

城镇燃气埋地PE管道 环向弯曲应力、变形与稳定性分析

张文强¹, 黎洪义², 肖思³, 李晶晶⁴, 马永璟⁵

1.北京市燃气集团有限责任公司第三分公司; 2.北京燃气怀柔有限公司; 3.北京燃气怀柔有限公司;
4.北京市燃气集团有限责任公司第四分公司; 5.北京市房山区城市管理委员会

摘要: 为了保证城镇燃气埋地PE管道的安全运行, 应重点评定其环向弯曲应力、变形与稳定性, 本文首先给出了埋地PE管道的受力情况及荷载的计算方法, 然后重点介绍了埋地PE管道环向弯曲应力、变形与稳定性的评定方法, 最后结合典型计算案例, 考虑不同管材系列、埋深、回填土密实度等因素进行对比分析, 探讨影响埋地PE管道安全运行的主要因素, 研究结果可为城镇燃气埋地PE管道的安全运行提供一定的技术支持。

关键词: 城镇燃气埋地; PE管道; 环向弯曲应力; 变形; 稳定性; 安全运行

1 概述

近年来, 聚乙烯管道(简称PE管道)越来越普遍应用于中低压城镇燃气输配工程中, 相比于传统的钢管, PE管道具有耐腐蚀性能好、使用寿命长、施工安装简单快捷等优点。但城镇燃气埋地管道多数设于车行道路下, 无论是钢管还是PE管, 其所受的外部荷载(管顶覆土荷载、车辆荷载、地面堆积荷载等)均

相同。为了保证城镇燃气埋地PE管道的安全运行, 有必要对PE管道进行应力分析, 对于中低压城镇燃气输配工程来说, 径向应力一般忽略不计, 由于PE管道埋于地下, 其环境温度变化小, 因此轴向温度应力也不是关系到安全运行的控制因素。相比于钢管来说, 在管材强度方面PE管道的许用弯曲应力远低于钢管的许用弯曲应力; 在管材刚度方面钢管的弹性模量约为20 000MPa, PE管的弹性模量约为800MPa~

障诊断、运行参数超限报警、流量异常等数据建立数据库, 为自动支路切换、批次运行、小流量适应等自动控制策略奠定基础。

参考文献

[1] 中华人民共和国建设部. 城镇燃气设计规范GB50028—

2006(2020年版)[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2020: 60-70、80-81.

[2] 高顺利, 李洪波, 宋来弟, 等. 燃气输配系统远程调压控制策略研究[J]. 城市燃气, 2014(3): 7-11.

[3] 张昊清, 魏东, 熊亚选. 住宅小区燃气调压系统预测控制策略[J]. 电子技术与软件工程, 2020(4): 93-94.

1 000MPa, 考虑到PE管材的蠕变性能使得弹性模量下降, 在长期使用工况下弹性模量约为200MPa~250MPa, 约为钢管的1/80~1/100, 由此可见, PE管道刚度较弱。由于城镇燃气埋地PE管道运行中所受的外部荷载不变, 因此对城镇燃气埋地PE管道安全性分析时应重点关注其环向弯曲应力、变形及稳定性, 因为这关系到管道是否能长期安全运行问题。

目前, 关于城镇燃气埋地PE管道的安全性研究相对较少, 徐青永等^[1]运用Abaqus有限元分析软件, 建立PE管道埋在土体中的有限元三维模型, 主要研究荷载大小、土体弹性模量对管道最大应力的影响规律。陈锦增等^[2]通过解析实际工程案例得出管道管中心处沟槽宽度及沟槽回填施工质量等因素也对管道竖向变形计算及管壁环截面的环向稳定性有一定的影响。张宁等^[3]针对城镇集中供热二次网的特点, 通过对最小环刚度的研究, 提出了供热直埋塑料管最小覆土深度的要求。张雷等^[4]专门对交通荷载作用下PE燃气管道的变形和稳定性分析, 并对一些案例进行试算, 证明只要措施得当, PE管敷设在车行道路下能够确保安全。

依据CJJ63-2018《聚乙烯燃气管道工程技术标准》第4.1.1条的规定, PE管选用时, 应根据燃气种类、设计压力、设计温度、施工方法以及环境条件等经技术经济比较后确定, 但尚未给出针对城镇燃气埋地PE管道环向弯曲应力、变形与稳定性的验算方法或设计要求, 若运行工况下PE管道径向变形过大, 可能会对PE管道造成一定的损伤, 从而产生安全隐患。因此, 为了保证城镇燃气埋地PE管道的安全运行, 应重点评定其环向弯曲应力、变形与稳定性, 本文首先给出了埋地PE管道的受力情况及荷载的计算方法, 然后重点介绍了埋地PE管道环向弯曲应力、变形与稳定性的评定方法, 最后结合典型计算案例, 考虑不同管材系列、埋深、回填土密实度等因素进行对比分析, 探讨影响埋地PE管道安全性的主要因素及相关注意事项。

