破碎区水体掺气特征及空隙率分布规律

邓斌^{1,2*}, 王孟飞¹, 蒋昌波^{1,2*}, 伍志元¹

1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114

* 联系人, E-mail: dengbin07@csust.edu.cn; jiangchb@csust.edu.cn

2018-02-25 收稿, 2018-09-02 修回, 2018-09-03 接受, 2018-10-29 网络版发表

国家自然科学基金(51509023, 51239001)资助

摘要 为了解破碎区水体掺气过程中空隙率的分布及其与波浪要素之间的关系, 基于波浪水槽实验, 通过高速摄像机和气泡测量系统分别记录了卷破波作用下破碎区内水体掺气过程和空隙率时空分布, 着重分析了影响空隙率分布的主要因素. 实验结果表明: 空隙率的分布与水深、波浪特征指标以及与破碎点的距离有关; 讨论了空隙率的时均分布特征, 引入 C_0 和 k_1 两个经验参数建立了其函数关系表达式, 并通过实验数据进行拟合反推得到参数 k_1 与波高成反比、 C_0 是波陡、相对水深、无量纲水平位置的函数. 基于拟合公式分析了各要素与空隙率之间的关系, 得到本实验条件下水面处最大的空隙率接近20%, 气泡最大穿透深度接近静水面下5 cm; 破碎区域内空隙率随水深的增加呈e指数的函数关系衰减. 研究结果能较好地用于预测破碎区空隙率的分布, 为深入研究波浪破碎作用下气泡输运机制提供参考.

关键词 破碎区, 掺气, 气泡, 空隙率, 水槽实验

波浪在近岸处破碎会引起强烈的湍流和水流翻滚, 并卷入大量空气形成气泡, 该过程涉及到复杂的水气两相流问题. 气泡的演化和输运过程影响着沿海结构的波浪冲击效应^[1]、海-气交换^[2~4]、破碎带泥沙输运^[5]、波能的耗散^[6~8]. 而最常见的波浪破碎多发生于近岸地区, 研究近岸破碎区内气泡的特性, 对于研究两相流机理有着重要的理论价值和科学意义; 同时, 对于解决近岸区域的工程实践问题和环境问题有着十分重要的现实意义.

液体中气泡的运动在自然界和工程领域是广泛存在的, 其运动的过程非常复杂且不稳定, 伴随水体运动过程中受到重力、浮力及液体表面张力等的作用之后, 会产生显著变形, 如破裂、融合等现象, 并且气泡附近的水流也会因此产生湍动、射流等水力现象^[9]. 目前, 有关气泡运动规律的研究一直是国内外

学者研究的热点. 为充分地认识气泡运动的真实物理过程, 国内主要开展了大量高速水流自掺气的物理模型实验^[10,11]和数值模拟^[12], 以及基于图像处理的方法测量高密度气泡下的瞬时空隙率分布, 从而研究气泡羽流的不稳定特性^[13]. 然而, 波浪破碎通常会卷入空气而形成气泡, 目前针对近岸波浪破碎下水体掺气特性的研究相对较少. 国外的研究主要集中在气泡径谱的研究上, 普遍发现气泡径谱与气泡粒径呈幂指数关系^[14]; 如 Deane 和 Stokes^[15], Chanson 和 Lee^[16]通过实验研究测量了破碎区气泡的大小分布, 并分析了破碎区空气夹带和气泡输运特性; Leifer 和 Leeuw^[17]进一步运用图像技术, 研究发现气泡尺寸分布遵循随水深呈e指数递减的关系; 近年来, 随着粒子激光测量技术的发展与应用, 部分学者基于气泡图像测速技术(bubble image velocimetry,

引用格式: 邓斌, 王孟飞, 蒋昌波, 等. 破碎区水体掺气特征及空隙率分布规律. 科学通报, 2018, 63: 3251–3260

Deng B, Wang M F, Jiang C B, et al. Experimental study on characteristics of air entrainment and distribution of void fraction in surf zone (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 3251–3260, doi: 10.1360/N972018-00180

