

# 三维地质建模在土耳其天然碱对接井设计中的应用

向昆明<sup>1</sup>, 刘汪威<sup>2</sup>, 陈剑垚<sup>2</sup>, 林修阔<sup>2</sup>, 胡汉月<sup>2</sup>

(1. 四川省煤田地质局一三七队, 四川 达州 635006; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 三维地质建模是从三维的角度对矿产进行描述和研究, 与传统方法相比, 具有时间短且数据精确的优越性, 对工程决策和科学管理具有重要的意义, 目前已经成为矿产开发与地质研究的重要手段之一。将三维地质建模方法应用于土耳其贝帕扎里天然碱矿对接井四期工程设计中, 取得了很好的效果。结合工程应用, 介绍了三维地质建模应用于对接井设计的方法。

**关键词:** 三维地质建模; 对接井; 天然碱; 钻井设计; 土耳其贝帕扎里天然碱矿

**中图分类号:** P634.7   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-7428(2012)10-0002-05

**Application of 3D Geological Modeling in Turkey Trona Solution Mining Project Design/XIANG Kun-ming<sup>1</sup>, LIU Wang-wei<sup>2</sup>, CHEN Jian-yao<sup>2</sup>, LIN Xiu-kuo<sup>2</sup>, HU Han-yue<sup>2</sup>** (1. 137 Geological Team, Sichuan Coalfield Geology Bureau, Dazhou Sichuan 635006, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** 3D geological modeling is a better method to describe and study the mineral than the traditional methods, not only quick but accurate. Because of the great importance to the project decision and scientific management, it has become one of the effective ways to exploitation of mineral resources and geological research. This paper introduces the 3D method applied in the Turkey trona solution mining project of phase IV basic design, which achieved a very good result.

**Key words:** 3D geological modeling; connection well; trona; well design; Turkey Beypazari trona mine

## 0 引言

所谓三维地质建模就是运用计算机技术, 在三维环境下, 将空间信息管理、地质解释、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来并应用于地质分析的技术。三维地质建模作为一种处理地质对象的新技术, 与传统方法相比, 具有很强的优越性, 符合现代工程设计、施工和管理的需要。

由于数据量较大, 三维地质建模离不开计算机及软件的支持。目前国内外已经出现了多种结合不同专业开发的三维地质建模软件。以美国、加拿大、澳大利亚和英国等为代表的工业化国家推出的比较有影响的三维地质建模软件有 GoCAD、Surfer、Petrel、Geomodeler3D、GSI3D、CTech、Earthvision、Vulcan 和 Micromine 等, 这些软件涉及地震勘探、石油开采、地下水模拟、矿体模拟、矿产资源评估、开采评估、设计规划和生产管理等众多专业领域。国内的三维地质建模软件主要有 GSIS、3DMineGeoView、GeoMo3D、理正地质 GIS、TitanT3M、VRMine、MAP-GIS-TDE、3DGrid 和深探地学建模软件等。与国外相比, 国内三维建模软件的研发还处在探索与完善

阶段, 产品尚不成熟, 商业化程度较低, 在建模功能和可用性上与国外软件仍有一定差距。

在土耳其贝帕扎里(Beypazari)天然碱矿对接井四期工程的设计中, 利用计算机软件建立矿区的地质模型, 其目的及意义在于:

- (1) 可以最大程度地集成多种地质资料信息;
- (2) 强大的可视化功能, 可以提高对难以想象的复杂地质条件的理解和判别, 为设计工作提供验证和解释;
- (3) 通过三维地质模型, 设计合理的对接井并眼轨迹, 并在此基础上进行钻井工程设计;
- (4) 三维地质模型更能客观反映矿层起伏变化特征, 较精确地预测沿水平轨迹的各项地质参数, 确保对接井顺利地穿越矿层;
- (5) 结合钻井施工情况, 比较实钻矿层与设计矿层的误差, 以及根据录井与测井的矿层显示情况, 检验工程设计中选井位、选矿层、选方位的合理性。

