

土耳其卡赞碱矿对接井分层同时开采设计方案探讨

刘汪威, 张正元, 林修阔, 涂运中, 刘海翔

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:土耳其卡赞天然碱矿采用了对接井水溶开采的方法,目前已成功完成了 100 余组对接井组,创造了显著的社会与经济效益。为了提高矿山的利用率,根据现有情况和地质条件,本文针对卡赞碱矿四期钻井工程,提出了 3 种分层同时开采碱层的可选方案进行探讨。在总体方案已基本确定的情况下,提出了分层同时开采的布井原则,并对 3 种方案进行了简要阐述及各项指标对比。本文选择了具有钻井工作量少、工期较短及投资费用较低等优点的可选方案 C(1 口水平井+2 口垂直井),详细阐述了垂直井施工、水平井施工及溶采操作,并提出了一些技术问题与建议。该分层同时开采方案对于天然碱矿的多层同时开采及回采率提高具有一定的指导作用和借鉴意义。

关键词:天然碱矿;水溶开采;水平井;对接井;分层同时开采;土耳其卡赞碱矿

中图分类号:P634.7;TD87 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)08-0057-07

Design for simultaneous mining of multiple trona layers with an intersected well set at Kazan Soda Trona Mine in Turkey

LIU Wangwei, ZHANG Zhengyuan, LIN Xiukuo, TU Yunzhong, LIU Haixiang

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

Abstract: In Kazan Trona Mine in Turkey, the method of solution mining with intersected well set has been adopted with around 100 intersected well sets drilled successfully, which has brought about remarkable social and economic benefits. In order to improve the utilization rate of the trona resources, based on the current situation and geological conditions, three alternative schemes for simultaneous mining of multiple trona layers with an intersected well set for the Kazan Phase IV drilling project are put forward in the paper. With the overall plan determined, the well layout principle for simultaneous mining of multiple layers is put forward, and the three schemes are briefly expounded and the index of them are compared. The 3rd alternative scheme (1 horizontal well + 2 vertical wells) is selected since it provides the advantages of less drilling work, shorter construction period and lower investment cost. Description is made in detail of vertical well drilling, horizontal well drilling and solution mining operation with some related technical problems and suggestions were put forward. The simultaneous mining scheme can provide some guidance and reference for simultaneous mining of multi-layer trona mines and increase of resource recovery.

Key words: trona mine; solution mining; horizontal well; intersected well set; simultaneous mining; Kazan Soda Trona Mine in Turkey

0 引言

我所自 2003 年应用自主研发的高精度定向钻进技术在土耳其贝帕扎里天然碱矿成功施工了第一组天然碱试采对接井,从此打开了土耳其天然碱对接井水溶采矿市场的大门。目前,我所凭借雄厚的

科研实力和精湛的对接井水溶采卤技术承揽了土耳其 2 个天然碱矿的对接井水溶采卤工程:一个是贝帕扎里天然碱钻采工程^[1-4],另一个是卡赞天然碱钻采工程。

土耳其卡赞碱矿目前已完成了试采、一、二、三

收稿日期:2020-04-22; **修回日期:**2020-07-09 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.08.010

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:刘汪威,男,汉族,1982 年生,高级工程师,地质工程专业,主要从事受控定向钻进连通井相关科研与设计工作,河北省廊坊市金光道 77 号,liuww88@qq.com。

引用格式:刘汪威,张正元,林修阔,等.土耳其卡赞碱矿对接井分层同时开采设计方案探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):57-63.
LIU Wangwei, ZHANG Zhengyuan, LIN Xiukuo, et al. Design for simultaneous mining of multiple trona layers with an intersected well set at Kazan Soda Trona Mine in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):57-63.

