

文章编号: 1000-4750(2020)Suppl-0333-07

车辆载荷下 PE 燃气管道的虚拟仿真 技术及其动力响应分析

王威翔¹, 姚安林¹, 徐涛龙¹, 代 强², 古 芑³

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川, 成都 610500; 2. 资阳港华燃气有限公司, 四川, 资阳 641300;
3. 中国石化新疆煤制天然气外输管道有限责任公司, 北京 100020)

摘 要: 当前, 城镇燃气管道受车辆碾压造成的事故时有发生, 为分析车辆载荷下 PE 燃气管道的动力响应, 借助虚拟样机系统仿真软件 ADAMS 并结合有限元分析软件研究车辆的运动载荷及受载埋地 PE 燃气管道的力学特征。建立车辆-路面-土体-管道模型, 根据实测值对仿真结果进行了验证。基于虚拟样机系统仿真提取的车辆动态载荷谱, 分析 PE 燃气管道的动力响应过程, 并开展不同车重、不同车速下埋地 PE 燃气管道的动力响应规律研究。结果表明: 管体所受的应力及其位移量随着车重的增大而增大; 管体所受应力随着车速的增大而增大, 而其位移量随着车速的增大而减小。

关键词: PE 燃气管道; 车辆载荷; 虚拟仿真技术; 动力响应; 有限元分析

中图分类号: TU996.7; O34 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.05.S028

VIRTUAL SIMULATION TECHNOLOGY AND DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF PE GAS PIPELINE UNDER VEHICLE LOAD

WANG Wei-xiang¹, YAO An-lin¹, XU Tao-long¹, DAI Qiang², GU Peng³

(1. College of Petroleum & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2. Ziyang Towngas Limited Company, Ziyang, Sichuan 641300, China;
3. Sinopec Xinjiang Synthetic Natural Gas Pipeline Transportation Co.Ltd, Beijing 100020, China)

Abstract: In order to analyze the dynamic response of PE gas pipeline under vehicle loading, the virtual prototype system simulation software ADAMS and the finite element analysis software are used to study vehicle moving loads and the mechanical characteristics of buried PE gas pipeline under the loads. A vehicle-pavement-soil-pipeline model is established, and the simulation results are verified by measured values. Based on the vehicle dynamic load spectrum extracted by virtual prototype system simulation, the dynamic response process of PE gas pipeline is analyzed, and the dynamic response law of buried PE gas pipeline under different vehicle weights and speeds is studied. The results show that: the stress and displacement of the tube increases with the increase of vehicle weight; the stress on the pipe increases with the increase of the vehicle speed, and its displacement decreases with the increase of the vehicle speed.

Key words: PE gas pipeline; vehicle load; virtual simulation technology; dynamic response; finite element analysis

聚乙烯 (polyethylene, 简称 PE) 管道具有耐化学腐蚀性、柔韧性、使用寿命长等优点, 在城镇

中低压燃气管网建设中被广泛应用^[1]。随着城镇建设加快, 城镇道路车流量逐渐增大且超载车辆最

收稿日期: 2019-05-06; 修改日期: 2020-01-16

通讯作者: 徐涛龙 (1984—), 男, 浙江诸暨人, 讲师, 博士, 从事管线力学及油气管道风险评价等研究 (E-mail: swpuxtl@163.com)。

作者简介: 王威翔 (1995—), 男, 浙江宁波人, 硕士生, 从事油气管道风险评价及完整性管理等研究 (E-mail: 550954460@qq.com);

姚安林 (1959—), 男, 四川三台人, 教授, 学士, 从事油气管道风险评价及完整性管理等研究与教学工作 (E-mail: yaoalt@sina.com);

代 强 (1983—), 男, 四川安岳人, 工程师, 学士, 从事燃气管网规划设计及工程质量管理等工作 (E-mail: dq20082008@126.com);

