海底管道振动对砂基淘蚀影响的试验研究*

申仲翰　刘玉标
中国科学院力学研究所，北京，100080

摘　要　针对引发振动的流与置于砂基上的管道淘蚀的相互作用问题，应用小尺度模型进行了试验研究。作为试验模型的管段由弹簧悬挂，管段淹没在水流中，并可在水平和垂直方向自由移动，依此研究管道系统的振动特性与淘蚀发展的关系。结合工程实践中的典型情况，应用相似比理论，建立起可在水槽中进行的试验模型。由这项研究所建立的方法不仅给出了管道下砂基动态淘蚀的机理，而且可为海底管道的概念设计提供参考性依据。

关键词　淘蚀　振动模拟　海底管道　涡脱

在海洋石油输运过程中，由砂基淘蚀引起的管道自由跨扩展带来了一系列实际工程问题，诸如管道的涡致振动导致管道结构疲劳损伤，并危及管道安全，因此，管道下砂基淘蚀发展规律、淘蚀速度和深度的预示，以及自由跨状态下水－结构振动的分析计算，将成为海底管道设计中的关键性技术。基于这一原因，海洋石油工业发达的国家，都投入了较大的力量，致力于这方面的研究工作，其中包括模型试验[1,2]、现场试验[3]以及自由跨振动的分析[4]，以便直接为设计工作提供有效的参数；但上述实验研究耗资巨大，且在砂基淘蚀与管道振动之间互为因果的关系方面至今尚未彻底搞清。本文以小尺度模型为基础，针对海流激励下管道振动与砂基淘蚀的相互作用进行了试验研究，它将为工程设计中所需参数的获得开辟一条简捷有效的途径。

1　相似率的确定

在模型试验中，相似准则的确立非常重要，有关因素包括流体的流动情况、流体的黏性力及重力、惯性力等内容，相应的相似参数如下：

雷诺数　$Re = vD/\nu$

弗劳德数　$Fr = v/\sqrt{gD}$

缩减速度　$v_r = v/f_n D$

KC 数　$KC = \dfrac{u}{Df_w} = \dfrac{uT_w}{D}$

式中：v 为单向流情况下的流体流动速度；u 为波浪所致流动的速度幅值；ν 为水的动黏度；g 为重力加速度；f_n 为管道系统在静水中的固有频率；f_w 为波浪频率；T_w 为波浪周期。

为了保证实验模型能真实地模拟原型管流涡动状态，上述参数在原型与模型 2 种状态下应保持一致性；但由于实际试验条件的限制，这一条件不可能完全满足。在相似的比尺上可作如下分析(在此，以下标 p 或 m 分别表示原型量与模型量)：

(1) 在实际海床上，淘蚀的形成源于绕流所致的紊动起动泥砂，因此在模型试验中必须保证涡道全部成为湍流。这就要求在模型试验中水流的雷诺数 $Re_m \geqslant$ 临界雷诺数 Re_{cr}，即 $Re_m \geqslant 4\,000$。这里 4 000 即为保证涡道为湍流的最小雷诺数值。

* 中国科学院“九五”重大项目 KZ 951—A 1—405 资助项目

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2) 在实际的管－流系统发生涡致振动的条件下，为模拟实际系统而进行的模型试验，同样要保证产生涡致振动。一般说，产生涡致振动的条件为 $v_r=4\sim7$，以 5 为最佳，这就要求 $v_{rp}=v_{rm}$，使模型试验的 v_{rm}与实际管流系统的 v_{rp}大致相等，而落在 4～7 的范围内，这样的试验才有价值。

(3) 在重力对流动的影响中可尽量保证弗劳德数相等，即 $Fr_p=Fr_m$，于是可导出速度比尺为

$$\lambda_v=\frac{v_p}{v_m}=\left(\frac{D_p}{D_m}\right)^{1/2}=(\lambda_\ell)^{1/2}$$

