

水平定向穿越大口径管道起吊仿真分析

孙凯¹, 邹春², 付必伟³

(1.中石化中原石油工程有限公司钻井一公司,河南濮阳 457001;

2.中石化中原油田分公司濮东采油厂,河南濮阳 457001; 3.长江大学机械工程学院,湖北荆州 434023)

摘要:水平定向穿越管道起吊过程中,管道的吊点位置决定管道入土角度,如果入土角度偏大或者偏小,都可能导致管道在入土时发生卡管或瘪管事故。通过对管道起吊过程中入土角度、吊点位置对管道应力的影响进行仿真分析,得到:吊点2与管道前端相距10m,入土角为10°时,两吊点的许用间距为22~28m;入土角为12°时,两吊点的许用间距为28~36m;入土角为14°时,两吊点的许用间距为30~36m,此时管道起吊过程中,管道处于安全状态。当入土角度超过16°时,管道应力超出了管道的屈服应力,因此管道入土角度不宜超过16°。

关键词:水平定向穿越;大口径管道起吊;吊点位置;入土角

中图分类号:TE973.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)10-0075-07

Simulation of lifting large diameter pipelines in horizontal directional crossing

SUN Kai¹, ZOU Chun², FU Biwei³

(1.No.1 Drilling Company, Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Puyang Henan 457001, China;

2.Pudong Oil Production Plant of Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang Henan 457001, China;

3.College of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jinzhou Hubei 434023, China)

Abstract: During hoisting of the pipeline in horizontal directional drilling, the hoisting point on the pipeline determines the entry angle into ground. If the entry angle is too large or too small, it may cause either sticking or collapse of the pipeline. Through the simulating analysis for the influence of the entry angle and the lifting point during the lifting process, it is obtained that with the distance between the lifting point No.2 and the front end of the pipeline at 10m, when the entry angle is 10°, the allowable space between the two lifting points is 22~28m; when the entry angle is 12°, the allowable space between the two lifting points is 28~36m; when the entry angle is 14°, the allowable space between the two lifting points is 30~36m. In such a way, the pipeline is in a safe state during the lifting process. When the entry angle exceeds 16°, the pipeline stress exceeds its yield stress; thus, the entry angle should not exceed 16°.

Key words: directional horizontal crossing; hoisting large diameter pipelines; lifting point; entry angle

0 引言

大口径管道水平定向穿越工程中,管道安全回拖是管道铺设工程成功的标志。在管道回拖前需要控制管道的入土角度,保证管道入土角度与井眼倾角一致^[1-12]。如果管道轴线与井眼轴线之间存在很大的夹角,当管道入土时就会与套管发生刮擦、瘪管等情况,造成管壁磨损,甚至是变形等事故,同时管道的回拖阻力也会急剧增大,造成管道回拖失败,进而带来巨大的经济损失^[13-17]。如图1所示,在吊装作业中如果吊点设置位置不当,容易导致管道在

起吊点处的应力集中,造成管道发生塑性变形。因此,在管道回拖前,必须分析吊点位置对吊装作业过程中管道力学性能的影响,设计适合的吊点位置保证管道安全进入井眼。

1 有限元模型

1.1 模型简化

图2为当管道起吊使管道前段轴线与套管轴线保持一致时的管道起吊示意图。此时管道前段长为 L_1 ,吊点1和吊点2之间的管道长为 L_2 ;吊点1的

收稿日期:2019-04-04 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.10.013

作者简介:孙凯,男,汉族,1984年生,副经理,高级工程师,油气井工程专业,硕士,从事钻井工程技术研究及管理工作,河南省濮阳市华龙区中原路与盘锦路交叉口濮东采油厂地质研究所, sinopecsun@163.com。

引用格式:孙凯,邹春,付必伟.水平定向穿越大口径管道起吊仿真分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(10):75-81.

SUN Kai, ZOU Chun, FU Biwei. Simulation of lifting large diameter pipelines in horizontal directional crossing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(10):75-81.



