

# 旋冲螺杆钻具在硬岩地热钻探中的应用研究

王勇军<sup>1,2</sup>, 刘刚<sup>1,2</sup>, 佟铮<sup>1,2</sup>, 赵长亮<sup>1,2</sup>, 郑宇轩<sup>1,2</sup>, 冯守涛<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:**针对目前地热钻探中,在花岗岩、片麻岩等硬岩地层中机械钻速低的问题,引入一种机械式旋冲螺杆钻具,先后在JHR-1井花岗岩地层及HG-1井片麻岩地层中进行了试验应用。与普通螺杆钻具相比,旋冲螺杆钻具在JHR-1井 $\varnothing 215.9$  mm井段、HG-1井 $\varnothing 215.9$  mm井段和 $\varnothing 311.2$  mm井段机械钻速分别提高了10%、8.4%和7.6%,同时,旋冲螺杆钻具使用过程中未产生其他副作用。试验证明使用旋冲螺杆钻具可以有效地提高花岗岩、片麻岩等硬岩地层的机械钻速,为旋冲螺杆钻具在硬岩地层地热钻探中的应用推广打下了基础。

**关键词:**旋冲螺杆钻具;冲击碎岩;硬岩地层;机械钻速;地热钻探

**中图分类号:**P634.4;TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0146-07

## Application study of rotary-percussive screw drilling tool in hard-rock geothermal drilling

WANG Yongjun<sup>1,2</sup>, LIU Gang<sup>1,2</sup>, TONG Zheng<sup>1,2</sup>, ZHAO Changliang<sup>1,2</sup>, ZHENG Yuxuan<sup>1,2</sup>, FENG Shoutao<sup>1,2</sup>

(1. The Second Team of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources (Shandong Provincial 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)

**Abstract:** In view of the problem of low mechanical drilling speed in the hard rock such as granite and gneiss in the geothermal drilling at present, a mechanical rotary-percussive screw drilling tool is introduced and tested in granite formation of JHR-1 well and gneiss formation of HG-1 well. Compared with the ordinary screw drilling tool, the mechanical drilling speed of the rotary-percussive screw drilling tool increases respectively by 10%, 8.4% and 7.6% in  $\varnothing 215.9$  mm well section of JHR-1,  $\varnothing 215.9$  mm and  $\varnothing 311.2$  mm well section of HG-1, and no other side effects exist during the drilling process. The test proves that the mechanical drilling speed can be effectively improved by the use of rotary-percussive screw drilling tool, which provides a foundation for the application and popularization of the rotary-percussive screw drilling tool in the drilling of hard rock such as granite and gneiss.

**Key words:** rotary-percussive screw drilling tool; impact broken rock; hard rock formation; mechanical drilling speed; geothermal drilling

## 0 引言

随着地热能的开发利用,地热勘探开发逐渐向

深部高温硬岩地层发展,钻遇岩体多为花岗岩、片麻岩等硬质火成岩或变质岩。在深部硬岩地热钻

收稿日期:2023-04-23;修回日期:2023-06-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.021

基金项目:山东省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:刘刚,男,汉族,1982年生,高级工程师,硕士,地质工程专业,从事水工环地质工作,山东省德州市大学东路1499号,21483126@qq.com。

引用格式:王勇军,刘刚,佟铮,等.旋冲螺杆钻具在硬岩地热钻探中的应用研究[J].钻探工程,2023,50(5):146-152.

WANG Yongjun, LIU Gang, TONG Zheng, et al. Application study of rotary-percussive screw drilling tool in hard-rock geothermal drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 146-152.

探中,普遍存在机械钻速低、施工周期长、钻探成本高等问题,影响了深部地热资源的勘探与开发利用。

目前在硬岩地层钻井中,常采用螺杆或涡轮钻具提供高转速、大扭矩,以此增强钻头切削碎岩效果,从而提高硬岩地层机械钻速<sup>[1-2]</sup>。但在以花岗岩、片麻岩等硬质火成岩或变质岩为主的深部硬岩地层中,岩石抗压强度高,依靠“静压”荷载难以使钻头牙齿压碎并吃入地层来破碎岩石,钻头牙齿实际以“磨削”的方式碎岩。螺杆或涡轮钻具提供的高转速也仅仅使钻头牙齿“磨削”岩石的速度增加,从而使机械钻速得到了一定的提高,但高转速也会带来钻头使用寿命短、磨损严重、甚至是钻头事故等问题<sup>[2-3]</sup>。

