

# 输油管道梁式直跨段弯管处应力的数值计算

刘海川<sup>1</sup> 张晓东<sup>2</sup> 高红茜<sup>3</sup> 刘超阳<sup>4</sup> 韦克熠<sup>5</sup>

**摘要：**在长输埋地管道施工过程中，由于地形复杂多变，弯管被广泛应用于管路系统，但是在特殊的环境条件下，弯管往往是管路系统中应力集中的部位，在一定的条件下会引起塑性变形，给管道的安全运行带来隐患。应用有限元分析软件，对埋地输油管道的特殊点处（弯管）的应力进行了数值计算与分析。结果表明：跨越段弯管的安装角度应为 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，在此角度范围时，既可以满足管线所需的应力要求，也能够缩小架空段的应力变化；随着河道土体长度增加，土体沉降作用的影响范围变大；当弯管角度一定，曲率半径增加时，管段所承受的应力范围会变大，但弯管处所承受的应力会相应减小。

**关键词：**长输管道；跨越段；弯管；断层；数值计算

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.4.007

## Numerical Calculation of the Stress of Bending in the Beam-Mounted Straight Crossing Pipeline

Liu Haichuan, Zhang Xiaodong, Gao Hongqian, Liu Chaoyang, Wei Keyi

**Abstract:** Because of the complex terrain in the construction of long-distance buried pipeline, the bends are widely used in pipeline systems. Due to special conditions of environment, bends in the piping system are often the section of concentration of stress. In certain conditions, plastic deformation occurs at the bending, which poses a potential threat to the safe operation of pipelines. Through the application of software of finite element analysis, stress at a particular point (bending) of buried pipeline were numerically calculated and analyzed. Conclude that the installation of the cross section of the pipe bending angle should be  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ , and the angle range, can satisfy the stress required to pipeline, can also reduce overhead section stress changes. With the increase of channel length of soil, the influence range of soil subsidence become larger. When bend angle defined, curvature radius increases, the section under stress range get larger, but the pipe bending under stress will be reduced accordingly.

**Key words:** long transmission pipelines; crossing section; bending; fault; numerical calculation

输油管道中的长输管道有的达到数百千米，在延伸过程中途经许多天然的屏障，例如湖泊、河流、森林等。长输管道施工过程中碰到此类的障碍，就会常常用到弯道。当管道穿越河流、湖泊等地段时，由于此类障碍造成的土地沉降会对该处的长输管道有很大影响，特别是在弯道地段，因为引力作用明显，所受影响最大。在一些特殊情况下，弯道处往往会发生塑性变形，引起管道破裂，会影

响管道的正常运行。所以，针对长输管道弯道部位的应力问题需要投入大量的研究，以防止发生事故<sup>[1-3]</sup>。本文运用有限元分析法，选择ANSYS软件，对埋地长输管道跨越段进行三维数值模拟，研究了长输管道弯管在径向载荷下的应力变化。

## 1 模型的建立

### 1.1 物理模型

水域跨越方式有多种方式，在这些跨越方式中

<sup>1</sup>青海油田公司采油二厂昆北第一采油作业区 <sup>2</sup>吐哈油田吐鲁番采油厂葡北采油工区

<sup>3</sup>青海油田公司采油三厂 <sup>4</sup>青海油田公司格尔木炼油厂 <sup>5</sup>青海油田公司采油二厂工程技术大队

梁式管道直跨以其结构简单、便于施工而得到了广泛的应用。本文的研究对象就是梁式管道直跨, 建立的计算区域物理模型如图1所示。为使计算模型尽量简化, 选择图1所示的W区域作为模拟区域, 并且把该区域的介质定位为饱和含水黏土。根据工程设计参数<sup>[1]</sup>, 模拟管径840 mm, 壁厚20 mm, 距管中心埋深3 m; 内压7 MPa, 输送油温40 ℃, 初始地温3 ℃, 地表平均风速5 m/s, 土壤密度1 960 kg/m<sup>3</sup>。假设土体为弹性体, 弹性模量为15 MPa, 泊松比为0.3, 热膨胀系数为1.0 × 10<sup>-5</sup>。

