

# 管道旋流中油芯的形成条件与形态研究

孙焕强, 吴应湘, 张军, 马乃庆, 钟兴福

(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京, 100190, Email: [sunhuanqiang@imech.ac.cn](mailto:sunhuanqiang@imech.ac.cn))

**摘要:** 以石油工业为背景的油水流动是典型的液液两相流。对于管道中的两相流动研究主要是充分发展之后的流型、压降等等。本工作则通过实验研究了一种非稳态阶段的两相流动一经过导流片之后一段距离之内的两相旋涡流动。实验划分了不同相含率与总表观流速下的四种流动形态以及压降规律。

**关键词:** 液液两相流动; 旋涡; 压降; 油芯;

## 1 引言

管道中油水两相流动的研究已经取得了很大的进展, 对于水平与竖直管道人们进行了大量工作, 已经绘制了流型图, 研究了流型转换与压降规律等等<sup>[1]</sup>。但是前人的工作大部分都是针对充分发展的管流, 对于两相流体遇到特殊管道条件后流动的演化则较少。这些工作主要集中在管道分叉、转弯等几种。

对于两相 core-annular 流动人们研究的对象主要包括: 旋风分离器<sup>[2]</sup>、石油管道润滑输送<sup>[2]</sup>、肺部支气管中的流动<sup>[3]</sup>、注射器<sup>[4]</sup>。除去旋风分离器外其他的均没有切向流动。

本工作主要通过实验研究了油水两相流过导流片之后流场的发展, 导流段前后压降、core-annular 段压强变化, 稳定性、发散现象。这一工作即有一定的理论意义又有很强的应用前景。实验在力学所多相流实验平台上进行, 管道为内径 50mm 的有机玻璃管。

## 2 物理模型

### 2.1 油芯形态

在两相流的研究中流型是一个很重要的概念, 它是进一步研究的基础, 类似于单相流中层流与湍流的划分。对于充分发展的管道流动, 人们已经画出了流型图。对于本文所研究的问题还没有类似的概念, 因此我们在实验中观察了油芯的具体形态结合水相区形态划分了几类, 这对工程应用有很好的指导意义。

### 2.2 流场

由于两相旋流的复杂性, 对于流场没有很好的理论, 人们应用各种测量手段对其进行了

研究。本研究参考 Erdal 给出的模型<sup>[5]</sup>。首先定义一个截面上的旋流度：周向与轴向动量通量之比，由于模型为半无限长，因此存在相似性，为指数衰减形式。在实验中也确实发现了这一规律<sup>[6]</sup>。切向速度、轴向速度、压强都是旋流度的函数。

### 3 实验装置与方案

实验在力学所多相流实验平台上进行（图 1），共有水平和垂直两种工况，导流片与管道截面夹角有  $45^\circ$  与  $30^\circ$  两种（图 2）。

