

# 循环流化床下料立管内气固两相流动状态与压力脉动的关系

张毅, 彭园园, 魏耀东, 时铭显

[中国石油大学(北京)化学科学与工程学院, 北京 102249]

**摘要:**在15 m高的大型气固循环流化床上对内径90和42 mm的下料立管内气固两相流的动态压力进行了测量. 实验结果表明, 负压差下料立管内的气固两相流动存在着低频压力脉动, 压力脉动的强度可以用动态压力的标准方差(Standard deviation, Sd)来表征, 且与立管下料的流动状态密切相关. 立管下料的流动状态依据颗粒质量流量通量的大小有浓相输送状态和稀密两相共存两种状态. 浓相输送状态的压力脉动强度较大, 是下行颗粒压缩其夹带气体引起气固两相强烈相互作用导致的; 稀密两相共存状态的压力脉动强度较小, 是密相段排料的不稳定性和稀相段较弱的气固相互作用共同引起的. 立管下料的压力脉动强度随颗粒质量流量通量的增加而增大, 对于浓相输送状态, 在实验操作范围内 $[G_s'=550\sim 850\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$ , 压力脉动的强度与立管下料质量流量通量近似成 $Sd=0.00875G_s'-4.77$ 的线性关系.

**关键词:**立管; 负压差; 流动状态; 压力脉动

**中图分类号:** TQ021

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2008)01-0023-05

## 1 前言

循环流化床内的固体颗粒是沿着一个回路循环流动的, 既有颗粒的上行部分也有颗粒的下行部分, 通常上行部分是提升管, 下行部分是连接两器的返料立管和旋风分离器料腿(也称为立管). 立管内气固两相流的主要特点是颗粒从高处的低压力端流向低处的高压力端, 是一种负压差流动, 同时颗粒下行速度大于气体速度<sup>[1,2]</sup>. 颗粒的这种顺重力逆压力梯度下行运动导致了流动的不稳定性, 主要表现为立管下料的低频压力脉动<sup>[3]</sup>; 而气体则因颗粒质量流率的不同, 或上行或下行<sup>[4]</sup>. 立管内的流动状态随颗粒质量流量通量的不同有两种形式, 即稀密两相共存状态和浓相输送状态<sup>[5,6]</sup>, 以平衡立管的负压差, 达到锁气排料的目的. 立管下料流动状态的不同导致压力的脉动强度不同, 压力脉动是表征流化状态的可测特征参量<sup>[7,8]</sup>. 认识立管内流动状态与压力脉动的关系就可对立管内颗粒的流动和排料进行诊断和调节. 虽然已有研究立管的文献<sup>[9-13]</sup>, 但还缺乏对循环流化床整体系统运行时立管压力脉动特性的实验和分析.

本工作在15 m高的大型循环流化床装置上, 对循环回路中具有代表性的3根下料立管的压力脉动进行了测量, 主要分析立管内颗粒流动状态特性与压力脉动的关系和压力脉动产生的机理.

## 2 实验

### 2.1 实验装置

实验装置如图1所示. 颗粒从预提升器5进入提升

管6, 经过提升管6和快速分离器7进入流化床11, 再通过立管12进入预提升器5, 完成一次循环. 立管12内径90 mm, 长4770 mm, 其中上斜管段长670 mm, 直管段长2250 mm, 下斜管段长1850 mm. 立管12入口在流化床11的密相床层内, 出口在预提升器5的密相床层内. 旋风分离器8料腿内径42 mm, 长4800 mm, 料腿出口在流化床11的密相床层. 旋风分离器10料腿内径42 mm, 长3700 mm, 料腿出口在流化床11的稀相床层. 提升管内径186 mm, 高约11 m. 颗粒循环流量用测量床9测量, 用控制阀13调节.

