

水平定向钻进技术在青海钾盐矿开采中的应用研究

韦海瑞^{1,2}, 马琳^{1,2}, 刘阔^{1,2}, 贾明浩^{1,2}, 吴礼林^{1,2},
朱芝同^{1,2*}, 邵玉涛^{1,2}, 刘广^{1,2}, 贾炜^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;
2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北廊坊 065000)

摘要: 为了提高青海某钾盐矿的开采效率和产量, 提出了贯通井的开采方案, 首次利用水平定向钻进技术和对接井技术施工了多组贯通井, 从水平井注水后从竖井抽取卤水, 极大地提高了钾盐的开采量。工程施工初期出现了卡钻事故, 通过优化泥浆配方、钻头合理选择、防卡钻钻具的设计使用, 避免了卡钻事故的再次发生。该工程完成40条水平井和竖井的对接后, 该区域内的钾盐年产量提高3.5万t, 证明利用水平定向钻进技术提高钾盐矿开采效率和产量的方案是可行的。相关研究成果可为后续利用水平定向钻进技术进行可溶性矿产开采提供理论依据和实践指导。

关键词: 水平定向钻进; 钾盐矿; 贯通井; 对接井

中图分类号: P634.7; TD26 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0404-07

Application of horizontal directional drilling technology in the exploitation of a potash mine, Qinghai Province

WEI Hairui^{1,2}, MA Lin^{1,2}, LIU Kuo^{1,2}, JIA Minghao^{1,2}, WU Lilin^{1,2},
ZHU Zhitong^{1,2*}, SHAO Yutao^{1,2}, LIU Guang^{1,2}, JIA Wei^{1,2}

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

2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: In order to improve the mining efficiency and output of a potash mine in Qinghai province, the mining scheme of through wells is put forward, after water injection from horizontal wells, brine is extracted from vertical wells, which greatly increases the production of potassium salts. The sticking accident occurred in the initial stage of construction, which was perfectly avoided by optimizing mud formula, reasonable selection of bit and design of anti-sticking drilling tool. After the completion of 40 horizontal and vertical wells, the annual output of potash in this area has increased by 35000 tons, which proves that the scheme of using horizontal directional drilling technology to improve the efficiency and output of potash mining is feasible! The related research results can provide theoretical basis and practical guidance for the subsequent use of horizontal directional drilling technology for soluble mineral

收稿日期: 2024-07-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.065

基金项目: 自然资源部钻井工程技术创新中心课题“电磁强度和距离对HDD无线导向仪探测深度的影响规律研究”(编号: PY202303); 中国地质调查局地质调查项目“重要成矿带战略性矿产钻探技术支撑”(编号: DD20243011)

第一作者: 韦海瑞, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 主要从事大口径钻头钻具、水平定向钻机及配套设备、地质钻探工程相关研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, 422607217@qq.com。

通信作者: 朱芝同, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事地质钻探工艺及器具研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, zhuzt@mail.cgs.gov.cn。

引用格式: 韦海瑞, 马琳, 刘阔, 等. 水平定向钻进技术在青海钾盐矿开采中的应用研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 404-410.

WEI Hairui, MA Lin, LIU Kuo, et al. Application of horizontal directional drilling technology in the exploitation of a potash mine, Qinghai Province[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 404-410.

exploitation.

Key words: horizontal directional drilling; potassium salt mine; through the well; connected well

0 引言

目前天然碱矿的开采主要采用钻井水溶开采的方法。该方法利用天然碱矿床易溶于水的特点,通过钻井注入淡水,溶解地下矿床中的有益组分,成为溶液返出地面,通过管道输送到工厂进行加工^[1-2]。水溶采矿法具有施工成本低、工艺和设备简单、施工条件好、环境破坏小等优势,特别适合于埋藏深、厚度薄、品位低的可溶性矿产开采,此法在国内外许多工程中已经得到了成功的应用^[3-5]。

水平定向钻进技术是指利用岩土钻掘、定向测控等技术手段,在地表不开挖和地层结构破坏极小的情况下,穿越河流、交通干线、建筑物,实现地下管线铺设的施工技术^[6-7]。

