

扭力冲击器复合钻进工艺在干热岩钻井中的试验应用

谭现锋^{1,2}, 战启帅^{1,2}, 张强^{1,2}, 王勇军³, 赵长亮³, 李生海^{1,2}, 陈宗涛⁴

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁 272100;

2. 山东省地热清洁能源勘查开发工程研究中心, 山东 济宁 272100;

3. 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;

4. 湖北工程学院机械工程学院, 湖北 孝感 432000)

摘要: 扭力冲击器在石油、天然气行业钻井中得到广泛应用, 具有提速增效的作用。而干热岩钻井工作环境不同于油气钻井, 面临着高温、高压、硬岩、强研磨性以及深井、超深井等问题, 因此对扭力冲击器进行了针对性设计, 并进行试验应用。在扭力冲击器2次入井试验中, 对硬—极硬岩地层进行了不同钻具组合下的钻进试验, 确定了扭力冲击器对钻进效率的影响机理。结果表明: (1) 扭力冲击器能够消除螺杆钻具因离心惯性力造成钻具的横向振动, 验证了扭力冲击器与螺杆钻具组合应用的可行性。相比未使用扭力冲击器井段, 机械钻速提高29.59%。(2) 从碎岩机理和地层适配性上, 相比PDC钻头, 牙轮钻头在扭力冲击器+螺杆钻具+转盘复合钻进的方式下, 有着较高的钻进优势。试验成果可为扭力冲击器与牙轮钻头匹配性研究和扭力冲击器与螺杆钻具的耦合性研究提供较好的技术基础。

关键词: 扭力冲击器; 复合钻进工艺; 干热岩钻井; 钻进效率

中图分类号: P634; TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)01-0094-08

Test of compound drilling with the torsional impactor in hot dry rock geothermal wells

TAN Xianfeng^{1,2}, ZHAN Qishuai^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, WANG Yongjun³,

ZHAO Changliang³, LI Shenghai^{1,2}, CHEN Zongtao⁴

(1. Shandong Provincial Lunan Geology and Exploration Institute (Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources No.2 Geological Brigade), Jining Shandong 272100, China;

2. Shandong Geothermal Clean Energy Exploration and Development Engineering Research Center, Jining Shandong 272100, China;

3. The Second Hydrogeology and Engineering Geology Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geological Survey (Lubei Geological Engineering Exploration Survey Institute of Shandong Province), Dezhou Shandong 253072, China;

4. College of Mechanical Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan Hubei 432000, China)

Abstract: The torsional impactor which can increase drilling rate and efficiency has seen wide use in oil and gas drilling industry. But hot dry rock drilling is quite different, where many difficulties such as high temperature, high pressure, hard rock, strong abrasiveness, deep and ultra-deep wells, are encountered. Specific design has been made on the torsional impactor in regard to these issues and trial use was conducted. A series of drilling tests were conducted on the torsional impactor with different drilling tool combinations in hard-extremely hard rock strata during two drilling trips to

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-09-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.01.014

第一作者: 谭现锋, 男, 汉族, 1977年生, 研究员, 地质工程专业, 博士, 主要从事深部地热资源勘探与开发、采煤沉陷区综合治理与生态修复工作, 山东省济宁市兖州区九州中路107号, geotan1977@126.com。

引用格式: 谭现锋, 战启帅, 张强, 等. 扭力冲击器复合钻进工艺在干热岩钻井中的试验应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 94-101.

TAN Xianfeng, ZHAN Qishuai, ZHANG Qiang, et al. Test of compound drilling with the torsional impactor in hot dry rock geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 94-101.

study its influence on drilling efficiency. The test results show that the torsional impactor can eliminate the lateral vibration of PDM caused by centrifugal inertia force, which verifies the feasibility of the combined application of the torsional impactor and PDM. ROP increased by 29.59% from the well section where the torsional impactor was not used. In addition, the roller cone bit had higher drilling advantages over the PDC bit in the combined drilling mode of the torsional impactor+PDM+the rotary table in terms of the rock fragmentation mechanism and the formation adaptability. The test results can provide theoretical basis for both the study of the matching between the torsional impactor and the cone bit and that for the coupling between the torsional impactor and PDM.

