沿坡敷设输气管道应力分析

黄　坤　吴世娟　卢泓方　鲜　燕　苏庆伟

西南石油大学石油工程学院，四川　成都　610500

摘要：

长距离的输气管道所经过的区域地形复杂多变，在山区丘陵地带一般采用沿坡敷设的方式，由于高低位差的原因，管道受力不均，且大多沿坡敷设的管道都是根据经验参数设计，很容易发生管道失效。为了在前期设计中研究管道的受力分布，校核其是否符合设计规范和安全要求，使用应力分析软件CAESAR Ⅱ对某沿坡敷设管道进行应力分析，研究安装、试压和运行工况下管道的受力情况，得出沿坡敷设方式的安全性较高的结论。分析结果对沿坡敷设管道的设计和施工提供了相应理论依据，具有工程价值和指导意义。

关键词：

沿坡敷设；管道；应力分析；CAESAR Ⅱ

文献标识码：A

文章编号：1006-5539(2012)04-0001-04

0　前言

川气东送是我国继西气东输工程后又一项天然气远距离管网输送工程。该工程西起四川普光气田首站，东至上海末站，全长 2 170 km，途经 6 省 2 市，地形复杂多变。管道途经坡度较小的山区丘陵地带，高低位差不大，不宜采用施工难度大的隧道穿越方式，一般采用沿坡敷设方式。沿坡敷设可以充分利用地下空间，使地上空间较为简洁，不需支撑措施，施工方便，工期较短[1]。由于沿坡敷设的管道大多根据经验参数设计，使管道转向处或截面的受力超过管材的许用应力，应力集中处易产生失效破坏。因此有必要对沿坡敷设的管道进行应力分析，清晰地定位出各工况下管道各处的应力值，确定应力集中的位置，为管道的设计、施工与运行提供安全依据[2-3]。

1　管道基本应力与校核

载荷是管道产生应力的主要原因，根据应力基本特征，将应力划分为一次应力、二次应力和操作应力。其中一次应力是由外载荷作用而在管道内部产生的正应力或剪应力，特点是无自限性，引起塑性破坏。二次应力是由于管道变形受约束而产生的正应力或剪应力，具有自限性和局部性，引起疲劳破坏。由于载荷、结构形状的局部突变而引起局部应力集中的最高应力值称为操作应力，它是导致脆性断裂和疲劳破坏的原因[4]。

为保证管件的强度安全，危险点处最大工作应力不允许达到（或接近）材料的极限应力。因此，在设计构件强度时，不能以工作应力是否到达极限应力值来判断构件的安全性，而是应在管件极限应力的范围内，规定一个许用应力[σ]作为衡量构件是否满足强

收稿日期：
2012-03-12
基金项目：
四川省重点学科建设项目(SZD0416)
作者简介：
黄　坤(1965-)，男，重庆荣昌人，教授，硕士；西南石油大学设计研究院副院长，从事油气储运、储运地面工程设计工作。

度要求的依据，$[\sigma]=F\cdot\Phi\cdot\sigma_S$，其中 F 值为不同地区强度设计系数，Φ 为焊缝系数。管道由于热胀冷缩、曲率发生突变、端点附加位移或受到约束，会产生相应的轴力、剪力、弯矩和扭矩，一般应力计算后需要进行一次应力、二次应力和操作应力的校核。

管道一次应力不得超过设计温度下管材的许用应力，即

$$\sigma_L\leqslant[\sigma]$$

管道二次应力不得超过许用应力范围，即

$$\sigma_E\leqslant\sigma_a=f(1.25\sigma_c+0.25[\sigma])$$

操作应力即 σ_L 与 σ_E 之和 σ_{OPE} 应满足

$$\sigma_L+\sigma_E\leqslant\sigma_S$$

式中 $[\sigma]$——管材的许用应力，MPa；

σ_L——由压力引起的纵向应力与重力、风荷载等外载荷在管道中产生的纵向弯曲应力之和，MPa；

σ_E——二次应力，MPa；

σ_a——许用应力范围，MPa；

σ_c——管材在 20℃时的许用应力，MPa；

σ_S——管道材料标准中规定的最小屈服强度，MPa；

σ_{OPE}——操作应力，MPa；

f——预期寿命内，考虑循环总次数影响的许用应力范围减少系数。

2 管道模型建立

采用国际通用管道应力分析软件 CAESAR Ⅱ对某沿坡敷设管道进行应力分析，其校核方法依据美国 ASME B31.8 Gas Transportation and Distribution Piping Systems。应力分析软件 CAESAR Ⅱ对管道应力的分类、校核及执行标准都与国内管道设计规范要求类似，不同的是管道校核许用应力采用的是管材许用应力的 90 %。

