

# 穿越公路及铁路埋地管道的设计计算

邓道明\*

孙建刚

张彦敏

(西南石油学院) (新疆石油学院管理局) (中国石油天然气管道勘察设计院)

邓道明 孙建刚等:穿越公路及铁路埋地管道的设计计算,油气储运,1998,17(9) 13~17。

**摘 要** 穿越公路、铁路埋地管道的结构型式为有套管和无套管两种。详细讨论了这两种型式管道的强度、刚度和稳定性问题,给出了计算公式及参数取值,在强度和刚度的验算方面提出了新看法。通过实例分析,认为穿越钢管道在满足规范要求最小壁厚限制时,通常不会发生横截面的弹性失稳,即刚度控制的实质为强度控制。

**主题词** 埋地管道 刚度 强度 设计计算 讨论

穿越公路或铁路的埋地油气管道结构有两种基本形式:有套管或无套管穿越。早期的油气管道穿越公路或铁路都采用外加套管保护。油气管道特别是长输管道,承受的内压较高,加上公路或铁路下的埋地管道所承受的土壤重量和车辆荷载又相当大,在无高性能的厚壁钢管以及工业技术整体水平还不高的年代,有套管穿越几乎成了唯一的方式。有套管的管道结构从受力上来看,是较合理的,套管承受土壤自身产生的压力和附加车辆荷载,输送管主要承担输送介质的内压。但是,从腐蚀控制、安装成本来看,有套管穿越是不利的。国内外油气管道的腐蚀调查表明,套管不仅未起到应有的保护作用,反而使有套管的穿越管段成为重点维护的对象。

随着冶金、制管、施工、焊接、检验、腐蚀控制等技术的发展和油气管道操作管理的现代化,取消套管的呼声越来越高。70年代以来,美国运输安全局(NTSB)、管道安全操作办公室(DOT/OPSO)、美国铁路和公用设施管理者协会(NARUC)、ASME、API、英国石油学会等机构都在力荐终止有套管穿越公路或铁路的作法,而直接采用厚壁管穿越。

承压的油气管道输送管直接穿越公路铁路时,管壁要承受相当大的应力。诚然,就管道横截面的弯曲效应而言,输送介质的内压和土壤外压的作用是相反的,但管道本身要承受相当大的内压引起的薄膜一次应力,热输管道还要承受温差作用,因此

输送管道直接穿越常常采用高性能的厚壁管(美国使用的钢管壁厚一般为10~16 mm)。无论是何种钢管,都必须满足强度、刚度、稳定性条件,才能保证结构的完整性。

## 一、刚度条件

钢套管或无套管保护的低压油气管道的壁厚一般由刚度条件确定。因为钢套管或低压输送钢管的环向应力主要为弯曲应力,薄膜应力不大,即钢管横截面的挠曲变形控制了钢管的壁厚。

GB50251<sup>[1]</sup>、GB50253<sup>[2]</sup>、CECS15:90<sup>[3]</sup>推荐的管道刚度校核公式都是 Iowa 公式<sup>[4]</sup>。Iowa 公式为管道水平挠度计算式<sup>[4]</sup>,用它来校核埋地钢管道的径向稳定性<sup>[1]</sup>,从概念上来讲,是不妥当的。

验算钢管刚度时,只考虑竖向和水平侧向土压力作用。引用文献[4]的符号,穿越公路及铁路的埋地钢管道的刚度条件为:

$$\Delta x \leq 0.03D \quad (1)$$

$$\Delta x = \frac{D_L k_{zv} W_c R_m^3}{EI_w + 0.061E'R_m^3} \quad (2)$$

式中  $\Delta x$  ——管环的水平挠度, m;  
 $D$  ——钢管道的外径, m;  
 $R_m$  ——钢管的平均半径, m;  
 $EI_w$  ——单位管长管环的抗弯刚度, N·m;

