

# 关于二相流、多相流、多流体模型 和非牛顿流等概念的探讨\*

刘大有

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码100080)

中国科学院化工冶金研究所多相反应开放研究实验室, 北京(邮政编码100080)

**摘要** 本文分析了单相流、二相流和多相流等概念上的差异,也分析了单流体模型、双流体模型和多流体模型等概念上的差异,指出前面三种概念是按流动介质的客观物理构成划分的,而后者是按主观采用的研究方法划分的.目前这些概念在使用中存在一些混乱,如二相流与多相流,多相流与多流体模型等.本文还研究了扩散模型、非牛顿流模型和颗粒流模型等,指出前两种模型在分类上属于单流体模型,分析了非牛顿流模型、扩散模型和双(多)流体模型的特点和应用范围.最后,以泥石流为例讨论了以上概念的应用.

**关键词** 单相流; 二相流; 多相流; 单流体模型; 双流体模型; 多流体模型; 扩散模型; 非牛顿流模型; 颗粒流模型; 风沙流; 泥石流

## 1 引言

化工设备中经常遇到各种复杂介质(包括二相混合介质)的流动,描述它们的运动可以采用单流体模型(包括非牛顿流模型)、双流体模型或多流体模型等.关于河流中泥沙运动,一般认为,沿流向泥沙与水体一起运动,而沿垂向和侧向泥沙有相对于水体的扩散运动,因此一般采用扩散模型.泥石流是一种液-固混合物流动,由于其中固体物质的含量和粒度可以在很宽的范围内变化,因此它的运动性质也变化很大.过去研究泥石流大多采用非牛顿流模型,近年来许多人开始采用双流体模型,但许多人称之为二相流模型.目前,关于二相流、双流体模型、非牛顿流等概念使用上有一定的混乱,亟待澄清.

在物理学上,物质有气、液、固三态<sup>1)</sup>.二相流体动力学(简称二相流)是研究包含两种相态的复杂混合物的运动的流体力学分支.顾名思义,多相流体动力学(简称多相流)研究的对象是组成上更复杂的混合物系统.二相流有气-固流,液-固流和气-液流等.对于由不相溶

\* 国家自然科学基金资助项目,并得到中国科学院山地灾害——泥石流、滑坡研究特别支持经费资助.

1) 有时也把等离子体称为物质的第四态,从这意义上说部分电离气体的运动也是一种二相流.事实上,除个别论著(如[1])外,在多相流研究中一般不涉及等离子体,或者把它纳入气相.

的两种液体组成的液-液流，在运动规律上与气-液流和液-固流很接近，因此，人们也把它视为一种二相流。从以上意义上说，所谓的多相流也就只有像空气-水-沙、气-油-沙这类三相流和气-油-水-沙这类四相流。目前，真正包含三个和三个以上相态的复杂混合物系统运动的研究还很少，多相流研究基本上就是二相流研究。

但是，也有许多作者把包含几种粒径的气体-颗粒流也称为多相流<sup>[2,3]</sup>，这主要是因为粒径不同的颗粒有不同的动力学性质。从这意义上说，自然界和工业中有很多多相流的例子，这种多相流与气-固二相流是同义词了。显然，现在关于多相流这一术语有狭义的和广义的两种理解。在这两种理解中，对“相”字分别理解为物理学中的相和动力学中的相。由于多相流术语的广义用法与多流体模型实际上是同义的（见下述），因此，笔者建议多相流术语只保留它的狭义用法。

本文将首先讨论连续介质模型、单流体模型、双流体模型、多流体模型、扩散模型、非牛顿流模型和颗粒流模型等概念，然后讨论以上这些概念在泥石流研究中的应用。

在本文中提到的相，除非特别声明，都是物理学意义上的相。

## 2 单流体模型、双流体模型和多流体模型

单流体模型、双流体模型和多流体模型都属于连续介质模型。连续介质模型是实际介质的一种科学抽象。实际介质都是由分子和原子组成，在分立的分子和原子之间存在大量空的空间。在连续介质模型中，这些分子和原子的质量、动量和能量等均布到周围的空间中，将实际的介质抽象为在空间连续分布的介质，相应地有连续分布的密度、速度、应力（包括压强和粘性应力）和温度等。