旋冲螺杆钻具是一种新研制的井底动力钻具,近年来在石油钻井硬岩地层中有一定的研究应用,相关研究表明,相比使用普通螺杆钻具,使用旋冲螺杆钻具的平均机械钻速提高超过30%<sup>[4-8]</sup>,取得了较好的效果;但在地热钻探领域,旋冲螺杆钻具研究应用较少。借鉴石油钻井硬岩地层中旋冲螺杆钻具应用经验,在花岗岩、片麻岩等硬岩地热钻探中进行旋冲螺杆钻具应用研究,有利于提高深部硬岩地热钻探施工效率、降低施工成本,丰富深部硬岩地热钻探工艺技术,推动深部高温地热资源勘探和开发利用。

## 1 旋冲螺杆结构及工作原理

### 1.1 结构特征

根据旋冲螺杆钻具冲击发生装置结构特征,目前国内研究应用的旋冲螺杆钻具大致可分为机械式和液动式2类。其中机械式旋冲螺杆钻具又大致可分为2种:一种是依靠弹簧蓄能、弹性势能和重力势能释放产生冲击力,其特点是产生的冲击力较为稳定,螺杆钻具的输出转速和扭矩消耗较小,但其产生的冲击力较小,且受弹簧性能和寿命的影响较大<sup>[8-9]</sup>;另一种是依靠钻柱的重力势能瞬间释放产生冲击力,冲击力的大小与施加到冲锤上的钻压大小直接相关,其特点是能产生较大的冲击力,但在产生较大冲击力的同时,螺杆钻具的输出转速和扭矩消耗亦较大<sup>[10-11]</sup>。

本次研究应用了DUPTXC系列机械式旋冲螺杆钻具,其依靠弹簧蓄能、弹性势能和重力势能释放产生冲击力。整个钻具结构简单,主要分为3部分:短螺杆、动力传动总成和冲击发生装置(见图1)。

短螺杆与普通螺杆钻具类似,动力传动总成由万向轴、单动轴承串及主轴等组成,冲击发生装置由弹簧、冲锤(上滚轮)和砧体(下凸轮)等组成。

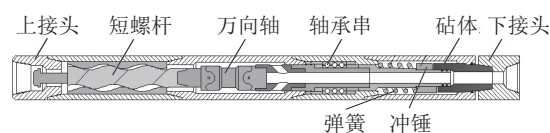


图1 旋冲螺杆结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotary-percussive screw drilling tool

### 1.2 旋冲螺杆工作原理

旋冲螺杆钻具是通过在普通螺杆钻具的输出端增设一个轴向冲击发生装置,将螺杆钻具输出的部分扭矩转化为冲击力,使钻头在旋转切削碎岩的同时对岩石施加一定频率的冲击载荷,实现旋转切削+冲击复合碎岩,充分利用硬岩地层岩石脆性大、强度高、抗冲击性能差的特点来提高碎岩效率<sup>[12-14]</sup>。

研究应用的DUPTXC旋冲螺杆钻具通过短螺杆为下部钻具提供旋转动力,通过万向轴驱动主轴旋转,主轴带动砧体(下凸轮)旋转,旋转过程中冲锤(上滚轮)和砧体(下凸轮)交错啮合而产生相对滑动,迫使冲锤向上移动、压缩弹簧蓄能,当上下轮相对滑动至啮合点时,冲锤在弹性势能和重力势能的作用下,快速下落,对砧体实施一次锤击,产生冲击荷载。砧体在主轴带动下连续旋转,滚轮冲锤与砧体不断交错啮合,弹簧不断蓄能、释放,就不断产生冲击荷载(见图2)。砧体将锤击所产生的冲击荷载通过主轴传导至钻头、作用在井底岩石上,实现冲击碎岩;同时冲击荷载与静钻压叠加,提高钻头牙齿吃入岩石的深度、增加单次破碎岩石体积,以此提高碎岩效率,进而达到提高机械钻速、减轻钻头磨损的目的<sup>[14-16]</sup>。

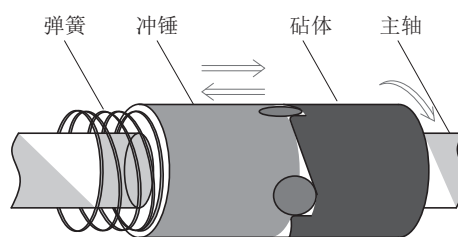


图2 旋冲螺杆工作原理示意图

Fig.2 Operating principle of rotary-percussive screw

## 2 旋冲螺杆钻具试验应用

### 2.1 钻具性能参数

试验应用研究采用了 DUPTXC-172 与 DUP-TXC-203 两种型号旋冲螺杆钻具,为对比旋冲螺杆钻具与普通螺杆钻具的应用效果,同时选用了两种工作流量范围、转速、工作扭矩等参数都相近的普通螺杆钻具,试验应用螺杆钻具实物见图 3,螺杆钻具性能参数见表 1。



