

水煤浆管道输送数值模拟研究进展

赵国华, 段钰锋, 王秋粉, 陈良勇

(东南大学 洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

[摘要] 水煤浆是一种具有复杂流变特性的非牛顿流体, 对水煤浆管道输送的流型和内部结构进行数值模拟可实现水煤浆流动的可视化, 弥补实验研究的不足. 从两相流理论和非牛顿流理论出发, 综述了水煤浆管道输送数值模拟的主要模型和方法并进行了分析比较, 考虑了水煤浆中添加剂对不同模型的影响, 最后得出水煤浆管道输送数值模拟较合理的模型是非牛顿流模型. 对目前各种模型和算法中存在的问题, 提出今后发展的方向.

[关键词] 水煤浆, 液固两相流, 非牛顿流, 数值模拟

[中图分类号] TQ 53 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2007) 02-0018-06

Progress of Numerical Simulations on Transportation of Coal-Water Slurry in Pipeline

Zhao Guohua, Duan Yufeng, Wang Qiufen, Chen Liangyong

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of the Ministry of Education,
Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Coal-water slurry (CWS) is a kind of non-Newtonian fluid having very complex rheology. The numerical simulation on CWS's flow pattern and internal configuration in its pipe flows is helpful to realize the visualization of CWS, which can also make up the insufficiency in its experimental tests. In this paper, the state of the art of current theoretical models based on liquid-solid two-phase flows and non-Newtonian fluids, and numerical approaches to predict the flows of coal-water slurry in pipes were summarized and compared with consideration of the factors of additives that may influence the models. It is concluded that the non-Newtonian flow model may be the preferable model for predicting the high-concentrated CWS pipe flows though it still has some uncertainties. Some problems in various models are discussed and some suggestions are proposed for further improving the numerical methodologies.

Key words coal-water slurry, liquid-solid two-phase flow, non-Newtonian flow, numerical simulation

0 引言

水煤浆是由煤、水及少量化学添加剂制成, 是一种浆体燃料, 具有较好的流动性和稳定性, 可以像石油产品一样储存、运输, 并且具有不易燃、污染小的特性, 是目前比较经济和实用的清洁煤代油燃料. 由于水煤浆是采用洗精煤制备, 其灰分、硫分较低, 在燃烧过程中, 水分的存在可降低燃烧火焰中心温度, 抑制氮氧化物的产生量, 其热值相当于燃料油的一半, 可代替燃料油用于锅炉、电站、工业炉和窑炉, 用于代替煤炭燃用, 具有燃烧效率高、负荷调整便利、减少环境污染、改善劳动条件和节省用煤等优点^[1-3]. 水煤浆在工业应用中, 运输是一个重要环节. 目前, 随工业应用的扩大, 对水煤浆的需求量日益增加, 用罐车运输已不能满足需求. 由于我国交通运输能力不足和管道运输投资省、对环境影响小、没有噪声、也没有有害物质的排放、隐蔽性好、安全可靠、维护简便、易于储、装、运的机械化、自动化程度高等优越性, 管道将成为水煤浆的主要运输方式. 为了掌握水煤浆的流动规律, 以便为管道运输提供可行性研究或为工程设计提供依据, 对水煤浆在管道输送过程中的研究越来越重要.

随着计算方法和计算机技术的进步与普及, 数值模拟已经渗透到各个领域. 模拟计算在各个领域的研

收稿日期: 2006-11-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2004CB217701)资助项目.

作者简介: 赵国华(1983-), 硕士研究生, 主要从事煤的洁净燃烧与气化等方面的学习与研究. E-mail: zhaoguohua_china@yahoo.com.cn

通讯联系人: 段钰锋(1963-), 教授, 博士生导师, 主要从事煤的洁净燃烧及污染物控制等方面的教学与研究. E-mail: yfkluan@seu.edu.cn

究中可以和传统研究方法相提并论,相互补充.数值模拟对研究新问题或实验研究难以给出定性和定量的结果时成为最可信赖的方法与手段.

