

基于惯性耗散法的峡口岬角地形能耗分析

倪培桐^{1,2,3}, 陈卓英^{1,2,3}

(1 广东省水利水电科学研究院, 广州 510630; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广州 510630; 3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广州 510630)

摘要:珠江河口峡口岬角地形(或者称“门”)是珠江河口典型的高能耗区,研究其消能机制,对于解释珠江河口宏观动力现象,提高对河口动力过程的认识有重要意义。本文设计了峡口岬角局部突变地形的湍流能耗特性物理模型试验,采用 SonTek 16MHz ADV 采集了高频流速数据,统计了时均流速及湍流特征量。利用“惯性耗散法”计算了峡口岬角突变地形与明渠水流的湍流动能耗率。峡口岬角地形的突变特征产生明显的形态阻力,本文试验工况引起的紊动强度量值是明渠的2倍到10多倍,湍流剪切应力较明渠水流大近2个数量级,湍流动能是明渠水流的40多倍,湍流动能耗散率比明渠水流湍流动能耗散率大2~3个数量级。从湍流局部平衡及能量传递理论看,峡口局部形态阻力导致时均流速的空间梯度、切应力增大及形成大量更小尺度的涡是湍流能耗率增加2~3个量级的重要原因。

关键词: 峡口地形; 湍流能耗; 物理模型试验; 惯性耗散法

中图分类号:TV148.3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)02-0128-07

Research on turbulent kinetic energy dissipation induced by throat topography based on inertial dissipation method

NI Peitong^{1,2,3}, CHEN Zhuoying^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510630, China;

2. Hydrodynamic Research Key Lab of Guangdong Province, Guangzhou 510630, China;

3. State-province Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The throat topography (or called “gate”) is a typical high energy consumption zone at Pearl River Estuary. Research on the turbulent kinetic energy dissipation induced by the throat topography is important to the explanation of the Pearl River Estuary dynamic phenomenon and understanding of dynamic estuarine processes. A physical model was designed for study of turbulent energy dissipation induced by throat topography. The high frequency velocity was collected by SonTek 16MHz ADV. Turbulent energy dissipation was calculated by inertial dissipation method for channel flow and jet flow induced by the throat topography. Turbulent energy dissipation induced by the throat topography is 100~1000 times than that in common channel. From the local turbulent equilibrium and energy transfer theory, the higher spatial gradients of velocity, turbulent stress and more smaller scale eddies produced by the throat topography is the important reasons that make the turbulent energy dissipation rate increase 2~3 order of magnitude.

Key words: throat topography; turbulent energy dissipation; physical model test; inertial dissipation method

潮汐动力河口重要的能量来源,潮汐能量在口门至潮区界之间通过底摩擦和水体内湍流传输完全消耗。在河口海岸地区水体能量传输与转化过程中,湍流通过从平均流中获取能量并最终转化为热

能。河口局部地形除决定平均流结构外,同时影响河口湍流微动力结构。局部地形影响下的湍流问题是河口动力学的重要研究内容^[1]。Signell等^[2](1991)观测岬角附近涡流的瞬时形成过程,发现该

涡流受床面摩擦效应影响。Furukawa 等^[3] (1998) 研究了岛后尾流的浅水效应, Neill 等^[4] (2004) 观测并模拟了苏格兰福思湾 (Firth of Forth) 岛后尾流现象。据 Zhong^[5] 对切萨皮克湾 (Chesapeake Bay) 的研究发现湾口岬角、Rapahannock 基岩地形、Bay Bridge 附近收窄段、湾顶缩窄段等 4 个高耗能区消耗了 40% 传入的能量, 其中在前 2 个区域耗能约 32%。这些高能耗区是潮流与地形相互作用产生强湍流, 导致能量消耗, 并进一步导致水动力结构变化。局部地形也直接影响紊动强度和涡动扩散系数^[6]。吴超羽等^[6-10] 对珠江河口的研究表明, 基岩岛屿之间形成独特的峡口地形, 峡口地形形成的河口射流结构区是珠江河口典型的高能耗区。高能耗区地形急剧变化产生的形态阻力 (form drag), 改变水流结构的同时增加能量耗散率。由于珠江河口的能耗反映了潮汐等动力与珠江河口地形的相互作用, 研究珠江河口峡口地形区的消能机制, 对于解释珠江河口宏观动力现象, 提高对珠江河口动力过程的认识有重要意义^[11]。

