

# Study on Operation Characteristics of Magnetically Stabilized Bed\*

Qiangqiang Fu, Tingting He, Qingtao Fu

Key Laboratory of Resources and Environmental Analytical Chemistry in Universities of Shandong, Linyi University, Linyi  
Email: fqtmail@yahoo.com.cn

Received: Dec. 18<sup>th</sup>, 2012; revised: Jan. 16<sup>th</sup>, 2013; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** A model MSB unit was designed and constructed, which was used to investigate the flow state with Fe fine particles as model catalyst, and water as liquid. The results indicated that the chain operation state with the high mass-transfer efficiency and the stable operation range is obtained.

**Keywords:** Magnetically Stabilized Bed; Cold Model Experiment; Stable Operation Range

## 磁稳定床的操作特性研究\*

付强强, 何婷婷, 付庆涛

临沂大学山东省高校资源与环境分析化学重点实验室, 临沂  
Email: fqtmail@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012年12月18日; 修回日期: 2013年1月16日; 录用日期: 2013年1月24日

**摘要:** 设计建造了磁稳定床冷模实验装置, 并以细小的铁粉颗粒为固相, 自来水为液相, 通过冷模实验研究了液固两相系统的流动状态, 确定了液固两相之间传质效率高的链式操作状态, 获得了磁稳定床的稳定操作区间。

**关键词:** 磁稳定床; 冷模实验; 稳定操作区间

### 1. 引言

目前在石油化工领域, 虽然大规模工业应用反应器主要是固定床和流化床, 但是它们也存在一些缺点。比如, 流化床轴向混合剧烈, 转化率低, 催化剂易带出, 产物与催化剂分离难, 操作成本高。固定床气液相扩散阻力大, 径向传热效率低, 易产生沟流, 床层压降高。而磁稳定床的研究和应用引起广泛的重视<sup>[1-4]</sup>。

### 2. 实验部分

#### 2.1. 引言

本文设计建造了磁稳定床冷模实验装置, 并以细

小的铁粉颗粒为固相, 自来水为液相, 通过冷模实验来研究液固的流动状态, 确定了液固两相之间传质效率高的链式操作状态, 获得了磁稳定床的稳定操作区间。

#### 2.2. 实验装置

##### 2.2.1. 实验装置流程图

磁稳定床冷模实验装置流程图如图1所示, 包括反应器部分, 外加磁场和电流控制部分、进料部分和测试部分。反应器是玻璃管, 外径为20 mm, 内径为10 mm, 长度为500 mm。四个轴向排布的赫姆霍兹铜线圈产生轴向均匀的磁场。每个线圈的匝数为400。线圈中的电流强度由变压器控制。

\*基金项目: 国家自然科学基金(20806093)。

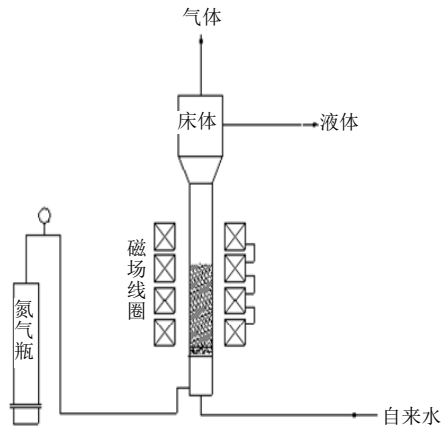


Figure 1. Schematic of cold experimental apparatus in magnetically stabilized bed  
图 1. 磁稳定床冷模实验装置流程示意图

### 2.2.2. 匀强磁场的设计

磁稳定床的关键因素是保持均匀的外加磁场，因为研究表明<sup>[5]</sup>，轴向均匀的磁场有助于床层较宽的的稳定操作区间以及较好的传质效率。均匀稳定的轴向磁场可以通过管外密绕载流螺线管和赫姆霍兹线圈来实现<sup>[6]</sup>。为了方便观察实验现象，本研究采用赫姆霍兹线圈来实现匀强磁场。电磁线圈技术指标为：线圈长度 64 mm，中心磁场  $H \geq 400$  Gs，内径为 45 mm，钢制骨架，无水冷，外径约 140 mm，四个线圈可串联使用，要求电源功率  $8 A \times 35 V$  (当电流为 7.2 A 时，中心磁场约为 400 Gs)。四个线圈串联组装，磁场方向垂直于地面；线圈座放于底架上，地平面距地面高度为 600 mm。

### 2.3. 实验材料

实验中选择了还原铁粉固体颗粒进行冷模研究。铁粉颗粒采用上海 CNPC 试剂厂的二次还原铁粉，筛取 80~100 目颗粒备用。其纯度 98%，密度  $7800 \text{ kg/m}^3$ ，近似球形。冷模实验中采用的介质与热模反应条件下反应物性质相似，以便取得的实验数据能更好的用来指导热模实验。但考虑到实验安全性和经济性，本实验中采取氮气和水作为气相和液相介质。实验所用氮气为高纯氮气，水为去离子水。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 流速对磁稳定床流动形式的影响