\* 637001, 四川省南充市油院路 30 号, 电话: (0817)2234411-3542。

$W_s$ ——单位管长总有效竖向荷载, N/m, 其中填土荷载  $W_d$  可分别按管顶上填土棱柱体重<sup>[3]</sup> (开沟敷管时) 和 Marston 的“窄沟深埋”荷载公式<sup>[2]</sup> (钻孔或顶管敷管时) 计算, 穿越公路钢管的交通荷载  $W_t$  按文献[5]推荐的方法计算;

$k_{sv}$ ——基床系数, 也即在竖向荷载作用下管环的水平挠度系数, 它与基床包角  $2\alpha$  有关<sup>[4]</sup>, 典型值可取为 0.1;

$D_L$ ——变形滞后系数, 取 1.5<sup>[1,2,6]</sup>;

$E'$ ——回填土的水平侧向反作用模量, 可参考文献[1,2]取值, Pa。

火车重量引起的管顶竖直土压力  $W_t$  可按 CECS15:90<sup>[3]</sup> 推荐的公式计算。其中的 Newmark 系数等同于 Holl 系数, 可查表或按文献[5]介绍的公式计算。铁路荷载的冲击系数  $F_i$  一般可取为 1.75<sup>[3]</sup>。文献[6]根据美国铁道工程师的作法, 按式(3)计算  $F_i$ :

$$\left. \begin{aligned} F_i &= 1.75, & h &\leq 1.5 \text{ m} \\ F_i &= 1.75 - 0.1(h - 1.5), & 1.5 \text{ m} < h < 9 \text{ m} \\ F_i &= 1.0, & h &\geq 9 \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $h$ ——枕木至管顶的距离, m。

英国在设计刚性管时, 针对其两种标准铁路荷载,  $F_i$  分别取为 1.2 和 2.0<sup>[7]</sup>。建议取  $F_i=1.75$  或按式(3)计算  $F_i$ 。式(3)考虑了  $h$  的影响, 与我国有关规范推荐的公路荷载冲击系数值相协调<sup>[3,18]</sup>。

基床包角  $2\alpha$  主要取决于管道的安装方法、铺管施工条件。GB50251、GB50253 推荐了开沟敷管时  $2\alpha$  的取值。对于钻孔敷管, Spangler 建议取  $2\alpha=120^\circ$ <sup>[6]</sup>。一般情况下, 开沟敷管时  $2\alpha$  取  $30^\circ$ <sup>[3,8,9]</sup>; 钻孔敷管时  $2\alpha$  取  $90^\circ$ <sup>[3,8]</sup>。如果管沟底有很多的石块或基床为捣实的石块时, 取  $2\alpha$  为  $0^\circ$ <sup>[8]</sup>。从安全和简便角度考虑, 推荐  $2\alpha$  按 CECS15:90 规定取值<sup>[3]</sup>。

$E'$  值与管周回填土的类型、密实度有关。GB50251<sup>[1]</sup>、GB50253<sup>[2]</sup> 和美国垦务局<sup>[10]</sup> 都推荐了开沟铺管时的  $E'$  值。文献[11]指出, 欧洲经常使用的  $E'$  典型值为 1、3、5、7、14 MPa。文献[12]推荐: 回填土密实度为 85%~90% (标准普氏密度) 时, 取  $E'=4.8$  MPa; 当密实度为 95% 时, 取  $E'=9.6$  MPa。

回填土密实度为 80%~90% 时, 日本的推荐值为 1.65~5.6 MPa。由上列数据比较, 可认为文献[1,2]推荐的  $E'$  值的数值范围是恰当的。目前还缺乏钻孔或顶管敷管时的  $E'$  值, 文献[6]取钻孔敷管时的  $E'=7.0$  MPa。

刚度条件式(1)的理论根据为以下方面。管环的最大弯曲应变  $\epsilon$  与挠度  $\Delta x$  之间关系为<sup>[4]</sup>

$$\epsilon \approx 3 \cdot \frac{t}{D_m} \cdot \frac{\Delta x}{D_m} \quad (4)$$

式中  $t$ ——管道的壁厚;