珠江河口峡口的形态阻力所导致的湍流能耗问题研究目前主要通过 3 种途径进行, 即现场观测、物理模型试验, 数值模拟研究。刘欢和吴超羽等^[9-10] 利用高频 ADV 对珠江河口不同地形附近的底边界层进行了现场观测, 并从湍流特征研究了珠江河口局部地形致高耗能区的消能机理, 对应于高能耗区的动力结构, 不同地形附近的湍流微结构有相应的响应, 反映在湍流能量平衡和湍流特征量的时空变化上。现场湍流观测对于了解局部地形引起的河口湍流能耗特性有着重要意义, 然而由于现场水文、地形条件的复杂性, 限制了大规模的湍流原体观测实施。为弥补原体观测的不足, 了解珠江河口峡口地形致动力场的湍流能耗特性, 建立物理模型试验是研究该问题的重要途径。对于珠江河口而言, 长期地形演化过程中, 除海外岛屿之间峡口存在自由射流外, 大多数河口的射流受制于固壁边界, 形成紊动附壁特殊浮力射流类型。本文建立水槽试验, 在概化条件下, 研究珠江河口峡口地形附壁特殊浮力射流的湍流能耗特征及其机制^[11]。

1 数据及方法

1.1 物理模型试验

珠江河口 8 个口门中有 7 个通过狭窄的基岩峡口流入河口湾, 这些基岩峡口 (也称之为“门”)。这些峡口及其所产生的双向射流动力-沉积-形态

系统的形成需要一定的条件: ①基岩岛丘之间构成一定宽度的峡口; ②峡口上下游方向均有宽阔的水面和较大放宽率; ③峡口的走向与主要涨落潮流方向一致。珠江口“门”地形条件下, 形成射流动力结构, 最为典型的门有虎门、崖门双向射流系统、磨刀门单向射流^[6-8]。

根据河口潮平均能耗方程^[5], 水体能耗与流体性质 (水体密度、涡动粘性系数)、地形的几何尺寸 (河道长、宽、深、糙率)、流动条件 (水流速度、风速) 等参数有关。本文不考虑流体性质、边界糙率变化等因子, 仅对比研究局部地貌形态峡口缩窄的形态阻力引起的能耗变化。

珠江河口峡口地形复杂多样, 峡口与下游河道的宽度比可以达数倍, 事实上本文无法对珠江峡口各种类型进行试验, 但随着河口的演化, 峡口地形多以紊动附壁特殊射流为特征 (如虎门的涨潮射流) 是本文研究重点。为便于控制及进行机理分析, 试验边界条件尽量简单且有代表性, 峡口地形概化形态见图 1。

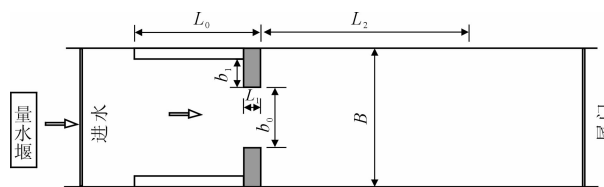


图1 峡口局部地形能耗试验布置图

峡口的宽度受试验水槽宽度、ADV 探头宽度、水流流态限制, 本文选择峡口的宽度为 18 cm, 峡口在 y 向对称布置, 峡口的宽度与下游河道宽度之比为 1: 2.75, 类似于珠江河口的紊动附壁特殊浮力射流类型^[9]。为保证水流处于充分发展的湍流状态, 流量选择 20 L/s, 下游水深设置为 20 cm。试验主体设备为长 14 m, 宽 0.5 m 的玻璃水槽, 下游设尾门可控水位; 水槽配置有供、排水泵及流量量测系统。流量测量用三角形量水堰量测, 相对误差小于 1%。水位测量仪器测针的量测精度为 0.1 mm。流速采集用 SonTek 公司的室内实验室专用的 16MHz ADV。在峡口地形水流试验中沿水流方向布置 8 个流速测量断面 (图 2), 明渠水流试验设置 3 个流速断面。每个流速测量断面垂直水槽方向布置 9 条垂线, 每条垂线水底至 5 cm 范围内按照 0.5 cm 间隔进行流速数据采集, 5 cm 范围至水面范围内以 2 cm 间隔数据采集。ADV 流速数据采样频率设置为 50 Hz, 每个测点的采样时间为 3 min。根据 SonTek 公司推荐的相关系数、信噪比等参数控制数据测量质量。