随着水煤浆的发展和需求量的增加,对水煤浆输送过程中的流变特性、流动特性、局部阻力特性的研究日趋重视.目前主要研究手段以实验为主,由于实验研究复杂性的限制,不可能对每个工况都进行实验研究,数值模拟已经开始在水煤浆管道输送中得到广泛地应用.随着对管道内水煤浆流动性能研究不断深入,传统上依据经验公式进行设计的方法已不能满足要求,需要真实、详细地了解管道内水煤浆流动的状况和结构,从而指导工程设计和应用.因此就需要建立精确的数学模型来模拟管道内水煤浆的流动状况.水煤浆是典型的液固两相流体,达到一定浓度的水煤浆呈现非牛顿流体性质,可以分别借助于比较成熟的液固两相流理论和非牛顿流理论对水煤浆的管道输送建立数学模型,进行数值实验和数值模拟,一方面可以克服实验周期长的缺点,另一方面可以减少实验耗资.将数值模拟和实验研究相结合是水煤浆管道输送研究的科学需要,并可以通过数值实验预测更复杂工况下水煤浆流动状况,为工程上管道的设计提供技术参考.

随着计算机技术和计算流体力学的发展,液固两相流的数值模拟计算得到迅速的发展,在此基础上水煤浆的数值模拟也得到一定的发展.基于守恒定律建立的连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、湍动能方程,许多数学模型用来描述液固两相流已经获得满意的结果,这些模型同样也可用于水煤浆的数值模拟,且取得较为满意的结果^[4-5].另外,非牛顿流理论的发展为水煤浆管道输送的数值模拟注入了新的活力.文献[6]提出一些水煤浆管道输送的数学模型,根据目前的理论,水煤浆管道输送数值模拟的数学模型可以分别从两相流理论和非牛顿流理论出发,建立控制方程进行求解,模拟管道中煤浆的流动状况.

1 数值模拟方法

在水煤浆管道输送数值模拟中,描述其流动的理论模型,都需要通过一定的数值计算方法来获得物理场的数值结果.目前,数值计算方法有:有限差分法、有限容积法、有限元法、谱方法、摄动法、蒙特卡罗法、边界元法以及有限分析法.用得比较多的是有限差分法、有限容积法和有限元法.

有限差分法:在每个结点上将控制方程中的每个导数用相应的差分表达式来代替,从而在每个结点上形成一个代数方程,求解这些代数方程就获得所需求的解.它是最早采用的数值计算方法,主要缺点是对复杂区域的适应性较差以及数值解的守恒性难以保证.

有限容积法:从描写求解问题的守恒型控制方程出发,对它在控制体范围内积分,运用高斯公式,按照一定的方法离散.它的优点是离散方程可以保证具有守恒性,而且离散方程的系数具有明确的物理意义,是应用最广的一种方法.

有限元法:在每个元体上取数个点作为结点,然后通过对控制方程做微积分来获得离散方程.最大优点是对不规则区域的适应性好,但计算的工作量较大,而且在求解流动问题时对源项的离散处理方法及不可压缩问题的原始变量法求解方面还不成熟.

2 水煤浆管道输送模型

水煤浆是煤粉、水和少量添加剂混合而成的均匀液固两相悬浮流体,低浓度的水煤浆呈现牛顿流体的性质,超过一定浓度的水煤浆呈现非牛顿流体的性质.水煤浆管道输送基本是一个等温过程,所以只需考虑连续性和动量方程(圆柱坐标系中).

连续性方程:

$$\frac{\partial W_r}{\partial \tau} + W_r \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial W_z}{\partial z} + \frac{W_r}{r} = 0$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_r}{\partial \tau} + W_r \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} + W_z \frac{\partial W_r}{\partial z} - \frac{W_\varphi^2}{r} &= g_r + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r} \right) \frac{\partial W_\varphi}{\partial t} + \\ W_r \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + W_z \frac{\partial W_\varphi}{\partial z} - \frac{W_r W_\varphi}{r} &= g_\varphi + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{\tau_{r\varphi}}{r} \right) \frac{\partial W_z}{\partial \tau} + W_r \frac{\partial W_z}{\partial r} + \\ \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_z}{\partial \varphi} + W_z \frac{\partial W_z}{\partial z} &= g_z + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right). \end{aligned}$$

根据水煤浆的性质,水煤浆管道输送数值计算主要基于两种理论:两相流理论和非牛顿流理论.两种理论从不同角度来处理控制方程里的各个相.两相流理论把水煤浆看成两种流体,各自有一套控制方程,通过相间的耦合关系进行求解;非牛顿流理论把水煤浆看成一种流体,只有一套控制方程,通过剪切应力与剪切速率关系表达式联立方程进行求解.

