

活动断层区埋地管道的 设计要求及防范措施

陈冠卿

岩石或土壤中的埋地管道与活动断层相交时,地震所产生的地表断裂运动将使管道产生纵向应变和横向变形。

断层沿管轴的纵向运动会使管子产生拉伸或压缩。管子受拉伸超过极限时,管道就会破坏^{〔1〕、〔2〕},而当管子受压缩时,则会由于薄壳失稳而造成如图1的屈曲破坏。

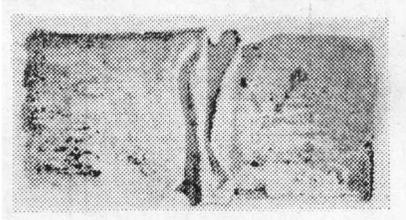


图1 1971年美国圣费尔南多地震中管子轴向失稳的外观

一、活动断层区内对管道设计的要求

1. 地震后管道状况

埋地管道通过断层的管段,地震后在断层处产生了较大的位移,其应力和应变值将达到最大值。该处的管子成了新的自由端,从断层到两侧锚固点(此处的锚固点不一定有实际的锚固物体,而是指管子的轴向应变为零处)之间的管段成为新的过渡段。此时,管子和土壤间的纵向摩擦力(沿管长按均匀分布)将阻止管子作纵向运动^{〔3〕}。

2. 过渡段管道的土压分布及管土间摩擦力

有关这方面的内容在文献中已有论述^{〔4〕},这里仅给出管土间摩擦力的简化计算式:

$$f \cong 2.4\mu r_s DH \quad (1)$$

式中 f ——单位长度上的纵向摩擦力, N/m ;
 μ ——管子外表面与土壤间的摩擦系数;
 r_s ——回填土的重度, N/m^3 ;
 D ——管子外径, m ;
 H ——管子上表面至管沟上表面距离, m 。

3. 材料

长输管道常用的钢材有API-5L X52(相当于我国的钢号16Mn)、X56、X60、X65和X70五种^{〔5〕}。

以X60材料为例,其应力-应变曲线可简化为折线(如图2),即可分弹性区、弹塑性

区、完全塑性区三部分、如将图 2 折线中斜率为 E_2 的线段延伸与 σ 轴相交，得应力 $\sigma_0 = 463\text{MPa}$ 。

考虑埋地管道在地震中的安全，同时也考虑到地震荷载是几率较低的设计荷载，故允许管材进入弹塑性区，但也不允许应变值处于完全塑性区，即应力-应变图中的水平线部分。我们取材料弹塑性区与完全塑性区的交点处的应变值为管道的允许最大应变值，即图 2 中 ε_2 。大约相当于管材延伸率的 27%。

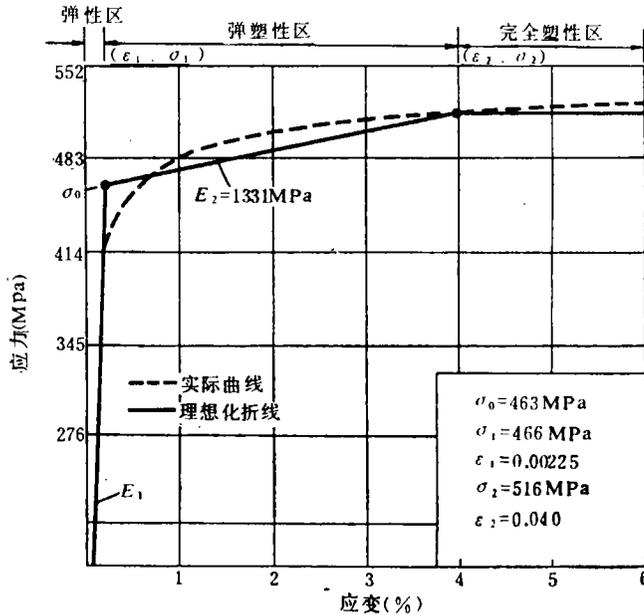


图 2 API 5 L X60 应力-应变曲线图

4. 地震中管子的滑动长度

对于弹性模量保持为常数的各区域两点之间的平均应变量是该区域两端点应变量的平均值。在图 2 简化的三个区域内管子两点间应变量的平均值乘上管子滑动的长度，即得出管子长度的变化量。

$$(1) \text{ 弹性区 } \Delta L_e = \bar{\varepsilon}_e \cdot L_e = \frac{\sigma L_e}{2E_1} \quad (2)$$