古 芑 (1991—), 男, 河南南阳人, 硕士生, 从事油气管道风险评价及完整性管理等研究 (E-mail: 245371008@qq.com)。

大超载额可达 200%，由于 PE 管道机械强度相对于钢管较低，抗压性不好，车辆载荷已经成为影响 PE 燃气管道安全的最主要动载荷之一。

车辆载荷下埋地管道的力学分析方法有 Marston 理论和 Boussinesq 理论^[2]，但是由于 PE 管道的粘弹特性，使用传统的分析方法已然不能满足精度要求。针对 PE 管道的材料属性，国外已有学者通过 Boltzmann 遗传积分在恒速加载下研究了 PE 管的位移与时间的关系^[3]；国内部分学者通过 maxwell 模型和遗传算法结合共轭梯度法模拟了 PE 材料的松弛曲线^[4]。

在数值模拟方面，郑绵彬等^[5]建立了车辆载荷下聚乙烯管道的失效率计算模型，用来获得不同埋深和内外载荷共同作用下聚乙烯管道的失效率；董冬冬等^[6]基于现场足尺试验和数值模拟，研究了交通载荷作用下埋地 PE 管道附加弯矩的影响因素及变化规律；李明阳等^[7]用 ANSYS 对交通载荷作用下的埋地聚乙烯管道进行了瞬态模拟，分析了不同覆土厚度对管道的影响。但是目前的研究大多使用的车辆载荷模型为简化后的均布载荷或波动载荷^[8]，因此本研究基于虚拟样机系统仿真软件 ADAMS 进行整车动力学分析，准确提取各车轮的载荷谱，结合有限元分析软件研究 PE 管道的力学特征。

1 基于虚拟样机技术的三轴重型卡车动态载荷分析

1.1 车辆-路面模型建立

为获得三轴重型卡车各轴的轮胎载荷，本研究基于虚拟样机系统仿真软件 ADAMS 中的 ADAMS/CAR 构建了某国产三轴 10 轮重型卡车多体动力学模型，具体模型参数如表 1 所示。

表 1 重型卡车参数
Table 1 Heavy truck parameters

车辆参数			轮胎参数		
自重/t	载重/t	轴数/个	轮压/MPa	轴距/mm	轮距/mm
12	<70	3	0.7~1.0	2400	2040/1880

表 2 各轮胎动载荷系数验证
Table 2 Verify the dynamic load coefficient of each tire

车轮编号	LF	LI	LI2	LW	LW2	RF	RI	RI2	RW	RW2
实测值 ^[10]	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
计算值	1.274	1.376	1.272	1.447	1.241	1.222	1.436	1.391	1.277	1.280
误差	-0.070	0.005	-0.072	0.056	-0.094	-0.108	0.048	0.015	-0.068	-0.066

GB/T7031-2005《机械振动道路路面谱测量数据报告》根据路面不平度系数将路面分为 8 级，分别命名为 A~H，级数越高路面越不平整^[9]，这里选用 B 级路面。利用 ADAMS/CAR 中的整车动力学仿真分析 (Full-Vehicle Analysis) 模块建立匀速事件 (Straight-Line Events)，即卡车在设定好的路面上进行匀速直线运动，建立的模型如图 1 所示，将车轮依次编号，如图 2 所示。

