

整流子对错流移动床颗粒行为的影响

陈允华, 朱学栋, 吴勇强, 朱子彬

(华东理工大学大型工业反应器工程教育部工程研究中心, 上海 200237)

摘要: 在矩形错流移动床中考察了整流子对移动床内颗粒移动、空腔、贴壁等现象的影响. 实验结果表明, 在有错流的条件下, 床层内颗粒下移速度表现为近上游面的颗粒快于近下游面的颗粒, 适当调整整流子位置有可能使床层内颗粒在某一气速下以几乎相同的速度下移. 与无整流子的装置相比, 整流子的设置能推迟移动床空腔的生成并减小空腔尺寸, 其横向位置离上游面越远对空腔影响越小; 但设置整流子将降低错流移动床的贴壁临界值, 其横向位置离上游面越远对贴壁影响越大. 为定量描述空腔尺寸和贴壁临界值, 将床层简化为由整流子中心位置决定的2个虚拟流道, 并分别建立了数学模型, 模型计算值与实验值大致相符.

关键词: 错流移动床; 整流子; 颗粒速度; 空腔; 贴壁

中图分类号: TQ051.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2007)04-0639-07

1 前言

通常在料仓等装置的出口处设置整流子以改善颗粒流动, 如 Arashi 等^[1]、曹晏等^[2,3]、Yang 等^[4]均发现在颗粒床中设置整流子可明显改善颗粒移动的不均匀程度. UOP 公司开发的用于连续重整工艺的移动床径向反应器中还原区和出料区等处也设置有整流子^[5]. 然而, 以上对整流子作用的报道仅是在无错流气速或低错流气速条件下进行的研究, 未涉及高气速下颗粒的移动和移动床的空腔以及贴壁现象, 而后两种现象决定了错流移动床中气体流速的上限值, 是开发移动床反应器必须考虑的. 此外, 一些学者^[6-11]虽对错流移动床内空腔和贴壁现象进行了研究, 但均未在移动床内设置整流子.

本工作以小米为物料, 在矩形移动床冷模装置中分别设置锥形整流子或 Binsert[®]整流子^[4], 考察整流子位置等因素对移动床内颗粒行为的影响.

2 实验装置与流程

实验装置如图 1 所示, 由料斗、移动床层主体及排料机组成. 为方便观察床层内颗粒状态, 移动床主体材料使用透明有机玻璃. 错流区床层高度 $H=430$ mm, 上下均有料封段, 上部料封段高 $H'=420$ mm, 下部料封高 $H''=700$ mm, 床厚度 $D=120$ mm, 沿气流方向的床层长度 $L=400$ mm. 为保证流入床层的气速均匀, 在床层进气面(称为上游面)设置了文丘里式渐扩段及整流格栅. 颗粒排料采用星形排料器, 由步进电机带动, 调频装置控制电机转速以控制床内颗粒流速.

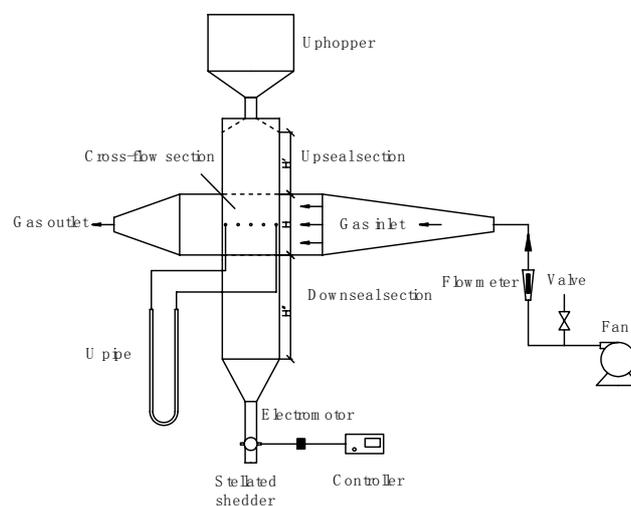


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

在实验装置的下部料封区设置整流子如图 2 所示. 锥形整流子截面呈正立的等边三角形, 叶片长 100 或 160 mm; Binsert[®]整流子如倒八字形, 叶片长 160 mm, 下端开口宽 100 mm, 两叶片间张角 60°. 锥形整流子尖端距上游面的水平距离有 3 种, 分别为 300, 200, 100 mm; 距错流区底端的纵向距离为 200 mm. 以无整流子的实验作为对比. 为考察整流子纵向位置的影响, 以叶片长 160 mm、整流子尖端距错流区下端 500 mm 对称放置(距上游面 200 mm)的装置作对比.

本实验的上游面(气体进口面)和下游面(气体出口面)的壁面材料为约翰逊网或丝网, 开孔率均为 30%. 以小米为颗粒物料, 物性数据见表 1.