Key words: torsional impactor; compound drilling; dry hot rock drilling; drilling efficiency

0 引言

扭力冲击器可以提供冲击扭矩,能够有效抑制钻井时钻头的“粘滑振动”现象,提高机械钻速、缩短钻井周期、降低成本,在石油、天然气行业钻井中得到广泛应用,特别是在砂岩和碳酸盐岩沉积岩地层中的应用起到了提速增效的作用^[1-6]。但是干热岩钻井面临的是高温、高压、硬岩、强研磨性、深井和超深井等环境^[7-12],不同于油气钻井工作环境,所以需要扭力冲击器进行针对性的设计,以满足干热岩钻井环境下的钻井需求。

国内外现有关于扭力冲击器的应用研究主要集中在油气钻井领域,对干热岩钻井中使用扭力冲击器的研究还鲜有文献报道。为解决干热岩钻井过程中钻具失效和机械钻速低的问题,笔者从提高钻速、降低井内事故、保护钻头和降低成本方面克服现有钻井技术的不足,研发了一套适用于高温硬岩地层的扭力冲击器,并在干热岩钻井中进行了钻进试验,进一步提高了钻井效率。

1 干热岩钻进面临的问题

(1) 钻进效率低,钻头和钻具消耗大^[7-12]。

干热岩井钻遇地层岩性致密坚硬,岩体硬度大,单轴饱和抗压强度高,研磨性强,可钻性差,可钻性级别8~10。钻进过程中钻杆和钻具的摩阻增大,需增加钻压以使井底钻头保持高效的切削能力。施加的高钻压能量得不到及时释放,钻头短时间停止转动。上部钻柱蓄积足够破碎岩石的扭矩能量后,致使钻头短时间高速旋转。会使钻头切削齿承受巨大的冲击载荷,造成钻头切削齿磨损、破坏。

(2) 井底钻进工况复杂^[4-5]。

钻井深度大,钻柱长,钻柱在高速转动下产生横向、纵向(跳钻)和扭向的振动以及多种振动的组合。井下振动加速钻头切削齿的损伤,导致钻头寿

命和钻井效率降低。同时高速转动使钻柱与套管及井壁间磨损加剧,易造成钻杆疲劳损伤甚至断裂。

2 扭力冲击器在干热岩钻井中的应用分析

2.1 可行性分析

(1) 扭力冲击器将钻井液的流体能量转换成扭向的、高频的、均匀稳定的机械冲击能力,可以消除钻杆带动钻头运动时出现的一种或者多种振动现象(横向、纵向、扭向),有利于钻压和扭矩的传递^[1-6,13-16],消除牙轮钻头的跳钻危害,促进牙轮钻头的冲击碎岩作用。

(2) 扭力冲击器轴向往复提供冲击扭矩,是一种剪切式的冲击作用,消除PDC钻头的“粘滑”^[1-6,14-16],也可以增强牙轮钻头横向剪切碎岩的作用。

(3) 扭力冲击器长度短,适用于不同钻具组合^[4-6,13,17],可以与螺杆马达组合实现硬岩钻进。

(4) 螺杆钻具的转子在定子型腔内作行星运动,产生离心惯性力造成钻具的横向振动,易导致井眼轨迹不规则,能耗增加^[7-11]。扭力冲击器轴向往复提供冲击扭矩,可以消除这种有害的横向振动。

2.2 扭力冲击钻具研究现状

在扭力冲击钻井技术研究上,我国起步较晚,主要对国外研究资料消化吸收后再创新来开展对扭力冲击钻井工具的研究,其中最具有代表性的研究单位是胜利石油管理局钻井工艺研究院和西南石油大学。2012年,胜利石油管理局钻井工艺研究院研制了SLTIDT型扭转冲击钻井工具,该工具结构相对简单并进行了室内试验和现场试验,结果表明SLTIDT型扭力冲击钻具具有能量转换率高的特点,能有效解决钻头在沉积岩地层钻井过程中产生的“粘滑”振动现象,提高了钻速,保障了钻井的稳定性,因钻具内未设计自动净化装置,岩屑沉积容易导

致扭转钻具内部碰撞机构无法正常工作。2009年,西南石油大学公布了2种分别以螺杆和涡轮驱动的新型扭力冲击钻井工具,在应用上各有优缺点。2011年由祝效华等人研制的涡轮扭力冲击钻井工具完成室内试验,该工具设计较为合理,可以实现对PDC钻头施加周期性的扭矩,不足之处是部分主要零部件磨损快、使用寿命短,扭力发生装置产生的单次冲击功小、能量转换率低。

