

水平管内油-气-水三相流流型的实验研究

吴浩江* 李 斌 周芳德

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室)

吴浩江 李 斌等:水平管内油-气-水三相流流型的实验研究,油气储运,1999,18(7) 30~34。

摘 要 在内径为 40 mm 的水平管内、0.4 MPa 压力下进行了油-气-水三相流流型可视化的实验。描述了所观察到的各种流型的特征,并给出了流型图。可视化实验中观察到的流型有 7 种类型,分别为水基和油基的波状流、弹状流和分层—环状流。实验中还发现了许多在两相流动中所观察不到的新的流型结构。

主题词 三相流动 流型 研究

三相流最重要的应用是在海上回收石油的海底油井管路上。这些管路水平或近乎水平地位于海底,并且其中可能有原油、海水(储油层中自然产生或是为了保持储油层的压力而在生产过程中注入的)和天然气的三相流混合物流动,流体的压降和稳定特性对于海上油井平台的正常运行非常重要,而流体的流型是决定因素。

气-液-液三相流流动被认为是一种特殊的气-液两相流动。普通的气-液两相流动是气体和均匀液体的两相流动,而气-液-液三相流动是气体和非均匀液相的两相流动。另外,三相流动的不均匀性表现为总是在管子中空间和时间上的变化。这里的不均匀性指的是流体物性的不均匀性,如不均匀的粘度、不均匀的密度等。一方面,正是由于这种不均匀性使得三相流动与普通的气-液两相流动不同,因此才有必要将它作为多相流动的一种形式单独加以研究。另一方面,三相气-液-液流动又与气-液两相流联系很紧密,因此在三相流研究中可参考气-液两相流中的方法、理论、关联式和结论等。

与气-液两相流相比,有关三相流的论文十分有限。在早期的三相流研究中,Tek^[1]将两个非互溶液相当作具有混合物性的单相流体,从而给出了预测压降损失的关系式。Govier 和 Aziz^[2]对水平的液-液流动提出了流型图,然而他们没有研究气相。Bhaga 和 Weber^[3]采用了一维漂移流动理论对在平均体积比下的垂直的气-液-固三相流动进行了分析,他们

用其实验数据支持了他们的理论分析结果,但却没有给出任何流型图。随后 Giot^[4]分析了气-液-固三相流垂直接流动,他的模型对于在不同管径下(40~300 mm)所得到的数据都很好地预测出了相份额和摩擦压降。陈宣政^[5]对垂直管内油-气-水三相流的流动特性进行了研究,采用将光纤探针和电导探针相结合的办法来判别垂直管内油-气-水三相流的流型,得到了垂直管内油-气-水三相流的流型图。王跃社^[6]经过深入的理论研究,首次将用过渡区来描述流型间转变的思想应用于三相流的研究中,给出了统一的垂直管内油-气-水三相流流型图。该流型图将众多前人的流型转变界限方程统一于相应的过渡区内。与已有的流型图相比,它具有较强的通用性,适用于不同条件下的流型的判别。同时他采用将光纤探针与高速动态分析仪相结合的办法对垂直管内油-气-水三相流流型及其转变进行了实验研究,理论流型图与实验结果符合良好。

一、实验系统描述

本文的实验是在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的油-气-水三相实验台上进行的(见图 1)。该实验台可以进行油-气-水多相流流动及传热特性的研究。如图 1 所示,水经滤网由离心式水泵从水箱中抽出,经水稳压器,根据所需的流量选择某一管道,由流量孔板计量后进入油-水混合器,油

* 710049,陕西省西安市咸宁西路 28 号;电话:(029)3269615。

经滤网由螺杆式油泵从油箱中抽出,经油稳压器进入某根管道,由流量孔板计量后也进入油-水混合器与水混合,形成的油-水混合物再进入油-气混合器,与气混合。空气由活塞式压缩机升压,经空气稳压器和冷却器,用流量孔板计量后进入油-气-水混合器,与油、水混合,所形成的气-水、油-气、油-水或油-气-水混合物流经实验段进行各项数据测量后,进入沿降式分离器,将空气分离出来排入大气,油-水混合物进入沿降式油-水分离器分离,分离出的油、水分别返回油箱和水箱,供循环使用。油-气-水各相的流量分别由置于各相流量计前后的旁通闸阀和截止阀配合调节。油相、水相和气相的流量孔板的压差用 1151 电容式压差变送器测量。各相流体的温度用铠装式热电偶测量,压力用 CY-B 型标准压力传感器测量。所有压差、温度和压力的电压信号经 IMP 3595 数据采集板输入 COMPAQ 586 计算机,以进行数据采集和处理。

