

关于长输天然气管道径向稳定性的计算研究

迟 静 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257027)

摘要: 本文通过 GB50251-2015、SY/T7022-2023、SY/T7366-2024 中的公式对天然气管道径向稳定性的计算要求, 并结合其在项目中的应用实例, 进一步确定了长输天然气管道径向稳定性的计算方法。

关键词: GB50251-2015; SY/T7022-2023; SY/T7366-2024; 长输天然气管道; 公式; 径向稳定性计算

中图分类号: TE973 **文献标识码:** B **文章编号:** 1674-5167 (2025) 018-0097-03

Calculation and research on radial stability of long-distance natural gas pipelines

Chi Jing (Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257027, China)

Abstract: This article uses the calculation requirements of the formulas in the GB 50251-2015, the SY/T 7022, and the SY/T 7366-2024 for the radial stability of natural gas pipelines. Combined with its application examples in projects, the calculation method for the radial stability of long-distance natural gas pipelines is further determined.

Keywords: GB 50251-2015, SY/T 7022-2023, SY/T 7366-2024, long-distance natural gas pipelines, formula, radial stability calculation

1 概述

在长输天然气管道施工回填过程中, 不仅要满足 GB50251-2015 中埋地管道管顶最小埋深的要求, 还要满足管道管顶最大覆土厚度的要求, 防止由于管道管顶的覆土厚度过大, 导致管道径向力过大超过管道的最大允许变形量而使管道失稳。故本文对长输天然气管道径向稳定性进行计算探究等。

2 一般线路段管道径向稳定性计算的方法及应用

2.1 一般线路段管道径向稳定性计算的方法

2.1.1 计算公式

根据 GB 50251-2015 的规定, 管道的径向稳定性校核如下。

$$\Delta x \leq 0.03D$$

$$\Delta x = \frac{ZKWD_m^3}{8EI + 0.061E_s D_m^3}$$

$$W = W_1 + W_2$$

$$I = \delta_n^3 / 12$$

式中: Δx ——钢管水平方向最大变形量 (m);
 D_m ——钢管直径 (m);
 W ——作用在单位管长上的总竖向载荷 (N/m);
 W_1 ——单位管长上的竖向永久荷载 (N/m);
 W_2 ——地面可变荷载传递到管道上的荷载 (N/m);

Z ——钢管变形滞后系数, 取 1.5;

K ——基床系数, 取 0.103;

E ——钢材的弹性模量, 210000MPa;

I ——单位管长截面惯性矩 (m^4/m);

δ_n ——管道壁厚 (m);

E_s ——土壤变形模量, 取 $2.8MN/m^2$;

D ——管道外径, m。

2.1.2 公式中的参数选取

2.1.2.1 总竖向载荷 W

考虑管道上方的竖向永久荷载主要为其上方的土壤荷载, 忽略一般地段管道上方的可变荷载, 即不考虑车辆荷载等可变荷载。

由上式可知, 管道上方的竖向永久荷载即管道上方的土壤荷载 W_1 与钢管水平方向最大变形量 Δ_x 有关, 管道外径 D 一定的情况下, 土壤荷载 W_1 越大, 钢管水平方向最大变形量 Δ_x 越大。管道上方的土壤荷载主要由管道上方的覆土产生, 故管道管顶的最大覆土厚度越大, 钢管水平方向最大变形量 Δ_x 越大。

2.1.2.2 基床系数 K 及土壤变形模量 E_s

根据 GB 50251《附录 D 敷管条件的设计参数》的要求, 长输天然气管道敷管分为 5 个类型, 分别为 1 型、2 型、3 型、4 型、5 型。根据本文 2.1 章节中推荐的基床系数 K , 取值 0.103; 土壤变形模量 E_s , 取 $2.8MN/m^2$, 即一般线路段的天然气管道的敷设管道类型为 3 型, 如表 1。

2.2 管道径向稳定性计算在实际项目中的应用

某长输天然气管道项目, 线路全长约 25km, 管径 D711mm, 管道壁厚 11.0mm, 钢管材质 L450M, 全线均为二级地区。此项目中一般线路段的管道径向稳定性计算结果如表 2。