实际存在的某种均相的或多相的混合介质，可以抽象为一种充满整个流场的连续介质，有一组连续分布的密度场、速度场、应力场和温度场等，这就是单流体模型。也可将其中的一个或几个组分抽象为一种充满整个流场的连续介质，另外一些组分抽象为另一种、也充满整个流场的连续介质，两种连续介质在同一时空内互相重叠，这就是双流体模型。类似地也可以抽象为三个或更多个在时空内互相重叠的连续介质，这就是三流体模型或多流体模型。这些连续介质既然存在于同一个时空，那么每两种连续介质之间就必定有相互作用，包括质量交换、动量交换和能量交换等。流态化的颗粒（如流化床中的颗粒，河流中的泥沙，泥石流中的石块等）能否视为连续介质，从什么意义上理解其为连续介质等，在[4]中有详细的论述。

一般说，一种物质没有必要用两种或两种以上的连续介质代替。但是，对于多组分的混合介质（可以是单相的，如混合气体，也可以是多相的），可以用与组分数同样数目的连续介质代替，也可以用较少种数的、乃至只用一种连续介质代替。因此，描述纯物质运动几乎无例外地采用单流体模型；对于二元混合气体和粒径单一的气-固二相混合物等，可以采用单流体模型，也可以采用双流体模型；对于多元混合气体和粒径不均匀的气-固二相混合物，从简到繁可以采用单流体模型，或双流体模型，或多流体模型。各组元的动力学性质相差越大，研究运动的精度要求越高，则越需要采用能较细致地描写运动，因而也是较复杂的力学模型，反之则可采用较简单的力学模型。例如，对于二元气体混合物，由于两种气体之间的相互作用非常强烈，弛豫时间很短（倘若某种外力作用使两种气体之间出现速度差，则一旦外力消失，这两种气体就会因强烈的相互作用而很快地使速度趋于一致），因此，一般均采用单流

体模型，并有相当满意的精度。对于气-固混合物，由于两相密度相差很大（即动力学性质差异大），而且两相之间的相互作用较弱，因此常采用双流体模型。但是也不排斥在某种流动条件下或为某种特定的研究目的（如工程概算等）而采用单流体模型。如果颗粒粒径（或材料密度）很不均匀，又希望较准确地反映出不同颗粒运动行为的差异，就需要采用多流体模型。由于液体密度与固体密度相对说比较接近，因此单流体模型在液-固流中应用还比较多。

由此可见，根据运动介质的物理属性，混合物可分为均相的、二相的和多相的，它们之间的差异是客观存在的；对于某一具体流动，不论它们的介质包含多少个物理上的相，都可采用各种力学模型（单流体模型、双流体模型或多流体模型），这是研究方法上的差异，随研究者的研究目的不同而不同，是一种主观上的差异。当然，人们选择力学模型时还是要同介质的性质联系起来，以便使模型更接近实际。

笔者建议，单相流、二相流和多相流术语中的相，以理解为物理学上的相为宜，以流动介质中实际存在的物理上的构成定义单相流，二相流或多相流。在不同相之间、同一相内不同成分之间或不同粒径的颗粒之间，若在动力学行为方面存在差异，那么可以不管这种差异而只用一组动力学方程，也可以引入两组或多组动力学方程而粗、细不等地研究这种差异，对此可用单流体模型、双流体模型和多流体模型这些术语加以区分。据此，目前文献中称为多相流的许多气体-颗粒流动，似乎可改称为“用多流体模型研究的气-固二相流”，否则多相流与二相流、[二]多相流与[双]多流体模型等概念容易发生混淆。

事实上，多流体模型的应用还可以更灵活一些，一个流体模型可包含几个物理上的相，某一相介质也可分属于几个流体模型。例如，关于泥石流质泥石流的运动，固相介质常按粒度分为粗、细两组，粗颗粒用一种流体描述，而细颗粒与水体合并用一种流体描述。

在快速流化床内，颗粒有聚团现象，但也有部分颗粒不聚团，并分散在气流中<sup>[6]</sup>。那些不聚团的颗粒的速度很接近气体速度，而聚团的颗粒的速度则小得多。这时，可以按传统的方法将气相当作一种连续介质，固相当作另一种连续介质；但也可以将气相和一部分不聚团的颗粒当作一种连续介质，而将聚团的颗粒当作第二种连续介质，两种介质之间也可能有质量交换。这两种抽象法都可以应用，根据研究问题的性质而定，哪种方便就用哪种。

