

# 穿越黄土陡坡管道斜井支护方式

孙毅力\* 王芝银

曾志华 马兰平

(中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室) (中国石油天然气管道工程有限公司)

孙毅力 王芝银等:穿越黄土陡坡管道斜井支护方式,油气储运,2009,28(4) 67~70。

**摘 要** 以陕西某地黄土边坡斜井穿越工程为例,利用数值模拟分析方法对斜井开挖支护过程进行了仿真模拟计算。通过对五种可能的开挖支护方式所引起的整个斜井洞周的受力变形特征、塑性区分布规律的对比分析,设计了该斜井合理的支护方式。研究表明,斜井的中间部位受力变形较大,支护过程中应重点关注。

**主题词** 油气管道 施工 黄土陡坡 斜井穿越 支护方式 设计

在长输管道施工中,地形、地质条件往往是制约工程的主要因素。在坡度较大的黄土边坡和冲沟等地段,若按照传统的“大开挖”方法施工,不仅会产生占地面积多、土方工程量大、施工进度缓慢、地貌恢复困难、水土流失等问题,而且会对管道安全运行造成严重威胁。在陕京二线输气管道建设中,利用斜井掘进工艺成功地解决了在地势陡峭的黄土梁上进行管道施工的难题。为控制斜井周围的土体产生过大变形及土体塌落,在斜井开挖过程中采用了组合支架的支护方式。虽然该施工方式类似于一般的隧道施工,但通过采用缩小支架间距来提高斜井施工的安全度,会相应增加工程造价,延长施工工期。因此,有必要研究合理的斜井支护方案。

## 一、斜井穿越工程的分析模型

基于陕西某地黄土边坡斜井穿越工程,依据该工程的勘探资料和黄土边坡稳定性分析结果,建立斜井穿越工程的分析模型。

### 1、穿越工程的力学模型

相关勘探资料显示,该工程的穿越边坡坡高为 40 m,坡角为 40°,边坡从数米至几十米范围内的黄土呈浅灰黄色、灰黄色,粒度均匀,结构较疏松,无层理构造,垂直节理发育,以马兰黄土(Q<sub>3</sub>)为主。通过地质勘探取样在室内进行黄土物理力学试验,得到土性参数及邓肯-张非线性本构模型参数,见表 1 和表 2。

表 1 马兰黄土边坡弹塑性力学参数

切线模量初值 (MPa)	泊松比初值	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
5.5	0.35	60	29	1 572

表 2 马兰黄土非线性弹性模型参数取值

G	F	D	K	n	C	φ	R <sub>f</sub>	K <sub>wr</sub>
0.154	0.097	4.66	47.68	0.56	60	29	0.49	119.2

根据邓肯-张非线性模型,土体切线模量  $E_t$  与泊松比  $\nu_t$  随应力水平变化<sup>[1,2]</sup>:

$$E_t = \left[ 1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

$$\nu_t = \frac{G - F \log(\sigma_3 / P_a)}{(1 - D \epsilon_1)^2} \quad (2)$$

式中  $E_t$  ——黄土的切线模量;

$R_f$  ——破坏比;

$C$  ——黄土的粘聚力;

$\varphi$  ——黄土的内摩擦角;

$\sigma_1$  ——最大主应力;

$\sigma_3$  ——最小主应力;

$P_a$  ——大气压, Pa;

$\nu_t$  ——黄土的切线泊松比;

$G, F, D, K, n$  ——邓肯-张非线性模型的试验常数;

