

kg/m^3 , 中位粒径 $58.66 \mu\text{m}$, 属于 Geldart A 类颗粒.

实验过程中通过测量立管的动态压力来反映颗粒流量的变化. 动态压力用自行开发的动态压力测量仪测量. 动态压力测量点设置在一级料腿 $z=9.5 \text{ m}$, 二级料腿 $z=6.5 \text{ m}$ 处(料腿入口 $z=0$), 颗粒流量由斜管上的闸阀控制, 用测量床测量(未画). 流化床流化速度 $u_f=0.17\sim 0.18 \text{ m/s}$.

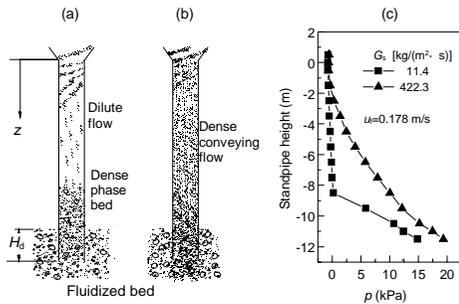


图2 立管内流态与压力

Fig.2 Flow patterns and pressure in the standpipe

2.2 气固两相流的流态

一般立管内气固两相流的流动流态有多种形式, 某些流动参数的改变可以使流态发生转变. Jones 等^[3] 用 U_{sl} , u_{mf}/ϵ_{mf} 两个参数将立管气固流动流态划分为流态化流动和非流态化流动两大类. 工业应用立管的流态一般属于流态化流动. 实验表明^[4] 立管内流态的存在形式取决于有关流化参数, 尤其是颗粒质量流率 G_s 的大小. 当 G_s 比较小时, 流态是稀密两相共存的流态形式, 见图 2(a), 气体上行, 是流化风, 这种流态出现在一级旋风分离器料腿和二级旋风分离器料腿内;

当 G_s 比较大时, 气固两相流动过程类似于密相输送管, 流态是浓相输送流态, 见图 2(b), 气体下行, 是颗粒夹带的气体, 这种流态仅出现在一级旋风分离器料腿内. 两种流态可以互相转变, 主要取决于立管内 G_s 的大小. 立管的流态不同, 轴向压力分布也不同, 轴向压力随着颗粒质量流率的增加而增加, 如图 2(c)所示.

2.3 气固两相流的不稳定性实验结果和分析

2.3.1 流量偏移

在稳定操作状态下, 颗粒循环回路保持着一定的压力平衡和颗粒循环量. 但当颗粒循环回路内某一部分的结构或操作参数发生变化, 就会引起流动参数的不稳定性现象. 立管气固两相流的不稳定性主要表现为颗粒流量的变化, 可以划分为两类: 一类是流量偏移, 流量从一个值逐渐或突然转变为另一个值; 另一类是流量振荡, 流量在一定范围内发生波动性变化.

流量偏移一般发生在立管的入口端或出口端. 在立管的入口处, 当颗粒质量流率超过立管的进料极限时, 颗粒就会在立管入口处堆积, 形成非流化流动而导致堵塞, 使立管失去进料功能. 由于颗粒不能进入立管, 立管内的颗粒质量流量逐渐减小, 流态由浓相输送流态转变为稀密两相流态, 发生了流量偏移现象. 立管下部的压力测量表明, 随着颗粒质量流率的增加, 管内的颗粒浓度增大, 压力逐渐上升, 但当形成堵塞时, 颗粒输送中断, 立管内的颗粒浓度急剧下降, 压力也急剧下降, 如图 3 所示. 立管颗粒质量流率的最大极限值可以根据 Talavera^[5]的分析给出:

$$G_{sl} = 1.754 \rho_{mf} \sqrt{g D_o} \sqrt{(1 - \epsilon_{mf}) + \tan \alpha}. \quad (1)$$

立管出口处是流化床的密相部分, 也能产生流量偏移现象. 固定一定的颗粒循环流率, 将流化速度 u_f 减小到某个值时, 立管下端出口的排料阻力增大. 稀密两相流态时, 流化风不能进入立管, 立管内的密相部分就会脱气而导致架桥; 浓相输送流态时, 下行的颗粒脱气, 发生失流化现象. 两种情况均使下落的颗粒填充在整个立管内, 造成下料堵塞, 使立管失去排料功能, 流化床的颗粒循环系统失效. 立管的压力测量表明, 这种不稳定性表现为由稳定排料压力开始逐渐上升到保持恒定, 如图 4 所示. 因此流化风的存在对立管稳定排料是非常重要的, 必要时要加强松动风.

