

# 竖直管道中固-液两相流动流态化实验探讨<sup>1)</sup>

张旭辉<sup>\*,2)</sup> 康环龙<sup>†</sup> 鲁晓兵<sup>\*</sup> 魏 伟<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

<sup>†</sup>(中国地质大学(北京), 北京 100083)

<sup>\*\*</sup>(中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

**摘要** 主要探讨竖直管道中不同颗粒级配、流体流速条件下的固-液两相流动的流态化规律。首先通过量纲分析获得关键控制参数, 然后以玻璃珠(粒径: 0.25 mm~2.0 mm)、粉细砂( $d_{10} = 0.044$  mm)两种固体和水为实验介质, 开展了两相流动流态化实验, 考虑流体流速(相对于管道雷诺数介于 640~3 300 之间)和颗粒级配的影响。通过分析发现: 具有均匀粒径分布的玻璃珠床, 床层膨胀高度随流速的增加而增加, 流速与浓度的对数呈线性关系, 与 Richardson-Zaki 公式一致; 具有较宽粒径分布的粉细砂, 细颗粒随水流逐渐流出管道, 剩余颗粒质量与雷诺数呈指数递减趋势。

**关键词** 两相流动, 颗粒级配, 雷诺数, 浓度

中图分类号: O359 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-15-230

## EXPERIMENTAL STUDY OF FLUID-SOLID TWO-PHASE FLOW IN A VERTICAL TUBE<sup>1)</sup>

ZHANG Xuhui<sup>\*,2)</sup> KANG Huanlong<sup>†</sup> LU Xiaobing<sup>\*</sup> WEI Wei<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>†</sup>(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

<sup>\*\*</sup>(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, Hebei, China)

**Abstract** This paper presents an experimental study of the solid-water two-phase flow with different solid grain size distributions and flow velocities. First, the controlling parameters are obtained through the dimensional analysis, then a two phase flow is created by using glass beads (grain size: 0.25 mm—2.0 mm) and sands ( $d_{10} = 0.044$  mm), respectively. The effects of the Reynolds number  $Re$  (640—3 300) and the solid grain size are investigated. The results show that for the glass bead bed of mean grain sizes, the height of the bed in the tube increases linearly with the Reynolds number. For the sands of a wide particle gradation range, the small grains are flushed out of the tube and the residue mass decreases with the Reynolds number exponentially. The results might help the evaluation of the elevation of the soils containing the gas hydrate under the seafloor.

**Key words** two-phase flow, grain size, Reynolds number, concentration

2015-08-31 收到第 1 稿, 2015-11-01 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目(11272314, 11102209)和中国石油-中国科学院科技合作项目(2015A-4813)资助。

2) 张旭辉, 博士, 副研究员, 主要从事岩土力学与天然气水合物开采关键力学问题研究。E-mail: zhangxuhui@imech.ac.cn

**引用格式:** 张旭辉, 康环龙, 鲁晓兵等. 竖直管道中固-液两相流动流态化实验探讨. 力学与实践, 2016, 38(2): 144-148

Zhang Xuhui, Kang Huanlong, Lu Xiaobing, et al. Experimental study of fluid-solid two-phase flow in a vertical tube. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 144-148

## 前 言

随着陆地、浅海的化石能源的可开采储量日趋减少, 深海能源开发(如海底矿产、天然气水合物等)得到越来越多国家政府的重视. 机械开挖与水力输送是深海能源开采的重要技术之一. 其基本思路是通过机械设备在深海海床或海床以下就地原位挖掘含矿产资源, 然后再粉碎成合适尺度的颗粒, 通过海水水力输送提升到海洋平台.

