

# 水平管道中油水旋流稳定性研究

孙焕强, 许晶禹, 张军, 吴应湘, 郭军

(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:** 密度不同的两相旋流运动在中心处形成轻相的核心, 在水平流动下由于重力效应会出现不稳定现象, 而这一不稳定现象在利用离心原理进行的相分离中是有害的应尽量避免。因此本研究采用线性稳定性方法对这一问题进行了分析, 得到了一个简单的稳定性准则, 并且与实验数据进行了对比。

**关键词:** 液液两相流动; 旋流; 流动稳定性; 油水分离;

## 1 引言

长期以来, 流动稳定性一直是流体力学的中心问题之一。在自然界, 只有稳定的流动状态才可以维持, 从而容易被观察到, 而一直流动即使它是流体控制方程的精确解, 如果它不是稳定的, 基本上是观察不到的。经过众多流体力学工作者的努力, 稳定性研究取得的很大进展, 尤其是平行流的稳定性, 已日趋成熟, 但旋转流的稳定性相对发展较慢<sup>[1]</sup>。而在工程应用中大量出现旋流运动, 如旋风分离器<sup>[2]</sup>、搅拌器等等。

对于分离器中两相旋转流动已有了一些研究结果, 程林等研究了圆形管道内自由旋流衰减的理论<sup>[3]</sup>, P. Angeli 系统研究了气液两相旋流<sup>[4]</sup>, 孙焕强等对油水两相在旋流器中的流动进行了研究观察了其中的涡不稳定现象<sup>[5]</sup>。与单相流动相比, 界面现象无疑是一个难点, 对其 K-H 稳定性分析已有很长的历史, 最近的研究可参考 Emma 与 Anne 的工作<sup>[6]</sup>。

本研究针对油水柱形分离器中的两相旋流运动, 简化了物理模型, 将其速度分布看做类刚体旋转, 对于黏性将其考虑为一个黏性边界层。对这一简单的基本流场, 运用稳定性分析方法得到了一个稳定准则。

此外通过实验测量了油芯的直径与壁面压强变化。通过压强计算得到旋流强度, 从而与理论结果进行对比。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 简化模型

为了分析方便, 我们将两相旋流流场近似看做类刚体旋转, 在壁面附近则存在一个边界层, 其厚度与  $Re^{-1/2}$  成正比。模型的示意图与速度分布图 (图 1 和图 2)。

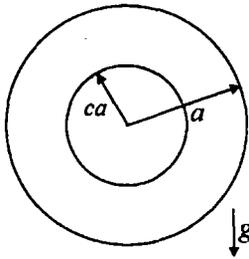


图 1 模型示意图

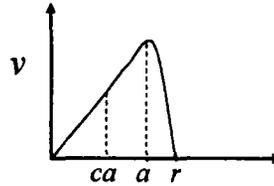


图 2 速度分布示意图

### 3 理论分析

柱坐标下的基本方程为:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + g \cos \theta \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + g \sin \theta \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中:  $u, v, w$  为径向, 切向与轴向速度。在此我们忽略黏性项, 认为黏性只是在管壁附近产生一个边界层。如果我们适当选取坐标系, 使得轴向速度为 0, 则我们可以得到如下的基本流场:

$$\begin{cases} u = 0, v = \Omega r, w = 0 \\ p_w = \frac{1}{2} \rho_w \Omega^2 (r^2 - c^2 a^2) + \rho_w g r \cos \theta \end{cases} \tag{2}$$

为了分析方便, 对其进行无量纲化:

$$\begin{cases} \eta = r / a \\ u = \Omega a (u_1 + u_2) \\ v = \Omega a (\eta + v_1 + v_2) \\ w = \Omega a w_2 \\ p_w = \frac{1}{2} \rho_w \Omega^2 [(r^2 - c^2) + p_1 + p_2] \\ \quad + \rho_w g a \eta \cos \theta \end{cases} \tag{3}$$

其中  $u_1, v_1, p_1$  表示由重力引起的油芯运动所带来的扰动, 而角标为 2 的量则是高频的脉动, 如果取平均, 则可消去。即将(3)带入柱坐标下的 N-S 方程取时间平均得到(4):

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial \theta} - 2v_1 = -\frac{1}{2} \frac{\partial p_1}{\partial \eta} \\ \frac{\partial v_1}{\partial \theta} - 2u_1 = -\frac{1}{2\eta} \frac{\partial p_1}{\partial \theta} \\ \frac{\partial p_1}{\partial \xi} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \eta}(\eta u_1) + \frac{\partial v_1}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} u_1 = 0, \quad \eta = 1 \\ u_1 = \frac{\partial \delta_1}{\partial \theta}, \quad \eta = c \\ p_1 = -2c \frac{g}{\Omega^2 a} \cos \theta - 2c \delta_1, \quad \eta = c \end{cases} \quad (5)$$

如果将扰动设成简单形式如下:

$$\begin{cases} \delta_1 = \Delta \cos \theta \\ p_1 = P(\eta) \cos \theta \\ u_1 = \chi(\eta) \sin \theta \\ v_1 = \phi(\eta) \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

则方程有满足边界条件的如下解析解:

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{1}{2} \frac{g}{\Omega^2 a} (1 - c^2) \cos \theta \\ p_1 = -c^2 \frac{g}{\Omega^2 a} \eta \left( \frac{3}{\eta^2} - 1 \right) \cos \theta \\ u_1 = -\frac{c^2}{2} \frac{g}{\Omega^2 a} \left( \frac{1}{\eta^2} - 1 \right) \sin \theta \\ v_1 = \frac{c^2}{2} \frac{g}{\Omega^2 a} \left( \frac{1}{\eta^2} + 1 \right) \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