## 1 矿区概况

土耳其贝帕扎里天然碱矿位于安卡拉(Ankara)和奈利汗(Nallihan)国家公路附近, 距安卡拉市

收稿日期: 2012-08-03; 修回日期: 2012-09-03

**作者简介:** 向昆明(1968-), 男(汉族), 四川宣汉人, 四川省煤田地质局一三七队队长、高级工程师, 探矿工程专业, 从事煤田勘探、非煤勘探、工程地质勘察等管理工作, 四川省达州市华蜀南路200号, scdzxkm@163.com; 刘汪威(1982-), 男(汉族), 四川威远人, 中国地质科学院勘探技术研究所工程师, 地质工程专业, 从事受控定向钻进连通井施工与相应科研项目研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, liuw88@qq.com。

110 km,位于贝帕扎里镇西北 14 km,矿区内有简易公路相通,交通便利。

碱矿赋存于第三系贝帕扎里盆地沉积序列中较下部位的河卡(Hirka)地层中。盆地的底板是由古生代始新世的变质岩、酸性深成岩、火山岩组成。碱矿床长 5.4 km,宽 3.6 km,面积约 8.2 km<sup>2</sup>,矿床走向北偏东 64°,倾向约正东。

贝帕扎里碱矿的沉积形态大致受区域地质构造的影响(断层和褶皱)。碱矿中心受坎塞维(Kanliceviz)断层影响分成 2 个区域,分别称为西部爱尔迈玻利矿区(Elmabeli)和东部阿利塞基矿区(Ariseki)。在阿利塞基矿区内有 4 条横切矿床的断层,将矿区划分为 5 个矿块。贝帕扎里矿区地层依次为札维依(Zaviy)、卡基鲁巴(Cakiloba)、沙里亚吉尔(Saragil)、卡拉杜鲁克(Karadoruk)、河卡(Hirka)和玻亚利(Boyalı)地层。

碱矿层位于主要由粘土层和含沥青的页岩组成的河卡地层中,埋深在 250~430 m 之间,含矿段厚度 70~100 m,共有 33 层厚度在 0.4~2.0 m 的单层矿,矿体以透镜形态产出。在纵向上碱矿层分为两个矿组,每个矿组含 6~7 个主要矿层,上部矿组划分为 U1~U6 共 6 个单层,累计矿层厚度为 8~20 m,平均总厚度 15 m;下部矿组划分为 L1,L2-1,L2-2,L3~L6 共 7 个单层,累计矿层厚度为 3~15 m,平均总厚度 10 m。上、下矿段之间有一层 20~25 m 厚的粘土岩、凝灰岩和油页岩组成的隔层。

## 2 数据准备

### 2.1 数据收集整理

在三维地质建模之前,要大量收集有关资料,并对资料进行筛选分析,资料的准确性对建模的效果起着至关重要的作用。四期设计收集的钻井资料包括土耳其一、二、三期的勘探井和生产井,其中,生产井又包括垂直井和水平井,共计 239 口,勘探井 101 口,垂直井 70 口,水平井 53 口,报废或资料不全的钻井 15 口。

收集的数据内容主要包括钻井井口坐标、井深、顶角、方位、矿层厚度、完井深度、岩性描述、钻时等钻井数据和矿石重度、碳酸钠含量、碳酸氢钠含量、总碱度、不溶物含量等矿石分析数据。收集完数据后还需经过整理、分析、筛选、计算、归纳和统计等工作,以确保矿层数据的准确性和完整性。例如一钻井资料中缺失某一矿层,应根据其钻井深度和周围钻井资料来判断未见矿层为零厚度层或未达井深的

未知层。所有钻井的矿层数据都须将井口坐标和矿层的井深、顶角、方位和视厚度计算转换为矿层大地坐标、底板高程和真厚度。矿层数据均为地质录井和电测录井经过综合分析比较后的数据。

