

## 斜管内颗粒流分层流动特性实验

邓佑鲜<sup>a</sup>,张万松<sup>a</sup>,曹晓阳<sup>b</sup>,贾梦达<sup>b</sup>,严超宇<sup>b</sup>,魏耀东<sup>b</sup>

(中国石油大学(北京) a. 理学院; b. 重质油国家重点实验室,北京 102249)

**摘 要:**在 150 mm×3 400 mm 倾角为 45°的斜管实验装置上,以流化催化裂化催化剂(FCC 催化剂)为固体颗粒物料,采用 PV6 型颗粒速度测量仪测量斜管内颗粒流下行过程中的不同径向位置的速度变化,研究斜管中颗粒流的分层流动特性. 结果表明:随着下行颗粒流量的增大,颗粒流的速度在径向位置分层现象由表面延伸至整个截面,最后分层现象消失;颗粒速度的平均剪切率期望值可以很好的反应这种分层现象的变化.

**关键词:**斜管;颗粒流;分层;剪切率

中图分类号:O351.2

文献标识码:A

文章编号:1005-4642(2015)12-0024-05

斜管内下行颗粒流是管道内气固两相流动一种常见的流动形式. 已有的研究主要有二维倾斜槽的颗粒流动<sup>[1-3]</sup>,这是单层颗粒通过二维倾斜槽的颗粒流,还有垂直管内气固两相颗粒流动<sup>[4-5]</sup>,这是同一截面上相同流动形式的颗粒流. 文献[1-5]阐述了当开口尺寸逐渐增大过程中,颗粒流流动形式的变化规律,但是并未涉及分层流动下的流动特性. 斜管内下行颗粒流不同于二维倾斜槽内下行的颗粒流,斜管内的颗粒流在垂直截面上有多层颗粒,另外斜管内下行的 FCC 催化剂颗粒流是典型的气固两相流,管内下行颗粒流受到重力的作用和斜管管壁约束的影响,在流动方向上的垂直截面上存在着很大的不均匀性,表现为不同的流态共存在一个垂直截面上<sup>[6]</sup>,是一种分层下行的复杂流动.

本文在 150 mm×3 400 mm 倾角为 45°的斜管实验装置上进行实验,以流化催化裂化催化剂(FCC 催化剂)为固体颗粒物料,采用 PV6 型颗粒速度测量仪测量斜管内颗粒流下行过程中不同径向位置处的速度变化,分析斜管中下行颗粒流的分层现象的演变,并用平均剪切率期望值描述这种演变.

### 1 实 验

#### 1.1 实验装置

图 1 为 150 mm×3 400 mm 的倾角为 45°的斜管实验装置示意图,除了料斗和蝶阀部分外整个实验装置材料均为有机玻璃制造. 有机玻璃有较高的光洁度和良好的透明性,表面粗糙度级别为 Ra0.05 μm,有利于对斜管内部的颗粒流动状态进行实验观察. 颗粒物料储存在上方料斗中,实验初始状态关闭蝶阀 1,蝶阀 2 处于常开状态,最后颗粒在斜管上的蝶阀 1 以上堆积. 实验过程中颗粒从料斗沿立管向下流至弯头,再流向斜管,

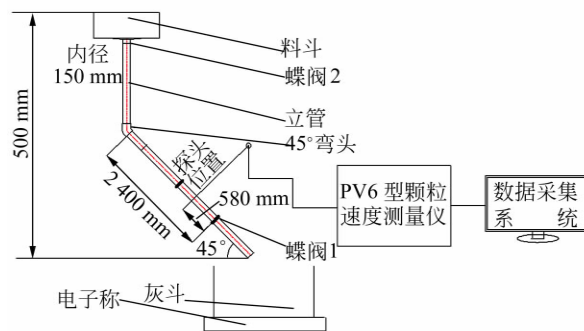


图 1 实验装置示意图

收稿日期:2015-05-28;修改日期:2015-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助(No. 21176250)

作者简介:邓佑鲜(1989-),男,湖南桂阳人,中国石油大学(北京)理学院 2012 级硕士,研究方向为气固两相流和颗粒物质.