BIV)测量了破碎区的气泡空隙率、气泡大小和气泡速度等的分布^[18]。此外,一些学者从射流实验入手对气泡特性及其气液两相流动特性进行研究^[19];部分学者则关注气泡特征参数与湍流之间的关系,如Hoque和Aoki^[20]对卷破波作用下破碎过程中气泡夹带引起的能量耗散进行了研究,并通过实验对气泡空隙率进行了测量,基于理论分析得到空隙率分布遵循扩散方程解析解;Deike等人^[21]提出了用于预测破碎波气泡运输的模型,指出波浪破碎过程中气泡的产生量与波能损耗呈线性关系;在此基础上,部分学者采用光纤探针^[22]或电导探针^[23]测量了波浪破碎过程中水体掺气空隙率的时空变化特征,并分析了破碎区水体中的空隙率、气泡分布和湍流特性,发现空隙率与气泡湍流之间存在线性变化的关系。与此同时,张书文^[24]在前人现场实验观测结果的基础上,通过理论分析推导出气泡云卷入深度、气体卷入速率、波浪破碎能量耗散以及湍流动能耗散率之间的关系,得到了波浪破碎气泡云卷入过程能量耗散和气泡粒径谱在不同波浪条件下的变化规律。此外,部分学者基于三维数值模拟方法开展了波浪破碎作用下气泡输运过程及其与水体剪切相互作用机制的研究^[25,26]。然而,类似的在破碎区内的气液两相流特性以及空气卷入对近岸波浪传播特性的影响等问题仍然缺乏深入的研究^[23],特别是对卷破波作用下气泡运动特性认识不足^[20],而前人研究指出近岸带卷破波引起的掺气远大于溢波的作用^[18,27],值得深入开展研究。

综上所述,虽然前人对气泡的运动规律以及波浪破碎过程中卷入气泡的相关统计量进行研究,但由于水气混合这一现象异常复杂而且测量相对困难,以上研究工作主要集中在波浪破碎时气泡形成过程、气泡的分布及其与能量耗散的关系上,而在破碎区

内各波要素对气泡特性等问题的定量研究仍缺乏深入的研究结果^[28]。本研究通过波浪水槽实验,利用光纤探针、高速摄像技术等光学测量仪器研究卷破波作用下破碎区内气泡的产生、分布及演变过程,分析了卷破波作用下卷入气泡的特性,为破碎区气泡运动特性提供科学认识,并为进一步研究波浪破碎作用下水体掺气及气泡输运对近岸物质输运、海-气通量预测、精确计算结构物受力等提供参考。

1 物理模型实验

1.1 实验布置及测量分布

物理模型实验在长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室40 m长,0.5 m宽,0.8 m深的波浪水槽中进行。水槽一端配有推板造波系统,且在两端均设有良好的消波装置,水槽两侧均为透明钢化玻璃。本实验采用1:10的光滑定床斜坡概化岸滩模型。本文以斜坡起点作为坐标零点,以波浪传播方向为x轴正方向,以水平垂直水槽方向为y轴正方向,以竖直向上方向为z轴正方向,由此建立三维坐标系,同时,将xoz坐标系作为二维坐标系,实验布置如图1所示。实验以规则波作为入射波,改变水深和波高,进行波浪破碎实验,实验条件及工况列于表1中。

本实验采用法国A2 Photonic Sensors公司生产的气泡测量系统(型号: B-POP, 传感器为L形光纤探针)测量气泡的大小和分布情况,其中L形光纤探针被固定在一个可以上下左右平移的测架上,实验过程中在水平方向和竖直方向上分别以5和1 cm的增量来测量水体中空隙率;采用德国General Acoustic公司研发生产的ULS 80D型号超声波非接触式浪高仪记录波高,采集频率为50 Hz,能较好地记录到波浪的传

图1 (网络版彩色)试验布置及测量分布图

Figure 1 (Color online) Sketch of the experimental setup and instruments

表1 实验工况

Table 1 Measured scenarios

工况	斜坡坡度	波浪类型	水深(m)	波高(m)	波陡	周期(s)	光纤探针水平坐标(cm)
Case1	1:10	规则波	0.35	0.05	0.018	1.6	301, 306, 311
Case2			0.35	0.08	0.029		281, 286, 291, 296
Case3			0.35	0.10	0.037		261, 266, 271, 276
Case4			0.30	0.08	0.031		232, 237, 242, 247
Case5			0.40	0.08	0.028		329, 334, 339, 344

播过程;采用德国Photron公司生产的高速相机(型号: FASTCAM Mini UX100)捕捉波浪在斜坡上破碎及传播过程,以及气体的卷入、气泡的形成与输运过程.实验中所有实验仪器设备均采用同步系统同步采集实验数据,且整个实验在自来水和周围环境空气下进行.

