

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2012.02.008

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

(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)

摘要: 以石油工业为背景的油水流动是典型的液液两相流。管道中的两相流动研究的主要内容是充分发展之后的流型和压降等。此文通过实验研究了一种非稳态阶段的两相流动—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表观流速下的流动形态, 研究了导流片前后的压降规律。

关键词: 液液两相流动; 旋涡; 压降; 油芯;

中图分类号: O359+.1

文献标识码: A

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

SUN Huan-qiang, WU Ying-xiang, ZHANG Jun, MA Nai-qing

(The Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The oil-water flow with the background of petroleum industry is the typical Liquid-Liquid two-phase flow. The most previous works is the study of the full developed flow: the flow pattern, pressure drop and so on. In contrast, in this work a experiment sturdy was done about no-stable two-phase flow—The two phase swirl flow black of the conductor vane. Four flow patterns under different kinds of oil volume fraction and surface flow velocity were divided.

Key words: liquid-liquid two-phase flow, swirling flow, pressure drop, oil-core

* 收稿日期: 2011-05-30(2011-11-02 修改稿)

作者简介: 孙焕强(1985 -), 男, 河北省涿州市人, 硕士研究生.

Received: May 30, 2011 (Revised November 2, 2011)

Biography: SUN Huan-qiang (1985-), Male, Master Candidate.

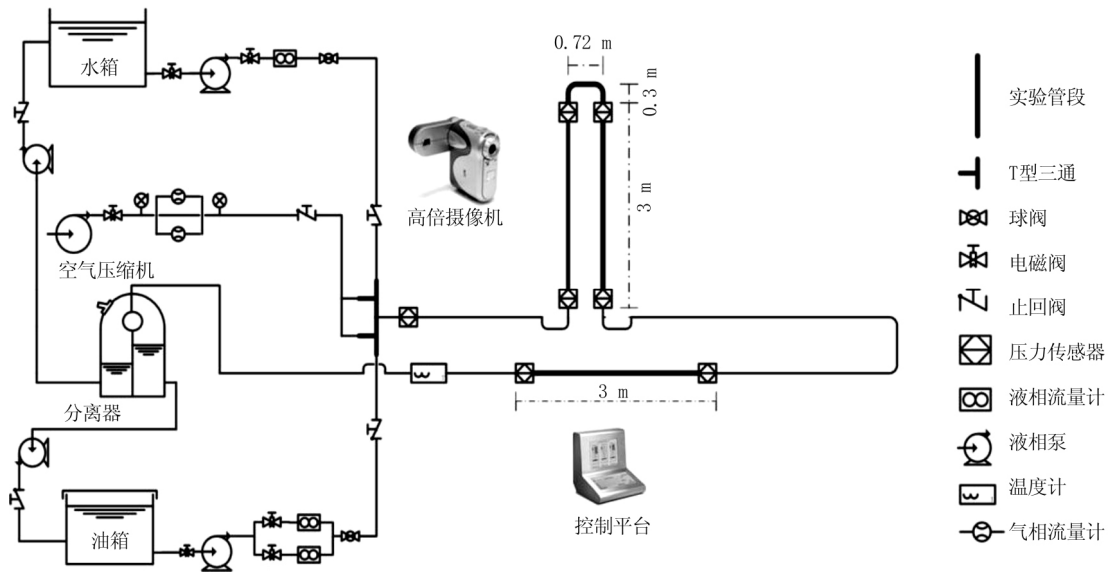


图 1 实验流程图
Fig.1. Experiment procedure

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, 人们已做了大量工作, 绘制了流型图, 研究了流型转换与压降规律等^[1]。但是以前的工作大部分都是针对充分发展的管流, 对于两相流体在特殊管道内的流动演化则研究较少(研究主要集中在管道分叉和转弯等)。

对于两相 core-annular 流动, 人们研究的对象主要包括: 旋风分离器^[2]、石油管道润滑输送^[2]、肺部支气管中的流动^[3]和注射器等^[4]。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经过导流片之后流场的发展、导流段前后的压降、core-annular 段压强变化、稳定性和发散现象。这一工作既有一定的理论意义又有很强的应用前景。本文的实验是在中国科学院力学研究所的多相流实验平台上进行的, 管道为内径 50 mm 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, 这类似于单相流中的层流与湍流的划分。对于充分发展的管道流动, 人们已经画出了流型图, 但对于本文所研究的问题还没有类似的概念。我们在实验中观察了油芯的具体

