第 48 卷 第 6 期
2005 年 11 月

地 球 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

Vol. 48, No. 6
Nov., 2005

林 缅,袁志达. 振荡流作用下波状底床上流场特性的实验研究. 地球物理学报,2005,**48**(6):1466～1474
Lin M, Yuan Z D. Investigation of characteristics of fluid field over wavy beds under oscillatory flow. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(6):1466～1474

振荡流作用下波状底床上流场特性的实验研究

林 缅,袁志达
中国科学院力学研究所,北京 100080

摘 要 本文利用 U 型振荡水槽和粒子图像测速仪(PIV)对三种固定波状底床上的流场进行了测量,得到一系列不同振幅条件下的瞬时速度场和涡量场. 通过分析不同时段涡强度以及涡轨迹,讨论了底床形状对其附近流场的影响. 实验结果分析表明,底床形状决定着整个涡量场特征及涡轨迹,从而决定着泥沙的净输移. 这些结果对于探讨浅海区沙波、沙纹和沙垄等波状底床上泥沙输移的力学机制是很有意义的.

关键词 振荡流, 波状底床, 涡量, 涡轨迹
文章编号 0001-5733(2005)06-1466-09 **中图分类号** P738 **收稿日期** 2005-04-10, 2005-06-10 收修定稿

Investigation of characteristics of fluid field over wavy beds under oscillatory flow

LIN Mian, YUAN Zhi-Da
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, *China*

Abstract Particle Image Velocimetry (PIV) has been used to measure the oscillatory flow above three fixed wavy beds in the U-type tank. And the instantaneous velocities and vortices at several amplitudes have been acquired. By analyzing the circulation and trajectory of vortices with varied phases, the influences of beds geometric characteristic on the flow closed to the beds have been carried out. All of these indicate that the wavy beds geometric profiles determine the characteristic of vortex field and the vortex trajectory and the net sediment transport. The conclusions are significant to study the mechanism of sediment transport over wavy beds such as sand waves, ripples and dune for the coastal environment.

Keywords Oscillatory flow, Wavy beds, Circulation, Vortex trajectory

1 引言

波状底床是一种十分常见的海床形式,比如,沙纹、沙波、沙坝等等,在海水动力作用下处于不稳定状态,每年以十几米的速率迁移,特别是在近岸海域,极端波况又使得波状底床时而消失时而产生. 海底底床不稳定不仅对海底管线的安全带来威胁,而且海底泥沙输移还会造成海滩侵蚀、海岸带变迁以及污染物扩散等环境问题[1～3]. 近年来随着海洋环境问题的日益突出,波状底床上流场特性对近海工程与环境的影响越来越成为诸多学者关注的问题之一.

振荡流是海底床面附近的典型流动特征,它是非定常的、空间结构复杂的流动. 研究振荡流作用下波状底床上的流场特征,分析底床上旋涡的产生、对

基金项目 中国海洋石油总公司与中国科学院"十五"科技合作项目、中国科学院知识创新工程重大项目(KJCX2-SW-L03-04-HB02)资助.
作者简介 林 缅,女,博士,副研究员,从事海洋环境与海洋工程力学方面的研究. E-mail: linmian@imech.ac.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

流、扩散等一系列复杂过程是探讨海底沉积物迁移机理之关键. 近年来国内外的实验研究大多是在振荡流水槽中进行,流场测量采用激光多普勒测速仪(LDA)或者粒子图像测速仪(PIV))[4~7]. 前者是单点瞬时测量,后者则是对全流场实施瞬时测量. 两者均以对流场无扰动而受到人们的推崇. 实验水槽中铺设的底床有两种:动床和定床. 动床也称自成形底床,即泥沙在振荡水流作用下自然形成的波状底床[8,9]. 由于在这种底床床面附近悬移质泥沙的存在,不论是 LDA 还是 PIV 都无法准确得到床面流场信息. 定床是用某种固体材料人工制作而成[10,11]. 已有研究结果表明,动床和定床的床面剪应力相差很小[12,13],特别是在雷诺数 $Re < 10^5$ 的情况下. 因此对于研究底床形状对泥沙输移的影响,讨论定床上流场特征是恰当的. 目前相关研究均是讨论对称底床,而非对称波状底床还没有人涉及. 实际上许多情况下海底沙波沙纹是以非对称形式出现,因此本文就三种典型的底床形状进行研究. 为了获得不同时段流场的瞬时信息,我们采用 PIV 进行测量. 下面将分别介绍实验装置和实验结果,并讨论振荡流下不同形状波状底床的流场特性.

2　实验装置

本实验在中国科学院力学研究所的 U 形水槽中完成. U 型水槽由 U 形管本体和驱动装置两部分组成,它具有小巧灵活、经济、可调的特点,可模拟振荡流场,振荡频率 ω 固定($\omega = 2.4/s$),振幅 a 在 50～200mm 可调. 水槽的本体为方形柱体,横截面为 $0.2 \times 0.2m^2$. 本体总长 2.12m,高 1.5m,实验段为 $0.6 \times 0.2 \times 0.21m^3$,这里有效高度为 0.2m,剩余 0.01m 是专为铺设各种底床而设置. 驱动装置包括蝶阀、送气管道、风机和调节阀门等. 该水槽没有自由面效应,适合开展底床附近流场特性研究.