国外的扭力冲击钻井工具——TorkBuster扭力冲击器虽然在石油钻探应用中取得了较好的钻井效果,但是其研究成果被予以了专利保护,国内使用成本高昂;国内的SLTIDT型扭力冲击钻井工具,虽然能够降低深井钻井中钻头“粘滑振动”现象,能有效提高钻井的机械钻速,但同时也存在部分零部件磨损快、容易卡死、工具寿命短、能量转换率低等不足之处。

扭力冲击器可以提供冲击扭矩,能够有效抑制钻头钻井时的“粘滑振动”现象,提高机械钻速、缩短钻井周期、降低成本,在石油、天然气行业钻井中得到广泛应用,但是干热岩钻井面临的是高温、高压、硬岩、强研磨性、深井和超深井等环境,不同于油气钻井工作环境,所以需要针对扭力冲击器进行针对性的设计,以满足干热岩钻井环境下的钻井需求

2.3 新型扭力冲击器结构和工作原理^[17]

2.3.1 新型扭力冲击器整体结构

如图1所示,扭力冲击器主要包括传动轴、轴承座、涡轮(定子和转子)、扭力传导接头、若干对扭力发生装置、深沟球轴承、推力球轴承以及相关接头等零部件。液力推动涡轮带动传动轴转动,并带动冲锤旋转以冲击冲击砧,从而产生扭力和振动,各对扭力发生装置中的两冲锤相互配合产生扭矩和扭力冲击,冲击砧将振动和扭力冲击通过扭力传导接头传递至下接头,并由下接头将振动和扭力冲击传递给钻头。

针对干热岩钻井地层具有硬度高、研磨性强的特点,对深沟球轴承、推力球轴承等零部件进行了优选,以提高扭力冲击器的使用寿命。

2.3.2 扭力发生装置结构

扭力发生装置是冲击器的关键零部件,其结构如图2所示,主要由冲击砧、冲锤和连接轴组成。

具体工作原理为:单个扭力发生装置是由1根连接轴(方形轴),2个冲锤,1个冲击砧,共4个零部

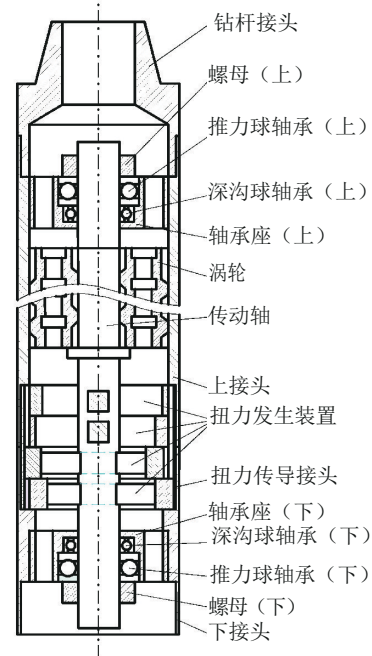


图1 新型扭力冲击器结构

Fig.1 Structure of the new type torsional impactor

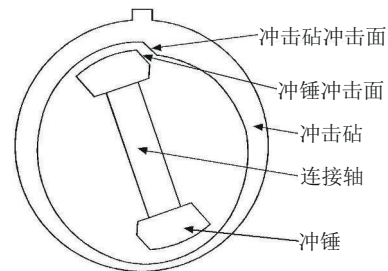


图2 扭力发生装置

Fig.2 Torsion generator

件组成。连接轴整体呈方形,与传动轴上的方形孔配合,并留有合适的间隙量。冲锤冲击面受到跟斜面垂直的一个作用力,该力可以分解为冲锤切向作用分力和连接轴轴向作用分力,该轴向作用分力带动连接轴和冲锤一起沿连接轴轴向,向冲击砧壁厚最薄处运动,从而使冲锤完成冲击任务后,能够绕过冲击砧最厚处的冲击面,继续旋转,进入下一个循环。单个扭力发生装置只能产生冲击力和冲击振动,要产生扭力则需要成对设计安装扭力发生装置,使产生的成对的冲击力,且冲击力大小基本相等,方向相反,作用不在同一条直线上,符合扭力作用要求,故能够产生扭力作用,又由于冲击过程中有冲击