形态, 并结合水相区形态对其进行了划分。本工作对工程应用将有很好的指导意义。

2.2 流场

由于两相旋流的复杂性, 目前对还没有很好的理论, 人们主要还是应用各种测量手段对其进行研究。Erdal (2001) 给出了一个模型^[5], 此模型首先把周向与轴向动量通量之比定义为一个截面上的旋流速度。由于模型为半无限长, 因此存在相似性, 旋流速度呈指数衰减形式。在实验中也确实发现了这一规律^[6]。切向速度、轴向速度和压强都是旋流速度的函数。

表 1 物性参数
Table 1. Physical parameters

流体名称	物性参数	
	粘性 (20°C) / (mPa·s)	密度 / (kg/m ³)
白油	135	0.81×10 ³
水	100	0.98×10 ³

表 2 线性拟合结果
Table 2. Linear fitting results

含油率 (%)	b	k	R
0	-3 578.22	4 550.845	0.997 25
2	-5 452.5	6 124.686	0.997 05
5	-8 499.02	8 644.025	0.996 96
10	-8 145.93	8 635.818	0.978 67
20	-5 135.77	7 645.442	0.994 9

注: b 为截距, k 为斜率, R 为决定系数

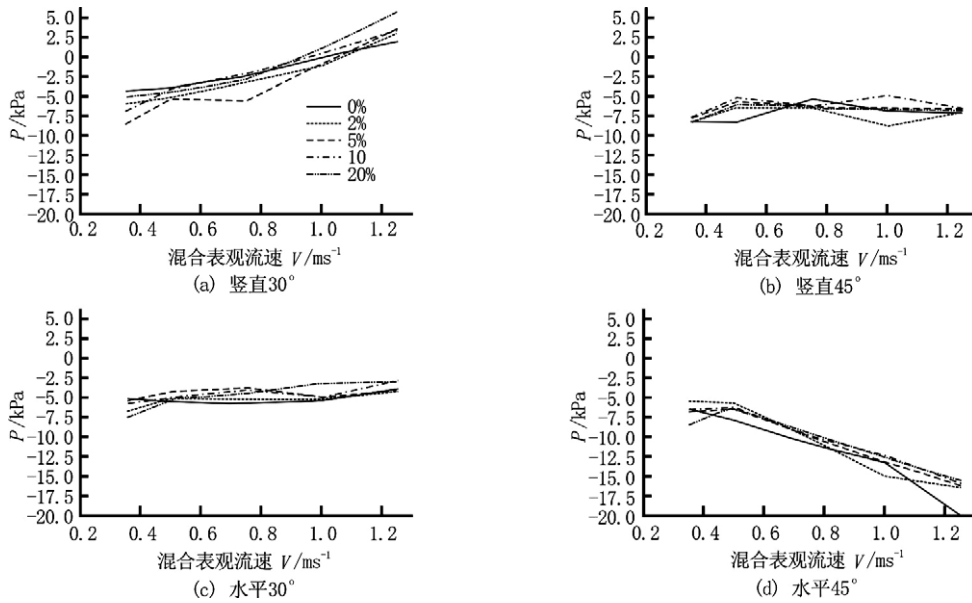


图2 不同含油率情况下导流片角度对压降的影响

Fig.2. Influence of the conductor vane angle on the pressure drop in different oil volume fractions

3 实验装置与实验方案

实验是在中国科学院力学研究所的多相流实验平台上进行的,实验流程见图1,共有水平和竖直两种工况,导流片与管道截面夹角有45度与30度两种。

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%和20%五种,混合表观流速取0.35、0.5、0.75、1.0和1.25(m/s)五种,共25个实验点。

3.2 测量手段

水相流量用电磁流量计测量,油相流量用涡轮流量计测量,下壁面压强用霍尼韦尔压力探头测量。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的变化

