

# 颗粒轨道模型用于烟气脱硫喷淋塔两相流数值模拟

赵 喆<sup>1</sup>, 田贺忠<sup>1</sup>, 郝吉明<sup>1\*</sup>, 张华<sup>2</sup>, 刘汉强<sup>2</sup>

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京国电龙源环保工程有限公司, 北京 100761)

摘要: 以 FLUENT 软件为计算工具, 采用 Euler-Lagrange 方法模拟喷淋塔内部气液两相流动. 气相用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型描述, 喷淋液滴用颗粒轨道模型描述. 综合考虑颗粒受力分析、颗粒湍流扩散以及气液两相耦合 3 方面影响因素对颗粒轨道模型进行设置, 从液滴粒径分布、液滴出口速度、喷淋夹角 3 个方面对喷嘴射流源进行精确定义. 模拟结果表明: 喷淋塔内轴向气速分布均匀; 中空锥形的喷嘴设计使喷淋液形成伞状雨帘, 有效防止烟气短流; 塔内液滴浓度分布存在中间高、边缘低的问题, 可通过改进喷嘴布置方案加以改进; 颗粒轨道模型能够较好地预测喷淋塔内两相流动.

关键词: 颗粒轨道模型; 烟气脱硫; 喷淋塔; 数值模拟

中图分类号: X701.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0033-05

## Particle Trajectory Model Used in Numerical Simulation of Flue Gas Desulfurization Spray Tower

ZHAO Zhe<sup>1</sup>, TIAN He-zhong<sup>1</sup>, HAO Ji-ming<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>2</sup>, LIU Han-qiang<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing SP Longyuan Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Beijing 100761, China)

**Abstract:** The commercial computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT is used to predict the two phase flow in a flue gas desulfurization (FGD) spray tower. The Euler-Lagrange method is used, in which the gas flow is described with standard  $k-\varepsilon$  turbulence model, and the motion of the liquid droplets is described with the particle trajectory model. The procedure of model definition, including force analysis of liquid particle, gas turbulent dispersion and the gas-liquid coupling method, is presented. The results show that the uniformity of axial gas velocity in the spray tower is satisfactory, and the hollow spray nozzle used in the tower can efficiently prevent short-circuiting of the flue gas. The concentration of liquid droplets in the central region is higher than near the wall, and this problem can be solved by optimizing the arrangement of the spray nozzles near the wall. Model predictions for particle trajectory are shown to be in good agreement with experimental results, and the particle trajectory model can predict the two phase flow in the spray tower successfully.

**Key words:** particle trajectory model; flue gas desulfurization (FGD); spray tower; numerical simulation

烟气脱硫喷淋塔是湿法烟气脱硫的核心设备, 其内部两相流动状态直接影响压降(能耗)、除雾效率、气液传质及脱硫效率等脱硫塔的重要性能参数. 近年来, 国内外学者采用多种方法对烟气脱硫喷淋塔内两相流场进行模拟研究<sup>[1~3]</sup>.

烟气脱硫喷淋塔内部是典型的气液两相流动. 研究两相流有 Euler-Lagrange 和 Euler-Euler 方法. 颗粒轨道模型是 Euler-Lagrange 方法体系下的两相流模型之一, 与其他两相流模型相比, 该模型的优点是无需构造颗粒湍流模型, 易于模拟有复杂经历(如颗粒凝并、破碎)的颗粒相, 且没有数值扩散, 但该模型的计算过程却相对复杂<sup>[4]</sup>. 随着计算流体力学的发展, 颗粒轨道模型已经包括到著名的商业软件, 如 FLUENT 和 STAR-CD 中, 使得该模型广泛用于工程模拟<sup>[5]</sup>. 本文选用 FLUENT 作为计算工具模拟喷淋塔内气液两相流场, 对气相湍流用 Euler 方法描述(标准  $k-\varepsilon$  湍流模型), 对液相颗粒采用

Lagrange 颗粒轨道模型描述.

模拟用到的设计、运行参数均取自北京国电龙源环保工程公司江阴夏港电厂二期脱硫吸收塔, 主要参数列于表 1.