通讯作者:严超宇(1977-),男,贵州贵阳人,中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室副教授,博士,主要研究气固两相流领域.

通过蝶阀 1 最后流至灰斗. 斜管中 PV6 型颗粒速度测量仪探头位置在斜管蝶阀上方 580 mm 处, 颗粒速度通过数据采集系统被记录. 实验中的质量流率测量是通过灰斗下方的电子称在测量时间内质量的变化来确定.

### 1.2 实验粉料

实验所用的颗粒物料为炼油催化裂化工艺平衡催化剂(FCC 催化剂), 其具体参量见表 1~2.

表 1 实验用 FCC 平衡催化剂的粒径分布

粒径范围	粒径分布/%
<40 $\mu\text{m}$	14
40~80 $\mu\text{m}$	63
80~105 $\mu\text{m}$	17
>105 $\mu\text{m}$	6

表 2 实验用 FCC 平衡催化剂物性

颗粒密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	堆积密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	充气密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	平均粒径 / $\mu\text{m}$
1 561	941.5	831	67

### 1.3 测量仪器

PV6 型颗粒速度测量仪是气固两相流中测量颗粒速度的常用仪器. PV6 型颗粒速度测量仪采用光导纤维做测量探头, 探头由 2 束 20  $\mu\text{m}$  光导纤维按一定间距排列构成. PV6 型颗粒速度测

量仪的工作原理是先计算 2 个通道信号的互相关函数, 然后通过互相关函数测量颗粒的速度. 即颗粒顺着光纤 2 个通道连线方向运动时, 光纤 2 个通道产生 2 路波形相似并存在延迟的信号  $X(t), Y(t+\tau)$ , 其相关函数  $R_{XY} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t)Y(t+\tau) dt$ . 对 2 路信号分段进行互相关运算, 求出各数据段的延迟时间  $t$ , 即可得出物料的运动速度  $v=L/t$ . 为了测量颗粒瞬时速度, 采样时间设为 13 s, 采样频率设为 5 000 Hz, 分组设为  $512 \times 256$ , 滤波常数位为 500 Hz.

## 2 实验结果

### 2.1 实验现象

当 FCC 催化剂颗粒在蝶阀 1 以上堆积后, 开启蝶阀 1, 固定开度, 观察实验现象. 当开度较小时, 斜管内上表面颗粒下行呈现出走走停停的脉冲式变化, 下层的颗粒基本不动, 颗粒流表现为明显的分层流动, 见图 2(a). 随着颗粒流量的增大, 斜管下层的颗粒也呈走走停停的脉冲式下行, 但脉冲速度比上层小, 此时分层现象延伸至整个径向不同位置, 见图 2(b). 这 2 种情况的颗粒流在下行过程中均伴有“嚓、嚓”的摩擦声音. 当颗粒流量继续增大时, 大量气体上窜, 造成激烈的气固两相返混, 颗粒速度在径向不同位置处都迅速增大, 颗粒流分层流动特性消失, 见图 2(c).

