

## 作者简介

余国琮, 1943年毕业于昆明西南联合大学化工系。1945年在美国密执安大学获科学硕士学位, 1947在匹兹堡大学获哲学博士学位, 并应邀留在该校化工系先后担任讲师、助理教授。新中国成立后, 于1950年秋返回祖国。先后在北方交通大学、唐山工学院、天津大学化工系任教授。现任天津大学化学工程研究所所长、天津大学化工分离技术及新型填料开发中心主任以及蒸馏国家重点实验室主任。担任全国政协常务委员、中国化工学会荣誉理事等。在国外, 担任欧洲化学工程学会的蒸馏、吸收与萃取专业委员会特邀委员, 国际蒸馏会议学术委员会委员等。在国内外发表科学研究论文一百多篇, 主编“化学工程辞典”等六本专著及教材。曾获全国科学大会奖, 国家科技进步二、三等奖, 国家教委科技进步一、二等奖, 全国优秀教材奖等多项国家级奖, 并被评为天津市特等劳动模范及荣获全国五一劳动奖章和全国优秀科研工作者称号。

---

【上接第29页】

## 参考文献

- [1] Li, Jinghai(李静海), Dong, Yuanki(董元吉) and Guo, Musun(Mooson Kwauk 郭慕孙). Mathematical Modeling of Particle-Fluid Two-phase Flow, Science in China(Series B), 33, No. 5, 524(1990).
- [2] Li, Jinghai, Tung, Yuanki and Kwauk, Mooson, Multi-Scale Modeling and Method of Energy Minimization in Particle-Fluid Twophase Flow, in Circulating Fluidized Bed Technology I, P. Basu and J. F. Large(eds), Pergamon Press, 89(1988).
- [3] Li, Jinghai, Tung, Yuanki and Kwauk, Mooson Energy Transport and Regime Transition of Particle-Fluid Two-Phase Flow, in Circulating Fluidized Bed Technology I, P. Basu and J. F. Large(eds), Pergamon Press, 75(1988).
- [4] Li, Jinghai, Reh, Lothar and Kwauk, Mooson Application of Energy Minimization Principle to Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, the 3rd International Conference on Circulating Fluidized Beds, Oct. 15-18, Nagoya, Japan(1990).
- [5] 李静海、郭慕孙, L. Reh, 垂直并流上行两相流不均匀性的机理, 中国工程热物理学报, 12, (1991).
- [6] Li, Jinghai, Kwauk, Mooson and Reh, Lothar, Dominant Role of Energy Minimization in G/S Fluidization, Paper Presented at the 7th International Fluidization Conference, May 3-8, Gold Coast, Australia(1992).

## 颗粒流体两相流能量最小多尺度作用(EMMS)模型简介

李静海 郭慕孙

(中国科学院化工冶金研究所)

颗粒流体两相流能量最小多尺度作用模型(EMMS模型)认为,不均匀两相流系统中存在多尺度的相互作用,通常的动量质量守恒条件并不足以确定系统的状态,稳定性条件是必要的。该模型实现了对不均匀两相流状态的定量描述和对聚式散式流态化系统的统一关联,并揭示了不均匀结构、饱和夹带、流型过渡等重要现象的机理。本文简述了该模型的基本思想和要点。

主题词:能量最小 多尺度作用 两相流 数学模型

根据颗粒浓度高低,颗粒流体两相流可有稀薄和稠密之分。前者由于颗粒均匀分布于流体中,流动结构简单并状态单一,传统理论可以模拟这样的系统;后者则由于系统内部不均匀结构和状态多值性的存在,流动结构极其复杂,难以直接用传统方法解决问题。

颗粒流体两相流能量最小多尺度作用(EMMS即Energy-Minimization Multi-Scale)模型<sup>[1]</sup>,与传统理论不同,通过多尺度分析和能量最小原理两个途径,分析系统内部的结构不均匀性和状态多值性,解决了一些用传统方法无法解决的问题。进一步的研究显示了这一模型的广泛应用。该文旨在介绍模型的基本思想和要点。

### 基本思想

结构不均匀性和状态多值性是颗粒流体

两相流系统的两个主要特征。

结构不均匀性引起颗粒流体之间多尺度相互作用,即:

微尺度作用:流体与单颗粒之间的相互作用;

宏尺度作用:稀相和密相之间的相互作用(气泡与乳化相或团聚物与稀乳相之间);

宇尺度作用:整个颗粒流体系统与外界的作用。

用稀薄两相流中适用的传统理论很难分析它们各自的作用规律及其相互联系。

状态多值性与系统稳定性相联系。在同一操作条件下,系统可以呈现截然不同的两种状态。尽管两种状态满足相同的动量和质量守恒条件,但可具有完全不同的流动结构。比如在循环流态化床中,顶部稀相区和底部密相区颗粒与流体之间相互作用机理完全不同。因而仅用传统的质量和动量守恒分析方

法并不足以确定系统的状态,而稳定性分析是必要的。

针对以上两个问题,EMMS 模型分别提出多尺度分析方法和能量最小原理,在此基础上,对系统进行动量和质量守恒分析,实现了不均匀两相流系统状态的定量叙述。

### 关键性步骤

在非均匀颗粒流体两相流中,除流体对颗粒的悬浮输送作用外,还存在诸如加速、减速、碰撞和循环等能量耗散过程。分析颗粒流

体相互作用的主要困难在于能量耗散过程的复杂性和多尺度作用的叠加。为此,EMMS 模型采取了两个步骤来简化所分析的系统<sup>[1~3]</sup>。

#### 1. 能量分析和总系统分解

根据流体能量消耗的方式,总的两相流系统可以分解成悬浮输送和能量耗散两个分系统,如图 1 所示。在悬浮输送分系统中,流体消耗的能量  $N_a$  全部用于悬浮和输送颗粒;而能量耗散分系统中气流的能量  $N_d$  则消耗于颗粒的碰撞、混合、加速和循环等过程。总的能量消耗(相对于单位质量的颗粒)。

