

挖掘载荷作用下埋地 RTP 管道的有限元分析

程梦鹏¹ 甘丽华¹ 唐继蔚² 刘畅²

1. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000;

2. 杭州欧佩亚海洋工程有限公司, 浙江 杭州 310012

摘要:为分析挖掘载荷作用在管道上所造成的后果,采用 ABAQUS 非线性有限元软件的耦合欧拉-拉格朗日法(CEL),对承受挖掘载荷作用的钢丝缠绕增强塑料复合管(RTP)进行有限元三维建模。土壤本构关系选用 Mohr-Coulomb 模型,分别从挖掘载荷未直接作用和直接作用在 RTP 管上进行分析,在挖掘载荷直接作用下 RTP 管各层材料发生屈服、断裂,管道结构发生变形、破裂,即 RTP 管强度失效。分析结果为采取相应的有效保护措施提供了依据。

关键词:挖掘载荷;埋地管道;热塑性增强管;耦合欧拉-拉格朗日法;有限元分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.04.005

0 前言

钢丝缠绕增强塑料复合管(RTP)是我国拥有自主知识产权的高新技术产品,它是以热塑性塑料高密度聚乙烯为基体,以高强度钢丝倾角错绕而成的网状骨架为增强体,钢丝与塑料之间采用高性能树脂粘结而成的钢塑复合结构。RTP 管生产效率高,结构可设计性强,并具有承载能力强、耐腐蚀性好、耐磨性优良、性价比高、质量轻、安装运输便捷等优点。从 21 世纪初起,已在市政工程、民用建筑、医疗化工、农业和煤化工等行业中广泛应用。

随着人类社会的不断进步和发展,工业化程度不断提高,各种施工越来越频繁,如:修筑地下铁路、地下商场以及挖煤采矿等,如果防护措施不当,可能造成埋地输气管道的损坏^[1]。埋地输气管道的施工条件比较恶劣,在役检测困难,再加上输送介质的特性,一旦发生泄漏或断裂,可能引起爆炸、燃烧、中毒等重大事故,使人民的生命和财产遭受重大的损失,使社会的生产和经济遭受严重破坏^[2-3]。

挖掘载荷作用在管道上所造成的后果,一是直接导致管道破裂,引起介质泄漏;二是不同程度地损坏管道防腐层或给管线造成刮痕、压坑等缺陷,为管道腐蚀或应力集中开裂埋下隐患^[4]。需要分析其产生的原因并

采取相应的有效措施保证管道的安全可靠运行。

宰金珉等人^[5]指出无论从静力学还是动力学的角度分析结构的受力状态,土体与结构的相互作用都是不可忽略的,只有把结构与基础和地基作为相互作用又相互制约的整体分析,才能得到比较符合实际的计算结果。土体和结构的非线性接触是土体-结构相互作用问题的难点之一,较为简化的处理是土体-结构共用节点,但是准确来讲,土体与结构间的关系应该是摩擦接触,而对动力问题来说就是动力接触^[5]。本文利用 ABAQUS 有限元软件,采用耦合欧拉-拉格朗日算法(CEL)结合非线性动力学基本理论,模拟挖掘机破坏埋地 RTP 管道过程。CEL 方法结合传统拉格朗日法和耦合欧拉法的优点,已成为解决物体发生大变形情况下的一种比较通用的计算力学方法,而非线性动力学理论考虑了在挖掘载荷作用下土体和 RTP 管相互作用的动力问题^[6]。

1 材料模型

1.1 土体的弹塑性模型

本文土体模型选用 Mohr-Coulomb 模型,其屈服面在子午面内是一条双曲线,在偏应力平面内则是六边形,见图 1^[7-8]。

收稿日期:2016-04-18

基金项目:中国石油天然气集团公司重点工程资助项目(Z-2013-KTFB-7)