1.2 仪器验证

实验开始前,本实验对造波机、超声波浪高仪以及气泡测量系统等试验仪器的重复性、稳定性进行基本的性能测试,确保所测实验数据的真实性和有效性.首先在预备实验中通过3次重复的造波,对1#($x=2.2$ m)浪高仪所记录的波面时间序列曲线进行验证.图2给出了 $H=0.08$ m, $h=0.35$ m条件下G1位置处($x=-1.5$ m)浪高仪的3次测量结果,从图中可见实验得到同一波况下3次造波的波面历时曲线基本重合,最大偏差仅为3.41%,平均误差在1%之内,因此造波机可以满足实验要求且性能稳定.其次,对气泡测量系统进行重复性验证,实验中对同一波况下同一位置处的空隙率分别进行了3次测量验证,每组工况下,造波时间取300 s,在运用同步软件设定造波1 min后触发光纤探针采集仪,采集时间为180 s(≈ 100 个波).空隙率验证测量结果如图3所示,从图中可知,该波况下同一位置处空隙率随时间的变化过程趋势基本一致,虽然数据有一定波动,但均在仪器的误差范围内.并且由于波浪破碎作用下卷入气泡的过程本来就具有一定随机性,为了确保实验数据的准确可靠,考虑对100个以上的规则波作用下的结果取平均,得到3次试验的时均空隙率分别为4.44%, 4.25%和4.43%,表明气泡测量系统性能良好稳定,能够用于本实验中对气泡特性进行测量.

2 波浪破碎形态及水体掺气过程

波浪破碎类型可分为溢波(spilling)、卷破波

图2 浪高仪波面历时曲线图

Figure 2 Times series of wave surface at wave gauge

图3 气泡测量系统空隙率历时曲线

Figure 3 Time series of void fraction at bubble fiber probe

(plunging)和激破波(surging),可根据Irribarren数区分:

$$\xi_0 = \frac{i}{(H/L)^{1/2}}, \quad (1)$$

式中, H 和 L 表示离岸位置的波高和波长, i 为岸滩坡度.根据Galvin^[29]的研究结果,当 $0.5 < \xi_0 < 3.3$ 时,波浪破碎类型为卷破波.本实验5个工况下计算的 ξ_0 分别为0.7332, 0.5796, 0.5184, 0.5616, 0.5948,可见本实验条件下波浪破碎类型均为卷破波,与本实验通过高速相机观测到的结果相吻合(图4).

由于卷破波作用下水体掺气和气泡输运是一个高动态演化过程,为清楚展示该过程中水气相互作用状态,图4给出了Case2下高速相机追踪到波浪卷破过程中从气体的卷入到气泡的大量扩散的过程.对于由卷破波作用下气泡形成的过程,主要分为

图4 (网络版彩色)波浪卷入气体及气泡形成过程实拍图。(a) 气体卷入并形成气腔;(b) 液体飞溅;(c) 气腔破裂与分解;(d) 气泡云扩散

Figure 4 (Color online) The snapshots of air entrainment under breaking waves are measured by high speed camera. (a) Air entrainment and air cavity formation; (b) droplet splash; (c) air cavity rupture and decomposition; (d) the diffusion of bubble cloud

3个阶段: 第1阶段(图4(a)), 波浪卷破在头部形成水舌, 并且当它射入到自由表面上时形成了大气腔, 此时由于卷舌撞击水体, 造成波额处形成液体飞溅(图4(b)); 第2阶段(图4(c)), 水舌继续深入水体, 并随着气腔逐渐变形, 最终破碎, 导致水气强烈掺混; 第3阶段(图4(d)), 破碎后形成的气水混合物不断扩散并形成气泡云, 伴随气泡的破碎、合并、上浮以及溢出水面, 直至水面趋于平稳。

3 实验结果分析与讨论

3.1 光纤探针信号的处理过程

波浪破碎卷入气体后, 形成水气高度掺混的两相流体, 由于空气的折射率不同于水体的折射率, 光纤探针在测量到空气和水体时所得到的信号强度是不同的。气体和波浪的信号示意图如图5所示, 通过测量到的信号可用来计算空隙率 C 。当气泡触碰到光纤探针尖端, 气泡表面受到光纤探针作用而开始破裂, 使得电压信号上升, 如图5(a)中1~2阶段所示, 当光纤探针完整地接触到气泡内部时, 信号呈2~3阶段所示, 此时输出的值为一个常数。当光纤探针再度穿过气泡表面, 使得介质由空气转变为水时, 信号迅速

图5 气泡信号和波浪信号示意图。(a) 光纤探针探测到单个气泡时的输出信号;(b) 浪高仪和探针的反馈示意图

Figure 5 Diagram of bubble signal and wave signal. (a) Output signal from a probe during the passage of a bubble; (b) response of the wave gauge and probe