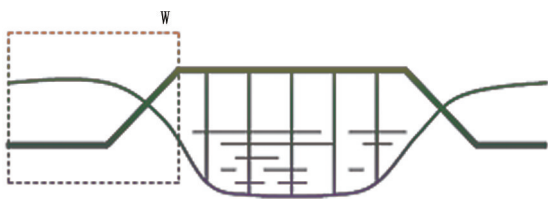


图1 梁式管道直跨计算区域物理模型

### 1.2 应力模型

在设计之初, 为了使模型尽量简化, 考虑的应力有两种: ①来自管道上面土体引起的径向压力; ②来自管道内部的轴向力, 该力是由管道内环向应力产生的。

#### 1.2.1 径向应力

本文只考虑输油管道在土体正上方的情况, 所以只研究径向土应力。研究区域的应力计算模型如图2所示。图中,  $H$  为水平管道埋地深度, 3 m;  $L_1$  为模拟区域水平管段长度, 5 m;  $L_2$  为模拟区域斜管段长度, 5 m; 1、2、3 分别代表三种敷设情况。因为选择研究对象具有特别的形状, 所以需要把研究对象分成两部分, 即直管段和斜管段。

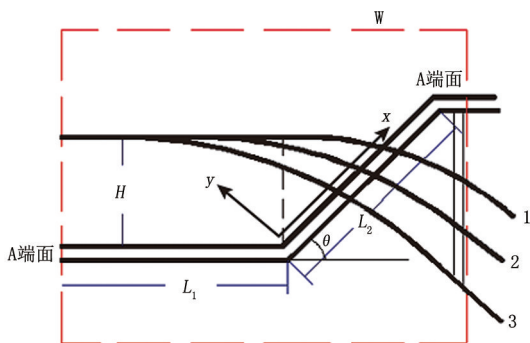


图2 计算模拟区域应力模型

在直管段中, 回填土与原状土之间的摩擦力  $\tau$  表达式为

$$\tau = \mu p_p - c = \mu k_p p_z - c \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为回填土和沟壁的摩擦系数, 等于或小于回填土的内摩擦系数,  $\mu = \tan \varphi$ ,  $\varphi$  为土壤内摩

擦角, ( $^\circ$ );  $k_p$  为被动侧向单位面积土压力  $p_p$  与垂直单位面积土压力  $p_z$  之比;  $c$  为回填土黏聚力, kPa。

在管道上任意位置构建平衡方程, 通过公式可以得到该点的径向土压力, 进而可以得到输油管道单位长度受的最大径向土载荷。图3所示为管道上的垂直土压力整体分布情况, 可以利用式(2)、(3)、(4)来计算垂向土载荷和对应参数。图3中,  $B$  为管顶处的管沟宽度, m。

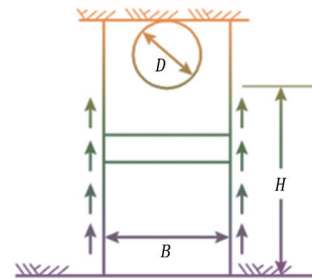


图3 管道上的垂直土压力整体分布情况

$$W_v = C_d(\gamma_{so} B + 2c)B \quad (2)$$

$$C_d = \frac{\exp\left[2k\mu\left(\frac{H}{B}\right)\right] - 1}{2k\mu} \quad (3)$$

$$k = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

式中:  $W_v$  为单位管长上的垂直土载荷, kN/m;  $\gamma_{so}$  为回填土的容重, kN/m<sup>3</sup>, 取15~22 kN/m<sup>3</sup>;  $C_d$  为载荷系数;  $k$  为土体摩擦角系数。

对于斜管段, 情况比直管段要复杂得多, 针对径向载荷要进行深入分析研究。弯管的角度和在斜管段处的土壤覆盖长度决定了作用在斜管段的载荷大小。通过图2可以发现, 有不同的土体长度作用在斜管段, 设土壤在斜管段的覆盖长度为  $X$ , 弯管角度  $\theta$ 。

假设式(3)中  $H$  的取值近似地等于  $X$ , 则斜管道上方的土体载荷系数  $C'_d$  为

$$C'_d = \frac{\exp\left(2k\mu\frac{X}{B}\right) - 1}{2\mu} \quad (5)$$

分析作用在斜管段的土体, 分解其作用在管道上的载荷, 就可以求得斜管段垂向载荷  $W'_v$ 。

$$W'_v = C'_d(\gamma_{so} B + 2c)B \cos \theta \quad (6)$$

沿  $X$  轴负向平行作用在斜管段上由土壤产生的摩擦力载荷  $W''_v$  为

$$W''_v = C'_d(\gamma_{so} B + 2c)B \sin \theta \quad (7)$$

#### 1.2.2 轴向应力

管道不但受到环向应力(因设计内压产生),

还会受到环向弯矩应力，这个弯矩应力是由管道自身质量、土壤作用在管道的载荷以及因为液重的非对称性共同产生的。埋地管道内的最大环向应力及相关参数解析式为

$$\sigma_h = \sigma_p + \sigma_v \quad (8)$$

$$\sigma_p = \frac{pd}{2t} \quad (9)$$

$$\sigma_v = \frac{3k_v(W_v + q_{vk}D)Ed\tau}{Et^3 + 3k_vpd^3} \quad (10)$$

式中： $p$  为管道内设计压力，Pa； $\sigma_h$  为埋地钢管内的最大环向应力，Pa； $\sigma_p$  为内压产生的环向应力，Pa； $\sigma_v$  为土体质量产生的垂直压力，Pa； $E$  为管材的弹性模量，Pa； $D$  为管道的外径，m；