实验段采用规格为 $\phi 50 \times 5$ 的有机玻璃管,以便进行流型的可视化研究,实验段进口稳定段长度为 2.5 m ($L/D=62.5$),实验段长度为 2 m ($L/D=50$),将进口稳定段长度定为 $L/D=62.5$,以保证实验段中的流动为充分发展流动,出口稳定段长度为 2 m ($L/D=50$),以减少出口效应。在本实验中,选用了 46 号液压机床油、空气和自来水作为实验工质来模拟现场的原油、天然气和水构成的油-气-水三相流动。

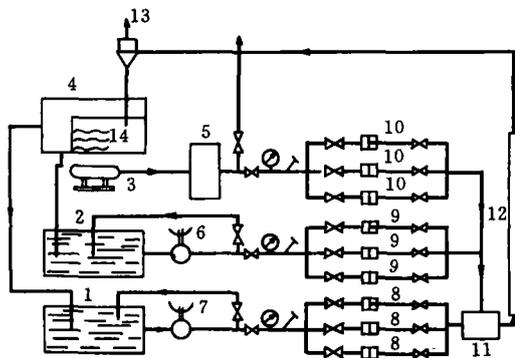


图 1 油-气-水三相流实验回路

1—油箱; 2—水箱; 3—空压机; 4—油水分离器; 5—空气稳压器; 6—水泵; 7—油泵; 8—油路孔板流量计; 9—水路孔板流量计; 10—气路孔板流量计; 11—三相混合器; 12—实验段; 13—气液分离器; 14—波纹板组件; \odot —压力测点; \triangleright —温度测点; \times —阀门

本次实验参数包括:压力为 0.4 MPa;温度为

30~40℃;空气折算流速为 1~10 m/s;水折算流速为 0.05~0.5 m/s;油折算流速为 0.09 m/s。

46 号液压机床油的物性参数:

$$\rho_0 = \frac{897}{1 + 1.646(T - 8) \times 10^{-3}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\nu_0 = 1.2223 T^{0.3684} \exp(-0.2352 \ln^2 T) \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/s)}$$

二、三相流流的划分

由于有关气-液-液流型的知识还很有限,不同的研究者对于这些流型的定义和划分方法并不一致。一些研究者直接采用了气-液两相流动的定义和划分方法,因此,在他们的三相流实验中所记录下来的流型和两相流动一样,没有将油为连续相和水为连续相时的流动区分开来,这是一个与实际差别很大的简化,因为这两种流动之间的区别很大。有鉴于此,一些学者对于气-液-液流动中的流型采用了一套独特的术语。本文作者将之总结并规范化,发现它主要包含三个方面的信息:(1)液相与管壁之间的联系,即两液相中的哪一种与管壁接触,基本上与管壁接触的液体(至少在靠近壁面的区域)通常为连续相。因此当流动主要是油相与管壁接触时,该流动称为油基流动。同样,水基流动中主要是水相与管壁接触。(2)油相与水相之间的关系。(3)气相与整个液相之间的关系。例如,油基/弥散/弹状流代表:(1)主要是油相与管壁接触,因而该三相流动看起来像气-油两相流动;(2)油和水混合在一起并形成悬浮液(弥散或分离);(3)从气液流动的角度来看流动为弹状流。可以看出,前两个部分是新提出的,并且是专为气-液-液三相流动提出的,而第三部分则采用了气-液两相流动中的术语。第一部分通常包括两种形式,即油基和水基。第二部分包括两种形式(称为弥散和分离)或者加上分离-弥散(即部分弥散)为三种。第三部分对水平流动而言至少有 4 种主要流型,即分层、间歇、泡状和弹状流。因此对于气-液-液流动,至少有 $2 \times 2 \times 4 = 16$ 种主要流型。如果第三部分采用 Hewitt 对水平气-液流动提出的 7 种主要流型,那么还会得到更多的气-液-液流动的流型。