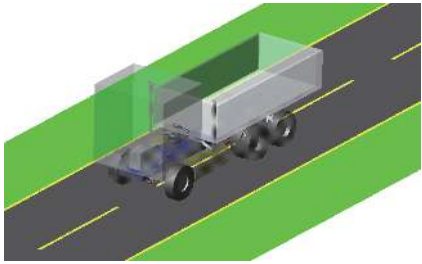


图 1 ADAMS/CAR 建立模型图
Fig. 1 ADAMS/CAR Model drawing

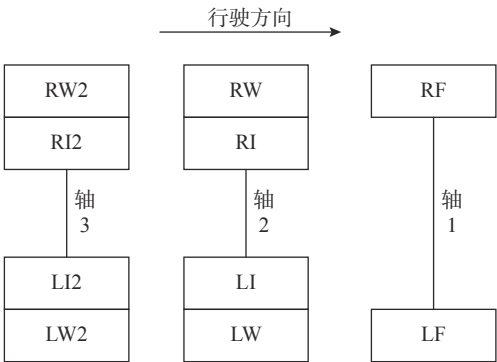


图 2 车轮俯视图
Fig. 2 Top view of wheel

1.2 车辆-路面仿真结果验证

本研究使用文献 [10] 中的试验实测值对车辆载荷仿真数据进行验证。在 ADMAS 中建立 50 t 卡车以 60 km/h 的速度进行匀速直线运动，提取轮胎载荷并计算动载系数 (动载值与静载值之比)。将最大动载系数与实测的动载系数 1.37 作比较，结果如表 2 所示，误差都在工程允许误差范围内，因此本模型能够较为准确的模拟出车辆在不平整路面上的轮胎载荷。

2 管道-土体三维有限元分析模型

2.1 土体参数设置

土体选用扩展的线性 Drucker-Prager 本构模型, 并采用不相关流动准则来避免材料的各向同性硬化, 即 $\varphi=0$ 土体不发生体积膨胀。土体参数如表 3 所示。

表 3 土体参数^[11]
Table 3 The soil parameters^[11]

土体类型	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	弹性模量 E_1/MPa	泊松比 μ
回填土	1869	20	0.4
摩擦角 $(^\circ)$	流变应力比 c	膨胀角 $\varphi/(\circ)$	—
36.5	1	0	—

2.2 管体参数设置

PE 材料是一种粘弹性材料, 力学性能受到应力、形变、温度和时间 4 个因素的影响, 本文不考虑温度对 PE 材料的影响。通过实验可以得到材料的松弛模量曲线和蠕变模量曲线, 并用 Prony 级数形式表示出来, 从而建立基于 Prony 级数的 PE 管材的本构方程^[11]。粘弹性材料的泊松比一般是时间的函数, 但是情况允许也可以近似为常数, 此时用 Prony 级数表示粘弹性属性的形式为:

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\mu)} \quad (1)$$

$$K(t) = \frac{E(t)}{3(1-2\mu)} \quad (2)$$

式中: G 是剪切模量; K 是体积模量; μ 为泊松比; $E(t)$ 为松弛模量, 由实验确定。PE80 管材的松弛模量如表 4 所示, 根据式 (1) 和式 (2) 得到其剪切模量和体积模量。

表 4 PE80 管材松弛模量^[12]
Table 4 Relaxation modulus of PE80^[12]

i	时间 t/s	松弛模量 E/MPa	剪切模量 G/MPa	体积模量 K/MPa
1	360	430.00	153.57	716.67
2	3600	320.00	114.29	533.33
3	36000	280.00	100.00	466.67
4	360000	250.00	89.59	416.67

瞬态剪切模量:

$$G_0 = G_\infty + \sum_{i=1}^N G_i \quad (3)$$

相对剪切模量:

$$g_i = G_i/G_0 \quad (4)$$

根据式 (3) 和式 (4) 得到各松弛时间下的相对剪切模量, 同理可得相对体积模量 (表 5)。将得到的瞬态松弛模量 $E_0(t=0 \text{ 时刻})$ 为 578.71 MPa。

表 5 各松弛时间下的相关参数^[12]
Table 5 The relevant parameters of each relaxation time^[12]

i	松弛时间 t/s	相对剪切模量 g_i	相对体积模量 k_i
1	360	0.3807	0.3947
2	3600	0.0858	0.0713
3	36000	0.0631	0.0723
4	360000	0.0515	0.0470

2.3 管-土接触设置

管道和土体间除了传递压力外, 还存在摩擦力及相对位移。因此, 管土接触选择面面接触, 管道为主面, 土体为从面。管道和土体之间存在法向和切向 2 个作用方向, 法向接触选择“硬接触”来保证接触面间的传递压力不受限制, 切向接触采用默认的库伦摩擦模型, 摩擦系数为 0.4。因为车辆碾压过程中管道会发生变形, 所以选择接触时管道会产生有限位移。土体四周和底部设置全约束, 管道两端设置轴向方向的约束。

