

水平定向钻穿越扩孔器动态变化及其对扩孔形状的影响

艾志久¹, 鲜勇¹, 夏换², 焦如义², 江勇²

1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500

2. 中国石油天然气管道科学研究院, 廊坊 065000

摘要 基于等效塑性应变的岩土破坏准则和岩土弹塑性本构关系, 考虑扩孔器在施工过程中与岩土的接触碰撞问题, 采用有限单元法建立扩孔器与岩土相互作用系统非线性动力学模型, 对水平定向钻穿越扩孔施工过程进行数值模拟, 研究了扩孔器的动态变化规律及其对扩孔形状的影响。结果表明, 在扩孔过程中, 扩孔器会产生沉降, 沉降量与钻进速度和扩孔时间有关, 钻进速度越大扩孔器沉降量越大, 扩孔时间越长扩孔器沉降量越大; 同时, 扩孔器在竖直方向会产生振动, 振动速度的变化范围为-380~320 mm/s。受扩孔器沉降等因素的影响, 模拟得到的扩孔截面形状为上窄下宽的长圆形, 与工程实例的扩孔形状吻合。

关键词 扩孔器; 动态变化规律; 扩孔形状

中图分类号 TD231

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.16.009

The Hole Shape under Horizontal Directional Drilling Crossing

AI Zhijiu¹, XIAN Yong¹, XIA Huan², JIAO Ruyi², JIANG Yong²

1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Research Institute of Science and Technology of China Petroleum and Natural Gas Pipeline, Langfang 065000, China

Abstract Based on the geotechnical failure criteria of the equivalent plastic strain and the geotechnical elastic-plastic constitutive relation, the random collision under gravity and the geotechnical interaction are considered to establish a nonlinear dynamics model of the interaction between the reamer and the geotechnical body, which is used in the finite element method. The horizontal directional drilling construction process is simulated when the reamer operates. The reamer produces a settlement in its operation, the settlement of the reamer increases with the construction time, the speed in the vertical direction changes in a range of -380~320 mm/s. The sedimentation rate increases with the reamer's drilling speed. The actual cross-section of the perforations is pear-shaped, as is the case in engineering examples.

Keywords reamer; dynamic characteristic; reaming shape

水平定向钻穿越是通讯光缆敷设、电气化改造、城市市政建设中采用的保护环境和地貌的重要施工方法^[1-4]。目前围绕水平定向钻穿越已经开展了大量的科研工作, 曾聪等^[5]以大直径水平定向钻进(HDD)在实际砂土层的工况为对象, 推导了HDD钻孔孔壁塑性半径的计算公式, 并对实验结果进

行分析; 高学林等^[6]针对水平定向钻轨迹偏差校正问题, 构建轨迹自动纠偏算法及控制系统, 提出了可行的轨迹检测方法; 闰相祯等^[7]对定向钻穿越施工中的弯曲半径、管道回拖力等关键参数和经验公式进行分析, 给出更加符合工程实际的理论计算公式; 徐国华等^[8]对水平定向钻钻架建立有限元分

收稿日期: 2013-09-10; 修回日期: 2014-04-11

基金项目: 中国石油天然气集团公司“十二五”科技项目(2011B-3303)

作者简介: 艾志久, 教授, 研究方向为石油天然气装备及油气井安全工程, 电子信箱: aizhijiu123@vip.sina.com; 鲜勇(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为石油天然气装备设计与制造, 电子信箱: xianyong5@126.com

引用格式: 艾志久, 鲜勇, 夏换, 等. 水平定向钻穿越扩孔器动态变化及其对扩孔形状的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(16): 54-57.