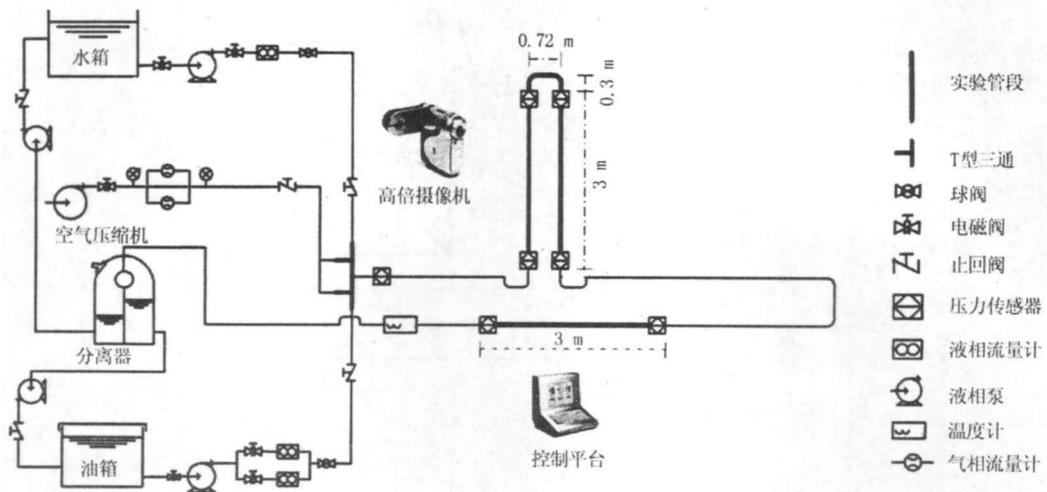


图 1 多相流实验平台

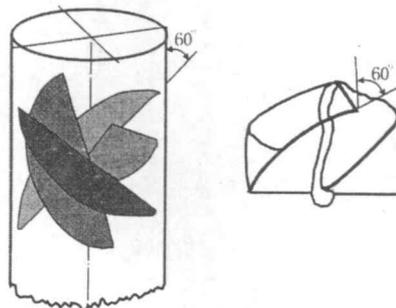


图 2 导流片结构

#### 3.1 实验设计

实验矩阵为含油率与混合表观流速，含油率取 0%，2%，5%，10%，20% 五类；混合表观流速取 0.35，0.5，0.75，1.0，1.25 (m/s) 五类。共 25 个实验点。

#### 3.2 测量手段

水相为电磁流量计，油采用涡轮流量计，霍尼韦尔压力探头测量了下壁面压强。如非特殊说明本文所提到的压强数据均为下壁面压强。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 导流片段前后壁面压强变化

变化分为两部分：首先由于导流片的影响导致压降，其中应包含加速压降和摩擦压降；其次由于切向流动使得壁面上压强大于管道截面平均压强。

第一部分，我们先分析加速压降（图 3）。由于质量守恒，流过导流片前后的轴向平均流速相等，流过导流片后，总速度认为与导流片平行。由此根据伯努利定理

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (v \cdot \cot \theta)^2 \quad (1)$$

考虑到油水两相效应和黏性效应对其做出修正

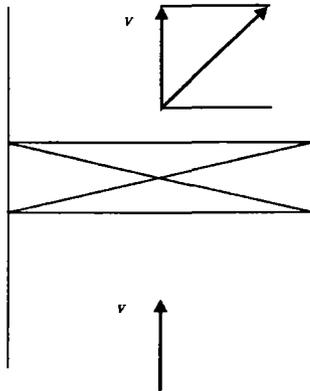


图 3 加速压降示意图

第二部分：压强公式  $p_b - p_c = \int_0^R \rho \frac{v_\theta^2}{r} dr$ ，其中  $p_b$  表示壁面压强  $p_c$  表示轴心压强，可见

其与切向速度的平方成正比。

综上所述，并且考虑含油率的影响总的压降公式

$$\Delta P = \frac{1}{2} k_1 \rho (v \cdot \cot \theta)^2 - k_2 (v \cdot \cot \theta)^2 \quad (2)$$

实验结果显示：

(1) 流型与导流片角度对导流段压降有很大影响。水平与竖直导致入口流型的不同水平情况下主要为分层流动，竖直情况则分散流（具体流型由相含率、管道直径、油的物性参数和表观流速决定）。

(2) 导流片角度对压降有很大影响：竖直情况下导流片为 30 度时流速增大引起的压降甚至超过了离心作用引起的壁面压强增大（图 4）。

(3) 含油率的影响：对于竖直/30 度工况取速度的平方对数据进行了最小二乘法线性拟合（表 1）。

表 1 线性拟合结果

线性拟合			
含油率/%	b	k	R
0	-3578.22	4550.845	0.99725
2	-5452.5	6124.686	0.99705
5	-8499.02	8644.025	0.99696
10	-8145.93	8635.818	0.97867
20	-5135.77	7645.442	0.9949

