

均匀腐蚀条件下天然气主干线钢质管道强度计算模型研究

何斯旭 (绵竹港华燃气有限公司, 四川 绵竹 618209)

摘要: 本文基于金属材料强度理论和燃气管道设计规范, 对天然气主干线埋地直管道、弹性敷设管道的强度计算模型进行了研究, 形成了考虑均匀腐蚀下相应管道的安全裕量计算方法, 并以新都区3条管道为例进行了实例计算。

关键词: 均匀腐蚀; 钢质管道; 安全裕量; 强度计算

中图分类号: TE88 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 036-0148-03

Research on Strength Calculation Model of Natural Gas Main Line Steel Pipeline under Uniform Corrosion Conditions

He Sixu (Mianzhu Ganghua Gas Co., Ltd., Mianzhu, Sichuan 618209, China)

Abstract: Based on the strength theory of metal materials and the design specifications of gas pipelines, this article studies the strength calculation models of buried straight pipelines and elastic laid pipelines of natural gas main lines, and forms a safety margin calculation method for corresponding pipelines considering uniform corrosion. Three pipelines in Xindu District are taken as examples for calculation.

Keywords: Uniform corrosion steel pipeline safety margin strength calculation

随着城市化进程加快, 天然气这种清洁能源越来越得到国家和人民的重视和认可^[1-2]。目前, 城市燃气管道用户在我国覆盖人数近4亿人^[3-4]。城市人口密度大及地下管网越来越复杂多变对燃气管道安全与风险提出了新的要求和挑战。管道强度计算对筛选高风险管段和消除安全隐患具有重要的作用, 也为管道维修和维护提供了有效指导。因此, 对钢质燃气管道开展强度计算的相关研究是有效保障燃气管道在服役过程中安全性和控制高风险的必要途径之一^[5]。

1 埋地直管道的强度安全裕量计算方法

天然气主干线钢质管道一般所使用的钢材是L245、L360无缝钢管, 其具有很好的塑性, 可以采用第三强度理论进行校核, 该理论不考虑 σ_2 的影响。从原理上说, 第四强度理论也是塑性破坏理论, 该理论认为钢材破坏时三个方向的主应力都起作用, 破坏是材料形变超过材料承受极限所发生的必然结果。

强度条件:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

式中: σ_1 —第一主应力, MPa; σ_3 —第三主应力, MPa; $[\sigma]$ —许用应力, MPa。

若用第三强度理论, 埋地直管道的强度应满足:

$$\frac{pd}{2t} \leq F\phi\sigma_s\varphi_i \quad (1-2)$$

式中: p —管道压力, MPa; d —管道直径, mm; t —壁厚, mm; ϕ —焊缝系数, 见公式1-1; F —强度设计系数, 按标准取值, 见公式1-2; σ_s —钢管的最低屈服强度 (SMYS), MPa; φ_i —温度折减系数, 当

温度低于120℃时, 取1.0。

埋地直管道的强度安全裕量计算方法, 即埋地直管道的强度安全裕量等于许用应力与环向应力之差。

确定许用应力为:

$$[\sigma] = F\phi\sigma_s \quad (1-3)$$

式中: F —强度设计系数, 按标准取值, 见表3-2; ϕ —焊缝系数, 见表3-1; σ_s —钢管的最低屈服强度 (SMYS), MPa; $[\sigma]$ —许用应力, MPa。

环向应力计算公式为:

$$\sigma_p = \frac{pd}{2t} \quad (1-4)$$

为了方便操作管理, 有必要从强度上进一步研究不同管道壁厚的安全裕量。实际的壁厚减薄极限就是对应于许用应力的壁厚减薄程度限定值。当然壁厚安全裕量就等于当前实际壁厚值减去最大可操作压力下达到许用应力所对应的壁厚。

$$\Delta t = t_0 - \frac{p_s d}{2[\sigma]} \quad (1-5)$$

式中: Δt —壁厚安全裕量, mm; t_0 —当前管道壁厚, mm; p_s —最大可操作压力, MPa; d —管道直径, mm; $[\sigma]$ —许用应力, MPa。

2 弹性敷设管道的强度安全裕量计算方法

埋地管道若需要改变转角, 在条件许可时, 应尽量采用弹性敷设, 对于采用弹性敷设的管段应符合下列要求: ①弹性弯曲的曲率半径不小于钢管外径的1000倍, 并满足管道的强度要求; ②竖向下凹的弹性弯曲管段, 其曲率半径应大于管子在自重作用下