$D_m$ ——管道的平均直径。

据管周荷载类型的不同, 式(4)中的系数值 3 可用数值 3~3.5 代替<sup>[11]</sup>。取  $t/D_m \approx 1/100$ ,  $\Delta x/D_m = 0.03$ , 最大弯曲应变约为  $\epsilon = 3.2 \times \frac{1}{100} \times 0.03 = 0.096\%$ , 按虎克定律, 相应的弯曲应力约为 200 MPa。取管材屈服极限  $\sigma_s=240$  MPa (A3 钢),  $240/200=1.2$ , 管壁不会出现屈服点。中国石油天然气管道局职工教育培训中心就  $D/t=100, 120, 150, 200, 300$  钢管所作的实验表明, 当管环挠度在  $0.05D$  左右时, 管壁上下或左右先后出现屈服点。当  $\Delta x/D = 0.05$ ,  $D/t = 150$  时,  $\epsilon \approx 0.107\%$ , 相应的弯曲应力约为 220 MPa, 接近于 A3 钢管的屈服极限。

根据上述的估算, 尽管柔性管发生结构失效的挠度可能达到 20% 左右<sup>[12]</sup>, 可以认为变形控制条件  $\Delta x \leq 0.03D$  的实质是强度控制, 那么变形条件与  $D/t$  比值和管材有关。加拿大标准<sup>[13]</sup> 规定了穿越公路、街道及铁路的钢套管或无套管保护的输气管的最小壁厚和不同内压、不同钢级下不加套管保护穿越铁路输气管的  $(D/t)$  最大值。当穿越公路、街道时, 要求  $D/t_{min} < 150$ ; 穿越铁路时  $D/t_{min} < 85$ <sup>[13]</sup>。总趋势是  $D/t_{min}$  随着  $D$  的增大而增大。SYJ15-85<sup>[14]</sup> 规定: 穿越钢管的  $D/t$  小于 100。对于  $D/t < 100$  的非 A3 (或 S240) 钢制造的钢管, 可考虑将式(1)修正为  $\Delta x \leq 0.03D \cdot \frac{D}{100t} \cdot \frac{\sigma_s}{240}$ , 其中  $\sigma_s$  单位为 MPa; 但当  $\frac{D}{100t} \cdot \frac{\sigma_s}{240} \geq 1.0$  时, 刚度条件仍为式(1)。

## 二、强度条件

无套管的承压油气钢管理地直接穿越公路及铁路时, 钢管既要承受内压、温差作用, 又要承受土壤

本身的压力和附加交通荷载的作用,其壁厚常常由强度条件控制。

内压引起的管壁环向薄膜应力  $\sigma_h$  按 Barlow 公式计算。土压力和内压共同作用下管环弯曲应力  $\sigma_m$  (属二次应力)按不考虑水平侧向土压力的 Spangler 公式计算<sup>[3]</sup>,由于无套管保护的承压钢管的壁厚较厚,土壤刚度影响相对较小而被忽略,这样算出的  $\sigma_m$  较实际值大,应用时偏安全。埋地穿越承压钢管的总环向应力  $\sigma_c$  为:

$$\sigma_c = \sigma_h \pm \sigma_m \quad (5)$$

纵向应力  $\sigma_l$  为:

$$\sigma_l = \mu\sigma_c - \alpha E\Delta T \quad (6)$$

式中  $E$ 、 $\alpha$ 、 $\mu$ ——分别为管材的弹性模量、线胀系数、泊松比;

$\Delta T$ ——管道的操作温度与敷设温度之差。

无套管保护的埋地穿越钢管的强度条件为分别限制  $\sigma_c$  和组合当量应力  $\sigma_e$ 。 $\sigma_c$  应满足下式。

$$\sigma_c \leq F\eta\sigma_s \quad (7)$$

穿越输油管道的的设计系数  $F$  取 0.6<sup>[2]</sup>。仿输油管道规范,认为仍可按式(7)限制穿越输气管道的环向应力  $\sigma_c$ ,此时,  $F$  按 GB50251<sup>[1]</sup> 或参考 ASME B31.8<sup>[16]</sup> 取值。GB50251 只规定了无套管穿越不同等级地区三、四级公路的输气钢管的设计系数,因我国规范要求穿越一、二级公路及铁路的油气管道要加套管保护<sup>[3,14]</sup>。无论如何,  $F$  不应超过 0.6。焊缝系数  $\eta$  按 GB50253<sup>[2]</sup> 中第 5.2.1.2 条取值。

