

埋地管道自然锚固规律研究

陈俊文¹ 徐 境² 邱星栋³ 任启瑞¹ 缪 晖¹ 杨 帆¹

1. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041;

2. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610017;

3. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500

摘 要:目前,天然气长输管道建设发展迅速,其安全性能被列为工程第一要素。埋地管道的安全评价与力学分析为管道设计与运营提供了重要的参考。管道与土壤相互作用,部分管段存在自然锚固现象,其分布规律值得研究。基于土壤位移—应力变化特性,分析了土壤对埋地管道的约束方式;结合土壤摩擦特性,推导了埋地管道自然锚固段分布规律;借助 CAESAR II 软件,模拟了特定工况的自然锚固分布,并与公式计算结果进行了对比分析。其研究成果为设计人员分析埋地管段锚固规律、掌握分布计算方法提供了借鉴。

关键词:埋地管道;应力分析;自然锚固;CAESAR II 软件;模拟

DOI:10. 3969 /j. issn. 1006 - 5539. 2015. 03. 003

0 前言

随着天然气储运技术发展,管道凭借其突出的经济性,成为了天然气输送的主要工具。输气管道多为埋地敷设,可最大限度保证其远离第三方破坏,尽可能降低对管线周围社会活动的影响。埋地管道应力分析与失效研究已成为储运专业热门的课题。埋地管道由于受到土壤的支撑与摩擦,极少出现因支撑欠缺导致的一次应力破坏,其失效形式主要为二次应力引起的轴向破坏、弯头处的应力集中和疲劳破坏^[1]。目前,诸多学者通过理论分析和数值模拟^[2-7],较为系统地研究了埋地管道入土和出土段的应力分布及失效规律。埋地管道的建模长度对入土和出土段应力计算影响较大,其建模长度至少应该保证管道埋地端受到土壤锚固。然而,目前对埋地管道实际路由中自然锚固段分布规律的研究尚未深入。本文结合前人研究成果,推导埋地管道自然锚固段分布规律,通过案例计算与软件模拟,评价计算精度,并分析误差原因。

1 土壤约束规律

埋地管道的特点在于土壤对管道的约束,管道因一次应力和二次应力与土壤建立约束关系^[8]。管道与土壤的相互作用主要考虑热膨胀后土壤约束管道所产生的力,表现为土壤对管道的轴向摩擦力、土壤对管道的推力和土壤对管道的横向作用力。土壤的约束作用是造成部分管段自然锚固的原因;而支撑作用体现在管道无法自然锚固时,土壤对管道的挤压和支撑。典型的土壤作用段位于埋地管道的入土段、出土段和埋地管道走向变化处。土壤对管道的作用区域可分为横向变形区、过渡区和自然锚固区三部分。热力作用下埋地管线典型力学区域分布见图1。

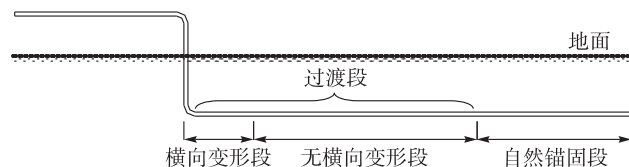


图1 热力作用下埋地管线典型力学区域分布

收稿日期:2015-01-18

基金项目:中国石油天然气集团公司重点工程资助项目(Z 2011-15)

作者简介:陈俊文(1987-),男,四川成都人,工程师,硕士,主要从事天然气储运研究与设计工作。

从图 1 可看出,横向变形段为管道主要变形区域,其特点为土壤约束密集,变形量较大。该段由于轴向受到土壤挤压,故存在横向变形。管道横向位移—土壤横向推力曲线呈弹塑性特征。当管道横向位移较小时,土壤横向推力与管道横向位移线性正相关;当管道横向位移超过临界条件后,管道横向推力 U 达到最大,不随位移增加而变化。唐永进^[8]在文献中给出了土壤线刚度 k 、最大推力 U 和横向变形段 L_b 的计算方法,其中,横向变形段长度与管道弹性模量 E 、管道截面惯性矩 I 和土壤线刚度 k 相关。

过渡段为埋地管道自由端(弯头)与自然锚固段之间的直段区域,包括横向变形段和无横向变形段。该区域中,随管道长度增加,其受到土壤摩擦力不断提高。同时,由于土壤不完全约束,管道出现应变,因此管道轴向应力低于自然锚固段,但由于存在应变受约束产生的弯曲、扭转应力,该段应力水平往往较高。

自然锚固段表示管道受土壤完全约束,无应变(或者应变极小)。ASME B31.8 - 2012《Gas Transmission and Distribution Piping Systems》和 GB 50251 - 2003《输气管道设计规范》明确要求了受约束段的当量应力需小于 90% 管道最低屈服应力^[9-10]。

