

# 湿式电除尘器充电模型建立与收集效率的数值研究

周小颖<sup>1</sup>, 张海珍<sup>2</sup>, 陈小平<sup>1</sup>, 窦华书<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018; 2. 华电电力科学研究院, 浙江 杭州 310030)

**摘要:** 本研究采用有限体积法对湿式电除尘器内部颗粒运动轨迹和颗粒收集效率进行了计算, 利用某 330 MW 燃煤发电机组湿式电除尘器的实验数据来建立其颗粒充电模型, 并分析不同循环水量下的颗粒收集效率。应用欧拉多相流方法计算气液两相流, 结合 DPM(离散相模型)追踪离子轨迹来模拟湿式电除尘器内部三相流动。结果显示, 数值计算模型与实验数据匹配程度较好, 能一定程度上体现湿式电除尘器内部特性。研究发现, 在一定范围内随着循环水量的增加, 收集效率随之增大; 同时发现, 在高循环水量的情况下, 收集效率随着粒径的增大而增大; 但是, 在低循环水量下, 随着粒径增大, 收集效率下降, 然后随着粒径的增大而升高。

**关键词:** 湿式电除尘器; 收集效率; 循环水量; 电场力

中图分类号: TM621.7<sup>+</sup>3 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.11.015

## 引言

湿式电除尘器是一种高效除尘设备, 与干式电除尘器相比, 湿式电除尘器不需要振打清灰, 而是利用连续水膜清灰, 因此没有二次扬尘, 也不受尘粒比电阻的影响, 对于 PM2.5 有很好的脱除效果, 能满足更严格的环保要求<sup>[1-4]</sup>。与在湿法脱硫装置后安装湿式电除尘器的做法, 已经在国内外火力电厂有所应用并取得了较好的效果<sup>[5-7]</sup>。

湿式电除尘器投入商业使用已经有了上百年的历史, 在钢铁冶金、水泥制造业的使用也比较成熟, 但是湿式电除尘器技术的理论尚不完备, 相关研究仍属于经验工程的研究范畴<sup>[8]</sup>。近年来, 湿式电除尘器在火力电厂中的应用非常广泛, 但是针对湿式电除尘器的数值计算研究较少, 而这一研究对于了解除尘器内部特性十分重要。

本文采用数值计算的方法, 对湿式电除尘器的内部流动进行三维定常湍流流动的数值模拟, 通过实验验证的方式确定湿式电除尘器的充电模型, 计算分离器内部气流流动特性和粒子运动轨迹, 研究

喷水量对流场性质以及分离效率的影响。由于湿式电除尘器中含有气固液三相, 内部流场受多种因素的影响, 因此需对其电场与气场进行耦合精确求解, 分析颗粒在其中的荷电作用, 提出完整可靠的湿式电除尘器数值计算模型, 为湿式电除尘器的性能优化提供依据。

## 1 数值模拟

### 1.1 湿式电除尘器充电模型

湿式电除尘器内部流场复杂, 涉及气固液三相, 并存在电场的作用, 使得内部气流及颗粒运动情况复杂, 内部特性受到多种因素的影响。电场控制方程为泊松方程与电流连续性方程<sup>[9]</sup>, 考虑电场对流体的影响。数值计算中, 气相和液相作为连续相, 采用欧拉多相流模型计算, 两相分别满足连续性方程和动量方程, 湍流封闭模型为标准  $k-\varepsilon$  模型。颗粒固相的运动轨迹由 DPM(离散相模型)追踪<sup>[12]</sup>, 以此来实现三相流的计算。三相流动相互作用: 气液混合相流动影响颗粒运动, 颗粒运动反过来也影响气液两相的分布。

离散相模型计算颗粒运动轨迹, 颗粒运动的支配方程为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{E}Q_p}{m_p} \quad (1)$$

式中: 等号右边两项分别为气流拖拽力与电场力;  $\vec{u}_p$ —粒子速度, m/s;  $\rho_p$ —粒子密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\vec{E}$ —电场强度, V/m;  $Q_p$ —尘粒荷电量, C;  $m_p$ —颗粒质量, kg。

$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$  为单位质量颗粒受到的拖拽力,  $F_D$  表示为:

收稿日期: 2015-12-29; 修订日期: 2016-01-20

作者简介: 周小颖(1991-), 女, 四川成都人, 浙江理工大学硕士研究生。

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

式中: $\mu$ —动力粘性系数,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $C_D$ —阻力系数;  $Re$ —相对雷诺数:

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (3)$$

湿式电除尘器中液相的存在一方面使得多相流动变得更复杂,另一方面会影响颗粒的荷电特性。考虑 3 种充电影响:电场充电、扩散充电、液相影响项。颗粒充电模型的待定参数通过实验数据验证的方式来确定。

电场充电的充电方程为:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_f = \frac{0.95\rho_i \mu_i Q_s}{4\varepsilon_0} \left(1 - \frac{Q_p}{Q_s}\right)^2 \quad (4)$$

扩散充电的方程为<sup>[14]</sup>:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_d = \frac{\pi\rho_i d_p^2 v_i}{2} \exp\left(-\frac{Q_p e}{2\pi\varepsilon_0 d_p k_b T}\right) \quad (5)$$

式中: $\rho_i$ —空间电荷密度,  $\text{C}/\text{m}^3$ ;  $\vec{E}$ —电场强度,  $\text{V}/\text{m}$ ;  $\varepsilon_0$ —气体介电常数,  $\text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ ;  $Q_s$ —饱和荷电量,  $\text{C}$ ;  $d_p$ —尘粒直径,  $\text{m}$ ;  $v_i$ —离子平均热运动速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $e$ —电子电荷数,  $\text{C}$ ;  $k_b$ —Boltzmann 常数,  $\text{J}/\text{K}$ ;  $T$ —气体温度,  $\text{K}$ 。

湿式电除尘器中,由于液相的存在,颗粒荷电特性及运动特性发生了变化。这是一个受多参数影响的复杂过程,在本文中对此过程进行了简化处理,将液相对颗粒分离效率的影响归结为液相分布对颗粒充电过程的影响:即在电场荷电和扩散荷电的基础上,考虑湿式电除尘器中液相分布特性的影响,表示为:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\text{wet}} = a\rho_i \mu_i E d_p^2 \beta \quad (6)$$

式中: $\beta$ —液相的体积分数;

湿式电除尘器电场充电的饱和充电量为:

$$Q_s = b\pi\varepsilon_0 \left(1 + 2\frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 1}\right) E d_p^2 \quad (7)$$

式中: $\varepsilon_p$ —相对介电常数。

当电荷小于  $Q_s$  时,受到电场充电、扩散充电和液相影响项的共同作用,当电荷小于  $Q_s$  时,受到扩散充电与除尘器中液相分布特性的影响。 $a$  和  $b$  为待定系数,由实验确定。数据来自某电厂 330 MW 燃煤发电机组所采用的湿式电除尘器颗粒收集实验。

## 1.2 几何模型

湿式电除尘器内部有多个矩形通道,每个通道主要包括两块收集板,通道中央设置高压放电极。试验数据来自某 330 MW 燃煤发电机组采用的双层卧式复式湿式电除尘器。根据实验几何参数对单通道建立相应几何模型,其几何形状与边界设置如图 1 所示。

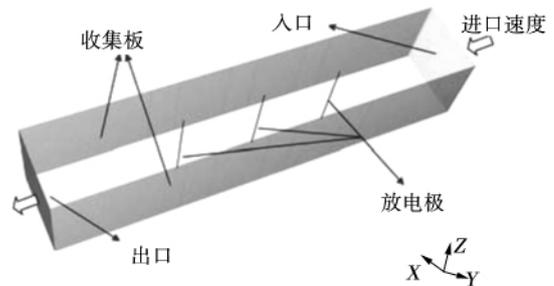


图 1 单通道除尘器数值几何模型

Fig. 1 Numerical geometrical model

计算模型尺寸为  $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ ,其中:通道中央设置 3 个放电极,放电极为表面光滑的线形圆柱,直径为 2 mm,极板间距、电极间距、通道宽度均为 0.3 m,通道长度为 1.6 m。设定电场放电为均匀放电,电场分布具有对称性,沿放电极方向电场值没有变化,可以忽略沿电极方向电场对气流的影响。数值计算中出于对计算量的控制,设定通道高度为 0.3 m。计算模型全部采用结构网格,在放电极周围使用 O 形网格划分,近壁面处进行网格加密,总网格数为 4 765 500。