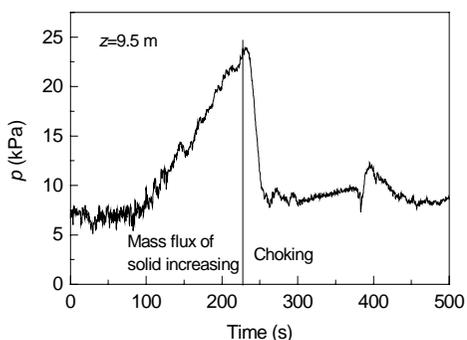


图 3 立管入口流量偏移的压力变化
Fig.3 Gas-solid flow instability at the entrance of standpipe

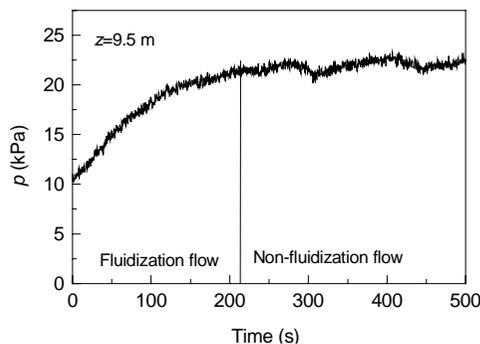


图 4 立管出口流量偏移的压力变化
Fig.4 Gas-solid flow instability at the exit of standpipe

2.3.2 流量振荡

流量振荡现象始终伴随着下行颗粒的流动过程，流量振荡的幅度和频率与流化参数有关。旋风分离器一级料腿和二级料腿内均有流量振荡现象，其特点是波动性排料，压力表现为周期性的脉动变化，频率比较低。由于颗粒性质和颗粒质量流率不同，旋风分离器一级料腿和二级料腿的压力脉动有一定的区别。

一级旋风分离器料腿的压力脉动频率比较低，一般小于 0.1~1 Hz。当颗粒质量流率比较大时，流态是浓相输送流态，在立管下部可以观察到波浪式下行的气固两相流，颗粒浓度分布疏密间隔，有明显的压力脉动特性，压力脉动的幅度随着颗粒质量流率的增加而增加^[4]，如图 5(a)所示。当颗粒质量流率比较小时，流态是稀密两相共存流态，稀密两相的交界料面上下小范围地浮动，频率比大颗粒质量流率相对高一些，如图 5(b)所示。二级旋风分离器料腿内的颗粒质量流率比较小，流态基本上是稀密两相共存形式，但颗粒比较细，属于 Geldart C 类颗粒，所以二级旋风分离器料腿内的压力脉动比较复杂，一般有两种流量振荡现象，一种是料面发生大幅度的上下升降，如图 6(a)所示，开始时下落的颗粒在立管内逐渐累积，密相料面逐渐上升，下部压力逐渐上升。当达到一定压力时，翼阀打开开始排料，密相料面下降，下部压力逐渐降低，当低到一定程度时，翼阀关闭，颗粒又开始在立管内积累，开始下一个循环。但当颗粒在管内架桥，压力传递不到翼阀，翼阀打不开，密相料面就会不断上升，出现上述的流量偏移现象。另一种是稀密两相交界料面保

