

文章编号:1005-9865(2021)05-0086-09

深水极端波浪非线性几何特征试验分析

赫岩莉¹,毛鸿飞¹,吴光林¹,潘新祥²

(1. 广东海洋大学 海洋工程学院,广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学 海运学院,广东 湛江 524088)

摘 要: 为了解极端波浪非线性特征,明确波群在演化过程中的水动力学特性,针对一系列高斯波群进行了深水物理试验分析。试验结果显示,增加波陡或波群宽度,均可使波面偏度 S_k 发生明显变化,尤其当波浪发生破碎后,在破碎区域内,波面偏度变化范围剧烈增大,说明该偏度极大值可能作为判断破碎的一个指标。波陡和波群宽度对波面不对称度影响程度不同:当波陡或波群宽度增加后,波峰不对称度所受影响最大,波峰前端波谷不对称度次之,波峰后端波谷不对称度所受影响最小,但仍不可忽略。在波浪演化过程中,幅值谱出现不同程度频带下移,波浪破碎后,会出现永久频带下移;当调制不稳定发生时,随着调制不稳定指数增加,频带下移量呈现快速增长趋势。

关键词: 波浪不对称;波浪破碎;调制不稳定;非线性;几何特征

中图分类号:TV139. 2

文献标志码:A

DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2021.05.009

Experimental analysis of the nonlinear geometric characteristics for extreme wave in deep water

HE Yanli¹, MAO Hongfei¹, WU Guanglin¹, PAN Xinxiang²

(1. College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. College of Ocean Transportation, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: To study the nonlinear characteristics of the extreme waves and identify the dynamic characteristics of wave groups during the evolution, a series of Gaussian wave groups are analyzed in deep water experimentally. The experimental results show that increasing the wave steepness or the wave group width can make the skewness S_k change obviously, especially when the wave is broken, the variation range of skewness increases dramatically within the breaking region, and the maximum value of skewness may be used as an indicator to judge the wave breaking. Wave steepness and wave group width have different effects on asymmetry. When the wave steepness or the width of the wave group is increased, the asymmetry of the crest is affected the most, followed by the asymmetry of the trough at the front of the crest and the asymmetry of the trough at the back of the crest being affected the least, which however is still not negligible. During the wave evolution, the amplitude spectrum shifts down to different degrees, and after the wave breaking, it shifts down permanently. When the modulation instability occurs, with the increase of the modulation instability index, the frequency band downshift presents a rapid growth trend.

Keywords: wave asymmetry; wave breaking; modulation instability; nonlinearity; geometric characteristic

在真实海洋中,波浪常以波群形式传播,在传播过程中,波浪非线性作用会使得波高增加^[1],形成极大波,这些极大波浪及其破碎正是引起海上事故的主要原因之一。目前,针对野外实测,由于测量难度大、工作人员安全不能得到很好保障、经济成本较大等原因,难以很好地捕捉波浪的多种形态,从而使得波浪演化过

收稿日期:2020-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52001071,52071090);广东省教育厅高校青年创新人才项目(2019KQNCX045);广东海洋大学科研启动费项目(120602-R20069)

作者简介:赫岩莉(1983-),女,黑龙江鸡西人,博士,讲师,主要从事非线性水波动力学方面研究。E-mail:hehe77972742@126.com

程中几何特征和变化规律的深入研究受阻。采用具有可重复性的物理试验对波浪进行多次采集,分析其演化变形及非线性现象产生机理是目前常用的有效研究方法。

在波浪演化过程中,随着非线性增加,波浪开始变形,波前前倾,波面幅值增加,波面不再对称。针对波浪演化的复杂变化及破碎波几何特征,学者们已经进行了相关研究。早在 1891 年,Stokes^[2]建议当波顶角大于等于 120°时,波浪发生破碎。Myrhaug 和 Kjeldsen^[3]通过分析极端波浪的峰前陡、竖直和水平不对称因子,对极端波浪的不对称性进行分析。Bonmarin^[4]针对深水陡波演化至波浪发生破碎阶段进行了试验观察研究,尤其针对波浪接近破碎区域的波形不对称情况进行了分析,指出不对称增长率与破碎类型紧密相关,卷破波不对称性要比崩破波更明显。Wu 和 Yao^[5]对试验结果分析指出谱斜率和频带宽对极端波浪的变形和几何特征起到关键作用。陈洪洲等^[6]采用物理试验对浅水极端波浪几何特征进行研究,指出坡度对极限波陡和偏度影响较小,但对不对称度具有明显影响,随着坡度增加,不对称程度更明显。高志一^[7]指出,波群包络线不对称性可导致最大波高提前一个波长出现。随后,高志一和文凡^[8]通过分析波群结构及波浪破碎特征得到,在波群前端波动振幅较大,波面不对称性导致前端单个波的波陡较大,从而易发生破碎。梁书秀等^[9]的深水试验分析结果给出,波浪发生破碎后,由于能量减小导致特征频率减小、特征周期增加。在波浪演化过程中,非线性使得波面发生严重变形,研究其产生机制是了解波浪变化的关键。Diorio 等^[10]采用不同方法产生破碎波浪,通过测量接近破碎处波峰波面指出,在缩放适当条件下,当破碎开始时,崩破波峰前端的凸起和毛细波是自相似的,不依赖于破碎波产生机制。Benjamin 和 Feir^[11]最初从理论上给出调制不稳定是引起深水极端波浪的机制之一。在此之后,Bonmarin 和 Ramamonjiarisoa^[12]通过对深水破碎波变形分析指出,破碎主要是由调制不稳定和快速增长的不稳定引起,前者使得局部波陡趋近于一个最大值,后者直接导致破碎发生。Tian 等^[13]通过分析色散聚焦和调制不稳定机制引起的波浪破碎波长下降情况得到,无论是崩破还是卷破,在破碎开始前两个周期内,波长下降率均约为 30%;同时,在破碎开始前一个周期内,崩破波峰增长约 20%,而卷破约增长 40%。