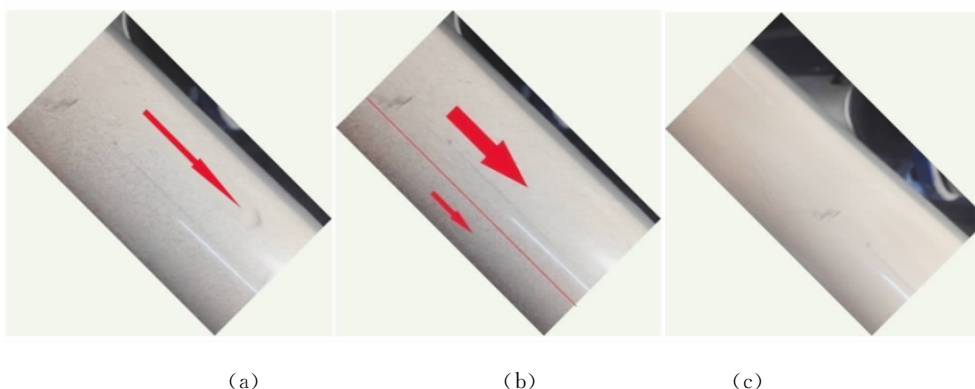


图 2 斜管内颗粒流分层流动特性演变

### 2.2 斜管内颗粒下行的瞬时速度

图 3, 4 和 5 是不同颗粒质量流率下, 用 PV6 型颗粒速度测量仪测量的颗粒瞬时速度经过粗大误差剔除和五点平滑后得到的随时间变化的曲

线. 从图 3, 4 和 5 中可以看出斜管径向不同位置处的颗粒速度均有速度的快慢变化, 不同的是图 3 有速度 0 的停滞, 图 4 和 5 中速度停滞现象消失. 这与实验现象一致.