$q_{vk}$  为管道的体积系数； $d$  为钢管的截面直径，m； $t$  为钢管的有效厚度，m； $k_v$  为管道的弯矩系数； $k_b$  为管道的垂直变形系数，也称基床系数或基座系数。

管道在各种载荷下的最大弯矩系数和竖向变形系数见表1，标准铺管条件的设计参数见表2。

表1 管道在各种载荷下的最大弯矩系数和竖向变形系数

土弧基础中心角/(°)	弯矩系数	变形系数
20	0.255	0.109
60	0.189	0.103
90	0.127	0.096
120	0.138	0.089
150	0.128	0.085

地下嵌固段直管道在液压的作用下产生环向应

表2 标准铺管条件的设计参数

铺管条件	回填土弹性模量 $E_c$ /MPa	基础包角/(°)	基座系数
管道敷设在未扰动土上，回填土松散	1.0	30	0.108
管道敷设在未扰动土上，回填土松散，管道中线以下的土轻轻压实	2.0	45	0.105
管道敷设在厚度最小为10 cm的松土垫层内，管顶以下回填土轻轻压实	2.8	60	0.103
管道敷设在砂卵石或碎石垫层内，管顶以下回填土夯实，夯实密度为80%	3.5	90	0.096
管道中线以下安装在压实的材料内，管顶以下回填的团粒材料的夯实密度为90%	4.8	150	0.085

力，由该环向应力产生的轴向应力（泊松应力）为

$$\sigma_{xp} = \nu \frac{pd}{2t} \quad (11)$$

式中： $\nu$  为埋地管道的泊松比，本文取0.25。

### 1.3 基本假设条件

- (1) 假设所模拟管道为完全弹性体。
- (2) 假设模拟管道采用同种稳定材料构成，各部分不存在差异，各位置的弹性系数一致。
- (3) 假设模拟管道为理想管道，即管道各处壁厚一致且任意横截面积为标准圆形。

(4) 在实际情况下，A端面因为位于水上方，并且有支架固定，因此假定A端面保持不动，即不发生位移；而对于埋在地下的B端面，因为受到上方土体沉降作用的影响，B端面就会产生弹性变形，如图4所示（其中黑色管道为原来位置管道，红色为发生位移后的管道）。因为沉降作用为垂向

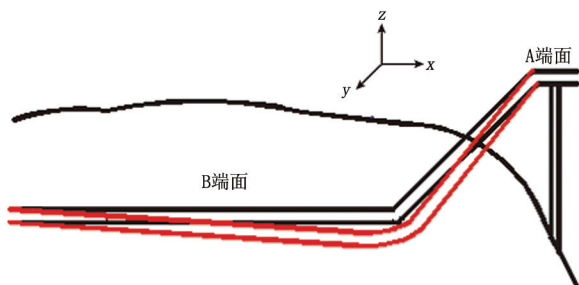


图4 土体沉降条件下管道变形情况

进行，可以近似假设图4所示的坐标轴  $y$  方向上B端面不发生位移，位移发生在  $x$  和  $z$  方向。对模拟研究的管段，土体延  $z$  方向施加径向压力，并且对管道施加轴向应力与热应力<sup>[4-5]</sup>。

## 2 数值模拟及结果分析

### 2.1 角度不同的弯管产生的应力

在建立管道模型时，管道截面应用 plan 42 单元建立，然后对网格进行划分。在建立扫描线的基础上，使用 solid 70 热单元做三维单元扫描，并将 plan 42 单元删除。弯管模型的网格划分如图5所示。

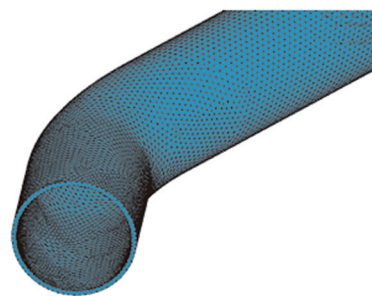


图5 弯管模型的网格划分

弯头处所受应力还受到弯头夹角的影响，为了探寻这些因素对于弯头所受应力的具体影响规律，有必要对不同夹角的弯头所受应力进行计算与分

析。不同角度的弯头在受到同样径向压应力时,所产生的应力变化不同。表3所示的是弯管在角度不同的情况下最大应力的变化。由表3可知,弯管所受最大应力与弯管的角度成正比例关系。当角度变大,埋地管道的水平段就会集中径向力,因此应力会缩小集中的范围,应力会影响到 $30^\circ$ 的弯管两侧直管段的部分范围,而应力对 $90^\circ$ 弯管的影响范围则相对集中,主要集中在弯管部位<sup>[6]</sup>。