### 1 模型设置

#### 1.1 颗粒受力<sup>[6]</sup>

在模拟中, 将烟气作为连续相处理, 将喷淋液滴作为离散相处理. 液滴的作用力平衡方程在直角坐标系下的形式为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\bar{u} - u_p) + \frac{g(\rho_f - \rho)}{\rho} + F_{\text{other}} \quad (1)$$

收稿日期: 2004-10-25; 修订日期: 2005-12-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2001 AA642020)

作者简介: 赵喆(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: zhaozhe97@mails.tsinghua.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: hjmrdn@tsinghua.edu.cn

$$F_D = \frac{18 \mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (2)$$

式中,  $\bar{u}$  为气相时均速度 (m/s);  $u_p$  为颗粒速度 (m/s);  $\rho$  为流体密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $\rho_p$  为颗粒密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $\mu$  为流体动力粘度 (Pa·s);  $d_p$  为颗粒直径 (m);  $C_D$  为阻力系数 (无量纲);  $Re$  为相对雷诺数 (颗粒雷诺数), 无量纲;  $F_{other}$  为其他相间作用力 (N)。

表 1 模拟参数

Table 1 Parameters used in simulation

项目	数值
烟气量 / m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	1 012 668
塔径 / m	12
塔高 / m	36
计算区域高度 (浆液池表面至除雾器底面) / m	16.6
入口截面积 (高 × 宽) / m	4 × 10
单层喷嘴数量 / 个	96
出口压力 (表压) / Pa	1 575
喷淋液出口速度 / m·s <sup>-1</sup>	10
液气比 / L·m <sup>-3</sup>	13.8
进口烟气流速 / m·s <sup>-1</sup>	10

阻力系数  $C_D$  与颗粒雷诺数以及颗粒形状有关, 可表示如下:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (3)$$

对于球形颗粒, 在一定雷诺数范围内,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  为常数<sup>[7]</sup>。

等式(1)右端的第一项为单位质量颗粒受到的阻力, 第二项为颗粒重力与所受浮力之差, 最后一项代表颗粒受到的其它作用力, 主要包括视质量力、热泳力、布朗力、Saffman 升力等。视质量力是由于要使颗粒周围流体加速而引起的附加作用力, 在流体密度大于颗粒密度时, 该力的影响作用不容忽视, 喷淋塔中流体密度 (气相) 远小于颗粒密度 (液相), 该力不需考虑。热泳力是由温度梯度引起的, 本研究针对冷态工况进行模拟, 假设塔内温度为常温且均匀分布, 故热泳力不予考虑。布朗力和 Saffman 升力均对亚观粒子 (直径 1 ~ 10 μm) 而言, 喷淋塔内液滴 Sauter 平均直径 (SMD) 2 100 μm, 故不需考虑这 2 种作用力。

## 1.2 颗粒湍流脉动

在直角坐标系下积分(1)式可得到颗粒运动的平均轨迹, 即忽略颗粒湍流脉动条件下的轨迹。实际上, 实验表明许多情况下颗粒的湍流扩散是不可忽略的。FLUENT 提供了随机轨道模型及颗粒群模型来确定湍流脉动对颗粒轨道的影响, 本文选用随机

轨道模型<sup>[8]</sup>。

在随机轨道模型中, (1)式中的流体平均速度  $\bar{u}$  用瞬时速度  $\bar{u} + u'(t)$  代替。假设气相湍流各向同性且局部均匀, 其随机速度满足高斯概率密度分布, 气体脉动速度可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} u'_x &= \zeta(\overline{u'^2})^{1/2}, u'_y = \zeta(\overline{v'^2})^{1/2}, \\ u'_z &= \zeta(\overline{w'^2})^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $u'_x, u'_y, u'_z$  分别为脉动速度矢量  $u'(t)$  在  $x, y$  和  $z$  方向的分量, 方程右边带根号的量为当地脉动速度的雷诺应力。  $\zeta$  为符合标准高斯概率密度分布的随机数。此时, 流场中各处的湍动能都是已知量, 对于  $k$ - $\varepsilon$  模型, 雷诺应力分量为:

$$\overline{u_x'^2} = \overline{u_y'^2} = \overline{u_z'^2} = \frac{2}{3} k \quad (5)$$

