

土耳其天然碱矿水平对接井水溶开采技术回顾

刘海翔, 刘春生, 胡汉月, 刘志强, 陈晓林

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:土耳其是世界上最早应用定向对接井进行天然碱商业化开采的国家,其所使用的核心技术——对接井水溶开采技术,就是引进我国自主研发的定向水平对接井水溶开采技术。与常规早采方法相比,该技术具有劳动强度低、人工成本少、不排放尾矿、绿色环保等优点。在过去 10 多年里,我国以对接井水溶开采技术为依托,深度参与了土耳其贝帕扎里和卡赞两大碱矿从试验到生产的开发,在整个工程实施过程中持续对开采井组模式、定向器具、井底钻具总成、测井仪器等进行了改进,尤其是磁中靶系统方面取得了突出成果和广泛应用,开发了第四代“慧磁”钻井中靶导向系统,设计施工了三井组模式。一方面,通过该项技术的应用使土耳其天然碱资源得到广泛开发,其纯碱工业在世界上占有了一席之地;另一方面,通过广泛的生产实践进一步推动了定向钻探技术的发展,提升了我国定向水平对接井技术水平。

关键词:天然碱矿;水溶开采;水平井;对接井;三井组;“慧磁”中靶系统;定向钻探技术;土耳其

中图分类号:P634.7;TD87 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)08-0007-07

Review on trona solution mining with intersected well sets in Turkey

LIU Haixiang, LIU Chunsheng, HU Hanyue, LIU Zhiqiang, CHEN Xiaolin

(*Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China*)

Abstract: Turkey is the first country to extract trona deposit commercially with intersected well sets. The core technology which is employed to make underground connection of the well sets for brine recovery is the intersected well drilling and mining technology developed by China. Compared with conventional tunnel mining, mining with the intersection well sets provide lots of advantages such as less labour intensity, reduced labour cost, environment-soundness without discharge of tailings. In the past ten-odd years, with support of the intersected well drilling technology, China has participated extensively in test and commercial production of trona resources, and made continuous improvement on the mining well set design, orientation tools, BHAs, survey tools; in particular, great achievement has been made in development and application of the magnetic ranging system, with the 4th generation “SmartMag” ranging tool launched into market; meanwhile, the three-well set mining mode has been designed and implemented. On one hand, intersected well drilling and mining technology has driven the extensive exploitation of trona resources in Turkey to elevate it to a major player in the world soda ash industry; on the other hand, intersected well drilling and mining technology has advanced itself through intensive field application, lifting it to a higher level.

Key words: trona mine; solution mining; horizontal well; intersected well set; three-well set; SmartMag ranging system; directional drilling; Turkey

0 引言

我国自主研发的定向水平对接井水溶开采技术 2003 年首次成功应用于土耳其天然碱第一组水溶

采卤试验对接井施工,使土耳其成为世界上最早应用定向对接井进行天然碱商业化开采的国家。迄今为止,我们总共在土耳其施工了采卤对接井约 200

收稿日期:2020-07-06 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.08.003

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“土耳其卡赞-贝帕扎里天然碱矿探采方法技术合作”(编号:DD2019090602)

作者简介:刘海翔,男,汉族,1966 年生,高级工程师,主要从事定向水平对接井钻进相关科研与开发工作,河北省廊坊市金光道 77 号,liuhaixiang1966@sina.com。

引用格式:刘海翔,刘春生,胡汉月,等.土耳其天然碱矿水平对接井水溶开采技术回顾[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):7-13.

LIU Haixiang, LIU Chunsheng, HU Hanyue, et al. Review on trona solution mining with intersected well sets in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):7-13.