式中 λ_v 和λ_ℓ 分别表示流体速度比尺和模型长度比尺。

(4) 在波浪流条件下的管—流涡动应考虑 KC 数相等，即 $u_pT_{wp}/D_p=u_mT_{wm}/D_m$，由此可导出时间比尺为 $\lambda_t=(\lambda_\ell)^{1/2}$。

2　试验模型的建立

为了模拟实际管道的运动，可首先对发生淘蚀后的海底管道的状态作图 1 所示的描述，即管道下的砂土被海流冲走而淘空，并随着淘蚀的发展，自由跨逐渐加大，最后管道支撑在由砂基构成的跨肩上(span shoulder)，图 1 中 e 表示淘蚀坑深度。对于淘蚀，我们最关心的是跨之中间管段的振动，因此可从抓关键问题入手，把上述管道的振动系统简化为由水平弹簧 K_x (在线振动方向)和垂直弹簧 K_y (横流振动方向)悬挂的刚性管件所组成的试验模型。其中，K_x 和 K_y 取自弹性管跨及跨肩的弹性支撑，支撑点在刚性管件的 2 端，管段直径为 D。于是，利用这一原理即可设计自由跨状态下管道振动的试验模拟系统。模型的各项参数将由相似准则确定，试验设备的主要数据如下：

实验水槽宽 0.5 m，长 17 m；试验管段放在水槽的中间位置；槽底铺砂作为砂床，砂的平均粒径为 0.4 mm，砂基厚度为 16 cm，水槽设计最大流量为 32 000 $cm^3\cdot s^{-1}$，有关参数的具体调配可根据试验要求而核定。

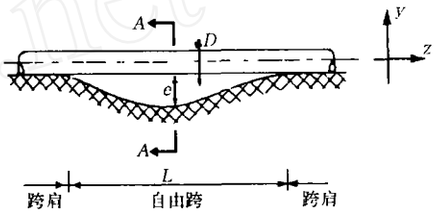

图 1　管道淘蚀状态示意图

2.1　试验系统具体尺寸的设定

目前我国海底管道的设定情况为：(1)工程中所用海底管道的实际管径有 152.4 mm、203.2 mm、304.8 mm 等，以较粗者为例，并考虑覆盖层厚度，可取外径为 36 cm 的管件作为实际管道的代表。(2)底部海流速度为 1～3 $m\cdot s^{-1}$。

2.2　试验模型参数确定

首先根据试验中雷诺数 $Re\geqslant4\,000$ 的条件保证槽中水的流动为湍流状态，这样需使原型对模型的几何比尺至少满足 $\lambda_\ell\leqslant40\ (v_pD_p)^{2/3}$的条件。以 $v_p=1\ m\cdot s^{-1}$、$D_p=0.36$ m 原型参数为基础，则有 $\lambda_\ell\leqslant20$，取 $\lambda_\ell=9$，于是由 D_p 可定出模型管外径 $D_m=4$ cm，又按照长径比≥10 的原则，取模型管长 $\ell=42$ cm。

鉴于在较深的海底，波浪对海水流动的影响较小，因此主要以研究单向稳态流下的管流涡动为主。从原型与模型相似的角度分析，需考虑的重要参数有：(1)模型的雷诺数 $Re_m\geqslant4\,000$，这已获得满足；(2)原型与模型的缩减速度值相似，即 $v_{rm}=v_{rp}$，它应使系统处于涡致振动状态。将研究范围适当扩展，取 $v_{rm}=3\sim8$，并相应确定如下试验参数：

水流速度　　$v=12\sim32\ cm\cdot s^{-1}$　　水深　　$h=16$ cm

试验模型的雷诺数　　$Re_m=(0.48\sim1.2)\times10^4>4\,000$

静水中模型在垂直方向的固有频率　　$f_{nv}=1$ Hz

静水中模型在水平方向的固有频率　　$f_{nh}=2$ Hz

取试验模型系统的水平方向结构质量为 1 kg，垂直方向结构质量为 3.4 kg。管段的附连水质量可按如下公式计算：

$$m_{ad}=\frac{\pi}{4}\rho C_mD^2\ell\ \sin(i,\ell)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：ℓ 为管件长度；ρ 为水密度；i 表示振动方向；符号(i,ℓ)表示管件 ℓ 与方向 i 之间的夹角；C_m 为附加质量系数，取 $C_m=1$。于是可算出管件附加质量为 0.53 kg。