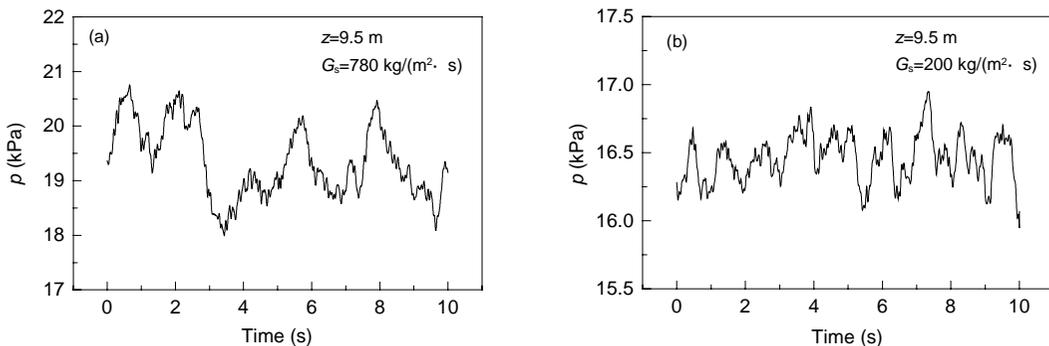


图 5 立管流量振荡时的压力脉动
Fig.5 Gas-solid flow instability of standpipe (primary cyclone dipleg)

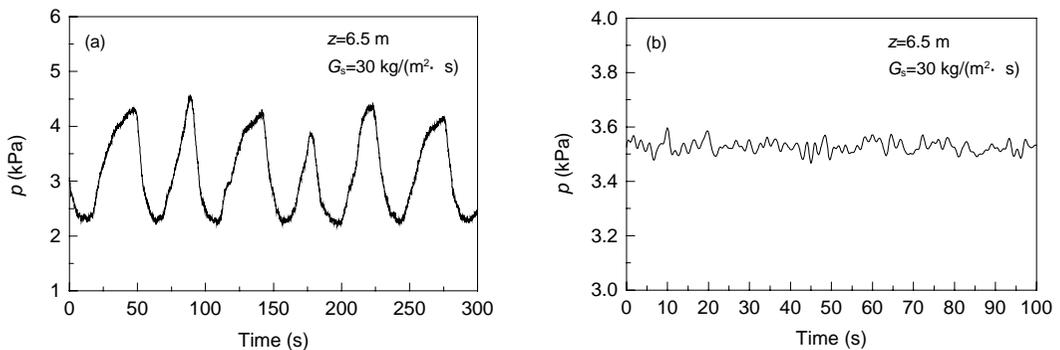


图6 立管流量振荡时的压力脉动

Fig.6 Gas-solid flow instability of standpipe (secondary cyclone dipleg)

持不变,翼阀一直保持开启状态,排料操作比较稳定,如图6(b)所示,尤其是当翼阀埋在流化床的密相床层或有松动风时.二级旋风分离器料腿发生上述何种流量振荡具有一定的随机性.

3 立管内气固流动的不稳定性讨论

提升管内的气固流动过程是气体携带颗粒上行,而负压差立管内的气固流动过程是颗粒夹带气体下行,颗粒的运动速度大于气体的速度,滑落速度 $U_{sl}=U_f-U_s$ 始终向上,即气体对颗粒的曳力与颗粒运动方向相反.另外,颗粒是逆压力梯度运动,从上部的低压端流向下部的高压端,气固两相之间的密度差别又很大,在有限的空间内造成对气体的压缩.当局部被压缩气体的压力超过其周围的气体压力时,气体发生膨胀,阻碍颗粒下行,导致气固两相局部混合密度发生变化.气体膨胀后的压力趋于减小,形成低压空穴,后续的颗粒和气体继续向下运动,填补空穴,如此反复形成了不稳定的流动,气固两相流形如波浪式地下行,颗粒浓度疏密间隔分布,产生颗粒流量和压力的脉动.但当气固流动过程中颗粒脱气过多,颗粒浓度超过 $\rho_s(1-\varepsilon_{mf})$,就会形成非流化流动,产生架桥,使颗粒循环系统失效,尤其是粘附性很强的 Geldart C 类颗粒,具有很大的潜在危害.通常采用加松动风的方法避免架桥现象.上述这种气固流动过程的不稳定性不同于由颗粒速度脉动和颗粒团聚所产生的气固流动不稳定性^[6],后者的压力脉动变化小,频率高.

立管内气固两相流的流动不稳定性对工艺过程的操作具有一定的危害性.气固流动的不稳定性不是工艺过程所需要的,一方面是颗粒流量的波动变化、压力的脉动,造成气固两相之间的不均匀分布,也会产生对设备的振动,另一方面这种不稳定性有发展为非流化流动的倾向,形成架桥,使颗粒循环系统失效,具有一定的危害性.因此气固两相顺重力下行流动应当避免这种流量不稳定性,或采取措施予以改善.这需要对气固流动的不稳定性机理、不稳定出现的条件、以及对流动过程、流化系统运转的影响作进一步的研究.

