压后、机械钻速亦未有明显提高,起钻检查未发现泥包等异常情况,钻头磨损亦较轻。随后换用钢齿牙轮和常规 PDC 钻头,机械钻速略有提升、但仍然很低(见表 1),且在含砾较多地层中,钢齿牙轮快速磨损、常规 PDC 钻头严重磨损(见图 1)。钻头进尺寿命仅有 40~60 m,钻头使用寿命短,机械钻速低,加之经常起下钻检查、更换钻头,严重影响了钻探施工效率。



图 1 遇砾石磨损严重的钢齿牙轮和常规 PDC 钻头
Fig.1 Severely wore teal tooth and conventional PDC bit when encountering gravel

表 1 D17 井钻头优化前硬塑性泥岩地层钻进情况 Table 1 Statistics of drilling in hard plastic mudstone formation of well D17 before bit optimization							
孔段/ m	孔径/ mm	钻头型号	硬塑性泥岩地 层厚度/m	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)	钻时/ h	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
1602~1604	311.2	437 偏顶勺型	2	80~100	84	5.83	0.34
1604~1607	311.2	437 偏顶勺型	3	100~120	84	8.33	0.36
1609~1614	311.2	HAT127	4	100~120	84	10.00	0.40
1614~1615	311.2	PDC	1	80~100	84	2.38	0.42
1616~1619	311.2	PDC	3	80~100	84	7.32	0.41
平均							0.38

针对以上问题,分析研究认为:沙河街组地层年代较久,其中较纯的泥质在上覆地层压力长期作用下压实脱水,形成结构致密、硬度较高,且具有一定

塑性特征的泥岩^[5-6]。在硬塑性泥岩地层钻进时,一方面孔底岩石结构致密、硬度较高,钻头牙齿(复合片)很难吃入岩石;另一方面孔底岩石具有一定的塑

性,孔底岩石在受到钻头牙齿(复合片)压力时发生塑性变形,只有当塑性变形达到一定程度时,孔底岩石结构才会被破坏、才会产生裂纹,进而形成体积破碎^[7-9]。实际钻进过程中常规钻头牙齿(复合片)很难压碎具有塑性的泥岩形成体积破碎,从而不能实现牙轮钻头冲击压碎-滑动剪切碎岩作用及PDC钻头复合片切削碎岩作用^[10],仅仅依靠钻头牙齿(复合片)磨削碎岩,因而效率很低。同时,在含砾较多地层中,砾石硬度高、研磨性强,钢齿牙轮钢齿上的合金层被快速消磨,而钢齿本身耐磨性差,使得钢齿牙轮的牙齿被快速磨平,形成钢齿牙轮钻头磨损严重的状况;常规PDC钻头在钻遇含砾较多的地层时,由于砾石本身硬度较高、与其周围岩石性能差异较大,使得地层呈现软硬不均的状态,PDC钻头旋转切屑碎岩过程中,复合片承受的反作用力极度不一致,形成强烈的冲击振动效果,而复合片本身具有抗磨性能较好、抗冲击性能差的特征^[11],使得PDC钻头上的复合片在较大的冲击力作用下崩裂损坏、进而快速磨损,复合片磨损后则快速磨损钻头体,出现PDC钻头磨损严重的状况。

2 钻头优化改进

根据以上分析,为解决钻探施工中所遇难题,首先选用耐磨性能更好的镶齿牙轮钻头,并对镶齿牙轮钻头的牙齿特征和钻进参数进行优化调整,使牙齿能够吃入、并压碎孔底岩石,实现牙轮钻头冲击压碎-滑动剪切碎岩作用,从而提高机械钻速。其次针对地层岩性特征,设计加工个性化的PDC钻头,使其具有较好的抗冲击性能,能够满足含砾地层钻进要求,同时通过PDC钻头切屑结构的优化设计,提高PDC钻头的碎岩能力,配合使用孔底动力钻具^[12],充分发挥PDC钻头剪切碎岩效率高的特点,提高在硬塑性泥岩地层的机械钻速。

