螺杆马达复合动力切割在地浸钻孔施工中的应用——以巴音青格利矿床为例

王亚奴[1],赵利信[1],霍建党[1],褚忠铎[2],杨立志[1]

(1.核工业北京化工冶金研究院,北京 101149;
2.核工业二〇八大队,内蒙古 包头 014010)

摘要:为提高埋深大、致密矿层的切割速度,以鄂尔多斯盆地北部巴音青格利矿床研究区的地浸采铀钻孔为对象,进行了常规切割工艺和螺杆马达复合动力切割工艺研究,获得了螺杆马达复合动力切割工艺在该研究区的应用参数。结果显示,螺杆马达复合动力切割工艺的切割速度较常规切割速度提升 102.8%,切割质量满足地浸钻孔要求,应用前景广泛。针对现阶段切割效果,建议引入带扶正器的螺杆马达、设计新型切割刀具,同时配套建立相应施工流程,以进一步提高切割质量。

关键词:螺杆马达;扩孔式地浸钻孔;砂岩型铀矿;深部致密矿层;鄂尔多斯盆地北部
中图分类号:P641.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)02-0014-06
DOI:10.13426/j.cnki.yky.2022.10.09

螺杆马达也称螺杆钻具,是一种将液体的压力能转换为机械能的井底动力钻具。在钻井钻进过程中,通过控制泥浆泵的流量和压力,调节螺杆马达的转速和扭矩,使钻头在钻杆和螺杆马达的叠加转速下钻进,可大大提高钻进效率[1]。由于钻头由顶部转盘和螺杆马达共同提供动力,因此也叫复合动力技术,常用于直井钻进[2]。此外,螺杆马达因可以提供井底动力,也被广泛应用于油田、煤田定向井钻进中[3-6]。对于深孔、致密地层及高温硬岩的钻进施工,螺杆马达复合动力钻进弥补了常规钻进的不足,钻进效率高,在煤矿、硬岩开采等已有广泛应用,技术相对成熟。

以往地浸钻孔深度较浅(小于 500 m),地层相对疏松,对于复合动力的需求较弱。但随着铀矿探采深度的增加,深部地层密度变大,成岩作用较强,同时也出现了钙质含量较高的矿层。矿层深度及地层密度等条件的变化,致使传统钻井、成井工艺效率降低,难以适应施工需求[7]。目前,在地浸采铀领域,对复合动力钻井、成井工艺的相关研究较少,缺乏对螺杆马达复合动力切割工艺与传统切割工艺的对比研究。

前期在鄂尔多斯盆地北部开展的地浸钻孔施工和切割成井研究表明,研究区矿层硬度大,传统切割工艺效率低,切割时间超过了 24 h。在研究区井深大、地层硬的条件下,复合动力所带来的转速和扭矩提升,预期可显著提高成井效率,缩短成井周期。因此,在现场切割过程中,引入了螺杆马达复合动力切割工艺,同时对应用中出现的问题进行了分析。

1 传统切割工艺与螺杆马达复合动力切割工艺对比

试验钻孔采用扩孔式成井工艺[8],内置可更换防砂过滤器,采用矿段切割、反向投砾技术。该工艺是在裸孔钻进完成后,全井段下入 PVC 套管,逆向注浆固井;然后根据测井解释结果,使用切割刀具对矿层段进行切割扩孔,完成对 PVC 套管、水泥环和地层的切割,以达到露出矿层并扩大井内浸出剂与矿层接触面积的目的。切割完成后下入可更换过滤器,反向投砾[9],最终完成地浸钻孔成井过程。

在以往的切割成井施工过程中,主要由钻机转盘带动井底切割刀具对矿层进行旋转切割(以下称传统切割工艺),目前广泛使用的是单臂切割

收稿日期:2022-10-28

第一作者简介:王亚奴(1995—),男,山东淄博人,硕士,工程师,主要从事砂岩型铀矿地浸研究工作。

刀具。切割过程中,刀具打开,钻杆转动过程中割刀与矿段位置的套管、水泥环、地层发生接触,旋转切割,从而扩大矿段处井径、露出矿层。

在利用螺杆马达复合动力进行切割时,在钻杆前端加接螺杆马达后,再接单刀切割刀具(图1)。在切割过程中,钻杆由钻机带动;同时在泥浆泵加压下,螺杆马达使钻杆转动与自身转动叠加,并传导到切割刀具,从而使切割刀具以更高的转速、更大的扭矩进行切割。