余组,单井总数达560余口。定向水平对接井水溶开采技术在广泛的生产应用中,针对当地碱矿钻井地层条件和采卤需要进行了大量技术创新和系统性升级换代,得到不断发展和完善。同时,伴随着水平对接井水溶开采技术的进步,土耳其纯碱工业在近10多年取得了迅速发展,综合产能已达5.3 Mt/a,成为仅次于美国的第二大纯碱输出国。土耳其纯碱工业的发展对全球纯碱市场产生巨大影响,其纯碱源源不断地销往世界各地,取得了良好的经济效益和社会效益。

1 土耳其天然碱资源

土耳其拥有2大天然碱矿,一家是位于安卡拉以西110 km的贝帕扎里天然碱矿,碱矿床位于主要由粘土岩和沥青页岩组成的第三系河卡地层中,矿体分成上下2部分,各有6层具有工业开采价值的晶碱石矿层。其天然碱地质储量为2.37亿t,可开采储量1.35亿t,品位高、杂质少,是加工低盐优质纯碱的上好原料^[1]。另一家是位于安卡拉西北35 km的卡赞天然碱矿,碱矿赋存于第三系下层的Incirlik地层中,矿床南北长4.5 km,东西宽3.7 km,面积约9.8 km²。据美国AGAPITO公司的研究表明,在Bed3矿层厚度>10 m的区域内,其天然碱地质储量大约6.07亿t,总碱量大约1.88亿t,矿石品位相对较低,晶碱石平均含量为31%^[2]。

2 贝帕扎里天然碱矿水平对接井水溶开采回顾

2.1 前期勘探开采

贝帕扎里天然碱矿是于1979年在勘探煤的过程中发现的,随后ETI Holding A.S.、Park Holding和土耳其的几所大学及公司为开发这一天然碱矿床做了大量勘探和地质、水文地质、采矿工艺及加工工艺的研究工作。1999年,土耳其选择了硐室掘进的早采方法,建成一条开采硐室(见图1),包含1000 m的入井斜井以及矿层中900 m的采矿巷道。由于入井斜井穿过2层含水层,开采过程中存在涌水风险,导致支护成本高;再加上开采成本高、产能不足及总体运行成本不合理等原因终止了早采方法。

2.2 两井对接水溶开采试验

2003年,中国机械设备进出口公司中标了贝帕扎里天然碱矿矿山建设项目,经过对各种开采方法的技术调研和论证,大胆引入代表国际前沿技术水



图1 早采入井斜井

Fig.1 Inclined shaft to the mining tunnel

平的定向水平对接井水溶开采技术实施天然碱开发,由我所负责对接钻进施工。定向水平对接井在岩盐水溶开采中已有应用,但开采天然碱矿尚无先例。由于天然碱与岩盐具有完全不同的地质生成环境和化学溶解特性,如碱层层厚薄,一般1.5~6 m,且与其它岩石交替沉积呈多层产出,首先计划实施一对试验井,了解碱矿地层的钻井技术参数和产卤技术参数情况,为后期商业开采提供可行性依据,一旦试验成功就在矿山大规模利用定向水平对接井水溶开采技术进行矿山开发。

2.2.1 钻井基本情况

(1)两井参数:两井地面距离453.92 m;水平穿矿长度254 m;垂直井钻进深度429.97 m;取心长度100 m;定向水平井完钻井深802.73 m。其对接井井身结构见图2。

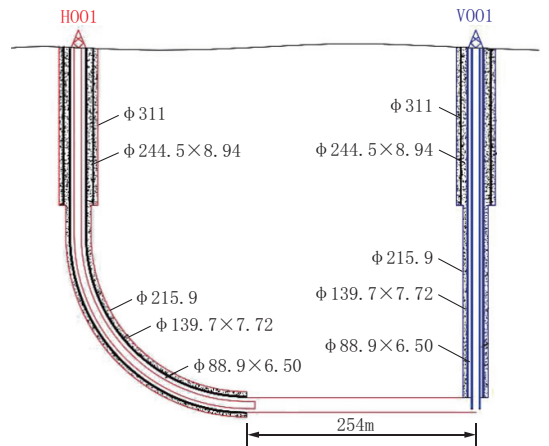


图2 试验对接井井身结构

Fig.2 Structure of the test intersected well set

(2)直井要求:全井取心率>85%;全井井斜 $\neq 60'$;方位角变化率 $\neq 30'/30$ m;井斜变化率 $> 30'/30$ m;井径扩大率 $\neq 20\%$ 。