此项目中 AA101-AA125 段约 4km 存在多处局部管道管顶覆土厚度在 7.3m-8.3m 的情况, 故考虑将此

表 1 敷管条件的设计参数

| 敷管类型 | 敷管条件 | E_s (MN/m ²) | 基床包角 (°) | 基床系数 K |
|------|---|-------------------------------|-------------|-----------|
| 1型 | 管道敷设在未扰动的土上, 回填土松散 | 1.0 | 30 | 0.108 |
| 2型 | 管道敷设在未扰动的土上, 管中线以下的土轻轻压实 | 2.0 | 45 | 0.105 |
| 3型 | 管道放设在厚度至少有100mm的松土垫层内, 管顶以下的回填土轻轻压实 | 2.8 | 60 | 0.103 |
| 4型 | 管道放在砂卵石或碎石垫层内, 垫层顶面应在管底以上1/8管径处, 但不得小于100mm, 管顶以下回填土夯实密度约为80% | 3.8 | 90 | 0.096 |
| 5型 | 管中线以下放在压实的黏土内, 管顶以下回填土夯实, 夯实密度约为90% | 4.8 | 150 | 0.085 |

注: ①管径大于等于750mm的管道不宜采用1型。

②基床包角指管基土壤反作用的圆弧角。

③表中的 E_s 为土壤变形模量。

表 2 D711×11.0mm 管道径向稳定性校核表

| 管外径 (mm) | 壁厚 (mm) | 基床系数 | 土壤变形模量 (MN/m ²) | I ($\times 10^{-7}$ m ⁴ /m) | W (MN/m) | Δx (取0.03D) (mm) | 最大管顶埋深 (m) |
|-------------|------------|-------|--------------------------------|--|---------------|-----------------------------|---------------|
| 711 | 11.0 | 0.103 | 2.8 | 1.109 | 0.098 | 21.33 | 7.3 |

表 3 D711×12.7mm 管道径向稳定性校核表

| 管外径 (mm) | 壁厚 (mm) | 基床系数 | 土壤变形模量 (MN/m ²) | I ($\times 10^{-7}$ m ⁴ /m) | W (MN/m) | Δx (取0.03D) (mm) | 最大管顶埋深 (m) |
|-------------|------------|-------|--------------------------------|--|---------------|-----------------------------|---------------|
| 711 | 12.7 | 0.103 | 2.8 | 1.109 | 0.098 | 21.33 | 10.3 |

段管道的壁厚增加一个等级。全线均为二级地区, 将AA101-AA125段强度设计系数为0.6提高到0.5, 壁厚由11.0mm提高到12.7mm, 对壁厚为12.7mm管道的径向稳定性进行校核, 计算结果如表3。

从表3中可以得出管道壁厚增加到12.7mm时, 管道的最大管顶覆土厚度可达到10.3m, AA101-AA125段的管道管顶覆土均小于10.3m, 因此AA101-AA123段管道增加壁厚后满足管道径向性校核的要求。

3 顶管穿越段管道径向稳定性计算的方法及应用

3.1 顶管穿越竖井内管段径向变形计算

3.1.1 计算公式

根据SY/T 7022-2023的规定, 当隧道竖井采用固态物质填充时, 应按下列公式对竖井内管段进行管道径向变形计算。

$$\Delta x = \frac{ZKWD_m^3}{8EI + 0.061E_s D_m^3}$$

$$W = W_1 + W_2$$

$$I = \delta_n^3 / 12$$

公式中参数的含义跟2.1.1章节公式中参数的含义一致。

3.1.2 公式中的参数选取

3.1.2.1 竖向荷载

根据SY/T 7022-2023的规定, 隧道和竖井内覆土埋设管道, 单位长度竖向土荷载应按下式计算:

$$We = \lambda DH$$

式中: We ——单位管长上的竖向土荷载 (m);

λ ——土壤容重 (MN/m);

D ——管道外直径 (m);

H ——管顶回填土高度 (m)。

3.1.2.2 基床系数K及土壤变形模量 E_s

根据SY/T 7022-2023中的要求, 土壤变形模量 E_s 应采用现场实测数据, 当无实测数据且基床系数K取0.096时可取3.5, 根据基床系数K及土壤变形模量 E_s 的取值, 对照到GB 50251-2015中的《附录D敷管条件的设计参数》即表1中的要求, 顶管穿越竖井内管段的敷管类型为4型, 即基床系数K取0.096、土壤变形模量 E_s 取3.8。

