

文章编号: 1672-9897(2005)04-0049-07

# 利用射流泵输送油水两相管流的实验研究

许晶禹, 吴应湘, 李东晖

(中国科学院力学研究所工程科学研究部, 北京 100080)

**摘要:**研究了应用射流泵输送油水两相管流时泵对下游管道中流型和压降的影响。实验管线为内径 50mm 的透明有机玻璃管, 管线从入口到分离器长约 35m, 实验段由一个垂直倒 U 型管和一个长 3m 水平管组成。分别给出了不同入口条件下实验管段的流型图和压降图。结果表明:采用射流泵输送油水两相流动, 对下游管道流型和油水乳化速度有着显著的影响, 但对下游管道内的压降随混合流速和体积份额的变化趋势影响很小。

**关键词:**射流泵; 油水两相流动; 流型; 压降; 乳化

\* 中图分类号: O359 文献标识码: A

## Experimental studies for oil-water two-phase pipeline transportation with jet pump

XU Jing-yu, WU Ying-xiang, LI Dong-hui

(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The effects of oil-water two-phase pipeline transportation with jet pump on flow pattern and pressure drop is investigated. The total length of the flow-loop between the entrance and the separation unit is approximately 35m. The test sections consist of a vertical inverse U-bend, with 3.3m height and 0.72m width, and a 3m long horizontal pipe. The flow pattern and pressure drop graphs are obtained from present experimental data. It is shown that jet pump exerts a remarkable effect on flow pattern and oil-water emulsification, but undertakes a minimal effect on pressure drop.

**Key words:** jet pump; oil-water two-phase flow; flow pattern; pressure drop; emulsion

## 0 引言

射流泵广泛应用于石油化工领域,其工作原理是通过引射与被引射流体间进行动量和能量交换,达到携带被引射流体的目的。射流泵(图1)由工作喷嘴、接受室、混合室和扩压器组成。引射流体通过工作喷嘴高速喷入混合室,将周围介质吸入主喷射流,一部分动能传给被引射流体。随后流动速度逐渐均匀的混合流体通过扩压段降速增压,使扩压段出口处的压

力高于被引射流体吸入时的静压,从而实现液液两相的输送<sup>[1]</sup>。T型三通也经常应用于液液两相输送管线的入口结合处和出口分离处。通过各自的动力输送系统获得动量和能量,液液两相在T型三通处结合。

多相流动中,改变设备的几何尺寸或各相的流动参数,都可能破坏相与相之间的界面状态,从而导致不同的流动方式—流型。即使流体物性条件相同,流型不同也将导致不同的流体力学性质<sup>[2]</sup>,所以多相

\* 收稿日期: 2004-12-07; 修订日期: 2005-03-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目和中国科学院与中国海洋石油总公司“十五”重大合作项目(KCX2-SW-L03)

作者简介: 许晶禹(1975-),男,黑龙江省人,在读博士生,研究方向:多相流体动力学。

流的性质研究往往是与流型结合在一起的。因为 T 型三通能使液液两相相互的干扰度降到最低,所以本文分别应用射流泵和 T 型三通管对油水两相输送进行实验观察,研究应用射流泵进行油水两相输送对下游管道两相流动的流型和压降的影响,从而为射流泵的实际工程应用提供参考。

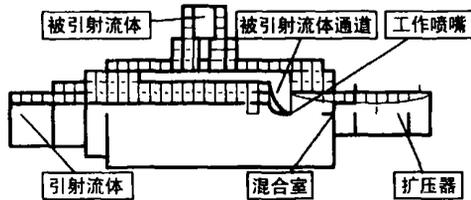


图1 射流泵示意图

Fig.1 Schematic of jet pump

## 1 实验系统

### 1.1 实验装置

实验是在中国科学院力学研究所的多相流动实验平台上完成的。图2为实验装置示意图。油水分别由油箱和水箱供应,经过各自的流量计后,通过射流泵(或T型三通)进入实验管线,流经实验段后被分离再循环使用。

流程管线采用内径50mm的透明有机玻璃管,这有助于观察油水两相的流动状态。管线从射流泵(或T型三通)到分离器长约35m,实验段包括垂直放置的倒U型管和长3m的水平管。倒U型管高3.3m,跨度0.72m。