作者简介:程梦鹏(1966-),男,山东安丘人,高级工程师,硕士,从事管道应用技术与标准制定工作。

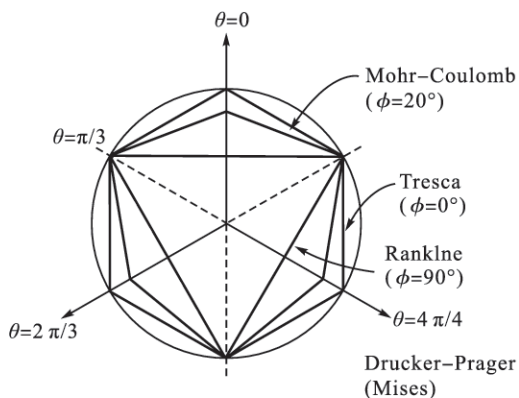


图 1 偏应力面上的 Mohr-Coulomb 模型屈服面

Mohr-Coulomb 模型屈服准则假定当土体中任何点的剪应力达到某个值时破坏发生,考虑正应力的最大主剪应力屈服理论,在 $\tau-\sigma$ 坐标系中,屈服或破坏线见图 2。

Mohr-Coulomb 的破坏准则为:

$$\tau = c - \sigma \tan \phi \quad (1)$$

在压缩情况下 σ 为负值,从 Mohr 圆中可知:

$$\begin{cases} \tau = s \cos \phi \\ \sigma = \sigma_m + s \sin \phi \end{cases} \quad (2)$$

经变换可得到:

$$s + \sigma_m \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (3)$$

式中: τ 为剪切应力,kPa; σ 为正应力,kPa; c 为土体的凝聚力,kPa; $s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, ϕ 为土体的摩擦角,rad。

土体参数见表 1。

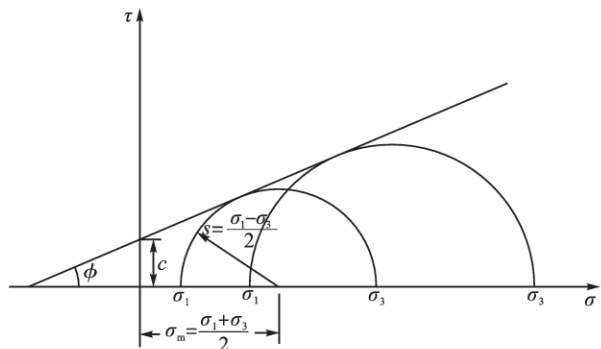


图 2 Mohr-Coulomb 破坏模型

1.2 RTP 管材料模型

RTP 管的主要材料是高密度聚乙烯(HDPE)、钢丝和热熔胶^[9-10]。通过在 HDPE 制成的芯管上以一定的倾角顺时针或逆时针缠绕高强度钢丝,采用挤出工艺将 HDPE 包覆于外层,高强度钢丝与内外层 HDPE 之间热熔粘接为一体^[11-13]。管道材料模型选用各向同性弹塑性模型。HDPE 材料和钢丝材料参数见表 2~3。

表 1 土体参数

参数	值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 780
弹性模量/MPa	0.207
泊松比	0.3
摩擦角/rad	0.35
初始凝聚力/MPa	6.9 E-5
剪胀角/rad	0

表 2 HDPE 材料参数

参数	值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	940
弹性模量/MPa	1 002
泊松比	0.45
极限抗拉强度/MPa	26.5
承载应力/MPa	24

表 3 钢丝材料参数

参数	值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
弹性模量/MPa	2.1 E 5
泊松比	0.26
极限抗拉强度/MPa	2 100

1.3 挖掘载荷参数

挖掘机抓斗主要是由钢材构成,挖掘机参数见表 4。

表 4 挖掘机参数

参数	值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 800
弹性模量/MPa	2.1 E 5
泊松比	0.26
挖掘半径/m	1.5
斗齿数目	2

2 有限元计算模型

2.1 几何模型

挖掘荷载作用下埋地 RTP 管的动力响应过程可抽象为半无限体在冲击荷载下作用的问题^[14],使用耦合欧拉-拉格朗日有限元分析模型进行仿真。挖掘机以一定的挖掘力和挖掘半径进行挖掘,地面到管顶距离 0.8 m。土体是半无限空间体,计算时选取 7.2 m×3.6 m×1.8 m 的范围,几何模型见图 3,RTP 管几何参数见表 5。