实验所用底床由聚苯乙烯泡沫材料加工制成. 该材料具有易加工成型、不易变形等优点. 我们采取对称和非对称两类底床形状. 为确保测得流场不受两端边界影响,实验段至少要保证有 6 个波长的波纹,本项研究对称底床波长 λ 取为 5cm,非对称底床波长 λ 取 10cm. 考虑到波状底床边界层厚度大约为波纹高度的 3～4 倍[14],为保证流场稳定我们取波纹高 η 为 1cm. 为考察不同陡峭度对流场的影响,我们又把非对称底床分成了两部分,其中一部分两种底床形状一样,另一部分则采用了不同的形式. 三种底床的波高、波长分别满足以下关系式(单位,cm):

(1) 对称底床(SC):选取接近于振荡流下自成形对称沙纹[15].

$$\eta(x) = 0.32 + 0.35 \sum_{i=1}^{5} \frac{\cos(0.4\pi i x)}{2^{i-1}} \quad 0 \le x \le 5,$$

(2) 余弦型非对称底床(ASC):由两部分组成,分割比例为 2∶1.

$$\eta(x) = \begin{cases} \sin(\frac{3\pi}{40}x) & 0 \le x \le 20/3 \\ \cos[\frac{\pi}{20}(3x - 20)] & 20/3 \le x \le 10 \end{cases}$$

(3) 指数型非对称底床(ASE):也是由两部分组成,分割比例为 2∶1.

$$\eta(x) = \begin{cases} \sin(\frac{3\pi}{40}x) & 0 \le x \le 20/3 \\ \frac{1}{1 - e^{-5/3}} e^{-(3x-20)/6} - \frac{e^{-5/3}}{1 - e^{-5/3}} & 20/3 \le x \le 10 \end{cases}$$

实验采用的 PIV 测试系统由四部分组成:光源为一双脉冲 YAG 激光器,能量范围 50～200mJ,频率为 10Hz;跨帧式数码相机,1K×1K,256 灰度等级,最小帧跨时间 1μs,相机捕捉范围约为 12cm×10cm,足以测得一个波长的边界层内流场分布;同步控制器,控制激光发生器与数字相机同步工作,实现精确时间延时控制,达到 10 幅/s;图像采集分析系统,采用互相关算法处理原始图像,计算网格为 2.5mm×2.5mm. 实验所采用的示踪粒子为球形空心玻璃微珠,直径 1～5μm,密度 $1.02g/mm^3$,在水中具有良好的反光性和跟随性.

3　实验结果

波状底床所引起的泥沙运动与水平底床不同. 波状底床背水面的漩涡结构决定泥沙输移率,而漩涡的存在与否和加载振幅密切相关. 实验结果表明,当 $Re(= a^2\omega/\nu) < 10^5$ 时(式中 ν 为水的运动黏性系数,a 为振荡幅值,ω 为振荡频率),定床可以替代动床. 由 Ourmieres 和 Chaplin[11] 实验结果可知,当泰勒数 $Ta(= a\eta\sqrt{Re}/2\lambda^2) > 0.7$ 时,波状底床波峰处会发生流分离和涡脱落. 为保证实验能够反映不同类型动床上漩涡结构特征,我们设计了 12 组实验,底床特征依照 KC 数($KC = a/\lambda$)分为三类:大波纹($KC < 0.5$)、中波纹($0.5 < KC < 1.0$)和短波纹($KC > 1.0$). 由表 1 的实验参数可知,所有实验的 Re 数和泰勒数 Ta 都满足要求.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 实验参数

Table 1 Experiment parameters

实验序号	a(cm)	Re	Ta	KC	底床特征
1	3.5	3.0×10^3	3.83	0.7	SC,中波纹
2	4.5	4.9×10^3	6.3	0.9	SC,中波纹
3	6.0	8.7×10^3	11.19	1.2	SC,短波纹
4	8.5	1.7×10^4	22.16	1.7	SC,短波纹
5	5.0	6.0×10^3	1.94	0.5	ASC,大波纹
6	7.0	1.2×10^4	3.83	0.7	ASC,中波纹
7	9.5	2.2×10^4	7.04	0.95	ASC,中波纹
8	11.5	3.2×10^4	10.28	1.15	ASC,短波纹
9	5.0	6.0×10^3	1.94	0.5	ASE,大波纹
10	7.0	1.2×10^4	3.83	0.7	ASE,中波纹
11	9.5	2.2×10^4	7.04	0.95	ASE,中波纹
12	11.5	3.2×10^4	10.28	1.15	ASE,短波纹

首先我们考察实验段流场稳定与否.图1给出了对称底床(SC)分别在波峰和波谷处的垂向速度分布.为便于比较每一种底床选取了6个时刻,ωt = 0°,55°,152°,180°,235°,335°,很明显前三个时刻和后三个时刻正好相差180°.从图1中可以看出,对称底床上垂向速度分布基本上是对称的.当 $y>3\eta$ 后,垂向速度基本上不随 x 变化.可见波状底床的影响厚度仅在 $3\eta\sim4\eta$ 范围之内,能够满足实验段主流场稳定的条件.

图2、图3分别给出了由PIV得到的涡量场,显示了一个周期内三种底床上漩涡的生成、运动、发展及湮灭过程.可以看出,在对称底床上(图2),前半周期当水流绕过波峰时在背水侧脱落出一个明显的涡结构(涡旋转方向为顺时针,定义为负涡).随着时间的推移,这一漩涡经历着增大、减少、反向,直至慢慢消散的过程.同样后半周期,在波纹另一侧又形成逆时针旋转的涡(定义为正涡),其运动发展过程与前半个周期类似.我们注意到,在一个周期内涡强度大小变化和外加流场不同步,总是滞后于外加流场.Musalem[9]在实验中也曾观测到这一现象.