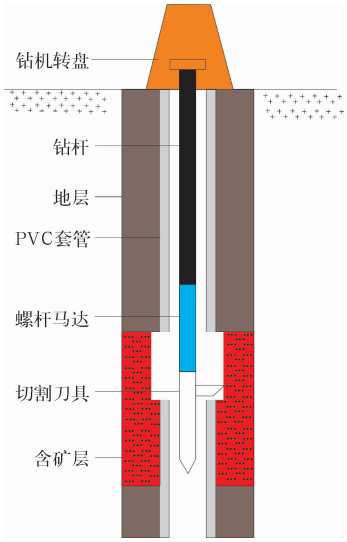


图 1　螺杆马达复合切割示意图

Fig. 1　Schematic diagram of screw motor cutting

2　螺杆马达复合动力切割工艺的应用

2.1　复合动力切割工艺设备配置

螺杆马达由接头、动力部分、传动部分、轴承及驱动轴构成,其中最重要的为动力部分,其为切割刀具提供额外动力。当泥浆进入动力部分时,形成的压力使螺杆马达定子中的转子转动,再经传动轴传导至切割刀具。

采用 ϕ95 mm 的螺杆马达,马达转速为 240～350 r/min;配合的泥浆泵最大流量为390 L/min。采用 XY-6N 岩芯钻机,电机转速最高为 1 480 r/min,转盘转速最高为 1 000 r/min。在复合动力下,切割刀具的转速为钻杆与螺杆马达转子转速的叠加,即

$$v=v_1+v_2$$

式中:v 为切割刀具复合转速,r/min;v_1 为螺杆马达转子转速,r/min;v_2 为螺杆马达外壳随钻杆旋转的转速,r/min。

实际应用过程中,根据地层条件与钻机转速、扭矩匹配关系,钻机转速一般选用 2 挡(490 r/min),在此转速下螺杆马达复合动力切割工艺的转速可提高 71.4%。在高转速下,会有效减小套管切割碎屑及矿层岩屑,进而提高施工效率。

2.2　复合动力切割工艺试验效果

2.2.1　试验参数及质量评价要求

巴音青格利铀矿床位于内蒙古自治区鄂尔多斯盆地北部,其主要矿层为下侏罗统直罗组下段,根据层序特征,直下段又可分为上亚段(J_2z^{1-2})和下亚段(J_2z^{1-1})。该矿床具有整体厚度大、渗透率低的特点,矿层段钙质夹层较厚,部分试验孔钙质夹层厚度占矿层厚度的 20%以上[10-11]。

目前,共开展了 7 个孔的矿段切割研究,其中 SYZ-1、SYZ-2、SYC-1 采用传统切割工艺,SYZ-4、SYG-2、SYG-3、SYG-4 采用螺杆马达复合动力切割工艺。本次各孔矿段切割长度均在 9.5～11.7 m,根据地层情况,各孔切割钻压均控制在 25～30 kN,试验孔切割参数见表 1(表中切割速度是指垂向上切割刀具旋转前进速度)。可以得出,传统切割工艺施工钻孔的平均切割速度为 0.387 m/h,而使用螺杆马达后平均切割速度提升到 0.785 m/h,切割速度提升了 102.8%。

表 1　试验孔切割参数

Table 1　Cutting parameters of test wells

孔号	切割长度/m	切割时长/h	切割工艺	全段平均切割速度/(m·h^{-1})	转速/(r·min^{-1})
SYZ-1	9.9	26	传统切割	0.38	490
SYZ-2	11.7	32	传统切割	0.37	490
SYC-1	9.5	23	传统切割	0.41	490
SYZ-4	10.0	16	螺杆马达复合动力切割	0.63	840
SYG-2	10.5	13	螺杆马达复合动力切割	0.81	840
SYG-3	10.4	12	螺杆马达复合动力切割	0.87	840
SYG-4	10.0	12	螺杆马达复合动力切割	0.83	840

