

DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2019.10.16.03

文章编号: 1674-5086(2020)05-0170-09

中图分类号: TE257

文献标志码: A

水平井完井管柱振动特性实验研究

黄亮^{1*}, 王国荣², 徐靖¹, 魏安超¹, 贾杜平²

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057

2. 西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500

摘要: 为探索气体作用下完井管柱振动响应机理, 开展了水平井完井管柱在开井工况下振动相似实验。实验采用PE管模拟完井管柱油管, 采用透明的亚克力管模拟完井套管, 并采用Froude相似准则进行尺寸缩放; 基于应变片测试技术采集气体作用下完井管柱油管在水平和垂直方向的振动, 并采用模态分析法分析了管柱应变、位移响应及振动模态。通过有限元分析管柱固有频率并与实验振动频率对比发现, 管柱振动频率接近三阶固有频率, 且会发生共振; 实验管柱系统在弯曲段响应应力、位移量较大, 振动较为剧烈; 管柱在水平方向与垂直方向振动频率与模态一致, 水平方向振动剧烈。

关键词: 完井管柱; 开井工况; 振动响应; 模态分析法; 水平井

An Experimental Study on Vibration Characteristics of Horizontal Well Completion String

HUANG Liang^{1*}, WANG Guorong², XU Jing¹, WEI Anchao¹, JIA Duping²

1. Zhanjiang Branch, CNOOC China Limited, Zhanjiang, Guangdong 524057, China

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

Abstract: In order to explore the vibration response mechanism of the completion string under the action of gas, the horizontal well completion string vibration test was carried out under the open well condition. PE pipe was used to simulate completion string, transparent acrylic pipe was used to simulate completion casing, and Froude similarity criterion was used for dimension scaling. The horizontal and vertical vibration responses of completion string is tested based on strain gauge test technology, and the strain, displacement response and vibration modes of the string were analyzed by modal analysis method. Through the finite element software analysis of the natural frequency of the string and the comparison with the experimental vibration frequency, it is found that the vibration frequency of the string is close to the third-order natural frequency and resonance occurs. The response stress, displacement and vibration of the test string system are large in the bending section. The vibration frequency of the string in the horizontal direction and the vertical direction is consistent with the mode.

Keywords: completion string; open well condition; vibration response; modal analysis; horizontal well

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20201012.1608.002.html>

黄亮, 王国荣, 徐靖, 等. 水平井完井管柱振动特性实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 170-178.

HUANG Liang, WANG Guorong, XU Jing, et al. An Experimental Study on Vibration Characteristics of Horizontal Well Completion String[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(5): 170-178.

* 收稿日期: 2019-10-16 网络出版时间: 2020-10-13

通信作者: 黄亮, E-mail: huangliang1@cnooc.com.cn

引言

完井管柱是连接地下油层和地面的重要通道,主要用于产出地下的油气及将地面的工作液注入井内。然而,在采气过程中,气体流经管柱,会引起管柱的振动^[1]。在管柱内流量变化、频繁的开关井作业、管柱截面积变化、管柱局部弯曲等因素的影响下,会增大完井管柱振动,主要有以下几点危害:(1)管柱振动使得管柱处于交变载荷状态下,会对管柱产生疲劳破坏,此外还会导致连接螺纹处疲劳破坏,破坏管柱的连接性和密封性。(2)管柱振动过大时,会导致管柱与套管之间碰撞和磨损。(3)振动较大时会有过大的冲击载荷导致管柱等工具直接断裂^[1-3]。这将造成不必要的经济损失。

当管柱内存在流体时,会诱发管柱振动,国内外对流体诱发管柱耦合振动的研究较少。Fan等^[4]推导了可用于气井完井管柱的流固耦合振动4方程模型,发现在充满天然气的管道中,开启井口阀门时,流体的瞬态压力将会诱发完井管柱产生轴向振动,此时管柱的应变以及运动状态处于循环过程,加快了完井管柱损伤。Housner等^[5]研究表明,管道内存在流体时会对管柱的固有频率造成影响,使得管柱更易发生振动,当流体流速较大时,可能造成管柱失稳。Lee等^[6]利用Newton原理首次推导出4方程模型,该方程同时考虑了管柱和流体的影响。练章华等^[7-8]推导出应用于完井管柱受力的数学模型,为完井管柱的设计提供了理论指导。此外,通过模拟实验研究,得出气体流速恒定时也会诱发管柱振动,并随着气体流速的增大振动强度增大。高德利等^[9]研究了钻柱的横向振动,得出钻井液的阻尼会减小钻柱的横向振动。李子丰等^[10]研究了钻井液对钻柱横向振动的影响,得出均匀流动的钻井液对管柱的振动影响较小的结论。刘清友等^[11]建立了考虑气体钻井液对钻柱内外耦合影响时的钻柱横向振动模型,得出管内流动速度达到一定值时会诱发钻柱弯曲失稳的结论。祝效华等^[12]推导出高压弯管的运动方程,并运用ANSYS进行计算,得出双弯头固有频率随着弯头内径的增大近似线性增大,随着弯头曲率半径的增大而减小的规律。王宇等^[13]研究发现,天然气在管柱内流动时,会使管柱应力不断变化,诱发管柱振动,造成管柱疲劳破坏和磨损。