振动,故该装置能够产生扭力和冲击。

在涡轮工作转速为500~600 r/min下,根据所需冲击频率和冲击力,选择扭力发生装置的对数和冲锤的质量以及冲击角。

2.3.3 工作原理

在钻井施工过程中,地面钻井液驱动装置将一定流速和压力的钻井液输送至涡轮处,以驱动涡轮转动,涡轮带动传动轴转动,传动轴带动连接轴转动,连接轴又带动冲锤转动以冲击冲击砧,而产生扭力和振动。冲击砧将扭力和振动通过扭力传导接头传递至下接头,并由下接头将扭力和振动传递给钻头,因此钻头在受到地面钻机和螺杆钻具提供的转动力的同时还会受到扭力发生装置提供的扭力和振动作用,从而可对钻头实现有效保护,并可使钻头在扭力冲击和振动作用下钻进,以实现高效碎岩,提高钻井效率。

2.4 新型扭力冲击器的性能参数及特点

190型新型扭力冲击器性能参数为:尺寸 $\Phi 190\text{ mm} \times 565\text{ mm}$,排量25~35 L/s,压降2~5 MPa,冲击频率24~40 Hz,冲击力9420~38096 N,冲击扭矩1480~2501 N·m。

该新型扭力冲击器的主要特点有:

(1)由涡轮提供动力,带动冲锤旋转冲击冲击砧,获得冲击力和冲击扭矩。钻井液流经扭力冲击器内腔的涡轮、轴承座导流孔时流道通畅,工作压降较低,工作性能稳定可靠;

(2)该结构设计比较巧妙,能够根据需要,设计安装多对扭力冲击发生装置,调节冲锤和冲击砧的接触面角度,以获得不同的冲击频率和冲击力,具备高冲击频率(24~40 Hz)、高冲击力(9420~38096 N)、高冲击扭矩(1480~2501 N·m)的能力;

(3)该新型扭力冲击器是纯机械式结构,无电子元件和橡胶件,可在干热岩高温钻井环境中工作;

(4)冲击振动部分结构简单,工作可靠,能够解决钻井过程中卡钻和“粘滑”现象等难题;

(5)本结构安装简单,配合螺杆钻具、三牙轮钻头和PDC钻头等能够有效提高深井硬岩地层的机械钻速。

3 新型扭力冲击器在花岗岩地层中的试验应用

在青岛即墨中深层同轴换热地热井项目中,扭力冲击器首次进行入井试验,地层岩性主要为花岗

岩,自浅到深,暗色物质逐渐减少,石英含量增加,硬度8~10级(见图3)。钻机为ZJ30型石油钻机,泥浆泵为3NB-500型泥浆泵。

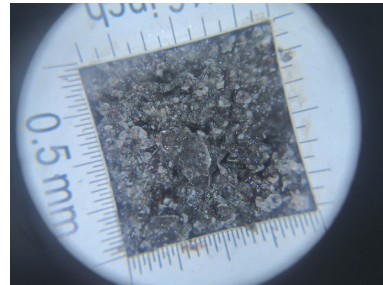


图3 花岗岩岩屑

Fig.3 Rock cuttings of granite

3.1 扭力冲击器试验情况

扭力冲击器入井后,初始钻压选择60~70 kN,转盘转速64 r/min,排量20.6 L/s,然后分别调整钻压、排量、转盘转速,进行不同工况下的机械钻速对比,见表1。在现场钻机现有能力下,采用钻压70 kN、转盘转速64 r/min、排量20.6 L/s的钻进参数达到了最优机械钻速,平均机械钻速1.27 m/h。

在相同工况条件下,使用三牙轮钻头+扭力冲击器+5LZ172×7螺杆马达的钻效与使用三牙轮钻头+5LZ172×7螺杆马达的钻效相比,使用扭力冲击器复合钻进井段平均机械钻速为1.27 m/h,而在未使用扭力冲击器复合钻进井段平均机械钻速为0.98 m/h,同比钻速提高29.59%,分别见表2和图4。

3.2 试验过程中的问题

因中深层同轴换热地热井现场钻机和钻具及其附属装备能力所限,使转盘+螺杆钻具+扭力冲击器复合钻井工艺在现场测试应用时存在以下问题:

(1)因现场3NB-500型泥浆泵性能限制,最大允许排量20.6 L/s,未能达到扭力冲击器的最优使用排量,使扭力冲击器的扭冲作用未得到最大效能的发挥,不能有效地稳定牙轮钻头的冲击碎岩效果,同时牙轮钻头的剪切碎岩能力亦没有得到明显增强。