导流片段前后壁面压强的变化分为两部分:第一部分是由于导流片的影响导致的压降,其中包含加速压降和摩擦压降;另一部分是由于切向流动使得壁面上的压强大于管道截面平均压强所造成。

我们先分析加速压降。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

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

再考虑到油水两相效应和粘性效应对其做出修正。第二部分,考虑压强公式

$$p_b - p_c = \int_0^R \rho \frac{v_\theta^2}{r} dr$$

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,可得总的压降公式为

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

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,竖直情况则为分散流(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) 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,其结果见表2。

(3) 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,见图2。

4.2 旋流段压降

实验中在旋流段测量位置所测得的压强 $p =$

$$A \exp\left(-\frac{x}{t}\right) - kx + c$$

分为两部分, 即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 3 显示了含油率对压力分布的影响。可以看到, 油相含率的增加使得压降先增大后减小, 故存在一个最大压降的含油率。

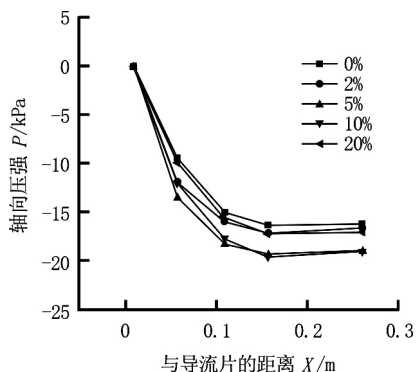


图 3 含油率对压力分布的影响

Fig.3. Influence of the oil volume fraction on pressure distribution

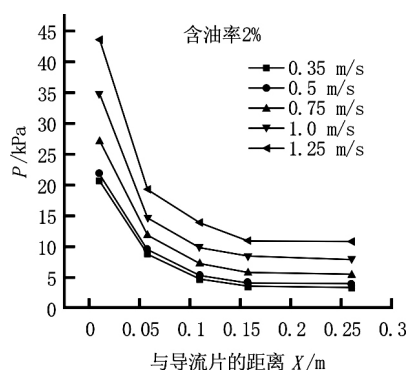


图 4 表观流速对压力分布的影响

Fig.4. Influence of the superficial velocity on pressure distribution

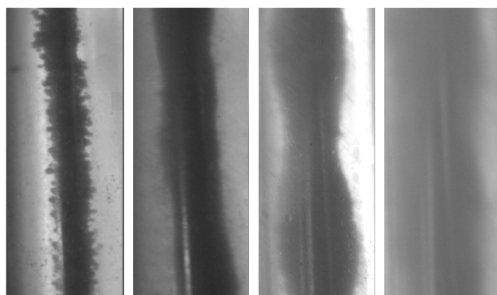


图 5 四种流动形态

Fig.5. Four kinds of flow pattern

图 4 显示了表观流速对压力分布的影响。可以看到, 表观流速越大压降也越大。

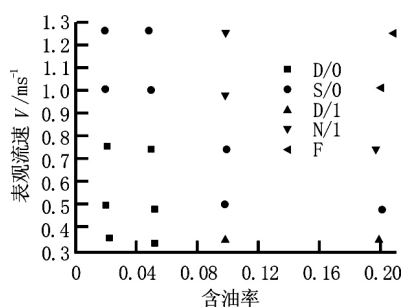


图 6 流动形态的划分

Fig.6. The division of flow pattern

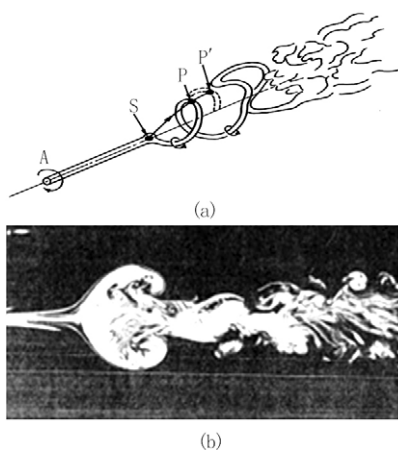


图 7 两种失稳形式示意图^[10]

Fig.7. Schematic of the two kinds of instability form^[10]