青海某钾盐公司目前开采钾盐的主要方式是打竖井收集卤水,然后抽取竖井的卤水生产硫酸钾。随着开采时间的推移,地表及地下卤水水位开始明显下降,每口竖井的出卤水量也越来越小,严重制约了该公司的硫酸钾生产量。该公司生产线设计年生产量100万t,实际上每年只有10~20万t的产量,主要原因就是生产硫酸钾的饱和卤水供应不足。为了解决这一问题,我们根据钾盐矿杂卤石的具体分布情况,结合水溶采矿法和水平定向钻进的技术优势,提出利用水平定向钻进技术,在每两口竖井之间打一口水平定向井,将所有的竖井用水平井连通起来,形成贯通井(图1),然后从水平定向井的井口注入淡水或淡卤水,再从其他的竖井中抽采,达到提高卤水产量的目的。

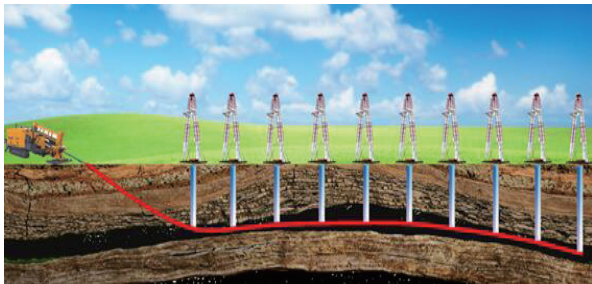


图1 贯通井原理示意

1 矿山概况

青海某钾肥公司的钾盐矿位于青海省海西州

冷湖镇大盐滩上,海拔高约2700 m,矿区面积800多平方千米,探明的钾盐资源总量为3.9亿t(按 K_2SO_4 当量计),主要分布在卤水(含 K_2SO_4 1.46亿t)和固体杂卤石(含 K_2SO_4 2.44亿t)里,而且该矿床的固体杂卤石分布地表至地下120 m处,这120 m厚的地层分为5个矿层,每两个矿层之间有1~3 m左右的淤泥层。

2 水平定向井施工方法

2.1 开采原理

在每两口竖井之间打一条水平定向井,使竖井和水平井连通,形成贯通井^[8-10],在水平定向井的井口注入淡水或淡卤水,再从其他的竖井中抽采,当注入的淡水或淡卤水通过水平定向井的通道时,可以溶解井壁固体杂卤石中的硫酸钾,使淡水变为卤水或增加卤水浓度,同时长距离的水平定向井通过钾盐矿层(杂卤石层)时也能收集地层中的卤水,因为原杂卤石地层中就含有一定量的饱和卤水层,而且原杂卤石地层裂缝比较多,卤水含量较大,这样通过贯通通道溶解杂卤石和收集原卤水,两者结合可快速提升卤水浓度,进而达到提高硫酸钾开采量的工程目的。

2.2 贯通井参数设计

贯通井由竖井和水平定向井组成,贯通井的设计参数主要包括:(1)竖井的孔径和深度;(2)水平定向井的井径、长度和深度;(3)水平井与竖井的贯通深度。

从溶解杂卤石的效果上来讲,水平定向井越长,溶矿效果越好,同时每条水平定向井长度越长,相对应的竖井数量可以减少。但是高原施工难度较大,物资供给有限,单次水平井的施工长度越长,风险越大,综合现有的施工技术和现场情况,初步设计每条水平定向井的长度为1000 m。水平定向井的井深越深收集的卤水越多,水平定向井的总长度由造斜段和水平段组成,如果水平定向井越深造斜段就越长,水平段长度就会缩短。竖井越深也能收集到更多的卤水,竖井的直径越大越有利于水平定向井的贯通,竖井直径越小,水平定向井贯通时的精确控向难度越大。该矿区竖井施工设备是一

台360型旋挖钻机,该钻机在矿区施工的最大孔径为 $\varnothing 1200$ mm,最大深度为60 m。由于旋挖的竖井是裸井,没有套管,经常会出现井内坍塌、淤泥堆积的现象,旋挖60 m的竖井深度实际只能保证约45 m井深不受淤塞,因此水平定向井与竖井的贯通深度 ≤ 40 m时,才可以保证在抽取卤水时长期畅通不受淤塞。根据现场条件设计水平井井径为241 mm,可一次成井,既能满足现场抽采、注水需求,又不用进行扩孔作业,极大地简化了施工工艺。综上,贯通井的设计参数如下:(1)竖井直径为1200 mm,深度为60 m;(2)水平定向井深度 ≥ 40 m,长度1000 m,井径241 mm;(3)水平井与竖井的贯通深度40 m。