下降, 如3~4阶段所示, 该阶段的响应速度远比1~2阶段迅速, 是因为受到了表面张力的作用。探针浸没在水中的时间, 即为测量时间 Δt , 穿过气泡的时间, 为 $\Delta \tau$, 则:

$$\Delta t = \sum_i \Delta \tau_i, \quad (2)$$

式中 $\Delta \tau_i$ 为一个气泡通过探针的时间; i 为在 Δt 时间内通过通过探针的气泡数量。则对于一个波周期内空隙率可以由下式计算:

$$C = \frac{\sum_T \Delta \tau}{\sum_T \Delta t}. \quad (3)$$

3.2 空隙率分布特征

Hoque和Aoki^[20]研究发现空隙率在垂直断面上的分布存在一定的规律和关系, 认为每一个垂直断面的平均空隙率能近似描述气体在垂线上的分布。而以往的研究中, 大多通过直接测量平均深度处的空隙率, 以此来确定垂直方向上的平均空隙率。然而在高速水体和非恒定水流运动过程中, 剧烈的水体运动使得对平均深度处的空隙率的测量无法精确描述垂向空间分布。因此, 本文采用在同一断面上不同水深处对空隙率进行单点测量的方法, 得到每个垂直断面上不同深度处的空隙率, 从而获得空隙率在垂直断面上的分布。

图6(a)~(e)给出了5个工况下不同断面的时均空隙率垂直分布。考虑到本研究区域为波浪破碎后的浅水区, 局部水深 h 相对波长 L 很小, 则根据微幅波理论色散方程可知, 在波周期一定的条件下, 波长 L 正比于浅水区局部水深 h , 因此图中首先采用局部水深 h 对纵坐标进行无量纲处理。可以看出, 空隙率随测量深度的增加呈e指数衰减。这是因为越靠近水体表面, 在波浪发生卷破卷入气体时, 波浪冲击能量和

图6 (网络版彩色)不同工况下不同断面的空隙率垂直分布. (a) Case1; (b) Case2; (c) Case3; (d) Case4; (e) Case5; (f) e指数拟合

Figure 6 (Color online) The void fraction of vertical distribution under different experimental conditions and different sections. (a) Case1; (b) Case2; (c) Case3; (d) Case4; (e) Case5; (f) the exponential curve fitting

湍流动能越大, 初始卷入的气体越多, 产生的气泡数量越多, 从而使得空隙率的值远大于深度较大处的值. 另外, 可观察到各工况下水舌射入点的大致位置 (即气泡的最大穿透点的位置) 分别位于 $x=3.06, 2.91, 2.71, 2.47, 3.34$ m 附近. 通过比较 Case1~3 可知, 在水深一定的情况下, 波高越小, 气泡的最大穿透距离越深. 在同一深度处、同一水深条件下, 可知波高越大, 空隙率越小. 另外, 对比 Case4, Case2, Case5 可知, 在同一波高下, 水深越大 (即波长越大), 气泡的最大穿透距离越深. 图 6(f) 给出了 5 个工况下所有断面时均空隙率随不同无量纲纵坐标的分布规律, 可见分别选用局部水深 h , 波高 H , 波长 L 对测量深度进行无量纲处理时, 时均空隙率均呈现 e 指数函数的衰减. 结合上述分析可知, 采用当地水深 h 进行无量纲处理, 在用于近岸浅水及波浪破碎条件的断面时均空隙率分析具有普适性.

3.3 空隙率分布表达式及相关参数确定

Hoque 和 Aoki^[20] 等基于扩散方程推导, 给出了波浪破碎区内空隙率分布的函数表达式, 如下式所示:

$$C(z) = C_0 \exp(k_1 z), \quad (4)$$

式中, k_1 为气泡在垂直方向上一个衰变的特征量, C_0

是定义在自由水面处 ($z=0$) 空隙率的分布, 并且能满足以下边界条件: $C(z)=C_0$, 在自由表面处 $z=0$; $C(z) \rightarrow 0$, $z \rightarrow -\infty$; 本文亦先假定波浪破碎区内空隙率分布满足式 (4), 并结合本实验条件深入对相关参数 k_1 和 C_0 进行详细讨论.

式 (4) 中存在 2 个未知参数 C_0 和 k_1 , 可根据实测数据进行非线性拟合以及相关分析, 从而近似得到两个参数的估算值, 使建立的空隙率分布的经验公式更加符合实际情况. 具体确定过程如下.