当管柱内流量变化、频繁的开关井作业、管柱局部弯曲等因素影响下,会增大完井管柱振动。刘磊等^[14]研究指出,由于完井管柱屈曲、结构等因素的影响,会引起管柱内流体产生漩涡,进而导致管柱振动;且流速不同,管柱振动不同。刘剑辉^[15]研究表明,管柱截面变化、弯曲、阀门开关处流速变化等多种因素都会引起完井管柱振动,并提出了减小完井管柱振动的4点措施。于凯强等^[16]对完井管柱振动研究表明,关井时会使得管柱井口压力、轴向力、振动速度增大,完井管柱低阶振动时在横向上振动更为剧烈。

从上述研究可以看出,研究者主要是针对理论方面的研究,针对完井管柱振动实验方面的研究还较少。本文开展了水平井完井管柱振动特性实验,基于应变片测试技术采集气体作用下水平井完井管柱耦合振动响应特性,并使用模态分析法处理实验数据,研究完井管柱在气体作用下的响应特性。对完井管柱的位移标准差、应变时间历程、频率和模态进行了分析,探索气体作用下水平井完井管柱的振动响应特性。

1 实验介绍

1.1 实验装置

完井管柱耦合振动实验在西南石油大学进行,实验装置包括:螺杆式空气压缩机、高压储气罐、气动阀门、连接管线、电磁阀、时间继电器、流量计、内管、外管、扶正器、轴向加力器等。整体实验装置及示意图如图1所示。用来模拟南海某气井的水平井完井管柱振动,如图2所示。实验中气量为 $480\text{ m}^3/\text{d}$ ($20\text{ m}^3/\text{h}$),压力为 1.25 MPa ,通过相似准则可模拟实际产量 $160\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,压力 $52.7\sim 53.5\text{ MPa}$ 。

应变片具有体积小、测量数据准确、动态特性好等优点,放置在管柱表面不会影响管柱的振动或实验数据。完井管柱模型外表面上均匀布置有8组应变片,采用半桥方式进行连接,四个应变片一组布置在管柱同一截面上,测量点从下端进气口开始依次记为测点1~8(见图1a),测点1和测点8均和两端相距 0.08 m ,相邻两个测点之间的距离为 1.12 m ,本实验使用定制的BX型应变片,采样频率设置为 500 Hz 。

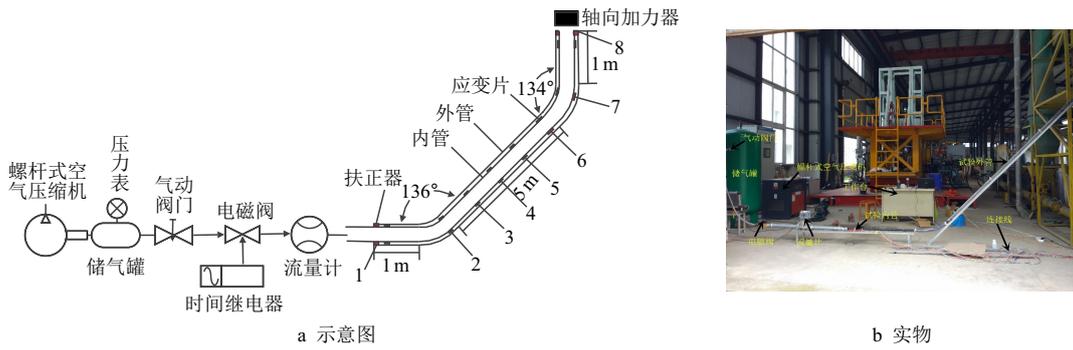


图 1 实验装置图
Fig. 1 Test equipment diagram

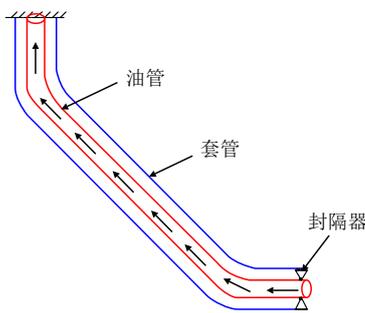


图 2 生产管柱示意图
Fig. 2 Production string diagram

1.2 管柱模型参数

目前,为了反映管柱振动特征,国内外主要使

用 PE 管、PVC 管和钢管等进行实验^[17-18],本文中实验内管管柱模型采用 PE 管,能较好模拟出实际情况,外管采用透明的亚克力管,用于模拟套管模型。采用 Froude 相似作为缩放规则,根据实际管柱尺寸得到缩放模型的几何形状^[19],实验中,管径的相似比为 4.7。实验和实际管柱的主要物理参数如表 1 所示。