2.1 牙齿特征及钻进参数优化

2.1.1 牙齿特征优化

根据前文分析,在硬塑性泥岩地层中,只有使孔底岩石在钻头牙齿碾压作用下产生足够大的变形,才能产生裂纹,进而形成体积破碎,从而提高碎岩效率。要使孔底岩石产生足够大的变形,就需要增大钻头牙齿压入岩石的深度和与岩石接触的面积,钻头牙齿需具有较长的出露长度和较大的齿顶宽度^[8-9];同时牙齿与孔底岩石接触面积增加后,单位

接触面积上的载荷就会降低,需要进一步增加钻压,也就需要牙齿具有较高的强度和韧性,在较大的钻压下不会发生折断;充分调研类似项目、类似地层牙轮钻头使用情况,会同牙轮生产厂家综合研究,优选出齿顶宽、齿长、韧性好的517G型宽齿牙轮钻头。

2.1.2 钻进参数优化

钻头牙齿吃入地层需要单位接触面积上有足够大的载荷、以抵抗岩石的抗压强度,同时牙齿压碎岩石还需要其与岩石有充分的接触时间^[9]。因此需加大钻压、增大钻头牙齿对岩石的压力,同时适当降低钻速、使牙齿与孔底岩石有充分的接触时间,硬塑性泥岩钻进参数优化调整为大钻压、较低转速。

2.1.3 应用效果

D17井钻进至1647 m后,换用优选的517G型宽齿牙轮钻头,在沙河街和孔店组地层中,钻遇硬塑性泥岩地层时,综合考虑现场设备、孔内钻具等因素,钻压由100~120 kN增加到140~180 kN、转速由84 r/min降低至60 r/min,机械钻速有了一定的提高,但仍然较低,见表2。而此时设计加工个性化PDC钻头的工作还未完成,结合工程实际情况,充分调研后决定采用螺杆钻具复合钻进提高碎岩能量、以提高机械钻速,采用螺杆钻具复合钻进后,在硬塑性泥岩地层的机械钻速有所提高,见表2。受各方面因素影响,D17井后续施工中未再对钻头进行进一步的研究,三开 $\varnothing 215.9$ mm井段一直使用517G型宽齿牙轮钻头配合螺杆钻具复合钻进,至穿过热储盖层、进入雾迷山组热储层。

2.2 设计加工个性化的PDC钻头

针对在硬塑性泥岩地层中,优化镶齿牙轮钻头牙齿特征和钻进参数改进后机械钻速仍然较低的问题,决定根据地层特性设计加工个性化的PDC钻头,配合使用孔底动力钻具,提高硬塑性泥岩地层钻进效率。

2.2.1 PDC钻头设计加工

根据前文分析,设计加工的PDC钻头,一方面要具有较强的碎岩能力,能提高硬塑性泥岩地层机械钻速;另一方面要具有较好的抗冲击性能,能够满足含砾地层钻进要求,具有较长的使用寿命。

设计加工的PDC钻头特征如下:

(1)钻头体:采用的钢体具有较好的韧性、可以承受较高的冲击力,有利于提高钻头的抗冲击性能,同时刚体钻头便于加工制作、磨损后易于修复。

表 2 优化调整后 D17 井中硬塑性泥岩地层钻进情况

Table 2 Statistics of drilling in hard plastic mudstone formation of well D17 after optimization and adjustment							
孔段/ m	孔径/ mm	钻头型号	硬塑性泥岩地层 累计长度/m	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)	钻时/ h	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
1647~1948	311.2	517G 型宽齿	43	140~180	60	93.50	0.46
1948~2348	215.9	517G 型宽齿	33	80~100	40+螺杆	62.25	0.53