确定研究区最合理的切割速度，是本研究的目的之一。在实际切割过程中，为保证切割段上下界面处的平整度及出露矿层的完全性，上下界面处的切割时间一般较长，在这 2 种工艺切割过程中，上下界面附近 0.5 m 的切割时间约为 1 h。因此矿层中部的切割速度，对钻孔整体的切割速度影响最大。

切割速度的评价是基于切割质量满足地浸钻孔施工要求进行的。一般通过返屑形态和切割段露出矿层情况来评价切割质量，切割段要完全切透套管和水泥环、出露矿层，以满足地浸开采的需要。当返屑不均匀时，碎屑易缠绕刀具，导致钻具在切割位置卡死，进而无法上提。

2.2.2 试验孔切割过程及质量检验

螺杆马达复合动力切割试验以 SYZ-4 孔为第 1 口试验孔。上午 4 时开始切割，控制其切割速度与常规切割一致，钻压较传统切割工艺小，平均切割速度约为 0.44 m/h，至 15 时 30 分，累计切割 5 m；15 时 30 分，进行钻压加压切割，瞬时切割速度约为 1 m/h，至 16 时 30 分，累计切割5.7 m；此时加钻杆，继续切割；17 时开始，继续加钻压，提高切割速度（瞬时切割速度为 1.26 m/h），维持该钻压至 21 时 30 分，设计切割段切割完毕。

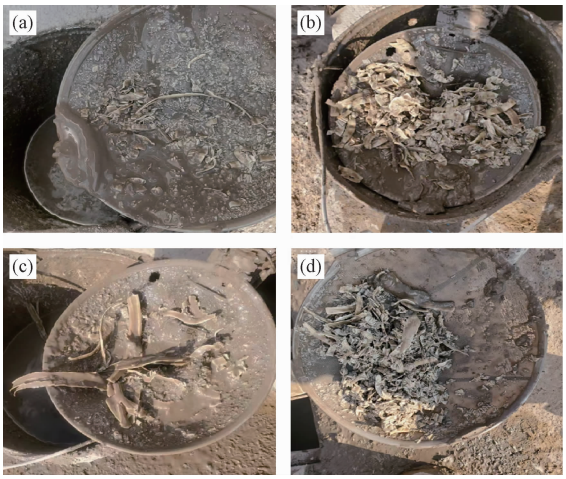
2.2.2.1 试验孔切割过程中返屑情况

SYZ-4 孔切割过程，切割碎屑自孔底返回井口时间约为30 min，切割返屑情况见图 2。SYZ-4 返屑情况显示，在切割速度相同的条件下，螺杆马达可以有效减小切割碎屑的大小，在 0.44 m/h 的切割速度下，复合动力切割的碎屑明显小于常规切割工艺（图 2a）；17 时 15 分左右切割碎屑较均匀，大小合适（图 2b）；17 时 25 时返屑呈长条状（图 2c）；18 时，碎片变细小，长窄碎片变少（图 2d）。

综合来看，切割速度不是越快越好，当切割速度过快时，长条状碎屑增加，增大卡刀具的风险。在使用螺杆马达时，最大切割速度以 1 m/h 为宜，不宜超过 1.2 m/h，SYG-2、SYG-3 孔以此为指导，返屑均匀，未见长条碎屑。

2.2.2.2 试验孔切割完毕地层出露情况

切割后地层出露情况可以通过井下电视（图 3）和井径测井（图 4）反映。SYZ-4 井下电视观察显示，切割段地层已经完全出露，视域中可见矿层砂岩。井径测井显示其切割深度为 616.3～626.0 m，其中在切割上界面（616～617 m）、下界面（624～626 m）处，存在井径逐渐变化的情况，切割段中部井径稳定。该情况与传统工艺切割测试结果基本一致，使用螺杆马达进行切割能够满足使用要求。