为了保证实验中管柱模型的边界连接方式和真实开采完井管柱的边界连接方式一致,故实验中内管两端使用扶正器扶正,同时固定内管的下端,在管柱上端施加一定的轴向载荷。

表 1 管柱的主要物理参数

Tab. 1 The main physical parameters of the string

模型	长度/m		外径/m		壁厚/m		管柱斜度/(°)		水平管长度/m	
	实验值	实际值	实验值	实际值	实验值	实际值	实验值	实际值	实验值	实际值
完井管柱模型	8	4 038.7	0.025	0.114 3	0.002 5	0.007	45	43.44	1.0	416.9
套管模型	8	4 038.7	0.050	0.177 8	0.005 0	0.006	45	43.44	1.0	416.9
模型	斜段长度/m		竖直长度/m		弯管长度/m		密度/(kg·m ⁻³)		弹性模量/MPa	
	实验值	实际值	实验值	实际值	实验值	实际值	实验值	实际值	实验值	实际值
完井管柱模型	5.0	2 156.8	1	1 000	0.5	465	970	7 850	0.172	210
套管模型	5.0	2 156.8	1	1 000	0.5	465	1 900	7 850	3.000	210

1.3 管柱固有频率计算

实验内管管柱模型的固有频率利用有限元分析中的模态分析进行计算,图 3 为有限元模型图,管

柱下端固定,上端加 300 N 预加轴向力,并且受到自重。管柱的前 4 阶固有频率计算结果见表 2。

表 2 内管固有频率

Tab. 2 Inner tube natural frequency

阶次	固有频率/Hz
一阶	2.15
二阶	4.05
三阶	5.87
四阶	6.98

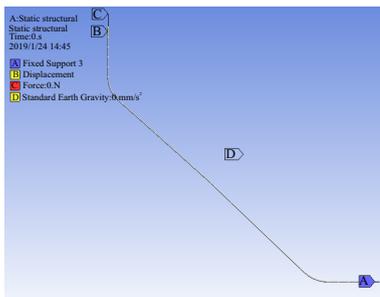


图 3 管柱有限元模型
Fig. 3 String finite element model

2 模态分析法

本次实验中,气体诱发完井管柱耦合振动,会使管柱在水平方向和垂直方向产生振动。其数据处

理流程如图 4。

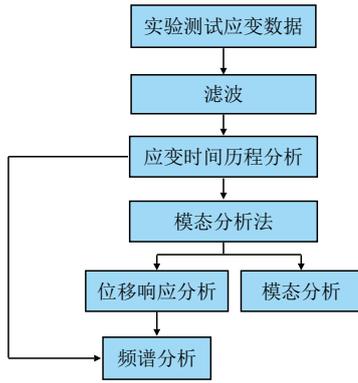


图 4 数据处理流程图

Fig. 4 Data processing flow chart

本文中用水平方向来说明气体诱发管柱振动实验中的数据处理方法。内管的振动位移表达式为^[20]

$$u(z, t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(t) \varphi_i(z), z \in [0, l] \quad (1)$$

式中:

- u —位移, m;
- z —管柱的轴线坐标, m;
- t —时间, s;
- n —模态数量;
- $\omega_i(t)$ —权重函数;
- $\varphi_i(z)$ —模态函数;
- i —模态阶次;
- l —管柱长度, m。

由于管柱的运动为小变形, 故管柱的曲率公式为

$$\frac{1}{k} = u'' \quad (2)$$

式中:

- k —曲率。

两端铰接管柱模型的模态函数为

$$\varphi_i(z) = \sin \frac{i\pi z}{l}, z \in [0, l] \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可得

$$u(z, t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(t) \sin \frac{i\pi z}{l}, z \in [0, l] \quad (4)$$

式(4)的二阶导数为

$$u''(z, t) = -\sum_{i=1}^n \omega_i(t) \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \sin \frac{i\pi z}{l}, z \in [0, l] \quad (5)$$

由水平方向上的曲率和轴线方向的应变关系, 可得

$$\varepsilon(z, t) = \frac{R}{k} = Ru''(z, t) = -R \sum_{i=1}^n \omega_i(t) \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \sin \frac{i\pi z}{l} \quad (6)$$

式中:

- R —管柱半径, m。

上述过程为采用模态分析法将管柱表面采集的应变信号求解出管柱位移响应值。实验中内管表面上布置了多个应变片, 因此, 管柱振动时, 可以根据管柱上各个测点处测量的应变来求出管柱的位移量变化。

3 实验结果与讨论

3.1 完井管柱位移分析

图 5 为气体流量 20 m³/h 时, 管柱振动偏离原平衡位置最大位移值的三维图。从图 5 中可知, 在水平(HOR)和垂直(VER)两个方向上, 当气体流量为 20 m³/h 时, 管柱位移出现较大幅值, 且两个方向的位移趋势大致相同, HOR 和 VER 两个方向上在管柱弯曲段的位移幅值均出现了尖峰值, 即在测点 2、3、5、7 处, 其中, 测点 2、3 的位移最大, 其余测点处振动较小。随着气流逐渐稳定后, 管柱振动幅值变小, 管柱趋于稳定状态。