本次实验中所有环状流都是针对分层一环状流而言的,这时由于分层作用,管子底部的液膜要比管子顶部的厚。

在根据文中给出的条件下所作的水平气-油-水

流动实验中,得到了 7 种流型(以新术语定义)(见表 1)。在所有可能的 16 种流型中,既没有得到泡状流,也没有得到其它组合。需要指出的是,为了简化起见,对油-水之间的关系只采用了两种形式加以描述,即分离和弥散。图 2 是在实验获得的气-油-水流型数据基础上绘制的流型图,描述了在恒定气速下逐渐增加水速时的流型的实验观察结果。

表 1 油-气-水三相流流型的划分

| 序号 | 基准相 | 油-水关系 | 气-液关系 | 简称 |
|----|-----|-------|--------|-----------|
| 1 | 油基 | 分离 | 弹状流 | O-S-SL |
| 2 | 水基 | 弥散 | 弹状流 | W-D-SL |
| 3 | 油基 | 弥散 | 弹状流 | O-D-SL |
| 4 | 油基 | 分离 | 波状分层流 | O-S-St. W |
| 5 | 油基 | 弥散 | 波状分层流 | O-D-St. W |
| 6 | 油基 | 弥散 | 分层-环状流 | O-D-A |
| 7 | 水基 | 弥散 | 波状分层流 | W-D-St. W |

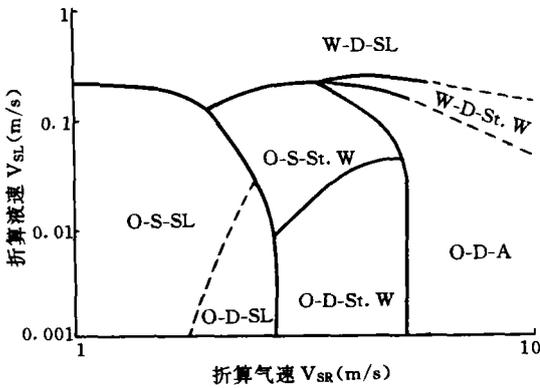


图 2 油-气-水三相流流型图(油速 $j_o = 0.09$ m/s)

三、三相流流型的描述

1、油基/分离/弹状流(O-S-SL)

在相对较低的折算气速和水速下,观察到了油基/分离/弹状流。由于折算气速很小,气相无法有效地将液相运送到下游,因此液相聚集起来形成了液弹。同时,由于折算气速很小,也使得油相和水相不能有效地混合,因此液体在重力作用下倾向于各自分层流动。在靠近壁面的液膜区时尤为明显,可以看到在油相和水相之间有一条非常清楚的边界,然而在液弹区,液弹中的液体速度比在液膜区高,使得油相和水相之间的边界相对模糊。当液弹经过后,可以在液膜区看到很多油附着在管子顶部表面,缓慢地流下,形成与管子顶部表面很薄的油膜层相连的复

杂的波状结构。图 3 给出了该流型可视化观察所得到的结果。

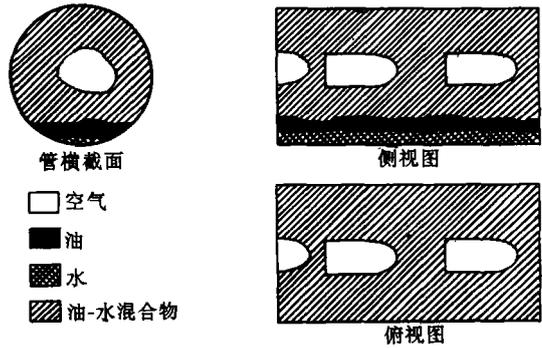


图 3 油基/分离/弹状流(O-S-SL)示意图

2、水基/弥散/弹状流(W-D-SL)

当从油基/分离/弹状流(O-S-SL)增加折算水速后,从图 4 中可以看到油层变得越来越薄,油相与水相之间的边界变得越来越模糊,并且折算液速增加使得油相和水相之间的混合越来越剧烈,从而越来越多的油相弥散于水相中,最终形成了水基/弥散/弹状流。由于该流动是水基流动,看上去与气-水两相弹状流十分相似。流动的悬浮液非常均匀,看不到明显的油块。当液弹经过后,在液膜区看不到液体附着在管子顶部表面的现象,因而管壁十分清楚。