图1 管道起吊施工图

Fig.1 Pipeline hoisting at site

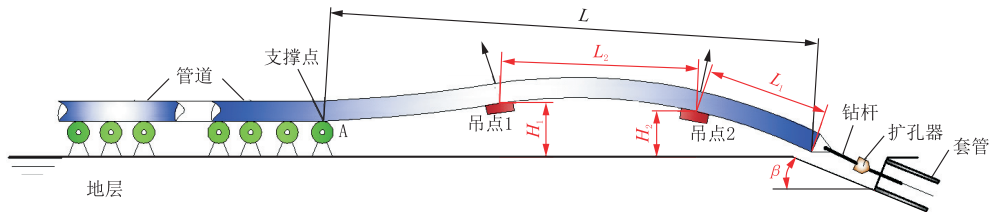


图2 管道起吊示意图

Fig.2 Diagram of pipeline lifting

中假设 L 足够大,使管道在起吊过程中 A 点始终与支撑体接触,此时 A 点处的挠度及起吊引起的转角为零,为此可将其简化为悬臂梁模型。

起吊过程中由于管道足够长在后段重力作用下,管道悬空长度一定,不可能全部脱离支撑点,则始终会存在一点与支撑体接触,分析中令该点为 O 点。并且后文中对管道起吊进行模拟仿真验证,由此在材料力学的基础上将管道起吊模型简化为如图 3 所示的受力模型。为便于分析将管道分为 AB、BC、CD 三段,由挠度线性叠加原理可知,管道前端挠度及转角主要受 2 个方面的影响:(1)重力作用引起管道变形;(2)集中载荷引起管道变形。

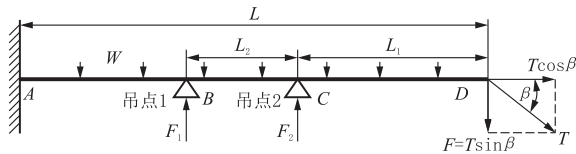


图3 管道起吊受力分析

Fig.3 Force analysis of pipeline lifting

1.2 有限元仿真模型

管道起吊作业就是通过调节两吊点的位置以及管道前段的拉力大小,使入土段管道轴线与套管轴线的夹角尽可能小,防止管道与套管或钻孔孔壁发生碰撞或瘪管事故。同时在起吊作业过程中使管道

高度为 H_1 ,吊点 2 的高度为 H_2 ;管道入土角为 β ;管道支撑点处至管道前段的管道长度为 L 。施工过程表明吊点位置对管道起吊过程中的力学特性有很大的影响,为此研究这些吊点位置对管道起吊过程中的力学性能影响,可设计合理的起吊参数,对于管道安全回拖具有重要的意义。

由管道起吊施工工艺可知,管道在起吊过程中的受力主要包括:管道自身重力;A 点对管道的支撑力;吊点 1 和吊点 2 对管道的拉力 F_1 和 F_2 ;钻杆对管道到产生的拉力 T 。起吊过程中由于管道足够长在后段重力作用下,管道悬空长度一定,始终会存在一点与支撑体接触,令此临界点为 A 点^[18]。分析

应力尽可能小,不能超过管道能承受的屈服极限应力值,保证管道安全回拖。吊点 1 和吊点 2 的位置是相互关联的,即当吊点 1 位置确定后,吊点 2 与吊点 1 之间存在一个最佳间距与高度差保证管道能安全起吊达到理想入土状态。图 4 为建立的管道起吊有限元模型,分析中采用了横梁吊具替代两个独立的吊点。因为吊具起吊也能保证吊点对管道的作用力始终竖直向上与两个独立吊点作用效果一样,因此得到合理的吊具长度就可以得到两个吊点之间的合理间距,并且在分析中吊具能根据受力状态调节两个吊点的高度,因此利用横梁吊具代替独立的吊点是合理的。

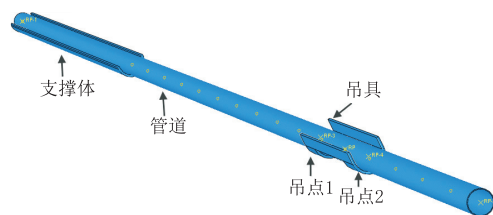


图4 管道起吊有限元计算模型

Fig.4 Finite element model for pipeline lifting

1.3 材料参数设置

管道材料为 X80,管道规格为 $\text{O}1016 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,材料参数设置如表 1 和表 2 所示。

表 1 弹性阶段材料参数

Table 1 Material parameters at the elastic stage

密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/Pa	泊松比
7800	2.1 × 10 ¹¹	0.3

表 2 塑性阶段材料应力-应变数据

Table 2 Material stress-strain data at plastic stage

真实应力/ MPa	塑性 应变	真实应力/ MPa	塑性 应变	真实应力/ MPa	塑性 应变
418	0.000	780	0.095	921	0.450
500	0.010	829	0.150	932	0.550
605	0.020	882	0.250	955	1.650
695	0.056	908	0.350		

1.4 边界条件设置

如图 5 所示为模型约束条件和边界条件设置情况,根据前面的理论分析将支撑体与管道末端采用固定约束,管道本身施加均布重力载荷。分析步 Step - 1 中吊具与参考点 RP 采用完全耦合约束,并施加竖直向上的微小位移载荷,使吊点与管道接触;分析步 Step - 2 中固定 RP - 1,给管道前端 RP - 2 施加竖直向下的位移载荷 $h = L \tan\beta$,保证管道前端轴线与水平线之间夹角的大小与入土角一致。