析模型,提出了采用有限元对设计进行校核的方法。在借鉴上述研究成果的基础上,本文通过建立扩孔器-岩土系统动力学仿真模型,研究水平定向钻穿越扩孔施工过程中扩孔器的动态变化规律及其对扩孔后孔洞截面形状的影响。

1 扩孔器-岩土系统动力学模型

扩孔器-岩土系统如图1所示。水平定向钻穿越扩孔过程中,由套管供给泥浆推动扩孔器绕自身轴线转动,由钻机提供拉力拉动扩孔器前进,通过扩孔器牙齿与岩石的相互交替作用实现对岩石的破碎。在仿真研究中,为了简化模型,假设:1)扩孔器为不可变形刚体;2)扩孔器绕自身轴线旋转的速度是常数;3)当扩孔器牙齿切削水平孔孔壁时,岩土只发生塑性破坏,而不发生脆性破坏;4)在扩孔前,水平孔洞中无岩屑^[9]。

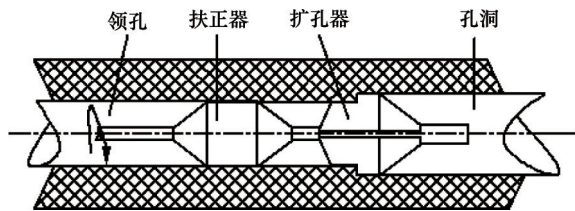


图1 扩孔器-岩土系统示意

Fig.1 Schematic diagram of underreamer and ground

扩孔器在扩孔时要完成对岩石的破碎,而扩孔器破碎岩石是典型的摩擦动态接触碰撞问题,在很短的时间内不仅有结构发生大转动、大位移而造成的几何非线性,而且有岩土材料发生应变直到破坏失效所引起的物理非线性,摩擦问题与复杂的碰撞接触问题在这个过程中同时存在。利用有限单元法和达朗贝尔原理,建立扩孔器与岩土相互作用的动力学模型为^[10]

$$\begin{pmatrix} m_u & 0 \\ 0 & m_c \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_u \\ \ddot{u}_c \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_u & 0 \\ 0 & c_c \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_u \\ \dot{u}_c \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_u & 0 \\ 0 & k_c \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_u \\ u_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_u - f_u \\ F_c - f_c \end{Bmatrix}$$

式中, m_u 、 m_c 分别为扩孔器和岩土的整体质量矩阵; c_u 、 c_c 分别为扩孔器和岩土的整体刚度矩阵; k_u 、 k_c 、 c_c 分别为扩孔器和岩土的整体阻尼矩阵; F_u 、 F_c 分别为作用在扩孔器上的拉力矢量和作用在岩土上的围压力矢量; f_u 、 f_c 分别为作用在扩孔器和岩土的接触力矢量; \ddot{u}_u 、 \ddot{u}_c 分别为扩孔器和岩土的加速度; \dot{u}_u 、 \dot{u}_c 分别为扩孔器和岩土的速度; u_u 、 u_c 分别为扩孔器和岩土的位移。

2 扩孔器-岩土系统动力学仿真分析

根据上述理论以及岩土本构关系破坏准则^[11-15],用Abaqus有限元分析软件对水平定向钻穿越扩孔施工过程进行动力学仿真分析。岩土材料为密质均匀的砂土,扩孔器类型为板式扩孔器(3个齿),在Abaqus软件中选择岩土弹塑性DP模型。主要计算参数:扩孔器的转速为14 r/min,钻进速度为140 mm/s,重力加速度为9.8 m/s²;岩石的摩擦角为20°,

流变应力比为1.0,膨胀角为20°;岩石的密度为2550 kg/m³,弹性模量为0.4137 GPa,泊松比为0.15;岩土弹塑性DP模型的硬化参数如表1所示^[16]。

表1 岩土DP模型的硬化参数

Table 1 Parameters of ground D-P hardening

屈服应力/MPa	2.2607	2.65	2.7
绝对塑性应变	0	0.005	0.08

基于空间解析几何原理,在有限元Solidworks软件中建立扩孔器的实体模型,在进行仿真时,将扩孔器实体模型直接导入到ABAQUS软件中^[17]。岩土采用六面体C3D8R单元进行网格划分,并对中心区域加密,扩孔器采用四面体C3D4单元进行网格划分,得到扩孔器与岩土相互作用的有限元模型如图2所示。