式中 ΔL_e ——管子的伸长量；

$\bar{\varepsilon}_e$ ——管子平均应变（弹性区），

$$\bar{\varepsilon}_e = \frac{\sigma}{2E}$$

σ ——弹性区管子所受的最大应力；

E ——管材的弹性模量；

L_e ——弹性区管子滑动长度， $L_e = \frac{\sigma t}{0.76\mu\gamma_s H}$ ；

t ——管子壁厚；

其余符号意义同前。

$$(2) \text{ 弹塑性区 } \Delta L_t = 2(L_s \cdot \bar{\varepsilon}_s + L_p \cdot \bar{\varepsilon}_p) \quad (8)$$

式中 ΔL_t ——弹塑性区管子的伸长量；

L_p ——弹塑性区管子滑动长度，

$$L_p = \frac{(\sigma - \sigma_1) \pi D t}{f} ;$$

$\bar{\varepsilon}_p$ ——管子平均应变（弹塑性区），

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{\sigma_1 - 2\sigma_0 + \sigma}{2E_2} ;$$

其余符号意义同前， σ_0 及 σ_1 的取值参见图2。

完全塑性区已离开了我们讨论的范围。在前面谈到的两个区域内，只要管子所受的应力没有超过材料的强度极限，则管子就可在最大允许变化长度内正常工作。

(3) 压缩皱褶 当管道遭受压缩时，由于局部屈服管壁会起皱褶。薄壳起皱褶理论中给出了压缩应变式⁽⁶⁾

$$\varepsilon_c = 0.6 \frac{t}{R} \quad (4)$$

式中 t ——管子壁厚， m ；

R ——管子半径， m 。

Wilson和Newmark经试验后指出，圆柱体会在理论应变值的1/2到1/4时就开始起皱，但是起皱并不意味着破坏。试验发现，管道能承受高出由式(4)计算的应变值的4~6倍，而在压缩皱褶处却不发生破裂。但应该指出的是当褶皱发生后，进一步的应变将集中于褶皱区域。

