

# 海底管道油气混输关键装备的实验研究\*

郑之初 吴应湘 李东晖

中国科学院力学研究所, 北京, 100080

**摘要** 多相增压泵、混相计量仪和油气水分离器是实施海底管道长线混输中的关键设备。中国科学院力学研究所用于研究这些关键设备的模拟实验装置, 包括了集重力、膨胀和离心原理于一体的高效油气分离器和引射增压泵、叶轮增压泵等设备。首先采用控制气液两相压比和流量比的方法实现了水平、垂直管内各种流态的仿真模拟, 并用狭缝光和快速摄影技术得到了清晰的流态照片, 用硅阻差压式压力传感器测量了一定距离内管流压降和同一截面不同位置的压差分布; 然后介绍对上述设备进行各种流态下分离器的分离效果以及引射增压、叶轮增压泵的性能、效率试验的方法和初步结果。

**关键词** 多相流实验 管流流态 压降 增压泵 油气分离

70 年代国际上为开发边际油田和深水油田, 开始构思水下生产系统, 该系统具有如下优点: (1) 无需建造固定式或永久浮式平台, 可节省工程投资; (2) 避免恶劣海洋气候影响; (3) 系统无现场操作人员, 能节省安全、消防、救生、生活设施和人工费用; (4) 灵活的开采方式和高采收率低采油成本等。从 80 年代末到 90 年代中期世界上不少海洋石油公司都在实施耗资巨大的水下生产系统输送关键设备的技术研究计划(如在英国的北海油田、墨西哥湾、巴西的深海)。其中有水下混输不分离的, 也有分相输送的, 所以海底多相泵、海底分离装置以及多相计量技术分别成为研究的主要目标。

我国自 1992 年起开始对海洋石油水下生产系统进行可行性研究。“九五”期间海底管道混输中的关键装备, 如多相增压泵、混相计量仪和油气水分离装置等已成为我国“863”海洋高技术研究中关注的研究课题。与单相流动不同, 油气两相或油气水三相同时在一条管道内流动, 由于流动参数及组分的不同可以共存不同的流态, 因此本文介绍的多相管流流态模拟实验装置和实验方法, 对判别或研制出适用于各种管流流态下的混输泵、流量计和分离装置有着极其重要的作用。

## 1 管流流态

通常水平管气液两相管流可以出现以下几种流态: (1) 气泡流; (2) 气柱流; (3) 分层流; (4) 波状流; (5) 团状流; (6) 环雾流; (7) 雾状流。垂直管可出现: (1) 气泡流; (2) 液节流; (3) 搅拌流; (4) 环雾流; (5) 分束环雾流。图 1 给出了各种流态的示意图。

不同的流态有不同的管道压降, 只有选用适合管内流态的计算方法, 才能使计算压降符合实际情况, 在管道油气混输中才能正确判定增压站的有无和确切数目, 所以判断流态和得到不同流态下的管道压降是油气输送管道设计的基础。

“八五”期间, 中国科学院力学研究所在总结 60 年代以来国内外有关方面研究工作的基础上, 建设了用于管道油气混输多相管流研究的专用模拟实验设备<sup>[1]</sup>。图 2 分别给出了设备的示意图和建成后设备的照片。

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 59476041)

中国科学院“九五”重大项目资助课题

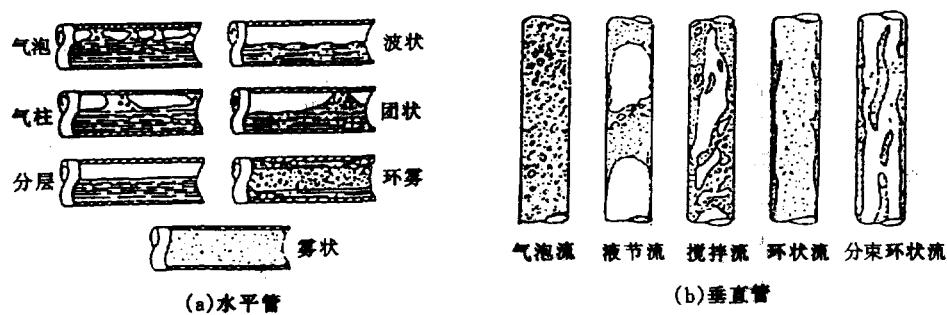


图 1 各种流态的示意图

设备由全透明有机玻璃制成,有效管长约 40 m,管子内径 50 mm。在全水流情况下最大流速可达  $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相应的  $Re$  约等于  $6 \times 10^4$ ;在全气流情况下气速可达  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,相应的  $Re$  约等于  $1.7 \times 10^4$ ;在气水两相并存的情况下,短时间内气流速度可达  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,相应的  $Re$  约等于  $1.7 \times 10^5$ ,可以进行 4 种状态下的管流实验:(1)层流与层流;(2)湍流与层流;(3)层流与湍流;(4)湍流与湍流。

