

埋地长输管道热胀内力近似分析

崔孝秉

(华东石油学院)

提要 埋地长输管道热胀强度问题在石油管道工程及城市热力网工程中都存在, 它对工程的质量、投资及材耗等方面都有相当大的影响。本文用弹性抗弯铰力学模型代替弯头, 用分割迭代法进行分析, 近似算出埋地长输管道的热胀位移和热胀内力。经试验验证和有限元法计算对比, 表明本文所述方法具有良好的工程准确度。

一、前言

我国石油凝固点偏高, 常需加热输送。埋地长输管道一般在常温下施工敷设, 建成投产时管温升到设计数值。由于热胀, 管道产生相当大的热胀内力。倘若设计考虑不周, 则管道弯头部位横截面将出现过大的扁平变形, 妨碍通球清管, 降低油品输送量, 甚至引起破裂漏油事故。

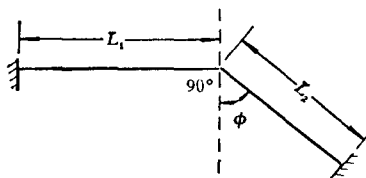


图 1

文献中关于这个问题的研究很少, 有些零散计算也误差较大, 不能用于长输管线, 1973年苏联 P. M. Сазонов 给出过“L”形管道许可臂长的计算公式^[1], 在规定预拉伸为热伸长量的 50% 的条件下, 公式为

$$L_1 + L_2 = \frac{4}{\beta^2 D_H E \alpha} \cdot \frac{[\sigma]}{\Delta t} \cdot \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi}$$
$$\left(\beta = \sqrt[4]{\frac{K D_H}{4 E I}} \right)$$

式中 L_1, L_2 为臂长, D_H 为管道外径, ϕ 为拐弯角度与 $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ 的差量, Δt 为管道升温值, α 为热胀系数, E 为弹性系数, $[\sigma]$ 为许用应力, K 为土壤的侧向压缩反力系数, I 为直管截

本文系王仁编委推荐, 于 1983 年 4 月 8 日收到。

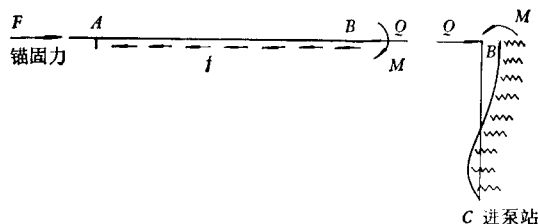


图 2

面惯性矩。按照此式,“L”型管道弯头处的热胀弯矩应为:

$$M = (L_1 + L_2) \beta^2 EI \alpha \Delta t \cdot \frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi}$$

由于没有考虑弯头柔性、土壤摩擦以及轴向力对直管伸长的限制,按此式计算 M 值必然总是大为偏高。当拐弯角趋向于零(即图1中 $\phi \rightarrow 90^\circ$)时,按此式计算的 M 并不趋向于零,反而趋向于无穷大,完全错误。所以,此式只能用于厚壁、小口径、大拐角的埋地短程热输管道,而不能用于近代化的薄壁大口径埋地长输石油管道。

1978年美国《管道工业》刊载 Peng Liang-Chaun 写的“埋地管线应力分析法”^[2],该文中曾对 90° 拐角的埋地“L”形管道热胀内力作过近似分析,给出弯头处热胀弯矩计算式如下:

$$M = \frac{1}{2\beta} \left[F + \frac{1}{K} \beta A E f - \sqrt{\left(F + \frac{1}{K} \beta A E f \right)^2 - F^2} \right]$$

式中 F 为长直管的热胀自锚力, A 为横截面积, K 为侧向土壤压缩反力系数与管道外径的乘积, f 为单位管长所受土壤摩擦力。此式在推导过程中只考虑长臂的热胀和摩擦,不计短臂的热胀和摩擦;只考虑短臂的弯曲和侧向土反力,不计长臂的弯曲和侧向土反力,而且完全不考虑弯头的柔性,故误差甚大。该文结合20英寸口径的管道升温 130°F 时给出的 M 值,其误差据我们核算超出500%。