2.1 两相流理论模型

两相流理论把水煤浆看成液体和固体组成,主要模型有:连续介质模型、离散颗粒轨道模型和流体拟颗粒模型.水煤浆的管道输送数值模拟中主要采用连续介质模型和离散颗粒轨道模型.

2.1.1 连续介质模型

连续介质模型:它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,在分子和原子之间存在大量空的空间.在连续介质模型中,运用连续介质理论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、压力和温度^[7,8].

在水煤浆管道输送中运用连续介质理论建立的模型主要是双流体模型.双流体模型,把其中的水看作为一种充满整个流场的连续介质,煤粉抽象为另一种、也充满整个流场的连续介质,两种连续介质在同一时空内相互重叠不仅考虑了水与煤粉颗粒之间的滑移,而且认为煤粉颗粒也有扩散现象.采用双流体模型建立两相流方程的观点和基本方法是:先建立每一相的瞬时的、局部的守恒方程,然后采用某种平均的方法得到两相流方程和各种相间作用的表达式.在双流体模型中,流体相的湍流模型一般采用 $k-\varepsilon$ 模型,考虑到颗粒的存在对流体相湍流的加强或消减作用,很多学者对标准的 $k-\varepsilon$ 模型作了改进,增加了额外的源项到湍流输运方程中,提出了一些新的模型.其湍流模型主要有零方程模型、一方程模型和两方程模型 3 种模型.吴玉林^[9]和袁丹青^[10]在模拟旋转、弯曲、扩散流道中的液固两相流时所采用 $k-\varepsilon-A$ 模型就属于零方程模型.但这种模型只能用于湍流各项异性不太明显的液固两相流动中.孟令杰^[11]也依据双流体模型理论建立了煤水混合物管道流动的流动模型.

双流体模型虽然无法描述煤粉颗粒之间的相互作用情况,但该模型可以全面的考虑颗粒相质量、动量和能量的湍流扩散,并用统一的办法处理颗粒和流体相,并且适合规模计算.因此,该模型在水煤浆管道输送的数值模拟中正得到越来越广泛的应用.

2.1.2 离散颗粒轨道模型

离散颗粒轨道模型:它不把颗粒看成是连续相,而是视为离散体系,在拉格朗日坐标体系中对每一个颗粒按照流体对它的作用力及颗粒间碰撞产生的作用力两部分列出方程,直接模拟颗粒间的碰撞过程.离散颗粒轨道模型把流体当作为连续介质,而将颗粒视为离散体系,在 Euler 坐标体系下考察流体相的运动,在 Lagrange 坐标体系下研究颗粒的运动.在水煤浆管道输送中运用离散颗粒轨道理论建立的模型主要是欧拉-拉氏模型.

欧拉-拉氏模型是研究两相流动的较为完整的两相流模型,但它最早只用于气固两相流, Lourenco^[12]欧拉-拉氏模型对管道中的气固两相流进行了模拟,后来该模型才逐渐被用于研究液固两相流.在欧拉-拉氏模型中,流体相作为连续介质用欧拉法处理,湍流模型一般选用双相耦合的 $k-\varepsilon$ 模型;而固体粒子作为扩散相则用拉氏模型处理. Snider^[13]欧拉-拉氏模型对倾斜管道中液固两相流的颗粒沉降做了模拟; Hideaki^[14]欧拉-拉氏模型对水平管道内相同比重的液固两相流进行了数值模拟,用来计算颗粒对水流速度断面和压力降的作用.

欧拉-拉氏模型虽然集中了宏观模拟流体模型和微观动力学模型优势,即不仅考虑了液相和固相的相互作用,而且可以描述颗粒之间的相互碰撞情况,但它需要记录每个颗粒在流场中的空间位置及运动状态,因此需要较大的计算机内存,目前对高浓度的水煤浆进行计算存在一定的困难.另外,就目前资料^[15-17]显示很多模拟结果与实验有很大差距,这与该模型中对固相处理的方法有一定的关系.

