

垂直螺旋管道内单颗粒悬浮运动的试验

张志雁 牧振伟 杨力行

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要 采用高速摄影方法拍摄记录垂直矩形螺旋管道内单颗粒的悬浮运动, 采用捕捉试验中颗粒运动轨迹的方法, 获得其运动参数, 并分析颗粒受力的规律。试验结果表明: 旋转水流的角速度对颗粒运动有较大的影响, 颗粒在运动过程中主要是受有效重力、阻力和旋转科氏力的作用; 在一定条件下, 颗粒所受的旋转科氏力与离心力满足抛物线的关系, 旋转科氏力比离心力大 2~3 个数量级; 在小尺度低速度旋转流中, 颗粒所受的旋转科氏力所占比例较大, 在受力分析中不应被忽略。

关键词 螺旋管道; 旋转流; 单颗粒; 旋转科氏力; 离心力

中图分类号: TV142 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2011)04-0056-04

Experimental study on suspended motion of a single particle in vertical spiral duct // ZHANG Zhi-yan, MU Zhen-wei, YANG Li-xing (College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract : The suspended motion of a single particle in a vertical spiral duct was recorded by means of the high-speed camera. The motion parameters of the particle were obtained by capturing its motion loci, and the forces acting upon it were analyzed. The results indicate that the angular velocity of rotational flows has great influence on the motion of the single particle. The whole motion of the is mainly affected by the effective gravity, drag and rotational Coriolis force. Under some conditions, there is a parabolic relation between the rotational Coriolis force and centrifugal force upon the particle, and the former is 2 to 3 orders of magnitude larger than the latter. Under small-scale rotational flows with low velocity, the proportion of the rotational Coriolis force upon the suspended particle is large, and thus, the rotational Coriolis force should not be ignored in analyzing the forces acting upon the particle.

Key words : spiral duct; rotational flow; single particle; rotational Coriolis force; centrifugal force

在旋转参照系中做直线运动的研究对象, 由于惯性的作用, 在运动过程中力图保持自己原有的速率和方向, 具有沿着原有运动方向继续运动的趋势。但由于参照系本身是旋转的, 在经历了一段时间的运动之后, 研究对象的位置会有所变化, 而其原有运动趋势的方向如果以旋转参照系的视角去观察就会发生一定程度的偏转。研究对象的直线运动偏离原有方向的倾向被归结为一个外加力的作用, 该力为科里奥利力, 1835 年通过研究确认^[1], 后人将其命名为科里奥利力, 简称科氏力。其数学表达式为

$$F_{CO} = -2m\omega \times v_R \quad (1)$$

式中: F_{CO} 为旋转科氏力; m 为研究对象的质量; ω 为旋转参考系的角速度; v_R 为研究对象与旋转参考系的相对速度。

科氏力可以分为地转科氏力和旋转科氏力。因

旋转物体上质点存在相对运动而产生的旋转惯性力称为旋转科氏力^[2], 如旋转固体上的科氏力称为旋转科氏力, 旋转地球上的科氏力称为地转科氏力。

地转科氏力对大尺度的河流、湖泊、海湾等水域水流的影响已是公认的事实^[3-5], 而在小尺度旋转流体运动过程中地转科氏力一般忽略不计^[6]。高速旋转的旋流分离器因其旋转科氏力远远小于离心力而被忽略^[7-8], 文献[9]中在对颗粒进行受力分析时只考虑离心力的作用。关于小尺度低速度旋转流如排沙漏斗、排沙涡管中泥沙颗粒所受旋转科氏力的研究尚不多见^[10-13]。

笔者通过球形单颗粒在垂直矩形螺旋管道内做悬浮运动的试验, 采用捕捉试验中颗粒运动轨迹的方法研究颗粒的受力作用, 探求颗粒在小尺度旋转水流中所受旋转科氏力与离心力、有效重力、阻力等

1 试验装置与材料

1.1 试验装置

试验模型装置(图1)的进流量可由进口阀门和出口阀门协调控制。模型装置有溢流和回流装置,整个试验装置为自循环系统,即:由水泵将回水箱的水抽送到具有恒定水位的水箱中,经进水管进入垂直放置的螺旋管道装置,再回流到回水箱构成循环恒定水流。试验单颗粒从颗粒导入管进入管道。

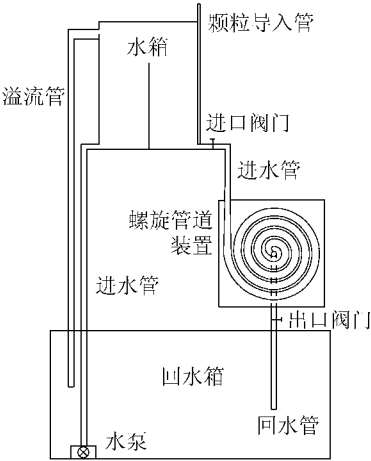


图1 试验模型装置

矩形螺旋管道模型几何参数如下:有机玻璃管道截面尺寸为30 mm×17 mm,螺旋管道由长210 mm的垂直进口管和管轴半径为185 mm的1/4圆结构以及管轴半径分别为165 mm,145 mm,125 mm,105 mm,85 mm,65 mm,45 mm等不同半径的半圆结构组成。

1.2 试验材料

试验颗粒选用塑料小圆球,粒径 $d_p=5.8\text{ mm}$,密度 $\rho=1.235\text{ g/cm}^3$ 。所用的仪器有:电子天平、小桶、秒表、高速摄像机等。

2 试验方法与工况

试验采用称重法测量水流流量。采用高速照相机捕获单颗粒运动轨迹。通过高速摄影技术对颗粒的运动轨迹进行拍摄,选取满足条件的一系列图像,从光学成像理论出发,对记录图像的可辨性及失真程度进行分析,进而通过对单颗粒在旋转水流中的运动距离、运动方位及运动时间等参数的测量,计算得单颗粒的速度、角速度等参数。以单颗粒所在管轴半径上的圆心作为基准点,计算并确定单颗粒中心的坐标位置。

根据单颗粒在垂直矩形螺旋管道内做悬浮运动作为来流条件,共分3组试验工况(表1)进行试验。

表1 试验工况

组次	流量 $Q/(cm^3 \cdot s^{-1})$	水流速度 $v_f/(cm \cdot s^{-1})$
1	61.925	12.142
2	72.674	14.250
3	77.480	15.192

3 试验现象

进流流量对颗粒运动情况有较大的影响:在 $54.723 \sim 81.412\text{ cm}^3/\text{s}$ 流量范围内,颗粒能够在管道内做悬浮运动;当减小进流流量时,由于主要受到有效重力的作用,管道内颗粒不再悬浮,而是停留在管道底部;当增大进流流量时,管道水流流速增大,挟带颗粒顺管道流出。

在螺旋管道内顺着水流上升方向单颗粒在不同管轴半径内做悬浮旋转运动,其运动方向均为逆时针方向。颗粒悬浮运动的轨迹为似椭圆形,如图2所示。不同时刻似椭圆形轨迹不同,随着颗粒所在管轴半径的减小其运动轨迹在管道内的位置有所上升,见图3。由此说明在相同流量下旋转水流的角速度对单颗粒有较大的影响。

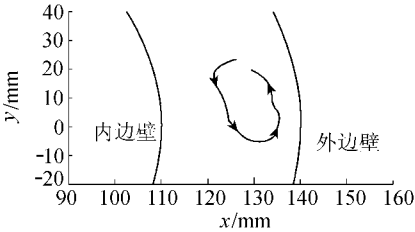


图2 颗粒运动轨迹

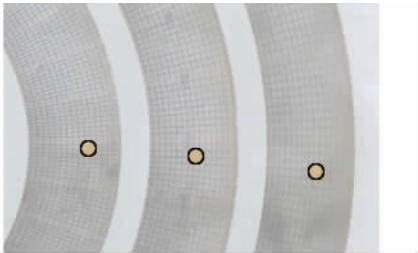


图3 不同管轴半径下颗粒的位置

4 试验结果与分析

颗粒受力分析是固液两相流中固体颗粒运动研究的核心问题。固体颗粒在螺旋管道中的运动比较复杂,但其运动方程可直接从牛顿第二定律得出:

$$m_p \frac{du_p^i}{dt} = \sum F_p^i \quad (2)$$

式中: $m_p \frac{du_p^i}{dt}$ 为惯性力分量; $\sum F_p^i$ 为包括单颗粒所受的有效重力 F_{EF} 、阻力 F_R 、离心力 F_{CE} 、旋转科氏力 F_{CO} 、虚假质量力 F_{VM} 、Basset力、Magnus升力、Saffman力等各力分量,各力计算方法见文献[12]

(不考虑颗粒在水流中的自转作用时,压力梯度力、Basset 力、Magnus 升力和 Saffman 升力等可以忽略不计^[14])。

为便于理论研究分析,规定速度、力等矢量变量径向以背离圆心为正方向,切向以顺水流方向为正方向,并引入 3 个无量纲量:距离无量纲量 η 、速度无量纲量 λ 、力无量纲量 ζ ,各量表达式如下:

$$\eta = \frac{r - R}{b} + 0.5 \tag{3}$$

$$\lambda = \frac{v_P^r}{v_F} \tag{4}$$

$$\zeta = \frac{F_{CO}}{F_{CE}} \tag{5}$$

式中: r 为颗粒中心到管道圆心的距离; R 为颗粒所在的管轴半径; b 为矩形管道断面的长; v_P^r 为颗粒速度的切向分量; v_F 为水流的平均速度。

4.1 单组受力分析

选取第 1 组管轴半径 $R = 125\text{ mm}$ 处颗粒所受离心力和旋转科氏力进行分析,结果见图 4。由图 4 可见,颗粒在管道内运动过程中受到的离心力很小,其均值为 $0.399\text{ }\mu\text{N}$,这是因为颗粒悬浮运动的速度较小。随着 η 的增大,颗粒所受到的旋转科氏力逐渐变小,即颗粒与水流的相对速度逐渐变小,但旋转科氏力均为负值。这是因为在悬浮旋转运动过程中颗粒的速度始终小于水流的速度,颗粒受到的旋转科氏力均值为 $-30.623\text{ }\mu\text{N}$,颗粒受到的旋转科氏力比离心力大 2 个数量级,因此在小尺度旋转流中,颗粒所受旋转科氏力不应当忽略不计。

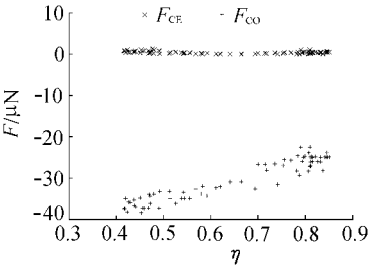


图 4 F_{CE} 、 F_{CO} 随 η 的变化

图 5 为颗粒在不同时刻所受的各径向分量力。由图 5 可见,在管道内悬浮运动中,颗粒所受旋转科氏力径向分量 F_{CO}^e 的量值比离心力、阻力径向分量 F_R^e 及虚假质量力径向分量 F_{VM}^e 都大 1~2 个数量级。有效重力径向分量 F_{EF}^e 因颗粒所在位置的不同而发生不同的变化:①当颗粒在水平位置(即 $y = 0\text{ mm}$)时,受到有效重力的径向分量为零。②当颗粒在水平位置下方时,受到有效重力径向分量为正;反之为负。③当颗粒处于较高的位置时,所受的有效重力径向分量与旋转科氏力在同一数量级。阻力的径向

分量较小,一般小于 $5\text{ }\mu\text{N}$ 。

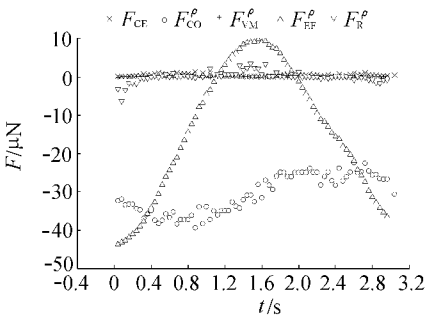


图 5 颗粒所受径向力随时间的变化

图 6 为颗粒在不同时刻所受各个力的大小。由图 6 可见,颗粒受到的有效重力为 $242.100\text{ }\mu\text{N}$,比其他各力都大,约为阻力的 2 倍、旋转科氏力的 8 倍,因此有效重力是支配颗粒运动的主要动力,阻力在颗粒运动过程中有较大幅度的变化,其量值范围为 $56.597\sim 174.029\text{ }\mu\text{N}$,主要是受到颗粒速度变化的影响。阻力在径向分量很小,因其量值较大,因而在切向分量较大,是颗粒运动的另一主要动力,相对于阻力,旋转科氏力变化幅度较小,但和阻力在同一量级,约占阻力的 $1/3$,而离心力和虚假质量力几乎为零。

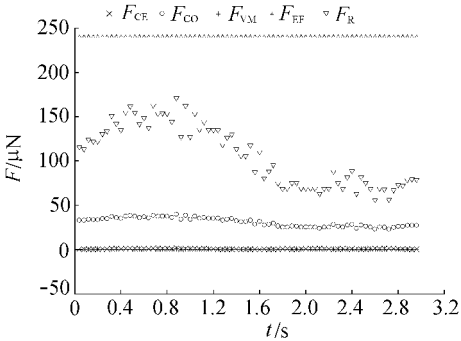


图 6 颗粒受力随时间的变化

4.2 颗粒受力分析

通过 3 组工况的试验,共采集了 16 组数据,通过对各组数据的处理,得到不同流量、不同管轴半径下的 $F_{CO} \sim F_{CE}$ 关系曲线,见图 7。由图 7 可见,在确定的流量和管轴半径下,通过回归拟合可以得到 F_{CO} 与 F_{CE} 满足抛物线的关系:在同一流量下,随着管轴半径的增大,抛物线对称轴逐渐右移,其开口有所减小;在同一管轴半径下,随着流量的增大,抛物线对称轴逐渐左移,其开口有所增大。这是因为在同一流量下管轴半径越小,水流的旋转角速度越大,在相同的相对速度情况下颗粒在大管轴半径位置下受到的旋转科氏力就越小,即抛物线位置左移。而在同一管轴半径下,随着流量的增大,水流的旋转角速度越小,在相同的相对速度情况下颗粒在大流量下受到的旋转科氏力就越大,即抛物线位置左移。

$F_{CO} \sim F_{CE}$ 关系曲线呈现抛物线的特点与颗粒

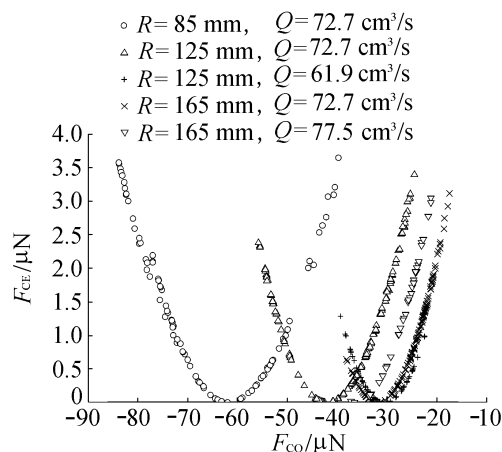


图7 $F_{CO} \sim F_{CE}$ 的关系

在管道内做悬浮旋转运动有密切的关系,在同一流量与管轴半径下,当切向速度相同(即颗粒的离心力相同)时,由于颗粒存在上升与下降的过程,颗粒与水流的相对速度差别较大。因此,存在2个不同量值的旋转科氏力,当颗粒上升时其与水流相对速度较小,位于抛物线的右侧;反之,当颗粒下降时其与水流相对速度较大,位于抛物线的左侧。

图8为无量纲量 λ 与 ζ 之间的关系。由图8可见,当 λ 的绝对值小于1.1时,随着 λ 的增大, ζ 急剧变大;当 λ 的绝对值大于1.1时,随着 λ 的增大, ζ 增大的速率较小。颗粒在管道内做悬浮运动的过程中,当运动到最高点和最低点的附近时,其切向速度变得很小,甚至为零。因此,其受到的离心力很小,而颗粒的相对速度为水流速度,即颗粒受到旋转科氏力并不为零,此时,旋转科氏力与离心力的比值 ζ 为无穷大。绝大多数情况下,颗粒所受的旋转科氏力比离心力大2~3个数量级。

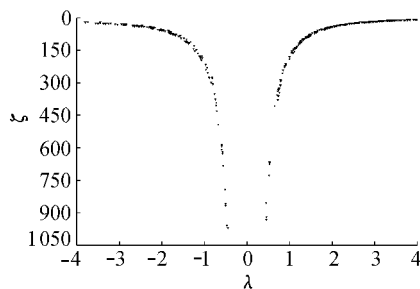


图8 λ 与 ζ 的关系

5 结 语

采用高速摄影方法拍摄记录垂直矩形管道内单颗粒的悬浮运动,捕捉试验中颗粒的运动轨迹,获得其运动参数,并分析颗粒的受力规律,得到以下结论:①颗粒在运动过程中主要受有效重力、阻力的作用,而在径向分量上主要受到旋转科氏力和有效重

力的作用。②在一定条件下,颗粒所受的旋转科氏力与离心力满足抛物线的关系。颗粒所受的旋转科氏力比离心力大2~3个数量级。③颗粒所受的旋转科氏力所占比例较大,约占阻力的1/3。在小尺度低速度旋转流中研究颗粒受力时,颗粒所受旋转科氏力不应被忽略。以上结论将为排沙漏斗、排沙涡管等小尺度旋转流内的泥沙运动研究提供一条新的思路。另外,试验仅对颗粒所受的阻力、有效重力、离心力、旋转科氏力及虚假质量力进行分析,对于没有考虑的压力梯度力、Basset力、Magnus升力等力对颗粒运动的影响作用,尚需进一步探讨。

参考文献:

- [1] PERSSON A O. The coriolis effect :four centuries of conflict between common sense and mathematics [J]. History of Meteorology 2005(2) :1-24.
- [2] 特里顿 D J. 物理流体力学[M]. 董务民,张志新,李汝庆,译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] 李国英. 黄河河势演变中科氏力的作用[J]. 水利学报, 2007, 38(12) :1409-1413.
- [4] 岳前进, 张希, 季顺迎. 辽东湾海冰漂移的动力要素分析[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(4) :24-39.
- [5] 高钰涯. 尼亚加拉河流及瀑布演化浅析[J]. 水资源保护, 2008, 24(6) :80-84.
- [6] WELLS M G. How Coriolis forces can limit the spatial extent of sediment deposition of a large-scale turbidity current [J]. Sedimentary Geology, 2009, 218 :1-5.
- [7] 张力. 旋转气固多相流分离的数值分析及试验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [8] 徐自力, 李辛毅, PARK J P, 等. 科氏力对高速旋转汽轮机叶片动态特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(9) :894-897.
- [9] 林建忠. 流-固两相流拟序涡流及稳定性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [10] 杨力行, 侯杰, 沈晓阳. 科氏力与水流涡旋成因初探 [C] // 侯杰, 周著. 第九届全国泥沙信息网学术研讨会论文集. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000 :136-137.
- [11] PAN Ying-kang, TANAKA T, TSUJIA Y. Direct numerical simulation of particle-laden rotating turbulent channel flow [J]. Physics of Fluids, 2001, 13(8) :2320-2337.
- [12] 张志雁, 牧振伟, 苏枋, 等. 垂直螺旋管道内球形单颗粒受旋转科氏力分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(11) :135-137.
- [13] 汪艺义, 苏枋, 胡景龙, 等. 小尺度旋转两相流中泥沙科氏力的作用[J]. 人民黄河, 2010, 32(6) :40-41.
- [14] 车得福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

(收稿日期 2010-12-24 编辑: 方宇彤)