

第三届

全国流态化会议

文集

学术组编

1984.4

太原

学术组成员

郭慕孙(组长)	杨贵林(付组长)
彭成中	王尊孝
秦霁光	张碧江
刘淑娟	朱寿康
陈甘棠	石炎福
夏诚意	金 涌
郑建生	

第三届全国流态化学术会议论文集目录

流动 (一)

- 节涌流化床流体力学特性的研究
.....崔世纯等 化工部化工机械研究院 (1)
- 明矾石流化床中气泡汇合长大及床层膨胀
.....何素英等 化工部化工机械研究院 (8)
- 大颗粒低速浅循环床流化特性的实验研究
.....温龙等 西安交通大学能源与重力工程系 (14)
- 加压流化床硅粉固体颗粒的夹带及TDH的测定
.....叶秋实 吉林化学工业公司研究院 (19)
- 气提式多层流化床中的流动及操作特性的研究
.....孙光林等 联合化学反应工程研究所 浙江大学化学反应工程室 (22)
- ✓ 粒度和粒度分布对流化特性的影响
.....王樟茂等 浙江大学反应工程室 (28)
- ✓ 混合颗粒的流态化特性—1、开始流态化速度和完全流态化速度
.....余华瑞 成都科技大学化工系 (36)

流动 (二)

- 流化颗粒的光致发光显示法
.....曲志捷 郭慕孙 中国科学院化冶所 (41)
- 流化床内气动颗粒循环器的研究
.....陈甘棠等 浙江大学等 (52)
- 顺流多层浅床的特性及其应用
.....严子纲等 中国科学院化冶所 (61)
- 无环隙挡板流化床流化特性研究 (一) 挡板对床层密度分布影响的测定
.....赵思源 沈国宏 天津大学化工系 (67)
- 流化床料腿中的气固流动
.....倪炳华 彭成中 北京化工研究院 (72)
- 充气斜面滑动床作为气—固接触设备某些特性的研究
.....陈汉民 南京水泥工业设计院 (77)
- 流化床明矾石物料的停留时间分布
.....满卓田等 化工部化工机械研究院 (89)

流动 (三)

- 流态化的颗粒夹带Ⅱ、限制床的颗粒夹带
.....张琪等 沈阳化工研究院 (94)

设有垂直管群的流化床中粒子的扬析

.....马万荣 加藤邦夫 沈阳化工研究院(日)群馬大学 (100)

✓ 气—固系均匀流化状态不稳定性的证据

.....卢天雄等 北京化工研究院 (107)

颗粒在流化床床间流动特性的研究

.....金涌 汪展文 清华大学化学化工系 (112)

细颗粒物料通过孔口流落的研究

.....张海生等 中国科学院煤化所 (119)

细颗粒节涌流化床流化性能的研究

.....王受书、胡惠民 中国科学院煤化所 (127)

射流流化床的颗粒分离

.....张济宇等 中国科学院煤化所 (138)

传质、传热

鼓泡流化床中气泡相与乳浊相之间的气体交换

.....秦霁光 王志洁 化工部化工机械研究院 (144)

中空立筒悬浮予热器的选型试验

.....高岱等 山东铝厂研究所 (153)

稀相输送床中气固两相运动及换热特征

.....徐德龙 胡道和 南京化工学院 (157)

对气固流化床层与埋管之间传热影响因素的实验研究

.....吴样征 南京工学院动力系 (164)

流化床内部构件对相间交换系数的影响

.....赵书琨等 中国科学院煤化所 (172)

模型、设计、计算

浅层连续流化床吸附器 I、单级等温床稳态模型分析解

.....戎顺熙等 浙江大学化工室 (181)

在喷射气流中粉料逆向运动的物理模型

.....顾大公 胡道和 南京化工学院 (190)

多层流化反应器各层固体颗粒转化率计算方法的研究

.....姚建中等 中国科学院化冶所 (196)

连续气—固流态化床中颗粒的横向混合

.....石炎福 成都科技大学化工系 (205)

流态化床气体分布板的设计

.....叶永华 沈阳化工研究院 (212)

移动颗粒床过滤除尘技术研究

.....王中礼 中国科学院化冶所 (220)

半球形气泡相间错流交换速率的解析计算

.....夏诚意 南京化工学院 (228)

液固、三相

碱浸铀矿浆流态化洗涤试验研究

.....邹茂森等 核工业部北京第五研究所 (237)

用电导法进行气—液—固三相流化床各相局部含率的测定

.....王一平 胡宗定 天津大学 化工系 (242)

$\Phi 304 \times 10$ 毫米直径三相流化床含率与返混的研究 (1)

.....胡宗定 张 瑛 天津大学 化工系 (247)

用快速付立叶变换算法研究气—液—固三相流化床的液相返混

.....赵学明 胡宗定 天津大学化工系 (253)

