

45°弯段明渠剪切分层流稳定性分析试验研究

褚克坚 华祖林 王惠民 邢领航

(河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 通过物理模型试验 ,对 45°弯段明渠剪切分层流的稳定性进行研究 ,同时进行了直道和 45°弯段两种水槽的分层流试验 ,获得不同工况下的断面流速、温度、紊动动能、雷诺应力等物理量 .选用初始密度弗汝德数作为稳定性判数 ,对直道和 45°弯段水槽的分层流稳定性进行了分析 ,得出试验条件下两种水槽的稳定性判别标准并进行对比 .结果表明 45°弯段分层流稳定分层的临界初始密度弗汝德数值约为直道分层流的 0.7 倍 ,说明弯段的存在加剧了分层流的垂向掺混 .

关键词 分层流 45°弯段水槽 ;直道水槽 ;初始密度弗汝德数 ;稳定性判数

中图分类号 X143 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2004)06-0640-04

分层流稳定性分析作为环境水力学的经典课题 ,其研究的重点在于寻找维持稳定分层的临界条件 ,在工程应用上具有十分重要的意义 ,迄今已为不少学者所关注^[1~9] ,他们总结出 Keulegan 数、Richardson 数等著名的稳定性判数 ,并在完善和发展之中 .但是已有研究大多针对直道水体 ,对弯段分层流稳定性分析则鲜见报道 .本文分别对直道和 45°弯段水槽明渠剪切分层流进行了较为系统的物理模型试验研究 ,涵盖了水流从完全分层到几乎完全混合的主要典型流态 ,分析了 45°弯段分层流的稳定性 ,并结合已有研究成果 ,分别求得 45°弯段和直道分层流的临界稳定条件 .

1 试验设备及量测仪器

试验分别在直道和带有 45°弯段的玻璃水槽内进行 .水槽断面为 34 cm × 30 cm ,底坡为 0.1% ,弯段曲率为 1/3 .进水段长 300 cm ,在距底 20 cm 处设 0.2 cm 厚的玻璃隔板 ,将水槽分为上下两层 ,分别引入热水(上层)和冷水(下层) .水槽末端安装自动尾门 ,控制出流水位 .试验水槽如图 1 所示 .试验模型配有两套相互独立的进水系统和一套回水系统 .试验前先抽取部分水至热水池预加热 ,然后把冷、热水注入两个独立的高位水池 ,平水后再将两股水流平稳、均匀地引入试验水槽进水段以形成分层流 .试验尾水经回水系统降温后排入水库 ,实现水体的循环利用 .

试验中应用美国 SonTek 公司研制的 16 MHz MicroADV 测量流速 ,应用数字温度计结合 HR-2 型红外热像仪测量分层水体温度 .其中 ADV 的主要技术性能如下 :采样频率为 0.1 ~ 50 Hz ;测速范围为 $\pm 3 \sim \pm 250$ cm/s ;最大零偏置速度为 ± 0.25 cm/s ;测速精度为测量速度的 $\pm 1\%$.