比较两种非对称底床上涡量场(图3).很明显,在前半周期沿着底床迎水面"搓"出了一负涡层,而

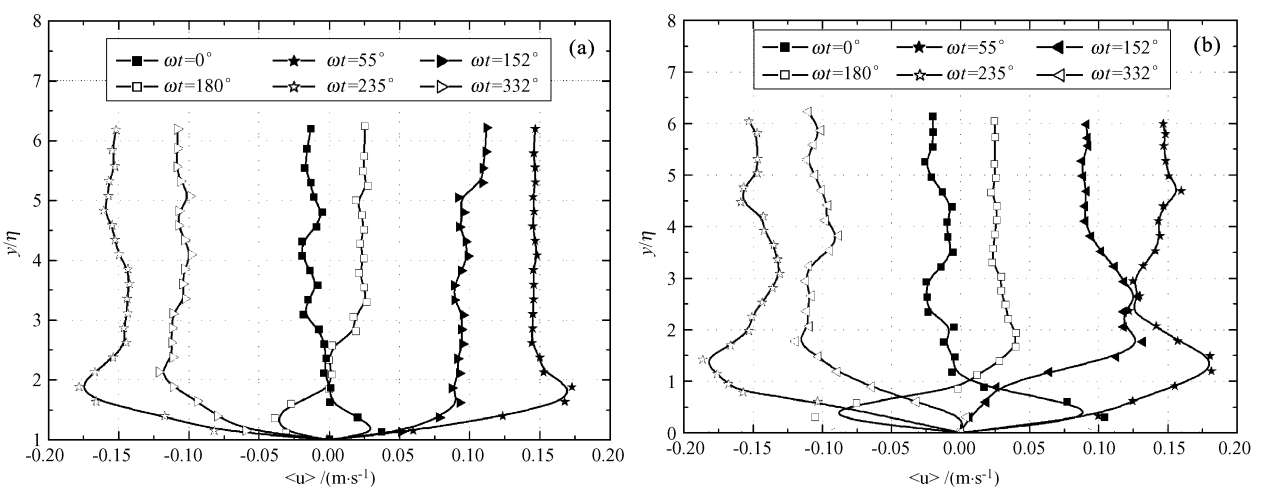


图1 SC底床速度分布

(a)波峰;(b)波谷.(纵坐标为无量纲)

Fig. 1 The measurements of velocity profiles at the two sections for SC BED

(a) Crest; (b) Trough.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在底床背水侧都有明显的负涡脱落. 虽然这两种底床的迎水面形状完全相同,但涡层出现的时间、强度及其结构都不一样. 这说明不能把波峰处的漩涡分离看成是随时间单调变化的,它影响着整个边界层附近的流场分布. 具体量值后文还会讨论. 对于非对称底床的,我们还需要关心正涡的形成、发展过程,特别是 $\omega t = 360°$ 时,因为此时正涡的强度及扩散趋势决定着向波纹另一侧的输沙能力. 由图 3(g、h)可以看出,与前半周期的负涡比较,这些正涡强度较弱,而且存在时间很短,大约运移1/4周期就已经消散.

从一个周期内涡流场特征来看,对泥沙输移来说最为关注的是两个时刻,即外流场速度接近于零时 $\omega t = 180°$ 和 $\omega t = 360°$,此时床面附近的负涡或正涡,由于惯性关系转动着离开底床面进入较高流层,并在下个时刻被带到底床另一侧. 这些正负涡的强度和移动轨迹直接关系到泥沙输移的多少. 因此我们将应用涡动力学,分析讨论不同形状底床上涡强度以及涡运动轨迹随时间的变化规律.