均匀磁场中铁磁颗粒的散式流态化

.....马兴华 郭慕孙 中国科学院化冶所 (258)

三相环流床上升管中的含气率和摩擦系数

.....曹翼卫等 中国科学院煤化所 (268)

三相环流床反应器气—液相接触面积测定

.....曹立仁等 中国科学院煤化所 (277)

均匀球体散式流态化特性的研究

.....张帆等 北京铀矿选冶研究所 (285)

测 试

针型电容探头测量系统的研制

.....俞振奎等 沈阳化工研究院 (292)

激光法气泡观测

.....张蕴璧等 西北大学化工系 (299)

流化床中气泡特性尺寸的测量

.....席敏等 北京化工研究院 (303)

光纤测量流动粉尘浓度

.....胡维贤 上海化学工业研究院 (311)

二维床单气泡直径和上升速度的检测技术

.....刘健生 中国科学院山西煤化所 杨桂燕 山西省电子所 (314)

床层塌落过程的料面动态测定仪

.....秦绍宗等 中国科学院化冶所 (320)

固体粒子停留时间分布测量

.....牛鸿昌等 中国科学院煤化所 (326)

应 用

沸腾炉轻烧菱镁矿的研究

.....勒明月等 马鞍山矿山研究院 (332)

三相无变压器零电位流态粒子电炉的研究	金鸿业 赵恒春 石家庄国营太行机械厂 (336)
流态化电极提铈	周兴茂等 广西冶金研究所 (343)
内循环多层顺流浅流态化床的铁矿石直接还原	王文禄 刘淑娟 中国科学院化冶所 (347)
跳态流态化煤还原铁矿	郭铨等 中国科学院化冶所 (353)
米糠油流态化脱色	黄健榕 华侨大学 (365)
塔型立构件在苯酐流化床反应器中的工业应用	金涌等 清华大学化工系 (370)
雾化萘在苯酐流化床工业装置上应用	马培德 时人俊 北京化工二厂 (374)
附录: 1980年国际流态化会议统一标记: 主要符号	(378)

节涌流化床流体力学特性的研究

崔世纯 周鹤令 纪飞晨*

(化工部化工机械研究院)

迄今,已有不少研究者^[1-7]对节涌床的流体力学特性进行了研究,但由于它本身的复杂性及测试手段的限制,所得的结果往往差异甚大,人们对节涌床的认识尚有待深入。

近年来,随着光导纤维技术的发展^[8],我们认为有可能利用光导纤维来改进节涌床研究中的测试手段。为此,我们研制了一套激光—光导纤维检测仪器,用于测量节涌床中气栓的流体力学行为。本文即为利用这套检测系统对节涌床进行测试所得的初步研究结果。

实验装置及测试方法

实验流程及条件分别如图1及表1所示。

表 1 实 验 条 件

设 备	床身: $\Phi 150 \times 5$ 有机玻璃圆筒, $A = 0.0154 \text{米}^2$ 。 气体分布板: 多孔板, 孔径 $\Phi 1.2$, 孔数 144。 探头距分布板高度: 0.730米; 0.807米; 0.887米; 0.965米。
物 料	固体颗粒: 硅球, $d_p = 0.880 \sim 0.65$ 毫米; $U_{mf} = 0.041$ 米/秒。 气 体: 空气。
操 作 条 件	静止床高: $H_0 = 0.880 \sim 0.915$ 米。 流化数: 2.3~11.8。

由激光发生器发出的二束激光分别射入床身上选定的二对检测口。当气栓通过检测口时,激光便穿过气栓,被光导纤维探头接收,并导入光电接收器。在此,光讯号转变成电讯号,然后将该电讯号放大并输入示波器。于是,在示波器的记录纸带上便得到二条分别反映上下二对检测口情况的讯号记录线(见图2)。由这二条讯号记录线上的矩形波可算得气栓上升速度、频率及长度等的观测值。