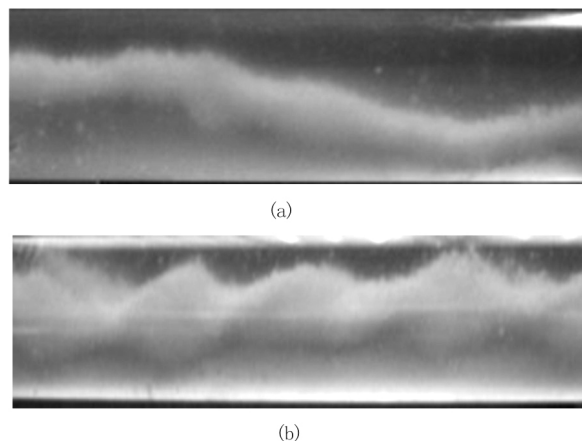


图 8 实验照片 (位于扭曲破碎前)

Fig.8. The photo of experiment (in the front of screw breakdown)

从图 3 中可以看到壁面压强随含油率的增加先增大后减小。含油率对壁面压强的影响主要体现在几个方面: (1) 含油率对流型有显著影响 (虽然强旋流对流型有一定限制作用, 但这种影响还是不可避免的), 而流型不同会导致压降规律的变化; (2) 含油率的变化必然会导致混合等效粘度的变化 (对于特定的流型, 其演化规律学者们已有一些研究成果, 但还很不完善, 这还有待进一步深入研究); (3) 由于本问题含油率影响混合密度, 因

表3 破碎形式与振动频率^[11]
Table 3. Breakdown forms and vibration frequencies

Re	Ω	破碎类型	测量站点的轴像位置 (cm)	f_{exp} (Hz)	f_{th} (Hz)	f_{th} / f_{exp}
11 480	1.07	轴对称	7.9	4.7	5.5	1.2
11 480	1.07	轴对称	13.2	3.1	3.5	1.1
11 480	0.79	Spiral	19.3	4.7	5.2	1.1
14 100	0.88	轴对称	8.4	17.2	14.4	0.8
14 100	0.88	轴对称	11.7	6.3	7.6	1.2
14 100	0.88	轴对称	15.5	4.7	6.5	1.4
14 100	0.74	Spiral	19.3	7.8	7.5	1.0
20 660	0.82	轴对称	11.7	9.8, 3.1	11.6	1.2, 3.7
20 660	0.82	轴对称	15.5	7.0, 3.1	8.5	1.2, 2.7

表4 涡破碎的实验结果
Table 4. The experiment results of vortex breakdown

编号	表观流速 (m/s)	含油率 (%)	类型	摆动 (cm)	弯曲 (cm)	破碎 (cm)
1	0.34	2.21	发散	-	-	234~238
2	0.51	1.95	发散	-	-	260~265
3	0.75	2.05	发散	-	-	310~320
4	1.02	2	扭曲	267	292	355
5	1.27	2.11	扭曲	287	305	386
6	0.35	5.02	发散	-	-	320
7	0.5	4.98	发散	-	-	326
8	0.75	4.85	扭曲	297	335	381
9	1	4.86	扭曲	302	349	404
10	1.25	5.12	扭曲	281	315	353

此由旋流产生的离心压强有很大不同。从以上分析可看出随着含油率是增加,开始时由于等效粘度增加而导致压降增加,增加到一定程度之后,密度变化起主要作用,故压强变化便趋于平缓。

4.3 流动形态

本文所研究的问题是一个空间非稳态问题,所以存在三种变量,即含油率、表观流速和空间坐标,因此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。本实验定点观察了距离导流片 1~1.5 m 处。实验发现流态主要分为四种:(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 5 显示的

是这四种流态,图 6 是流态的划分。

图 5 中第一部分为动态油滴型核心。在这种流动条件下,油水界面上由于剪切不稳定会形成界面模态,生成油滴,因此这是动态的过程。而油滴又在压差作用下有合并入核心的趋势。油滴的产生和消失动态平衡。第二部分由于剪切较强形成的水滴很小,与水的跟随性好。此时由于油核较细和界面处速度梯度较小,剪切失稳现象没有发生。第三部分与第二部分相近,但油核直径大,因而速度梯度较大,界面易失稳,入口的不对称性演化为长波。第四部分为油水充分混合区,故无明显核心。

