

文章编号: 1001-4888(2002)03-0289-07

群沙射流结构的实验研究^{*}

詹杰民¹, 李毓湘²

(1. 中山大学 应用力学与工程系, 广州 510275; 2. 香港理工大学 土木及结构工程系)

摘要: 本文以 90~150 μ m 的标准细沙为研究对象, 利用超声波速度剖面测量仪和数码摄录机进行了垂直入水群沙射流的实验研究, 给出了群沙入水后的运动规律。我们发现, 群沙湍射入水的一霎那, 底部瞬时产生反射波, 由它带动的流速与群沙入水带动的流速同量级。

关键词: 液-固两相流; 射流; 超声波测速

中图分类号: O359 **文献标识码:** A

1 引言

随着经济的不断发展, 越来越多水底结构工程和大规模填海工程发展起来。在这些工程中, 涉及到大量泥沙倾倒入水或被灌入结构物的底座之下的问题, 需要我们正确认识湍急入水群沙的动力特征, 从而正确解决所涉及的问题。而在自然界或工程实际中, 流体-颗粒湍流现象是普遍存在的, 如水中泥沙的运动, 液力输送, 污染物的水中运动等, 这里流动不仅涉及到湍流的规律, 而且涉及到颗粒之间, 或颗粒液体之间的相互作用, 过程非常复杂。因此, 群沙入水流动结构的研究具有重要理论和实际意义。群沙入水的实验研究, 可以追溯到 Nakatsuji 等 (1990), Bihler & Papantoniou (1991) 和 Li (1997) 的工作。Nakatsuji 等发现: 如果颗粒团的初始容积相对较大, 而颗粒尺度相对较小, 颗粒团的动态可以比拟为热运动; 颗粒团的容积相对较小, 且颗粒的沉淀速度相对较大, 则颗粒将独立地运动, 且该运动主要由作用于每个颗粒的重力、拖曳力和浮力之间的平衡所控制。

即使是单相流动的问题研究, 当速度较高时, 也是难度较高前沿课题。而涉及液体-颗粒两相流动的研究则难度更高, 因为不仅液相流动本身的状态非常复杂, 而且当颗粒浓度增大时, 颗粒与颗粒之间的相互碰撞, 颗粒与液体之间的动量交换也不能忽视。例如, 詹^[1]在研究挟带细沙运动的方腔环流发现, 当方腔内沙的浓度较稀时 (10^{-4}), 颗粒相主要起了阻尼减速作

* 收稿日期: 2002-01-16; 修订日期: 2002-08-29

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 19802023), 广东省自然科学基金博士启动基金 (No. 984140)

作者简介: 詹杰民 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流体力学研究。

用,随着浓度增大,“热浮力效应”起了重要的作用,出现了两相流的方腔多胞环流现象.目前,在国际上,在研究液固两相流的时候,对于固相的处理,通常利用轨迹法(Trajectory)和双流体(Two-fluid)公式,而对于液相(连续相),则可利用 $k-\epsilon$ 模式,大涡模拟模式,直接数值模拟方法或离散的涡模式来求解(C. T. Crowe等, 1996).

2 实验装置和测量内容

2.1 玻璃容器

该容器是高 1米、长 0.4米、宽 0.4米的玻璃透明容器(图 1).清水被预先注入容器中,细沙从水面高速注入水中.为了方便观察,容器贴上了网格纸,每个网格尺寸为 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$.

