

围油栏中油膜受剪切作用的稳定性分析

赵文谦 江 涌 吴至维

(成都科技大学)

摘 要

本文通过对油膜稳定性实验的观察,提出了油膜与水流速度分布的假设,在此基础上应用Orr-Sommerfeld稳定性方程给出了油膜失稳临界流速的求解方法,得出了油膜稳定性判别条件,同时还给出了油膜厚度与水流速度关系的计算公式,且进行了实验验证。

围油栏作为一种控制和处理海洋溢油的工具已在实际中得到广泛应用。实践证明,并非任何海况和水流条件下围油栏都能有效地工作。当水流速度超过一定值时,围油栏内油膜在水流的剪切作用下会失去原有的分层状态而与水流混掺形成油滴,且在水流的带动下越过围油栏向水中扩散,这种情况就称为油膜失去了稳定性。因此,围油栏只有在水流速度相对较小,海面较平静的情况下才能有效地工作。问题的要害是怎样确定油膜的失稳条件。

实验观察表明^[1],随着水流与油膜之间流速差的加大,油膜与水的交界面上会出现界面波,当流速差超过某一定值时,界面波变得非常陡峭进而破碎,使油水混掺形成油滴,这就是油膜失稳的机理。

最早研究油膜稳定性的是Wicks^[1],他给出了一个油膜失稳临界流速的经验式。之后Lindermuth等^[2]用Kelwin Helmholtz稳定性理论对油水界面波的稳定性进行了研究,给出了相应的临界流速计算公式。他们在分析时把油水均视为半无限域,忽略了油膜厚度对稳定性的影响,显然与实际不符。为了分析油膜厚度在保持油膜稳定性中所起的作用,Jones^[3]引用Kelvin-Helmholtz稳定性方程,用摄动法给出了油膜失稳的临界流速判定条件。无论是Jones还是Lindermuth等的方法都是基于理想流体假设,忽略了油水的粘性作用。作者通过对油膜稳定性实验的观察,提出油膜与水流速度分布的假设,且在此基础上用描述真实流体的Orr-Sommerfeld稳定性方程对油膜的稳定性进行了分析,在考虑了油的粘性、比重、油膜厚度等多种参数情况下给出了油膜稳定性临界流速的求解方法。本文提出了油膜失稳的原因与一定水流速度相应的油膜厚度达不到稳定性所要求的油膜厚度。文中导出了描述油膜厚度与水流速度关系的解析式,还进行了实验验证。

