第 23 卷 第 5 期　　力 学 学 报　　Vol. 23, No. 5
1991 年 9 月　　ACTA MECHANICA SINICA　　Sept., 1991

应用二维激光测速系统研究面流消能的紊动特性*

冬俊瑞[1)]　沈　熊[2)]　赖翼峰[1)]
(清华大学水利水电系[1)],工程力学系[2)],北京,100084)

提要　本文应用二维激光测速系统对面流消能工下游典型流态的紊动特性进行了系统的试验研究,得到了不同来流条件下面流的时均流速、紊动强度及雷诺应力等沿主流与回流区的分布特征;计算并绘制了流线图,由此分析了淹没面流时底旋滚长度和佛劳德数的关系. 对紊动能量的转换过程及耗散特征进行了计算分析,初步探明了消能机理.

关键词　面流消能工,旋滚区,紊动强度,雷诺应力,二维激光测速

一、引　言

面流消能工具有结构简单、工程量较省、施工期短与提前发电的优点，尤其适用于流量丰盛、尾水较深的河道;但面流消能方式流态多变,受下游水位影响显著;而且消能率较低,容易引起河床冲刷以及尾水波浪冲淘护岸、影响航运等，因此对其评价不同. 通过对国内已建 8 座大中型水电站面流消能工程实地调查，发现优点是主要的[1]. 本文是在调查基础上，采用试验手段对面流消能水流的典型流态进行紊动特性与波浪要素的量测与分析,获取基本参量以探索面流消能过程,并为改善面流消能运行提供科学依据. 限于篇幅,本文仅介绍面流紊动特性部分成果.

面流水股由溢流坝下泄时，由于坝趾鼻坎的折转作用，使水股沿下游水面流动,并在鼻坎下游形成较大的底旋滚，此即为自由面流流态(见图 1)；随着尾水深度的逐渐增高，除底旋滚外还形成尾部表面旋滚与坎上表面旋滚；使面流流态可依次形成为自由混合流、淹没混合流与淹没面流等，以上通常称为面流的典型衔接流态.

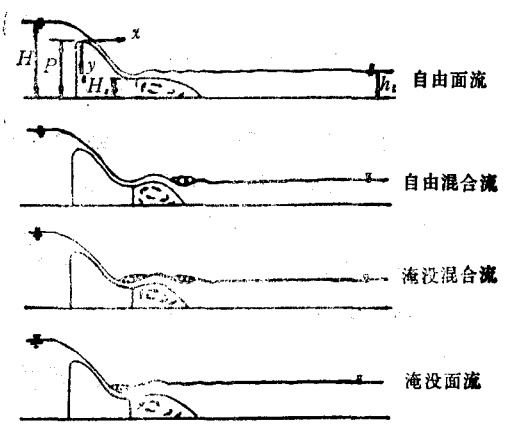


图 1　面流典型流态图

量测面流消能工下游流态的流动结构是很重要的. 但由于主流水股与底旋滚、表面旋滚之间的流速分布变化很大,且有反向流速，因此迄今对这种带有自由波动水

* 本项研究为国家自然科学基金委员会资助项目.
本文于 1990 年 6 月 9 日收到第一稿，1990 年 11 月收到修改稿.

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

面的复杂流场是很少有人进行量测的. 本文利用二维激光测速仪 (LDA) 这一强有力的试验技术手段,使对分离流动和旋滚区的量测成为可能;[2][3]尤其激光测量是无接触式的,不会扰动局部流场; 不需校准且精度较高. 此次对不同佛劳德数 Fr 时四种面流典型流态的时均与紊动特性进行了系统地量测.

二、试验设备与激光测速仪器

试验是在一座长 5m、高 40cm、宽 30cm 的平底玻璃水槽中进行的. 实验模型是参照我国某实际面流工程、并结合 WES 标准剖面堰型设计而成. 模型用有机玻璃制成;堰高 P 为 22cm,鼻坎高 H_s 为 8cm, 挑角 θ 为 0°,鼻坎水平段长 1.6cm. 模型安装在水槽前部. 试验流量用三角形堰量测,水深用跟踪式水位计与测针来量测.