(3)水平对接井要求:直井段井斜 $\neq 60'$;方位角变化率 $\neq 30'/30$ m;井斜变化率 $\neq 30'/30$ m;井径扩

大率 $\geq 20\%$;造斜段最大造斜率 $\geq 10^\circ/30\text{ m}$;方位角变化率 $\geq 30^\circ/30\text{ m}$;井径扩大率 $\geq 20\%$ 。

(4) 钻井轨迹设计:典型钻井轨迹设计见图 3。

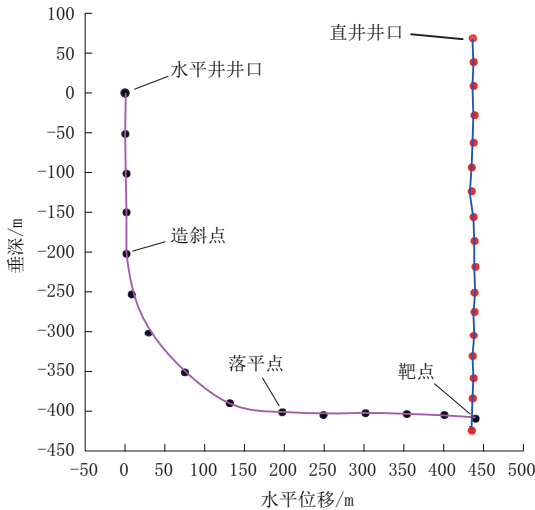


图 3 钻井轨迹设计

Fig.3 Design of the horizontal drilling trajectory

2.2.2 试验结果

试验工程采用了 1 台套常规 2000 m 水文转盘钻机、2 台套固井设备、1 台套物探测井设备、2 台套定向钻进相关设备以及螺杆钻、有线随钻测斜仪等定向器具。

在定向钻进过程中,发现对接主矿层比设计上抬 2 m,且矿厚只有 1.8 m,比预计的 4 m 薄了 2.2 m,不得不更改三开水平钻进轨迹,从而导致三开钻具结构的变化。因垂直井溶腔建槽仅达到 3 m 直径,离合同要求的 6 m 溶腔直径相差较大,所以,尽管水平钻进到达第二靶点,但没能直接连通。经过现场反复校验,发现当地磁异常较大,并且已校验出因磁异常对测井仪器引起的偏差值,因时间和施工条件的限制,不得不中止钻进,改为采用压裂辅助连通。经过计算,地磁磁偏角改变量达 1.3° ,实际钻进靶点离垂直井靶点在水平方向上距离为 13 m。表明仅用有线随钻测斜方式难以实施直接连通,最后采用压裂方式实现连通,形成了有效的采矿通道。通过试验工程发现了当地地磁异常、解决了泥浆起泡问题、重新修改了中靶作业方案等,为后面规模化施工提供了大量的第一手资料,也为成功实施商业开采奠定了良好的技术基础。

2.3 两井对接水溶开采施工

两井对接井组水溶开采试验成功后,2005—2006 年期间实施了 29 对两井对接连通开采井,

2009—2010 年期间实施了 16 对井,钻井参数、井身结构、技术要求及钻井轨迹设计均与试验井一致^[3-9]。技术上实施了以下几项革新措施和技术突破,确保了工程圆满竣工。

2.3.1 解决泥浆起泡问题

钻进碱层或含碱地层时,由于天然碱的溶解使钻井泥浆 pH 值发生变化,泥浆中所含有机物因生化反应会产生大量气泡。气泡较多时,导致钻头清洁困难,钻速低,钻头泥包严重,不得不频繁起下钻具;同时还增加孔壁稳定难度,易发生井下埋钻事故。在定向钻进期间,螺杆钻具效率低,岩粉上排困难,无论是钻速,还是加压都有相当大的风险;且水泵配件损耗大,维护时间长,钻进辅助时间增多。如不解决好泥浆起泡问题,将无法保证该工程的顺利实施。