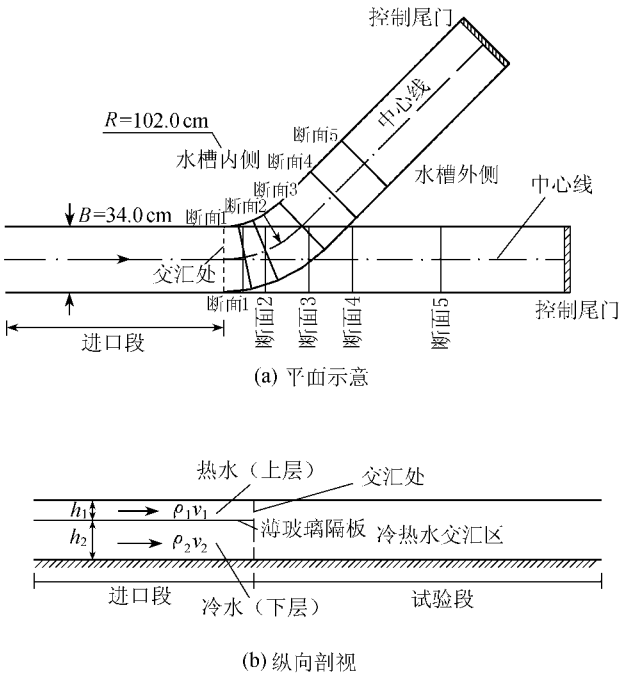


图 1 试验水槽示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental flume

2 试验参数

由于试验是在密闭条件较好的室内进行的,并且测量时段也相对较短,所以风吹及表面散热对分层流掺混的影响均可忽略不计。

考虑一般电厂冷却水与环境水温差在 8~12℃ 的范围内,所以试验中将上下层水温差控制在 10℃ 左右,选定的热水层高度和流量分别为 3 cm 和 0.3×10⁻³ m³/s 左右,冷水出流的流量从 3.09×10⁻³ m³/s 逐次增大到 9.21×10⁻³ m³/s。具体参数见表 1。其中初始密度弗汝德数定义为

$$Fr_{d_0} = v_a / \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} gh_0}$$
 (1)

式中: v_a ——水槽平均流速; h_0 ——交汇处水深; ρ_1 、 ρ_2 ——进口段上、下层水体密度; g ——重力加速度。

表 1 剪切分层流试验参数

Table 1 Summary of testing conditions of stratified shear flows

工况	下层参数				上层参数				密度差 $\Delta\rho$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	流速比 v_1/v_2	雷诺数	进水密度 弗汝德数	混合 情况	
	流速 v_2 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	厚度 h_2 /cm	密度 ρ_2 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	温度 T_2 /℃	流速 v_1 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	厚度 h_1 /cm	密度 ρ_1 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	温度 T_1 /℃						
直道	1	4.64	20.00	0.999 215	14.40	2.95	3.00	0.996 786	26.10	0.002 429	0.64	2 583.81	0.59	二层
	2	6.44	20.00	0.999 193	14.55	3.02	2.95	0.996 638	26.65	0.002 555	0.48	3 577.41	0.80	二层
	3	7.82	20.00	0.999 643	10.90	2.94	3.02	0.997 967	21.25	0.001 676	0.38	3 807.37	1.15	分层
	4	10.99	20.00	0.999 466	12.50	2.95	3.01	0.997 544	23.10	0.001 922	0.28	5 451.34	1.48	混合
	5	12.39	20.00	0.999 513	12.10	2.97	2.95	0.997 645	22.67	0.001 868	0.23	6 068.24	1.69	混合
	6	13.97	20.00	0.999 710	10.20	2.56	3.25	0.998 068	20.78	0.001 642	0.18	6 377.08	1.97	混合
45°弯段	1	4.54	20.00	0.999 200	14.50	2.91	3.05	0.996 813	26.00	0.002 387	0.64	2 545.23	0.59	二层
	2	5.67	20.00	0.999 186	14.60	2.86	3.05	0.996 711	26.38	0.002 475	0.50	3 110.48	0.71	分层
	3	6.47	20.00	0.999 186	14.60	2.95	3.04	0.996 821	25.97	0.002 365	0.46	3 529.53	0.82	分层
	4	7.53	20.00	0.999 299	13.80	2.91	3.05	0.996 926	25.57	0.002 373	0.39	3 978.72	0.94	分层
	5	9.00	20.00	0.999 096	15.20	2.91	3.05	0.996 624	26.70	0.002 472	0.32	4 857.84	1.10	混合
	6	10.70	20.00	0.999 339	13.50	2.91	3.05	0.997 118	24.83	0.002 222	0.27	5 523.82	1.36	混合
	7	12.59	20.00	0.999 417	12.90	2.90	3.03	0.997 382	23.77	0.002 035	0.23	6 307.13	1.67	混合
	8	13.54	20.00	0.999 502	12.20	2.64	3.02	0.997 567	23.00	0.001 935	0.19	6 682.12	1.83	混合

3 直道分层流稳定性分析

3.1 已有的试验研究成果

a. Keulegan^[1].在水槽中做盐水楔试验,建立了异重流交界面稳定性判数:

$$\Theta = \left(\nu_2 g \frac{\Delta\rho}{\rho_2} \right)^{1/3} / \Delta v$$
 (2)