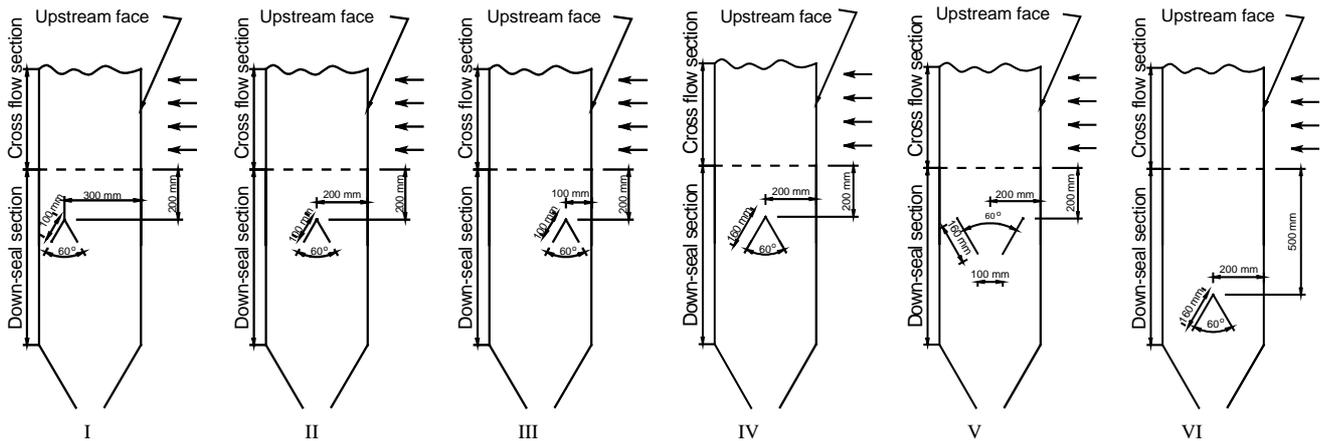


图2 整流子的位置示意图

Fig.2 Configurations with internals

表1 颗粒物性参数

Table 1 Parameters of particles

Diameter, D_p (mm)	Bulk density, ρ (kg/m ³)	Internal angle, ϕ (°)	Friction angle		
			Plexiglass, ϕ_k (°)	Johnson-net, ϕ_w (°)	Mesh-screen, ϕ_w' (°)
1.92	802.7	39	11.64	11.7	19.19

3 结果与讨论

3.1 对颗粒速度分布的影响

若移动床内不设置整流子,当无错流风速或错流风速很低时,床层内颗粒呈平推流下移,仅边角处颗粒流速滞后;随着错流风速逐渐增大,上游面处的颗粒下移速度逐渐加快,下游面处颗粒的下移速度减慢甚至停止下移,如果错流风速足够大,甚至整个床层的颗粒完全停止下移^[1,2,6-10,13,14].

本实验以染色的小米为示踪颗粒,在错流区中央(距上、下端各 215 mm)沿轴向跟踪一排示踪颗粒的运动,以秒表计时,将示踪颗粒纵向移动距离除以所用时间作为颗粒速度.每次对颗粒速度的测量在 1~3 min 之内,尽可能消除床内纵向气流对颗粒流动的影响.

当整流子对称放置于床层中时(包括锥形整流子的 II, IV 以及 Binsert[®]整流子的 V 型),颗粒运动规律与上述一致.但是当整流子不对称放置于床层中时,在有错流风速条件下颗粒运动则有所不同.

为考察整流子对颗粒运动的影响,引入“平均相对偏差”作为比较标准.平均相对偏差是指一组数据与其均值的绝对偏差的平均值除以均值,用于评测这组数据的离散度,平均相对偏差值越大数据越离散.图 3 是上、下游面均为约翰逊网、锥形整流子不对称放置的 I 和 III 型装置的颗粒速度分布. I 型装置[图 3(a)~3(d)]在无错流风速时,由于整流子的作用,靠近下游面的颗粒下移速度慢于近上游面的颗粒,平均偏差 0.083;当有错流气

体流动时,近上游面的颗粒速度更快,如图中错流风速为 0.47 m/s 时,可以看出床层颗粒层明显分成了两部分,此时平均偏差 0.549;随着错流风速的增大平均偏差也增大,如错流风速为 0.56 m/s 时平均偏差增加到 0.90;当错流风速较高(达到 0.70 m/s)时,近下游面的颗粒停止下移,即发生了“贴壁”现象.