2.4 轮胎载荷加载

通过 ADAMS 提取出的轮胎载荷可以通过 VDLOAD 子程序加载到 ABAQUS 有限元软件中。在土体表面设置 4 条载荷移动带, 载荷移动带在长度方向是单个轮胎载荷长度的 40 倍。为了将 VDLOAD 子程序与轮胎载荷精确的结合, 将载荷移动带的长度方向平分为 80 个小矩形, 加载初始阶段车轮占据前 2 个小矩形, 如图 3 所示的 1、2 位置; 第 1 个时间间隔, 载荷整体向前移动 1 个小矩形, 载荷作用位置为 2、3; 第 2 个时间间隔, 载荷再整体向前移动 1 个小矩形, 载荷作用位置为 3、4; 这样便达到载荷的移动效果。当车速为 36 km/h (10 m/s) 时, 每个时间间隔为 0.0175 s。

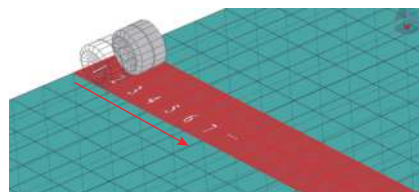


图 3 车辆载荷加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vehicle load loading

2.5 有限元计算结果验证

为了分析管-土有限元模型的计算精度，使用文献 [13] 中的试验实测值对比不同深度下的土体应力。在模拟结果中提取车轮正下方 0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m 处土体的应力值，与实测的数据作比较，对比结果如表 6 所示。结果显示，模拟值与实测值的误差小于 10%，在工程允许误差范围内，因此管-土基本模型能够较为准确地模拟车辆载荷对 PE 燃气管道的动力响应。

表 6 管-土模型验证
Table 6 Pipe-soil model validation

土体深度/m	模拟值/MPa	实测值/MPa ^[13]	误差/(%)
0.5	0.2225	0.2151	3.44
1.0	0.1342	0.1457	-7.89
1.5	0.0867	0.0886	-2.14
2.0	0.0294	0.0295	-0.33

3 结果分析与讨论

3.1 典型工况分析

以某一典型工况为例，分析 PE 燃气管道在车辆载荷作用下的动力响应行为。管道直径为 200 mm，壁厚 18.2 mm，管内介质压力 0.2 MPa，属于中压城镇燃气管道；土壤参数取 1.2 节中的土壤特性参数，土体尺寸为 14 m×12 m×6 m，管道埋深为 0.9 m。车辆载荷通过 ADAMS 模拟，具体参数见 1.1 节，模拟过程如图 4 所示。

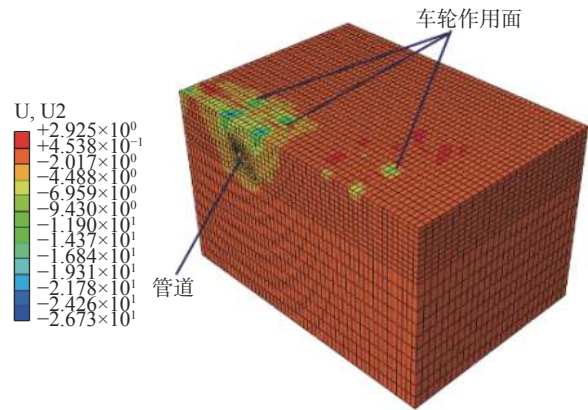


图 4 典型工况模拟
Fig. 4 Typical condition simulation

现分析在车辆行驶过管道的过程中管道的应力和位移变化情况。管道最大位移时刻放大 100 倍的结果如图 5 所示和该时刻 (STEP2, 0.7875 s) 管顶路径的管程-位移曲线如图 6 所示，此时车辆后轮组位于管道正上方，可以看出车辆经过时，管