(a)15 时 40 返屑；(b)17 时 13 返屑；(c)17 时 25 返屑；(d)18 时返屑。

图 2 SYZ-4 孔不同时刻切割返屑情况

Fig. 2 Chip returned during cutting of SYZ-4 at different times

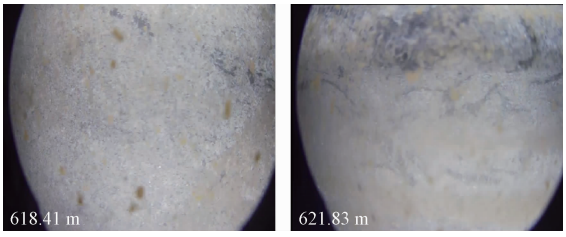


图 3 SYZ-4 井下电视观测结果

Fig. 3 Downhole TV observation results of SYZ-4

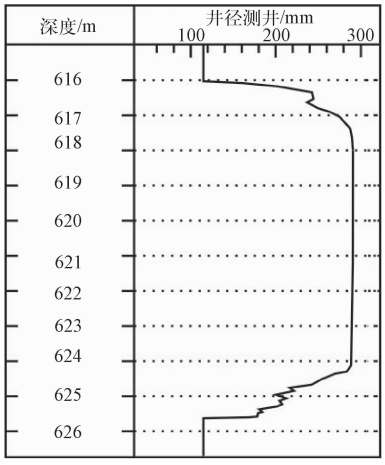


图 4 SYZ-4 井径测井结果

Fig. 4 Caliper logging results of SYZ-4

3　螺杆马达切割效果分析

螺杆马达复合动力工艺的切割效果与传统工艺的切割效果存在一定的差异,主要体现在切割速度、切割面平整度和刀具磨损程度方面。

3.1　切割速度

切割速度的选择以满足施工质量要求为前提。在深孔、地层成岩作用较强的条件下,传统切割工艺在使用 XY-6N 岩芯钻机时,钻机的输出转速和扭矩有限。当试图增加切割速度时,会出现地层切割不动、钻压要求过大且套管碎屑偏长的现象。在应用螺杆马达复合动力切割工艺后,切割刀具转速提升、扭矩增大,在相同切割速度下,其所需钻压较传统切割工艺更小,地层更容易被切割,且切割后可以满足地浸钻孔质量要求。

切割速度提高后,刀具转速要与切割速度相匹配,才能保证切割的套管碎屑形状合适,不会增加卡刀具风险。传统切割工艺在切割速度过快时会产生宽、长的切割碎屑,卡刀具的风险显著增加。螺杆马达复合动力切割工艺在应用中转速较传统切割工艺提高 71.4%,在相同切割速度下,由于转速的提高,碎屑变得更加细碎,有效降低了卡刀具的风险。

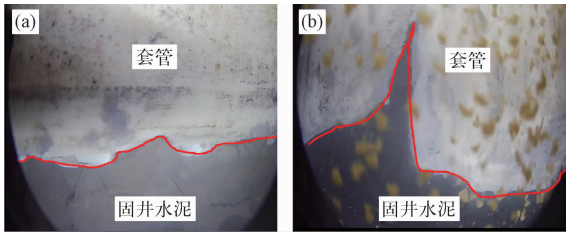
3.2　切割面平整度

切割段的上界面是地浸孔施工的关键部位,切割段上界面的切割质量及该位置的套管情况会影响后续封隔器的坐封效果。当切割过程对切割面上部套管损伤较大时,需要上移坐封位置,增加过滤器长度,额外消耗砾料等材料,这会提高作业成本,同时增加封隔器坐封失败的风险。

通过井下电视对切割段上界面进行的观察发现,螺杆马达复合动力切割的上界面平整度较差。由于螺杆马达复合动力切割过程中转速的提高,切割刀具稳定性变差,使切割段上界面附近套管更易破坏,进而造成了切割段上界面较传统切割更为凹凸不平(图 5)。

