

基于有限元法的大落差管段清管冲击分析

曾 鸣¹ 宋尚娜¹ 王文明¹ 张仕民¹ 于 达¹ 牛化昶²

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院 2. 中国石化天然气川气东送管道分公司

曾鸣等. 基于有限元法的大落差管段清管冲击分析. 天然气工业, 2013, 33(5): 100-103.

摘 要 “川气东送”管道全长约 2 200 km, 沿线地形地貌复杂, 多处形成大落差起伏, 最大坡度达 60°, 给管道清管作业带来一定的困难和风险。为此, 针对大落差管段建立了清管动力学有限元模型, 在给定清管器进入管道时的初始运行速度、管道内压等作业参数的条件下, 采用 ABAQUS 有限元分析软件分析了橡胶清管球在大落差管段清管时的运行规律以及清管器通过时管道的振动情况, 研究了清管器冲击时的管道应力变化与清管器速度及管道内压的变化关系, 评估了大落差管段清管时的安全性。结果表明: ①橡胶清管器清管作业时, 管道内部的输送压力对大落差管段的冲击载荷影响明显, 管道最大应力会随着管道内压的增大而增大; ②清管器的速度对冲击应力的影响不大, 基本呈增长趋势, 变化范围在 7 MPa 之内; ③清管器通过时管道发生明显振动, 通过后管道恢复原状; ④为保证清管器顺利通过大落差管段, 增大了清管器两端压差, 此时清管器速度表现为增长趋势。

关键词 “川气东送”管道 大落差管段 橡胶清管器 清管 冲击 有限元计算 运动规律

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.05.019

Dropping impact analysis of hilly pipeline pigging based on the finite element method

Zeng Ming¹, Song Shangna¹, Wang Wenming¹, Zhang Shimin¹, Yu Da¹, Niu Huachang²

(1. School of Mechanical and Storage & Transmission Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Sichuan - to - East China Gas Pipeline of Sinopec, Wuhan, Hubei 430027, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 5, pp.100-103, 5/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The Sichuan - to - East China gas pipeline is about 2200 km long in total, along which the landform is complex and in many areas with huge downthrow, much undulate topography and a maximum gradient of 60°. This brings about a certain difficulty and risk in pigging operation in pipelines. In view of this, a dynamic model based on the finite element method was established for pigging operation in such hilly pipelines. Under the given condition of such parameters as the initial running speed, the internal pressure of pipes, etc. when a pig enters into the pipelines, the ABAQUS was adopted to analyze the motion law of the rubber cleaning pig in the hilly pipelines and the vibration of pipes at the time when the pig goes through. On this basis, the pig's dropping impact was discussed on the pipe's pressure as well as its correlation to the pig's running speed and the pipe's internal pressure. Additionally, the pigging operation safety was evaluated in hilly pipelines. The following conclusions were thus drawn. a. During the pigging operation, the pipe's transmission pressure has an obvious effect on the dropping impact in the hilly pipelines and the maximum pipe pressure will increase with the increase of internal pressure in pipes. b. The rubber pig's running speed has little effect on the dropping impact and keeps rising within the range of less than 7 MPa. c. The pipes vibrate prominently when the pig goes through and after that they soon return to the status quo. d. The pressure difference between the pig's two ends should be increased to ensure the pig's smooth going through the hilly pipelines, by the time of which the pig's running speed is in rising tendency.

Key words: Sichuan - to - East China gas pipeline, hilly pipeline, rubber pig, pigging, dropping impact, finite element calculation, motion law

作者简介: 曾鸣, 1956 年生, 副教授, 硕士生导师, 博士; 主要从事清管技术及管道内检测方面的研究工作。地址: (102249) 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学机械与储运工程学院。电话: (010) 89734942, 13910220642。E-mail: mzung@cup.edu.cn

“川气东送”管道工程为国家“十一五”重点工程，管道全长约 2 200 km。管道沿线地形地貌复杂，在多处形成大落差起伏，最大坡度达 60°，给管道的清管作业带来了一定的困难和风险。为了保证“川气东送”管道在清管作业时的安全，进行清管器运行对管道的冲击影响研究十分必要。国外诸多学者对清管模型进行了研究，典型的清管模型有 McDonald-Baker 模型、Barua 模型^[1]、Kohda 模型^[2]和 Minami 模型^[3-4]，以稳态或准稳态假设为前提，国内学者则多以上述几种模型为基础，采用实验和数值模拟，研究清管器在管道中的运行规律^[5-11]，而采用有限元分析法研究清管器对特殊管段管道冲击影响的论文还不多见。