图 3(e)~3(h)是 III 型装置的颗粒速度分布.整流子偏向于上游面,因而当无错流风速时,靠近上游面的颗粒下移速度慢于近下游面的颗粒,此时颗粒的平均相对偏差 0.329,床层内颗粒移动速度不均匀;随着错流风速的增加,近上游面的颗粒速度加快,达到床内颗粒的平均速度,如图中错流风速为 0.47 m/s 时,平均相对偏差反而降低到 0.230;当继续增加错流风速,近上游面颗粒下移速度超过了床内颗粒的平均速度,床内颗粒速度又变得不均匀,如图中错流风速为 0.56 m/s 时,平均相对偏差又增大到 0.372;当错流风速为 0.70 m/s 时,平均相对偏差 0.964,近下游面的颗粒停止下移.

以上结果说明,整流子的设置能影响床层颗粒的运动,适当向上游面侧调节整流子位置则可能使床内颗粒在较高错流风速下保持均匀下移.

3.2 对空腔的影响

当风速超过一定程度时,将使靠近上游面的颗粒与壁面脱离,在上游面与颗粒床层之间形成空腔(Cavity).严重时空腔将造成短路,致使大部分气体从空腔中穿过,不利于移动床正常操作.

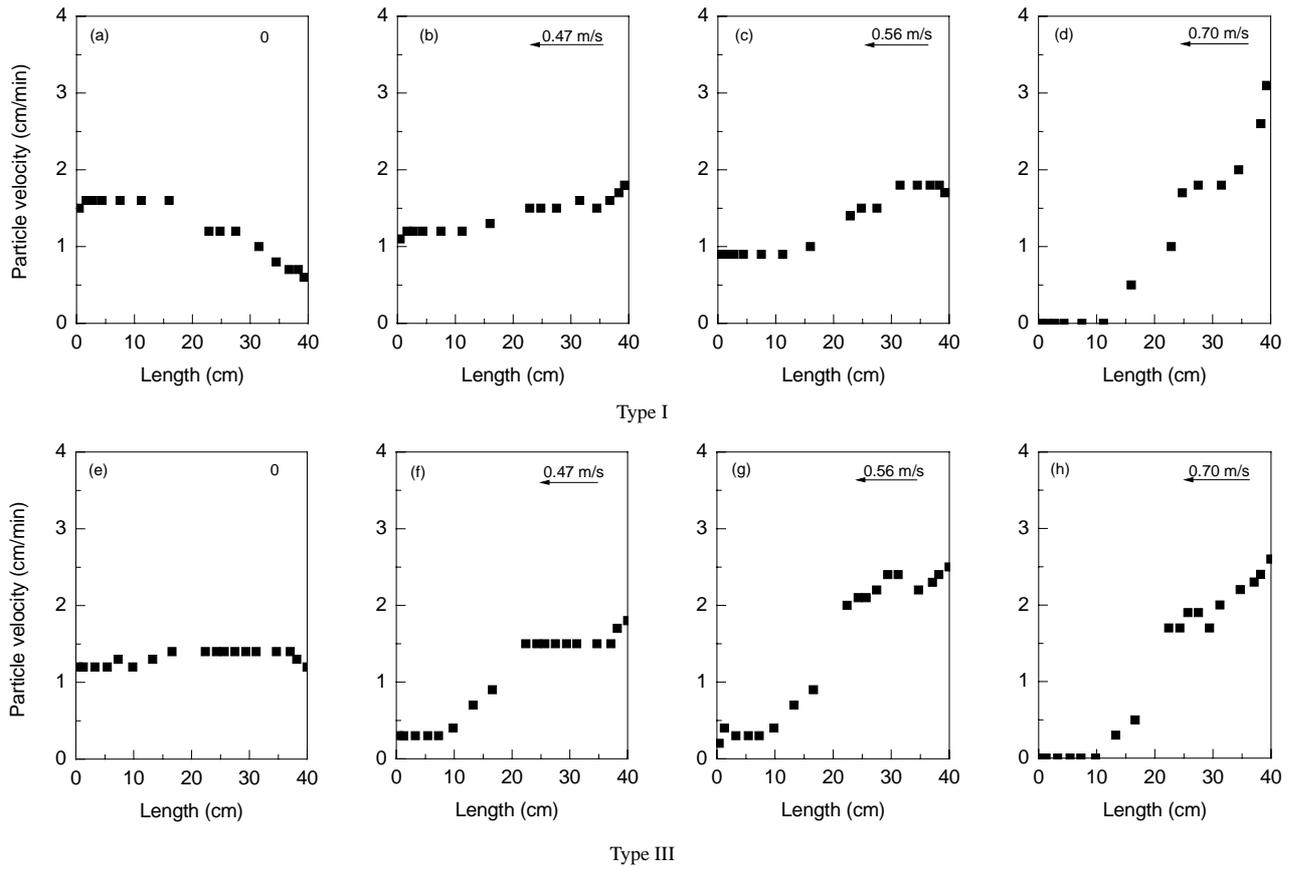


图 3 不同错流流速下颗粒速度分布

Fig.3 Particle velocity distributions under various gas velocities (Face: Johnson-net)