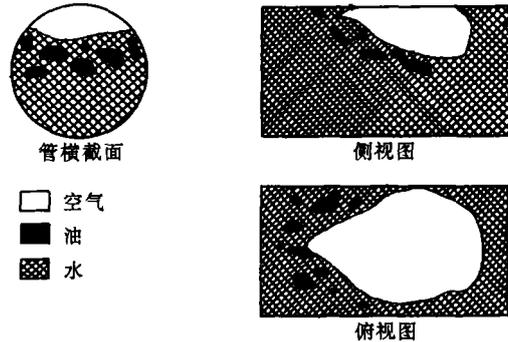


图 4 水基/弥散/弹状流(W-D-SL)示意图

3、油基/弥散/弹状流(O-D-SL)

当从含水率相对较低的油基/分离/弹状流(O-S-SL)增加折算气速后,更多的水相弥散于油相中,因而水层变得越来越薄,最后在因折算气速增加而导致的剧烈混合的作用下消失了(见图 5)。

从图 5 可以看到,在该流型下,管中的油相和水相十分均匀地混合在一起,混合物具有油的特性,看起来呈泡沫状。同油基/分离/弹状流(O-S-SL)一

样,当液弹经过后,可以看到泡沫状混合物附着在管子顶部,并缓慢地流下来,形成与管子顶部一层很薄的液膜相连的复杂的波状结构。

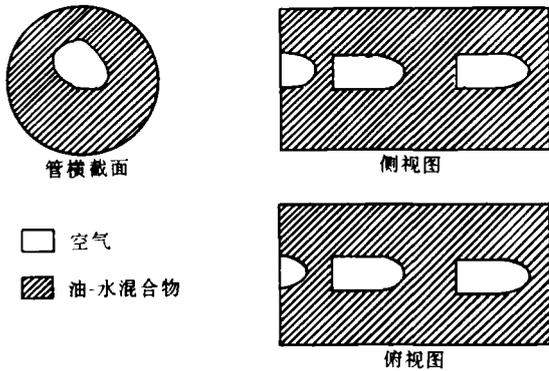


图 5 油基/弥散/弹状流(O-D-St. W)示意图

4、油基/分离/波状分层流(O-S-St. W)

从图 6 可以看到,当从油基/弥散/弹状流(O-D-St. W)增加折算水速后,在管子底部开始出现水层,这个水层趋向于减少液相与管壁之间的摩擦力,从而使液速增加,导致液相的聚集减少,这样弹状流趋于消失,波状分层流开始形成。可以看到两种略有不同的油基/分离/波状分层流,一种管子顶部表面被油相弄脏,另一种管子顶部表面很清洁。实际上,前一种代表了从油基/弥散/波状分层流到油基/弥散/环状流的转变。在这种情况下,被弄脏的管子壁面的粗糙度会变大,使得压降增加。

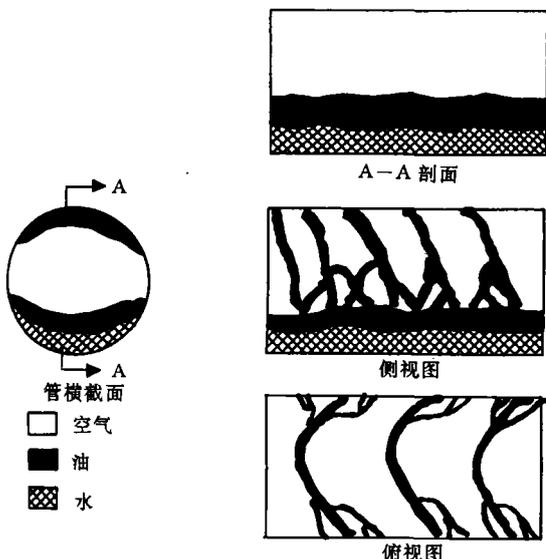


图 6 油基/分离/波状分层流(O-S-St. W)示意图

5、油基/弥散/波状分层流(O-D-St. W)

从图 7 可以看到,当增加了油基/弥散/弹状流(O-D-St. W)的折算气速后,油相和水相仍然保持弥散状态,混合物具有油的特性,但是弹状流变得越来越弱并逐步消失,开始形成油基/弥散/波状分层流。与油基/分离/波状分层流(O-S-St. W)相似,同样有两种不同的油基/弥散/波状分层流,一种管子顶部被液体混合物弄脏,一种管壁十分光亮,前者代表了从油基/弥散/波状分层流到油基/弥散/环状流的转变过程。