(2)冠状部轮廓:设计为长抛物线型,相关研究表明,长抛物线型冠状部轮廓,既有较强的碎岩能力,又具有防泥包特性^[13-14]。

(3)刀翼形状及数量:侧翼设计为直线型,底翼窄、且在翼背部设计大倒角,刀翼数设计为 4 翼。底翼窄及翼背部设计大倒角可以减少刀翼与孔底岩石的接触面积,有利于复合片吃入岩石;目前在此类地层中应用的 PDC 钻头常为 4 翼或 5 翼,3 翼或 3 翼以下钻头因回转阻力大、运行极不稳定,在较硬地层 Ø 311.2 mm 孔径中几无应用。翼较少、底翼窄、侧翼直的钻头,在孔底回转稳定性相对较差,钻头上复合片不均衡承压,会在孔底形成高低不平、相互交叉的“刮痕”,有助于实现体积破碎,进而提高碎岩效率^[15-16]。

(4)复合片前倾角:设计为 15°~20°,内圈角度略大、外圈角度略小。相关试验表明,复合片前倾角越小、越有利于破碎塑性岩石,但前倾角减小、其抗冲击性能也会变差,同时也不利于排屑^[16-17]。

(5)复合片选择:选用国产 1619 型抗冲击型复合片,复合片金刚石复合层厚度为 3 mm。相关研究表明,金刚石复合层厚度越厚,抗冲击性能越好,但金刚石复合层厚度越厚,其造价越高,3 mm 厚的金刚石复合层已基本能满足此类地层钻进需求^[18]。

设计加工的 PDC 钻头实物见图 2。

2.2.2 应用效果

设计加工的 PDC 钻头在雄安新区 D19 及 D05



图 2 设计加工的 PDC 钻头实物
Fig.2 Picture of real products of the optimized and improved PDC bit

井中进行了应用,配合使用螺杆钻具,在硬塑性泥岩地层中的机械钻速有了明显提高(见表 3),但仍旧偏低,在硬塑性泥岩地层的机械钻速还需进一步提高。同时,在 D19 井中,设计加工的 2 只 PDC 钻头共钻进 301 m,钻头使用寿命基本能够满足钻进要求;但在地层砾石含量多、直径大、硬度高的 D05 井中,设计加工的 2 只 PDC 钻头仅钻进了 188 m,钻头使用寿命较短,设计加工的 PDC 钻头抗冲击性能还需要进一步提高,以应对砾石含量多、砾径大、硬度高的地层。

表 3 设计加工的 PDC 钻头在硬塑性泥岩地层钻进情况

Table 3 Statistics of drilling in hard plastic mudstone formation of well D17 after designed and processed PDC bit								
孔号	孔段	孔径/ mm	钻头型号	硬塑性泥岩地层 累计长度/m	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)	钻时/ h	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
D19	1706~2007	311.2	4 翼平面片 PDC	34	60~80	40+螺杆	49.25	0.69
D05	1303~1491	311.2	4 翼平面片 PDC	17	60~80	40+螺杆	24.17	0.70

2.2.3 PDC 钻头优化改进

针对设计加工的 PDC 钻头在含砾较多地层使

用寿命、在硬塑性泥岩地层的机械钻速还需进一步提高的问题。分析研究认为:在含砾较多地层钻头

使用寿命短,一方面与设计加工的PDC钻头所使用复合片抗冲击性能不足有关,复合片在地层砾石的冲击作用下快速损耗、钻头使用寿命短;另一方面,设计加工的钻头复合片为平面片,复合片与岩石接触面是一个平面,整个接触面都参与对岩石的切屑,容易造成“粘滑”和“抱团”效应,“粘滑”效应会使复合片瞬间受到强烈的冲击力,“抱团”效应还会造成复合片受力区域内应力集中^[15-17],两者都会加速复合片的崩裂失效、进而造成钻头快速磨损,亦会降低碎岩效率。而在硬塑性泥岩地层机械钻速低,除与“粘滑”效应有关外,还与复合片轮廓形状有关,现加工的PDC钻头复合片首先接触岩石的轮廓为圆弧线,不利于复合片小范围吃入岩石,易在硬塑性泥岩中形成“滑动”现象而降低碎岩效率^[17-19]。