由于存在非自然锚固段(过渡段),对于管道系统应力分析,其建模范围需由自然锚固位置确定。根据埋地段应力分布,探讨埋地管道自然锚固影响因素,研究过渡段长度计算方法。

2 埋地管道自然锚固影响因素

埋地管道自然锚固实质为管道热膨胀引起的应变受土壤轴向摩擦产生的约束。因此,影响埋地管道自然锚固的影响因素应从两方面考虑,即管道热膨胀和土壤约束能力。

2.1 温差

在 ASME B 31.8 - 2012《Gas Transmission and Distribution Piping Systems》和 GB 50251 - 2003《输气管道设计规范》中,提到了管道在受约束条件下,其轴向应力包括热膨胀应变受约束后产生的应力,该应力为线膨胀系数、弹性模量和温差的乘积。对钢管而言,其线膨胀系数和弹性模量均为定值,因此主要影响因素为安装温度与操作温度,操作温度与安装温度差值为正,则管道运行中,有膨胀趋势,受两端约束为压应力;反之亦然。

2.2 压力

压力对于埋地管道自然锚固的影响,主要体现在轴向应力和环向应力的泊松效应。轴向应力和环向应力的泊松效应的计算方法为经典薄壁管推导的计算公式,内压越大,则轴向应力越大,环向应力的泊松效应越小。另外,对于塑料管道具有延伸作用的内压布尔登效应

(Bourdon Pressure Effect),在钢制管道的使用中存在争议,其计算结果将更保守。

2.3 管道埋深

根据陆上管道常用施工方法,管道敷设一般采用大开挖方式进行。因此,在 $-0.5 \sim -2.0$ m 这种管道常规埋设深度,土壤作用载荷可按照管道上部全土壤体积进行建模,不必考虑由于“土拱”引起的土壤载荷降低。根据摩擦原理,埋设深度越大,则覆土质量越高,土壤的摩擦阻力越大。

2.4 钢管尺寸

钢管尺寸包括管道外径和壁厚,两者均对管道内应力和所受土壤摩擦力产生影响。其中,外径一方面影响管道系统内应力,另一面对土壤的约束面积也有作用;壁厚亦影响管道应力。另外,钢管尺寸的变化也将导致管道单位长度质量改变,对管道所受土壤摩擦力产生影响。

2.5 土壤性质

土壤性质将直接影响埋地管道自然锚固性能,主要表现为土壤与管道的摩擦系数、土壤密度、土壤摩擦角以及土壤夯实系数等。目前,虽然多数报道明确了常见土壤性质,但对实际工程,地质调查水平将直接决定土壤参数的准确性。

3 过渡段长度确定

对于自然锚固段管道,土壤通过完全约束阻止了管道由于热膨胀和内压引起的应变。轴向上土壤摩擦力等于管道轴向膨胀力。对于过渡段管道长度 VAL (Virtual Anchor Length),由于土壤不完全约束和自由端土壤推力,受力平衡式可表示为“土壤摩擦力 + 自由端土壤推力 = 管道轴向膨胀力”。为使该式数值化和过渡段计算长度最大化,提出如下假设:

1) 由于管道一侧受土壤约束,另一端受自然锚固影响,故假设轴向应力为完全约束状态应力。

2) 由于自由端土壤推力受到土壤弹塑性影响,但其值相对土壤摩擦力极小,且手算方法难以精确计算,故忽略该项。

3) 以最大静摩擦力定义土壤摩擦力,取代滑动摩擦力。得到计算结果后,适当进行长度修正。

4) 基于 GB 50251 - 2003《输气管道设计规范》和 ASME B31.8 - 2012《Gas Transmission and Distribution Piping Systems》标准,在充分理解自然锚固成因的基础上,确定管道的应力组成包括膨胀应力、环向应力的泊松效应和内压轴向应力。主要考虑自然锚固过渡段实质为半锚固半活动状态。

因此,根据唐永进^[8]研究成果,结合土壤回填理论,低埋深土壤最大静摩擦力为管道与土壤间静摩擦系数

乘以土壤受到的正压力:

$$F = \mu D(m\rho_s H + \pi\rho_p t + D\rho_f \pi/4) \quad (1)$$

式中: F 为管道单位长度上的轴向摩擦力, N/mm ; μ 为管道与土壤的摩擦系数; ρ_s 为回填土的重量密度, N/mm^3 ; D 为管道外径, mm ; H 为管顶埋深, mm ; ρ_p 为管道的重量密度, N/mm^3 ; ρ_f 为管内介质的重量密度, N/mm^3 ; m 为土壤回填密实系数, 一般取值 2; t 为管道壁厚, mm 。