2 力学模型及荷载计算

2.1 力学模型

PE管道受到土体的包裹, 主要受到竖向覆土荷

载及车辆荷载的影响, 在竖向荷载作用下, PE管道可能会产生较大的侧向变形(如图1所示), 两侧土体受到挤压变形从而会产生较大的被动土压力(如图2所示)。PE管道受到竖向荷载与两侧的被动土压力分别使得管道产生相反方向的变形, 因此在一定程度上侧向的土压力的存在提高了管道的承载力。

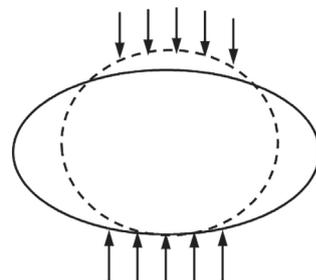


图1 管道竖向荷载下的变形图

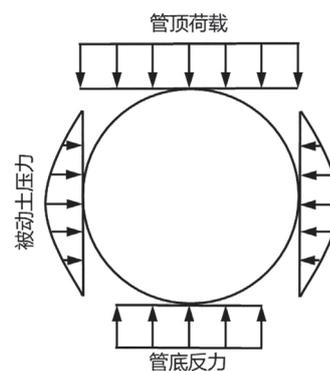


图2 管道的力学模型图

2.2 荷载计算

对于城镇燃气埋地PE管道来说所受的荷载主要包括永久荷载(管顶覆土荷载)、可变荷载(地面堆积荷载、地面车辆荷载等)。

(1) 在GB50332-2002《给水排水工程管道结构设计规范》附录B中给出了管顶竖向覆土压力标准值的计算方法:

$$q_{ck} = \gamma_s H \quad (1)$$

式中:

q_{ck} ——管顶竖向覆土压力标准值(kN/m²)

γ_s ——回填土的重力密度(kN/m³)

H ——地面至管顶的深度(m)

(2) 在JTGD60-2015《公路桥涵设计通用规范》表4.3.1-3车辆荷载的主要技术指标中给出了公路一级得车辆荷载后轴重力标准值 $2 \times 140\text{kN}$, 单轮为

70kN, 轮胎着地宽度及长度为0.6×0.2m, 轮距1.8m。两辆车并行行驶时车间距离为1.3m, 本文为了保障计算的安全性, 单个轮压标准值取70kN, 考虑两辆车并行行驶时的相互影响。

两个以上单排轮压综合影响传递到管道顶部的竖向压力标准值可按以下公式计算:

$$q_{vk} = \frac{\mu_d n Q_{vi,k}}{(a_i + 1.4H) \left(nb_i + \sum_{i=1}^{n-1} d_i + 1.4H \right)} \quad (2)$$

式中:

q_{vk} ——轮压传递到管顶处的竖向压力标准值(kN/m²)

μ_d ——动力系数, 取值详见表1

$Q_{vi,k}$ ——车辆的*i*个车轮承担的单轮压标准值(kN)

a_i ——*i*个车轮的着地分布长度(m)

b_i ——*i*个车轮的着地分布宽度(m)

d_i ——两个车轮之间的净距(m)

n ——车轮的总数量

H ——地面至管顶的深度(m)

表1 μ_d 取值

管顶覆土深度(m)	动力系数
0.25	1.30
0.30	1.25
0.4	1.20
0.5	1.15
0.6	1.05
≥0.70	1.00

地面堆积荷载标准值取10kN/m², 地面堆积荷载与车辆荷载不同时考虑, 当车辆荷载标准值小于10kN/m², 此工况下不考虑车辆荷载的影响, 按照堆积荷载来考虑变形计算。

3 环向弯曲应力、变形与稳定性校核

城镇燃气埋地PE管道在外压作用下变形量计算符合Spangler模型, 燃气设计相关规范尚未给出明确的环向弯曲应力、变形与稳定性的校核准则, 埋地PE管道在给排水领域应用极其广泛, 设计体系比较完善, CJJ101-2016《埋地塑料给水管道工程技术规