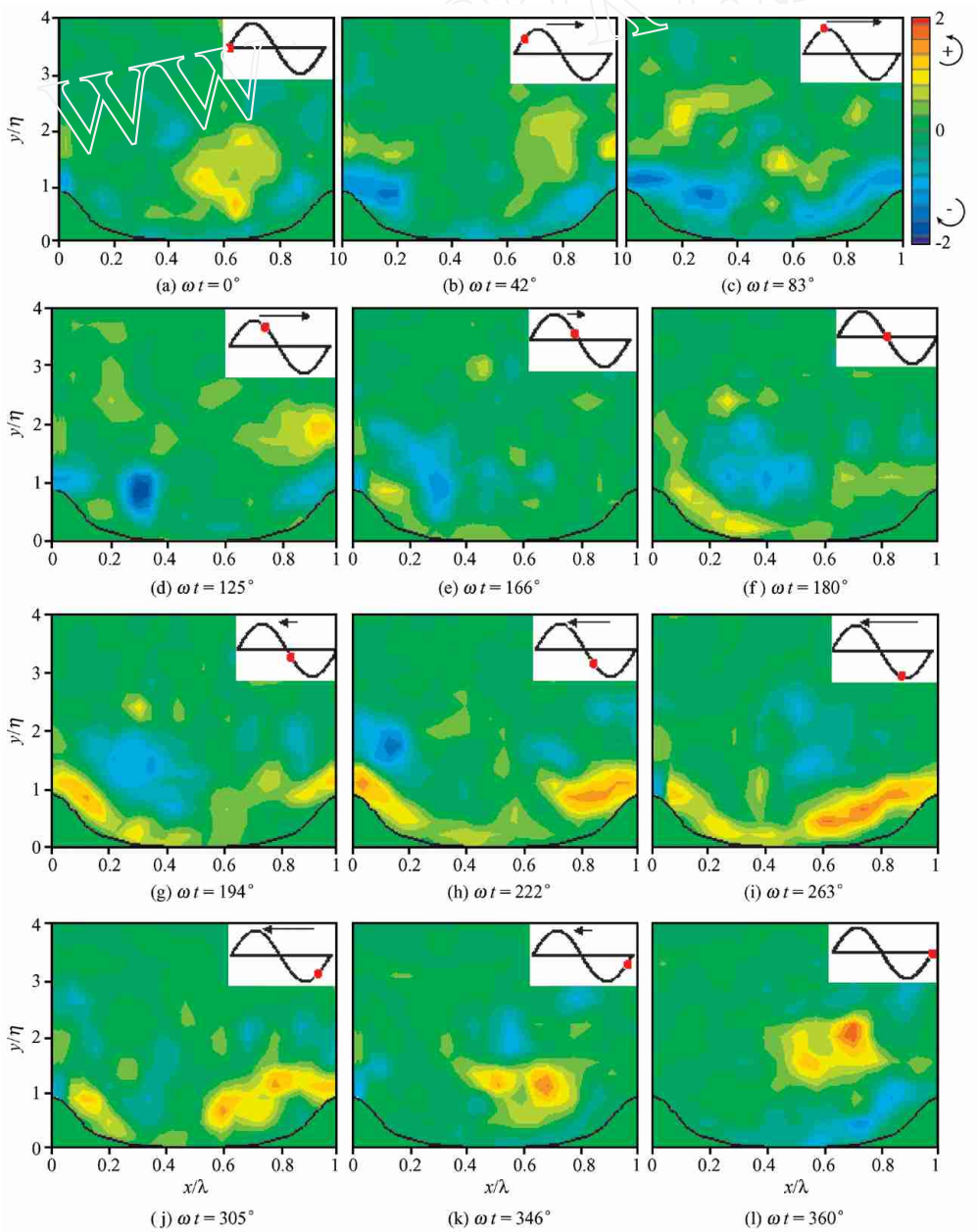
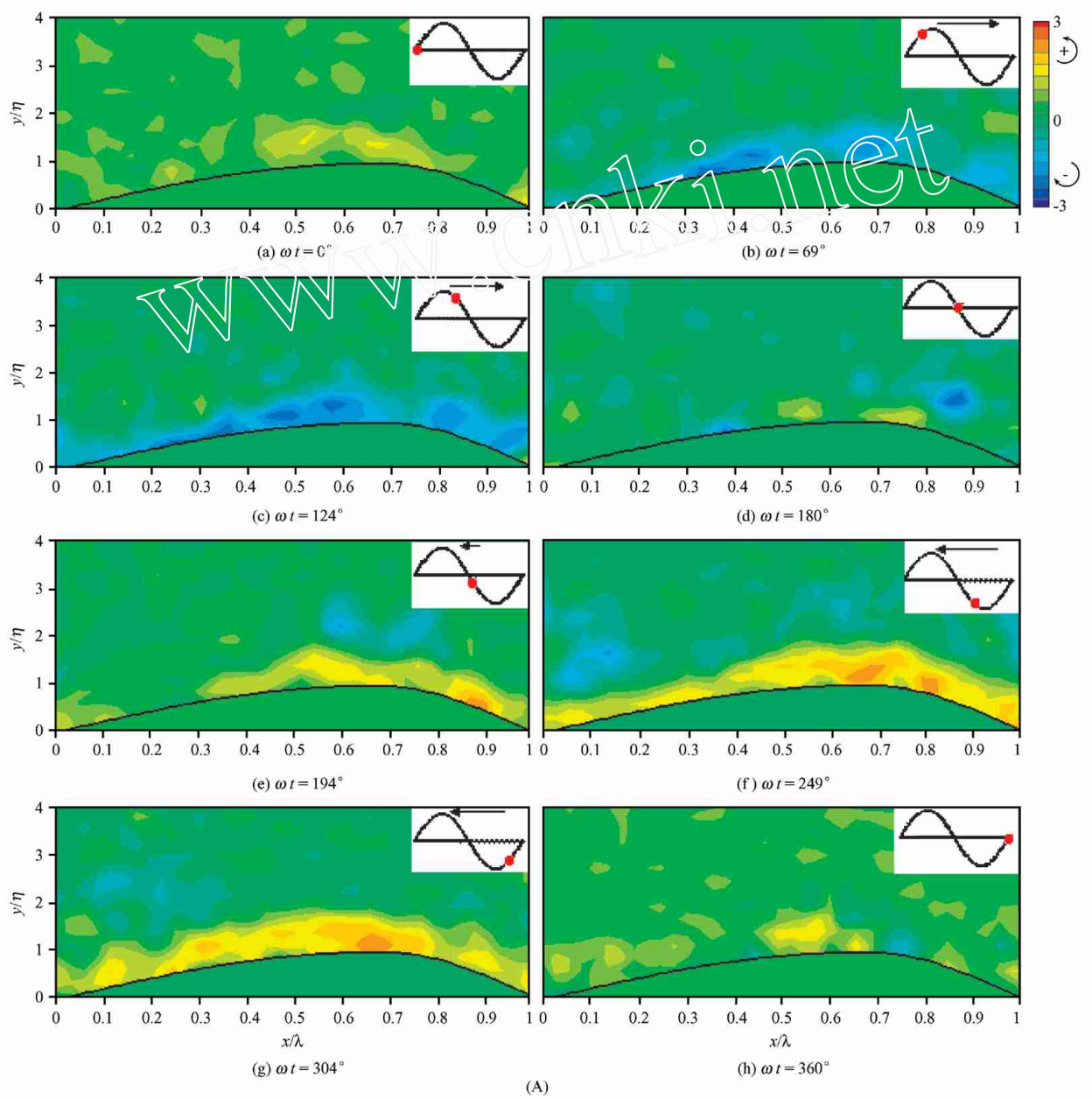