期钻井工程,合计约100余组天然碱对接井,目前正在实施四期钻井工程。其中,卡赞碱矿一期工程共完成了74个溶采井组,并配套建设了发电站和天然碱加工厂,产能为250万t纯碱和20万t小苏打。我所承担了该项目所有井组的设计与施工,共动用了10台套钻机,依靠具有自主知识产权的“慧磁”高精度对接中靶导向系统^[5-9],提前6个月完成了所有钻井施工任务。

这些工程主要开采模式为1口水平井和2口垂直井对接^[10],全部需要利用高精度中靶技术实现一次对接成功。由于天然碱可溶性较差,建槽时间较长,施工时甚至不建槽,这样导致靶区溶腔较小,定向连通难度较大。采用高精度对接技术指导连通,在靶区半径仅有0.3m、矿层腔高只有1.2m的条件下,取得了直接定向钻进中靶连通的优良效果。并在此工程中开发了多井组对接模式^[11-14],这种多井组利用了水平分支井的优势,可有效控制某一区域的矿产资源。采用一个水平井分支形成2个或多个水平段,可节约大量成本。

1 地质概况

土耳其卡赞天然碱矿位于土耳其首都安卡拉市西北35km,矿区交通便利,附近有高速公路和国道经过,矿区内有简易公路相通。卡赞盆地位于Anatolia中部的Sakarya盆地,其延展方向为NE-SW,纬度在 $32^{\circ}24' \sim 32^{\circ}50'$ 之间,经度在 $39^{\circ}56' \sim 40^{\circ}28'$ 之间,矿区位于卡赞盆地西面,在Incirlik和Fethiye村庄之间。碱矿赋存于第三系下层的Incirlik地层中,矿床南北长4.5km,东西宽3.7km,面积约9.8km²。

该矿区地质条件复杂,地层具有较强的自然致斜特性。矿区地下水丰富,钻井过程中容易发生涌水。前期勘探调查结果表明,天然碱矿矿体埋深600~700m,含矿段厚度为60~100m,从上至下分布了Bed10, Bed Y, Bed X, Bed9~Bed1等12个碱层,每层厚度0.5~20m不等,可采资源量丰富,具有极大的开发利用价值。

其中,碱层平均厚度最大的为Bed3碱层,厚度为10~25m,最厚处超过34m,西部变化较为剧烈,东部变化较为平缓。矿层底板从西北向东南逐渐降低,走向约 $30^{\circ}(N30^{\circ}E)$,倾向约 120° ,矿层倾角约 $12^{\circ}(SE120^{\circ} \angle 12^{\circ})$,分布较为规律。勘探孔采取

的Bed3碱层岩心见图1。

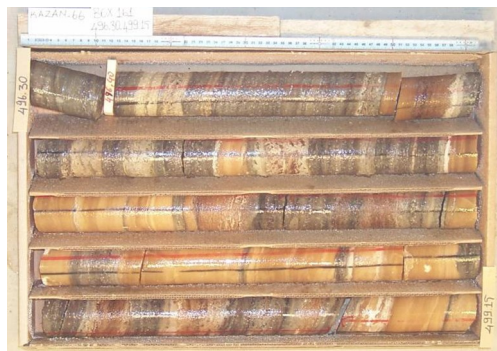


图1 Bed3碱层岩心

Fig.1 Cores from Bed3 trona layer

2 分层同时开采的提出

在前期已完成项目的基础上,碱矿业主经过充分论证,决定选择Bed3碱层作为主采层,Bed4和Bed5碱层为次采层,利用水平定向对接井钻进、水溶采矿法进行开采,共规划7期进行开发。水溶采矿法具有节约土地资源、污染少、开采成本低等优点,特别适用于埋藏较深的可溶性固体矿产,已在国内外一系列工程项目中得到了成功应用^[15-16]。

根据业主的提议,希望在四期钻井工程中在开采Bed3碱层的同时,实现对Bed2碱层的开采,以提高矿山的资源利用率。在四期工程区域内,Bed2平均厚度3~4m,埋藏深度450~600m,Bed3平均厚度18~24m,Bed2与Bed3之间的夹层厚度为5~6m。根据邻井取心资料分析,Bed2与Bed3碱层品位大致相当,具有可采价值。

根据天然碱矿水溶开采的设计及施工经验,垂直井溶腔发展的理论模型为 14° 倾角的倒圆锥体,Bed3碱层溶腔发展理论最大半径能达到35m。若开采Bed2碱层,溶腔半径预计能达到15~20m,具有较好的开发利用价值。垂直井分层同时开采溶腔理论发展剖面见图2。