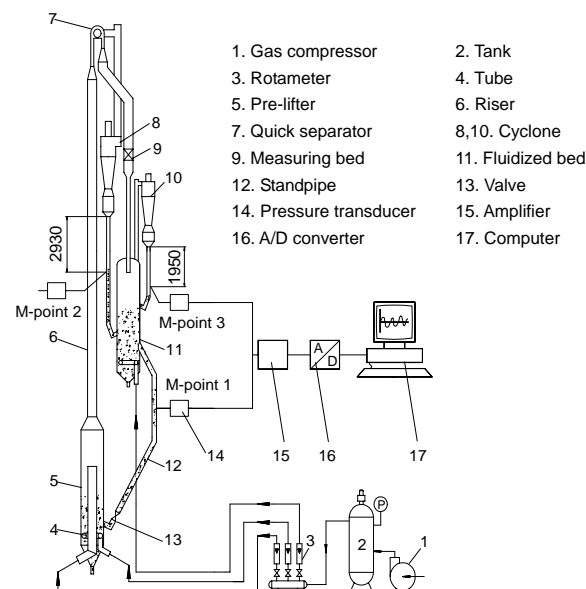


图1 实验装置

Fig.1 Experimental set-up

收稿日期: 2007-04-16, 修回日期: 2007-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 20576074); 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(编号: G2005CB22120103)

作者简介: 张毅(1982-), 男, 成都市人, 硕士研究生, 化学工程专业; 魏耀东, 通讯联系人, E-mail: weiyd@cup.edu.cn.

实验物料是 10%的 FCC 平衡催化剂(颗粒密度约  $1500 \text{ kg/m}^3$ )与 90%的石英砂(颗粒密度约  $2462 \text{ kg/m}^3$ )的混合物, 平均粒径  $78 \mu\text{m}$ , 平均密度  $2365.8 \text{ kg/m}^3$ .

测压点 1 位于立管 12 直管段的中间部位, 测压点 2, 3 分别设置在旋风分离器 8, 10 的料腿上, 如图 1 所示.

### 2.2 测量方法

压力脉动用自行开发的动态压力测量仪测量, 见图 1. 动态压力传感器由英国 Gems Sensors Ltd 制造, 压力量程  $0\sim 80 \text{ kPa}$ , 灵敏度  $20 \text{ Pa/mV}$ , 测得的压力由压力变送器转换为  $1\sim 5 \text{ V}$  的标准电压信号, 用多功能数据采集板采样, 通过计算机输出. 采样频率为  $1\sim 500 \text{ Hz}$ , 采样时间根据需要调整.

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验现象描述

实验操作条件见表 1, 提升管表观气速为  $6.31 \text{ m/s}$ .

表 1 操作条件  
Table 1 Operation conditions

Parameter	Solid flow rate, $G_s$ (kg/s)	Solid flux, $G_s'$ [ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]
Riser	5.35	197.1
Standpipe 12	5.34	839.8
Dipleg of cyclone 8	$5.34 \times 10^{-3}$	3.856
Dipleg of cyclone 10	-	-

实验过程中内径  $90 \text{ mm}$  的立管 12 内的颗粒质量流量通量较大, 流动状态是浓相输送状态, 如图 2 所示. 此时透过有机玻璃立管可观察到颗粒下行的速度不稳定, 时而减速时而加速, 表现为周期性的变化. 下行的颗粒受阻时速度下降形成高浓度区, 流过此区域后颗粒加速, 形成低浓度区, 结果导致下行的颗粒浓度沿立管轴向分布不均匀, 呈疏密间隔变化[图 2(a)]. 立管内的颗粒以这种速度和浓度周期性变化的流动状态波浪式下行.

旋风分离器 8 接快速分离器 7, 是组成提升管顶部气固分离系统的主要部分, 料腿直径  $42 \text{ mm}$ , 颗粒质量

流量通量较小. 旋风分离器 8 料腿出口淹没在流化床 11 的密相床层内, 料腿内下料的流动状态呈现出稀密两相共存状态, 存在着明显的稀相和密相的分界面, 见图 2(b). 料腿上部是稀相段, 空隙率大, 下落的颗粒受旋风分离器内旋流的影响, 短暂旋转后呈雨滴状连续下落; 下部是密相段, 存在上升的气泡, 呈鼓泡床状态, 床层维持一定的密相料位高度以平衡料腿的负压差, 满足锁气排料的要求. 下料过程不稳定, 密相料面上下起伏波动, 具有间歇性.

旋风分离器 10 主要分离流化床 11 的流化风夹带的颗粒, 气固混合物入口浓度很低, 因而料腿的颗粒质量流量通量很小. 料腿内的流动状态也是稀密两相共存状态, 与旋风分离器 8 的料腿相比, 旋风分离器 10 料腿颗粒质量流量通量更小, 上部稀相段颗粒呈稀疏状下落, 见图 2(c); 下部密相段由于料腿出口在流化床 11 的稀相床层, 因而料腿的密相料位较低, 料位有小幅波动, 近似呈移动床状态下行, 下料相对平稳.