* 参加实验的还有董耀清、常国琴、王志洁、屠之龙同志。

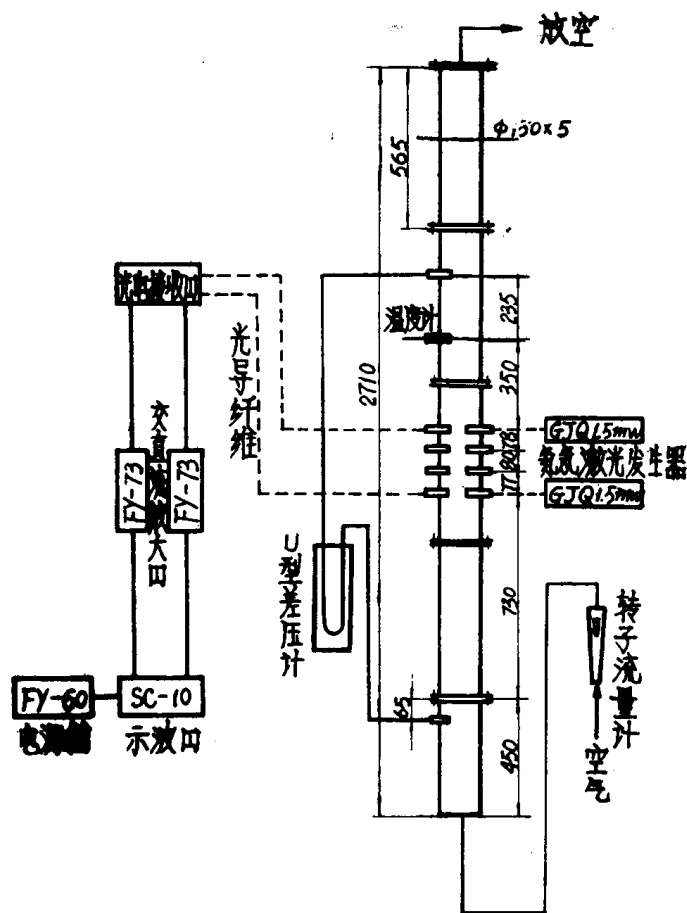


图1 试验流程示意图

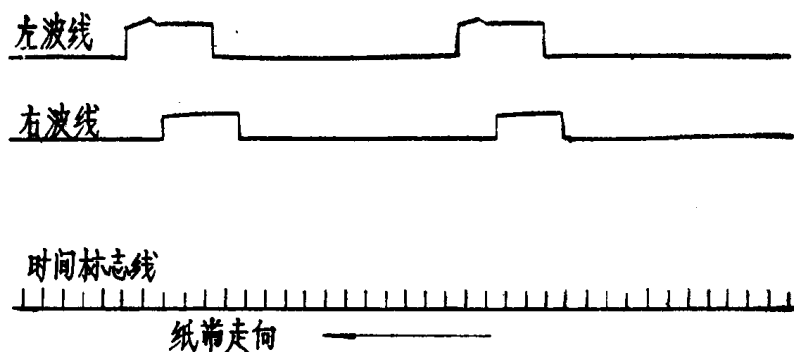


图2 典型的讯号记录图

实验结果分析讨论

一 床层最大膨胀比 $H_{\max}/H_0$

本实验测得的36组床层膨胀数据与文献和所介绍计算式之比较结果列于表2。由该表可见，Matsen的计算式较简单，屠一周的计算式则更接近观测值一些，且较合理地反映了

节涌床的膨胀过程, 但复杂一些。

表 2

床层最大膨胀比计算式比较

来 源	Matsen [3]	屠之龙和周鹤令 [7]
计算式	$\frac{H_{\max}}{H_0} = 1 + \frac{U - U_{mf}}{0.35(gD)^{0.5}}$	$\frac{H_{\max}}{H_0} = \left(1 - \frac{H_{b0}}{H_0}\right) \left[1 + \frac{U - U_{mf}}{0.35(gD)^{0.5}}\right] + \frac{H_b}{H_0}$
平均相对偏差	7.80%	6.28%
相对偏差的标准误差	3.20%	2.71%
最大相对偏差	15.98%	13.45%

二、气栓上升速度 U_s

由本实验所测的48组 U_s 观测值回归得到:

$$U_s = 0.7613 (U - U_{mf}) + 0.35 (1.19gD)^{0.5} \quad (1)$$

表 3

气栓上升速度计算式比较

来 源	Ormiston等 [8]	Birkhoff和Carter [10]	中村等 [4]	本文式 (1)
计算式	$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35(gD)^{0.5}$	$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35(2gD)^{0.5}$	$U_s = 0.28(gL_s)^{0.5}$	$U_s = 0.7613(U - U_{mf}) + 0.35(1.19gD)^{0.5}$
平均相对偏差	9.73%	23.10%	30.52%	9.27%
相对偏差的标准误差	5.64%	8.48%	13.88%	5.76%
最大相对偏差	21.06%	-39.40%	56.37%	-21.29%