本实验中观察了在一定外磁场下，铁粉颗粒随着

流速在床层中的流动情况，如图 2 所示，表 1 为不同流速范围内床层的操作状态。由表 1 看出，磁场强度为 40.5 Oe，流速在  $0 \sim 1.35 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  时，床层静止，操作状态如图 2a 所示，这时床层流动状态接近固定床。流速提高到  $1.35 \times 10^{-3} \text{ m/s} \sim 1.62 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  时，颗粒排成链状，操作状态如图 2b 和 2c 所示，这时床层流动状态为稳定的悬浮态。流速高  $1.62 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  时，颗粒在床中做自由运动，如图 2d 所示，这时床层流动状态接近流化床。因此，在一定外加磁场下，随着流速的变化，床层表现出四种流动状态。在流速较小时，床层是一种比颗粒简单堆积稍高的固定床。当流速进一步提高时，床层有较大膨胀，并且有链的出现，但床层没有明显的摆动。流速继续增大时，床层膨胀程度更大，不仅有链的排列还有链的摆动。当流速很大时，链断裂，颗粒呈散状做自由运动。磁稳定床稳定操作的状态应该处于图 2b 和 c 所示。

### 3.2. 磁场强度对磁稳定床流动形式的影响

从图 3 可以看出，不同磁场强度下磁稳定床中磁性颗粒的流动表现为三种形式：(a) 磁场强度为 8 Oe

Table 1. Operation state under different flow rates  
表 1. 不同液体流速范围内的床层操作状态

磁场强度(Oe)	液体流速范围	床层操作状态
40.51	$0 \sim 1.35 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	图 2a 状态
	$1.35 \times 10^{-3} \sim 1.62 \times 10^{-2} \text{ m/s}$	图 2b、c 状态
	$> 1.62 \times 10^{-2} \text{ m/s}$	图 2d 状态
54.16	$0 \sim 4.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	图 2a 状态
	$4.6 \times 10^{-3} \text{ m/s} \sim 2.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$	图 2b、c 状态
	$> 2.7 \times 10^{-2} \text{ m/s}$	图 2d 状态
68.2	$0 \sim 4.6 \times 10^{-2} \text{ m/s}$	图 2a 状态
	$4.6 \times 10^{-2} \text{ m/s} \sim$	图 2b、c 状态
	-	图 2 d 状态

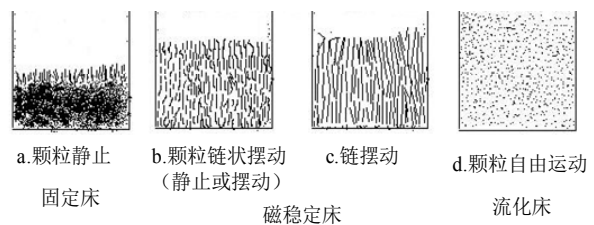


Figure 2. Operation state under different flow rates  
图 2. 不同流速下的床层操作状态示意图

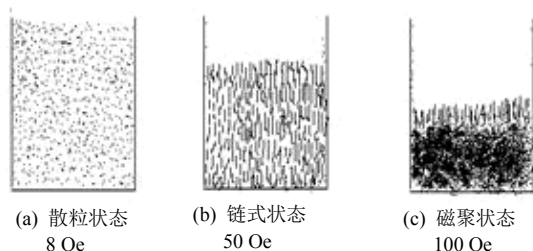


Figure 3. Operation state under different magnetization (flow rates  $1.6 \times 10^{-2}$  m/s)

图 3. 不同磁场强度的床层操作状态(液体流速  $1.6 \times 10^{-2}$  m/s)

时, 磁性颗粒呈散粒状; (b) 磁场强度为 50 Oe 时, 磁性颗粒呈链式状; (c) 磁场强度为 100 Oe 时, 磁性颗粒呈磁聚状。刚开始, 磁场强度很小时, 铁粉颗粒的磁化程度小, 相互作用小, 因此铁粉颗粒在床层中作自由运动。当磁场进一步增大时, 颗粒沿磁场方向排列成链状, 床层颗粒呈链摆动状态。磁场继续增大时, 颗粒团聚在一起, 形成磁聚状态。在气液固三相同时存在时, 床层操作形式和液固系统相似, 但气体流量对床层的稳定操作影响很大。

由以上实验可见, 散粒操作状态返混率高, 操作范围窄, 颗粒易流失。而磁聚操作状态易于形成沟流, 降低催化剂的颗粒利用率。而链式操作状态, 因为颗粒聚集成链状, 链彼此的间隙均匀, 难于形成沟流,

固体润湿充分均匀, 液固传质效率高, 而且床层对大气泡有较好的破碎作用, 形成小气泡, 气液接触面积增大, 有利于床层内传质效率的提高。综上所述, 在磁稳定床中进行加氢反应时, 最佳操作状态为链式状态。为了确保磁稳定床的高效率, 必须保证其床层是在链式状态。

#### 4. 结论

综上所述, 铁粉颗粒为固相, 自来水为液相, 可以形成操作范围较宽的磁稳定床层。链式操作状态是液固两相反应的最佳操作状态。

#### 参考文献 (References)

- [1] 慕旭宏. 气液固三相磁稳定床用于加氢反应过程的探索性研究[D]. 北京: 石油化工科学研究院, 1996.
- [2] R. E. Rosensweig. Magnetic stabilization of the states of uniform fluidization. *Science*, 1979, 204(1): 57-59.
- [3] 谢文华. 磁性催化剂与磁稳定床反应器[J]. *化学进展*, 2009, 11(21): 23-40.
- [4] 龚全安. 磁稳定床研究进展[J]. *河北化工*, 2005, 110(5): 145-155.
- [5] R. E. Rosensweig. Hydrocarbon conversion process utilizing a magnetic field in a fluidized bed of catalytic particles. US Patent: 4136016, 1979.
- [6] R. E. Rosensweig. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge: University Press, 1985.