对于参数 k_1 , 分析发现气泡穿透深度越大 k_1 越小, 于是可引出一个新的无量纲参数 k_0 , 并满足以下关系:

$$k_0 = k_1 H. \quad (5)$$

通过实验数据建立 k_0 与无量纲水平位置之间的关系, 如图 7 所示, 可以看出, 尽管 k_0 对于不同的坡陡 (H/L) 和离破碎点不同的水平位置处, 其值有所变化, 但是基本趋于一个常数值 $k_0=5.50$, 如图 7 中虚线所示. 当 k_0 基本趋于一个值, $k_1 (=k_0/H)$ 会随着 H 的变化而变化, 两者成反比关系, 从而影响空隙率的垂直分布, 符合上文的实验分析结果.

对于参数 C_0 , 由于水体表面附近水体湍流剧烈, 使得很难对该处的空隙率进行精确的测量, 所以通

图7 无量纲参数 k_0 与水平位置的关系

Figure 7 Relationship between dimensionless parameter k_0 and distance

通过对实验数据进行非线性拟合并与理论公式进行对比,从而近似得到水体表面处空隙率 C_0 的值.假定破碎区自由表面的空隙率 C_0 与波高、水深、波长、与破碎点的距离和岸滩坡度存在一定的关系.为便于定量分析,假定 C_0 满足以下函数表达式:

$$f(H, L, h, \Delta x, i). \quad (6)$$

式中, C_0 为水体表面处空隙率, H 为深水波高, L 为深水波长, h 为水深, Δx 为距破碎点的位置(x 为水平位置, x_b 为破碎点位置($\Delta x = x - x_b$)), i 为岸滩坡度.

考虑到上述不同因素对 C_0 的影响,分别取无量纲参数,包括深水波陡、相对水深和断面位置等,具体为 $(x-x_b)/L$,无量纲水平位置.波浪传播过程中,不同水平位置处的空隙率也会有所不同. H/L ,波陡.波陡对波浪的破碎形态、波浪破碎作用下卷入气体的过程有着重要的影响. H/h ,相对水深.相对水深不同,对波浪传播至近岸发生破碎作用,而卷入气体的过程造成一定影响. i ,岸滩坡度.本实验条件初始岸滩坡度为常数1:10,因此本文暂不考虑岸滩坡度 i 这一影响因素.

基于实验得到的3个无因次数 $(x-x_b)/L$, H/L , H/h 进行线性拟合得到了 C_0 的计算公式:

$$C_0 = 3.480 \left(\frac{\Delta x}{L} \right) - 13.878 \left(\frac{H}{L} \right) + 0.94 \left(\frac{H}{h} \right) + 0.159, \text{ 当} \\ 0 \leq \frac{(x-x_b)}{L} \leq 0.1583, \quad (7)$$

$$C_0 = -6.868 \left(\frac{\Delta x}{L} \right) - 67.235 \left(\frac{H}{L} \right) - 4.964 \left(\frac{H}{h} \right) + 2.45, \text{ 当} \\ \frac{(x-x_b)}{L} \geq 0.1583. \quad (8)$$

从式(7), (8)可以看出,当 $0 \leq (x-x_b)/L \leq 0.1583$ 时,水面处空隙率 C_0 随无量纲水平位置 $(x-x_b)/L$ 的增大而增大,随波陡 H/L 的增大而减小,随相对水深 H/h 的增大而增大;当 $(x-x_b)/L \geq 0.1583$ 时,水面处空隙率 C_0 随无量纲水平位置 $(x-x_b)/L$ 的增大而增大,随波陡 H/L 的增大而减小,随相对水深 H/h 的增大而减小.将实验数据根据公式(4)拟合得到的水面处空隙率 C_0 的值与式(7), (8)的计算结果进行比较,如图8所示.从图中可以看出,数据拟合精度相对较高,相关系数 R^2 均在0.7以上.

3.4 结果讨论

图9给出了各工况下不同断面上空隙率的实验数据与通过式(4)所得理论公式的结果对比图.为了解理论公式与实验数据的吻合精度,本文通过Skill数来验证其精度(Skill数越接近1,表明模型精度越高,越接近0,则精度越低).Skill数定义采用Wilmott的方法^[30],如下所示:

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{\text{model}} - X_{\text{obs}}|^2}{\sum \left(|X_{\text{model}} - \bar{X}_{\text{obs}}| + |X_{\text{obs}} - \bar{X}_{\text{obs}}| \right)^2}, \quad (9)$$

其中 X_{model} 和 X_{obs} 分别代表理论计算值和实验测量值,上画线表示取平均值.