2.3 施工方案设计

基于贯通井的设计参数,我们设计了两套合理可行的施工方案。

方案1:水平定向井总长度为1000 m,水平定向

井井深40 m。竖井井深60 m,竖井直径1200 mm(图2)。

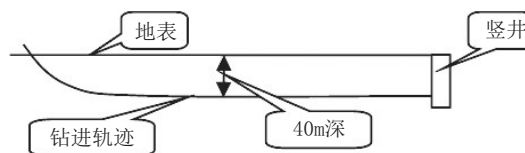


图2 施工方案1示意

方案2:为了穿越更多的矿层,收集更多矿层内的卤水,可以将水平井钻深到80 m,水平钻进一段距离后再将井深调整到40 m与竖井贯通,长度依然为1000 m。竖井井深60 m,竖井直径1200 mm(图3)。两种施工方案的钻井参数见表1。

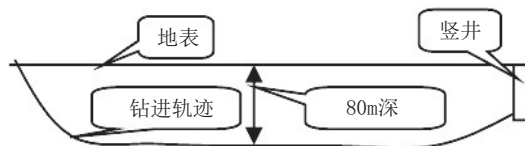


图3 施工方案2示意

表1 贯通井不同施工方案钻井参数

方案	水平井设计参数					竖井设计参数	
	总长/m	井径/mm	造斜段长度/m	水平段长度/m	水平段深度/m	井深/m	井径/mm
方案1	1000	241	260	740	40	60	1200
方案2	1000	241	600	300	80	60	1200

综合考虑后,业主最终选择了方案2,目的是让水平定向井穿越更多的矿层,后期可以在水平定向井的钻孔轨迹上方再次钻进一定数量的小直径大深度的竖井和水平井连通,为进一步提高卤水采集量预留空间。同时可以验证水平定向钻进工艺在钾盐地层的可靠性,为后续完善钾盐矿开采工艺提供更多的参考依据。

2.4 施工工艺选择

2.4.1 钻机选择

钻机选择上主要考虑两点:(1)钻进长度1000 m,距离较长;(2)施工地点为高原,氧气稀薄。据此选择GBS-320型钻机(图4)进行施工,该钻机在低海拔地区可一次性钻进2000 m,最大功率559 kW,有充足的功率储备。钻机具体技术参数见表2。

2.4.2 钻进工艺选择

水平定向钻进的造斜钻进工艺有3种,一种是普通的鸭掌式钻头钻进,常用于土层钻进;一种是



图4 GBS-320型水平定向钻机在青海冷湖施工现场

泥浆螺杆马达钻进,几乎适用于所有的地层,只是钻进效果不同;还有一种是潜孔锤钻进,适合坚硬地层^[11-12]。根据钾盐矿的相关地质资料及钾盐公司以往的施工经验显示,该钾盐矿层的硬度比土层坚硬但是比硬岩软,现场选用泥浆螺杆马达进行钻进。

螺杆马达在软岩钻进中,常用的钻头有钢齿牙轮钻头、镶齿牙轮钻头和PDC复合片钻头3种。考虑到钾盐矿层的硬度一般,现场同时配备了钢齿三牙轮钻头和镶齿三牙轮钻头(图5)。钢齿钻头的钻

表2 GBS-320型水平定向钻机技术参数

参数项	参 数 值
发动机功率	559 kW
最大扭矩	85000 N·m
最大转速	45 r/min
回拖力	3200 kN
给进力	3200 kN
入射角	4°~18°
泥浆泵排量	2500 L/min
钻杆规格	Ø140 mm×9600 mm
外形尺寸	16340 mm×3000 mm×3550 mm
主机质量	56000 kg

