

气固脉冲流化床的流体力学特性^{*}

聂永生 刘大有

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 在直径 70 mm 的流化床中, 采用 FCC、空心玻璃珠、细沙等 A 类和 B 类颗粒, 在 0~10 Hz 的频率范围内, 测定了气固脉冲流化床的流体力学特性。采用时间继电器改变脉冲气流的频率和脉宽周期比, 利用微压传感器记录床层压力变化, 研究了瞬时床层压力、平均床层压力, 最大床层压降、起始流化速度、床层高度等随操作条件的变化规律。并对脉冲流化床中的气泡现象进行了初步的观察和研究, 发现在脉冲流化床中气泡的形成和发展受到了有效抑制, 床层中的气固接触效率可大为提高。

关键词: 脉冲流化床 流体力学 压力 床层高度 气泡

1 前 言

气固流化床被广泛应用于化工、冶金、能源、环保等众多领域中。气固流化床中, 往往由于存在气流短路而造成气固接触效率低, 流化质量差, 因此, 流化床中的气固接触效率一直是人们关注和研究的热点问题。人们采取了各种措施来强化流化床中的气固接触, 例如特殊设计的分布板, 多段床, 加入挡板或填料以及引入强制扰动和振荡。其中, 引入强制扰动和振荡的方式主要包括振动流化床和脉冲流化床^[1]。

振动流化床是利用机械装置振动整个床体或分布板, 从而带动床内颗粒跳动; 脉冲流化床则是将传统流化床的流量稳定的进气改为流量周期性波动的脉冲气流。

振动流化床设备复杂, 而且对于某些工艺上不允许或不便于振动的流化装置, 它的应用受到了限制, 因此将脉冲流化床应用于工业生产具有重要的实际意义。

据文献报道^[2~4], 在引入气流强制振荡的脉冲流化床中, 沟流和短路减少, 气泡变小, 气体和固体颗粒及构件表面间的传热、传质效率大为提高, 而且可以处理的颗粒粒径范围变宽, 在通常条件下难以流化的体系也变得较易流化。

近年来, 人们对于振动流化床进行了广泛的研究^[5], 而对于脉冲流化床的研究报道却相对较少, 人们对于脉冲流化床的流体力学特性还知之甚少。关于脉冲流化床流体力学特性的研究对于其设计和操作至关重要。

本文将对气固脉冲流化床的床层压力、床层高度、气泡现象等流体力学特性进行研究。

1998 - 03 - 18 收到初稿, 1998 - 06 - 02 收到修改稿。

联系人: 刘大有。第一作者: 聂永生, 男, 29 岁, 博士研究生。

* 本课题得到中国科学院化工冶金研究所多相反应开放实验室的资助。

2 实验

图 1 是进行脉冲流化实验的装置图。有机玻璃流化床的内径为 70 mm,高 870 mm,不锈钢分布板的孔径为 0.5 mm,开孔率为 1.8%,分布板上覆盖一层 300 目的筛网,下部气室中装填细玻璃珠,以使气体分布均匀。

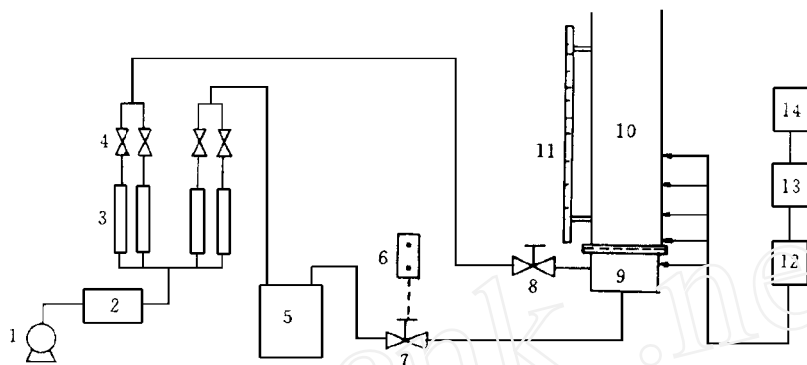


图 1 实验装置示意图

Fig 1 The Schematic diagram of the experimental apparatus

- 1-空气压缩机; 2-干燥器; 3-转子流量计; 4-针形阀; 5-缓冲罐;
6-时间继电器; 7,8-电磁阀; 9-气室; 10-流化床; 11-刻度尺;
12-压力传感器; 13-A/D 转换; 14-微机