道中间垂直位移最大且位移最大点位于的管道右下方。

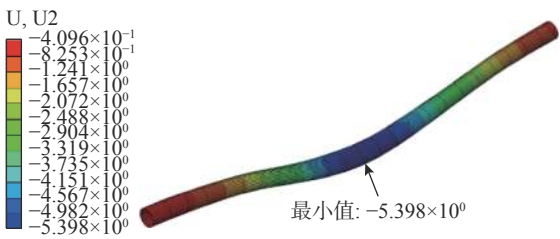


图 5 管道最大位移
Fig. 5 Maximum pipeline displacement

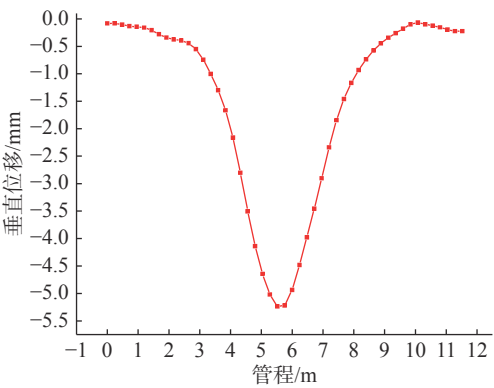


图 6 管程-位移曲线
Fig. 6 Pipe path-displacement curve

管道应力最大时刻的结果如图 7 所示，可以看出管道的最大应力出现在管道的右上方。管道最大应力点的时长-应力曲线如图 8 所示，可以看出当卡车的 3 组车轴经过管道上方时出现了 3 次依次增大的峰值，但是周围出现了一些小的波动是因为车辆以 10 m/s 的速度通过管道上方时间较短，载荷由土体传递至管道的过程具有滞后性。

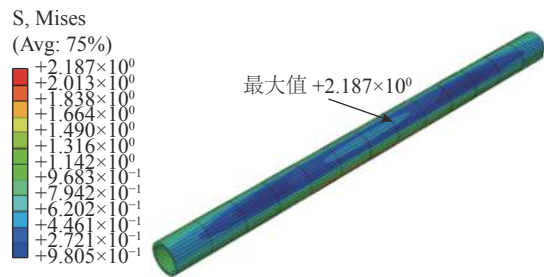


图 7 管道最大应力
Fig. 7 Pipeline maximum stress

3.2 车辆运行参数对管道的影响

为了更准确的得到车辆载荷作用下 PE 燃气管道的动力响应，对车辆重量和车辆速度这两个因素进行分析。

1) 车重的影响

保证其他参数不变，比较 40 t、50 t、60 t、70 t

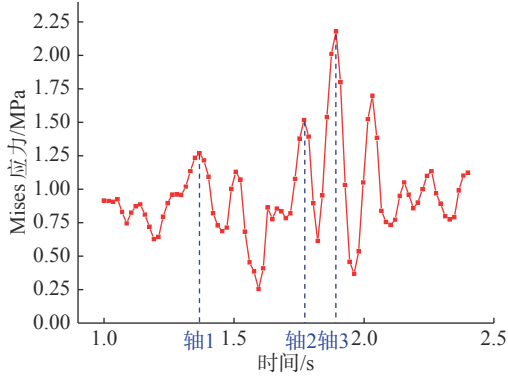


图 8 管道最大应力点时长-应力曲线
Fig. 8 Length - stress curve of maximum stress point of pipeline

和 80 t 车重的卡车对管道的影响。不同车重下 PE 燃气管道的最大位移和最大应力如表 7 所示,为了更好的分析不同车重下 PE 燃气管道的应力和位移变化情况,绘制了最大应力-时程曲线(图 9)和位移-管程曲线(图 10)。

根据模拟结果可知,随着车辆重量的提高,管道受到的应力和产生的位移均增大,但是出现最大位移和最大应力的时刻不发生改变。车辆重量从 40 t 增加到 80 t 时,管道最大应力和最大位移分别增加了 58.3% 和 149.2%,说明车辆重量的增加对 PE 燃气管道有显著影响。

表 7 不同车重下管道的最大位移和最大应力
Table 7 Maximum displacement and maximum stress of different vehicle weight under pipeline

车重/t	最大位移/mm	最大位移时刻/s	最大应力/MPa	最大应力时刻/s
40	3.655	0.7875	1.841	0.8925
50	4.599	0.7875	2.041	0.8925
60	5.398	0.7875	2.178	0.8925
70	6.265	0.7875	2.284	0.8925
80	9.109	0.7875	2.916	0.8750