表 3 列出了以本实验48组 U_s 观测值对式 (1) 及文献[4]、[9]、[10]所推荐计算式进行比较的结果。可见Ormiston等的计算式和本文的式 (1) 都比较满意地与观测值吻合。然而, 相比之下, Ormiston等的计算式具有更为普遍的意义。本文推荐采用Ormiston公式计算 U_s :

$$U_s = (U - U_{mf}) + 0.35 (gD)^{0.5} \quad (2)$$

三、气栓频率 f_s

本实验所测48组 f_s 值对 $(U - U_{mf})$ 回归得到:

$$f_s = 0.533 (U - U_{mf})^{-0.152} \quad (3)$$

以本实验的 f_s 观测值对文献[4]、[11]报道的 f_s 计算式及本文式(3)所作的比较结果见表4。可见唯式(3)较满意地关联了本实验的观测值。

表4 f_s 的计算式比较

来 源	Matsen等 ^[11]	中 村 等 ^[4]	本文式(3)
计算式	$f_s = \frac{0.35g^{0.5}}{K \cdot D}$	$f_s = \begin{cases} 27.0(U - U_{mf})^{-0.43} H^{-0.8} & (H < 120\text{cm}) \\ 1.5(U - U_{mf})^{-0.43} & (H > 120\text{cm}) \end{cases}$	$f_s = 0.533 (U - U_{mf})^{-0.152}$
平均相对偏差	13.51%	26.72%	6.08%
相对偏差的标准误差	7.57%	21.97%	4.21%
最大相对偏差	-32.92%	91.17%	17.27%

*K为与床径D有关的系数。对于本实验，由文献[1]的数据内插得到 $K = 3.64$ 。

四 气栓长度 L_s

Matsen等^[11]、Hovmand和Davidson^[2]及中村等^[4]都曾报道对气栓长度的研究结果。须指出，Matsen关于气栓长度的定义乃是某个与气栓同体积并以床层横截面为底的假想圆柱体的高度，它不是气栓的实际长度。由于弹头状气栓的平均直径必定小于床径，显然Matsen把气栓平均直径考虑得偏大了，所以其计算式所得的 L_s 将偏低。事实上，以本实验的各组条件，用Matsen计算式所得 L_s 都比观测值小，果然不出所料。

我们认为，计算气栓长度的公式必须考虑二个约束条件：(1)弹头状气栓的平均直径不得达到更不能超过床径；(2)单个气栓的体积应当等于理论值 $\frac{Q - Q_{mf}}{f_s}$ 。许多研究者^[2,4,11]对此似乎欠考虑，本文则充分注意到这二个约束条件。为此，首先从气栓的物料平衡 $L_s \cdot \frac{\pi}{4} (\overline{m}D)^2 = Q - Q_{mf} = \frac{\pi}{4} D^2 (U - U_{mf})$ 出发，根据观测到的 $(L_s)_{obs}$

和 $(f_s)_{obs}$ ，算出气栓平均直径与床径之比 $\overline{m} = \frac{\overline{d}_s}{D}$ 的观测值 $\overline{m}_{obs}$ ：

$$\overline{m}_{obs} = \left[\frac{U - U_{mf}}{(L_s)_{obs} \cdot (f_s)_{obs}} \right]^{0.5} \text{ 然后,}$$

$$\text{将 } \overline{m}_{obs} = \text{对 } \frac{U - U_{mf}}{U} \text{ 回归, 得到}$$

$$\overline{m} = 0.931 \left(\frac{U - U_{mf}}{U} \right)^{0.656} \quad (4)$$

显然，式(4)算得的 $\overline{m}$ 值不会达到1，这是合理的。将式(4)代入气栓的物料平衡

式, 即得

$$L_s = 2.165 U^{1.31} (U - U_{mf})^{-0.16} \quad (5)$$

以本实验48组 L_s 观测值将文献[2]、[4]、[11]的 L_s 计算式同本文式(5)进行比较, 可得表5。

表 5 L_s 的 计 算 式 比 较

来 源	Mstsen [11]	Hovmand和 Davidson [2]	中村等 [4]	本文式 (5)
计算式	$L_s = \frac{k \cdot (U - U_{mf}) D^{0.5}}{0.35 g^{0.5}}$	$\frac{L_s}{D} - 0.495 \left(\frac{L_s}{D} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{U - U_{mf}}{0.35 (gD)^{0.5}} \right) + 0.061 - \frac{1.939 (U - U_{mf})}{0.35 (gD)^{0.5}} = 0$	$L_s = \begin{cases} 2.6 (U - U_{mf})^{0.48} H^{0.22} & (H < 120 \text{ cm}) \\ 0.47 (U - U_{mf})^{0.78} H^{0.48} & (H > 120 \text{ cm}) \end{cases}$	$L_s = 2.165 U^{1.31} (U - U_{mf})^{-0.16}$
平均相对偏差	89.94%	68.35%	49.08%	17.52%
相对偏差 的标准误差	44.20%	35.77%	35.41%	12.96%
最大相对偏差	212.19%	160.46%	165.73%	58.39%