流化床的进气气流分为两路,一路是流量恒定的稳定气流,一路是流量周期性变化的脉冲气流。用转子流量计来控制脉冲气流的平均流量,通过电磁阀的开闭使其脉动,用时间继电器调整脉冲气流的频率和脉宽。利用刻度尺测量床层高度的变化。采用 5 个微压传感器同时测量流化床气室及床层不同位置处的压力,测得的压力信号经放大和 A/D 转换,由计算机采集处理。采样频率为 100 Hz。

实验所用气体为空气,流速范围为 0.0005 ~ 0.1 m/s。所用固体物料的物性参数见表 1。

表 1 实验所用固体颗粒的物性
Table 1 Physical properties of solids used

颗粒	$d_p/\mu\text{m}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	u_{mf}/ms^{-1}
FCC-	62 ~ 78	1598	0.007
FCC-	38 ~ 62	1020	0.001
空心玻璃珠	38 ~ 62	821.7	0.0009
沙	200 ~ 220	2600	0.03

3 结果与讨论

3.1 瞬时压力波动

作者对不同颗粒、不同操作条件下的脉冲流化床的瞬时床层压力进行了测量。随着操作条件的不同,脉冲流化床的瞬时床层压力波动呈现出如图 2 所示的四种不同类型。

类型 I:如果通气阶段和停气阶段的时间都较长,即脉冲频率较低,那么刚开始通气时,床层空隙率较小,此时颗粒受到的气流作用力大于颗粒本身的重量,床层中的颗粒在气流作用下处于加速运动状态,同时由于床层中颗粒向上运动时要受到壁面的摩擦阻力,所以床层压力会迅速升高,并超过单位截面面积床层中的颗粒重量。床层空隙率由下向上逐渐增大,床层高度也随之升高,压力升高到一极值后,又开始逐渐降低,在这一过程中,床层中一般不会出现气泡,处于“活塞流”状态。然后床层过渡到平稳流化状态,床层中出现气泡。由于气泡的存在,床层压力会呈现波动,其平均值等于单位床层截面积中的颗粒重量(图 2(a)中的水平虚线所示)。进入停气阶段后,实质上相当于一个流化床的床层塌落过程,床层中的气体不断逸出,床层高度和压力都逐渐降低。在这个过程中,如果没有稳定气流存在,或者稳定气流的流速小于起始流化速度,则除了在停气阶段开始时会有气泡从床层中逸出外,床层中不会出现气泡。

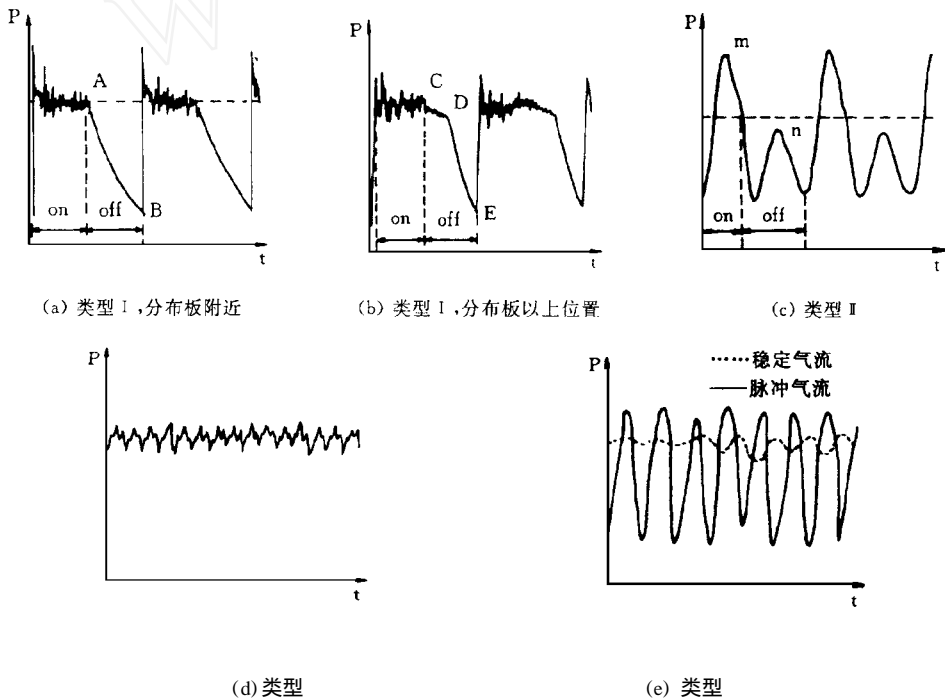


图 2 脉冲流化床床层压力波动的类型
Fig 2 Patterns of the pressure fluctuation in pulsed fluidized beds