考虑总环向应力  $\sigma_c$ 、纵向应力  $\sigma_l$ 、轴向应力三个主应力,认为按最大剪应力理论计算得到的当量应力  $\sigma_e$  应满足条件:

$$\sigma_e \leq 0.72\sigma_s \quad (8)$$

式(8)中系数 0.72 的理论分析如下。先看前苏联规范 СНиП 2.05.06-85《大型管线》的设计规定:按管段等级取工作条件系数  $m$  分别为 0.9、0.75、0.6(0.9/0.75=1.2,0.75/0.6=1.25),一般地段埋地管道的  $m$  值取 0.9,河流穿越沟埋管道的  $m$  值取 0.75,穿越公路及铁路的管道分情况不同取  $m$  值为 0.75、0.9(因该规范要求管道穿越公路及铁路时必须加套管保护)。若要求无套管穿越公路及铁路的管道与河流穿越管道具有相近的安全度<sup>[14]</sup>,无套管穿越公路及铁路管道的  $m$  值应取 0.75。由于一般埋地管道的当量应力(能量准则)的限制值为  $\sigma_e$ (前苏联

不取 0.9 $\sigma_s$  的原因是计算应力时考虑了荷载系数),则无套管穿越公路、铁路管道的  $\sigma_e$  的限制值为  $\sigma_s/1.2 = 0.83\sigma_s$ 。

再分析中国、美国、加拿大的油气管道设计规范,对于一般的埋地油气管道<sup>[1,2,13,15]</sup>, $\sigma_h$  的最高限制值是 0.72 $\sigma_s$ , $\sigma_c$ (最大剪应力理论)的限制值是 0.9 $\sigma_s$ ,0.9/0.72=1.25。而埋地输气管道的  $\sigma_c$ 、 $\sigma_h$ (环向薄膜应力)限制值分别为<sup>[1]</sup>0.9 $\sigma_s$ 、0.72 $\sigma_s$ 、0.6 $\sigma_s$ 、0.5 $\sigma_s$ 、0.4 $\sigma_s$ , (0.9/0.72=1.25,0.72/0.6=1.2,0.6/0.5=1.2,0.5/0.4=1.25)若认为无套管穿越公路及铁路的管道的  $\sigma_c$  的最高限制值为 0.6 $\sigma_s$ ,则  $\sigma_e$  限制值应为 0.72 $\sigma_s$  或 0.75 $\sigma_s$ 。取 0.72 $\sigma_s$  更安全一些,也与  $\sigma_h$  限制值相协调。

与一般埋地管道相比,仅将含有二次应力成分 of 无套管埋地穿越管道的  $\sigma_c$ 、 $\sigma_e$  的限制值降低一个等级的原因是由于考虑了安全度,特别是疲劳控制。

由于车辆荷载引起的附加土压力为不均匀分布的交变荷载,它对埋地钢管会产生疲劳效应。如何校核埋地穿越钢管(特别是焊缝)的疲劳强度,是有待解决的重要课题。在目前对该问题还缺乏定量认识的情况下,不宜提高  $\sigma_c$ 、 $\sigma_e$  的限制值,另外还可通过对管材选择、施工、检验等过程的质量控制以及增加钢管埋深等措施来缓解管道的疲劳伤害。

### 三、稳定性条件

为了满足钢管在运输、施工、运行等过程中的稳定性要求,许多油气管道设计规范<sup>[1~3,13,14,16]</sup> 都限制了管道的最小壁厚或者  $(D/t)$  最大值。