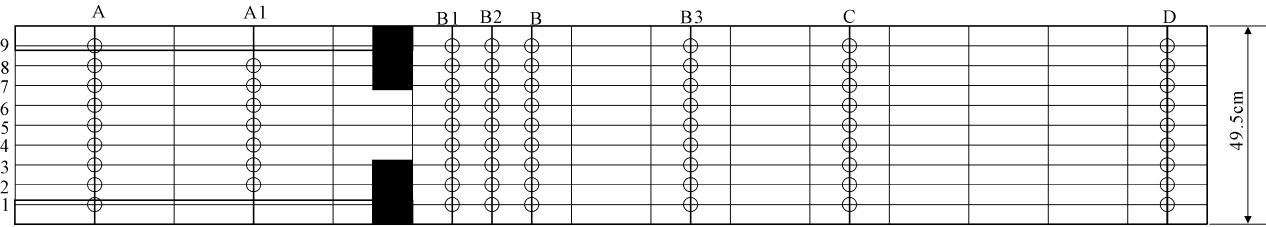


图2 峡口局部地形能耗试验流速测点布置图

1.2 惯性耗散法

通过把一系列观测资料分解成波长(或频率)与能谱密度的关系,就可发现不同时间和空间尺度的湍涡在整个湍流状态中所起的作用。湍流能谱的惯性副区是指在湍流能谱的某个波数范围内能谱密度只与湍流动能耗散率和波数有关,而与湍流在大尺度的能量输入和小尺度的能量耗散(分子粘性)无关。利用湍流惯性副区(Inertial Subrange)估计湍动能耗散率的方法称为“惯性耗散法”^[12-15]。

对于充分发展的湍流,湍流能谱符合 Kolmogorov 衰减律,具有如下形式:

$$E_{ii}(k) = \alpha_i \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (1)$$

式中: $E_{ii}(k)$ 为第 i 个流速分量在波数 k 的能谱密度 ($i = 1, 2, 3$); ε 为湍动能耗散率; α_i 为一维 Kolmogorov 普适常数, $i = 1$ 对应于平均流方向, $i = 2, 3$ 对应于与平均流垂直的另外两个流速分量。根据试验可得 $\alpha_1 = 0.53, \alpha_2 = \alpha_3 \approx 0.71$ ^[16]。

本文的观测均为单点流速时间序列,借助“Taylor 冻结假设”,把波数谱转化为频率谱。取波数 $k = 2\pi f/U$, 其中 f 是频率; U 是平均流速,则(1)式转化为:

$$\frac{2\pi}{U} E_{ii} \left(\frac{2\pi f}{U} \right) = S_{ii}(f) \quad (2)$$

$$\text{或: } k E_{ii}(k) = f S_{ii}(f) \quad (3)$$

由(2)和(3),湍动能耗散率的表达式为:

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{U} \alpha^{-3/2} f^{5/2} S_{ii}^{3/2}(f) \quad (4)$$

式中: $S_{ii}(f)$ 为对应频率 f 的能谱密度,上横线表示在惯性副区内取平均值。由实验数据可知,试验水流垂直流速受波动影响较水平流速要小,垂直脉动 w' 主要由湍流产生,因此只用垂直流速脉动来估计湍流动能耗散率。

2 结果与讨论

根据湍流局部平衡理论,湍流动能局部平衡为:

$$-\nu_i \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

式(5)第一项为湍流消能项;第二项为紊动切应力所做的功。湍流消能项等于剪切应力 $\overline{u'_i u'_j}$ 与时均水流速梯度 $\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j}$ 的乘积。由于观测数据局限,本文主要通过切应力和时均流速梯度来讨论峡口地形引起的湍流能耗变化。

2.1 时均流速与流速梯度

峡口地形的形态阻力表现为阻水作用并使上游水位壅高(本试验约 1.5 cm),峡口附近水面波动现象明显。峡口地形横断面流速剖面显示在射流的主体段(峡口下游 10、20、30 cm),各断面的纵向流速分布有明显的相似性(自保性)(图 3),但由于试验精度影响,时均流速分布并未严格对称。由于峡口地形的影响,峡口下游横断面流速梯度明显比明渠水流流速梯度大(图 4)。

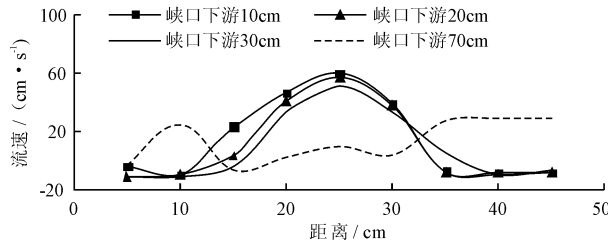


图3 峡口地形横断面流速剖面(水深 15 cm)