$k$  为湍动能 (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)。

颗粒湍流扩散的计算应用了积分时间尺度  $\tau_c$  的概念, 该积分时间尺度表示颗粒与随机涡的作用时间, 可以取为  $\tau_c = \min[\tau_r, \tau_T]$ 。其中  $\tau_r$  为颗粒脉动驰豫时间, 表示为:

$$\tau_r = d_p^2 \rho_p / (18 \mu) \quad (6)$$

$\tau_T$  为流体脉动时间 (即扩散时间), 表示为:

$$\tau_T = k / \varepsilon \quad (7)$$

$\varepsilon$  为湍能耗散率 (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)。

颗粒与一个涡作用的结束就是与下一个涡作用的开始, 这样不断计算至计算域出口, 即完成一个单颗粒运动及扩散的计算。通过这种方法计算足够多条的颗粒轨迹, 湍流对颗粒的随机性影响就可以得到考虑。

## 1.3 气液两相耦合

在本设计中, 当烟气负荷 100%, 4 个喷淋层全部投运时, 塔内液相体积为气相的 1.4%, 且液相以雾化液滴的形式存在, 强烈影响气相湍流的分布。因此, 在模拟中不仅要考虑气体对液滴的作用, 而且应考虑液滴对气体的作用, 计算气液之间的双向耦合作用, 其方法为: 当液滴颗粒穿过每个计算网格时, 通过计算液滴的动量变化来求解气体传给液滴的动量值。液滴动量变化值为:

$$F = \sum \left| \frac{18 \mu C_D Re}{\rho d_p^2 24} (u_p - u) \right| \dot{m}_p \Delta t \quad (8)$$

式中,  $\dot{m}_p$  为颗粒质量流率 (kg/s);  $\Delta t$  为时间步长 (s)。

这个动量交换作为动量“汇”作用到随后的气相动量平衡计算中。迭代计算过程中, 气、液两相交替计算, 经过一定步数之后, 最终达到收敛标准, 即可

得到气液两相流场分布结果。

## 2 射流源定义

烟气脱硫喷淋塔内分层布置了大量喷嘴(4层,每层96个),喷嘴型式为中空锥形,双向喷淋(图3)。由于要考察喷嘴布置方式对液滴浓度空间分布的影响,每个喷嘴必须作为单独的射流源来处理。喷嘴的位置严格按照设计图纸以三维直角坐标的形式输入 FLUENT 软件,各个射流源的特性可由一系列特性参数来表征,对于液滴轨迹计算而言,最重要的特性参数是液滴尺寸分布、液滴出口速度和喷淋夹角。

### 2.1 液滴尺寸分布

在相同的喷淋液量下,液滴雾化粒径的不同,塔内压力损失显著不同,因此,必须准确输入液滴初始粒径。在 FLUENT 中,颗粒尺寸分布用 Rosin-Rammler 分布描述,该分布假定颗粒直径  $d$  与大于此直径的颗粒的质量分数  $Y_d$  之间存在指数关系:

$$Y_d = \exp[-(d/\bar{d})^n] \quad (9)$$

其中,  $n$  是非均匀性指数,  $\bar{d}$  是特征尺寸,均可由喷淋试验数据拟合得到。

喷嘴供应商提供的喷淋液滴 PDPA 试验数据中包括液滴累积粒径分布数据,从中选取具有代表性的9个点进行数据拟合,可得喷淋液滴的 Rosin-Rammler 分布曲线,如图1所示。由(9)式可知,  $\bar{d}$  为  $Y_d = e^{-1} \approx 0.368$  时的颗粒直径。由图1得到的拟合曲线,可计算出  $\bar{d} = 3696 \mu\text{m}$ 。