如果对于处理有利，在某种特定的条件下也可以将均匀粒径的颗粒按照某种运动特征将其分成两组，用两组动力学方程分别描写这两组粒子的运动，加上气相运动，就需采用三流体模型。例如，当研究风沙运动时，可将垂向分速为正的颗粒当作第二种连续介质，垂向分速为负的颗粒当作第三种连续介质<sup>[6]</sup>。在重力作用下，向上运动的颗粒达到顶点后变为向下运动，这说明这两种连续介质之间有质量交换。

由此可见，二相流与双流体模型是完全不同的两个概念。

### 3 连续介质力学方程

对于每一种连续介质都可根据质量、动量和能量守恒原理写出一组Euler型的守恒方程。对于第  $k$  种连续介质，这些方程为

$$\frac{\partial \sigma_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\sigma_k \mathbf{v}_k) = \Gamma_k \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sigma_k \mathbf{v}_k) + \nabla \cdot (\sigma_k \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k) = -\nabla \cdot \mathbf{P}_k + \sigma_k \mathbf{b}_k + \mathbf{M}_k \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \sigma_k \left( e_k + \frac{1}{2} v_k^2 \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \sigma_k v_k \left( e_k + \frac{1}{2} v_k^2 \right) \right]$$

$$= -\nabla \cdot (\mathbf{P}_k \cdot \mathbf{v}_k + \mathbf{q}_k) + (\sigma_k \mathbf{b}_k \cdot \mathbf{v}_k + \sigma_k \bar{q}_k) + E_k \quad (3.3)$$

其中  $\sigma_k, \mathbf{v}_k, e_k, (-\mathbf{P}_k), \mathbf{q}_k, \mathbf{b}_k$  和  $\bar{q}_k$  分别为组元  $k$  的分密度, 速度矢, 比内能, 分应力张量, 分热流量, 单位质量的体积外力和体加热率;  $\Gamma_k, \mathbf{M}_k$  和  $E_k$  分别为单位体积的控制体中连续介质  $k$  在单位时间内从其他连续介质获得的质量、动量和能量。为了使方程组封闭, 还需要补充关于  $\mathbf{P}_k, \mathbf{q}_k, \mathbf{b}_k, \bar{q}_k, \Gamma_k, \mathbf{M}_k$  和  $E_k$  等量的本构关系。

对于单流体模型, 因为只有一种连续介质, 故可略去下标  $k$ ; 或者将下标  $k$  改为  $m$ , 表示它们都是混合物的平均量, 同时略去分密度、分应力和分热流中的“分”字。在单流体模型中,  $\Gamma_k, \mathbf{M}_k$  和  $E_k$  均为零, 可略去。

对于双流体模型, 下标  $k=1$  或  $2$ , 两种组元的守恒方程在形式上完全一样 (事实上, 以上三个守恒方程适用于任何一种连续介质), 它们之间的差异仅在于  $\mathbf{P}_k$  和  $\mathbf{q}_k$  等的本构关系式上。由于组元  $1$  与组元  $2$  之间的任何相互作用, 在混合物体系中都属于内部作用, 因而必定有

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 = 0, \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 = 0, E_1 + E_2 = 0 \quad (3.4)$$

对于多流体模型, 例如有  $\alpha$  种连续介质组成的多流体模型, 下标  $k=1, 2, \dots, \alpha$ , 方程组 (3.1)–(3.3) 对任何一种连续介质均适用, 并有

$$\Gamma_k = \sum_{\substack{s=1 \\ (s \neq k)}}^{\alpha} \Gamma_{k,s}, \mathbf{M}_k = \sum_{\substack{s=1 \\ (s \neq k)}}^{\alpha} \mathbf{M}_{k,s}, E_k = \sum_{\substack{s=1 \\ (s \neq k)}}^{\alpha} E_{k,s}, \quad (k=1, 2, \dots, \alpha) \quad (3.5)$$

$$\Gamma_{k,s} = -\Gamma_{s,k}, \mathbf{M}_{k,s} = -\mathbf{M}_{s,k}, E_{k,s} = -E_{s,k}, \quad (s \neq k) \quad (3.6)$$