这是因为: 当管柱内存在高速运动的气体时, 会诱发管柱产生振动^[1], 特别是当管柱内的气体存在压力脉动、流速变化、开关井时以及管柱自身的弯曲等因素时, 气体会对管柱造成较大的冲击振动^[13, 15, 21]。打开气动阀门后短时间内, 不稳定的高压气流瞬间通过管柱, 使得管柱内的气体压力突然升高, 气体在管柱内产生较大的压力脉动, 压力的变化会引起气体对管柱内壁所产生的力发生变化, 变化的力作用在管柱上, 引起管柱局部剧烈振动, 产生了负水锤效应^[4, 16]。当气体流过管柱的弯曲部位时, 气体的流速和方向将会发生变化^[15], 各个方向流速不均就会在管柱弯曲处产生漩涡, 使得弯曲管段内气体压力发生变化, 因此管柱会受到动载荷作用, 增大管柱的振动^[1]。而且具有一定动能的气体会对管柱弯管处产生冲击振动, 在弯管界面上形成 Bourdon 耦合^[16, 22], 进一步增大了管柱的振动, 所以, 在实验中内管弯管处产生的振动较大, 即测点 2、3、5、7 位置处。当气流稳定后, 气体的脉动值较小, 此外由于管柱结构和气体阻尼的作用, 故管柱振动逐渐降低^[23-24]。

因此, 在实际工况中, 增加扶正器的数量, 有利于减少完井管柱的横向变形以及完井管柱与套管之间的碰撞磨损, 进而保障完井管柱的安全性。

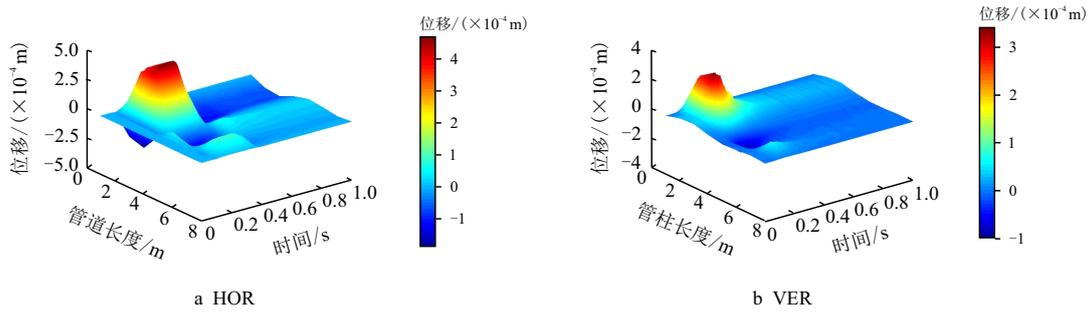


图 5 气体流量 20 m³/h 时管柱位移三维图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of pipe displacement at a gas flow rate of 20 m³/h