表 1 列出了完整的边界条件,其中入口处液相的体积分数由循环水量与进气量计算给出。空间电势分布的边界条件采用 Kaptzov 假设,即在放电极起晕后,放电极表面的电场强度  $E_c$  保持不变<sup>[11]</sup>,满足 Peek 公式<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果与参数确定

实验运行电压为 48.5 kV,图 2 给出了湿式电除尘器中间截面的电势分布和空间电荷密度分布云

图 ,可以看到电势梯度值—电场强度只在电极附近 才有较大值。

表 1 边界条件

Tab. 1 Boundary conditions

边界	气相	液相	电势场	空间电荷密度	颗粒运动
入口	速度入口	速度入口 & 设定 $V_{fluid}$	$\partial V/\partial n = 0$	$\partial \rho_i/\partial n = 0$	逃逸
出口	自由出口	自由出口	$\partial V/\partial n = 0$	$\partial \rho_i/\partial n = 0$	逃出
收集板	无滑移壁面	无滑移壁面	$V = 0$	$\partial \rho_i/\partial n = 0$	捕捉
绝缘壁面	无滑移壁面	无滑移壁面	$\partial V/\partial n = 0$	$\partial \rho_i/\partial n = 0$	反弹
放电极	无滑移壁面	无滑移壁面	$V = 48.5 \text{ kV}$		反弹

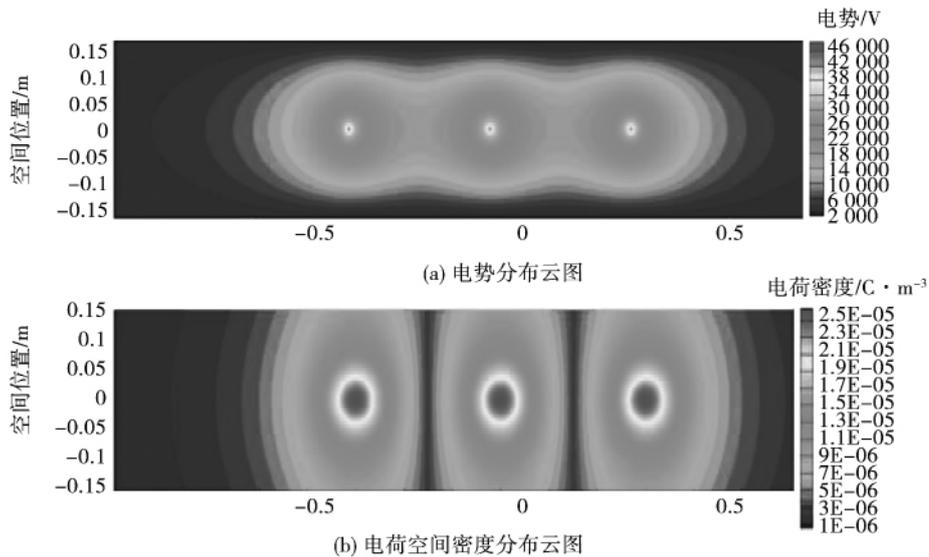


图 2 中心截面上电势分布和空间电荷密度分布云图

Fig. 2 Contours of the distribution of the potential and the spacial charge density in the central section

实验测试了 100% 负荷下 ,湿式电除尘器的除尘效率。进出口颗粒质量以及出口处粒径分布情况 如表 2 所示。数值计算中 ,入口处粒径分布采用 Rosin - Rammmler 分布函数拟合。

湿式电除尘器的充电方程的待定系数最终由实验数据确定。当待定系数  $a$  和  $b$  满足以下两个条件时 ,认为其值满足要求:(1) 总的分离效率计算结果与实验误差不超过 0.1% ;(2) 各粒径区间颗粒的