其中  $\Gamma_{k,s}, \mathbf{M}_{k,s}$  和  $E_{k,s}$  分别为单位时间内单位体积控制体中连续介质  $k$  从连续介质  $s$  获得的质量、动量和能量。

方程组 (3.1)–(3.3) 是将守恒原理应用于连续介质而得到, 不涉及实际介质的具体构成。但是, 关于  $\mathbf{P}_k, \mathbf{q}_k, \mathbf{M}_k$  和  $E_k$  等量的本构关系, 不论采用实验的方法或理论分析的方法确定, 其结果都与介质的物性有很大关系。例如, 对于纯气体运动 (略去下标  $k$ ) 或混合气体的平均运动 (下标  $k=m$ ) 有

$$\mathbf{P}_k = p_k \mathbf{U} - \mu_k [\nabla \mathbf{v}_k + (\nabla \mathbf{v}_k)^T] + \frac{2}{3} \mu_k (\nabla \cdot \mathbf{v}_k) \mathbf{U} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{q}_k = -\lambda_k \nabla T_k \quad (3.8)$$

$$p_k = \sigma_k R_k T_k \quad (3.9)$$

$$de_k = (c_v)_k dT_k \quad (3.10)$$

$$\Gamma_k = \mathbf{M}_k = E_k = 0 \quad (3.11)$$

其中  $T_k, \mu_k, \lambda_k, R_k$  和  $(c_v)_k$  分别为气体的 (无下标) 或混合气体平均的 (下标  $k=m$ ) 温度, 动力粘性系数, 导热系数, 气体常数和定容比热;  $p_k$  为气体的 (无下标) 或混合气体的 (下标  $k=m$ ) 压强;  $\mathbf{U}$  是单位张量。

对于惰性的二元混合气体, 当采用双流体模型 (两组元分别用下标  $k=1$  和  $2$  表示) 时, 式 (3.7)–(3.10) 对于每一组元仍适用, 这时  $T_k, \mu_k, \lambda_k, R_k, (c_v)_k$  和  $p_k (k=1, 2)$  则分别是

组元 $k$ 的温度, 动力粘性系数, 导热系数, 气体常数, 定容比热和分压强, 此外有<sup>[7,8]</sup>

$$\Gamma_k = 0, \quad (k=1,2) \quad (3.12)$$

$$-\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_2 = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \frac{\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2}{\tau_\nu} \quad (3.13)$$

$$-E_1 = E_2 = \mathbf{M}_2 \cdot \frac{m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2}{m_1 + m_2} + \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} \frac{3k}{2\tau_T} (T_1 - T_2) \quad (3.14)$$

其中 $m_k$ 和 $n_k$  (下标 $k=1,2$ ) 分别是组元 $k$ 的分子质量和数密度,  $n_k \equiv \sigma_k/m_k$ ,  $k$ 是Boltzmann常数,  $\tau_\nu$ 和 $\tau_T$ 分别是两组元间的速度弛豫时间和温度弛豫时间.

对于具有均匀粒径的低速气体-颗粒流, 则有 (为简单起见, 略去了与湍流脉动及二相流特有的各种脉动有关的量, 下标 $k=1,2$ )<sup>[7,9,10]</sup>

$$\sigma_k = \alpha_k \rho_k, \quad \rho_1 = \text{常数}, \quad \rho_2 = \text{常数}$$

$$\mathbf{P}_k = \alpha_k (p\mathbf{U} - \boldsymbol{\tau})$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1$$

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0$$

$$\mathbf{M}_k = p\nabla\alpha_k + \mathbf{F}_k$$

其中 $p, \boldsymbol{\tau}$ 为混合物的压强和粘性应力张量;  $\mathbf{F}_k$ 是除 $p\nabla\alpha_k$ 以外的相间力, 包括相间阻力, 附加质量力, Basset力, Magnus力和Saffman力等;  $\alpha_k$ 和 $\rho_k$ 是相 $k$ 的体积分数和相密度 (对于固相, 此即材料密度, 对于液相和气相, 此即液体和气体的密度). 到目前为止, 关于混合物的粘性应力张量 $\boldsymbol{\tau}$ 和相间力的本构式还不很成熟, 需凭经验或用实验的方法确定. 但有一点是肯定的, 它们都同每一相的物性有很大关系.