根据以上分析,借鉴石油钻井中异形复合片应用经验,决定将原平面复合片更换为三棱形非平面复合片和三角形复合片。三棱形非平面复合片具有突出的棱脊、三角形复合片具有较尖的角,破碎岩石时,其棱脊(尖角)首先接触岩石,可以产生较大的点载荷,有利于小范围内压碎吃入岩石,提高压碎吃入岩石的效率,减轻“滑动”现象;在岩石受压产生塑性变形时,三棱结构还可以增大岩石进入拉剪状态的区域,进而提高碎岩效率^[19-20]。异形复合片可以减轻碎岩过程中的“滑动”现象及“粘滑”、“抱团”效应,提高碎岩效率、减小复合片所承受得冲击力,进而提高机械钻速和钻头使用寿命。其中三棱形非平面复合片还具有棱脊型的复合加强层,聚晶金刚石复合层也较平面复合片厚,抗冲击性能好于平面复合片,相关研究表明,三棱形非平面的复合片相较常规平面复合片抗疲劳冲击性能提高了95.7%^[20]。同时对复合片金刚石复合层进行脱钻处理,进一步提高复合片抗冲击性能。优化改进的异形复合片PDC钻头实物见图3、图4。

2.2.4 异形复合片PDC钻头应用效果

D19井自2007 m开始使用异形复合片PDC钻头,至进入雾迷山组热储层结束,在硬塑性地层中的机械钻速有所提高(见表4),基本满足了钻进需求。D19井使用三角形复合片和三棱形复合片PDC钻头各1只、并各修复使用1次,累计完成进尺912 m;其中三角形复合片PDC钻头使用寿命约为180 m左右,三棱形复合片PDC钻头使用寿命约为250 m左右,钻头使用寿命满足了正常钻进需求。



图3 三棱形复合片PDC钻头实物

Fig.3 Picture of real products of the triangular prismatic PDC bit



图4 三角形复合片PDC钻头实物

Fig.4 Picture of real products of the triangular PDC bit

D05井地层砾石含量较多、砾径大、硬度高,自孔深1591 m开始使用抗冲击性能更好的三棱形复合片PDC钻头,至进入雾迷山组热储层结束,在硬塑性地层中的机械钻速略有提高(见表4),基本满足了钻进需求。但钻头使用寿命未有明显提高,使用三棱形复合片PDC钻头3只、并修复使用3次,累计进尺597 m,钻头平均使用寿命约为100 m,且出现了钻头严重磨损报废的情况。

两种复合片钻头在后续施工的XK03-1井中进行了推广应用,在含砾较少的地层首选三角形复合片PDC钻头,钻头使用寿命短、磨损较严重时则换用三棱形复合片PDC钻头,共使用异形片PDC钻头5只、并修复使用3次,累计进尺2269 m,钻头平均使用寿命超过280 m,应用效果良好。异形复合片PDC钻头在硬塑性泥岩地层应用情况统计见表4。

表 4 硬塑性泥岩地层异形复合片 PDC 钻头钻进情况

Table 4 Statistics of social-shaped PDC bit drilling in hard plastic mudstone formation