表 2 各装置的空腔初始值和贴壁临界值

Table 2 The critical values of pinning in various apparatuses

Face			I	II	III	IV	V	VI	No insert
Johnson-net	Cavity	Gas velocity (m/s)	0.31	0.30	0.45	0.35	0.34	0.41	0.27
		Pressure drop (Pa)	838	784	1014	952	885	1023	608
	Pinning	Gas velocity (m/s)	0.60	0.78	0.71	0.61	0.66	0.75	0.79
		Pressure drop (Pa)	1380	2129	1942	1585	1664	2096	2177
Mesh-screen	Cavity	Gas velocity (m/s)	0.38	0.40	0.39	0.41	0.34	0.38	0.25
		Pressure drop (Pa)	936	1015	943	1023	813	920	587
	Pinning	Gas velocity (m/s)	0.46	0.51	0.46	0.49	0.53	0.56	0.61
		Pressure drop (Pa)	1210	1376	1162	1305	1312	1456	1676

实验过程中缓慢增大错流流速,当观察到上游面出现微小空洞(约 3~5 倍颗粒直径)或少量颗粒出现流化时,即认为空腔已发生^[11].各装置的空腔初始值列于表 2,从表可见,设置了内构件的装置空腔发生的初始值大都略大于无内构件的装置.以壁面为约翰逊网的实验为例, I, II, III, IV, V 型空腔初始流速分别为 0.31, 0.30, 0.45, 0.35, 0.34 m/s,而无整流子的装置空腔初始值为 0.27 m/s.从表也可以看出,整流子位置越靠近上游面,空腔初始流速越大,如 III 型高于 I 型.说明在横向位置上整流子越靠近上游面越有利于推迟空腔的发生.

空腔通常发生在错流区上游面顶端位置,错流流速较低时,形成的空腔近似为半圆形,将此半圆的半径定

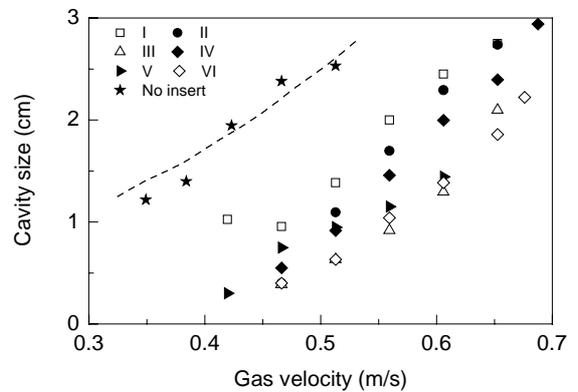


图 4 空腔尺寸与错流流速的关系

Fig.4 The relation between cavity size and gas velocity (Face: mesh-screen)

义为空腔尺寸^[11]。空腔尺寸随错流流速的增加而增加,各装置的空腔尺寸与错流流速的关系如图4,在相同错流流速下无整流子装置中空腔尺寸通常大于有整流子装置,例如当壁面材料为丝网、错流流速为0.51 m/s时,无整流子装置空腔尺寸为2.53 cm,而I, II, III, IV, V型空腔尺寸分别为1.39, 1.10, 0.63, 0.93和0.95 cm。说明设置整流子有利于减小空腔尺寸。

3.3 对贴壁的影响

贴壁(Pinning)是指在操作过程中移动床内颗粒受到错流气体的作用,增加了颗粒床层对下游面的摩擦力,当错流流速或压降超过一定值时,造成靠近下游面的颗粒床层与壁面的摩擦力增大,以至足以支撑部分或全部颗粒重量而使颗粒不再下移。移动床内一旦出现贴壁,颗粒将形成死区,使反应恶化甚至中断生产,是移动床操作中应避免的。

实验时将错流流速缓慢增大,当观察到下游面颗粒停止下移时则认为贴壁已发生,此时的错流流速和压降分别为贴壁临界流速和压降。各装置的贴壁临界值列于表2。移动床错流流速与压降的关系可用欧根公式计算,在此以贴壁临界压降作比较。从表可以看出,床层宽度同为400 mm,但设置了整流子装置的贴壁临界值与无整流子的装置相比均有所降低,如壁面为丝网时,I, II, III, IV, V型贴壁临界压降分别为1210, 1376, 1162, 1305, 1312 Pa,都比无整流子的装置贴壁临界值1676 Pa低很多。