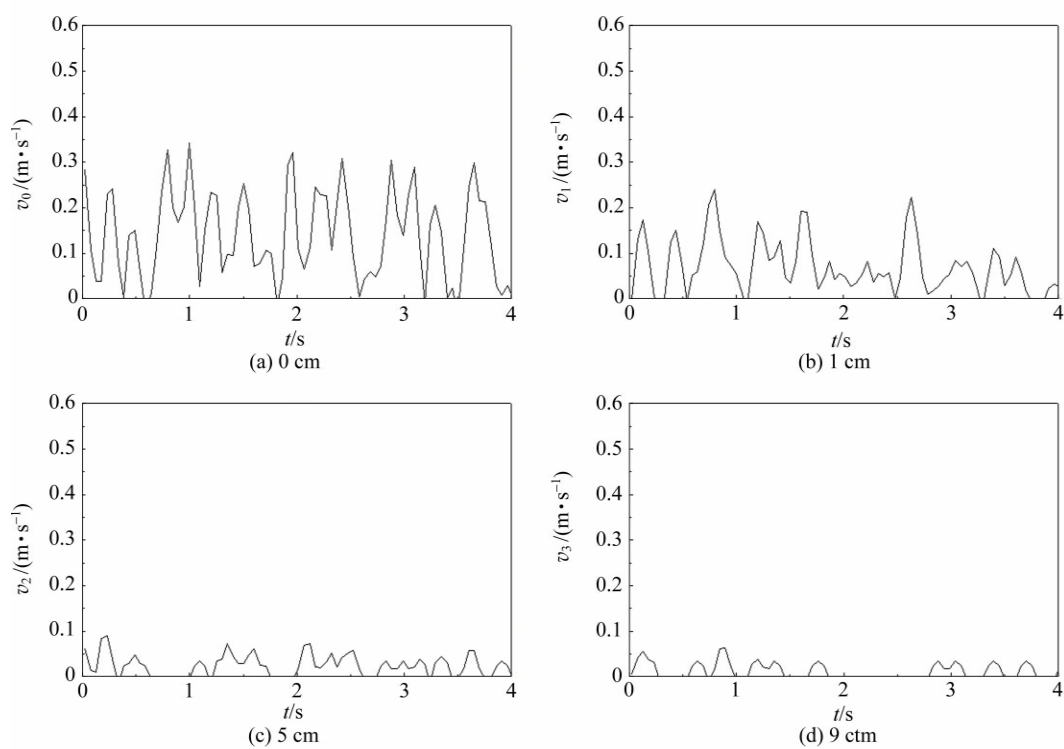


图 3  $Q=0.036 \text{ kg/s}$  时斜管内径向不同深度处下行颗粒的瞬时速度

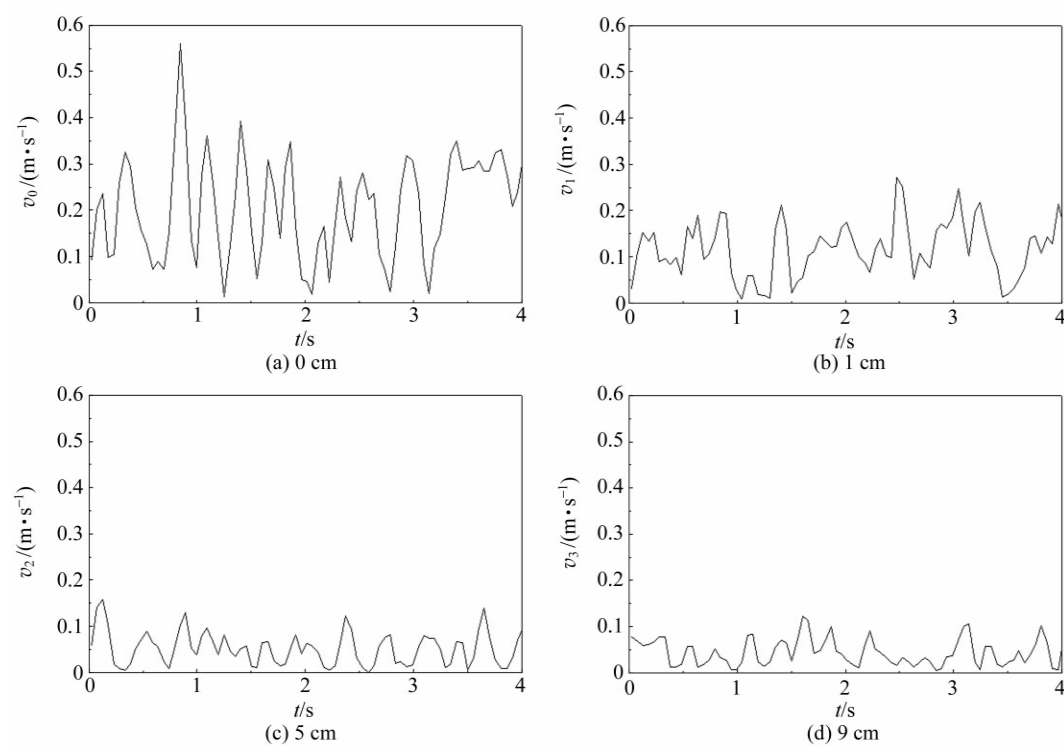


图 4  $Q=0.730 \text{ kg/s}$  时斜管内径向不同深度处下行颗粒的瞬时速度

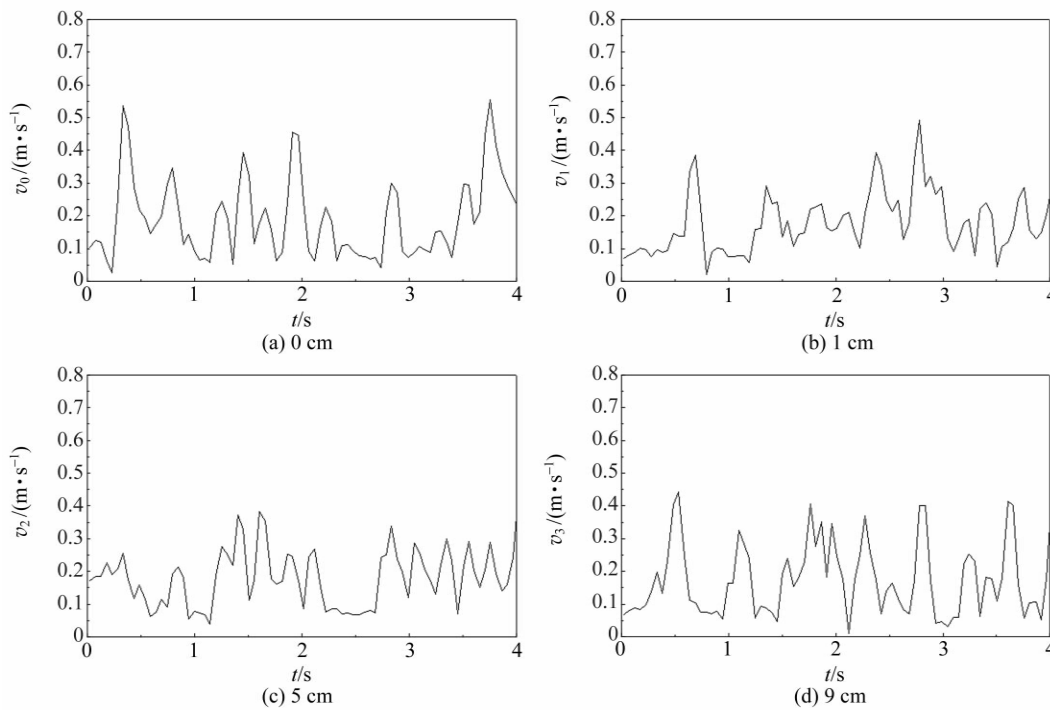


图 5  $Q=2.070 \text{ kg/s}$  时斜管内径向不同深度处下行颗粒的瞬时速度

在  $Q=0.036 \text{ kg/s}$  时,颗粒速度的波动幅值从 0 和 1 cm 处有衰减,到 5 cm 和 9 cm 处后,颗粒速度基本为 0.  $Q=0.730 \text{ kg/s}$  时,从径向位置的 0 到 9 cm 处颗粒速度的波动幅值也有衰减,但是并未衰减至 0.  $Q=2.070 \text{ kg/s}$  时,颗粒速度随着径向位置的增大基本没有衰减. 颗粒速度沿径向位置的衰减,很好地说明了斜管内颗粒流的分层流动特性.

### 3 分析与讨论

采用 PV6 型速度测量仪对不同质量流率下斜管内径向不同深度下的颗粒速度进行了测量. 由于速度存在快慢不同的脉冲式变化,此时对速度求的平均值与实验现象不符合,研究平均速度意义不大,为此需要对测量的结果进行统计. 在较长时间段内测量不同径向位置的颗粒速度,统计每个较短速度段内的速度出现次数,确定这个较短速度段的出现概率. 若连续型均匀分布中其随机变量  $x$  的概率密度为