流量计量:水相采用电磁流量计,油相采用涡轮流量计。压力信号采用 Honeywell 压力传感器测量后,用 DAQP-12H 数据采集系统进行数据采集,采样频率为2000Hz。实验中,在7个不同管道截面处布置了压力传感器,由于管道同一截面上压力分布的不均匀性,各截面成90°布置4个传感器<sup>[3]</sup>。压力数据处理同时采用了时间和空间平均方法,即对压力数据进行截面平均和2分钟内时间平均。流型识别采用高速摄像机记录每次实验条件下的流动状态,慢镜头回放观察流型。辅助识别采用 Weismen<sup>[4]</sup>提出的压差脉动信号识别法。为保证实验数据的可靠性,对每个测量点,都在调整流量后的5~8min,流动相对稳定后再采集数据、记录压力信号和观测流型。

### 1.2 实验工质

实验油相采用无色、透明的矿物油,俗称白油,常温常压(20℃,0.101MPa)粘度为44mPa·s,密度为860kg/m<sup>3</sup>,表面张力为0.0445N/m。水相为自来水,20℃时的粘度为1.005mPa·s,密度为998kg/m<sup>3</sup>,表面张力为0.0712N/m。纯白油表现出牛顿流体特性,而乳化后白油表现出非牛顿流体特性<sup>[5]</sup>。为便于实验时的流型观察,在水中加入了高锰酸钾(颜色剂)以便于识别。

### 1.3 实验过程

实验工质温度控制在19~21℃,给定水相流量后,调整油相流量,通过可视化观察实验段的油水两

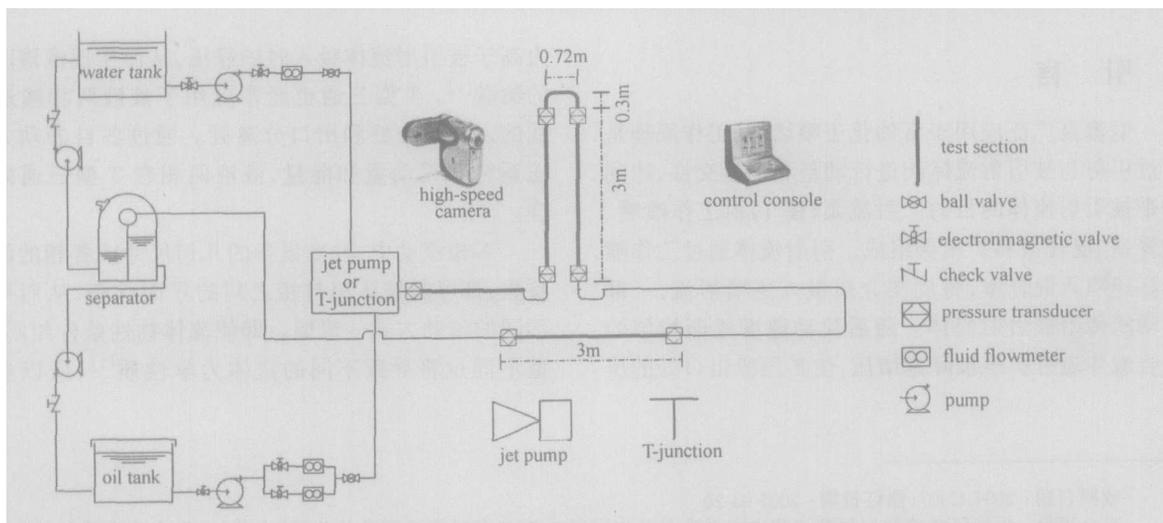


图2 油水两相流动流程示意图

Fig.2 Schematic of experimental setup

相流型,入口处为射流泵(水相引射油相)或 T 型三通下,记录不同流型的油相和水相表观流速和实验段压力脉动信号。流量变化范围:油相:0~12m<sup>3</sup>/h,水相:0~7.5m<sup>3</sup>/h。对每个实验段,记录 98 组不同油、水比下流动的压力脉动信号和流型。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流 型

本文采用 M. Nädler 提出的方法<sup>[5]</sup>来定义流型。实验中流型是利用可视化观察实验管段得到的。用 T 型三通管输送,在一定的混合流速和输入水相体积份额下,依次观察到了水平管 6 种流型,即:塞状流(SLUG)、分层流(SW)、波动分层流(SWD)、油滴分层流(ODST)、有混合界面的三层流动(3L)和乳化混合流动(M)。比较入口水平段图 3(a)和远端水平段图 4(a)的流型图,可看出经过倒 U 型管,分层流动的流型发生了变化,由分层、分层波动转变为油滴分层流,