图 3 螺杆钻具实物照片

Fig.3 Photo of the screw drill tool

### 2.2 试验应用项目概况

DUPTXC-172 型旋冲螺杆钻具和 6LZ172×7.0V 型普通螺杆钻具在 JHR-1 和 HG-1 两口井的 Ø215.9 mm 井段进行对比试验应用,DUPTXC-203 型旋冲螺杆钻具和 5LZ203×7.0-4.8 型普通螺杆钻具在 HG-1 井 Ø311.2 mm 井段进行了对比试验应用。

JHR-1 井位于山东省青岛市即墨区,是一口同轴换热地热井,设计钻井深度 2500 m,钻探作业采用 TSJ-3200 型钻机、配套 3NB-500 型泥浆泵。井身结构为二开:一开 0~200 m 采用 Ø311.2 mm 钻头和 Ø244.5 mm 石油套管,二开 200 m 至终孔采用 Ø215.9 mm 钻头和 Ø177.8 mm 石油套管。地层岩性如下:150 m 以浅为覆盖层;150 m 以深为中生代燕山期崂山花岗岩,中细粒结构,主要成分为石英、长石、云母等,岩石硬度为硬—坚硬。

HG-1 井是大同高温地热详查中的一个勘探井,设计钻井深度 3000 m,钻探作业采用 ZJ-40 型钻

机、配套 LGF-1300 型泥浆泵。井身结构为三开:一开 0~350 m 采用 Ø444.5 mm 钻头和 Ø339.7 mm 石油套管,二开 350~1500 m 采用 Ø311.2 mm 钻头和 Ø244.5 mm 石油套管,三开 1500 m 至终孔采用 Ø215.9 mm 钻头和 Ø177.8 mm 石油套管。地层岩性如下:260 m 以浅为覆盖层;260 m 以深为太古界集宁群黑云斜长片麻岩、角闪岩,内部充填多期岩脉,混合岩化作用明显,包含捕掳体、包体等多种杂岩体,岩石硬度为较硬—硬。

### 2.3 试验应用情况

JHR-1 井 Ø215.9 mm 井段试验应用新购 6LZ172×7.0V 型普通螺杆钻具及 DUPTXC-172 型旋冲螺杆钻具各 2 根;HG-1 井 Ø215.9 mm 井段试验应用新购 6LZ172×7.0V 型普通螺杆钻具及 DUPTXC-172 型旋冲螺杆钻具各 1 根,同时对 JHR-1 井用过的螺杆钻具进行了回厂检修后再次使用;HG-1 井 Ø311.2 mm 井段试验应用新购 5LZ203×7.0-4.8 型普通螺杆钻具及 DUPTXC-203 型旋冲螺杆钻具各 1 根。试验应用现场螺杆钻具入井前试运转见图 4。入井钻具组合和钻进参数见表 2。



图 4 螺杆钻具试运转照片

Fig.4 Trial operation photo of screw drilling tool

表 1 螺杆钻具参数

Table 1 Parameters of the screw drill tool

| 类型   | 规格型号           | 螺杆外径/mm | 流量范围/(L·S <sup>-1</sup> ) | 钻头转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 工作扭矩/(N·m) | 冲击频率     | 冲击力/kN |
|------|----------------|---------|---------------------------|-----------------------------|------------|----------|--------|
| 旋冲螺杆 | DUPTXC-203     | 203     | 25~55                     | 90~200                      | 11520      | 7.5~16.7 | 10~30  |
|      | DUPTXC-172     | 172     | 20~36                     | 88~160                      | 9360       | 7.3~13.3 | 10~30  |
| 普通螺杆 | 5LZ203×7.0-4.8 | 203     | 25~55                     | 92~200                      | 12000      | /        | /      |
|      | 6LZ172×7.0V    | 172     | 20~38                     | 93~176                      | 10320      | /        | /      |