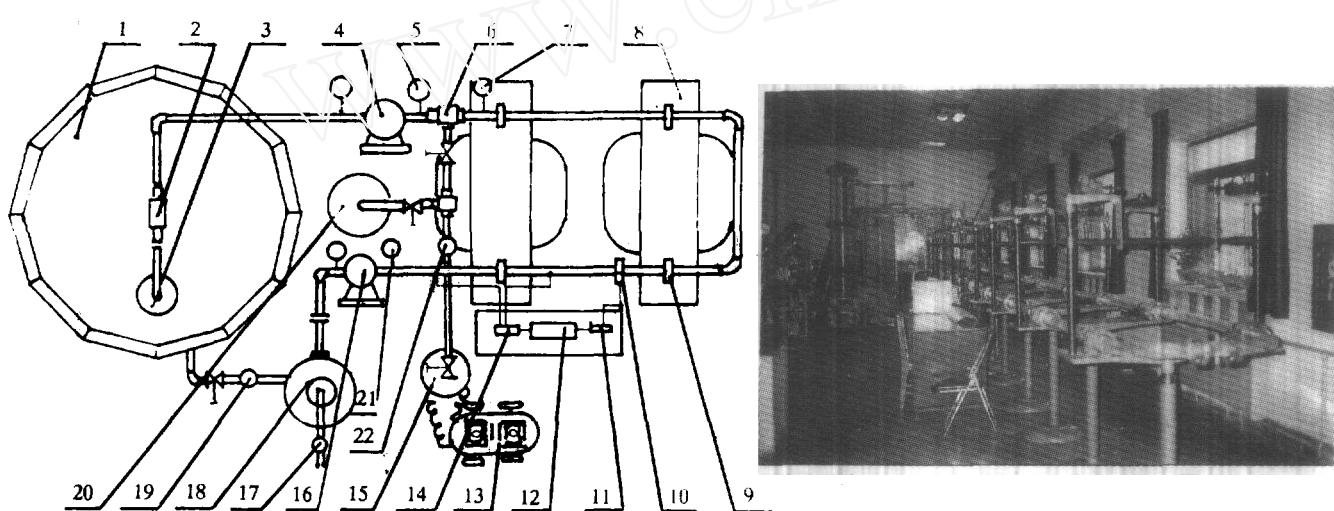


图 2 (a) 模拟实验设备示意图

图 2 (b) 建成后的模拟实验装置照片

1. 循环水池 2. 射流泵 (I) 3. 潜水泵 4. 增压泵 5. 压力计 6. 射流泵 (II) 7. 压力计 8. 支架 9. 固定环 10. 界面测量仪 11. 信号处理器 12. 图像显示器 13. 压气机 14. 压差测量仪 15. 储气室 16. 增压泵 17. 气体流量计 18. 油气水分离器 19. 液体流量计 20. 储油罐 21. 压力计 22. 气体流量计

80 年代末笔者在研究水下气水两相射流流态时发现:各种流态的成因主要依赖于气液两相的流量比和流动参数(如压力)的配比,因此采用自行设计的两相引射器(LJ型射流泵),利用不同压比和流量比下的气水或水气引射原理,分别实现了水平和垂直管内各种管流的流态<sup>[2]</sup>。在长期的国内外流态实验中也曾成功地实现了各种管内流态。对圆形截面管道,由于光反射的原因,很难得到清晰的流态照片。本文在全暗的实验环境中,使用一定宽度的狭缝聚光,用  $1/500\sim1/2000 \text{ s}$  曝光时间的快速摄影方法减弱了光反射,避免了气泡和气团快速移动形成的界面模糊,从而得到了各种流态的清晰照片。图 3 是水平、垂直、弯曲管道中的一些典型流态的照片。进一步的流态研究指出,即使在同一种流态下由于含气量的微小变化,流动图像也有差异,而流态的转换正是含气量以及气相和液相迁移速度逐步量变积累到一定程度才达到质变的过程。