二维激光测速系统见图 2 所示,采用二维双色三光束光路,为氩离子激光器的蓝光和绿光两根谱线. 光收集部分采用后向散射工作方式;为量测反向流速,采用光电子频移装置来进行判别和实现二维测量.

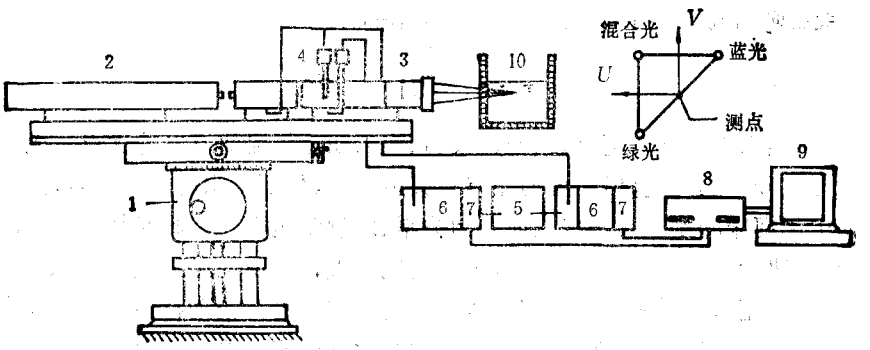


图 2 二维激光测速系统图

1.坐标架,2.激光器,3.光学单元,4.频移器,5.示波器,6.计数式处理器,7.数字接口,8.微处理机,9.显示打印终端,10.模型水槽

信号和数据处理系统由二台 1980B 型计数式处理器、1998 数字接口和 HP-1000 型微机等组成; 数据的统计分析由 DRP-3 系统软件来完成,该软件具有文件管理、参数设置、统计分析与画直方图等打印输出功能,可计算出时均流速、均方根值及雷诺应力等. 每个测点的采样容量为 1024,采样跳距为 2; 同时窗宽度为 10μs; 频移量为蓝光 500kHz、绿光 200kHz. 有关二维 LDA 系统可参阅文献[4].

三、实验结果与分析

共进行 6 种流量下 4 种典型面流流态的试验, 组别与特征参数见表 1. 试验量测了模型水槽中心线上数据,沿程布置 10—15 个量测断面,每个断面沿水深施测 15—35 个测点. 限于篇幅,本文仅选几组代表性结果为例进行分析.

1. 时均流速分布和紊动特性

(1) 时均流速分布及流线图

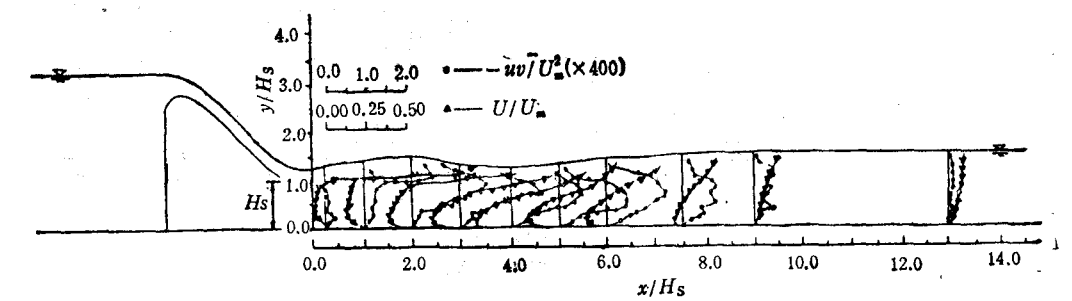
© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