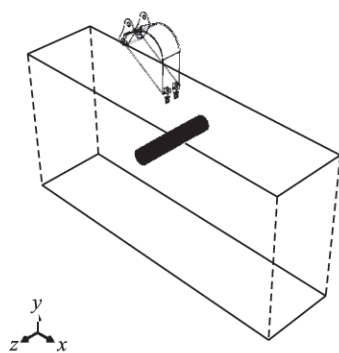


图3 几何模型

表5 RTP管几何参数

mm

参数	值
内径	300
内层壁厚	12
加强层壁厚	8
外层壁厚	7.5
钢丝直径	1.6

2.2 模型单元类型

有限元模型见图4,其中挖掘机挖斗位于土体上方采用S4R单元模拟;管道在土体中间,其HDPE层和加强层基体由C3D8R单元模拟;钢丝嵌于RTP管加强层内,采用T3D4单元模拟^[15-17],见图5;土体使用EC3D8R欧拉单元模拟^[18]。

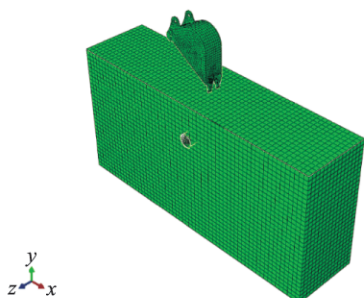


图4 有限元模型



图5 RTP管有限元模型

2.3 载荷与边界条件

根据研究对象实际受力变形情况,利用耦合约束将RTP管端面6个自由度与中心点的运动约束在一起。在模型两端固定轴向位移。同时,RTP管内壁面施加6.4 MPa的均布压力。

土体模型边界条件见图6,分别固定其中3个面的法向运动。

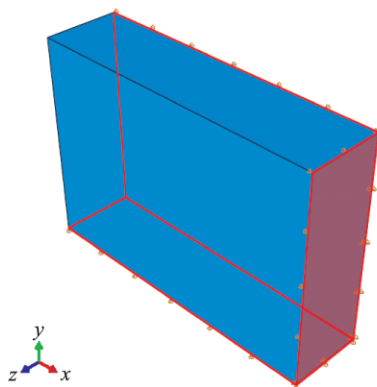


图6 土体模型边界条件

在整个分析过程中都将挖斗设定为刚性体,并按图7定义刚性体约束点,在约束点上施加y方向向下速度0.01 m/s、绕z轴方向角速度1.57 rad/s并约束挖斗其他4个自由度的运动。

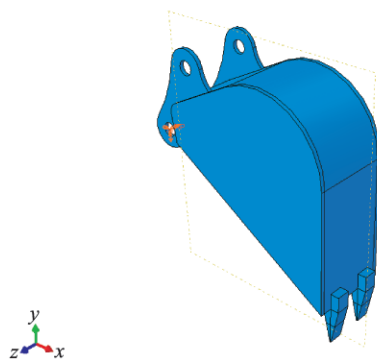


图7 挖斗边界条件

3 分析结果

3.1 挖斗与管道距离对管道响应影响

建立挖斗与管道的距离分别为0.8、0.6、0.4、0.2 m的4个模型,挖掘载荷均为250 kN。

以挖斗与管道距离为0.8 m为例,当挖掘机开始作业,挖斗撞击到RTP管上方土面,冲击能量传递到管道处,此时管道局部最大等效应力(Mises应力)瞬间达到21.03 MPa,见图8。但随着挖斗拨开土层并远离管道,能量逐步释放后,管道的最大等效应力很快下降到8.41 MPa,见图9。

在本次挖掘过程中,管道上层有土壤保护,且挖斗并没有直接撞击到管道,从图10内外层管道等效应力云图中可以看出管道受到上方挤压,HDPE材质的等效应力最大值在管道底部为21.03 MPa,没有超过HDPE材料的强度极限,从图11挖斗未直接作用在RTP管上钢丝应力图中也可以看出RTP管中的加强钢丝最大应力