对于壁面为丝网的装置,II型和IV型中锥形整流子均对称放置,只是叶片长度不同,但是两者贴壁临界压降大致相同。V型的Binsert®整流子同样也会降低贴壁临界值。考虑到存在测量误差,II, IV, V这三种整流子对称放置的情况贴壁临界值基本相等,分别为1376, 1305, 1312 Pa,说明整流子叶片长度和形状对贴壁的影响不明显。

然而对于壁面为约翰逊网的II型整流子位置(整流子叶片长为100 mm,对称放置于床层中),贴壁临界压降却仍保持较高的值,与无整流子装置几乎一致,可能是因为在这两种情况下整流子虽然将床层分成两部分,但这两部分颗粒之间没有相对滑移而保持相对一致的运动,抵消了整流子的作用,相当于无整流子的床层。当整流子叶片长度较大时(如叶片长160 mm的IV和VI型)整流子作用明显,因而对贴壁临界值产生了较大影响。这说明整流子要对床层产生影响,其叶片长度必须超过某一值。这一长度与颗粒物性、壁面材料等因素有关,本文暂不详细讨论。

比较IV型和VI型位置(整流子距错流区底端分别

200和500 mm)可知,当整流子远离错流区时,贴壁的临界值均有所提高,如当壁面为约翰逊网时VI型的贴壁临界压降(2096 Pa)大于IV型的临界值(1585 Pa),更接近无整流子装置的临界值(2177 Pa)。说明整流子远离错流区时作用减弱。

取错流区中央(距上、下端各215 mm)处贴壁厚度来考察贴壁颗粒层厚度与压降的关系,结果示于图5。无论哪种装置,贴壁厚度与压降均呈线性关系。整流子离错流区较远的VI型贴壁厚度(图5中空心菱形点)与无整流子的装置(图5中虚线)相差不大,仅略大于后者;而同样横向位置但整流子离错流区近的IV型装置在相同压降下贴壁厚度大于无整流子装置及VI型,也说明整流子远离错流区时作用减弱。

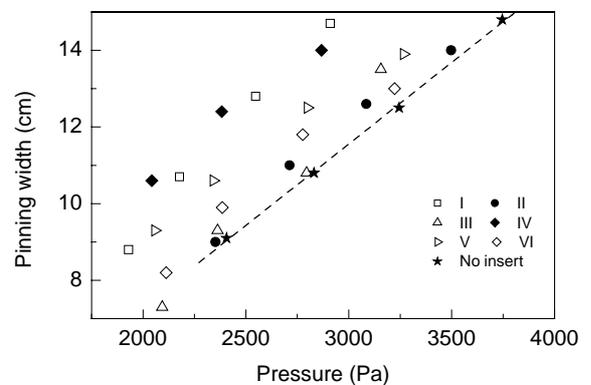


图5 贴壁厚度的比较

Fig.5 Comparison of pinning widths (Face: Johnson-net)

4 数学模型

从以上对颗粒行为的实验观察可见,当移动床内设置整流子后,其颗粒行为的基本规律与无整流子装置相似,如随着错流流速的增大移动床内也会出现空腔和贴壁、空腔尺寸和贴壁厚度随流速的增大而增大,但其特征有别于无整流子移动床。为简化,本模型提出以下处理方法:假设因整流子的作用,床层沿纵向被分成2个虚拟的流道,虚拟流道的宽度由整流子中心位置决定。上游面虚拟流道宽度为整流子中心与上游面的横向距离,是空腔模型的主要参数;下游面虚拟流道宽度为整流子中心与下游面的横向距离,用于计算贴壁行为。

4.1 空腔

假设当颗粒层堆积高度足够高,颗粒层中的应力将不随高度的变化而变化^[15],垂直压力和近壁处压力在垂直方向径向无分布,即以截面平均压力来代替。当移动床内错流流速不太高、未出现贴壁时,无整流子装置中的空腔尺寸满足以下方程组^[11]:

$$\alpha u_p \left(\ln \frac{r_0}{R} + \frac{4-\pi}{4} \right) + \beta u_p^2 \left(\frac{r_0}{R} - \frac{\pi}{4} \right) = \frac{\alpha}{2} (u_p + u_c) + \frac{\beta}{3} (u_p^2 + u_p u_c + u_c^2), \quad (1)$$

$$u_c = \frac{H - \pi r_0}{H - 2r_0} u_p, \quad (2)$$

$$2 \left(\rho g - \frac{\tau_c}{D} \right) R^2 - \left(\frac{4}{\pi} \tau_w + \sqrt{2} \alpha u_p r_0 \right) R + \sqrt{2} \alpha u_p r_0^2 - 2 \rho g r_0^2 + \frac{4}{\pi} \tau_w r_0 + \frac{2\tau_c}{D} r_0^2 + \sqrt{2} \beta u_p^2 r_0^2 \ln \frac{r_0}{R} = 0, \quad (3)$$