$\epsilon_1$  ——轴向应变。

卸荷(开挖)及重复加载时切线模量为:

$$E_{wr} = K_{wr} P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

$$K_{wr} = 2.5K$$

式中  $E_w$ ——卸荷及重复加荷时弹性模量。

在整个斜井开挖支护过程中,塑性模型采用摩尔-库仑屈服准则,支护(支架)按弹性材料处理。

### 2、数值计算模型

根据实际地形图所建立的简化计算模型见图 1,其中标注了斜井断面形状、尺寸及斜井位置。斜井位置是在确定边坡潜在最危险滑动面(根据简化 Bishop 条分法<sup>[3]</sup>确定)后设计,斜井位于稳定滑床区,与水平面形成的倾角为 25°。斜井从坡顶向下掘进,斜井开挖总长度(L)为 96 m,每次开挖不超过 2 m。在洞口位置沿斜井长度方向约 6 m 开挖作业坑,以便运出弃土及进行管道的敷设和回填。

为减少边界效应对数值模拟计算的影响,取坡肩距离左侧边界为 100 m,坡脚距离右侧边界为 60 m,计算模型总高度为 80 m,总宽度为 60 m。模型底面边界为固定约束,四周边界施加法向约束。

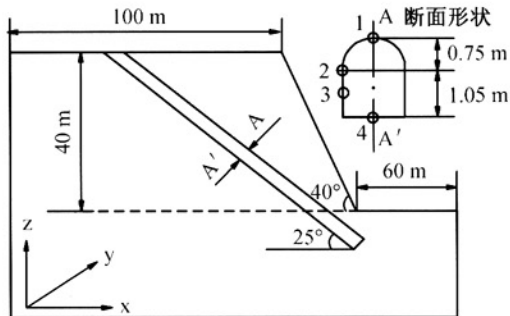


图 1 黄土斜井穿越模型

## 二、斜井支护方式

斜井支护能够有效防止在开挖施工、管道敷设及斜井回填整个过程中发生斜井坍塌,保证施工人员安全。因此,确定合理的临时支护方案是确保安全施工的必然要求。为了加快施工进度,临时支护可以采用安全支架形式,安全支架由外径为 50 mm、壁厚为 3.5 mm 的钢管煨制成 5 个架子。架子间距为 0.25 m,支架长度为 1 m,通过焊接连成一体,并在表层覆盖一张钢板,钢板厚度为 2 mm。将钢管与钢板视为同种钢(弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3),支架的形状、尺寸与斜井断面相同(洞高 1.8 m,洞宽 1.5 m)。随着斜井的掘进,安全支架随之跟进,并按一定的间距放置<sup>[4]</sup>。

## 三、斜井穿越支护方案分析

利用数值模拟方法对斜井不支护情况以及根据

施工进尺设计的五种支护方案进行分析。五种支护方案支架放置的间距分别为 0、1、2、3、4 m。

### 1、位移分析

在斜井开挖支护过程中,对每种支护方案沿斜井纵向设置 16 个断面(断面间距为 6 m),每个断面取 4 个关键点(见图 1)进行位移分析。

由于斜井开挖的特殊性,关键点 1 和 4 在  $xz$  平面内进行合位移分析,关键点 2 和 3 主要考虑是  $y$  方向的位移。图 2 为五种支护方案的拱顶下沉位移曲线。该曲线变化趋势相似,下沉的最大位移均出现在斜井的中间部位,方案 1 支架能够很好地控制拱顶下沉,斜井最大位移仅为 6.6 mm;方案 2 与方案 3 斜井的最大位移约为 20 mm;方案 4 与方案 5 拱顶下沉位移曲线几乎重合,最大位移约达到 30 mm。图 3 为五种支护方案底板上鼓的位移曲线,斜井穿越支护支架为无仰拱结构,有利于对斜井的拱部和边墙部位进行支护,不受临时支护的影响。