2.1 管系输入

管系输入是进行静力分析的基础，包括管道参数（管长、管径、壁厚、腐蚀裕量等）、空间走向（DX、DY、CosX、CosY 等）、外界条件（温度、设计压力、流体密度等）、管材参数（管材型号、许用应力、泊松比等）、约束条件（ANC、+Y、LIM 等）。沿坡敷设仅两端采用固定支墩，固定支墩可简化为固支约束（ANC）[5-6]。管系输入从节点 10 开始，输入过程中数值要根据具体情况变化，管道长度与壁厚应根据实际情况确定。

2.2 覆土模型

管系输入完成后，需对管道覆土。包括输入土壤参数（土壤密度、摩擦系数、压实系数等）、选择入土点与出土点。覆土后的管道模型即为近似于实际情况的管道。

2.3 建立载荷工况

斜坡内管道工况应力分析包括操作应力、一次应力计算和二次应力计算工况。

操作应力工况：〔OPE〕$L_1=W+T+P$，载荷、结构形状的局部突变引起的局部应力集中的最高应力值；

一次应力计算工况：〔SUS〕$L_2=W+P$，由内压、自重（管道及管内介质）引起；

二次应力计算工况：〔EXP〕$L_3=L_1-L_2$，由纯热态应力引起[7]。

式中 W——自重载荷，N；

T——温度载荷，N；

P——压力载荷，N。

3 沿坡敷设管道应力分析实例

该斜坡位于忠县兴峰乡大屋基处，见图 1。管道参数和土壤参数分别见表 1、2。

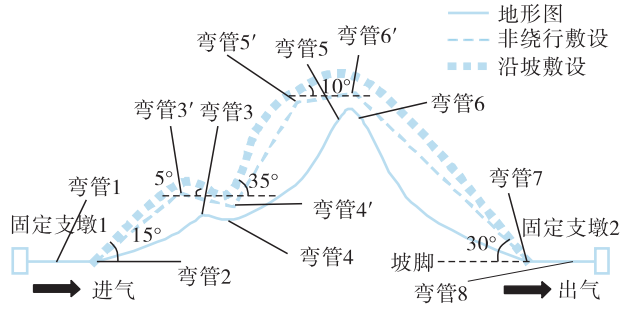

图 1 斜坡及管道走向

注：“非绕行”敷设方式弯管用数字加上标“′”表示，如弯管 3′。

斜坡坡脚高程 320.00 m，坡腰高程 344.40 m，坡顶高程 368.90 m。管道总长度 721 m，在斜坡内采用大开挖方式，研究的管道起点和终点分别设置固定支墩 1、固定支墩 2，用以截断研究对象外管道的影响。西侧进土导向前有 30 m 长的管段，与入土处有 60°的偏离度；西侧平巷长 106.38 m，西侧斜坡总长 219.19 m；东侧出土导向后有 30 m 长的管段，与出土处有 60°的偏离度；东侧平巷长 106.38 m，斜坡管道长 288.76 m。弯管的曲率半径 $R=6D$，D 为管道外径，地区等级为 1 级。

为说明沿坡敷设方式的安全性更高，分析对象为“非绕行”敷设方式（假想的管道敷设方式，即管道从坡脚到山顶之间为折线形），及沿坡敷设方式（管道以一定弧度依山体斜坡敷设，相比“非绕行”敷设会增加管道长度）。

管道按照“非绕行”方式从进土点到出土点总长为 648 m，其中进土导向前和出土导向后各有 30 m 长

表1　管道参数

材料	外径 /mm	直管壁厚 / mm	弯管壁厚 / mm	腐蚀裕量 / mm	介质密度 / (kg·m^{-3})	保温层厚度 /mm	安装温度 / ℃	操作温度 / ℃	操作压力 / kPa	许用应力 / MPa
X70 钢	1 016	17.5	22.2	0.1	95	0	20	50	10 000	485

表2　土壤参数

摩擦系数	土壤密度 / (kg·m^{-3})	到顶管的深埋 /m	摩擦角度 /(°)	压实系数	热膨胀系数
0.6	0.002 65	1.2	0	3	0.015

的管段，与入土和出土处各有 60°的偏离度；东侧平巷长 106.38 m，斜坡管道长 311.45 m，坡度 5°~20°（A′B′段坡度 15°，B′C′段坡度 5°，C′D′段坡度 20°，D′E′段坡度 10°）；西侧平巷长 106.38 m，斜坡管道长 124.26 m，E′F′段坡度 15°；东西侧两端处分别设置固定支墩 1 和固定支墩 2，见图 2。