(2)因现场钻井液净化装置能力不足,钻井液含砂量过高,造成扭力冲击器腔体和转子之间有岩屑充填。岩屑为高硬度、强研磨性的花岗岩,加大了扭力冲击器涡轮叶片和腔体以及各过流断面端口的

表1 扭力冲击器钻进参数调试过程

Table 1 Commissioning procedure for the torsional impactor

泵量/(L·s ⁻¹)	钻压/kN	转盘转速/(r·min ⁻¹)	泵压/MPa	井深/m			纯钻时间/min	机械钻速/(m·h ⁻¹)
				自	至	计		
20.6	40	34	8	2151.78	2151.88	0.10	20	0.30
20.6	40	34	8	2151.88	2151.98	0.10	20	0.30
20.6	50	34	8	2151.98	2152.23	0.25	20	0.75
20.6	60	34	8	2152.23	2152.61	0.38	20	1.14
19.5	70	64	8	2152.61	2153.61	1.00	47	1.28
19.5	60	64	8	2153.61	2154.61	1.00	56	1.07
19.5	50	64	8	2154.61	2155.61	1.00	71	0.85
20.6	70	64	8	2155.61	2156.61	1.00	43	1.40
18.0	70	64	8	2156.61	2157.61	1.00	45	1.33
19.5	70	64	8	2157.61	2158.61	1.00	45	1.33

表2 花岗岩地层平均机械钻速对比

Table 2 Comparison of ROP in granite formation

钻进方法	井段/m	井径/mm	段长/m	纯钻时间/h	平均钻速/(m·h ⁻¹)	钻具组合
未使用扭力冲击器复合钻进	1894.85~2151.78	215.9	256.93	269.67	0.95	三牙轮钻头+5LZ172×7螺杆马达
	2223.16~2308.28	215.9	85.12	78.83	1.08	三牙轮钻头+5LZ172×7螺杆马达
	平均				0.98	
使用扭力冲击器复合钻进	2158.6~2223.16	215.9	64.55	50.74	1.27	三牙轮钻头+172型扭力冲击器+5LZ172×7螺杆马达

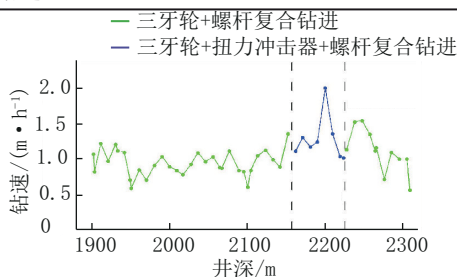


图4 花岗岩地层钻速对比曲线

Fig.4 Comparison curves of ROP in granite formation

磨损,使扭力冲击器在进尺71.38 m后过早失效,这一点也反映出扭力冲击器没有发挥到最大效能,在材质的选择上也存在一定的问题。

(3)钻进过程中,泵压相对较高,钻杆多次发生刺漏,导致泵压不稳,影响了扭力冲击器的正常运转。

4 新型扭力冲击器在片麻岩地层中的试验应用

4.1 现场试验

在山西大同某干热岩勘探项目,再次进行了转盘+螺杆钻具+扭力冲击器复合钻井工艺现场应用

试验。采用ZJ40型石油钻机,F1300型泥浆泵,地层岩性主要为片麻岩(图5),在2313.26~2500.94 m井段进行了不同工艺下的入井测试应用对比,平均机械钻速见表3,不同工艺钻速对比曲线见图6。



图5 片麻岩岩心

Fig.5 Rock cores of gneiss

由表3可以看出,使用牙轮钻头+扭力冲击器+螺杆的复合钻进的机械钻速与未使用扭力冲击器没有太大差距,扭力冲击器未能有效提高牙轮钻头的碎岩能力和使用寿命。使用 $\varnothing 215.9$ mm六刀翼PDC钻头的扭力冲击器+螺杆钻具的复合钻进,平均机械钻速1.71 m/s,相对于牙轮钻头复合钻进,平均机械钻速提高了10.32%。

