

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.013

臂坡对堰槽组合设施紊流结构影响试验研究

廖伟^{1,2}, 张维乐³, 王文娥², 王坤¹, 巩朝¹, 王芳芳³

(1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610095; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 堰槽组合设施在山区河流流量监测中具有很大优势, 臂坡作为其关键形状参数, 可以调节堰槽组合设施内水动力特性, 改变堰后泥沙沉积分布和下游冲刷形态。为进一步探索臂坡对堰槽组合设施水流流动特性的影响, 通过室内试验, 分析不同臂坡、来流强度及底坡因素影响下的底层水流特性变化, 探究流速、紊动能、床面切应力等参数分布规律, 揭示堰槽组合设施运行过程中水流能量耗散及冲刷机理。研究表明: 臂坡影响流量的横向分布, 臂坡增大加剧水流聚中, 使两侧堰后水流下切回流增强, 增加溯源冲刷风险; 臂坡和底坡增大导致堰后两侧紊动强度及紊动能增大, 加剧了堰下水流能量耗散, 有效提高了设施的消能率; 相比雷诺切应力法, 设施后床面剪切应力计算更适合采用修正紊动能法且床面剪切应力较大值主要集中在两侧堰后区域; 大尺度涡结构主要集中在排淤量水槽出口两侧, 而其他涡区分布在两侧堰后区域。

关键词: 堰槽组合; 臂坡; 溯源冲刷; 水流结构; 紊动; 涡旋

中图分类号: TV135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)03-0465-15

堰槽组合设施以灌区量水槽和克伦普堰为基础, 利用量水堰、量水槽的稳定水位—流量关系, 在保证较高测流精度及测流范围的同时, 还能满足生态功能要求, 在山区河流流量监测中具有较大优势^[1-6]。当堰槽组合设施在山区河道中修建和运行时, 堰前和堰后区域的水流结构将直接影响泥沙淤积分布和下游冲刷形态^[7-8], 改变生态环境的演变。此外, 在汛期泄洪期间, 河道流量突增, 会造成堰后不同程度的冲刷破坏, 形成溯源冲刷^[9], 影响堰槽组合设施的测流精度。因此, 研究大流量下堰槽组合设施的底层水流结构, 分析堰槽组合设施的堰后冲刷、泥沙淤积及能量扩散等问题, 可为堰槽组合测流设施的工作性能及体型优化提供一定的理论参考, 对堰槽组合测流设施在山区季节性河流中的推广应用具有一定的指导意义。

臂坡作为堰体形状的关键影响因素, 可以控制主流, 改变过堰流量的横向分布, 影响水流对两侧坡脚的冲刷^[10-12]。Li等^[13]研究表明, V型堰臂坡改变了下游湍动能水平分布, 并指出两臂夹角在60°~120°之间适宜鱼类通过; 马立等^[14]通过对比矩形淹没式矮堰和带上游堰坡的淹没式矮堰试验结果, 发现上游堰坡仅能增加下游浑水冲刷深度的振荡频率, 并可以有效减少矮堰上游浑水冲刷深度; Baki等^[15]通过数值模拟, 为堆石堰的设计提供了有效池间距、河床坡度、堰高、臂角和堰布置的建议, 并指出臂角大于60°适合鱼类通过。目前, 关于量水槽和拦水堰的结构优化研究较多, 但二者研究相对独立, 对于堰槽组合设施的水力特性研究却较少, 特别是设施后底层水流结构的认识还不足。因此, 为了确保安全设计并维持河道的稳定性, 需进一步探究底层水流结构对堰后冲刷机理的影响。

本文针对不同臂坡、底坡、来流强度等条件, 对堰槽组合测流设施进行室内模型试验, 分析底层水流的三维时均流速、紊动强度、雷诺切应力、紊动能、2种床面切应力以及涡旋的分布规律, 旨在为堰槽组合体型比选及应用提供理论参考。

收稿日期: 2022-07-27; 网络出版日期: 2023-03-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230329.0834.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52079113); 江苏省基础研究计划资助项目(BK20190142)

作者简介: 廖伟(1994—), 男, 四川德阳人, 博士研究生, 主要从事工程水力学研究。E-mail: 875517412@qq.com

通讯作者: 张维乐, E-mail: 1833305149@qq.com

1 堰槽组合试验概况

1.1 水槽系统与测量系统

试验系统由供水系统、变坡升降系统、采集系统、智能控制终端、稳水段、矩形试验水槽、尾水阀门和尾水池组成。其中,玻璃试验水槽长1 800 cm,宽80 cm,高60 cm;供水系统根据设定目标流量来自动调节变频器的频率,从而实现控制进水流量;变坡升降系统可根据目标角度来实现角度设定,控制精度 ± 0.1 mm;电磁流量计测量范围为0~200 L/s,流量精度为 $\pm 2\%$ 。三维流速采用超声多普勒流速仪(ADV)测量,频率为100 Hz,3D下视探头,探头直径为6 cm,精度为 ± 1 mm/s,采样空间距离探头距离为5 cm,根据不同的流速大小调整ADV的测速范围。将坐标原点设置在距排淤量水槽进口40 cm的中轴线上,按照右手法则,将水槽的纵向流速方向设置为 x 轴(纵向),水槽的横剖面方向为 y 轴(横向),沿水深垂向方向设置为 z 轴(垂向);试验水槽横向宽度为 B ,水深为 H 。

1.2 堰槽组合体型参数与试验方案

以臂坡为0的堰槽组合设施作为设计基础模型,参照平坦V型堰设计规范以及U型堆石堰结构参数^[16-17],设计了不同臂坡(W)的堰槽组合设施。该设施由克伦普堰和排淤量水槽组成,整个堰槽组合设施中两侧堰体长度与排淤量水槽宽度($2b$)比为1:1:1,隔墙厚度为 s ,隔墙高度为 d ,体型参数见图1和表1。

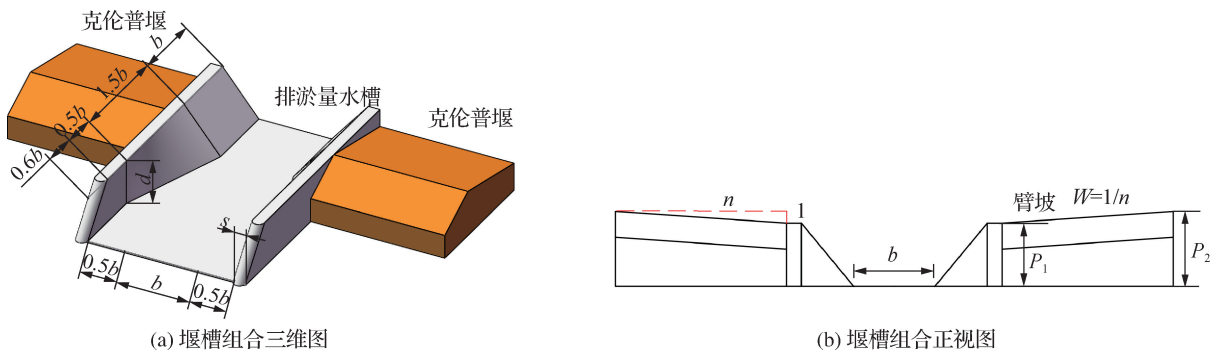


图1 堰槽组合体型参数

Fig. 1 Weir and trough combination body shape parameter

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

单位: cm

名称	W	b	s	堰高 P_1	堰高 P_2
模型1	0	13	2.6	7.8	7.8
模型2	1/16	13	2.6	7.8	9.33
模型3	1/8	13	2.6	7.8	10.8

本试验将流速测点平面区域划分成3个区域,共453个测点,如图2。堰槽组合前U形区域I,布设138个测点;排淤量水槽锥形区域II,布设120个测点;堰槽组合后矩形区域III,布设195个测点。垂向测点布置在距离水槽底部1 cm范围内,对靠近堰槽组合设施模型区域和排淤量水槽内的区域进行了测点加密。试验以流量 Q_{flow} (30、45和60 L/s)、底坡 S (0° 、 0.25° 和 0.5°)和侧堰臂坡(0、1/16和1/8)3种变量组成了7组试验工况(表2)。设施在山区河流中受到汛期来流特点影响,常在堰后冲刷形成自然堆石,造成下游壅水。基于此,本试验将下游淹没度统一设置成0.9,如表2。待水流稳定后开始采样,每个测点测量时间取50 s,共采集5 000个瞬时流速值(u 、 v 、 w)。