式中: ν_2 、 ρ_2 ——下层水体运动黏滞系数和密度; Δv 、 $\Delta\rho$ ——上下层水体相对流速、密度。Keulegan 认为,如果 Θ 小于临界值 Θ_{cr} ,异重流交界面就被破坏。经试验得出:当上层雷诺数 $Re < 450$ 时, $\Theta_{cr} = 0.127$; $Re > 450$ 时, $\Theta_{cr} = 0.178$ 。

b. Sherekov^[3].做了同向和反向分层流的水槽试验,详细描述了水流从稳定分层过渡到完全混合时中间层形态的发展变化 (a) $\Theta \geq \Theta_{cr1} \approx 0.188$,两层有明显分界,中间层为连续波状交界面 (b) $\Theta_{cr1} \geq \Theta \geq \Theta_{cr2} \approx 0.126$,中间层有明显 $K-H$ 波,其振幅较低 (c) $\Theta_{cr2} \geq \Theta \geq \Theta_{cr3} \approx 0.108$,内波失稳,不规则波产生 (d) $\Theta_{cr3} \geq \Theta \geq \Theta_{cr4} \approx 0.085$,所有内波破裂,中间层有局部掺混, Θ 越小则掺混越多 (e) $\Theta < 0.085$,掺混强烈,两层完全混合,分层现象消失。

c. Chu 和 Baddour^[6].采用 Richardson 数作为分层流稳定性判数,经反向分层流试验得出临界稳定条件

$$Ri = \frac{\Delta\rho}{\rho_2} g\delta / \Delta v^2 \geq 0.32$$
 (3)

式中 δ 为中间层厚,其他参数意义同前。

d. 金海生^[9].通过密度分层剪切流的物理模型试验和数模预测,发现水流分层情况与雷诺数 Re 没有直

接的关系,而与初始密度弗汝德数 Fr_{d_0} 和流速比 v_1/v_2 密切相关,得到分层稳定条件

$$Fr_{d_{cr}} = 13.2 (v_1/v_2)^{1.13} \tag{4}$$

对于一定的流速比,若 $Fr_{d_0} > Fr_{d_{cr}}$, 分层流不稳定,将达到完全混合.

3.2 本文试验分析

根据本文对直道分层流的试验成果,并结合 Viollet^[5],Majewski^[10]和金海生^[9]的部分数据,绘出流速比 v_1/v_2 与初始密度弗汝德数 Fr_{d_0} 关系,如图 2 所示.

图 2 中表明存在一个以虚线为中心的分界区:当 Fr_{d_0} 在虚线下方时,水流能保持分层流态稳定运行;当 Fr_{d_0} 在虚线上方时,冷热水完全混合,密度分层消失.可见,要使分层流稳定运行,初始密度弗汝德数必须满足如下条件:

$$Fr_{d_0} < 14.58 (v_1/v_2)^2 + 0.362 v_1/v_2 \tag{5}$$

该稳定条件与金海生公式基本一致,可得出本文试验的直道分层流临界稳定初始密度弗汝德数 $Fr_{d_{0cr}} \approx 1.4$.

4 45°弯段分层流的稳定分析

分别定义断面相对单宽热通量 Fl 、密度弗汝德数 Fr_d 为

$$Fl = \left(\int_0^h \frac{(T - T_e)}{T_e} \rho v dz \right) / \left(\int_0^h \rho v dz \right)$$
$$Fr_d = v_a / \sqrt{\frac{g(\rho_e - \rho_s)h}{\rho_e}} \tag{6}$$

式中: T, ρ, v ——测点水温、密度和主流方向流速; T_e, ρ_e ——环境水体温度和密度; h ——水深; ρ_s ——表层水体密度.

图 3 和图 4 为相同入流条件下, 45°弯段和直道水槽的断面相对热通量 Fl 及密度弗汝德数 Fr_d 沿流程的变化情况.由图 3 和图 4 可知,对于直道水槽, Fl 与 Fr_d 的横向分布较为均匀.而对于 45°弯段水槽,弯道内的 Fl 从内侧向外侧递减, Fr_d 则从内侧向外侧递增,说明弯段外侧分层流的垂向掺混强度高于弯段内侧,其主要原因可能是:水流进入弯段时产生断面二次环流(图 5),其中上层环流带动外侧表层高温水向内侧输运,同时温度相对较低的水体经环流涌向弯段外侧,由此产生的横向对流减少了弯段外侧的热水量,减弱了水体浮力对垂向掺混的抑制作用.另外,外侧水体处于高主流速区,上下层环流相互作用产生的能量、动量交换也较内侧更为剧烈.可见,对于弯段水槽,分层流的失稳应首先出现在弯段外侧.