• k 值同表 4。

由表 5 可见, 只有式 (5) 比较吻合观测值, 这是料想中的结果。因为式 (5) 考虑了上述二个约束条件, 故其计算值能比较接近观测值。

五、料栓长度 L_p

本文由物料平衡出发, 计算料栓长度:

$$L_p = \frac{U_s}{f_s} - L_s \quad (6)$$

式中 U_s 、 f_s 和 L_s 分别由式(2)、(3)和(5)算得。

以本实验的48组 L_p 观测值对文献报道的 L_p 计算式和本文式(6)进行比较, 如表6所示。可见式(6)算得之结果能较好地与观测值相吻合。

六、气栓形状 $d_s = f(D, L)$

Nicklin等^[12]基于空气—水系统, 假定围绕气栓向下流动的液体相对于气栓的流速等于 $\sqrt{2gL}$, 并考虑到液体的向下流动纯因向上运动的气栓的排挤作用所造成, 从而由物料平衡得到:

$$d_s = D \left(1 - 0.35 \left(\frac{D}{2L} \right)^{0.5} \right)^{0.5}$$

表 6

Lp 计 算 式 比 较

来 源	Matsen ^[11]	Hovmand 和 Davidson ^[2]	Baeyens ^[1]	中 村 等 ^[4]	本文式 (6)
计算式	$L_p = 2.44D$	$L_p = 2D$	$L_p = 9.38 D^{0.643}$	$L_p = \begin{cases} 0.32(U - U_{mf})^{0.83} \\ H^{0.60} \quad (H < 120\text{cm}) \\ 0.24(U - U_{mf})^{0.83} \\ H^{1.10} \quad (H > 120\text{cm}) \end{cases}$	$L_p = \frac{U_s}{f_s} - L_s$
平均相对偏差	31.89%	58.47%	21.52%	42.56%	18.41%
相对偏差的标准误差	25.46%	34.55%	14.05%	31.26%	14.73%
最大相对偏差	96.14%	139.29%	-67.57%	139.53%	-64.00%

与此相应的气栓气积方程为:

$$V_s = \frac{\pi}{4} D^2 \left[L_s - 0.495 (DL_s)^{0.5} \right]$$

如果Nicklin等的理论对于气—固系统也适用, 则由上式算得的气栓体积应当等于由物料平衡所得的理论值 $\frac{Q - Q_{mf}}{f_s}$, 而且气栓的根部直径 (ds) max 应当

介于床径D和气栓平均直径 $\bar{d}_s$ 之间。通过计算可知, 所得 (ds) max 的确介于D 与 $\bar{d}_s$ 之间, 但 V_s 却与 $\frac{Q - Q_{mf}}{f_s}$ 相差甚大。产生偏差的原因可能主要在于气—固节涌流化床毕竟

不同于气—液系统, 固体颗粒群相对于气栓的向下运动速度是否等于 $\sqrt{2gL}$ 乃是值得探讨的。此外, 从物理意义上讲, 当 $L = 0$ 时, d_s 应当等于0, 但上述Nicklin的计算式却不能满足这一边界条件。

鉴于上述情况, 我们假定围绕气栓向下的颗粒群之绝对速度为 $U_p = c\sqrt{gL}$, c 为比例系数。然后由物料平衡 $A_L \cdot C\sqrt{gL} = (A - A_L) U_s$ 得:

$$d_s = D \left(1 - \frac{U_s}{U_s + cg^{0.5}L^{0.5}} \right)^{0.5} \quad (7)$$

上式显然满足边界条件: 当 $L = 0$ 时, $d_s = 0$ 。

由式 (7) 进而得:

$$v_s = \int_0^{L_s} \frac{\pi}{4} d_s^2 dL = \frac{\pi}{4} D^2 \left[L_s - \frac{2U_s}{Cg^{0.5}} L_s^{0.5} + \right]$$

$$\left. \frac{2 U_s^2}{C^2} \ln (C g^{0.5} U_s^{-1} L_s^{0.5} + 1) \right\} \quad (8)$$

从理论上讲, 应当

$$V_s = \frac{Q - Q_{mf}}{f_s} = \frac{\pi}{4} D^2 (U - U_{mf}) / f_s \quad (9)$$

于是, 由式 (8) 和式 (9) 得:

$$\left[L_s - \frac{2 U_s}{C g^{0.5}} L_s^{0.5} + \frac{2 U_s^2}{C^2 g} \ln (C g^{0.5} U_s^{-1} L_s^{0.5} + 1) \right] - \left(\frac{U - U_{mf}}{f_s} \right) = 0$$

将本实验48组 $(U - U_{mf})$ 值以及由式 (2)、(3)、(5) 算得的相应的 U_s 、 f_s 、 L_s 的计算值分别代入上式, 用试差法解得48个 c 值, 然后对 $(U - U_{mf})$ 回归即得

$$C = 2.887 (U - U_{mf})^{0.646} \quad (10)$$

将式 (10) 与式 (7) 及 (8) 连用, 即可计算气栓的直径及体积。计算结果表明, 算得的 V_s 对理论值式 (9) 的平均偏差仅为0.86%, 相当令人满意。这说明式 (10) 与式 (7) 连用也将是令人满意的。

