

文章编号: 1000-5862(2019)03-0225-06

不均匀沉降架空管道系统的有限元计算分析

陈英红¹, 黄 思^{2*}, 徐征南², 林冠堂¹, 张 聪², 牛琦锋²

(1. 广东省特种设备检测研究院珠海检测院, 广东 珠海 519002;

2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 以某化工园区的基础不均匀沉降地段的架空管道系统作为研究对象, 该管道系统有 10 组立柱, 4 层桁架及 27 根管道, 输送不同温度和压力工况的流动介质。采用自动安平水准仪测量架空管道立柱的沉降值, 在此基础上考虑重力、介质温度、流动载荷等因素, 系统完整地建立 ANSYS 有限元模型并进行数值计算, 得到了不均匀沉降架空管道系统的位移、应力等参数分布。对 2 次应力进行了校核验算, 以判断不均匀沉降地段的架空管道系统的可靠性, 并估算出各个立柱的临界沉降值。旨在探索一套针对不均匀沉降架空管道系统实际应用的安全风险评估方法, 为架空管道的安全运行提供坚实的技术支持。

关键词: 架空管道; 不均匀沉降; 热流固耦合; 有限元分析

中图分类号: TE 88 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2019.03.02

0 引言

化工园区的架空管道一般用于输送各种温度、压力和流动工况的化工原料和成品。在基础不均匀沉降地段, 立柱、桁架和管道产生相对错位, 容易出现结构局部变形、减薄失效等问题, 这将直接影响架空管道的作业安全。近年来因地基不均匀沉降带来的储运设备安全问题引起了有关研究人员的关注。李星华^[1]、赵欢^[2]、李玉坤^[3]等分别对不均匀沉降地基的埋地管道进行了力学计算, 探讨了地基沉降的影响及其应对方案。谢伟^[4]、周蓓蓓^[5]、高红利^[6]等分别对基础不均匀沉降球形储罐受力和稳定性做了分析, 得到了不同沉降情况下立柱和储罐的应力变化规律。但有关基础不均匀沉降架空管道的研究鲜有报道。

本文选取华南某化工园区一个基础不均匀沉降地段的架空管道系统作为研究对象, 采用自动安平水准仪测量架空管道立柱的沉降值, 在此基础上考虑重力、介质温度、流动载荷等因素, 建立系统完整的 ANSYS 有限元计算模型进行数值计算, 旨在探索一套针对基础不均匀沉降架空管道系统实际应用的安全风险评估方法, 为架空管道的安全运行提供坚实的技术支持。

1 立柱沉降测量

图 1 和图 2 分别给出所研究的基础不均匀沉降地段架空管道系统纵向和横向示意图。该系统有 10 组立柱, 4 层桁架。第 1 层桁架有 5 根管道, 第 2 层有 3 根, 第 3 层有 3 根, 第 4 层有 16 根, 一共 27 根管道, 管道编号如图 2 所示。

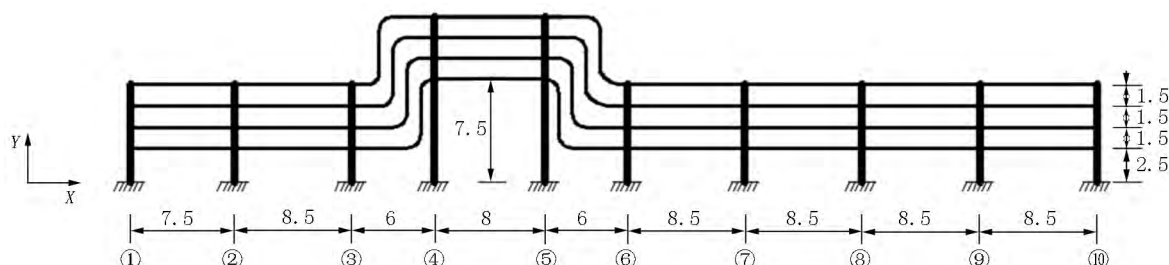


图1 架空管道系统几何模型纵向示意图

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(21878102)和广东省质监局科技(2018CT23)资助项目。

通信作者: 黄 思(1962-), 男, 广西南宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械的教学与科研工作。E-mail: huangsi@scut.edu.cn