综上,多年来,极端波浪几何非线性特征一直是水波动力学研究中难点与热点之一,目前尚未有统一的结论。采用试验方法对极端波浪进行深入分析是了解其物理特征的重要途径之一。海洋中大多破碎类型为崩破,为更接近海浪真实情况,采用调制不稳定为主要机制生成极端波浪进行其动力学特征分析。

1 试验布置及参数介绍

1.1 试验布置

试验在大波流水槽中进行,水槽尺寸为 48.6 m×2 m×1.8 m(长×宽×高),试验水深 1 m,俯视图见图 1。水槽一端为液压驱动式活塞型造波板,另一端采用消浪网作为吸波装置。在以往试验中,频率为 1 Hz 的波反射系数约为 5%,则可认为反射对试验影响较小,故在此试验中忽略不计。该试验中,将造波板平均位置定义为零点 $x=0$ m,波浪传播方向 C 如图 1 所示。

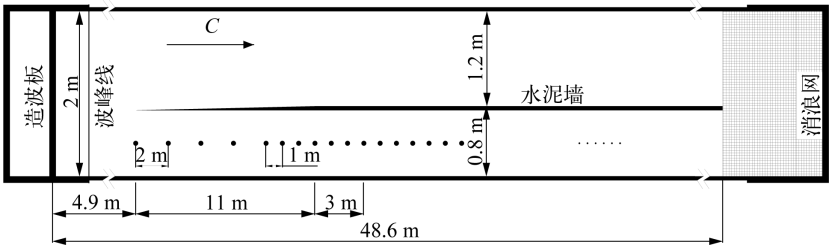


图 1 试验水槽俯视图
Fig. 1 Top view of experimental tank

为保障波浪二维传播,将一个光滑水泥墙安装在水槽中间,使得水槽分为 0.8 m 和 1.2 m 两部分,选择 0.8 m 宽度部分作为有效试验区域。在试验中,沿水槽长度方向共布置 34 个测点采集数据,在 $x=12.9$ m 以前部分,测点间距为 2 m;在 $x=12.9$ m 以后部分,测点间距为 1 m。浪高仪绝对精度为 ± 1 mm,在进行试验之前,对所有浪高仪进行了稳固性检查和校准。为减小造波机产生的非传播波影响,首测点位置布置在 $x=4.9$ m 处,并以此处测量结果校准波群初始参数。

1.2 参数介绍

采用高斯波群为研究目标,对其演化过程中产生的极端波浪非线性动力学特征进行分析。在试验中,采样频率 $f_s=50\text{ Hz}$,采样时间间隔为 $\Delta t=0.02\text{ s}$,采样点数为 8 192,载波波数 $k_0=4.03>1$,满足深水条件。试验中造波函数与 Shemer 等^[14]研究相同:

$$\zeta = A_p \exp[-(tf_0/N)^2] \cos(2\pi f_0 t) \tag{1}$$

其中, A_p 是造波机运动冲程幅值; N 是波群包络宽度,也称为波群宽度, N 与频带宽 Δf 关系为:

$$\Delta f = \frac{f_0}{N\pi} \sqrt{\frac{1}{2} \ln 2} \tag{2}$$

其中,载波频率 $f_0=1\text{ Hz}$, Δf 为频带宽,根据谱峰值一半所截幅值谱的宽度确定。在试验中,造波机为推板式,其水力传递函数为:

$$T_{\text{rsfun}} = \frac{4\sinh^2 kh}{2kh + \sinh 2kh} \tag{3}$$

通过式 (3) 可得到初始位置处最大波面升高 $A_0=A_p T_{\text{rsfun}}$,波陡为 $\varepsilon_0=k_0 A_0$,具体试验波况见表 1。

表 1 高斯波群初始波况
Tab. 1 Initial wave condition for Gaussian wave group

名称	ε_0	A_0/m	N	BFI	$\Delta f/\text{Hz}$	备注
GP1	0.10	0.024	2	0.483	0.256	—
GP2	0.15	0.044	2	0.928	0.244	—
GP3	0.20	0.054	2	1.275	0.269	—
GP4	0.27	0.062	2	1.383	0.244	—
GP5	0.09	0.025	3	0.697	0.183	—
GP6	0.17	0.045	3	1.394	0.171	—
GP7	0.23	0.057	3	1.718	0.171	—
GP8	0.26	0.065	3	2.151	0.171	破碎
GP9	0.10	0.027	4	0.900	0.146	—
GP10	0.18	0.044	4	1.633	0.146	—
GP11	0.22	0.055	4	2.051	0.146	破碎
GP12	0.26	0.064	4	2.596	0.146	破碎
GP13	0.11	0.026	5	1.034	0.122	—
GP14	0.17	0.043	5	1.952	0.122	—
GP15	0.22	0.054	5	2.487	0.122	破碎
GP16	0.26	0.064	5	3.125	0.122	破碎

