

许媛媛, 梁书秀, 薛庆仁, 等. 不同破碎波气液混合区发展特征及其运动特性研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(5): 113–123, doi:10.12284/hyxb2022075

Xu Yuanyuan, Liang Shuxiu, Xue Qingren, et al. Study on development characteristics of gas-liquid mixture zones and kinematics of breaking wave with different breaking type[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(5): 113–123, doi:10.12284/hyxb2022075

不同破碎波气液混合区发展特征及其运动特性研究

许媛媛¹, 梁书秀^{1*}, 薛庆仁¹, 孙昭晨¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 了解波浪破碎速度场的分布特性对于波浪破碎物理机制的研究极为重要, 同时, 对比研究不同类型破碎产生的气液混合区的演化特征有利于波浪白冠覆盖率模型的完善。在实验室水槽, 生成了深水临界波、单次崩破波和单次卷破波, 采用图像测速技术获取了波浪破碎图像、波面下水体和气液混合区速度场。结果表明, 崩破波的水平向速度 u 和垂直向速度 v 在波峰前和波峰后的分布极为不对称, 其水平向最大速度 u_{\max} 并不位于峰顶, 而是在主导波峰前 $0.7\eta_{\max}$ 处; 卷破波的 u_{\max} 出现在波峰峰顶前端极小的区域内, 且该区域与周围区域的速度梯度极大。崩破波和卷破波生成的气液混合区发展特征也存在差异: 崩破波的 u_{\max} 值大、影响区域长、混合区厚度较小、各区域影响时间短; 而卷破波的各项特征参数与崩破波形成对比。

关键词: 破碎速度场分布; 气液混合区; 深水崩破波; 深水卷破波

中图分类号: P753

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)05-0113-11

1 引言

波浪破碎是海洋中常见的现象, 是许多海洋工程和海岸工程问题的重要影响因素, 而波浪的速度场是研究波浪破碎的基础, 在破碎判定、能量计算等方面都不可或缺。通过物理试验获取破碎波浪的水质点速度进而分析波浪破碎速度场的分布特性具有重要意义。波浪破碎在水面和水体形成的气泡和泡沫称为白冠, 在海洋动力环境研究中, 白冠覆盖率常用来参数化很多海气交换过程的强度包括气体和热量的交换、能量耗散等^[1], 因此研究破碎波浪气液混合区的演化特征对于海浪统计模型的完善也是极为重要的。

国内外针对波浪破碎进行了大量研究, Grue 等^[2-3], Grue 和 Jensen^[4-5] 在波浪水槽中进行了一系列物理试验, 采用粒子图像测速(PIV)技术测量了多个深水破

碎波浪的速度场, 分析了不同入射波陡下, 极限波波面形态、运动特性、速度场和加速度场的分布情况, 发现波面形态、速度场和加速度场的分布表现出强烈的前/后不对称性。他们的物理试验对于破碎波浪极限状态时运动特性的研究是极为细致的, 然而受控于测量技术, 波浪破碎形成的气液掺混区域的速度在他们的试验中没有得到有效测量。之后, Lim 等^[6] 和 Na 等^[7] 使用改进的 PIV 技术结合气泡图像测速(BIV)技术测量了实验水槽深水卷破波速度场, 其中气液掺混区的速度利用 BIV 技术进行了测量, 使卷破波破碎过程的运动特征得到详细的分析。在国内, 台兵等^[8] 利用物理试验研究了孤立卷破波波面形态的演化特性。龙晓警^[9] 利用 PIV 测量了斜坡上的卷破波速度场, 明确了卷破波在水舌进入水体的过程中速度最大、涡动最明显的特点。Gao 等^[10] 利用声学多普勒流

收稿日期: 2021-08-01; 修订日期: 2021-10-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1407700); 国家自然科学基金(51779038)。

作者简介: 许媛媛(1989—), 女, 四川省南充市人, 主要从事海洋环境动力学的试验和模拟研究。E-mail: xuyy_dl@mail.dlut.edu.cn

* 通信作者: 梁书秀, 女, 教授, 主要从事近海环境关键过程以及影响因素的模拟和实测研究。E-mail: sxliang@dlut.edu.cn

速仪(ADV)测量临近崩破时的速度场,发现垂直方向和水平方向的最大速度存在相位差,其值约为 $T/8$;且在破波点,速度场不对称性明显。易婧^[11]利用物理试验对斜坡上的卷破波产生的气泡特性进行了研究,分析了气泡大小和数量分布以及混合区空隙率的分布规律。

可见,这些研究侧重于深水卷破波的运动特性,针对不同破碎类型的波浪运动特性的对比研究仍然较为缺乏。另外,卷破波产生的气泡特性虽得到了研究,然而气液混合区的整体演化特征讨论较少。再者,考虑到深水中崩破波的发生概率极大,关于崩破波的气液混合区演化特征也需要进行讨论。因此,本文以深水崩破波和卷破波为研究对象,基于波浪破碎水槽试验,研究两种破碎形态的波浪破碎演化特征、极限状态时速度场分布特性以及破碎产生气液混合区的发展过程。

2 波浪破碎试验

2.1 水槽和仪器布置

试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的非线性波浪水槽中进行,其长度为 69 m,宽

度为 4 m,深度为 2.5 m,本次试验采用固定水深 1.5 m。试验需获得的数据包括:波面位移、波面下水体和气液混合区速度场。试验中采用的实验仪器包括:(1)高精度浪高仪,用来测量各固定点波面位移的变化情况,波面位移数据用于判断同一工况多次试验的重复性;(2)PIV 测速系统和 BIV 测速系统,包括连续激光发射器、高速摄像机、柱状透镜、示踪粒子、不同方向和角度布置的高功率 LED 灯。采用 PIV 测量波面下水体的速度,采用 BIV 测量混合区速度。图像测速系统的搭建情况参见文献 [12]。

试验仪器在水槽中的具体布置如图 1 所示,波面的测量由 10 根浪高仪完成,其沿波浪传播方向分布在水槽不同位置。浪高仪采样频率设置为 100 Hz,采集时长为 163.84 s。第一根浪高仪位于 $x=11.17$ m 处,将该处浪高仪采集的波浪参数作为初始波浪参数。PIV 和 BIV 测量区域为:水平向 $x=16.9$ m 到 $x=20.6$ m; PIV 垂向由 $y=-1.25$ m 到 $y=0.30$ m; BIV 垂向由 $y=-0.30$ m 到 $y=0.30$ m。总测量区域在水平向长度为 3.7 m,大于破碎波的一个波长,保证了覆盖整个破碎过程;在垂直方向深度为 1.5 m,保证覆盖到波动影响深度。