对于在流化床分布板附近测量的压力,在停气阶段的压力变化曲线可以明显地看到一段直线(图 2(a)中的 AB 段),而对于在分布板以上其它位置测量的压力信号,则出现明显的

两段斜率不同的直线(图 2(b)中的 CD 段和 DE 段)。通过对流化床塌落过程的动力学分析,得到了类型 的脉冲流化床停气阶段压力变化的数学模型,解释了出现不同斜率直线的现象^[6]。例如,采用 FCC- 颗粒, $U_{g,p} = 2 u_{mf} \sim 6 u_{mf}$, $U_{g,s} < 0.8 u_{mf}$, 脉冲频率为 0.1 ~ 1.0 Hz 时,床层压力波动的类型属于类型 。

类型 :如果脉冲频率增大,或频率不变而缩短通气时间,即减小脉宽周期比,则通气阶段中平稳流化状态所占时间缩短,床层中气泡明显减少。与类型 类似,通气阶段压力升高到一极值后(图 2(c)中的 m 点),又开始逐渐降低。但停气阶段的压力变化规律则与类型 有所不同,停气后床层压力先是急剧下降,然后会再次升高,并达到一极值(图 2(c)中的 n 点),又逐渐降低。这种现象文献中也有报道^[2,7],而且当颗粒粒径较大时更为显著。例如,采用 210 μm 的细沙,当 $U_{g,p} = 2 u_{mf}$, $U_{g,s} = 0$, 通气时间为 0.1 s, 停气时间为 0.3 s 时,会出现类型 的床层压力波动。

类型 :随着脉冲频率继续增大,脉冲流化床会逐渐接近于同样平均流量的稳定气流作用下的流化床。此时床层中有大量气泡存在,床层压力波动的幅度较小(图 2(d))。例如,采用 FCC- 颗粒, $U_{g,p} = 2 u_{mf} \sim 6 u_{mf}$, 脉冲频率为 4.0 ~ 6.0 Hz 时,出现类型 的压力波动。

类型 :当脉冲频率继续增大至某一频率附近时,床层压力波动的幅度反而会变大,若再增大频率,压力波动幅度又会减小。从图 2(e)中可以看出,此时的压力波动幅度比同样平均流量的平稳气流作用下的流化床的压力波动幅度要大得多,但两者的频率基本相同,文献中称这种现象为共振^[8]。

图 3 是对 1000 g FCC- 平稳流化时的压力波动信号进行频谱分析的结果。从图中可以得到床层的自然频率约为 6.8 Hz。若改用同样平均流量的脉冲气流,则当脉冲频率为 7.0 Hz 时,会出现共振现象。可见,正如文献中所说,共振频率基本上等于床层的自然频率^[8]。

在类型 的操作条件下,床层中几乎不会出现气泡,在通气阶段,床层中的颗粒处于加速运动状态,气固间的相对速度比平稳流化时要大得多。在类型 的通气阶段初期和停气阶段,也没有气泡出现。床层中气泡少,则“短路”的气流就少;气固间相对速度大,有利于气固间的传质和传热。所以,在类型 的条件下,或者在类型 的条件下而且通气时间相对较短时,流化床中的气固接触效率可以大为提高。而在类型 的条件下,床层中的情况基本接近于平稳流化,床层中存在大量气泡,气固接触效率不会有明显改善(至于类型的条件下气固接触效率是否会有明显改善,作者还将做进一步的研究)。所以,为了有效提高气固接触,并且考虑到实际工业应用,脉冲流化床的操作频率不能太高,应尽量在类型 和类型 的条件下进行操作。通气时间不应过长,最好在达到平衡流化状态前停气;停气时间也不能太短,要使床层有一段时间进行“回缩”,最好让床层降低到起始流化时的高度。