其中, $\alpha=150\{(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3\}(\mu/D_p^2)$, $\beta=1.75\{(1-\varepsilon)/\varepsilon^3\}(\rho g/D_p)$, 为欧根公式系数; u_p 为错流区内的平均气速, $\tau_w=p_x \tan \phi_w$, $\tau_c=p_x \tan \phi_c$, 分别为上游面、侧壁的剪应力, 可用多种方法计算, 例如以下 Janssen 公式^[15]:

$$p_y = \frac{\rho g L D}{\tan \phi_c K_p 2(L+D)} \left\{ 1 - \exp \left[-\tan \phi_c K_p \frac{2(L+D)}{L D} H' \right] \right\}, \quad (4)$$

其中, $K_p=(1-\sin \phi)/(1+\sin \phi)$. 或根据 Haar-Vonkarman 假定计算如下^[9,10]:

$$p_y = \frac{\rho g L D \xi}{2 D \tan \phi_w + 2 L l \tan \phi_c}, \quad (5)$$

其中

$$l = \frac{1 + \xi + \sqrt{(1 + \xi)^2 - 4(\xi - \tan^2 \phi_w)}}{2},$$

$$\xi = \frac{1 + \sin^2 \phi_1 - \sqrt{4 - 4 \cos^2 \phi_1 (1 + \tan^2 \phi_w)}}{\cos^2 \phi_1}.$$

从上述方程组可知, 减小床层横向宽度有助于减小空腔尺寸. 有整流子的装置中空腔发生于上游面, 计算时仅用上游面侧虚拟流道的横向宽度, 由此可见, 空腔尺寸小于同样错流气速下无整流子的装置.

4.2 贴壁

假设压降为 Δp 时, 移动床内已发生贴壁, 床内状态已达到平衡. 建立如图 6 的坐标系: Y 方向竖直向上, 为床层高度, 起始面在错流区下端, X 方向与气流方向相反, 为贴壁层厚度, 起始面在下游面上, 由力平衡有

$$(\sigma_y + d\sigma_y) X D + \rho g X D dY = \sigma_y (X - dX) D + (\Delta p + \sigma_x) D \tan \phi_w dY + 2\sigma_x \tan \phi_c X dY, \quad (6)$$

式中, σ_x , σ_y 分别为水平方向和垂直方向的正应力. 由于此时颗粒停止下移, 对应为颗粒的主动应力状态. 略去二阶项并化简, 得:

$$X \frac{d\sigma_y}{dY} + \sigma_y \frac{dX}{dY} = (\Delta p + \sigma_x) \tan \phi_w + \frac{2\sigma_x \tan \phi_c}{D} X - \rho g X. \quad (7)$$

在方程(6)中考虑 $X \rightarrow 0$, 即当贴壁厚度很小时, 颗粒

层的应力应接近被动应力状态 p_x , p_y , 略去无穷小项后可化为

$$p_y \frac{dX}{dY} = \Delta p_0 \tan \phi_w. \quad (8)$$

由于贴壁颗粒层由下游面的摩擦力支撑, 在贴壁颗粒层的另一侧, 运动的颗粒相当于不断堆积过程, dX/dY 则为颗粒安息角的正切, 为减少参数, 在此用在数值上几乎与其相等的内摩擦角正切代替^[15], 即 $\tan \phi$, 故贴壁临界条件为

$$\Delta p_0 = \frac{p_y}{\tan \phi_1 \tan \phi_w}. \quad (9)$$

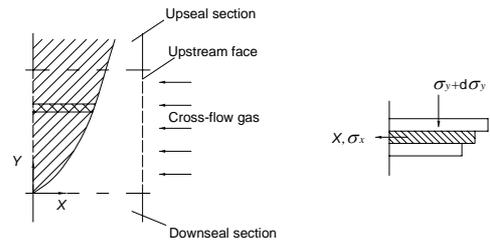


图 6 贴壁示意图
Fig.6 Schematic diagram of pinning

对于设置整流子的装置, 仍使用上面提及的处理方法. 由于贴壁发生在下游面, 计算贴壁临界值时使用下游面侧虚拟流道的宽度. 这也可以说明将整流子对称放置的装置, 无论锥形整流子或 Binsert[®]整流子, 贴壁临界值大致相同.