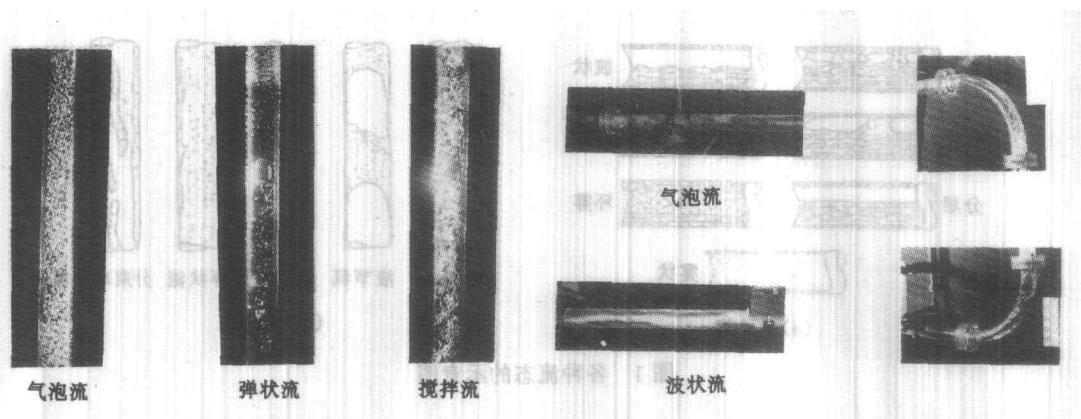


图3 一些典型流态的照片

## 2 管流压降实验

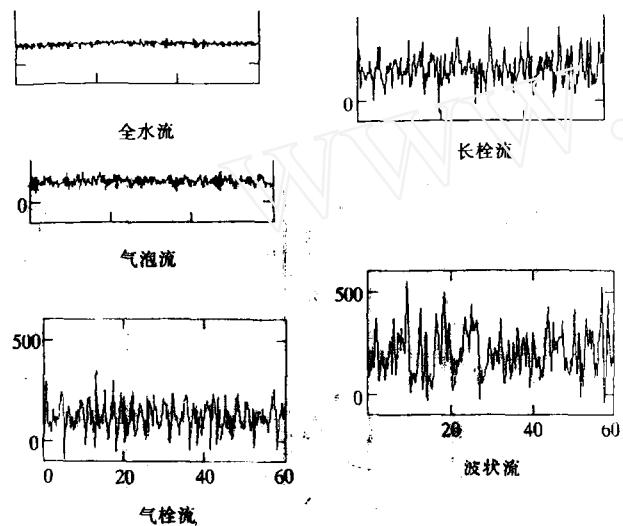


图4 一些典型流态下的压差—时间曲线

## 3 气液分离器

水下采油系统目前在国际上有单相和多相输送2种方式，在系统复杂性、可靠性、遥控等方面它们各自具有优越性，最终的取舍取决于2种方式中关键装置的研究进展。单相输送的关键在于结构简单、高效、快速的水下油气分离器，它是把天然气从原油中分离出来的装置，按分离原理可分为重力式、膨胀式、旋流式等几种。目前较常用的是重力式，其优点是结构简单，缺点是分离时间长，对局部过载（流量偏大）比较敏感。中科院力学所研制的油气分离装置试图用于陆上或海底的油气输送，结构上采用重力、膨胀与离心3种形式的结合（见图5），同时在油气入口处设置了双管预分器，以解决长线输送时由气相与液相迁移速度差别引起的气、液流量不稳定的难题。在分离器中上段采用静态导流片以保证气液介质进入分离器后充分起旋以达到利用离心

与实验室里有限管长的管子压降相比管内压力值是个小量，为避免测量二截面压力值用2个大量相减求取管子压降的方法带来较大的误差。本文在模拟装置上用24 EI型硅阻式压差传感器实现了不同对应位置的压降测量。应当指出，在同一截面的不同位置，如管子的顶、底及两侧，由于浮力造成不同气液界面的作用，其压差时间曲线也有差异。图4给出了一些典型流态下同一截面上不同位置的压差时间曲线。由图可见，不同流态下，压降幅值和频率以及平均压降有较大差异。如果流态判别不当，在长线输送中压降值可造成很大的差异，这一现象在国际上已引起广泛的关注，不少学者试图从压力曲线的时域、频域的变化来实施流态判别的新方法研究。