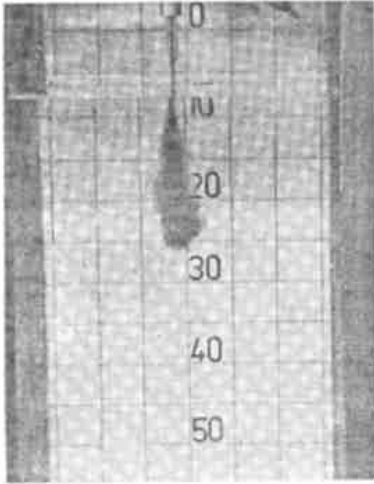


图 1 群沙射流实验



图 2 超声波速度剖面测量仪

2.2 超声波速度剖面测量仪

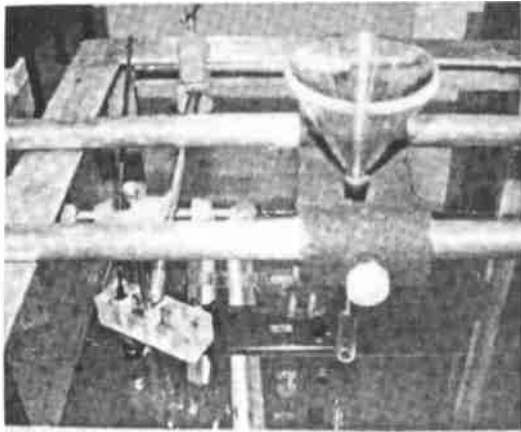
在实验中,如图 2是我们采用的超声波速度剖面测量仪,它主要由超声波传感器和计算机软硬件系统组成.利用超声波传感器(图 3)发射短超声波,当超声波接触到小颗粒时,其能量分散并反射回来,如果颗粒运动且沿超声波束的速度分量非零,将产生反射频率的多普勒频移,而被接受的信号变为多普勒频移信号.因此,超声波速度剖面测量仪工作原理与激光多普勒测速仪的工作原理相同.该测量仪在本实验中用于测量流点速度.它可以测量从超声波传感器到固体反射面之间 128个等距点的速度.可以得到速度剖面,也可以得到每个点的速度随时间的变化规律.

2.3 数码摄录机

该 Sony型号的摄录机每秒可成像 25幅,可以将群沙湍急的入水过程与入水后经过混合后沙云的沉降过程清晰地反映出来.得到的图片经过数码图形捕捉卡转录到计算机后,可以直接被处理成动画或电影剪辑.

2.4 微机与数码图形捕捉卡

利用奔腾 586微机与 Sony DV BK-100 数码图形捕捉卡(DV Still Image Capture Board DV BK-1000).将由数码摄录机得到的实验结果转录到计算机里,以便分析和使用.



a). 垂直速度分量测量



b). 水平速度分量测量

图 3 传感器的布置

2.5 其他装置

包括固定摄录机的三脚架,提高摄录质量的射灯,注沙用的玻璃管和漏斗等.

2.6 测量内容

通过数码摄录机直观显示群沙入水后的规律,研究沙云的宏观运动规律;通过超声波速度剖面测量仪测量不同垂直断面(图 3a)和水平断面(图 3b)的微观运动规律,揭示群沙射流的两相流动结构特征.

3 实验结果与讨论

3.1 沙云的宏观运动规律

用数码摄录机研究沙云的宏观运动规律在文 [2] 中作了讨论,这里,为了便于与用超声波速度剖面测量仪得到的细观结果比较,我们简述主要的规律:利用长玻璃管(37cm)使得沙群垂直下落加速(入水前速度约为 273cm/s),这一速度相对水中的颗粒自由沉降速度(约 10cm/s),是相当大的速度.在沙粒入水初期,其形态呈射流状态,颗粒在自由落体过程中所获得的能量是射流的主要能量来源,在距离水面的 5cm 的范围内,有明显的射流段.但很快,颗粒的动能被液体的阻力消耗掉,颗粒呈蘑菇状的形态以接近均匀的速度沉降(图 1,图 4).但由射流产生的向上卷曲的运动使得在运动过程中获得横向的动力,加上单位体积内流体含量变化形成的“热效应”所引起的浮力变化,沙云在运动过程中呈膨胀的趋势(图 5).这里的“热效应”,与温度变化引起密度变化而产生的自然流动的现象在机理有相似之处,因此,称之为“热效应”.图 4和图 5所显示的沙云的宏观运动规律,是通过对数码摄录机拍摄的相片进行分析后得到.

然而,在细观结构上,沙云的运动规律难以用精度有限的数码摄录机显示出来,需要采用下列超声波测速方法.

3.2 群沙射流所引起的流动结构

除了采用带有长度为 12.5cm 玻璃管的漏斗代替长度为 37cm 玻璃管外,在用超声波测速方法研究群沙射流所引起的流动结构时,其他装置相同.利用数码摄录机,我们也记录了实验

过程(如图1),沙云的运动规律与文[2]得到的结果相同,除了图1,4,5涉及的是数码摄录机进行的实验工作,其余都是用超声波测速进行的工作.在进行垂直速度分量的测量时(图3a),传感器分别布置在距射孔的距离2.75cm, 5cm, 7.5cm, 10cm, 12.5cm和15cm处;在进行水平速度分量的测量时(图3b),传感器分别布置在距水面1.5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 35cm, 40cm, 50cm, 60cm和70cm处.