依据前面所确定的试验系统的固有频率，可通过有关公式近似得出 $k_h=1.536\ \mathrm{N\cdot mm^{-1}}$，垂直方向刚度为 $k_v=0.155\ \mathrm{N\cdot mm^{-1}}$，并利用上述参数值进行弹簧的设计。

3 试验系统研制

管道下砂基动力淘蚀试验设备由 2 个部分组成，即运动激励部分和测量显示部分。

3.1 运动激励设备的设计

运动激励设备这部分主要包括水槽、砂床及管道振动系统，有关振动系统的工作原理表示在图 2 中。

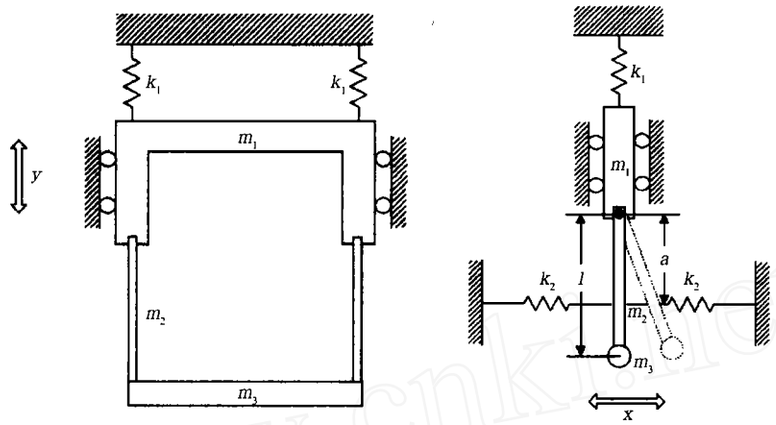

图 2 管件振动系统示意图

由图 2 可见，反应垂直方向运动的自由度为 y，反应水平方向摆动的自由度为 x，相应于 2 个自由度的自振频率可按下式计算：

$$\omega_1^2=\frac{k_v}{m_1+m_2+m_3+m_{ad}} \tag{1}$$

$$\omega_2^2=\frac{(a^2/\ell^2)k_h+\frac{1}{2}m_2g/\ell+m_3g/\ell}{\frac{1}{3}m_2+m_3} \tag{2}$$

式中：$k_v=2k_1$；$k_h=2k_2$；ω_1 为系统在垂直方向的振动频率；ω_2 为系统在水平摆动方向的振动频率，在本试验模型中取 $\omega_2\approx2\omega_1$，这是为了模拟实际管道在涡流激励下最大可能的振动情况。主要原理可作下述解释：由于在实际管道的运行中，淘蚀引起的空跨间交替的旋涡脱落产生 2 种形式的激励，其中在线振动与流的方向平行，它主要由与管道的单个涡脱同步的压力波动所形成，其振动激励频率为 2 倍涡脱频率$(2f_s)$；横向振动主要由与管道的交替涡脱对子同步的波动升力所造成，其激发频率为 f_s；于是当管—流系统在线振动(水平方向)的自振频率为其横向自振频率的 2 倍时，一旦激励与响应耦合，则水平和竖直方向可同时共振而引起管道最激烈的振动。

根据上述原理，以频率计算公式(1)和(2)为基础，可给出试验系统的各项基本参数，并进行具体设计。

3.2 测量显示设备

试验的测试对象是管件沿垂直和水平方向的合成运动。由于振动频率为 1～2 Hz 的低频，一般的动态位移传感器难当此任；为此，试验中采用了光测法，即用 501 型光－电双轴跟踪器监测管件端部的运动轨迹，将所得信号以示波器显示，并通过采集器输入到计算机进行数据处理。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 试验结果分析