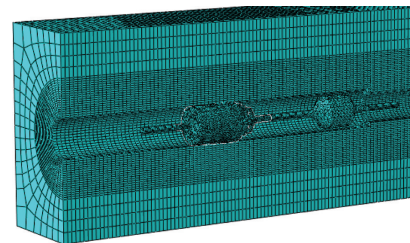
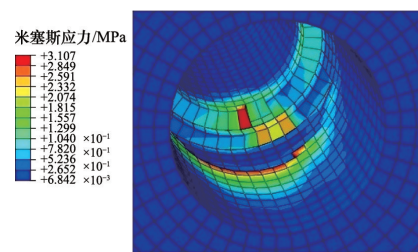


图2 扩孔器-岩土有限元模型

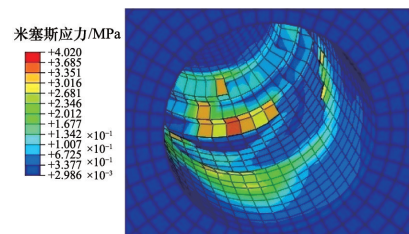
Fig. 2 FEM model of underreamer and ground

扩孔器的穿越长度为15960 mm,仿真计算时间为114 s。

扩孔施工不同时刻水平孔孔底模式如图3所示。可以看出,孔底部位的应力值较大。图3(a)为 $t=27$ s时扩孔器沉降160 mm的孔底模式,图3(b)为 $t=48$ s时扩孔器沉降270 mm的孔底模式,表明随扩孔时间的延长,孔洞底部为下沉趋势。



(a) $t=27$ s

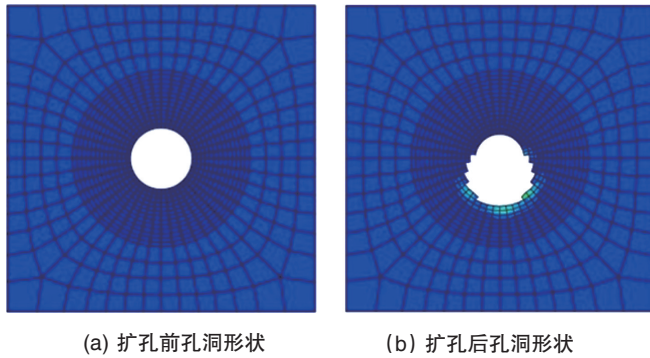


(b) $t=48$ s

图3 不同时刻的模式

Fig. 3 Bottom modes at different times

扩孔前后孔洞的截面形状如图4所示,扩孔前的孔洞截面形状是圆形,扩孔后孔洞的截面形状近似长圆形,且上窄下宽。扩孔器在扩孔施工过程中,扩孔器在自身重力作用下逐渐下沉,导致水平孔洞下围的应力值较大(图3),最终形成长圆形孔洞。



(a) 扩孔前孔洞形状 (b) 扩孔后孔洞形状

图4 扩孔前后孔洞的截面形状

Fig. 4 Hole shape before and after reamer's operation

扩孔器在竖直方向(y)的沉降-时间关系曲线如图5所示。可以看出,在扩孔过程中扩孔器是逐渐下沉的,且扩孔器的沉降量随着扩孔时间的延长而逐渐增大;扩孔器的沉降-时间关系曲线随扩孔器沉降趋势线而摆动,说明在扩孔施工过程中,扩孔器在逐渐下沉的同时在竖直方向不断振动。

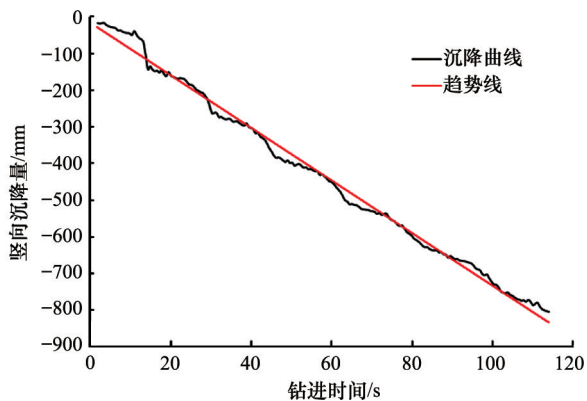


图5 扩孔器在竖直方向的沉降曲线

Fig. 5 Subsidence curve of reamer in the vertical direction

扩孔器在竖直方向振动的速度、加速度响应曲线如图6和图7所示。从图6可以看出,在扩孔施工过程中,扩孔器在竖直方向有明显振动,振动速度变化范围为-380~320 mm/s。从图7可以看出,扩孔器在扩孔施工刚开始与岩土发生相互作用时,扩孔器在竖直方向的振动较为剧烈并且呈现出一定的随机性。