#### 4 扩散模型——一种修正的单流体模型

在本节和下一节, 假设流动速度较低, 不必考虑介质的可压缩性, 因而求解速度场和压强场时可以不考虑能量方程.

当采用单流体模型研究二元混合介质运动时, 只建立一组守恒方程, 求解这组方程只能得到一组流场参数: 密度场、速度场和应力场等, 它给出了混合物的平均运动状态. 若要得到更详尽的流场信息, 除可采用双流体模型外, 还可以采用扩散模型.

扩散模型是以单流体模型为基础的一种修正模型, 它用一组混合物的守恒方程求解混合物的运动状态, 再用一个 (例如组元2的) 扩散方程和一个扩散速度本构式求解一个组元的扩散速度和浓度 (例如 $\mathbf{V}_2$ 和 $\varphi_2$ ) 变化, 通过换算很容易求出另一组元的扩散速度和浓度变化. 最简单的扩散速度本构式是根据Fick定律写出的

$$\mathbf{V}_2 = -D \nabla \ln \varphi_2 \quad (4.1)$$

虽然描述二相介质运动有时也用扩散模型, 但一般说 Fick 定律型的扩散速度本构式已不适用, 而应采用更完全的扩散速度本构式<sup>[7,8]</sup>.

用双流体模型的方程组(3.1)–(3.2) (因 $k=1$ 和 $2$ , 因此共有4个方程) 可以解出每一组元的分压 $p_k$ 和速度 $\mathbf{v}_k$  (对于气体混合物), 或者混合物压强 $p_m$ , 组元2的体积分数 $\alpha_2$ 和每一组元的速度 $\mathbf{v}_k$  (对于二相混合物), 利用下式可以由此推算出混合物的压强 $p_m$ 和速度 $\mathbf{v}_m$ 、每个组元的浓度 $\varphi_k$ 和扩散速度 $\mathbf{V}_k$ . 对于气体混合物

$$p_m = p_1 + p_2 \quad (4.2a)$$

$$v_m = \frac{\sigma_1 v_1 + \sigma_2 v_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (4.3a)$$

$$V_k = v_k - v_m \quad (k = 1, 2) \quad (4.4a)$$

$$\varphi_k = \frac{p_k m_k}{p_1 m_1 + p_2 m_2} \quad (k = 1, 2) \quad (4.5a)$$

对于二相混合物,

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 \quad (4.2b)$$

$$v_m = \frac{\alpha_1 \rho_1 v_1 + \alpha_2 \rho_2 v_2}{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2} \quad (4.3b)$$

$$V_k = v_k - v_m \quad (k = 1, 2) \quad (4.4b)$$

$$\varphi_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2} \quad (k = 1, 2) \quad (4.5b)$$

用扩散模型的方程组[混合物质量的和动量的守恒方程(3.1)和(3.2) ( $k = m$ ), 组元 2 的扩散方程和组元 2 的扩散速度本构式]可以解出混合物压强  $p_m$  和速度  $v_m$ , 组元 2 的扩散速度  $V_2$  和浓度  $\varphi_2$ , 由此也可推算出每一组元的速度  $v_k$  和分压  $p_k$ , 或组元的体积分数  $\alpha_k$ .

与一般的单流体模型相比, 采用扩散模型可以得到比较完全的流场信息, 当然它的求解过程比解单流体方程组复杂一些. 扩散模型可以得到几乎与双流体模型一样多的信息, 但在求解方面它比双流体模型简单得多. 最近的研究表明<sup>[8]</sup>, 以双流体模型的方程组为基础, 引入一些近似假设后, 可以推导出扩散模型的方程组. 这些近似假设对于气体混合物完全适用, 引起的误差非常小, 但对于二相混合物, 它不大适用, 或者说包含很大的或较大的误差. 这就解释了为什么人们在研究气体混合物运动时都采用扩散模型, 而研究二相混合介质运动时多采用双流体模型.

下面简要地总结一下单流体模型、扩散模型和双流体模型之间的关系. 若完全忽略两种流体之间的相对运动(相对速度为零), 则双流体模型就退化为(基本形式的)单流体模型; 将双流体模型的两个动量方程(全微分形式)相减而得到关于两种流体相对运动的动量方程, 若在此方程中仅忽略两种流体之间的相对加速度(并不完全忽略它们之间的相对运动), 则此动量方程就退化为一般形式的扩散速度本构式[式(4.1)是这种本构式进一步简化的结果], 双流体模型就退化为扩散模型.