在中国、前苏联和美国工程界(特别是市政工程和水电部门)和有关规范通常使用尼古拉(Е. П. Ниопай)公式(1955),或称 Luscher 公式<sup>[17]</sup>(1966),验算埋地钢管的稳定性。Luscher 模型<sup>[17]</sup> 研究的是被空心土壤圆柱体所包围的柔性管(平面应变问题)在均匀径向压力作用下的弹性稳定问题。该管道与土系统为轴对称,并把土壤看作均匀的弹性体。柔性管失稳的临界均匀径向压力  $P_{cr}$  按式(9)计算:

$$P_{cr} = \frac{(n^2 - 1)EI_w}{(1 - \mu^2)R_m^3} + \frac{K_{so}}{n^2 - 1} \quad (9)$$

式中  $n$ ——柔性管的失稳波数,其取值应使  $P_{cr}$  为最小值,且  $n$  为大于 1 的正整数;

$K_{so}$ ——土壤的弹性支撑模量,根据弹性理论,

并假定土壤圆柱体的外径与其内径(即管道的外径)相比可看作无穷大,则  $K_{so} = E_{so}/(1 + \mu_{so})$  (10)

式中  $E_{so}$ ——土壤的变形模量;

$\mu_{so}$ ——土壤的泊松比。

显然,式(9)前一项为明管的临界压力值;后一项反映了土壤反力的影响,由于土壤的支撑作用,提高了柔性管的临界压力。

实际的埋地钢管的稳定问题与 Luscher 模型并不一致,另外油气管道的壁厚一般大于发生弹性失稳所对应的壁厚,而按弹性失稳算出的临界压力要高于弹塑性失稳或强度失效的临界压力。因此,用式(9)验算埋地钢管的稳定性,则要谨慎选择安全系数。GBJ69<sup>[18]</sup>取式(9)的稳定安全系数为 2.5,这样埋地钢管的稳定性条件为:

$$P_{cr} \cdot D/W_e > 2.5 \quad (11)$$

## 四、设计计算示例

$\phi 720 \times 12$  的 X60 钢管在开沟敷设时穿过二类地区<sup>[1]</sup>的三级公路,回填土为粘土,靠人工夯实。该三级公路可能有重车行驶,交通荷载按二级干线公路考虑。管顶到路面的距离为 1.6 m,土的容重  $\gamma_{so} = 1.96 \times 10^4 \text{ N/m}^3$  (已考虑路面的重量),取回填土的反作用模量  $E' = 3.0 \text{ MPa}$ ,变形模量  $E_{so} = 4.0 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu_{so} = 0.33$ 。在下列三种情况下:

(1) 套管;

(2) 输油管 取  $P = 4.5 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ;

(3) 输气管 取  $P = 4.5 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T = -20^\circ\text{C}$ 。

分别验算钢管的强度、刚度和稳定性。

在下面的计算中,  $D = 0.72 \text{ m}$ ,  $t = 0.012 \text{ m}$ ,  $I_w = 1.44 \times 10^{-7} \text{ m}^4/\text{m}$ ,  $D_m = 0.708 \text{ m}$ ,  $R_m = 0.354 \text{ m}$ ,  $E = 206 \text{ GPa}$ ,  $EI_w = 29664 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,  $\mu = 0.3$ ,  $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_s = 415 \text{ MPa}$ ,  $0.72\sigma_s = 299 \text{ MPa}$ , 焊缝系数  $\eta = 1.0$ 。

### 1、荷载计算

假定管沟为人工开挖的梯形沟,按 GB50251、GB50253,管顶处沟宽  $B_d \approx 2.2 \text{ m}$ 。填土荷载  $W_d$  分别按三种方法计算:

(1) 按“窄沟”条件<sup>[2,7]</sup>,  $W_d = 20.57 \text{ kN/m}$ ;

(2) 按“宽沟”条件<sup>[7]</sup>,  $W_d \approx 31 \text{ kN/m}$ ;