刘大有<sup>[1]</sup>提出了两相流动的基本控制方程, 并给出了固体颗粒被流体携带的特征时间. Nielsen<sup>[2]</sup>基于单颗粒在流体中的重力、拖曳力、浮力的受力平衡分析, 获得了单个球状颗粒的自由沉降速度. Richardson 等<sup>[3]</sup>提出了液固两相流的颗粒群在流体中的沉降速度计算公式, 考虑固体颗粒浓度和雷诺数对固体颗粒群沉降速度的影响. Baldock 等<sup>[4]</sup>开展了粒径分别为 0.22 mm 和 0.32 mm 砂土颗粒的流态化实验, 结果表明高浓度土颗粒在水中沉降速度的测量结果与 Richardson 和 Zaki 经验公式计算结果差别较大. 陈子彤等<sup>[5-6]</sup>研究了颗粒级配(mm)对煤泥颗粒群在水中沉降速度的影响. 但缺乏有效地考虑颗粒浓度和颗粒级配的两相流体中颗粒沉降速度的理论分析方法.

针对竖直接管道中水力提升问题, 费祥俊<sup>[7]</sup>针对泥沙、细煤粉等细固体颗粒(粒径小于 1 mm)和水的两相流规律进行了系统研究, 考虑了浆体浓度分布、颗粒级配、流体速度等对竖直接管道水力提升的影响. 夏建新等<sup>[8]</sup>、姜龙<sup>[9]</sup>针对采矿水力输送问题, 通过实验测量并分析了竖直接管道中粒径范围为 5 mm~50 mm 粗固体颗粒的浮游速度、临界提升速度, 提出了管道稳定输送优化参数, 包括颗粒直径、管道直径和流体速度. 赵立娟<sup>[10]</sup>、张钦礼等<sup>[11]</sup>、田龙等<sup>[12]</sup>分别通过实验和无量纲理论分析方法获得了不同粒径级配的固-液两相流的管道阻力变化规律, 考虑了固体体积浓度(40%~50%)、流速(1 m/s~2 m/s)、管道直径、混合料密度等因素对管道中流动阻力的影响. 这些研究的颗粒级配和颗粒浓度范围有限, 且获得的是针对特定工程材料的半理论半经验计算公式, 在不同的实验工况与固体颗粒等条件下差异较大.

深海能源挖掘开采与粉碎提升过程中, 由于沉积物的提升需要大量的能量支持, 我们需要控制固体沉积物的提升高度和水速, 降低流动摩阻, 减少这一技术过程中多相流动的能量损耗, 同时, 通过流动

中的流态化, 进行固液分离, 并有效防止管道堵塞是关键. 目前, 以我国 1000 m 以上深水油气管道最大直径约 50.8 cm~63.5 cm 为参考, 粉碎后颗粒尺度需要兼顾管道尺寸、流动性和传热效率, 设计在微米至毫米量级之间, 颗粒粒径级配比较宽, 需要弄清颗粒级配、两相混合浓度和流体速度对于固体颗粒的提升高度和两相流动的阻力系数的影响.

因此, 本文首先通过量纲分析获得了竖直接管道中两相流动的关键控制参数, 然后设计实验, 开展了竖直接管道中不同粒径大小和颗粒级配的固相颗粒的两相流动实验, 获得流态化过程中固体颗粒浓度和提升高度的变化规律, 为深海能源开采中固体颗粒提升高度等分析提供参考.

## 1 物理问题分析

液固两相流问题描述: 质量为  $m_0$  的固体颗粒在直径为  $D$  高度为  $H$  的竖向管道内随水流向上流动, 水的流速为  $u$ , 经过一定时间后稳定, 平均直径为  $\bar{d}$  的颗粒被带起高度为  $\Delta h$ , 管道内剩余固体的质量为  $m$ , 不同高度的混合物中固体的质量为  $C_z$ . 已知重力加速度  $g$ , 水的密度  $\rho_w$ , 水的黏滞系数  $\mu_w$ , 固体颗粒密度  $\rho_s$ , 初始孔隙度  $\varepsilon_0$ , 固体的初始高度  $h = \frac{4m_0}{\varepsilon_0 \rho_s \pi D^2}$ . 该问题中, 颗粒带起高度  $\Delta h$ , 管道内剩余土的质量  $m$ , 不同高度的混合物中固体的质量  $C_z$  可以写成已知实验参数基本函数关系

$$\left. \begin{aligned} \Delta h &= f_1(m_0, \varepsilon_0, H, D, \bar{d}, u, g, \rho_w, \mu_w) \\ m &= f_2(m_0, \varepsilon_0, H, D, \bar{d}, u, g, \rho_w, \mu_w) \\ C_z &= f_3(m_0, \varepsilon_0, H, D, \bar{d}, u, g, \rho_w, \mu_w) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