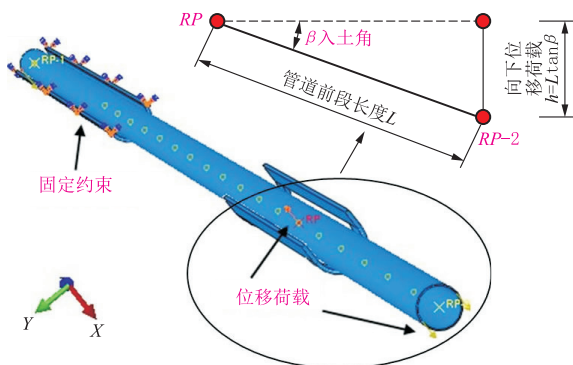


图 5 管道起吊约束条件及边界条件

Fig.5 Restraint conditions and boundary conditions for pipeline lifting

2 管道起吊力学仿真分析

2.1 吊点参数对管道应力分布规律影响

如图 6 所示,管道长度为 120 m 时管道起吊应力分布云图。从图中可以看出管道左端应力基本无变化,因此左端产生的应力可以看成只受管道重力作用,而管道起吊对管道左端应力影响基本可以忽略不计,这与前文中的理论分析结果一致。图中还可以看出管道应力在吊点 1 处比较集中,吊点 1 的高度也明显高于吊点 2。该计算结果与文献[10]中的理论分析结果一致,因此使用该有限元模型进行



图 6 管道应力分布云图

Fig.6 Stress distribution of the pipeline

起吊过程中的管道力学分析结果可信。

图 7 为不同入土角度下,管道起吊应力分布云图。从图 7(a)中可以看到吊点 1 是管道应力集中最明显的位置,与(b)(c)(d)对比可以看出随着入土角的增大应力集中区域逐渐向吊点 2 扩散。管道与吊点之间的接触应力随入土角的增大而增大,并且当入土角 $> 14^\circ$ 后管道出现弯曲屈服现象。因此,当管道前端为 10 m 时,入土角度最好不超过 14° 。

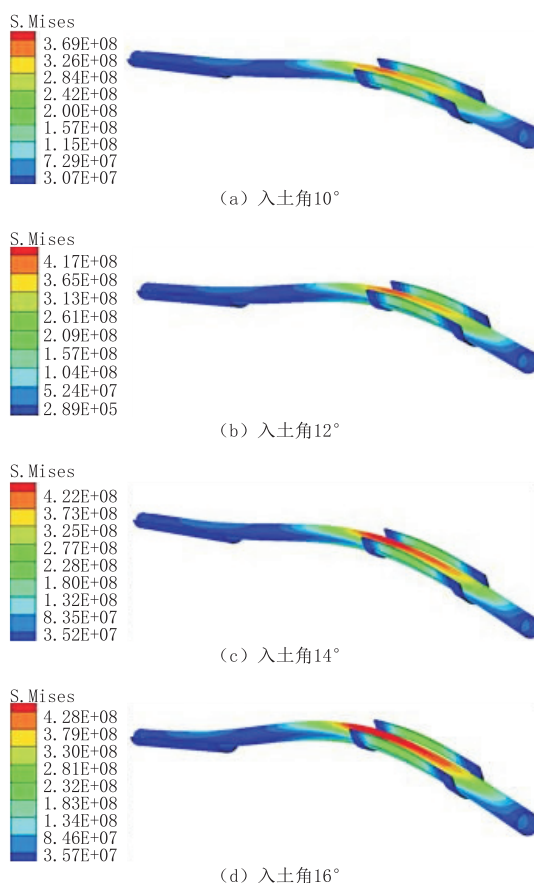


图 7 不同入土角度下管道应力分布云图

Fig.7 Stress distribution of pipelines at different entry angles

图 8 是相同吊点间距,入土角度为 10° ,吊点 2 与管道前端间距不同的管道应力分布情况。从图 (a)中可以看出管道应力在吊点 1 处应力集中现象最严重。由(a)(b)(c)(d)(e)5 幅图中显示吊点 2

离管头的距离 L_1 越大,管道应力集中现象越明显,并且管道应力集中区域分布在吊点 1 和吊点 2 之间。由管道最大应力值变化可以得到,当吊点 2 与管头的距离 < 15 m 后应力降低幅度增大。进一步分析计算发现当管道前端长度 $L_1 \leq 8$ m 后,在相同条件下,起吊过程中管道会产生滑移现象。所以当入土角为 10° 时,吊点 2 的最佳位置 L_1 为 $10 \sim 15$ m。