表 1　试验组别与流动参数

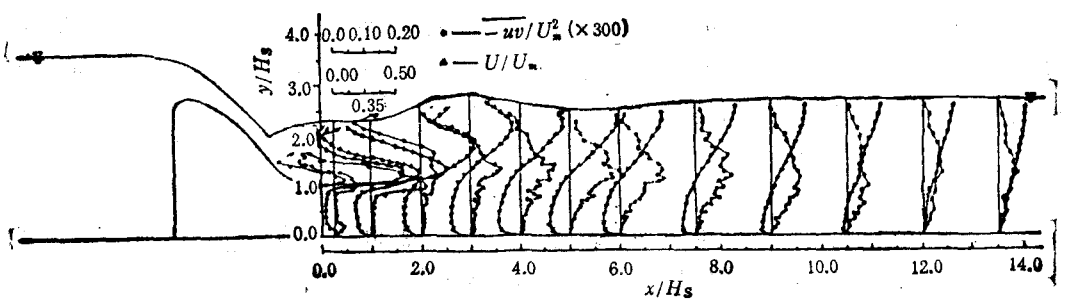
组别	H (cm)	U_m (m/s)	Q 10^{-3}(m³/s)	Fr	下游水深 h_t(cm)			
					自由面流	自由混合面流	淹没混合面流	淹没面流
1	24.28	1.48	1.65	7.80	9.32	—	—	11.92
2	25.60	1.65	3.70	6.10	10.99	—	13.78	16.03
3	26.53	1.72	5.25	5.42	—	13.99	15.04	16.76
4	27.62	1.78	7.59	4.77	—	14.84	16.47	19.17
5	29.15	1.84	11.49	4.08	—	17.14	19.10	22.12
6	30.08	1.87	14.18	3.77	—	18.19	19.96	22.53

注：〈1〉H 为上游水深 〈2〉$Fr = U_m/\sqrt{gh_1}$，U_m 为鼻坎上平均流速 h_1 为鼻坎上水深

将二维激光测速仪量测得到的自由面流(第 2 组)与淹没面流（第 5 组）的纵向(沿流程方向)时均流速 U 值，除以坎端断面（$x = 0$）平均流速 U_m 而成无量纲时均流速剖面图，绘如图 3(a)、3(b)。实验表明，面流消能工下游的水流运动是一种典型的分离流动。由溢流堰下泄的高速水流在鼻坎末端发生分离并在坝下形成底旋滚区，对淹没面流并有一表面旋滚。时均流速随水深 y 变化较大，可将流场划分成两个区，一为势流而另一为回流(旋滚)，时均流速在势流区中沿程逐渐减小；在回流区中流速开始显著增大，而后逐渐减小。在两种流动的交界面上，流速梯度很大，剪切作用增高并成为产生紊动和旋涡的源地；由于紊动混掺的结果，使流速由均匀分布变化为非均匀分布，最后又趋于均匀分布。