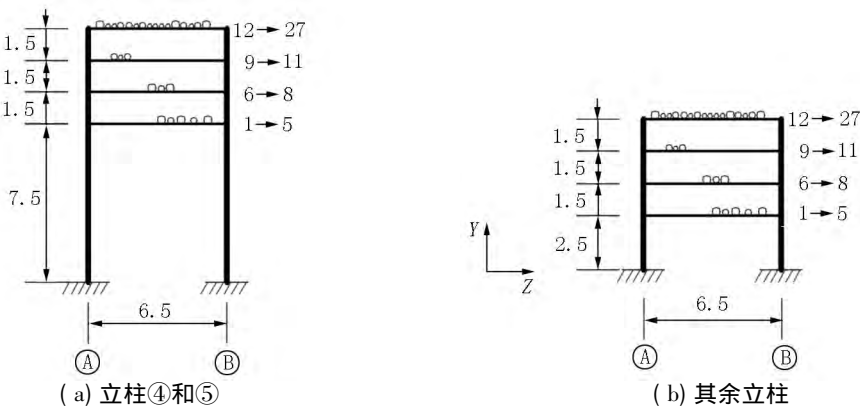


图2 架空管道系统几何模型横向示意图

采用可自动视线调平、稳定抗干扰的DSZ3-32X型水准仪测量架空管道立柱的沉降值,得到沉降地段中几组立柱的累积沉降值 h 如表1所示,其中立柱①和⑩不在沉降地段。

表1 架空管道立柱累积沉降测量值/mm									
立柱	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
h	4.3	3.9	4.7	5.0	5.8	6.8	5.3	3.8	

2 有限元建模

2.1 计算单元类型

根据图1~图2所示的架空管道系统布局,建立ANSYS的APDL有限元计算模型.分别使用梁单元(Beam189)和管单元(Pipe289)对立柱、桁架和管道进行建模^[7-9],表2给出了立柱、桁架和管道单元的具体数据,其中 B 为梁单元截面长度, H 为截面高度, D 为管单元外径, δ 为管壁厚度。

表2 有限元参数

结构部分		单元类型	截面尺寸 /mm	材料类型
管架	立柱	Beam189	$B=600\ H=500$	混凝土 C35
			$B=500\ H=300$	
			$B=950\ H=500$	
	桁架		$B=700\ H=500$	
管道(编号)	15	Pipe289	$D=89\ \delta=3.5$	20#钢
	9 ,13 ,20 ,21 ,22		$D=108\ \delta=3.5$	
	10 ,23 ,24 ,25 ,27		$D=159\ \delta=3.5$	
	6 ,7 ,11		$D=129\ \delta=4.0$	
	3 ,16 ,18 ,19		$D=273\ \delta=4.5$	
	2 ,8 ,14 ,17 ,19		$D=325\ \delta=5.0$	
	4 ,5		$D=377\ \delta=5.0$	
	1		$D=426\ \delta=5.0$	
	12		$D=529\ \delta=6.0$	

2.2 材料属性

有限元单元模型中使用的材料参数如表3所示.由结构的材料、单元类型以及单元截面尺寸,建

立了完整的架空管道ANSYS计算模型,共包括12 660个单元和25 057个节点.图3为架空管道系统有限元网格模型。

表3 材料参数

材料类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	热膨胀系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	结构部分
混凝土 C35	3.15×10^4	0.2	2 450	1.0×10^{-5}	管架
20#钢	2.10×10^5	0.3	7 800	1.2×10^{-5}	管道