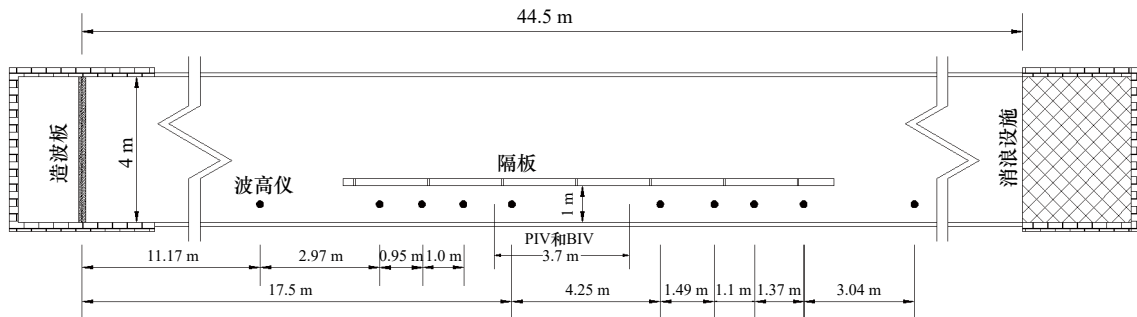


图 1 试验仪器在水槽中的布置
Fig. 1 Wave tank and measurement locations

2.2 图像拍摄视场布置

受控于示踪粒子大小、相机拍摄像素、波浪破碎影响区间等因素的影响,单个 PIV 拍摄区间不可能覆盖整个破碎影响区域。综合考虑 PIV 测量区域和相机像素,将 PIV 测量区域划分为 21 个拍摄视场(Field of View, FOV),如图 2 所示。

每一个视场相机拍摄窗口大小为 60 cm×60 cm,窗口之间保证有 5~6 cm 的重叠区利于后期破碎过程的全场拼接。窗口间的重叠比例在长度上为 11.8%,在高度上为 13.8%。选择拍摄像素为 1 024×1 024,采样频率根据波浪破碎具体情况选择 500 帧/s 或 1 000 帧/s。对于同一种工况,单次试验对应一个相机视场,对

21 个视场做重复多次测量,以保证破碎区域的完整拍摄和实验的有效性。



图 2 粒子图像测速技术拍摄视场说明
Fig. 2 Particle image velocimetry field of view

2.3 工况设置

波浪破碎类型依靠破碎形态、白冠出现位置等划分为崩破波、卷破波以及激破波。在深水中,波浪以崩破和卷破为主,因此,本次试验基于线性相位聚焦理论在实验室水槽生成了深水临界波、单次崩破波和单次卷破波的波列,波浪生成的过程参见文献[13]。临界波为接近破碎但是没有破碎的波浪,这里用来与破碎波做对比。深水波为水深大于波长的一半的波浪,试验中采用谱峰频对应的理论波长作为特征波长。试验具体的工况见表1,波浪生成时,输入波浪能量按照 JONSWAP 谱型分布, f_p 为谱峰频率、 S_{input} 为整体波陡、 Δf 为输入频宽、 γ 为谱峰升高因子。

3 极限状态速度场分布的比较分析

本节利用测量的速度场深入分析不同破碎类型波浪发展到极限状态时速度场的分布特性。极限状

表1 试验工况参数

Table 1 Experimental conditions

工况	f_p	S_{input}	Δf	γ	破碎类型
1	0.8	0.33	0.56	6.0	临界波
2	0.75	0.38	0.64	3.3	崩破波
3	0.75	0.35	1.46	3.3	卷破波

态为波浪到达破碎条件但破碎过程还未进行时刻。

3.1 临界波速度场特征分析

图3为临界波波峰区间水平向速度 u 和垂向速度 v 的分布情况。从图3a可以看出, u 随着深度的增加而较为缓慢的减小。另外,即使是接近破碎的临界波, u 在波峰前和波峰后的分布仍是较为对称的。图3b显示,峰前向上的垂向速度(v 为负值)绝对值略大于峰后向下的垂向速度(v 为正值),且由波峰到波谷,这一趋势更加显著。

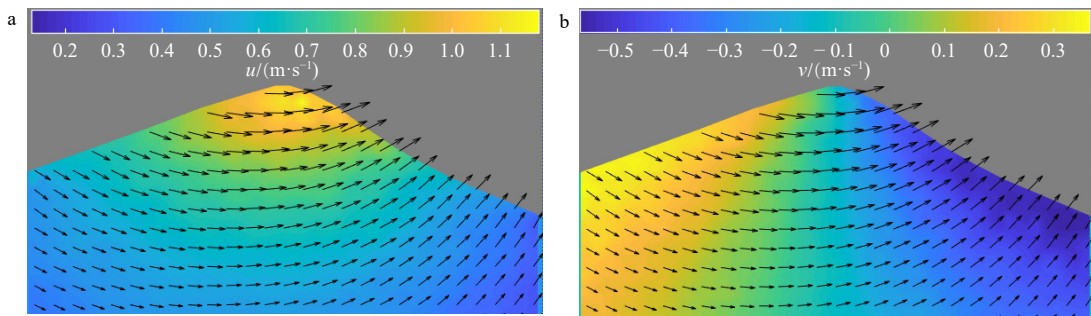


图3 粒子图像测速技术分析的临界波波峰区间速度场

Fig. 3 Particle image velocimetry velocity field in wave crest area of critical wave

a. 水平向速度; b. 垂向速度, 黑色矢量为合速度

a. Horizontal velocity; b. vertical velocity. The black vector is the absolute velocity

图4为临界波波峰区间,无量纲化速度矢量平面图,采用主导波的局地波相速 C_d 对水平向和垂向速度进行无量纲化 $(\hat{u}, \hat{v}) = (u, v)/C_d$ 。主导波定义为达到极限状态时的局地最大波,其周期取为波谷周期,基于

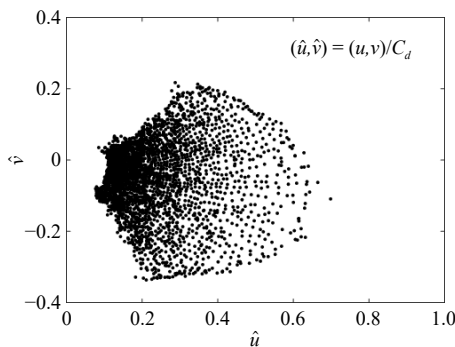


图4 临界波波峰区间,速度矢量平面图

Fig. 4 \hat{u} vs \hat{v} for wave crest area of critical wave

线性波理论、临界波的 $C_d = 1.69$ m/s。由于是波峰内速度分布,因此水平向速度 \hat{u} 始终为正值,而 $\hat{v} > 0$ 表示水质点垂向速度向波面下运动, $\hat{v} < 0$ 代表水质点垂向速度向上。

可见,从最小速度出发,速度场形成近似半圆形分布;速度场关于 $\hat{v} = -0.06$ 轴对称,说明此时,波浪峰前速度与峰后速度在数值上较为接近,波面关于波峰对称性好。临界波波峰水平向最大值 $\hat{u} = 0.66$ 远小于波浪破碎运动指标, Barthelemy 等^[14] 研究表明,粒子水平向运动速度 u 为 0.80~0.85 倍相速度时波浪开始破碎。说明,临界波的主要特征仍以非破碎波的特征为主。