（a）组 2 自由面流

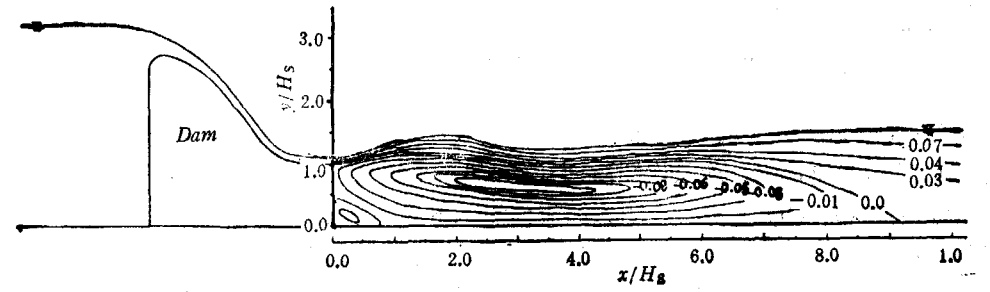


（b）组 5 淹没面流

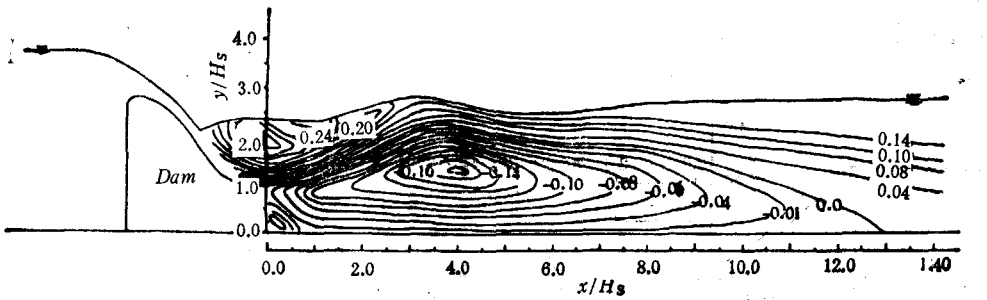
图 3　纵向时均流速及雷诺应力分布图

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

为了较直观地描述面流的流动情况，根据流函数与流速的关系：$\Psi = \int_0^y U dy$，由实测的断面纵向时均流速 U，计算并绘制了自由面流和淹没面流的流线图，如图 4 所示。由图看出，自由面流的水流运动可明显地划分为主流区与底旋滚区(鼻坎趾处的小旋滚不予考虑)。在时均意义上，两个流区之间无质量交换；但通过两区之间的交界面有动量和能量的交换，主流区不断地将能量供给底滚区，以维持底旋滚的循环运动。淹没面流除有底滚区外，在鼻坎上还有一表面旋滚区，这两个旋滚区的运动也是靠主流不断供给能量来维持的。



(a) 组 2 自由面流



(b) 组 5 淹没面流

图 4 流线图 ($\Psi/U_m \cdot H_s$)

底旋滚区长度 L_R 可以直观地从零流线 $\Psi = 0.0$ 所反映的再附点得出。图 5 为淹没面流流态下，L_R 和佛劳德数 Fr 的关系曲线，可以看出，当 $Fr < 4.0$ 时，L_R 随 Fr 数的增大而增加；当 $Fr > 4.0$ 时，L_R 随 Fr 数的增大而减小；在 Fr 大约为 6 以后，底滚区长度达到一个定值 ($L_R/H_s \doteq 9.25$)。总的看，旋滚区长度受鼻坎高度与水流条件及自由水面情况等的影响较大，是一比较复杂的问题。

(2) 紊动强度及雷诺应力特征

紊动强度是反映水流紊动剧烈程度的重要参量。本文采用脉动流速与鼻坎平均流速的无量纲比值(纵向为 u/U_m，横向为 v/U_m) 来表示，图 6(a)、(b) 分别为自由面流第 2 组与淹没面流第 5 组的紊动强度分布图。可以看出，沿水深方向在 $y/H_s = 1.0$ 附近，纵向与横向紊动强度均较大；而且纵向紊动强度比横向的大一些，仍为同一量级。沿流程方向由于紊动水流的不断混掺、调整，使紊动强度在断面上的分布由起始断面较小而沿程逐

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

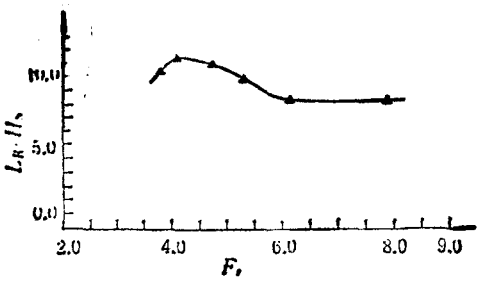
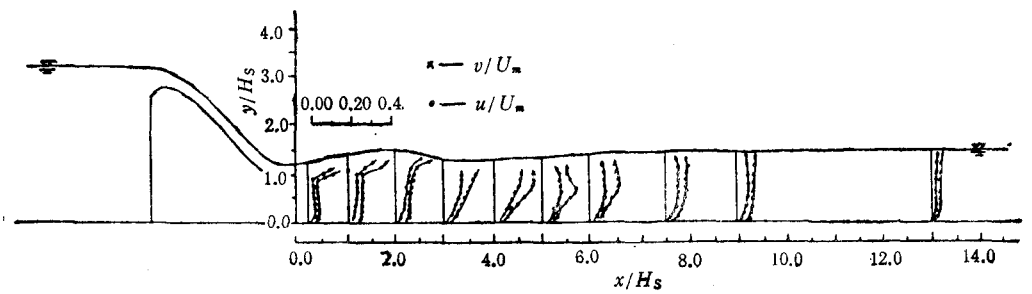
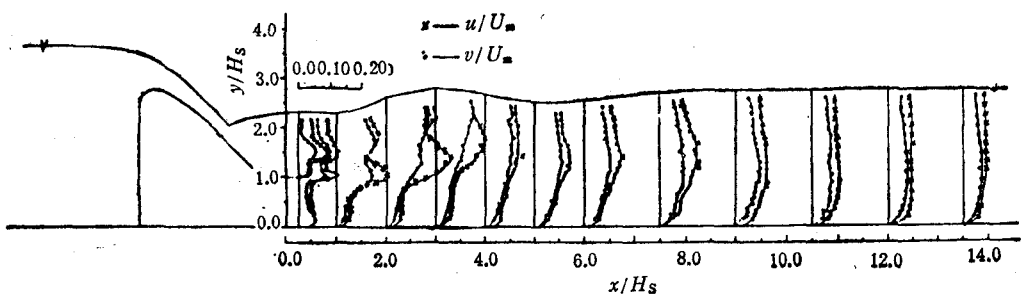