根据我国石油管道工程发展的需要,近几年来我们在这方面作过一些分析和实验研究,本文是这些工作部分内容的综合。

二、计算模型的简化处理

埋地长输石油管道由许多大口径薄壁直管和薄壁弯头光滑焊接而成。除起点和终点锚固外,长输区间还有因工程设施必须增建的锚固约束点,以及由于土壤摩擦力约束形成的自然锚固区。因此一条长输管道的全线可以视为若干个独立的两端锚固约束的局部管道系的组合。

在局部管道系中,由于土壤的弹性和土壤的摩擦力,介于两个弯头之间的每根直管,热胀时一定同时向两端有所伸长。所以在该直管的轴线上,必有一个点无轴向位移,在它的两侧土壤摩擦力方向相反,该点可称为“驻点”。由于土壤约束的限制,热胀时管道系显著的弯曲变形只能发生在弯头的邻近区间。离开弯头后,管道的热胀弯曲变形衰减很快,驻点处的横向位移和截面转角完全可以忽略不计。因此驻点也相当于锚固点,不过这是

位置待定的锚固点。基于这些分析,可见局部管道系又可分割成若干个两端锚固的“L”形管道进行分析(可参看本文第四节图 10)。研究清楚“L”形管道热胀内力与臂长的关系后,不难由驻点处轴向力连续条件确定出局部管道系中全部驻点位置。

考虑到埋地长输石油管道的直管段比较长,弯头夹角比较小,弯头弧长比较短,因而弯头各截面内力相差也比较小的特点,我们在分析中将弯头的几何尺寸略去不计,而保留它的抗弯柔性,将它简化成能够传递弯矩的铰链模型,称为“弹性抗弯铰”,如图 3 所示。于是,长输管道可简化成空间折管系,“L”形管道可简化成由两根直管和一个弹性抗弯铰相连接的简单平面管道系。

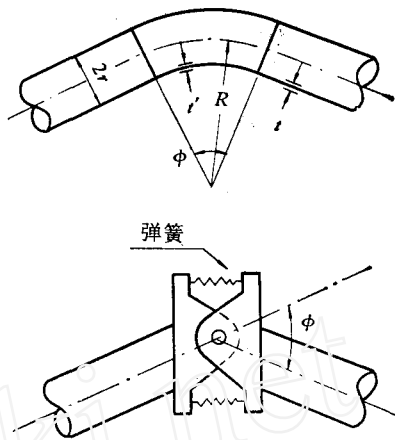


图 3

弹性抗弯铰传递的弯矩 M 应和它所代替的弯头的夹角变化量 $\Delta\phi$ 成正比,根据 E. C. Turner 的评定^[3],设 λ 为弯头参数, K 为弯头柔性系数,

$$K = \frac{1.65}{\lambda} = \frac{1.65r^2}{Rt'}$$

则应有:

$$\Delta\phi = \frac{KR\phi M}{EJ'}$$

这里 r 为管道平均半径, R 为弯头曲率半径, t' 为弯头壁厚, EJ' 为弯头截面抗弯矩, $J' \cong \pi r^3 t'$. 当 $\lambda < 1$ 时,此式误差最大不超过 3%. 当要求考虑内压对弯头柔性的影响时, K 值需用 Lodabaugh 系数修正^[4],将 K 除以一个与管道内压 p^* 有关的 n_s 值:

$$n_s = 1 + \frac{6p^*r}{Et'} \left(\frac{r}{t'} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{R}{r} \right)^{\frac{1}{3}}$$

三、水平“L”形管道的热胀内力分析

由长输管道分割成的“L”形管道大体上可分为水平“L”形和纵向“L”形两类。前者多见于平川地区,后者多见于丘陵地区。热胀时二者的受力情况略有差别,需要分开研究。下面首先考虑水平“L”形管道。

设有埋地水平“L”形管道如图 4 所示。图中 (a) 为弯头点的热胀位移几何关系; (b) 和 (d) 为直管的受力图, (c) 为弯头点的受力图。在 (b) 和 (d) 中我们描写侧向土壤反力时,采用了与管道横向位移 y_i 成比例的假定,同时还假定土壤摩擦力 q 沿轴向均匀分布。