管道轴向应力包括热膨胀应力、泊松效应和介质内压等分力, 表示为:

$$\sigma_L = \alpha E \Delta t - \nu \frac{PD}{2t} + \frac{PD}{4t} \quad (2)$$

式中: σ_L 为管道轴向应力, MPa ; P 为管道内压, MPa ; D 为管道外径, mm ; Δt 为温差, 操作态与安装态温度差, $^{\circ}\text{C}$; α 为线膨胀因数, $\text{mm}/(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})$; ν 为材料泊松比, 取值 0.3; E 为管道弹性模量, MPa ; t 为管道壁厚, mm 。

由此可得, 过渡段长度 VAL 为:

$$VAL = \frac{\sigma_L \times A}{F} = A \times \frac{\alpha E \Delta t - \nu \frac{PD}{2t} + \frac{PD}{4t}}{\mu D(2\rho_s H + \pi\rho_p t + D\rho_f \pi/4)} \quad (3)$$

根据式(3), 可计算埋地管道过渡段的最大长度。

4 实例计算

为验证式(3)的准确性, 根据文献报道和实际工程案例, 计算过渡段 VAL 长度。借助行业公认的 CAESAR II 软件的 VAL 计算功能, 对比软件和公式(3)计算结果,

进一步探寻自然锚固规律。

4.1 文献报道算例

根据文献报道案例^[4], 某埋地输气管道采用 273 mm × 12.5 mm 的 X 52 钢管, 管输介质最大操作压力 10 MPa, 温度 80 $^{\circ}\text{C}$, 介质密度 0.76 kg/m^3 , 其他物流、管道及环境参数见表 1。

表 1 文献报道的物流、管道及环境参数

参数	数值
摩擦系数 μ	0.3
土壤密度 $\rho_s / (\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	1.87 E-05
外径 $D / (\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	273
管道埋深 H / mm	1 830
钢管密度 ρ_p / mm	7.69 E-05
介质密度 $\rho_f / (\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	7.45 E-09
管道壁厚 $t / (\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	12.5
线膨胀系数 $A / (\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	1.20 E-05
泊松比 ν	0.3
弹性模量 E / MPa	210 000
设计压力 P / MPa	10
操作态与安装态温差 $\Delta t / ^{\circ}\text{C}$	38

4.2 工程算例

根据多项工程案例, 对比分析式(3)和 CAESAR II 软件的埋地管道自然锚固长度计算结果。实际工程的物流管道及环境参数见表 2。

表 2 实际工程的物流、管道及环境参数

地区	屈服强度 δ / MPa	摩擦系数 μ	土壤密度 $\rho_s / (\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	外径 D / mm	管道壁厚 t / mm	管道埋深 H / mm	钢管密度 $\rho_p / (\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$
四川 A	360	0.35	1.87 E-05	168.3	5	1 000	7.69 E-05
四川 B	485	0.3	1.87 E-05	813	11	1 000	7.69 E-05
中亚 A	360	0.3	1.81 E-05	168.3	10	1 000	7.69 E-05
中亚 B	415	0.3	1.81 E-05	610	20	1 000	7.69 E-05
非洲	360	0.31	1.83 E-05	406.4	25	900	7.69 E-05

地区	介质密度 $\rho_f / (\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	线膨胀系数 $A / (\text{mm}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	泊松比 ν	弹性模量 E / MPa	最大操作压力 P / MPa	操作态与安装态温度差 $\Delta t / ^{\circ}\text{C}$
四川 A	7.45 E-09	1.20 E-05	0.3	210 000	6	30
四川 B	7.41 E-09	1.20 E-05	0.3	210 000	6	30
中亚 A	5.52 E-09	1.20 E-05	0.3	210 000	13.5	112
中亚 B	5.52 E-09	1.20 E-05	0.3	210 000	13.5	102
非洲	6.66 E-09	1.20 E-05	0.3	210 000	14	35

4.3 对比分析

根据前述工况输入参数, 借助 CAESAR II 软件模拟和手算式(3), 结果对比见表 3。

由此可见, 针对不同工程的埋地管道, 其自然锚固长度的式(3)计算值与 CAESAR II 软件模拟值误差较小, 属可接受范围。同时, 式(3)计算结果均大于 CAESAR II