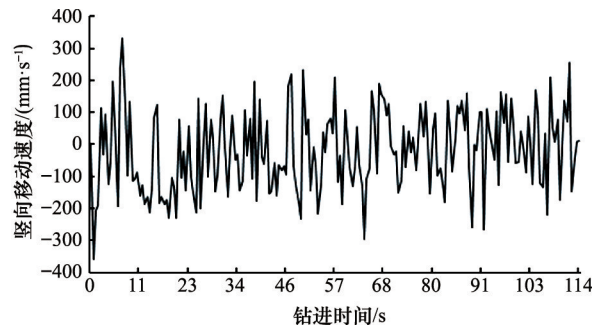


图6 扩孔器在竖直方向的振动速度响应曲线

Fig. 6 Beating velocity response curve of reamer in the vertical direction

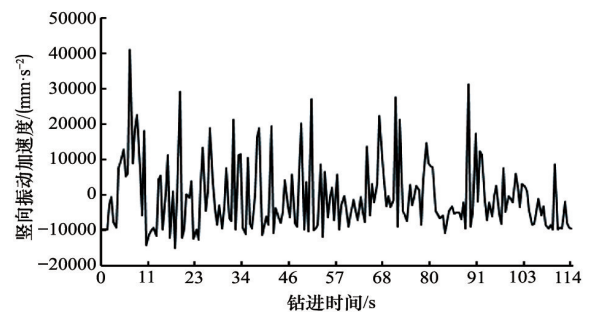


图7 扩孔器在竖直方向的振动加速度响应曲线

Fig. 7 Beating torque response curve of reamer in the vertical direction

为研究扩孔器不同钻进速度对其沉降量的影响,在Abaqus软件中分别建立扩孔器钻进速度为 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 的有限元动力学模型进行仿真。扩孔器在不同钻进速度下的沉降量如图8所示。可以看出,钻进速度越小,扩孔器在相同时间的沉降量越小,但施工效率越低,扩孔器钻进速度越大,施工效率越高,但扩孔器在相同时间的沉降量越大,影响施工质量。因此,扩孔器在扩孔施工过程中,应选择合适的钻进速度,将扩孔器的沉降量控制在一定的范围内,并对扩孔器进行纠偏,以提高施工质量。

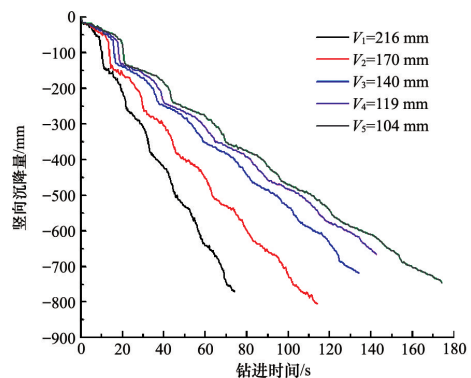


图8 不同钻进速度下扩孔器在竖直方向的沉降曲线

Fig. 8 Subsidence curves of the reamer in the vertical direction at different speed

3 工程实例

工程实例为中石油管道局穿越公司在印度进行的东气西输Purna河输气管道的定向钻穿越施工工程。施工管径为1219 mm,壁厚为20.7 mm,实际穿越长度为670 m,主要穿越地质层为硬塑粉质黏土。该工程实际施工中,共进行了457、609、762、914、1067、1219、1320、1428、1564、1625 mm共10级扩孔。在扩孔过程中,钻杆的位置由最初的导向孔中心下沉了670 mm,扩孔后的孔洞截面形状如图9所示,为上窄下宽的长圆状,与本文的仿真扩孔形状近似,证明本文仿真研究结果较为符合实际。