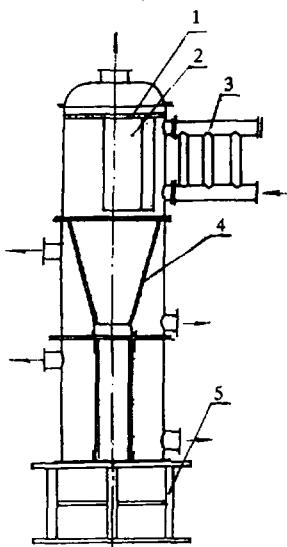


图5 气液分离装置示意图

1. 孔板 2. 导流板 3. 预分器 4. 锥管 5. 支架

力使气液分离的目的, 顶端上的带孔板对排出气体中的细微液沫起阻滞作用。具有带孔锥管的中段除用于气液分离外, 对油气水三相流动还能起到油水的预分作用, 中段以下都有内外两层, 外层为重力分离容器以达到油水充分分离的效果。

根据上述原理设计制造的气液分离装置已安装在多相管流模拟实验设备末端, 并进行了各种流态下的分离效果实验。实验证明, 气液快速分离器的效果良好。在分离器的气体和液体出口处设置了气体和液体流量计量装置, 通过与进口处气体和液体流量比较可以检验分离器的分离效率。

#### 4 混相增压泵实验

海底油气混输的关键在于使用适用于海底环境的具有泵和压缩机 2 种性能的多相泵, 以及满足各种条件下的混相流量计。80 年代国外开始了大型多相泵的研究, 而且泵的形式多样, 如螺杆泵、反转轴泵、活塞泵、隔膜泵、离心泵、射流泵等<sup>[3]</sup>。从有无驱动件来分, 泵可分成有驱动件和无驱动件 2 种, 本文各选 1 种, 如选离心泵和射流泵作为研究对象, 图 2 (a) 中给出了试验原理示意图。射流泵的增压原理是: 液体与气体经射流泵双曲流道混合腔均匀混合达到增压目的, 通过调节液体与气体流量和压力以达到不同的出口压力。一般说来, 随着引射气体压力的提高, 出口压力可提高 2~3 倍。所以射流泵的增压是不高的, 而且对于无相变的气体来说, 还会造成混合后流态的变化。对于有相变的气体(如蒸汽), 在增压之后由于汽化潜热的释放会使油温提高, 粘性降低, 可以获得增压和减阻双重效果, 如在输送管线中采用多个引射泵增压, 加上无运转部件、密封、材料寿命等问题容易解决, 这些优点使它仍不失为可用的增压手段之一。如果通过第 1 级油气混合后再进入射流泵在本文实验装置上还可进行油气水三相引射增压试验。

由图 2 可见离心泵的增压试验方案, 气液两相经射流泵混合后, 通过调节气体的流量和压比可以得到各种气液两相的管流流态然后进入离心泵, 在泵的进出口计量它们的压力。为简单起见, 我们选择了普通水泵作为研究对象, 主要考查含气率的变化对增压效果的影响(含气率在 0~100% 条件下变化), 我们发现一般的水泵在混入大量气体的情况下增压效果将大大下降, 它可为全水条件的 1/2 以下, 所以在油气混输初期我国曾用水泵代替多相泵, 在含气率较高时其效率是很低的。如果把离心泵设置于气液分离装置之前(见图 2), 我们可以进行油气水三相条件下的增压效果试验。

#### 5 结束语

本文介绍的多相管流模拟试验装置, 已成为研究管流流态的仿真规律和压降规律, 以及海底管道长距离混输系统中的多相增压泵、混相流量计和油气分离器等关键设施性能的重要实验设备。

#### 6 参考文献

- 1 郑之初, 雷晓晓, 李东晖. 海底管线中多相流动的实验研究. 第七届全国海洋工程学术会议论文集. 1994. 10, 西安, 164~170
- 2 郑之初, 李坤, 等. 水下气水两相射流流态的实验研究. 力学与实践, 1992 (3): 15~17
- 3 王勇. 国外多相泵和多相流混输技术综述. 油气田地面工程, 1996, 15 (1)

(收稿日期: 1998-06-12; 编辑: 付昱华)

The AC Uninterrupted Power Supply (UPS) is a kind of emergency power, but it is different from emergency diesel generator and DC batteries. The UPS equipment for the platforms of CNOOC is specially designed and not standard UPS equipment. The dual standard UPS parallel operation system is recommended as a new type.