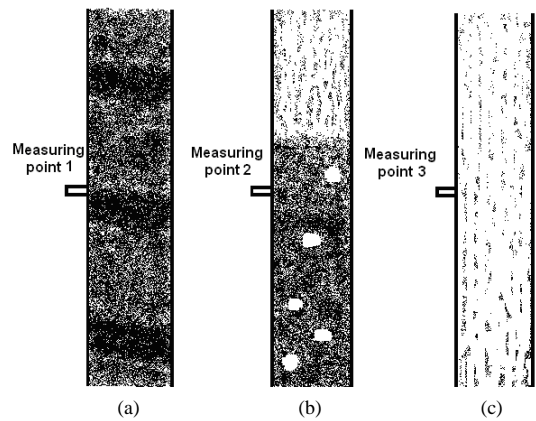


图 2 立管内气固两相流的流动状态  
Fig.2 Flow patterns in the 3 standpipes

### 3.2 压力脉动与流动状态的关系

图 3 是测压点 1, 2 和 3 的动态压力随时间的变化曲

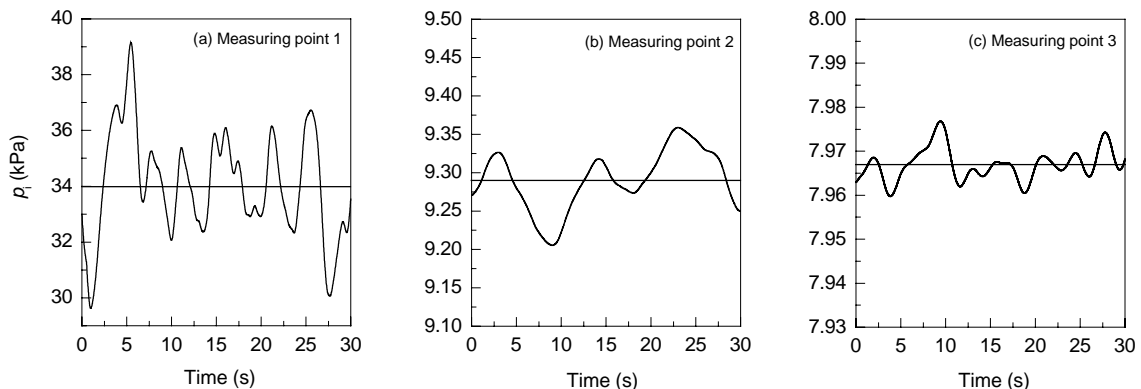


图 3 动态压力测量曲线  
Fig.3 Pressure fluctuations in the 3 standpipes

线. 图中的曲线进行了滤波平滑处理, 以减小噪声对压力脉动统计分析的影响, 保留原始压力脉动曲线的特征. 图3表明, 下料立管内的压力具有明显的脉动特性, 但3个测量点的压力脉动的幅值和频率不同.

为描述压力脉动的强度, 对图3的实验数据进行平均压力和标准方差处理.  $p_i$ 为动态压力, 则平均压力

$$\bar{p} = n^{-1} \sum_{i=1}^n p_i \quad (n=1, 2, 3, \dots).$$

在稳定操作条件下,  $\bar{p}$  为定值, 可以用标准方差值Sd表征压力脉动的强度:

$$Sd = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}.$$

图 3 各点的压力脉动实验数据统计分析结果见表 2. 由表可知, 立管 12 的平均压力和压力脉动的标准方差值显著大于旋风分离器 8 和 10 料腿的平均压力和标准方差值, 但各测量点压力脉动的周期都在 4 s 以上, 属于低频压力脉动.