表 2 各井段钻具组合和钻进参数

Table 2 Drilling assembly and parameters in each well section

| 井段                   | 钻 具 组 合                                                                           | 钻压/kN | 泵量/(L·s <sup>-1</sup> ) | 转盘转速/(r·min <sup>-1</sup> ) |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------|-----------------------------|
| JHR-1 井 Ø215.9 mm 井段 | Ø215.9 mm 牙轮钻头+Ø172 mm 螺杆+45 m Ø165 mm 钻铤+Ø214 mm 扶正器+27 m Ø165 mm 钻铤+Ø114 mm 钻杆  | 60~80 | 24.2                    | 40                          |
| HG-1 井 Ø215.9 mm 井段  | Ø215.9 mm 牙轮钻头+Ø172 mm 螺杆+45 m Ø165 mm 钻铤+Ø214 mm 扶正器+27 m Ø165 mm 钻铤+Ø 114 mm 钻杆 | 60~80 | 35.5                    | 40                          |
| HG-1 井 Ø311.2 mm 井段  | Ø311.2 mm 牙轮钻头+Ø203 mm 螺杆+27 m Ø203 mm 钻铤+Ø310 mm 扶正器+18 m Ø203 mm 钻铤+Ø127 mm 钻杆  | 60~80 | 24.2                    | 40                          |

JHR-1 井 Ø215.9 mm 井段试验应用孔深为 210~2036.4 m,普通螺杆钻具及 DUPTXC-172 型旋冲螺杆钻具交替试验应用 16 个回次,总进尺 1826.4 m,试验应用数据见表 3。HG-1 井 Ø215.9 mm 井段试验应用孔深为 1506.7~3000.5 m,其中 2347.3~2406 m 段因井内存在复杂情况未使用螺杆钻具,两种螺杆钻具交替试验应用 14 个回次、总进尺 1431.5 m,试验应用数据见表 4。HG-1 井 Ø311.2 mm 井段试验应用孔深为 369.6~1445.1 m,因孔内复杂情况终止,普通螺杆钻具及 DUPTXC-203 型旋冲螺杆钻具交替试验应用 10 个回次、总进尺 1015.5 m,试验应用数据见表 5。

表 3 JHR-1 井 Ø215.9 mm 井段螺杆钻具试验应用数据

Table 3 Test application data of screw drilling tool in Ø215.9 mm section of JHR-1 well

| 螺杆规格型号              | 编号 | 回次 | 孔段/m          | 进尺/m  | 纯钻时/h | 机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> ) | 螺杆状况 | 钻头状况 |
|---------------------|----|----|---------------|-------|-------|---------------------------|------|------|
| 普通螺杆<br>6LZ172×7.0V | P1 | 1  | 210.0~304.7   | 94.7  | 58.3  | 1.62                      | 正常   | 轻微磨损 |
|                     |    | 2  | 428.2~546.5   | 108.3 | 68.0  | 1.59                      | 正常   | 一般磨损 |
|                     |    | 3  | 655.0~769.6   | 114.6 | 73.8  | 1.55                      | 正常   | 一般磨损 |
|                     |    | 4  | 892.7~996.0   | 103.3 | 71.0  | 1.45                      | 正常   | 外圈崩齿 |
|                     | P2 | 5  | 1091.0~1207.5 | 116.5 | 74.7  | 1.56                      | 正常   | 一般磨损 |
|                     |    | 6  | 1338.5~1465.7 | 127.2 | 71.5  | 1.78                      | 正常   | 磨损较重 |
|                     |    | 7  | 1614.3~1736.8 | 122.5 | 73.0  | 1.68                      | 正常   | 一般磨损 |
|                     |    | 8  | 1865.2~1956.9 | 91.7  | 57.7  | 1.59                      | 加压憋泵 | 一般磨损 |
|                     | 平均 |    |               | 109.9 | 68.5  | 1.60                      |      |      |
| 旋冲螺杆<br>DUPTXC-172  | X1 | 1  | 304.7~428.2   | 123.5 | 65.7  | 1.88                      | 正常   | 轻微磨损 |
|                     |    | 2  | 546.5~655.0   | 108.5 | 61.0  | 1.78                      | 正常   | 轻微磨损 |
|                     |    | 3  | 769.6~892.7   | 123.1 | 72.2  | 1.70                      | 正常   | 一般磨损 |
|                     |    | 4  | 996.0~1091.0  | 95.0  | 62.5  | 1.52                      | 憋泵损坏 | 一般磨损 |
|                     | X2 | 5  | 1207.5~1338.5 | 131.0 | 73.3  | 1.79                      | 正常   | 磨损较重 |
|                     |    | 6  | 1465.7~1614.3 | 148.6 | 74.2  | 2.00                      | 正常   | 一般磨损 |
|                     |    | 7  | 1736.8~1865.2 | 128.4 | 73.5  | 1.75                      | 正常   | 轻微磨损 |
|                     |    | 8  | 1956.9~2036.4 | 79.5  | 47.6  | 1.67                      | 压降略低 | 一般磨损 |
|                     | 平均 |    |               | 117.2 | 66.3  | 1.76                      |      |      |