注: BFI 是 Benjamin-Feir 不稳定指数^[15],采用 $BFI=S_G/(\Delta f/f_p)$ 计算,其中 S_G 为全局波陡,定义可参照 Tian 等^[16]研究, f_p 是初始位置处的主频率。

2 试验结果几何特征分析

众多研究已表明^[3, 17],在传统研究中,只采用波高和波长比值定义的波陡对不对称陡波特性进行分析是不够的。继 Myrhaug 和 Kjeldsen^[3]后,Babanin 等^[18]指出偏度 S_k 和不对称度 A_s 是水波的自然特征。偏度是波面关于水平轴的对称参数,其值大于零,说明波峰大于波谷值,即为典型的表面波;不对称度 A_s 是波面关于竖直轴的对称参数, A_s 小于零,说明在波浪传播方向,波浪前倾。偏度和不对称度两者结合,共同表现波浪在传播过程中的非线性特征变化。

2.1 偏度 S_k 特征演化

为更好提取数据有效信息,在分析数据之前,采用 5 Hz 为截止频率的低通滤波对数据进行去噪处理。

波浪在传播过程中,由于非线性作用,使得波面发生明显不对称现象,见图 2,示例波况为 GP8。图 2(a)为 $x=4.9\text{ m}$ 处波面,图 2(b)为波浪传播至 $x=13.9\text{ m}$ 处波面情况,此时波面升高达到最大值 0.1 m 。由表 1 得,对应该波况 BFI 值为 2.151 ,根据 Janssen^[15] 研究可知,调制不稳定发生。比较两图可知,随着传播距离增加,由于调制不稳定和高低阶谐波非线性作用,波形由对称逐渐变化为不对称状态,几何形态发生明显变化。

为深入研究极端波浪在传播过程中几何特征变化情况,采用与 Ma 等^[19] 研究中相同定义的波面偏度 S_k 和不对称度 A_s 对试验数据进行分析。在此之前,首先给出波群各参数定义,如图 3 所示, η_m 、 η_f 和 η_r 为波峰值以及与其相邻的前后两个波谷值,其中 η_f 和 η_r 为负值; t_h 和 t_r 分别对应两个波谷最大幅值发生时刻, t_m 为最大波面升高发生时刻; t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 为与波峰和两个相邻波谷相关的过零点发生时刻。文中偏度 S_k 定义为:

$$S_k = \frac{2\eta_m}{|\eta_f| + |\eta_r|} - 1 \tag{4}$$

令 $t_f = t_m - t_2$, $t_r = t_3 - t_m$, $t_{hf} = t_h - t_1$, $t_{hr} = t_2 - t_h$, $t_{rf} = t_r - t_3$, $t_{rr} = t_4 - t_r$,采用 Ma 等^[19] 研究对不对称度 A_s 定义为:

$$A_s = \frac{t_f}{t_r} - 1 \tag{5}$$

同样地,可分别给出对应两个波谷的不对称度 A_{ls} 和 A_{rs} 定义为:

$$A_{ls} = \frac{t_{hf}}{t_{hr}} - 1 \tag{6}$$

$$A_{rs} = \frac{t_{rf}}{t_{rr}} - 1 \tag{7}$$

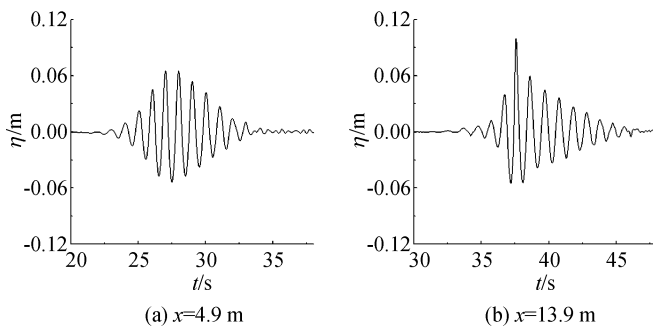


图 2 GP8 波面变化
Fig. 2 Variation of wave surface elevation for GP8

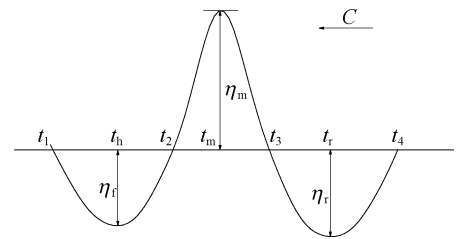


图 3 波群几何参数示意
Fig. 3 Sketch of geometric parameters for wave group

针对未发生破碎波群,其偏度 S_k 演化情况如图 4 所示,图中竖直划线表示最大波面升高发生处。由图 4(a)可见,在首测点位置处,由于波前作用使得波面偏度大于 0,由于初始波陡较小,波面呈现微小不对称。随着传播距离增加, S_k 从正值逐渐过渡到负值后趋近 0,整体 S_k 变化幅度较小。保持其他条件不变,当增加波陡后, S_k 呈现大幅度变化,见图 4(b)。根据 S_k 均为正值且偏离零值较大可知,随着波浪演化波峰逐渐增大。根据表 1 可知,该波况对应 BFI 值为 1.383 ,即调制不稳定发生。随着波浪传播,由于三阶共振作用,产生新的自由波,使得非线性增强,从而在 $x=10.9\text{ m}$ 处产生大波,因此使波面偏度发生明显变化。图 4(c)为增加群宽度后 S_k 演化情况,结果显示,当保持较小波陡、增加群宽度后, S_k 逐渐增加至 0.3 左右然后开始减小,直至最后接近于 0。说明增加群宽度使得偏度增加,波面不对称性增加,但因波陡较小,非线性较弱,最终波面在演化一段距离后接近于对称形状。

