

圆管中紊流分层流动的理论及实验研究*

李洪波 伍 超

(四川大学高速水力学国家重点实验室)

李洪波等. 圆管中紊流分层流动的理论及实验研究. 天然气工业, 2004; 24(1): 89~91

摘 要 随着石油和天然气混相输送技术的应用和发展, 两相管流的理论研究越来越受到重视。为此, 提出了圆管中两相分层流动水力特性研究的新方法——旋转坐标轴法, 并基于此建立了新的圆管分层紊流流动模型, 得出了速度场解析分布式。此外, 还用设计的掺气实验装置完成了圆管分层掺气实验, 进一步验证了笔者所得出的结论: 掺气可实现有效减阻。为油气混输技术的进一步发展提供了有力的理论支持。

主题词 圆柱壳体 管道 油气集输 混输 紊流 旋转 坐标系统 分层 流动

两相管流的理论研究因管道混相输送的发展需要而日渐兴起。管道两相流的水力特性远比单相流动复杂, 与流体的物性以及两相流体在管道中的流型^[1]都有着密切的关系。分层流是其中较为典型的一种流型, 在下倾管中常见, 同时也是其他流型产生的基础, 对分层流水力特性的研究具有显著的理论意义和实践意义。关于两相流体管道分层流动的研究报导^[2~5]并不多, 而且多数还需要引入摩擦系数的经验或半经验公式, 从而影响了研究精确度。笔者在圆管横剖面利用旋转坐标轴, 将圆管分层流动近似用分层平板流来代替, 并将分层流分为分层流区和单相流区, 从应力分布规律出发, 建立了圆管内两相流体均为紊流时的分层流动模型。

流动模型与速度分布

如图 1 所示, 假定圆管内流动为满流, 上、下两层流体为牛顿流体, 均处于紊流流动状态, 且流动稳定, 压力梯度恒定。其中流体 1 为上层流体, 流体 2 为下层流体。取管道内任意横截面, 建立以 AOB 为旋转坐标轴的旋转坐标系, 近似用坐标轴以 O 为圆心旋转时的每一个 Φ 角对应的无数个分层平板流来进行研究。如图 1, $\Phi_0 \leq \Phi \leq \pi - \Phi_0$ 区域, 可认为是两层流体的平板流动模型, 其上层流体 1 的厚度为 h_1 , $h_1 = R - h_0 / \sin\Phi$; 下层流体 2 的厚度为 h_2 , $h_2 = R + h_0 / \sin\Phi$ 。其余区域: $\pi - \Phi_0 \leq \Phi \leq 2\pi + \Phi_0$, 流动属于平板间单相流动情况。

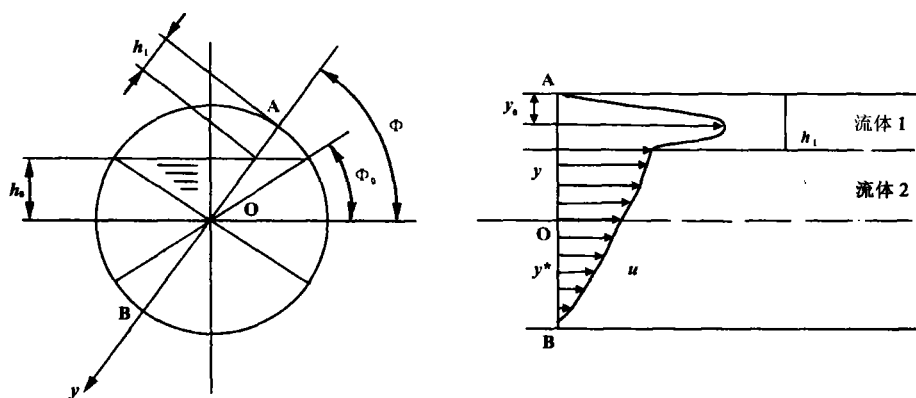


图 1 圆管分层流动模型图

* 本成果得到教育部重点基金项目资助, 项目编号: (2000)00108。

作者简介: 李洪波, 1974 年生, 1997 年毕业于江苏石油化工学院; 现为四川大学高速水力学国家重点实验室博士研究生。地址: (610065) 四川省成都市一环路南一段 24 号四川大学 47 号信箱。电话: (028)85401144。E-mail: lee_hongbo@163.com