5 模型与实验的比较

5.1 空腔尺寸

给定错流气速 u_p , 空腔尺寸与错流气速的关系可用式(1)~(3)迭代解出. 在有整流子的装置中, 空腔尺寸由上游面侧流道宽度决定. 空腔尺寸的计算值与实验值比较见图 7. 除最初的数据点差别较大外, 计算值与实验

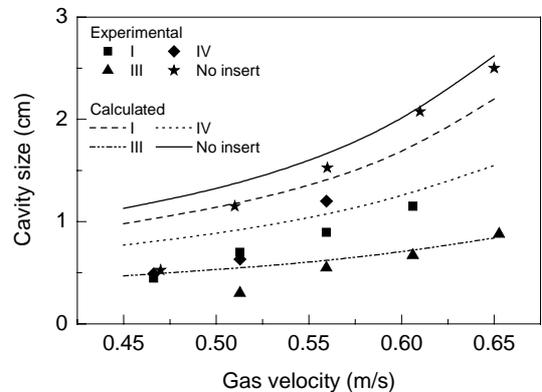


图 7 空腔尺寸计算值与实验值的比较
Fig.7 Comparison of cavity sizes between model and experimental results (Face: Johnson-net)

值接近, I, IV, III型的空腔尺寸均小于同样气流下无整流子的装置, 因而可说明设置整流子有利于减小空腔尺寸. 同时也可以说明, 有整流子的装置中空腔初始值大于无整流子的装置.

5.2 贴壁

移动床中的贴壁临界值可用式(9)计算, 模型计算值与实验值的比较见表3, 从表可见, 模型计算值与实验值相近.

表3 贴壁临界压降的计算值与实验值的比较

Table 3 Comparison of calculated data and experimental results for pinning (Pa)

Face		I	II	III	IV	V	VI	No insert
Johnson-net	Calculated	1 551	2 132	2 393	2 132	2 132	2 132	2 624
	Experimental	1 380	2 129	1 942	1 585	1 664	2 096	2 177
Mesh-screen	Calculated	842	1 170	1 301	1 170	1 170	1 170	1 440
	Experimental	1 210	1 376	1 162	1 305	1 312	1 456	1 676

Note: 1) Stresses were calculated by Eq.(4).

对于设置整流子的装置, 颗粒床层被整流子分为两部分. 由于贴壁发生在下游面, 计算贴壁临界压降时使用下游面虚拟流道的宽度, 使贴壁临界压降低, 均低于同样床层宽度但无整流子装置. 由于在计算时只使用颗粒流动的虚拟流道宽度, 因而贴壁临界值与整流子叶片长度及形状关系不大. 如壁面为丝网、整流子对称放置的装置(II型、IV型、V型)的2个流道宽度都是200 mm, 它们的贴壁临界压降分别为1376, 1305, 1312 Pa, 大致相同, 而这三者的计算值均为1170 Pa. 然而颗粒的运动十分复杂, 当整流子离错流区较远时其作用减弱, 用上述方法计算的结果与实验值有较大差别.

6 结论

考察了整流子对错流移动床内颗粒行为的影响. 在有气体错流的条件下, 床层内颗粒向下的运动表现为近上游面的颗粒下移速度加快、近下游面的颗粒下移速度减慢. 将整流子不对称放置于移动床中, 适当调整其位置则可能使床层内颗粒在某一错流气流下保持均匀的速度下移.

在移动床中设置整流子对移动床空腔和贴壁现象均产生影响. 与无整流子的装置相比, 整流子的设置能够使错流移动床空腔的发生推迟并减小空腔尺寸, 但却降低了错流移动床的贴壁临界值并使相同压降下贴壁厚度增加. 整流子纵向距错流区越远作用越小.

建立了空腔尺寸和贴壁临界值的数学模型, 将床层简化为由整流子中心位置划分的2个虚拟流道. 由于空腔和贴壁分别发生在上、下游面, 则按上游面虚拟流道宽度计算空腔尺寸而按下游面侧虚拟流道宽度计算贴壁临界值. 应用该模型计算的结果与实验值大致相符.

符号表:

D	床层厚度 (m)
D_p	颗粒直径 (m)
g	重力加速度 (m/s^2)
H	错流区高度 (m)
H'	上部料封段高度 (m)

H''	下部料封段高度 (m)
L	沿气流方向床层长度 (m)
Δp	过床压降 (Pa)
Δp_0	贴壁临界压降 (Pa)
p_x	被动态颗粒层水平方向应力 (Pa)
p_y	被动态颗粒层垂直方向应力 (Pa)
R	空腔尺寸 (m)
r_0	气体作用于空腔的最大范围 (m)
u_c	未有空腔部位上游面的气体速度 (m/s)
u_p	气体空床速度 (m/s)
X	贴壁颗粒层厚度 (m)
Y	错流区高度 (m)
α	欧根方程参数 $\alpha=150\{[(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3](\mu/D_p^2)\}$
β	欧根方程参数 $\beta=1.75\{[(1-\varepsilon)/\varepsilon^3](\rho_p/D_p)\}$
ε	颗粒空隙率
ρ	颗粒堆积密度 (kg/m^3)
μ	流体的粘度 (Pa·s)
τ_c	颗粒床层对侧壁的剪应力 (Pa)
τ_w	颗粒床层对上游面的剪应力 (Pa)
σ_x	主动态颗粒层水平方向应力 (Pa)
σ_y	主动态颗粒层垂直方向应力 (Pa)
ϕ_c	颗粒与侧壁摩擦角 ($^\circ$)
ϕ_i	内摩擦角 ($^\circ$)
ϕ_w, ϕ_w'	颗粒与上游面或下游面摩擦角 ($^\circ$)