### 3 试验应用效果分析

#### 3.1 机械钻速

JHR-1 井使用普通螺杆钻具和旋冲螺杆钻具分别复合钻进 8 个回次,平均机械钻速分别为 1.60、1.76 m/h,旋冲螺杆钻具较普通螺杆钻具提高了

10%;HG-1 井 Ø215.9 mm 井段使用普通螺杆钻具和旋冲螺杆钻具分别复合钻进 7 个回次,平均机械钻速分别为 1.79、1.94 m/h,旋冲螺杆钻具较普通螺杆钻具提高了 8.4%;HG-1 井 Ø311.2 mm 井段使用普通螺杆钻具和旋冲螺杆钻具分别复合钻进 5 个回

表4 HG-1井 Ø215.9 mm 井段螺杆钻具试验应用数据

Table 4 Test application data of screw drilling tool in Ø215.9 mm section of HG-1 well

| 螺杆规格型号              | 编号  | 回次 | 孔段/m          | 进尺/m  | 纯钻时/h | 机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> ) | 螺杆状况 | 钻头状况    |
|---------------------|-----|----|---------------|-------|-------|---------------------------|------|---------|
| 普通螺杆<br>6LZ172×7.0V | P4  | 1  | 1506.7~1622.5 | 115.8 | 62.7  | 1.85                      | 正常   | 轻微磨损    |
|                     |     | 2  | 1757.6~1849.5 | 91.9  | 50.5  | 1.82                      | 正常   | 一般磨损    |
|                     |     | 3  | 1964.9~2076.7 | 111.8 | 62.2  | 1.80                      | 正常   | 一般磨损    |
|                     |     | 4  | 2163.9~2250.8 | 86.9  | 49.5  | 1.75                      | 憋泵损坏 | 外圈崩齿    |
|                     | C1修 | 5  | 2406.0~2493.0 | 87.0  | 48.6  | 1.79                      | 正常   | 崩齿、轮轴磨损 |
|                     |     | 6  | 2577.6~2673.1 | 95.5  | 54.6  | 1.75                      | 正常   | 磨损较重    |
|                     |     | 7  | 2781.3~2891.2 | 99.9  | 56.1  | 1.78                      | 正常   | 一般磨损    |
| 平均                  |     |    | 98.4          | 54.9  | 1.79  |                           |      |         |
| 旋冲螺杆<br>DUPTXC-172  | X4  | 1  | 1622.5~1757.6 | 135.1 | 64.3  | 2.10                      | 正常   | 轻微磨损    |
|                     |     | 2  | 1849.5~1964.9 | 115.4 | 56.0  | 2.06                      | 正常   | 轻微磨损    |
|                     |     | 3  | 2076.7~2163.9 | 87.2  | 44.8  | 1.95                      | 正常   | 轴承磨损    |
|                     |     | 4  | 2250.8~2347.3 | 96.5  | 52.2  | 1.85                      | 憋泵损坏 | 磨损较重    |
|                     | X1修 | 5  | 2493.0~2577.6 | 84.6  | 47.0  | 1.80                      | 正常   | 外圈崩齿    |
|                     |     | 6  | 2673.1~2781.3 | 108.2 | 55.4  | 1.95                      | 正常   | 一般磨损    |
|                     |     | 7  | 2891.2~3000.5 | 109.3 | 57.6  | 1.90                      | 正常   | 一般磨损    |
| 平均                  |     |    | 105.2         | 53.9  | 1.94  |                           |      |         |