3.3　刀具磨损程度

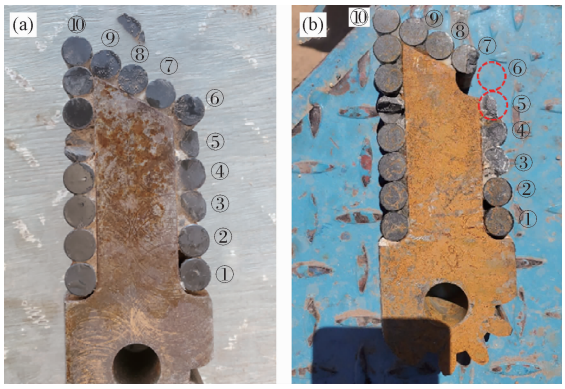
刀具磨损程度受地层和切割工艺的共同影响,在试验区内,地层特征相似,因此认为刀具磨损程度主要是由切割工艺不同引起的。在磨损程度上,在应用螺杆马达前,平均每切割 3 口井更换 1 次切割刀具,单口井作业后磨损情况见图 6(a);在应用螺杆马达后,需每切割 1 口井更换 1 次切割刀具,刀具磨损情况见图 6(b)。



(a)SYZ-1 传统切割;(b)SYZ-4 孔螺杆马达切割。

图 5　不同切割工艺的切割段上界面情况

Fig. 5　Upper cutting surface of different cutting processes



(a)传统切割工艺;(b)螺杆马达复合动力切割工艺(红色为原齿位)。

图 6　不同工艺单井作业后切割刀具磨损情况

Fig. 6　Wear pattern of cutting tools in different processes after a single operation

在螺杆马达复合动力切割工艺下,刀具磨损加剧,且主要磨损位置为刀具底部水平位置的③～⑥号齿,刀具外侧⑦～⑩号齿磨损较小。刀具环形切割面积计算直径约为 320 mm,套管内径为 128 mm,因此③号齿切割位置为 PVC 套管,④～⑤号齿切割位置为水泥环,⑥～⑩号齿切割位置为矿层;实际中由于刀具切割时存在小幅摆动,各齿牙切割位置会稍有变化。

根据刀具磨损情况可知,切割过程最主要磨损位置为水泥环及水泥环和地层交界处,即⑤～⑥号齿。在传统切割工艺中,切割速度慢,刀具磨损小,因此⑤～⑥号齿磨损有限,且以⑤号齿磨损为主,⑥号齿稍有磨损。而采用螺杆马达复合动力切割时,切割速度变快,刀具磨损严重,⑤号齿严重磨损,⑥号齿脱落,同时⑦号齿也有磨损。结

合切割刀具不同齿牙的磨损情况，可反映刀具齿牙磨损顺序，当主要磨损位置的齿牙磨损后，相邻齿牙磨损加剧。此外，斜列切割的齿牙较水平切割齿牙磨损小，磨损情况可为后续切割刀具改良提供参考。

4 螺杆马达复合动力切割工艺改进建议

在地浸孔切割中，螺杆马达复合动力切割工艺具有切割速度快、出露矿层效果好的优势；但同时也存在对切割处套管损伤稍大、刀具磨损加快的问题。在后续切割过程中，针对螺杆马达复合动力切割工艺需要进行一定改进。

4.1 增加螺杆马达扶正器

扶正器环绕在螺杆马达上，通常井下带扶正器的螺杆马达具有保直效果好、减少孔底钻具振动的特点[12]。引入扶正器后，可减小在切割过程中孔底钻具振动，起到保护 PVC 套管、平整切割面的效果。

4.2 对切割刀具进行优化

根据螺杆马达应用后切割刀具的磨损特征，在磨损严重的位置更换硬度更大的齿牙，以适应现有切割工艺；也可以开展双刀或者三刀切割刀具的应用研究，多刀头的应用可以减小刀头磨损。此外，应根据切割尺寸，使切割刀具齿牙与地层、水泥环斜列式接触。多刀头与斜列式齿牙刀头已有固体矿床施工经验[13]，其应用将更有利于降低刀头磨损，延长刀头寿命。