(3) 按管顶上填土棱柱体重量计算<sup>[3]</sup>,  $W_d$

$= 22.58 \text{ kN/m}$ 。故实际情况为“窄沟”条件,  $W_d = 20.57 \text{ kN/m}$ 。按前面推荐的填土荷载计算方法,取  $W_d$  设计值为  $22.58 \text{ kN/m}$ 。交通荷载  $W_l$  由 1 000 kN 平板挂车决定,按 Spangler 法<sup>[5]</sup>,  $W_l = 24.07 \text{ kN/m}$ 。

总有效竖直荷载  $W_e = W_d + W_l = 46.65 \text{ kN/m}$ 。

### 2、刚度、稳定性验算

套管、输油管、输气管三种情况下,刚度和稳定性验算的荷载是一样的。

取基床包角  $2\alpha = 30^\circ$ <sup>[3]</sup>, 滞后系数  $D_L = 1.5$ <sup>[1,2]</sup>。按式(2),管环水平挠度  $\Delta x = 9 \text{ mm}$ ,  $\Delta x/D = 0.012$ 。又  $0.003 \cdot \frac{D}{100t} \cdot \frac{\sigma_s}{240} = 0.031$ , 故  $\frac{\Delta x}{D} < 0.03$ , 钢管满足刚度条件。

对式(9)两边关于  $n$  求导,由  $\frac{dP_{cr}}{dn} = 0$  得:

$$n^2 - 1 = \sqrt{\frac{E_{so}(1 - \mu^2)R_m^3}{(1 + \mu_{so})EI_w}} \quad (12)$$

将已知数据代入式(12)得  $n = 1.7$ 。取  $n = 2$ ,由式(9)算得  $P_{cr} = 3.207 \text{ MPa}$ ,  $P_{cr} \cdot D/W_e = 49 > 2.5$ , 钢管不会失稳。

### 3、强度验算

如前所述,若忽略套管的温差作用(因温差一般不大),可认为满足刚度条件的套管也满足强度条件。

按 Spangler 公式<sup>[3,4]</sup>,取  $2\alpha = 30^\circ$ ,可算得管环最大弯曲应力  $\sigma_m = 65.623 \text{ MPa}$ 。按 Barlow 公式计算内压产生的环向薄膜应力  $\sigma_h = 132.75 \text{ MPa}$ 。由式(5)算得钢管总环向应力  $\sigma_c = (198.37 \text{ MPa}, 67.13 \text{ MPa})$ 。

对于输油管  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ,由式(6)得纵向应力  $\sigma_l = (-64.09 \text{ MPa}, -103.46 \text{ MPa})$ 。按最大剪应力理论,当量应力  $\sigma_e = (262.46 \text{ MPa}, 170.59 \text{ MPa})$ 。输油管的设计系数  $F = 0.6$ ,  $F \cdot \eta \cdot \sigma_e = 249 \text{ MPa}$ 。输油管满足式(7)、(8),即满足强度条件。

对于输气管  $\Delta T = -20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_l = (108.95 \text{ MPa}, 69.58 \text{ MPa})$ 。最大剪应力理论的  $\sigma_e = (198.37 \text{ MPa}, 69.58 \text{ MPa})$ 。又  $F = 0.5$ <sup>[1]</sup>,  $F \cdot \eta \cdot \sigma_e = 207.5 \text{ MPa}$ 。管壁应力满足式(7)、(8),即输气管道满足强度条件。

### 4、结果分析

管径为  $720 \times 12$  的 X60 钢管作套管使用,强

度、刚度、稳定性都足够,可降低钢级和减小壁厚。钢级高不利于疲劳控制。若使用 $\phi 720 \times 8$  A3 或 X52 钢管作套管,  $\Delta x/D = 0.028 < 0.03$ ,  $P_{cr} = 1.645 \text{ MPa}$ ,  $P_{cr} \cdot D/W_c = 25.4 > 2.5$ , 可满足刚度、稳定性要求。这也说明套管壁厚一般由刚度条件决定。