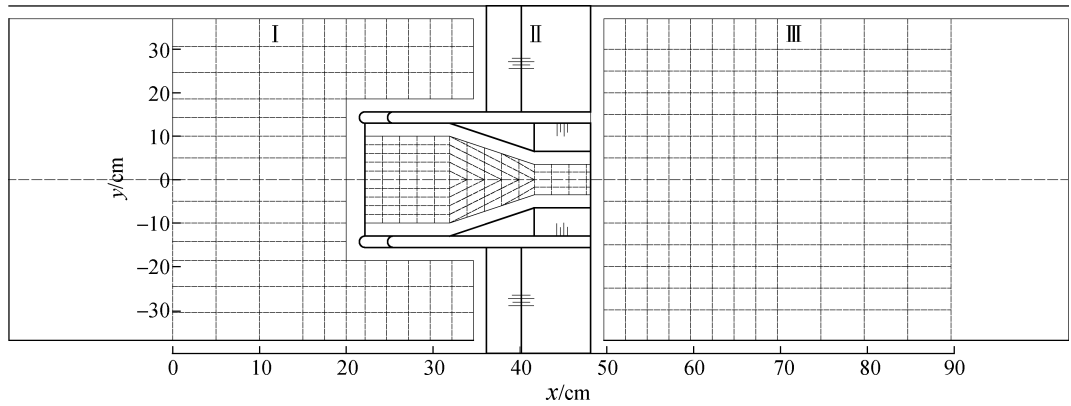


图2 流速测点布置

Fig. 2 Layout of flow velocity measurement points

表2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	$Q_{\text{flow}} / (\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	$S / (^{\circ})$	W	淹没度
工况 1	45	0	0	0.9
工况 2	45	0	1:16	0.9
工况 3	45	0	1:8	0.9
工况 4	30	0	1:16	0.9
工况 5	60	0	1:16	0.9
工况 6	45	0.25	1:16	0.9
工况 7	45	0.50	1:16	0.9

1.3 流速数据处理

ADV 流速测量中信噪比(R_{SN})和相关系数(r)是反映数据准确度的重要参数,一般认为 $R_{\text{SN}} > 15$ dB、 $70\% \leq r \leq 100\%$ 时所测数据基本可靠。但在湍流强度较大或水中气泡掺混较多条件下,平均速度可以选择最小相关度 30% 进行计算,而紊动特性分析最小可以选择相关度 40% 进行计算,信噪比选择平均值 15 dB^[18]。本试验中 R_{SN} 均大于 20 dB,外界噪音干扰很小,但堰后由于存在跌水现象,水中掺混了一定的气泡,因此,制定 2 种数据筛分标准。对水流较平稳的区域 I 和区域 II,最小相关度选择 85%,平均信噪比选择 15 dB;而对于水流气泡掺混比较大的区域 III,最小相关度选择 60%,平均信噪比选择 15 dB。筛分掉不合格的数据,并采用插值法得到合格的数据点。为了得到最终可靠的数据,去除时间序列中由于干扰产生的尖峰值,本文选择了速度阈值法和滤波法做进一步筛分。

2 结果及分析

2.1 时均流速分布

2.1.1 区域 I 和区域 II

图 3(a) 为工况 2 条件下纵向流速(u)和平面速度(u, v)矢量分布图;图 3(b)和图 3(c)分别为工况 2 下左侧堰前区域纵向流速(u)和垂向流速(w)分布图。

整体上,流速呈现出对称分布。由图 3(a)和图 3(b)可知,在区域 I 内水槽中间流速略大于两侧,当两

侧水流不断流向克伦普堰时，纵向流速不断减小，且下降速率逐渐增大。而图3(c)呈现出两侧垂向流速增加速率逐渐增大，这说明当两侧水流不断流向克伦普堰时，底层流速受到克伦普堰阻碍，纵向流速急剧减小，纵向上的动能转化成垂向上的动能，与上层水流掺混后翻越克伦普堰堰顶，在堰后形成负流速区。在区域Ⅱ内，水流受到排淤量水槽侧壁的挤压，流速逐渐增大，在出口处达到最大值。图3(a)表明区域Ⅰ内速度矢量基本保持平行，没有明显方向改变，堰槽组合前水流平稳满足量水测点选取要求；区域Ⅱ矩形段内的速度矢量保持平行，当水流进入收缩段时，速度矢量出现聚中现象，最终在窄段内速度矢量恢复到平行状态。

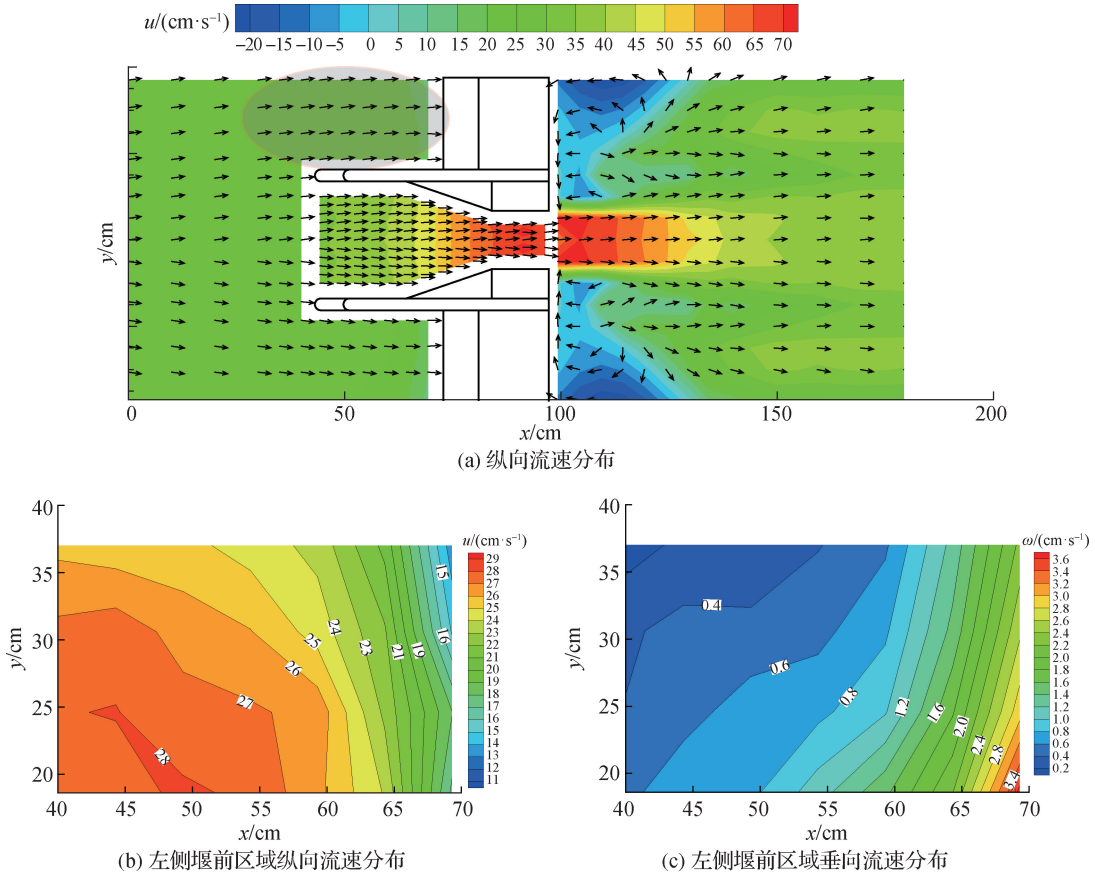


图3 工况2下底层水流流速分布

Fig.3 Flow velocity distribution of bottom layer under working condition 2

2.1.2 区域Ⅲ

当排淤量水槽和两侧克伦普堰同时过流时，水流结构复杂。为便于分析其水流结构，根据水流对堰后底部的冲击形式，将水下淹没射流近似看作附壁射流和冲击射流2种。量水槽排出水流受河床底部限制，平行且紧贴壁面进行流动，对下游河床产生切应力，形成附壁射流区域(图4)。在附壁射流中，流速在立面上表现为双层非对称结构，可分为近壁流区和边界层外延区，本文主要测量的是近壁流区内的流速。克伦普堰堰上水流沿着背坡(1:5)流出，对堰后一定距离范围形成冲击，可近似看成冲击射流。因此，克伦普堰堰上过流可划分成附壁射流区1、冲击射流区和附壁射流区2等3个区域(图5)。在附壁射流区1中，水流会沿着克伦普堰顶部壁面流动，与外部水流发生掺混，形成卷吸现象。水流进入冲击射流区时，射流边界向两侧扩散，在接触河床底部时，流动方向迅速改变，形成较大的速度梯度以及压力梯度，易造成河床底部冲刷。同时由于堰后壁面和中轴射流区存在，限制了射流向四周扩散，与周围水体发生掺混，形成三维方向上的环流和负流区域，形成溯源冲刷破坏。