当增加波陡后,波浪非线性增强,破碎发生, S_k 演化情况如图 5 所示,阴影区域代表破碎发生区域。由图 5 所示,与图 4 比较,破碎波群偏度呈现明显不同的变化。从波浪开始传播, S_k 持续上涨,其最大值(甚至超过 1)发生在破碎区域内。由此说明,波峰逐渐变尖,尤其在破碎区域,波面发生严重变形。需要注意的

是,在破碎区域内, S_k 呈现出几次超过开始破碎时其值的情况,对应试验中间歇性发生的多次破碎。当 S_k 达到极大值时,波峰异常尖锐,波谷平缓,波面严重不对称,同时破碎发生,这也说明 S_k 可能作为判断破碎发生的一个标志。随着传播距离增加,经历破碎之后,由于破碎和黏性等因素,波浪损失大量能量, S_k 逐渐趋向于恢复至初始状态。

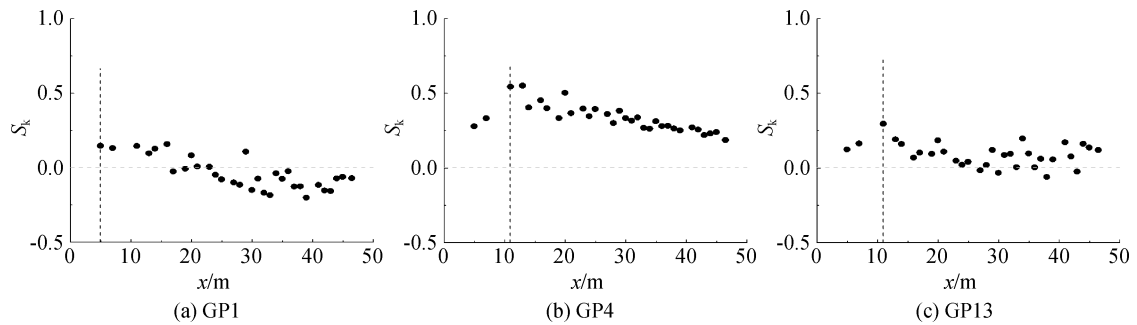


图 4 未破碎波群偏度 S_k 演化

Fig. 4 Evolution of skewness S_k for non-breaking wave groups

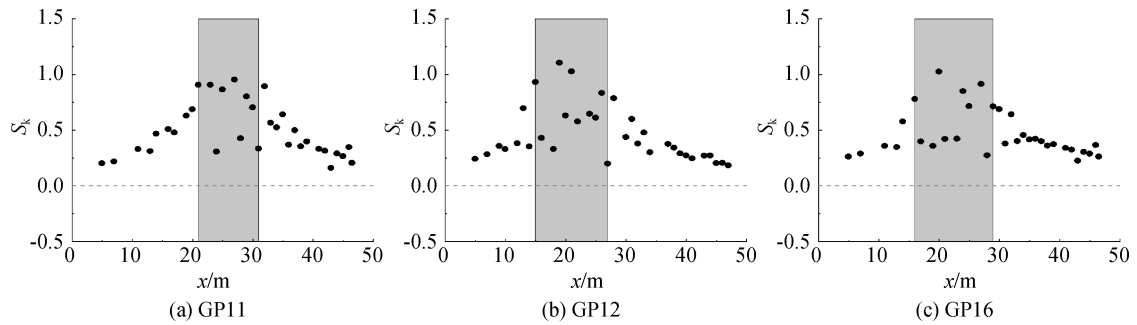


图 5 破碎波群偏度 S_k 演化

Fig. 5 Evolution of skewness S_k for breaking wave groups

2.2 不对称度 A_s 特征演化

由以上分析可知,根据初始条件不同,随着波群演化,波面会产生不同程度不对称变形。针对其不对称性,这里从最大波峰及其相邻两个波谷情况分别进行分析。图 6 为波陡依次增加后波群波峰不对称参数 A_s 演化情况,由图可见,随着波陡增加,非线性增加, A_s 变化幅度明显增加。尤其当接近破碎(图 6(c))或发生破碎(图 6(d))时, A_s 值大于 0.5,甚至接近于 1,说明波峰前后两端发生强烈不对称变形。

