



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。

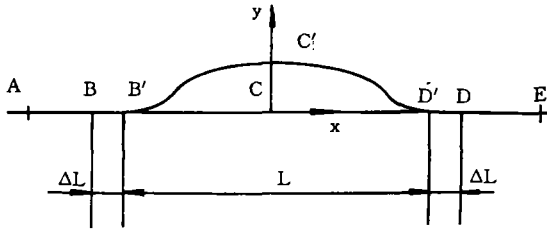


图 1 管道屈曲形状及屈曲位移协调条件

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)。

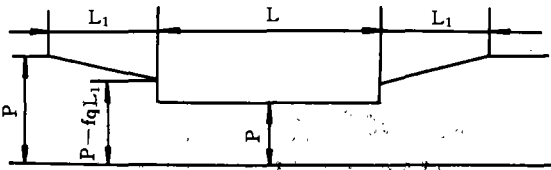


图 2 轴力在屈曲长度上的变化

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 由直线变成曲线形态时的轴向位移,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。

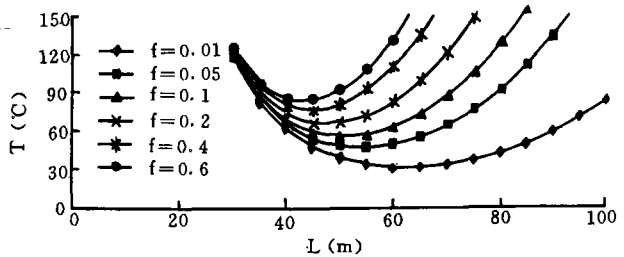


图 3 不同摩擦系数时管道屈曲长度与温升的关系

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。

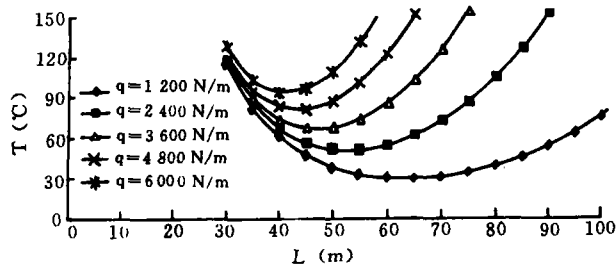


图 4 不同管顶覆盖土层载荷时的管道屈曲长度与温升

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:

$$P_0 - P = 1.598 \times 10^{-5} \frac{q^2 EAL^6}{(EI)^2}$$

(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

作 者 介 绍

- 章龙江** 副教授,1959年生,1987年毕业于大庆石油学院,获硕士学位,现在石油大学(北京)攻读石油与天然气储运工程专业博士学位。
- 陈向新** 高级工程师,1956年生,1983年毕业于原中国石油天然气管道职工学院线路工程专业,现任中国石油天然气管道勘察设计院副总工程师。
- 罗塘湖** 教授级高级工程师,国家有突出贡献的科技专家,1933年生,1956年毕业于北京石油学院储运专业,1956~1961年留苏研究生,现任《油气储运》编委会副主任。
- 李 才** 高级工程师,石油大学(北京)硕士研究生导师,1962年毕业于北京石油学院储运专业,长期从事油气管道方面的教学、工程设计和科学研究工作。
- 梁静华** 高级工程师,1957年生,1985年毕业于原中国石油天然气管道局职工学院石油储运专业,现在中国石油天然气管道科学研究院从事输油工艺研究工作。
- 李子军** 工程师,1967年生,1989年毕业于抚顺石油学院石油储运专业,现在齐鲁石化公司炼油厂油品分厂从事生产管理工作。
- 帅 健** 副教授,1963年生,1982年毕业于武汉化工学院化工机械专业,1987年毕业于石油大学北京研究生部,现任石油大学(北京)机电系强度教研室主任。
- 周罗生** 高级工程师,1940年生,1965年毕业于湖南大学应用物理专业,现在中国石化销售公司株洲石油储存研究所从事石油储存技术的研究与开发工作。
- 刘立力** 助理工程师,1970年生,1994年毕业于大连大学机械制造工艺与设备专业,现在中国石油天然气管道科学研究院机械室从事专业技术工作。
- 杨瑞钧** 高级工程师,1937年生,1955年毕业于长春电力技术学校锅炉装置专业,退休于中国石油天然气华东输油管理局生产调度处。
- 井一平** 工程师,1963年生,1987年毕业于石油大学储运专业,现任新疆石油管理局油气储运公司生产科科长。
- 翁永基** 教授,1945年生,1967年毕业于上海复旦大学物理化学专业,现在石油大学(北京)从事腐蚀科学和防腐蚀工程技术的科研及教学工作。
- 熊 靖** 工程师,1956年生,1985年毕业于原中国石油天然气管道职工学院线路工程专业,现在中国石油天然气胜利输油公司管道科从事管道管理工作。
- 李辉勤** 副教授,1945年生,1968年毕业于北京科技大学理化系(原北京钢铁学院),现在北京科技大学腐蚀系从事电化学、金属腐蚀、表面处理等课程的教学和科研工作。
- 李宝山** 副教授,1960年生,1982年毕业于原华东石油学院,1995年毕业于石油大学(北京),获硕士学位,现在承德石油高等专科学校热工系从事教学及科研工作。
- 樊宝德** 副教授,1941年生,1968年毕业于原华东石油学院油料储运专业,现在中国人民解放军空军后勤学院四系油库管理教研室从事油料教学和科研工作。
- 曾祥炜** 教授级高级工程师,1944年生,1965年毕业于四川建材学院,现任中国创造学会副会长、四川省科协副主席、成都孚砾技术公司董事长。
- 王凡喜** 高级工程师,1953年生,1987年毕业于中国人民解放军重庆后勤工程学院油料管理专业,现任中国人民解放军济南军区后勤油料技术监督室主任,从事油料技术监督工作。
- 肖静萍** 翻译,1949年生,1982年毕业于抚顺师范专科学校,现在中国石油天然气管道局特种施工装备处从事综合管理工作。

lyzing initial yield with an elastic deformation theory, describing fractured yield with the time-dependent rheological equations and depicting residual yield with the time-independent rheological equations; second the results confirmed that the pressure transmitting mechanism in the gelled crude is different from that of sound wave transmitting process. The pore structure of the gelled oil is a critical factor affecting the pressure transmitting velocity. The damping effect from the pores in the gelled crude and the bagging effect due to the gelled crude yielding in radial direction are two important factors. A new model of pressure transmitting speed for a gelled crude restarting operation has been developed. The new mathematical model of restarting pressure has been established with the association of thermodynamic and hydraulic analyses, its calculating results correspond with the experimental data. The two pressure peaks and the distribution of flowing radius for a gelled crude restarting operation have been forecast on the basis of calculation.

Subject Headings: pipeline, high wax content oil, shut-down, start-up pressure, research

Liang Jinghua and Li Huiduo: **The Feasibility Analysis on the Batch Transportation of Product Oil and Crude Oil in Xinjiang—Baoji Pipeline**, *OGST*, 1998, 17(1) 15~18.

The paper discusses the feasibility of the batch transportation of product oil and crude oil in Xinjiang—Baoji pipeline. Based on the operating ways of the French product oil and crude oil batch transportation pipeline, the preliminary tentative plan has been put forward. Through analyzing the oil characteristics of Xinjiang, and in the preconditions of the total throughput rate of $1\ 100 \times 10^4$ t/a and the ratio of product oil to crude oil at 8 : 3, the authors calculate the pipe diameters and safe throughput for the initial feasibility plan of the pipeline project. Some problems about the batch transportation of product oil and crude oil of the pipeline have been studied and discussed from the standpoint of transportation technology.

Subject Headings: long distance pipeline, batch transportation, product oil, crude oil, feasibility study

• OIL & GAS STORAGE •

Li Zijun: **Stabilized Gasoline Tank Matches Annular-cabin Type Steel Floating Roof**, *OGST*, 1998, 17(1) 19~21.

Using inner floating roof tank to store light oil can decrease the evaporation loss and prevent the environment from polluting. Generally, the semifinished stabilized gasoline coming from the FCC has more gas content with high temperature when it enters into the tank. Therefore, how to select the structure of the inner floating roof is more important. The application of several structures shows that the ring-plate type inner floating roof presents the liquid overflowing problems, which causes the plate to sink; the aluminum-alloy inner floating roof exists corrosion problem caused by impurities in the light oil, which can not avoid the liquid overflowing as well. The annular-cabin type inner floating roof can effectively prevent the gas from building-up at the soft seals of floating roof, and decrease or prevent the liquid overflowing. The liquid can not accumulate on the top of floating roof. It is considered that if the protective coating applies to the floating roof, the structure will be an ideal selection for the stabilized gasoline tank.