### 5 非牛顿流模型——单流体模型之一

在单流体模型的方程(3.1)和(3.2) (下标  $k = m$ ) 中, 粘性应力与应变率之间可能成正比(牛顿流体), 也可能不成正比(非牛顿流体), 因此, 单流体模型又可分为牛顿流体型的和非牛顿流体型的<sup>1)</sup>. 大多数二相混合物的应力-应变率关系是非牛顿型的, 所以, 二相混合物若不采用双(多)流体模型, 则几乎都要采用非牛顿流模型. 对于气-固流和气-液流, 大多采用双流体模型; 而对于混-固流, 由于两相的相密度相差并不悬殊, 速度较小, 在一定条件下也可采用非牛顿流模型.

1) 虽然在原则上双流体模型也可根据粘性应力本构式而分为牛顿型的和非牛顿型的, 但一般都不这么分, 因为在双流体模型中组元间作用力等量的本构式是人们更关心的, 而粘性应力本构式是牛顿型或非牛顿型的问题相对来说不太重要. 但是, 随着研究的深入, 将来也可能需要对双流体模型再作细分.

因此,现在通常所说的非牛顿流模型是单流体模型的一种。在这种模型中,所有组元都具有相同的速度,由此不可能获得组元间相对运动的任何信息。

两相之间存在较大速度差的任何实际流动,都不宜采用非牛顿流模型,因为这种模型给不出任何速度差的信息,这时以采用双流体模型为宜。

如前所述,流-固混合物(气-固的或液-固的)运动是一种二相流,这是毋庸置疑的,研究时需根据具体条件决定采用单流体模型(多数是非牛顿流模型)或双流体模型。

虽然原则上也可以在非牛顿型的应力-应变率关系基础上采用扩散模型,并由此得到某些组元之间的相对运动,但实际上这种模型不多见。

## 6 颗粒流模型——两种流体不耦合的双流体模型<sup>1)</sup>

当颗粒浓度很高时,在同一混合物体积内,流体的质量远小于固相的质量(相比之下液-固流比气-固流更难于满足此条件),固相的运动几乎完全不受流体运动的影响。固相可能完全不动,也可能在自身重力作用下克服床面上的摩擦而运动。在这种情况下,若只为求解固相运动,则可完全忽略流体存在,采用单流体模型;若要解两相运动,则可在求出固相运动后再解流体相的运动,求解时应计入固相对流体运动的影响,这在原则上属于双流体模型。

## 7 各种力学模型在泥石流研究中的应用

下面以泥石流为例,讨论一下以上介绍过的各种力学模型的应用。

按照物质的组成,泥石流是一种液-固二相流。

根据固体颗粒的含量、粒径大小和级配等,泥石流又可分为泥质的、水石质的和泥石质的泥石流等几类,还可按稀性泥石流和粘性泥石流分类,分类法的选择在很大程度上取决于研究的目的。一般说,不同种类的泥石流需采用不同的研究方法、采用不同的力学模型。但力学模型的选择不是绝对的。对于同一流动,根据研究目的、精度要求之不同,可以采用不同的模型。下面的论述只是给出选用不同力学模型的一般原则。

下面假设泥石流可以采用连续介质假设(参见[4])。

7.1 泥质泥石流和河流中的泥沙运动 若泥沙颗粒很细,因而有很好的跟随水体运动的特性和絮凝性,介质成泥浆状,则这种介质运动时,液、固两相几乎完全不分离,而且各处浓度也很均匀。因此,关于泥质泥石流多数采用单流体模型,而应力-应变率关系一般说是非牛顿型的。

若泥沙颗粒的粒度稍大一些,虽然它们跟随水体运动的特性尚好,但在垂向已有明显的浓度不均匀,尤其是泥沙浓度较小、混合介质的等效粘性较小的情况。这时,沿着流向基本上仍可忽略两相之间的相对运动,但需计入浓度垂向分布的不均匀性,当有冲淤现象发生时,还需计入沿垂向的扩散过程,这时可采用扩散模型。