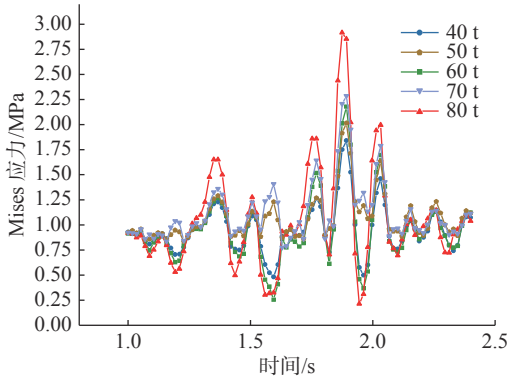


图 9 不同车重下最大应力-时程曲线
Fig. 9 Maximum stress-time history curve under different vehicle weights

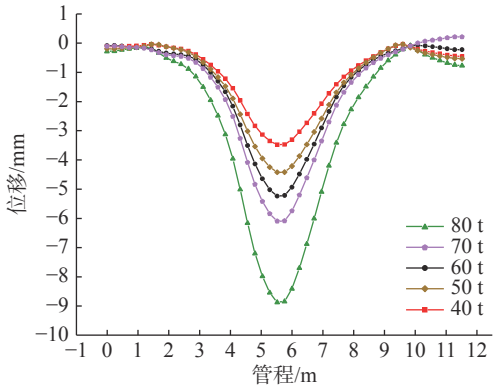


图 10 不同车重下最大位移-管程曲线
Fig. 10 Maximum displacement under different vehicle weights-pipe path curve

2) 车速的影响

为了研究车速的卡车对管道的影响,且保证轮胎载荷能够准确的与土体表面吻合以提高计算精度,选取的车速颇为讲究。分别使车辆在 14 m 长的土体上行驶 1.0 s、1.2 s、1.4 s、1.6 s、1.8 s、2.0 s,对应的车速为 14.00 m/s、11.67 m/s、10.00 m/s、8.75 m/s、7.78 m/s 和 7.00 m/s,经过有限元模拟计算,不同车速下 PE 燃气管道的最大位移和最大应力如表 8 所示。为了更好的分析不同车速下 PE 燃气管道的应力和位移变化情况,绘制了最大应力-时程曲线(图 11)和位移-管程曲线(图 12)。

表 8 不同车速下管道的最大位移和最大应力
Table 8 Maximum displacement and maximum stress of pipeline under different speed

车速/m/s	最大位移/mm	最大位移时刻/s	最大应力/MPa	最大应力时刻/s
7.00	6.195	1.0250	1.997	1.2000
7.78	5.604	0.9675	2.021	1.0350
8.75	5.543	0.8600	2.113	0.9600
10.00	5.398	0.7875	2.178	0.8925
11.67	5.220	0.7200	2.254	0.7500
14.00	5.139	0.5250	2.323	0.6000