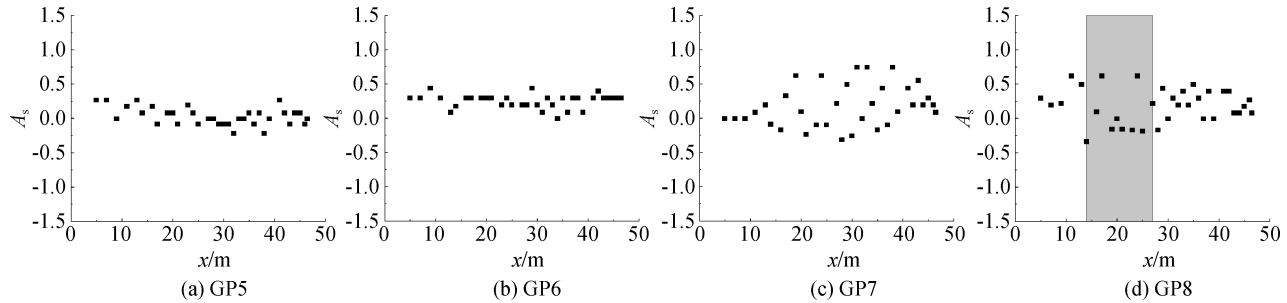


图 6 不同初始波陡波群的波峰不对称度 A_s 演化

Fig. 6 Evolution of asymmetry A_s of crest for wave groups with different initial wave steepness

当保持波陡不变,增加波群宽度以后,波峰不对称度 A_s 演化情况如图 7 所示,阴影部分为破碎区域。由图 7 可见,在破碎区域内,由于强烈非线性使得不对称度发生大幅度变化, A_s 最大值可超过 1,此时波峰变形严重;同时针对破碎波群, A_s 最大值也发生在破碎域内,即波峰严重变形情况发生在破碎区域。

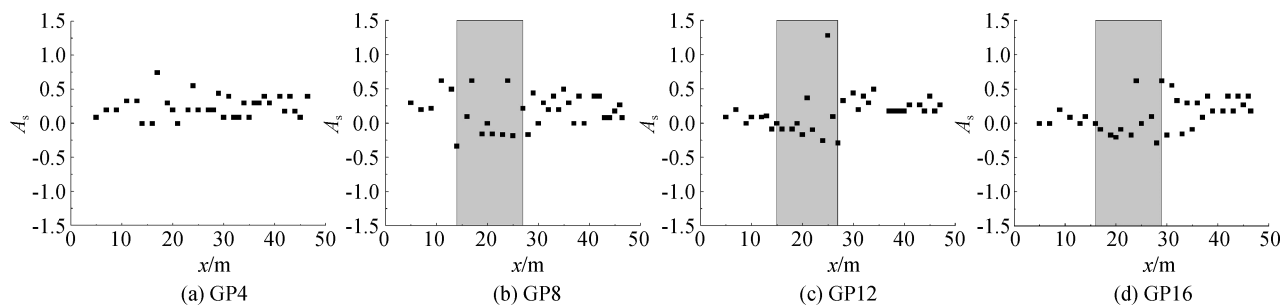


图7 不同群宽度波群的波峰不对称度 A_s 演化

Fig. 7 Evolution of asymmetry A_s of crest for wave groups with different wave group widths

以上针对不同初始条件下波群的波峰不对称性进行了分析,下面对与其相邻两个波谷的不对称性进行分析。图8为不同波陡情况下,波峰前端波谷不对称度 A_{ls} 演化情况。由图8可见,随着波陡增加,非线性增加, A_{ls} 出现增长,尤其当波浪发生破碎时,在破碎区域, A_{ls} 较大;与波峰情况类似,此处峰前波谷也出现明显变形。

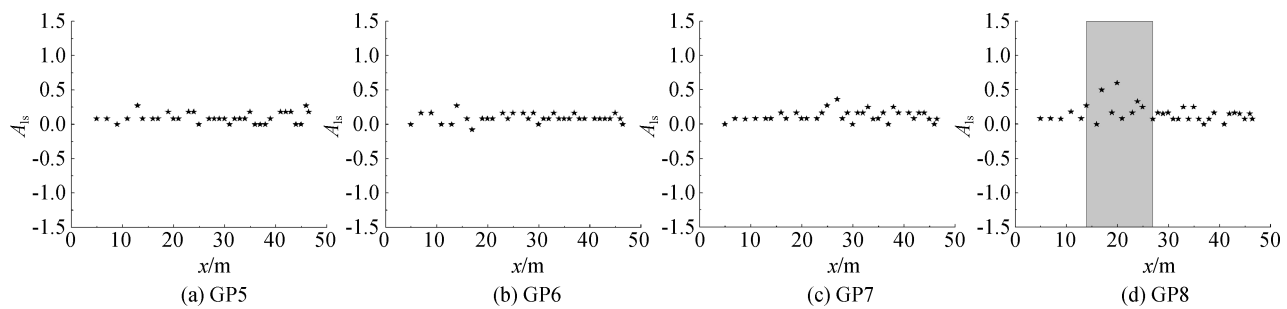


图8 不同初始波陡波群的波峰前端波谷不对称度 A_{ls} 演化

Fig. 8 Evolution of asymmetry A_{ls} of trough in front of crest for wave groups with different initial wave steepness

保持波陡不变,增加波群宽度, A_{ls} 演化如图9所示,阴影部分为破碎区域。当波陡较大、波群宽度较小时,如图9(a)所示,波群峰前波谷不对称性较稳定,变化幅度较小。这说明在未发生破碎情况下,峰前波谷变形相对稳定,峰前波谷相对对称。当继续增加波群宽度之后,谱宽减小,在相同波陡情况下,波浪发生破碎,如图9(b)~(d)所示。图9(b)~(d)中显示,在破碎带内, A_{ls} 变化范围突然变大,随着波群宽度增加,其变化范围从-0.1~0.7发展到-0.3~1.1之间。尤其当 A_{ls} 超过1时,在波峰前端、与波峰相邻的半个波谷变的非常窄,而另一半波谷宽度是其二倍以上,说明峰前波谷变形非常严重。