2.3 介质参数

根据现场实际情况,计算所使用的介质种类、操作工况和介质物性参数如表4所示。

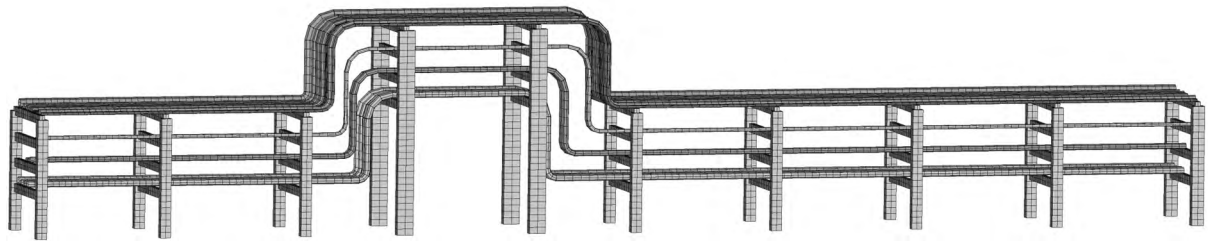


图 3 架空管道系统有限元网格

表 4 管道输送介质参数

介质类型	介质种类	管道编号	介质密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	运动粘性系数 $\nu/(10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	内压 p/MPa	温度 $T/^\circ\text{C}$	导热系数 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
水	过热蒸汽	13	15.4	14.80	721	1.25	194	0.07
	含油污水	15	850	1.00	56	0.80	25	0.50
油	石脑油	3, 11, 23	653, 760, 760	8.00	591, 378, 196	0.80	40	0.11, 0.14, 0.11
	航煤	24	780	3.50	196	0.80	40	0.12
	凝析油	8	800	8.00	842	0.80	40	0.14
	加氢裂化尾油	27	832	13.20	196	0.80	40	0.12
	柴油	14, 26	855, 955	8.00	842, 842	0.80	40	0.12, 0.12
	蜡油	2	877	8.00	842	0.80	40	0.12
	燃料油	7, 19	900, 994	8.00	378, 591	0.80	80	0.11, 0.12
	原油	1, 12	959, 950	8.00	1,468, 2,267	0.80	40	0.14, 0.14
	溶剂油	22	970	2.74	87	0.80	40	0.12
	馏分油	6	1,000	8.00	378	0.80	80	0.11
	92#汽油	17	746	8.00	842	0.80	40	0.15
	95#汽油	18	746	8.00	591	0.80	40	0.15
芳烃	轻芳烃	4	730	8.00	1,142	0.80	80	0.14
	中芳烃	5	890	8.00	1,142	0.80	80	0.14
	重芳烃	16	1,000	30.00	591	0.80	80	0.12
苯	混合二甲苯	25	860	8.00	196	0.80	80	0.13
	甲苯	20	866	8.00	86	0.80	80	0.13
	苯	21	879	8.00	86	0.80	80	0.16
其他	芳烃产品	10	680	8.00	196	0.80	80	0.14
	非芳烃产品	9	800		56	0.80	40	0.12

3 载荷与约束条件

载荷主要有重力、介质温度和流动对管道的作用力。计算中对管道两端采取固定约束,对无沉降的立柱底部采取固定约束,有沉降的立柱底部按表 1 的测量结果设置向下位移^[10]。

3.1 介质温度载荷

管道因流动介质温度与安装时环境温度的差异而产生伸缩,因此在有限元计算中,需同时考虑温度和结构的选项^[11-13]。在施加温度载荷时,所需的材料膨胀系数、介质工作温度和导热系数见表 3 和表 4。

3.2 介质流动载荷

流动介质对管道施加的力主要有因粘性流动造成的沿程阻力和因管道变向 90°而产生的作用力^[14]。

(i) 等径管道沿程阻力为

$$F_x = (p_1 - p_2) A = \lambda l \rho v^2 A / (2d),$$

沿程阻力系数为 $\lambda = 0.3164/R_e^{0.25}$, 雷诺数表达式为 $R_e = vd/\nu$, 其中 l 为管道长度, d 为管道内径, v 为介质流速, ν 为介质运动粘性系数, A 为管道截面积, 如图 4 所示。