图 2　SC 底床上涡量场

Fig. 2　A sequence of vorticity fields for SC BED

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

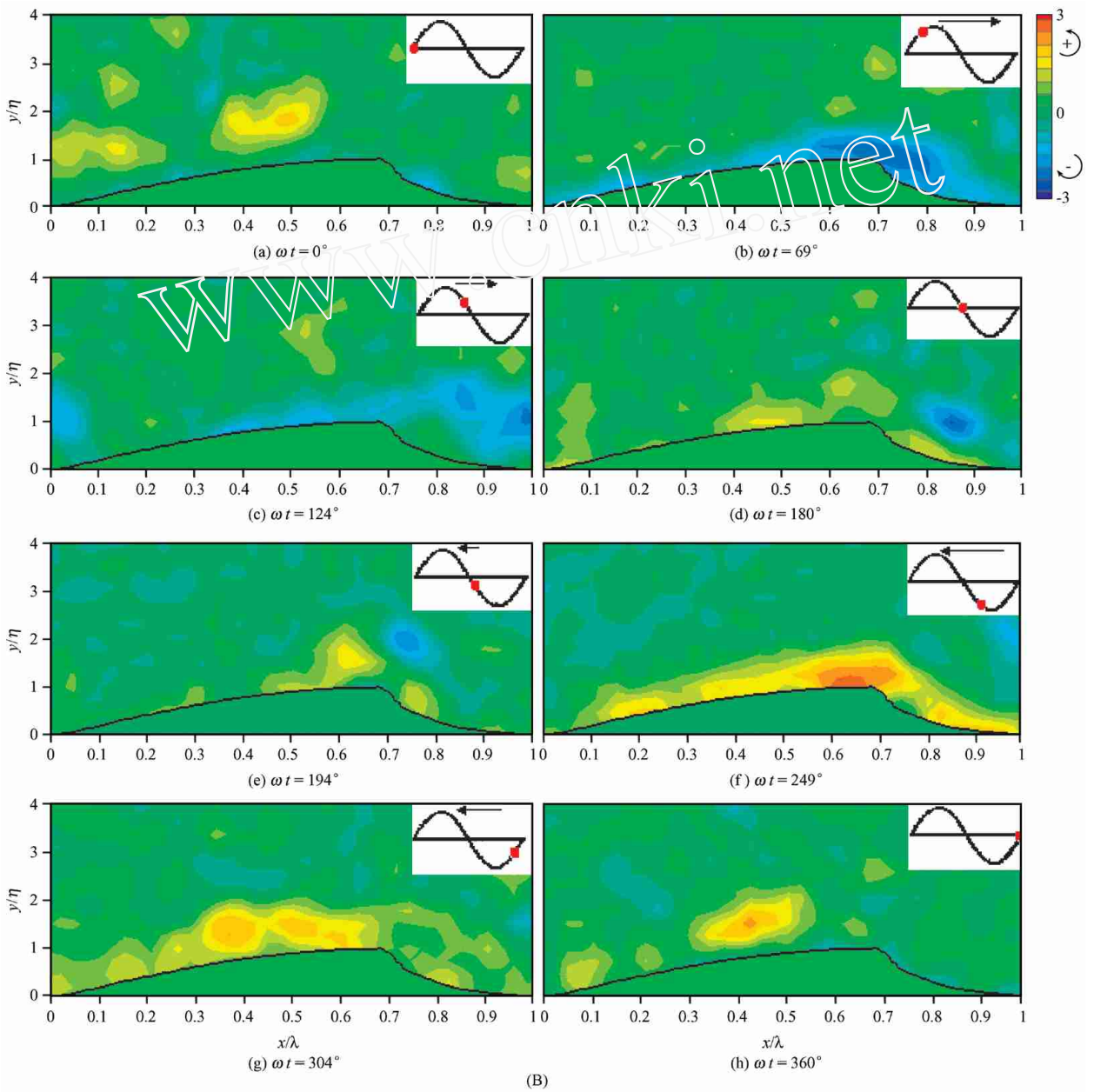


图 3　ASC 底床上涡量场(A)和 ASE 底床上涡量场(B)

Fig. 3　A sequence of vorticity fields for ASC BED(A) and ASE BED(B)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 分析与讨论

首先定义涡结构的边界:跟踪流场中某时刻的涡结构,由测量结果确定该涡结构的最大涡量,应用涡量等值线图截取最大涡量10%的等值线为该涡结构边界.那么根据Stokes定理,涡通量可写为

$$\Gamma = \sum_{i=1}^{N} \omega_i A_i ,$$

其中 ω_i 为第 i 点测得的涡量,A_i 为第 i 点计算网格面积.