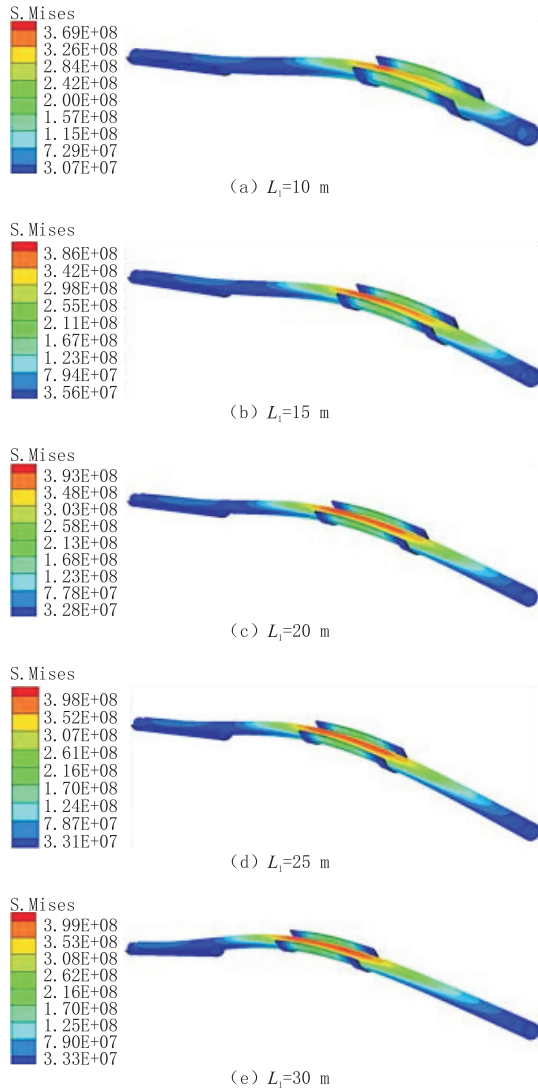


图 8 吊点 2 与管头间距不同时管道应力分布云图

Fig.8 Stress distribution of pipelines at different spacings between lifting point 2 and the pipe head

图 9 是入土角 β 为 10° , $L_1 = 10$ m 时,不同吊点间距下管道应力分布云图。图(a)~(j)显示随着吊点间距增加,两个吊点间的管道最大集中用力逐渐减小。当两吊点之间的间距 $L_2 > 26$ m,管道与吊点的接触应力逐渐增大。因此,当吊点 2 位置确定后,两个吊点之间的距离存在最佳的范围保证管道能安

全起吊。通过分析发现入土角 β 为 10° , $L_1 = 10$ m 时,吊点间距的最佳范围为 $22 \sim 26$ m。

2.2 管道前端长度对其应力分布的影响

图 10 是管道最大应力随吊点间距增大的变化曲线。从图中可以看出随着吊点间距增大,管道起吊产生的最大应力逐渐减小,在 $L_2 \leq 20$ m 时吊点间距对管道应力影响较小; $L_2 > 20$ m 时随吊点间距的增大,管道最大应力降幅增大,随着吊点间距的继续增大,管道应力又趋于平稳并在 $L_2 > 26$ m 时出现应力反弹现象。并且 5 种情况管道最大应力变化规律基本相似,图中可以直观看出入土角 $\beta = 10^\circ$ 时,吊点间距 L_2 的合理范围为 $22 \sim 26$ m,在 $L_1 = 10$ m 时管道最大应力明显要小于其余 4 种情况。所以当入土角 $\beta = 10^\circ$ 时,吊点间距合理范围为 $22 \sim 26$ m,吊点距管头长度 $L_1 = 10$ m。

由于上面分析中,吊点 2 距管道间距为 20 m 和 25 m 的两种情况,管道最大应力随吊点间距增大持续减小,为此还需进一步加大吊点间距,分析它对管道最大应力的影响,从而获得最佳的吊点间距。计算结果如图 11 所示,图中显示当 $L_2 \geq 30$ m 后管道最大应力值出现回升现象,所以这两种情况下吊点间距的合理范围为 $26 \sim 30$ m。

图 12 为不同 L_1 下吊点高度差与吊点间距之间的关系曲线。从曲线上可以看出高度差随吊点间距的增大而增大,并且基本表现为线性关系。管端长度为 10 m 时两吊点之间的高度差明显要小于其余 4 组。