$$f(x) = \begin{cases} 1/(b-a), & a < x < b; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

其期望值

$$E(x) = \frac{a+b}{2}, \tag{1}$$

而不同区间之间的统计分布属于离散型的,其期望值为

$$E(x) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i. \tag{2}$$

平均剪切率  $\dot{\gamma}$  体现了颗粒流动的平均剪切变形能力,综合了颗粒尺寸、形状、摩擦因数和流动状态等多种因素的影响<sup>[7]</sup>. 本文中在不同颗粒质量流率下对  $45^\circ$  斜管径向不同深度速度测量,颗粒尺寸、形状 2 个因素均未改变,颗粒流流态和摩擦因数 2 个影响因素是影响不同颗粒流率下斜管径向速度平均剪切率  $\dot{\gamma}$  改变的主要因素.

$$\dot{\gamma} = v_w / L. \tag{3}$$

这里  $\dot{\gamma}$  是平均剪切率,  $v_w$  是相对速度. 在实验初期,研究  $45^\circ$  斜管 3 种典型颗粒流现象时,记录了 3 种典型流态下的颗粒流在径向不同深度下的速度,根据(3)式可以得到不同颗粒流率下的平均剪切率  $\dot{\gamma}$ ,  $\dot{\gamma}$  是在距离  $L$  内的剪切率的平均值,由于本文未测量径向不同深度的颗粒速度,因此测量的速度是统计的概念,所以为了准确描述颗粒流速度的剪切率,拟定义平均剪切率的期望值  $\bar{\dot{\gamma}}$ .