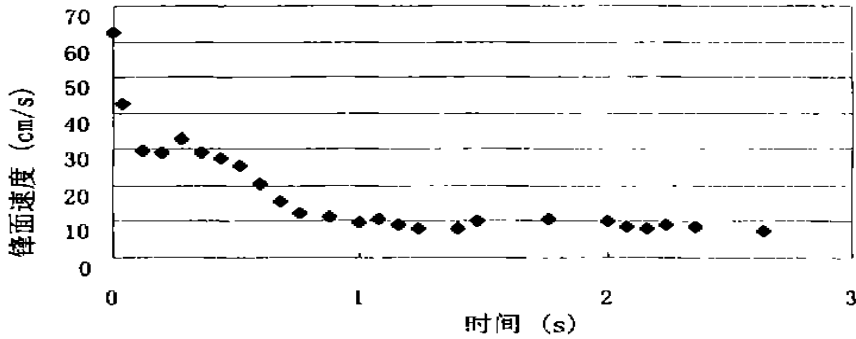


图4 颗粒团沉降时的锋面速度

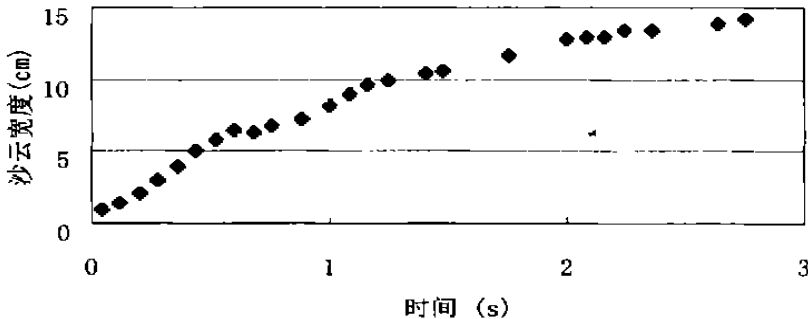


图5 沙云沉降时的宽度变化

在垂直速度分量的测量时,我们发现,群沙入水一霎那,容器的底部,就产生了反射波(如图6).在图6中,当速度为正时,表示颗粒(或流体)向下运动离开超声波传感器,速度为负时表示向上运动.反射波垂直向上传播,当群沙下降与反射波相遇时,反射波可以穿过沙云(如图7).观察速度剖面的变化规律和每个点(共128个通道)的速度随时间的变化规律,我们发现,除了群沙入水初期,群沙保持较高的湍射流速度外,反射波所引起的流动速度与沙云的量级相若(如图7).当群沙瞬时入射水面时,相当于给水体一个局部瞬时冲量(即瞬时压力).按帕斯卡原理,这个压力将瞬时传遍整个流场,由于水的不可压缩性质和玻璃容器四壁面的约束,在水平方向,无法形成反射波,所有水平分量的测量结果都证实这一点.而在垂直方向,由于存在自由表面,在所有垂直分量的测量结果,都发现了瞬时压力在底面的瞬时反射现象.

从整个超声波测速的结果可以看出,湍急入水群沙的运动是复杂的过程,当颗粒速度较大时,固相将带动液相运动,固相和液相得运动变得复杂,沙云整体向下运动,随着群沙速度的减弱,中心部分的流体由于其体积分数的减少形成了“热效应”,产生了类似于“热浮力现象”的向上运动,从而可能产生蘑菇状向内卷曲的运动.我们进行的测量证实了这一点.在垂直速

度分量的测量过程中,发现了在沙云整体向下运动同时,水是向上运动的,但由于颗粒的遮挡,水的向上运动现象不如反射波现象明显.而在水平速度分量的测量过程中,发现整体而言,水平流动分量是向外的(如图 8),但当群沙速度的减弱后,“热效应”的作用使得流体反向运动向内卷曲(如图 9).从而验证 Nakatsuji 等的结论.但我们认为,值得在理论研究中将有关结论加以借鉴和引用,因为结论的数学表达形式远比许多强非线性形式的颗粒与液体之间的相互作用关系简单.