3 水平对接井组布井设计

通过收集和整理相关矿山地质数据,建立三维地质模型,绘制矿层相关地质图件,根据地层埋藏情况与勘探结果分析,四期工程主要设计了2种水平对接井组类型。

当水平井钻至开采层后,落平点与最终垂直井(第二靶点)的距离不足150m的情况下,设计为A型“1H+2V”水平对接井组,见图3。溶采通道仅在

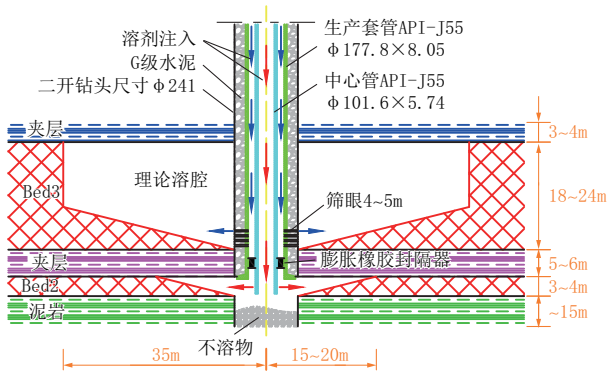


图 2 垂直井分层同时开采溶腔理论发展剖面

Fig.2 Profile of theoretical cavity development in simultaneous mining with a vertical well

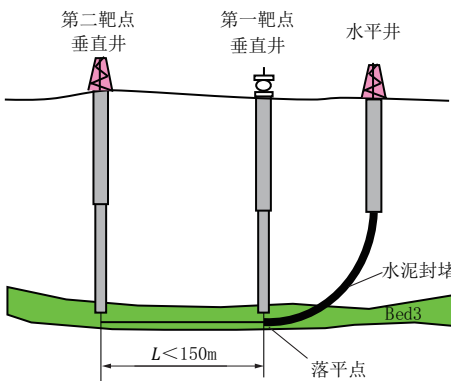


图 3 A 型“1H+2V”水平对接井组结构

Fig.3 Structure of “Type A” intersected well set “1H+2V”

2 口垂直井之间循环,水平井仅起到连通 2 口直井的作用,因此,水平井不作为生产井,也不下入生产套管,在连通两直井后,对造斜段进行水泥固井封堵。

当水平井钻至开采层后,落平点与最终垂直井(第二靶点)的距离 > 150 m 的情况下,设计为 B 型“1H+2V”水平对接井组,见图 4。水平井在造斜段下入生产套管,溶剂从生产井注入,经过碱层溶解,卤水从垂直井采出,溶采通道可以在水平井与两垂直井之间交替循环。

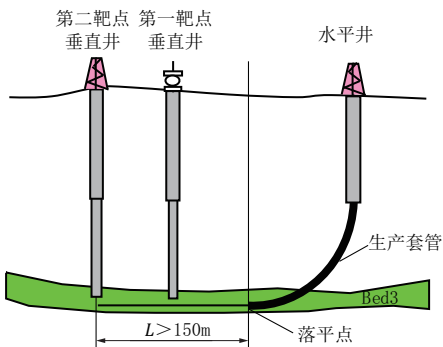


图 4 B 型“1H+2V”水平对接井组结构

Fig.4 Structure of “Type B” intersected well set “1H+2V”

其垂直井与 2 种类型的水平井井身结构参数见表 1。

表 1 钻井井身结构参数

Table 1 Well structure parameters

| 钻井类型 | 一 开 | | 二 开 | | 三 开 |
|--------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| | 井径/ 套管直 mm 径/mm | 井径/ 套管直 mm 径/mm | 井径/ 套管直 mm 径/mm | 井径/ 套管直 mm 径/mm | 裸眼井径/ mm |
| 垂直井 | 346 | 273 | 非取心段 241 取心段 140 | 177.8 | 118 300(局部扩孔) |
| A 型水平井 | 311 | 244.5 | 215.9 | | 152 |
| B 型水平井 | 311 | 244.5 | 215.9 | 139.7 | 118 |

四期工程的井组在区域、方位、组距、井距已基本确定的情况下,其 Bed2 分层同时开采的布井设计方案总体保持与四期工程一致,不同之处如下:

(1)采用多口水平井或分支侧钻的方式分层同时开采 Bed3 和 Bed2 碱层;

(2)B 型水平井组下入生产套管后,存在分支钻进困难且不利于分层开采的问题,故 B 型水平井组分支侧钻宜改为 A 型井组布置;