综上所述,分别按刚度、强度条件确定的 $\phi 720 \times 8$ 、 $\phi 720 \times 12$ 埋地穿越钢管的稳定性足够。

在缺少高性能厚壁钢管的情况下,从结构设计观点来看,用韧性较好(耐疲劳)的中低强度钢管作穿越公路及铁路的油气管道的保护套管是比较合理的。而输送管和套管之间绝缘可通过改进结构型式(如用高密度聚乙烯塑料管外衬输送管)来保证。现代高强度、高韧性和焊接性能优良的厚壁高级钢管以及焊接、施工、检验等技术的进步为取消套管打开了禁门,但是需要承受较高应力的直接穿越高强度厚壁钢管的疲劳强度值得关注,其强度设计理论有待完善。

参 考 文 献

- 1, GB50251-94, 输气管道工程设计规范。
- 2, GB50253-94, 输油管道工程设计规范。
- 3, CECS15:90, 埋地输油输气钢管道结构设计规范。
- 4, 邓道明 李育光:埋地柔性管道的应力和变形分析, 油气储运, 1998, 17(6)。
- 5, 邓道明 吴 斌等:穿越公路埋地管道的荷载计算, 油气储运, 1998, 17(4)。
- 6, Spangler, M. G. :Structural design of pipeline casing pipes, J. of the Pipeline Division, ASCE, Vol. 94, No. 1, Oct. , 1968.
- 7, Young, O. C. & Trott, J. J. : Structural Design of Pipelines, BURIED RIGID PIPES, 1984.
- 8, Pierce, R. N. etc: Design considerations for uncased road crossings, PLI, May. 1978.
- 9, McNorgan, J. D. :How to calculate distribution system stresses, PLI, Oct. 1990.
- 10, Howard, A. K. :Modulus of soil reaction values for buried flexible pipe, J. of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT1, Jan. 1977.
- 11, Prevost, R. C. : Design of non-pressure, very flexible buried pipe, Pipes & Pipelines International, May-June, 1983.
- 12, Gaylord, E. H. , Jr. & Gaylord, C. N. : Structural Engineering Handbook, 1990.
- 13, CAN/CSA-Z 184-M 92, 气体管线系统。
- 14, SYJ15-85, 原油长输管道穿跨越工程设计规范。
- 15, ANSI/ASME B 31. 4-1986, 液体输送管线系统。
- 16, ANSI/ASME B 31. 8-1982, 输配气管线系统。
- 17, Luscher, U. :Buckling of soil-surrounded tubes, J. of the soil

Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, No. SM6, Nov. , 1966.

- 18, GBJ69--84, 给水排水工程结构设计规范。
- 19, HDPE: pipe insulates cased road crossings, OGJ, Feb 13, 1989.

(收稿日期:1998-03-02)

编辑:张彦敏



题 录

运用正确手段进行地震成像 ..... 石 璟等  
《世界石油工业》1998 年第 6 期第 27 页

供油自动化系统  
在机场的应用 ..... 唐 柯 梁 平等  
《天然气与石油》1998 年第 2 期第 35 页

原油管道漏点定位技术 ..... 新世久等  
《石油学报》1998 年第 3 期第 93 页

金属储罐底板外侧阴极保护电位  
分布的解析算法 ..... 李相怡 翁永基  
《石油学报》1998 年第 3 期第 98 页

城市煤气泄漏报警控制系统的  
技术及其实施 ..... 袁 庚 朴贞花  
《城市煤气》1998 年第 6 期第 11 页

中亚地区输油管道现状  
及未来展望 ..... 牛跃进  
《世界石油工业》1998 年第 6 期第 62 页

液化石油气储罐排污管的  
电伴热带保温 ..... 孙铁柱  
《城市煤气》1998 年第 6 期第 17 页

用增长曲线预测油气田开发指标  
并评价调整效果 ..... 俞启泰  
《天然气工业》1998 年第 4 期第 40 页

特超稠油污水回掺降粘集输工艺 ..... 张振华等  
《石油学报》1998 年第 3 期第 125 页

节流管汇存在的问题  
及改进措施 ..... 陈惠玲  
《天然气工业》1998 年第 4 期第 91 页