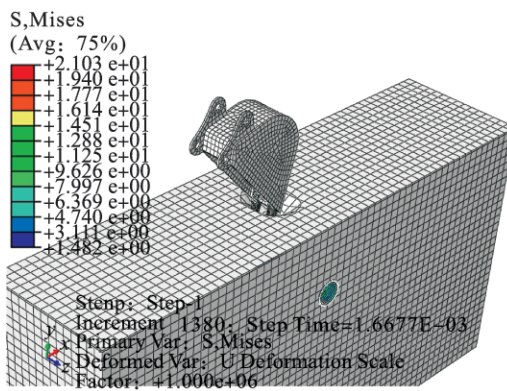


图 8 挖掘机挖斗初次撞击土面

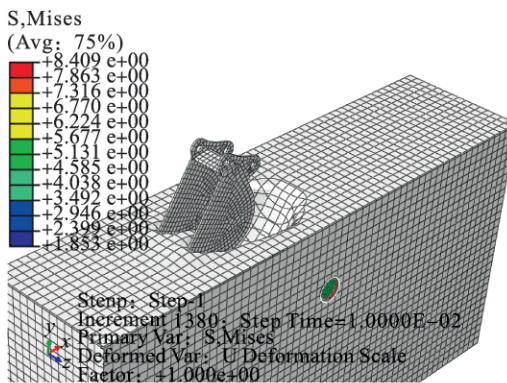


图 9 挖掘机挖斗远离 RTP 管

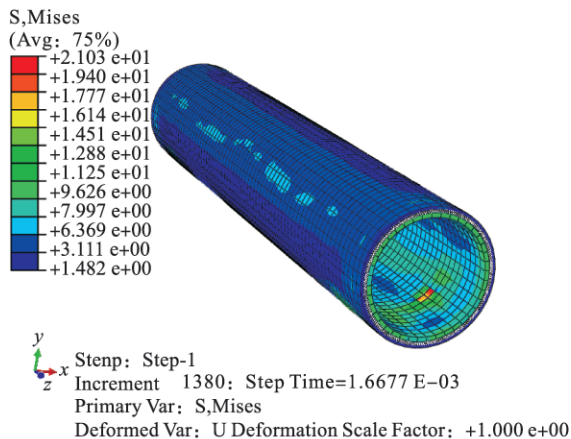


图 10 内外层管道等效应力云图

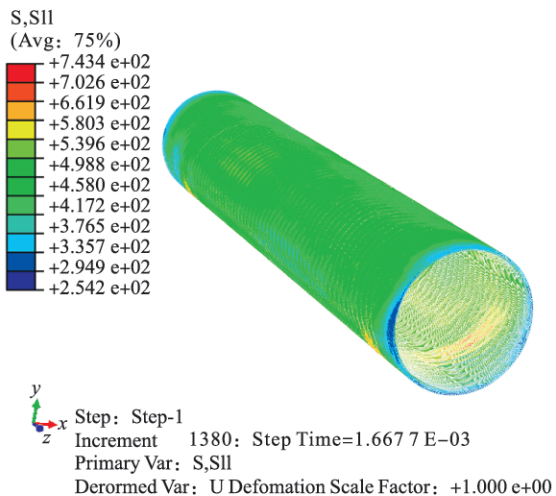


图 11 挖斗未直接作用在 RTP 管上钢丝应力图

只有 743 MPa,远没有达到钢丝的强度极限 2 100 MPa。从管道整体性来看,管道没有明显变形,在挖掘机挖斗远离后,管道应力、变形都恢复正常,可见过程中 RTP 管并没有破坏。

图 12 为不同挖斗与管道距离同 HDPE 最大 Mises 应力关系曲线,图 13 为不同挖斗与管道距离同增强层钢丝最大 Mises 应力关系曲线。从图 12~13 可以看出,内外层 HDPE 和增强层钢丝始终没有失效,随着距离增大,HDPE 和增强层钢丝的 Mises 应力峰值明显减小。相同挖掘载荷下,传播距离越长,能量消耗越多,挖掘的影响就越小。在挖掘载荷一定的情况下,挖斗与管道的距离越大,埋地输气管道破坏的可能性越小。