(3)由于 Bed2 碱层在矿区的分布不均匀,大面积布置 Bed2 碱层的开采井存在较大的风险和不确定性因素,应先施工四周外围的井组,后施工中部的井组;

(4)在边缘矿区的井组,应先施工外侧靠近边缘的垂直井,后施工内侧的水平井,若外侧的垂直井未发现 Bed2 碱层,则该井组取消 Bed2 碱层的分层同时开采方案,保持原开采 Bed3 碱层的方案。

4 分层同时开采可选方案

根据四期工程的现有情况和地质条件,提出了如下 3 种分层同时开采的可选方案。

4.1 可选方案 A(1H+4V)

在原设计开采 Bed3 碱层的井组旁,增加 2 口垂直井,即 1 口水平井+4 口垂直井,采用 A 型水平井分支侧钻的方式开采 Bed2 碱层。其平面布置见图 5,具体方案如下:

(1)优先施工开采 Bed3 碱层的 V001A 和 V001B 垂直井;

(2)根据取心或电测井结果,判断 Bed2 碱层是否存在,以及 Bed2 碱层厚度和品位是否具有商业开采价值;

(3)若 Bed2 碱层不存在或不具备商业开采价值,则保持原设计施工水平井开采 Bed3 碱层;

(4)若 Bed2 碱层存在且具备商业开采价值,则开始施工 V001C 和 V001D 垂直井,技术套管下入 Bed2 碱层中;

(5)施工 A 型水平井 H001,造斜段使用 $\varnothing 216$ mm 钻头,造斜半径为 200 m,在距离 V001A 井前方 70 m 处更换为 $\varnothing 152$ mm 钻头施工水平段,连通开采 Bed3 碱层的 V001A - V001B 通道;

(6)关闭 V001A 和 V001B 井的井口装置, H001 井提钻更换为 $\varnothing 118$ mm 钻头(更易于分支和大斜率钻进),从距离 V001A 井前方 70 m 的变径处开始分支;

(7)距离 V001A - V001B 通道水平方向偏移 45 m,垂直方向下沉 8~10 m,进入 Bed2 碱层中,最后连通 V001C - V001D 通道,整个分支段长度在 200~240 m;

(8)关闭 V001C 和 V001D 井的井口装置,在分支点处下入封隔塞,用水泥封闭上部造斜段。

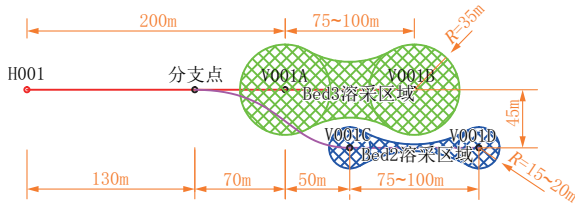


图5 可选方案 A 钻井平面布置

Fig.5 Schematic plan of drilling layout in the alternative scheme A

4.2 可选方案 B(2H+2V)

在原设计开采 Bed3 碱层井组轴线的另一端,增加 1 口 A 型水平井,即 2 口水平井+2 口垂直井,连通 2 口垂直井 Bed2 碱层通道进行开采。其剖面布置见图 6,具体方案如下:

(1)优先施工 V001A 和 V001B 垂直井,以及 H001A 水平井连通开采 Bed3 碱层的 V001A - V001B 通道;

(2)若 Bed2 碱层存在且具备商业开采价值,则开始施工 H001B 水平井;

(3)关闭 V001A 和 V001B 井的井口装置, H001B 井采用 $\varnothing 152$ mm 钻头进入 Bed2 碱层中,在“慧磁”中靶系统的引导下,连通 V001A - V001B 在 Bed2 碱层的通道;

(4)在 H001B 水平井下入封隔塞,用水泥封闭上部造斜段。

4.3 可选方案 C(1H+2V)