通过试验发现 (a) $Fr_{d_0} \leq 0.59$,冷热水分层明显,层间有较为稳定的界面波.此时断面二次环流很弱,冷热水横向扩散不明显,交界面基本水平.(b) $0.71 \leq Fr_{d_0} \leq 0.94$,界面波逐渐破裂并有局部掺混,在冷热水间形成具有一定厚度的中间层.随二次环流作用的逐渐增强,弯段内水槽外侧热水内涌,致使中间层内厚

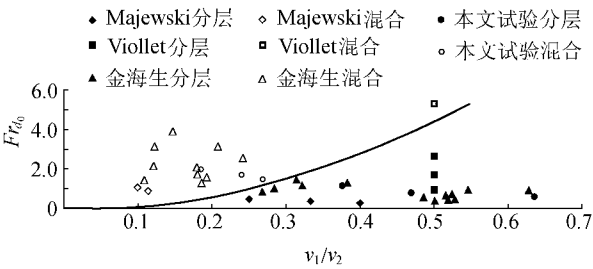


图 2 $v_1/v_2 \sim Fr_{d_0}$ 关系

Fig.2 v_1/v_2 versus Fr_{d_0}

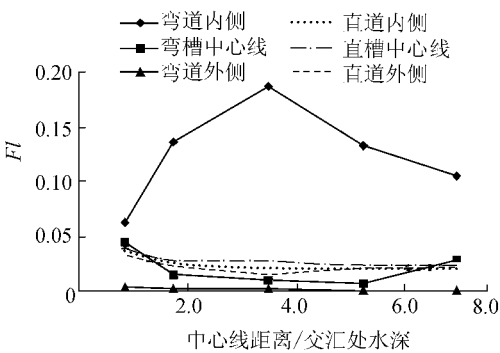


图 3 相对热通量 Fl 沿流程变化

Fig.3 Dimensionless heat flux Fl versus X/h_0

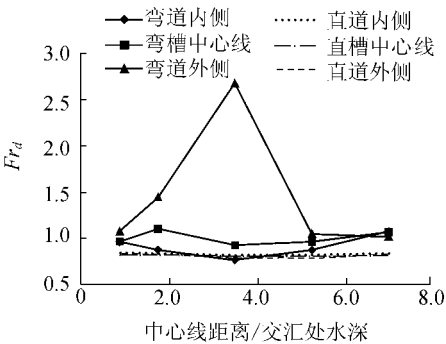


图 4 密度弗汝德数 Fr_d 沿流程变化

Fig.4 Fr_d versus X/h_0

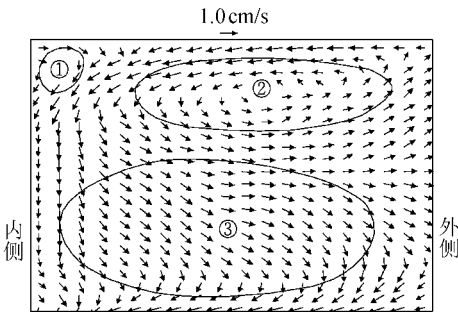


图 5 22.5°弯角处断面环流矢量

Fig.5 Velocity vectorgraph for circulating current in transection with a bending angle of 22.5°

外薄,交界面向内侧倾斜,倾斜程度随 Fr_{d0} 递增。(c)当 $Fr_{d0} \geq 1.10$ 时水流掺混剧烈,弯段外侧冷热水完全混合,分层现象消失。

图 6 表明当全场水流密度弗汝德数 $Fr_d < Fr_{d_{cr1}} \approx 1.2$ 时,分层流呈二层流态,具有稳定的交界面,对应稳定交界面临界入流条件为 $Fr_{d0} < Fr_{d_{0cr1}} \approx 0.62$,全场水流密度弗汝德数 $Fr_d < Fr_{d_{cr2}} \approx 5.5$ 时,水流能保持分层流态稳定运行,对应的稳定分层临界入流条件为 $Fr_{d0} < Fr_{d_{0cr2}} \approx 1.0$ 。