### 2.2 矿层边界处理

矿层中存在内部零厚度的孤岛和外围边界,因此,必须对矿层边界范围进行处理。

#### 2.2.1 处理原则

根据相关技术规范和四期工程具体情况,制订以下原则:矿层的连接和外推应遵循矿床地质规律。矿层一般采用直线连接,钻井间矿层的厚度,不得大于相邻钻井实际控制的矿层最大厚度。矿层的外推采用有限外推或无限外推方法。当边缘见矿钻井以外有其它未见矿钻井控制,采用有限外推法,当钻井间距小于 300 m 时,外推距离可按钻井间距的 1/2 确定;当钻井间距大于 300 m 时,取 150 m。当边缘见矿钻井以外无其它钻井控制,采用无限外推法,外推距离根据边缘见矿钻井见矿情况确定,一般取 150 m。

#### 2.2.2 有限外推法

根据钻井的矿层数据分为 2 类:一类是见矿井,称其为矿层厚度非零井;另一类为未见矿井,称其为矿层厚度零井,简称为见矿井和未见矿井(指某一特定矿层,而非钻井所有矿层)。未见矿井主要用于确定矿层零边界,又可分为外围未见矿井和内部未见矿井。采用有限外推法确定矿层边界的数据应用流程图,如图 1 所示。

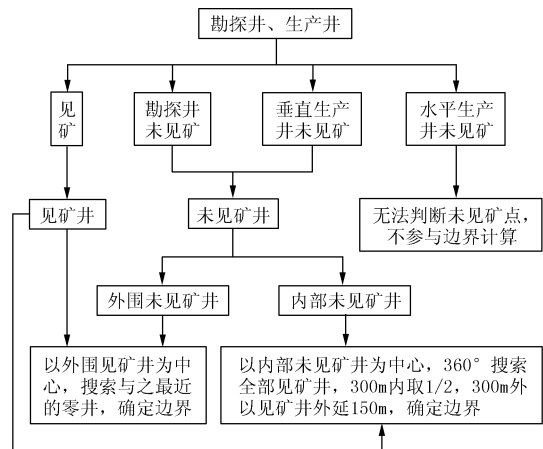


图 1 有限外推法矿层边界确定流程图

#### 2.2.3 无限外推法

无限外推法矿层边界确定如图 2 所示。

矿层外推可以利用建模软件和绘图软件绘制钻井矿层坐标平面图来完成矿层边界的判断,并可以

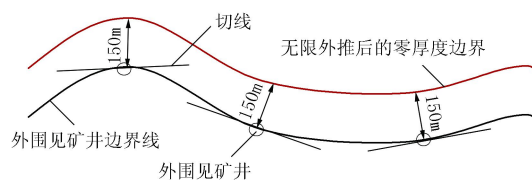


图2 无限外推法矿层边界确定示意图

利用计算器编辑公式精确的计算出零边界点的坐标。值得注意的是,通过外推法确定的虚拟零厚度边界点数据录入到数据表中时,应剔除与之相应的原矿层厚度为零的钻井数据。

### 3 数据库建立

建立数据库之前必须将数据整理为标准格式,其包含3个字符段,即 $X$ 、 $Y$ 坐标和值。工程中一般采用的是高斯直角坐标系,而建模软件采用的是数学坐标系,因此, $X$ 、 $Y$ 坐标计算时要进行互换。根据贝帕扎里碱矿矿区分布情况, $X$ 坐标取值范围为399000~405000, $Y$ 坐标取值范围为448000~452500,建模面积27 km<sup>2</sup>。为了保证地质模型的控制精度,在建立三维网格中使用5 m×5 m的网格间距,平面网格结点数为901×1201,共得到1082101个单元网格。插值方法采用最小曲率法。最小曲率法广泛应用于地球科学,是构造出具有最小曲率的曲面,使其穿过空间场的每一个点,并尽可能使曲面变得光滑,最大残差和最大循环次数2个参数控制最小曲率的收敛标准。

四期设计共建立了13个主矿层的数据库,包括矿层底板高程、矿层厚度、矿石密度、碳酸钠含量、碳酸氢钠含量、总碱度和不溶物含量等。

### 4 等值线图绘制

数据库准备完成后,建模软件可以自动生成等值线图。在此基础上,通过添加井位张贴图、调整线型、间隔、颜色和标记等操作使图形更加美观,也可以用绘图软件进行后期编辑,添加图框、图例、矿层特征、公路、管线、特殊点和标注等信息。