3.2 崩破发生阶段速度场特征分析

图5a和图5b为崩破型波浪极限状态波峰区间水平向速度 u 和垂向速度 v 分布的发展情况。从图中

可以看出相对于临界波浪, u 和 v 在波峰前和波峰后的分布极为不对称, 波浪峰前速度明显大于峰后速度。随着主导波越靠近极限状态, 不对称性越强, 且峰顶区间与下方的速度梯度越大。在极限状态时, 速度最

大值并没有出现在波峰最顶端, 而是在主导波峰前 $0.7\eta_{\max}$ 位置, 导致崩破的破碎点也位于此, 如图 5b。 η_{\max} 为破碎主导波波面最大高度, 计算方法参见文献 [15]。

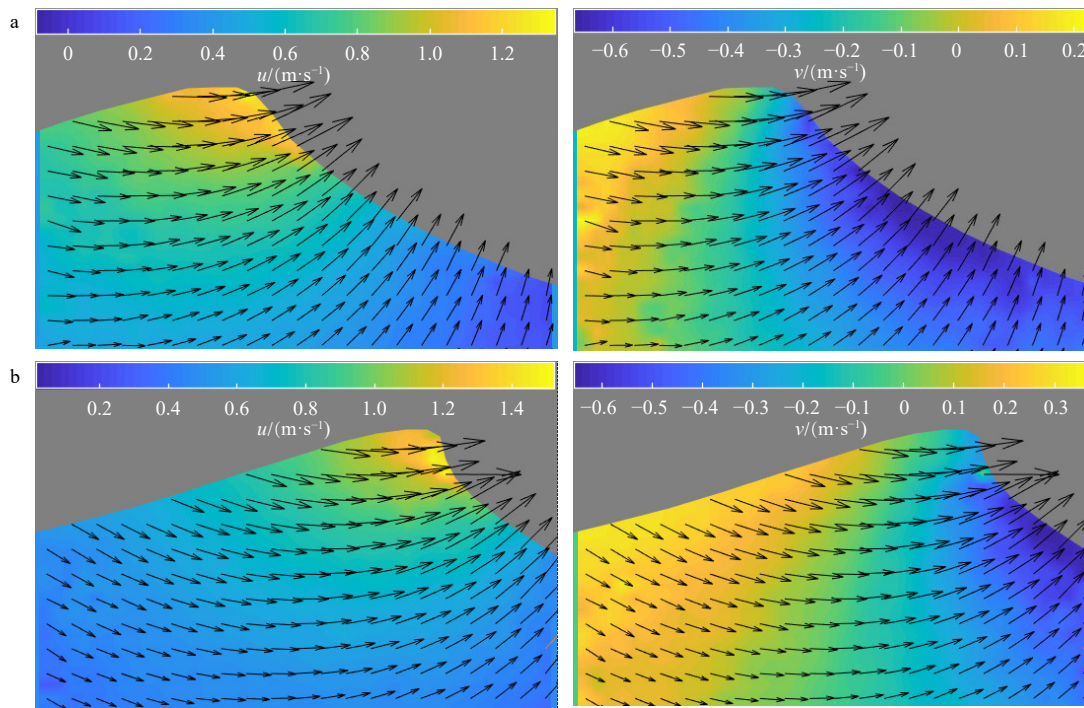


图 5 崩破波形成过程波峰区间速度场

Fig. 5 Particle image velocimetry velocity field in wave crest area of spilling wave

左列为水平向速度; 右列为垂向速度, 黑色矢量为合速度

Left column represents horizontal velocity; right column represents vertical velocity. The black vector is the absolute velocity

图 6 为图 5b 时刻无量纲化速度矢量平面图, 此时主导波相速度 $C_d = 1.79$ m/s。可见, 相对于临界波, 峰前峰后的不对称分布加深, 峰前的水平向和垂向速度都大于峰后, 速度场形成的扇形分布较临界波浪速度场的更窄。说明对于崩破波, 波峰区间尤其是峰顶区间远比峰下区间发展得快。最大水平向速度接近甚至超过波浪破碎运动指标, 显示破碎即将开始。结合临界波的速度场分布特征可见, 由临界波到破碎

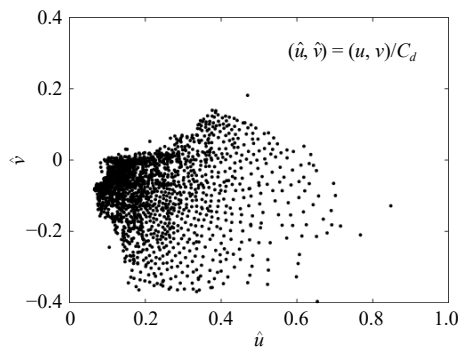


图 6 图 5b 时刻波峰区间速度矢量平面图

Fig. 6 \hat{u} vs \hat{v} for wave crest area of spilling wave in Fig. 5b

波的非线性变化极为迅速。

3.3 卷破波发生阶段速度场特征分析

图 7 为卷破波水舌入水前波峰区间水平向速度 u 和垂向速度 v 分布的发展情况。图 7a 时刻波峰前近似垂直, 最大 u 出现在峰前顶端, 此时, 峰前顶端的水平向速度与其下方和后方水体的速度梯度极大, 峰前顶端出现垂直向下的速度与较大的水平向速度共同作用使得水舌快速形成。图 7b 显示在水舌形成过程中, 水舌区域的整体水平向和垂向速度都有增加, 而最大水平向速度有微弱的减小。水舌入水时刻为图 7c, 水舌区间速度场变得紊乱。

图 8 为图 7a 时刻无量纲化速度矢量平面图, 此时主导波相速度 $C_d = 1.99$ m/s。从图中可以看出, 与崩破波相似, 波峰内 u 和 v 在波峰前和波峰后的分布较为不对称, 峰前的垂直向上速度大于峰后的垂直向上速度, 绝对值最大差异 2.3 倍。在卷破波峰顶前端, 水平向速度极大, 分布在 $0.68C_d \sim 0.83C_d$ 区间, 最大水平向速度达到波浪破碎运动指标。与崩破波速度分布不同的是: 卷破波峰顶前端的水质点产生了垂直向

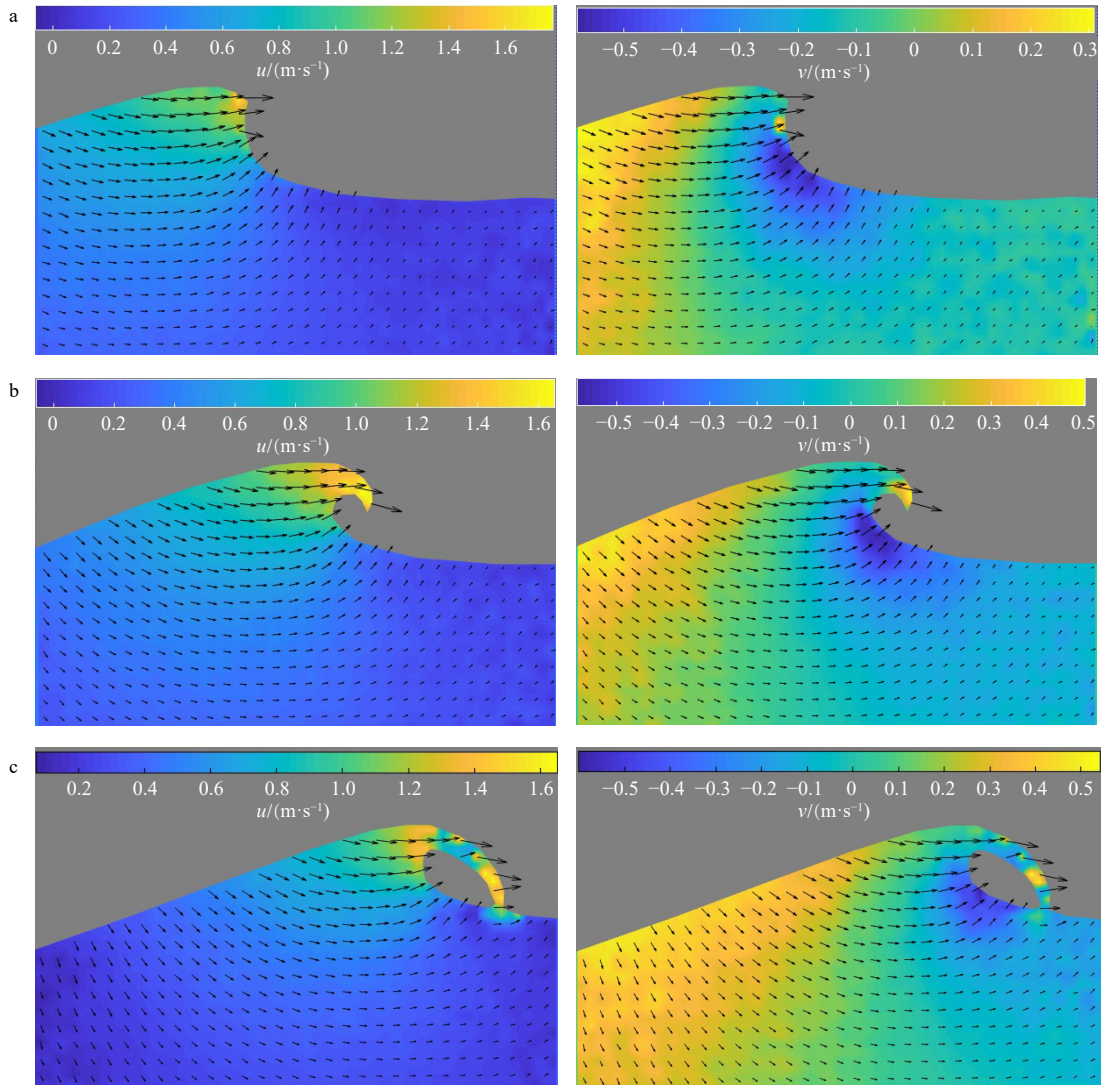


图7 卷破波水舌入水前波峰区间速度场

Fig. 7 Particle image velocimetry velocity field in wave crest area of plunging wave

左列为水平向速度;右列为垂向速度。黑色矢量为合速度

Left column represents horizontal velocity, right column represents vertical velocity. The black vector is the absolute velocity

下的速度导致水舌逐渐形成。

4 波浪破碎演化特征对比分析

4.1 两种破碎过程的定性描述

4.1.1 崩破波破碎过程

图9展示了崩破波破碎阶段气液混合区的形成及消散过程。该过程由2.2节描述的21个拍摄视场获取的图像进行拼接而成。该破碎主导波波面最大高度^[15]为 $\eta_{\max}=0.137$ m,波谷周期 $T=1.15$ s,主导波相速度 $C_d=1.79$ m/s。图中无量纲时间 \hat{t} 为破碎时间与波谷周期之比。可见,波浪破碎开始后,快速移动的波峰与峰前高速向上运动的波面相撞加剧了破碎区前端气液混合区极速形成;破碎区前端以大于波速的速度前进,将破碎区的长度和厚度不断加大;当 $\hat{t}<0.508$ 5,

前端气液混合区的运动速度增大,最大达到2.24 m/s,破碎区的主体速度以水平向为主。

当 $\hat{t}=0.671$ 2,破碎区尾端混合体的速度逐渐小于

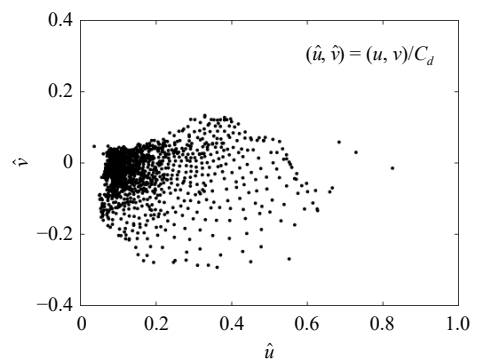


图8 图7b时刻,波峰区间速度矢量平面图

Fig. 8 \hat{u} vs \hat{v} for wave crest area of plunging wave in Fig. 7b

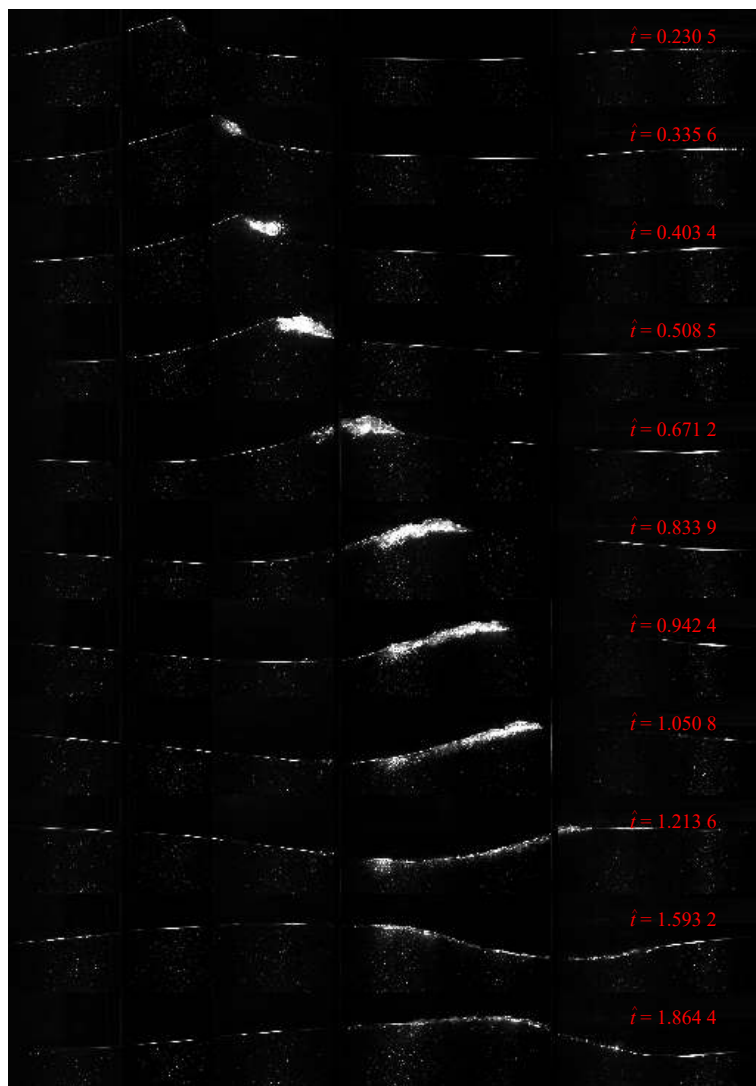


图9 崩破波破碎过程

Fig. 9 Breaking process for spilling wave

波浪的传播速度,而破碎区前端速度虽减小为 2.0 m/s,但仍然大于波速,导致该部分逐渐与破碎主体分离;第一次分离后,破碎区前端的前进速度仍然保持在 1.98 m/s,此时破碎区主体厚度为 10.3 cm,长度为 29 cm。紧接着,破碎区前端速度逐渐减小至与波速相等,破碎区前后端速度梯度分布越来越大,导致越来越多的气液混合部分跟不上前端传播的速度而使破碎区的分布被拉伸,随着破碎区前进速度急剧减小,拉伸现象越明显,最长破碎区为 63.0 cm,厚度为 6.16 cm,速度为 1.3 m/s,此时 $\hat{t}=1.0508$ 。当破碎时长大于 1 个主导波周期后,破碎区逐渐零落,空气占比逐渐减小,破碎区厚度减小,破碎区速度持续减弱;最终表面气泡消散,水体速度完全表现为波浪运动。

4.1.2 卷破波破碎过程

图 10 展示了卷破波破碎阶段气液混合区的

形成以及消散过程。该破碎主导波波面最大高度为 $\eta_{\max}=0.1486$ m,波谷周期 $T=1.277$ s,主导波相速度 $C_d=1.99$ m/s。将卷破波波峰近似垂直的时刻作为波浪初始破碎时刻。 $\hat{t}=0.0877$ 时刻,卷起的水舌冲击液面引起其前方水体产生气体混合;随着水舌的不断冲击,水舌前端新形成的气液混合区不断向上向前挤压已存在的混合区,使得生成的混合区不断增高增长; $\hat{t}=0.2255$ 时刻,混合区高于波峰最大值 2.89 cm,并形成 一个 顺时针水滚; $\hat{t}=0.3101\sim 0.3540$ 时刻,随着水舌不断深入水体,水舌中封闭的气体卷入水体,并一直与周围水体作用,最终在液面下形成一个气液混合区,该混合区初始为一个顺时针水滚,之后在波速和浮力的影响下向下游、向上发展形成一个逆时针水滚,并快速到达液面甚至形成一定的喷射,如图 10 中 $\hat{t}=0.5732$ 。在这一阶段中,水舌前端形成的混合区

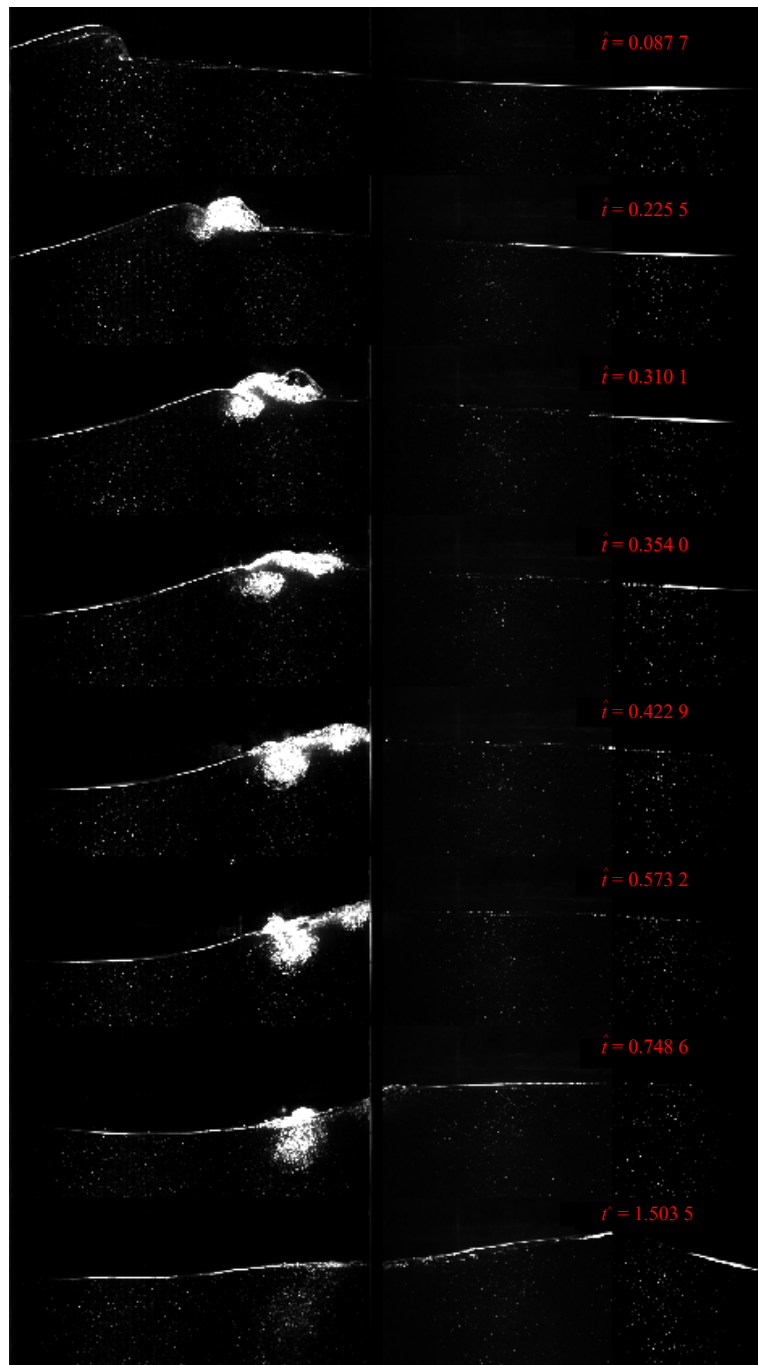


图 10 卷破波破碎过程

Fig. 10 Breaking process for plunging wave

一直在向下游传播并逐渐减弱;0.6个主导波周期后,水舌前端形成的混合区已经消散,到 $\hat{t}=1.5$ 之后,卷入水体中的气体也即将消散。

对比崩破波和卷破波的气液混合区形成及消散过程,可见,崩破波的气液混合区侵入水体不深,主要位于液体表面,但混合区水平向速度极大,使得混合区的影响长度达到了主导波波长 $L_d=2.064$ m的1.15倍。而卷破波的气液混合区在水平向上影响长度相对崩破波较小,约为 $0.5L_d$ ($L_d=2.54$ m),但其侵入水体

较深,能达1.55倍的 η_{\max} ,而崩破波只有其主导波 η_{\max} 的0.75倍。根据华锋^[16]的定义,海面白冠覆盖率是海面上白冠维持时间内不断生成的破碎面积的总和,其破碎面积通常从俯拍的破碎图像中提取,因此混合区的厚度差异不能体现在白冠覆盖率的计算中。试验中,崩破波和卷破波白冠维持时间较为接近,崩破波维持时间略小于卷破波;崩破波的混合区长度为卷破波的2.3倍,使得崩破波的破碎面积大于卷破波的破碎面积,致使计算的崩破波白冠覆盖率

大于卷破波的白冠覆盖率。因此在利用白冠覆盖率进行波浪破碎耗散量化容易引起对崩破波能损失的高估。

4.2 气液混合区发展特征对比分析

本节分析了两种破碎类型产生的气液混合区在不同破碎阶段的影响范围和持续时间,同时对比了两种破碎类型在不同破碎阶段的水体和气液混合区最大传播速度的变化特征。

4.2.1 崩破波气液混合区发展过程

图 11 左列图为崩破波不同破碎阶段气液混合区的影响范围和持续时间,图中横轴为采用主导波周期 T 无量纲化的局地时间 \hat{T} ,纵轴为与主导波波面最大高度 η_{max} 无量纲化的波面位移 $\hat{\eta}$,黑色实线为参考点水面随时间的变化(从 PIV 图像中提取,计算方式参考文献 [17]),红色区域为参考点处气液混合区的厚度随时间的变化(从 BIV 图像中提取)。图 11 右列图

为崩破波不同破碎阶段气液混合区最大水平向速度 (BIV 测量所得) 和水体最大水平向速度 (PIV 测量所得) 的变化特征,纵轴为与主导波相速度 C_d 无量纲化的最大水平向速度 \hat{u}_{max} 。

由图 11 左列图可见,崩破波影响范围内气液混合区的厚度都存在先急速增大再缓慢下降的趋势。破碎初始阶段(图 11 中 B1 Col=420),气液混合区在该参考点的停留时间较短,为 $0.3T$;该参考点 BIV 测量的 \hat{u}_{max} 随着混合区厚度的急速增加而增大,最大 \hat{u}_{max} 大于波速,为 $1.5C_d$ 。该参考点另一显著特征为:混合区最大 \hat{u}_{max} 的出现时间先于水体的最大 \hat{u}_{max} 出现(水体的最大 \hat{u}_{max} 出现时刻为波峰达到时刻),时间差为 $0.18T$ 。之后,随着破碎进入中间阶段, B1 Col=620 处出现气液混合区,且混合区在该阶段停留时间变长,为 $0.6T$;气液混合区传播速度变小,最大速度为 $1.0C_d$,气液混合区与波峰出现的时间差在缩短。最

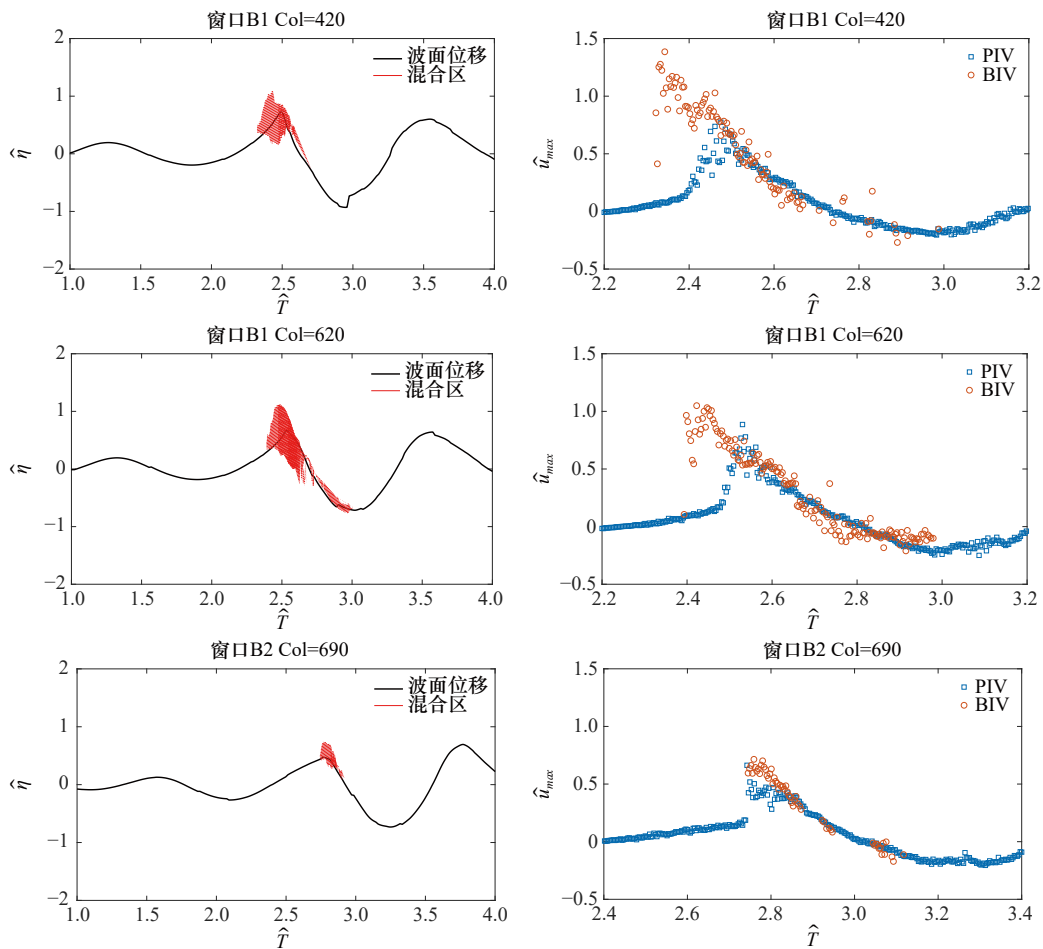


图 11 崩破导致混合区影响深度随时间的变化(左列)和混合区最大水平向速度与水体最大水平向速度的比较(右列)

Fig. 11 Spilling wave, the thickness of mixed zone varies with time (left column) and the comparison of the maximum horizontal velocity

\hat{u}_{max} in mixed zone and the maximum horizontal velocity \hat{u}_{max} in water body (right column)

混合区最大水平向速度由 BIV 测量获得,水体最大水平向速度由 PIV 测量获得

Maximum horizontal velocity \hat{u}_{max} of the mixed zone is measured by BIV, maximum horizontal velocity \hat{u}_{max} of the water body is measured by PIV

后,随着破碎接近尾声,气液混合区停留时间更短,向前的动量几乎被消耗,其运动速度逐渐与水体一致。

4.2.2 卷破波气液混合区发展过程

图12左列图为卷破波不同破碎阶段气液混合区的影响范围和持续时间,右列图为卷破波不同破碎阶段气液混合区最大传播速度的变化特征。横纵轴的意义与图11一致。从图中可以看出,对比崩破波,卷破波破碎初始阶段气液混合区的最大速度相对小一些,为 $1.0C_d$,因此气液混合区最大速度与水体最大速度

几乎同时出现,无时差;而气液混合区在B2窗口 $Col=490$ 的位置经历了出现、前进、接近 $1.0T$ 后又部分返回的过程,也说明卷破波导致的水平向动量输移小于崩破波。对于B2窗口 $Col=640$ 的位置,气液混合区的高度达到 $1.55\eta_{max}$ 且持续时间达 $0.9T$,相对而言,崩破波混合区的最大高度只有 $0.75\eta_{max}$ 。当然,与崩破波一致,随着破碎的进行,混合区的速度持续减小直到与水体的速度一致,主要受波动影响。

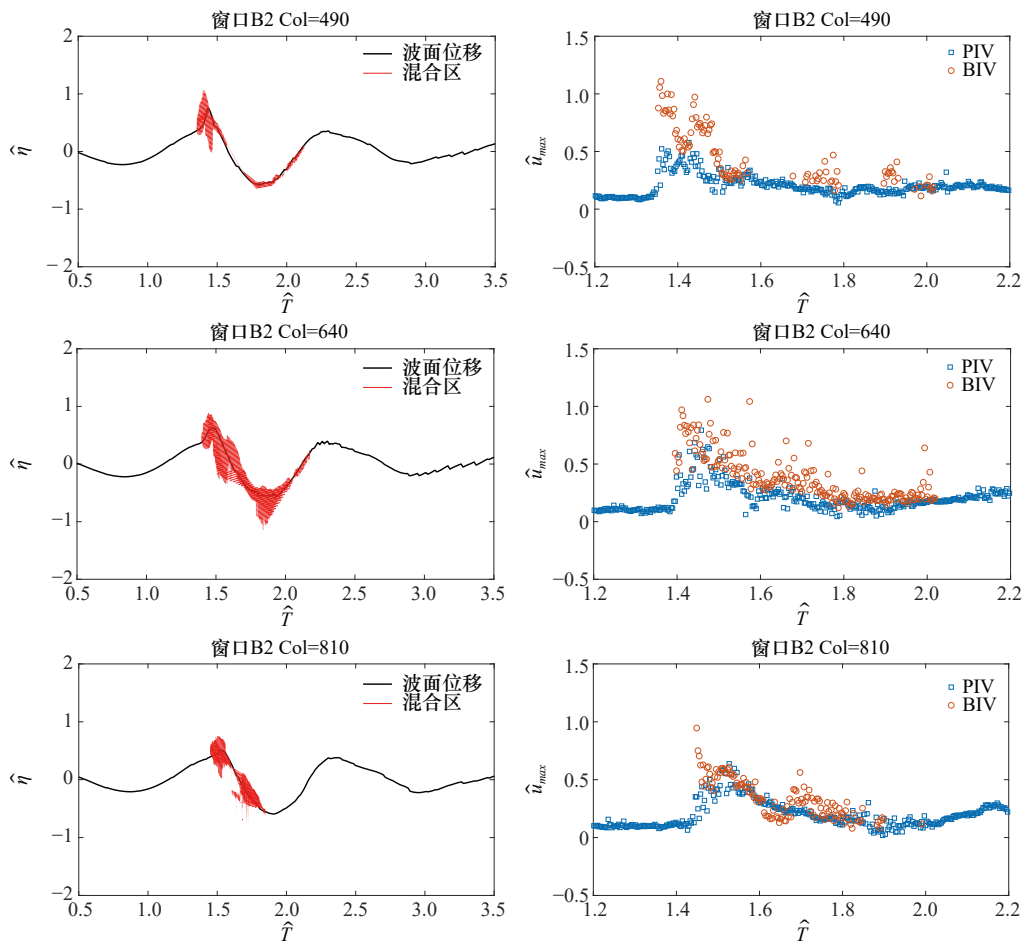


图12 卷破导致混合区影响深度随时间的变化(左列)和混合区最大水平向速度与水体最大水平向速度的比较(右列)
 Fig. 12 Plunging wave, the thickness of mixed zone varies with time (left column) and the comparison of the maximum horizontal velocity u_{max} in mixed zone and the maximum horizontal velocity u_{max} in water body (right column)

混合区最大水平向速度由BIV测量获得,水体最大水平向速度由PIV测量获得

Maximum horizontal velocity u_{max} of the mixed zone is measured by BIV, maximum horizontal velocity u_{max} of the water body is measured by PIV

表2详细对比了崩破波和卷破波各项特征参数的差异。在极限状态,崩破波和卷破波波峰区间水质点最大水平向速度 u_{max} 均开始超过波浪破碎运动指标,然而,两种破碎类型 u_{max} 出现位置不同,卷破波的 u_{max} 出现在波峰峰顶前端极小的区域内,且该区域与周围区域的速度梯度极大;崩破波的 u_{max} 并没有出现在波峰最顶端,而是在峰顶下约4 cm处的峰前位置,且该处

与周围区域的速度梯度较大,但没有卷破波那样显著。波浪破碎开始后,详细对比了破碎生成的气液混合区的各项特征参数。对于崩破波,气液混合区的最大速度 u_{max}^m 可达 $1.5C_d$,导致混合区在水平向输运较远,混合区影响的总长度 $L_m = 1.15L_d$;由于混合区前进速度大于波相速,因此混合区出现时间与波峰出现时间存在差异,差异最大时混合区先于波峰出现 $0.18T$;

表 2 不同破碎类型特征参数的对比

Table 2 Comparison of characteristic parameters of different breaking types

破碎类型	极限状态运动特征参数		气液混合区特征参数				
	速度场分布	u_{\max}	总长度 L_m	总时长 T_m	D_{\max}	t_{\max}	u_{\max}'''
临界波	对称	$0.66C_d$					
崩破波	极不对称	$0.84C_d$	$1.15L_d$	$1.86T$	$0.75\eta_{\max}$	$0.6T$	$1.5C_d$
卷破波	不对称	$0.83C_d$	$0.5L_d$	$2.0T$	$1.55\eta_{\max}$	$1.0T$	$1.0C_d$

崩破波输送给水体的动量主要在水面附近, 导致混合区厚度较小, 最大厚度 $D_{\max} = 0.75\eta_{\max}$, 较小的厚度导致混合区在区域内各点持续时长较短, 停留最大时长 $t_{\max} = 0.6T$ 。对于卷破波, 破碎时大量能量随水舌输入水体, 因此在水平向, 气液混合区的最大速度 $u_{\max}''' \approx 1.0C_d$, 混合区的传播大致与主导波的传播一致, 导致混合区影响的总长度小于崩破波, $L_m = 0.5L_d$; 大量能量输入水体, 使得混合区厚度较大, 最大厚度 $D_{\max} = 1.55\eta_{\max}$, 较大的厚度导致混合区在区域内各点持续时长较长, 最大各点持续时长 $t_{\max} = 1.0T$ 。

5 结论

基于线性相位聚焦理论, 在实验室水槽生成了深水临界波、单次崩破波和单次卷破波。试验采用 PIV

技术和 BIV 技术获取了波面下水体和混合区速度场。基于试验数据, 研究了崩破波和卷破波的波浪破碎演化特征、极限状态时速度场分布特性以及破碎产生气液混合区的发展过程。结论总结如下:

(1) 临界波的主要特征仍以非破碎波的特征为主, 由临界波到破碎波的非线性变化极为迅速, 波峰下速度场分布的不对称性显著增强。

(2) 崩破的发生点并不位于波峰最顶端, 而是在主导波峰前 $0.7\eta_{\max}$ 处。卷破水舌的形成源于峰顶前端极小区域内较大的水平向速度 u 并与周围水体存在极大的速度梯度。

(3) 在波浪破碎过程中, 崩破波形成的气液混合区具有水平向输运较快、混合区影响的总长度较长、混合区厚度较小、各点持续时长较短的特点; 而卷破波形成的气液混合区的演化特征与崩破波较为不同, 混合区影响的总长度为崩破波的 0.43 倍, 混合区厚度为崩破波的 2.07 倍, 各点持续时长为崩破波的 1.67 倍, 总持续时间为崩破波的 1.07 倍。气液混合区的演化特征对比表明, 即使崩破波导致的能量耗散显著小于卷破波, 根据定义计算的白冠覆盖率要大于卷破波。因此, 在利用白冠覆盖率进行波浪耗散量化时应结合不同破碎类型气液混合区的演化特征进行修正, 防止引起崩破波能量耗散的高估。

参考文献:

- [1] Wanninkhof R, Asher W E, Ho D T, et al. Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 213–244.
- [2] Grue J, Clamond D, Huseby M, et al. Kinematics of extreme waves in deep water[J]. *Applied Ocean Research*, 2003, 25(6): 355–366.
- [3] Grue J, Kolaas J, Jensen A. Velocity fields in breaking-limited waves on finite depth[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2014, 47: 97–107.
- [4] Grue J, Jensen A. Experimental velocities and accelerations in very steep wave events in deep water[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2006, 25(5): 554–564.
- [5] Grue J, Jensen A. Orbital velocity and breaking in steep random gravity waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C7): C07013.
- [6] Lim H J, Chang Kuang'an, Huang Zhicheng, et al. Experimental study on plunging breaking waves in deep water[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(3): 2007–2049.
- [7] Na B, Chang Kuang'an, Huang Zhicheng, et al. Large-scale laboratory observation of flow properties in plunging breaking waves[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 138: 66–79.
- [8] 台兵, 马玉祥, 董国海, 等. 孤立卷破波传播演化特征分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 778–784.
Tai Bing, Ma Yuxiang, Dong Guohai, et al. Characteristics of propagation and evolution of plunging solitary waves[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(6): 778–784.
- [9] 龙晓警. 粒子图像测速(PIV)技术在水槽波浪中的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
Long Xiaojing. Particle image velocimetry investigation on waves in flume[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [10] Gao Xiangyu, Dou Xiping, Gao Zhengrong, et al. Research of flow characteristics on spilling waves[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 64–70.
- [11] 易婧. 卷破波作用下卷入气泡特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
Yi Jing. Analysis on the characteristic of the bubble entrained by the plunging wave[D]. Changsha: Changsha University of Science &

- Technology, 2017.
- [12] 毕小奇. 基于PIV及BIV耦合的破碎波浪特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Bi Xiaoqi. The study on the evolution characteristics of breaking waves based on PIV and BIV coupling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [13] 梁书秀, 张怡辉, 孙昭晨. 深水波浪破碎时波浪演化特征实验研究[J]. 海洋工程, 2016, 34(1): 71–79,123.
Liang Shuxiu, Zhang Yihui, Sun Zhaochen. Experimental study on the evolution characteristics of deep-water breaking waves[J]. The Ocean Engineering, 2016, 34(1): 71–79,123.
- [14] Barthelemy X, Banner M L, Peirson W L, et al. On a unified breaking onset threshold for gravity waves in deep and intermediate depth water[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 841: 463–488.
- [15] Rapp R J, Melville W K. Laboratory measurements of deep-water breaking waves[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A—Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1990, 331(1622): 735–800.
- [16] 华锋. 破碎波统计及应用研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005.
Hua Feng. Study of breaking wave statistics and its application[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [17] Xu Yuanyuan, Liang Shuxiu, Sun Zhaochen, et al. An experimental comparison of the velocities and energies of focused spilling waves in deep water[J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70(7): 863–877.

Study on development characteristics of gas-liquid mixture zones and kinematics of breaking wave with different breaking type

Xu Yuanyuan¹, Liang Shuxiu¹, Xue Qingren¹, Sun Zhaochen¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To understand the internal physical mechanism of wave breaking, it is important to study the distribution characteristics of the particle velocity field under breaking wave. In addition, a comparative study of the evolution characteristics of the gas-liquid mixing zone caused by different types of breaking is beneficial to the improvement of the whitecap coverage model. In the laboratory wave flume, a critical wave, a single spilling wave, and a single plunging wave are generated in deep water based on the linear phase focusing theory. The velocity fields below the wave surface and the velocity fields in the gas-liquid mixing zone are measured using particle image velocimetry (PIV) and bubble image velocimetry (BIV), respectively. The distribution characteristics of the velocity field at the extreme state of different breaking types are compared and discussed. The results show that the horizontal velocity u and vertical velocity v of the spilling wave are extremely asymmetrical in the front part and back part of the wave crest. In addition, the maximum horizontal velocity u_{\max} is not at the top of the wave peak, but at the pre-peak position about $0.7\eta_{\max}$ front part and back part of the wave crest. In addition, the maximum horizontal velocity of the peak. For plunging wave, the maximum horizontal velocity u_{\max} appears at the top and very front of the wave peak with a very small region, and the velocity gradient between this area and the surrounding area is very large. The development characteristics of the gas-liquid mixing zone produced by different wave breaking also have differences. For spilling wave, the gas-liquid mixing zone generated by breaking has high horizontal movement speed, long influencing area, short influence time at each location, and small thickness. For plunging wave, the gas-liquid mixing zone has relatively slow horizontal movement speed and larger vertical input, shorter affected area, longer affected time at each location, and greater thickness. However, for plunging wave, these characteristic parameters are in contrast with those of the spilling wave.

Key words: velocity fields of breaking wave; gas-liquid mixing zone; deep-water spilling wave; deep-water plunging wave