最后须指出, 中村等^[4]关于 f_s 、 L_s 及 L_p 的计算式中都包括了检测点高度 H 的影响。根据气泡汇合理论, 这是合理的。但本实验并未发现 f_s 、 L_s 及 L_p 随着 H 有明显的变化, 这恐怕由于本实验的检测口高度 H 改变不大的缘故。还须指出, 本文导得的各计算式均采用米—千克—秒制。

参 考 文 献

- [1] Baeyens, J. and D. Geldart, *chem. Eng. Sci.* 29, 1, 255 (1974).
- [2] Hovmand, S. and J. F. Davidson, *Fluidization*, edited by J. F. Davidson and D. Harrison, 193 (1971).
- [3] Matsen, J. M., S. Hovmand and J. F. Davidson, *Chem. Eng. Sci.* 24, 12, 1743 (1963).
- [4] 中村正秋, 洪公弘, 日冲克彦, 化学工学论文集 (日), 第2卷, 第6号, 577 (1976)。
- [5] 秦霁光, 化学工程, 5, 67 (1979)。
- [6] 秦霁光, 化工机械, 2, 25 (1982)。
- [7] 屠之龙, 周鹤令, 第二届全国流态化会议论文集, 83 (1980)。
- [8] 秦绍宗、刘广源, 光导纤维在固体颗粒速度测量中的应用, 中国科学院化冶所 (1979. 3)。
- [9] Ormiston, R. M. and F. R. G. Mitchell, J. F. Davidson, *Trans. Inst. Chem. Engrs.* 43, 209 (1965)。
- [10] Birkhoff, G. and D. Carter, *J. Rat. Mech. Anal.* 6, 769 (1957)。
- [11] Matsen, J. M. and B. L. Tarmy, *Chem. Eng. prog. Symposium Series*, 66, 101, 1 (1962)。
- [12] Nicklin, D. J., J. O. Wilkes and J. F. Davidson, *Trans. Inst. Chem. Engrs.* 40, 61 (1962)。

明矾石流化床中气泡汇合长大及床层膨胀

何素英 陈 晓 刘 群 孔兰英

(化工部化工机械研究院)

提 要

在一个 $\Phi 140\text{mm}$ 流化床中测定了明矾石物料的气泡频率、气泡高度和气泡上升速度,得到了气泡高度和上升速度之间的关系式。同时,从两相理论出发,导出了气泡汇合长大以及床层膨胀的计算公式,并用实验数据进行了验证。

前 言

明矾石还原热解法制钾肥是一种气、固相加工过程。通过测定得知明矾石物料是一种宽筛分物料,且含有不少小于400目的颗粒^[1]。上海化工研究院动力学实验证明,明矾石还原热解反应不属于快速反应。

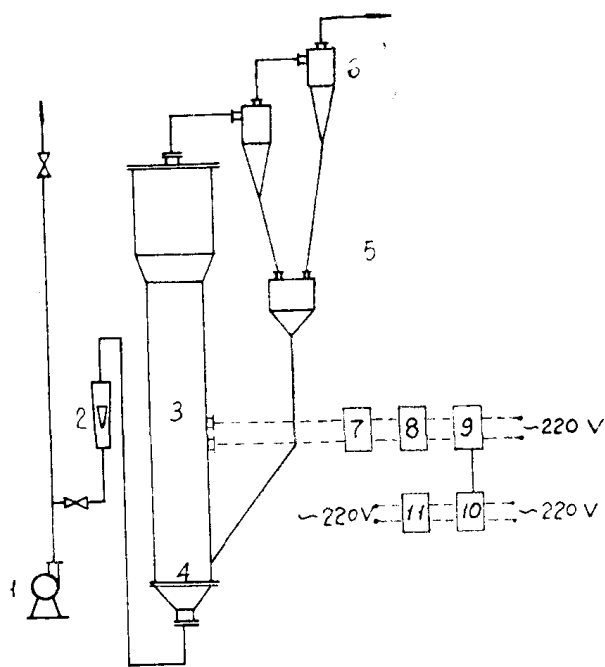
许多研究者^[2、4]将流化床分为三个区域,并且认为鼓泡区对于反应速度不太快的反应显得比较重要,稀相区对颗粒细转化率又高的情况要充分考虑。可见,在明矾石还原流化床放大时,鼓泡区和稀相区应当进行认真的研究。

前人已对鼓泡区进行了不少的研究工作,并且基于气泡现象提出了许多数学模型。本文研究明矾石物料的气泡特性,在于寻求一个适用于宽筛分明矾石物料的鼓泡模型。我们采用了 $\Phi 140\text{mm}$ 的园柱流化床,研究了气泡频率的轴向和径向分布、气泡大小,气泡上升速度以及气泡汇合长大和床层膨胀等特性。