在绘制等值线图时,应先绘制矿层厚度等值线图。矿层零边界以外的数据无意义,因此其它参数的等值线图要利用该矿层厚度边界线进行白化处理。白化,即选定某一图形后,以白化文件为边界去除该图形内部或外部数据的过程。白化文件是以ASCII文件格式存储的用来描述白化边界及白化信息的文件,其包含2列数据,第一行分别为范围节点个数和赋值,下面行则为节点坐标。赋值为0或1,

若为1则白化指定区域内部,若为0则白化指定区域外部。

四期设计共绘制了13个主矿层的等值线图,包括矿层底板等高线图、等厚线图和碳酸钠等值线图等,这些等值线图直观准确的显示了矿层各种信息,为矿区整体研究、规划、设计起到了指导作用。

## 5 井组布井设计

在井组布井设计之前,将每一矿层各等值线图通过绘图软件图层叠加到一起,以方便设计。

### 5.1 布井设计要求

井组布井时要考虑矿层指标来判断水溶采矿是否合理。如指标不符合要求,可能会出现卤水总碱度不足、溶腔通道堵塞等故障,最终造成采矿效率低下的结果。

#### 5.1.1 总碱度指标 $TA$

$TA$ 指标直接关系到采出的卤水是否能够达到设计规范的基本要求。四期设计对 $TA$ 指标的基本要求是溶腔通道区域的 $TA$ 值不小于25%。

#### 5.1.2 矿层厚度指标 $THK$

过小的 $THK$ 值不仅对定向钻进轨迹提出过于苛刻的要求,同时,易引起通道堵塞事故。四期设计对 $THK$ 指标的基本要求是首采层 $THK$ 值不小于1.2 m、非首采层 $THK$ 值不小于1.0 m。

#### 5.1.3 纯碱厚度指标 $SOTH$

由于考虑了不溶物等因素, $SOTH$ 指标比矿层厚度更能反映矿层通道质量的优劣性。四期设计对 $SOTH$ 指标的基本要求是所有溶腔通道位置的 $SOTH$ 值均不小于0.4 m。

#### 5.1.4 可采性指标 $LI$

水溶性开采在完成首采矿层开采后,应尽量设法让顶部的夹层坍塌,继续溶解上部的矿层。由于不同岩性具有不同的膨胀系统,其底部的溶腔高度也各不相同,因此,夹层的坍塌有时并不具备条件。可采性指标 $LI$ 就是用于描述非首采矿层的溶采可行性的一项技术指标。

贝帕扎里天然碱矿下矿段与上矿段之间有20~25 m的一套粘土岩、层凝灰岩、油页岩的隔层。L矿段 $LI$ 分布图显示绝大多数矿区区域的 $LI$ 指数大于1,这表明位于L段和U段中间的大夹层的塌陷的可能性几乎为0。因此设计上必须分两套井系分别以L矿段和U矿段作目的层。总体而言,L段矿层的 $LI$ 指数大于U段矿层的 $LI$ 指数,它表明U段矿层具有更优越的开采可行性,而与此同时,L段矿

层发生溶腔堵塞的可能性较大。四期设计对  $LI$  指数的基本要求是所有溶腔通道位置的  $LI$  值均不得大于 0.90。

将上述指标符合要求的区域在等值线图中圈定出来,通过图层叠加可以找出都符合要求的区域,再考虑地表的建筑物、道路、管线和农田等障碍物,最终可以确定符合要求的布井区域。

## 5.2 布井设计原则

- (1) 充分合理利用资源,提高矿山回采率;
- (2) 基建工作量小,利于矿山的总体规划;
- (3) 充分考虑所采用的采矿方法、钻井技术水平;

(4) 根据钻井水溶法的开采特点,自下而上逐层开采;

- (5) 保留未开发地带的原始性,便于后期开发。

## 5.3 布井设计参数

布井参数主要是指井距、组距和首选目标矿层等。四期布井仍然处于三期井组的区域附近,继承三期井组的基本参数,利用已有井组的走向、组距、排距等,从而可以避免井组提前串通和重新布置采卤管线、供水、供电线路等问题。