设取 y_1 坐标轴和 y_2 坐标轴如图 4 所示,则分析热胀内力时,直管段有关的方程及边

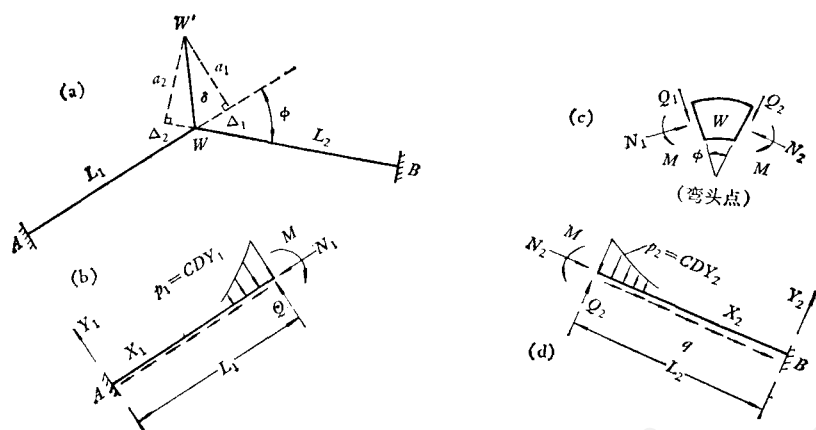


图 4

界条件如下:

$$\frac{d^4 y_i}{dx_i^4} + 4k^4 y_i = 0 \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

$$k^4 = \frac{cD}{4EJ}$$

$$(y_i)_{x_i=0} = 0 \quad \left(\frac{dy_i}{dx_i} \right)_{x_i=0} = 0$$

$$(y_i)_{x_i=L_i} = a_i \quad EJ \left(\frac{d^2 y_i}{dx_i^2} \right)_{x_i=L_i} = -M$$

$$EJ \left(\frac{d^3 y_i}{dx_i^3} \right)_{x_i=L_i} = -Q_i$$

$$\left(\frac{dy_1}{dx_1} \right)_{x=L_1} + \left(\frac{dy_2}{dx_2} \right)_{x=L_2} = \frac{KR\phi M}{EJ'} \quad (2)$$

此外,还有弯头端的热胀几何关系及弯头本身(弹性抗弯铰)的受力平衡关系:

$$\Delta_i = \alpha T L_i - \frac{q L_i}{2EF} - \frac{N_i L_i}{EF} \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{\Delta_2 + \Delta_1 \cos \phi}{\sin \phi} \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 \cos \phi}{\sin \phi} \quad (5)$$

$$(Q_1 - Q_2) \sin \frac{\phi}{2} + (N_1 - N_2) \cos \frac{\phi}{2} = 0 \quad (6)$$

$$(Q_1 + Q_2) \cos \frac{\phi}{2} - (N_1 + N_2) \sin \frac{\phi}{2} = 0 \quad (7)$$

以上各式中 y_i 代表直管热胀时的横向位移, D 为管道外径(应包括保温层尺寸), L_i 为“L”形管道臂长, J 为直管的截面惯性矩, J' 为弯头的截面惯性矩. N_i 为直管上弯头端的轴向压力, Q_i 为剪力. Δ_i 为直管轴向的总伸长量, a_i 为直管在弯头端的横向位移. T 为管道升温值, α 为线胀系数, E 为弹性系数, F 为直管横截面积, c 为侧向土壤

压缩反力系数。

根据以上各方程式和边界条件, 可以解出热胀时的横向位移曲线 $y_i(x_i)$, 以及其它诸未知量 a_i , Δ_i , Q_i , N_i 及 M 等, 都是三角函数和双曲函数的表达式, 详见文 [5]。注意到石油长输管道管段较长, 一般情况下总能满足 $(kL) \geq 3$, 我们可以对双曲函数进行简化。经简化后所得到的对称情况 ($L_1 = L_2 = L$) 下的横向位移曲线 $y(x)$ 及弯头端内力 N 和 M 表达式如下:

$$y = \frac{a}{\text{sh} kL} \{ [(1 - C_M) \cos kL + (1 + C_M) \sin kL] \sin kx \text{sh} kx + (\cos kL + C_M \sin kL) (\cos kx \text{sh} kx - \sin kx \text{ch} kx) \} \quad (8)$$