2.1.3 流体拟颗粒模型

拟颗粒模型将液体考虑成离散的液体“颗粒”微团,微团直径介于液体分子与拟流体的网格尺度之间,通过模拟液体“颗粒”与真实颗粒之间的碰撞等相互作用,可以再现两相流动中的一些典型现象.它的优点在于可以从单颗粒的尺度准确描述颗粒、流体相互作用,它不需要对相间的传递引入模型封闭.拟颗粒模型的结果原则上可以对真实的两相流动微观结构给出描述,从而可以对颗粒轨道模型及拟流体模型当中的封闭模型指引方向^[18].

拟颗粒模型目前还处在发展阶段,并不能模拟真实条件下的情况.该模型的准确程度与“拟颗粒”的

大小是密切相关的,“拟颗粒”越小,颗粒越多,计算结果越准确,但工作量也就越大.在水煤浆管道输送中运用此模型难度和工作量都非常大,难以运用到实际计算中.

2.2 非牛顿流理论模型

运用非牛顿流理论建立的模型主要是非牛顿流模型,它是单流体模型的一种.单流体模型又称为无滑移模型,该模型把水和煤粉颗粒两相作为单相流体处理,不考虑水和煤粉颗粒之间的滑移,认为煤粉颗粒的温度等于水的温度,且煤粉颗粒犹如流体中的组份一样把实际存在的某种均相的或多相的混合介质抽象为一种充满整个流场的连续介质.其扩散与流体组分的扩散相同.该模型一般只应用于颗粒尺寸足够小,颗粒浓度足够大或者液固两相的密度比较接近,即动力学性质比较相似的液固两相流中,水煤浆比较适合这种模型.单流体模型方程比较简单,可以用较为成熟的处理单相流体的数值解法来处理,目前这种方法主要用来计算复杂的液固两相流现象.胡志伟^[19]、徐自立^[20]运用此方法对弯管中矿浆的流动情况进行了数值模拟,来分析矿浆在弯管中的“二次流”现象.

高浓度水煤浆是典型的非牛顿流体,它的基本特征能够流动,但流动过程中的剪切应力与剪切速率之间的关系不符合牛顿内摩擦定律.非牛顿流模型是运用非牛顿流体力学的理论,结合单流体理论把水煤浆看成一种单一的流体,从原始本构方程出发建立流动控制方程,根据边界条件进行求解.水煤浆的流变性本构方程通常包含两方面内容,一是表示水煤浆稳定程度的屈服应力部分;二是代表水煤浆流动阻力的剪切应力部分,它通常采用屈服——幂律流体模型^[21]: $\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$, 式中: τ 为剪切应力 / Pa; τ_0 为屈服应力 / Pa; k 为稠度系数 / (Pa·s); n 为流动性系数.当 $\tau_0 = 0, n = 1$ 时,为牛顿流体;当 $\tau_0 = 0, n \neq 1$ 时,为幂律流体 ($n > 1$, 为胀塑性流体; $n < 1$ 为拟塑性流体);当 $\tau_0 \neq 0, n = 1$ 时,为宾汉流体;当 $\tau_0 \neq 0, n \neq 1$ 时,为广义宾汉流体 ($n > 1$ 为具有屈服应力的胀塑性流体; $n < 1$ 为具有屈服应力的拟塑性流体).

非牛顿流模型描述水煤浆管道流动状况的主要缺点是没有考虑煤粉颗粒分布和煤粉颗粒间的相互作用对水煤浆流变性的影响,此外对非牛顿流体的特异流动行为难以模拟,例如滑移、减阻等现象.