4.3 增加二次切割环节

在现场试验中，由于螺杆马达切割速度较快，在上切割面处或加接钻杆后有时存在部分矿层未完全切割的现象。为了应对这种情况，需要在切割完毕后进行二次切割和修整，通过钻压变化判断切割情况，以确保完全切割。二次切割和修整过程速度较快，一般 1～2 h 即可完成，可提高切割质量。

5 结论

与传统切割工艺相比，螺杆马达复合动力切割工艺的切割速度提高了 102.8%，显著缩短了切割时间；其切割面平整度及刀具磨损情况虽有不足，但能显著降低卡钻风险，其施工质量可以满足地浸钻孔切割要求。未来还需进行钻具改良和流程优化，以更好地适应科研生产需要。

参考文献：

[1] 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.

[2] 李明谦，黄继庆. 螺杆钻具的应用现状及未来发展建议[J]. 石油机械，2006(5)：73-76＋84.

[3] 李萌，于兴胜，罗西超，等. 螺杆钻具的前沿技术[J]. 石油机械，2011，39(9)：19-22＋46.

[4] 李泉新，许超，刘建林，等. 煤矿井下全域化瓦斯抽采定向钻进关键技术与工程实践[J]. 煤炭学报，2022，47(8)：3108-3116.

[5] 李泉新，褚志伟，许超，等. 煤矿井下双动力复合定向钻进轨迹调控研究[J]. 工矿自动化，2021，47(12)：25-31.

[6] 许超，姜磊，陈盼，等. 煤矿井下大盘区瓦斯抽采定向钻进技术与装备[J]. 煤田地质与勘探，2022，52(4)：147-152.

[7] 阙为民. 中国铀矿采冶技术新方向[J]. 中国核工业，2017(11)：35-37.

[8] 李柏军. 通辽钱家店铀矿床地浸采铀钻孔施工技术研究[D]. 吉林：吉林大学，2017.

[9] 秦昊，胡柏石，李召坤，等. 地浸采铀钻孔内置过滤器反向填砾方法研究[J]. 铀矿冶，2019，38(1)：14-18.

[10] 李振成，胡立飞，李强，等. 鄂尔多斯盆地巴音青格利地段砂岩型铀矿成矿条件及找矿前景分析[J]. 西部资源，2017(6)：43-44.

[11] 张艳，易超. 鄂尔多斯盆地北部巴音青格利铀矿床地质特征[J]. 地质论评，2019，65(S1)：111-112.

[12] 徐保龙，黄寒静，王力. 煤矿用带扶正器螺杆钻具造斜规律试验研究[J]. 煤矿机械，2017，38(5)：19-21.

[13] 林修阔，刘汪威，陈晓林，等. 套管锻铣开窗技术在土耳其贝帕扎里碱矿中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程)，2020，47(8)：50-56.

Application of Screw Motor Composite Cutting Technology to ISL Well: a Case Study of Bayinqinggeli Sandstone Uranium Deposit

WANG Yanu[1], ZHAO Lixin[1], HUO Jiandang[1], CHU Zhongduo[2], YANG Lizhi[1]

(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;
2. Geological Party No. 208, CNNC, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to improve the cutting efficiency of deep and tight ore beds, the conventional cutting technology and screw motor composite cutting technology were studied by using the ISL wells in Bayinqinggeli deposit in the northern Ordos Basin, and the application parameters of screw motor composite cutting technology were obtained. The results show that the cutting speed of screw motor composite cutting technology is 102.8% higher than that of conventional cutting technology, and the cutting quality can meet the requirements of the ISL. The screw motor composite cutting technology has wide application prospect. According to the cutting effect in research area, it is suggested to introduce screw motor with centralizer, design a new cutting tool, and establish the corresponding casing cutting procedures to further improve the cutting quality.

Key words: screw motor; reamed type ISL well; sandstone type uranium deposit; deep and tight ore beds; northern Ordos Basin