对于速度分布,笔者只研究两相分层流动区而忽略单相流动情况。若以圆管轴向为 x 方向且压力梯度恒定,即 $dp/dx = \text{const.}$ 。圆管分层流动模型为:

$$d\tau/dy = (dp/dx)/\beta \quad (1)$$

式中: τ 表示剪切应力; p 表示压应力; β 表示壁面曲率影响参数。当 $\beta=1$ 时,该模型为平板流模型;当 $\beta=2$ 时,该模型为圆管均匀流模型。在上式中令 $\tau=0$,可得最大流速点坐标 $y_0 = -(\tau_w\beta)/(dp/dx)$ 。再由边界条件: $\tau = \tau_w (y=0)$,可得: $\tau = (dp/dx)y/\beta + \tau_w$ 以及 $\tau = \tau_w[1 - (y/y_0)]$ 。所受总应力 $\tau = \tau_t + \tau_s$,式中: τ_t 为黏性应力; τ_s 为紊动应力。当流体处于不同位置时,两种应力相差很大。在黏性底层内紊动应力与黏性应力相比很小,可忽略不计,在紊流核心区,黏性应力与紊动应力相比很小,可忽略不计。

1. 上层流体

$$u = u_{b_1} + (2V_{*1}/k) \{ [1 - (y/y_0)]^{1/2} - [1 - (b_1/y_0)]^{1/2} \} + (V_{*1}/k) \left\{ \ln \frac{1 - [1 - (y/y_0)]^{1/2}}{1 + [1 - (y/y_0)]^{1/2}} - \ln \frac{1 - [1 - (b_1/y_0)]^{1/2}}{1 + [1 - (b_1/y_0)]^{1/2}} \right\} \quad (6)$$

将 $y=h_1$ 代入上式,可得上下层流体界面处流速公式,

$$u_1 = u|_{y=h_1} = u_{b_1} + (2V_{*1}/k) \{ [1 - (h_1/y_0)]^{1/2} - [1 - (b_1/y_0)]^{1/2} \} + V_{*1}/k \left\{ \ln \frac{1 - [1 - (h_1/y_0)]^{1/2}}{1 + [1 - (h_1/y_0)]^{1/2}} - \ln \frac{1 - [1 - (b_1/y_0)]^{1/2}}{1 + [1 - (b_1/y_0)]^{1/2}} \right\} \quad (7)$$

式中: $y = h_1$; $h_1 = R - h_0/\sin\Phi$; k 为常数。因此界面处流速是 Φ 的函数,初始条件: $\Phi = \Phi_0, h_1 = 0$ 。

2. 下层流体

研究方法与上层流体相似,在黏性底层和紊流核心区可建立 y^* 坐标如图 1 所示, y 与 y^* 坐标关系为:

$$\begin{cases} y^* = 2R - y \\ y_0^* = 2R - y_0 \end{cases} \quad (8)$$

于是在下层流体的黏性底层和紊流核心区可以得到与上层流体相似的公式,仅仅用 y^* 来代替公式中的 y 。

此外,在区域 $\pi - \Phi_0 \leq \Phi \leq 2\pi + \Phi_0$ 内流动属单相流动,因此比较容易确定其速度解析分布公式, $y=R$ 即圆管中心处的速度公式可同时确定。

由界面流速的连接条件知,上、下层流体在 $y=h_1$ 处的流速相等;同时由圆管中心连接条件知,在两相分层流动区和单相流动区的圆管中心处的流速相等。因此可建立两个方程式,由此确定 $\beta(y_0)$ 和 τ_w ,其中 $\beta, \tau_w(y_0, y_0^*)$ 均为 Φ 的未知函数。

(1) 黏性底层 ($\Phi_0 \leq \Phi \leq \pi - \Phi_0$) ($0 \leq y \leq b_1$)

在该层内,不计紊动应力。黏性底层厚度为 $b_1 = \alpha_1 (V_1/V_{*1})$,其中 $V_{*1} = (\tau_w/p_1)^{1/2}$ 为摩阻流速。该层流体为牛顿流体,利用其本构方程为:

$$\tau_1 = \mu_1 (du/dy) \quad (2)$$

以及公式 $\tau = \tau_w [1 - (y/y_0)]$,可以推出:

$$\mu_1 (du/dy) = \tau_w [1 - (y/y_0)] \quad (3)$$

整理并在边界条件: $u=0 (y=0)$ 下积分,可得:

$$u = (\tau_w/u_1) y [1 - (y/2y_0)] \quad (4)$$

(2) 紊流核心区 ($\Phi_0 \leq \Phi \leq \pi - \Phi_0$) ($b_1 \leq y \leq h_1$)

在该层内,不计黏性应力,紊动应力由 Prandtl 混合长度理论给出,即: $\tau_1 = \rho_1 l^2 (du/dy)^2$ (5)

在边界条件: $u = u_{b_1} (y = b_1)$ 下积分可得:

实验检验

通过建立速度解析分布式,便可求得两相分层紊流的速度。该速度可与圆管单相紊流流动的速度进行比较。为进一步加以验证,笔者用水流掺入气层进行了实验。实验的主要检测手段是丹麦 DAN-TEC 公司生产的二维光导纤维激光测速仪,每一断面用于描述速度分布的激光测速点定为 15~20 个。实验所用的 PVC 管总长 17 m,管内内径 0.1 m,其中用于激光测速的管段(长 1 m)及光学补偿盒为有机玻璃制作。采用高位水塔及平水槽提供稳定的水头。实验管边掺气气源由电动式加气机提供,加气机输出的压缩空气先经减压室分压,再由多根细管注入实验管道。对于分层掺气,由 3~16 个内径为 3 mm 的管道顶部进气孔提供。对于圆管分层流,可以用 Φ_0 代表含气量。圆管截面含气量 ϵ 与 Φ_0 的关系为:

$$\epsilon = \frac{\pi - 2\Phi_0 - \sin 2\Phi_0}{2\pi} \quad (9)$$

实验得到的数据如表 1 所示。

表 1 实验数据表

实验序号	掺气前		掺气浓度		掺气后		流量增加	流速增加	误 差
	流量 ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	流速 (m/s)	Φ_0 (rad)	体积含 气浓度	流量 ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	流速 (m/s)			
1	0.990	0.126	0.8552	7.0%	1.040	0.132	5.05%	4.76%	0.28%
2	1.800	0.229	0.9861	4.0%	1.831	0.233	1.72%	1.75%	-0.02%
3	1.166	0.148	0.8552	7.0%	1.177	0.15	0.94%	1.35%	-0.40%
4	1.166	0.148	0.9861	4.0%	1.214	0.155	4.12%	4.73%	-0.59%
5	1.118	0.142	0.8552	7.0%	1.139	0.145	1.88%	2.11%	-0.23%
6	0.512	0.065	0.8552	7.0%	0.513	0.065	0.20%	0.00%	0.20%
7	0.199	0.025	0.7854	9.1%	0.200	0.025	0.50%	0.00%	0.50%
8	0.199	0.025	0.8552	7.0%	0.202	0.026	1.51%	4.00%	-2.40%
9	0.199	0.025	0.9861	4.0%	0.205	0.026	3.02%	4.00%	-0.95%
10	2.330	0.297	0.9250	5.3%	2.400	0.306	3.00%	3.03%	-0.03%

图 2、3 分别为沿垂直径向($\Phi=90^\circ$)和水平径向($\Phi=0^\circ$)掺气前、后实验数据比较,可以看出掺气后流速有所增加。

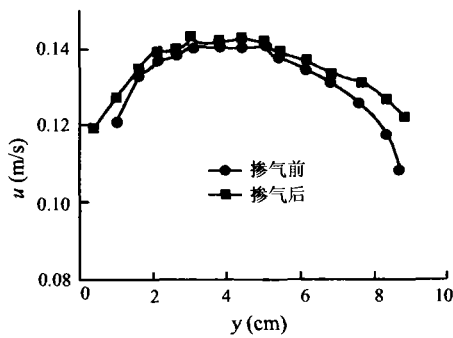


图 2 垂直径向的速度分布图

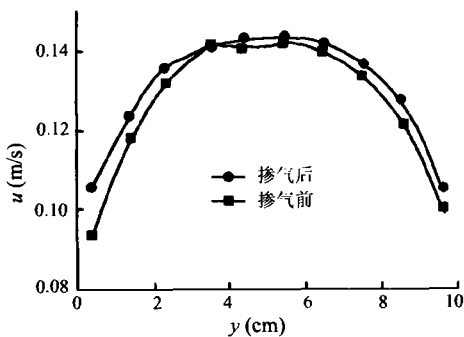


图 3 水平径向的速度分布图

结 论

(1) 采用的旋转坐标轴法较为准确地研究了管道圆管分层紊流的水力特性,建立了新的流动模型,得出了速度场解析式。为圆管内分层流动的研究提供了一种有别于传统经验公式的,更为精确的研究方法。

(2) 将圆管分层流模型分为分层流区和单相流区来研究,从分析应力分布规律出发,从理论和实验上研究确定了圆管分层流速度分布规律。

(3) 用设计的掺气实验验证了圆管中两相分层紊流流动的减阻效应。

参 考 文 献

- 1 王常斌,魏兆胜,陈家琅. 气体—幂律液体两相水平管流的流型分布. 管道技术与设备,1994;(3):5~7
- 2 郑永刚,方铎,李桂芬. 圆管流掺气减阻理论研究. 水动力学研究与进展,1996;(2)
- 3 郑永刚,谢翠丽. 非牛顿流体在圆管中分层流动及减阻规律. 水动力学研究与进展,2000;(3)
- 4 Bishop A A, Deshpande S D. Non-Newtonian liquid-air stratified flow through horizontal tubes-II, Int J Multi phase Flow, 1986;12(6):977~996
- 5 窦国仁. 紊流力学(下册). 北京:高等教育出版社,1987

(收稿日期 2002-07-15 编辑 居维清)