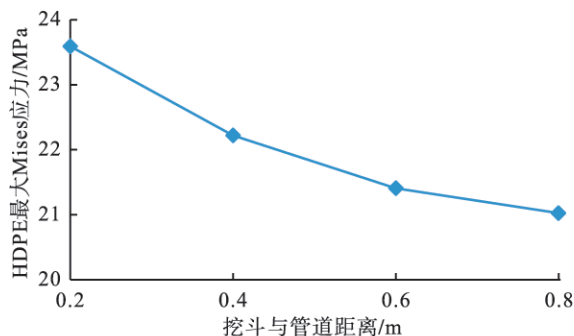


图 12 挖斗与管道距离与 HDPE 最大 Mises 应力关系曲线

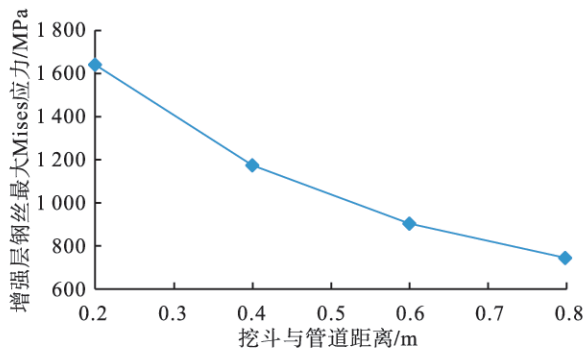


图 13 挖斗与管道距离与增强层钢丝最大 Mises 应力关系曲线

3.2 不同挖掘载荷对管道响应影响

建立挖掘载荷分别为 50、100、150、200、250 kN 的 5 个模型。挖斗与管道的距离不变均为 0.8 m。

当挖掘机继续作业,大部分土壤被挖开,挖斗撞击到 RTP 管上,以挖掘载荷 250 kN 为例,见图 14。此时管道发生大变形破坏,HDPE 最大等效应力达到 24.28 MPa,超过 HDPE 的承载应力,RTP 管的等效应力云图见图 15。同时钢丝的应力也达到了 1 918 MPa,接近其极限强度 2 100 MPa,见图 16。从计算结果可知,管道发生明显形变,管道的 HDPE 层和增强层钢丝都已经遭到破坏。

图 17 为挖掘机挖斗直接作用于 RTP 管上的冲击力随时间变化曲线,RTP 管所受挖斗最大冲击力为 223.7 kN,在挖掘载荷作用下 RTP 管的主要破坏形式以强度失效

为主,管道发生大变形、破裂失效。

图18为不同挖掘载荷与HDPE最大Mises应力关系曲线,图19为不同挖掘载荷与增强层钢丝最大Mises应力关系曲线。从图19可以看出,当挖掘载荷超过150 kN,HDPE最大等效应力超过了其承载应力24 MPa, RTP管失效。随着挖掘载荷的增大,HDPE和增强层钢丝的Mises应力峰值也增大,但它们之间并不是线性关系。这是因为在挖掘荷载下,管道表面覆土深度太小,土体已经发生塑性变形,而土体和RTP管又是复杂的动态