基于式(9)得到每个工况下的平均Skill数分别为0.97, 0.97, 0.95, 0.97, 0.97,均大于0.9,表明本研究基于实验数据拟合得到式(4)的两个参数,能更好地反映其物理意义,并可以很好地表述空隙率的垂直分布.从图中可以看出空隙率随着深度呈e指数衰减,与Wu^[5], Stanton和Thomton^[31], Hoque和Aoki^[17]分别通过大尺度实验、现场试验和室内实验得到空隙率分布规律相符合.此外,水面处最大的空隙率接近20%,与Blenkinsopp和Chaplin^[32]的实验结果一致.另外从图中也可以看出气泡的最大渗透深度约在静水面下5~6 cm之间.

从图9中还可以看出,在不同的波陡条件下,空隙率在垂向分布的穿透深度是不同的.在Case1中 $x-x_b=0.35$ m, Case2中 $x-x_b=0.4$ m, Case3中 $x-x_b=0.30$ m, Case4中 $x-x_b=0.35$ m, Case5中 $x-x_b=0.45$ m处空隙率在垂向分布的范围最深,气泡的穿透深度最大,而这些位置均处于“气泡生成区域”,这与高速相机和实验观察的结果基本一致.波浪破碎发生时,卷破波向下翻卷的水舌注入水中,与水体发生激烈撞击,从

图8 参数 C_0 与影响因子之间的关系. (a) 公式(7); 公式(8)

Figure 8 The calculated dimensionless parameter C_0 vs. the predicted C_0 from eq. (7) (a) and eq. (8) (b)

图9 (网络版彩色)空腔率实验数据与理论公式(4)对比图. (a) Case1; (b) Case2; (c) Case3; (d) Case4; (e) Case5

Figure 9 (Color online) Comparison of eq. (4) with experimental data of void fractional. (a) Case1; (b) Case2; (c) Case3; (d) Case4; (e) Case5

而在水体表面附近产生大量气泡形成“气泡生成区域”，随后气泡在湍流的作用下扩散至水体。然而在水体表面处的最大空腔率的位置也不尽相同，5个工

况下 $x-x_b$ 分别对应为0.35, 0.4, 0.35, 0.45, 0.5 m处。并且这些位置均大于等于气泡的最大穿透深度处的位置。由此可推断气泡在上升的过程中受到水平速度

的剪切原因,在射入点下游的水面处会上浮且破裂,但最大空隙率的分布与速度梯度剖面是否一致还有待探讨。

此外,虽然水体的紊乱会导致空隙率变化的规律难以表征^[21],但根据上文研究结果可以看出在同一水深处不同水平距离上,可以看出空隙率会随着断面离破碎点的距离先增大后减小,这一规律与“气泡生成区域”相关。从实验现象也可见,“气泡生成区域”两侧均为气泡扩散区域,越靠近该区域,水体湍流越强烈,空隙率越大。基于公式(4)在给定工况和水平位置离破碎点距离的条件下,可以预测出近岸规则波作用下近岸破碎区域内空隙率的垂直分布。然而 C_0 和 k_0 两个参数是对于空隙率分布所作的基本假设,并且是通过实验数据拟合反推得出的。其次,本文中实验的斜坡坡度为1:10,而斜坡坡度是否会对空隙率垂直分布造成影响,尚需进一步探讨。

4 结论与展望

基于波浪水槽实验对卷破波作用下破碎区内水体掺气过程及其空隙率进行精细测量,探讨了空隙率

与不同波要素之间的关系,在本实验条件下(Irribarren数为0.5184~0.7332)得到:

(1) 波浪作用下破碎区域内空隙率随局部水深呈e指数的函数关系衰减,且具有普适性;水面处最大的空隙率接近20%,气泡最大渗透深度在静水面下接近5 cm。

(2) 受湍流强弱的影响,水平方向上空隙率首先随破碎点距离的增大而增大,随后呈现减小的趋势。

(3) 基于实验数据,拟合反推得到既能更全面考虑波要素又可满足空隙率的垂向分布表达式 $C(z)=C_0\exp(k_1z)$ 的参数 C_0 和 k_1 ,发现 k_1 与波高成反比, C_0 是波陡、相对水深、无量纲水平位置的函数,相关系数 R^2 均在0.7以上。