然后定义涡心位置:为了避免由于涡结构几何不对称或涡量不均匀所带来的偏差,我们采用对几何坐标取涡量权重办法.涡心坐标满足:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^{N} \omega_i A_i x_i}{\sum_{i=1}^{N} \omega_i A_i}$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^{N} \omega_i A_i y_i}{\sum_{i=1}^{N} \omega_i A_i}$$

其中,x_i 和 y_i 分别为第 i 点坐标.注意,我们把坐标原点取在波峰处.

对于对称底床的情况,最关注的是背水侧漩涡的运动发展.由于对称关系,这里只给出了负涡涡强度随时间变化曲线,如图4a所示.特别说明的是,本实验所采用的对称底床和Musalem的动床形状类似.在前半个周期随着外流场速度增加,涡强度也逐渐增大.当 $\omega t = 90°$ 时,外流场速度达到最大,但涡强度此时并没有达到峰值.说明此时在波峰处仍不断有新的涡脱落,而且和前面的涡合并.当 $\omega t = 150°$ 时涡强度达到最大.随后涡强度开始减小,大约在 $\omega t = 270°$ 时,涡强度已消散到最大强度的10%.

还可看出,随着加载振幅的增加,涡强度也随之增加,但到达最大涡强度的时刻却和加载振幅无关.这些定性结果和Musalem的动床实验一致[9].证明低雷诺数下可以用定床代替动床分析流场的理论.

本实验又与Earnshaw和Greated[10]定床实验进行了比较,发现他们实验中最大涡强度出现在相位 $\omega t \approx 90°$ 时刻,与我们实验结果相差比较大.我们认为这是由于他们采用的底床外形由两段圆弧对接而成,与本次实验的底床形状完全不同所致.

为比较底床形状的影响,我们考虑 KC 数相同,既流场紊乱程度相同情况.比较实验序号1,6,10三组实验结果,我们发现(图4b)最大涡强度出现的时刻不同:ASC底床出现在120°,而ASE底床则大致在150°.对非对称底床来说,KC 数相同,还意味着加载振幅相同,可以看出ASE底床的涡强度大于ASC底床.所以我们认在对称底床为涡强度大小取决于加载振幅,而在非对称底床形状则决定着最大涡强度的出现时刻.

下面分别讨论涡心随时间和空间变化规律.一定强度的漩涡卷挟着泥沙在外流场的作用下运动,其涡心轨迹就表征着泥沙输移轨迹.

在对称底床的情况下(图5),涡心坐标 x_c 转向时间随振幅而变(图6a),短波纹在 $\omega t \approx 120°$ 转向,而中波纹转向时间晚于短波纹大约在 $\omega t \approx 180°$;同样涡心坐标 y_c,中波纹的转向时间比短波纹晚了将

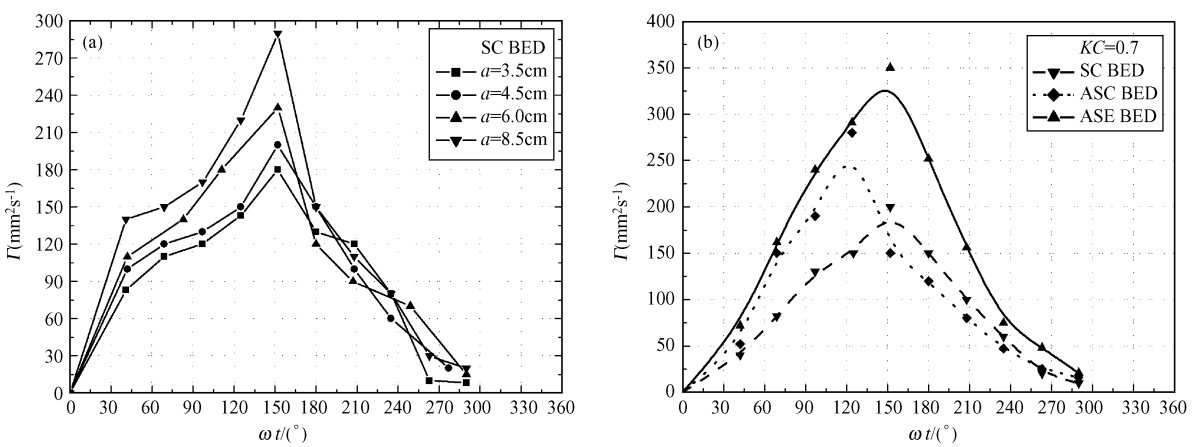


图4 三种底床上涡强度随时间变化曲线

Fig. 4 The vortex circulation as a function of phase for (a) SC BED and (b) three kinds of beds at $KC = 0.7$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