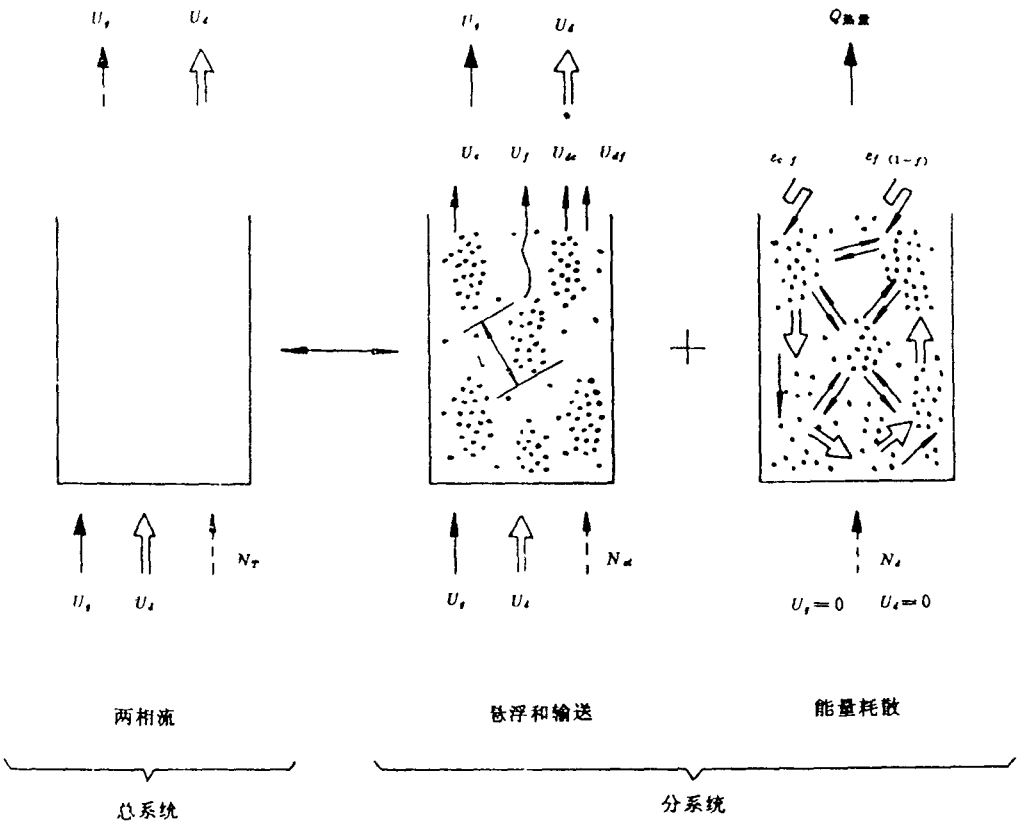


图 1 颗粒流体两相流总系统分解

$$N_T = N_u + N_d = U_f \cdot g$$

$$N_u = N_s + N_m$$

$$N_m = G_s \cdot g / (1 - \epsilon) \rho_f$$

$$N_s = U_d \cdot g / (1 - \epsilon)$$

式中

$G_s$  颗粒质量流率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$N_s$  流体悬浮颗粒的能耗,  $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{kg})$

$N_m$  流体输送颗粒的能耗,  $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{kg})$

$U_f$  流体表观速度,  $\text{m/s}$

$U_d$  颗粒表观速度,  $\text{m/s}$

$\epsilon$  平均空隙率

这样,可产生两个效果:一是复杂的能量耗散过程从总系统中分解出来,简化了分析过程;二是无规律可寻的总能耗  $N_T$  分解为两个可取极值的分量  $N_u$  和  $N_d$ ,从而找到了系统稳定性条件。

在流态化系统中,  $N_u$  取最小值;对应的  $N_d$  取最大值。

## 2. 多尺度分析和悬浮输送分系统分解

为了分析悬浮输送分系统中的多尺度相互作用,该分系统又可以分解为三个可视为均匀的系统:稀相、密相和相互作用相,其中,相互作用相是为了分析稀相和密相之间的相互作用(即宏尺度作用)而虚拟的一个系统,把密相团聚物等价为“颗粒”,稀相混合物等价为“流体”。这样,复杂的多尺度作用就表达为稀相和密相中的微尺度作用和相互作用相中的宏尺度作用,简化了计算,并将  $N_u$  分解为三个分量,即

$$N_u = (N_u)_{\text{稀相}} + (N_u)_{\text{密相}} + (N_u)_{\text{相互作用相}}$$

这三个分量是容易计算的,从而实现了  $N_u$  的定量表达。

## EMMS 模型

根据多尺度分析,悬浮输送分系统的状态可由八个参数组成的向量  $X$  来定义:

$$X = \{\epsilon_s, \epsilon_f, f, U_f, U_c, l, U_{dc}, U_{df}\}$$

这八个参数依次为:密相空隙率  $\epsilon_s$ 、稀相空隙率  $\epsilon_f$ 、密相体积份额  $f$ 、稀相流体表观速度  $U_f$ 、密相流体表观速度  $U_c$ 、团聚物当量直径  $l$ 、密相颗粒表观速度  $U_{dc}$  和稀相颗粒表观速度  $U_{df}$ 。它们必须满足动量和质量守恒条件<sup>[1,2]</sup>:

$$F_i(X) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

然而,满足以上条件的  $X$  有无穷个,其中仅有一个是稳定的,并满足使  $N_u$  取极值这一条件。注意到稀相、密相和相互作用相中颗粒和流体之间相对速度  $U_{df}$ 、 $U_{dc}$  和  $U_c$  大于或等于零,EMMS 模型可表达为:

$$N_u = \min$$

$$F_i(X) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$U_{df} \geq 0, U_{dc} \geq 0, U_c \geq 0$$

该模型可以解析求解,也可数值求解。

## EMMS 模型的应用

EMMS 模型可用于确定颗粒流体两相流状态<sup>[1]</sup>;定义流型过渡,统一关联聚式和散式流态化<sup>[2]</sup>;揭示不均匀性机理<sup>[4,5]</sup>,为开发新型反应器提供依据;解决诸如最小鼓泡、饱和夹带等疑难问题<sup>[6]</sup>;统一解释和模拟两相流中各种现象和参数。

图 2 为用 EMMS 模型计算得到的 FCC ( $\rho_p = 930 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_p = 54 \mu\text{m}$ ) 和空气组成的两相流系统中八个状态参数、平均空隙  $\epsilon$  和气固相对滑移速度  $U_r$  随表观气速  $U_o$  的变化规律。其它方面的应用见相应的参考文献。