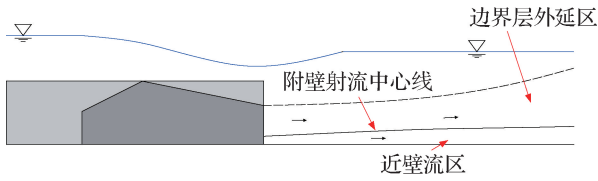


图4 附壁射流
Fig.4 Wall jet

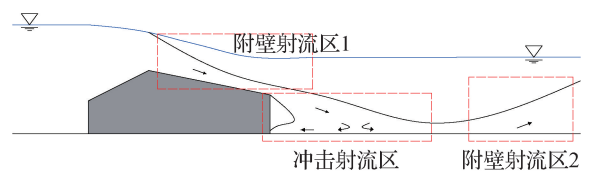


图5 冲击射流
Fig.5 Impinging jet

图6为不同工况下区域Ⅲ底部纵向流速分布,由图6可知,中轴射流区纵向流速大于两侧流速,且在两侧堰后出现明显负流速区。由图6(a)—图6(c)和表3(A_x 为区域Ⅲ底部负流速面积, A 为区域Ⅲ面积)可知,随着臂坡增大,中轴射流区长度逐渐增大,堰后纵向负流速区面积逐渐减小。这是由于臂坡增大导致水流聚中加剧,从而中轴射流区纵向流速增大带动两侧水流,减小负流速区面积。由图6(d)—图6(f)和表3可知,随着流量增大,纵向负流速区面积也呈现出逐渐减小趋势。由图6(g)—图6(i)和表3可知,随着底坡增大,中轴射流区长度及宽度均增大,相比臂坡和底坡变化的影响,纵向负流速区面积变化较小,但负流速绝对值增大。这是由于底坡增大,导致水流动能增加,从而附壁射流得以快速扩散,致使冲击射流区域增大。

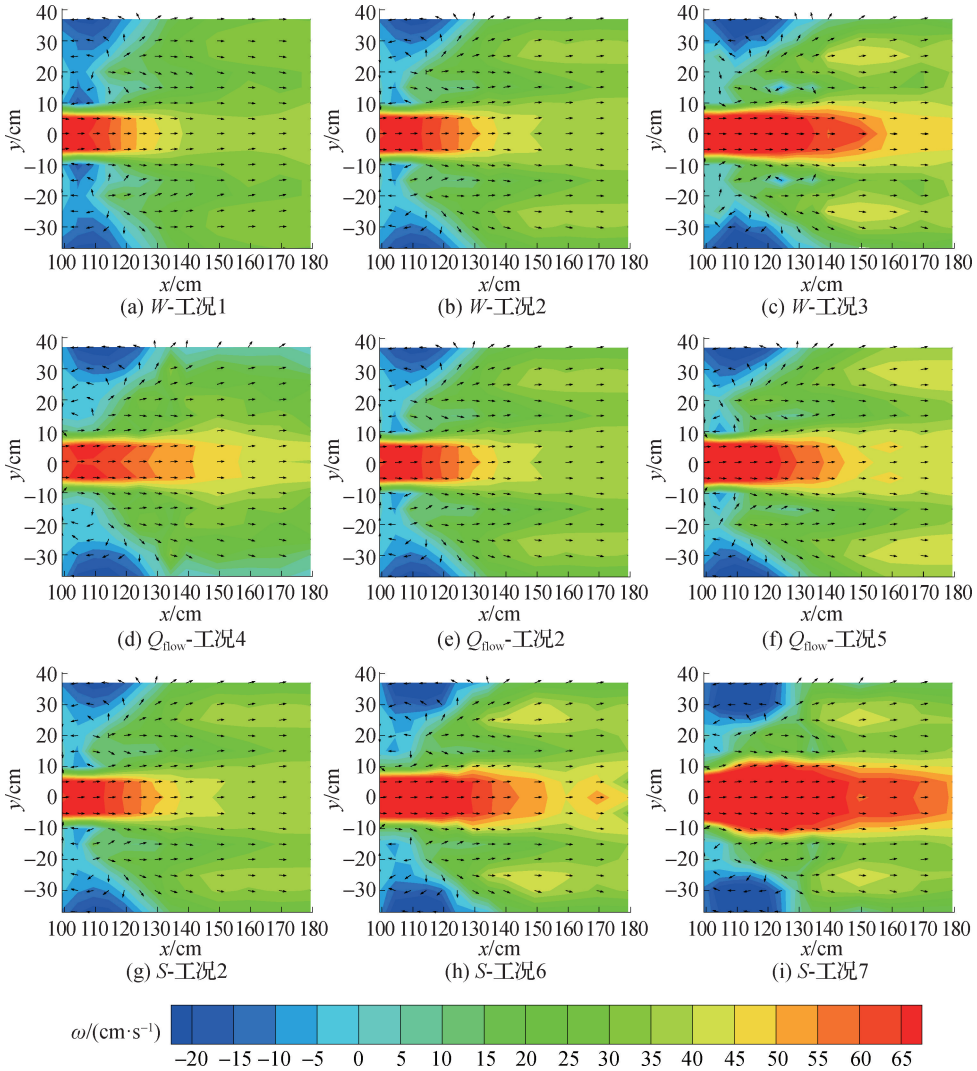


图6 堰后纵向流速分布

Fig.6 Longitudinal velocity distribution behind the weir

表3 不同工况下纵向、垂向负流速区相对面积

Table 3 Relative area of longitudinal and vertical negative flow velocity zones under different working conditions

W	A_x/A		$Q_{\text{flow}}/(L \cdot s^{-1})$	A_x/A		$S/(\circ)$	A_x/A	
	纵向	垂向		纵向	垂向		纵向	垂向
0(工况1)	0.15	0.38	30(工况4)	0.14	0.39	0(工况2)	0.13	0.42
1:16(工况2)	0.13	0.42	45(工况2)	0.13	0.42	0.25(工况6)	0.14	0.21
1:8(工况3)	0.11	0.25	60(工况5)	0.10	0.41	0.50(工况7)	0.14	0.25

由图7可见堰后出流的2个典型特征：①两侧堰下主要为垂向负流速区域(向下)且表现为聚集现象，聚集点出现在排淤量水槽和克伦普堰相交轴线上，距克伦普堰约 $1/8B$ 处；②排淤量水槽出口中轴垂向流速主要为正向流速(向上)。从图7(a)—图7(c)和表3知，臂坡增大，垂向负流速区域面积先增加后减小，其流速绝对值减小，而中轴区垂向正流速值随着臂坡增大而增大。从图7(d)—图7(f)和表3知，随着流量增大，垂向负流速区域面积变化规律与臂坡变化呈现一致，但垂向流速绝对值却逐渐增大，