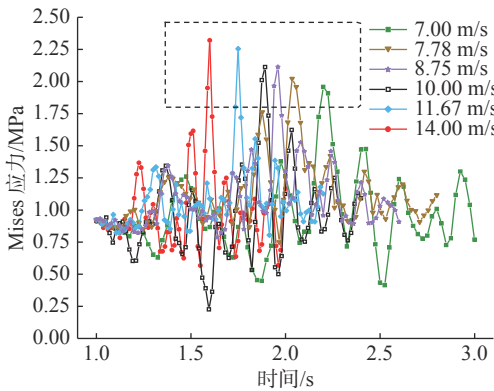


图 11 不同车速下最大应力-时程曲线
Fig. 11 Maximum stress-time history curve at different speed

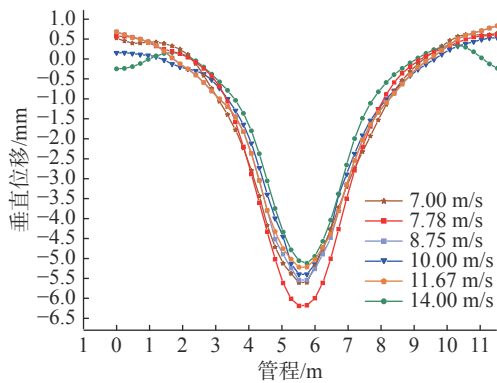


图 12 不同车速下最大位移管程-曲线

Fig. 12 Maximum stress-time history curve at different speed

根据模拟结果可知,随着车辆速度的提高,管道受到的应力增大但是产生的位移减小,可以从图 11 虚线黑框中看出,因为车速的不同,管道受到最大应力的时刻不同。因为 PE 管道是粘弹性材料,PE 管道受到得应力作用时间越长,弹性模量就会越小,则管道的变形越大。车重相同情况下,车速不同造成的管道应力变化不是很明显,所以决定 PE 管道位移变化大小的是管道所受应力的时长大小,7 m/s 时 PE 管道产生得垂直位移最大。

4 结论

基于 ADAMS 和 ABAQUS 建立车辆-道路模型和管道-土体模型,对不同车重和不同车速下的 PE 燃气管道的进行了动力响应分析,得出以下结论:

(1) 用 ADAMS 建立的车辆-道路模型能够较为准确的模拟出车辆在道路上的行驶情况,并可以获得每个车轮的载荷。

(2) 车辆重量越大,管道受到的应力越大且产生的位移越大。80 t 车辆碾压时 PE 燃气管道最大变形达到 9.1 mm,变形量达 4.5%,PE 管道的安全变形量为 5%,更重的车辆经过时可能会导致安全事故。

(3) 车辆速度越大,管道受到的应力越大;但是由于 PE 管道是粘弹性材料,管道变形大小还与力的作用时间有关,结果得出在 7 m/s~14 m/s 范围内,车速越大,PE 管道产生的位移越小。若超出 14 m/s,动载荷系数增大,随着车速增大管道位移是否会继续增大仍有待研究。

参考文献:

[1] 朱荣全,阮艳灵,秦立臣,等. PE燃气管道力学失效模式分析[J]. 化学工程与装备, 2017(3): 43 — 44, 67.

Zhu Rongquan, Ruan Yanling, Qin Lichen, et al. Mechanical failure mode analysis of gas pipeline [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(3): 43 — 44, 67. (in Chinese)

[2] 卢正,王长柏,付建军,等. 交通荷载作用下公路路基工作区深度研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 316 — 321, 352.

Lu Zhen, Wang Changbai, Fu Jianjun, et al. Deep study on roadbed working area under traffic load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 316 — 321, 352. (in Chinese)

[3] Oyen M L, Cook R F. Load-displacement behavior during sharp indentation of viscous-elastic-plastic materials [J]. Journal of Materials Research, 2003, 18(1): 139 — 150.

[4] 陈锦裕,朱志彬,杨晓翔. PE80燃气管道的应力松弛模型与实验验证[J]. 中国塑料, 2016, 30(4): 93 — 98.

Chen jinyu, Zhu zhibin, Yang Xiaoxiang. Stress relaxation model and experimental verification of PE80 gas pipeline [J]. China Plastics, 2016, 30(4): 93 — 98. (in Chinese)

[5] 郑绵彬,张玲. 交通载荷作用下聚乙烯燃气管道失效率分析[J]. 塑料工业, 2009, 37(2): 39 — 42.

Zheng Mianbin, Zhang Lin. Failure rate analysis of polyethylene gas pipeline under traffic load [J]. China Plastics Industry, 2009, 37(2): 39 — 42. (in Chinese)

[6] 董冬冬,王非,张亚军,等. 交通载荷作用下HDPE管道附加弯矩变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊 1): 80 — 88, 99.

Dong Dongdong, Wang Fei, Zhang Yajun, et al. Study on the Changing Mechanism of Additional Bending Moment in Buried HDPE Pipes under Traffic Loading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(Suppl 1): 80 — 88, 99. (in Chinese)

[7] 李明阳,陈国华. 交通载荷作用下埋地聚乙烯燃气管道的有限元分析[J]. 塑料工业, 2009, 37(9): 30 — 33.