3.2 完井管柱各测点处应变时间历程和频率分析

开气动阀门短时间内, 测点 1~8 所对应的应变时间历程图和响应频谱图。图 6、图 7 分别是是气体流量为 20 m³/h 时, 打

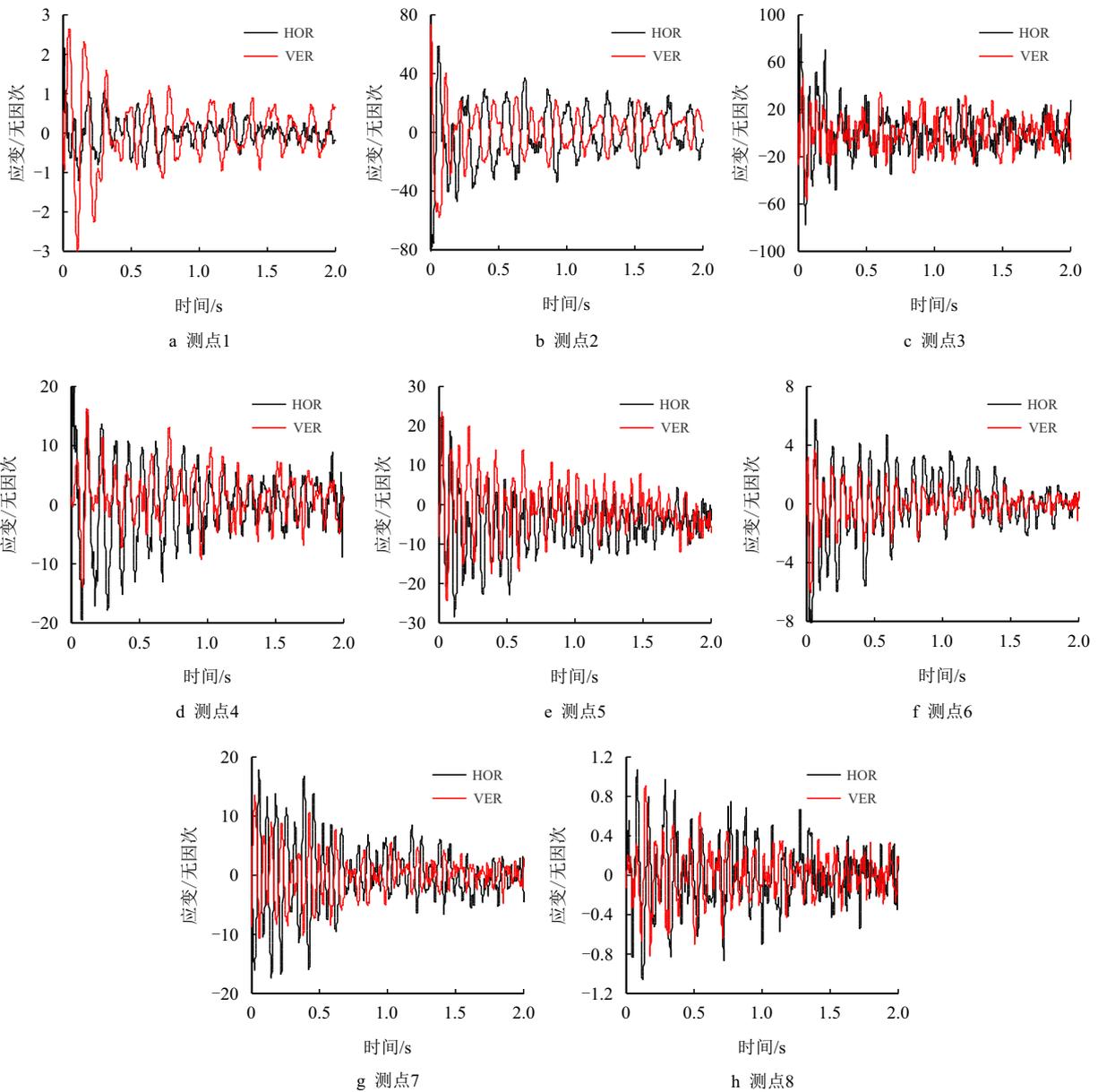


图 6 气体流量 20 m³/h 时不同位置处管柱应变时间历程图

Fig. 6 Strain histories of the pipe at different measuring points when gas flow rate of 20 m³/h

从图 6 中可以得出, 当气体流量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 管柱在弯曲段的应变较大, 即测点 2、3、5、7 处的应变较大。这和图 5 中完井管柱的位移规律是一致的。还可以看出, 管柱的振动处于脉动交变且逐渐衰减的趋势。这是因为: 阀门开启后, 管柱振动急剧增加, 之后由于管柱自身结构和气体阻尼的作用使得响应的波动幅值逐渐减小。

从图 7 可知, 管柱上 8 个测点在同一方向上振动响应频率是一致的, 且两个方向上的频率是一致

的, 均为 6.49 Hz 。这是因为: 当激振频率接近管柱的某阶固有频率时, 就会引起管柱产生共振, 出现较大的振动幅值^[15]。实验完井管柱的一阶固有频率为 2.15 Hz , 二阶固有频率为 4.05 Hz , 三阶固有频率为 5.09 Hz , 四阶固有频率为 6.98 Hz 。由频谱响应图中可以看出, 实验中管柱实际振动的频率为 6.49 Hz , 在管柱的三阶固有频率和四阶固有频率之间, 故实验管柱达到三阶固有频率时的振动, 使管柱振动幅值大幅增加, 管柱以三阶固有频率振动。