选取基本单位:  $\rho_w, \bar{d}, \mu_w$ , 根据  $\pi$  定理, 函数关系 (1) 可以写成以下无量纲形式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta h}{h} &= f_1\left(\frac{\bar{d}}{D}, \varepsilon_0, \frac{D}{H}, \frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}, \frac{\rho_w \cdot \bar{d}^{3/2} \cdot g^{1/2}}{\mu_w}\right) \\ \frac{m}{m_0} &= f_2\left(\frac{\bar{d}}{D}, \varepsilon_0, \frac{D}{H}, \frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}, \frac{\rho_w \cdot \bar{d}^{3/2} \cdot g^{1/2}}{\mu_w}\right) \\ C_z &= f_3\left(\frac{\bar{d}}{D}, \varepsilon_0, \frac{D}{H}, \frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}, \frac{\rho_w \cdot \bar{d}^{3/2} \cdot g^{1/2}}{\mu_w}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

多相流实验中,  $\varepsilon_0, \frac{D}{H}, \frac{\rho_w \cdot \bar{d}^{3/2} \cdot g^{1/2}}{\mu_w}$  可以看作是实验常数, 我们只需变化固体颗粒直径  $\frac{\bar{d}}{D}$  和雷诺数  $\frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}$  即可找到多相流动的规律和基本数据, 函

数关系 (2) 可以简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta h}{h} &= f\left(\frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}, \frac{\bar{d}}{D}\right) \\ \frac{m}{m_0} &= f\left(\frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}, \frac{\bar{d}}{D}\right) \\ C_z &= f\left(\frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}, \frac{\bar{d}}{D}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## 2 实验介绍

固液两相流动的基本实验装置主要由以下几部分组成: 有机玻璃管、水流量计、调压阀、气泵、水泵等, 见图 1. 在有机玻璃管底部布置进水口, 通过水泵并连接水流量计提供进水流量, 通过调压阀提供进气流量, 也即流速. 在进水口上方布置 10 cm 厚的透水泡沫和 3 cm 厚的带有 1 mm 网眼的稳流网, 既防止固体颗粒的回落, 又减弱进水、气口射流引起的湍流等不稳定流体现象. 在有机玻璃管壁间隔 10 cm 布置出水孔, 可将这一高度混合物取出, 测量固体颗粒所占的体积比例, 即浓度. 在竖直管道顶部, 布置溢流口, 使得水、颗粒、气体通过溢流口稳定流出.

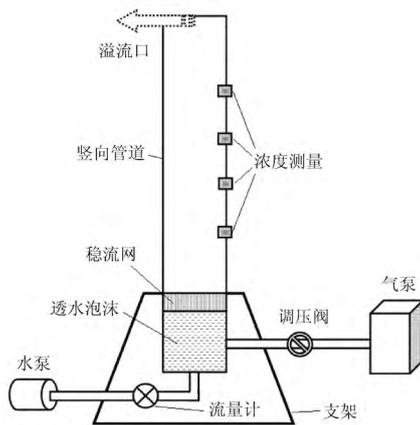


图 1 实验装置示意图

固体颗粒实验介质采用粒径分布比较均匀的玻璃珠 (球形) 和颗粒级配较宽的粉细砂两种, 其中, 玻璃珠的比重为 2.50, 粒径范围分为 4 种: 0.25 ~ 0.4 mm, 0.4 ~ 0.6 mm, 0.8 ~ 1.0 mm, 1.0 ~ 2.0 mm. 粉细砂的比重  $G_s$  为 2.69, 相对密度为 54%, 属于中密砂, 颗粒级配曲线如图 2.