产生的挠度曲线的曲率半径；③在相邻的反向弹性弯管之间及弹性弯管和人工弯管之间，采取直管段连接，直管段的长度不应小于钢管的外直径，且不小于500mm；④与直管道相比，弹性敷设管段在轴向上增加了弯矩引起的弯曲应力作用。从力学上说，在弯曲内侧拥有比直管段更大的轴向应力，因此对弹性敷设管段再进行一些有针对性的强度分析是有必要的。

弹性敷设管段的轴向应力由下式计算：

$$\sigma_a = \sigma_{xp} + \sigma_{xT} + \sigma_w \quad (2-1)$$

式中： σ_{xp} —由设计内压产生的轴向应力，MPa； σ_{xT} —由温差产生的热应力，MPa； σ_w —管道弯曲应力，MPa。

最大弯曲应力发生在弯曲管道的内外两侧，可表示为：

$$\sigma_w = \pm \frac{Ed_o}{2R} \quad (2-2)$$

式中： σ_w —管道弯曲应力，MPa； E —钢管的弹性模量，统一取 $E=2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ ； d_o —钢管的外径，m； R —弹性敷设管道的曲率半径，m。

一般情况下，管道完全被嵌固时应力状况最不利，此时管道内的轴向应力为：

$$\sigma_a = \pm \frac{Ed_o}{2R} + \nu \frac{pd}{2t} - \alpha E(T_1 - T_0) \quad (2-3)$$

式中： $\sigma_a > 0$ 表示拉应力，此时弯曲管段的外弧最危险； $\sigma_a < 0$ 表示压应力，此时弯曲管段的内弧最危险。 p —管道工作压力，MPa； d —管道平均直径，m； t —管道壁厚，m； ν —钢管的泊松比，取值0.3； α —管材线膨胀系数，取值 $0.000012 \text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ； T_1 —管道的最高操作温度， $^\circ\text{C}$ ； T_0 —管道的安装温度， $^\circ\text{C}$ 。

根据第三强度理论得到的当量应力等于最不利条件下的拉应力，即

$$\sigma_a = \frac{Ed_o}{2R} + \nu \frac{pd}{2t} - \alpha E(T_1 - T_0) \quad (2-4)$$

与埋地直管道相同，可得到弹性敷设管道强度安全裕量计算方法，即埋地直管道的强度安全裕量等于许用应力与环向应力之差。同理，弹性敷设管道的壁厚安全裕量也等于当前实际壁厚值减去最大可操作压力下达到许用应力所对应的壁厚。

3 实例计算

在实际工程应用中，材料有很大的安全裕度，因此，采用如上介绍的埋地直管道安全裕量计算方法对管道进行安全性能评价，优化管道修护方案，合理制定更换计划。

如下实例计算在新都区3段主干线管网，其不同站间管道的管材等级详见表3-1。不同站间管道的口径和厚度各不相同，详见表3-2。

表 3-1 新都区各段管线的管道规格和管材等级表

序号	管段	管线规格	管材等级
1	大丰煤气调压站 - 彭县门站	$\Phi 219 \times 6.0$	L245 无缝钢管
2	竹友气站 - 川港供气柜	$\Phi 426 \times 10$	L245 无缝钢管
3	德阳门站 - 大丰调压站	$\Phi 426 \times 12.0$	L360 无缝钢管

管道内压和管道壁厚是影响直管道强度安全的主要因素，随着管道内压的增加，直管道内的应力呈线性规律递增，即当管道内压大于最大安全工作压力后，管道不可再行使用，否则风险急速上升。若要保持可靠性不变，则需要降低介质的压力。

另外，按照SY/T 5329-2012标准，其均匀腐蚀速率应控制在0.076mm/a指标以内，腐蚀速率大于0.076mm/a即为腐蚀超标点。NACE标准对腐蚀程度的规定略有不同，见表3-3。均匀腐蚀在生产生活中危害不是很大，因为其发生在全部的表面，易于发现和控制，一般在工程设计时考虑了腐蚀裕量。

表 3-3 NACE 标准 RP-0775-2005 对腐蚀程度的规定

腐蚀程度	平均腐蚀速率 mm/a	最大点蚀速率 mm/a
轻度	< 0.025	< 0.13
中度	0.025-0.125	0.13-0.20
严重	0.126-0.25	0.21-0.38
极严重	> 0.254	> 0.38

本论文主要计算管道失效压力和最大安全工作压力，从而确定出管道的强度安全裕量、内压安全裕量和壁厚安全裕量。其中，每个管段的安全系数、设计压力下极限壁厚减薄百分比是安全评价的基础数据，也是比对安全状况的基础，见表3-4。在考虑20%壁厚减薄百分比情况下，直管道强度安全裕量计算结果见表3-5，直管道内压安全裕量计算结果见表3-6，