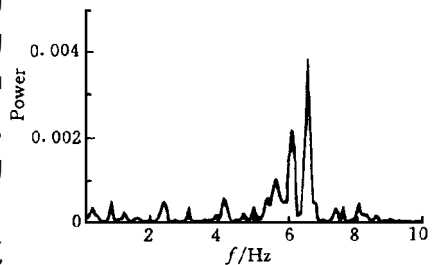


图 3 流化床压力波动的频谱分析
Fig 3 Power spectrum of the pressure signal of the fluidized bed with steady gas flow (1000 g FCC- , $\bar{u}_g = 2 u_{mf}$)

3.2 平均床层压力

图 4 是稳定气流和不同频率的脉冲气流作用下的流化床的平均床层压降。从图中可以看出,当气体流速较小,床层处于固定床状态时,在同样的平均气体流速下,脉冲气流作用下的床层压降比平稳气流作用下的床层压降要大,而当气体流速较大,床层处于流化状态时,脉冲气流作用下的床层压降比平稳气流作用下的床层压降要低。

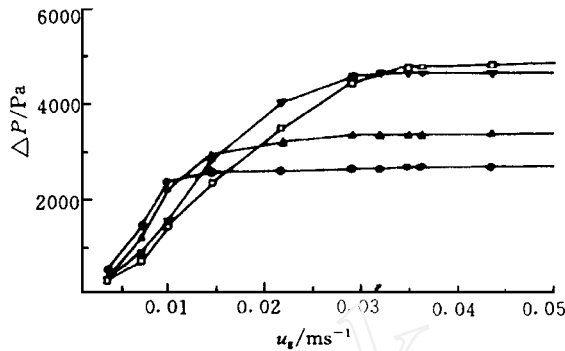


图 4 稳定气流和脉冲气流作用下的流化床的平均床层压降

Fig 4 The time-averaged pressure drop in steady and pulsed fluidized beds (2000 g Sand, $I=0.5$)
—稳定气流; —●—0.1 Hz; —■—0.5 Hz; —▼—2.5 Hz

脉冲气流的流速 u_g 可以表示为平均流速 \bar{u}_g 和一个脉动速度 u_g 的和,即 $u_g = \bar{u}_g + u_g$, 脉冲气流作用下的固定床的床层压降为

$$(\Delta P/H)_p = \frac{1.75(1-\epsilon)_g(\bar{u}_g + u_g)^2}{3 d_p} + \frac{150(1-\epsilon)_g^2 \mu (\bar{u}_g + u_g)}{3 \cdot 2 d_p^2}$$

它的平均值为

$$\begin{aligned} (\Delta P/H)_p &= \frac{1.75(1-\epsilon)_g(\overline{(\bar{u}_g + u_g)^2})}{3 d_p} + \frac{150(1-\epsilon)_g^2 \mu \bar{u}_g}{3 \cdot 2 d_p^2} \\ &= (\Delta P/H)_s + \frac{1.75(1-\epsilon)_g \overline{(u_g)^2}}{3 d_p} = (\Delta P/H)_s + (\Delta P/H) > (\Delta P/H)_s \end{aligned}$$

所以,脉冲气流作用下的固定床的床层压降要比同样平均流速的稳定气流作用下的固定床床层压降高。

当床层处于流化状态时,如果气流流速是稳定的,则床层压降等于单位床层截面积上颗粒的重量。而对于脉冲流化床,它的停气阶段是床层塌落过程,颗粒会逐渐在分布板上堆积。这一阶段的床层压降要小于平稳流化时的床层压降,尽管在通气阶段初期床层压降大于平稳流化时的床层压降,但这段时间很短,无法弥补停气阶段的压力降低,所以平均的床层压降要低。本文研究了脉冲频率、脉宽周期比和气量比对平均床层压力的影响,结果见图 5。脉冲频率越低,或者脉宽周期比越小,停气时间就越长,平均床层压降也就越低(见图 5(a)和(b))。进气所流中脉冲成份越多,即 $U_{g,p}/U_{g,s}$ 越大,床层平均压降的降低就越明显(见图 5(c))。