本文于1989年1月20日收到,修改稿于1989年9月28日收到。

[1] 江、涌,石油向水下扩散的研究,1948。

一、水流速度与油膜厚度的关系

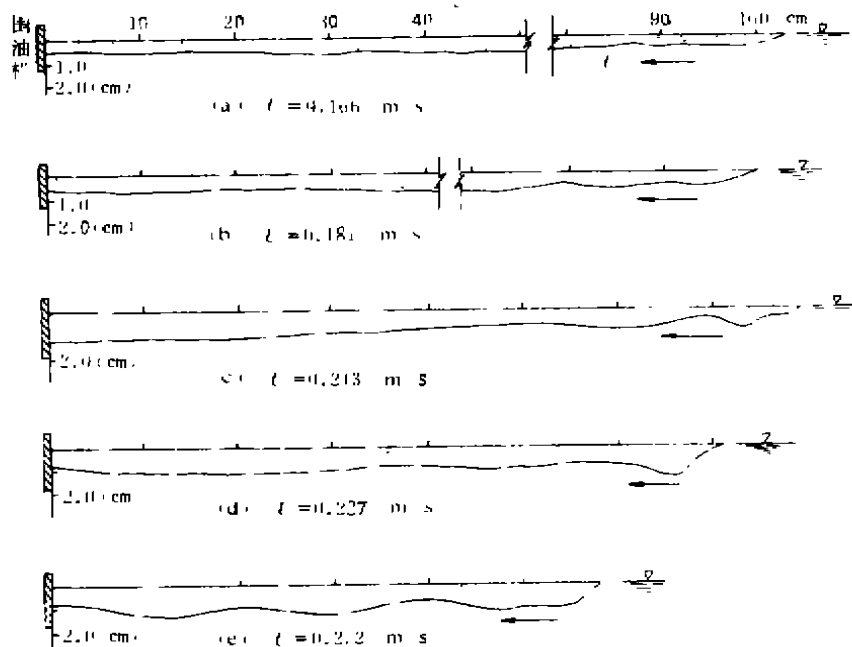


图1 实测水流速度与油膜厚度的关系

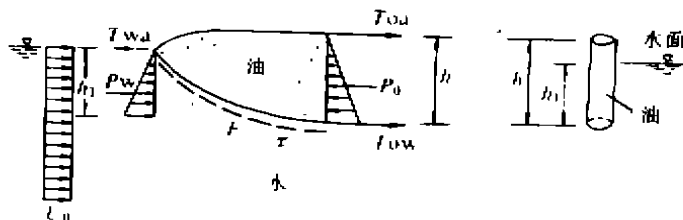


图2 油膜头部的受力分析

图1是作者通过实验测到的油膜形状和尺寸在不同流速情况下的变化。从图可看出，随水流速度的增大，油膜变厚，且交界面变得越不稳定，形成了很多界面波。

取油膜头部作为分析对象(图2所示)，作用在脱离体上的力有水压力 P_w 、油压力 P_o 、水流所产生的阻力 F 、气水界面张力 T_{wa} 、气油界面张力 T_{oa} 和油水界面张力 T_{ow} ，这些力在 x 方向平衡，即：

$$P_o - P_w - F + T_{wa} - T_{oa} - T_{ow} = 0. \tag{1}$$

令展开系数 $S = T_{wa} - T_{oa} - T_{ow}$ ，且注意到 $h_1 = (\rho_o - \rho_w)h$ ，具体写出各力的表达式后式(1)可变成：

$$g(\rho_w - \rho_o)h^2 - C_D \rho_w U^2 h - 2 \frac{\rho_w}{\rho_o} S = 0,$$

式中· ρ_o 和 ρ_w 分别为油和水的密度； C_D 为油膜头部的阻力系数； U 为水流速度； h 为油膜厚度； g 为重力加速度。上式对 h 的解为

$$h = \frac{C_D \rho_w U^2 \pm \sqrt{C_D^2 \rho_w^2 U^4 - 8gS(\rho_w - \rho_o) \rho_w / \rho_o}}{2g(\rho_w - \rho_o)}, \quad (3)$$

对石油而言 $S = 0$ ，也就是说考虑表面张力的油膜厚度小于不考虑表面张力的厚度。随着 S 的增大， h 应逐渐变小，因而上式应取正号，即

$$h = \frac{C_D \rho_w U^2 + \sqrt{C_D^2 \rho_w^2 U^4 - 8gS(\rho_w - \rho_o) \rho_w / \rho_o}}{2g(\rho_w - \rho_o)}. \quad (4)$$

一般情况下，当流速较大时，上式中根号内的前项比后项约大一个数量级。由于确定界面张力特性比较困难，在应用时可略去表面张力项，用综合阻力系数 C'_D 来调整由于忽略表面张力项后所引起的误差，这样式(4)可化简为

$$h = \frac{C'_D \rho_w U^2}{g(\rho_w - \rho_o)} \quad (5)$$

由上式可见，油膜厚度与流速平方成正比。

作者实验测定了油膜厚度与水流速度的关系，目的在于确定综合阻力系数 C'_D 。将实测结果点绘于图3中。由此可见，随着雷诺数的增加，油膜的综合阻力系数 C'_D 逐渐减小。这一规律与固体绕流的结果相似，但 C'_D 值与固体绕流的阻力系数相比较小，这是因为油膜随水流速度的增加其形状有变成流线形的趋势，从而减小了油膜所受的阻力。