质量流量计算结果与实验误差在 20% 以下。根据计算结果 ,确定  $a = 3.16 \times 10^4$  ,  $b = 25$  ,计算收集效率为 79.23% ,出口处不同粒径颗粒的百分比与实验比较如图 3 所示。考虑到质量流量值非常小 ,以及实验测量的误差 ,认为误差在可接受范围内。待定系数的确定方法仅为充电模型的建立和研究提供思路 ,并不进行进一步的实验验证。

表 2 实验测试颗粒收集情况

Tab. 2 Collection conditions of particles tested

测试工况	测试位置	$\leq PM_{10}$	$PM_{10} \sim PM_{2.5}$	$PM_{2.5} \sim PM_{1.0}$	$\leq PM_{1.0}$	分离效率
100% 负荷	进口	2.64	1.83	0.61	5.08	79.13%
	出口	0.62	0.38	0.07	1.06	

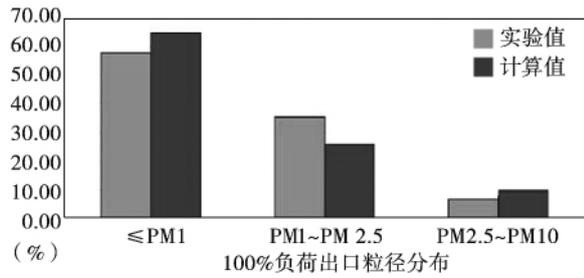


图 3 实验与数值计算出口粒径分布图  
Fig. 3 Chart showing the distribution of the particle diameter tested and numerically calculated at the outlet

2.2 计算结果与分析

本研究分析了循环水量对颗粒收集效率的影响,分别计算了循环水量为 95、105、115、128 和 140 t/h 条件下颗粒的收集效率,如图 4 所示。可以看到颗粒的收集效率与循环水量正相关。一方面,喷雾会使小颗粒凝并,使颗粒粘附在液滴上被脱除,另一方面,水量的增加有利于颗粒的充电作用,有利于颗粒收集。

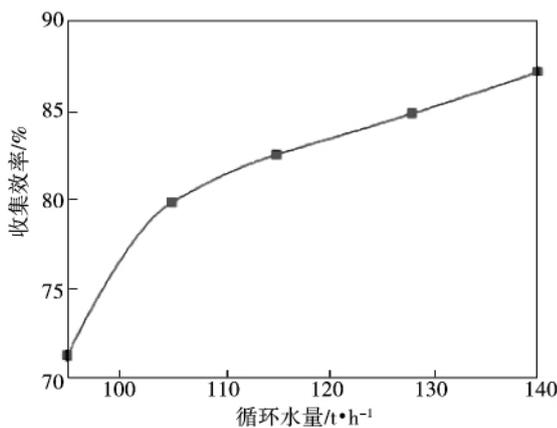


图 4 循环水量与收集效率关系图  
Fig. 4 Chart showing the relationship between the circulating water flow rate and the collection efficiency

在上述 5 个工况条件下,分析不同粒径尘粒(1 ~ 10  $\mu m$ )的分离效率,如图 5 所示。随着循环水量的增大,所有粒径的颗粒收集效率都呈上升趋势。同时,观察到当循环水量等于 95、105 和 115 t/h 时,收集效率随着粒径增大有一个先下降再上升的趋势,这个趋势随着循环水量的增大不断减弱,到 115

t/h 以后基本就消失了。

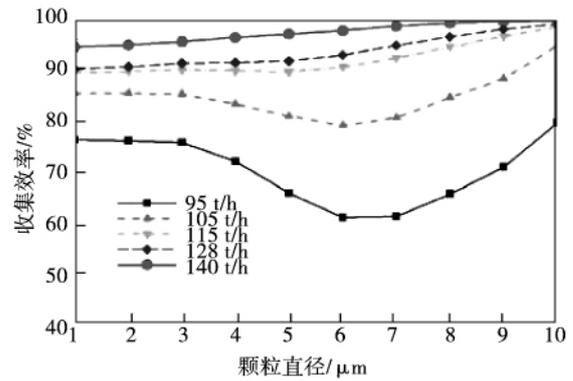


图 5 循环水量与出口粒径分布关系图  
Fig. 5 Chart showing the relationship between the circulating water flow rate and the distribution of the particle diameter at the outlet