Key Words: AC Uninterrupted Power Supply (UPS), power supply, stability, cost, dual standard UPS parallel operation system

## •RESEARCH•

Problems in Ice Force Calculation for Fixed Structure in Bohai Gulf ..... *Li Yushan* (21)

Ice is one of the major actions for fixed structure designs in Bohai. This paper introduces the problems in ice force calculation in several respects on vertical and inclined structures, local ice pressure and dynamic ice force etc..

Key words: vertical structure, inclined structure, ice force

Experimental Study on Key Equipment for Subsea Oil – Gas Mixed Transportation System

..... *Zheng Zhichu , Wu Yingxiang , Li Donghui* (24)

This paper describes a multiphase flow test – loop which is set up in the Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences and used to study the performance of the key equipment in sub – sea oil – gas mixed transportation system, such as multiphase pumps, multiphase meters and oil – gas – water separators. A high efficiency oil – gas – water separator designed on gravitational, expansive and centrifugal separation principles, a jet pump and a vane pump are equipped in the test – loop. By regulating the pressure ratio and flow rate of each phase with a jet pump, various flow patterns in horizontal and vertical pipes are created and flow pattern pictures are taken clearly by using narrow light source and fast photography technique. The pressure drop of a two – phase flow is measured under various flow patterns by applying silicon – resistance – difference – pressure type pressure transducers and signal processing circuits designed by ourselves. The measurement results of difference pressure at the inlet and outlet of two kinds of typical booster pumps: centrifugal pump and jet pump under different flow patterns by using strain – diaphragm – pressure – transducers are also presented in this paper. The separating efficiency of the separator is also tested and good results are given.

Key Words: multiphase flow experiment, pipe flow pattern, pressure drop, booster pump, oil – gas separation

Development of High Efficient New Sacrificial Anode for Sea Water and Saline at Different Temperatures

..... *Zhu Chengde , Li Yi* (28)

Submarine pipelines for high temperature crude oil and seawater hot exchange equipment are often seriously corrupted by warm sea water and warm saline mud. Therefore, these installations must be protected by sacrificial anodes. At present, the available anodes at home and abroad are restricted for their application in aforementioned environment because of inherent defects and lower current efficiency. Thus, alloy materials of sacrificial anodes are researched with orthogonal tests. The alloy prescriptions for two kinds of sacrificial anodes of Al – Zn – In – Sn – Bi and Al – Zn – In – Sn – Ti have been screened out excellent elected in laboratory test and many times respectively in different temperature sea water and saline mud. Finally, new aluminum alloys anodes that show excellent electrochemical properties in high temperature sea water and saline mud is chosen. The paper also discusses the effect of bismuth and titanium on anodes.

Key Words: sacrificial anodes, corrosion, sea water, and saline mud

The Corrosion behavior of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel in A/S/P Solution

..... *Zhou Kaimei , Qiu Yubing , Zhang Huamin* (32)

The corrosion behaviors of 1Cr18Ni9Ti stainless steel in Alkali (NaOH)/surfactant/HPAM solutions are studied by weight loss and potential scanning methods. The results show that 1Cr18Ni9Ti stainless steel occurs pitting corrosion in all studied solutions with exception of the NaOH solution. The pitting sensitivity of 1Cr18Ni9Ti stainless steel in the HPAM solution is the highest, and the pitting sensitivity becomes lower in the solutions with NaOH.

Key Words: stainless steel, A/S/P solutions, corrosion behaviors, pitting sensitivity

Forecasting Typhoon Tracks with Fractal Distribution Model

..... *Fu Yuhua* (36)

By using the extended form of fractal distribution model  $N = C/r^D$ , i.e., sectioned variable dimension fractals, this paper discusses the forecast of typhoon tracks. This method is simple and easy to be worked. As running the forecast, the similar tracks in the past is not needed to be considered. The only thing needs to do is to establish the two independent sectioned variable dimension fractals models according to the given typhoon tracks, one model stands for the relationship between time and the longitude of typhoon tracks, another stands for the relationship between time and the latitude of