



埋地管道的上浮屈曲分析

帅 健* 魏化中

(石油大学(北京)) (武汉化工学院)

帅 健 魏化中:埋地管道的上浮屈曲分析,油气储运,1998,17(1) 22~24.

摘 要 使用材料力学方法研究了埋地管道产生上浮屈曲的条件。上浮屈曲常见于海底和液化土中的埋地管道,在上浮屈曲过程中产生过量的垂直位移和塑性变形被认为是一种失效情形。根据分析结果提出了管道温升问题。对于实际埋地管道,当运行时的温升大于安全温升时,管道即发生上浮屈曲。提出了管道上浮屈曲的两个重要因素:管—土之间的摩擦系数;管顶上覆盖土层载荷,包括管子自重和所含介质的重量。给出了实际算例。

主题词 埋地管道 变形 分析 计算

上浮屈曲常见于海底和地震液化土中的埋地管道^[1,2],当管道的操作温度和压力高于周围环境时,管子将膨胀,如果管子的轴向变形受到限制,那么管子将承受轴向载荷。类似于直杆的欧拉弯曲,当管子中的轴向载荷达到一定值时,管子就会因屈曲而产生向上拱的弯曲变形,这种现象称为上浮屈曲,上浮屈曲产生过量的垂直位移和塑性变形,被认为是一种失效情形。

一、上浮屈曲的形态及数学表达式

埋地管道的上浮屈曲和铁路铁轨中的热胀屈曲相类似^[3]。图 1 所示为管道的上浮屈曲形状,设管道在长度为 L 的部分发生屈曲,在屈曲后的长度上受到的轴向力为 P ,包括覆盖土层和管子、物料自重的均布载荷为 q ,取如图 1 所示的坐标系,则考虑轴向力的弯曲微分方程为^[4]:

$$EIy'''' + Py'' = -q \tag{1}$$

其解的形式为:

$$y = A\cos kx + B\sin kx + Cx + D - \frac{qx^2}{2P} \tag{2}$$

其中 $k = \sqrt{\frac{P}{EI}}$,由于对称性,系数 $B=C=0$,由边界条件:

$$y(\pm \frac{L}{2}) = A\cos \frac{kL}{2} + D - \frac{qL^2}{8P} = 0 \tag{3 a}$$

$$y'(\pm \frac{L}{2}) = \mp Ak\sin \frac{kL}{2} \mp \frac{qL}{2P} = 0 \tag{3 b}$$

$$y''(\pm \frac{L}{2}) = -Ak^2\cos \frac{kL}{2} - \frac{q}{2P} = 0 \tag{3 c}$$

可以求出未定系数:

$$A = -\frac{q}{2k^2P\cos \frac{kL}{2}} \quad D = \frac{q}{2k^2P} + \frac{qL^2}{8P} \tag{4}$$

并且还可以得到一个确定临界载荷的方程:

$$\frac{kL}{2} = \text{tg} \frac{kL}{2} \Rightarrow P = 80.73 \frac{EI}{L^2} \tag{5}$$

确定屈曲的挠曲线方程为:

$$y = \frac{q}{2k^2P} \left(\frac{\cos kx}{\cos(kL/2)} + \frac{k^2L^2}{4} + 1 - \frac{k^2x^2}{4} \right) \tag{6}$$

但是,挠曲线还没有完全确定,式中的 P 和 L 都是未知数,需要附加条件求解。

二、位移协调条件

附加条件为位移协调条件(见图 1),屈曲前管道上的 $A、B、C、D$ 和 E 点,在屈曲后, A 和 E 点没有动, $B、C$ 和 D 点分别移到 $B'、C'$ 和 D' 。假定 A 和 B' 之间、 D' 和 E 之间只有轴向位移,无横向位移,以

* 102200,北京市昌平区水库路;电话:(010)69745566-3443.