孔号	孔段/ m	孔径/ mm	钻头型号	硬塑性泥岩地 层累计长度/m	钻压/ kN	转速/ (r·min ⁻¹)	钻时/ h	机械钻速/ (m·h ⁻¹)
D19	2007~2919	311.2	4 翼三角片 PDC	53	6~8	40+ 螺杆	68.00	0.78
		311.2	4 翼三棱片 PDC	28	8~10	40+ 螺杆	39.43	0.71
D05	1591~2185	311.2	4 翼三棱片 PDC	91	6~8	40+ 螺杆	124.67	0.73
XK	1241~3059	311.2	4 翼三角片 PDC	30	6~8	40+ 螺杆	37.50	0.80
		311.2	4 翼三棱片 PDC	29	8~10	40+ 螺杆	40.27	0.72
03-1	3059~3498	215.9	4 翼三角片 PDC	100	5~6	40+ 螺杆	129.85	0.77
		215.9	4 翼三棱片 PDC	37	7~8	40+ 螺杆	52.10	0.71

3 结论

(1)在深部地热钻探中,采用长宽硬质合金齿、大钻压、低转速的技术手段,在硬塑性泥岩中钻效提高效果不明显。

(2)根据硬塑性泥岩及含砾地层特征,针对性的进行个性化的PDC钻头设计,可以有效地提高深部地热钻探中硬塑性泥岩地层机械钻速、延长钻头使用寿命。

异形复合片可以进一步提高PDC钻头的碎岩能力和抗冲击性能,三角形复合片在提高机械钻速方面效果较好,较平面复合片机械钻速提高超过10%;三棱形复合片在应对砾石、提高钻头寿命方面效果较好。

(3)在砾石含量多、砾径大、硬度高的地层中,使用三棱形复合片后钻头寿命仍旧较低,在适宜于此类地层的PDC钻头切削部位结构设计、提高复合片抗冲击性能等方面还需进一步深入研究。

参考文献(References):

[1] 庞忠和,孙彦龙,庞菊梅,等.雄安新区地热资源与开发利用研究[J].中国科学院院刊,2017,32(11):1224-1230.
PANG Zhonghe, KONG Yanlong, PANG Jumei, et al. Geo-thermal resources and development in Xiong'an New Area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(11): 1224-1230.

[2] 王贵玲,高俊,张保健,等.雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J].地质学报,2020,94(7):1970-1980.
WANG Guiling, GAO Jun, ZHANG Baojian, et al. Study on thermal storage characteristics and high-productivity geothermal well parameters of Wumishan Formation in Gaoyang Low Uplift Area, Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):1970-1980.

[3] 戴明刚,汪新伟,刘金侠,等.雄安新区起步区及周边地热资源特征与影响因素[J].地质科学,2019,54(1):176-191.
DAI Minggang, WANG Xinwei, LIU Jinxia, et al. Characteristics and influence factors of geothermal resources in the starting and adjacent zone of Xiong'an New Area[J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(1):176-191.

[4] 赵长亮,王勇军,聂德久,等.雄安新区D19井破碎热储层气举反循环钻进技术研究[J].钻探工程,2022,49(4):127-143.
ZHAO Changliang, WANG Yongjun, NIE Dejiu, et al. Gas lift reverse circulation drilling technology for D19 well in broken thermal reservoir in Xiong'an New Area[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):127-143.

[5] 樊腊生,贾小丰,王贵玲,等.雄安新区D03地热勘探井钻探施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):13-22.
FAN Lasheng, JIA Xiaofeng, WANG Guiling, et al. Drilling practice of D03 geothermal exploration well in Xiong'an New Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10):13-22.

[6] 王勇军,赵长亮,张明德,等.垦利东兴地区深层卤水普查井钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(6):28-31.
WANG Yongjun, ZHAO Changliang, ZHANG Mingde, et al. Drilling technology for deep brine reconnaissance wells in Kenli Dongxing area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(6):28-31.

[7] 祝效华,刘伟吉.热孔弹塑性完全耦合作用下的井底岩石应力分布[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):72-78.
ZHU Xiaohua, LIU Weiji. A coupled thermo and poro-elastoplasticity analysis of stress distribution in bottom-hole rocks during drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(5):72-78.