$$N = 2k^3 EJ a (1 + C_M) \text{ctg}(\phi/2) \quad (9)$$

$$M = 2k^2 EJ C_M a \quad (10)$$

其中:

$$a = \frac{(\alpha TEF - \frac{1}{2} qL) \text{tg}(\phi/2)}{2k^3 EJ \left[1 + C_M + \frac{F \text{tg}^2(\phi/2)}{2k^3 JL} \right]} \quad (11)$$

$$C_M = \frac{1}{1 + KkR\phi(J/J')} \quad (12)$$

系数 C_M 是大于零小于 1 的正值, 它反应出弯头柔性对热胀弯矩的缩减效应。

当“L”形管道两臂不对称时, 弯头热胀弯矩的表达式为:

$$M = \frac{C_M \left[\alpha TEF - \frac{1}{2} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2}{L_1 + L_2} \right) q \right] \text{tg}(\phi/2)}{k \left[1 + C_M + \frac{F \text{tg}^2(\phi/2)}{k^3 J(L_1 + L_2)} \right]} \quad (13)$$

不难看出, 如果在 (13) 式中用平均臂长取代 $\frac{1}{2}(L_1 + L_2)$ 的话, 其结果很接近于 (10) 式。

由于显著的热胀弯曲位移及弯曲内力只发生在弯头邻近区域内, 其值基本上只与“L”形两臂长度之和有关系, 而与其差的关系不大, 因而上述两臂对称“L”形管道热胀内力的分析结果具有较广泛的实用范围。

当需要考虑管道内压对热胀内力的影响时, 在以上诸表达式中, K 值应除以系数 n_e , 同时数组 (αTEF) 应改为 $[\alpha TEF + (1 - 2\mu)\pi r^2 p^*]$ 。其中 p^* 为管道内压, μ 为管材的波桑系数。

图 5 及图 6 所示, 为管道热胀内力随弯头夹角 ϕ 变化的曲线。当 $\phi = 90^\circ$ 时, N 和 M 都不大, 当 $\phi = 0^\circ$ 时, N 达到最大值, M 则为零。最大的热胀弯矩 $M_{\max}$ 并不发生在 ϕ 值较大的弯头内, 而发生在 ϕ 值较小的弯头内。按极值条件可以求得具有最大弯矩值的夹角值 ϕ_m , 它应由下式计算:

$$\frac{F}{k^2 J(L_1 + L_2)} [1 + C_M KkR(J/J') \sin \phi_m] \text{tg}^2 \left(\frac{\phi_m}{2} \right) + C_M KkR(J/J') \sin \phi_m = 1 + C_M \quad (14)$$