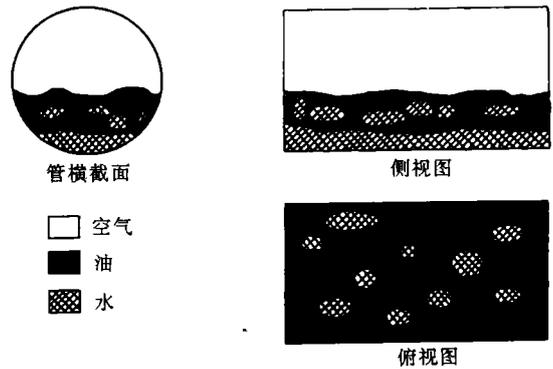


图 7 油基/弥散/波状分层流(O-D-St. W)示意图

6、油基/弥散/环状流(O-D-A)

从图 8 可以看到,当增加了油基/弥散/波状分层流(O-D-St. W)的折算气速后,越来越多的液体混合物被夹带到管子顶壁,然后流下来。这种排液形成了与管子顶部的一层薄膜相连的复杂泡沫波状结构,而这恰恰表征了油基/弥散/环状流。当折算气速进一步增加时,波状结构开始沿着管子顶部表面向前运动。在大多数的情况下,因为混合物的粘度远大于纯油,所以混合物在整个管子表面的存在使得管壁的粗糙度达到最大,因而最大的压力梯度通常可在该流型下测得。

7、水基/弥散/波状分层流(W-D-St. W)

当增加油基/弥散/环状流(O-D-A)的折算气速后,油相和水相仍然保持弥散状态,并且混合物的粘度在低于某个特定的初始液相含水率时会变得越来越大,而当高于该值时,随着折算气速的增加,混合物的粘度会变得越来越大,并且管子顶部表面的复杂波状结构变薄,流下来得更快,最后消失。在这时,水基/弥散/波状分层流(W-D-St. W)开始形成,看上去与气-水两相波状分层流很相似。悬浮液很均匀,区别不出明显的油块(见图 9)。

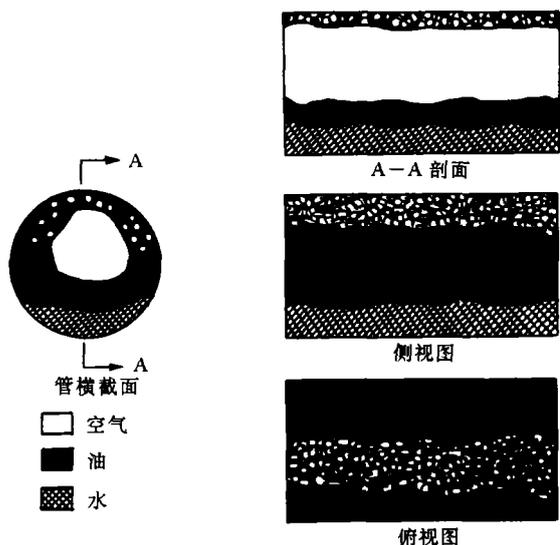


图 8 油基/弥散/环状流(O-D-A)示意图

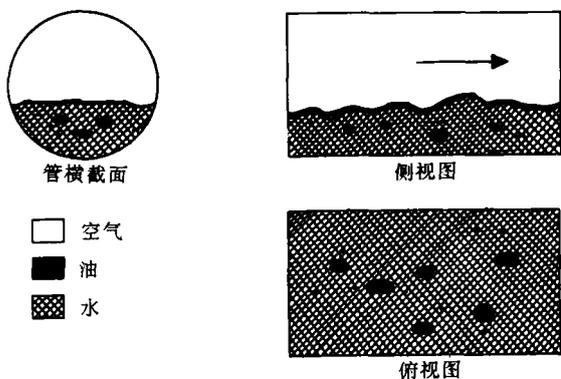


图 9 水基/弥散/波状分层流(W-D-St. W)示意图

油-气-水三相流动中存在着各种各样的流型。在不同的实际应用场合中,可能希望出现或不希望出现某种流型,然而在实际长距离油气输送中,要想设计安全可靠并节能的管道,在了解沿管道油-气-水三相压降和相份额之前,必须先研究流型,才能对其进行精确地计算。

总之,研究油-气-水三相混合物在水平管道内的流型,不仅对提高石油天然气工业的经济效益和测试技术的现代化具有重要的实用价值,而且具有重要的学术意义。

参 考 文 献

- 1, Tek, M. R. : Multiphase flow of water, oil and natural gas through vertical flow strings, Petrol. Technol, 1961.
- 2, Govier, G. W. & Aziz, K. : The flow of complex mixtures in pipes. Krieger, New York, 1972.