2.3 吊点间距对管道应力分布的影响

图 13~15 是入土角度为 12° 、 14° 和 16° 时,管道最大应力随管道前端长度 L_1 增大的变化情况。图中显示入土角相同的情况下,管道最大应力随 L_1 增大而增大,吊点间距从 22 m 到 24 m 的过程中,管道最大应力明显降低。图中还可以看出管道前端长度 L_1 超过 10 m 后,管道应力快速增大,因此管道前端长度设置为 10 m 较为合理。

2.4 入土角对管道应力分布的影响

图 16、图 17、图 18 是不同入土角情况下,管道最大应力与 L_1 的关系曲线。图 16 中显示除了入土角为 10° ,吊点间距为 22 m 时起吊应力未超过管道的许可应力外,其他情况下管道的起吊应力均超过了管道的屈服极限,而随着吊点间距的增加其他 3 种情况的最大应力也逐渐减小。所以不同入土

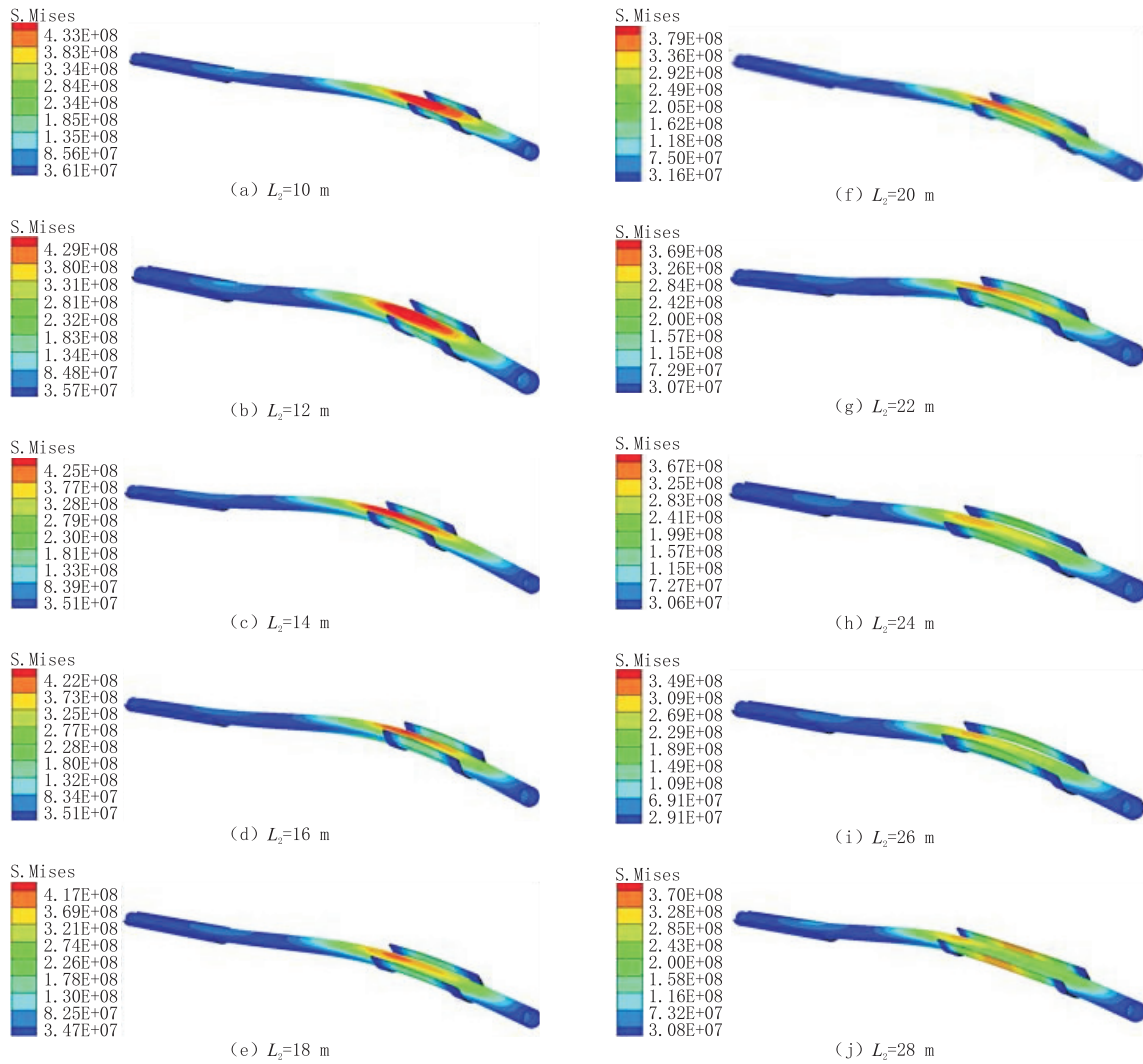


图 9 不同吊点距离下管道应力分布云图

Fig.9 Stress distribution of pipeline at different distances between the lifting points