根据上面对速度期望值的得出,进一步可以得出平均剪切率的期望值:

$$\bar{\gamma} = \overline{v_w} / L, \quad (4)$$

这里 $\overline{v_w}$ 是相对速度的期望值, $L$ 是距离.

为了体现颗粒流分层流动特性的演变,更加具体地描述各个径向不同深度位置处的平均剪切率的期望值随径向深度位置的变化,将0~9 cm每隔1 cm进行颗粒速度的测量,并进行统计分布,绘制了如图6所示的不同流率下斜管内颗粒流径向不同深度平均剪切率的期望值分布.将每个径向深度位置的区间中点值作为这段平均剪切率期望值的代表.从图6中可以清晰地看出 $Q=0.036$  kg/s和 $Q=0.730$  kg/s时的剪切率随着深度的增加都呈减小趋势,表明分层蠕动流动中越靠近径向位置上方其剪切率越大,速度分层越明显; $Q=0.036$  kg/s时,平均剪切率期望值呈“L”型分布,在表面0~1 cm处剪切率较大,1~5 cm处剪切率大幅度减小,且1~5 cm与5~9 cm其剪切率基本都接近0,没有大的变化幅度; $Q=0.730$  kg/s时的剪切率随着深度的增加变化梯度明显,呈“斜线型”分布,这时整个斜管内速度都有明显的分层,越往上速度越大且分层越明显; $Q=2.070$  kg/s时速度的剪切率随深度增加基本接近于0,且没有太大的幅度变化,表明此时速度分层消失,分层流消失.随着深度增大,平均剪切率的期望值呈“小凸面型”分布,表明在中间比上下两层壁面附近的速度略微大,这是流化流中比较常见的现象,与许多研究一致<sup>[8-9]</sup>.平均剪切率的

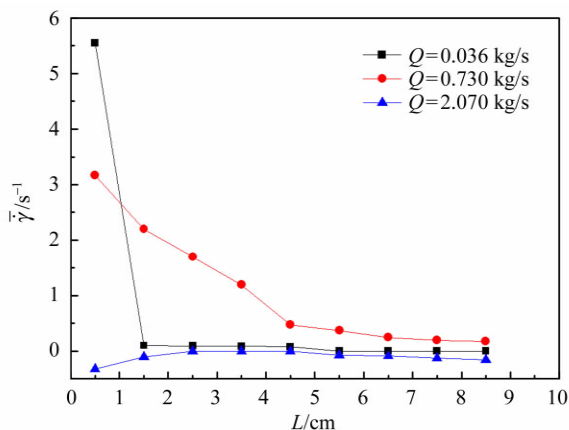


图6 不同流率下斜管内径向不同深度处颗粒速度平均剪切率的期望值

期望值随径向位置深度变化的分布可以说明平均剪切率的期望值可以很好地说明45°斜管内颗粒流分层流动特性的演变.

## 4 结 论

在150 mm×3 400 mm倾斜角为45°的斜管实验装置上,以FCC催化剂为固体颗粒物料,实验测量了斜管内颗粒流下行过程中的分层流动特性.结果表明:颗粒流率不大时,颗粒流的速度随着径向位置的增大均呈衰减趋势,颗粒流流率增大到某个值后,衰减趋势消失.随着下行颗粒流量的增大,分层现象由表面延伸至整个截面,最后分层现象消失;颗粒速度的平均剪切率期望值可以很好地反映这种分层现象的变化.