采用 Phillips 研究圆柱水流时给出的一个稳定性判据<sup>[6]</sup>:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \eta}\right)_{\theta=\pi} = \frac{1}{2} \rho \Omega^2 a^2 \left\{ 2\eta - \frac{g}{\Omega^2 a} \left[ \frac{3c^2}{\eta^2} + (2+c^2) \right] \right\} > 0 \quad (8)$$

可得到如下简单的稳定性条件:

$$\frac{g}{\Omega^2 a} < \frac{c}{3} \quad (9)$$

## 4 实验对比

这一稳定性准则虽然可以说明试验中观察到的基本现象,但由于模型过于简单因此缺点是明显的。在这一模型中没有包含油水密度差,这是一个很大的缺憾,这源于我们在基本假设中假定油芯刚体旋转,取中心处压强为基准,则界面压强为一定值,我们将其选为参考点即压强为零点。这一假设就抹掉了密度的差异。

此外这一模型未考虑界面处速度梯度,而实际试验中油芯表面会产生油滴,这显然是由于界面处剪切不稳定形成的。

模型与实验的对于是容易做到的,在实验中我们可以观测到的量有:油芯直径、壁面压强。由这两个量我们可以得到旋流强度  $\Omega$  的数值:

$$p = \frac{1}{2} \Omega^2 a^2 \left[ \rho_o c^2 - \rho_w (1-c^2) \right] \quad (10)$$

在压强数据的拟合上我们采用  $p = A(1 - e^{-kx})$  的形式。这样就将实验数据与稳定性曲线联系起来。但经过计算发现实验观察到的稳定长度数值一般小于模型的计算值。

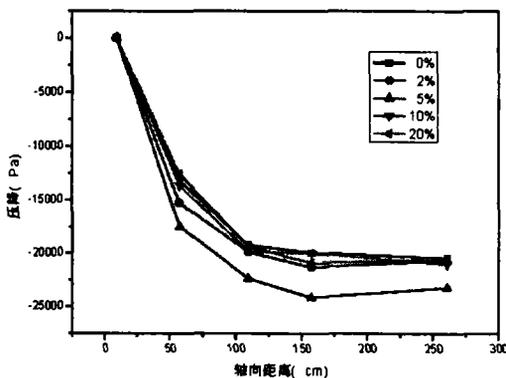


图 3 不同含油率条件下的压降

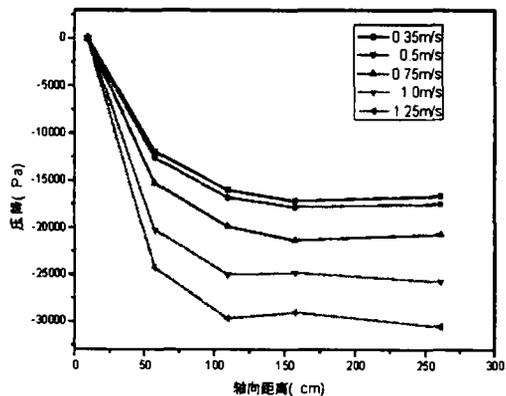


图 4 不同表观流速条件下的压降

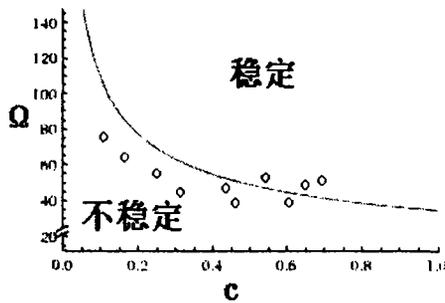


图 5 实验结果与理论对比

## 5 结论

本研究从刚体旋转形式的流场出发得到了一个旋流的稳定性条件，这主要是考虑重力的影响下的稳定性。在假设中将其余形式的扰动略去，这也导致了一定的偏差。实验结果在中等大小的  $c$  值处于理论相差不多。当  $c$  接近与 1 的时候，由于边界层的影响变得重要本文的前提假设便不再成立。当  $c$  趋于 0 时会发生油芯的扭曲，轴向的变化开始影响其稳定性，而我们在假设中没有考虑轴向扰动与速度的影响。

综上所述，本文所得稳定条件的适用范围为中等油芯直径。

## 参 考 文 献

- 1 尹协远, 孙德军. 旋涡流动的稳定性. 北京国防工业出版社, 2003.
- 2 J. Gonzalo, Flores. Oil-water flow in vertical and deviated wells. Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2001
- 3 程林, 田茂诚, 陆煜. 圆形管道内自由旋流衰减的理论分析. 水动力学研究与进展, A辑, 1995, 10(6): 673-678.
- 4 P Angeli, G F Hewitt. Flow structure in horizontal oil-water flow. International Journal of Multiphase Flow 2000, 26(7): 1117-1140.
- 5 孙焕强, 吴应湘, 张军等. 管道旋流中油芯的形成条件与形态研究. 水动力学研究与进展, A辑, 2012, 27(2): 168-173.
- 6 T Emma, J Anne. Instability of a viscous interface under horizontal oscillation. Physics of Fluids, 2007, 19 (092102): 1-14.
- 7 O Phillips. Centrifugal wave. Journal of fluid mechanics, 7(03): 340-352.

## The Stability of Oil-water Swirling Flow in Horizontal Pipe

SUN Huanqiang, XU Jingyu, ZHAN Jun, WU Yingxiang, GUO Jun

(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 swirling flow of two-phase had different densities will form a light phase core in the center of the pipe. If the pipe is horizontal, the core will be instable under gravity effect which is harmful in the phase separation which employs centrifugal principle. So, in this article, we investigate this issue by linear stability analysis methods. We have got a simple stability criterion and compared it with experimental data.

**Key words:** Liquid-Liquid two-phase flow, swirling flow, Flow stability. Oil-water separate