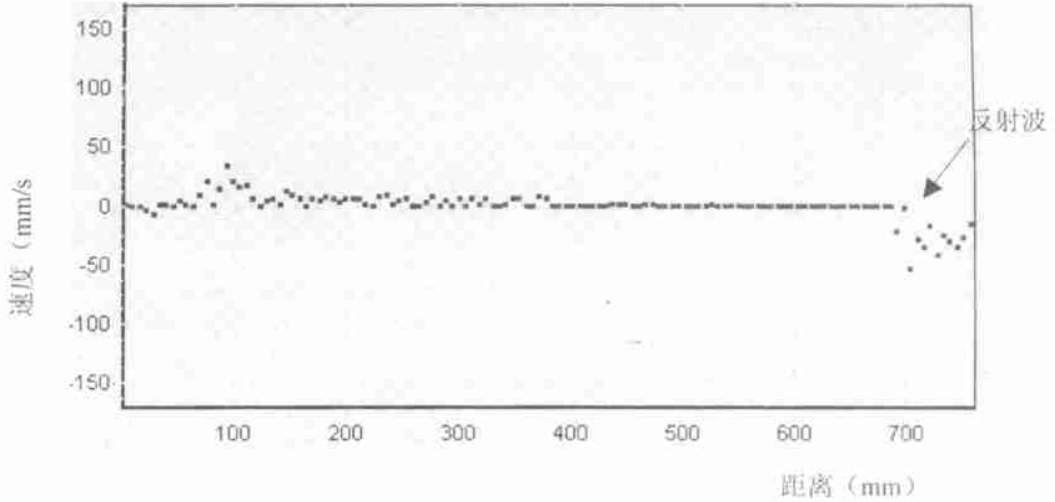


图 6 群沙入水时距射孔 2.75cm 处的垂直速度分量

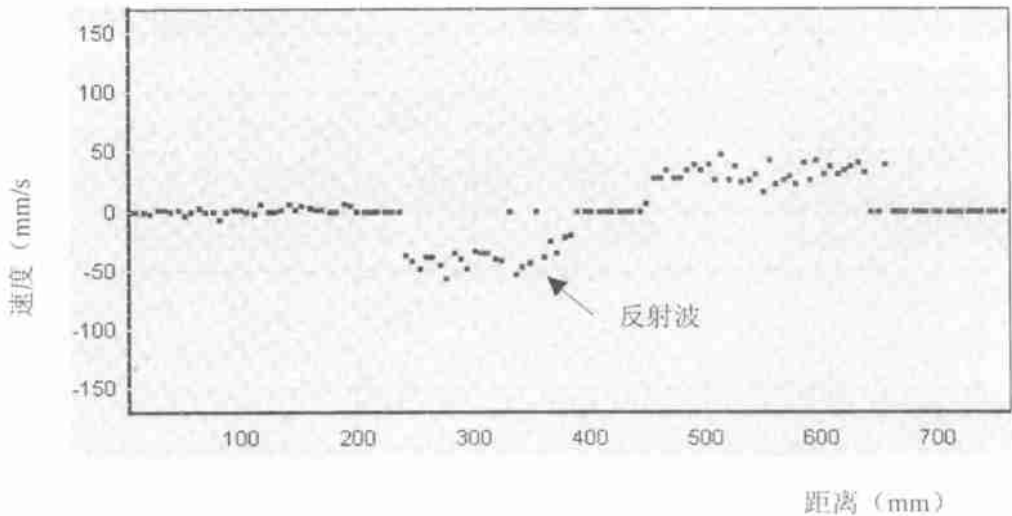


图 7 反射波穿越沙云 (距射孔 7.5cm 处的垂直速度分量)