表5 HG-1井 Ø311.2 mm 井段螺杆钻具试验应用数据

Table 5 Test application data of screw drilling tool in Ø311.2 mm section of HG-1 well

| 螺杆规格型号                 | 编号 | 回次 | 孔段/m          | 进尺/m  | 纯钻时/h | 机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> ) | 螺杆状况 | 钻头状况 |
|------------------------|----|----|---------------|-------|-------|---------------------------|------|------|
| 普通螺杆<br>5LZ203×7.0-4.8 | P3 | 1  | 369.6~495.1   | 125.5 | 74.0  | 1.70                      | 正常   | 轻微磨损 |
|                        |    | 2  | 630.2~655.3   | 115.1 | 68.3  | 1.69                      | 正常   | 一般磨损 |
|                        |    | 3  | 790.1~914.7   | 124.6 | 73.8  | 1.69                      | 正常   | 一般磨损 |
|                        |    | 4  | 1009.3~1096.2 | 86.9  | 49.5  | 1.76                      | 正常   | 外圈崩齿 |
|                        |    | 5  | 1214.2~1320.7 | 106.5 | 61.5  | 1.73                      | 加压憋泵 | 磨损较重 |
|                        | 平均 |    |               | 111.7 | 65.4  | 1.71                      |      |      |
| 旋冲螺杆<br>DUPTXC-203     | X3 | 1  | 495.1~630.2   | 135.1 | 75.0  | 1.80                      | 正常   | 轻微磨损 |
|                        |    | 2  | 655.3~790.1   | 134.8 | 75.7  | 1.78                      | 正常   | 轻微磨损 |
|                        |    | 3  | 914.7~1009.3  | 94.6  | 51.7  | 1.83                      | 正常   | 磨损较重 |
|                        |    | 4  | 1096.2~1214.2 | 118.0 | 64.8  | 1.82                      | 正常   | 一般磨损 |
|                        |    | 5  | 1320.7~1445.1 | 124.4 | 63.1  | 1.97                      | 憋泵损坏 | 一般磨损 |
|                        | 平均 |    |               | 121.4 | 66.1  | 1.84                      |      |      |

次,平均机械钻速分别为 1.71、1.84 m/h,旋冲螺杆钻具较普通螺杆钻具提高了 7.6%。3 次试验应用机械钻速对比见图 5。

分析试验取得的数据:旋冲螺杆钻具在 JHR-1 井 Ø215.9 mm 井段应用,机械钻速提高率最高,与地层硬度较高、可钻性较差有关,普通螺杆钻具复合钻进机械效率相对较低,使用旋冲螺杆钻具冲击碎岩效果较好,但整体机械钻速偏低,原因是 JHR-1

井钻进中泵量较小,螺杆转速慢、冲击频率低,影响了碎岩效率。HG-1 井中旋冲螺杆钻具复合钻进机械钻速提高幅度低于 JHR-1 井,与地层较为破碎有关,旋冲螺杆钻具所产生的冲击功被破碎地层的裂隙消耗,减弱了冲击碎岩效果<sup>[12-13]</sup>。

### 3.2 对钻头的影响

试验应用中,主要采用 617 系列高速牙轮钻头,个别回次采用 637 系列高速牙轮钻头。钻进过程

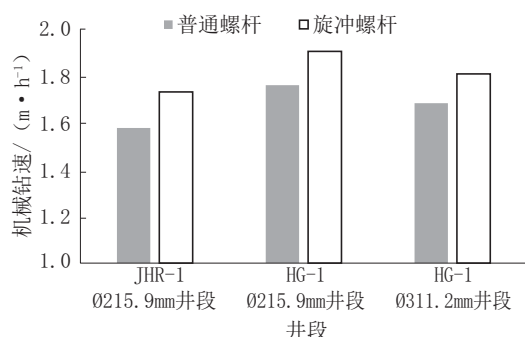


图5 试验机械钻速对比

Fig.5 Comparison of test mechanical drilling speed

中,根据牙轮钻头的磨损情况,对牙轮钻头的保径、轴承及密封、牙齿形状及强度韧性等特征进行了调整,如增加楔形修边齿、加强钻头保径、采用特种硬质合金齿等。

试验应用共使用牙轮钻头40只,各下井使用一个回次。其中10只磨损较轻,18只磨损一般,12只磨损较重。磨损较重的钻头中有6只是正常磨损(见图6),有6只出现了崩齿、轴承失效等异常磨损情况(见图7),异常磨损的钻头有4只出现在普通螺杆钻具复合钻进中,2只出现在旋冲螺杆钻具复合钻进中,磨损严重的钻头大多出现在HG-1井中。