EMMS 模型的完善、推广和应用工作正在正在进行之中。

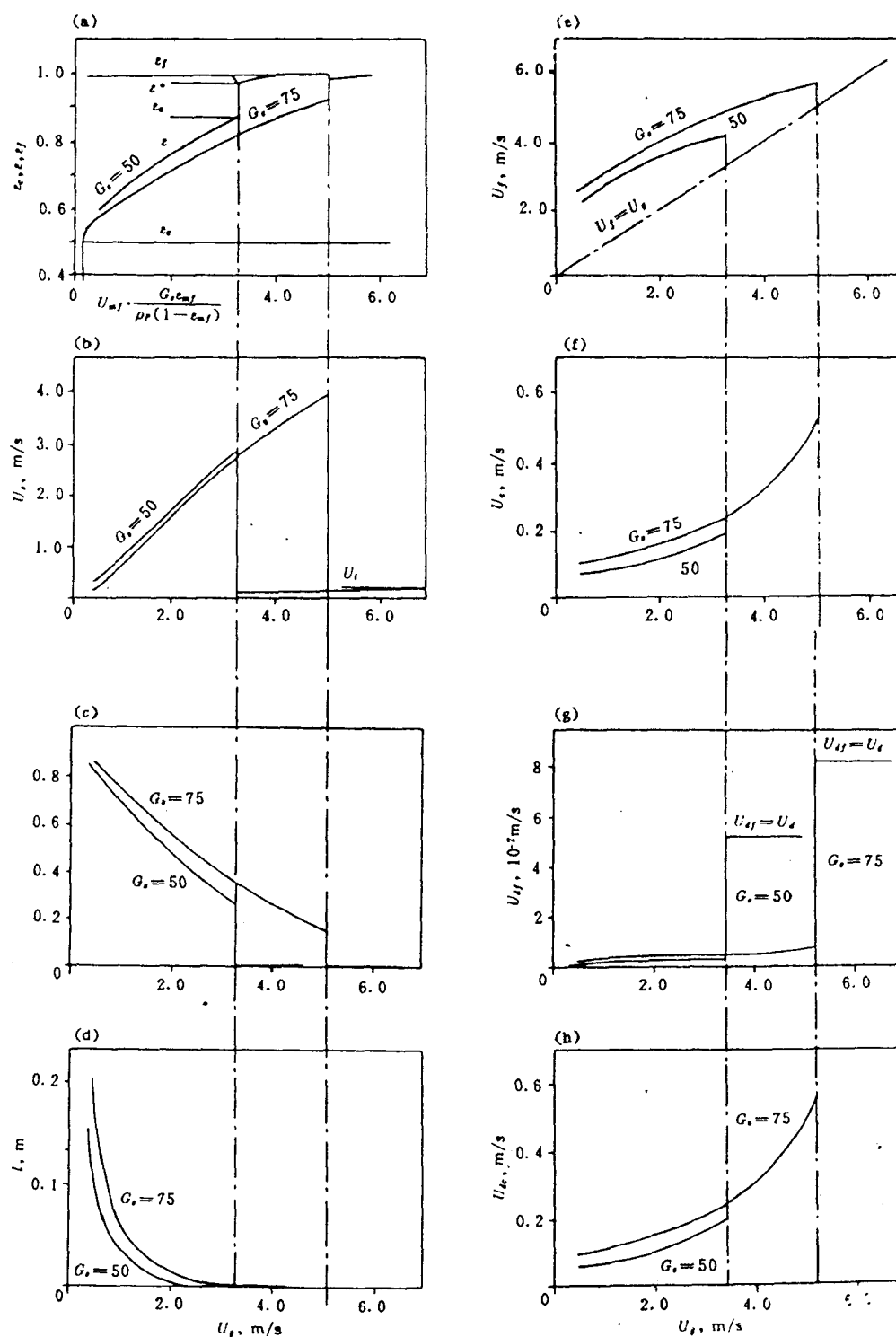


图2 用EMMS模型计算的颗粒流体两相流  
状态参数随 $U_g$ 变化规律(FCC/空气系统)

【下转第25页】