消泡剂的种类较多,理想的消泡剂应该具有如下特点:消泡速度快、抑泡时间长、耐高温性、用量少且无毒无害。最先使用了从国内进口的蓖麻油进行消泡,由于加量大、消泡慢、且成本高,不得不寻求替代消泡剂。通过多次尝试比较,最后选用了土耳其 KARBEN 公司提供的“Defoamer-1015”号消泡剂。该消泡剂主要成分为三硬脂酸铝,白色晶体,不易溶于水,先取适量溶解于柴油等有机溶剂,然后再加入到泥浆中。消泡剂的用量可以根据泥浆起泡的程度灵活掌握,在钻进过程中可分批分量随时加入,直到钻进正常为止。该消泡剂加量少、抑泡时间长、起效快,有效解决了该矿区天然碱矿层钻进中泥浆起泡这一难题。

2.3.2 引进精确对接连通控制

施工过程中井组能否成功对接,受建槽延滞和地磁干扰 2 个方面的负面影响。但工程又不能因此受阻,解决该问题一是可以在钻到直井溶腔附近时,采用压裂辅助连通,但这样对以后其它井的钻井成孔存在较大风险;二是让其建槽自然溶通,但时间又不能控制。两者都不能令人满意。为此,引进了国际上先进的旋转磁井距测量仪用以控制对接精度,保证顺利实施高精度对接。该仪器在钻头与对接靶点距离 30~60 m 时测量结果误差率为 20% 以上,但在距离 $< 20\text{ m}$ 以后,误差率只有约 5%。该仪器的应用保证了后续 20~40 m 的最后对接精度。利用我们已有的前期定向和水平钻进技术控制精度,再辅以该仪器后续的可靠精度,项目施工完全不受

业主建槽工作的影响,确保了项目按期完成。

2.3.3 多井组连通开采试验

在解决井组对接中靶精度和可靠性后,为进一步提高返卤浓度和资源回采率,在施工设计中井组形式进行了设计创新。首次尝试了三井组、五井组连通、双通道平行井组形式的连通方式进行天然碱开采(见图4)。试验结果表明,这些井组形式不仅技术先进、控制精度高,返卤浓度明显提升,且可以更大程度地开采矿产资源、减少工程投资、缩短工程工期,极具推广应用潜力。

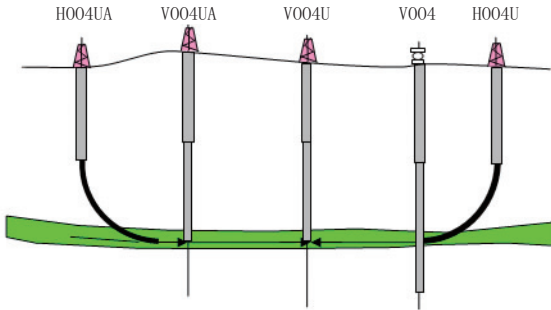


图4 多井组连通设计示意

Fig.4 Schematic of the multiple intersected well set

2.3.4 采用自主研发的中靶系统实施精确中靶

定向对接井钻井技术成功的关键在测井仪器,其中最重要的2种仪器是随钻测量仪和对接引导仪器。随钻测量仪在我国已是成熟产品,基本能满足工程技术要求;但对接引导仪器仍需引进国外产品。在大规模对接井施工作业情况下依靠国外技术一是成本高,二是存在许多不确定风险,如仪器损坏返修时间长、技术出让方“坐地”起价等。我们依托承担的地质调查项目“定向钻进高精度中靶系统研究”,成功开发了具有自主知识产权的近距离中靶系统——“慧磁”中靶系统,并于2009年第一次投入使用,指导现场对接施工。“慧磁”中靶系统及其软件界面见图5。该系统具有技术含量高、测量精度高、软件界面友好和易于使用等优点,在首次中靶作业中,在靶区半径仅有1.5m、矿层腔高只有0.5m的条件下,取得了直接定向钻进一次中靶连通的优良效果^[10-15]。该仪器的成功应用使我国近距离测井摆脱了对国外技术的依赖。