应力分析软件 CAESAR Ⅱ输出的结果是某节点的应力比率，即节点应力值与管材许用应力（0.9[σ]）的比值。根据一次应力及二次应力校核，一次应力最高节点应力比率为 66.813 9 %，产生在固定支墩 1 处；二次应力最高节点应力比率为 42.391 1 %，产生在弯管 6′处（图 2E′）。一次应力、二次应力校核最高节点应力均未超过 0.9[σ]=0.9×485=436.5 MPa，符合强度要求。图 3 是“非绕行”敷设方式运行工况下沿管长度操作态应力比率（一次应力和二次应力之和，即管道在该点的最大工作应力比率）变化情况。

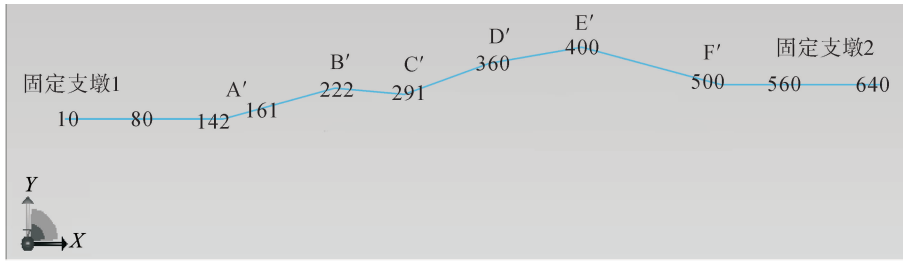

图 2　“非绕行”敷设方式管道模型

注：“非绕行”敷设弯管处用字母加上标“′”表示，如 A′。

由图 3 可知，集中应力主要产生在弯管和端点处，各弯管处的应力比率均超过 80 %，且最大应力产生在弯管 6′处（图 2E′），应力比率为 89.172 9 %。

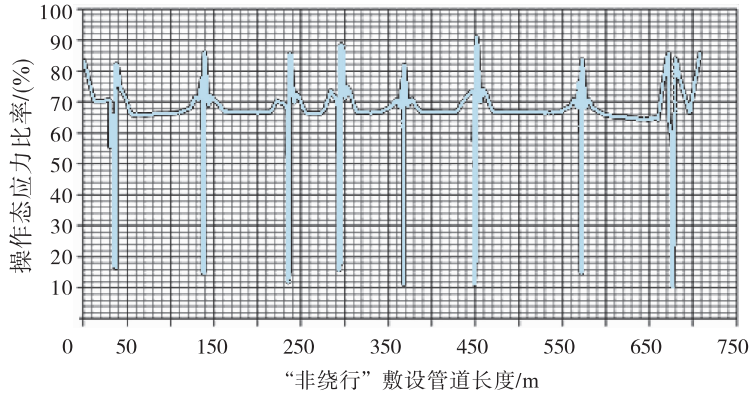

图 3　运行工况下“非绕行”敷设方式操作态应力比率

管道按照沿坡敷设方式从进土点到出土点总长 721 m，其中进土导向前和出土导向后各有 30 m 长的管段，与入土和出土处各有 60°的偏离度；东侧平巷长 106.38 m，斜坡管道长 288.76 m，纵向坡度 5°~15°（AB 段纵向坡度 15°，BC 段纵向坡度 5°，CD 段纵向坡度 15°，DE 段纵向坡度 10°）；西侧平巷长 106.38 m，斜坡管道长 219.19 m，EF 段纵向坡度 15°。东西侧两端处分别设置固定支墩 1 和固定支墩 2，见图 4。

根据一次应力及二次应力校核，一次应力最高节点应力比率为 66.805 3 %，产生在固定支墩 1 处；二次应力最高节点应力比率为 36.560 2 %，产生在弯管 2 处（图 4A），一次应力、二次应力校核最高节点应力均未超过 0.9[σ]= 434 369.700 0，符合强度要求。图 5 是沿坡敷设方式运行工况下沿管长度操作应力比率变化情况（校核的应力允许值为管材许用应力 σ_1 的 0.9 倍）。