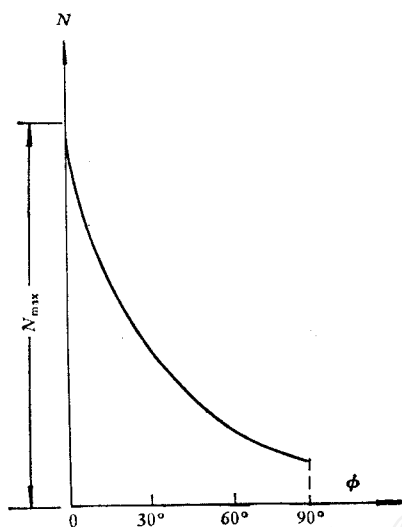


图 5

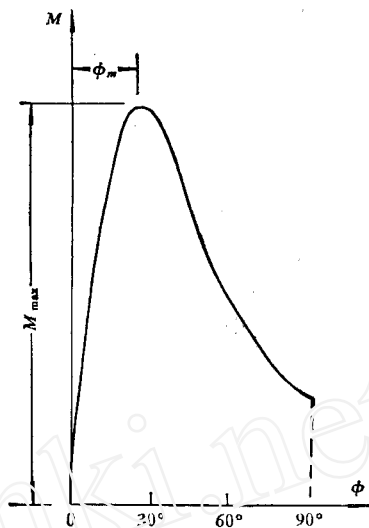


图 6

此式表明: ϕ_m 值主要取决于管道尺寸及弯头尺寸. ϕ_m 虽然与土壤反力系数 c 也有关系, 但影响较弱. ϕ_m 值与摩擦力 q 及升温值 T 完全无关. 因此对于同一条长输管线, ϕ_m 的变化范围不大. 设取 $r = 36\text{cm}$, $t = 0.8\text{cm}$, $t' = 1.2\text{cm}$, $(L_1 + L_2) = 200\text{m}$, $c = 0.4\text{kg/cm}^3$, $E = 2.1 \times 10^6\text{kg/cm}^2$, 可得 $\phi_m = 28.6^\circ$. 若改取 $(L_1 + L_2) = 100\text{m}$, 则 $\phi_m = 22.5^\circ$, 改变不大.

(13) 式表明: 增加土壤摩擦力 q 总能使热胀弯矩降低. 但增加侧向土壤压缩反力系数 c 只能使夹角较小的弯头 M 值降低, 而不能使大夹角弯头 M 值降低, 甚至还可能有所增加.

如果“L”形管道两臂很长, 则产生所谓“过渡段长度” L_{go} , 在距离弯头不超过 L_{go} 的范围内直管各截面有轴向热胀位移, 超出 L_{go} 以远, 就没有轴向热胀位移, 直管处于自锚状态. L_{go} 值在埋地管道计算中有许多用处, 不难求得

$$L_{go} = \sqrt{Z^2 + \left(\frac{2Z}{q}\right) \alpha T E F} - Z \quad (15)$$

$$Z = \frac{\lg^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{k^3 r^2 (1 + C_M)}$$

L_{go} 与许多因素有关, 但和弯头夹角 ϕ 的关系最突出, 是 ϕ 的增函数. 用 L_{go} 作为臂长 L 代入 (8) 式至 (11) 式, 可以算出自锚状态下的热胀位移和内力, 在设计上可作为上限值参考.

为校核热胀弯矩计算式 (11) 的精度, 我们曾用美国 SAP4 结构分析通用程序, 结合北京市直埋热力管道的参数, 计算出在各种 ϕ 值和各种 (R/d) 值情况下, 埋地水平“L”形管道弯头中部横截面内的 M 值, 然后用本文 (10) 式求得的结果相对比, 对比的情况部分如图 7 所示. $\phi = 30^\circ$ 时分歧在 5% 以下, $\phi = 90^\circ$ 时分歧最大约为 20%, 详见

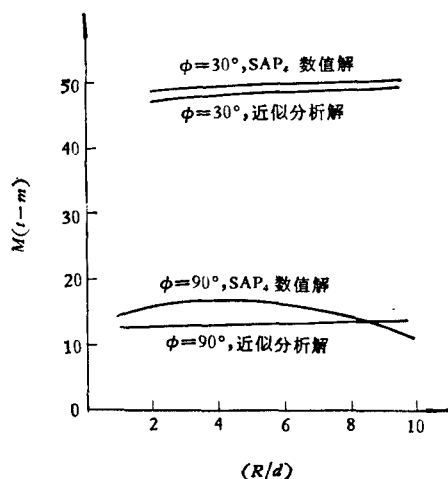


图 7

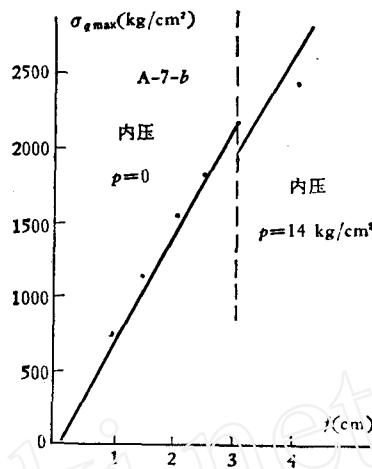


图 8

● 实测值 — 计算值

文[6]。此外,文[7]用有限单元法计算埋地水平“L”型管道热胀内力和位移的结果,与本文分析结果也基本一致。

1977年至1979年我们和北京市煤气热力设计所、北京第四市政工程公司等单位协作进行《热力管道直埋敷设试验研究》,曾对埋地水平“L”形管道的热胀应力和位移作过三次冷推模拟试验,和多次循环加温的热胀应力实测试验。试验所用管道的管径 $d = 52.9\text{cm}$, 壁厚 $t = 0.8\text{cm}$, 臂长 $L = 18.3\text{m}$ 。管顶复土深度为 1.2m , 温升值 $T = 120^\circ\text{C}$, 弯头夹角 $\phi = 90^\circ$, $R = 2.5d$ 。试验结果表明,本文所给分析解无论计算位移、内力或应力,都具有良好的工程准确度。图8所示,为一次冷推模拟试验的结果对比。图中 $\sigma_{q\max}$ 为弯头中部横截面上最大的环向弯曲应力, f 为模拟热胀量 (αTL) 的冷推位移。图中实线代表按本文分析的计算结果,黑点代表实验测量所得的结果。

四、纵向“L”形管道的热胀内力分析

经过山区和丘陵地带的埋地热输管线,位于铅直平面内的“L”形特多,它们称为纵向“L”形管道。弯头顶朝下,曲率中心在上的纵向“L”形管道,其热胀内力分析和水平“L”形管道完全一样,只是土壤压缩反力系数 c 比较大。弯头顶朝上,曲率中心在下的纵向“L”形管道,热胀情况有些特点,要具体分析。过山区或丘陵地带的埋地管道,管顶复土一般不深,热胀时,弯头向上顶土,管道所受土壤反力接近于被顶土体的重量,近似于常

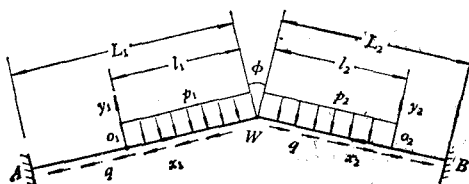


图 9

数,而不是与管道位移成正比。

我们略去离弯头较远处管道的微小弯曲位移,假设弯头近旁向上弯起顶土的管段长度为 l_1 和 l_2 ,取坐标原点如图 9 所示,则分析纵向“L”形管道热胀内力时,直管段部分有关的方程及边界条件应如下:

$$EJ \frac{d^4 y_i}{dx_i^4} + p_i = 0 \quad (i = 1, 2) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} (y_i)_{x_i=0} &= 0 \quad \left(\frac{dy_i}{dx_i} \right)_{x_i=0} = 0 \\ \left(\frac{d^2 y_i}{dx_i^2} \right)_{x_i=0} &= 0 \quad (y_i)_{x_i=l_i} = a_i \\ EJ \left(\frac{d^2 y_i}{dx_i^2} \right)_{x_i=l_i} &= -M_i \quad EJ \left(\frac{d^3 y_i}{dx_i^3} \right)_{x_i=l_i} = -Q_i \\ \left(\frac{dy_1}{dx_1} \right)_{x_1=l_1} + \left(\frac{dy_2}{dx_2} \right)_{x_2=l_2} &= \frac{KR\phi \bar{M}}{EJ'} \end{aligned} \quad (17)$$

弯头端的热胀几何关系,及弯头本身的受力平衡关系,完全和(3)式至(7)式相同。经积分后可得

$$y_i = -\frac{p_i x_i^4}{4! EJ} + \frac{x_i^3}{l_i^3} \left(a_i + \frac{p_i l_i^4}{4! EJ} \right) \quad (18)$$

其中 l_1, l_2, a_1, a_2 连同轴向压力 N_1, N_2 , 需由下列六式构成的非线性代数方程组算出:

$$a_1 = \frac{1}{EF \sin \phi} \left[L_2 \left(\alpha TEF - \frac{qL_2}{2} - N_2 \right) + L_1 \left(\alpha TEF - \frac{qL_1}{2} - N_1 \right) \cos \phi \right] \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{1}{EF \sin \phi} \left[L_1 \left(\alpha TEF - \frac{qL_1}{2} - N_1 \right) + L_2 \left(\alpha TEF - \frac{qL_2}{2} - N_2 \right) \cos \phi \right] \quad (20)$$