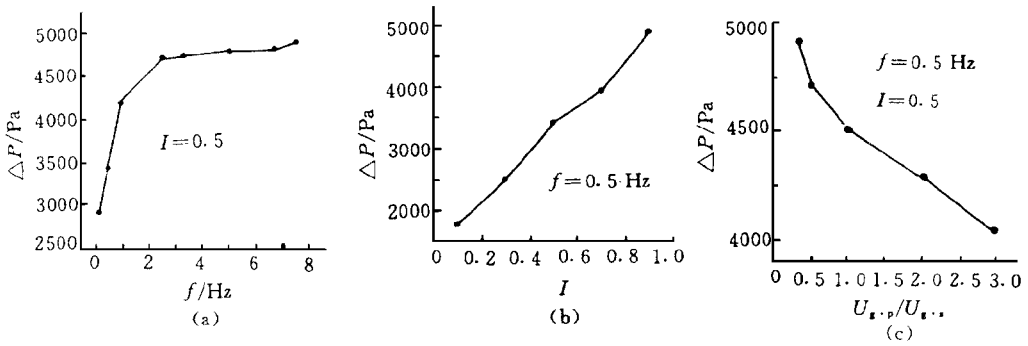


图 5 脉冲频率、脉宽周期比和气流比对脉冲流化床平均床层压降的影响
 Fig 5 The effects of frequency f , duration ratio I and $U_{g,p}/U_{g,s}$ on the average pressure drop
 (Particle: 2000 g Sand, $\bar{u}_g = 2 u_{mf}$)

3.3 起始流化速度

如果采用研究普通流化床的方法来定义脉冲流化床的起始流化速度,即将床层压降随气流变化的曲线上的固定床段和流化床段延长相交,取交点对应的气速为起始流化速度。那么从图 4 可以看出,脉冲流化床的起始流化速度要小于普通流化床的起始流化速度。

3.4 最大床层压力

最大床层压力对于脉冲流化床的设计和操作来说是一个重要参数。图 6 是不同操作条件下最大床层压力的变化情况。随着脉冲频率的增大,最大床层压力降低,当脉冲频率接近床层的自然频率时,最大床层压力又会上升并出现一极值(见图 6(a)),这个频率对应于共振频率,此时床层压力波动幅度会突然增大,所以最大床层压力会升高。

在同样频率和同样的平均气体流量下,若脉宽周期比小,则通气时气体的流速就大,最大床层压降也大,随着脉宽周期比的增大,最大床层压力降低(见图 6(b))。

进气气流中脉冲成份越多,最大床层压降越大(见图 6(c))。

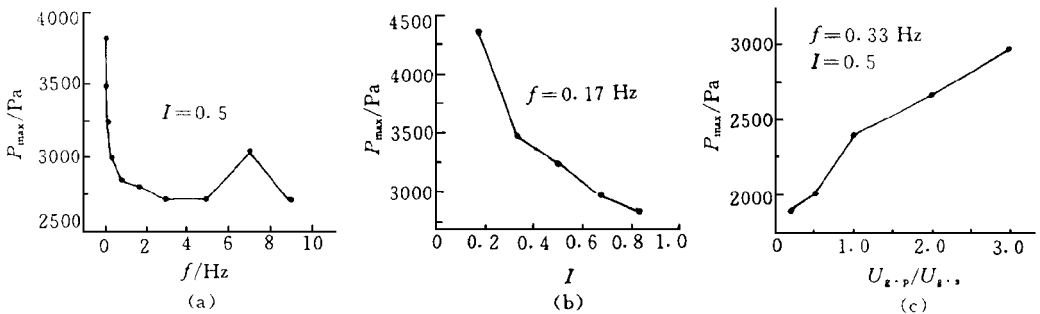


图 6 脉冲流化床的最大床层压力
 Fig 6 The maximum pressure drop in pulsed fluidized beds
 (FCC, 1000 g, $\bar{u}_g = 2 u_{mf}$)