3 添加剂对流动模型的影响

水煤浆虽然是水和煤粉的混合物,但是其中加入了添加剂,使其性质改变,不是简单的煤粉和水的混合物,不能把水煤浆简单地看成液固两相流.添加剂通常包括分散剂、稳定剂以及其它一些辅助化学药剂^[22].分散剂可以促进分散相在分散介质中均匀分散,其作用是降低粘度,分散剂的作用机理则可以从润湿分散作用、静电斥力分散作用及空间位阻与熵斥力分散作用等 3 个方面进行考虑.分散剂大都是一些表面活性剂,由疏水基和亲水基两部分构成,溶于水后,亲水基受到水分子的吸引,疏水基则受到水分子的排斥,结果疏水基被挤向水面定向排列,将疏水端伸向气相,亲水端伸入水中.当水中含有煤粉这样的疏水物质时,它同样会在煤粉表面定向排列,从而对煤粉颗粒起到很好的分散作用.分散剂能够显著地降低水的表面张力,提高煤粒表面的润湿性.稳定剂的作用则是为了确保水煤浆的稳定性,即保证水煤浆在储存与输送过程中性态均匀的特性.水煤浆是一种由液固两相组成的粗分散体系,分子布朗运动作用力、颗粒之间的范德华力、颗粒之间的静电引力,都不足以阻止颗粒的沉淀.而稳定剂却可以使水煤浆中已分散的颗粒与周围其它颗粒及水之间结合成为一种较弱、但又有一定强度的三维空间结构,这种空间结构对颗粒沉淀形成机械阻力,从而保证水煤浆的稳定性.稳定剂的作用则是为了确保水煤浆的稳定性,即保证水煤浆在储存与输送过程中性态均匀的特性.

在计算的过程中应用普通模型简单地考虑相间的作用是偏离实际的,添加剂在微观上增加了煤粉颗粒与水之间的作用力,与一般的液固两相流不同,相之间的作用力加强,且变得复杂.计算时不能简单的把水煤浆看作两种流体,考虑两种流体相间的相互作用,忽视了这些化学添加剂在微观上对水与煤粉颗粒之间的相互作用力.在水煤浆管道流动的数值模拟中对于这些微观上列出方程描述比较困难,这为真正地揭示其流动特性带来不利因素,这就是研究水煤浆管道输送数值模拟时的关键所在.如果能从微观分子力学角度考虑,建立一系列模型方程,再利用计算机进行求解,应该比较能够真实地模拟水煤浆在管道中的流动状况.以后的重点应该放在从微观角度对模型方程的建立研究上,才能更好地模拟水煤浆在管道中的流动状况.

4 模型的评价

很多人在研究液固两相流的特性,倪晋仁、王光谦^[23-24]等人在液固两相流运动特性机理方面作了大

量的研究,以颗粒运动的动理论,通过改变颗粒浓度考察非粘性颗粒在水流中运动的典型微观和宏观运动特性,还以颗粒浓度垂直分布为例进行分析,获得满意的结果,揭示了高浓度的液-固两相流的一些特点。姜培正^[25]等人在 IPSAR 算法的基础上推导出 DIPSAR 算法。但是水煤浆的性质跟他们研究的液固两相流的性质差别很大,所以真正地应用他们的模型去计算水煤浆不一定能得到理想的结果。

采用双流体模型考虑了水与煤粉颗粒之间的滑移,应用的是双向耦合的模型,但没有考虑煤粉颗粒间的相互碰撞作用,特别对浓度比较大的水煤浆如果没有考虑这一点,与实际过程的偏差比较大。

采用欧拉-拉氏模型充分考虑了水与煤粉颗粒的相互作用,而且描述了煤粉颗粒间的相互碰撞情况。但是,需要记录每个煤粉在空间流场的位置、运动状态,需要很大的计算机内存,必须花费很大的代价,不切合实际情况。

采用非牛顿流体模型,由于受非牛顿流体理论发展的限制,完全采用理论方法构造出来的一些本构方程一般很复杂,在应用方面一般采用经验和半经验公式进行计算。特别是对粘度这一项的处理非常复杂,水煤浆的流变特性随煤种、温度、浓度、输送管道的直径等因素影响。计算过程中采用的一些控制方程并不适合水煤浆这种非牛顿流体模型,所以采用非牛顿流体模型计算时,对模型中控制方程、微分方程的处理必须从最原始的本构方程开始建立,其中的简化和近似的过程要结合非牛顿流体的性质,从而能很好地描述水煤浆在管道内输送的过程。

这 3 种模型中双流体模型和欧拉-拉氏模型来描述水与煤粉之间的作用只是简单地从相间的作用力来考虑,而相间的作用力也只是通过经验和半经验公式表现出来,添加剂微观上的作用力难以体现。非牛顿流体模型来描述水煤浆有一定的优势,因为煤粉的颗粒分布比较广泛,煤粉浆体的密度与水的密度比较接近,描述流动时从本构方程开始,非常符合使用这种模型的条件,但是非牛顿理论发展没有完全成熟也为数值模拟带来一定的困难。