表3 不同角度弯管的最大应力

角度/ $^\circ$	架空弯管最大应力/MPa	埋地弯管最大应力/MPa
30	409	364
60	484	431
90	612	545

## 2.2 不同长度土体发生沉降对弯管产生的应力

实验采用角度为 $60^\circ$ 的弯管,水平段管线长度为10 m。从其应力变化情况可以发现,随着管线长度增加,管道所受到的径向载荷也会随之增大,特别是在两处弯管的地方,所受应力增加很多,并且随着管线长度增加,管线所受应力影响的部位也随之增大。综上所述,随着河道土体长度增加,由于沉降作用力臂就会增加,根据杠杆原理,弯管所承受的应力就会增加,土体沉降作用的影响范围变大。

## 2.3 曲率半径不同的弯管产生的应力

实验采用角度为 $90^\circ$ 的弯管,从不同曲率半径的弯管所受应力情况可以发现,当弯管角度为 $90^\circ$ ,曲率半径从 $D$ 变化至 $2.5D$ 时,与之对应的弯管承受的最大径向应力从270 MPa左右降至240 MPa左右。

由此可以得到如下结论,当弯管角度一定时,曲率半径增加,管段所承受的应力范围会变大,但是在弯管处所承受的应力却会相应减小。

## 3 结论及建议

(1) 管道在遭遇河流、湖泊等自然障碍时,会架空一段管道,因此需要支撑固定一端,若遭遇土体沉降,悬空管段所受应力会发生变化,此种情形在较小弯管角度的时候,会显得特别明显。综合实验结果认为,跨越段弯管的安装角度应为 $30^\circ \sim 60^\circ$ ,在此角度范围时,既可以满足管线所需的应力要求,也能够缩小架空段的应力变化。

(2) 随着河道土体长度增加,由于沉降作用产生的力臂增加,根据杠杆原理,弯管所承受的应力就会增加,土体沉降作用的影响范围变大。所以,在管道建设中,当遇到河流、湖泊等自然阻力时,

要尽量选择结实稳定的土体,并采用合适的架空方式,尽可能减小土体沉降的影响。

(3) 当弯管角度一定,曲率半径增加时,管段所承受的应力范围会变大,但是在弯管处所承受的应力会相应减小,也就是说,曲率半径越大,应力越不集中。所以,在其他条件符合施工要求的情况下,选用大曲率的弯管,可以有效地减小应力集中,有利于保护管线。

## 参考文献

- [1] 马贵阳,杜明俊,李丹. 永冻区埋地管道周围土壤水热力耦合数值计算[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(3): 108-114.
- [2] 邓道明,李育光,封晓霞. 无固定墩两端埋地跨越管道自振频率计算[J]. 油气储运, 1999, 18(9): 18-22.
- [3] 毅力琦,丁克勤,钱才福. 基于应变的长输管道变形计算方法研究[J]. 固体力学学报, 2011, 32(专辑): 310-313.
- [4] 崔孝秉. 埋地长输管道水平弯头的升温载荷近似分析[J]. 华东石油学院学报, 1978(2): 54-68.
- [5] 张鑫,黄晓靓. 穿越活动断层埋地管道的应变分析[J]. 管理技术与设备, 2012(6): 10-12.
- [6] 计海力,李宗利,陈江林. 管土相对刚度对沟埋管道竖向土压力影响研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(4): 143-144.

## 作者简介

刘海川:2007年毕业于西安石油大学油气储运专业,研究方向为油田单井集输管线的设计与铺设,15249237410,81841817@qq.com,甘肃省敦煌市七里镇昆北南区2-2-203,736202。

收稿日期 2015-12-17

(栏目编辑 杨军)

## 我国将增加非化石能源消费

我国在可再生能源发电、智能电网、智能用电等方面制定了电力标准400多项,成功研发具有自主知识产权的三代核电技术和具有四代安全特征的高温气冷堆核电技术;风电、光伏发电已形成完整产业链。“十三五”期间,中国将大幅度增加非化石能源消费比重,提高能源领域绿色低碳发展质量和水平。到2020年,我国核电装机力争达到 $5\ 800 \times 10^4$  kW,常规水电装机达到 $3.5 \times 10^8$  kW,风电装机达到 $2 \times 10^8$  kW,光伏装机达到 $1 \times 10^8$  kW。

摘自 中国石油新闻中心网站