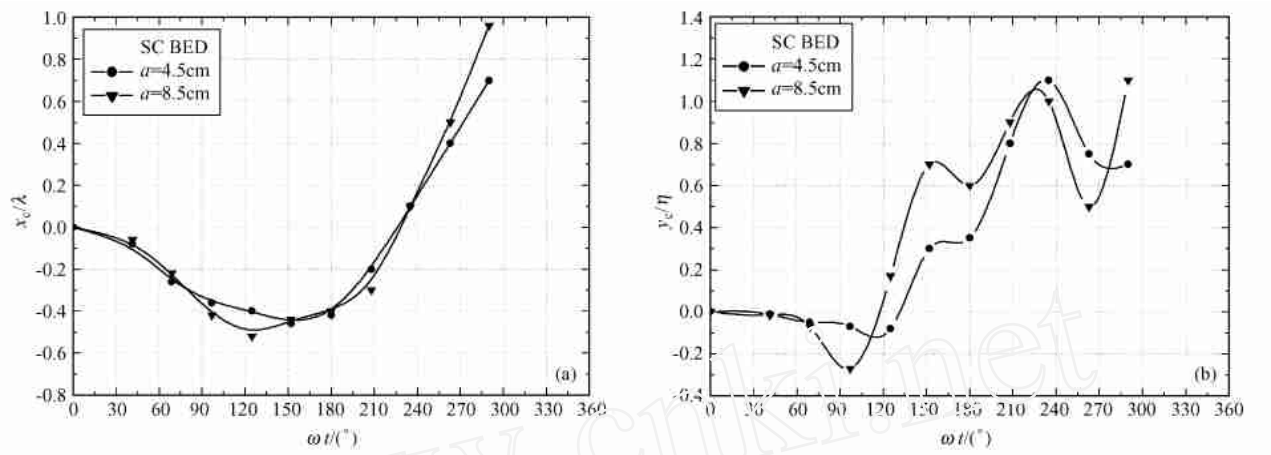


图 5　对称底床形状涡心坐标随时间变化曲线

Fig. 5　Variation of x_c and y_c of vortices with phase for SC BED

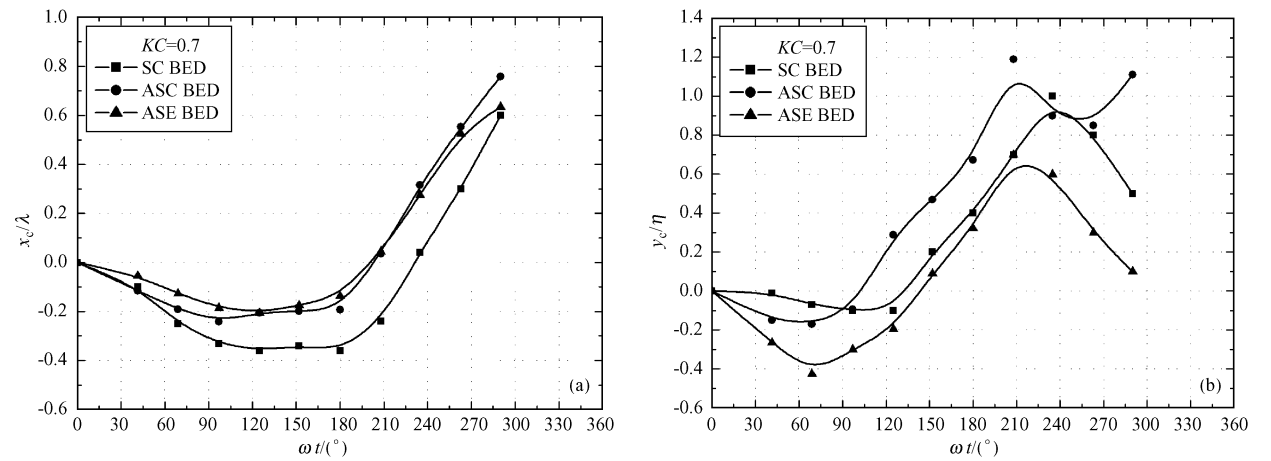


图 6　相同 KC 数不同底床形状涡心坐标随时间变化曲线

Fig. 6　Variation of x_c and y_c of vortices with phase for three beds at same KC number

近π/6,而且短波纹的 y_c 向波谷移动的距离又比中波纹大 0.2η. 也就是短波纹情况下,涡心移动幅度大. 同样我们取 KC 数相同的三组实验数据看底床形状的影响,如图 6 所示. 两种非对称底床涡心移动轨迹的 x 坐标随时间变化趋势差别不大,但涡心移动 y 坐标相差比较大,特别是涡反向之后.

图 7 给出了三种底床的涡心移动轨迹. 涡心所能达到的最大高度大致 2.6η,最终移动距离与加载振幅有关,振幅越大,移动距离越远. 可以看出在非对称底床,相同振幅下 ASC 底床的涡心移动高度和漂移距离都大于 ASE 底床,但这并不表明 ASC 底床的输沙能力强于 ASE 底床,因为输沙能力还取决于涡强度. 我们在图 7 还给出了正涡离开底床面后的移动轨迹,很明显此时泥沙被漩涡卷带着移向底床另一侧. 可以说底床形状决定着涡轨迹,振幅决定着涡心漂移距离.

5　结　论

本文利用 U 型水槽产生均匀振荡流的特点,采用瞬时无干扰粒子图像测速仪(PIV),测量了三种典型底床形状上的涡流场. 通过跟踪特定漩涡结构,比较分析了不同形状底床涡强度和涡轨迹随时间、空间变化规律. 得到以下结论:

(1) 低雷诺数下用定床代替动床分析波状底床附近涡流场是可行的.

(2) 涡强度与底床形状有关. 底床越陡,涡强度越大,最大涡强度出现时间越晚.

(3) 底床形状决定着旋涡分离位置,越平缓底床,旋涡漂移高度越高.