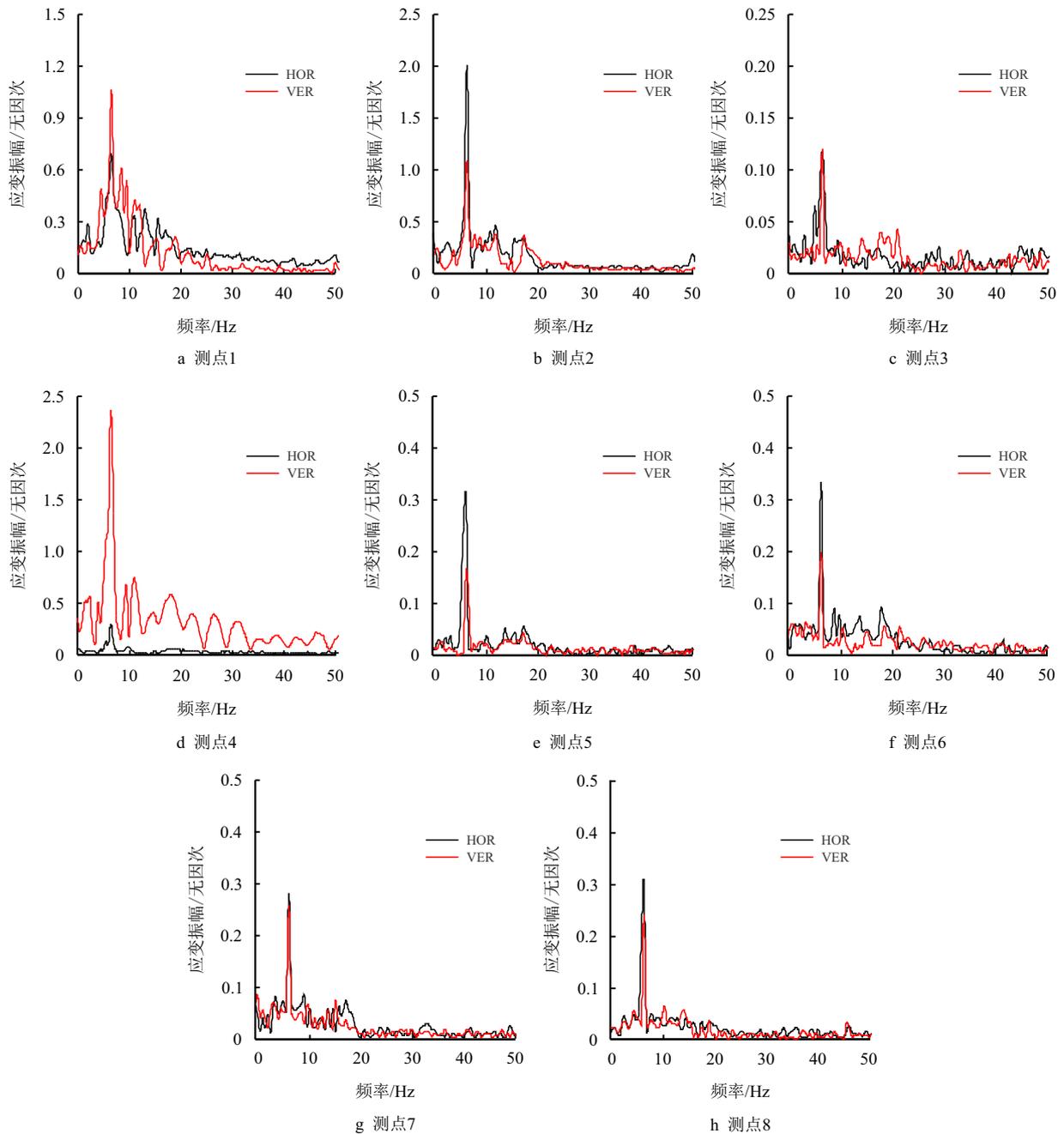


图 7 气体流量 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 时不同位置处管柱响应频谱图
 Fig. 7 Spectra of the pipe at different measuring points when gas flow rate of $20 \text{ m}^3/\text{h}$

3.3 完井管柱模态分析

管柱的模态数量可以用管柱位移标准差来表示,图8为气体流量 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 时管柱模型位移标准差空间分布图。从图8a可以看出,当气体流量为 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 时,HOR方向出现3个明显尖峰,其振动的模态阶次为3次;从图8b中可知,VER方向也出现3个明显的尖峰,说明VER方向振动模态由三阶模态控制;HOR和VER方向上管柱位移标准差空间分布图的趋势一致,在管柱相同位置处出现较大或较小值。此外,由图可知,对比两个方向振动幅值的数量级可以看出,管柱在HOR方向上的振动幅值比VER方向的大,即管柱在HOR方向的振动较大。

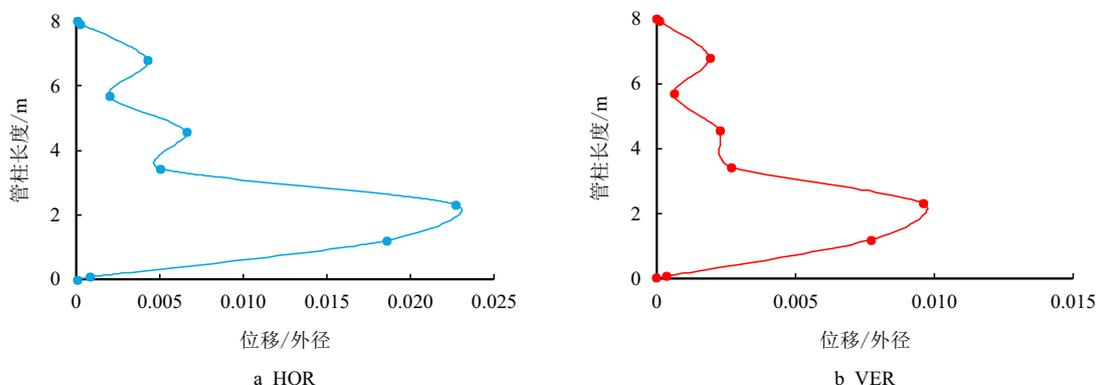


图8 气体流量 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 时管柱模型位移标准差空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of displacement standard deviation of pipe string model at a gas flow rate of $20\text{ m}^3/\text{h}$

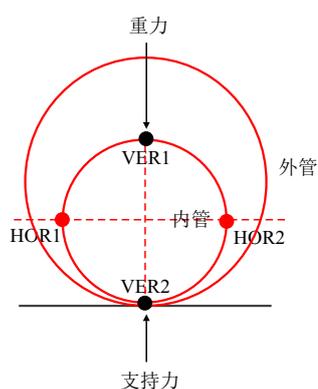


图9 内管受力图

Fig. 9 Internal tube force diagram

4 结论

(1) 管柱内通过高速气体时,会诱发完井管柱振动,特别是在管柱弯曲处,由于弯曲处流速不均匀,导致管内流体产生漩涡,使得水平井实验管柱系统在弯曲段的响应应力、位移量较大,振动剧烈。