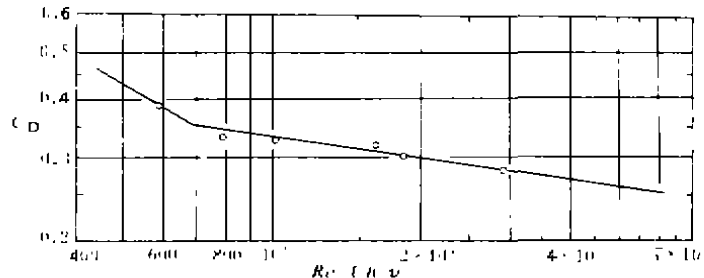


图3 油膜综合阻力系数 C_D 随油膜雷诺数的变化

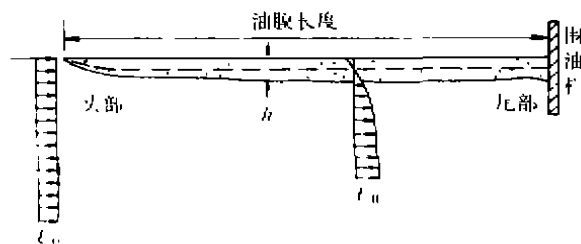


图4 油膜稳定性分析示意图

二、油膜的稳定性分析

(一) 物理图像

对于图 4 所示的油水分层流,在油水界面处给定一初始扰动波,如果扰动波逐渐增长,则油膜就不稳定,反之则稳定。

实验发现,一旦水流速度 U_0 给定,油膜的长度和厚度就不再变化,油膜相对静止(如图 4)。但是,由于油和水的粘性,油膜的下半部分受水的拖动而向油膜尾部流动;为保持油膜长度和厚度恒定不变,油膜上半部分的油势必向相反方向流动,因而在油膜中间必然有一个流速为零的层,把油膜分为上下两层,上层向油膜头部流动而下层向油膜尾部流动。

一般情况下油膜长度方向尺寸远远大于厚度,因而在稳定性分析时可忽略油膜头部和尾部的影响,取其中的一部分如图 5 所示来分析,于是,在保证边界条件和流速分布不变的情况下可用图 6 所示的平面流动模型来代替原来的流动模型(图 5)。

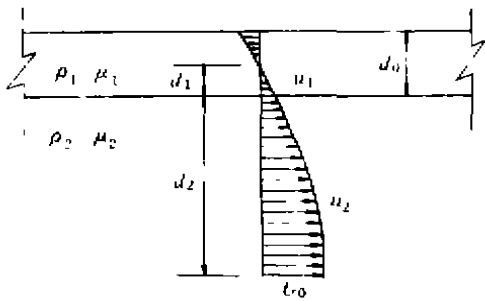


图 5 油膜和水的速度分布

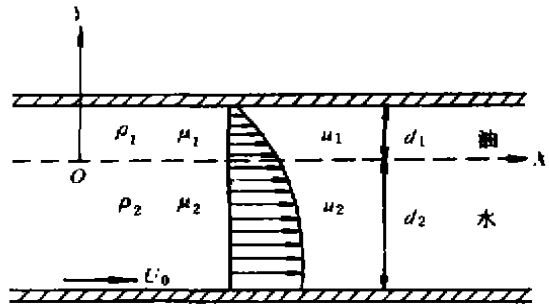


图 6 分析油膜稳定性示意图

(二) 流动模型的流速分布

流动模型的流速分布可从 Navier-Stokes 方程导出,对图 6 所示的坐标系 N-S 方程可写成

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{u}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \right), \quad (6)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial Y} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{u}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial Y^2} \right), \quad (7)$$

因 $v=0$, $u=f(Y)$, 所以上两式可简化为

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \mu \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2}, \quad (8)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Y}. \quad (9)$$

式 (9) 说明 P 仅为 x 的函数, 为此可令

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{dP}{dx} = k = \text{const.}, \quad (10)$$

代入式 (8) 后可得

$$\frac{d^2 u}{dY^2} = -\frac{k}{\mu}. \quad (11)$$

引入无量纲坐标和流速

$$x = \frac{X}{d_1}, \quad y = \frac{Y}{d_1}, \quad (12)$$

$$U = \frac{u}{U_0},$$

则式 (11) 的无量纲式为

$$\frac{d^2 U}{dY^2} = -\frac{k d_1^2}{\mu U_0}, \quad (13)$$

上式中 U 取 $U_1 = u_1/U_0$, μ 取 μ_1 时代表上层油的流速微分方程; U 取 $U_2 = u_2/U_0$, μ 取 μ_2 时代表下层水流的流速微分方程, 边界条件及油水分界面的连续性条件为:

$$\left. \begin{aligned} u_1 = 0 \text{ 或 } U_1 = 0 & \quad \text{当 } Y = d_1 \text{ 或 } y = 1 \text{ 时} \\ u_2 = U_0 \text{ 或 } U_2 = 1 & \quad \text{当 } Y = -d_2 \text{ 或 } y = -\frac{d_2}{d_1} = -n \text{ 时} \\ u_1 = u_2 \text{ 或 } U_1 = U_2 & \quad \text{当 } Y = 0 \text{ 或 } y = 0 \text{ 时} \\ \mu_1 \frac{du_1}{dY} = \mu_2 \frac{du_2}{dY} & \quad \text{当 } Y = 0 \text{ 或 } y = 0 \text{ 时} \\ \text{或 } \mu_1 \frac{dU_1}{dy} = \mu_2 \frac{dU_2}{dy} & \quad \text{当 } Y = 0 \text{ 或 } y = 0 \text{ 时} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