本文采用物理模型实验方法揭示了卷破波作用下气体的卷入过程和不同断面的水体空隙率的垂线分布规律,但仅考虑了特定坡度下和一定范围内的波浪动力因素,更多样的波浪形态(如溢波)波要素、岸滩形态以及气泡特征参数密切相关水动力特征参数的定量分析有待进一步开展,以便为深入揭示气泡的输运机制的研究提供理论基础。

参考文献

- Bullock G N, Crawford A R, Hewson P J, et al. The influence of air and scale on wave impacts pressures. *Coast Eng*, 2001, 42: 291–311
- Bullock G N, Obhrai C, Perefrine D H, et al. Violet breaking wave impacts. Part1: Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls. *Coast Eng*, 2007, 54: 602–617
- Zhang S W, Yuan Y L. Wave breaking statistics and its application in sea-air flux estimation: Theoretical model (in Chinese). *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2003, 33: 696–703 [张书文, 袁业立. 海浪破碎统计及其在海-气通量估计中的应用 I: 理论模型. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 696–703]
- Merlivat L, Memery L. Gas exchange across an air-water interface: Experimental results and modeling of bubble concentration to transfer. *J Geophys Res*, 1983, 88: 707–724
- Wu J. Bubbles in the near-surface ocean: A general description. *J Geophys Res Oceans*, 1988, 93: 597–590
- Lamarre E, Melville W K. Air entrainment and dissipation in breaking waves. *Nature*, 1991, 351: 469–472
- Hoque A, Aoki S I. Distribution of void fraction under breaking waves in the surf zone. *Ocean Eng*, 2005, 32: 1829–1840
- Blenkinson E C, Chaplin J R. Void fraction measurements in breaking waves. *Proc Royal Soc London A*, 2007, 463: 3151–3170
- Zhang A M. 3D dynamic behavior of underwater explosion bubble (in Chinese). Doctor Dissertation. Harbin: Harbin Engineering University, 2006 [张阿漫. 水下爆炸气泡三维动态特性研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006]
- Zhang F X, Xu W L, Zhu Y Q. Experimental study on formation of air bubbles in self-aerated open channel flows (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2010, 41: 343–347 [张法星, 许唯临, 朱雅琴. 明渠自掺气水流气泡形成过程的试验研究. 水利学报, 2010, 41: 343–347]
- Wei W R, Deng J, Tian Z, et al. Analysis of air-water structure in self-aerated developing region of open channel flows (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2014, 25: 704–712 [卫望汝, 邓军, 田忠, 等. 明渠水流自掺气发展区水气结构分析. 水科学进展, 2014, 25: 704–712]
- Song C, Cheng W, Hu B W, et al. Research on the calculation of void fraction of bubble plume and its instability pattern (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2011, 42: 419–424 [宋策, 程文, 胡保卫, 等. 气泡羽流空隙率的计算及其不稳定规律的研究. 水利学报, 2011, 42: 419–424]
- Zhang A M, Wang S P, Bai Z H, et al. Experimental study on bubble pulse features under different circumstances (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2011, 43: 71–83 [张阿漫, 王诗平, 白兆宏, 等. 不同环境下气泡脉动特性实验研究. 力学学报, 2011, 43: 71–83]