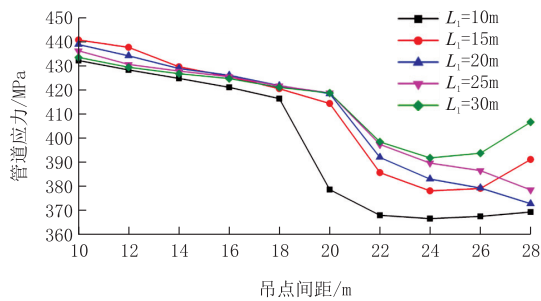


图 10 管道最大应力变化曲线

Fig.10 Maximum stress curve of the pipeline

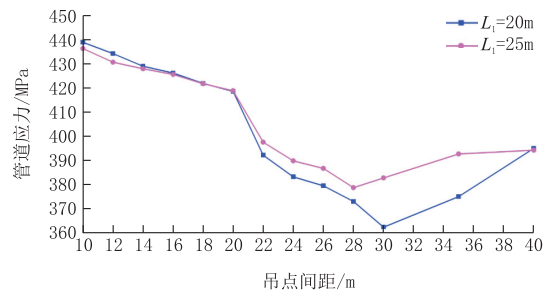


图 11 管道最大应力变化曲线

Fig.11 Maximum stress curve of the pipeline

角度对应的合理吊点位置不同,因此还需进一步对不同入土角下的合理吊点间距确定进行分析。

为了便于施工过程中吊点位置的定位,对不同入土角度合理吊点位置的确定进行了研究,计算结果如表3所示。结果显示入土角度为12°和14°时,

以管道应力未超过屈服极限为标准,得到对应的合理吊点间距分别为 28~36、30~36 m。并且入土角度 >14°后管道起吊很容易造成管道损坏,建议入土角度最好不超过 14°。