齿突出,切削效果好,耐用性较差。镶齿三牙轮钻头钻进速度稍慢,耐用性更好。



(a) 钢齿三牙轮钻头

(b) 镶齿三牙轮钻头

图5 三牙轮钻头

2.4.3 泥浆配置预案

水平定向钻进中,泥浆主要起润滑、稳定孔壁、携带钻屑的作用。钻屑通过泥浆携带排出钻孔,避免钻屑在孔内堆积,形成卡钻现象^[13-14]。

在钾盐地层使用水平定向钻进技术没有任何经验可参考,我们查阅了许多钾盐钻探的泥浆配方资料,钾盐钻探中有的直接使用卤水钻进,不用任何泥浆材料,一般用于较浅的地质勘探钻进,钻进深度100 m左右。另一类较深的钻井泥浆配置较为复杂,而且每个钾盐矿上使用的配方都不一样,因为每种钾盐地层中各种钾盐的金属离子成分和含量不同,需要的各种添加剂也不同。仔细分析发现所有的钾盐泥浆都需要以下几种添加剂:(1)抗盐剂,防止泥浆的泥水分离;(2)抗盐增粘剂,提高钾盐泥浆的粘度;(3)抗盐润滑剂,增加钾盐泥浆的润滑性;(4)钾盐泥浆的钾盐浓度调节剂,防止钾盐泥浆在饱和卤水里发生变性;(5)包被剂、降滤失剂、

降失水剂以及泥浆多功能剂等等。市场上这些添加剂的品种繁多,咨询了多位钾盐深井钻探的泥浆师,建议现场调配泥浆保证效果。最终决定每类添加剂选2~3种到施工现场调配泥浆。

2.4.4 定向仪器的选择

工程设计钻深80 m,且要在深40 m处和孔径1200 mm的竖井贯通,对定向钻进的控向精度要求非常高。传统水平定向钻进用无线测量仪精准测量深度只有30 m左右,加上钾盐地层中电磁波信号衰减严重,导致无线测量仪测量误差增大,所以无线探测仪不适合本次钻进作业。有线导向测量仪的探测深度几乎不受限制,测量精度也是随着钻深增加而逐渐增大,误差一般是0.5%~1%,钻进1000 m的距离要求定向精度误差<1.2 m,难度极大。为了实现水平井和竖井的精准贯通,引入勘探技术研究所自主研发的“慧磁”高精度定向中靶导向系统(图6),它可以完美地和有线导向仪配合使用,当有线导向仪的探棒距离“慧磁”探管50 m时,它就可以精确地探测到有线导向仪的位置,提前预知方位及顶角误差,操作手可以根据测量结果及时纠斜,实现水平井与竖井的一次贯通^[15]。



图6 “慧磁”高精度定向中靶导向系统

3 施工过程中遇到的问题及解决方案

首次钻进选取深度43 m、孔径1200 mm的竖井作为目标井,入钻点距离目标井1000 m。施工工序如下:(1)完成导向孔施工,钻具组合为GBS320型钻机+Ø140 mm钻杆+Ø172 mm螺杆马达+Ø241 mm钻头;(2)钻机回拉作业,回收钻杆钻具。尽管施工前做了充分的准备工作,但是实际施工中还是遇到了许多难题,首次钻进不顺利,钻进到目标井1000 m处,总计用时50余天。

3.1 信号线连接故障

由于施工地点地处高原地带,春季风大且持续时间长,风起时盐粉满天飞,给施工中信号线的连

接造成了很大的干扰。施工中多次发现信号线在热缩套连接处发生漏电现象,导致导向信号受到干扰甚至中断。分析原因是电线外皮粘上盐粉颗粒导致热收缩套融化出来的溶胶无法很好的融入电线外皮,当有一定水流压力冲刷时热收缩套就会脱落(图7),导致漏电。最后现场搭建帐篷专门用于信号线热熔连接,避免盐粉颗粒粘在电线上,解决了信号线漏电问题。



图7 脱落的热收缩套

3.2 泥浆配置问题

由于施工地处偏远的无人区,交通不便,泥浆配方的水源就地取材选用非饱和卤水。为了防止污染杂卤矿,现场配置了无固相泥浆,添加了抗盐聚合物,抗盐剂及泥浆润滑剂,同时基于成本考虑,

添加一定量的纤维素用来提高泥浆粘度。首次钻进至150 m处泥浆泵出现憋压现象,检查后发现有泥浆在钻杆内的线卡处结晶造成泥浆通道堵塞(图8),结晶物是纤维素包裹着钾盐颗粒。纤维素可溶性差不能完全溶于卤水泥浆,而且其粘性较大,极易包裹钾盐颗粒形成结晶现象。