二、实验设备和测试方法

实验所采用的设备为 $\Phi 60\text{mm}$ 和 $\Phi 140\text{mm}$ 有机玻璃流化床。分布板为不锈钢烧结板。在流化床的侧面沿着不同高度设置了测量气泡的测试点,每对测试点的间距为40mm左右。实验装置的流程如图1所示。

气泡是用电容法测量的,电容探头有三层导体和两层绝缘体,中间一层导体为屏蔽层。测量时将探针插入一对测试孔中,实验曲线记录在十四线示波器的紫外线感光纸上。测量线路如图1所示。



1. 鼓风机
2. 转子流量计
3. 流化床
4. 分布板
5. 料斗
6. 旋风分离器
7. 电容测微仪
8. 电阻箱
9. 十四线示波器
10. 放大器
11. 时间指示器

图1. 实验流程及测量线路示意图

三、实验和结果

电容探针测试位置 I、II、III、分别代表距分布板的平均距离为 12.9cm、32.3cm 和 51.4cm。在同一水平面的测试位置上，沿径向三个不同位置进行了气泡的测量。固定床层的高度位于 18~52cm 之间，空塔速度为 5.0cm/S~14cm/S。实验采用的物料为明矾石和 FCC 催化剂。FCC 催化剂的平均粒径为 58 μ ，小于 61 μ 的颗粒约有 50%。明矾石的粒度分布及平均颗粒直径见文献 [1]。

气泡上升速度

在十四线示波器上记录的气泡波形如图 2 所示。探针的直径 D_n 为 1.4mm， y 为气泡高度， L 为两探针之间的距离。记录的波形有三个特征时间 t_1 、 t_2 和 Δt_1 。 t_1 为气泡通过下探针的时间， t_2 为气泡通过上探针的时间，从气泡开始通过下探针的时刻至到达上探针的时刻之差为 Δt_1 。 Δt_2 不是一个独立变量。由于气泡沿床高不断汇聚长大，故取 Δt_1 和 Δt_2 的平均值。气泡通过的三个特征时间均在波形高度的 $\frac{1}{3}$ 处进行测量。这是对自制电容探针进行标定得出的。据此可以列出气泡上升速度 U_B 关系式为：

$$U_B = \frac{2L}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \quad (1)$$

气泡高度 y 为：

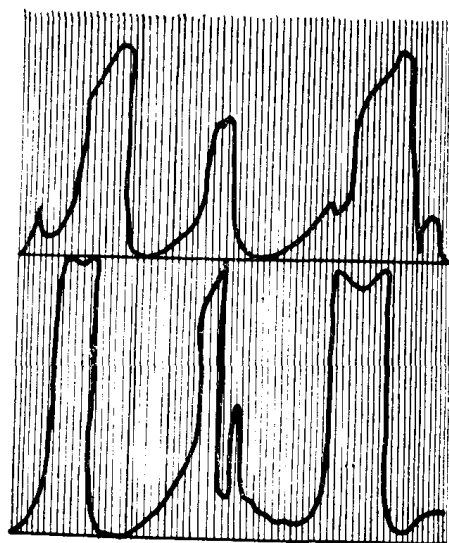


图2、拍摄的气泡波形

$$Y = U_B \frac{t_1 + t_2}{2} - Dn \quad (2)$$

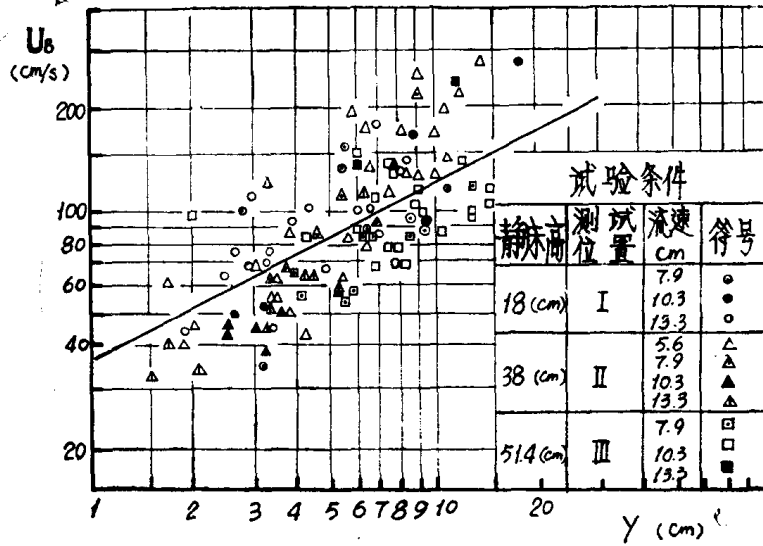


图 3、气泡速度与气泡高度关系曲线

用公式 (1) 和 (2) 计算的气泡速度和气泡高度标绘在图 3。可以得到明矾石流化床中气泡群的上升速度公式为:

$$U_B = 1.15 (gy) \frac{1}{2} \quad (3)$$

气泡率频及其平均直径

用电容探针测定了床层中气泡频率 f ，由此可以求得气泡在该处的平均当量直径 D_B 。气泡频率 f 可用下式表示:

$$f = \frac{U_B}{h_B} \quad (4)$$

式中 h_B 为记录到相继两个气泡之间的高度。假定探针能记录到探针两侧一个气泡半径范围内的气泡，则 h_B 和气泡分率 δ 的关系式为:

$$\delta = \frac{\frac{1}{6} \pi D_B^3}{\frac{\pi}{4} D_B^2 h_B} = \frac{2}{3} \cdot \frac{D_B}{h_B} \quad (5)$$

在三维流化床中，根据戴维森模型，对于只有上升小气泡和气泡晕可以忽略的快速气泡床层中，气泡分率 δ 分别可表示为:

$$\delta = \frac{U - Umf}{U_B + 2 Umf} \quad \text{和}$$

$$\delta = \frac{U - Umf}{U_B - Umf} \quad (6)$$

由于细颗粒 U_{mf} 值很小,故可忽略分母中 U_{mf} 项,将 δ 表达式和(4)式一并代入(5)式,可以导出:

$$D_B = 1.5 \frac{U - U_{mf}}{f} \quad (7)$$

实验测定的气泡频率的径向分布和轴向分布如图4和图5所示。可以看出,气泡频率从中心到四壁逐渐减小,同时也随着床层高度的增加而逐渐减小。气速的变化对气泡频率

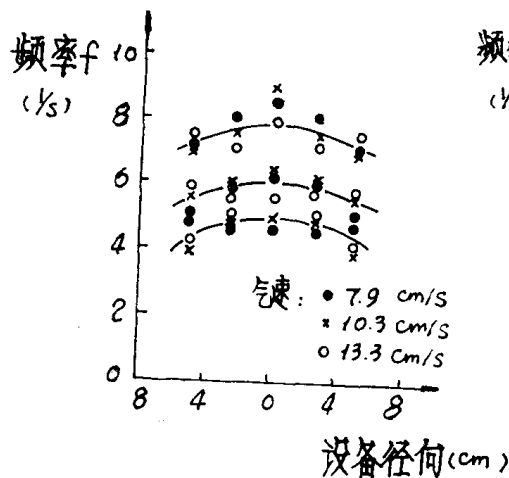


图4、气泡频率的径向分布

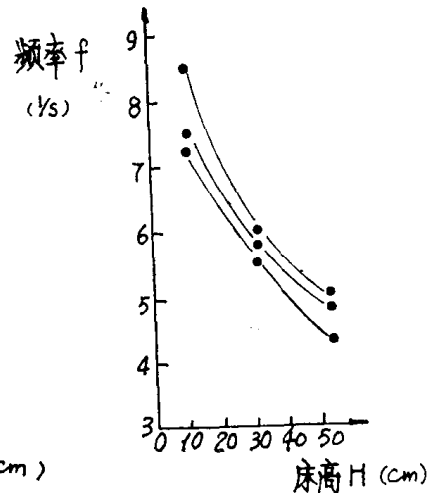


图5、气泡频率的轴向分布

影响不大,这说明了气速的增加导致了气泡直径的增大。

实验测定的气泡频率 f 是床高的函数。为了求出它在床层任一截面的平均值,我们将流化床分成几个相等的截面,将这些截面的频率平均即求得该截面处的平均频率,把这个值代入(7)式即可求出该截面的气泡平均当量直径 D_{Be} 。

气泡的汇合长大

由实验可知,在明矾石和FCC催化剂流化床中,气泡的平均直径沿床高而增大,气泡频率随床高的增加而减小。这与许多研究者的结论是一致的。可以假定气泡的汇合长大是沿垂直方向进行的,并在任一床高的水平面内,气泡直径相等并为球形。其次,假定在任一床高处气泡直径的变化沿单位床层高度的变化与气泡在此高度水平面内的分开程度成正比例,并可用幂函数的形式表示。秦霁光^[4]基于这种假定,导出了气泡在粗颗粒床中床层高度为 H 处的气泡当量直径 D_{Be} 为:

$$D_{Be}^{1 + \frac{b}{4}} = a \frac{(U_f - U_{mf})^{b/2}}{g^{b/4}} \frac{1 + b/4}{H + D_{Be}} \quad (8)$$

式(8)中的常数 a 和 b 需要通过实验测定。我们采用了密孔板进行实验,在这种情况下,可近似认为气泡的初始直径 $D_{B0} = 0$,并令

$$a \frac{4}{4+b} = K, \quad \frac{b}{4+b} = c,$$

方程(8)整理为: