

## 设计计算

## 有/无固定墩跨越管道的内力和变形比较

邓道明\* 张庆元

金劲松

(西南石油学院)

(北京大学)

(中国石油天然气管道局秦皇岛输油公司)

邓道明 张庆元等:有/无固定墩跨越管道的内力和变形比较,油气储运,1999,18(6) 17~20.

**摘 要** 考虑几何非线性,导出了有固定墩跨越管道的内力和挠度计算公式,并从中推荐了简单实用的计算式。通过比较有/无固定墩跨越管道的内力和挠度,得出结论:固定墩减小了管道的挠度、轴向拉力及当量轴向拉力,增大了轴向压力及应量轴向压力;当当量轴向力为压力/拉力时,无固定墩跨越管道的最大弯矩大于/小于有固定墩时的值;有固定墩跨越的管道嵌固端的弯矩与跨中的弯矩相比,绝对值大,无固定墩跨越管道的两者大小关系主要取决于横向反力系数的值。基于静力分析,认为低温管道、离压缩机站较远的输气管道以及常温输送的成品油管道,跨越时可不设置锚固墩;输热油管道是否设置锚固墩宜作方案比较。

**主题词** 管道 跨越 固定墩 对比 分析

油气管道跨越沟渠时,特别是当正温差(操作温度与安装温度之差)和内压较大时,常常在出土端设置锚固墩,以隔断跨越段与埋地段的相互作用。安装锚固墩增加了工程造价,给管道防腐和防水处理增加了难度,相应地给管道的安全带来隐患,一旦锚固墩处管道发生泄漏,维修很不方便。因此,生产现场要求少用锚固墩的呼声越来越高。然而,设计人员关心的是,取消锚固墩后跨越管道的内力和变形有何变化?锚固墩是否可以取消?考虑管梁的几何非线性和埋地段土壤轴向摩擦力的物理非线性,导出了有/无固定墩单跨管道的内力和变形计算式,以供设计时选用。针对有/无固定墩两种情况,对跨越管道的内力和变形作了比较分析。

无固定墩两端直接埋地单跨管道的内力和变形计算参阅文献[1],以下讨论有固定墩单跨管道的内力和变形计算。

## 一、有固定墩跨越管道的内力和变形

### 1、当量轴向力 $S_0$ 为拉力时的解

如图 1 所示两端嵌固的跨越管道的挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = S_0 y + M_0 + \frac{1}{2} q x^2 - \frac{1}{2} q L x \quad (1)$$

式中  $E$  —— 管材的弹性模量;

$I$  —— 管道横截面的惯性矩;

$y$  —— 管道的挠度;

$M_0$  —— 管道在嵌固端的弯矩;

$q$  —— 管道所受到的横向荷载<sup>[1]</sup>;

$L$  —— 跨越长度;

$S_0$  —— 管道的当量轴向拉力。

$$S_0 = N_0 - N_p \quad (2)$$

$$N_p = p \frac{\pi}{4} d^2 \quad (3)$$

$N_0$  —— 管道的轴力,以拉力为正;

$p$  —— 管道承受的内压;

$d$  —— 管道的内径。

跨越管段轴向应变的几何方程为

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 \quad (4)$$

式中  $\epsilon_x$  —— 管道的轴向应变;

$u$  —— 管道的轴向位移。

轴向应变的热弹性关系为

$$\epsilon_x = \alpha \Delta T + \frac{1}{E} \left( \frac{N_0}{F} - \mu \sigma_h \right) \quad (5)$$

式中  $\alpha$  —— 管材的线性膨胀系数;  
 $\mu$  —— 管材的泊松比;  
 $\Delta T$  —— 管道的操作温度与安装温度之差;  
 $F$  —— 管道的金属截面积;  
 $\sigma_h$  —— 内压  $p$  引起的管道环向应力。

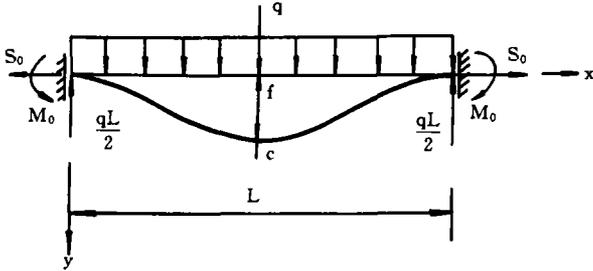


图 1 有固定墩的跨越管道

根据对称性条件、边界条件,可得管道当量轴向拉力  $S_0$  计算式

$$\epsilon_{ip} + \frac{\psi^2}{\lambda^2} + \frac{c_f}{6\psi^6} \left( \frac{3\psi^2}{\text{th}^2\psi} + \frac{9\psi}{\text{th}\psi} - 5\psi^2 - 12 \right) = 0 \quad (6)$$

式中  $\epsilon_{ip} = \alpha\Delta T + \frac{1}{E} \left( \frac{N_p}{F} - \mu\sigma_h \right) \quad (7)$

$$\lambda^2 = \frac{L^2 F}{4 I} \quad (8)$$

$$c_f = \frac{q^2 L^6}{128 E^2 I^2} \quad (9)$$

$$\psi = \frac{kL}{2} \quad (10)$$

$$k = \sqrt{\frac{S_0}{EI}} \quad (11)$$

端部弯矩  $M_0$  为

$$M_0 = \frac{qL^2}{4\psi^2} \left( \frac{\psi}{\text{th}\psi} - 1 \right) \quad (12)$$

跨中弯矩  $M_C$  为

$$M_C = -\frac{qL^2}{4\psi^2} \left( 1 - \frac{\psi}{\text{sh}\psi} \right) \quad (13)$$

跨中挠度  $f$  为

$$f = \frac{qL^4}{16EI\psi^3} \left( \frac{1}{\text{sh}\psi} - \frac{1}{\text{th}\psi} + \frac{\psi}{2} \right) \quad (14)$$

当  $\psi$  值较小时,利用幂级数展开式,  $S_0$ 、 $M_0$ 、 $M_C$ 、 $f$  值可分别由式(15)、(16)、(17)、(18)计算:

$$\psi = \sqrt{\frac{\frac{2}{945}c_f - \epsilon_{ip}}{\frac{1}{\lambda^2} + \frac{c_f}{1050}}} \quad (15)$$

$$M_0 = \frac{qL^2}{12} \left( 1 - \frac{\psi^2}{15} \right) \quad (16)$$

$$M_C = -\frac{qL^2}{24} \left( 1 - \frac{7\psi^2}{60} \right) \quad (17)$$

$$f = \frac{qL^4}{384EI} \left( 1 - \frac{\psi^2}{10} \right) \quad (18)$$

## 2、当量轴向力 $S_0$ 为压力时的解

当量轴向力  $S_0$  为压力时

$$N_0 = N_p - S_0 \quad (19)$$

$S_0$ 、 $M_0$ 、 $M_C$ 、 $f$  的计算式分别为<sup>(2)</sup>

$$\frac{\psi^2}{\lambda^2} + \frac{C_f}{6\psi^6} \left( 5\psi^2 + \frac{3\psi^2}{\text{tg}^2\psi} + \frac{9\psi}{\text{tg}\psi} - 12 \right) = \epsilon_{ip} \quad (20)$$

$$M_0 = \frac{qL^2}{4\psi^2} \left( 1 - \frac{\psi}{\text{tg}\psi} \right) \quad (21)$$

$$M_C = -\frac{qL^2}{4\psi^2} \left( \frac{\psi}{\sin\psi} - 1 \right) \quad (22)$$

$$f = \frac{qL^4}{16EI\psi^3} \left( \frac{1}{\sin\psi} - \frac{1}{\text{tg}\psi} - \frac{\psi}{2} \right) \quad (23)$$

当  $\psi$  较小时,式(20)~(23)简化成

$$\psi = \sqrt{\frac{\epsilon_{ip} - \frac{2}{945}c_f}{\frac{1}{\lambda^2} + \frac{c_f}{1050}}} \quad (24)$$

$$M_0 = \frac{qL^2}{12} \left( 1 + \frac{\psi^2}{15} \right) \quad (25)$$

$$M_C = -\frac{qL^2}{24} \left( 1 + \frac{7\psi^2}{60} \right) \quad (26)$$

$$f = \frac{qL^4}{384EI} \left( 1 + \frac{\psi^2}{10} \right) \quad (27)$$

## 3、 $S_0$ 是拉力还是压力的判定

由式(15)或式(24)可知

当  $\epsilon_{ip} > \frac{2}{945}c_f$  时,  $S_0$  为压力;

当  $\epsilon_{ip} = \frac{2}{945}c_f$  时,  $S_0 = 0$ ;

当  $\epsilon_{ip} < \frac{2}{945}c_f$  时,  $S_0$  为拉力。

当  $S_0 = 0$  时

$$M_0 = \frac{qL^2}{12} \quad (28)$$

$$M_C = -\frac{qL^2}{24} \quad (29)$$

$$f = \frac{qL^4}{384EI} \quad (30)$$

## 4、线性解

$$N_0 = (\mu\sigma_h - \alpha E\Delta T)F \quad (31)$$

$M_0$ 、 $M_C$ 、 $f$  分别按式(28)、(29)、(30)计算。

## 二、计算结果及其分析

### 1、有固定墩跨越管道

表 1 列出了跨长  $L=16$  m 的  $\phi 325 \times 8$  钢管的内

力和挠度值。输油时  $q=1\ 330\ \text{N/m}$ , 输气时  $q=811\ \text{N/m}$ 。通过分析计算结果, 得出以下结论。

(1) 由于有固定墩跨越管道挠度不很大,  $S_0$ 、 $N_0$  值主要决定于  $p$ 、 $\Delta T$  和管道规格, 其它参数 (如  $L$ 、 $q$ ) 对  $S_0$ 、 $N_0$  影响不大。

(2) 非线性精确解和线性解存在规律性的关系。

①  $N_0$ (精确)  $> N_0$ (线性), 这是由于非线性精确解考虑了管道挠曲对轴向拉力的增加作用。

② 当  $S_0$  为压力时,  $|M|$ (精确)  $> |M|$ (线性),  $f$ (精确)  $> f$ (线性); 当  $S_0$  为拉力时,  $|M|$ (精确)  $< |M|$ (线性),  $f$ (精确)  $< f$ (线性)。其原因是非线性解考虑了  $S_0$  对管道弯曲的影响。

(3) 将级数解和精确解进行比较,  $S_0$ 、 $N_0$  计算值相差很小, 这是因为在简化方程 (6) 和 (20) 时, 用级

数展开  $1/\text{th}\psi$ 、 $1/\text{tg}\psi$  所取项数较多 (前 4 项) 之故。式 (16)~(18)、式 (25)~(27) 计算出的  $M$ 、 $f$  值与精确解之间的误差随  $\psi$  值的增大而增大。从精度和简单实用考虑, 可用式 (15) 或 (24) 计算  $S_0$ , 用式 (12)~(14) 或式 (21)~(23) 计算弯矩和挠度。

(4) 当挠度很小时, 线性理论计算的內力和挠度值与精确解比较接近。

### 2、有/无固定墩跨越管道的內力和挠度比较

表 2 列出了有/无固定墩跨越钢管 ( $\phi 325 \times 8$ 、 $L=16\ \text{m}$ 、 $p=4.0\ \text{MPa}$ ) 的內力和挠度值。管道相关参数取值同前, 土壤与管道相互作用参数取值为: 土壤为粘土, 管顶埋深  $1.2\ \text{m}$ , 轴向反力系数  $c_{x0}=3.8\ \text{N/cm}^3$ , 横向反力系数  $c_{y0}=3.5\ \text{N/cm}^3$ , 管外防腐层厚  $6\ \text{mm}$ 。

表 1  $\phi 325 \times 8$  钢管 ( $L=16\ \text{m}$ ,  $p=4.0\ \text{MPa}$ ) 的內力和挠度

输送介质	$\Delta T$ (°C)	求解方法	$\psi$	$S_0$ (kN)	$N_0$ (kN)	$M_0$ (kN·m)	$-M_c$ (kN·m)	$f$ (cm)
油	50	精确解	1.844	1 095.69	-795.73	37.96	22.90	1.67
		级数解	1.843	1 095.27	-795.31	34.80	19.81	1.47
		线性解			-800.10	28.37	14.19	1.10
气	50	精确解	1.846	1 098.43	-798.47	23.17	13.99	1.02
		级数解	1.846	1 098.28	-798.31	21.23	12.09	0.90
		线性解			-800.10	17.30	8.65	0.67
气	-20	精确解	0.930 6	279.16*	579.13	16.38	7.85	0.62
		级数解	0.930 3	279.00*	578.96	16.30	7.78	0.61
		线性解			578.53	17.30	8.65	0.67

注 \* 为拉力, 其它  $S_0$  值为压力。

表 2  $\phi 325 \times 8$  跨越管道有/无固定墩的內力和挠度

输送介质	$\Delta T$ (°C)	有/无固定墩	$S_0$ (kN)	$N_0$ (kN)	$M_0$ (kN·m)	$-M_c$ (kN·m)	$f$ (cm)
油	50	有	1 095.69	-795.73	37.96	22.90	1.67
		无	1 069.00	-769.50	48.38	65.84	8.30
气	50	有	1 098.43	-798.47	23.17	13.99	1.02
		无	1 088.36	-788.40	30.27	41.15	5.17
气	-20	有	279.16*	579.13	16.38	7.85	0.618
		无	280.73*	580.69	8.26	13.36	2.08

注 \* 为拉力, 其它  $S_0$  值为压力。

比较有/无固定墩跨越管道的內力和挠度, 得到以下结论。

(1) 固定墩减小了跨越管道的挠度, 这是因为固定墩阻止了管道端部的横向位移和埋地管道向跨中的轴向位移。

(2) 固定墩使  $N_0$ (代数)、 $S_0$ (拉) 值减小,  $S_0$ (压)

增大。但挠度不很大时, 两者差别不大。这是因为无固定墩两端直接埋地跨越管道较大的挠曲变形增大了轴向力的拉力成分, 相应地减小了压力成分。因此, 不论有/无固定墩, 跨越长度  $L$  增大时,  $N_0$ (代数)、 $S_0$ (拉) 值增大,  $S_0$ (压) 减小。

(3) 当  $S_0$  为压力/拉力时, 无固定墩跨越管道的

# 天然气压力储罐低温低应力工况分析

石 磊\* 陆 巍

陆 贵 先

(广东惠州管道燃气有限公司)

(广东惠州燃料工业总公司)

石 磊 陆 巍等:天然气压力储罐低温低应力工况分析,油气储运,1999,18(6) 20~21。

**摘 要** 分析了寒冷地区的低温环境对天然气压力球罐性能的影响。结果表明,球罐在低温工况下,其材料将由延性状态向脆性状态转变,若工作压力超过特定值,将会产生低温脆性破坏。设计温度和压力的正确选择将对压力容器的造价和安全运行产生积极影响。以 2 000 m<sup>3</sup> 天然气压力球罐为例,对如何选择球罐的设计温度和低温低应力工况的控制方法进行了介绍。

**主题词** 天然气 球罐 设计温度 压力选择

新疆乌鲁木齐新近建成了 2 座 2 000 m<sup>3</sup> 天然气球形储罐,在容积和种类方面填补了大型球形容器的空白,并为乌鲁木齐市燃气用户的安全稳定用气奠定了基础。新疆是高寒地区,每年平均约有一个月的低温天气(小于或等于-20 ℃)。因此,球罐低温低应力工况是设计时要解决的问题之一。

## 一、球罐设计温度的选择

压力容器作为一种储气调峰设施,在城市管道

最大弯矩大于/小于有固定墩时的值。这也是因为无固定墩跨越管道的挠度较有固定墩大的缘故。

(4)有固定墩跨越管道其 $|M_0| > |M_C|$ ,无固定墩跨越管道的 $|M_0|$ 、 $|M_C|$ 大小关系主要取决于 $c_{y0}$ (横向阻力综合系数)值。当 $c_{y0}$ 值较大时, $|M_0| > |M_C|$ ;当 $c_{y0}$ 值较小时, $|M_0| < |M_C|$ 。由于敷设油气管道时,常常在沟底铺垫细粒软土,一般可认为 $c_{y0}$ 值不大,此时 $|M_0| < |M_C|$ 。

(5)一般情况下,埋地管段的轴向摩擦力处于弹性区,其原因是管道挠度引起的轴向位移不大。当 $c_{x0}$ (轴向摩擦力综合系数) $\rightarrow \infty$ , $c_{y0} \rightarrow \infty$ 时,无固定墩跨越管道的内力和挠度计算值趋于有固定墩时的相应值。

基于上述分析,若管道挠度没有严格限制,当

燃气行业中应用非常广泛。用 16 MnR 球光体钢制成的压力容器,随着使用温度的降低,将会由延性状态向脆性状态转变,当温度低于其无延性转变温度(NDT)时,材料(包括其连接焊缝)韧性便会急剧下降,此时容器若在难以避免的缺陷存在情况下受力,就极可能发生脆性破坏。由于压力容器脆断时的总体薄膜应力往往小于材料的屈服强度 $\sigma_s$ 或许可用应力 $[\sigma]$ ,破坏时一般没有或只有局部极小的塑性变形,并不出现整体屈服迹象,因此这种破坏非常突然,危害性极大。

$\epsilon_{ip} \leq 2/945 c_f$ 时,没有必要设置锚固墩;当 $\epsilon_{ip}$ 远大于 $2/945 c_f$ (如热泵站的出站管段)且跨长较大时,可考虑设置锚固墩。梁式单跨的低温管道(如 LNG 管道)、离压缩机站较远的输气管道以及常温输送的成品油管道,可不设置锚固墩;对于输热油管道,是否设置锚固墩需作方案比较。

### 参 考 文 献

1. 邓道明 王春喜:无固定墩两端埋地单跨管道的强度计算,油气田地面工程,1999(1)。
2. 宋伯韬 张传忠:两端固定的热油(水)管线单管跨越内力分析,石油施工技术,1980(5)。

(收稿日期:1999-02-01)

编辑:刘春阳

\* 516001,广东惠州麦地花边岭路 28 号;电话:(0752)2260743。