将试验所得的主要数据进行整理后列于表 1。分析表 1 中数据可知，随着槽内水流速度从 14.9 cm·s^{-1}增至 27.1 cm·s^{-1}，管件的振动逐渐加大，动力淘蚀坑的深度也随之增加。变化中，21.5 cm·s^{-1}的流速是构成锁住状态的临界速度；23.5 cm·s^{-1}和 27.1 cm·s^{-1}的流速，是在锁住振动的速度范围之中；而 35.7 cm·s^{-1}的流速已处于“锁住”振动范围之外，在此流速下，不能激起管件的大幅振动。在“锁住”振动状态下，管件振幅加大，可达 50～60 mm，最大淘蚀深度可达 40 mm。又从静力淘蚀(管件固定)与动力淘蚀(管件以弹簧悬挂)的不同情况相比，在相同流速及锁住状态下，动力淘蚀深度大于静力淘蚀深度，前者约为后者的 1.5 倍；但在 35.7 cm·s^{-1}的流速下，静力淘蚀与动力淘蚀下的坑深基本相等，这是由于管件振动很小，不足以产生显著影响。图 3 为管件振动的频谱图及振形图。

表 1　管道系统砂基淘蚀试验

水流速度/(cm·s^{-1})	管道振动情况			砂基淘蚀深度/mm	
	振幅/mm		现象说明	静力淘蚀	动力淘蚀
	垂直	水平			
14.9			无明显振动	8	10
19.0			微小振动	9	12
21.5	5	2	临界振动状态	18	26
23.5	50	19	振动处于“锁住”状态，管端振动轨迹呈明显的“8”字形	21	31
27.1	56	30	管端振动轨迹呈“8”字形	26	40
35.7	2	1	处于微振状态	32	33

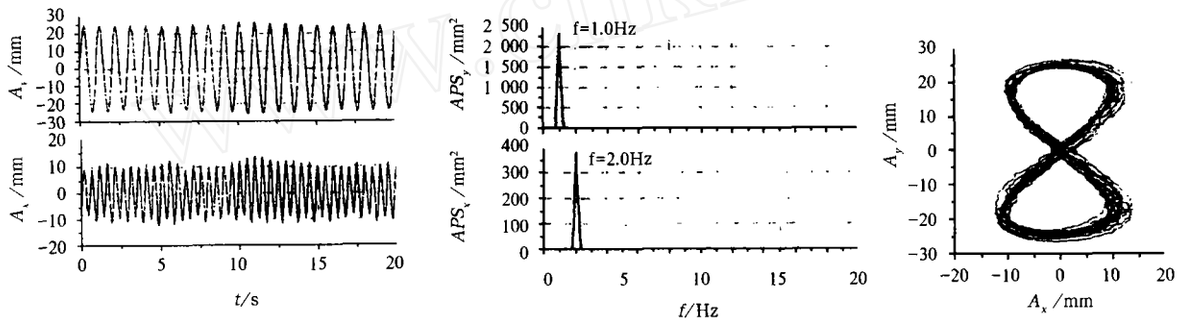

图 3　管件振动的时程曲线、自功率谱及 $x-y$ 振形图

5 结　论

(1) 在“锁住”状态下，管件振动幅值随流速的增加而增大，淘蚀深度也同步增加。

(2) 试验结果表明，与“锁住”状态相应的缩减速度在 5～8 的范围内，又由相似率可知，与“锁住”状态相应的管道原件的缩减速度 v_r，也应在 5～8 的范围内，这将给实际管道的设计提供重要的参考依据。

(3) 振动对淘蚀有明显影响，振动状态下的淘蚀坑深度约为静力淘蚀深度的 1.5 倍。

6 参考文献

1 Bryndum M B, Bonde C . Long Free Spans Exposed to Current and Waves: Model Tests .OTC 6153,1989:317～336

2 Kenjiron Hayashi, Chaplin J R. Vortex－Excited Vibration of a Vertical Circulay Cylinder in Waves. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 1988,8(1):66～73