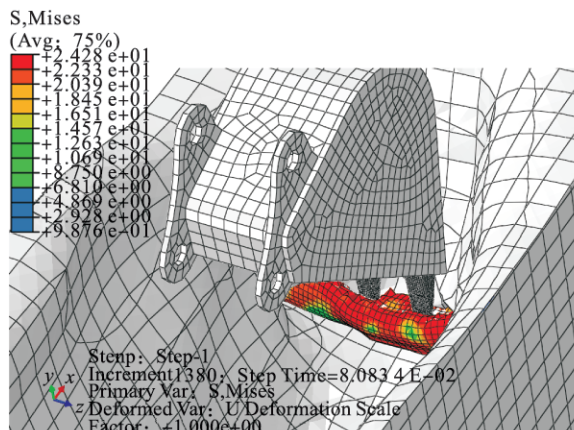


图14 挖掘机挖斗撞击 RTP 管

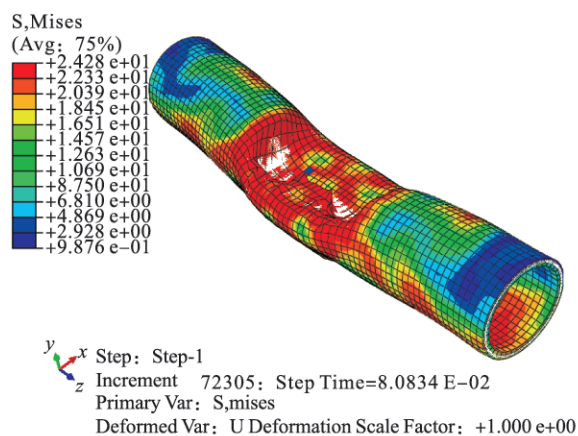


图15 RTP 管等效应力云图

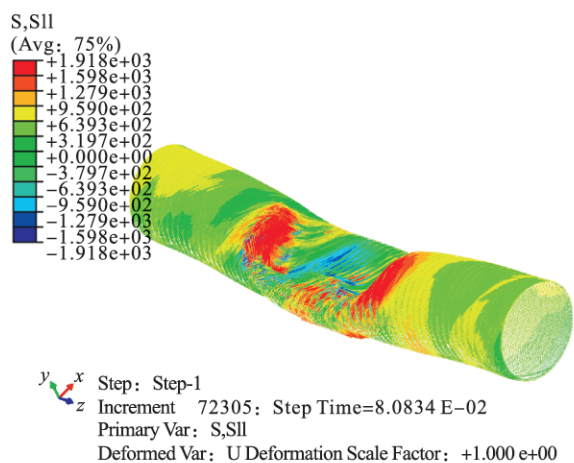


图16 挖斗未直接作用在 RTP 管上钢丝应力图

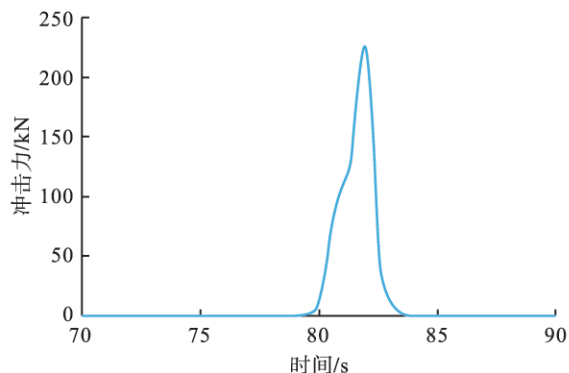


图17 挖掘机挖斗直接作用于 RTP 管上的冲击力随时间变化曲线

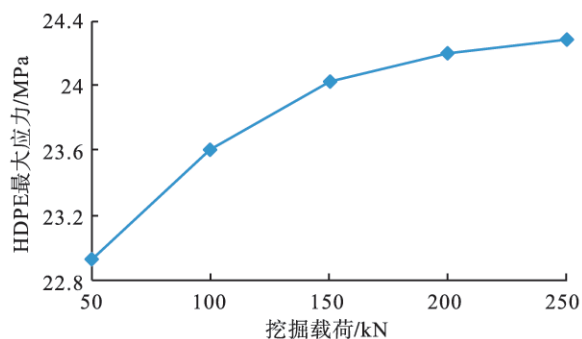


图18 不同挖掘载荷与HDPE最大Mises应力关系曲线

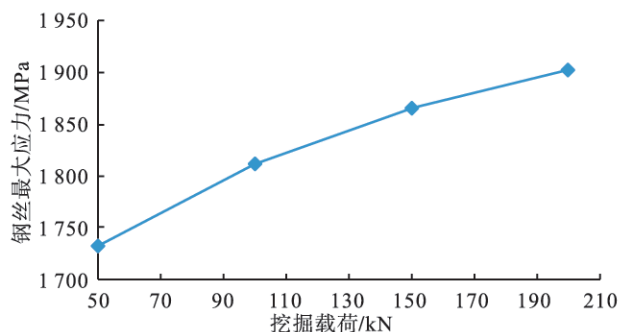


图19 不同挖掘载荷与增强层钢丝最大Mises应力关系曲线

接触,本身就是个高度非线性的问题,故在分析土体与结构的相互作用时,不能将两者分开考虑,只有把结构与土体相互作用又相互制约作为整体分析,才能得到比较符合实际的计算结果。

4 结论

挖掘载荷作用位置是等效应力最大处,也是 RTP 管最先达到破坏的位置。可以将 Mises 屈服准则作为挖掘载荷作用下埋地 RTP 管破坏的优先准则。

挖掘载荷作用下影响埋地输气 RTP 管的因素很多,本文仅从挖斗与管道距离和挖掘载荷大小两方面进行分析研究。分析结果表明:RTP 管 Mises 应力峰值的大小与挖斗与管道距离有关,随着距离的增大,其峰值明显减小,为保证管道的安全,应禁止在管道附近施工,建

议施工范围在0.5倍挖掘半径范围外;随着挖掘载荷的增大,RTP管Mises应力也增大,但由于土体发生塑性变形以及土体和管道间是复杂的动态接触问题,它们之间是非线性的关系。下一步可以对RTP管埋深及壁厚等因素进行研究。

参考文献:

- [1] 钟强,赵国仙.某海底输送管线腐蚀失效分析[J].天然气与石油,2016,34(1):89-93.
Zhong Qiang, Zhao Guoxian. Analysis on Corrosion Failure in Certain Submarine Pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34(1): 89-93.
- [2] 景国泉.埋地管道的极限载荷计算与风险评价[D].南京:南京工业大学,2003:1-6.
Jing Guoquan. Limit Load Calculation and Risk Assessment of Buried Pipe[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2003: 1-6.
- [3] 黄崇伟.沟埋式输油管道管土相互作用分析[J].公路工程,2011,36(2):164-168.
Huang Chongwei. Theories on Mechanics and Pipe-Soil Interaction Model of Channel-Buried Pipe[J]. Highway Engineering, 2011, 36(2): 164-168.
- [4] 吕宏庆,李均峰.管道第三方破坏的原因及预防措施[J].天然气工业,2005,25(12):118-120.
Lü Hongqing, Li Junfeng. Cause and Prevention of Pipeline Third-Party Interference[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 118-120.
- [5] 宰金珉,庄海洋.对土—结构动力相互作用研究若干问题的思考[J].徐州工程学院学报,2005,20(1):1-6.
Zai Jinmin, Zhuang Haiyang. Analysis on the Several Problems about the Dynamic Soil-Structure Interaction[J]. Xuzhou Institute of Technology, 2005, 20(1): 1-6.
- [6] 杨秀娟,闫涛,修宗祥,等.海底管道受坠物撞击时的弹塑性有限元分析[J].工程力学,2011,28(6):189-194.
Yang Xiujian, Yan Tao, Xiu Zongxiang, et al. Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Submarine Pipeline Impacted by Dropped Objects[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(6): 189-194.
- [7] 贺嘉,陈国兴.基于ABAQUS软件的大直径桩承载力-变形分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):306-310.
He Jia, Chen Guoxing. Analysis of Bearing Capacity-Deformation of the Large Diameter Pile by the ABAQUS Software[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 306-310.
- [8] 王金昌,陈页开.ABAQUS在土木工程中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2006:16-20.
Wang Jinchang, Chen Yekai. Application of ABAQUS in Civil Engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 16-20.
- [9] 白勇,熊海超,陈伟,等.钢丝缠绕增强复合管的内压研究[J].低温建筑技术,2015,37(5):44-46.
Bai Yong, Xiong Haichao, Chen Wei, et al. Study on the Internal Pressure of Composite Pipe Reinforced by Winding Steel Wire[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(5): 44-46.
- [10] Xia M, Takayanagi H, Kemmochi K. Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Internal Pressure[J]. Composite Structures, 2001, 53(4): 483-491.
- [11] Wang Wei, Chen Geng. Analytical and Numerical Modeling for Flexible Pipes[J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(4): 737-746.
- [12] Xia M, Takayanagi H, Kemmochi K. Analysis of Transverse Loading for Laminated Cylindrical Pipes[J]. Composite Structures, 2001, 53(3): 279-285.
- [13] Bai Yong, Wang Yu, Cheng Peng. Analysis of Reinforced Thermoplastic Pipe (Rtp) Under Axial Loads[C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. New York: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [14] 李又绿,姚安林,赵师平,等.爆炸载荷对埋地输气管道的动力响应和极限载荷分析[J].焊管,2009,32(11):63-69.
Li Youli, Yao Anlin, Zhao Shiping, et al. Analysis on Dynamic Response and Extreme Loads of Buried Gas Pipeline Under Blast Loading[J]. Welded Pipe and Tube, 2009, 32(11): 63-69.
- [15] Kruijer M P, Warnet L L, Akkerman R. Analysis of the Mechanical Properties of a Reinforced Thermoplastic Pipe (Rtp)[J]. Composites: Part A Applied Science & Manufacturing, 2005, 36(2): 291-300.
- [16] Arikan H. Failure Analysis of ($\pm 55^\circ$) 3 Filament Wound Composite Pipes with an Inclined Surface Crack Under Static Internal Pressure[J]. Composite Structures, 2010, 92(1): 182-187.
- [17] Xia M, Takayanagi H, Kemmochi K. Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes Under Internal Pressure[J]. Composite Structures, 2001, 53(4): 483-491.
- [18] 范峰,丰晓红.跨断层埋地输气管道有限元模型建立与分析[J].天然气与石油,2015,33(1):11-15.
Fan Feng, Feng Xiaohong. Establishment and Analysis of Finite Element Model of Buried Gas Pipeline Crossing Fault[J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(1): 11-15.