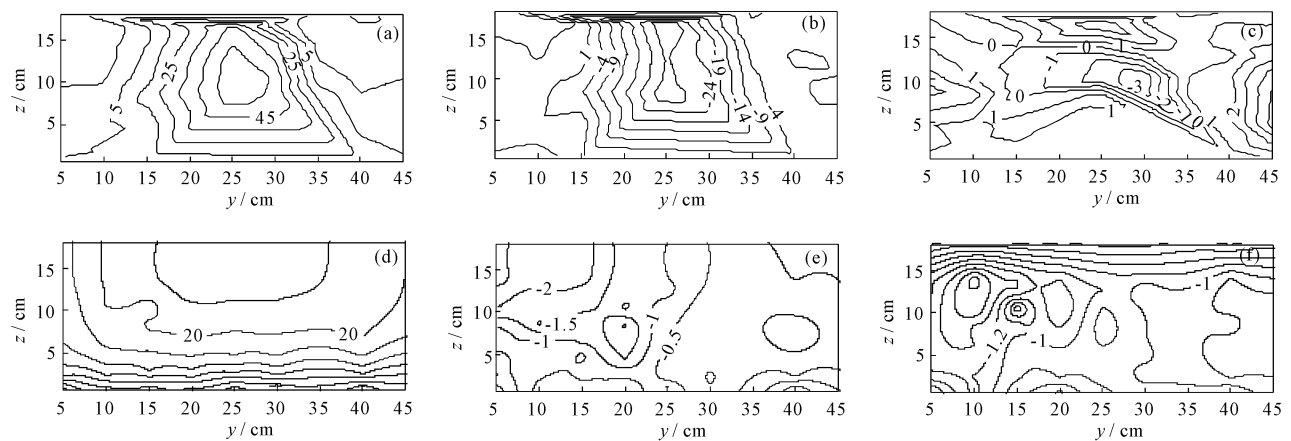
2.2 湍流特性

湍流数据分析的重要方法是把湍流流速数据看作随机信号,统计湍流不规则运动的统计特征变量,如紊动强度、湍流动能、雷诺应力等。

峡口地形的形态阻力引起下游水体紊动强度增加。在峡口射流轴线周围水流流速也大,最大可达 60 ~ 70 cm/s,水流的脉动强度相对较小(峡口后 20 cm 位置纵向紊动强度约为 4 ~ 5 cm/s)。高紊动强度区位置与射流混合区位置一致,紊动强度可达 19 cm/s,是射流轴线紊动强度的 4 ~ 5 倍。与明渠水流相比,峡口地形的形态阻力引起的紊动强度量值是明渠的 2 ~ 10 倍(图 5)。峡口地形致使水体的紊动切应力横断面分布不均匀,最大值出现在射流轴线

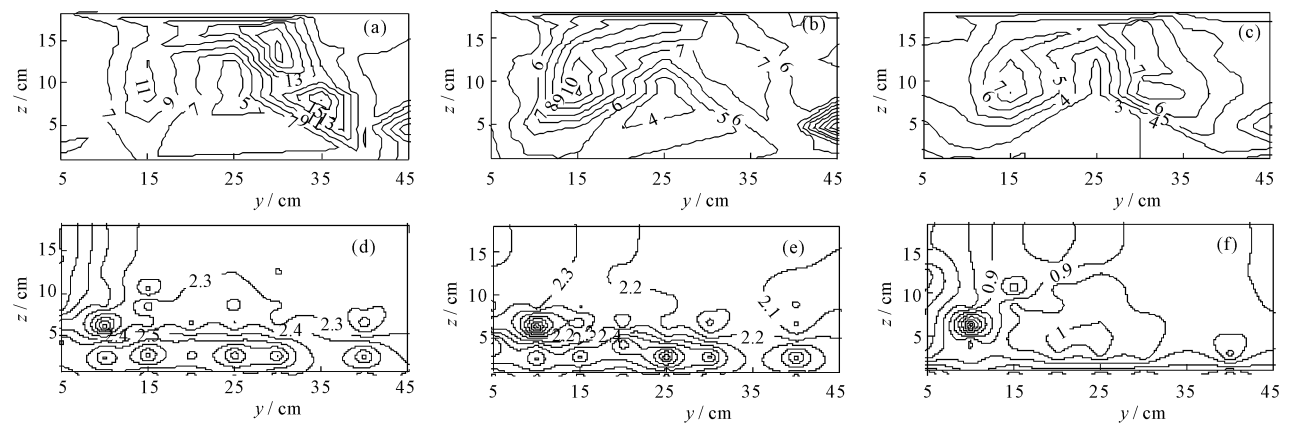
两侧,高切应力位置与混合区位置一致。射流两侧混合区、射流轴线上方,水体切应力都较大。射流轴线周围,水体的切应力相对小,两侧和表层切应力最大可达 $50\text{ cm}^2/\text{s}^2$ (图 6)。峡口地形条件下的紊动