3 卡赞天然碱矿水平对接井水溶开采回顾

3.1 前期勘探开采

卡赞天然碱矿是1998年由Rio Tinto公司的

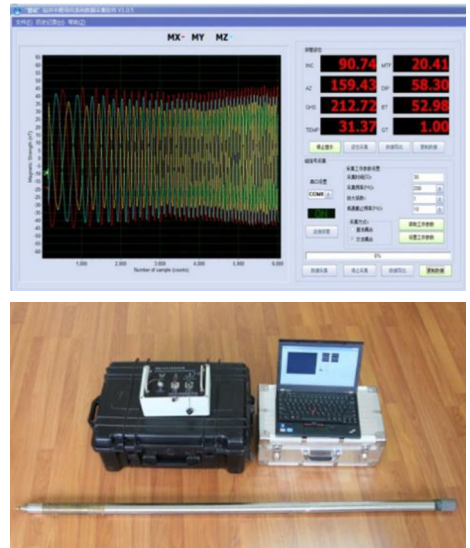


图5 “慧磁”中靶系统及其软件界面

Fig.5 “SmartMag” ranging system and the software interface

地质专家在第三系沉积地层钻探中发现的,于2000年完成了矿床地质勘探和水文地质勘探,根据获得的丰富勘探资料进行了地质评估、资源模拟和储量估算。2004年获得土耳其环保许可后,从2005年开始进行了水溶开采中试。

卡赞天然碱矿床的矿石品位较低,晶碱石平均含量为31%。如采用传统的房柱法采矿,将采出的矿石提升至地面加工,生产出的纯碱量不会高,而且还伴随产生大量尾矿废渣,将对周围地区造成严重污染。因此,相关专家提出应用水溶开采技术,将溶采的碱液送出地面加工,能生产出高产量的纯碱,当扩大溶采区时甚至可生产出更高产量的纯碱。为支持溶采的可行性研究,AAI公司用7组钻孔岩心在实验室做了晶碱矿石和围岩矿石的材料力学试验和受热试验,测定了高温下岩石强度和岩性变化,还做了岩心热溶解试验,建立了溶腔扩展模型和物热平衡模型,并提出了在溶采工程设计中纳入溶采中间试验计划。并进行了三维地震测量,得到了地层结构的三维分辨图像,可以鉴别含矿带潜在的断层和波动,以使水平井组选在最适宜的位置。

3.2 三井对接水溶开采试验

2011年,我们针对卡赞矿区地质特点,参考贝帕扎里矿山的开采模式,提出并实施了三井对接水溶开采试验,即1口水平井和2口垂直井组成的对接井组(见图6)。在原来一口水平井与一口垂直井对接形成的井组间插入一口探采结合的垂直井,可进一步探明矿层沿水平井设计轨迹的分布情况,提

高水平井溶采通道的遇矿率,减少穿越矿层顶底板,从而避免开采过程中可能形成的通道瓶颈导致的堵井事故。试验井位的选择既要有代表性又要利于对接成功后的溶腔发育和多层碱矿的换层开采,试采矿层选择为矿区主矿层 Bed3 矿层。同时也考虑了地面地形、地貌等因素。设计井组的水平段长度 284 m 左右,其中水平井曲率半径 180~200 m。注水温度 50~90 ℃,注水量 20~60 m³/h。