根据式 (3), 在实验过程中, 控制的主要参数包括介质平均粒径和雷诺数, 且针对同一实验介质, 通过改变雷诺数来观察流动的基本数据和特征. 基

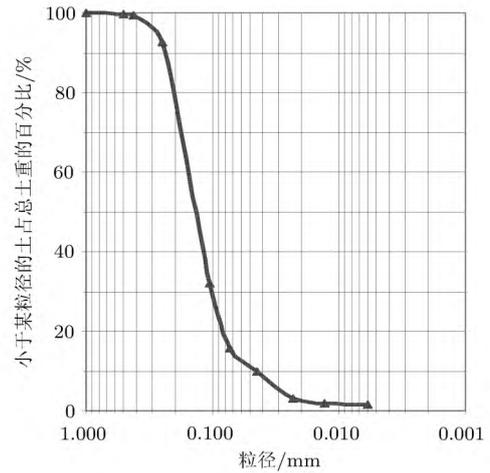


图 2 粉细砂颗粒级配曲线

本实验流程为: 预先在管道底部铺设 1 kg 的玻璃珠或粉细砂; 然后从管道进水口注入控制流量的水, 根据流量计调整水泵供水速度. 每一种速度下, 保持 30 min 以上至管道中各相状态稳定, 记录固体颗粒整体提升高度和随高度的浓度分布; 增加流速或者减少流速或者注入气体, 观察并记录固体颗粒的提升高度和浓度分布; 最后, 测量实验后管道中剩余固体颗粒、水的质量.

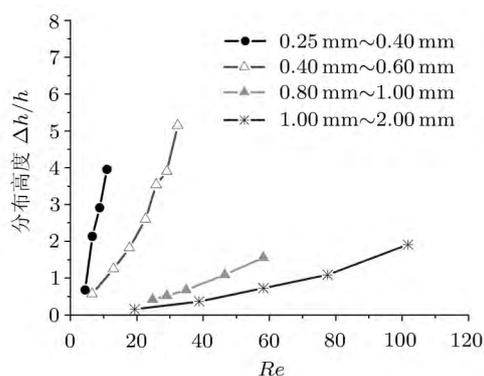
## 3 结果分析与讨论

以玻璃珠为实验介质的工况 (如图 3), 其粒径分布比较均匀, 在特定流速下, 经过一段时间玻璃珠床层高度保持不变 (一般取为 30 min, 实际上单颗粒在不同速度的流体中运动的弛豫时间为秒量级), 整个流场也基本稳定. 随着流体流速的增加 (雷诺数的增加), 玻璃珠床层从原来稠密的多孔介质分布状态, 逐渐变得稀疏, 即发生流态化现象, 因此, 在管道中床层膨胀的高度也随着提升, 平均浓度  $\varepsilon_s$  降低. 玻璃珠的粒径越大, 同一雷诺数下, 玻璃珠床层提升高度越低, 浓度降低程度越高. 主要由于流体速度越大, 流体与固体间的速度差越大, 液固相间作用力增加, 因此, 需要固体浓度变得更加稀疏.

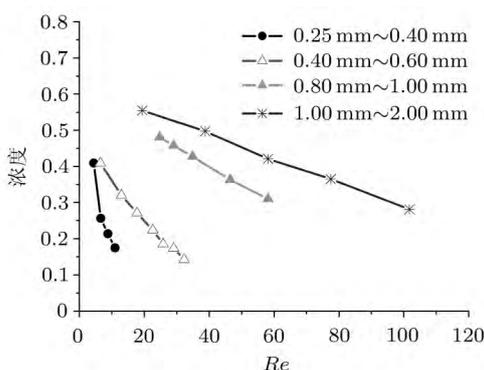
针对流速与颗粒浓度的关联进行分析, 首先根据 Allen 计算公式得到单颗粒在流体中的自由沉降速度

$$v_t = d \cdot \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_w) \cdot g^2}{225\rho_w \cdot \mu_w} \right]^{1/3} \quad (4)$$