(ii) 90°等径弯管作用力为

$$F_x = (p_1 + \rho v^2) A, F_y = (p_2 + \rho v^2) A.$$

作用力方向和作用点如图 5 所示。

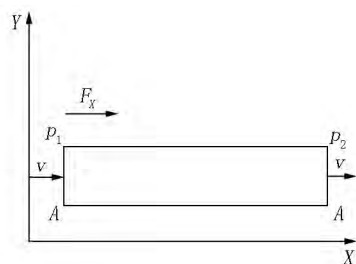


图4 作用于等径直管的流体力

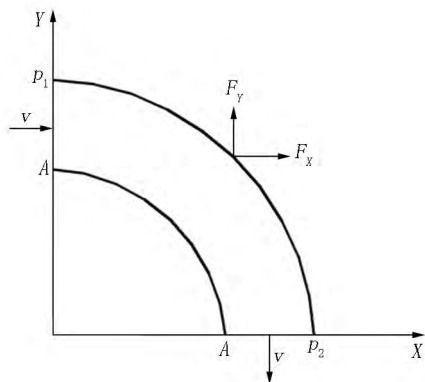


图5 作用于90°等径弯管的流体力

4 计算结果与分析

4.1 位移分布

图6和图7分别是计算得到的架空管道系统X向和Y向位移分布。由图6和图7可见,最大X向位移(11.4 mm)出现在编号13、输送介质为过热蒸汽的管道,位于管架⑤和管架⑥之间;最大Y向位移出现在编号9、输送介质为非芳烃产品的管道,位于管架⑤和管架⑥之间,最大位移值为14.3 mm。此外,方形补偿器两端上圆角处受拉伸,下圆角处受挤压,位移情况与文献[15]对方形补偿器受力变形的分析一致。

4.2 应力分布和强度校核

图8为计算得到的架空管道系统等效(Von Mises)应力分布。由图8可见,最大应力(156 MPa)出现在编号13、输送介质为过热蒸汽的管道与管架⑧第4层横梁接触的地方。由于该管道内径小、介质温度高、流速大,所以该管道应力高于其他管道。

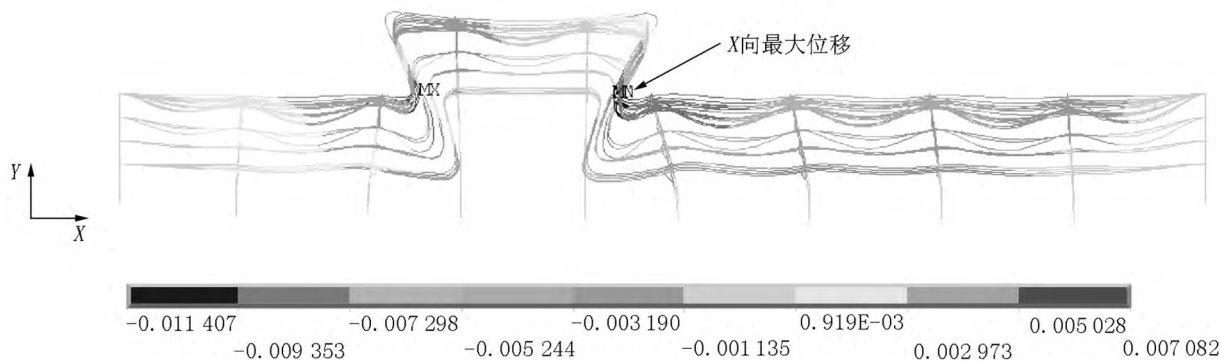


图6 X向位移分布

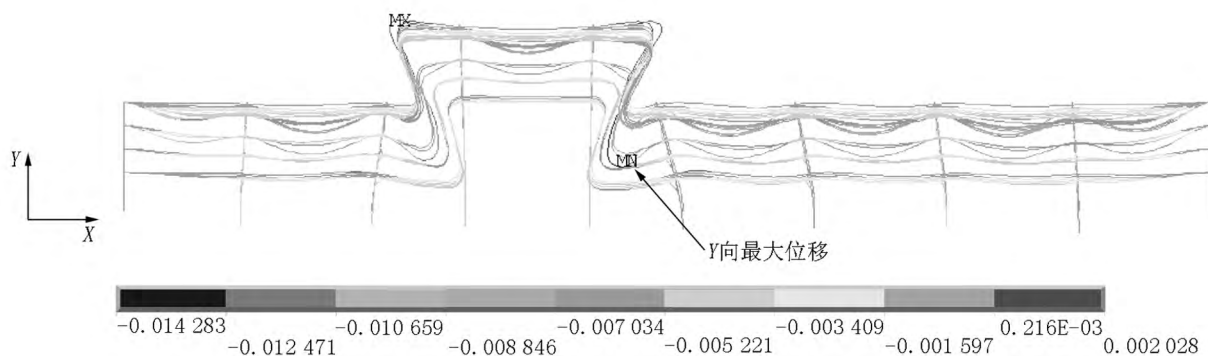


图7 Y向位移分布

根据行业的技术规程^[16]可知,管材因热胀冷缩和其它位移受到约束而产生的热胀2次应力 σ_f 需满足以下条件^[17]:

$$\sigma_f \leq 1.2 [\sigma]_j^{20} + 0.2 [\sigma]_j' \quad (1)$$

其中 $[\sigma]_j^{20}$ 和 $[\sigma]_j'$ 分别为管材在20℃和计算温度

下的基本许用应力。对于架空管道所采用20#钢,按(1)式得知2次应力值应满足 $\sigma_f \leq 209.4$ MPa。由图8可知,计算得到的架空管道系统最大应力为156 MPa,满足条件 $\sigma_f \leq 209.4$ MPa,故该不均匀沉降地段的架空管道运行可靠。