## 参考文献:

- [1] 鲍德松,张顺生,徐光磊,等.平面颗粒流的瓶颈效应及其与速度的关系[J].物理学报,2003,52(4):875-878.
- [2] 厚美瑛,陈唯,张彤,等.颗粒物质从稀疏流到密集流转变的普适规律[J].物理,2004,33(7):473-476.
- [3] 黄德财,孙刚,厚美瑛,等.颗粒速度在颗粒流稀疏-密集流转变中的作用[J].物理学报,2006,55(9):4754-4759.
- [4] 李洪钟.立管移动床中架拱现象的力学分析[J].化工冶金,1993,14(4):327-337.
- [5] 闫雪,张万松,刘仁锋,等.垂直立管中颗粒移动床蠕动流动特性的实验研究[J].过程工程学报,2014,14(3):383-387.
- [6] 邓佑鲜,张万松,曹晓阳,等.斜管内流化催化裂化催化剂颗粒流的流态识别[J].中国粉体技术,2015,21(3):12-15.
- [7] 欧阳鸿武,黄誓成,王琼,等.一种表征粉体流动性的新方法[J].中国有色金属学报,2008,18(12):2201-2211.
- [8] Wang J, Bouma J H, Dries H. An experimental study of cyclone dipleg flow in fluidized catalytic cracking [J]. Powder Technology, 2000,112(3):221-228.
- [9] 聂向锋,卢春喜,马安,等.新型液固循环床提升管颗粒速度径向分布的实验研究[J].过程工程学报,2006,6(2):403-407.

(下转第32页)

- [4] 吴肖,朱道云,胡峰,等. 利用视频分析软件 Tracker 研究皮球的弹跳[J]. 物理实验,2013,33(7):40.
- [5] 董光华. 在测液体粘滞系数实验中计时起点的确定[J]. 物理实验,1982,12(4):164-165.
- [6] 张兆钧. 用落球法测量实验中小球下落速度的辨析[J]. 物理实验,1995,15(5):199-200.
- [7] 盛忠志,简家文. 用落球法测液体粘度计时起点的确定[J]. 大学物理,2001,20(7):26-27.
- [8] 百度文库. <http://wenku.baidu.com/view/8663e4e6ce2f0066f53322a5.html?re=view>[EB/OL].
- [9] 俞熹,乐永康,冀敏,等. 美国大学物理教学和管理考察报告[J]. 物理实验,2013,33(4):14-20.

## Analysis of experiment on viscosity of liquid oil by Tracker software

CAO Hai-bin, HOU Juan, LIN Jin-ping, LIU Yun-hu  
(School of Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** Based on the traditional falling-ball apparatus of measuring liquid viscosity, the falling process of the ball was video recorded by a smart mobile phone, and the displacement and velocity of the ball were processed using the intelligent video Tracker software. The analysis of motion of the falling ball could be displayed directly and the obtained terminal speed and viscosity coefficient were more accurate.

**Key words:** falling ball; viscosity; Tracker software; motion capture

[责任编辑:郭 伟]

(上接第 28 页)

## Stratified flow of granular solids in inclined tube

DENG You-xian<sup>a</sup>, ZHANG Wan-song<sup>a</sup>, CAO Xiao-yang<sup>b</sup>,  
JA Meng-da<sup>b</sup>, YAN Chao-yu<sup>b</sup>, WEI Yao-dong<sup>b</sup>

(a. College of Science; b. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing,  
China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** Using the catalyst for fluidized-bed catalytic cracking as solid particle materials, the velocities at different radial positions in the downstream of particles in inclined tube, with an obliquity of 45°, were measured by PV6 particle velocity instrument. The stratified flow characteristics of the granular flow in the inclined tube was studied. The results showed that with the increase of mass flow rate of the downstream, stratification firstly emerged at the surface, gradually extended to the whole cross section, and finally disappeared; the changes of the stratification could be well reflected by the expected value of the average shear rate of the particle velocity.

**Key words:** inclined tube; granular flow; stratification; shear rate

[责任编辑:郭 伟]