程》给出了相应的校核标准, 本文参考该标准进行计算分析。

3.1 弯曲应力校核要求

参考CJJ101-2016规范第3.3.6节规定: PE管道(PE80、PE100)弯曲强度设计值为16MPa, 规范第4.4.6节给出了在外压作用下, 最大环向弯曲应力按式(3)计算:

$$\sigma_m = \frac{0.88 D_f E_p t (1.27 q_{ck} + 1.4 q_{vk}) D_1 K_d}{D_0^2 \left(\frac{8 E_p I_p}{D_0^3} + 0.061 E_d \right)} \quad (3)$$

3.2 竖向变形校核要求

参考CJJ101-2016规范第4.4.12节规定: 埋地PE管道在准永久组合下的最大长期竖向变形的极限值不超过管道计算直径的5%, 规范第4.4.13节给出了PE管道在土压力和地面荷载作用下产生的最大长期竖向变形按式(4)计算:

$$w_d = \frac{D_L q_k D_1 K_d}{8 \eta_E \frac{E_p I_p}{D_0^3} + 0.061 E_d} \quad (4)$$

3.3 环形稳定性校核要求

参考CJJ101-2016规范第4.4.9节规定: 管道应根据各项作用的不利组合, 验算管壁截面的环向稳定性, 验算时各项作用均取标准值, 环形稳定抗力系数不应小于2.0, 校核要求见公式(5)所示。管道环形稳定性临界压应力按式(6)计算:

$$F_{crk} \geq 2(q_{ck} + q_{vk}) \quad (5)$$

$$F_{crk} = \frac{2 \eta_E E_p (n^2 - 1)}{\left(\frac{D_1}{t} - 1 \right)^3 (1 - \nu_p^2)} + \frac{E_d}{2(n^2 - 1)(1 - \nu_s^2)} \quad (6)$$

式中:

D_L ——变形滞后效应系数, 取1.2~1.5, 本文取值1.5

D_f ——管道的形状系数

D_1 ——管道外径(m)

D_0 ——管道的计算直径(m)

t ——管道计算壁厚(mm)

I_p ——管壁纵向截面单位长度截面惯性矩(mm⁴/mm)

K_d ——管道变形系数, 本文按照管底土弧基础的中心角90°确定, 取0.096

- η_E ——管材弹性模量长期调整系数, PE管取0.25
- E_p ——管材的弹性模量 (MPa)
- ν_p ——管材的泊松比, PE管取0.45
- E_d ——管侧土的综合变形模量 (MPa), 参考附录A
- ν_s ——管侧土体泊松比
- n ——管壁失稳时的褶皱波数, 大于等于2的整数

4 典型计算案例

4.1 管道参数

本研究以管道规格DN200为例, 选用SDR26、SDR21、SDR17 3个系列进行计算分析, 管材等级采用PE100, 管道外径及壁厚见表2所示。

表2 管道参数

系列	外径 (mm)	壁厚 (mm)
SDR26	200	7.7
SDR21	200	9.6
SDR17	200	11.9

4.2 荷载参数

CJJ63-2018规范规定PE管道埋设在车行道下时, 覆土深度不得小于0.9m, 但在实际工程项目中也可能有不满足的情况, 本文典型计算案例中管顶覆土厚度取0.4m、0.8m、1.5m进行计算分析, 依据本文第2章给出的荷载计算方法, 作用在管道上的荷载汇总表3所示。

4.3 管侧土综合变形模型

管侧土的综合变形模量和回填土的土质、沟槽两侧原状土的性质、回填压实度有关, 本文按照回填材

料为砂土考虑, 现场工程中沟槽两侧原状土的性质存在很多不确定因素, 按照最不利工况考虑, 其参数与回填砂土参数相同, 考虑不同的压实度, 其相应的参数见表4所示。

表3 作用在管道上的荷载汇总

覆土深度H (m)	覆土压力标准值 q_{ck} (kN/m ²)	车辆荷载竖向压力标准值 q_{vk} (kN/m ²)
0.4	7.2	72.96
0.8	14.4	32.04
1.5	27	16.02

表4 管侧土综合变形模型选用表

压实度	管侧土综合变形模型 E_d (MPa)
85%	1
90%	3

4.4 结果与分析

本文采用的PE100管材许用弯曲应力为16MPa, 应力比为计算弯曲应力与许用弯曲应力的比值, 即要求应力比不大于1.0; 同时竖向变形与计算直径的比值不大于5%, 环形稳定抗力系数大于2.0, 上述3个校核项需同时满足规范要求方可校核通过, 否则管道运行工况下可能存在一定的安全风险。