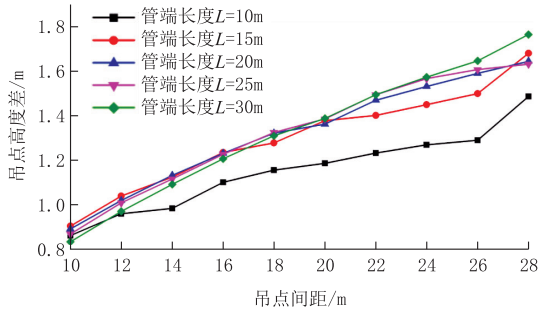


图 12 吊点高度差与吊点间距关系曲线

Fig.12 Lifting point height vs lifting point spacing curve

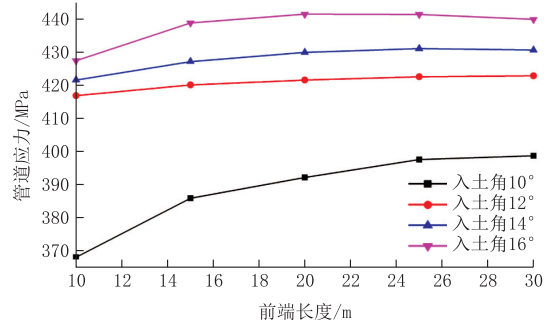


图 16 吊点间距 22 m

Fig.16 Spacing of the lifting points at 22m

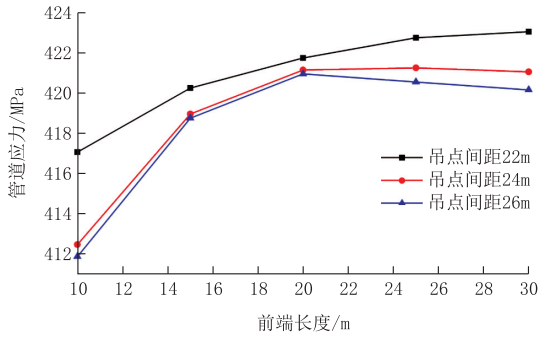


图 13 入土角为 12°

Fig.13 Entry angle at 12 degrees

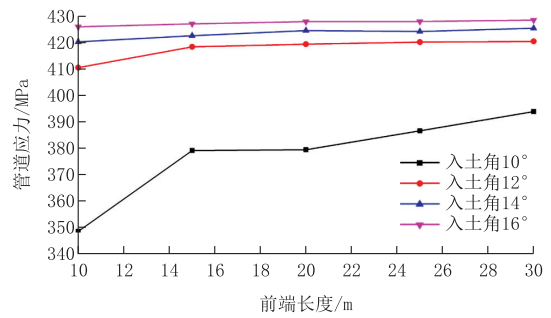


图 17 吊点间距 24 m

Fig.17 Spacing of the lifting points at 24m

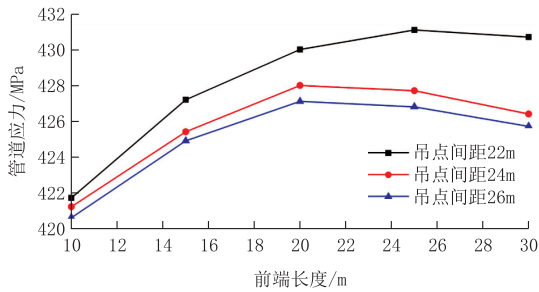


图 14 入土角为 14°

Fig.14 Entry angle at 14 degrees

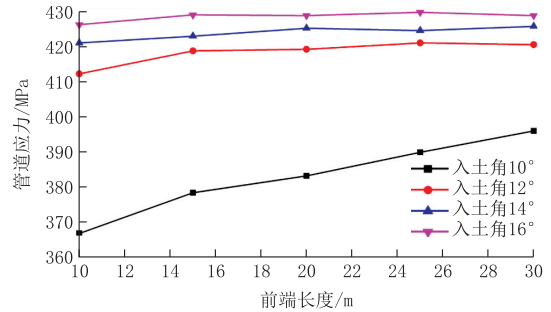


图 18 吊点间距 26 m

Fig.18 Spacing of the lifting points at 26m

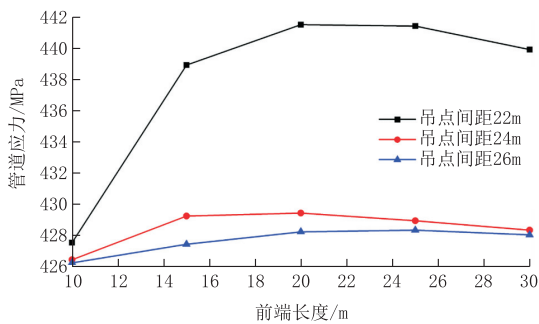


图 15 入土角度为 16°

Fig.15 Entry angle at 16 degrees

表 3 管道最大应力值

MPa

Table 3 Maximum stress values of the pipeline

吊点间距/ m	入土角度/(°)		
	12	14	16
28	417.4	423.1	429.5
30	349.1	393.9	418.6
32	389.8	410.3	419.3
34	392.4	411.2	420.2
36	410.3	416.7	432.2
38	419.5	420.9	438.6

到如下结论：

当吊点位置确定后管道应力随入土角度的增大而增加；入土角一定时，管道应力随吊点 2 与管头距离 L_1 的增大而增大；入土角、吊点 2 与管头距离一

3 结论

综上所述，对吊点位置优化的分析计算可以得

定时,随吊点间距增大,管道应力先减小后增大。

通过对不同入土角度,吊点位置对 $\Phi 1016 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的管道应力计算分析得到:管端长度为 10 m,入土角为 10° 时,两吊点的许用间距 22~26 m;入土角为 12° 时,两吊点的许用间距 28~36 m;入土角为 14° 时,两吊点的许用间距 30~36 m;入土角为 16° 时,管道应力基本超出了管道的屈服应力,建议管道入土角度最好不超过 16° 。

参考文献 (References):