软件模拟值,是由于式(3)计算中忽略了管道起弯处土壤的自由端推力,这在公式计算中难以准确获得。过渡段管道自由端承受土壤的约束反力,可以抵消部分热膨胀应力。该约束反力受管道变形影响,无法通过简单公式快速计算。在 CAESAR II 软件中通过细分网格,可模拟获得土壤对管道的轴向反力。借助公式计算管端推力,将进一步提高 VAL 计算精度。同时,埋地管道自然锚固长度影响因素在本文第 2 节中进行了分析,计算结果证实前述分析较可靠;埋地管道自然锚固计算考虑半锚固+半活动状态,因此需在主动力中既考虑约束态,亦加入活动态下的轴向应力计算;算例覆盖了多种工况与管道规格,结果准确率较高,证明了本文提出的式(3)自然锚固计算方法适用范围较广。

表 3 自然锚固长度计算结果对比

m

地区	自然锚固长度		误差/(%)
	式(3)计算	软件模拟	
四川 A	152	144	2.05
四川 B	340	333	2.10
中亚 A	778	769	1.17
中亚 B	1 480	1 425	3.85
非洲	683	678	0.73
文献算例	205	196	4.59

5 结论

1) 借助埋地管道应力分析研究成果,根据土壤约束性质,分析了埋地管道自然锚固长度的影响因素,主要包括:压力、温差、埋设方式、钢管规格和土壤条件等,探讨并通过计算验证了各因素对自然锚固长度的影响。

2) 根据土壤特性和摩擦规律,推导了埋地管道自然锚固长度计算式。借鉴文献报道和工程案例数据,采用 CAESAR II 软件模拟了对应的自然锚固长度。本文推导式(3)的自然锚固长度结果与 CAESAR II 软件模拟误差在 5% 以下,表明式(3)具有较大的适用范围和较高的计算精度,说明半活动半锚固状态适用于管道过渡段长度计算,可供埋地管道工程设计和软件模拟参考。

3) 模拟结果与式(3)计算结果的误差主要来自部分假定的边界条件,可通过进一步研究,完善和修正管道自然锚固长度计算公式。

参考文献:

[1] 黄 坤,吴世娟,卢泓方,等.沿坡敷设输气管道应力分析

[J]. 天然气与石油,2012,30(4):1-4.

Huang Kun, Wu Shijuan, Lu Hongfang, et al. Analysis on Stress of Gas Pipeline Laid along Slope[J]. Natural Gas and Oil,2012,30(4):1-4.

[2] 孙 简,余汉成,李 沫,等.长输高陡坡段管道应力浅析[J]. 天然气与石油,2013,31(4):5-7.

Sun Lin, Yu Hancheng, Li Mo, et al. Analysis on Stress in Long-distance Pipelines Located in High Steep Slopes[J]. Natural Gas and Oil,2013,31(4):5-7.

[3] 吴晓南,鲜 燕,刘源海,等.清管过程中隧道内输气管道应力分析[J]. 天然气与石油,2012,30(2):1-3.

Wu Xiaonan, Xian Yan, Liu Yuanhai, et al. Analysis on Gas Pipeline Stress in Tunnel during Pigging[J]. Natural Gas and Oil,2012,30(2):1-3.

[4] 刘仕鳌,蒲红宇,刘书文,等.埋地管道应力分析方法[J]. 油气储运,2012,31(4):275-278.

Liu Shi'ao, Pu Hongyu, Liu Shuwen, et al. Stress Analysis Method of Buried Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2012,31(4):275-278.

[5] 沙晓东,陈晓辉,黄 坤,等.输气管道应力影响因素分析[J]. 天然气与石油,2013,31(1):1-4.

Sha Xiaodong, Chen Xiaohui, Huang Kun, et al. Analysis on Factors Affecting Stress in Gas Pipeline[J]. Natural Gas and Oil,2013,31(1):1-4.

[6] 蒋 喜,王棠昱,孙 简,等.未覆土高陡边坡输气管道的应力分析[J]. 天然气与石油,2013,31(6):26-30.

Jiang Xi, Wang Tangyu, Sun Lin, et al. Stress Analysis of Unburied Gas Pipelines Laid in High Slopes[J]. Natural Gas and Oil,2013,31(6):26-30.

[7] 杜明俊,王 伟,张振庭,等.基于 CAESAR II 的埋地热油管道应力计算[J]. 油气储运,2012,31(8):597-600.

Du Mingjun, Wang Wei, Zhang Zhenting, et al. CAESAR II-based Stress Calculation for Buried Hot Oil Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2012,31(8):597-600.

[8] 唐永进.压力管道应力分析[M].2版.北京:中国石化出版社,2007:95-99.

Tang Yongjin. Stress Analysis of Pressure Pipeline[M]. 2nd ed. Beijing:China Petrochemical Press,2007:95-99.

[9] ASME B 31.8-2012, Gas Transmission and Distribution Piping Systems[S].

[10] GB 50251-2003,输气管道工程设计规范[S].

GB 50251-2003, Code for Design of Gas Transmission Pipeline Engineering[S].