注: b 截距, k 斜率, R 决定系数

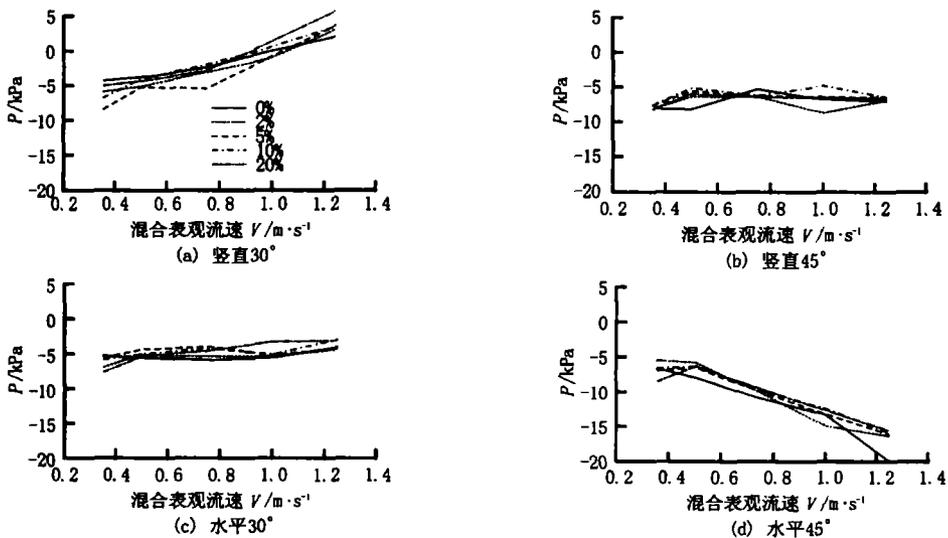


图 4 不同工况下总体趋势

#### 4.2 旋流段压降

旋流段, 实验中所测量位置的压强  $p = A \exp(-\frac{x}{l}) - kx + c$  将其分为两部分, 正常管流部分与旋流引起的壁面压强升高部分。第一部分为线性函数, 第二部分为指数衰减 (图 5)。数据处理结果显示油相对衰减程度有影响: 油相含率的增加使得压降先增大后减小, 存在一个最大压降的含油率。

表观流速对参数的影响: 表观流速越大压降也越大。

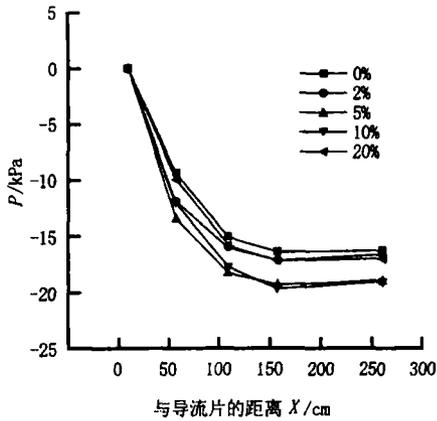


图5 相含率影响压力分布

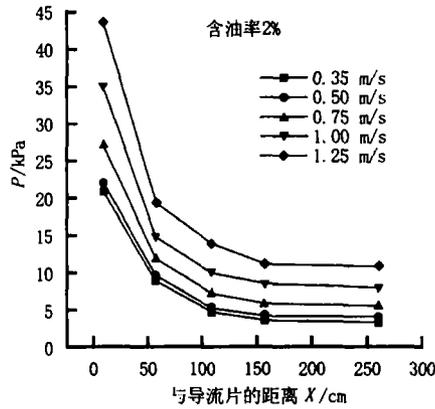


图6 表观流速影响压力分布

#### 4.3 流动形态:

本文所研究的问题是一个空间非稳态问题,所以存在三个变量,含油率、表观流速、空间坐标。这个问题需要大量的实验才能总结出系统的流型图,本工作只是做了一个有益的尝试,所取点较少。定点观察了距离导流片1~1.5m处。实验发现主要分为四种:①油相聚集很好,但油核边界存在动态油滴(记作D/0);②水相中存在微小油滴,油核边界清晰(记作S/0);③油核发生波动凸起部分边界开始模糊(记作N/1);④不存在油水明显分界(记作F)。