式 (4) 适用固体颗粒直径  $d$  在 0.25 mm ~ 3.0 mm 之间, 雷诺数  $Re$  在 1 ~ 500 之间的单颗粒自由沉降速



(a) 玻璃珠分布高度随雷诺数的变化



(b) 玻璃珠浓度随雷诺数的变化

图 3 玻璃珠分布高度和浓度随雷诺数的变化曲线

度计算 [13]. 本文的实验控制参数在其区间内.

每组实验选取玻璃珠直径的最大和最小值, 计算单颗粒自由沉降速度, 然后将流速 (这里的流速也是颗粒群的临界悬浮速度) 的无量纲数  $v/v_t$  与流化床中水的体积分数  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1 - \varepsilon_s$ ) 分别取对数绘图, 得到图 4, 可以看出, 两者在不同的粒径时, 基本呈现线性关系.

根据 Richardson 和 Zaki 计算公式

$$v/v_t = \varepsilon^n \quad (5)$$

两边取对数, 得到

$$n = \ln(v/v_t) / \ln \varepsilon \quad (6)$$

因此, 实验结果与理论结果在规律上是一致的. 通过实验数据拟合得到  $n$  值分别为 4.57, 4.12, 2.68 和 2.47, 随着玻璃珠平均直径的增大,  $n$  值变小. 但该参数与雷诺数  $Re$  和颗粒直径  $d/D$  的关系还需深入研究.

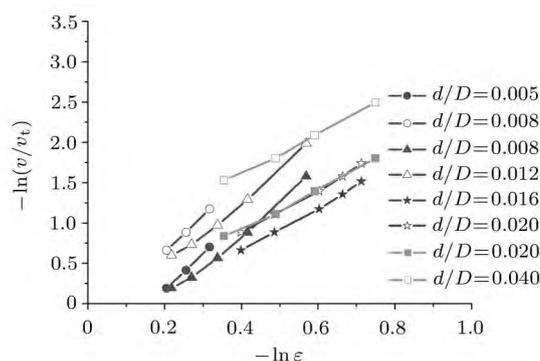


图 4 流速/单颗粒自由沉降速度随水的体积分数的变化

以粉细砂为实验介质的工况 (如图 5), 其颗粒级配比较宽, 在特定流速下, 粉细砂土颗粒遍布整个竖直管道 (一般取为 30 min), 细颗粒逐渐从管道上方的溢流口流失, 高度越高, 浓度越低 (浓度在径向存在一定的差别, 但流速较慢, 认为可作平均化处理, 且颗粒近似球形处理), 颗粒有效直径越小. 随着流体流速的增加 (雷诺数的增加), 粉细砂从原来稠密的多孔介质分布状态, 逐渐变得稀疏, 在管道中分布的剩余颗粒质量越小. 由于不同流速下, 不同粒径的颗粒悬浮于不同的高度, 这与粒径和流速有关. 一般地, 较大直径的颗粒分布在管道下部, 较小颗粒随着流体流速的增加, 不断从溢流口携带而出. 在某一特定的流速下, 留在管道内的固体颗粒按照粒径大小分布于管道中, 并呈现出明显的浓度差 (实验中观察到明显的颜色深浅变化), 也即固体颗粒的分层现象. 通过拟合发现, 剩余质量与雷诺数呈现指数下降关系

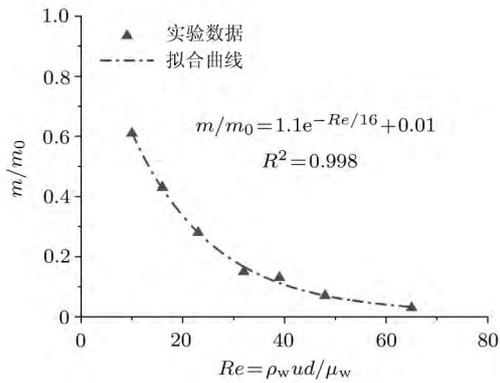
$$m/m_0 = 1.1 \exp(-Re/16) + 0.01 \quad (7)$$

实际上, 这与沙-水两相流不同粒径的固体颗粒在管道中分层悬浮、浓度变化规律是一致的 [4].