图9 多级扩孔后形成的长圆孔

Fig. 9 Long hole by multi-level operation of reamer

4 结论

扩孔器在扩孔施工过程中,在竖直方向会产生的沉降,沉降量随施工时间的增加而逐渐增大,并且在不同的钻进速度下沉降量也不一样,钻进速度越大扩孔器在相同时间的沉降量越大,速度越小扩孔器在相同时间的沉降量越小。扩孔器在施工过程中在竖直方向不断振动,钻进速度越大,扩孔器的速度、加速度振幅越大。有限元数值模拟的扩孔形状为上窄下宽的长圆形,与工程实例的扩孔形状吻合。本研究结果可为水平孔孔壁稳定性问题、扩孔器动力学以及控制孔洞轨迹的形成提供一定理论依据。

参考文献(References)

- [1] Kumano A. An experimental and analytical investigation of the response of rock to impact loading[D]. California: University California, Berkeley, 1980.
- [2] Sheppard M C, Lesage M. The forces at the teeth of a drilling rollercone bit: Theory and experiment[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1988.
- [3] Kellogg C G. Vertical earth loads on buried engineered works[J]. Journal of geotechnical engineering, 1993, 119(3): 487-506.
- [4] Crochet M J, Davies A R, Walters K. Numerical simulation of non-newtonian flow[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984.
- [5] 曾聪, 马保松, 刘厚平. 水平定向钻穿越施工中钻井液渗透对孔壁塑性半径的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(2): 57-61.

- Zeng Cong, Ma Baosong, Liu Houping. Effect of drilling fluid penetration on plastic radius of horizontal directional drilling borehole [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(2): 57-61.
- [6] 高雪林, 叶桦, 任峥峥, 等. 水平定向钻的轨迹自动纠偏方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(2): 298-302.
- Gao Xuelin, Ye Hua, Ren Zhengzheng, et al. Automatic trajectory correction of horizontal directional drilling[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(2): 298-302.
- [7] 闫相祯, 丁鹏, 杨秀娟. 水平定向钻技术在管道穿越工程中的应用研究[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 292-295.
- Yan Xiangzhen, Ding Peng, Yang Xiujuan. Research on applying horizontal directional drilling technology to pipeline crossing project[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 292-295.
- [8] 徐国华, 褚学宁, 张在房. 水平定向钻钻架有限元建模与分析[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 322-325.
- Xu Guohua, Chu Xuning, Zhang Zaifang. Finite element modeling and analysis for drilling frame of horizontal directional drill[J]. Computer Simulation, 2007, 24(2): 322-325.
- [9] 刘清友, 王国荣, 牛再举. 盘式单牙轮钻头破岩机理仿真研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2003, 35(5): 12-15.
- Liu Qingyou, Wang Guorong, Niu Zaiju. Simulation study the rock-breaking mechanism on disc one-cone bit[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003, 35(5): 12-15.
- [10] 祝效华, 罗衡, 贾彦杰. 考虑岩石疲劳损伤的空气冲旋钻井破岩数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 754-761.
- Zhu Xiaohua, Luo Heng, Jia Yanjie. Numerical analysis of air hammer bit drilling based on rock fatigue model[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 754-761.
- [11] 陆波. 牙轮钻头与岩石互作用下系统纵向振动研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- Lu Bo. The research of the longitudinal vibration in cone bits-rock system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [12] 费康. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- Fei Kang, Geotechnic engineering in abaqus[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010.
- [13] Forrestal M J, Tzou D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets[J]. International Journal of Solids and Structures, 1997, 34(31): 4127-4146.
- [14] Lueke J S, Ariaratnam S T. Surface heave mechanisms in horizontal directional drilling[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2005, 131(5): 540-547.
- [15] 吴泽兵, 刘清友. 盘式钻头与岩石互作用计算机仿真[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(1): 72-74.
- Wu Zebing, Liu Qingyou. Computer simulation of interaction between disc drill and rock[J]. Journal Southwest Petroleum University, 1998, 20(1): 72-74.
- [16] 黄志强, 范永涛, 魏振强, 等. 冲旋钻头破岩机理仿真研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(1): 148-150.
- Huang Zhiqiang, Fan Yongtao, Wei Zhenqiang, et al. Emulation study on rock-breaking mechanism of percussive-rotary bit[J]. Journal Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2010, 32(1): 148-150.

(责任编辑 韩星明)