荷电颗粒拟流体多相湍流模型的建立

王军锋，毛惠敏，罗惕乾
（江苏大学 能源与动力工程学院，江苏 镇江 212013）

摘　要：荷电多相湍流与一般多相湍流相比，存在流场脉动与电场脉动耦合的复杂运动特征，如何用方程加以描述并利用模型方程模拟这种耦合作用成为荷电多相湍流模拟研究的一项重要任务。在单相荷电流体湍流模型方程和荷电颗粒拟流体多相湍流描述方程建立的基础上，根据目前发展和应用不断扩大的"双流体"多相湍流模型，把荷电颗粒当作拟流体处理，借用拟流体多相湍流描述方程建立的方法，获得了荷电颗粒拟流体多相湍流模型，该模型方程通过电场关联项描述了电场和流场湍流脉动的耦合作用，通过引入电湍能交换系数对电场关联项加以模化，该模型可用于工程中大尺度复杂荷电多相湍流的模拟计算和工业装置的设计。

关键词：荷电颗粒；拟流体；多相湍流；模型；流场
中图分类号：O359　**文献标识码**：A　**文章编号**：1005-6254(2007)01-0054-04

Establishment of charged particle pseudo-fluid multi-phase turbulent flow model

WANG Jun-feng, MAO Hui-min, LUO Ti-qian
(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Compared with normal multiphase turbulent flow, charged multi-phase turbulent flow appears more complex due to the coupling between electric field and flow field. How to describe the coupling action with mathematic function and to model it are the main task in charged multi-phase turbulent flow. Based on the establishment of single-phase charged fluid turbulence model and charged particles pseudo-fluid multi-phase turbulence governing equations, a new simulation model was deduced with the double fluid modeling method regarding the charged particle phase as a fluid phase. In this model, the coupling action between turbulent flow field and electric field was described with electric conjunction term and this term will be modeled by using an electric-turbulence exchanging coefficient. This model could be applied in the accurate engineering simulation of big size complex charged multi-phase turbulent flow.

Key words: charged particles; pseudo-fluid; multi-phase turbulent flow; model; flow field

荷电多相湍流是静电喷雾技术应用于工程领域中出现的一种复杂流动现象，如在静电农药喷洒及静电喷雾燃烧中的荷电喷雾射流、在静电喷涂中的荷电颗粒绕流、在静电雾化脱硫中的荷电多相湍流反应流等[1-4]。随着工程应用领域的不断扩大，基于工程模拟预报和工业装置的设计需求，荷电多相流动的模拟自20世纪90年代以来不断发展，借鉴了多相湍流模式理论研究的方法与应用的成功经验，发展了一些模拟荷电多相湍流的工程模型与方法[5,6]。荷电多相湍流的复杂性不仅表现在具有一

收稿日期：2006-08-16
基金项目：国家发展与改革委员会项目[发改高技(2003)2140]；江苏省高校自然科学基金资助项目(03KJD4300064)
作者简介：王军锋(1975-)，男，山东烟台人，副教授，博士，主要从事荷电多相流理论与应用、流场现代测试技术及应用的研究。
毛惠敏(1984-)，女，浙江江山人，硕士研究生，主要从事荷电喷雾制薄膜技术的研究。

般多相湍流的复杂特征,更具有自身的特点,如荷电颗粒产生的诱导电场随颗粒本身的湍流脉动而脉动,进而影响颗粒间的相内作用以及颗粒相与气相的相间作用。这种电场与流场的复杂脉动耦合作用在数值模拟中由于其复杂性难以用数学方程表达而加以忽略,仅考虑外加的空间诱导电场。但近年来的实验研究表明,颗粒荷电诱导的电场对流场产生了显著的影响,这种作用是不能被忽略的,因此如何在数学描述方程中表达电场与流场脉动的耦合作用,为进一步建立更加精确的模型方程提供依据,成为研究人员一直探索的问题。颗粒拟流体湍流模型的发展与应用为解决这一问题提供了新思路。尽管近来不断发展的直接模拟和大涡模拟方法为揭示微观流动特征提供了有效方法,但在目前基于工程应用的大尺度模拟,由于模型方程的方法用于工程具有实用性。颗粒拟流体模型对气粒两相采用统一的数值方法,随着应用的扩大改变了过去认为其占用大量的计算机容量和时间的观点,认为比颗粒轨道模型更节省机时和存储量,便于工程应用[7]。其中 $k-\varepsilon-k_p$ 模型由于考虑了颗粒相湍能自身的对流、扩散、产生及耗散而认为更完善和合理,这种模型的建立方法和特征比较适用于荷电颗粒相复杂流动的描述。沿用周培源先生对湍流研究建议的从单相到多相的方法,在周力行[8-11]等国内外学者发展的颗粒拟流体多相湍流模型与应用研究的基础上,作者在文献[12,13]中完成了单相荷电流体 $k-\varepsilon$ 湍流模型方程的建立和荷电颗粒拟流体多相湍流描述方程的建立,在此基础上,对描述方程的各项进行模化,进而获得了荷电颗粒拟流体的多相湍流模型。该模型方程在燃油荷电喷雾射流的模拟中应用取得了良好的效果[3],下面将给出该模型的具体推演方法。

1　荷电两相湍流时均方程组

发展颗粒拟流体模型的关键是颗粒湍流模型,在文献[13]中采用“体平均”的方法建立了荷电颗粒拟流体多相湍流的描述方程,其中荷电颗粒相动量方程为

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}(n_p v_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(n_p v_{pj} v_{pi}) = \\
&n_p g_i + \frac{n_p(v_i - v_{pi})}{\tau_{rp}} + \frac{(v_i - v_{pi}) n_p \dot{m}_p}{m_p} + \frac{F_{p,Mi}}{m_p} - \\
&E_i n_p q_p - \frac{\partial}{\partial x_j}(n_p \overline{v'_{pj} v'_{pi}} + v_{pj} \overline{n'_p v'_{pi}} + \\
&v_{pi} \overline{n'_p v'_{pj}} + \overline{n'_p v'_{pj} v'_{pi}}) + \frac{\overline{n'_p v'_i} - \overline{n'_p v'_{pi}}}{\tau_{rp}} + \frac{1}{m_k} \times \\
&(v_i \overline{n'_p \dot{m}'_k} + n_p \overline{v'_i \dot{m}'_p} + \dot{m}_p \overline{n'_p v'_i} + \overline{n'_p v'_i \dot{m}_p} - \\
&\overline{v'_{pi} n'_p m'_p} - n'_p \overline{v'_{pj} \dot{m}_p} - \dot{m}_p \overline{n'_p v'_{pi}} - \\
&\overline{n'_p v'_{pi} \dot{m}'_p}) - \overline{n'_p E'_i q_p} - \frac{\partial}{\partial t}(\overline{n'_p v'_{pi}}) \qquad (1)
\end{aligned}$$

拟流体模型的基本点在于把颗粒群作为与流体互相渗透的拟流体或拟连续介质。空间各处各粒子相与流体相共存,相互渗透,各相具有各自不同的群体速度及体积分数分布。荷电颗粒相与气相间除了时均运动相互作用外还有湍流的相互作用以及自身的湍流对流、扩散,产生和耗散等,因而有其自身的湍流输动性质。

参照对单相荷电流体湍流的模拟方法来模拟荷电湍流两相流的气体相及有湍流脉动的荷电颗粒相[12]。忽略非定常关联项流体的密度脉动,颗粒质量损失率的脉动及阻力项的脉动即取 $\rho' = 0$, $m'_p = 0$, $\overline{n'_p(v'_i - v'_{pi})} = 0$,并且对气体相动量中关联项与单相流相同的模拟方法,同时对荷电颗粒相各方程中关联项取如下的梯度模拟:

$$-\overline{n'_p v'_{pi}} = \frac{v_p}{\sigma_p} \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x_i}, \qquad -\overline{n'_p v'_{pj}} = \frac{v_p}{\sigma_p} \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x_j}$$

$$-(\overline{n'_p v'_{pj} v'_{pi}} + n_p \overline{v'_{pj} v'_{pi}}) = v_p n_p \left(\frac{\partial v_{pj}}{\partial x_i} + \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_j}\right)$$

$$-\overline{n'_p E'_i q_p} = \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial E_i}{\partial x_j} \cdot n_p q_p$$

得到荷电两相湍流时均方程组:

气相连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = S = -\sum n_p \dot{m}_p \qquad (2)$$

荷电颗粒相连续方程

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(n_p v_{pj}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{v_p}{\sigma_p} \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x_j}\right) \qquad (3)$$

气相动量方程

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \\
&\left[\mu_e\left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right)\right] + \Delta \rho g_i + \sum_p \frac{\rho_p(v_{pi} - v_i)}{\tau_{rp}} + \\
&v_i S + F_{Mi} \qquad (4)
\end{aligned}$$

荷电颗粒相动量方程

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}(n_p v_{pi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(n_p v_{pj} v_{pi}) = n_p(v_i - v_{pi})\tau_{rp} + \\
&n_p g_i + \frac{(v_i - v_{pi}) n_p \dot{m}_p}{m_p} + \frac{F_{p,Mi}}{m_p} - E_i n_p q_p +
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[v_p n_p\left(\frac{\partial v_{pj}}{\partial x_i}+\frac{\partial v_{ki}}{\partial x_j}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{v_p}{\sigma_p}\left(v_{pj}\frac{\partial n_p}{\partial x_i}+v_{pi}\frac{\partial n_p}{\partial x_j}\right)\right]+\frac{v_p}{\sigma_p}\cdot\frac{\partial E_i}{\partial x_j}\cdot n_p q_p \tag{5}$$

2 气相湍能 k 方程

对荷电气液两相流中气相的湍流特性用 $k-\varepsilon$ 双方程模型来模拟，可以得到气相的 k 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_e}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+G_k-\rho\varepsilon+G_p \tag{6}$$

$$G_p=\sum_p G_{pg}^k=-\sum_p\sum_i\frac{m_p}{\tau_{rp}}\left[\overline{n_p v_i(v_i-v_{pi})}-\bar{n}_p\bar{v}_i(\bar{v}_i-\bar{v}_{pi})\right]$$

式中 G_p 为荷电颗粒湍流与气体湍流相互作用所造成的气相湍能 k 的源项。

将 $n_p=\bar{n}_p+n'_p$，$v_i=\bar{v}_i+v'_i$，$v_p=\bar{v}_p+v'_{pi}$ 代入式(6) 可得

$$G_p=-\sum_p\sum_i\frac{m_p}{\tau_{pk}}\left[\bar{n}_p\overline{v'_i(v'_i-v'_{pi})}+\bar{v}_i\overline{n'_p(v'_i-v'_{pi})}+\overline{n'_p v'_i}(\bar{v}_i-\bar{v}_{pi})+\overline{n'_p v'_i(v'_i-v'_{pi})}\right] \tag{7}$$

对 G_{pg} 中各个关联项进行模拟，认为 n'_p 与 v'_i 的关联比其他关联弱得多，从而式(7) 可写成

$$G_p=-\sum_p\sum_i\frac{m_p}{\tau_{rp}}\left[\bar{n}_p(\overline{v'^2_i}-\overline{v'_i v'_{pi}})-\bar{v}_i\overline{n'_p v'_{pi}}\right] \tag{8}$$

由量纲分析取

$$\overline{v'_i v'_{pi}}=2(kk_p)^{1/2}C_p$$

取

$$-\overline{n'_p v'_{pi}}=\frac{v_p}{\sigma_p}\cdot\frac{\partial n_p}{\partial x_i}$$

因此有

$$G_p=-\sum_p\sum_i\frac{\rho_p}{\tau_{rp}}\left[2(k-C_p\sqrt{kk_p})+v_i\frac{v_p}{\sigma_p n_p}\frac{\partial n_p}{\partial x_i}\right]$$

3 荷电颗粒湍能 k_p 方程

对于荷电颗粒项的湍流模型较简单的为代数模型，其物理基础是认为颗粒湍流脉动仅仅由于追随流体脉动而产生脉动，这时有 Hinze-Techen 公式：

$$\frac{v_p}{v_T}=\frac{k_p}{k}=\left(1+\frac{\tau'_{rp}}{\tau_T}\right)$$

式中，τ_T 为湍流脉动周期，Soo 等人对此曾作了一些改进[8]。

颗粒湍流代数模型是以颗粒追随当地流体湍流为基础，即颗粒只取决于当地的气体湍流特性。按这一观点，颗粒的扩散只能小于气体组分的扩散，颗粒的脉动只能小于气体的脉动，而从荷电射流的 PIV 试验结果来看[3]，在某些区域荷电颗粒相的脉动是大于气相的，说明颗粒湍能不仅受当地气相脉动的影响，而且类似于气相存在自身的对流、扩散、产生与耗散。因此可以建立荷电颗粒相的湍能输运方程。类似于单相荷电流体湍能 k 方程的推导[12]，将荷电颗粒相瞬时动量方程乘以颗粒瞬时速度 v_{pi}，得到瞬时功能方程，将瞬时量分解为时均量与脉动量，然后对各项再取时平均。类似将颗粒相时均动量方程乘以颗粒时均速度 $\bar{v}_{pi}$，得到时均动能方程，将这两个方程相减，便可以得到荷电颗粒湍能 k_p 的方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_p k_p)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_p v_{pj}k_p)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{v_p}{\sigma_p}\frac{\partial}{\partial x_j}\rho_p k_p\right)+P_k+P_g+P_E \tag{9}$$

式中 P_k，P_g，P_E 分别表示荷电颗粒湍能自身源项，颗粒和气相间相互作用引起的颗粒湍能源项以及荷电颗粒与电场作用产生的湍能源项。

$$P_k=\left[v_p\rho_p\left(\frac{\partial v_{pi}}{\partial x_j}+\frac{\partial\sigma_{pj}}{\partial x_i}\right)+v_{pj}\frac{v_p}{\sigma_p}m_p\frac{\partial n_p}{\partial x_j}\right]\frac{\partial v_{pi}}{\partial x_j}-g_i\frac{v_k}{\sigma_p}m_p\cdot\frac{\partial n_p}{\partial x_i}+\frac{1}{2}C_{p2}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(v_{pj}v_p\rho_p\frac{\partial v_{pi}}{\partial x_i}\right)+\frac{1}{2}C_{p2}\frac{\partial}{\partial t}\left(v_p\rho_p\frac{\partial v_{pi}}{\partial x_i}\right)+\frac{v_p}{\sigma_p}m_p\frac{\partial n_p}{\partial x_i}\cdot\frac{\partial v_{pi}}{\partial t}$$

$$P_g=\frac{m_p}{\tau_{rp}}\left[2n_p(C_{p1}\sqrt{kk_p}-k_p)-\frac{v_p}{\sigma_p}\frac{\partial n_p}{\partial x_i}\times(v_i-v_{pi})-C_{p2}v_p\cdot n_p\frac{\partial v_{pi}}{\partial x_i}\left(C_{p1}\sqrt{k/k_p}-1\right)\right]$$

$$P_E=-q_p\left(E_i\cdot\overline{n'_p v'_{pi}}+\overline{E'_i n'_p v'_{pi}}+\overline{E'_i v'_p n_p}\right)$$

采用与单相荷电流体的类似模拟方法。

$$P_E=q_p\left(E_i\frac{v_p}{\sigma_p}\cdot\frac{\partial n_p}{\partial x_j}+n_p\frac{v_p}{\sigma_p}\cdot\frac{\partial E_i}{\partial x_j}\right)$$

式中 σ_p 为电场脉动 schmidt 数。

以上便获得了在充分考虑了电场和流场耦合作用、相间作用及颗粒相湍能自身对流、扩散、生成和耗散基础上的荷电两相湍流的颗粒拟流体模型。

4 结论与分析

根据荷电雾滴颗粒相与气相及高压静电场之间

的相互作用情况,考虑颗粒相湍流脉动与电场的耦合及荷电雾滴自身湍动特性的基础上,建立了荷电颗粒拟流体的荷电两相及多相湍流运动模型,该模型方程考虑了电场和流场的耦合作用、相间作用及荷电颗粒相湍能自身对流、扩散、生成和耗散,通过引入电湍能交换系数,对电场和荷电颗粒相的湍能脉动耦合关系进行了模化,使荷电多相流动特征的描述更加完善。

在外加电场存在时,电场与流场的耦合作用包含两部分,一部分是外加电场引起的,另一部分是荷电颗粒间的电场力引起的,并且后者通过试验表明[15],在没有加外电场的情况下,荷电粒子间的作用是不可忽略的。外加电场通常是实现改变荷电两相流场特性的另一个途径,在利用环状电极方式对水的荷电喷雾试验来看[3],这一措施也是可行的,因此在对荷电两相流场的理论模型建立中,要充分考虑两部分因素引起的电场与流场的耦合作用。在模拟的实现方法上,有电场因素的关联项采用引入电湍能交换系数和场强梯度的模拟方法,这样可将外加电场和荷电颗粒间的电场作用一并考虑,利用外加电场产生的场强梯度进行模拟,但在没有外加电场的作用时,由于荷电颗粒间所产生的电场目前难以获得恰当的模拟方法,因此电场梯度未知给模拟带来了困难,设想可以假设场强梯度为某个常数,张量或函数,通过改变电湍能系数来实现模拟,这种方法的经验性较强,需要建立在大量实验的基础上。另一个方面电场的存在及荷电颗粒相内带电粒子的相互作用力及碰撞,使颗粒相存在相内压力及粘性的变化,将电场与流场的耦合作用并入这两项考虑也是实现模拟的一个途径,但目前由于对此的机理了解不够,很难给出具体的模拟方法,在模型建立中忽略了颗粒相内部压力及粘性,将电场作用一并归入有电场因素作用的关联项。

采用本模型方程用于荷电燃料喷雾射流的模拟,模拟结果与 LDV 实验测量结果进行了对照,反映出该模型用于荷电气液两相湍流射流流场预测可取得较好的效果,由于本文篇幅所限,模拟的详细内容和结果可以参见文献[16]。

参考文献(References)

[1] Colbert S A, Cairncross R A. A discrete droplet transport model for predicting spray coating patterns of an electrostatic rotary atomizer [J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(3): 234-246.

[2] Gaunta L F, Hughes J F, Harrisonb N M. Electrostatic deposition of charged insecticide sprays on electrically isolated insects [J]. Journal of Electrostatics, 2003, 57(1):35-47.

[3] 王军锋. 静电喷雾燃烧的基础研究[D]. 江苏:江苏大学,2002.

[4] Edward Law S. Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51(1):25-42.

[5] 金晗辉. 荷电两相湍流理论在病虫害防治技术中的应用研究[D]. 江苏:江苏理工大学,1999.

[6] 周浩生. 荷电气固两相流动理论及应用[D]. 江苏:江苏理工大学,1997.

[7] 周力行. 湍流气粒多相流数值模拟理论的最近进展[J]. 燃烧科学与技术,1995,1(1):10-14.

[8] 周力行. 多相湍流反应流体力学[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

[9] 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟[M]. 北京:清华大学出版社,1989.

[10] 张　健,雷　勇,周力行. 湍流漩流流动的湍流模型理论研究与应用综述[J]. 东北大学学报,2001,22(增刊2):29-33.

[11] 周力行. 湍流气粒多相流数值模拟理论的最近进展[J]. 燃烧科学与技术,1995,1(1):10-15.

[12] 王军锋,陈　燕,罗惕乾. 荷电流体 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型的建立[J]. 排灌机械,2003,21(5):43-46.

[13] 罗惕乾,王军锋,毛惠敏,等. 荷电颗粒多相湍流数学模型构建初探[J]. 排灌机械.(待发表)

[14] 是勋刚. 湍流[M]. 天津:天津大学出版社,1994.

[15] 王军锋,闻建龙,王　泽,等. 煤油荷电喷雾特性及喷雾流场的试验研究[J]. 机械工程学报,2002,38(7):37-40.

[16] 王军锋,闻建龙,罗惕乾. 荷电喷雾两相湍流流场的数值计算[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2004,25(1):13-16.

(责任编辑　贾国方)