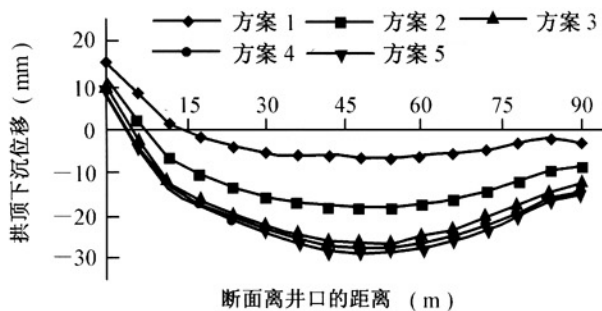


图 2 拱顶下沉位移曲线

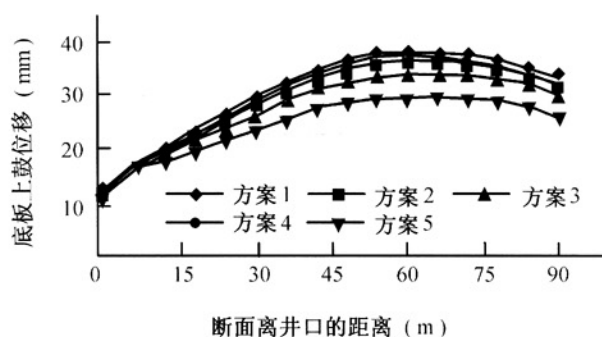


图 3 底板上鼓位移曲线

图 4 为边墙 2 关键点位移曲线,边墙 2 点随断面与洞口距离的增加,位移长度也呈单调增加趋势。方案 1 边墙 2 点的最大位移仅为 7.29 mm,方案 2 最大位移为 16.8 mm,其余三种方案最大位移相差不多,均为 23 mm 左右。

根据上述分析,方案 1(全封闭支护)支架很好地控制了拱顶下沉与边墙内移,是最安全的支护方案,但不是最合理的支护方案。方案 4 与方案 5 对

拱顶下沉与边墙位移所起作用几乎一样,并且与不支护方案所产生的位移十分相近,控制斜井变形的效果不明显。

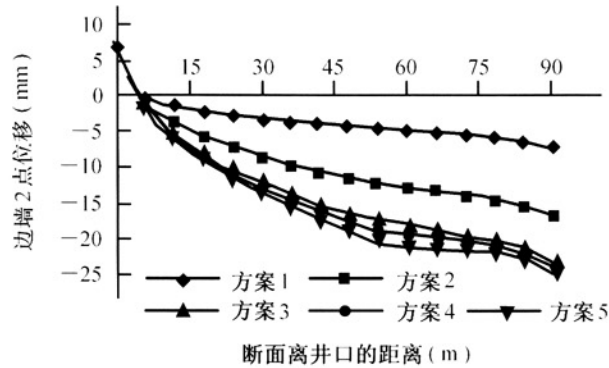


图 4 边墙 2 点位移曲线

### 2、塑性区分析

根据数值模拟分析结果,统计斜井开挖支护过程中井周塑性区的分布,通过程序计算井周破坏区的体积,以判断每种支护方案的优劣,井周塑性区体积曲线见图 5。

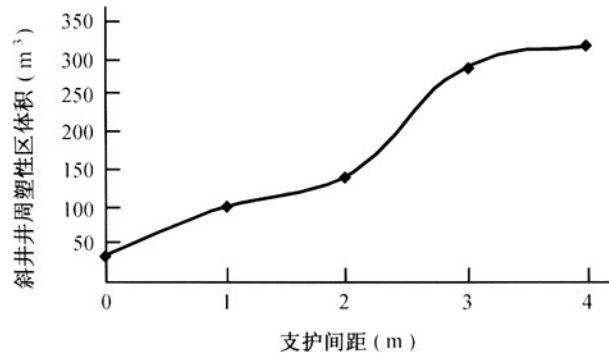


图 5 井周塑性区体积曲线

图 6 为不加支护斜井的井周塑性区分布,图 7 为支架间距 4 m 的井周塑性区分布。从图中可以看出,两种方案的井周塑性区体积相差很大,不加支护方案破坏区域主要集中在井口至斜井长度的 3/4 位置;支架间距为 4 m 的方案井周破坏区域沿斜井零星分布,但主要集中在斜井中间部位。方案 4 支架虽然对拱顶下沉与边墙位移所起作用不大,但能够控制塑性区范围。