[8] 胡莉,况雨春,韩一维,等.塑性地层宽刃齿破岩机理研究与提速应用[J].石油机械,2022,50(8):52-60.
HU Li, KUANG Yuchun, HAN Yiwei, et al. Rock breaking mechanism of wide-bladed teeth in plastic formation and application of ROP increase[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50

- (8):52-60.
- [9] 何婷.宽齿牙轮钻头在海相硬塑性地层中的应用[J].石油和化工设备,2011,14(12):42-46.
- HE Ting. Application of wide tooth bit in marine hard plastic formation[J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2011, 14(12): 42-46.
- [10] 高明洋,张凯,周琴,等.高温硬地层钻进中PDC钻头切屑齿磨损研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):185-189.
- GAO Mingyang, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Wear of PDC cutters in high temperature hard for mation drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):185-189.
- [11] 祝效华,刘伟吉,贾彦杰.切削和侵入作用下层理岩层破碎机理浅析[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):444-451.
- ZHU Xiaohua, LIU Weiji, JIA Yanjie. Nvestigation on the mechanism of laminated rock fragmentation under the action of cutting and indenting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2):444-451.
- [12] 王勇军,代娜,郑宇轩.干热岩钻探关键技术探索[J].山东国土资源,2019,35(2):64-67.
- WANG Yongjun, DAI Na, ZHENG Yuxuan. Study on key technologies of dry hot rock drilling[J]. Shandong Land and Resources, 2019, 35(2):64-68.
- [13] 王兴忠,刘强,陆忠华,等.防泥包高效PDC钻头研制与应用[J].钻采工艺,2016,39(2):91-94.
- WANG Xingzhong, LIU Qiang, LU Zhonghua, et al. Development and application of anti-balling high-performance PDC bit [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(2):91-94.
- [14] 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,2011,34(2):87-91.
- MENG Qinghong, ZHANG Hengchun, HU Yule, et al. Optimum design and application of balling-preventing bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 34(2):87-91.
- [15] 杨迎新,杨燕,陈欣伟,等.PDC钻头复合钻进碎岩机理及个性化设计探讨[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):565-575.
- YANG Yingxin, YANG Yan, CHEN Xinwei, et al. Discussion on rock-breaking mechanism and individuation design of PDC drill bit in compound drilling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2):565-575.
- [16] 胡书锴,田锋,李汉月,等.超高温地热钻井耐磨PDC钻头研制及应用[J].钻采工艺,2020,43(9):2-3.
- HU Shukai, TIAN Feng, LI Hanyue, et al. Development and test appllction of high efficiency PDC bit for ultra-high temperature geothermal well[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(9):2-3.
- [17] 李琴,傅文韬,黄志强,等.硬地层中新型PDC齿破岩机理及试验研究[J].工程设计学报,2019,26(6):635-644.
- LI Qin, FU Wentao, HUANG Zhiqiang, et al. Rock breaking mechanism and experimental study of new PDC tooth in hard formation[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(6):635-644.
- [18] 孟昭,毛蕴才,张佳伟,等.超深层井底应力环境下PDC单齿破岩机理研究[J].石油机械,2020,48(5):1-7.
- MENG Zhao, MAO Yuncai, ZHANG Jiawei, et al. Research on single-tooth PDC rock breaking mechanism at ultra-deep bottomhole stress[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(5): 1-7.
- [19] 谢晗,祝雨春,秦超.非平面PDC切削齿破岩有限元仿真及试验[J].石油钻探技术,2019,47(5):69-73.
- XIE Han, KUANG Yuchun, QIN Chao. The finite element simulation and test of rock breaking by non-planar PDC cutting cutter[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5):69-73.
- [20] 刘建华,令文学,王恒.非平面三棱形PDC齿破岩机理研究与现场试验[J].石油钻探技术,2021,49(5):46-50.
- LIU Jianhua, LING Wenxue, WANG Heng. Study on rock breaking mechanism and field test of triangular prismatic PDC cutters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 46-50.

(编辑 王文)