由上述计算结果(表5~表7)可知:(1)在回填土压实度85%的情况下, 覆土深度0.4m、0.8m、1.5m情况下SDR26和SDR21系列的管道均不满足规范校核要求, 在回填土压实度90%的情况下三项指标均满足规范校核要求, 且有一定的安全余量, 由此可见, 回填土的压实度是关系到城镇燃气埋地PE管道的安全

表5 覆土深度0.4m计算结果

管道系列	SDR26	SDR21	SDR17	SDR26	SDR21	SDR17
管侧土综合变形模型 E_d (MPa)	1	1	1	3	3	3
弯曲应力 (MPa)	20.74	18.7	15.13	9.54	10.2	9.89
应力比	1.3	1.17	0.95	0.6	0.64	0.62
竖向变形 (mm)	17.54	15.27	12.19	6.49	6.16	5.59
竖向变形与计算直径的比值 (%)	9.12	8.02	6.48	3.38	3.23	2.97
环向稳定临界压力 (MPa)	0.32	0.44	0.67	0.72	0.84	1.07
环形稳定抗力系数	3.98	5.48	8.42	8.93	10.43	13.37

表6 覆土深度0.8m计算结果

管道系列	SDR26	SDR21	SDR17	SDR26	SDR21	SDR17
管侧土综合变形模型 E_d (MPa)	1	1	1	3	3	3
弯曲应力 (MPa)	11.77	10.61	8.59	5.41	5.79	5.61
应力比	0.74	0.66	0.54	0.34	0.36	0.35
竖向变形 (mm)	12.22	10.64	8.49	4.52	4.29	3.89
竖向变形与计算直径的比值 (%)	6.35	5.59	4.51	2.35	2.25	2.07
环向稳定临界压力 (MPa)	0.32	0.44	0.67	0.72	0.84	1.07
环形稳定抗力系数	6.87	9.46	14.53	15.42	18.01	23.07

表7 覆土深度1.5m计算结果

管道系列	SDR26	SDR21	SDR17	SDR26	SDR21	SDR17
管侧土综合变形模型 E_d (MPa)	1	1	1	3	3	3
弯曲应力 (MPa)	10.57	9.53	7.71	4.86	5.2	5.04
应力比	0.66	0.6	0.48	0.3	0.32	0.31
竖向变形 (mm)	14.06	12.24	9.77	5.21	4.93	4.48
竖向变形与计算直径的比值 (%)	7.31	6.43	5.19	2.71	2.59	2.38
环向稳定临界压力 (MPa)	0.32	0.44	0.67	0.72	0.84	1.07
环形稳定抗力系数	7.42	10.22	15.68	16.64	19.44	24.91

运行方面最为主要的因素。(2) 在相同运行工况下, 随着PE管道径厚比的减小, 竖向变形量会减小, 环向稳定性抗力会增强, 在一定程度上会降低管道失稳的风险。(3) 管顶覆土深度关系到城镇燃气埋地PE管道所受荷载的大小, 覆土深度小于0.8m时, 车辆对管道的荷载效应会占主导作用, 覆土深度大于1.5m, 覆土自重对管道的环形变形占主导控制作用, 因此选择恰当的覆土深度在一定程度上也可以提高PE管道的安全性。

5 结论

(1) 回填土的压实度是关系城镇燃气埋地PE管道安全运行的主导因素, 因此现场工程施工中, 应该严格把握回填质量。

(2) 在管道系列选取方面, 取用径厚比小的管道会增强管道抗竖向变形能力和环形稳定抗力能力, 但相应的会在一定程度上增大工程投资。

(3) 敷设在道路下的城镇燃气埋地PE管道应选取合适的覆土深度, 当局部埋深过大或过小时均应进行环向弯曲应力、变形与稳定性三方面的验算, 必要时局部可加大管道径厚比, 严格要求回填质量方面的措施, 保障管道的安全运行。

参考文献

- [1] 徐青永, 郭华超, 王志刚. 接触载荷作用下聚乙烯燃气管道的有限元分析[J]. 特种设备安全技术, 2023 (1): 23-25.
- [2] 陈锦增. 埋地塑料管道结构稳定性分析计算[J]. 四川建材, 2021 (5): 189-190.
- [3] 张宁. 供热直埋保温塑料管PE-RT II 最小覆土深度[J]. 2019供热工程建设与高效运行研讨会论文集, 2019 (4): 822-826.
- [4] 张雷, 张诚, 李建军. 交通荷载作用下聚乙烯PE燃气管道的应力和稳定性分析[J]. 城市燃气, 2010 (09): 22-24.