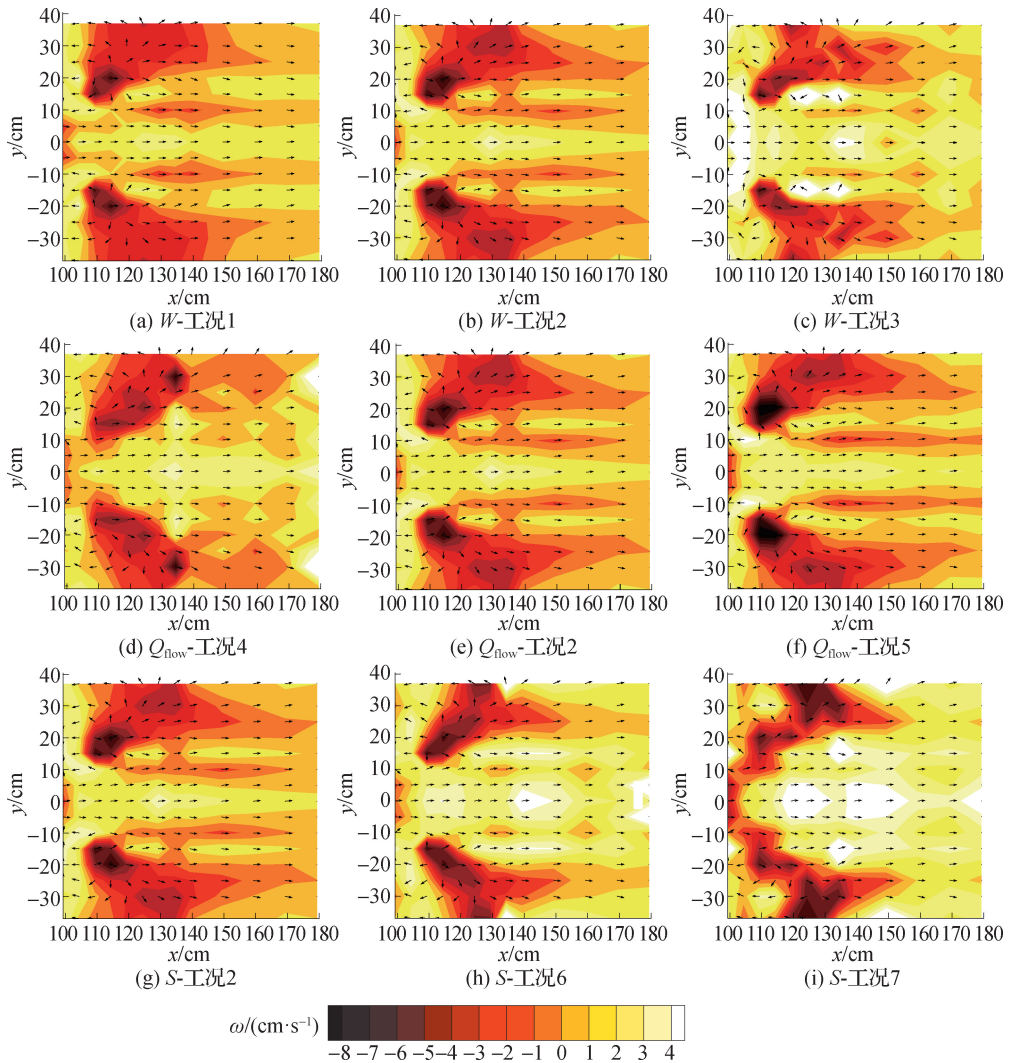


图7 堰后垂向流速分布

Fig. 7 Vertical velocity distribution behind the weir

聚集点从两侧边壁移动到量水槽出口两侧区域,而中轴区垂向正流速区域面积随着流量增大而减小。从图7(g)—图7(i)和表3知,垂向负流速区域面积随着底坡增大而先减小后增大,聚集点也随着底坡增大并向两侧边壁移动,垂向绝对流速值增大;中轴区垂向正流速区域面积随着底坡增大而增大,其流速值也增大。

综上,臂坡通过改变堰上过流流量的横向分布,导致更多水流在堰顶前流入排淤量水槽内,致使堰顶过流量减少。因此,中轴区域产生更多上扬水流,而两侧下切水流减少。底坡增大给堰顶水流提供更多动能,使水流在克伦普背坡面滑行距离更远,致使下切水流的聚集点向后推移。

2.2 紊动强度

紊动强度是天然河流中紊动性能的一个基本参数^[19],在一定程度上表征着堰后冲刷区域分布,通常用脉动流速的均方根来表示:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u}_i)^2}{N}} \quad \sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v}_i)^2}{N}} \quad \sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w}_i)^2}{N}} \quad (1)$$

式中: σ_u 、 σ_v 、 σ_w 分别为纵向、横向和垂向的紊动强度; u_i 、 v_i 、 w_i 分别为3个方向的瞬时流速; \bar{u}_i 、 \bar{v}_i 、 \bar{w}_i 分别为3个方向的时均流速; N 为采样个数。

2.2.1 纵向紊动强度

图8为不同工况下区域Ⅲ底部纵向紊动强度分布。由图8可知,纵向紊动强度较大值均分布在中轴射流区两侧,而较小值集中在中轴射流区内。结合图6可知,中轴射流区内流速分布较为均匀,且发生紊动掺混和卷吸较少,所以紊动强度较小;而在中轴射流区两侧流速变化梯度较大,发生紊动掺混和卷吸严重,导致紊动强度较大。由图8(a)—图8(c)和表4可知,随着臂坡增大,中轴射流区的流量和流速均增大,带动两侧流速较小的水流,并卷吸更多两侧水流进行掺混,致使中轴射流区两侧和尾部的纵向紊动强度逐渐增大。由图8(d)—图8(f)和表4可知,随着流量增大,底部紊动强度呈现出先减小后增大的趋势,可以推断出较小流量时,河流底部水流紊动剧烈,而随着流量增大,水流的主要掺混可能转移到水流中部或者顶部。由图8(g)—图8(i)和表4可知,随着底坡增大,底部纵向紊动强度增大,并在中轴射流区两侧出现紊动强度极大值的聚集区域且分布呈现出间歇性地向两侧扩散。

2.2.2 横向紊动强度

图9为不同工况下区域Ⅲ底部横向紊动强度分布。由图9可知,横向紊动强度分布规律与纵向紊动强度分布具有一定的相似性,但横向紊动强度总体上比纵向紊动强度值小。在小流量下,横向紊动强度分布形状比纵向紊动强度分布形状更具有规律性且较大值主要聚集在渠道两侧;随着流量增大,较大值向交界带(中轴射流区与两侧射流区交界的区域定义为交界带)区域靠近。在较大底坡下,横向紊动强度没有出现间歇性极大值区域,而主要集中在两侧堰后区域。

2.3 紊动能

紊动能(E_{TK})是一种可以用来表征紊流强度的参数^[20],能够较为直观地反映出水流整体的紊动状况,同时在能量转换和传递中起重要作用,其表达式为

$$E_{TK} = [\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}]/2 \quad (2)$$

式中: u' 、 v' 、 w' 分别表示纵向、横向、垂向上的脉动流速。

图10为不同工况下区域Ⅲ底部紊动能分布。由图10可知,受到两侧二次环流影响,紊动能较大值均出现在交界带和两侧堰后冲击区域内,由于中轴射流区内水流不受二次环流影响,与周围水体掺混较弱,所以

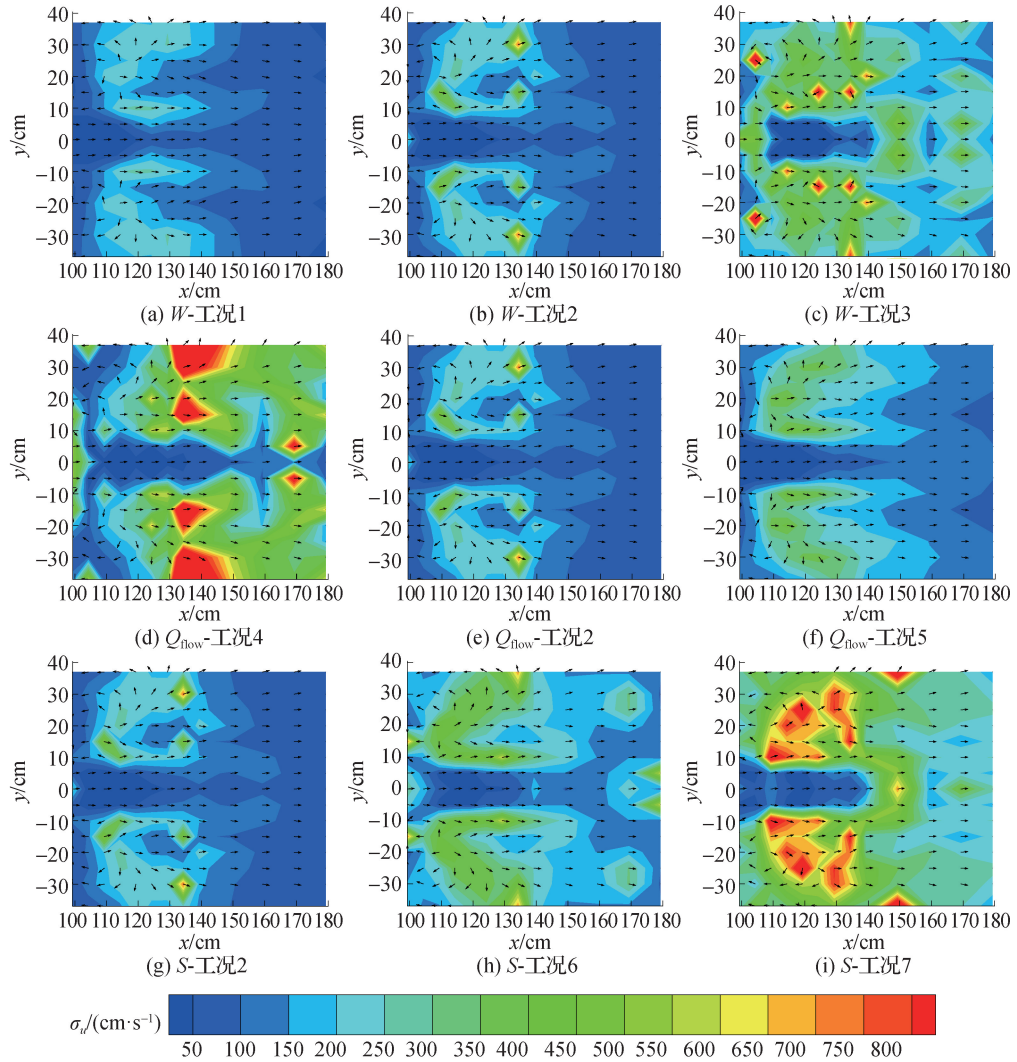


图8 堰后纵向紊动强度分布

Fig. 8 Longitudinal turbulence intensity distribution behind the weir

表4 区域III底部纵向、横向紊动强度平均值

Table 4 Average value of longitudinal, transverse and vertical turbulence intensity at the bottom of region III