根据“川气东送”管道的特点，笔者应用 ABAQUS 有限元分析法，重点研究了大落差管段在橡胶清管器通过时的动力学特性、动态载荷与管道强度的关系，提出了清管作业时管道安全运行工艺参数的界限，评估了清管作业时管道的安全性。

1 大落差管段清管有限元模型

1.1 模型的建立

采用 ABAQUS 有限元分析软件对大落差管段清管进行建模(图 1)，管道采用 C3D8R 六面体单元，橡胶清管球采用 C3D4 四面体网格。

1.2 关键参数的选取与确定

清管器依靠压差作用在管道中运行，通过改变压差的大小来控制清管器的运行速度。因此，压差的确定对清管冲击分析有着至关重要的作用。

清管器清前后压差(Δp)可利用“组合圆筒”原理按下式计算确定^[12]：

$$\Delta p = p^1 - p^2 = \frac{2fEa \arctan g \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt{2-\delta}} - \sin\left(4 \arctan g \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt{2-\delta}}\right)}{1-\mu}$$

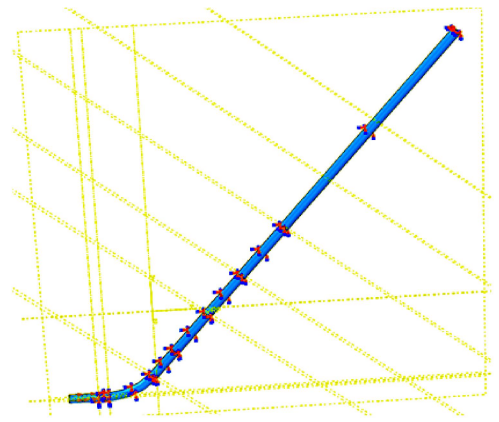


图 1 大落差管段清管有限元模型图

式中 δ 为清管球直径过盈量与直径的比值； E 为橡胶清管球的弹性模量； μ 为橡胶球的泊松比，取值为 0.49； f 为清管器与管壁的滑动摩擦系数。

通过计算可知清管器两端的压差约为 0.06 MPa，考虑污物等的阻力，确定清管器前后压差为 0.09 MPa。对清管器两端都施加压力，形成压差，外部压力为 0.29 MPa，内部压力为 0.20 MPa，压差为 0.09 MPa。清管器与管道之间为面接触，摩擦系数为 0.3。