方程 (13) 满足定解条件式 (14) 的解为:

$$U_1 = A_1 y^2 - a_1 y + b, \quad (15)$$

$$U_2 = A_2 y^2 + a_2 y + b, \quad (16)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} A_2 = -\frac{k d_1^2}{2 \mu_2 U_0}, \quad A_1 = m A_2 \\ a_2 = -\frac{1 + A_2 (m - n^2)}{m + n}, \quad a_1 = m a_2 \\ b = m \frac{1 - A_2 n (1 + n)}{m + n} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中参数 $m = \mu_2/\mu_1$, $n = d_1/d_2$.

为保证图 6 所示的流动模型中流速分布与图 5 所示的流速分布相同, 必须把最大流速

限制在 $y = -n$ 的地方, 为此令:

$$\frac{dU_2}{dy} \Big|_{y=-n} = 0, \quad (18)$$

即

$$A_2^c = \frac{a_2}{2n}. \quad (19)$$

把 a_2 的表达式代入上式就可求得:

$$A_2^c = -\frac{1}{n^2 - 2nm + m}. \quad (20)$$

相应地有

$$k^c = \frac{2\mu_2 U_0}{d_1^2 (n^2 + 2nm + m)}. \quad (21)$$

(三) 油膜的稳定性方程

油膜的稳定性方程亦可以由 N-S 方程导出. 对于图 6 所示的流动模型, 引入无量纲变量:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{u}{U_0}, \quad \bar{v} = \frac{v}{U_0}, \quad x = \frac{X}{d_1} \\ \bar{p} &= \frac{p}{\rho_1 U_0^2}, \quad \tau = \frac{t U_0}{d_1}, \quad y = \frac{Y}{d_1} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

则无量纲形式的 N-S 方程可写成:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{\rho_1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu \rho_1}{\mu_1 \rho} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right), \quad (23)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \tau} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{\rho_1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\mu \rho_1}{\mu_1 \rho} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right), \quad (24)$$

式中 Re 为雷诺数, $Re = \rho_1 d_1 U_0 / \mu_1$.

如果用 u' 和 v' 代表 x 方向和 y 方向的速度扰动值, p' 代表压力的扰动值, 整个流动就可以用未受扰动时的流动与扰动部分的叠加来表示, 即:

$$\bar{u} = U(y) + u', \quad v = v', \quad (25)$$

$$\bar{p} = p + p', \quad (26)$$

注意到 u' 和 v' 可以用一流函数 ψ 来表示, 则式 (23) 和 (24) 就可写成:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau \partial y} + U \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\rho_1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{\mu \rho_1}{\mu_1 \rho} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^3 \psi}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3} \right), \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau \partial x} + U \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{\rho_1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} + \frac{\mu \rho_1}{\mu_1 \rho} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^3 \psi}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^2 \partial x} \right). \quad (28)$$

对二维扰动可假设 ψ 和 p' 具有下列形式:

$$\psi = \phi(y) \exp[ia(x - c\tau)], \quad (29)$$

$$p' = f(y) \exp[ia(x - c\tau)], \quad (30)$$

式中, a 为波数, c 为无量纲的复波速, $c = c_r - ic_i$, 显然, 若 c_i 为正, 则扰动将增长, 油膜不稳定; 若 c_i 为负, 则扰动将衰减, 油膜稳定, 因此, 油膜的稳定性取决于 c_i 的正负符号。

把式 (29) 和 (30) 代入方程 (27) 和 (28) 并消去 $f(y)$ 后就得到描述平行分层流动稳定性的 Orr-Sommerfeld 方程:

$$\phi^{(4)}(y) - 2a^2\phi''(y) + a^4\phi(y) = iaRe \frac{\mu_1 \rho}{\mu \rho_1} [(U - c)(\phi''(y) - a^2\phi(y) - U''\phi(y))], \quad (31)$$