参考文献:

- [1] Arashi N, Komuro T, Kanda O. Study of the Movement of Granular Particles in a Union Moving Bed [J]. J. Soc. Powder Technol., Japan, 1989, 26(10): 712-716.
- [2] 曹晏, 张建民, 王洋, 等. 矩形错流移动床床内颗粒流速分布的考察 [J]. 化学反应工程与工艺, 1999, 15(3): 248-261.
- [3] 曹晏, 张建民, 王洋, 等. 内构件对矩形移动床床内颗粒流动影响的试验研究 [J]. 化学工业与工程, 1999, 16(2): 63-67.
- [4] Yang S C, Hsiau S S. The Simulation and Experimental Study of Granular Materials Discharged from a Silo with the Placement of Inserts [J]. Powder Technol., 2001, 120: 244-255.
- [5] Greenwood A R, Heinze W W, Schnitta E, et al. Multiple-stage Stacked Reactor System for Catalyst Moving Bed Particles [P]. US Pat.: 3706536, 1972-12-19.
- [6] Takahashi H, Takeuchi T. Solid Flow in a Vertical Moving Bed with Cross Flow of Gas—Flow Pattern and Stress Distribution [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 1989, 15(3): 1011-1021.
- [7] Takahashi H, Honda Y. Estimation of Particle Velocity in Moving Beds Based on a Flow Model for Bulk Solids [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 1992, 18(6): 849-855.
- [8] Pilcher K A, Bridgewater J. Pinning in a Rectangular Moving Bed Reactor with Gas Cross-flow [J]. Chem. Eng. Sci., 1990, 45(8):

- 2523–2542.
- [9] Ginestra J C, Jackson R. Pinning of a Bed of Particles in a Vertical Channel by a Cross Flow of Gas [J]. *Ind. Eng. Chem. Foundam.*, 1985, 24: 121–128.
- [10] 王保平, 庞桂赐, 金涌. 径向移动床反应器内贴壁现象的研究 [J]. *石油学报(石油加工)*, 1993, 9(3): 78–87.
- [11] 陈允华, 朱学栋, 吴勇强, 等. 移动床内空腔现象及尺寸 [J]. *化工学报*, 2005, 54(4): 731–738.
- [12] 陈允华, 朱学栋, 吴勇强, 等. 错流移动床的压降特性 [J]. *过程工程学报*, 2006, 6(5): 697–702.
- [13] Takahashi T, Walata S A, Tien C. Transient Behavior of Granular Filtration of Aerosols—Effect of Aerosol Deposition on Filter Performance [J]. *AIChE J.*, 1986, 32(4): 684–690.
- [14] Hsiau S S, Smid J, Tsai F H, et al. Velocities in Moving Granular Bed Filters [J]. *Powder Technol.*, 2001, 114: 205–212.
- [15] 王奎升. *工程流体与粉体力学基础* [M]. 北京: 中国计量出版社, 2002. 135–162.

Effects of Internals on the Particle Behavior in a Rectangular Moving Bed with Gas Cross-flow

CHEN Yun-hua, ZHU Xue-dong, WU Yong-qiang, ZHU Zi-bin

(Engineering Research Center of Large Scale Reactor Engineering and Technology, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The effects of internals on particle behaviors were investigated in a rectangular moving bed with gas cross-flow by changing the position and size of internals. Experimental results show that the velocity of particles near upstream face is faster than that of particles near downstream face in the condition of gas cross-flow. And it is possible that particles move at the same velocity under a certain gas velocity if an internal is located in a suitable horizontal position. As compared with an apparatus without an internal, location of internal could suspend the formation of cavity and decrease cavity size while it reduces critical value of pinning. To describe the cavity size and critical condition of pinning, it is assumed that the particle layer was divided into two virtual channels, whose widths were decided by the horizontal position of the internal. Using different widths of the two virtual channels, mathematical models for cavity size and critical condition of pinning were established respectively. The model data agreed with the experimental results.

Key words: cross-flow moving bed; internal; particle flow; cavity; pinning