5 总结与展望

综上所述,目前计算流体力学方法研究水煤浆在管内流动的规律已经取得了一定的成就,有许多模型适合模拟水煤浆在管道中的输送状况,非牛顿流体模型描述水煤浆管道输送机理具有一定的优势。

在水煤浆管道输送的数值模拟中,在低浓度方面已经获得比较理想的结果,但是由于水煤浆的流变特性、机理方面的研究还没有完全成熟,给水煤浆进行理论上的模拟带来极大的困难,另外,水煤浆在流动过程中还有滑移现象,在研究的过程中还要进行滑移修正,这为数值模拟带来很大的困难。

今后的研究一方面要侧重于水煤浆的流变特性模型,从本构方程出发,对水煤浆的机理深入研究,得出一个较好的通用模型;另一方面对水煤浆这种特殊流体要寻找新的模型,希望从微观分子力学方面考虑添加剂对水和煤粉的相互作用及分子间的作用力,以便更真实地模拟水煤浆在管道中的输送规律。

[参考文献] (References)

- [1] 赵成修,曾建国.高浓度水煤浆管道输送的研究[C]//水煤浆技术译文集.北京:中国煤炭加工利用协会,1987:45-52.
Zhao Chengxiu Zeng Jianguo A reach on transportation of highly concentration coal-water slurry in pipeline [C]//Proceedings of Technology of Coal-Water Slurry. Beijing: China National Coal Machining and Use Association, 1987: 45-52. (in Chinese)
- [2] 岑可法,姚强,曹欣玉,等.煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M].杭州:浙江大学出版社,1997:24-77.
Cen Kefa Yao Qiang Cao Xinyu, et al. Theory and Application of Combustion, Flow, Heat Transfer, Gasification of Coal Slurry [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997: 24-77. (in Chinese)
- [3] 岑可法,袁镇福,陆重庆,等.煤浆管道流动特性及传热过程的研究[J].工程热物理学报,1983,1(1):1-6.
Cen Kefa Yuan Zhenfu Lu Chongqing, et al. Investigation of flow properties and heat transfer process of coal slurry inside the pipeline [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1983, 1(1): 1-6. (in Chinese)
- [4] 刘永兵,陈纪忠,阳永荣.管道内液固浆液输送的数值模拟[J].浙江大学学报:工学版,2006,40(5):858-863.
Liu Yongbing Chen Jizhong Yang Yongrong. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow in slurry pipeline transportation [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2006, 40(5): 858-863. (in Chinese)
- [5] 张政,谢灼利.流体-固体两相流数值模拟[J].化工学报,2001,52(1):1-11.
Zhang Zheng Xie Zhuoli. Numerical simulation of fluid-solid two-phase flows [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(1): 1-11. (in Chinese)
- [6] 夏德宏,王世均.水煤浆管道输送数学模型及应用[J].北京科技大学学报,1990,12(6):528-534.