上式中 μ 和 ρ 分别取上层油膜的 ρ_1, μ_1 和下层水体的 ρ_2, μ_2 , 且相应的 $\phi(y)$ 分别用 $\phi_1(y)$ 和 $\phi_2(y)$ 表示时, 可得油膜和水的 Orr-Sommerfeld 方程:

$$\phi_1^{(4)}(y) - 2a^2\phi_1''(y) + a^4\phi_1(y) = iaRe [(U - c)(\phi_1''(y) - a^2\phi_1(y) - U''\phi_1(y))], \quad (32)$$

$$\phi_2^{(4)}(y) - 2a^2\phi_2''(y) + a^4\phi_2(y) = iaRe \frac{r}{m} [(U - c)(\phi_2''(y) - a^2\phi_2(y) - U''\phi_2(y))], \quad (33)$$

式中 r 为水油密度之比 ($r = \rho_2/\rho_1$),

(四) 定解条件和稳定性方程的解

1. 边界条件

$$\begin{aligned} u_1' = v_1 = 0 & \quad \text{当 } y = 1 \text{ 时,} \\ u_2' = v_2 = 0 & \quad \text{当 } y = -n \text{ 时,} \end{aligned}$$

即

$$\phi_1'(1) = 0, \quad \phi_1(1) = 0, \quad (34)$$

$$\phi_2'(-n) = 0, \quad \phi_2(-n) = 0. \quad (35)$$

2. 界面法向速度连续条件

$$\phi_1(0) = \phi_2(0), \quad (36)$$

3. 切向速度连续条件

$$\phi_1'(\eta) = \phi_2'(\eta), \quad (37)$$

上式是在 $y = \eta$ 上给定的 (参看图 7), 为便于应用, 将其转化为在 $y = 0$ 上给出的条件, 油水界面方程为

$$\eta = \frac{\phi(0)}{c^*} \exp[ia(x - c\tau)], \quad (38)$$

其中,

$$c^* = c - U(0), \quad (39)$$

图 7 油与水交界面的波动
未扰动流速沿 y 方向由 $y = 0$ 变到 $y = \eta$ 时产生的扰动量可用泰勒级数近似:

$$U(\eta) - U(0) = U'(0)\eta,$$

考虑到扰动流速 u' 沿 y 方向由 $y = 0$ 变到 $y = \eta$ 时产生的扰动量与 $U'(0)\eta$ 或 u' 相比为高阶小量, 则在 $y = 0$ 上的切向速度连续条件为

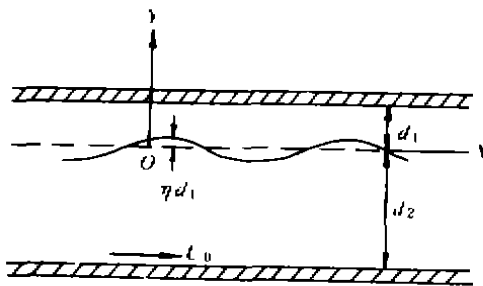


图 7 油与水交界面的波动

$$\phi_1'(0) - \phi_2'(0) = \frac{\phi_1(0)}{c^*} (a_2 - a_1). \quad (40)$$

4. 同理, 在 $y=0$ 上给出的切应力连续条件为

$$\phi_1''(0) + a^2 \phi_1(0) = m [\phi_2''(0) + a^2 \phi_2(0)]. \quad (41)$$

5. 在 $y=0$ 上给出的正应力连续条件为

$$-iaRe[c^* \phi_1'(0) + a_1 \phi_1(0)] - \phi_1''(0) + 3a^2 \phi_1'(0) + iraRe[c^* \phi_2'(0) + a_2 \phi_2(0)] \\ + m[\phi_2''(0) - 3a^2 \phi_2'(0)] = iaRe(F_r^{-2} + a^2 w_e) \frac{\phi_1(0)}{c^*}, \quad (42)$$

式中

$$F_r^2 = \frac{\rho_1 U_0^2}{(\rho_2 - \rho_1) g d_1}, \quad w_e = \frac{T}{\rho_1 U_0^2 d_1}.$$