- 3, Bhaga, D. & Weber, M. E. : Holdup in vertical two and three-phase flow, Part I : experimental investigation. Can. J. Chem. Engng, 1972.
- 4, Giot, M. : Three-phase Flow, Chap. 7. 2. , McGraw-Hill, New York, 1982.
- 5, 陈宜政:垂直上升管内油气水三相流流动特性的研究,西安交通大学博士学位论文,1992.
- 6, 王跃社:垂直及倾斜上升管内油气水三相弹状流流动特性的研究,西安交通大学博士学位论文,1998.

(收稿日期:1999-01-27)

编辑:康力平

最新世界石油供需趋势

1998年石油需求增长幅度(0.3%)是1985年以来最小的,仅比上年增加 $38 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。拉丁美洲地区石油需求增加3.6%,而亚太地区减少2.1%。前苏联因经济衰退石油需求再度下降,北美由于库存过剩和暖冬影响而使石油需求增速减慢到1.0%。

1998年世界原油和天然气液的产量达到 $11\,530 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 的历史最高水平。非欧佩克国家的石油产量仅增 $47 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$,是1993年以来增长最少的一年。由于加拿大和墨西哥石油产量的增长被美国的产量下降所抵销,所以北美地区的石油产量仅增加 $636 \text{ m}^3/\text{d}$ 。欧佩克石油产量创下1979年以来的最高记录($4\,426 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$),但增加主要来自伊拉克的 $152 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产量,而其他10个欧佩克成员国中有7个国家石油产量是下降的。

石油供需的不平衡造成1998年石油库存增加。北美石油库存达到1993年以来的最高水平。

截至1999年1月1日世界炼油能力达 $12\,813 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$,比上年同期增加0.5%($67 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$)。亚太地区炼油能力增加了 $73 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。中国、印度和日本在亚洲金融危机之前进行和接近完成的项目在1998年投产。北美的炼油能力增加了 $43 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$,比上年增长1.3%。

此外,各地区还提高了生产轻质、高质量产品的能力。全世界热反应加工能力(焦化、热裂化、减粘裂化)增加5.2%($64 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$),在总炼油能力中的比例上升到10.7%。其中 $47 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 来自北美和西欧, $16 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 来自中东。

1998年全世界催化裂化能力上升2.9%($64 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$),达到 $2\,274 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。其中亚太地区增加 $32 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$,北美和拉丁美洲增加 $16 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