3 Bruschi R, Montes M. Field Test With Pipeline Free Spans Exposed to Wave Flow and Steady Current. OTC 6152, 1989: 301～315

4 Lammert W F, Hale J R. Dynamic Response of Submarine Pipelines Exposed to Combined Wave and Current Action. OTC 6058, 1989:159～170

(收稿日期：1999－10－22；编辑：郭　骊)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

CHINA OFFSHORE OIL & GAS ENGINEERING (Bimonthly)

Apr., 2000
Vol.12 No.2

Sponsor China Offshore Oil Production Research Centre, CNOOC
Publisher CHINA OFFSHORE OIL & GAS (Engineering) Editorial Department
Address P O Box 9607, Haidian, Beijing, China
Post Code 100086 ISSN 1001-7682, CODEN ZHYGEQ

CONTENTS

·SUMMARY·

Application Study of Multi-Phase Vertical Flow in Oil Wells ····· *Jiang Shiquan, Qiu Dahong, Zhang Zhenguo, Zheng Jun* (1)

Abstract: This paper overviews the application development of prediction method for pressure drops in multi-phase vertical flow.

Key Words: vertical pipe, multi-phase flow, pressure drop, correspondence equation

Optimization of the Overall Development Plan of QK 17-2 Oilfield ····· *Yu Junxiong, Ding Jiuliang* (8)

Abstract: QK 17-2 oilfield is a marginal oilfield, and it would not be cost effective to be developed with any existing way of development, which are being used in Bohai area. With the developmat plans optimized, the overall development plan is finalized with rate of return impraved to a level above the required target, on a technical reasible, safe and leliable basis. Thus, a solid foundation is laid down for the development of the oilfield.

Ke Words: marginal oilfield, rate of return, overall development plan

·DESIGN AND CONSTRUCTION·

The Design of Follow up Power Cable Frame on Offshore Drilling Equipment ····· *Liu Mingqing* (10)

Abstract: When drilling cluster wells on offshore drilling platform, the following up problem of all kinds of cables and BOP controlling cables must be solved. The paper introduces the successful paradigm of solving the following up problem on homemade"BOHAI 5"and"BOHAI 7"drilling platforms.

Key Words: follow up power cable frame, active arm, random arm, connection rod, slide type, curtain type, cable bundle

Drilling Template and Secondary Structure for Tied-Back ····· *Hou Jinlin* (15)

Abstract: In order to reduce platform fabrication period and achieve early start-up, both pre-drilling and platform drilling methods are adopted in developing Pinghu oil & gas field. However, it is well known that the tie-back of pre-drilled wells, especially for gas wells are difficult and risky. Therefore, it is necessary to carryout careful feasibility study for the drilling template and tie-back operation. The smooth tie-back of pre-drilled wells proves that Pinghu drilling template and all secondary structures for the tie-back are very successful.

Key Words: drilling template, docking pile, well area, tie-back

·RESEARCH·

Calculation of Jack-Up Drilling Platform Leg Penetration and Some Discussions ····· *Zheng Xiyao* (18)

Abstract: The development of offshore oil industry has been over 20 years. Jack-up platforms have played an important role in the offshore oil and gas exploration and development activities. Jack-up drilling platforms can be divided into two broad categories according to their foundation type: (1) individual footings or (2) mat-supported. With the purpose of inviting good suggestions from experts, and thus enabling the leg penetration calculating methods of the rigs to be more standardized, this paper presents the leg penetration calculating methods for jack-up platforms with individual footings on uniform cohesive soils, sands, and silts, and discusses some questions in interpreting soil strength.

Key Words: jack-up platform, footing, undrained shear strength, effective angle of internal friction, ultimate bearing capacity of soil

Experiment on Scour Effects to a Sandy Bottom by Sub-Sea Pipeline Vibration ····· *Shen Zhonghan, Liu Yubiao* (22)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Abstract: The interaction between current induced vibration and scour of pipeline placed on a sandy bottom was investigated experimentally in a small scale model. The vibration behaviour of pipeline system modelled as a spring suspended rigid pipe, free to move in both the horizontal and the vertical directions, and exposed to a current, has been studied in relation to the scour development. This paper considers typical case in the engineering and applies analogous theory to set up testing model performed in a flume. The method established by the experiments not only gives mechanism of dymamics scour of pipelines on the sandy bottom but also provides reference basis for concept phase design of sub-sea pipelines.