如前所述, 油膜的稳定性取决于无量纲复波速中 c_1 的正负号。为此利用非奇异摄动方法来求解稳定性方程 (32) 和 (33) 在求解条件 (34) — (42) 下的特征函数 ϕ 和特征值 c 。对于交界面有某种间断发生的流动, 长波是最不稳定的^[4], 因此设 a 为小量, 则特征函数和特征值 c 可以用 a 的幂级数表示:

$$\phi = \phi_{(0)}(y) + a\phi_{(1)}(y) + a^2\phi_{(2)}(y) + \dots, \quad (43)$$

$$c = c_0 + ac_1 + a^2c_2 + \dots. \quad (44)$$

把上二式代入方程 (32) 和 (33) 以及定解条件 (34) — (42), 且作第一级近似得 $\phi_{(0)}$ 应满足的微分方程和定解条件为:

$$\phi_{(0)}^{(4)}(y) = 0, \quad \phi_{(0)}^{(4)}(y) = 0, \quad (45)$$

$$\phi_{(0)}'(1) = 0, \quad \phi_{(0)}'(1) = 0$$

$$\phi_{(0)}'(-n) = 0, \quad \phi_{(0)}'(-n) = 0$$

$$\phi_{(0)}(0) = \phi_{(0)}(0)$$

$$\phi_{(0)}'(0) - \phi_{(0)}'(0) = \frac{\phi_{(0)}(0)}{c_0^*} (a_2 - a_1) \quad (46)$$

$$\phi_{(0)}''(0) = m\phi_{(0)}''(0)$$

$$\phi_{(0)}'''(0) = \phi_{(0)}'''(0)$$

对式 (45) 积分就可得方程的解为

$$\left. \begin{aligned} \phi_{(0)} &= B_1 y^3 + C_1 y^2 + D_1 y + E \\ \phi_{(0)} &= B_2 y^3 + C_2 y^2 + D_2 y + E \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

式中的各项系数为:

$$B_2 = \frac{n^2 - m}{2n^2m(n+1)} E, \quad B_1 = mB_2,$$

$$C_2 = \frac{n^3 + m}{n^2m(n+1)} E, \quad C_1 = mC_2,$$

$$D_2 = \frac{n^3 + 4m + 3nm}{2nm(1+n)} E, \quad D_1 = -\frac{m + 3n^2 + 4n^3}{2n^2(n+1)} E.$$

$$E = 1.$$

再由式 (46) 中的第六个式子得到

$$c_0^* = \frac{a_2 - a_1}{D_1 - D_2} = \frac{2mn^2(1+n)(a_1 - a_2)}{n^4 + 2mn(2 + 3n + 2n^2) + m^2}, \quad (48)$$

所以,

$$c_0 = c_0^* - b = \frac{a_2 - a_1}{D_1 - D_2} - b. \quad (49)$$

同理作第二级近似后可得出油膜稳定性判数^[1]为

$$c_1 = \frac{Re c_0^{*2}}{a_1 - a_2} \left[\frac{(n^2 - m)L_2 - 2n^3(m+n)L_1}{2mn^2(1+n)} + L_3 \right], \quad (50)$$

式中,

$$L_1 = \frac{1}{6} \left[\frac{1}{F^2 c_0^*} - (r-1)(c_0^* D_1 + a_1) \right], \quad (51)$$

$$L_2 = \left\{ n^2 [I_1'(1) + I_1(1)] + r [n I_2'(-n) + I_2(-n)] \right\}, \quad (52)$$

$$L_3 = L_1'(1) - 2I_1(1) - \frac{r}{m} \left[I_2'(-n) + \frac{2}{n} I_2(-n) \right], \quad (53)$$

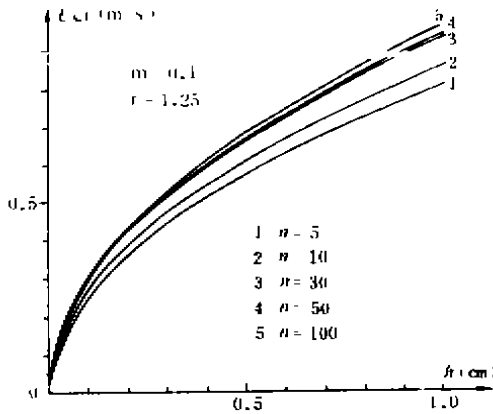


图8 不同参数 N 的情况下油膜失稳临界流速与油膜厚度的关系

$$I_1(y) = \frac{A_1 B_1}{210} y^7 + \frac{a_1 B_1}{60} y^6 + \frac{a_1 C_1 - 3B_1 c_0^* - A_1 D_1}{60} y^5 - \frac{C_1 c_0^* + A_1}{12} y^4, \quad (54)$$

$$I_2(y) = \frac{A_2 B_2}{210} y^7 + \frac{a_2 B_2}{60} y^6 + \frac{a_2 C_2 - 3B_2 c_0^* - A_2 D_2}{60} y^5 - \frac{C_2 c_0^* + A_2}{12} y^4. \quad (55)$$