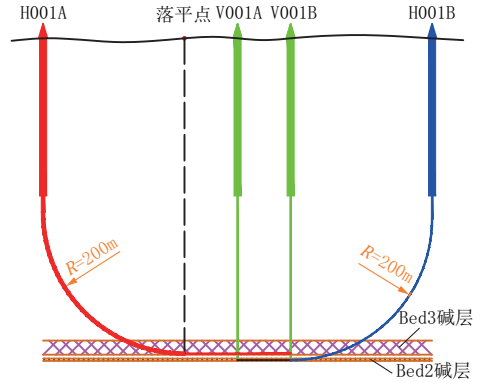


图6 可选方案 B 钻井剖面布置

Fig.6 Profile of drilling layout in the alternative scheme B

在原设计井组中, H001 水平井连通 Bed3 碱层之后,采用分支侧钻的方式开采 Bed2 碱层,即保持 1 口水平井+2 口垂直井不变。水平井组所采用的参数与原设计基本一致,水平井造斜距离 200 m,2 口垂直井距离在 75~100 m,开采 Bed2 的分支点距离 V001A 垂直井为 70~80 m,其平面布置见图 7。

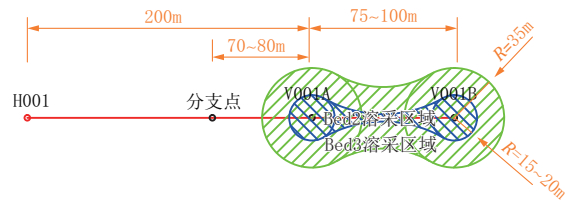


图7 可选方案 C 钻井平面布置

Fig.7 Plan of drilling layout in the alternative scheme C

4.4 方案比较

对上述 3 种可选方案的主要指标进行了比较(见表 2),从中可以看出这 3 种方案各有优缺点,可根据不同的侧重面进行选择。

表 2 3 种可选方案的主要指标比较

Table 2 Comparison of main index between the three alternative schemes

| 方 案 | 增加钻井 工作量 | 钻井 工期 | 钻井 投资 费用 | 钻井 难易 程度 | 堵井 风险 性 | 产卤 能力 | 后期修 井难易 程度 |
|-------------|-------------|----------|----------------|----------------|---------------|----------|------------------|
| 方案 A(1H+4V) | 2 口直井 | 较长 | 很高 | 较难 | 较小 | 较高 | 较难 |
| 方案 B(2H+2V) | 1 口水平井 | 中等 | 较高 | 较易 | 中等 | 很高 | 较易 |
| 方案 C(1H+2V) | 分支段 | 较短 | 较低 | 很难 | 较高 | 较高 | 很难 |

根据现场情况及业意见进行综合考虑,本文选择可选方案 C(1H+2V),分别在垂直井施工、水平井施工及溶采操作 3 方面进行详细阐述。该方案明显的优势在于钻井工作量少、工期较短及投资费用较低。

5 分层同时开采施工方案

5.1 垂直井施工方案

导管及一开施工方案与原设计保持一致,后续施工方案参见图 2。其具体的施工步骤如下:

(1)导管钻进采用 $\Phi 445$ mm 钻头钻至井深约 20 m,下入 $\Phi 339.7$ mm 导管并用油井水泥固井,对表土层进行封闭;固井水泥养护 48 h。

(2)一开钻进采用 $\Phi 346$ mm 钻头钻至井深 350~450 m(比深部含水层低 10~20 m,以保固井井段和固井质量),进行录井、测斜作业;下入 $\Phi 273$ mm $\times 8.89$ mm 表层套管并用油井水泥固井,对上部含水层进行封闭;固井水泥养护 72 h;下钻扫水泥塞后进行固井质量测量。

(3)二开采用 $\Phi 241$ mm 全面钻头钻进至 Bed2 碱层底板以下 15 m 终孔;或采用 $\Phi 140$ mm 取心钻头取心钻进,再采用 $\Phi 241$ mm 全面钻头扩孔至 Bed2 碱层底板以下 15 m。

(4)根据取心或电测井结果,判断 Bed2 碱层是否存在,以及 Bed2 碱层厚度和品位是否具有商业开采价值。

(5)若 Bed2 碱层不存在或不具备商业开采价值,生产套管(API-J55- $\Phi 177.8$ mm $\times 8.05$ mm)下至 Bed3 碱层顶板以下 1 m 位置,相应的另一口垂直井即使发现 Bed2 碱层,也只开采 Bed3 碱层。