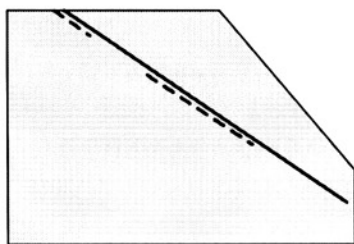


图 6 不加支护斜井井周塑性区分布

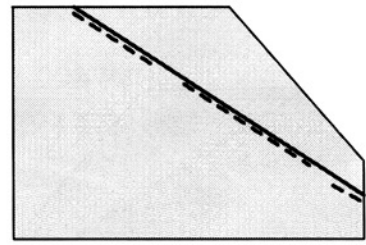


图 7 支架间距为 4 m 的井周塑性区分布

## 四、斜井穿越合理支护方案的确定

### 1、设计要点

(1)受风化作用的影响,为了防止松软土体在开挖、支护及回填过程中塌陷,应在距斜井井口 4 m 范围内采取全封闭支护。

(2)在距井口 4 m 至斜井 1/4 L 范围内,拱顶下沉、边墙内移值以及塑性区范围不大,将支护间距设为 4 m 即可满足施工安全要求。

(3)在斜井(1/4~3/4)L 范围内,斜井处于受力变形大的区域,拱顶下沉、底板上鼓位移值以及塑性区范围都较大,是施工过程中重点考虑支护的部位。

(4)在斜井(1/4~3/4)L 范围内,斜井的位移变化呈减小趋势,该部位即使不支护也几乎不出现塑性区,但适当支护可以控制边墙内移值(见图 7)。

### 2、斜井穿越合理支护方案

在距斜井井口 4 m 范围内实施全封闭支护,在距井口 4~24 m 范围内支架放置间距为 4 m,斜井距井口 24~72 m 范围内支架间距为 2 m,其余部分支架间距取 4 m。按照这种支护方案进行数值模拟分析,得到的关键点位移和塑性区见图 8 和图 9。

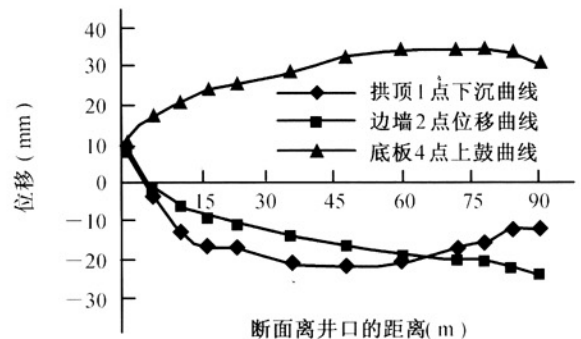


图 8 关键点位移曲线

合理支护下斜井长度方向上拱顶下沉、底板上鼓位移变化比较平缓,斜井拱顶下沉最大位移约为 22 mm,边墙关键点 2 最大位移出现在斜井底部约为 23 mm;塑性区分布范围比较理想,总体积约为

124 m<sup>3</sup>。由此可见,这是该斜井开挖施工比较合理的支护方案。

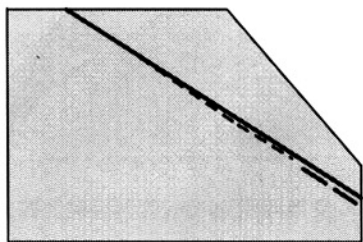


图9 合理支护方案塑性区分布

### 五、结束语

(1)黄土陡坡斜井穿越开挖支护方案,是针对特定工程的土性参数、边坡角度、管道角度等进行研究的,对于不同的黄土地区、不同的斜井,开挖支护方案会有相应的变化。对于某些土性较差的边坡斜井开挖施工进尺应低于 2 m。