- 14 Johnson B D, Cooke R C. Bubble populations and spectra in coastal waters: A photographic approach. *J Geophys Res*, 2012, 84: 3761–3766
- 15 Deane G B, Stokes M D. Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves. *Nature*, 2002, 418: 839–844
- 16 Chanson H, Lee J F. Plunging jet characteristics of plunging breaking. *Coast Eng*, 1997, 31: 125–141
- 17 Leifer I, Leeuw G D. Bubbles generated from wind-steepened breaking waves: Part 1. Bubbles-plumes bubbles. *J Geophys Res*, 2006, 11110.1029/2004JC002673
- 18 Dai H J, Kikkert G A, Chen B T, et al. Entrainment air in bore driven swash on an impermeable rough slope. *Coast Eng*, 2017, 121: 26–43
- 19 Harby K, Chiva S, Muñoz-Cobo J L. An experimental study on bubble entrainment and flow characteristics of vertical plunging water jets. *Exp Therm Fluid Sci*, 2014, 57: 207–220
- 20 Hoque A, Aoki S I. Air entrainment by breaking waves: A theoretical study. *Indian J Geo-Mar Sci*, 2006, 35: 17–23
- 21 Deike L, Melville W K, Popinet S. Air entrainment and bubble statistics in breaking waves. *J Fluid Mech*, 2016, 801: 91–129
- 22 Rojas G, Loewen M R. Fiber-optic probe measurements of void fraction and bubble size distributions beneath breaking waves. *Exp Fluids*, 2007, 43: 895–906
- 23 Cox D T, Shin S. Laboratory measurements of void fraction and turbulence in the bore region of surf zone. *J Eng Mech*, 2003, 129: 1197–1205
- 24 Zhang S W. Air bubble entrainment by breaking waves and estimation of the related statistical quantities (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2008, 57: 3287–3292 [张书文. 波浪破碎气体的卷入过程及相关统计量的估计. *物理学报*, 2008, 57: 3287–3292]
- 25 Witt A, Gulliver J, Shen L. Simulating air entrainment and vortex dynamics in a hydraulic jump. *Int Multiphas Flow*, 2015, 72: 165–180
- 26 Wang Z Y, Yang J M, Frederick S. High fidelity simulations of bubble, droplet and spray formation in breaking waves. *J Fluid Mech*, 2016, 792: 307–327
- 27 Cokelet E D. Breaking waves. *Nature*, 1977, 267: 769–774
- 28 Mohammadreza T. Air bubble entrainment by breaking bow waves simulated by a 2D+T technique. Doctor Dissertation. Maryland: the University of Maryland, 2010
- 29 Galvin C J. Breaker type classification of three laboratory beaches. *J Geophys Res*, 1968, 73: 3651–3659
- 30 Willmott C. On the validation of models. *Phys Geogr*, 1981, 2: 184–194
- 31 Stanton T P, Thomson E B. Profiles of void fraction and turbulent dissipation under breaking waves in the surf zone. In: *International Conference on Coastal Engineering*, 2001. 70–79
- 32 Blenkinsopp E C, Chaplin J R. Void fraction measurements and scale effects in breaking waves in freshwater and seawater. *Coast Eng*, 2011, 58: 417–428

Summary for “破碎区水体掺气特征及空隙率分布规律”

Experimental study on characteristics of air entrainment and distribution of void fraction in surf zone

Bin Deng^{1,2*}, Mengfei Wang², Changbo Jiang^{1,2*} & Zhiyuan Wu²¹ School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;² Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China

* Corresponding authors, E-mail: dengbin07@csust.edu.cn; jiangchb@csust.edu.cn

The study of breaking wave-induced air bubble flows near the seashore is a great challenge. The process of air entrainment is highly complex and air bubbles evolution takes place over a wide range of spatial and temporal scales. Surf wave breaking can generate strong turbulence and entrain a large amount of air in the water and produce many air bubbles with different lifetimes. It is a typical two-phase flow involving water and air. The evolution and transport of wave-induced air bubbles can significantly affect coastal structures with respect to impact intensity, seawater-air exchange, sediment transport and wave energy dissipation. Studying the characteristics of wave-induced air bubbles in the nearshore wave breaking zone has important theoretical value and scientific significance. A better understanding of this process is also important to improving engineering practice and environmental protection in the nearshore region. Past studies have been focused on the transport law of the wave-induced air bubbles and the related statistics of air bubbles involved in the wave breaking process. Due to the complexity of water and gas mixing processes and the difficulty of the corresponding measurements, the prior research mainly focused on the formation and distribution of wave-induced air bubbles and their relationship with wave energy dissipation. However, quantitative research on how air bubble characteristics vary with different wave parameters still lacks in-depth discussion.

This work presents a wave tank experiment to fully understand the void fraction distribution and its relationship with prominent wave parameters during the air entrainment process during surf wave breaking. Spatial and temporal variations of air entrainment and void fraction evolutions are recorded by an air bubble measuring system and high speed camera, respectively. The main factors affecting the distribution of void fraction are determined. The experimental data demonstrates that the distribution of void fraction is closely related to the water depth, prominent wave parameters and distance from the wave breaking location. We discuss the spatial and temporal evolution of the void fraction and derive an empirical formula to predict the void fraction by introducing two factors named C_0 and k_1 . The factor k_1 is inversely proportional to wave height and C_0 varies with the wave steepness, relative water depth and dimensionless horizontal position. The empirical formula is used to analyze the relationship between each wave parameter and the distribution of void fraction. Experimental results show that the maximum void fraction was close to 20% at the water surface and that the maximum penetration depth of air bubbles was close to 5 cm below the still water surface. As the water depth increased, void fraction varied with e -index. Results of this work can be used to analyze and predict the spatiotemporal distribution of the void fraction in wave breaking zone and provide a good reference for further study of air bubble transport during surf wave breaking.

surf zone, air entrainment, bubble, void fraction, flume experiment

doi: 10.1360/N972018-00180