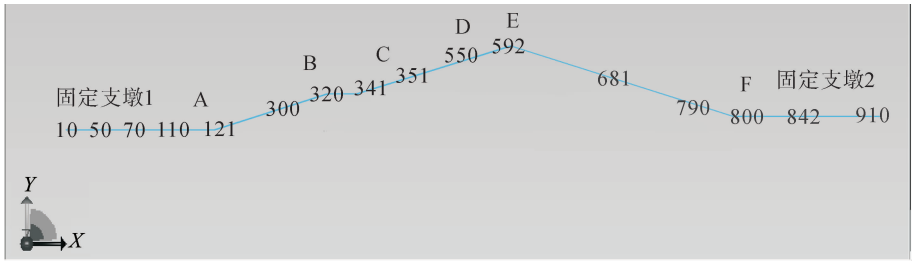

图 4　沿坡敷设方式管道模型

注：沿坡敷设弯管处用字母表示，如 A。

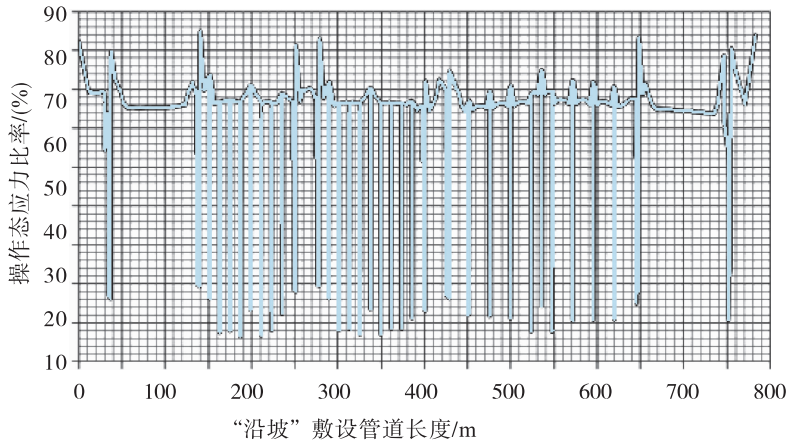

图 5　运行工况下沿坡敷设操作态应力比率

表3　集中应力关键点处应力对比分析

	固定支墩 1	弯管 1	弯管 2	弯管 3/3′	弯管 4/4′	弯管 5/5′	弯管 6/6′	弯管 7	弯管 8	固定墩 2
“非绕行”敷设方式	83.45	81.58	84.27	84.00	86.98	80.70	89.17	82.23	85.69	85.80
沿坡敷设方式	82.31	78.86	83.30	79.65	81.31	71.34	74.19	81.72	80.07	83.79
增减量	–1.14	–2.72	–0.97	–4.35	–5.67	–9.36	–14.98	–0.51	–5.62	–2.01

注：“–”表示沿坡敷设较“非绕行”敷设方式应力减小。

由图 5 可知，集中应力主要产生在弯管和端点处，弯管处的应力比率大多为 80 %左右，且最大应力出现在西侧出土处，应力比率为 83.792 6 %。

对应图 1，“非绕行”与沿坡敷设方式弯管和端点处的应力对比情况见表 3。

由表 3 可得，沿坡敷设定位处较“非绕行”方式定位处应力均有所降低，平均下降 4.733 %，其中弯管 6 处应力值降低最多，达到 14.98 %。

4　结论

对斜坡内输气管道进行应力分析，得出集中应力的位置，即弯管和端点处。通过“非绕行”与沿坡敷设两个模型的对比分析，沿坡敷设管道长 781 m，“非绕行”敷设方式管道长 708 m，前者较后者管材消耗较多。但考虑其安全性，采用沿坡敷设方式定位处（弯管、端点）应力值较“非绕行”敷设方式有显著降低，最高降低14.98 %，更能保证管道的安装与运行安全。综合分析比较，管道沿坡敷设既安全性又经济。

参考文献：

[1] GB 50251–200，输气管道工程设计规范[S].

[2] 尹辉庆，杨明新.山区陡坡地段管道施工的几种方法[J]. 石油工程建设，2007，33(5)：37–39.

[3] 李　朝，史　航. 山区地段长输管道线路设计要点[J]. 油气储运，2002，21(12)：27–30.

[4] 唐永进. 压力管道应力分析(第一版)[M]. 北京：中国石化出版社，2003.

[5] GB 50316–2000，工业金属管道设计规范[S].

[6] 章　磊，杨　朔，岳良武，等. 输气管道工程设计规范修订建议[J]. 天然气与石油，2011，29(3)：4–7.

[7] 吴晓南，鲜　燕，刘源海，等. 清管过程中隧道内输气管道内应力分析[J]. 天然气与石油，2012，30(2)：1–3.