### 5.3.1 井距

井距参数是根据水平段长度和钻井施工技术条件确定的。根据水平井施工技术要求,造斜半径选为 160~200 m。考虑到卤水浓度、采矿成本等方面的因素,设计首采矿层开采水平段长度为 200~250 m,水平井和靶点垂直井的井距确定为 360~450 m。

### 5.3.2 组距

组距为开采过程中各井组两端的溶解距离与矿柱宽度之和。一般溶腔向两端的发展距离为极限跨度的 80%~100%,设计为 70 m。

### 5.3.3 首选目标矿层

按照自下向上矿层布井原则,首先应在 L 矿段内布置,由于根据业主要求和布井原则选定在三期东南区域布井,而 L 矿段在此区域不能满足矿层指标的要求。L 矿段与 U 矿段之间的大夹层的塌陷可能性几乎为 0,因此,四期选取在 U 矿段布井。U 段矿层中,U6 处于最底层,各参数和指数分析适合于布井要求,当不满足时则选取上部 U5 矿层。因此,我们选定将 U6 和 U5 作为首采目标矿层。

四期设计最终布井情况如表 1 所示。

## 6 井组剖面设计

井组剖面图能够直观的反映井组之间的矿层起

表 1 四期布井情况统计

| 首选目标矿层 | 水平井井数 | 垂直井井数 |
|--------|-------|-------|
| U6     | 1     | 2     |
| U5     | 10    | 15    |

伏变化特征,更能准确设计钻井轨迹、确保对接井顺利地穿越矿层与中靶。

井组剖面图绘制是先将布井完成后的井组坐标查找并录入数据表中,把一个井组制作成一个白化文件,对各矿层相关参数的数据库进行切片处理,其切片结果录入到数据表中,通过对数据处理绘制出该井组的剖面图。井组剖面图如图 3 所示。

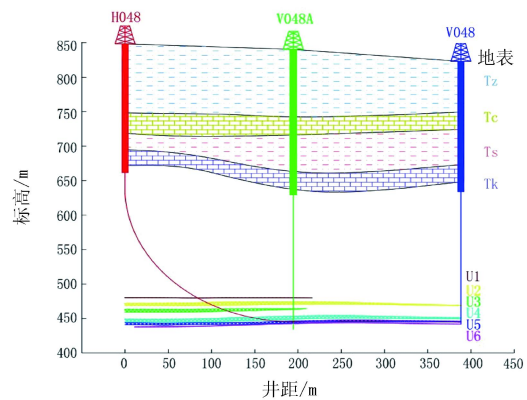


图 3 井组剖面图

## 7 井身结构设计

本文主要介绍水平井井身结构设计的基本原则。

(1)  $\varnothing 244.5$  mm 表层套管下入深度为含水层 TK 底板以下 10 m;

(2)  $\varnothing 311$  mm 一开钻进深度为含水层 TK 底板以下 12 m;

(3) 造斜点位于表套底部以下 6~10 m(条件许可尽量选大值);曲率半径 160~200 m,在深度许可的前提下,尽量靠近 200 m;

(4) 进入矿层顶板时顶角为  $86^\circ \sim 87^\circ$ ,以便于在矿层中行走 10~20 m 后接近矿层底板;

(5) 进入第一靶点时,顶角控制在  $89^\circ \sim 91^\circ$ ,以利于水平井钻进;

(6)  $\varnothing 139.7$  mm 生产套管下入深度为首采矿层顶板以下 6 m(MD);

(7)  $\varnothing 88.9$  mm 油管下入深度为生产套管以下 3 m(MD);

(8)  $\varnothing 200$  mm 水平钻进第一靶点位于首采矿层底板以上 50 cm(TVD);