表 3-2 新都区各段管线的基础数据表

序号	管段	长度 /m	最大可操作压力 /MPa	设计压力 /MPa	最高工作压力 /MPa	设计温度 / $^\circ\text{C}$	最高工作温度 / $^\circ\text{C}$	最小屈服强度 /MPa	极限抗张强度 /MPa
1	大丰煤气调压站 - 彭县门站	16200	1.4	1.6	1.2	-20~+40	35-38	245	415
2	竹友气站 - 川港供气柜	6600	1.4	1.6	1.2	-20~+40	35-38	245	415
3	德阳门站 - 大丰调压站	13200	3.5	4.0	2.5	-20~+40	35-38	358	455

表 3-4 埋地直管道安全基础参数计算结果

序号	管段	设计安全系数	实际安全系数	设计压力 / MPa	极限壁厚减薄百分比 / % (未考虑安全系数)	极限壁厚减薄百分比 / % (考虑安全系数)
1	大丰煤气调压站 - 彭县门站	2.5	8.39	1.6	88.08	70.20
2	竹友气站 - 川港供气柜	2.5	7.19	1.6	86.09	65.22
4	德阳门站 - 大丰调压站	2.5	5.04	4	80.17	50.42

表 3-5 埋地直管道强度安全裕量计算结果 (考虑 20% 壁厚减薄百分比)

序号	管段	屈服强度 / MPa	最大可操作压力下管道应力 / MPa	强度安全裕量 / MPa	最大允许管道应力与实际管道应力的比值
1	大丰煤气调压站 - 彭县门站	245	31.94	66.06	3.07
2	竹友气站 - 川港供气柜	245	37.28	60.73	2.63
4	德阳门站 - 大丰调压站	358	77.66	65.54	1.84

表 3-6 埋地直管道内压安全裕量计算结果 (考虑 20% 壁厚减薄百分比)

序号	管段	失效压力 / MPa	最大安全工作压力 / MPa	内压安全裕量 / MPa	最大安全工作压力与 MAOP 的比值 / MPa
1	大丰煤气调压站 - 彭县门站	10.74	4.30	2.90	3.07
2	竹友气站 - 川港供气柜	9.20	3.68	2.28	2.63
4	德阳门站 - 大丰调压站	16.14	6.45	2.95	1.84

表 3-7 埋地直管道壁厚安全裕量计算结果 (考虑 20% 壁厚减薄百分比)

序号	管段	公称壁厚 / mm	最大可操作压力下最小壁厚 / mm	壁厚安全裕量 / mm	最大允许均匀腐蚀速率下的使用寿命 / 年
1	大丰煤气调压站 - 彭县门站	6	1.56	3.24	42.58
2	竹友气站 - 川港供气柜	10	3.04	4.96	65.23
4	德阳门站 - 大丰调压站	12	5.21	4.39	57.82

管道壁厚安全裕量计算结果见表 3-7。

4 结束语

本文对比分析了均匀腐蚀条件下埋地直管道、弹性敷设管道两种类型燃气管道的强度计算方法。以 3 条主干线钢质管道为实例计算可知:从强度上来说,管道内压增加 1MPa 与壁厚减薄 2.5mm 对管道应力的增加是等效的。壁厚一旦出现了减薄,则管道的可靠度下降,发生失效的概率增加。若要保持可靠性不变,则需要降低介质的压力。另,如上口径管道的壁厚安全裕量各不相同,有 3.24mm、4.96mm。整体上说,管道口径越小,其壁厚强度裕量越小;只要做好防腐措施,确保壁厚减薄量不超过 50%,所有埋地直管道的强度是有保证的。

参考文献:

[1] 万德胜. 推广清洁能源趋势下我国“气荒”的缓解

与优化 [J]. 发展改革理论与实践, 2018(04):24-26.

- [2] 金祺, 刘永铎, 杜廷召. “十三五”期间天然气利用前景分析 [J]. 化学工程与装备, 2017(10):195-197.
- [3] 徐丽, 曲建升, 李恒吉, 曾静静, 张洪芬. 中国居民能源消费碳排放现状分析及预测研究 [J]. 生态经济, 2019, 35(01):19-23+29.
- [4] 穆献中, 李国昊. 基于系统动力学模型的中国天然气需求情景预测及影响因素研究 [J]. 工程研究 - 跨学科视野中的工程, 2018, 10(01):56-67.
- [5] 钱溢. 长输天然气钢质管道防腐补口施工质量探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(19):18-20

作者简介:

何斯旭 (1984), 男, 汉族, 四川省都江堰市人, 硕士, 工程师, 研究方向: 燃气安全。