3.2 管道径向稳定性计算在实际项目中的应用

某长输天然气管道项目中含1处水域顶管单体穿越, 穿越工程等级为中型, 管径D1219mm, 管道壁厚

表 4 稳定性计算结果表

| 壁厚 (mm) | 基床系数 | 土壤变形模量 (MN/m ²) | I (×10 ⁻⁷ m ⁴ /m) | W (MN/m) | Δx (取 0.03D) (mm) | 最大管顶埋深 (m) |
|------------|-------|--------------------------------|--|-------------|----------------------|---------------|
| 22.0 | 0.096 | 3.8 | 8.87 | 0.28 | 36.57 | 10.4 |

表 5 稳定性计算结果表

| 管外径 (mm) | 壁厚 (mm) | 基床系数 | 土壤变形模量 (MN/m ²) | I (×10 ⁻⁷ m ⁴ /m) | W (MN/m) | Δx (取 0.03D) (mm) | 最大管顶埋深 (m) |
|-------------|------------|-------|--------------------------------|--|-------------|----------------------|---------------|
| 1219 | 22.0 | 0.096 | 3.8 | 17.3 | 0.49 | 36.57 | 20.4 |

22.0mm, 钢管材质 L555M。此单体的管道径向稳定性计算结果如表 4。

经计算, 此单体管道管顶的最大埋深为 10.4m, 根据本单体的设计图纸始发井深度为 17.2m、接收井深度为 15.9m, 竖井回填后管顶埋深超过了径向稳定性计算的管顶覆土最大允许值。因此, 根据竖井内管道的安装位置, 对始发井底部以上 6.8m、接收井底部以上 5.5m 采用素混凝土填充, 防止竖向土压力直接作用于管道上。

4 开挖穿越段管段径向变形计算

4.1 开挖穿越段管道径向稳定性计算的方法

4.1.1 计算公式确定

根据《油气输送管道工程水域开挖穿越设计规范》SY/T7366-2024 的 8.2.5 章节中的规定: “穿越管段应按现行国家标准《输油管道工程技术规范》GB50253 进行管道径向变形校核验算”。

根据 GB 50253-2014 中的 5.6.2 章节中的要求: “穿越公路的无套管管段、穿越用的套管, 以及埋深较大的管段, 均应按无内压状态验算在外力作用下的变形, 其水平方向直径的变形量不应大于钢管外径的 3%”。计算公式如下:

$$\Delta x = \frac{ZKWD_m^3}{8EI + 0.061E_s D_m^3}$$

$$W = W_1 + W_2$$

$$I = \delta_n^3 / 12$$

公式中参数的含义跟 2.1.1 章节公式中参数的含义一致。

4.1.2 公式中的参数选取

4.1.2.1 竖向荷载

根据 GB50253-2014 中的规定, 埋设在管沟内的管道单位长度上的竖向土荷载应按下式计算:

$$We = \lambda DH$$

式中: We——单位管长上的竖向土荷载 (MN/m)

λ——土壤容重 (MN/m³) ;

D——钢管外直径 (m) ;

H——管顶回填土高度 (m) 。

4.1.2.2 基床系数 K 及土壤变形模量 E_s

根据以往项目施工经验, 基床系数 K 取值 0.096、土壤变形模量 E_s 取值 3.5MPa。

4.2 管道径向稳定性计算在实际项目中的应用

某长输天然气管道项目中含 1 处水域开挖单体穿越, 穿越工程等级为中型, 管径 D1219, 管道壁厚 27.5mm, 钢管材质 L555M。此单体的管道径向稳定性计算结果如表 5。

经计算, 此单体管道管顶的最大埋深为 20.4m, 根据设计图纸本段管道最大管顶埋深为 14.2m, 管顶埋深满足管道径向稳定性计算的允许值。

5 结语

本文对长输天然气管道处于不同敷设段的管道含一般线路段敷设、顶管穿越段、开挖穿越段管道的径向稳定性校核计算进行了初步研究, 在项目的实际运用过程中, 应按照项目中管道不同的敷设方式分别按照 GB50251、SY/T7022、SY/T7366 中的公式及各自的参数选取要求, 进行管道径向稳定性的校核计算, 以达到满足管道投产时稳定运行的要求。

参考文献:

- [1] GB50251-2015 输气管道工程设计规范 [S]. 住房和城乡建设部, 2015.
- [2] GB50253-2014 输油管道工程设计规范 [S]. 住房和城乡建设部, 2014.
- [3] SY/T7022-2023 油气输送管道工程顶管法隧道穿越设计规范 [S]. 国家能源局, 2023.
- [4] SY/T7366-2024 油气输送管道工程水域开挖穿越设计规范 [S]. 国家能源局, 2024.