$$l_1 = \frac{\sqrt[4]{72EJa_1/p_1}}{\left[3 - \frac{l_1 + \left(\frac{p_2 l_2^2}{p_1 l_1^2} \right) l_2}{(1/2)(l_1 + l_2) + KR\phi(J/J')} \right]^{1/4}} \quad (21)$$

$$l_2 = \frac{\sqrt[4]{72EJa_2/p_2}}{\left[3 - \frac{\left(\frac{p_1 l_1^2}{p_2 l_2^2} \right) l_1 + l_2}{(1/2)(l_1 + l_2) + KR\phi(J/J')} \right]^{1/4}} \quad (22)$$

$$N_1 = \frac{3}{8} (Ap_1 l_1 + Bp_2 l_2) - \frac{3EJa_1}{l_1^3} \left[A + B \left(\frac{a_2 l_1^3}{a_1 l_2^3} \right) \right] \quad (23)$$

$$N_2 = \frac{3}{8} (Bp_1 l_1 + Ap_2 l_2) - \frac{3EJa_2}{l_2^3} \left[B + A \left(\frac{a_2 l_1^3}{a_1 l_2^3} \right) \right] \quad (24)$$

其中: $A = \text{ctg}(\phi/2) - \text{tg}(\phi/2)$, $B = \text{ctg}(\phi/2) + \text{tg}(\phi/2)$

采用循环迭代法可由以上六式求得 l_1, l_2, a_1, a_2 和 N_1, N_2 。如果迭代从(19)、(20)两式开始。取自锚状态下的 N_1 和 N_2 作为(19)式和(20)式右边 N_1 和 N_2 的零次近似值,一般情况下,第二次近似解就足够准确。详见文[9]。求得 l_1 和 l_2 后,弯头的热胀弯矩值

价于每根直管所受全部轴向作用力的平衡条件. 参照图 10 所示, 设驻点 P_i 所在直管段左右两端的轴向压力分别为 $N_{i左}$ 和 $N_{i右}$, 单长土壤摩擦力为 q , 则应有:

$$S_i = \frac{1}{2} \left[L_i - \frac{1}{q} (N_{i左} - N_{i右}) \right] \quad [i = 1, 2, 3, \dots (n-1)] \quad (27)$$

这是关于 S_i 的非线性代数方程组. 其中 $N_{i左}$ 应该从折点为 W_i 的“L”形管道中计算, 它和 S_i 及 $(L_{i-1} - S_{i-1})$ 有关; $N_{i右}$ 应该从折点为 W_{i+1} 的“L”形管道中计算, 它和 $(L_i - S_i)$ 及 S_{i+1} 有关. 因此, 一般说来由 (27) 方程组求 S_i 不太容易. 但是, 对于长输管道的情况, 求解 S_i 并不困难, 因为长输管道的直管段比较长, $N_{i左}$ 、 $N_{i右}$ 随其所在“L”形管道臂长的变化很弱, 一般情况下臂长误差 $(\Delta L/L)$ 总是大于它所引起的轴向力误差 $(\Delta N/N)$. 因此可以用迭代法从方程 (27) 求解驻点位置 S_i . 为此先选取一组合理的零次近似解 $S_{i(0)}$, 从而给出各“L”形管道臂长的零次近似值, 并由这些“L”形管道中算出相应的零次近似轴向压力值 $N_{i左(0)}$ 和 $N_{i右(0)}$, 然后代入方程 (27) 的右端, 即可得出第一次近似解 $S_{i(1)}$. 重复迭代直至 S_i 的数值稳定为止. 如何选 $S_{i(0)}$ 比较关键, 我们推荐用过渡段长度插值, 按下式计算:

$$S_{i(0)} = \frac{(L_{go})_{i左} L_i}{(L_{go})_{i左} + (L_{go})_{i右}} \quad (28)$$

其中 $(L_{go})_{i左}$ 和 $(L_{go})_{i右}$ 分别代表按照弯头 W_i 和弯头 W_{i+1} 算得的过渡段长度. 采用 (28) 式, 则计算 S_i 值的迭代过程收敛很快. 一般第二次或第三次近似解足够准确^[10].