(2)对于黄土陡坡斜井开挖支护方案,不能仅仅笼统地确定支护深度,而应针对斜井的具体位置,采用相应的支护方式。斜井受力变形大的部位应加密

支架。

(3)合理的支护方案既能确保施工的安全,又能加快施工进度,减小支护成本,取得良好的经济效益和社会效益。斜井井口和斜井与水平巷道的交叉部位是斜井开挖的特殊位置,应在施工支护过程中重点关注,以全封闭支护为佳;在斜井的(1/4~3/4)L范围内,井周受力变形比较大,十分容易塌陷,支架的放置间距不能超过一个施工步。当斜井周围土性较差时,应使用带仰拱的支架以控制底板上鼓位移,其余部位支护间距以不超过两个施工步为宜。

### 参 考 文 献

- 1, 郑颖人 沈珠江等著:岩土塑性力学原理,中国建筑工业出版社(北京),2002。
- 2, Zhen Yinren, Sheng Zhujiang et al: Principle of Plastic Mechanics for Rock and Soil, China Building Industry Press, 2002.
- 3, 张学言 闫澍旺(编著):岩土塑性力学基础(第2版),天津大学出版社,2006。
- 4, Zhang Xue-yan, Yan Shu-wang: Fundamentals of Geotechnics Plasticity, Tianjing University Press, 2006.

(收稿日期:2008-04-11)

(上接第 44 页)

酶的活性控制、半导体纳米材料的开发以及微束半导体胶质等高级材料的制备等<sup>[14]</sup>。

水合物法储运天然气是一种高效、经济、安全的储运方式,它在小型、分散、边缘油田伴生气的开采、运输方面具有很大的优越性。但是,至今世界上还没有一个国家实现 NGH 储运技术的工业化,更没有形成成套技术。地球上以水合物形式赋存的天然气资源量是其余所有烃类资源量总和的两倍,我国的天然气水合物储量也很丰富。加强水合物储运技术的研究不但可以为天然气水合物的勘探开发提供理论基础,而且可以促进天然气的开采和应用,进而逐步改善我国能源结构的不合理性。

### 参 考 文 献

- 1, 张文亮 贺艳梅等:天然气水合物研究历程及发展趋势,断块油气田,2005,12(2)。
- 2, 胡仲敏 王海华等:天然气储运新技术-水合物法储运,油气田地面工程,2001,20(3)。
- 3, Gudmundsson J S, Parlaktuna M et al: Storing natural gas as frozen hydrate, SPE: Production and Facilities, New Orleans, 1994.
- 4, Dale Berner: The marine transport of natural gas in hydrate form, Proceedings of the Second International Offshore and

Polar Engineering Conference(San Francisco),1992.

- 5, Zhong Y, Rogers R E: Surfactant effects on gas hydrate formation, Chem Eng Sci, 2000, 55.
- 6, Kashchiev D, Firoozabadi A: Induction time incrystallization of gas hydrates, J. Crystal Growth, 2003, 250.
- 7, Gudmundsson J S, Parlaktuna M: Gas in ice: concept evaluation, Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, 1991, 56.
- 8, Gudmundsson J S, Parlaktuna M: Storage of natural gas hydrate at refrigerated conditions, AIChE Spring Natural Meeting, New Orleans, 1992.
- 9, 宋 磊 钱 旭等:天然气水合物的储存和运输可行性研究,油气储运,2005,24(3)。
- 10, Natural gas hydrate as new technology company based on NTNU research and Aker engineering development, Press Release, 1999, 7.
- 11, 廖 健 梅东海等:天然气水合物相平衡研究的进展,天然气工业,1998,18(3)。
- 12, 裘俊红 贺 亚:水合物研究与应用现状,河南化工,2005,22(4)。
- 13, 王利生 王志东:近临界流体储存车用天然气,石油与天然气化工,1996,25(1)。
- 14, 李 化 罗小武等:天然气水合物储运技术综述,天然气与石油,2006,24(3)。

(收稿日期:2008-04-18)