- Xia Dehong Wang Shijun A mathematical model of pipeline transportation of CWS and its applications [J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 1990, 12(6): 528–534 (in Chinese)
- [7] Deniz Fashola A A, Chen C P. Modelling of confined turbulent fluid particle flows using Eulerian and Lagrangian schemes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(4): 691–701.
- [8] 刘大有. 关于二相流、多相流、多流体模型和非牛顿流等概念的探讨 [J]. 力学进展, 1994, 24(1): 66–74
Liu Dayou Discussion on the concepts of two-phase flow, multiphase flow, multiphase fluid model and non-Newtonian flow [J]. Advances in Mechanics, 1994, 24(1): 66–74 (in Chinese)
- [9] 吴玉林, 曹树良, 葛亮, 等. 渣浆泵叶轮中液固两相湍流的计算和实验 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(1): 71–74
Wu Yulin Cao Shuliang Ge Liang et al. Solid-liquid two-phase turbulent flow calculation and measurement through centrifugal slurry pump impellers [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 1998, 38(1): 71–74 (in Chinese)
- [10] 袁丹青, 刘天宝. 旋转、弯曲、扩散流道中的液固两相流场的数值模拟及其分析 [J]. 上海力学, 1999, 20(2): 201–204
Yuan Danqing Liu Tianbao Numerical analysis for liquid-solid two phase flow in rotatory bent and diffuse path [J]. Shanghai Journal of Mechanics, 1999, 20(2): 201–204 (in Chinese)
- [11] 孟令杰. 增压流化床煤水混合物输送特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 1996: 57–69
Meng Lingjie An investigation on transportation properties of coal-water paste in a pressurized fluidized bed [D]. Nanjing Southeast University, 1996: 57–69 (in Chinese)
- [12] Lourenco L. The kinetic model for gas particle flow and its numerical implementation [C] // Proceedings of International Conference on the Physical Modeling of Multi-phase Flow. England: Coventry University, 1983: 501–513.
- [13] Snider D M, O'Rourke P J, Andrews M J. Sediment flow in inclined vessels calculated using a multiphase particle-in-cell mode for dense particle flows [J]. Int J Multiphase Flow, 1998, 24(1): 1359–1382
- [14] Hilek M, Benoit O, Serterle G, Ichimatsu T. Eulerian-Lagrangian simulation of nearly equal density solid-liquid two-phase flow in a horizontal pipe [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Freight Pipeline. Shanghai: China Machine Press, 1999: 146–150.
- [15] Liu Dayou. Fluid Dynamics of Two-phase Systems [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 12–45.
- [16] Long Fan, Mao Zaisha, Wang Yundong et al. Numerical simulation of turbulent solid-liquid two-phase flow and orientation of slender particles in a stirred tank [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(8): 7045–7056.
- [17] 白晓宁, 胡寿根. 固体两相流管道水力输送的研究进展 [J]. 上海理工大学学报, 1999, 21(4): 366–372
Bai Xiaoning, Hu Shougen The development of research on solid-liquid two-phase flow pipeline hydraulic transportation [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 1999, 21(4): 366–372 (in Chinese)
- [18] 王维, 李佑楚. 颗粒流体两相流模型研究进展 [J]. 化学进展, 2000, 12(2): 208–217.
Wang Wei, Li Youchu Progress of the simulation of particle-fluid two-phase flow [J]. Progress in Chemistry, 2000, 12(2): 208–217 (in Chinese)
- [19] 胡志伟, 李勤凌, 苗永森. 三维强弯管道湍流场的数值分析 [J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(1): 49–53.
Hu Zhiwei, Li Qiling, Miao Yongsen Numerical analysis of the three-dimensional turbulent flow field in a strong curved duct [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(1): 49–53 (in Chinese)
- [20] 徐自力, 屠珊, 杜秀杰. 弯曲圆管中矿浆湍流场的三维数值模拟及分析 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(5): 46–49.
Xu Zili, Tu Shan, Du Xujie Analysis of three-dimensional turbulent flow of mineral slurry in curved pipe [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(5): 46–49 (in Chinese)
- [21] 李兴长. 高浓度煤水悬浮液的流变特性 [C] // 水煤浆技术译文集. 北京: 中国煤炭加工利用协会, 1984: 20–26
Li Xingchang Rheology of highly concentration coal-water slurry coal-water slurry [C] // Proceedings of Technology of Coal-Water Slurry. Beijing: China National Coal Machining and Use Association, 1984: 20–26 (in Chinese)
- [22] 周明松, 邱学青, 王卫星. 水煤浆分散剂的研究进展 [J]. 化工进展, 2004, 23(8): 846–851
Zhou Mingsong, Qiu Xueqing, Wang Weixing Advances in the dispersants of coal-water slurry [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2004, 23(8): 846–851 (in Chinese)
- [23] 倪晋仁, 王光谦. 高浓度恒定两相流运动机理探析: II. 应用 [J]. 水利学报, 2000, 5(5): 27–32
Ni Jinren, Wang Guangqian Mechanism of hyper-concentrated flow: II Application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 5(5): 27–32 (in Chinese)
- [24] 倪晋仁, 王光谦. 高浓度恒定两相流运动机理探析: I. 理论 [J]. 水利学报, 2000, 5(5): 22–26
Ni Jinren, Wang Guangqian Mechanism of hyper-concentrated flow: I Theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 5(5): 22–26 (in Chinese)
- [25] 姜培正, 魏进家, 王长安. 浓密液固两相流动的数值研究与理论分析 [J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(4): 84–88
Jiang Peizheng, Wei Jinjia, Wang Changan Numerical research and theoretical analysis for dense liquid-solid two-phase flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(4): 84–88 (in Chinese)

[责任编辑: 刘健]