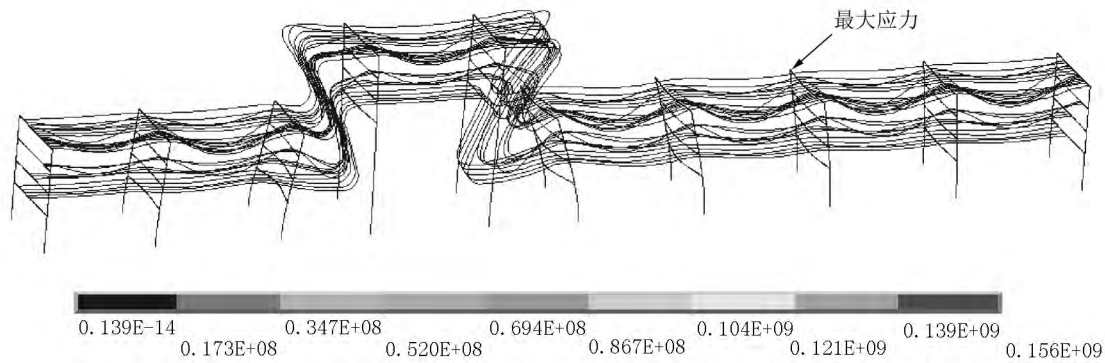


图 8 等效应力分布

4.3 临界沉降值

为考察该地段架空管道系统所能承受的临界沉降大小,在计算模型中对各立柱分别单独设置沉降值 h (其余立柱无沉降),计算出所对应的系统最大应力 σ_{\max} ,得到如图 9 所示的单柱沉降 h 和最大应力 σ_{\max} 之间的关系,由此可根据管材的许用应力 $[\sigma]$ 求出各单柱的临界沉降值 h_{cr} . 以 20#钢的 2 次许用应力为例,在图 9 中做 $\sigma_{\max} = 209.4 \text{ MPa}$ 的水平线与其余各线相交,得到各交点的横坐标 h 即为各单柱的临界值 h_{cr} ,如表 5 所示. 由表 5 可见,最高立柱④⑤和相邻立柱③⑥所能承受的沉降值较小.

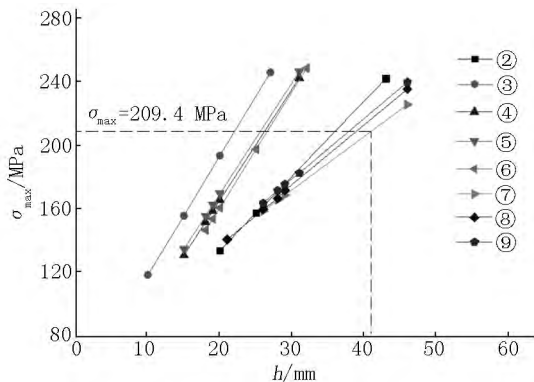


图 9 单柱沉降 h 与架空管道系统最大应力 σ_{\max} 关系

表 5 单柱的临界沉降值

立柱	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
h_{cr}	36.0	22.1	26.1	26.2	26.6	41.0	39.0	37.9

5 结论

通过对某化工园区基础不均匀沉降地段的架空管道系统的沉降测量和有限元计算,得到以下结论:

- 1) 所研究的架空管道系统最大位移出现在 2 个最高立柱之间,两端上圆角处受拉伸,下圆角处受挤压,位移情况满足设计要求;
- 2) 在整个架空管道系统中,最大应力出现在内径小、介质温度高、流速高的管道与横梁接触的位

置. 经强度校核,该不均匀沉降地段的架空管道系统满足应力校核;

3) 不均匀沉降架空管道中最高立柱和相邻立柱所能承受的沉降值较小,需重点关注这些立柱的沉降情况;

4) 所采用的热流固耦合有限元计算方法对基础不均匀沉降地段的架空管道受力分析是切实可行的,可为在役架空管道的安全运行提供坚实的技术支持.