图8 结晶堵塞的钻杆泥浆通道

基于以上泥浆配置问题,再次配置泥浆时决定采用钠土为基液调制配方,选用的泥浆材料着重考虑了以下几点:(1)选用的各种添加剂要可溶性好;(2)选择抗盐性较好的产品;(3)把非饱和卤水调整为饱和的卤水。最终经过数十次试验终于找到了一种较好的泥浆配方:400 mL饱和卤水+20 g钠土+2.5 g抗盐降失水剂+2.5 g抗盐聚合物+3 g氯化钾(图9)。



(a) 泥水分离明显

(b) 调配泥浆

(c) 几乎没有泥水分离现象

图9 现场泥浆配置

3.3 钻头的选择问题

施工时为了提高钻进效率先采用钢齿三牙轮钻头试钻,钻进速度快,但是钻进切削下来的盐屑颗粒大。钻进至500 m后,发现泥浆携带出的盐屑明显减少,钻进效率急剧下降,每根钻杆(长9.6 m)的平均钻进时间由最初的7 min增加至35 min,钻进的回转扭矩也增大。检查钻头发现钻齿磨损严

重,单个新钻头无法完成一条1000 m钻孔量,中途需要抽回钻杆更换钻头,极大降低了钻进效率,同时切削下来的盐屑颗粒较大,排渣困难,容易造成卡钻事故。

盐屑颗粒的大小和钻头的选择直接相关,钻头的钻齿越突出,钻速越快,切削的盐屑颗粒就越大,排渣越困难。为了平衡钻效与排渣之间的关系,后

续选择镶齿的三牙轮钻头进行施工,钻进时控制钻进速度不宜过快,采用高回转慢给进的钻进策略,保证切削下来的盐屑颗粒直径较小,方便排渣。采用镶齿三牙轮钻头后,单根钻杆的平均钻进时间为13 min,且完成1000 m工作量后钻头未出现明显磨损,说明对于钾盐地层,镶齿钻头是最佳选择。

3.4 卡钻事故

首次钻进至目标井后泥浆突然泄漏,钻机推力和扭矩下降,目标井内水位上升,开始回抽钻杆。回抽至第5根钻杆时,钻机扭矩和拉力明显增加,第6跟钻杆直接抱死,发生卡钻事故。随后采用多种解卡工具都未成功解卡,尝试采用800 t(8000 kN)滑轮组强行回拉钻杆,也未成功,暂时放弃解卡作业。庆幸的是卡钻后孔内水道畅通,从入井口注水,在目标竖井内用200 m³/h的泵连续抽水,竖井内水位未下降,对比原来此口竖井使用200 m³/h的泵抽水2 h就抽干的情况,直接证明了使用水平定向井和竖井贯通的工艺进行钾盐开采,提效显著。

为了最大限度地预防卡钻事故,除了已经解决的泥浆配置问题,还需要从钻进工艺上预防卡钻问题。施工地层的杂砾石比较硬脆,虽然对比后选用的镶齿牙轮钻头比钢齿钻头切削下来的盐屑颗粒更小,但是也不太均匀,盐屑最大颗粒直径超过3 cm(图10),完全依靠泥浆排渣较困难,尤其是当钻头钻进至目标井时,泥浆瞬间泄露,盐屑随着泥浆流动,泥浆的流速大于盐屑,泥浆泄露完后,盐屑就会在孔内下游段形成堆积,造成卡钻。特别是钻杆接头处,镦粗段外径比钻杆杆体外径大50 mm(钻杆杆体外径140 mm,接头处外径190 mm),泥浆通道变小,容易形成盐屑堆积造成卡钻。同理,三牙轮钻头的背面也是一个易卡点(三牙轮钻头直径241 mm,连接三牙轮钻头的短节外径为190 mm)。

解决此问题最直接的办法就是在钻具外径上焊接刀刃(图11)进行清孔,但是刀刃直接焊接在钻杆上会对钻杆材质造成不利影响,缩短钻杆寿命,同时钻杆进入钻机夹持器拧卸钻杆非常困难。综合考虑后,选择在钻杆之间增加一个短节,将刀刃直接交错排列焊接在短节上(图12)。由于刀刃的作用是清理盐屑,不需要扩孔,所以选择刀刃的直径为25 mm,确保短节回转切削直径为190 mm左右,带刀刃短节在钻进过程中不会造成阻力,不会影响钻进效率。同理,三牙轮钻头直径241 mm,为