表3 片麻岩地层平均机械钻速对比

Table 3 Comparison of ROP in gneiss formation

井段/m	井径/ mm	钻压/ kN	泵量/ (L·s ⁻¹)	转速/ (r·min ⁻¹)	平均钻速/ (m·h ⁻¹)	钻具组合
2313.26~2377.32	215.9	70	31	160	1.56	LST617G 三牙轮钻头+7LZ165*7.0-4.8 螺杆马达
2377.32~2397.03	215.9	70	31	69	0.60	LST617G 三牙轮钻头回转钻进
2397.03~2401.66	215.9	40	31	160	0.52	九刀翼PDC钻头+190型扭力冲击器+7LZ165*7.0-4.8 螺杆马达
2401.66~2417.02	215.9	40	31	160	1.71	六刀翼PDC钻头+190型扭力冲击器+7LZ165*7.0-4.8 螺杆马达
2417.62~2500.94	215.9	70	31	160	1.55	LST617G 三牙轮钻头+190型扭力冲击器+7LZ165*7.0-4.8 螺杆马达

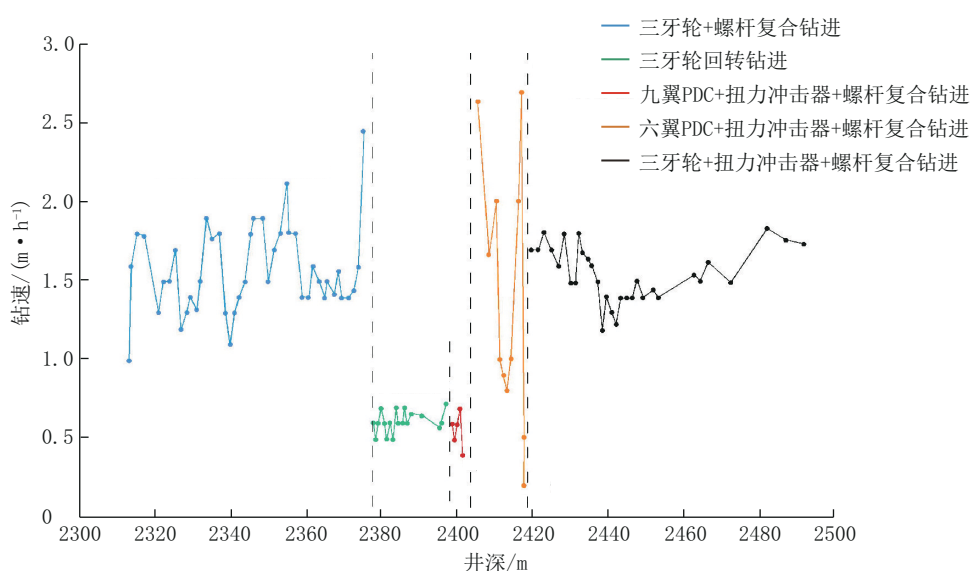


图6 片麻岩地层钻速对比曲线

Fig.6 Comparison curves of ROP in gneiss formation

从现场九刀翼PDC钻头配合扭力冲击器进行的干热岩复合钻进看,钻头底唇面的切削齿崩损严重、保径齿复合片基本上全部崩坏,钻头的底唇胎体亦有明显磨损(见图7)。从六刀翼PDC钻头配合扭力冲击器进行的干热岩复合钻进看,钻头的底唇面切削齿损伤明显,而保径齿复合片损伤稍轻(图8)。现场使用PDC钻头没有掉齿等现象,主要表现为金刚石表层剥离,证明钻头在井底受到了非常大的冲击作用,钻头外锥肩部唇面受损是受到了集中载荷的作用,可能和前期扩井眼钻进存在一定的关系(现场采用九刀翼PDC钻头扩井眼钻进3h左右)。