表 2 动态压力实验数据分析

Measuring point	Mean pressure (kPa)	Fluctuation amplitude (Pa)	Fluctuation cycle (s)	Sd (kPa)
1	34.6	$<5 \times 10^3$	4~7	2.72
2	9.29	$<90$	7~10	$4 \times 10^{-2}$
3	7.96	$<20$	$\approx 8$	$4 \times 10^{-3}$

下料立管的负压差和颗粒质量流量通量  $G_s'$  的变化决定了立管内下料的流动状态<sup>[1,5]</sup>, 如图 4 所示, 存在一个临界颗粒质量流量通量  $G_{sc}'$ , 当立管下料的  $G_s' > G_{sc}'$  时, 立管下料是浓相输送状态; 当  $G_s' < G_{sc}'$  时, 立管下料是稀密两相输送状态. 已有研究<sup>[1,5]</sup>表明,  $G_{sc}' \approx 200$

$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . 在实验中返料立管 12 的  $G_s' > 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 流动状态是浓相输送状态, 压力脉动较大; 而旋风分离器料腿 8 和 10 的  $G_s' < 200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 流动状态是稀密两相共存的输送状态, 压力脉动较小.

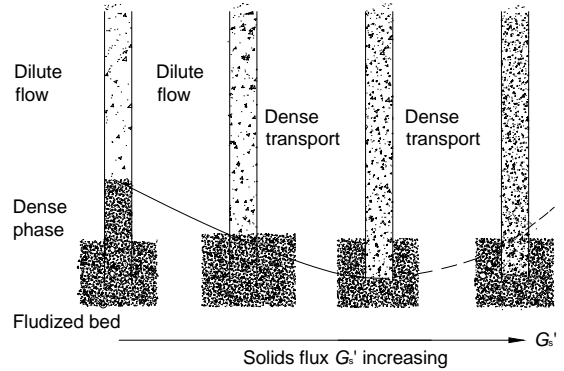


图 4 立管的流态<sup>[1]</sup>

Fig.4 Flow patterns in the standpipes<sup>[1]</sup>

### 3.3 压力脉动与颗粒质量流量通量的关系

颗粒质量流量通量的大小直接影响立管下料的压力脉动强度. 针对返料立管 12 的浓相输送状态, 在一定的提升管表观气速条件下, 改变颗粒质量流量通量, 下料立管测量点 1 的压力脉动与颗粒质量流量通量的关系如图 5 所示. 结果表明, 立管颗粒质量流量通量越大, 压力脉动越剧烈. 依据图 5 的测量结果得出压力脉动的标准方差值与颗粒质量流量通量的关系, 见图 6. 颗粒质量流量通量越大, 压力脉动的标准方差值越大, 在实验操作范围 [ $G_s' = 550 \sim 850 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] 内, 立管压力脉动强度对应的标准方差值 Sd 与颗粒质量流量通量近似呈  $Sd = 0.00875G_s' - 4.77$  的线性关系.