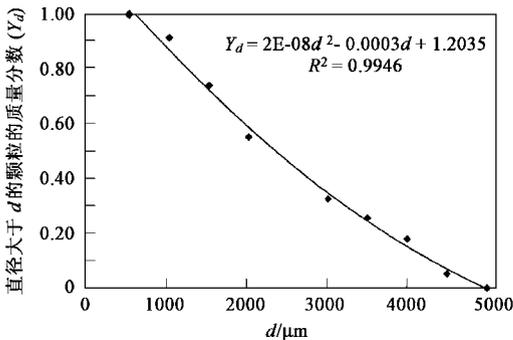


图1 喷淋液滴粒径 Rosin-Rammler 分布

Fig.1 Particle size Rosin-Rammler distribution

$n$  值由(10)式给出:

$$n = \frac{\ln(-\ln Y_d)}{\ln(d/\bar{d})} \quad (10)$$

把  $Y_d$  与  $d/\bar{d}$  的数值代入(10)式可得到  $n$  值及其平均值  $n_{\text{aver}}$ , 本算例中  $n_{\text{aver}} = 1.51$ , 将算得的  $\bar{d}$  与

$n_{\text{aver}}$  输入到 FLUENT 中,即可准确给定液滴的初始粒径分布。

### 2.2 液滴出口速度与喷淋夹角

液滴的喷出速度难以直接测得,同时,由于采用中空锥形喷嘴,也无法通过流量、喷嘴截面积计算得到。可以根据喷淋实验曲线提供的喷淋夹角、最大喷淋高度,利用平抛公式计算得到。

由于喷淋塔中使用的喷嘴为中空锥形双向喷淋喷嘴,增大了初始条件设定的难度。可以通过在同一点设定4个射流源来实现,即把一个喷嘴当作分别向左上、左下、右上、右下4个方向喷射的“子喷嘴”来模拟,每个“子喷嘴”的出口速度、粒径分布均与“母喷嘴”相同。喷淋夹角的设定要考虑喷射偏差,将喷嘴坐标、液滴出口速度、喷射角度在 FLUENT 软件 Injection 输入面板中给定,即完成了射流源的定义过程。

## 3 数值模拟结果及分析

### 3.1 气相湍流速度场

气相湍流速度场如图2所示。在图2中,各个网格节点的箭头代表了当地的气体速度矢量,其长短反映其相对大小,其方向反映风速方向。需要说明的是,由于网格节点数量很大,故利用 FLUENT 软件对矢量进行合成处理,亦即每个箭头都是多个网格节点上速度矢量的合成。气体进入塔体后与分布在塔内的液滴发生强烈的相互作用,迅速过渡至充分发展的湍流流动状态。强烈湍动有利于气体动量输运,使得气体速度在沿塔径方向均匀分布。由于进口段的几何突扩作用,在其上方和下方各形成一个涡。在整个塔体范围内,不存在显著的回流区。沿塔高方向截面风速分布均匀性始终保持很好,没有明显的高风速带,验证了现有设计能够有效防止烟气短流现象的发生。

### 3.2 颗粒相轨迹跟踪

图3给出了单个中空锥形喷嘴在烟气负荷100%的条件下的液滴轨迹跟踪结果。运行轨迹由液滴在气相流场中的受力及湍流脉动2方面作用共同决定。在吸收塔进口区域,液滴由于收到烟气的冲击,呈现明显的回转。喷嘴为双向喷淋,部分液滴具有向上的初始速度,在保证喷淋密度的同时有效增加了液滴在塔内的停留时间,有利于气液传质。由于喷淋液的粒径从  $100 \sim 5000 \mu\text{m}$  不等( $SMD = 2100 \mu\text{m}$ ),可以看到,较小的颗粒被烟气夹带至塔的上部,其中一部分可到达出口截面,大部分液滴在冲刷

烟气之后落至浆液池,还有相当一部分液滴碰撞塔壁之后沿壁下流.