W	$\sigma_u/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\sigma_v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_{\text{flow}}/$ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\sigma_u/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\sigma_v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$S/(\circ)$	$\sigma_u/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\sigma_v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
0(工况1)	117.44	30.83	30(工况4)	299.55	35.42	0(工况2)	134.95	36.30
1:16(工况2)	134.95	36.30	45(工况2)	134.95	36.30	0.25(工况6)	258.69	47.06
1:8(工况3)	286.76	46.68	60(工况5)	170.41	48.21	0.50(工况7)	372.60	62.99

紊动能较小值主要集中在中轴射流区。由图 10(a)—10(c)可知,随着臂坡增大,两侧堰后区域内的紊动能增大且较大值区域也增大;两侧臂坡增大导致排淤量水槽内排出的流量增大,致使与两侧水流发生剧烈掺混,此时时均流速动能在交界带与两侧水流发生动量传递,转化成紊动能;但伴随着掺混时形成的涡旋,会不断带动紊动能向两侧和上部区域扩散,导致两侧较大紊动能值分布区域扩大。由图 10(d)—10(f)可知,随着流量增大,有一个先减小后增大的趋势,且在小流量工况下,底部产生紊动能最大值。由图 10(g)—

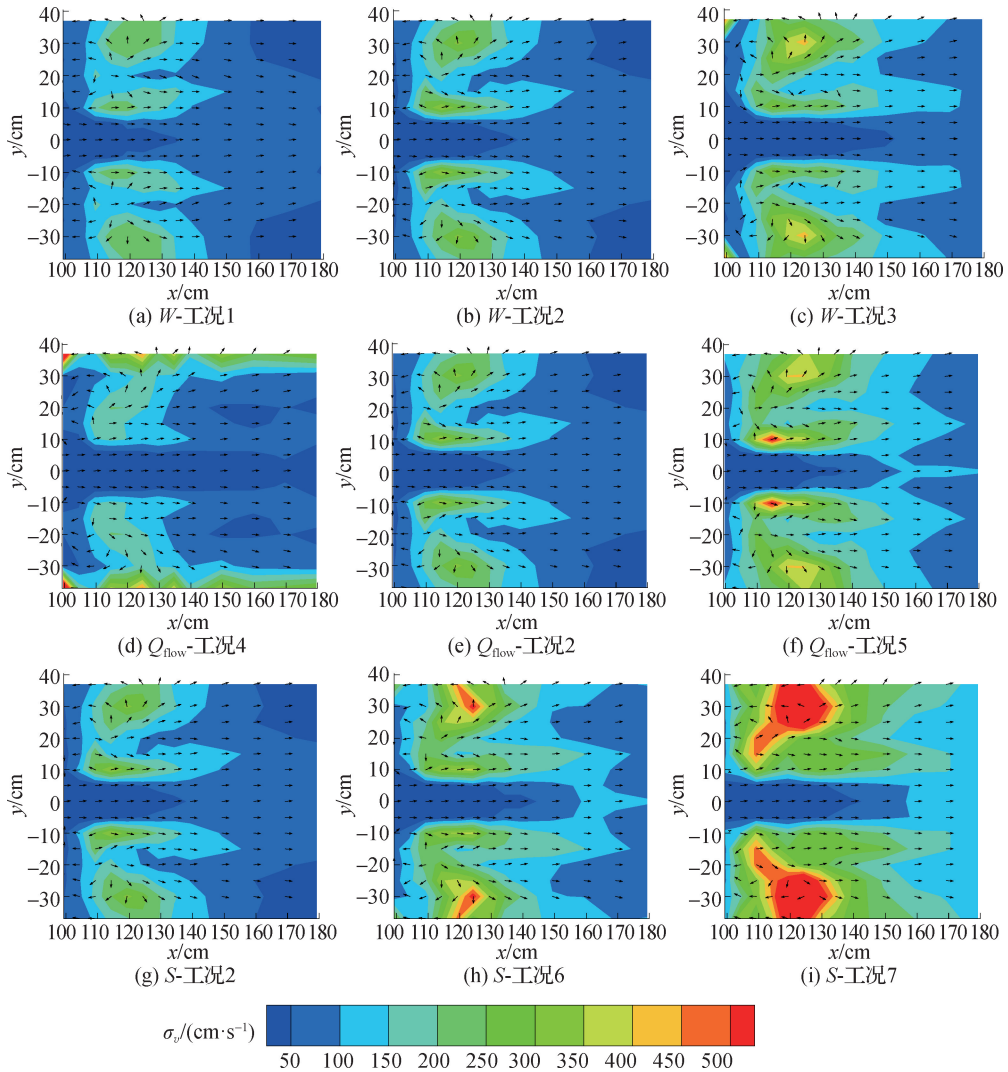


图 9 堰后横向紊动强度
Fig. 9 Lateral turbulence intensity behind the weir

10(i)可知,在底坡较小工况下,紊动能较大值主要分布在交界带和两侧边壁区域内;但随着底坡增大,堰后两侧冲击区紊动能整体增大。结合图 6 可知,底坡增大导致底部流速增大,促进了紊动能产生和扩散。

2.4 涡旋

研究堰后涡结构,有助于理解底部附近能量消耗和传递过程,更好判别堰后冲刷区域位置。 Q 准则^[21]是一种比较常用的涡旋捕捉方法,正值表示为流场涡张量超过应变率张量的区域, Q 值越大,此处的流体旋转速度越大,涡量(即涡旋强度)也就越大,因此本文采用 Q 准则对二维涡旋进行识别分析。王芳芳^[22]通过分析流体的能量耗散与涡量之间的关系,指出不可压缩流体中动能耗散率与流体中涡量绝对值的大小直接相关,单位体积内涡量绝对值越大,动能耗散率越高。

图 11 为 Q 准则方法下识别出的底部涡旋结构分布图。由图 11 可知,强涡区(涡旋强度值相对较大区域)主要集中在排淤量水槽出口两侧,而其他涡区分布在两侧堰脚,其中小尺度涡结构散落在交界带附近。当水流以较大速度流出量水槽时,受到边界突扩和两侧堰顶冲击水流的干扰,在排淤量水槽两侧不断产生较大尺度的涡结构;同样堰顶流出水流受到底部和两侧边壁限制,也会不断产生较大尺度的涡结构。大尺度涡受到外界和涡体内部之间的拉伸作用,会发生结构破坏,产生不同大小的小尺度涡体,向下游传递。结合图