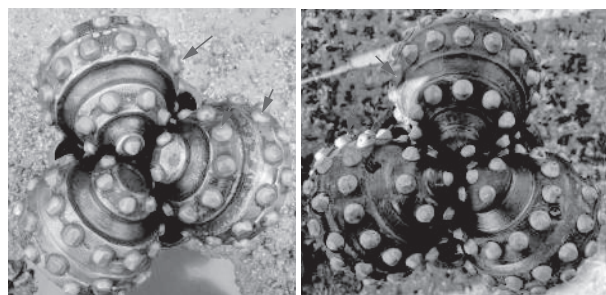


图6 正常齿磨平钻头照片

Fig.6 Drilling bit photo of normal tooth grinding

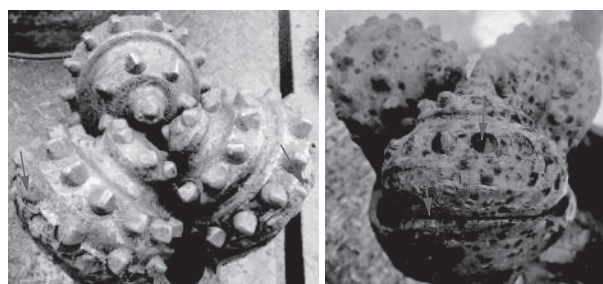


图7 崩齿、轮轴严重磨损钻头照片

Fig.7 Drilling bit photo of broken tooth and wheel shaft seriously wear

分析认为:除去钻具结构、钻进参数方面的因素,钻头的正常磨损与岩石硬度、研磨性等有关,而钻头的非正常磨损受地层破碎、岩石软硬不均及地层温度影响较大。HG-1井地层温度较高(1500 m时 $>100^{\circ}\text{C}$ ,终孔时 $>150^{\circ}\text{C}$ ),影响了牙轮轴承的性能;同时,该井钻遇地层破碎、软硬不均,造成了较多钻头非正常磨损的状况。

通过试验应用取得的数据(参见表3~5)可以看出:使用旋冲螺杆钻具复合钻进的回次进尺长于普通螺杆钻具复合钻进,而钻头磨损程度则轻于使用普通螺杆钻具。证明旋冲螺杆钻具复合钻进时,岩石体积破碎增加,形成较大颗粒的岩屑,钻头虽然承受一定的冲击作用,但钻头与单位体积岩石间的相互研磨程度降低,钻头的磨损也相对减轻。因此使用旋冲螺杆钻具可以提高钻头寿命。

### 3.3 螺杆钻具使用寿命

统计试验应用相关数据(参见表3~5),JHR-1井Ø215.9 mm井段:P1号普通螺杆钻具累计使用271.1 h、P2号普通螺杆钻具累计使用276.9 h,X1号旋冲螺杆钻具累计使用261.4 h、X2号旋冲螺杆钻具累计使用268.6 h;HG-1井Ø215.9 mm口径孔段:P4号普通螺杆钻具累计使用224.9 h、P1号普通螺杆钻具修复后再次使用159.3 h,X4号旋冲螺杆钻具累计使用217.3 h、X1号旋冲螺杆钻具修复后再次使用160 h;HG-1井Ø311.2 mm口径孔段:P3号普通螺杆钻具累计使用327.1 h,X3号旋冲螺杆钻具累计使用330.3 h。

从以上数据可以看出,试验应用中旋冲螺杆钻具使用寿命与普通螺杆钻具使用寿命基本相同,说明增设冲击发生装置未对螺杆钻具的寿命造成影响。其中,172型螺杆钻具在HG-1井中使用寿命较JHR-1井低,主要是受HG-1井下部地层温度较高的影响,高温作用下螺杆钻具中橡胶件快速老化,同时螺杆钻具运转所产生的热量不能及时散发掉,加剧螺杆钻具的损坏<sup>[17]</sup>。

## 4 结论

(1)试验采用的旋冲螺杆钻具冲击发生装置为纯机械装置,结构简单、性能稳定,试验应用过程中未出现冲击发生装置异常的情况。在花岗岩、片麻岩地层中,旋冲螺杆钻具复合钻进机械钻速较普通螺杆钻具有一定提高,但提高幅度不大,还需进一步