- [1] 张玉.燃气管道水平定向穿越深度设计与应用[C]//中国土木工程学会燃气分会,中国燃气运营与安全研讨会(第九届)暨中国土木工程学会燃气分会 2018 年学术年会论文集(下),2018. ZHANG Yu. Deep design and application of horizontal directional traverse of gas pipeline[C]//Gas Branch of China Society of Civil Engineering. Symposium on Gas Operation and Safety of China (9th session) and Collected Papers of 2018 Annual Meeting of Gas Branch of China Society of Civil Engineering, 2018.
- [2] 朱海锋,李伟.长输管道水平定向钻穿越施工的冒浆风险及应对措施[J].建设监理,2018(10):74-77. ZHU Haifeng, LI Wei. Drilling mud flooding risks and countermeasures in long horizontal directional crossing construction [J]. Project Management, 2018(10):74-77.
- [3] 杨磊.水平定向钻技术在供水管道穿越工程中的应用[J].水科学与工程技术,2019(3):58-60. YANG Lei. Application of horizontal directional drilling technology in water supply pipeline crossing project[J]. Water Science and Engineering Technology, 2019(3):58-60.
- [4] 龙飞泉.城市燃气管道水平定向穿越施工技术探讨[J].化工管理,2019(19):187-188. LONG Feiquan. Discussion on horizontal directional crossing construction technology of urban gas pipeline[J]. Chemical Enterprise Management, 2019(19):187-188.
- [5] 张文胜,尹延飞,裴灼炎,等.水平定向钻施工穿越膨胀土渠堤环境影响安全监测[J/OL].西北水电:1-5[2019-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1260.TV.20190531.1601.006.html>. ZHANG Wensheng, YIN Yanfei, PEI Zhuoyan, et al. Environmental impact safety monitoring of horizontal directional drilling construction crossing expansive soil dike [J/OL]. Northwest Hydropower: 1-5 [2019-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1260.TV.20190531.1601.006.html>.
- [6] 黄梅丹,于彬.城镇天然气管道水平定向钻穿越河流施工要点[J].煤气与热力,2019,39(2):20-22,46. HUANG Meidan, YU Bin. Key points in construction of city natural gas pipeline river crossing using horizontal directional drilling[J]. Gas & Heat, 2019,39(2):20-22,46.
- [7] 魏少青.水平定向钻穿越施工及风险管控路径研究[J].中国标准化,2019(6):90-92. WEI Shaoqing. Research on horizontal directional drilling and risk control route[J]. China Standardization, 2019(6):90-92.
- [8] 郭冠花.大直径截污管道水平定向穿越施工技术的应用[J].山西建筑,2019,45(3):90-92. GUO Guanhua. Application of large-diameter sewage pipeline

- for horizontally crossing construction technique[J]. Shanxi Architecture, 2019,45(3):90-92.
- [9] 刘强.岩层水平定向钻进铺管施工工艺的试验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2009. LIU Qiang. Experimental study on horizontal directional drilling and pipe laying construction technology [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [10] 杜学龙.水平定向钻穿越管道满足回拖条件的探讨[J].工程技术,2017(8):361-362. DU Xuelong. Discussion on the dragging conditions of horizontal directional drilling crossing pipeline [J]. Engineering and Technology, 2017(8):361-362.
- [11] 尹东莉,刘丽妍.水平定向钻技术在天然气管道穿越工程的应用[J].煤气与热力,2009,29(12):30-32. YIN Dongli, LIU Liyan. Application of horizontal directional drilling technology for crossing project of Natural gas pipeline [J]. Journal of Gas and Heating Power, 2009,29(12):30-32.
- [12] 马保松.非开挖工程学[M].北京:人民交通出版社,2008. MA Baosong. Trenchless engineering [M]. Beijing: China Communications Publishing, 2008.
- [13] 王二朋,何永辉.西气东输二线管道工程—泾河水水平定向钻穿越工程[J].非开挖技术,2011(4):18-21. WANG Erpeng, HE Yonghui. West-to-east Gas Transfer No. 2 Pipeline Project: Jing River horizontal directional drilling [J]. Journal of Trenchless Technology, 2011(4):18-21.
- [14] 宋神昕,姚安林,蒋宏业,等.天然气管道水平定向钻穿越事故及其后果分析[J].中国安全生产科学技术,2011,7(4):118-122. SONG Shenxin, YAO Anlin, JIANG Hongye, et al. Analysis of accidents and the results during natural gas pipeline horizontal directional drilling [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011,7(4):118-122.
- [15] 蔡亮学,何利民,王鑫,等.水平定向钻回拖载荷预测模型及其特征参数敏感性分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2010(6):114-119. CAI Xueliang, HE Limin, WANG Xin, et al. Prediction model of towing loads in horizontal directional drilling installations and its characteristic parameter sensitivity analysis [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010(6):114-119.
- [16] 周陶宏,王恺,张鹏,等.水平定向钻穿越电力管束时管道受力及安全分析[J].地质科技情报,2013(4):181-184. ZHOU Taohong, WANG Kai, ZHANG Peng, et al. Analysis on the safety and forces acting on the multiple electric power pipeline crossing by HDD [J]. Geological Science and Technology Information, 2013(4):181-184.
- [17] 许文波,孟英峰.气体钻井井内动力学分析[J].内蒙古石油化工,2005(11):102-105. XU Wenbo, MENG Yingfeng. Dynamic analysis in gas well drilling [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2005 (11):102-105.
- [18] 董宗正,付必伟,席燕卿.水平定向穿越管道起吊力学分析[J].机械强度,2016(5):1118-1122. DONG Zongzheng, FU Biwei, XI Yanqing. The mechanical analysis of pipeline lifting during the horizontal directional crossing [J]. Journal of Mechanical Strength, 2016(5):1118-1122.