(9)设计终止深度/第二靶点位于垂直井井底首采矿层底板以上 50 cm。

井身结构图的绘制方法同样也是制作白化文件,对矿层数据库进行切片处理后再绘制图件。更为便捷的方法是直接在相应的井组剖面图中查找相关数据来绘制图件。

## 8 钻井轨迹设计

工程技术人员在水平井施工之前必须进行钻井轨迹设计,通过相关矿层数据、施工要求及相关图件设计出水平井的井深、顶角和方位。将井口坐标、井深、顶角和方位经过计算转换为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标,通过三维绘图软件可以绘制出立体的钻井轨迹,让工程技术人员更能清晰的分析和优化轨迹设计。井组三维轨迹图如图 4 所示。

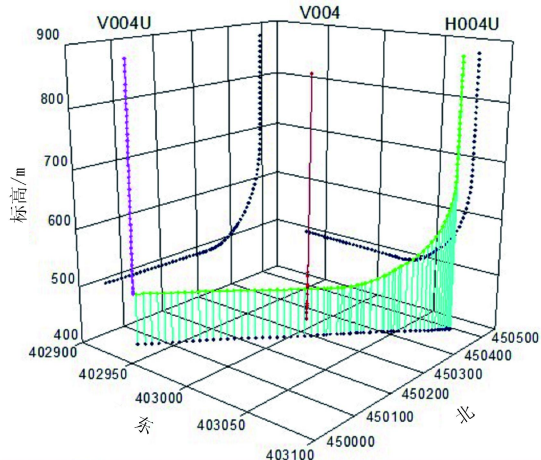


图 4 典型的水平对接井组轨迹图

## 9 相关数据统计

通过三维地质模型和设计井组的相关信息可以快速准确地统计出所需相关数据。

(1)矿区储量统计方法是将矿层厚度、密度、总碱度等值线图在零边界以内矿的区划分为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  方格,取每一方格点厚度值  $THK$ 、面积值  $S$ 、密度  $G$  和总碱度值  $TA$  的乘积,最后累加积分,得出某一矿层的储量值。

$$W = \sum_{\text{layer}} \left( \sum_{\text{grid}} (THK_{\text{grid}} S_{\text{grid}} G_{\text{grid}} TA_{\text{grid}}) \right)$$

式中:  $W$ ——矿石质量,  $t$ ;  $THK$ ——矿层厚度,  $m$ ;  $S$ ——矿层面积,  $m^2$ ;  $G$ ——矿石密度,  $t/m^3$ ;  $TA$ ——矿石总碱度, %。

(2)可根据矿层数据库统计出每一个主矿层厚度、重度、总碱度等的最大值、最小值、平均值及分布面积等。

(3)可结合矿层数据库统计出钻井的井号、井组号、 $X$ 、 $Y$  坐标、地表高程和首采矿层等。

(4)钻井进尺统计通过井组剖面图和井身结构图统计出垂直井一开、二开、取心钻进工作量,水平井一开、造斜、水平钻进工作量。

(5)通过相关资料还可以统计出如井组可采储量、井组采出矿量、服务年限、钻井套用量和固井水泥用量等信息。

## 10 结语

(1)三维地质建模作为一种处理地质对象的新技术,与传统方法相比,具有很强的优越性,符合现代工程设计、施工和管理的需要。

(2)在三维地质建模之前,要对资料进行收集、筛选、分析,资料的准确性对建模的效果起着至关重要的作用。

(3)三维地质建模对预测含水层、矿层深度,计算矿区储量、采出矿量和回采率等参数有着重要的作用。

(4)结合三维地质模型,使井组布井设计、井组剖面设计、井身结构设计、钻井轨迹设计等更加快捷、方便与合理。

## 参考文献:

- [1] 刘海翔,刘汪威,陈剑壺,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.
- [2] 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.
- [3] 林修阔,陈剑壺,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.
- [4] 向军文,胡汉月,等.土耳其天然碱30对对接井钻井工程[J].中国井矿盐,2007,38(5):25-28.
- [5] 陈欢欢,李星,等.Surfer8.0等值线绘制中的十二种插值方法[J].工程地球物理学报,2007,4(1):52-57.
- [6] 王环玲,徐卫亚.三维地质建模技术在岩土工程数值模拟中的应用[J].长江科学院院报,2008,(5).
- [7] 李舒,李伟波,等.三维地质建模的应用研究[J].科学技术与工程,2008,(24).