若取实际薄壁管道开始起皱的压缩应变值（即1/4的 ε_c ）为计算值，

$$\text{可得} \quad \Delta L_c = 2 L_c \bar{\varepsilon}_c, \quad (5)$$

式中 ΔL_c ——压缩时管子允许的最大长度变化， m ；

L_c ——压缩情况下，断层一侧管子的滑动长度，

$$L_c = \frac{\sigma_c \pi D t}{f}, m ;$$

$\bar{\varepsilon}_c$ ——管子受压缩开始起皱的应变值，

$$\bar{\varepsilon}_c = \frac{1}{4} \varepsilon_c = 0.15 \frac{t}{R} ;$$

σ_c ——管材的屈服极限，取 $\sigma_c = \sigma_s$ ， MPa ；

其余符号同前。

5. 断层运动对管道长度变化的影响

设走向错动断层运动与管道的位置如图3所示，断层水平总位移为 S ，其两个分量

见图 3。

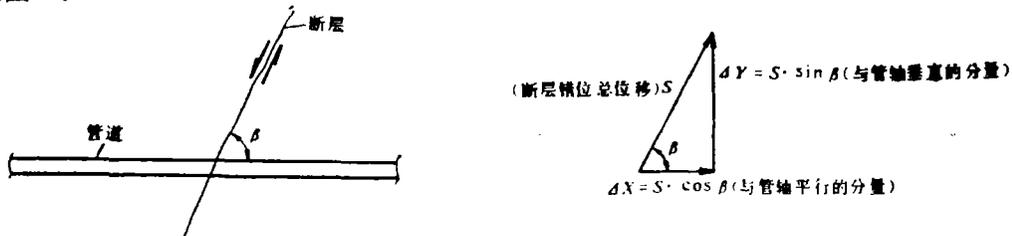


图 3 断层错位与管道位置关系图

由于断层错动引起管道长度的变化 ΔL

$$\Delta L = \varepsilon_2 L = \Delta X + \frac{\Delta Y}{4L} \quad (6)$$

式中 ε ——过渡段管子总的平均轴向应变，

$$\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_b = \frac{\Delta X}{2L} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta Y}{2L} \right)^2,$$

L ——断层一侧过渡段的管长；

ΔX ——断层水平错动总位移与管轴平行的分量，

$$\Delta X = S \cdot \cos \beta,$$

ΔY ——断层水平错动总位移与管轴垂直的分量，

$$\Delta Y = S \cdot \sin \beta,$$

S ——断层水平错动总位移，见图 3；

ε_a —— ΔX 位移使管子产生的轴向应变；

ε_b —— ΔY 位移使管子产生的纵向应变。

6. 校核标准

管道经过活动断层是否需要抗震加固由下列条件校核：

若 $\Delta L \leq \Delta L_c$ (或 ΔL_e)，则认为该条管道经过活动断层可以不作加固处理；

若 $\Delta L > \Delta L_c$ (或 ΔL_e)，则需要采取抗震措施。

二、活动断层区内管道的防范措施

1. 浅埋

管道适应断层运动的能力（用管道最大允许的长度变化 ΔL 或 ΔL_c 来表示）与埋深成反比，在断层区内管子覆盖层的厚度最好不超过 1.0m ⁽³⁾。对于预期在未来地震中会产生很大位移的断层区域内建设管道，要使管道在地震时能作横向和纵向的运动，为此，最好将该区域内的管道设计为地面铺设。

2. 管道与断层平面应有合理的夹角

因为管道处于压缩状态要比处于拉伸状态更容易造成破坏。所以，必须使管道在断层运动时受拉伸而避免受压缩。如图 3 中，断层平面与管道走向的夹角 $\beta = 70^\circ \sim 90^\circ$

最为有利。在上述范围内, β 角越大管道耐断层运动的能力也就越大^[7]

3. 提高管材的延性

材料的拉伸许用应变与材料性质有关。长输管道常用的 16Mn 管材(相当于 API 5 L X52)的延伸率为22%, 而API 5 L X70的延伸率为10%, 显然, 钢号等级愈高而延伸率愈低。另外, 压缩许用应变与管壁厚度成正比。因此, 管道穿越断层时应取低钢号的厚壁管。处在断层区的管道还应避免壁厚的突变及低劣的焊缝质量。

4. 正确选择管道穿越断层的位置

断层位移的大小和断裂带宽度在一条断层上并不相同。在确定管道穿越位置时, 应根据历史记载和地震资料, 尽可能查找断层位移和断裂带宽度最小的地方作为穿越点。若管道与断裂带平行, 则铺设的管道应距断裂带200m以上。

5. 合适的回填土

管道适应断层运动的能力与管土间的摩擦系数 μ 和回填土的重度 γ 成反比。因此, 输送油气的管道经过活动断层处的回填土, 应采用疏松至中等重度的土质, 最好是无粘性的摩擦系数较低的砂或砂砾石。

6. 合理选择固定墩的位置

固定墩应远离断层。距离断层每侧的长度至少为 $1.5L_1 \sim 2.0L_1$ (或 $1.5L_2 \sim 2.0L_2$)。

7. 过渡段内设置膨胀节

试验表明, 膨胀节对吸收断层错动产生的能量是有利的, 故允许在过渡段的管道上设置膨胀节。

8. 管路附件应避开过渡段设置

9. 正确的管沟截面

处于断层区域内的管道, 其管沟截面及回填土要求按图4进行。若管道处于永冻土层的断层区域, 其管沟底部还应安放隔热板, 如图4B所示。这样, 当断层错动时, 管子能较自由地活动、升起而不致被破坏。