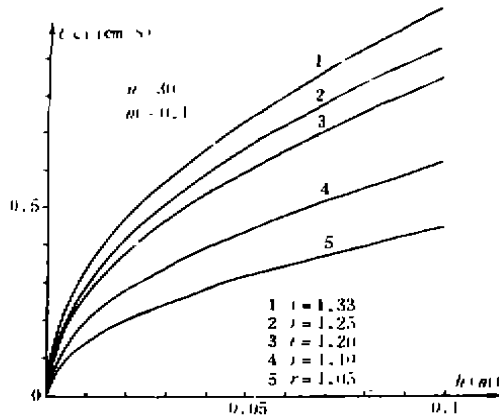


图9 不同密度比情况下油膜失稳临界流速与油膜厚度的关系

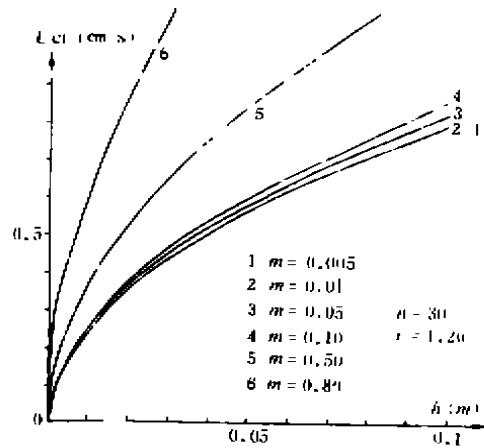


图10 不同粘性比情况下油膜临界流速与油膜厚度的关系

当 $c_1 = 0$ 时, 油膜不稳定; 当 $c_1 > 0$ 时, 油膜稳定; 当 $c_1 = 0$ 时, 为中性稳定。

用式(50)可以算出不同参数条件下临界流速 U_c , 随油膜厚度的变化规律如图8、9和10所示。

三、结 论

1. 油膜的稳定性随油膜厚度的增大而增加, 且油膜较薄时影响较大, 随着油膜厚度的增加, 这种影响逐渐减弱, 最后趋于零。这与作者实验观察到的规律相同。

2. 油膜的稳定性随参数 n 的变化不大, 特别当 $n = 30$ 时更是如此(见图)。 n 的物理意义表示水流受油膜阻碍使流速受影响的深度与半油膜厚度之比。因此 n 的选择对油膜的稳定性结论影响不大, 表明用图6所示的流动模型来代替图5的真实流动是可行的。

3. 油膜失稳的临界流速随水油密度比 r 的增加而逐渐增大(参看图9), 油和水的比重相差越大, 油膜的稳定性越好; 反之, 油和水的比重越接近, 油和水就越容易混掺。

4. 油膜失稳的临界流速随水油粘性系数比值的增加而增加(参看图10), 油和水的粘性相差越大, 油膜越不稳定。因为粘性的存在使得油水之间的切应力得以相互传递, 油水之间的粘性相差越大, 其传递的切应力也就越大, 因而油膜越容易失稳。由此可见, 粘性的存在增加了油膜的不稳定性。从图中还可以看出, 当油水粘性差大到一定程度(如 $m = 0.1$)后, 粘性的影响就不再十分明显了。

5. 油膜失稳是由于与一定水流速度相应的油膜厚度达不到稳定性所要求的油膜厚度造成的^[1]。

综上所述, 本文提出的用Orr-Sommerfeld方程来分析油膜稳定性的方法是可靠的, 对边界条件的处理也是合理的, 可以应用于实际。

参 考 文 献

- [1] Wicks, M., Fluid dynamics of floating oil containment by mechanical barriers in the presence of water currents, *Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, 1969, 55-106.
- [2] Lindenmuth, W. F., E. R. Miller, Jr, and C. C. Hsu, Studies of oil retention boom hydrodynamics, Hydronautics Inc, Final Report to the Coast Guard, 1970, AD 719 291.
- [3] Jones, W. T., Instability at an interface between oil and flowing water, *J. Basic Engineering*, 1972, 474-478.
- [4] Yih, C. S., Stability of liquid flow down an inclined plane, *Phys. Fluids*, 6 (1963), 321.