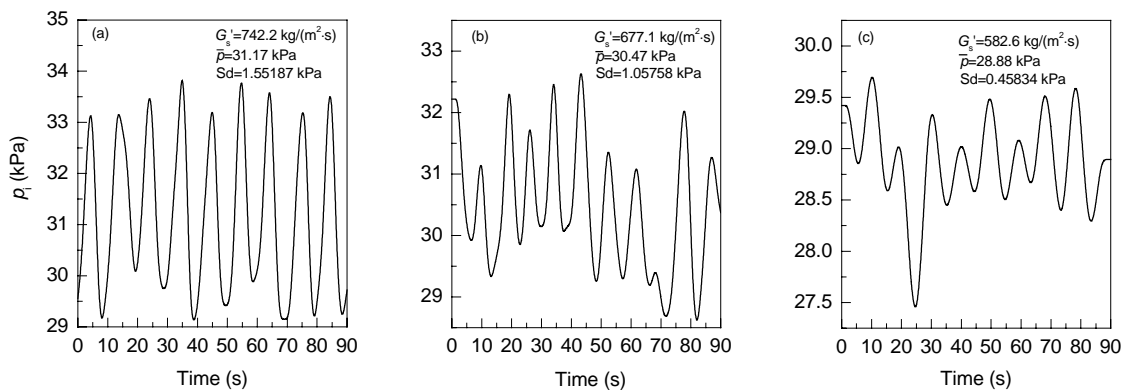


图 5 不同条件下立管 12 的压力脉动

Fig.5 Pressure fluctuations in standpipe 12 under different operation conditions

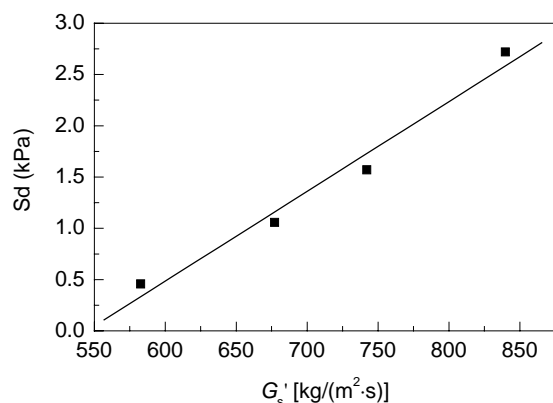


图6 压力脉动标准方差与颗粒质量流量通量的关系  
Fig.6 Relationships between Sd and  $G_s'$  in standpipe 12

### 3.4 综合分析

立管内气固两相流动的主要特点是存在着负压差和颗粒顺重力下行的速度大于气体速度. 立管下料的流动状态为浓相输送状态时, 负压差主要依靠颗粒的静压能和动能平衡; 流动状态为稀密两相共存状态时, 负压差主要依靠密相料位的静压能平衡.

颗粒质量流量通量较大时, 立管下料呈浓相输送状态, 颗粒进入立管后快速下落, 颗粒速度大于气体速度, 导致颗粒群夹带气体在重力的作用下由低压端向高压端迅速下行, 使夹带的气体受到压缩, 压力升高. 气体受压达到一定程度会产生向上的膨胀, 阻碍颗粒下行, 迫使部分颗粒减速. 当气体膨胀到一定程度后, 气体空穴内部的压力下降, 随着颗粒不断涌入立管, 受阻减速的颗粒得到补充, 在重力的作用下克服阻力又开始加速下行, 对气体进行新一轮的压缩. 这种气固两相相互作用的结果导致颗粒速度发生周期性的变化. 依据颗粒相的连续性方程  $G_s' = \rho_p(1-\varepsilon)u_s$ , 颗粒质量流量通量一定时, 颗粒速度  $u_s$  的变化会使颗粒相浓度  $\rho_p(1-\varepsilon)$  发生相应的变化, 使颗粒浓度沿立管轴向不均匀分布, 表观上形成如图 2(a)所示的密度疏密间隔变化. 因此, 立管内下料流动状态的不稳定性必然导致颗粒表观密度和速度的变化, 从而表现为立管下料的低频压力脉动. 颗粒质量流量通量越大, 这种气固两相相互作用越剧烈, 导致立管下料压力脉动的强度越大.

当颗粒质量流量通量较低时, 立管内流动状态是稀密两相共存状态. 对于立管下部的密相部分, 空隙率小, 固体颗粒是连续相, 流动处于移动床或鼓泡床状态, 主要为密相部分以静压能克服立管出口背压的约束而排料. 由于颗粒质量流量通量较小, 立管蓄压较为缓慢, 排料过程不稳定, 表现为立管密相料面的上下起伏, 从而导致压力的周期性脉动; 上部的稀相部分空隙率大, 固体是分散相, 气体是连续相, 颗粒下落质量少速度慢,

夹带气体的能力较弱, 因而立管上部稀相段有较长的脱气段. 由于下落的颗粒量很少, 气固两相之间的相互作用很弱, 主要表现为上部稀相部分段下落颗粒的团聚和分散, 以及来自下部密相段上升气泡在床面破碎扰动的影响, 这些因素产生的压力脉动强度很小.

## 4 结论

(1) 在 15 m 高的大型气固循环流化床上对内径 90 mm 的返料立管和内径 42 mm 的旋风分离器料腿内气固两相流的动态压力测量结果表明, 立管下料过程存在低频的压力脉动, 且与立管下料的流动状态密切相关. 内径 90 mm 返料立管内  $G_s' > G_{sc}'$ , 流动是浓相输送状态, 压力脉动强度大, 这是固体颗粒压缩所夹带的气体产生强烈的气固相互作用导致的; 内径 42 mm 旋风分离器料腿内  $G_s' < G_{sc}'$ , 流动是稀密两相共存输送状态, 下部密相段压力脉动主要是排料的不稳定性产生的, 上部稀相段压力脉动主要是较弱的气固相互作用产生的.

(2) 立管的压力脉动强度可以用动态压力的标准方差值 Sd 来表征. 分析结果表明, 立管下料的压力脉动强度随立管颗粒质量流量通量的增加而增大, 且稀密两相共存状态时立管下料的压力脉动强度显著小于浓相输送状态时立管下料的压力脉动强度.