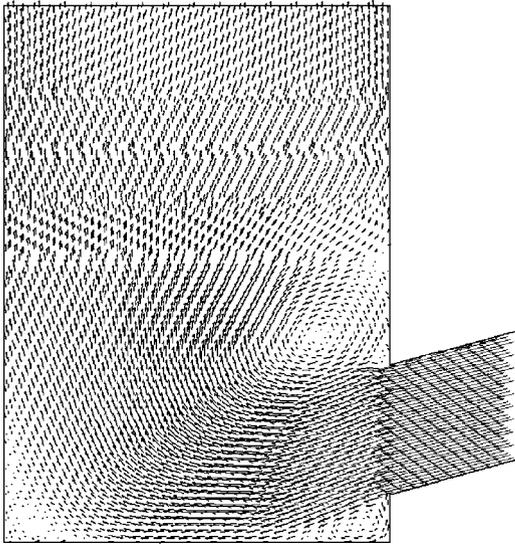


图 2 气相湍流速度场

Fig.2 Gas velocity profile in the spray tower

最高值出现在各喷淋层之间,塔的中心部位.这种分布规律由喷嘴布置方案决定.液滴浓度中间高,边缘较低,导致截面风速分布呈现中心部位较低,靠近塔壁处偏高的现象.可以通过改进喷嘴布置方案,例如,加大塔壁附近喷嘴密度,减小周边喷嘴的喷射角度,实现基于液滴浓度空间均匀分布的喷嘴布置,代替喷嘴位置空间均匀分布的布置.

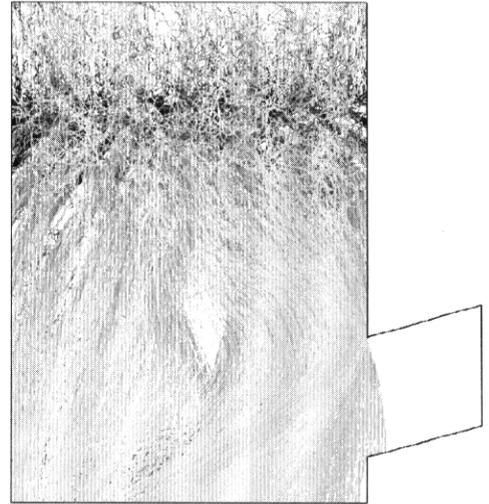


图 4 单层喷嘴液滴轨迹跟踪

Fig.4 Trajectory of the liquid droplets of one spray layer

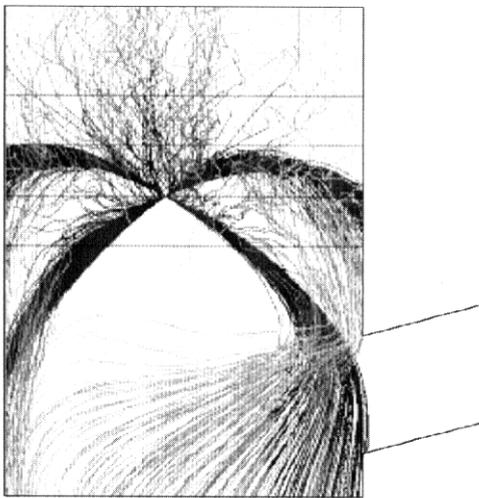


图 3 单个喷嘴液滴轨迹跟踪

Fig.3 Trajectory of the liquid droplets of one spray nozzle

图 4 给出了最上层喷嘴喷出的液滴的轨迹跟踪结果,由图 4 可知,液滴在塔内分布的均匀性较好,中空锥形的喷嘴设计在塔内形成多个伞状水帘,能够有效防止烟气短路,延长气液接触时间.

### 3.3 液滴浓度空间分布

图 5 给出的是 4 个喷淋层同时工作时液滴浓度的空间分布,在第 1 喷淋层至第 4 喷淋层之间的区域,液滴浓度较高,其均值约为  $7.8 \text{ kg/m}^3$ ,液滴浓度

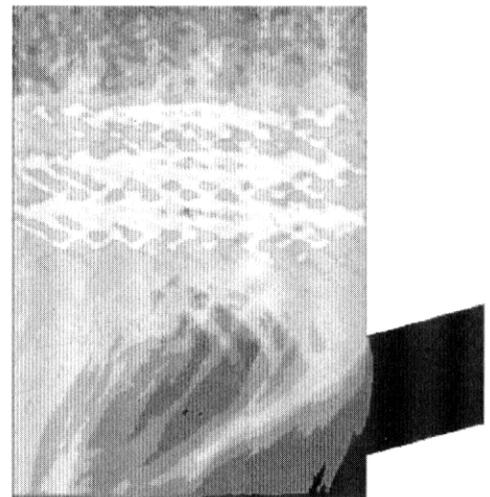


图 5 液滴浓度空间分布

Fig.5 Distribution of the liquid concentration

### 4 模拟结果的校验

将数值模拟得到的喷淋液滴运动轨迹与喷淋实验结果进行对比,可以验证数值模拟结果的可靠性.