为进一步分析颗粒收集产生变化的原因,选取循环水量为 95 t/h 和 140 t/h 两个工况进行比较。选取 3 种粒径分析:循环水量为 95 t/h 颗粒收集曲线的高点(1  $\mu m$  和 10  $\mu m$ )和低点(6  $\mu m$ )。同时,考虑不同射入区域对收集的影响,在入口中心线上选取两个射入区域:中心 1/3 长度 A 处( $y = -0.05 \sim -0.05 m$ ),靠近收集壁面 1/3 长度 B 处( $y = -0.15 \sim -0.05 m$ )。每次射入灰颗粒数量为 50 个,均匀射入。

图 6 和图 7 分别为循环水量为 95 t/h 和 140 t/h 工况下,粒径为 1、6 和 10  $\mu m$  颗粒,从射入口 A 射入后的运动轨迹图,颗粒流线由荷电量着色标记。从图 6(a) 可以看到,在循环水量为 95 t/h 工况下,粒径为 1  $\mu m$  颗粒,在第一个电极附近发生偏转。之后,颗粒继续向收集板偏转,最终部分被收集;剩余颗粒随气流从出口逃逸,但此种情况所占比例较小。颗粒发生偏转的主要原因是带电颗粒受电场作用引起的。而颗粒在第一个电极附近就被迅速充电,荷电量迅速增大,在第一和第二个电极之间荷电量持续增大。对于粒径 6  $\mu m$  的颗粒,发现少部分颗粒在第一和第二个电极之间,获得向收集板的偏转力而被收集,剩余颗粒跟随气流向下游运动。由于颗粒脱离中心区域没有足够的电场强度来获得偏转力,因此在靠近收集板的区域随气流出除尘器,收集效果明显不如 1  $\mu m$  颗粒。粒径 10  $\mu m$  颗粒运

动轨迹如图 6(c) 所示,第 3 个放电极之后颗粒的运动轨迹较 6  $\mu\text{m}$  颗粒更稳定,收集效果更好,但是逃逸颗粒数比 1  $\mu\text{m}$  颗粒多。从图 7 可以看到,在循环水量为 140 t/h 工况条件下,所有颗粒都在第一个电极后被收集,由于循环水量增大使得液相体积分数整体提高,颗粒在第一个电极处就迅速获得饱和电量而被收集,收集效果与粒径正相关。图 5 中部分工况(95、105 t/h)所出现的收集效率随粒径增大先下降后增大的趋势消失。

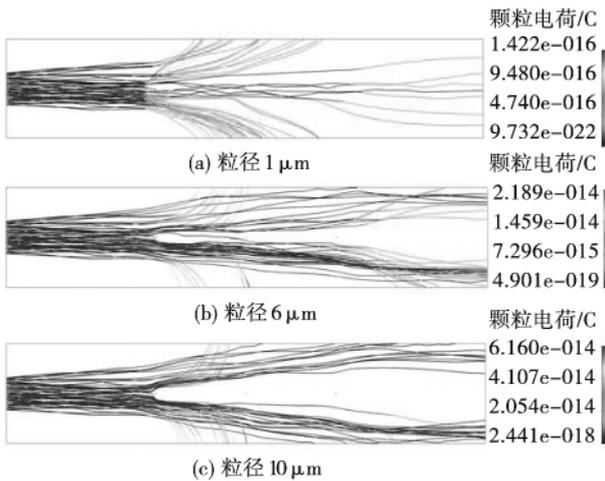


图 6 循环水量为 95 t/h 工况下从 A 处射出不同粒径颗粒的运动轨迹

Fig. 6 Movement trajectory of particles in various diameters jet from the location A at a circulating water flow rate of 95 t/h