对比直道分层流的稳定条件,发现 45°弯段水槽的稳定分层临界初始密度弗汝德数约为直道的 0.7 倍,另外,由图 4 可知,同样入流条件下直道水槽的密度弗汝德数要小于弯道的,可见弯道水槽冷热水的掺混强度较直道水槽为高,这说明弯段的存在加剧了上下层水流的掺混,因而在同样入流条件下弯段分层流更易出现冷热水完全混合的现象。

5 结 论

以初始密度弗汝德数 Fr_{d0} 为稳定性判数,对 45°弯段和直道水槽分层流进行稳定性分析,发现弯段分层流的失稳首先发生在水槽弯段外侧,并求得 45°弯段分层流的交界面稳定临界条件,求得 45°弯段和直道分层流的稳定分层临界条件,发现弯段的临界初始密度弗汝德数约为直道的 0.7 倍,说明弯段的存在加剧了上下层水流的掺混,可见两者的掺混规律有着显著的不同。

参考文献:

[1] KEULEGAN G H. Interfacial instability and mixing in stratified flow[J]. J of Research, 1949, 45: 487—500.
[2] KOPPEL D. On the stability of flow of a thermally stratified fluid under the action of gravity[J]. J Math Phys, 1964, (5): 963—982.
[3] SHEREKOV I A, NETJUKHALIO A P, TELESHKIN E D. Research investigation of transfer process in two-dimensional stratified flow[A]. In: Société Hydrotechnique de France. IAHR[C]. Paris: Imprimerie Louis Jean, 1971. 217—226.
[4] THORPE S A. Experiments on the instability of stratified shear flow[J]. J Fluid Mech, 1973, 61: 731—751.
[5] VIOLLET P L. Turbulent mixing in a two layer stratified shear flow[A]. In: CARSTENS T, MCCLIMANS T. Proceeding of the second International Symposium on Stratified Flow[C]. Oslo: Tapir, 1980. 315—326.
[6] CHU V T, BADDOUR R E. Turbulent gravity-stratified shear flows[J]. J Fluid Mech, 1984, 138: 353—378.
[7] GRUBERT J P. Interfacial stability in stratified channel flows[J]. Journal Hydraulic Engineering, 1989, 115(5): 1185—1203.
[8] FRIEDLANDER S. On nonlinear instability and stability for stratified shear flow[J]. J Math Fluid Mech, 2001, (3): 82—97.
[9] 金海生. 紊动分层剪切流的稳定性和数值模拟[J]. 水利水运科学研究, 1992, (2): 121—131.
[10] MAJEWSKI W. Laboratory investigation on heat transfer in thermally stratified flow[A]. In: Société Hydrotechnique de France. IAHR[C]. Paris: Imprimerie Louis Jean, 1971. 207—216.

Experimental investigation on stability of stratified shear flows
in open channel with a bending angle of 45°

CHU Ke-jian, HUA Zu-lin, WANG Hui-min, XING Ling-hang

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract Laboratory experiments were performed in two flumes, a straight one and a weakly curved one with a bending angle of 45°, for study of the stability of thermally stratified shear flows. Some hydraulic parameters in different cases, such as the flow velocity, temperature, turbulence energy, and Reynold stress, were obtained. With the initial densimetric Froude number taken as the index for reflection of the stability of the stratified shear flows, the stability criterion for the flows in the two flumes was derived under the experimental condition. The comparison of the stratified flows in the two flumes indicates that the critical initial densimetric Froude number for stable stratification in the weakly curved flume is about 0.7 times of that in the straight one, showing that the bending section intensifies the mixing of stratified flows in vertical direction.

Key words stratified flow; curved flume with a bending angle of 45°; straight flume; initial densimetric Froude number; stability criterion

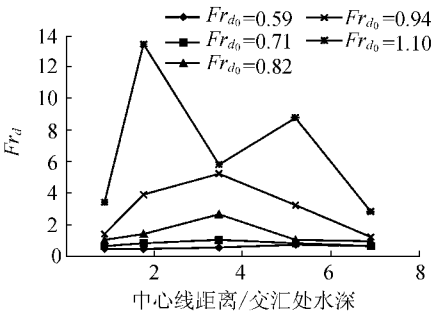


图 6 弯段外侧 Fr_{dx} 沿流程变化
Fig.6 Fr_{dx} at outer side of bending section versus X/h_0