Subject Headings: covered floating roof tank, stabilized gasoline tank, structure, selection

• DESIGN & CALCULATION •

Shuai Jian and Wei Huazhong: **Upheaval Buckling of Buried Pipelines**, *OGST*, 1998, 17(1) 22~24.

Upheaval buckling often happens in sea bottom or liquefied soil when earthquake. Upheaval is regarded as a failure case due to the overdue vertical displacements and plastic deformation. The conditions under which upheaval buckling can produce are studied with the methods in mechanics of materials. According to the analysis, the safety temperature rise is presented. Upheaval buckling occurs when the operating temperature rise is larger than safety temperature rise. Two important factors which effect upheaval buckling are

friction between pipe and soils, and loads of soil above pipe (containing the weight of pipe and liquid inside the pipe). Actual examples are given.

Subject Headings: buried pipeline, deformation, analysis, calculation

• MECHANICAL EQUIPMENT •

Zhou Luosheng: **A Brief Analysis on Assembling the Three-proof Floating Roof of Floating Roof Tank**, *OGST*, 1998, 17(1) 25~27, 29.

The steel-disk floating roof, assembled-aluminum floating roof, metal framework and plastic floating roof are generally used in oil tanks. The three-proof floating roof (squeeze-proof, sink-proof, leak-proof) has been further improved on the basis of the above mentioned roofs. In particular, the honeycombed, framework or lattice design forms for integral structure with high-strength aluminum-alloy or stainless steel and active joint connections can guarantee the floating roof's strength, rigidity, reliability and assembly accuracy. This paper introduces the structural and technical features of the three-proof floating roof.

Subject Headings: floating roof tank, device, structure, technology

Liu Lili: **Mobile Pour Depressant Dil-injection System**, *OGST*, 1998, 17(1) 28~29.

Subject Headings: pour depressant, oil pipeline, device, technological process

Yang Ruijun and Jiang Weigang: **The Development of Packaged Oil-fired Hot Water Heater**, *OGST*, 1998, 17(1) 30~31.

The packaged oil-fired hot water heater has been developed by Huadong Oil & Gas Transportation Administration Bureau and Oil & Gas Pipeline Survey and Design Institute of China. This new heater overcomes some shortcomings, such as cumbersome structure, backward technology and high energy consumption existed in the old-type heaters. The heater uses the double spiral tubes as its heated surface, which allows the hot water in the tube to flow to pass through the overall surface. Some new technologies and materials have been adopted for the new heater, such as pneumatic atomizing burner, micro-positive pressure burning, program-controlled start-up and lightweight heater wall fabricated with alumina silicate fibre. The heater has many advantages of high thermal efficiency, pet volume, light weight, fast start-up, simple operation, high safety and reliability and a long service life. Two winters' preliminary operation in Changqing pump station in LuNing pipeline shows that the technological parameters meets the requirements of the design.

Subject Headings: packaged heater, oil-fired heater, technical reform

• CONSTRUCTION TECHNIQUE •

Jing Yiping, Li Weilin *et al*: **Intelligent Pig Used in Oil Pipeline**, *OGST*, 1998, 17(1) 32~35.

The signalling pig and introduced intelligent pig ($\phi 273$ leakage magnetic flux pig) have been adopted in Xinjiang oil pipeline in order to detect pipeline defects. The detecting results show that the defects of pipe steel and the locations of internal and external corroded pipe sections have been found out accurately. Using the intelligent pig can cut down the pipeline accidents caused by corrosion and leakage, decrease upkeep period and cost, and is also helpful to the work-out of maintenance program.

Subject Headings: oil pipeline, corrosion, inspection

• CORROSION CONTROL & INSULATION •

Weng Yongji and Li Xiangyi: **Judgment of Cathodic Protection Effectiveness on Tank Bottom by Potential Distribution Modeling**, *OGST*, 1998, 17(1) 35~40.