而其它流动方式变化很小。在倒 U 型管的垂直段,主要有油滴流动(OD)、块状流动(CHURN)和乳化混合流动(M)。对比垂直上升段和下降段的流程图(图 5(a)、6(a)),可看出流型转化基本相同。

应用射流泵输送,观察到水平管段 4 种流型,即:油基环状流动(OA)、油滴分层流动(ODST)、有混合界面的三层流动(3L)和乳化混合流动(M)。垂直的倒 U 型管内,有油滴流动(OD)、油基环状流动(OA)和乳化混合流动(M)。观察入口设备为射流泵的实验管段流型图(图 3(b)~6(b)),可看出随着输入水相体积份额和混合流速的增加,整个流程管段基本成乳化混合流动(M)。

比较入口设备为 T 型三通和射流泵的流程图(图 3~6),可看出两者在管道中呈现不同流型,由于射流泵的结构特点,使得在较低的混合流速下(>0.6m/s),油水两相便呈现乳化混合流动。通过慢镜头回放观察和参考文献[6~8]得出,对入口设备为 T 型三

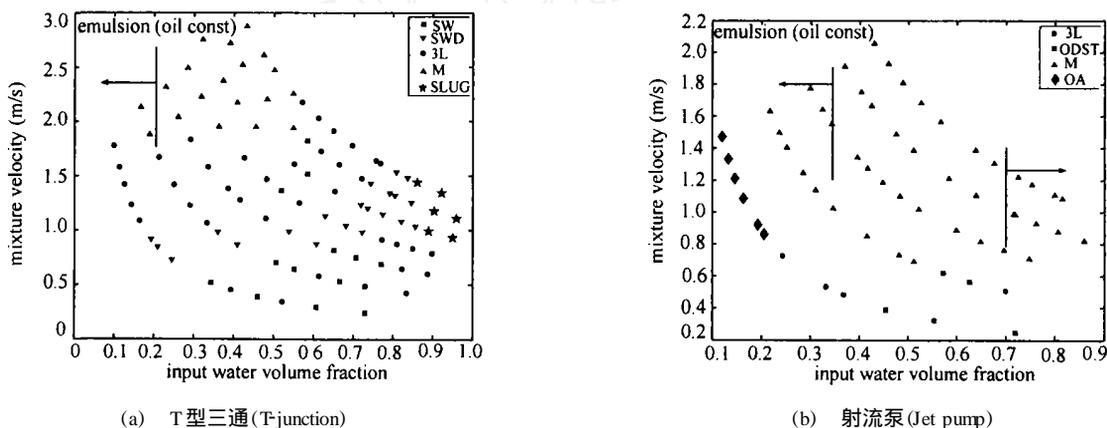


图 3 实验入口水平段的流型图

Fig. 3 Flow regime map based on input water volume fraction at the entrance

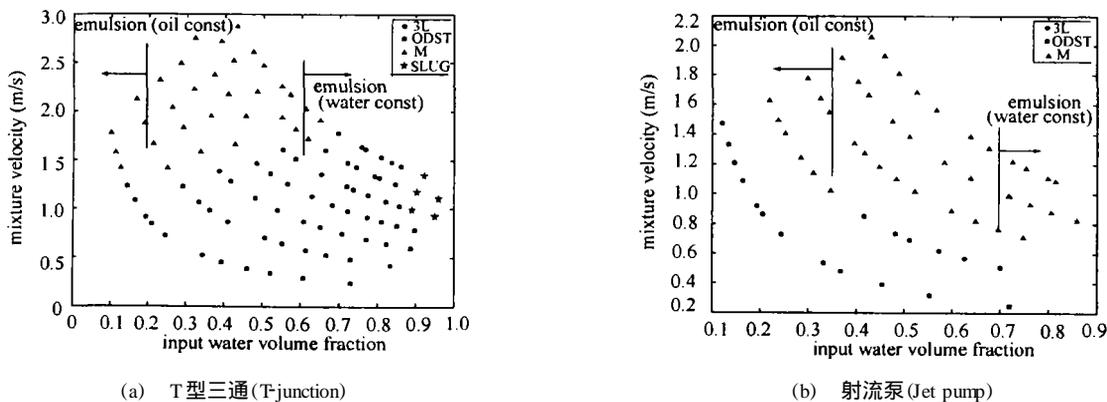


图 4 远端水平段的流程图

Fig. 4 Flow regime map based on input water volume fraction for horizontal pipe

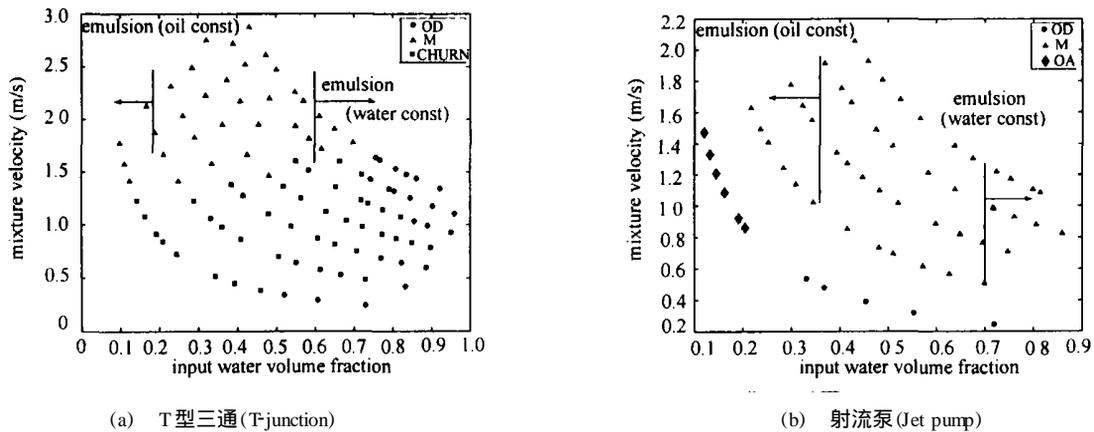


图5 倒U型管垂直上升段的流程图

Fig. 5 Flow regime map based on input water volume fraction for vertical upward

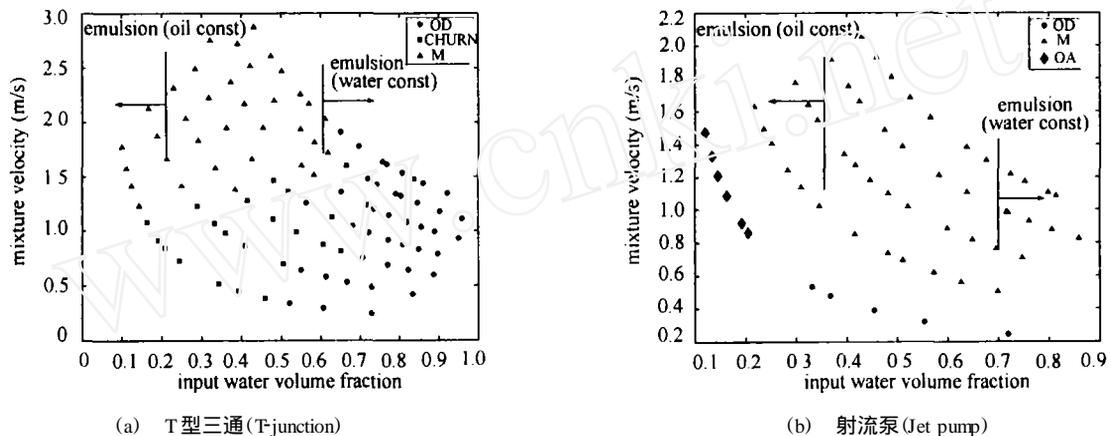


图6 倒U型管垂直下降段的流程图

Fig. 6 Flow regime map based on input water volume fraction for vertical downward

通,输入水相体积份额  $w$  小于 20%,乳化混合流动(M)明显的以油相连续的形式存在。当  $w$  大于 60%,出现以水为连续相的混合流动。应用射流泵输送油水两相流动时,在  $w$  小于 35%时,为油相连续的均相混合流动,当  $w$  大于 70%,出现明显的水相连续混合流动。

## 2.2 压降

对比不同入口设备的出口表面压力(图7)。在相同混合流速和输入水相体积份额下,射流泵出口表面压力略低于用T型三通输送的出口表面压力,但出口表压随混合流速和输入水相体积份额的变化趋势基本相同。固定混合流速,出口表压随混合流速的变化较平稳。当输入水相体积份额一定,出口表压随混合流速的增加成陡峭的上升趋势。

观察倒U型管中的压降(图8~9)可看出:图8(a)和图8(b)中压降的走势基本相同,只是应用射流

泵输送混合液体时,无论是倒U型管段的垂直上升段还是下降段,压降都略低于用T型三通输送时的管道压降。在垂直上升段,压降存在最低点。这种压降波动的存在是由于输入水相体积份额比较高和混合流速较低,油水两相流动以水相连续的形式存在,壁面的摩擦压降主要由水相引起,重力压降起主要作用。当输入油相体积份额增加到一定值时,由于不稳定扩散过程中油滴的破碎和凝聚(Pal, 1993),发生乳化现象,流动以油相连续形式存在,壁面摩擦压力增加,壁面摩擦压降的增加速度大于油相在管段中重力引起的压降。同样的油相流速下,表观水相流速越大,油水乳化现象越严重。

图9给出了油水在倒U型管垂直下降管内的压降。压降随输入水相体积份额呈近似线性的变化。图9表明:对同样混合流速,不同输入水相体积份额导致流型不相同,压降也不同,但图中压降曲线的变

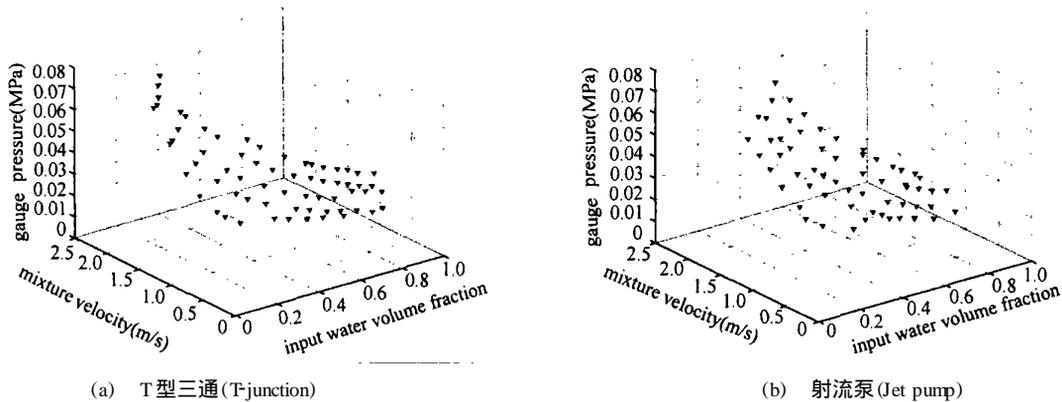


图 7 入口设备的出口表压

Fig.7 Gauge pressure at the entrance

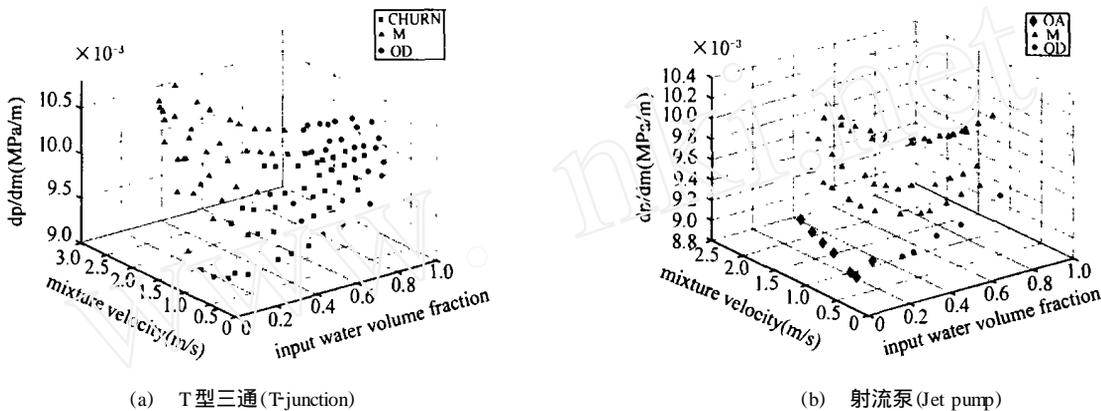


图 8 倒 U 型管垂直上升段压降

Fig.8 Pressure drop measured for vertical upward

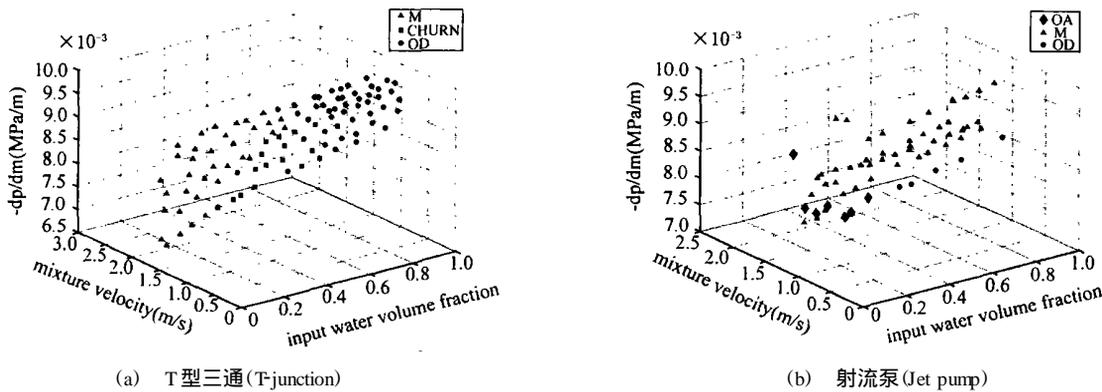


图 9 倒 U 型管垂直下降段压降

Fig.9 Pressure drop measured for vertical downward

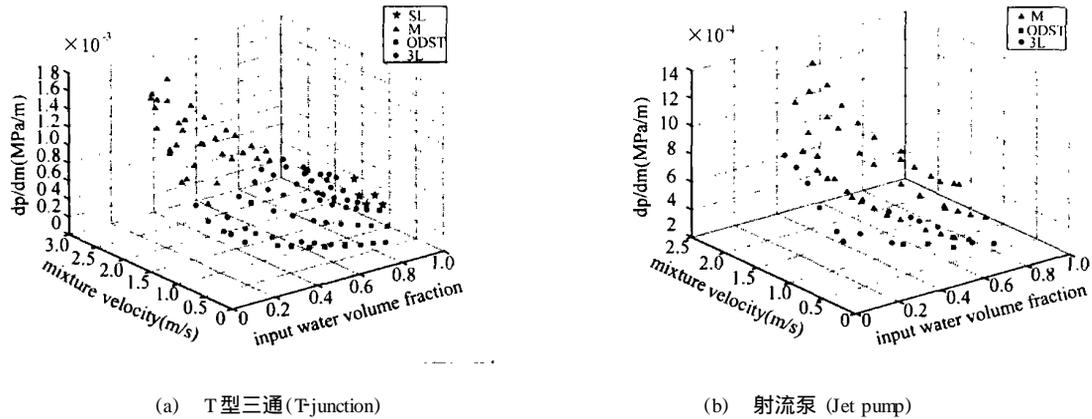
化趋势基本相同。

若用 T 型三通进行油水两相输送,则远端水平管的压降将如图 10(a) 所示。从图中看出:混合流速的增加,流型发生变化的同时,压力梯度也呈增加趋势。当流型为乳化混合流动时,压降增加的趋势变大。采用射流泵输送(图 10(b)),水平管的压降趋势与 T 型

三通输送的压降趋势基本一致,油水流动的主要方式为乳化混合流动。

### 3 理论计算

将油水两相混合物看作均相的单相流体,应用均相模型压降计算公式,分别对水相连续流动的混合物



(a) T型三通(T-junction)

(b) 射流泵 (Jet pump)

图10 远端水平段压降

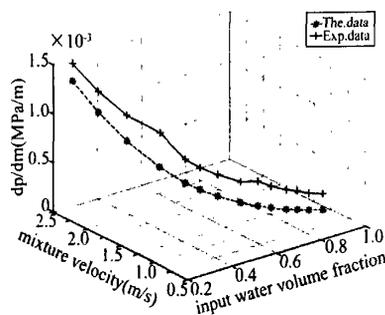
Fig. 10 Pressure drop measured for horizontal

粘度  $\mu_{m1}$  和油相连续流动的混合物粘度  $\mu_{m2}$  采用下式计算<sup>[9]</sup>:

$$\mu_{m1} = \frac{0(1-w) + w w}{0(1-w)/\mu_0 + w w/\mu_w}$$

$$\mu_{m2} = \frac{\mu_0}{1-w} \left( 1 + \frac{1.5\mu_w w}{\mu_0 + \mu_w} \right)$$

应用上式计算了应用射流泵输送下的远端水平实验管内的压降,图11给出了表观水相流速不变 ( $V_{sw} = 0.71\text{m/s}$ ) 均相计算压降方法与实验数据的比较。从图中看出:理论计算值与实验数据之间的差别较大,但随着混合流速增加和输入水相份额减少,流型改变为乳化混合流动(M),理论值与实验值之间的差别减少。原因是:均相模型将油水两相混合物看作均相的单相流体,速度越高,油水乳化越充分,均相模型的计算越准确。因此,应用射流泵输送油水两相流动,在较高的混合流速下可采用均相模型计算管内压降。

图11 远端水平段摩擦阻力压降 ( $V_{sw} = 0.71\text{m/s}$ )Fig. 11 Pressure drop calculated for horizontal ( $V_{sw} = 0.71\text{m/s}$ )

## 4 结论

笔者分别应用射流泵和T型三通研究了输送油水两相流动对下游管道中流型和压降的影响,并比较了两者的结果。通过分析实验数据得出,应用射流泵时,下游管道中的流型较为单一。在较低混合流速下,油水两相便呈现乳化混合流动。对乳化混合流动,当  $w$  小于 35%,为油相连续流动,当  $w$  大于 70%,呈现出明显水相连续混合流动。

与T型三通管相比,用射流泵时,下游管道内的压降略微降低。无论对垂直管段还是水平管段,压降随混合流速和体积份额的变化趋势基本相同。对较高的混合流速,可应用均相模型计算管道压降。

## 参考文献:

- [1] 郑之初. 节能射流泵 [J]. 力学与实践, 1985, 1: 46~50.
- [2] CHEREMISINOFF N P. Encyclopedia of fluid mechanics [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1986.
- [3] WU Ying-xiang, ZHENG Zhi-chu. Experimental study and simulation principles of an oil-gas multiphase transportation system [J]. China Ocean Engineering, 2000, 14: 33~44.
- [4] WEISMAN J, DUNCAN D and GIBSON J. et al. Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal Lines [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1979, 5: 437~462.
- [5] NADLER M, MEWES D. Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1997, 23: 55-68.
- [6] BRAUNER N, MOALEM M D. Flow pattern transitions in two

phase liquid-liquid flow in horizontal tubes [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1992, 18: 123-140. [7] LOVICK J, ANGELI P. Experimental studies on the dual continuous flow pattern in oil-water flows [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2004, 30: 139 ~ 157.

[8] ANGELI P, HEWITT G F. Flow structure in horizontal oil-water flow [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2000, 26: 1117 ~ 1140.  
[9] 刘文红, 郭烈锦等. 水平管油水两相流摩擦阻力特性实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23: 627 ~ 630.

(上接第 48 页)

### 3 结 论

介绍了气动院新近开发的一种低速风洞飞机尾旋试验技术——旋转流场下单自由度振荡试验技术。从本期试验结果来看,旋转流场下滚转振荡模态试验性能稳定,试验数据可靠,为研究飞机非稳定尾旋过程中的气动力特性提供了一种新的有效的试验方法。

#### 参考文献:

[1] 王学俭. 飞行器非定常动态模拟综合试验系统 [R]. 中

航气动院, 2001.

- [2] 周玉. 飞行器非定常动态模拟综合试验系统测控系统 [R]. 中航气动院, 2002.
- [3] 高剑军. HL-8 风洞流场校测报告 [R]. 中航气动院, 1995. 8.
- [4] 科契克 M. 飞机螺旋动力学 [M]. 中国人民解放军空军司令部, 1978. 6.
- [5] 庄开莲, 贺德馨等. 旋转天平试验 [M]. 中国空气动力研究与发展中心情报站, 1995. 12.
- [6] 于彦泽. 旋转流场下的动导数测量相关滤波原理及技术关键的对策 [J]. 气动研究与实验, 2001. 6.