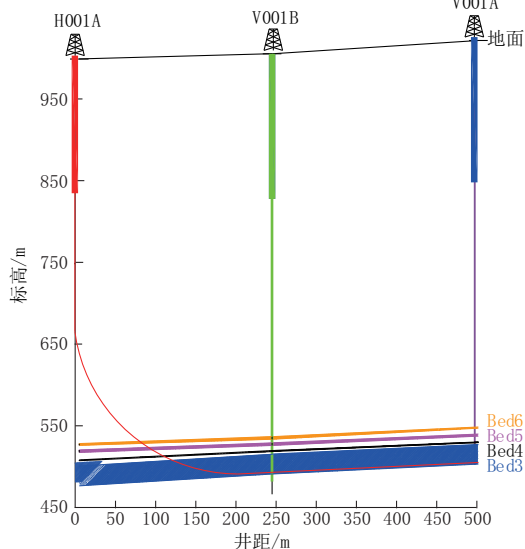


图 6 三井组连通设计

Fig.6 Design of the three-well set

当两井对接连通后,开始进行水平井建槽;当溶采通道宽度达到 5 m 时,开始进行试采作业。配制的注剂(按将来加工厂可能产生的杂水及循环卤水配制)加温后,经计量通过直井(或水平井)泵入矿层,在钻井形成的通道中溶解矿石并到达采卤井(直井或水平井),计量和取样分析;根据注井温度、流量组织进行试采,达到试采平衡后所收集的采矿数据作为试采数据。

试验结果表明该钻井设计方法是合理有效的,井组具有较高开采效率,卤水具有较好的质量,为矿山建设提供了各种合理的溶采参数,也为后期大范围矿产开发奠定了坚实基础。

3.3 三井对接水溶开采施工

2015—2017 年,由中国天辰工程有限公司总包、我所设计并实施了卡赞矿区的天然碱开采工程,开采模式仍为试验井的模式,即 1 口水平井和 2 口垂直井组成的对接井组模式,共建了 74 个对接井组,包括 74 口水平井和 148 口垂直井,合计 222 口

井,保证了向纯碱生产线供应合格原料碱卤^[16]。

3.3.1 利用纠斜技术保证井眼的垂直度

卡赞矿区地层有自然倾斜趋势,如果不加以控制,井底会发生不可忽视的偏斜。根据业主办方要求垂直井井底目标区域应在靶点中心 6 m 半径范围以内。纠斜时,造斜率应控制在 0.25°/m,避免井眼出现“狗腿”度,保证顺利下入生产套管。取心钻进时,尽管取心长度只有大约 100 m,还是会产生偏斜。钻进时选择了合理的取心工具尽可能减少偏斜量。当钻至设计深度时,采用 MWD 复测井眼轨迹。钻进至靶区范围外时则采用水泥封堵重新分支直至钻进至靶区内。纠斜过程中根据需要进行了复合钻进,即保证钻井轨迹回到设计位置同时提高了钻速,最后井身结构达到技术要求。

3.3.2 升级水平对接井专用器具

(1)配套无线随钻测斜仪。随钻测量仪是水平定向钻探的关键仪器,是连续监测钻井轨迹、及时纠斜的必备器具,负责测量钻头所处位置的顶角、方位角和工具面角。随钻测量仪分有线随钻和无线随钻测量 2 种类型。有线需要配备电缆测井绞车,每次加钻杆时需要将仪器探管提出井口,这种方式操作比较繁琐、影响钻进效率。卡赞碱矿首次引进无线随钻系统实施测斜应用,无线随钻仪直接跟随钻柱下入井底,加钻杆时无需上提仪器,简化操作,减少定向操作人员,大大提高钻进效率,缩短施工工期。加入自然伽马的随钻测斜仪可判断出钻头是否在矿层中钻进,否则就进行纠正,提高遇矿率。

(2)升级磁中靶系统。磁中靶系统是水平对接时的至关重要的仪器。是随钻测量仪的补充,不像随钻测量系统是测量大地磁为基准,磁中靶系统是测量靶井和钻头之间的相对空间位置关系,有越趋近靶精度越高的优点,大大提高了中靶精度。在卡赞天然碱水溶开采工程中,我们结合科研项目对早期“慧磁”中靶系统进行了升级,攻克了单芯铠装电缆数字传输技术,用单芯电缆替代了原来的多芯电缆,采用载波、双向通讯方式进行数据传输,同时向井底探管供电。尤其对软件也进行了升级,采用多窗口的用户界面实现多种资料、多种方法的应用和解释。因此设计时首先归纳用户界面的共性,然后逐渐增加专有成分进行多继承,使用户界面做到协调统一,操作简单,增加了其稳定性。界面采用了中文界面,集中了采集过程中的多种功能选择,实现了