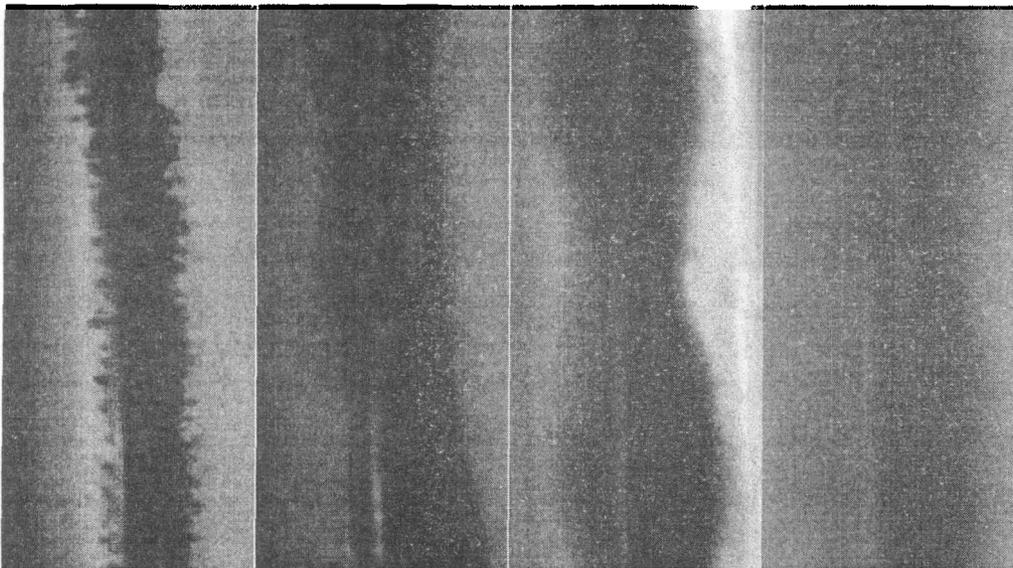


图7 四种流动形态

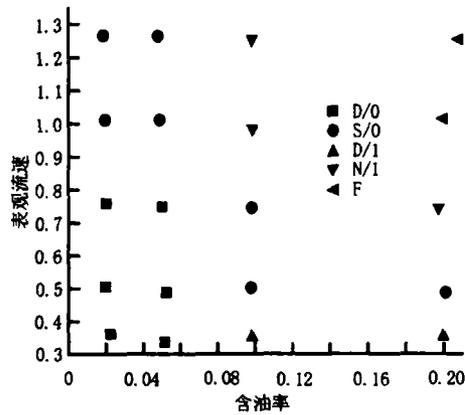


图8 流动形态划分

## 5 结论

(1) 导流段压降与入口流型密切相关, 分层流压降小于分散流。导流片角度的减小压降急剧增大, 而旋流度增加不明显。压降近似与速度平方成线性关系, 含油率增加则其直线斜率增加, 即对速度敏感。

(2) 旋流段壁面压降为线性与指数衰减的组合, 线性部分类似于管流中分散流的压降, 可认为是截面平均压强, 指数衰减部分为旋流引起的壁面压强。油相含率的增加使得压降先增大后减小, 存在一个最大压降的含油率。表观流速越大压降也越大。

(3) 在油核较稳定的中段, 可分为四类流动形态。

## 参 考 文 献

- 1 J. Gonzalo Flores. Oil-water flow in vertical and deviated wells[M]. Thesisi, The University of Texas at Austin, Austin, Texas,2001
- 2 DD Joseph, RBai K P,Chen Y. Y. Renardy Core-annular flows[J]. Annu. Rev. Fluid Mech. 1997. 29:65-90
- 3 Halpern DGrotberg. Surfactant effect on fluid elastic instabilities of liquid lined flexible tube a model of airway closure[J].Trans. ASME J Biomech Engn,1993
- 4 Cao Q,Ventersca AL,Sreenicas KR. Instability due to viscosity stratification downstream of a centerline injector[J].Can J Chem Eng,2003,81
- 5 Erdal FLocal. Measurements and Computational Fluid Dynamic Simulations in a Gas-Liquid Cylindrical Cyclone

Separator[M]. The University of Tulsa. 2001

- 6 Hui Li, Yuji Tomita . Particle velocity and concentration characteristics in a horizontal dilute swirling flow pneumatic conveying Powder Technology , 2000,107: 144–152.
- 7 P Angeli, GF Hewitt .Flow structure in horizontal oil-water flow International Journal of Multiphase Flow 26 2000

## **Formation conditions and pattern of oil-core in oil-water swirling pipe flow**

SUN Huan-qiang, WU Ying-xiang, ZHAN Jun, MA Nai-qing, ZHONG Xing-fu

(The Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering Institute of Mechanics.CAS, Bei Jing, 100190.

Email: [sunhuanqiang@imech.ac.cn](mailto:sunhuanqiang@imech.ac.cn))

**Abstract:** The oil-water flow had the background of oil industry is the typical Liquid-Liquid two-phase flow. The most work of two-phase flow in pipe is the full developed flow, the flow pattern, pressure drop and so on. In contrast, our work is a experiment sturdy about no-stable two-phase flow —The two phase swirl flow black of the conductor vane. we divide the four flow patterns under different the oil volume fraction and surface flow velocity.

**Key words:** Liquid-Liquid two-phase flow, swirling flow, pressure drop ,oil-core.