研究探索,优化改进旋冲螺杆钻具结构,提高深部硬岩地热钻探中旋冲螺杆钻具复合钻进效率。

(2)试验应用证明,使用旋冲螺杆钻具不会影响牙轮钻头使用寿命,且有助于钻头保持良好的工况,提高牙轮钻头寿命。

(3)试验应用中,旋冲螺杆钻具寿命与普通螺杆钻具寿命基本相同,增设冲击发生装置未对螺杆钻具寿命造成影响。

### 参考文献(References):

- [1] 谭现锋,马哲明,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 Zheming, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):1-8.
- [2] 代锋,曾桂元,李林,等.元坝高研磨性地层提速提效集成钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):27-30.  
DAI Feng, ZENG Guiyuan, LI Lin, et al. Speed up and improve the efficiency of the integrated drilling technology for high grinding formation in Yuanba Region[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(4):27-30.
- [3] 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):64-67.
- [4] 秦晓庆,刘伟,李丽,等.旋冲钻井技术在川西硬地层的应用[J].断块油气田,2013,20(4):505-507.  
QIN Xiaoqing, LIU Wei, LI Li, et al. Application of rotary thrust drilling technology in the hard formation of western Sichuan[J]. Broken Oil and Gas Field, 2013, 20(4):505-507.
- [5] 王利中,王凤春.旋转冲击钻井工具在塔河油田12区块应用效果分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):54-57.  
WANG Lizhong, WANG Fengchun. Application effect analysis of rotary impact drilling tool in Block 12 of Tahe Oil field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(11):54-57.
- [6] 王甲昌,张海平,张仁龙,等.旋冲螺杆钻具在临盘油田的试验应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):44-49.  
WANG Jiachang, ZHANG Haiping, ZHANG Renlong, et al. Test application of rotary screw drilling tool in Linpan Oilfield[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12):44-49.
- [7] 席传明,穆总结,罗翼,等.GCY-1型冲击螺杆钻井提速技术研究与应用[J].石油机械,2020,48(10):39-43.  
XI Chuanming, MU Zongjie, LUO Yi, et al. Research and trial of drilling speed improvement technology of the GCY-1 type impact screw[J]. Petroleum machinery, 2020, 48(10):39-43.
- [8] 甘心.ZYXC-244机械式旋冲螺杆钻具的研制与应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(3):823-832.
- GAN Xin. Development and application of ZYXC-24 mechanical rotary-percussive tool based on screw drill[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3):823-832.
- [9] 张海平.机械式旋转冲击钻井工具结构设计与试验[J].石油机械,2020,48(12):9-14.  
ZHANG Haiping. Structural design and test of mechanical rotary impact drilling tools[J]. Petroleum Machinery, 2020, 48(12):9-14.
- [10] 陈永,吴仲华,聂云飞,等.应用于螺杆钻具的轴向振动冲击装置研制[J].石油钻采工艺,2017,39(2):214-216.  
CHEN Yong, WU Zhonghua, NIE Yunfei, et al. Development of axial vibration impact device applied to screw drilling tool[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(2):214-216.
- [11] 陈杰,牟小军,李汉兴,等.旋冲振荡钻井提速工具的研制与应用[J].断块油气田,2020,27(3):386-389.  
CHEN Jie, MOU Xiaojun, LI Hanxing, et al. Development and application of spinning oscillating drilling speed up tool[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(3):386-389.
- [12] 景英华,袁鑫伟,姜磊,等.高速旋冲冲击钻井破岩数值模拟及现场试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):75-80.  
JING Yinghua, YUAN Xinwei, JIANG Lei, et al. Numerical simulation and field test of high-speed cyclone impact drilling rock breaking [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2019, 43(1):75-80.
- [13] 祝效华,刘伟吉.旋冲钻井技术的破岩及提速机理[J].石油学报,2018,39(2):216-222.  
ZHU Xiaohua, LIU Weiji. Rock breaking and acceleration mechanism of rotary drilling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(2):216-222.
- [14] 胡思成,管志川,路保平,等.锥型齿旋冲及扭冲的破岩过程及破岩效率分析[J].石油钻探技术,2021,49(3):87-93.  
HU Sicheng, GUAN Zhichuan, LU Baoping, et al. Analysis of rock breaking process and rock breaking efficiency of cone tooth twisting and twisting flushing[J]. Petroleum drilling technology, 2021, 49(3):87-93.
- [15] 田家林,杨应林,朱志,等.基于旋冲螺杆提速器的井下动力特性[J].石油学报,2019,40(2):224-231.  
TIAN Jialin, YANG Yinglin, ZHU Zhi, et al. Downhole power characteristics based on rotary screw governor [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2):224-231.
- [16] 柳贡慧,李玉梅,李军,等.复合冲击破岩钻井新技术[J].石油钻探技术,2016,44(5):10-16.  
LIU Gonghui, LI Yumei, LI Jun, et al. New technology of composite impact rock breaking drilling[J]. Petroleum Drilling Technology, 2016, 44(5):10-16.
- [17] 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. Application of screw drilling technology in GR1 drilling of Gonghe hot dry rock in Qinghai Province [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):49-53.

(编辑 王文)