动能断面分布与紊动强度分布规律一致。峡口地形形态阻力的湍流动能可以超过 200 J ,接近明渠水流最大湍流动能的 40 倍(图 7)。



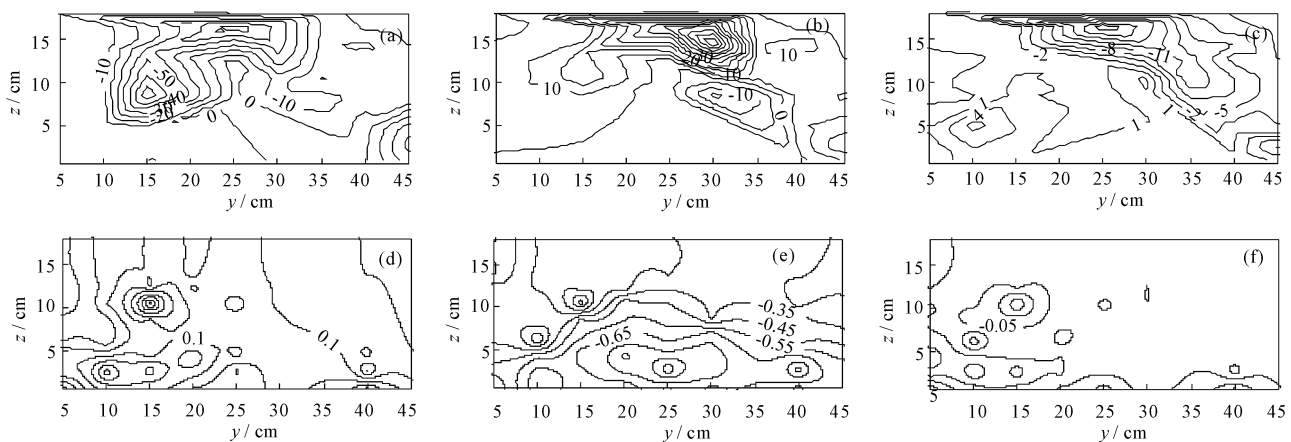
注:(a)、(b)、(c)分别是峡口下游 20cm 流速 u 、 v 、 w 等值线;(d)、(e)、(f)分别是明渠水流 u 、 v 、 w 等值线

图 4 流速剖面(单位: cm/s)



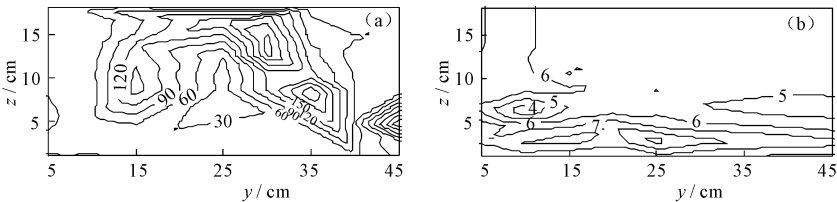
注:(a)、(b)、(c)分别是峡口下游 20 cm 紊动强度 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 等值线;(d)、(e)、(f)分别是明渠水流紊动强度 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 等值线

图 5 紊动强度等值线(单位: cm/s)



注:(a)、(b)、(c)分别是峡口下游 20 cm 流速 $\overline{U'V'}$ 、 $\overline{U'W'}$ 、 $\overline{V'W'}$ 等值线;(d)、(e)、(f)分别是明渠水流 $\overline{U'V'}$ 、 $\overline{U'W'}$ 、 $\overline{V'W'}$ 等值线

图 6 剪切应力等值线(单位: cm^2/s^2)



注:(a)、(b)分别是峡口下游 20cm、明渠水流单位质量水体的湍流动能紊动强度

图 7 湍流动能(单位: cm^2/s^2)

2.3 湍流动能耗率

湍流动能耗散率是表征湍流小尺度涡的机械能转化为热能速率的湍流特征量。为了解峡口地形形态阻力对水流的湍流动能耗散影响,本文用“惯性耗散法”估计湍流动能耗散率。

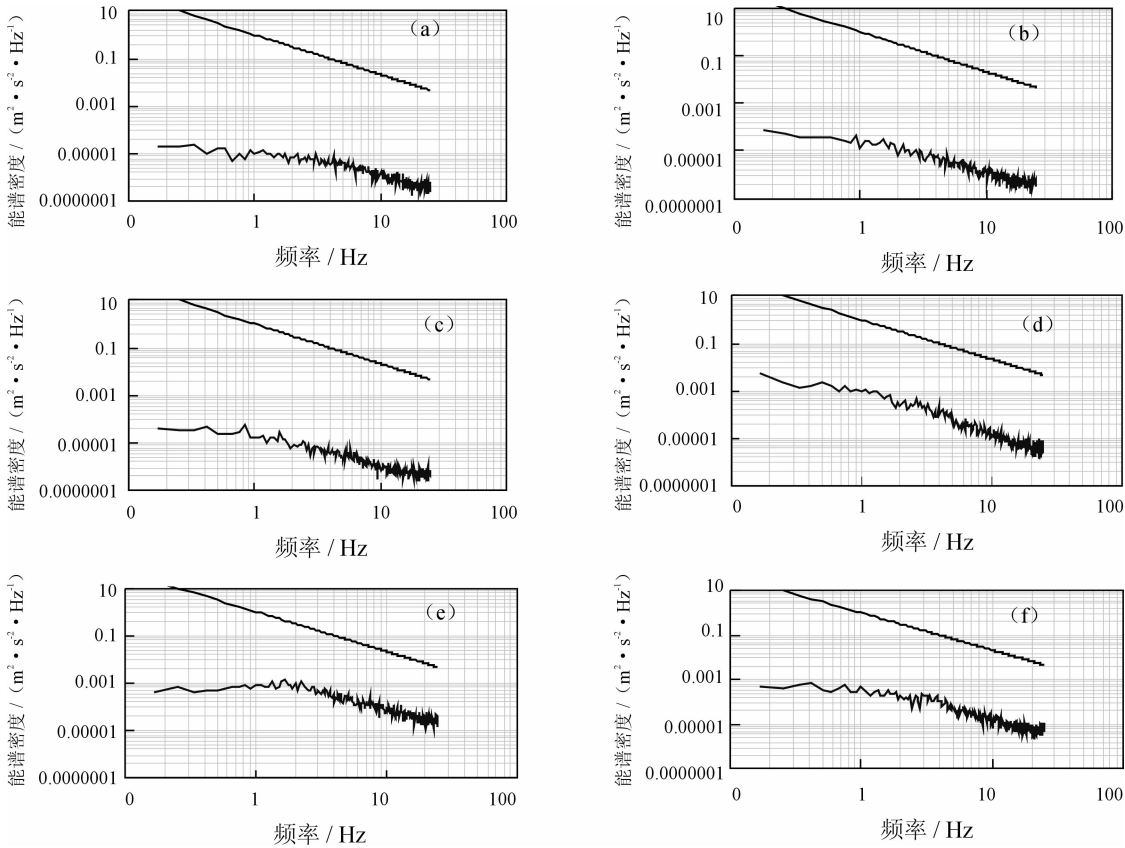
峡口地形形态阻力引起的垂向湍流动能谱的惯性副区在 $1 \sim 20 \text{ Hz}$ 左右(图 8),峡口地形形态阻力不会改变水流的惯性副区,在不同位置的惯性副区范围一致(表 1)。峡口地形形态阻力引起的断面平均湍流动能耗散率可达 $1\,631.73 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$ (峡口后 20 cm 位置),比明渠水流断面平均湍流动能耗散率大 2~3 个数量级。

明渠水流的垂向湍流动能耗散率范围为 $1.7 \times$

$10^{-5} \sim 6.0 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$,垂向上越接近床面,湍流动能耗散率越大。峡口地形加大了水体的湍流动能耗散率,峡口后两侧掺混区湍流动能耗散率相对较大(P3、P7 垂线及附近点),断面两侧湍流动能耗散率相对较小(P2、P9 垂线)。垂向湍流动能耗散率最大值位置与紊动强度、紊动切应力等湍流要素分布位置一致(图 9、图 10)。

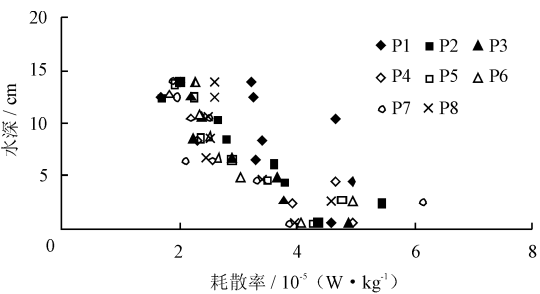
表 1 峡口地形与明渠水流湍流动能耗散率统计表

断面	断面平均耗散率/ (10^{-5} W/kg)	计算 样本数
明渠	3.16	63
峡口后(20 cm)	1631.73	59
峡口后 30~70 cm 射流轴线	795.0	18



注:(a)、(b)、(c)分别为明渠水深 0.5、8.6、13.8 cm 位置;(d)(e)、(f)分别为峡口轴线水深 0.5、6.5、17.5 cm 位置

图 8 明渠、峡口典型测点湍流能谱(曲线为能谱曲线,直线为 $f^{-5/3}$ 曲线)



注:P1 ~ P8 为明渠断面均匀分布的 8 条采样垂线

图 9 明渠典型断面各垂线湍流动能耗散率

2.4 讨 论

本文明渠、峡口地形湍流能耗试验的控制条件相同,唯一的差别是局部地形峡口的存在与否。与明渠水流相比,由于峡口地形的存在,对水体流动产生形态阻力,部分水体动能转化为势能,形成壅水。峡口地形下游形成射流,流速增大,势能转化为动能。

(1)从动力机制上看,根据峡口地形附壁射流动力场的时均与湍流特性、能量耗散空间分布差异,可分成 4 个单元,分别对应于峡口的射流核心区、混合区、下游区、上游区^[17]。峡口的射流核心区、下游区、上游区的动力平衡项都是正压力与水平对流的平衡,射流核心区是高能耗区,主要是原因流速大,能量耗散以底摩擦能耗为主,单位面积底摩擦能耗比下游区、上游区大一个数量级。峡口射流混合区,射流与周围水体的流速梯度大,紊动强度高。本分区湍流能耗与底摩擦能耗处于同一数量级,动力平衡项主要是正压力与水平对流、湍流应力的平衡。

(2)从湍流局部平衡理论看,湍流能耗率的量值与时均流速的空间梯度、切应力有关。本文的对比试验中峡口地形作用下射流混合区的剪切应力 $u_i' u_j'$ 最大可达到 $50 \text{ cm}^2/\text{s}^2$,比明渠水流的大 2 个数量级,明渠底切应力较大,但量值一般不超过 $1 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。

峡口射流的核心区与回流区之间时均流速梯度大,比明渠水流的流速梯度大 1 ~ 2 个数量级^[11],明渠水流的流速梯度主要为水平流速在垂向上的流速

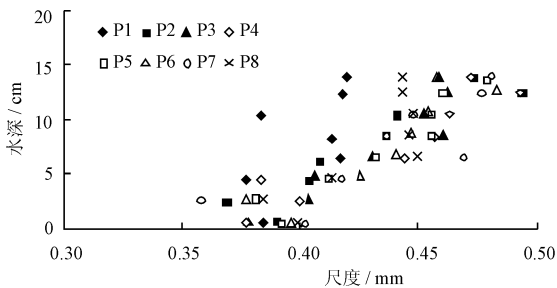
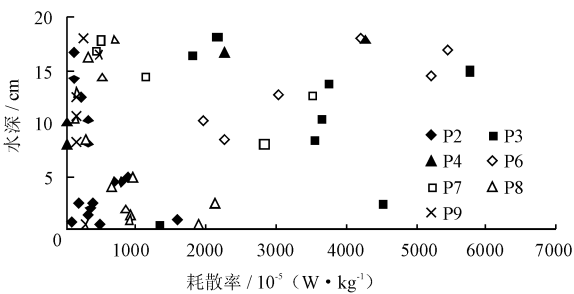


图 11 明渠典型断面各垂线湍流耗散尺度



注:P2 ~ P9 为峡口后 20cm 断面均匀分布的 8 条采样垂线

图 10 峡口地形条件下典型断面湍流动能耗散率

差异。试验表明,剪切应力峰值分布位置与局部地形形成的高流速梯度区、高湍流动能区位置一致,湍流能耗的峰值区域出现在混合区。从图 4、8 可以看出,明渠水流平稳,水流紊动强度小,湍动能耗散率也很小,而由于峡口地形的存在,射流的主流区、回流区之间会通过回流出现明显的质量、动量交换。主流区与回流区之间流速梯度大、水流脉动强度大、紊动切应力大,水体的紊动强度增大,同时也使湍流能耗率增加 2 ~ 3 个量级。

(3)从微涡尺度看,湍流的宏观尺度的重要性在于它本质上决定了水流的消能率,这些大尺度的涡旋连续的消能于小的和更小的尺度涡旋,最终随着能量的递减至 Kolmogorov 尺度。这一尺度决定水流中最小的涡旋的大小,这些涡旋消散湍流动能。Kolomogorov 微尺度由下式给出:

$$\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4} \tag{6}$$

耗散尺度 η 取决于湍流能量耗散率 ε 与运动粘性系数 ν 。本文对比试验中明渠水流 Kolomogorov 微尺度涡近底层涡在 0.4 mm 左右(图 11),垂直剖面上先减小后增大,上层在 0.5mm 左右。受峡口地形影响,除了观测样本中除 2 个点外, Kolomogorov 微尺度涡主要在 0.1 ~ 0.2 mm 左右(图 12)。由于能耗率与微涡尺度有关,尺度越小,能耗率越高。与同条件的明渠水流相比,峡口地形作用增大水流的掺混,在掺混区域存在大量更小尺度的 Kolomogorov 微尺度涡,能量耗散作用强。

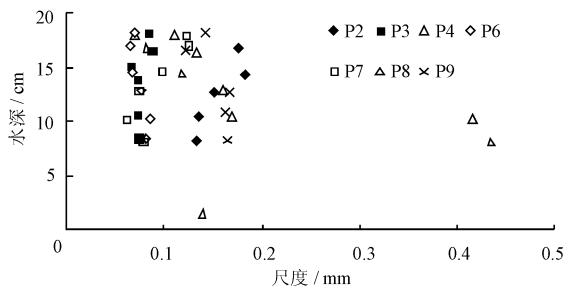


图 12 峡口地形条件下典型断面耗散尺度

3 结 论

本文设计了峡口地形的附壁湍流能耗物理模型试验,采用 SonTek 16MHz ADV 采集高频流速数据,并统计了湍流特征量,分析了峡口地形形态阻力形成湍流能耗特性。

(1)峡口地形形成特殊的射流结构,同时影响决定其微动力结构。峡口地形的突变特征产生明显的形态阻力,从而直接影响水体的紊动强度。与明渠水流相比,峡口地形形态阻力引起的紊动强度量值是明渠的 2~10 倍,最大湍流剪切应力比明渠水流大近 2 个数量级,湍流动能是明渠水流的 40 多倍。峡口地形对垂向湍流动能谱的惯性副区范围影响不大,其产生的湍流能耗散率可比明渠水流湍流能耗散率大 2~3 个数量级。

(2)峡口地形的存在,射流的主流区、回流区之间会通过回流出现明显的质量、动量交换。主流区与回流区之间流速梯度大、水流脉动强度大、紊动切应力大,水体的紊动强度增大,是湍流能耗率增加 2~3 个量级的主要原因。

(3)对比试验中明渠水流微尺度涡近底层涡在 0.4~0.5 mm 左右。受峡口地形形态阻力的影响,微涡尺度主要在 0.1~0.2 mm 左右。峡口地形作用增大水流的掺混,在掺混区域存在大量更小尺度的涡,能量耗散作用强。

参考文献:

- [1] Uncle R. Estuarine physical processes research: Some recent studies and progress[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002,55:829-856.
- [2] Signell R P, Geyer W R. Transient eddy formation around headlands[J]. Journal of Geophysical Research, 1991,96 (C2):2561-2575.
- [3] Furukawa K, Wolanski E. Shallow-water Frictional Effects in Island Wakes[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998,46:599-608.
- [4] Neill S P, Elliott A J. In situ measurements of spring-neap variations to unsteady island wake development in the Firth of Forth, Scotland[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004(60):229-239.
- [5] Zhong L, Li M. Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay[J]. Continental Shelf Research, 2006,26 (6):752-770.
- [6] 吴超羽,何志刚,任杰,等.珠江三角洲中部子平原形成演变机理研究——以大鳌平原为例[J].第四纪研究,2007b,27(5):814-827.
- [7] 吴超羽,任杰,包芸,等.珠江河口峡口的地貌动力学初探[J].地理学报,2006,61(5):537-548.
- [8] 吴超羽,包芸,任杰,等.珠江三角洲及河网形成演变的数值模拟和地貌动力学分析:距今 6000~2500 a.[J].海洋学报,2006,28(4):64-80.
- [9] 刘欢.珠江河口地形致高能耗区的消能特点和机理研究[D].中山大学,2009.
- [10] 刘欢,吴超羽,许炜铭,等.珠江河口底边界层湍流特征量研究[J].海洋工程,2009,27(1):62-69.
- [11] 倪培桐.地形致动力场对珠江河口能量耗散及其作用机制[D].中山大学,2010.
- [12] Egbert G D, Ray R D. Significant dissipation of tidal energy in the deep ocean inferred from satellite altimeter data[J]. Nature,2000,405(15):775-778.
- [13] Voulgaris G, Trowbridge J H. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulent measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998,15(1):272-289.
- [14] Nimmo S W, Katz J, Osborn T R. On the structure of turbulence in the bottom boundary layer of the coastal ocean[J]. Journal of physical oceanography,2005,35(1):72-93.
- [15] 刘志宇,魏皓.黄海潮流底边界层内湍动能耗散率与底应力的估计[J].自然科学进展,1997,17(3):362-369.
- [16] Sreenivasan K R. On the universality of the Kolmogorov constant[J]. Physics of Fluids,1993,7(11):2778-2784.
- [17] 倪培桐,吴超羽,刘欢,等.“门”地貌单元的能量耗散和过程机制[J].热带海洋学报,2012,31(2):34-40.