Key Words: scour, vibraion simulation, sub-sea pipelines, shedding of vortex

Numerical Value Simulation of Three Dimension Ocean Wave
..... *Bai Lianping, Chen Xiuzhen, Xu Xingping, Su yanmin* (26)

Abstract: This paper firstly analyzes directional spectrum and mathematical description of three random ocean waves. Then it gives the design of numerical value simulation program under the environment of MATLAB. Lastly, it presents the directional spectrum and the three dimension space model of the three random ocean wave.

Key Words: random ocean wave, directional spectrum, directional function, numerical value simulation

Discussion of Measuring Technique for a Drilling Platform
..... *Yang Gang, Lin Weixue, Liu Shuxian, Li Jisheng* (29)

Abstract: This paper discusses how to ensure transducers working properly and how to ensure measured data accurate and reliable in the environment of high humidity, high salt-fog, large temperature variation and interference of drilling rigs, and proposes corresponding techniques. The method proposed in this paper has been used in the measurement of "Gang Hai 1" platform successfully.

Key Words: drilling platform, measuring technique

·DRILLING AND PRODUCTION·

Forecasting Drag and Torque of String During Drilling of a Horizontal Well in Southchina Sea
..... *Guo Yongfeng, Jin XiaoJian, Tan Shuren* (31)

Abstract: The paper discusseds the question of forecasting the drag and torque of string in drilling of horizontal wells by a method of nonlinear finite element. A set of saftware is developed according to such method. At the end of 1997, 4 wells of NHWC were forecasted for drag and torque of drilling strings. This paper gives the forecasted data and measured data of well W 12-1-SPI 2 and some discussions.

Key Words: drilling, horizontal well, offshore platform, mechanics of string, drag and torque of drilling string, computer, simulation, forecast, limit element, nonlinear, iterate, matrix, vector, weight of hang, torque

Design of Lateral Parabola Extended-Reach Well Trajectory ..... *Zhang Jianguo, Cui Hongying* (35)

Abstract: To optimize trajectory is one of the key problems of the Extended-Reach Well(ERW). A new curve called lateral parabola is put forward. In the meantime, the design method of lateral parabola trajectory is provided. The relative calculation shows that the new trajectory has smallest torque & drag and shortest well length among the four trajectories. Both design equations and case history are also presented in this paper.

Key Words: Extended-Reach Well, well path design, torque & drag

Large Diameter Casing Technique Applied in Liaohe Shallow Sea Oil Fied
..... *Sun Zhongwei, Feng Jiuhong, Chen Dechun, Wang Ping* (39)

Abstract: Large-diameter casing cementing is a special operation in offshore drilling. Liaohe offshore oilfield has summed up experiences obtained from this cementing operation and developed the large-diameter self-filling floating shoe, resulting in simplified procedures, high efficiency and cost saving.

Key Words: cement, job, drilling, riser, offshore oilfield, technology

Testing Technique for Multiple Intervals With One Run-In-Hole ..... *Zhao Huiqing* (42)

Abstract: Using combined test string composed of inflatable test tools and the spiral pump, once the test string is run in hole, multiple intervals can be tested, thus to achieve geological objectives with least engineering hours.