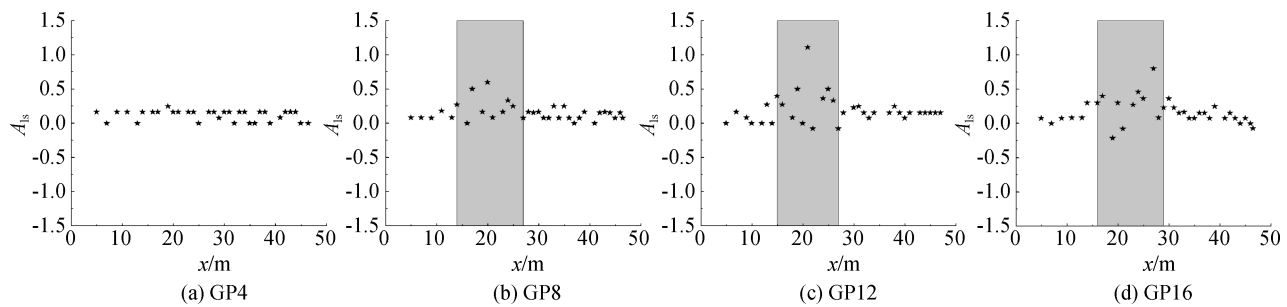


图9 不同群宽度波群的波峰前端波谷不对称度 A_{ls} 演化

Fig. 9 Evolution of asymmetry A_{ls} of trough in front of crest for wave groups with different wave group widths

由以上分析可见,波浪在演化过程中,波峰以及峰前波谷在波陡和谱宽影响下,都会呈现不同程度变化。同样地,针对峰后波谷不对称性 A_{rs} ,目前研究也很少,因此对其也进行了分析。当波群宽度相同时,随着波陡增加, A_{rs} 演化情况如图10所示,阴影部分为破碎区域。由图10可见,随着波陡增加,峰后波谷不对称性有所增加,但增加幅度小于峰前波谷。

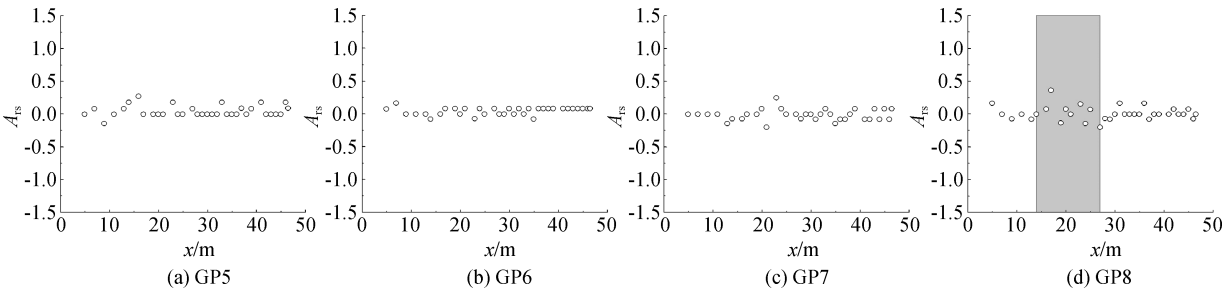


图 10 不同初始波陡波群的波峰后端波谷不对称度 A_{rs} 演化

Fig. 10 Evolution of asymmetry A_{rs} of trough behind crest for wave groups with different initial wave steepness

维持波陡不变,增加波群宽度,谱宽减小, A_{rs} 变化情况如图 11 所示,阴影部分为破碎区域。由图 11 可见,随着波群宽度增加,峰后波谷不对称度也有明显增加;同样地,与 A_{ls} 相比, A_{rs} 增加幅度相对小。

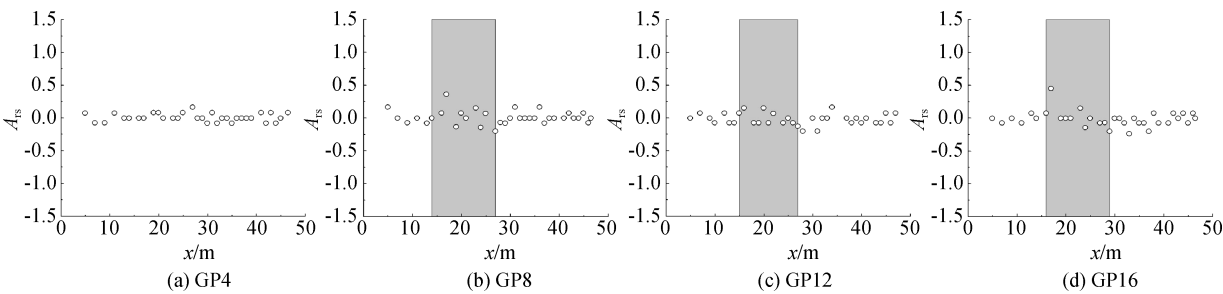


图 11 不同群宽度波群波峰后端波谷不对称度 A_{rs} 演化

Fig. 11 Evolution of asymmetry A_{rs} of trough behind crest for wave groups with different wave group widths