此外, 由于在长输管线上夹角 ϕ 都较小, $N_{i左}$ 和 $N_{i右}$ 的计算过程可以简化. 碰到不等臂“L”形管道时, 可以折换成等臂“L”形管道进行计算 (按平均臂长折换). 这对确定 S_i 引起的误差很小.

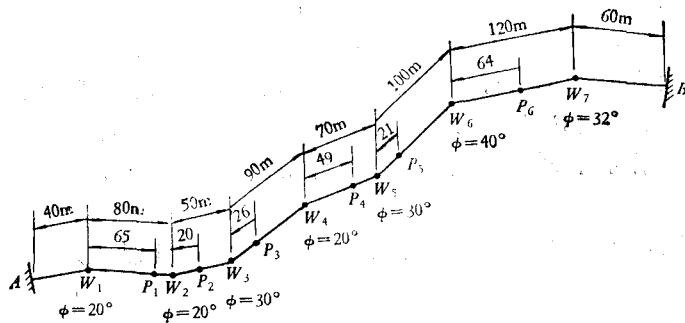


图 11

作为例题, 在图 11 中给出了一条纵向埋地的局部管道系. 它含有八根直管七个弯头. 计算其热胀内力时, 取用了下列基本数据: $\phi 720 \times 8$, $T = 60^\circ\text{C}$, $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{cm/cm}^\circ\text{C}$, $E = 2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$, 顶朝上“L”形的 $p_1 = p_2 = 20 \text{kg/cm}$, $q = 20 \text{kg/cm}$, 顶朝下“L”形的 $c = 2 \text{kg/cm}^3$, $q = 20 \text{kg/cm}$. 各段直管长度及各弯头夹角皆标注在图 11 中. 经过三次迭代后求得六个驻点位置如图所示. 详细计算过程见文 [10]. 弯头处的热胀内力计算结果注在图的右下方表中.

参 考 文 献

- [1] Тамчук, А. В., Бесканальная Прокладка Теплотрасс (1975), 60—64.
- [2] Peng, L. C., *Pipe Line Industry*, 48, 5 (May, 1978), 65—74.
- [3] Turner, C. E. and Ford, H., *Proc. Instn. Mech. Engrs*, 171 (1957), 513.
- [4] Rodabaugh, E. C. and George, H. H., *Trans ASME*, 79, (1957), 939.
- [5] 崔孝秉, 埋地长输管道水平弯头的升温载荷近似分析, 华东石油学院学报, 2(1978).
- [6] 崔孝秉, “L”形及“Z”形直埋热力管道的内力计算, 华东石油学院学报, 3(1981).
- [7] 蔡强康, 吕英明, 埋地长输管线的内力和应力计算的进一步研究, 华东石油学院学报, 1(1980).
- [8] 崔孝秉, 埋地长输管道纵向弯头温度内力的近似分析, 华东石油学院学报, 2(1980).
- [9] 崔孝秉, 两臂不对称埋地纵向弯头的温度内力近似分析, 华东石油学院学报, 2(1980).
- [10] 崔孝秉, 埋地长输管道全线热胀强度问题的分割算法, 华东石油学院学报, 1(1981).

APPROXIMATE ANALYSIS OF THE THERMAL INTERNAL FORCES IN A LONG UNDERGROUND PIPE LINE

Cui Xiaobing

(Huadong Petroleum Institute)

Abstract

There are a few published papers on the theoretical analysis of thermal internal forces in a long underground pipeline. Some calculations^[1,2] in which the elbow flexibility was completely neglected resulted in large errors. In this paper an approximate analysis of this problem is given by dividing the pipeline into many “L”-type sections. The dividing points on stright pipes can be determined by solving a set of non-linear algebraic equations by the method of successive approximation from the continuity condition of axial force. In order to simplify the calculation every elbow in the pipeline is treated as a special kind of hinge named “elastic flexure-resisting hinge”. The process of successive approximation converges very fast when the ration of imagined “moving portion length” corresponding to the elbows at two ends of each stright pipe is used to find he initial approximate dividing point on each stright pipe. As an example. The thermal internal forces in an underground pipeline lying in a vertical plane with eight stright pipes and seven elbows were calculated with third approximation.

The main results obtained in this paper are in good agreement with many experimental results, and the results calculated by he finite element method.