多种资料、多种方法的应用和解释。主要包括图形生成和数据显示模块,数据显示中增设了数据资料导出及数据复制功能。具体包括采集方式选取、探管姿态的显示、采集工作参数的设置和读取以及采集磁信号波形图的显示等,这样的用户界面友好,图形数据显示直观,有相对参照性,且波形可放大缩小显示,见图7。



图7 第四代“慧磁”钻井中靶导向系统

Fig.7 The 4th generation “SmartMag” ranging system

3.3.3 三井组水平对接井大规模应用

卡赞天然碱钻井中设计了三井组水平对接商业开采模式,先完成2口垂直井,再钻水平井,对接时首先连通第一个垂直井,然后连通第二个垂直井,形成三井组采矿单元。实施对接时,远靶点水平钻进利用MWD无线随钻仪进行导向钻进,配备的伽马短节保证钻头在矿层中钻进。钻至近靶点中靶段后下入升级后的“慧磁”中靶系统,测量钻头和靶井中探管的相对距离、顶角偏差和方位偏差,从而指导钻头下一步钻进方向,进行中靶作业,最终实现了一次对接成功的效果。卡赞矿区三井组水平对接井布置见图8。卡赞天然碱对接井水溶开采钻井工程一期设计供卤总井组数74组,单井数量222口,该工程为世界天然碱定向水平对接井水溶开采规模最大的工程。

4 结语

通过土耳其贝帕扎里和卡赞天然碱矿的大量水



图8 卡赞矿区三井组采卤布置

Fig.8 Layout of the three-well sets

溶开采工程实践,定向水平对接井水溶开采技术取得了系统性发展。定向钻井随钻测量仪从有线升级到无线再到电磁数据传输,减少了停钻等待时间,提高了钻井效率;在定向钻探技术中引入了旋转磁井距测量系统,引导钻头与靶点达到精准一次对接,保证了对接的可靠性和成功率;开发了适合当地碱矿钻井地质条件的泥浆系统,提高了钻井速度,保证了碱矿取心质量;同时,伴随定向水平对接井钻井技术的提高,使得对接井开采模式得以采用多样化布置,提高了资源回采率和利用率。通过该项技术的应用,使土耳其天然碱资源得到广泛开发,其纯碱工业在世界上占有了一席之地。

值得一提的是,在引进国外旋转磁引导系统过程中,利用施工现场的便利条件进行了大量数据分析和研究试验,在短期内研发了具有自主知识产权的同类产品,从而打破了国外技术的垄断,巩固了我国定向对接井水溶开采技术在世界钻孔水溶采矿行业中的领先地位。

定向水平对接井水溶开采技术是定向钻探技术与对接引导技术在采矿工业中的创新应用,将随定向钻探技术与对接引导技术的进步而进步,同时又在采矿实践中不断发展与完善。要想保持我国定向

水平对接井水溶开采技术在天然碱矿水溶开采领域的领先地位,还需在定向钻探和对接引导技术方面进一步加强科技创新与应用创新力度,尤其是在旋转定向钻井技术、近钻头随钻测量技术、不依赖靶井的对接引导技术上实现突破,不断提高定向钻探与对接引导技术水平,从而提高钻井效率及资源回采率,创造更高的经济效益和社会效益。

参考文献 (References):