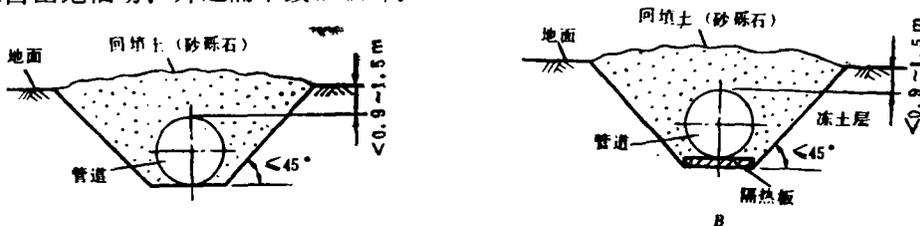


图4 断层区管沟截面图

10. 管道外敷设套管

管道在断层区敷设时, 为保护管道可以在其外面加设套管, 用以吸收断层错动的部分能量。

参 考 文 献

- [1] 陈冠卿, 震害及长距离输油管道的抗震计算, 《油气储运》, 1985年, 第5期

西德防火器技术见闻

蒲家宁

1987年4月,我参加了应西德有关方面邀请的一个考察组,在西德布劳施威格防火器厂(Braunschweiger Flammenfilter)考察了一天。给我们的印象是,该厂在防火器的研究、试验和制造方面确实具有世界先进水平,很值得借鉴和参考。现将所见所闻分四部分介绍如下。

1. 防火标准

防火器是阻止意外燃烧和爆炸的火焰向未燃爆的混合气传播的安全装置。对其要求,美国API标准显然低于西德DIN标准。API只要求防火器有防爆炸的功能,倘若容器外部易燃易爆气体爆炸,其火焰不得经呼吸孔道窜入容器内;而DIN不仅要求防爆炸,且要求防燃烧和防爆震。

以储存汽油的油罐为例,如果在油罐呼气过程中呼出的油蒸气发生爆炸,有可能点燃透气阀出口处的油蒸气。假若这时油蒸气的出流速度大于火焰前锋的燃烧速率,火焰诚然是不会进入油罐里面的。不过这种理想条件难以保持,从实际考虑应当着眼于可能发生的逆火。因此,在油罐进出油蒸气的孔道上必须设置阻止逆火的防火器。

如果易燃爆的混合气爆炸发生于薄壳容器内,其灾难性后果远非防火器所能防备。但若爆炸发生于管道内,那么就可以用防火器阻挡火焰沿管道传播。尤其值得注意的是管道内的爆炸很容易导致爆震。因为当易燃爆混合气在管道内某处被点爆后,火焰前锋将沿管道继续向未爆混合气推进,速度不断增快,未爆混合气被压缩,爆炸速度相应提高,此过程继续下去,可以使未爆混合气压缩到不待火焰前锋到达而自行引爆,此爆

[2] T.D.O'Rourke, C.H.Trautmann; Buried Pipeline Response to Permanent Earthquake Ground Movement, ASME 80-C2/PVP-78, 1980

[3] 陈冠卿:埋地油气管道通过断层区的设计方法,《油气储运》,1982年,第3期

[4] 潘家华:埋地管线的强度设计和计算,《油气管道技术》,1979年,第2期

[5] Robert P. Kennedy, etc.; Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline, Journal of Transp. Engr. ASCE, TE 5, 1977

[6] W.J.Hall, N.M.Newmark; Seismic Design Criteria for Pipeline and Facilities, Proceedings of Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Specialty Conference, August 1977

[7] Robert P.Kennedy, A.C.Darrow and S.A.Short; Seismic Design of Oil Pipeline Systems, Journal of the Technical Councils of ASCE, Tel. 1979