(3) 立管下料呈浓相输送状态时, 在实验操作范围内 [ $G_s' = 550 \sim 850 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ ], 立管压力脉动的强度与颗粒质量流量通量近似呈  $Sd = 0.00875G_s' - 4.77$  的线性关系.

### 参考文献:

- [1] 魏耀东, 刘仁桓, 孙国刚. 负压差立管内的气固两相流 [J]. 化工学报, 2004, 55(6): 896-901.
- [2] Bodin S, Briens C, Bergougnou M A, et al. Standpipe Flow Modeling, Experimental Validation and Design Recommendations [J]. Powder Technol., 2002, 124: 8-17.
- [3] 张毅, 魏耀东, 时铭显. 气固循环流化床负压差下料立管的压力脉动特性 [J]. 化工学报, 2007, 58(6): 1417-1420.
- [4] Li Y C, Lu Y Q, Wang F M. Behavior of Gas-Solid Flow in the Downcomer of a Circulating Fluidized Bed Reactor with a V-valve [J]. Powder Technol., 1997, 91: 11-16.
- [5] 魏耀东, 刘仁桓, 孙国刚, 等. 负压差立管内气固两相流的流态特性及分析 [J]. 过程工程学报, 2003, 3(5): 385-389.
- [6] 魏耀东, 刘仁桓, 孙国刚. 负压差立管内气固流动的不稳定性实验分析 [J]. 过程工程学报, 2003, 3(6): 493-497.
- [7] 周章玉, 石炎福, 余华瑞. 由压力波动判断气-固流化床中的流化类型 [J]. 化学反应工程与工艺, 1999, 15(3): 262-267.
- [8] 杨富军, 王嘉骏, 顾雪萍, 等. D类颗粒节涌流态化的实验和数值模拟 [J]. 过程工程学报, 2005, 5(6): 597-600.
- [9] 罗保林, 宗祥荣, 王中礼. 垂直立管中催化剂流动特性的实验研究 [J]. 过程工程学报, 2005, 5(2): 119-124.
- [10] 景山, 李洪钟. 负压差移动床立管料斗中散体颗粒流动特征: III. 流区压力波动特征研究 [J]. 化学反应工程与工艺, 1998, 14(2): 164-169.

[11] 董众兵, 曹晏, 王鸿瑜. 循环立管中气固移动床流动 [J]. 燃料科学与技术, 2003, 9(4): 318-322.

[12] Zhang J Y, Rodolph V. Flow Instability in Non-fluidized Standpipe

Flow [J]. Powder Technol., 1998, 97: 109-117.

[13] Geldart D, Broodryk N, Kerdoncuff A. Studies on the Flow of Solid down Cyclone Diplegs [J]. Powder Technol., 1993, 76: 175-183.

## Relationships between Pressure Fluctuation and Flow Patterns in Standpipes of Circulating Fluidized Bed

ZHANG Yi, PENG Yuan-yuan, WEI Yao-dong, SHI Ming-xian

(Dept. Chem. Eng., China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Pressure fluctuation in the  $\phi 90$  mm and  $\phi 42$  mm standpipes in a 15 m circulating fluidized bed was measured. The gas-solid two-phase flows under negative pressure gradient in the standpipes have low frequency pressure fluctuation, which can be described by standard deviation (Sd). Flow patterns in standpipes are classified as two types according to solids flux, dense conveying pattern and dilute-dense coexisting flow pattern. The pressure fluctuation intensity is great under the dense conveying pattern, which is mainly caused by intensive mutual action between solid and the gas entrained down. The pressure fluctuation intensity is relative weak under the dilute-dense coexisting flow pattern, which is caused by instabilities of solid discharge at the bottom dense part and weak gas-solid mutual action in the upper dilute part. With the solid flux increasing in the standpipes, pressure fluctuation is more intensive. For the dense conveying pattern, there exists nearly linear relationship between solid flux and pressure fluctuation intensity as  $Sd=0.00875G_s'-4.77$  under the experimental condition of  $G_s'=550\sim 850$  kg/(m<sup>2</sup>·s).

**Key words:** standpipe; negative pressure gradient; flow pattern; pressure fluctuation