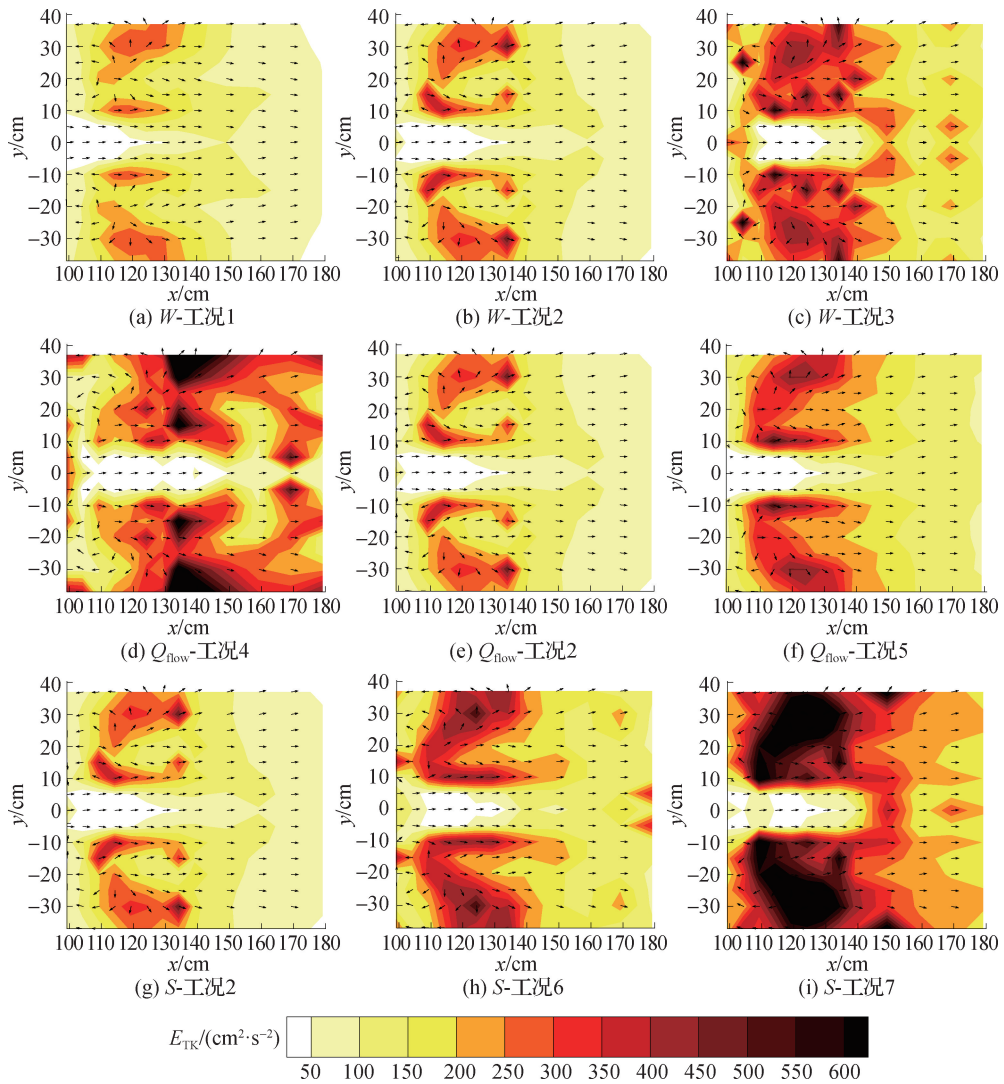


图 10 堰后紊动能分布

Fig. 10 Turbulent kinetic energy distribution behind the weir

10 可知, 具有较大能量的大尺度涡体, 通过能量串级的方式将自身能量传递到小尺度涡体中, 这种自身破解传递方式会将能量传递到末级涡体中。当最小尺度涡体的能量不足以克服自身的黏性作用时, 机械能就会转化成热能消耗掉, 这也充分说明了堰槽组合具有一定的消能作用。由图 11(a)—11(c)可知, 随着臂坡增大, 排淤量水槽流出的水流流速增大, 加剧了与两侧水流之间碰撞和掺混, 因此导致出口两侧的 Q 值增大, 产生更大的涡体。由图 11(d)—11(f)可知, 最大 Q 值出现在较小流量工况下, 这说明在较小流量下, 河床底部的水流之间碰撞和掺混程度更高, 随着流量增大, 这种碰撞和掺混过程可能转移到其他部位, 所以在大流量下底部 Q 值有所减小。由图 11(g)—11(i)可知, 随着底坡增大, 排淤量水槽出口两侧 Q 值增大, 且涡体数量也增多。结合图 6 可知, 因为底坡增大, 导致下游流速增大, 增强了出口水流与两侧水体的掺混, 并将破裂产生的小尺度涡体迅速扩散到下游。

2.5 床面剪切应力

在河流的研究中, 床面剪切应力是连接水流特征和动床冲刷的一个重要参数, 一定程度可以预测动床冲刷规律。当河床底部附近扰动波或时间序列结构以及水流内部所产生的床面切应力大于 Shields 剪切应力后, 床面就会产生相应的响应。但在堰后冲刷水流结构中, 由于水流条件复杂, 床面切应力变化与水流流速以及

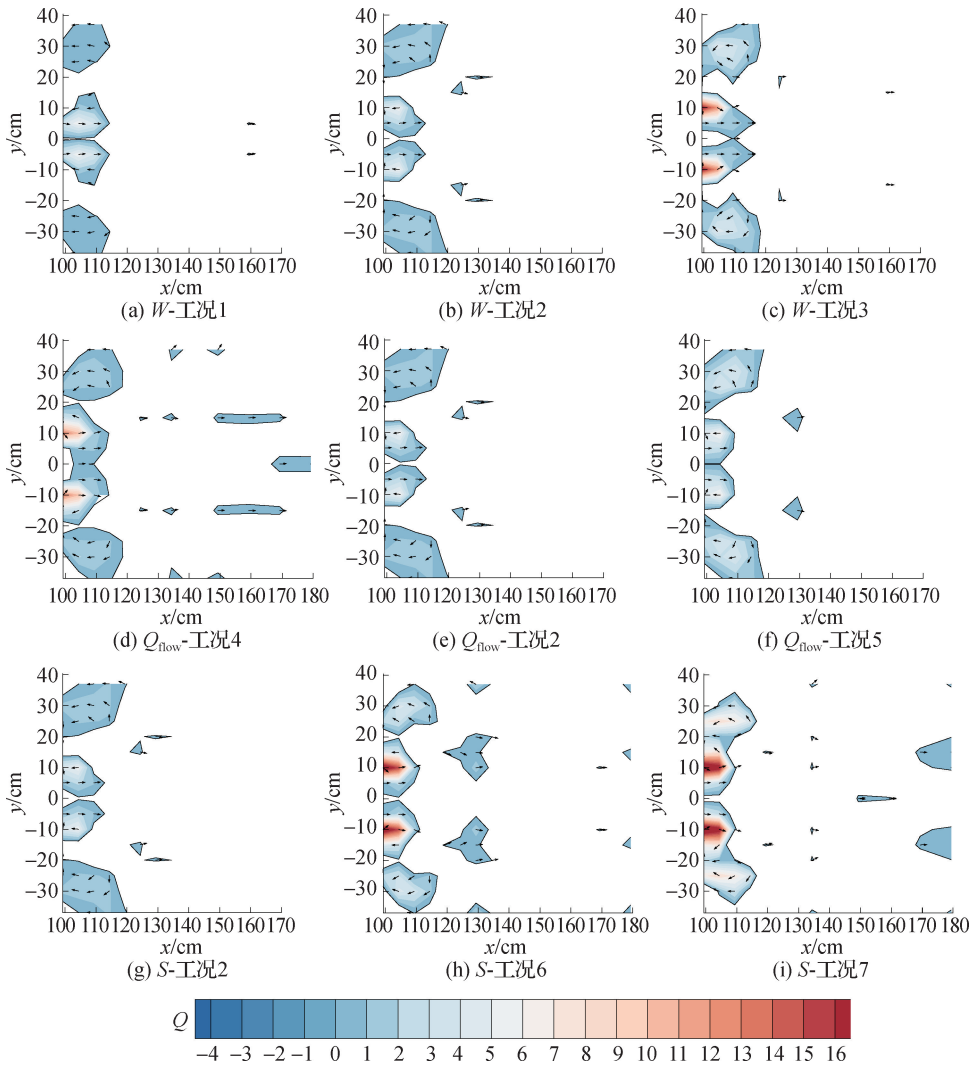


图 11 堰后 Q 值分布

Fig. 11 Q value distribution behind the weir

紊动参数变化是相互作用关系, 所以无法直接准确获得床面切应力值。因此, 前人们提出了常见 6 种床面切应力的计算方法: 平均切应力法、对数率估测法、流速二次法、雷诺应力法、紊动能法和修正紊动能法。基于计算方法的适用条件, 本文采用了雷诺应力法和修正紊动能法^[23]进行了对比。

2.5.1 雷诺应力法

雷诺切应力是由紊流液体质点相互混掺而引起的附加切应力。图 12 为采用雷诺应力法计算得到的区域Ⅲ床面剪切应力 1 (τ_{bl}) 分布。由图 12 可知, 床面剪切应力 1 较大值主要集中在交界带上, 而床面剪切应力 1 极小值主要出现在中轴射流区内。结合图 6 可知, 中轴射流区水流带动两侧水流流速增大, 导致在交界带上形成很大的速度梯度, 这就说明了为什么床面剪切应力 1 最大值主要集中在交界带上。由图 12(a)—图 12(c) 可知, 随着臂坡增大, 交界带上的床面剪切应力 1 值逐渐增大且较大值分布面积也逐渐增大。由图 12(d)—图 12(f) 可知, 在小流量时, 在交界带上没有出现明显极大值聚集带, 随着流量增大, 交界带上的床面剪切应力 1 逐渐增大且极大值出现在交界带首部。由图 12(g)—图 12(i) 可知, 随着底坡增大, 床面剪切应力 1 逐渐增大, 交界带长度加长且极大值点从首部转移到中部。