4 结论

负压差立管内气固两相流具有较强的流动不稳定性,比较典型的是颗粒流量的不稳定性.实验表明这种流量不稳定性有两种形式:一种是流量偏移,流量从一个值逐渐或突然转变为另一个值;另一类是流量振荡,流量在一定的范围内发生波动.前者是由于气固流动过程中失流化产生的,具有很大的危害性,后者是颗粒逆压力梯度运动压缩气体造成的.旋风分离器一级料腿和二级料腿都可以发生这些气固流动过程的不稳定性.负压差立管内气固两相流的流动不稳定性对工艺过程的运行具有潜在的危害性,需要进行深入的研究.

符号表：

D_b	粒管直径 (m)	U_s	颗粒速度 (m/s)
G_s	颗粒质量流率 [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	U_{sl}	滑落速度 (m/s)
G_{sl}	极限颗粒质量流率 [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	z	轴向坐标 (m)
H_d	立管插入流化床密相高度 (m)	α	颗粒内摩擦角 ($^\circ$)
u_f	流化速度 (m/s)	ε_{mf}	流化床起始流化空隙率
U_f	气体速度 (m/s)	ρ_{mf}	起始流化颗粒密度 (kg/m^3)
u_{mf}	起始流化速度 (m/s)	ρ_s	颗粒密度 (kg/m^3)

参考文献：

- [1] Geldart D, Broodryk N, Kerdoncuff A. Studies on the Flow of Solid Down Cyclone Diplegs [J]. Powder Technology, 1993, 76: 175–183.
- [2] Wang J, Bouma J H, Dries H. An Experimental Study of Cyclone Dipleg Flow in Fluidized Catalytic Cracking [J]. Powder Technology, 2001, 112: 221–228.
- [3] Jones P J, Leung L S. Downflow of Solids through Pipes and Valves [A]. Davidson J F, Clift R, Harrison D. Fluidization, Second Edition [C]. London: Academic Press, 1985. 293–329.
- [3] Geldart D, Radtke A L. The Effect of Particles on the Behaviour of Equilibrium Cracking Catalysts in Standpipe Flow [J]. Powder Technology, 1986, 47: 157–165.
- [4] 魏耀东, 刘仁桓, 孙国刚, 等. 气固两相流顺重力流动的压力脉动实验研究 [J]. 过程工程学报, 2002, 2(增刊): 422–426.
- [5] Talavera P G. Calculate Nonfluidized Flow in Cyclone Diplegs and Transition Pipe [J]. Hydrocarbon Processing, 1995, 12: 89–92.
- [6] John van der Schaaf, Filip Johnsson, Jaap Schouten C, et al. Fourier Analysis of Nonlinear Pressure Fluctuations in Gas–Solids Flow in CFB Risers—Observing Solids Structures and Gas/Particle Turbulence [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54: 5541–5546.

Instability Analysis on Gas–Solid Two-phase Flow in the Standpipe under Negative Pressure Gradient

WEI Yao-dong, LIU Ren-huan, SUN Guo-gang, SHI Ming-xian

(Dept. Chem. Eng. University of Petroleum, Beijing 102200, China)

Abstract: The paper presents an experimental study on the instability behaviors of gas-solid two-phase flow in a $\phi 150 \text{ mm} \times 11500 \text{ mm}$ standpipe under negative pressure gradient. The gas–solid two-phase flow in the standpipe is characteristic of the flowing against negative pressure and slip velocity upward, which made flow instability of the gas–solid two-phase flow. There are two kinds of instability, one is the flowrate shift resulting from non-fluidization, the other is flowrate fluctuation resulting from compressed gas. Flowrate shift happened at the entrance or the exit of standpipe and the flowrate fluctuation occurred in any part of standpipe. The instability of gas–solid two-phase flow in the standpipe has potential harm to the operation of circulating fluidized beds.

Key words: fluidized bed; gas–solid two-phase flow; standpipe; dipleg; instability