(6)若 Bed2 碱层存在且具备商业开采价值,则生产套管下至 Bed2 碱层顶板位置。

(7)在下入生产套管之前,井深在 Bed3 碱层底板处至上部 4~5 m 的区间内,在生产套管上打上一定数量和尺寸的筛眼(具体的筛眼分布密度和大小可以根据后续的效果进行调整),以供生产时注井溶液通过。

(8)固井时,水泥浆会从筛眼出来并上返。一方面,碱层处的水泥胶结质量相对较差,另一方面,扫水泥塞时钻头的震动,会清除部分堵在筛眼里的水泥。

(9)扫塞完成后,提钻更换为带高压水射流钻头的钻具下入井中,在筛眼区域来回滑动,可扫除其筛眼上的水泥,并进行 24 h 的建槽作业,以扩大溶腔。

(10)中心管采用 API-J55- $\Phi 101.6$ mm $\times 5.74$ mm,下至 Bed2 碱层底板位置。

(11)在下入中心管之前,井深在 Bed2~Bed3 碱层的夹层中部位置,安装膨胀橡胶封隔器,其在井

中遇水后会慢慢膨胀填满生产套管与中心管之间的环空,起到分隔作用。

5.2 水平井施工方案

水平井分层同时开采 Bed2 碱层剖面示意图 8。施工 A 型水平井 H001,其导管与一开施工方案与原设计保持一致。其具体的施工步骤如下:

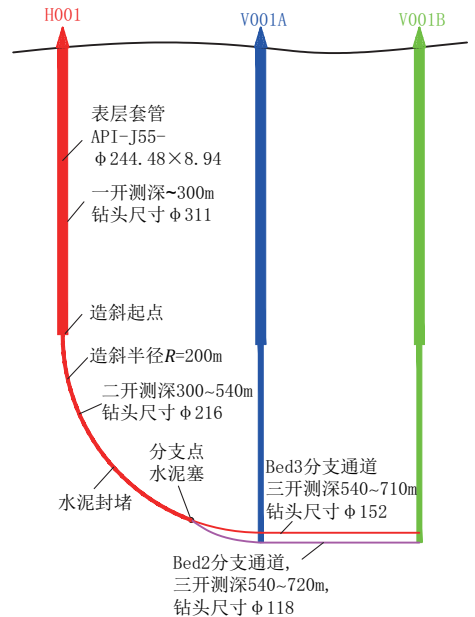


图 8 水平井分层同时开采 Bed2 碱层剖面示意

Fig.8 Profile of simultaneous mining of Bed2 trona layer with the intersected well set

(1)导管钻进采用 $\Phi 445$ mm 钻头钻至井深约 20 m,下入 $\Phi 339.7$ mm 导管并用油井水泥固井,对表土层进行封闭;固井水泥养护 48 h。

(2)一开钻进采用 $\Phi 311$ mm 钻头钻至井深 350~450 m(比深部含水层低 10~20 m,以保固井井段和固井质量),进行录井、测斜作业;下入 $\Phi 244.5$ mm $\times 8.94$ mm 表层套管并用油井水泥固井,对上部含水层进行封闭;固井水泥养护 72 h;下钻扫水泥塞后进行固井质量测量。

(3)造斜段使用螺杆马达、无磁钻铤、无线随钻测量仪、 $\Phi 215.9$ mm 钻头的钻具组合,造斜半径为 200 m。

(4)在距离 V001A 井前方 70~80 m 处提钻,更换为带磁接头的 $\Phi 152$ mm 钻头,相应应在 V001A 井和 V001B 井中下入“慧磁”中靶仪。