ΔL 表示 BB' 和 DD' 在屈曲期间的位移。

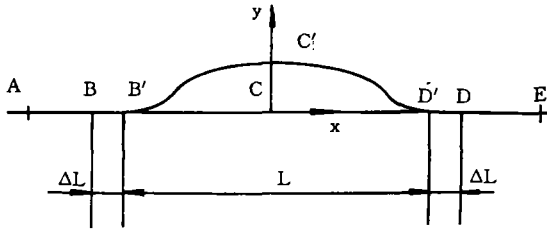


图 1 管道屈曲形状及屈曲位移协调条件

屈曲之前,假定管道中的轴向压缩载荷是 P_0 , 屈曲之后, A 和 B' 之间、 D' 和 E 之间的管段受到均匀摩擦力的作用(见图 2)。

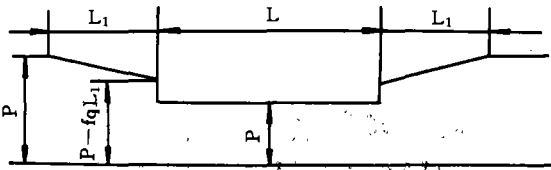


图 2 轴力在屈曲长度上的变化

轴向载荷线性变化,设这段线性变化的长度为 L_1 。此外,由于横向分布载荷 q 的作用,在 B' 和 D' 两点之间必须考虑横向集中载荷 $\frac{1}{2}qL$ 的作用,假设管道与覆盖土层的摩擦系数为 f ,则轴向力可以表示为:

$$P = P_0 - fqL_1 - \frac{1}{2}fqL \quad (7)$$

位移可表示为:

$$\Delta L = \frac{1}{2} \frac{fqL_1^2}{EA} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),得:

$$\Delta L = \frac{(P_0 - P - \frac{1}{2}fqL)^2}{2EAfq} \quad (9)$$

$B'C'D'$ 部分由于屈曲形状而产生的轴向压缩位移为:

$$\Delta L' = \int_{-L/2}^{L/2} (y')^2 dx \quad (10)$$

但是,上式只表示 BCD 由直线变成曲线形时的轴向位移,不包括由于 $B'C'D'$ 部分由于轴向力从 P_0 减小到 P 而产生的伸长,这部分伸长为:

$$\Delta L'' = \frac{P_0 - P}{EA} \quad (11)$$

因此,位移协调方程为:

$$2 \Delta L = \Delta L' - \Delta L'' \quad (12)$$

将式(9)、(10)、(11)代入式(12),得:

$$\frac{(P_0 - P - \frac{1}{2}fqL)^2}{2EAfq} = \int_{-L/2}^{L/2} (y')^2 dx - \frac{P_0 - P}{EA} \quad (13)$$

再将式(6)代入,并求解,得:

$$P_0 - P = \frac{qL}{EI} [1.598 EAfqL^5 - 0.25(fEI)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

上式中 P_0 是由于管子温度和压力变化产生的轴向载荷,它的计算可参考文献[5]。式(5)和式(14)联立可以完全确定屈曲长度和屈曲载荷。

三、屈曲安全温升

为了考察屈曲长度和温度变化的关系,需研究式(14)。这里的温度变化是指运行时的温度与管道安装时的温度之差。由于只有温度升高才会使管道屈曲,因此以下称温度变化为温升。管内压力变化对屈曲的影响不大,这里按常数考虑,主要研究温升与上浮屈曲的关系。以管子屈曲长度 L 为横坐标,温升 T 为纵坐标,作出了如图 3 所示的曲线,每根曲线对应于不同的管土摩擦系数,分别为 $f=0.01$ 、 0.05 、 0.1 、 0.2 、 0.4 、 0.6 ,例如,当 $f=0.01$ 时,对应于屈曲长度 $L=60$ m 时的温升约为 45°C ,每根曲线上有一个最低点,这个最低点的温升称为安全温升,即高于这一温升时,上浮屈曲发生。例如,当 $f=0.6$ 时,安全温升约为 90°C 。当实际温升高于安全温升时,对应的屈曲长度有两个,实际管道的屈曲只会对应于一个形态,这时屈曲长度是由管土系统的特征常数的随机变化确定。图 3 结果还表明,随着摩擦系数的加大,安全温升也随之上升。

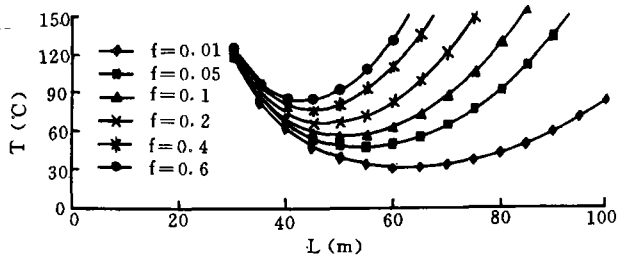


图 3 不同摩擦系数时管道屈曲长度与温升的关系

除了摩擦系数以外,上浮屈曲还会受到管顶上覆盖土层载荷(包括管子及所含介质的重量)的影响,图 4 是不同的管顶上覆盖土层载荷($q=1200$ 、 2400 、 3600 、 4800 、 6000 N/m)时的温升与屈曲长