- [1] 张晨鼎.土耳其贝帕扎里天然碱矿床的开发[J].纯碱工业, 2004(2):15-18.
ZHANG Chending. Exploitation of natural soda deposit in Beypazari, Turkey[J]. Soda Industry, 2004(2):15-18.
- [2] 张晨鼎.2017 年国外纯碱工业发展概况与趋势[J].纯碱工业, 2018(6):3-7.
ZHANG Chending. Growth and trend of overseas soda industry in 2017[J]. Soda Industry, 2018(6):3-7.
- [3] 向军文,胡汉月,刘志强.土耳其天然碱矿 30 对对接井钻井工程[J].中国井矿盐,2007,38(5):25-28.
XIANG Junwen, HU Hanyue, LIU Zhiqiang. Well drilling in 30 pairs of butted wells in a trona mine in Turkey[J]. China Well and Rock Salt, 2007,38(5):25-28.
- [4] 林修阔,刘汪威,向军文.采卤对接井技术在 XL3-7 井的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):39-40.
LIN Xiukuo, LIU Wangwei, XIANG Junwen. Application of technology of connected brine wells in XL3-7 Well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(9):39-40.
- [5] 宫如刚,曹福德,曹文忠,等.土耳其贝帕扎里天然碱矿水平对接井施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):19-21.
GONG Rugang, CAO Fude, CAO Wenzhong, et al. Technology of horizontal butted well construction in Beypazari Natural Alkali Mine of Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(7):19-21.
- [6] 向昆明,刘汪威,陈剑奎,等.三维地质建模在土耳其天然碱对接井设计中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(10):2-6.
XIANG Kunming, LIU Wangwei, CHEN Jianyao, et al. Application of 3D geological modeling in Turkey trona solution mining project design[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(10):2-6.
- [7] 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.
LIU Wangwei, LIN Xiukuo, ZHANG Xingang, et al. Process design of complex connection well units in special geological conditions[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(4):13-16.
- [8] 刘海翔,刘汪威,陈剑奎,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.

- LIU Haixiang, LIU Wangwei, CHEN Jianyao, et al. Design optimization of well unite layout at Beypazari Trona Solution Mining Project (Phase III)[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(11):9-11.
- [9] 林修阔,陈剑奎,刘汪威,等.双通道平行井在采卤对接井中的首次应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(2):12-14, 18.
LIN Xiukuo, CHEN Jianyao, LIU Wangwei, et al. First application of double channel parallel wells in connected brine wells[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(2):12-14,18.
- [10] 胡汉月,向军文,刘海翔,等.SmartMag 定向中靶系统工业试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程).2010,37(4):6-10.
HU Hanyue, XIANG Junwen, LIU Haixiang, et al. Industrial test research on SmartMag target-hitting guidance system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(4):6-10.
- [11] 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.
XIANG Junwen, HU Hanyue. The application of accurate target technology of domestic directional butted-wells in salt mine[J]. China Well and Rock Salt, 2010, 41(5):16-18.
- [12] 陈剑奎,胡汉月.SmartMag 定向钻进高精度中靶系统及其应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):10-12.
CHEN Jianyao, HU Hanyue. Experience on application of SmartMag high precision drilling guidance system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(4):10-12.
- [13] 商敬秋,武程亮,刘汪威,等.无建槽直井的定向中靶作业[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):13-16.
SHANG Jingqiu, WU Chengliang, LIU Wangwei, et al. Oriented target-hitting operation for vertical well without cavity building[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(1):13-16.
- [14] 胡汉月.对接中靶区建槽若干问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):20-23.
HU Hanyue. Discussion of cavity development in the target area of intersection well pair[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(7):20-23.
- [15] 隆东,张新刚,岳刚,等.H024 井施工工艺及精确中靶技术措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(3):5-8,12.
LONG Dong, ZHANG Xingang, YUE Gang, et al. Construction technology of Well H024U and the technical measures of accurate target hitting[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(3):5-8, 12.
- [16] 刘汪威,刘海翔,涂运中,等.天然碱矿综合钻井水溶开采工艺设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):1-6.
LIU Wangwei, LIU Haixiang, TU Yunzhong, et al. Comprehensive borehole solution mining design for trona mines [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):1-6.