综上所述,通过对波峰以及与其相邻两个波谷不对称度分析可知,增加波陡或波群宽度,均使得波浪非线性增加,从而波峰和两侧波谷均发生不同程度不对称,使得波群携带主要能量部分的波面发生明显变形。当改变波陡或波群宽度后,波峰不对称度 A_s 发生强烈变化;波峰前端波谷不对称度 A_{ls} 也有明显变化,但变化程度小于波峰;变化最小的是波峰后端波谷不对称度 A_{rs} 。

3 幅值谱特征

当初始条件不同时,波面变化呈现差异很大,随着波浪传播,由于波波相互作用和三阶共振作用可分别产生高低阶谐波和新自由波,使得幅值谱发生很大变化。图 12 给出以破碎波群 GP16 为例对应的对数坐标下幅值谱演化情况,虚线表示首测点处幅值谱,标记 η_{max} 处表示最大波面升高发生处(破碎发生)。由图 12 可见,随着波浪趋近于破碎点处,谱峰能量开始向低频转移,当达到最大波面升高发生处,破碎发生,出现明显频带下移现象,经过破碎区域后,主频能量没有向初始主频恢复,并呈现出永久频带下移现象。峰频变化对后续波浪演化及相关特性等会产生很大影响,如 Gao 等^[20] 数值研究指出,当谱峰频率等于或者接近港湾共振频率之一时,聚焦波群可直接引起港湾共振现象。

针对文中试验数据,对其频带下移量 Δf_d 进行了研究分析。其中,对于未破碎波群,频带下移量采用首尾测点处无量纲化主频差来确定;对于破碎波群,频带下移量采用频带下移开始发生处 X 与最后测点处的无量纲化相对主频差来确定,无量纲化参数均为首测点处主频,结果见表 2。

表 2 频带下移量
Tab. 2 Frequency downshift

波况	$\Delta f_d / (\%)$	X/m	波况	$\Delta f_d / (\%)$	X/m	波况	$\Delta f_d / (\%)$	X/m	波况	$\Delta f_d / (\%)$	X/m
GP1	0.0	—	GP5	0.0	—	GP9	0.0	—	GP13	0.0	—
GP2	0.0	—	GP6	3.6	27.9	GP10	6.0	24.9	GP14	8.4	23.9
GP3	2.4	14.9	GP7	2.4	32.9	GP11	6.2	20.9	GP15	6.2	19.9
GP4	2.4	13.9	GP8	7.4	13.9	GP12	7.4	14.9	GP16	7.4	15.9

根据表2中结果所示,随着波陡增加, Δf_d 整体上呈现增加趋势且频带下移倾向于更早发生;同时,宽波群整体频带下移量较大。当波陡较小时,非线性较小,增加波群宽度,在波浪演化过程中未出现频带下移现象。当波陡增大后,针对未发生破碎波群,频带下移量随着波群宽度增加而增加,如表2中GP2、GP6、GP10和GP14所示。继续增大波陡,针对未发生破碎波群,频带下移量较小;然而针对发生破碎波群,频带下移量有明显增加,如表2中GP3、GP7、GP11和GP15。如继续增大波陡,未破碎波群依然具有较小的频带下移量,但随着波群宽度增加,破碎波群具有更大且一致的频带下移量。这说明,在波浪演化过程中,频带下移量与波陡、波群宽度和波群是否发生破碎密切相关。

调制不稳定是频带下移产生机制之一,赫岩莉等^[21]的试验研究指出,较大频带下移量对应的BFI一般也较高。结合文中试验波浪在演化过程中出现不同程度频带下移现象,对频带下移量与BFI是否相关,进行了分析。如图13所示,当 $BFI>1$ 时,几乎所有波群均发生了不同程度的频带下移情况,随着BFI增加,频带下移量整体呈现明显的上升趋势。

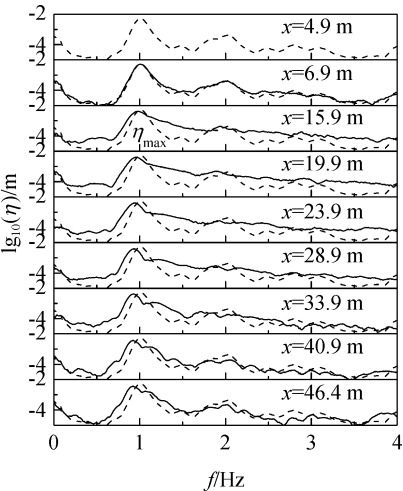


图12 波况GP16幅值谱演化

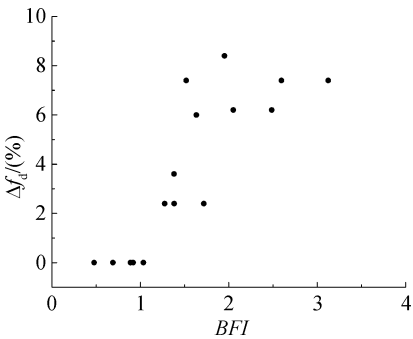


图13 频带下移量 Δf_d 与BFI的关系

Fig. 12 Evolution of amplitude spectrum for Case GP16 Fig. 13 Relation between frequency band downshift Δf_d and BFI

4 结 语

通过物理试验,对多种初始条件下的高斯波群几何特征以及幅值谱特征进行了分析,得到以下主要结论:

- 1) 随着波陡或波群宽度增加,非线性增强,波峰逐渐变尖,波面发生明显变形,偏度 S_k 呈现大幅度变化。尤其在破碎区域, S_k 的多次极大值对应着间歇性发生的破碎,也说明 S_k 可能作为判断破碎的一个指标。
- 2) 通过对波峰以及与其相邻两个波谷的不对称度分析得出,增加波陡或波群宽度,均使得波浪非线性增加,从而波峰和两侧波谷均发生不同程度不对称。其中,波峰不对称度 A_s 所受影响较大。其次是波峰前端波谷不对称度 A_{ls} ,同时 A_{ls} 变化程度与破碎情况紧密相关,当波陡较大时,波群未发生破碎, A_{ls} 变化较小;反之,当波群发生破碎后, A_{ls} 会呈现剧烈变化。所受影响较小的是波峰后端波谷的不对称度 A_{rs} 。
- 3) 随着波陡增加,频带下移量增加且频带下移倾向于更早发生,同时,宽波群整体频带下移量较大。频带下移量与波陡、波群宽度以及破碎情况相关:保持较小波陡不变,针对均未发生破碎的多个波群,随着波群宽度增加,频带下移量快速增加;将波陡增加后,对应该波陡,波群发生未破碎和破碎两种情况,随着波群宽度增加,破碎波群的频带下移量要大于未破碎波群,且对应该波陡下破碎与未破碎波群,两者频带下移量分别保持不变。当 $BFI>1$ 时,随着BFI增加,频带下移量呈现快速增长趋势。

参考文献:

[1] RAPP R J, MELVILLE W K. Laboratory measurements of deep-water breaking waves[J]. Philosophical Transactions of the

- Royal Society of London, 1990, 331(1622): 735-800.
- [2] STOKES S G G. Note on the theory of the solitary wave[J]. Philosophical Magazine Series 5, 1891, 32(196): 314-316.
- [3] MYRHAUG D, KJELDSEN S P. Steepness and asymmetry of extreme waves and the highest waves in deep water[J]. Ocean Engineering, 1986, 13(6): 549-568.
- [4] BONMARIN P. Geometric properties of deep-water breaking waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 209(1): 405-433.
- [5] WU C H, YAO A F. Laboratory measurements of limiting freak waves on currents[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(C12): C12002.
- [6] 陈洪洲, 马玉祥, 马小舟, 等. 浅水极限波浪几何特征的实验研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 105-111. (CHEN Hongzhou, MA Yuxiang, MA Xiaozhou, et al. Laboratory study on geometric characteristics of limiting waves in shallow water [J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(2): 105-111. (in Chinese))
- [7] 高志一. 波群中波包络相互作用及波群特性的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (GAO Zhiyi. Envelope interaction in wave group and wave group properties study[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese))
- [8] 高志一, 文凡. 波群结构和波群中的波破碎[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(9): 8-14. (GAO Zhiyi, WEN Fan. The structure of wave groups and wave breaking in wave groups[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(9): 8-14. (in Chinese))
- [9] 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. (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. (in Chinese))
- [10] DIORIO J D, LIU X, DUNCAN J H. An experimental investigation of incipient spilling breakers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 633: 271-283.
- [11] BENJAMIN T B, FEIR J E. The disintegration of wave trains on deep water part 1. Theory[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 27: 417-430.
- [12] BONMARIN P, RAMAMONJIARISOA A. Deformation to breaking of deep water gravity waves[J]. Experiments in Fluids, 1985, 3(1): 11-16.
- [13] TIAN Z, PERLIN M, CHOI W. An eddy viscosity model for two-dimensional breaking waves and its validation with laboratory experiments[J]. Physics of Fluids, 2012, 24(3): 036601.
- [14] SHEMER L, KIT E, JIAO H. An experimental and numerical study of the spatial evolution of unidirectional nonlinear water-wave groups[J]. Physics of Fluids, 2002, 14(10): 3380-3390.
- [15] JANSSEN P A E M. Nonlinear four-wave interactions and freak waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 2003, 33(4): 863-884.
- [16] TIAN Z G, PERLIN M, CHOI W Y. Energy dissipation in two-dimensional unsteady plunging breakers and an eddy viscosity model[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 655(1): 217-257.
- [17] SOARES C G, CHERNEVA Z, ANTÃO E M. Steepness and asymmetry of the largest waves in storm sea states[J]. Ocean Engineering, 2004, 31(8-9): 1147-1167.
- [18] BABANIN A, CHALIKOV D, YOUNG I, et al. Predicting the breaking onset of surface water waves[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(7): L07605.
- [19] MA Y X, MA X Z, PERLIN M, et al. Extreme waves generated by modulational instability on adverse currents[J]. Physics of Fluids, 2013, 25(11): 114109.
- [20] GAO J L, MA X Z, ZANG J, et al. Numerical investigation of harbor oscillations induced by focused transient wave groups[J]. Coastal Engineering, 2020, 158: 103670.
- [21] 赫岩莉, 马玉祥, 马小舟, 等. 有限水深下独立波群的能量变化试验研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(1): 56-63. (HE Yanli, MA Yuxiang, MA Xiaozhou, et al. Experimental investigation on energy evolution of single wave group at finite water depth[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(1): 56-63. (in Chinese))