4.2 结果分析

(1)选用的扭力冲击器和牙轮钻头匹配性差,未



图7 九刀翼PDC钻头

Fig.7 Nine-blade PDC bit

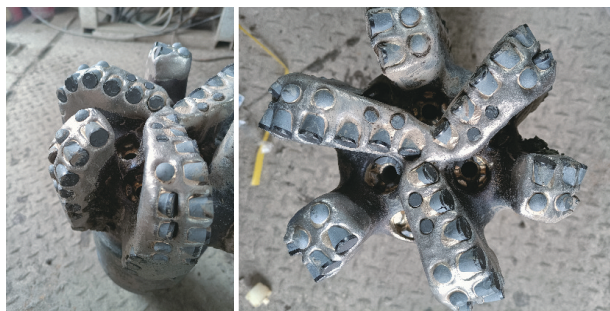


图8 六刀翼PDC钻头

Fig.8 Six-blade PDC bit

能更大地激发出牙轮钻头的剪切碎岩能力。

(2)PDC钻头在钻进时,扭力冲击器提供轴向冲击荷载,冲击激活岩石裂纹,产生大的开裂区,再通过剪切作用切削掉开裂区的岩石^[18-21]。当冲击荷载超过切削齿的承受值时,会造成切削齿的崩坏。九刀翼PDC钻头没有得到很好的机械钻速,因掉块和扫孔时间过长造成切削齿损坏。六刀翼PDC钻头由开始的机械钻速2~5 m/h到因切削齿损坏无法正常钻进,是因在高转速(转盘40 r/min+螺杆钻具120 r/min)与低钻压(40 kN)下,加剧了PDC钻头在井底的不规则振动,冲击荷载超过了PDC复合片的承受能力,导致切削齿崩坏。

5 结论

(1)在相同工况条件下,花岗岩地层使用三牙轮钻头+扭力冲击器+5LZ172×7螺杆马达的钻效与使用三牙轮钻头+5LZ172×7螺杆马达的钻效相比,前者平均机械钻速1.27 m/h,后者平均机械钻速0.98 m/h,同比钻速提高29.59%。PDC钻头+扭力冲击器+复合钻进在片麻岩地层的机械钻速为1.71 m/h,相比牙轮钻头(1.55 m/h)提高10.32%,相比牙轮钻头回转钻进(0.60 m/h)提高159.09%。

(2)扭力冲击器+螺杆复合钻进工艺通过现场试验应用,利用扭力冲击器提供轴向往复的扭力冲击,产生的冲击功有利于钻压的传递,保证了牙轮钻头能够有效地冲击碎岩,同时这种扭力冲击也增强了牙轮钻头剪切碎岩的功效,验证了两者集成组合应用的可行性,有效地抑制了振动效应对钻具的影响,提高了钻头碎岩效率;从钻进参数对钻具提速影响来看,大钻压下螺杆钻具对扭力冲击器短节亦无结构性损伤,能够更最大限度地发挥钻具碎岩性能。

(3)扭力冲击器可以一定程度地消除螺杆钻具

因离心惯性力造成钻具的横向振动。在文中2次的试验应用中,使用的扭力冲击器和螺杆钻具没有达到理想耦合,需进一步加强两者之间的耦合研究。

(4)需进一步加大对扭力冲击器的研究和扭力冲击器与钻头的匹配性研究;为进一步延长扭力冲击器的使用寿命还应加大对腔体和转子以及其他过流断面部件的耐磨性研究;加大钻机和附属装备与高温硬岩钻井的匹配性研究,以发挥扭力冲击器的最大效能,减少井内事故,实现高效、快速碎岩。

参考文献(References):

- [1] 白璐,蔡东胜,崔向龙,等.扭力冲击工具在白垩系硬质地层的应用与分析[J].石化技术,2017,24(11):123.
BAI Lu, CAI Dongsheng, CUI Xianglong, et al. Application and analysis of torsion impact tool Cretaceous hard stratum[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017,24(11):123.
- [2] 陈波,马志忠,和鹏飞,等.扭力冲击器在海洋6-1钻井提速中的应用[J].石油工业技术监督,2021,37(8):65-67.
CHEN Bo, MA Zhizhong, HE Pengfei, et al. Application of torque impactor in drilling speed increase of Well Haiyang 6-1[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(8):65-67.
- [3] 刘志良,张伟,谢建安,等.TorkBuster扭力冲击器在玛湖凹陷西斜坡的试验应用[J].新疆石油天然气,2016,12(3):76-79,5.
LIU Zhiliang, ZHANG Wei, XIE Jian'an, et al. Experimental application of TorkBuster torsional in western Slope of the Mahu lake[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2016,12(3):76-79,5.
- [4] 李玮,孙文峰,闫铁,等.扭转冲击器在金跃7-1井的现场试验[J].石油机械,2017,45(3):35-38.
LI Wei, SUN Wenfeng, YAN Tie, et al. Field test of torsion impactor in Well Jinyue 7-1[J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(3):35-38.
- [5] 周祥林,张金成,张东清.TorkBuster扭力冲击器在元坝地区的试验应用[J].钻采工艺,2012,35(2):15-17,7.
ZHOU Xianglin, ZHANG Jincheng, ZHANG Dongqing. Experimental application of TorkBuster torsional impactor in Yuanba Region[J]. Drilling & Production Technology, 2012,35(2):15-17,7.
- [6] 张秋阳,朱高磊,胡可能,等.液力扭转冲击工具在双229-34-66井应用分析[J].辽宁化工,2018,47(12):1242-1243,1267.
ZHANG Qiuyang, ZHU Gaolei, HU Keneng, et al. Analysis on application of hydraulic torsion impact tool in Shuang 229-34-66 well[J]. Liaoning Chemical Industry, 2018,47(12):1242-1243,1267.
- [7] 谭现锋,王景广,郭新强,等.螺杆钻进工艺在青海共和干热岩GR1钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):49-53.
TAN Xianfeng, WANG Jingguang, GUO Xinqiang, et al. Ap-