3.5 床层高度

脉冲流化床的床层高度变化非常大而且快,很难测量它的瞬时床层高度。作者测量了不同操作条件下的脉冲流化床的最大床层高度和最小床层高度。

从图7(a)中可以看出,随着脉冲频率增大,最大床层高度降低,并逐渐接近同样平均流量的稳定气流作用下的流化床的床高;最小床层高度随脉冲频率增大而增大。

从图7(b)中可以看出,在同样的脉冲频率下,如果脉宽周期比增大,则通气阶段的气体流速降低,最大床层高度也随之降低;但如果脉宽周期比过小,虽然通气时气流速度很大,但床层没有足够时间上升到它应该达到的最大高度,所以最大床高反而较小。最小床高决定于床层塌落过程,随着脉宽周期比增大,停气时间缩短,床层高度降低得就少,即最小床层高度增大。

从图7(c)可以看出,脉冲气流所占成份较小时,床层高度变化主要受稳定气流控制,床高波动较小。

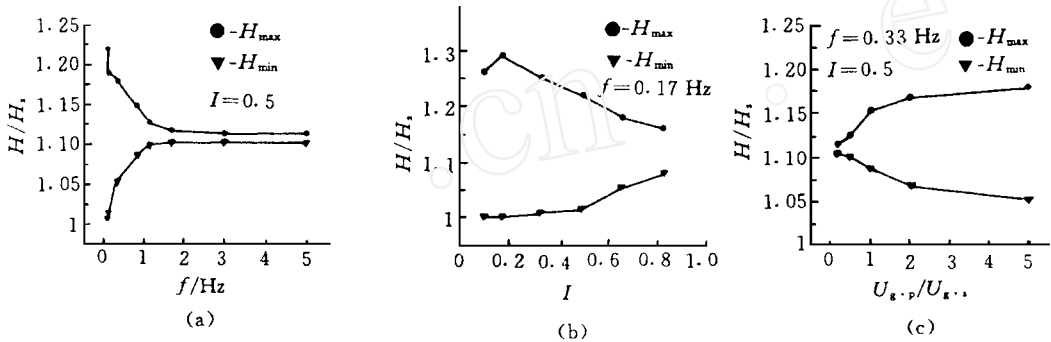


图7 脉冲流化床的最大床层高度和最小床层高度

Fig 7 The maximum and minimum bed height of pulsed fluidized beds
(FCC, 1000 g, $\bar{u}_g = 2 u_{mf}$)

3.6 气泡现象

脉冲流化床中的气泡特性和平稳流化时有很大不同。在稳定气流作用下,流化床中的气泡沿床高聚并,逐渐变大,最后在床层表面破裂。在脉冲流化床中,在通气阶段初期,床层底部会出现较大的气泡或空穴,这些气泡和空穴在上升过程中逐渐破裂变小,甚至消失,所以床层中气泡直径的分布是沿床高减小,和平稳流化时正好相反。在某些操作条件下,在床层表面观察不到气泡的破裂现象,床层上部几乎没有气泡。

一方面,流化床中气泡的形成和发展需要一段时间,在平稳气流作用下的流化床,已经发展到了“定态”,床层中会存在大量气泡。在脉冲流化床中,气固两相的运动始终处于非稳态,抑制了气泡的形成和发展,所以脉冲流化床中气泡较少,气泡直径也较小。

另一方面,在平稳气流作用下的鼓泡流化床中,由于大量气泡的存在,床层的平均空隙率较小,床层处于一种“疏松”状态,气泡上升过程中受到的阻碍很小,可以聚并长大。在脉冲流化床中,开始通气时,床层还处于空隙率较小的“密实”状态,先是床层底部的空隙率增

大,出现气泡,整个床层被抬升,但此时床层上部的空隙率仍较小,气泡上升过程中受到很大的阻碍作用,所以气泡很难聚并,而且会破裂为小气泡,甚至消失。

气泡变小,可以增大气泡和乳化相间的传质传热速率;气泡减少,短路的气流就少,这些因素都有利于提高气固接触效率。

4 结 论

1 随操作条件不同,脉冲流化床的瞬时床层压力波动呈现四种不同类型。为了有效提高气固接触效率,应在类型 和类型 的条件下进行操作。

2 在固定床阶段,脉冲气流作用下的平均床层压降大于平稳气流作用下的平均床层压降;在流化床阶段,脉冲流化时的平均床层压降小于平稳流化时的平均床层压降。平均床层压降随频率增大而增大,随脉宽周期比增大而增大,随 $U_{g,p}/U_{g,s}$ 的增大而减小。