Li Mingyang, Chen Guohua. Finite element analysis of buried polyethylene gas pipeline under traffic load [J]. China Plastics Industry, 2009, 37(9): 30 — 33. (in Chinese)

[8] 卢培纪,王福明. 某型车路面冲击载荷作用下瞬态动力分析[J]. 机械研究与应用, 2014, 27(1): 19 — 20, 26.

Lu Peiji, Wang Fuming. Vehicles transient dynamic analysis under the impact loading [J]. Mechanical Research & Application, 2014, 27(1): 19 — 20, 26. (in Chinese)

[9] 赵兰英,鲁植雄,侯占峰. 路面不平度的分形分级参数研究[J]. 交通与计算机, 2008, 26(6): 158 — 161.

Zhao Yinglan, Lu Zhixiong, Hou Zhanfeng. Study on fractal grading parameters of road roughness [J]. Transportation and Computers, 2008, 26(6): 158 — 161. (in Chinese)

[10] 董忠红,吕彭民. 高等级路面上的车辆动载荷[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(1): 95 — 99.

- Dong Zhonghong, Lu Pengmin. Dynamic load of vehicle on high-class pavement [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science)*, 2010, 30(1): 95 — 99. (in Chinese)
- [11] 周立国, 姚安林, 徐涛龙, 等. 挖掘载荷下燃气PE管道损伤分析[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(3): 59 — 64.
Zhou Liguang, Yao Anlin, Xu Taolong, et al. Damage analysis of urban gas PE pipeline under excavation load [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(3): 59 — 64. (in Chinese)
- [12] 左建东. 含缺陷燃气聚乙烯管道的安全评定数值分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- Zuo Jiandong. Numerical Analysis of Safety Assessment of Gas Polyethylene Pipes with Defects [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [13] 余红伟, 倪友伟, 姚士洪. 车辆载荷碾压作用下管道的安全性测试与分析[J]. *石油工程建设*, 2009, 35(3): 15 — 19, 5.
Yu Hongwei, Ni Youwei, Yao Shihong. Safety test and analysis of pipeline under rolling load of vehicle [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2009, 35(3): 15 — 19, 5. (in Chinese)

(上接第 332 页)

- [5] 顾乐乐. 伊通墙板节点强度、重复荷载作用及墙体模拟地震振动台试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
Gu Lele. YITONG nodes wall strength, the wall repeat loading and shaking table experimental study [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [6] 于敬海. 新型轻质加气混凝土承重砌体抗震性能的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
Yu Jinghai. Study on seismic performance of new lightweight aerated concrete load-bearing masonry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [7] 李晓丹. 轻质蒸压砂加气混凝土墙板的设计与研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
Li Xiaodan. Design and research of lightweight autoclaved and aerated concrete wallboard [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [8] Ghazi K. Wakili thermal behaviour of autoclaved aerated concrete exposed to fire [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 62: 52 — 58.
- [9] 张国伟, 肖伟, 陈博珊, 等. 蒸压加气混凝土外挂墙体滞回性能研究[J]. *工业建筑*, 2016, 46(11): 86 — 92.
Zhang Guowei, Xiao Wei, Chen Boshan, et al. Study on hysteretic behavior of autoclaved aerated concrete wall [J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(11): 86 — 92. (in Chinese)
- [10] 张国伟, 陈博珊, 肖伟, 等. 蒸压加气混凝土外挂墙板受弯性能研究[J]. *建筑结构*, 2016, 46(13): 97 — 102.
Zhang Guowei, Chen Boshan, Xiao Wei, et al. Study on the bending behavior of autoclaved aerated concrete wall panels [J]. *Building Construction*, 2016, 46(13): 97 — 102. (in Chinese)
- [11] 阳超. 装配式AAC砌体填充墙的平面外抗震性能研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
Yang Chao. Study on out-of-plane seismic performance of assembled AAC masonry filled wall [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2018. (in Chinese)
- [12] 顾祥林. 混凝土结构基本原理 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
Gu Xianglin. Basic principle of concrete structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015. (in Chinese)