图 5　淹没面流 $L_R/H_s \sim Fr$ 关系图



(a) 组 2 自由面流



(b) 组 5 淹没面流

图 6　纵向及横向紊动强度沿程分布图

渐增大，至底旋滚区核心附近达到最大，随后减小。这与图 3 的流速分布与图 4 的流线图是相符合的。

自由面流(2 组)和淹没面流(5 组)的雷诺应力 $\overline{uv}$ 的分布特性如图 3 所示。同样，在 $y/H_s \fallingdotseq 1.0$ 附近该值较大；随着水流沿程的不断调整，雷诺应力的"弓"形分布趋于平坦，量值也沿程减小；并且临近再附点的断面上，雷诺应力急剧减小。

紊动强度和雷诺应力的分布特征表明，剪切层主要在零流线 $\Psi = 0.0$ 附近产生；亦即主流与旋滚区交界面附近是紊动能量产生的主要源地，也是能量消耗的主要区域。

2. 能量沿程的分布特性及紊动能量的耗散特性

应用紊流力学理论[5]，将能量方程沿流程积分，并略去一些小量，得到任一断面总能量 E_s 的表示式为

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

$$E_S = h + \frac{1}{2gq}\int_0^h U(U^2+V^2)\,dy + \frac{1}{2gq}\int_0^h U(\overline{u^2}+\overline{v^2})dy + \frac{1}{gq}\int_0^h (U\cdot\overline{u^2} + V\cdot\overline{uv})dy \tag{1}$$

右式中：第一项表示单位重量液体的位置水头，即水深；

第二项为单位重量液体的时均流速水头；

第三项为单位重量液体的紊动流速水头；

第四项为单位重量液体的雷诺应力所作的功。

以上各项均化为长度单位。

紊动能量的产生项：

$$P = \frac{2}{U_m^3\cdot H_S}\int_0^h\int_0^x\left[-\overline{uv}\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right) + \overline{u^2}\frac{\partial U}{\partial x} + \overline{v^2}\frac{\partial V}{\partial y}\right]dxdy \tag{2}$$

紊动能量的迁移项：

$$C = \frac{1}{U_m^3\cdot H_S}\int_0^h U(\overline{u^2}+\overline{v^2})\,dy \tag{3}$$

紊动能量耗散项：

$$D = \frac{2}{U_m^3\cdot H_S}\int_0^h\int_0^x \frac{\mu}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}}\,dxdy \tag{4}$$

(1) 断面能量的沿程分布特性

根据实测流场，计算了各断面的时均流速水头、紊动流速水头及雷诺应力作功，计算结果表明，紊动流速水头和雷诺应力功的数值较小，约为时均流速水头值的 5—10%；但是，在底滚区中心附近的断面上，该值较大，最大可达时均流速水头的 45%。计算结果还表明，紊动流速水头的调整过程远比时均流速水头缓慢得多。

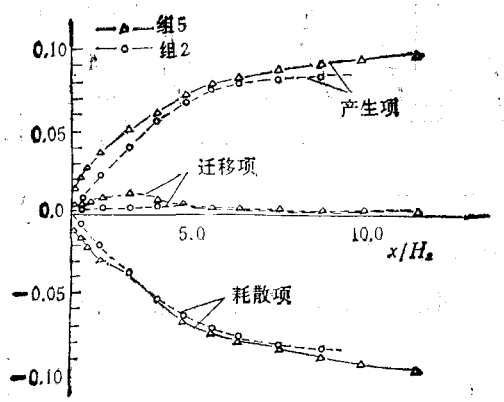


图 7 紊动能量沿程平衡关系图

(2) 能量沿程的耗散特性

面流流动的能量除波动能外，主要用时均能量和紊动能量来表示。根据实测资料用式 (2)、(3)、(4) 计算了自由面流和淹没面流两种流态的下列各项，即紊动能的产生项 P 及迁移项 C，并由此计算了紊动能的耗散项 D，示如图 7。由图可反映出沿程紊动能量的产生、迁移与耗散的变化关系；在数值上，紊动能量的产生项与耗散项大致平衡[6]。