这是因为:管柱模型的三阶固有频率为 5.87 Hz ,四阶固有频率为 6.98 Hz ,当气体流量 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 时,实验频率为 6.49 Hz ,完井管柱的振动频率超过管柱模型的三阶固有频率。由共振发生的原理可以看出,当管柱系统所受激励的频率与该系统的某阶固有频率相近时,管柱产生剧烈振动^[15],因此,实验管柱达到共振,其主导模态最高为三阶,这和图6中响应频率的规律是一致的。由图9可知,HOR方向为水平方向,受到重力和支持力约束较少,振动较为剧烈。此外,振幅最大的位置均出现在管柱 $1\sim 3\text{ m}$ 的位置,这一规律与图6中应变时间历程的规律是一致的。

(2) 实验中完井管柱模型的响应频率达到了三阶固有频率,由共振机理可知,在气体气量为 $480\text{ m}^3/\text{d}$ 时,管柱发生共振现象,并以三阶模态振型振动。实验中管柱在水平方向上比垂直方向振动频率与模态一致。

(3) 由于管柱在垂直方向受到重力的影响,使得完井管柱模型在垂直方向的振动小于水平方向的振动幅值,即管柱在水平方向上的振动更加剧烈。

(4) 适当增加扶正器的数量,有利于减少完井管柱的横向振动,进而减少完井管柱与套管之间的碰撞和磨损,增加完井管柱寿命。

参考文献

- [1] 宋鹏,全少凯.高产气井完井管柱横向振动分析[J].石油矿场机械,2013,42(6):19-22. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2013.06.005
SONG Peng, TONG Shaokai. Lateral vibration analysis of completion tubing string in high production gas well[J].

- Oil Field Equipment, 2013, 42(6): 19–22. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2013.06.005
- [2] 刘金川. 深井完井管柱振动特性分析及实验研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015. doi: 10.7666/d.Y2796565
LIU Jinchuan. Analysis of vibration characteristics and experimental research for completion tubing in deep well[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015. doi: 10.7666/d.-Y2796565
- [3] SREEJITH B, JAYARAJ K, GANESAN N, et al. Finite element analysis of fluid-structure interaction in pipeline systems[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 227(3): 313–322. doi: 10.1016/j.nucengdes.2003.-11.005
- [4] 樊洪海, 王宇, 张丽萍, 等. 高压气井完井管柱的流固耦合振动模型及其应用[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 547–550.
FAN Honghai, WANG Yu, ZHANG Liping, et al. A fluid-solid coupled oscillation model for completion string and its application in high pressure gas well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 547–550.
- [5] HOUSNER G W. Bending vibration of pipeline containing flowing fluid[J]. Journal of Applied Mechanics, 1952, 19: 205–208. doi:
- [6] LEE U, PAK C H, HONG S C. The dynamics of a piping system with internal unsteady flow[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 180(2): 297–311. doi: 10.1006/jsvi.-1995.0080
- [7] 练章华, 林铁军, 刘健, 等. 水平井完井管柱力学-数学模型建立[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 61–64. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.07.020
LIAN Zhanghua, LIN Tiejun, LIU Jian, et al. Mechanical mathematic models developed for completion strings of horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 61–64. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.07.020
- [8] 丁建东, 练章华, 丁熠然, 等. 储气库注采管柱振动模拟试验及振动规律分析[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(2): 30–34. doi: 10.19459/j.cnki.61-1500/te.2019.02.007
DING Jiandong, LIAN Zhanghua, DING Yiran, et al. Simulated vibration test and vibration law analysis of injection pipe string in gas storage[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019, 5(2): 30–34. doi: 10.19459/j.-cnki.61-1500/te.2019.02.007
- [9] 高宝奎, 高德利. 深井钻柱的横向振动浅论[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(4): 8–14.
GAO Baokui, GAO Deli. Lateral vibration of drill stem in deep well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(4): 8–14.
- [10] 李子丰, 李邦达. 钻柱内钻井液流动对钻柱横向振动的影 响[J]. 石油机械, 1992, 20(1): 37–41. doi: 10.-16082/j.cnki.issn.1001-4578.1992.01.009
LI Zifeng, LI Bangda. Influence of the drill fluid flow on lateral vibration of drill stem[J]. China Petroleum Machinery, 1992, 20(1): 37–41. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.1992.01.009
- [11] 孟庆华, 刘清友. 气体钻井钻柱气固耦合横向振动的数学建模与求解[J]. 应用力学学报, 2010, 27(4): 830–833.
MENG Qinghua, LIU Qingyou. Mathematical modeling of lateral vibration of the drilling string with gas-solid coupling[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(4): 830–833.
- [12] 祝效华, 曾云义, 陈波, 等. 考虑流固耦合的双弯头压裂管汇的振动特性[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 95–101. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.01.012
ZHU Xiaohua, ZENG Yunyi, CHEN Bo, et al. Vibration characteristics of double-elbow fracturing manifold considering fluid-solid interaction[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 95–101. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.-2018.01.012
- [13] 王宇, 樊洪海, 张丽萍, 等. 高压气井完井管柱系统的轴向流固耦合振动研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 202–207. doi: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.06.041
WANG Yu, FAN Honghai, ZHANG Liping, et al. Analysis of fluid-structure interaction of completion string system in high pressure gas well[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(6): 202–207. doi: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.06.041
- [14] 刘磊. 高产气井完井管柱动力学分析及安全评价与控制技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2011. doi: 10.-7666/d.y1943439
LIU Lei. Dynamics Analysis of completion tubing strings in high production gas wells and technology to control research[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2011. doi: 10.-7666/d.y1943439
- [15] 刘剑辉. 大斜度高产气井完井管柱完整性分析与控制技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2010. doi: 10.-7666/d.y1708960
LIU Jianhui. Integrity analysis of completion tubing strings in high angle and high production gas wells and technology to control research[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2010. doi: 10.7666/d.y1708960
- [16] 于凯强. 高产气井完井管柱流固耦合振动分析及安全性评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
YU Kaiqiang. The analysis fluid-solid coupling vibration and safety evaluate of completion string of high gas well[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.