图 6 是喷淋实验得到的喷嘴在不同工作压力下的喷淋曲线。将  $0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$  时(与数值模拟条件对应)的喷淋实验曲线与图 3 对比可知,数值模拟得到的喷淋曲线与喷淋实验曲线吻合得非常好。此外,数值模拟预测的液滴停留时间,除雾器断面液滴浓度分布,液滴浓度空间分布的结果均在脱硫塔设计、运行保证值的范围内,与工程实际相符。由此可以得出结论:运用颗粒轨道模型能够较好地预测液滴运动轨迹,模拟结果是可靠的。

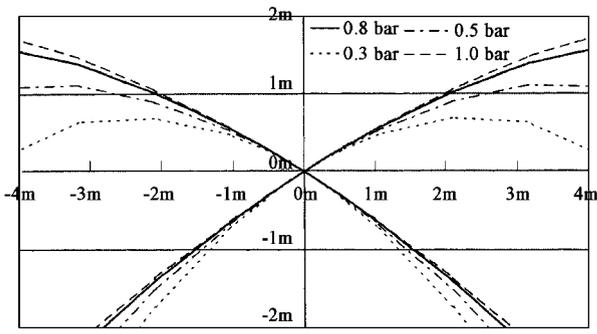


图 6 喷淋范围实验曲线

Fig.6 Spray width due to experiment data

## 5 结论

(1) 对于数量多且属性复杂的射流源, FLUENT 能够从颗粒粒径分布、喷淋夹角和出口速度 3 个方面进行精确定义。

(2) 颗粒轨道模型由于全面考虑了颗粒受力、颗粒湍流脉动以及两相之间的双向耦合等各方面的因素,能够成功预测烟气脱硫喷淋塔内部两相流场,模

拟结果与喷淋实验结果吻合较好。

(3) 模拟结果表明:脱硫塔内的喷淋液滴浓度分布存在中间高、边缘低的问题,可以通过改进喷嘴布置方案,例如,加大塔壁附近喷嘴密度,减小周边喷嘴的喷射角度加以改进。

参考文献:

- [ 1 ] Jacek A Michalski. Aerodynamic Characteristics of Flue Gas Desulfurization Spray Towers: Polydispersity Consideration[ J ]. Ind. Eng. Chem. Res., 2000, **39**:3314 ~ 3324.
- [ 2 ] Dudek S A, Rogers J A, Gohara W F. Computational Fluid Dynamics ( CFD ) Model for Predicting Two Phase Flow in a Flue-Gas-Desulfurization Wet Scrubber[ A ]. In: Proceedings of EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium[ C ]. Georgia: Atlanta, 1999.
- [ 3 ] Thomas W Stroock, Wadie F Gohara. Experimental Approach and Techniques for the Evaluation of Wet Flue Gas Desulfurization Scrubber Fluid Mechanics[ J ]. Chemical Engineering Science, 1994, **49**( 24A ):4667 ~ 4679.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 周力行. 多相湍流反应流体力学[ M ]. 北京:国防工业出版社, 2002. 168 ~ 170.
- [ 6 ] FLUENT 6.0 User's Guide[ CP ]. December 2001 :19-6 ~ 19-14
- [ 7 ] Morsi S A, Alexander A J. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems[ J ]. J. Fluid Mech., 1972, **55**( 2 ):193 ~ 208.
- [ 8 ] Thomson D J. Criteria for the Selection of Stochastic Models of Particle Trajectories in Turbulent Flows[ J ]. J. Fluid Mech., 1987, **180**:529 ~ 538.
- [ 9 ] Li He Ping, Chen Xi. Three-dimensional simulation of a plasma jet with transverse particle and carrier gas injection[ J ]. Thin Solid Films, 2001, **390**:175 ~ 180.