度的变化曲线。此图同样表明存在安全温升,例如, $q=3\ 600\ \text{N/m}$ 时,安全温升为 $67\ ^\circ\text{C}$ 。随着管顶覆盖土层载荷的增大,安全温升增高。

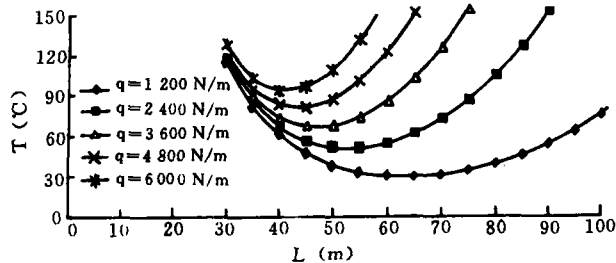


图 4 不同管顶覆盖土层载荷时的管道屈曲长度与温升

四、计算实例

例如,某实际管道,材质 X52、管外径 377 mm、壁厚 6 mm、管内操作压力 6.26 MPa。表 1 是该管道在管土之间摩擦系数分别为 0.2、0.4 和 0.6 时的安全温升。

表 1 某管道的安全温升

管顶覆盖土层载荷 (N/m)	安全温升(°C)		
	f=0.2	f=0.4	f=0.6
1 200	26.35	31.65	35.04
2 400	46.67	53.27	58.32
3 600	60.06	72.19	79.93
4 800	75.91	85.97	92.48
6 000	85.67	97.60	106.70

五、讨 论

(1)两个相邻屈曲波形之间的距离由下式确定:

$$L_1 = \frac{P_0 - P}{fq} - \frac{1}{2}L$$

(2)工程上,有时用固定支座来防止屈曲,由于支座提供的摩擦力足够大,因此取 $L_0=0$,这样,位移协调条件式(12)变成:

$$\Delta L' - \Delta L'' = 0$$

相应式(14)变成:

$$P_0 - P = 1.598 \times 10^{-5} \frac{q^2 EAL^5}{(EI)^2}$$

(3)最大屈曲位移和屈曲弯矩:

$$y|_{x=0} = 2.408 \times 10^{-3} \frac{qL^4}{EI}$$

$$M|_{x=0} = 0.069\ 38\ qL^2$$

参 考 文 献

- 1, Palmer, A. C. et al; Design of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling, Proceedings of the 22 Annual OTC in Houston, Texas, OTC 6335, 1990.
- 2, Yun, H. D. and Kyriakids, S.; Model for Beam-Mode Buckling of Buried Pipelines, Journal of Engineering Mechanics, 1985(2), 111.
- 3, Marek, D. J. and Darieds, J. H.; Behavior of Continuous Crane Rails, Proceedings of the American Society of Civil Engineerings, 1971(4).
- 4, 刘鸿文;材料力学,第二版,高等教育出版社(北京),1982.
- 4, 潘家华等;油罐及管道强度设计,石油工业出版社(北京),1986年第一版.

(收稿日期:1997-05-04)

编辑:刘春阳

我国西部输油管道的一项 阴极保护技术通过鉴定

由西北石油管道建设指挥部组织、上海冶金所等六个单位参加的“库鄯输油管道工程沙漠地区阴极保护技术综合试验研究”科研项目于 1997 年 12 月 23 日通过了上海市科委主持的专家技术鉴定。中国腐蚀与防护学会理事长、中科院院士曹楚南先生出席了会议并任鉴定委员会主任。参加会议的有来自石油、市政、中科院及大专院校的腐蚀专家和生产一线的工程技术人员共 36 人。代表认真听取了研究单位的报告,并进行了热烈的讨论,一致同意通过技术鉴定。

该项目针对沙漠地区和石方段长输管道阴极保护的技术难题开展了带状镁阳极、柔性阳极和阳极地床降阻剂的应用研究,取得了有价值的成果,并将成果应用于库鄯输油管道工程实际,技术上居国内领先。经科技查新检索表明,技术总体达到了国际先进水平。

鉴定会上,与会专家对于该项目的科研、设计、生产和施工单位密切合作攻关的组织方式,将科学技术直接转化为生产力的作法给予充分的肯定。

该项技术可供我国西部石油开发和管道建设、东部地区的山地等高电阻率环境中的阴极保护借鉴。

胡士信