2.5.2 修正紊动能法

修正紊动能法是一种只基于垂向脉动流计算床面剪切应力 $2(\tau_{b2})$ 的方法。图13为修正紊动能法计算得到的堰后床面剪切应力 2 分布。对比发现,床面剪切应力 2 较大值主要分布在两侧堰下区域,而不只是在交界带上。由图13(a)—图13(c)可知,随着臂坡增大,两侧床面剪切应力 2 增大,较大值分布面积也逐渐增大。由图13(d)—图13(f)可知,在较小流量下,出现床面剪切应力 2 较大值聚集点,分布在距离堰槽组合堰后,随着流量增大,这些聚集点消失,在交界带和两侧区域形成聚集区。由图13(g)—图13(i)可知,底坡增大,两侧床面剪切应力 2 增大,较大值分布转移扩散到两侧中心区域,底坡变化对床面剪切应力分布影响显著。

通过2种床面剪切应力算法对比,可以发现雷诺应力法计算得到的床面剪切应力 1 明显大于修正紊动能法计算得到床面剪切应力 2 ,这是由于垂向脉动流速值远小于纵向脉动流速值导致而成。同时2种方法得到的床面剪切应力分布规律也不一致,床面剪切应力 1 主要分布在交界带上,以条形带分布为主;而床面剪切应力 2 主要分布在两侧堰下区域,以连片块状分布为主。结合实际工程运行情况,相比中轴附壁射流的冲刷,两侧堰下的跌水冲刷更具有破坏力,此时切应力使用垂向脉动分量表示更为准确^[22]。因此,采用修正紊动能法计算堰后床面剪切应力更为合适。

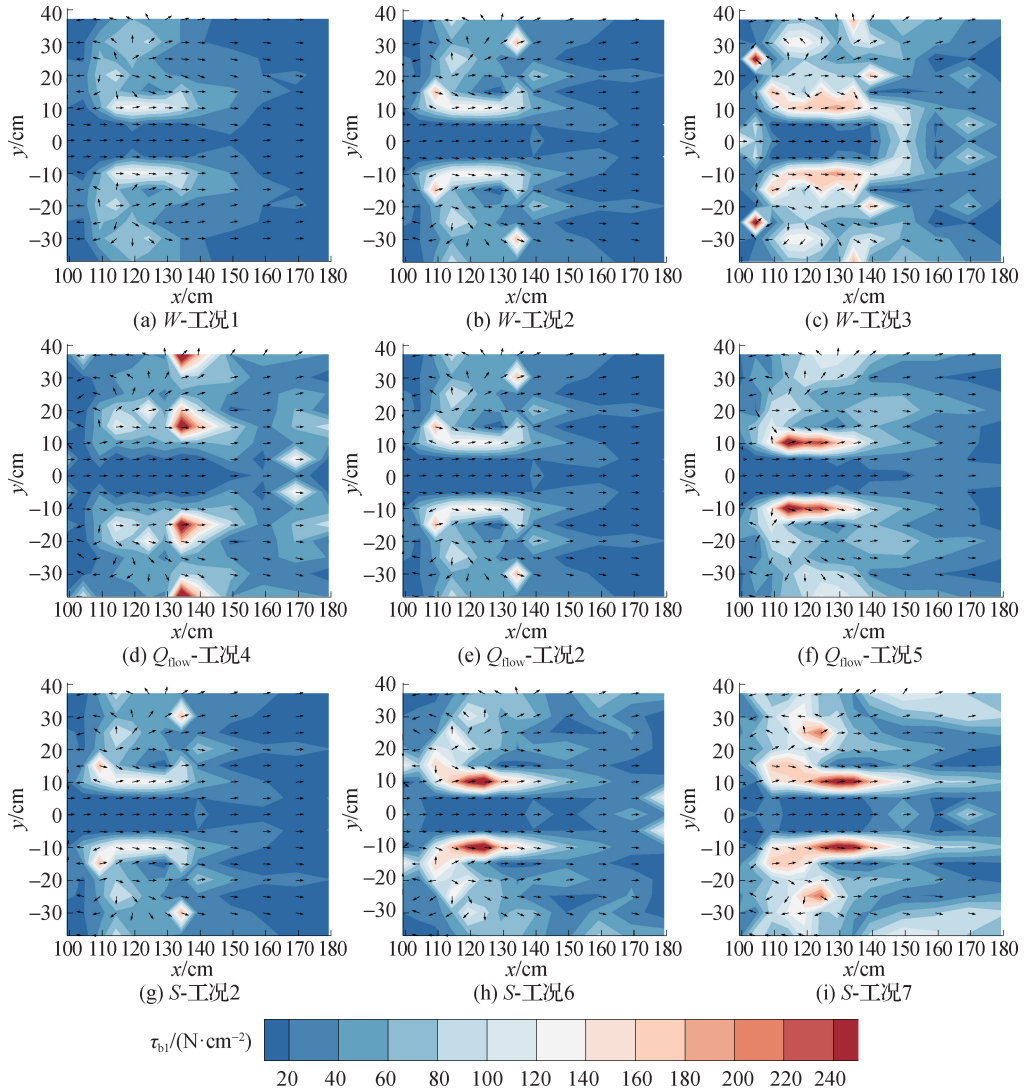


图12 堰后床面剪切应力1

Fig. 12 Shear stress 1 of the bed surface behind the weir

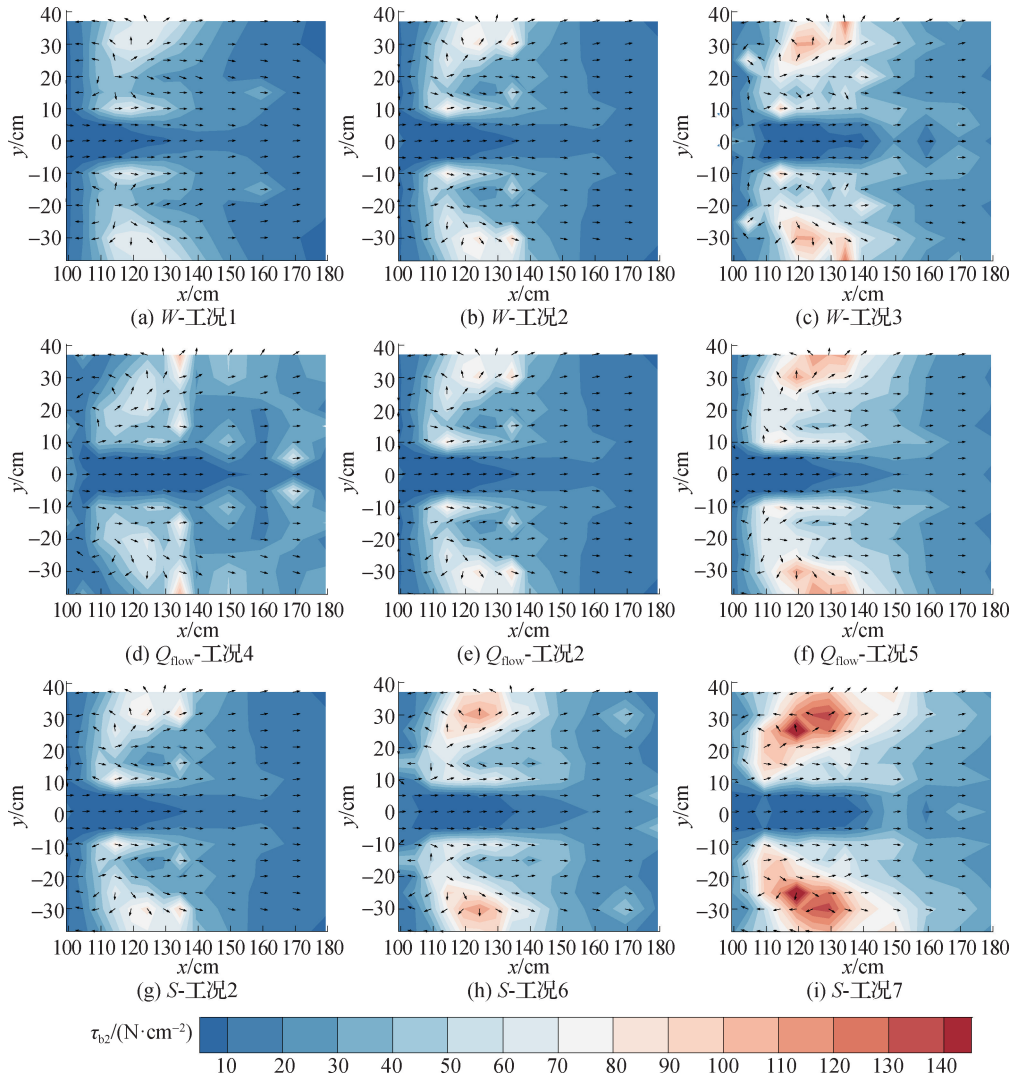


图 13 堰后床面剪切应力 2

Fig. 13 Shear stress 2 of the bed surface behind the weir

3 结 论

本文针对不同臂坡的堰槽组合量水设施开展了一系列试验, 研究了臂坡、水流强度、底坡等因素对堰槽组合设施后的底层水流结构和紊动特性的影响, 主要结论如下:

- (1) 根据射流形式, 将堰槽组合设施后的淹没出流划分成附壁射流区域和堰后的冲击射流区域, 其中冲击射流区域易发生溯源冲刷破坏。
- (2) 臂坡增大导致量水槽出口射流流速增大, 表现为水流上扬; 而两侧堰下产生明显回流, 表现为水流下切。
- (3) 臂坡和底坡增大均导致底部两侧紊动强度、床面剪切应力、紊动能值增大, 加剧了两侧堰下水流的能量耗散及堰后冲刷, 有效提高了设施的消能率。
- (4) 相比雷诺应力法, 设施后床面剪切应力计算更适合采用修正紊动能法, 且床面剪切应力较大值主要集中在两侧堰后冲击区域。
- (5) 强涡区主要出现在排淤量水槽出口两侧, 而其他涡区分布在两侧堰后区域, 其中小尺度涡结构散落在交界带附近。

参考文献:

- [1] 王文娥, 廖伟, 陈土成, 等. 堰槽组合设施测流机制试验研究[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 922-932. (WANG W E, LIAO W, CHEN T C, et al. Experimental study on the flow measurement mechanism of a weir-flume combination facility[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 922-932. (in Chinese))
- [2] 冉聃颖, 王文娥, 胡笑涛. 梯形喉口无喉道量水槽设计及其水力性能模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 177-183. (RAN D J, WANG W E, HU X T. Design of trapezoidal cut-throated flume and its hydraulic performance simulation and test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 177-183. (in Chinese))
- [3] AL-NAELY H, AL-KHAFI Z, KHASSAF S. Effect of opening holes on the hydraulic performance for crump weir[J]. International Journal of Engineering, 2018, 31(12): 2022-2027.
- [4] MUHSUN S S, AL-MADHHACHI A S T, AL-SHARIFY Z T. Prediction and CFD simulation of the flow over a curved crump weir under different longitudinal slopes[J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(9): 1067-1076.
- [5] KERR J R, KARAGEORGOPOULOS P, KEMP P S. Efficacy of a side-mounted vertically oriented bristle pass for improving upstream passage of European eel (*Anguilla Anguilla*) and river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) at an experimental Crump weir[J]. Ecological Engineering, 2015, 85: 121-131.
- [6] NOURANI B, ARVANAGHI H, SALMASI F. Effects of different configurations of sloping crests and upstream and downstream ramps on the discharge coefficient for broad-crested weirs[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126940.
- [7] ZENG Y X, ISMAIL H, LIU X F. Flow decomposition method based on computational fluid dynamics for rock weir head-discharge relationship[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2021, 147(8): 0733-0745.
- [8] MIELHAUSEN J. Evaluating fish passage effectiveness through a sequence of modified vortex rock weirs[D]. Guelph: University of Guelph, 2019.
- [9] BAKI A B M, ZHU D Z, HARWOOD A, et al. Hydraulic design aspects of rock-weir fishways with Notch for habitat connectivity [J]. Journal of Ecohydraulics, 2020, 5(1): 94-109.
- [10] KELLER R, ROBERT J. Sloping crest crump weir [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1989, 115(2): 231-238.
- [11] 李志威, 王兆印, 李文哲, 等. 卵石沙洲发育与冲刷试验[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 797-805. (LI Z W, WANG Z Y, LI W Z, et al. Experimental study of development and erosion of gravel mid-channel bar[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 797-805. (in Chinese))
- [12] 余明辉, 申康, 吴松柏, 等. 水力冲刷过程中塌岸淤床交互影响试验[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 675-682. (YU M H, SHEN K, WU S B, et al. An experimental study of interaction between bank collapse and river bed evolution[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 675-682. (in Chinese))
- [13] LI S C, YANG J, MA X, et al. Flow features in a pooled fishway with V-shaped weir formation[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14(1): 1337-1350.
- [14] 马立, 王路, 聂锐华, 等. 上游堰坡对淹没式矮堰浑水冲刷深度振荡频率的影响研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2021, 36(1): 5-9. (MA L, WANG L, NIE R H, et al. Impacts of upstream weir slope on fluctuating frequency of live bed scour depth around submerged weirs[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(1): 5-9. (in Chinese))
- [15] BAKI A B M, ZHU D Z, HARWOOD A, et al. Rock-weir fishway II: design evaluation and considerations[J]. Journal of Ecohydraulics, 2017, 2(2): 142-152.
- [16] 饶良懿, 朱金兆, 王玉杰. 平坦 V 型测流堰在山区森林水文研究中的应用与设计[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 123-129. (RAO L Y, ZHU J Z, WANG Y J. The application and design of the flat V weir for mountain forest hydrology research [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 123-129. (in Chinese))
- [17] MOONEY D, HOLMQUIST-JOHNSON C, HOLBURN E. Qualitative evaluation of rock weir field performance[M]. Denver: USBR Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group, 2007.
- [18] MARTIN V, FISHER T S R, MILLAR R G, et al. ADV data analysis for turbulent flows: low correlation problem[C]//Hydraulic Measurements and Experimental Methods Specialty Conference. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-10.
- [19] 程伟, 方红卫, 黄磊, 等. 生物膜泥沙床面对水体紊动影响的实验研究[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 1017-1024.

- (CHENG W, FANG H W, HUANG L, et al. Changes in the turbulent characteristics for sediment bed coated by biofilm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(8): 1017-1024. (in Chinese))
- [20] 张幸农, 牛晨曦, 假冬冬, 等. 流滑型窝崩水流结构特征及其变化规律[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 112-119. (ZHANG X N, NIU C X, JIA D D, et al. Flow structure characteristics and changes in a simulated riverbank nest-shaped flow slide[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 112-119. (in Chinese))
- [21] 赵建涛, 袁建平, 裴吉, 等. Ω 涡识别方法在双进口两级中开泵中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(5): 447-453. (ZHAO J T, YUAN J P, PEI J, et al. Application of Ω vortex identification method in two-stage double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(5): 447-453. (in Chinese))
- [22] 王芳芳. 后向台阶流动相干涡结构与能量传递规律试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2018. (WANG F F. Experimental study on the coherent vortex structure and energy transformation of backward-facing step flow[D]. Nanjing: Hohai University, 2018. (in Chinese))
- [23] 孙剑雄, 张文祥, 史本伟. 基于潮间带现场数据的底部切应力算法对比[J]. 海洋学研究, 2022, 40(1): 21-32. (SUN J X, ZHANG W X, SHI B W. Comparison of methods for calculating bottom shear stress based on intertidal flat field data[J]. Journal of Marine Sciences, 2022, 40(1): 21-32. (in Chinese))

Experimental study on the effect of arm slope on turbulent structure of weir-flume combination*

LIAO Wei^{1,2}, ZHANG Weile³, WANG Wene², WANG Kun¹, GONG Zhao¹, WANG Fangfang³

(1. China Three Gorges Construction engineering Corporation, Chengdu 610095, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The weir-flume combination facility is advantageous for flow monitoring in mountainous areas. The sediment distribution behind the weir and the downstream erosion can be affected by arm slope owing to the changes in the hydrodynamic characteristics of the weir-flume combination facility. To further explore the influence of arm slope on the flow turbulence characteristics of the weir-flume combination facility, the bottom flow characteristics under different flow rates, bottom slope, and arm slope were analyzed based on the hydraulic performance test. The distribution law of velocity, turbulence kinetic energy, and bed surface shear stress were obtained, and the mechanism of flow energy dissipation and erosion was revealed during the operation. The research results show that the arm slope affects the lateral flow distribution. The increase in arm slope causes the water flow to be concentrated in the middle, and the flow behind the weirs on both sides is strengthened, which increases the risk of retrogressive scour. Compared with the Reynolds shear stress method, the modified turbulent kinetic energy method is more suitable for calculating the bed surface shear stress behind the facility. The larger values of the bed surface shear stress are mainly concentrated in the area behind the weir on both sides. Large-scale vortex structures are mainly focused on both sides of the flume outlet, while other vortex areas are distributed in the area behind the weir on both sides. The increase in the arm slope and bottom slope leads to an increase in turbulent intensity and turbulent energy on both sides behind the weir, which intensifies the energy dissipation of the water flow under the weir and effectively improves the energy dissipation rate of the facility.

Key words: weir-flume combination; arm slope; retrogressive scour; flow measurement; turbulent fluctuation; eddy

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52079113) and Fundamental Research Program of Jiangsu Province, China (No. BK20190142).