- [17] 朱林. PE管水平定向钻最大拖拉力的探讨[J]. 煤气与热力, 2018, 38(11): 4-5. doi: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2018.11.015
ZHU Lin. Discussion on the maximum traction force of PE pipe horizontal directional drilling[J]. Gas & Heat, 2018, 38(11): 4-5. doi: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2018.11.015
- [18] 孙中飞, 蔡美婷, 宋晞明, 等. 钢管和聚乙烯管应用于水平定向钻穿越的比较[J]. 煤气与热力, 2012, 32(7): 32-35. doi: 10.3969/j.issn.1000-4416.2012.07.009
SUN Zhongfei, CAI Meiting, SONG Ximing, et al. Comparison between steel pipe and PE pipe for horizontal directional drilling crossing[J]. Gas & Heat, 2012, 32(7): 32-35. doi: 10.3969/j.issn.1000-4416.2012.07.009
- [19] SONG Jining, LU Lin, TENG Bin, et al. Laboratory tests of vortex-induced vibrations of a long flexible riser pipe subjected to uniform flow[J]. Ocean Engineering, 2011(38): 1308-1322. doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.05-020
- [20] MAO Liangjie, LIU Qingyou, ZHOU Shouwei. Experimental study of the vortex-induced vibration of drilling risers under the shear flow with the same shear parameter at the different Reynolds numbers[J]. Plos One, 2014, 9(8): 1-10. doi: 10.1371/journal.pone.0104806
- [21] 付永领, 荆慧强. 弯管转角对液压管道振动特性影响分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13): 165-169. doi: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.13.031
FU Yongling, JING Huiqiang. Elbow angle effect on hydraulic pipeline vibration characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(13): 165-169. doi: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.13.031
- [22] 徐合力, 蒋炎坤. 弯曲输流管道流固耦合流动特性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(2): 343-346. doi: 10.3963/j.issn.2095-3844-2008.02.041
XU Heli, JIANG Yankun. Research on flow characteristics of fluid-solid coupling in bent pipe[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(2): 343-346. doi: 10.3963/j.issn.2095-3844.2008.02.041
- [23] 朱达江, 李玉飞, 卢亚锋, 等. 大产量气井完井管柱振动模拟试验及有限元分析[C]. 武汉: 2015年全国天然气学术年会, 2015.
- [24] 刘秀全, 刘康, 刘红兵, 等. 深水高压气井开关井作业窗口分析[J]. 中国海上油气, 2016, 28(4): 88-93. doi:

10.11935/j.issn.1673-1506.2016.04.014

LIU Xiuquan, LIU Kang, LIU Hongbing, et al. Envelope analysis for starting-up and shutting-in operations of high pressure deep water gas wells[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(4): 88-93. doi: 10.11935/j.issn.1673-1506-2016.04.014

作者简介



黄亮, 1985年生, 男, 汉族, 江西吉安人, 工程师, 硕士, 主要从事油气田完井、测试方面的研究工作。E-mail: huangliang1@cnooc.com.cn



王国荣, 1977年生, 男, 汉族, 湖北仙桃人, 教授, 博士, 主要从事油气装备仿生织构摩擦学与井下工具方面的研究工作。E-mail: swpi2002@163.com



徐靖, 1990年生, 男, 汉族, 广西博白人, 工程师, 主要从事油气田完井、测试方面研究工作。E-mail: xujing11@cnooc.com.cn



魏安超, 1979年生, 男, 汉族, 湖北襄阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气田完井、测试方面的研究工作。E-mail: weianch@cnooc.com.cn



贾杜平, 1994年生, 男, 汉族, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事管柱力学研究。E-mail: 1218133030@qq.com

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>