2 大落差橡胶清管器冲击分析

2.1 冲击过程分析

给定清管器进入管道时的初始运行速度，对大落差管段清管冲击进行仿真，得到清管冲击过程如图 2 所示。

2.2 管道最大应力分析

通过 ABAQUS 模拟仿真，得到管道在不同内压及不同清管器运行速度时的最大应力值如表 1 所示。

由表 1 可以看出，在输送压力为 4、5、6、7、8、10 MPa，清管器初始运行速度为 2、4、6 m/s 时，管道最大

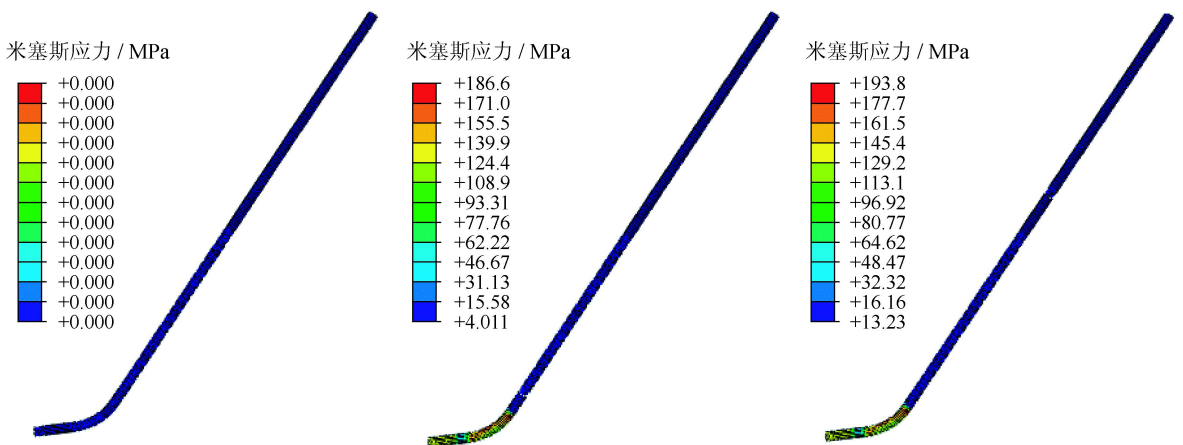


图 2 清管冲击过程图

表1 管道在不同内压及不同清管器运行速度时的最大应力值表

管道内压/ MPa	清管器运行速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大应力/ MPa
4	2	158.24
	4	161.47
	6	164.30
5	2	178.87
	4	181.92
	6	185.24
6	2	198.25
	4	201.49
	6	204.15
7	2	218.82
	4	221.90
	6	224.61
8	2	238.47
	4	241.56
	6	244.48
10	2	279.09
	4	282.32
	6	285.71

应力为 285.71 MPa。管道最大应力随着管道内压的增大而增大,增幅约为 20 MPa;清管器进入管道后,其运行速度随着前后压差变化和阻力变化而发生较大变化,故其初始运行速度对管道应力影响不大,管道应力随清管器初始运行速度的增加而增大,增幅约为 3 MPa。

2.3 运动规律分析

2.3.1 管道加速度分析

在管道弯曲处及斜坡地方选取一点,得到在清管过程中管道加速度曲线如图3所示。

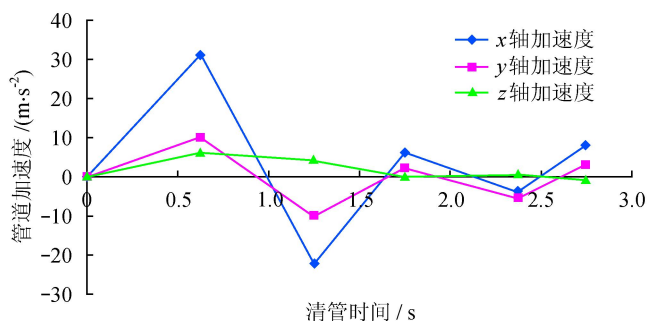


图3 清管过程中管道加速度曲线图

清管器在 0.5~1.5 s 内经过管道弯曲处。由图3可以看出,清管器未到达处,管道有轻微振动,加速度最大不超过 1 m/s^2 ;在清管器通过时,由于冲击作用,管道发生了较大的波动,表现为上下、左右振动,最大加速度达 30 m/s^2 。清管器通过后,管道加速度逐渐

减小,直至为零。

2.3.2 清管器速度分析

图4为清管器速度曲线,由图4可以看出,清管时清管器速度不稳定,一直在变化。为保证清管器顺利通过弯管段,初始时给清管器两端较大压差,其速度逐渐增大。在 0~0.6 s 内,弯管阻力较大,清管器速度增长幅度较小,加速度为 0.8 m/s^2 ;清管器通过弯管后,加速度达到了 2 m/s^2 ;清管器通过大斜坡时,速度达到了 6 m/s 。清管器通过大落差管段后,调节清管器两端压差,使清管器速度保持在正常范围内。

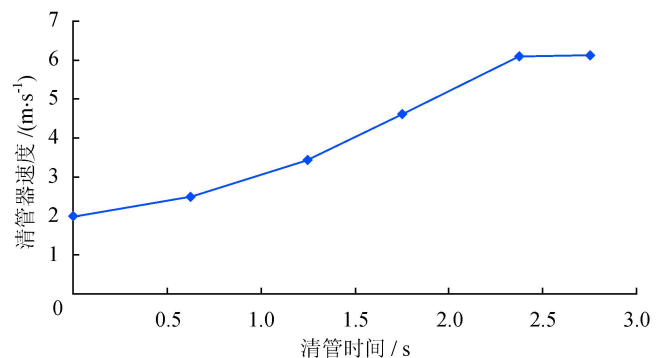


图4 清管器速度曲线图

3 结论

1)橡胶清管器清管作业时,管道内部的输送压力对大落差管段的冲击载荷影响明显,管道最大应力会随着管道内压的增大而增大,在管道内压为 10 MPa 时,管道应力最大。管道最大应力仍在许用应力范围之内,说明在橡胶清管器进行清管作业是安全的。