Key Words: once "run in hole", inflatable pump, spiral pump, group of testing fermation, back pressure

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

14 Gregory G A, Fogarasi M, Aziz K. Analysis of Vertical Two Phase Folw Calculations: Crude Oil - Gas Flow in Well Tuding. J Cdn. Pet Tech, 1980.(1~3):86~92

15 Yao S C, Sylvester N D. A Mechanistic Model for Two - Phase Annular - Mist - Flow in Vertical Pipes. AIchE J, 1987,33(6):1008~1024

16 Ozon P M, Ferschneider G, Chwetzoff A. A New Multiphase Flow Model Predicts and Temperature Profiles in Wells. Paper 16535 Presented at the 1987 SPE Offshore Europe Conference, Aberdeen, 1987.9.8

17 Kabir C S, Hasan A R. A Study of Multiphase Flow Behavior in Vertical Oil Wells: Part Ⅱ - Field Application. Paper SPE 15139 Presented at the 1986 California Regional Meeting, Oakland, CA, 1986.4.2

18 Rai R, Singh I, Srini - vasan S. Comparison of Multiphase Flow Correlations With Measured Field Data of Vertical and Deviated Oil Wells in India, Paper 16880 Presented at the 62nd Annual Technical Conference, Dalas, TX, 1987.9.27

19 Ansari A M, Sylvester N D, et al. Supplement to Paper SPE 20630, A Comprehensive Mechanistic Model for Upward Two - Phase Flow in Wellbores. Paper SPE 28671 Available at SPE Headquarters, Richardson, TX, 1994

（收稿日期：1998 - 07 - 22；编辑：张金棣）

作者简介

蒋世全　高级工程师，副研究员，1958 年出生，1994 年获西南石油学院博士学位，1996 年在大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室博士后出站，现在中海石油研究中心工作

余俊雄　高级工程师，1964 年出生，1987 年毕业于华东石油学院储运专业，现在中海石油（中国）有限公司天津分公司对外合作处工作

柳明庆　高级工程师，1939 年出生，1964 年毕业于四川石油学院机械系，现在中海石油工程公司工作

侯金林　高级工程师，1957 年出生，1982 年毕业于大连工学院海工专业，现在中海石油研究中心工作

郑喜耀　高级工程师，1964 年出生，1987 年毕业于山东海洋学院海洋地质专业，现在中国海洋石油南海西部勘察设计公司工作

申仲翰　研究员，1939 年出生，1963 年毕业于中国科技大学力学系固体力学专业，现在中国科学院力学研究所工作

杨　钢　工程师，1957 年出生，1983 年毕业于中央广播电视大学自动化仪表专业，现在天津大学建筑工程系船模实验室工作

白连平　副教授，博士研究生，现在西安交通大学工作，主要研究方向为电气传动系统的智能控制

郭永峰　讲师，1955 年出生，1994 年获石油大学（北京）硕士学位，现在中海石油技术服务公司从事钻井计算机软件的开发工作

张建国　1969 年出生，1992 年毕业于石油大学（华东）钻井专业，1998 年获硕士学位，现在石油大学（华东）从事定向井和岩石力学的研究工作

孙仲伟　1972 年出生，1994 年毕业于西南石油学院海工系，现在辽河油田钻采工艺研究院海工所工作

赵会卿　工程师，1965 年出生，1988 年毕业于石油大学石油地质专业，现在中国海洋石油渤海公司勘探部工作

王世华　高级工程师，1964 年出生，1987 年毕业于中国地质大学石油系，现在中国海洋石油渤海公司勘探部任测试监督

李清平　1969 年出生，1991 年毕业于西安交通大学动力系制冷与低温专业，1994 年获西安交通大学动力机械及其测试技术硕士学位，1998 年获石油大学（北京）石油机械专业博士学位，现在中海石油研究中心技术研究部工作

陈　海　助理工程师，1973 年出生，1994 年毕业于江汉石油学院机械系，1997 年在石油大学（北京）机电系获工学硕士学位，现在中海石油研究中心技术研究部工作

钟国忠　助理工程师，1971 年出生，1996 年毕业于中国地质大学（武汉）工程学院安全工程专业，现在中国海洋石油南海东部公司安全环保部工作

张朝辉　高级工程师，1978 年毕业于上海交通大学电机系船舶电气/自动化专业，现在中海石油研究中心机电部工作

刘倩丽　工程师，1963 年出生，1985 年毕业于天津大学海工专业，现在中海石油工程公司工作

——本　刊

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net