作 者 介 绍

- 侯桐瑞** 高级工程师,1955年生,1985年毕业于原中国石油天然气管道职工学院仪表自动化专业,现任中国石油天然气管道局科技处副处长。
- 常景龙** 见本刊1999年第1期。
- 曲文卿** 博士研究生,1972年生,1994年毕业于北京航空航天大学,1997年在北京航空航天大学获硕士学位,现在北京航空航天大学攻读博士学位。
- 李 明** 副教授,1960年生,1986年毕业于哈尔滨科学技术大学技术物理专业,现在西安石油学院基础课部从事物理教学与实验方面的工作。
- 刚芹果** 讲师,1967年生,1991年毕业于华中理工大学,现在河北大学数学系从事教学工作。
- 胡延江** 1963年生,1986年毕业于北京化工学院化学工程系,现在中国石油天然气东北输油管理局管道设计研究院从事设计工作。
- 张对红** 见本刊1999年第1期。
- 曹旦夫** 工程师,1971年生,1993年毕业于石油大学(华东)炼制系应用化学专业,现任江苏省徐州华冠石油化工有限公司生产部经理,主管生产、技术、开发工作。
- 吴浩江** 博士研究生,1974年生,1994年毕业于西安交通大学,现在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室攻读博士学位。
- 张朝晖** 助理工程师,1977年生,1993年毕业于西安石油学院机械制造与工艺设备专业,现在中国石化集团管道储运公司新乡输油公司从事设备技术管理工作。
- 罗明强** 工程师,1969年生,1992年毕业于西南石油学院采油工程专业,现在中国石油天然气四川石油管理局输气公司从事石油计量管理工作。
- 师文会** 工程师,1967年生,1990年毕业于大庆石油学院采油工程专业,现在大港油田油气开发公司原油集输分公司从事输油技术管理工作。
- 李铁成** 工程师,1965年生,1988年毕业于华中理工大学金属腐蚀与防护专业,现在中国石油天然气东北输油管理局管道工程处工作。
- 王军武** 助理工程师,1974年生,1997年毕业于石油大学(华东)建工系储运专业,现在广州市中航中南机场设计院工作。
- 谭希宙** 工程师,1957年生,1985年毕业于原中国石油天然气管道职工学院仪表自动化系,现任中国石化集团管道储运公司胜利输油公司黄岛油库主任。
- 汪岗伟** 高级工程师,1944年生,1966年毕业于浙江大学工业电气自动化专业,现任中国石油天然气管道局秦皇岛输油公司副经理,从事生产技术管理工作。
- 曾多礼** 工程师,1956年生,1988年毕业于青海大学内燃机专业(自修),1991~1992年在中国人民解放军后勤工程学院油料储运专业进修,现任中国人民解放军59243部队副总工程师,本刊通讯员。
- 罗富绪** 高级工程师,1928年生,1948年就读于西北工学院,1952年在中国人民解放军第二高级步兵学校俄文团完成俄语大专学业,退休前在中国石油天然气管道勘察设计院从事科技情报翻译工作。

stated in this paper through calculating elastic-plastic J integral and tearing modulus. Meanwhile, critical pressure is anticipated in unstable crack propagation.

Subject Headings: J integral, tearing modulus, axial crack, stability assessment

• EXPERIMENT & RESEARCH •

Cao Danfu; **Field Test on BEM—6N Oil Flow Improver in Weigang—Jingmen Oil Pipeline**, *OGST*, 1999, 18(7) 27~29.

The paper introduces the commercial test of BEM—6N oil flow improver in Weigang—Jingmen oil pipeline, discusses the reason of influence of shear on the modified effectiveness of crude oil improver. The test results show that the BEM—6N oil flow improver is effective in reducing the oil's viscosity and pour point, and as a result, the operating temperature of the line can be reduced.

Subject Headings: oil pipeline, crude oil, oil flow improver, field test

Wu Haojiang, Li Bin *et al.*; **An Experimental Study of Oil-Gas-Water Three-phase Flow Regimes**, *OGST*, 1999, 18(7) 30~34.

Visual experiment on flow regimes of oil-gas-water flow in a 40 mm bore horizontal pipe were carried out at a pressure of 0.4 MPa. Characteristics of observed flow patterns were described and a flow pattern map were generated. The observed flow could be classified into seven patterns. They were water-oil based wavy flow, slug flow, and stratified flow. Also many new flow regime configurations were found in this paper.

Subject Headings: horizontal pipeline, three-phase flow, flow pattern, experimental study

Zhang Zhaohui; **Application Analysis on Heat Conducting Oil of Heat Medium Heater**, *OGST*, 1999, 18(7) 35~37.

Taking the heat conducting oil used in Zhongmu—Luoyang oil pipeline as an example, the problem on service life of heat conducting oil of heat medium heater is studied. The result shows that the high temperature operation, local superheating, nitrogen isolation free, and high impurity shorten the service life of heat conducting oil. In the light of the problems, some countermeasures against the problems, such as adopting by-pass dilatation tank process, installing a cooling tank to isolate air, and heat conducting oil filtering and refinement, are put forward. Taking 3 or 4 years as a service period into account, expanding a service period of heat conducting oil could save a cost up to 100×10^4 yuan.

Subject Headings: heat medium heater, heat conducting oil, service life, measure

• METERING TECHNOLOGY •

Luo Mingqiang and Zhang Jingpeng; **To Understand the Measurement Uncertainty of Natural Gas Flowrate**, *OGST*, 1999, 18(7) 38~41.

Analyzing the measurement uncertainty of natural gas flowrate is important. However, some