

# 水平轴圆形边界旋流中固粒的运动分析\*

孙西欢 彭龙生  
(西安理工大学) (太原理工大学)

**摘 要** 根据运动学观点,对具有水平轴旋流中固粒运动轨迹进行分析,依据模型试验探讨圆形边界旋流中固粒运动轨迹参数,结果表明:在具有水平轴圆形边界旋流中,固粒运动轨迹圆不仅取决于固粒沉速与旋转水流角速度的比值,而且取决于圆形边界半径的大小。

**关键词** 旋流 固粒 运动轨迹

含沙水流属于液固二相体,农田灌溉中的含沙水流管道输送及抽水泵站压力管道的含沙水流输送,往往因泥沙沉积而影响正常工作。传统的液固二相体管道输送是靠提高轴向流速、增大流体紊动强度来实现的。其固相浓度分布的特点是上稀下浓,在固相颗粒较粗或其浓度较大情况下,会在管道底部出现推移质层或层移运动,因而减小了输送效率,增大了输送能耗<sup>[1,2]</sup>。管道螺旋流输送是一种全新的液固二相体输送方式,其输送不仅具有轴向流速,而且具有沿管道边壁的周向流动,从而使管道底部的推移质或层移质在周向流速作用下,转变为悬移质,减小了输送阻力,提高了输送效率。但这一新的输送方式尚缺乏深入的理论研究,尤其是在周向水流作用下固粒由管底上升为悬移质及其运动轨迹方面尚无前人研究。本文根据运动学观点对固体颗粒在具有水平轴纯旋流中的定常运动轨迹进行分析,并通过试验观察对其加以讨论。

## 1 水平轴旋流中固粒运动轨迹的理论分析

设具有水平轴的旋转水流为定常运动,并采用图1所示坐标进行分析,水平轴过O点并垂直于xoy平面,旋转流场中水流质点均具有相同的角速度 $\theta$ 。

由图1可知,直角坐标与极坐标的关系为

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$$

在点(x, y)水流质点的速度为

$$u = -r\dot{\theta} \sin \theta, v = r\dot{\theta} \cos \theta$$

其中, u, v 分别为 x, y 方向的分速度。

为了分析上的方便,我们仅考虑单颗固相颗粒在水平轴旋流场中的运动。考虑固粒受水流粘滞力等的作用,可以认为固粒受水流拖曳而与水水质点具有相同的运动速度;但在具有水平轴的旋转流场中,由于固粒密度较水重,所以在有效重力作用下产生沉降运动,其沉速为 $\omega$ 方向恒为y轴的负向。因此由固粒运动的速度合成可知其运动速度为:

$$u_d = -r\dot{\theta} \sin \theta, v_d = r\dot{\theta} \cos \theta - \omega$$

其中,  $u_d, v_d$  分别为颗粒在 x, y 方向的分速度。上式整理后得:  $u_d = -y\dot{\theta}, v_d = x\dot{\theta} - \omega$

根据迹线方程<sup>[3]</sup>,固粒运动可表示为  $\frac{dx}{-y\dot{\theta}} = \frac{dy}{x\dot{\theta} - \omega}$

整理得:  $d(y^2/2) + d[x^2/2 - (\omega x/\dot{\theta})] = 0$

上式中令  $\omega/\dot{\theta} = A$ , 并积分, 得

$$(x - A)^2 + y^2 = C + A^2 \quad (1)$$

式中 C——固粒在旋流场中与运动初始状态有关的积分常数。

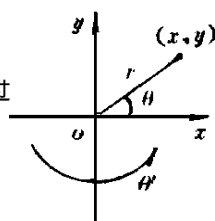


图1 水平轴旋流坐标示意图

收稿日期: 1998-06-15 1999-04-08 修订

\* 山西省教委科研专项基金及山西省自然科学基金资助项目(971038)

孙西欢, 副教授, 西安理工大学博士生, 太原市迎泽西大街79号 太原理工大学水利工程系, 030024

式(1)是具有水平轴定常旋转流场中固粒的运动轨迹方程,表明固粒的运动轨迹是以 $(A, 0)$ 为圆心,  $(C+A^2)^{1/2}$ 为半径的圆,  $A$ 、 $C$ 为固粒运动轨迹的重要参数。

## 2 水平轴圆形边界旋流中固粒运动轨迹的试验模型

为了探讨在具有水平轴圆形边界旋流场中固粒运动轨迹圆是否存在,建立了试验模型。试验模型是用3.0 m长、直径为10 cm的有机玻璃管段,两端用有机玻璃板封闭加工而成,管段内充满水而构成液相,预放1颗球形石英砂(直径0.895 mm)构成固相。将管段安装于旋转台上,并使管段的轴线与旋转轴保持在水平面的同一直线上,用调速电机带动管段转动则形成有界旋转流场。由模型试验观察得知:

1) 当管段转动速度较小时,沉积在管底的石英球,有随管壁转动而上升的趋势,上升高度随转动角速度 $\theta$ 的增大而增大。这说明在角速度较小时,有界流体转动所引起的上升速度 $v$ 很小,不足以克服沉速 $\omega$ 因而固粒不能悬浮于流体中运动。

2) 当管段转动角速度增加到一定程度(大于35 r/min)时,固粒在旋转流场中的运动轨迹呈一圆形,且轨迹圆与管壁边界相切于 $x$ 轴上。图2为一组测试结果。随着旋转角速度的继续增加,轨迹圆的半径不断增大,且与管壁边界仍相切于 $x$ 轴上(图2中 $R$ 点处),这说明随着旋转角速度的增加,式(1)中的 $A$ 值在减小。

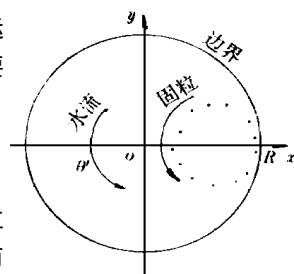


图2 固粒在具有水平轴圆形边界旋流中的运动轨迹  
( $\theta = 50$  r/min)

## 3 水平轴圆形边界旋流中固粒运动参数的分析

由模型试验知,当水流达到某一旋转速度后,在水平轴有界旋流中的固粒运动轨迹仍为圆,因此分析有界旋流条件下的参数 $A$ 、 $C$ ,对有界旋流中固粒悬浮状态研究具有重要意义。

$A$ 值的大小决定着固粒轨迹圆的圆心位置。由式(1)的推导可知,参数 $A = \omega/\theta$ ,为固粒的沉速与旋转水流的角速度之比。 $\omega$ 反映了固粒有效重力作用下的运动效应,而 $\theta$ 反映了水流的旋转运动特性,由此可见,参数 $A$ 的物理意义为在具有水平轴旋流中固粒有效重力作用下的沉降运动与水流旋转运动的相对比值。

设固粒运动轨迹圆半径为 $R'$ ,则由式(1)可知

$$R' = \sqrt{C + A^2} \quad (2)$$

由此可见, $A$ 、 $C$ 值对轨迹圆的半径大小均有影响,由模型试验知,固粒轨迹圆总是在 $x$ 轴上与管壁相切。设旋转流场的边界半径为 $R$ ,因固粒运动轨迹的圆心为 $(A, 0)$ ,所以,轨迹圆的半径为

$$R' = R - A \quad (3)$$

由式(2)、(3)整理得

$$C = R(R - 2A) \quad (4)$$

上式可知,在具有圆形边界旋流中 $C$ 为 $R$ 和 $A$ 的函数,亦即 $C$ 为 $R$ 和 $\omega/\theta$ 的函数。由式(3)知,固粒运动轨迹圆的半径 $R'$ 是由 $R$ 和 $\omega/\theta$ 所决定的。 $A$ 的值域为 $[0, R]$ ,由式(4)可知, $C$ 的值域为 $[-R^2, R^2]$ 。在几种特殊情况下:(1)若 $\theta$ 很大,此时 $A = 0$ ,则 $C = R^2$ , $R' = R$ 。(2)若固粒沉速 $\omega = R\theta$ ,则固粒将停留在 $x$ 轴上 $R$ 处,不随旋转水流运动, $A = R$ , $C = -R^2$ , $R' = 0$ 。(3)若 $A = R/2$ ,则 $C = 0$ , $R' = R/2$ 。

## 4 结 语

固粒的运动轨迹为一圆,圆心的位置取决于参数 $A$ ,圆的半径取决于参数 $A$ 和 $C$ 。由模型试验证明了在具有水平轴圆形边界旋流中固粒运动轨迹圆的存在。参数 $A$ 和 $C$ 均为固粒沉速与旋转速度比值的函数,且 $C$ 还与圆形边界的半径有关。固粒运动轨迹圆的圆心位置位于水平轴上,并由固粒沉速与旋转水流角速度的比值所确定,其半径则是由圆形边界的半径及固粒沉速与旋转水流角速度的比值确定。

### 参 考 文 献

- 1 费祥俊 浆体与粒状物输送水力学 北京:清华大学出版社 1994 473
- 2 戴继岚 流体力学(上册) 北京大学出版社,1982 312