2)清管器的速度对冲击应力的影响不大,基本呈增长趋势,变化范围在 7 MPa 之内。

3)清管器通过时管道发生明显振动,通过后又恢复原状。

4)清管器通过大落差管段时,为保证清管器顺利通过,增大清管器两端压差,因此,在大落差管段清管时,清管器速度表现为增长趋势。

参 考 文 献

- [1] BARUA S. An experimental verification and modification of the McDonald-Baker pigging model for horizontal flow [D]. Tulsa: University of Tulsa, 1982.
- [2] KOHDA K, SUZUKAWA Y, FURUKWA H, et al. A new method for analyzing transient flow after pigging scores well [J]. Oil & Gas Journal, 1988, 5(9): 40-47.
- [3] MINAMI K, SHOHAM O. Transient two-phase flow be-

- havior in pipelines—experiment and modeling[J].International Journal of Multiphase Flow,1994,20(4):739-752.
- [4] MINAMI K, SHOHAM O. Pigging dynamics in two-phase flow pipelines; Experiment and modeling[J]. SPE Production & Facilities,1995,10(4):225-232.
- [5] 徐孝轩,宫敬,邓道明.多相流管道清管模型研究概况[J].中国海上油气工程,2003,15(4):21-24.
- XU Xiaoxuan, GONG Jing, DENG Daoming. A summary on pigging models in multiphase pipelines[J]. China Offshore Oil and Gas; Engineering, 2003, 15(4): 21-24.
- [6] 李玉星,冯叔初,王新龙.气液混输管路清管时间和清管球运行速度预测[J].天然气工业,2003,23(4):99-102.
- LI Yuxing, FENG Shuchu, WANG Xinlong. Prediction of pigging time and velocity for two phase in pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(4): 99-102.
- [7] 王荧光,裴红,刘文伟,等.气液两相流管道中的瞬态流动及清管操作模型[J].国外油田工程,2010,26(10):47-51.
- WANG Yingguang, PEI Hong, LIU Wenwei, et al. Transient flow and pigging operation model in gas-liquid two phase pipelines[J]. Foreign Oil Field Engineering, 2010, 26(10): 47-51.
- [8] 张洋.气液两相流管线清管过程模拟研究[J].石油知识,2012(6):32-33.
- ZHANG Yang. Simulation study of pigging in gas-liquid two phase pipelines[J]. Knowledge of Petroleum, 2012(6): 32-33.
- [9] 史培玉,岳明,李玉星,等.水平管路清管过程流动参数变化规律模拟研究[J].中国海上油气工程,2003,15(6):25-29.
- SHI Peiyu, YUE Ming, LI Yuxing, et al. A simulation study on the change of flow parameters during pigging horizontal pipeline[J]. China Offshore Oil and Gas; Engineering, 2003, 15(6): 25-29.
- [10] 李玉星,冯叔初.水平气液混输管道清管操作实验与数值模拟技术[J].化工学报,2004,55(2):271-274.
- LI Yuxing, FENG Shuchu. Simulation of pigging dynamics in two-phase flow pipeline[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering; China, 2004, 55(2): 271-274.
- [11] 彭星煜,梁光川,张鹏,等.人工爆破地震作用下输气管道动力响应分析[J].天然气工业,2012,32(11):81-84.
- PENG Xingyu, LIANG Guangchuan, ZHANG Peng, et al. Dynamic response for buried gas pipelines under artificial explosion[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(11): 81-84.
- [12] 李莉萍,王卫红,曲伟国.天然气高压管道带气通球清管的分析[J].煤气与热力,2003,23(5):296-298.
- LI Liping, WANG Weihong, QU Weiguo. Analysis of on-line purging of high pressure natural gas pipeline[J]. Gas & Heat, 2003, 23(5): 296-298.

(修改回稿日期 2013-03-02 编辑 何 明)