(4) 底床形状非对称引起的两侧漩涡强度不对等是造成泥沙净输移的主要因素.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

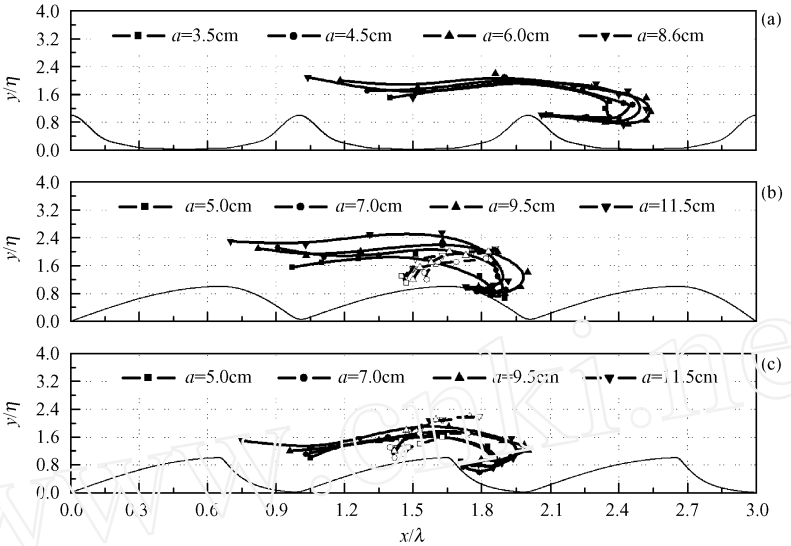


图7 涡心运动轨迹

(a)对称底床SC;(b)余弦型非对称底床ASC;(c)指数型非对称底床ASE.(实线负涡,虚线正涡)

Fig. 7 Trajectories of vortices over the wavy beds

(a) SC BED; (b) ASC BED; (c) ASE BED. (negative vortex by solid line; positive vortex by dash line)

参考文献(References)

[1] 董志华,曹立华,薛荣俊. 台风对北部湾南部海底地形地貌及海底管线的影响. 海洋技术,2004,**23**(2):24～28

Dong Z H, Cao L H, Xue R J. The influence on topography and relief in south gulf Beibu and suspending of pipe caused by typhoon. *Ocean Technology* (*in Chinese*), 2004, **23**(2): 24～28

[2] 吴永胜,王兆印. 渤海动力对黄河入海泥沙输移的影响. 黄渤海海洋,2002,**20**(2):22～30

Wu Y S, Wang Z. Y. Effect of the Bohai Sea dynamics on sediment transport discharged from the Yellow River. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas* (*in Chinese*), 2002, **20**(2): 22～30

[3] 林 缅. 波浪和海底底床的相互作用(2)-底床应力及位移分布. 地球物理学进展,2002,**17**(3):437～444

Lin M. Interaction of water waves and seabed(2)-the distribution of stresses and displacements. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, **17**(3): 437～444

[4] Nakagawa S, Hanratty T J. Particle image velocimetry measurements of flow over a wavy wall. *Physics of Fluids*, 2001, **13**(11): 3504～3507

[5] Hyun B S, Balachandar R, Yu K, et al. Assessment of PIV to measure mean velocity and turbulence in open-channel flow. *Experiments in Fluids*, 2003, **35**: 262～267

[6] 戴光清,王滨蓉,杨 庆. 数字PIV在圆柱振荡流中的应用. 四川大学学报(工程科学版),2001,**32**(6):1～5

Dai G. Q, Wang B R, Yang Q. DPIV measurement of a circular cylinder oscillating in water. *Journal of Sichuan University* (in Chinese), 2001, **32**(6): 1～5

[7] 毛 野,张志军,袁新明等. 沙波附近紊流拟序结构特征初步研究. 河海大学学报(自然科学版),2002,**30**(5):56～61

Mao Y, Zhang Z J, Yuan X M, el al. Characteristics of turbulent coherent structures over sand waves in open channels. *Journal of Hohai University* (Natural Sciences), 2002, **30**(5): 56～61

[8] Ahmed A S M, Sato S. Investigation of bottom boundary layer dynamics of moveable bed by using enhanced PIV technique. *Coastal Engineering Journal*, 2001, **43**(4): 239～258

[9] Musalem R. Particle image velocimetry (PIV) analysis of oscillatory flow field above self-formed vortex ripples [Master thesis]. Illinois: University of Illinois, 2003

[10] Earnshaw H C, Greated C A. Dynamics of ripple bed vortices. *Experiments in Fluids*, 1998, **25**(3): 265～275.

[11] Ourmieres Y, Chaplin J R. Visualizations of the disturbed-laminar wave-induced flow above a rippled bed. *Experiments in Fluids*, 2004, **36**: 908～918

[12] Andersen K H. The dynamics of ripples beneath surface waves and topics in shell models of turbulence [Ph. D. thesis]. Copenhagen: University of Copenhagen, 1999

[13] Blondeaux P. Mechanics of coastal forms. Annual Review Fluid Mechanics, 2001, **33**: 339～370

[14] Nielsen P. Coastal Bottom Boundary Layer Sand Sediment Transport. Singapore: World Scientific, 1992

[15] Pierro T. Numerical Simulations of the Wave Bottom Boundary Layer over Sand Ripples [Master thesis]. Florida: Florida Atlantic University, 2001

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net