4.4 失稳形式

涡核的失稳破碎是工程和自然界中的旋涡流所特有的一种现象。如图 7 所示,涡破碎的图像主要可分为两种形态:轴对称泡状破碎,它以在涡轴

上含有一个驻点以及紧接的涡核突然膨胀的回流区为主要特征; 螺旋形破碎, 它以涡轴的突然扭曲但没有回流区为主要特征(图8为位于扭曲破碎前的实验照片)。这一问题十分重要但也非常复杂, 现在还没有一个普适的理论可以解释复杂多样的涡破碎现象。Benjam 曾提出轴对称流动的共轭态(conjugate state)理论, 因为它没有考虑色散波, 故只适用于无粘柱状涡且不完善。现在许多人认为涡破碎与绝对和对流不稳定性有关。Garg 和 Leibovich^[11]测定了两种破碎形态, 其结果见表3。

对于两相旋涡流破碎则很少有人研究, 我们在实验中对这一现象进行了观察。与单相旋涡类似, 两相涡的破碎也存在类似的两种形式, 见表4。

5 结论

根据本文的研究。可得如下结论:

(1) 导流段压降与入口流型密切相关, 其中分层流压降小于分散流压降。导流片角度的减小导致压降急剧增大, 而旋流度的增加则不明显。压降近似与速度平方成线性关系, 且含油率的增加使其直线斜率增大, 即压降对速度更敏感。

(2) 旋流段壁面压降为线性与指数衰减的组合, 其中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, 而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, 故存在一个最大压降的含油率。表观流速越大则压降也越大。

(3) 在油核较稳定的中段距入口 50 cm 处进行的流型观察和绘制的初步流形图表明, 流动形态可分为四类。

下一步工作将进行大量的补充实验, 以进一步画出不同位置流型图, 给出旋涡失稳破碎的位置及其受影响的参数。

参 考 文 献:

[1] FLORES J G. Oil-water flow in vertical and deviated wells[D]. The University of Texas at Austin, Austin, USA, 2001.

- [2] JOSEPH D D, BAI R, CHEN K P, et al. Core-annular flows[J]. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1997, 29: 65-90.
- [3] HALPERN D, GROTBORG H D. Surfactant effect on fluid elastic instabilities of liquid lined flexible tube a model of airway closure[J]. *Trans. ASME J., Biomech. Engng.*, 1993, 115(3): 271-277.
- [4] CAO Q, VENTERSCA A L, SREENICAS K R. Instability due to viscosity stratification downstream of a centerline injector[J]. *Can. J. Chem. Eng.*, 2003, 81(5): 913-922.
- [5] ERDAL F. Local measurements and computational fluid dynamic simulations in a gas-liquid cylindrical cyclone separator[D]. The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, USA, 2001.
- [6] TOMITA Y, LI H. Particle velocity and concentration characteristics in a horizontal dilute swirling flow pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2000, 107: 144-152.
- [7] 程林, 田茂诚, 陆煜. 圆形管道内自由旋流衰减的理论分析[J]. *水动力学研究与进展, A辑*, 1995, 10(6): 673-678.
- CHEN Lin, TIAN Mao-cheng, LU Yu. The attenuation of turbulent swirl flow in the circular pipes[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. A*, 1995, 10(6): 673-678.
- [8] 李琳, 邱秀云, 龚守远, 等. 浑水水力分离清水装置弱旋流场特性分析[J]. *水动力学研究与进展, A辑*, 2007, 22(4): 520-528.
- LI Lin, QIU Xiu-yun, GONG Shou-yuan, et al. The study on weak swirl flow field characteristics of a turbid water hydraulic separator[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. A*, 2007, 22(4): 520-528.
- [9] ANGELI P, HEWITT G F. Flow structure in horizontal oil-water flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26(7): 1117-1140.
- [10] ESCUDIER M. Vortex breakdown observations and explanations[J]. *Prog. Aerospace Sci.*, 1988, 2(4): 189-196.
- [11] GARG A K, LEIBOVICH S. Spectral characteristics of vortex breakdown flowfields[J]. *Phys. Fluids*, 1979, 22(11): 2053-2064.