3 脉冲流化床的最大床层压降随频率增大而降低,但在“共振”频率附近会升高并出现一极值;最大床层压降随脉宽周期比的增大而减小,随 $U_{g,p}/U_{g,s}$ 的增大而增大。

4 随脉冲频率和脉宽周期比的增大,最大床层高度减小,最小床层高度增大,但如果脉宽周期比过小,最大床高反而降低;随 $U_{g,p}/U_{g,s}$ 的增大,床层高度的波动变大。

5 在脉冲流化床中,气泡的形成和发展受到抑制,气泡沿床高逐渐变小,甚至消失,脉冲流化床中的气固接触效率较高。

符 号 说 明

d_p	——颗粒粒径, μm	p_{\max}	——最大床层压力, Pa
f	——脉冲频率, Hz	$U_{g,p}$	——脉冲气流速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
H	——床高, m	$U_{g,s}$	——稳定气流速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
H_{\max}	——最大床高, m	u_g	——瞬时气速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
H_{\min}	——最小床高, m	\bar{u}_g	——平均气速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
H_s	——静床高, m	u_{mf}	——起始流化速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
l	——脉宽周期比, = 通气时间/总周期时间	ρ	——颗粒密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
p	——床层压力, Pa		

参 考 文 献

- Baird M H I. British Chem Eng, 1966, 11(1): 20 ~ 25
- Wong H W, Baird M H I. Chem Eng J, 1971, (2): 104 ~ 113
- Kobayashi M, Ramaswami D, Brazelton W T. Chem Eng Prog Sym Ser, 1970, 66(105): 58 ~ 67
- 严建华, 岑可法, 康齐福. 浙江大学学报, 1986, 20(6): 123 ~ 131
- Gupta R, Mujumdar A S. in: Mujumdar A S, ed. drying '80. New York: Hemisphere Pub. Co, 1980. 141 ~ 150
- Nie Y S, Liu D Y. in: Zhou L X, Li X F, ed. Multiphase Fluid, Non-newtonian Fluid and Physico-chemical Fluid Flows. Beijing: International Academic Publishers, 1997. 35 ~ 43
- Kobayashi M, Ramaswami D, Brazelton W T. Chem Eng Prog Sym Ser, 1970, 66(105): 47 ~ 57
- Bi H T, Grace J R, Zhu J. Power Technology, 1995, 82: 239 ~ 253

(下转第 372 页)

STUDIES OF GAS PHASE ETHYLENE POLYMERIZATION IN FLUIDIZED-BED REACTOR WITH CONDENSED MODE SELECTION OF DEW POINT INCREASING COMPONENT AND ITS EFFECT ON THE HEAT PROPERTY OF POL YMERIZATION SYSTEM

Chen Aihui Yang Yongrong Rong Shunxi

(Dept of Chem Eng , Zhejiang University , Hangzhou , 310027)

ABSTRACT An investigation to the increase of capacity of removal heat from ethylene polymerization in gas-solid fluidized-bed reactors , with addition of inert medium which is apt to be condensed , was carried out in this work. With a suitable thermodynamics model , a simulation was taken to investigate the effects of various fraction of various inert medium on the heat properties of polymerization system. It is likely reasonable that based on the operating conditions there are three possible types of modes , i. e. , single temperature rising , partial and total evaporation of DIPC , existed in the gas-phase fluidized bed reactors in using condensation mode for ethylene polymerization.

Key words : Gas phase polymerization , Ethylene polymerization , Fluidized-bed reactor , Condensed Mode

(上接 356 页)

HYDRODYNAMICS OF GAS-SOLID PULSED FLUIDIZED BEDS

Nie Yongsheng Liu Dayou

(Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080)

ABSTRACT The hydrodynamics of pulsed fluidized beds was studied with four kinds of particles of the category of A and B in a frequency range of 0 to 10 Hz. The effects of operating conditions on the pressure drop and bed height were discussed. The operating conditions studied include pulse frequency , duration ratio and $U_{g,p}/U_{g,s}$. Four kinds of patterns of pressure fluctuation can be obtained with different operating conditions. The bubbling phenomena in pulsed fluidized beds were also observed. The formation and development of bubbles are restricted in the pulsed fluidized bed and , hence , the gas-solid contact can be enhanced.

Key words : Pulsed fluidized bed , Hydrodynamics , Pressure fluctuation , Bed height , Bubble