图10 钻孔带出来的盐屑

为了避免三牙轮钻头背面出现较大的台阶面,连接钻头的短节焊接刀刃后的回转切削直径控制在220 mm。安全起见,刚开始使用刀刃短节时,每隔10跟钻杆(约100 m)加接一个短节,随着施工经验的积累,最后每20根钻杆加接一个短节。使用刀刃短节的清孔效果显著,后续连续施工3个多月,完成40条水平井对接穿越,未发生卡钻事故。



图11 焊接在钻杆接头处的刀刃



图12 带刀刃的短节

3.5 定向仪器的正确使用

关于“慧磁”仪器的使用经验也是慢慢探索出来的,首次使用时探测不到稳定的信号,发现是由于目标井旁边的沟渠抽水造成目标井内的水流不稳定,导致仪器悬挂不稳定,关闭沟渠抽水后,仪器

信号也就稳定了。第二次出现测量信号精度较差,是由于仪器放置深度(悬挂在井深55 m处)和测量的钻头深度(地下37 m深处)相差较大造成的,经过反复探索,发现当仪器放置位置和钻头的深度基本相同且仪器离目标钻头相距30 m左右时测量精度最准。在掌握以上使用要点后,后续仪器使用非常顺利,40条水平井的对接工作圆满完成。

4 结论

(1)完成40条水平井和竖井的对接后,该区域内的钾盐年产量提高3.5万t,证明利用水平定向钻进技术提高钾盐矿开采效率的方案是可行的。

(2)镶齿三牙轮钻头在钾盐矿地层中钻进效率较高,耐磨损,单个钻头可完成千米级穿越工程,是钾盐矿地层的最佳选择。

(3)带刀刃短节的设计使用该工程的技术亮点。每一个刀刃短节相当于一个清孔钻头,具有二次碎岩的作用,可大大降低卡钻风险。

参考文献:

- [1] 王清明. 钻井水溶开采技术的发展与展望[J]. 盐业史研究, 2001(1):40-43.
- [2] 洪常久. 水平对接井技术在天然碱矿中的应用[J]. 煤炭技术, 2008,27(6):142-143.
- [3] 李友辉,李立明. 湖南澧县芒硝矿采卤井建井施工工艺[J]. 探

- 矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(11):30-34.
- [4] 樊传忠. 盐矿水平对接井开采的几个关键问题[J]. 中国井矿盐, 2015,45(5):13-16,46.
- [5] 蒋太平,李果民,丁红卫. 四川省宣化县钾盐普查ZK001参数井钻井施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018,45(7):25-29.
- [6] 刘成勇,刘江涛,杨红斌. 非开挖水平定向钻进技术在管道穿越河流中的应用[J]. 石油工程建设,43(S2):1.
- [7] CECS 382—2014, 水平定向钻法管道穿越工程技术规程[S].
- [8] 向军文,胡汉月. 国产定向对接井精确中靶技术在盐矿中的应用[J]. 中国井矿盐, 2010,41(5):16-18.
- [9] 刘汪威,林修阔,张新刚,等. 特殊地质条件下定向对接复杂井组的工艺设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011,38(4):13-16.
- [10] 刘海翔,刘汪威,陈剑垚,等. 土耳其贝帕扎里采集卤钻井三期工程井组布置的优化设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010,37(11):9-11.
- [11] 王海,乌效鸣. 非开挖铺管施工中扩孔直径的优化设计与计算[J]. 探矿工程,2007(4):21-23.
- [12] 袁玉石,苗红昌,张志强,等. 水平定向钻在南水北调配套工程输水管线穿越中的应用研究:以沙颍河穿越工程为例[J]. 地质科技情报, 2016,35(4):208-212.
- [13] 金勇. 大口径管道水平定向钻穿越施工技术[J]. 中国科技信息, 2014(1):62-63.
- [14] 徐伟平. 浅析大口径管道水平定向钻穿越的施工技术[J]. 科技与创新, 2015(16):132-133.
- [15] 向军文,胡汉月. 国产定向对接井精确中靶技术在盐矿中的应用[J]. 中国井矿盐, 2010,40(5):16-18.

(编辑 荐华)