为了分析主流区和旋滚区之间的能量交换关系，选择自由面流和淹没面流二种流态作了近似计算。结果表明，在不考虑面流波能的情况下，自由面流主流区的紊动能量占总紊动能量产生项的 51.95%，底旋滚区占 48.05%；淹没面情况下，主流区的紊动能量占总紊动能量产生项的 48.51%，底旋滚区占 42.24%，表面旋滚区占 9.25%，也就是说，假设水流流经底滚区末端断面后总共损失的时均能量为 100% 的话，则在自由面流时，约有48%

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

的时均能量为维持底旋滚的水流紊动而耗散掉，另有 50.95% 的时均能量维持主流区水流的紊动，剩下 1.05% 的时均能量向下游迁移；在淹没面流情况下，约有 47.38% 的时均能量维持主流区水流的紊动，另有约 50.26% 的时均能量传递给底旋滚和表面旋滚，以维持这两个区水流紊动的进行，余下 2.36% 的时均能量向下游迁移[7]。

综合上述分析表明，通过雷诺应力作变形功，一部分时均能量发生转换，转化为紊动能；剩下的时均能量有一小部分通过时均粘性应力做功耗散掉，其余皆转化为时均动能的迁移与雷诺应力功的迁移。紊动能量中除一部分转化为紊动能的迁移外，其余绝大部分都通过粘性力的作用转变为热能而耗散掉，这部分热能的耗散是能量耗损的主要途径，由此，初步探明了消能机理。

四、结　　语

应用二维激光测速系统对面流消能工下游水流典型流态进行了紊动特征试验研究。实验表明，面流消能工下游的水流运动是一种典型的分离流动，在主流区和旋滚区之间形成一剪切层，在该层附近，时均流速梯度、紊动强度与雷诺应力都较大。通过剪切层的作用，使时均流速沿程得到迅速调整，由不均匀分布趋于均匀分布，同时也消耗大量的能量。通过分析能量的沿程分布特性及紊动能量耗散特性，初步探明了消能机理。实验表明，底旋滚区随自由水面及佛劳德数 Fr 而变，得到淹没面流时底滚长度随 Fr 数的变化关系，可供改善面流消能的设计与运行参考。

参　考　文　献

[1] 冬俊瑞，水力发电，1989(1)：16—20.
[2] Shen Xiong et al., *ACTA AERONAUTICA*, 1984,(5).
[3] Nakagawa H, et al., *J. Hydraulic Research*, (1987).25.
[4] 盛森芝、沈熊、舒玮，流速测量技术，北京大学出版社，1987.
[5] 窦国仁，紊流力学(上册)，人民教育出版社，1981.
[6] H. Rouse et al., *J. Hydraulic Div. ASCE*, 1958.
[7] Lai Yifeng, Dong Junrui, Shen, Xiong, Modern Techniques and Measurements in Fluid Flows, International Academic Publishes, Beijing, Pergamon Press, 1989, 58—63.

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

EXPERIMENTAL STUDY ON TURBULENT CHARACTERISTICS UNDER BUCKET ENERGY DISSIPATORS BY USING A 2-D LDA SYSTEM

Dong Junrui, Shen Xiong, Lai Yifeng

(Dept. of Hydraulic Eng. and Dept. of Eng. Mechanics Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract Turbulence measurements downstream of an energy dissipators, including the reverse flow region were performed using a two-dimensional Laser Doppler Anemometer (2-D LDA). The mean velocity distributions, turbulence intensities and Reynolds shear stresses were revealed in and around the separated shear layer and recirculation region. The patterns of the streamlines were calculated and drawn, and then, the reattachment properties were studied varying with Froude numbers. Finally, the transition process of turbulent energy and energy dissipation were analysed, the mechanism of energy dissipation was tentatively explained.

Key words bucket energy dissipators, reverse flow region, turbulence intensity, Reynolds stress. 2 dimensional Laser Doppler Anemometry

© 1995-2006 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.