- plication of PDM drilling technology in Well-GR1 drilling in hot dry rock[J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(2):49-53.
- [8] 谭现锋,刘肖,王贵玲,等. 利津干热岩型地热资源调查评价关键技术研究[J]. *地质学报*, 2020,94(7):2166-2176.
TAN Xianfeng, LIU Xiao, WANG Guiling, et al. Research on the key technology for the investigation and evaluation of the hot dry rock geothermal resources in Lijin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020,94(7):2166-2176.
- [9] 谭现锋,马哲民,段隆臣,等. 复合动力钻进工艺在干热岩钻井中的应用研究[J]. *钻探工程*, 2021,48(7):1-8.
TAN Xianfeng, MA Zhemin, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(7):1-8.
- [10] 刘伟莉,马庆涛,付怀刚. 干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J]. *石油机械*, 2015,43(8):11-15.
LIU Weili, MA Qingtao, FU Huaigang. Drilling difficulties and solutions for hot dry rock geothermal development[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015,43(8):11-15.
- [11] 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):64-68.
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.
- [12] 牛洪波,冯光通,赵洪山,等. 哈山101井火成岩地层空气锤钻井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2018,40(2):164-168.
NIU Hongbo, FENG Guangtong, ZHAO Hongshan, et al. Application of air hammer drilling technology in the igneous strata of Well Hashan 101[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018,40(2):164-168.
- [13] 王四一,赵江鹏,赵建国. 扭力冲击器在煤矿井下硬岩钻进中的应用研究[J]. *煤矿机械*, 2018,39(10):139-141.
WANG Siyi, ZHAO Jiangpeng, ZHAO Jianguo. Application research on torque impactor applications on hard rock drilling underground coal mine [J]. *Coal Mine Machinery*, 2018,39(10):139-141.
- [14] 张抒夏,孙澜江,张武涛,等. 扭力冲击器在尖北难钻地层的应用[J]. *新疆石油天然气*, 2020,16(2):93-97,6.
ZHANG Shuxia, SUN Lanjiang, ZHANG Wutao, et al. Application of torquebuster in hard formation of Jianbei area[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2020,16(2):93-97,6.
- [15] 任鹏. 扭力冲击钻井提速机理及在哈拉哈塘的应用研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2016.
REN Peng. Study on the mechanism and application of torsion impact drilling speed in Halahatang[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [16] 汪伟,柳贡慧,李军,等. 扭转冲击钻井工具的工作特性[J]. *断块油气田*, 2019,26(3):385-388.
WANG Wei, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Operating characteristics of torsional impact drilling tool [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019,26(3):385-388.
- [17] 谭现锋,段隆臣,宋明春,等. 一种扭力冲击器: ZL201911295737.X[P]. 2020.11.27.
TAN Xianfeng, DUAN Longchen, SONG Mingchun, et al. A torsional impactor: ZL201911295737.X[P]. 2020.11.27.
- [18] 李嘉文. 扭矩冲击器下PDC钻头破岩技术研究[D]. 荆州:长江大学,2018.
LI Jiawen. Study on rock-breaking technology of PDC bit under torsional impactor[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.
- [19] 王昶皓,李士斌,张立刚. PDC破岩条件下的岩石研磨性评价[J]. *地质与勘探*, 2019,55(3):850-861.
WANG Changhao, LI Shibin, ZHANG Ligang. Evaluation of rock abrasiveness under the rock-breaking condition of PDC [J]. *Geology and Exploration*, 2019,55(3):850-861.
- [20] 陈子贺. 松辽火山岩地层PDC钻头切削齿破岩机理研究[D]. 大庆:东北石油大学,2020.
CHEN Zihe. Rock breaking mechanism of PDC cutter applied in Songliao volcanic rock stratum[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [21] 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. Investigation 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.

(编辑 李艺)