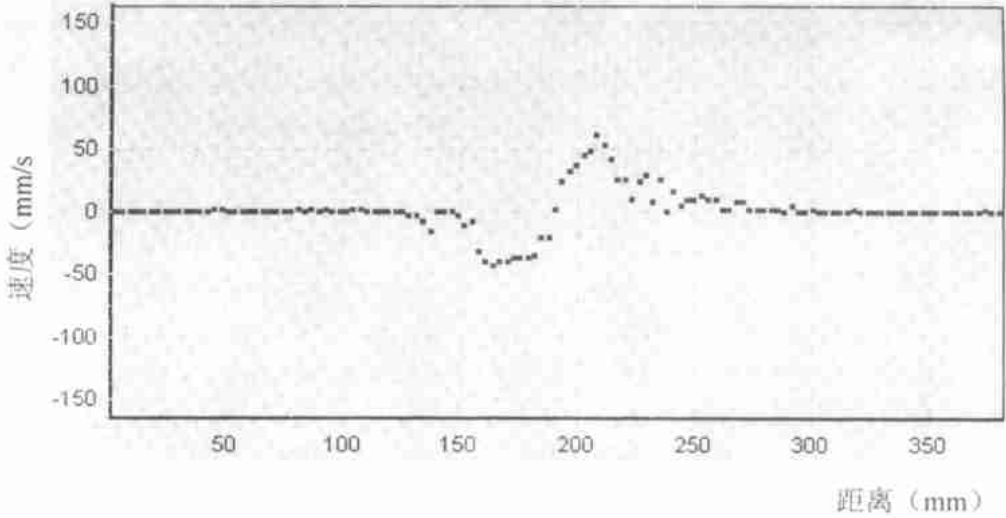


图 8 距水面 35cm 处的水平速度分量——群沙带动的向外卷曲运动

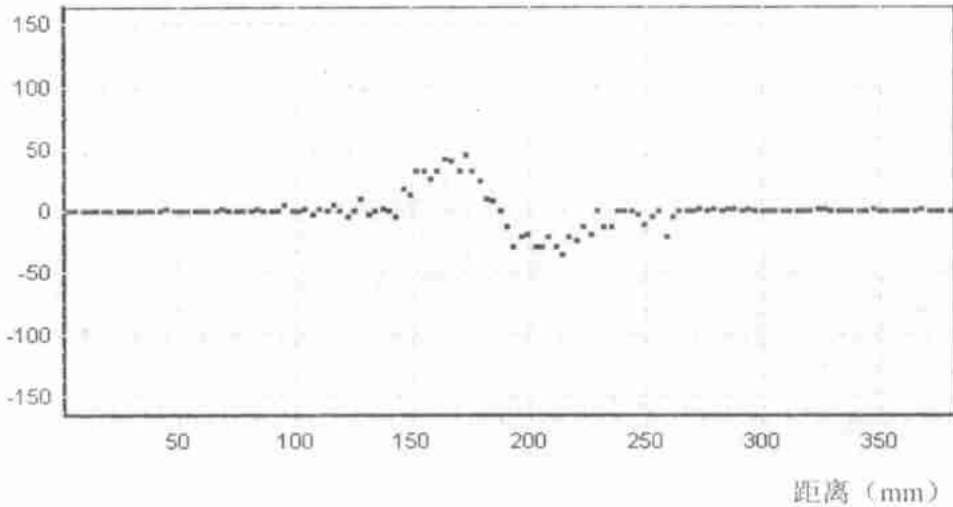


图 9 距水面 35cm 处的水平速度分量——“热效应”产生的向内卷曲运动

4 结论

采用超声波速度剖面测量仪,我们发现,群沙湍射入水的一霎那,底部瞬时产生反射波,由它带动的流速与群沙入水带动的流速同量级.本文的实验还证实,“热效应”的作用可以产生蘑菇状向内卷曲的运动.

参考文献:

- [1] 詹杰民. 挟带细沙运动的方腔环流 [C]. 第六届全国流体力学会议论文集, 上海, 2001, 286-289.

- [2] 詹杰民,李毓湘. 湍急入水群沙的动态研究 [J]. 机械开发, 2000, 4: 1- 2.
- [3] 詹杰民,吴春亮,孙明光. 直接数值模拟液体颗粒两相流的关键——颗粒的准确追踪 [C]. 应用力学研究与实践,刘仁怀主编,暨南大学出版社, 2000, 77- 82.
- [4] Nakatsuji K, Tamai M, Murota A. Dynamics behaviours of sand clouds in water [C]. Int. Conf. on Phys., Modelling of transport and dispersion, M. I. T. Boston, 1990, C. 1- C. 6.
- [5] Bihler J, Papantoniou D A. Swarms of coarse particle falling through a fluid [C]. Proc. of the Int. Sym. On Environmental Hydraulics, Hong Kong, 1991, 147- 152.
- [6] Li C W. Convection of particle thermals [J]. Journal of Hydraulic Research, 1997, 15(3): 363- 376.
- [7] Crowe C T, Troutt T R, Chung J N. Numerical models for two-phase turbulent flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1996, 28: 1- 43.

An Experimental Investigation on the Two-Phase Flow Structure of Sand Jets

ZHAN Jie-min¹, LI Yu-xiang²

(1. Dept. of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. Dept. of Civil & Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, HK, China)

Abstract In this paper, the motion of sand jets acting into stagnant water is experimentally investigated. The size of the sand used is 90~ 150 μ m. By using a digital video camera and Ultrasonic Velocity Profile (UVP) measurement, the patterns of the sand cloud after discharge are obtained. The reflective wave from the bottom can also be observed by using UVP transducer.

Key words fluid-solid two phase flow; jet; ultrasonic velocity profile measurement