6 参考文献

[1] 李星华. 浅谈软土地基不均匀沉降对燃气管道的影响及对策 [J]. 化工管理, 2013(5): 182-183.

[2] 赵欢, 邓荣贵, 高阳. 回填土不均匀沉降引起管道力学性状变化的分析 [J]. 路基工程, 2014(1): 69-72.

[3] 李玉坤, 吴中林, 李龙杰, 等. 不均匀沉降填海地基埋地管道应力计算 [J]. 油气储运, 2014, 33(3): 247-251.

[4] 谢伟. 球罐支柱基础沉降差对稳定性的影响 [J]. 压力容器, 2001, 18(3): 45-46, 66.

[5] 周蓓蓓, 谭蔚, 杨培志. 基础不均匀沉降形式对球形储罐支柱受力状况的影响 [J]. 石油化工设备, 2009, 38(4): 12-17.

[6] 高红利, 李伟军, 李志海, 等. 基础不均匀沉降及支柱倾斜球罐应力分析 [J]. 石油化工设备, 2013, 42(3): 41-45.

[7] 刘文凯, 王飞, 王国伟, 等. 直埋弯管应力分析及 ANSYS 的二次开发 [J]. 中国科技论文, 2018, 13(11): 1238-1243.

[8] 谭俊, 高德芳, 杨超. 斜齿轮精确啮合模型的 APDL 建模方法 [J]. 机械传动, 2017, 41(5): 188-192.

[9] 徐鹏飞, 王洪申, 豆永坤. 基于命令流方法实现 ANSYS 系统参数化建模 [J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(4): 51-53.

[10] Ramaneyulu K, Husain A, Sehgal D K. Finite element analysis and reliability assessment of spherical LPG storage tank [J]. Journal of the Institution of Engineers: Me-

- chanical Engineering Division 2003 84(3):98-103.
- [11] Guan Changsheng, Wan Zhao. The Simulation study on buried ground-source heat pipe transient temperature field distribution [J]. Advanced Materials Research 2012 383-390: 6621-6625.
- [12] 李程. 热力管网中补偿器与支架位置优化的研究 [D]. 北京: 北京建筑大学 2017.
- [13] 徐君臣, 吴云龙, 张文杰. 高温管道限位支撑结构的热力耦合分析及结构改进 [J]. 压力容器 2017 34(12): 32-38.
- [14] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [15] 秦小刚, 王银璞, 张成藩, 等. 正确计算方形补偿器安装冷拉值的公式 [J]. 石油和化工设备 2012 15(8): 38-40.
- [16] 中国电力企业联合会. 中华人民共和国电力行业标准: DL/T 5366—2006 [S]. 北京: 中国电力出版社 2007.
- [17] 常守欣, 王志栋. 方形补偿器类型及应力分析验算 [J]. 四川建材 2008 34(6): 23-24.

The Finite Element Analysis of Uneven Settlement Overhead Pipeline System

CHEN Yinghong¹, HUANG Si^{2*}, XU Zhengnan², LIN Guantang¹, ZHANG Cong², NIU Qifeng²

(1. Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research Zhuhai Branch Zhuhai Guangdong 519002, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

Abstract: In this study, the overhead pipeline system in the uneven settlement area of a chemical industry park is taken as the research object. The pipeline system consists of 10 sets of columns, 4 layers of pipe racks and 27 pipelines, which transports the flow media under different temperature and pressure conditions. On the basis of measuring the settlement of overhead pipeline pillars with automatic level, considering factors such as gravity, medium temperature and flow load, the ANSYS finite element model is established sophisticatedly to perform the thermal fluid-solid coupling calculation. The displacement and stress distribution of overhead pipeline system with uneven settlement are obtained. The secondary stress is checked in order to judge the reliability of the overhead pipeline system and estimate the critical settlement of each column. The study aims to explore a set of safety risk assessment method for the application of overhead pipeline system with uneven settlement, and provide solid technical support for the safety operation of overhead pipelines.

Key words: overhead pipeline; uneven settlement; thermal fluid-solid coupling; finite element analysis

(责任编辑: 王金莲)