(5)通过中靶系统的引导及伽马探管判断碱层,连通 Bed3 碱层中的通道。

(6)H001 井上提钻具,并关闭 V001A 和

V001B井的井口装置,在分支点处下入水泥封隔塞,用水泥封闭上部造斜段。

(7)H001井更换为 $\varnothing 118$ mm钻头(更易于分支和大斜率钻进),从距离V001A井前方70~80 m的变径处开始分支。

(8)钻头在垂直方向下沉8~10 m,进入Bed2碱层中,通过中靶系统的引导及伽马探管判断碱层,

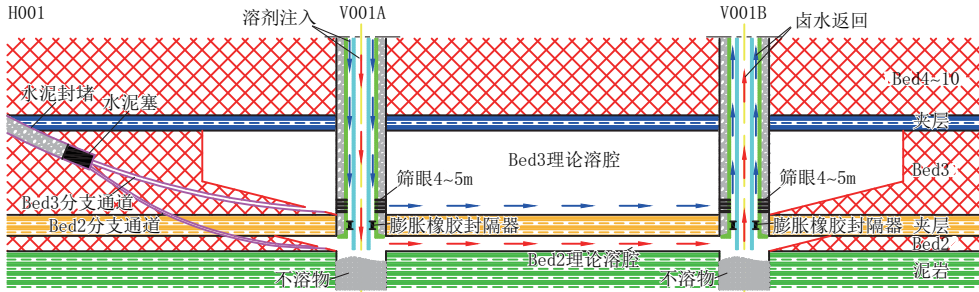


图9 井组分层同时溶采流程

Fig.9 Simultaneous mining flow chart

分别在V001A井的中心管中和中心管与生产套管的环空中注入溶剂,注入中心管中的溶剂会进入Bed2碱层中进行溶解,然后从V001B井的中心管中返出;注入中心管与生产套管环空中的溶剂会进入Bed3碱层中进行溶解,然后从V001B井的环空中返出。相反地,亦可以从V001B井注入,从V001A井返出。亦可以从一口井的中心管中注入,环空中返出,或从环空中注入,中心管中返出。在生产中可以根据具体的注井压力、流速、温度等参数,调整循环模式,可有效提高生产效率,避免不溶物阻塞通道。

6 问题与建议

本文提出的3个可选方案总体上都具有可行性,各有优缺点,可根据不同的侧重面进行选择。具体实施细节及技术难题需进一步与业主探讨,目前存在以下几点问题与建议:

(1)若垂直井的生产套管在固井封塞后,筛眼仍然全部堵塞或极少量连通,则需要考虑在筛眼处采用射孔操作。

(2)在溶采的中后期,Bed3碱层溶腔中可能存在大量的不溶物堆积堵塞下部的筛眼,不能像原设计通过上提中心管来解决,从而导致无法开采Bed3碱层的中上部矿层,则需要考虑在Bed3碱层中上部位的生产套管处进行射孔操作。

连通Bed2碱层中的通道,整个分支段长度在150~180 m。

5.3 溶采操作方案

水平井施工完成后,应尽快完成地面管线和仪表的安装,开始建立起循环,其分层同时开采流程见图9。

(3)若出现管中形成结晶或夹层垮塌等情况,导致堵塞中心管,由于中心管上安装了封隔器,可能对后续修井工作带来困难。

(4)即使优先施工边缘处的垂直井,另一垂直井也可能出现没有Bed2碱层的情况,则该井组只能改为开采Bed3碱层。

(5)建议在水平井施工前,对垂直井进行7 d以上的单井建槽作业,一方面可以提高一次连通的成功率,另一方面可以检验筛眼通道的效果。该情况下,应在建槽结束以后,提出中心管,再在中心管上安装膨胀橡胶封隔器后下入井中。

(6)整个矿区缺少Bed2碱层的品位、不溶物含量、NaCl含量等关键参数,可能对溶采操作和工厂加工带来影响,建议将四期工程区域附近已经取心的钻井中Bed2碱层的岩心进行化学实验分析。

(7)该方案相对于原设计增加了一定的成本,且Bed2碱层厚度低于Bed3碱层,建议对Bed2碱层分层同时开采方案进行商业化可行性论证。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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 Bepazari Natural Alkali Mine of Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(7):19-21.
- [4] 向昆明,刘汪威,陈剑垚,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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 陈剑垚,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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- HONG Changjiu. Application of level docking wells in nature alkaline mine[J]. Coal Technology, 2008,27(6):142-143.
- [11] 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.
- [12] 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.
- LIU Haixiang, LIU Wangwei, CHEN Jianyao, et al. Design optimization of well unite layout at Bepazari Trona Solution Mining Project (Phase III) [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(11):9-11.
- [13] 林修阔,陈剑垚,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.
- [14] 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.
- [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] 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.
- FAN Chuanzhong. Essential issues of horizontal butted well mining[J]. China Well and Rock Slat, 2015,45(5):13-16,46.

(编辑 周红军)