7.2 水石质泥石流 若固体颗粒较大,则水体与沙粒(或石块)的运动有明显的分离倾向,故称为水石质。当运动状态改变时(如坡度变化,河道宽度变化引起的加速或减速等)粗颗粒的反应明显地滞后于水体,两相之间产生较大的相对运动,这时以采用双流体模型为宜。

当固相浓度很高、水体对固相运动的影响可以忽略不计时,可采用颗粒流模型。

1) 严格地说不是不耦合的,而是非双向耦合的双流体模型。两种说法虽有差异,但有一点是共同的:两组动力学方程不必耦合求解。

7.3 泥石质泥石流 若固体颗粒的级配很宽,细颗粒与水混合而成浆体,浆体中各成份的速度几乎都相等,而粗颗粒的运动有明显的滞后,这种介质称为泥石质。对于泥石质泥石流一般说以采用双流体模型为宜,一种流体代表浆体,一种流体代表粗颗粒群。如果细颗粒浓度很高,因而浆体的等效粘度很高,以至粗颗粒的运动与浆体运动相差不多,也可以考虑采用单流体模型——非牛顿流。

## 8 主要结论

①按所研究的运动介质的物理构成,可分为单相流、二相流和多相流。

②对于某一特定的二相流,根据流动条件和对研究所提的精度要求(包括提供流场信息量的多寡),可采用单流体模型或双流体模型,有时(如有几种粒度的气体-颗粒流)还可采用多流体模型。此外,当采用双流体模型研究二相流时,两种连续介质(流体)并不一定分别与两个物理上的“相”对应。

目前,一些作者把含有几种粒度的气体-颗粒流称为多相流,我们建议称之为采用多流体模型研究的一种气-固二相流。

③扩散模型是一种修正的单流体模型。

④单流体模型中的应力-应变率关系可能是牛顿型的,也可能是非牛顿型的,因此,在一定条件下可以用非牛顿流模型研究二相流。采用非牛顿流模型得不到两相速度差的任何信息,因此它不宜用于两相速度差较大的任何实际流动。

## 参 考 文 献

- 1 Pai S I. Two-Phase Flow. Vieweg-Verlag (1977)
- 2 White B R. Particle dynamics in two-phase flow, in Encyclopedia of Fluid Mechanics 4, Solid and Gas-Solids Flows (ed Cheremisinoff N P). Gulf Publishing Company, Houston, Texas (1985)
- 3 中国大百科全书,力学。中国大百科全书出版社,北京(1985):128—130
- 4 刘大有,李洪州.论流态化的颗粒群当作流体处理的条件以及其他有关问题。第4届全国多相流、非牛顿流和物理化学流学术会议论文集,西安(1993):93—100
- 5 李洪钟等.快速流化床中两相结构的微观显示。第5届全国流态化会议文集,北京(1990):143—146
- 6 刘大有,贺大良,董飞.风沙二相流运动特点的分析(1993)(待发表)
- 7 刘大有.二相流体动力学。高等教育出版社(1993)
- 8 刘大有.描写混合物运动的双流体模型与扩散模型。第4届全国多相流、非牛顿流和物理化学流学术会议论文集,西安(1993):21—26
- 9 Ishii M. Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow. Eyrolles, Paris (1975)
- 10 刘大有,王柏懿.有相间质量交换的悬浮体两相流基本方程。中国科学, A辑,(1990):495—504

## Discussion on the Concepts of Two-Phase Flow, Multiphase Flow, Multifluid Model and Non-Newtonian Flow

Liu Da-you

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

Multiphase Reaction Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080

**Abstract** The differences between the concepts of single-, two- and multi-phase flow and the differences between the concepts of single-, two- and multi-fluid



model have been studied in this paper. The first three concepts are defined according to the physical properties of the moving medium, while the second three are based on the research methods used by authors. Now, there are some confusions in using these concepts, such as two-phase flow and multiphase flow, multiphase flow and multifluid model, and so on. The diffusion model, non-Newtonian flow model and granular flow model are also studied in this paper, and it is indicated that the first two models belong to the single-fluid model in classification. Taking debris flow as an example, the characteristics and suitable areas of applications of the non-Newtonian flow model, diffusion model and two- (or multi-) fluid model are also discussed.

**Keywords** *single-phase flow, two-phase flow, multiphase flow, single-fluid model, two-fluid model, multifluid model, diffusion model, non-Newtonian flow model, granular flow model, gas-sand flow, debris*