(a) 实验图

图 5 土颗粒剩余质量随雷诺数的变化曲线



(b) 实验数据

图5 土颗粒剩余质量随雷诺数的变化曲线(续)

## 4 结论

通过管道水力提升的深海矿产资源开采技术需要多相流动规律认识的深入. 如何控制固体颗粒提升高度, 降低流动能量损耗是需要解决的关键力学问题之一. 本文主要探讨不同颗粒级配、流体流速条件下的液-固两相流的流态化问题.

首先通过量纲分析获得了竖直管道中两相流动的关键控制参数, 本文主要考虑固体颗粒直径  $\bar{d}$  (颗粒级配) 和雷诺数  $\frac{\rho_w \cdot u \cdot \bar{d}}{\mu_w}$  作为确定多相流动规律的基本影响参数.

通过竖直管道中液-固两相流实验结果发现: 具有均匀粒径分布特征的玻璃珠, 随着流速的增加, 其在管道中的分布高度近似线性增加 (固体浓度降低), 颗粒群的临界悬浮速度与雷诺数、颗粒直径关联, 一定的流体流速对应着一定的固体浓度, 与

Richardson-Zaki 计算公式是一致的. 对于具有较宽粒径分布的粉细砂, 随着流速的增加, 较细颗粒逐渐流出管道, 管道中固体浓度降低, 剩余质量随雷诺数呈指数递减趋势.

本文的研究工作, 将为后续开展的含相变多相流动研究提供参考依据.

## 参考文献

- 刘大有. 二相流体力学. 北京: 高等教育出版社, 1993
- Nielsen P. Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport. Singapore: World Scientific, 1992
- Richardson JF, Zaki WN. Sedimentation and fluidisation: part 1. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 1954, 32: 35-53
- Baldock TE, Tomkins MR, Nielsen P, et al. Settling velocity of sediments at high concentrations. *Coastal Engineering*, 2004, 51: 91-100
- 陈子彤, 刘文礼, 赵宏霞等. 干扰床分选机分选粗煤泥的试验研究. *煤炭工程*, 2006, 5: 69-70
- 刘文礼, 陈子彤, 位革老等. 干扰床分选机分选粗煤泥的规律研究. *选煤技术*, 2007, 4: 11-13
- 费祥俊. 浆体与颗粒物料输送水力学. 北京: 清华大学出版社, 1994
- 夏建新, 倪晋仁, 黄家楨. 锰结核在垂直管路输送过程中的压力损失. *泥沙研究*, 2002, 2: 22-28
- 姜龙. 粗颗粒垂直管水力提升速度与浓度的实验研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2005
- 赵立娟. 不同粒径泥沙管道水力输送阻力特性研究. [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2002
- 张钦礼, 姜志良, 王石等. 高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力模型. *科技导报*, 2014, 32(24): 51-55
- 田龙, 李鹏程, 姜龙等. 垂直管固体物料水力输送浓度的研究. *泥沙研究*, 2006, 2: 72-76
- 桂夏辉, 李延锋, 刘炯天等. 液固流化床内颗粒沉降特性试验研究. *煤炭学报*, 2010, 35(8): 1374-1379

(责任编辑: 刘希国)

中国力学学会已开通官方微信平台, 将及时发布中国力学学会信息和力学界动态. 热诚欢迎力学界广大科技工作者及院校师生关注 (扫一扫右侧二维码, 即可轻松关注).