图 8 和图 9 分别为循环水流量 95 和 140 t/h 工况下,粒径为 1、6 和 10  $\mu\text{m}$  颗粒,从射入口 B 射入后的运动轨迹图,颗粒流线由荷电量着色标记。从图 8 可以看到,在循环水流量 95 t/h 工况条件下,粒径为 1  $\mu\text{m}$  的颗粒的收集效率优于粒径为 6  $\mu\text{m}$  的颗粒,低于粒径为 10  $\mu\text{m}$  的颗粒。还可以发现入射位置靠近放电极的颗粒更容易被收集,从图 8(a) 可以看到第一个放电极后颗粒荷电量急剧增大,入射位置靠近放电极的颗粒运动轨迹发生明显的偏转。从图 8(b) 可以看到,粒径 6  $\mu\text{m}$  的颗粒被收集区域主要在第一个和第二个电极之后。与粒径为 1  $\mu\text{m}$  的颗粒不同的是,未被收集的颗粒并不集中分布在收集板附近。从图 8(c) 可以看到,粒径 10  $\mu\text{m}$  在第一个电极后整体向收集板偏移,几乎全部被收集。

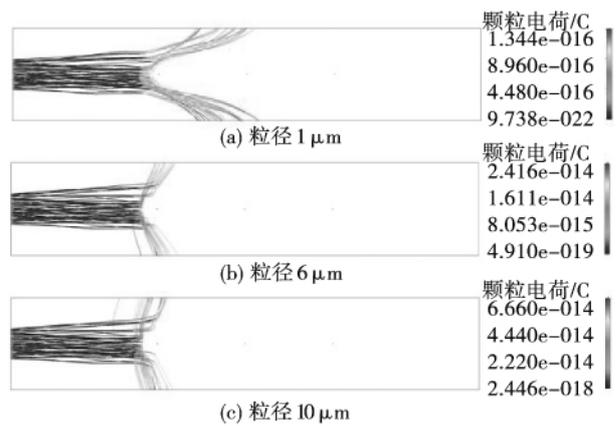


图 7 循环水量为 140 t/h 工况下从 A 处射出不同粒径颗粒运动轨迹

Fig. 7 Movement trajectory of particles in various diameters jet from the location A at a circulating water flow rate of 140 t/h

从图 9 观察到,在 140 t/h 工况条件下,颗粒的收集效果随着粒径增大而提高,1  $\mu\text{m}$  颗粒有少数从出口逃逸,6  $\mu\text{m}$  颗粒在第三个电极附近被全部收集,10  $\mu\text{m}$  颗粒在第二个电极前被全部收集。

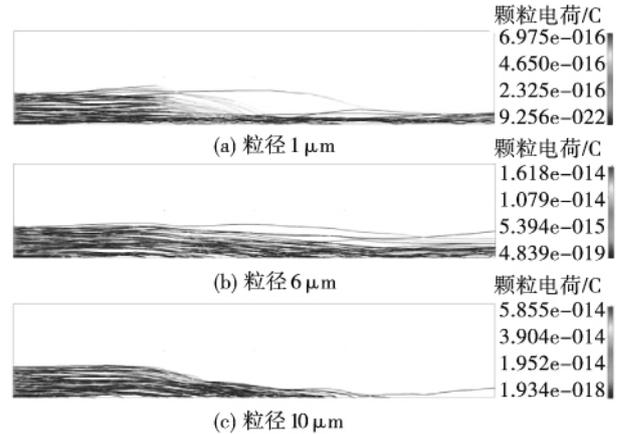


图 8 循环水流量 95 t/h 工况下,从 B 处射出不同粒径颗粒运动轨迹

Fig. 8 Movement trajectory of particles in various diameters jet from the location B at a circulating water flow rate of 95 t/h

从射入口位置来看,粒径 6  $\mu\text{m}$  的颗粒在 A、B 射入口的收集效果都低于 1  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  的颗粒,而 1  $\mu\text{m}$  颗粒从入口 A 射入的收集效率高于 10  $\mu\text{m}$  颗粒,从 B 入口射入效率低于 10  $\mu\text{m}$  颗粒,两者总

收集效率相当。

从图 8 和图 9 还观察到, 颗粒在出口处出现远离壁面的现象, 这是由于出口附近电场强度小 (如图 2 所示) 颗粒运动受气流拖拽力支配, 跟随流体流动, 出现小幅远离收集板的偏转。颗粒的运动过程是气体拖拽力与电场力共同作用的结果, 其中电场力主要贡献  $Y$  方向, 即颗粒朝收集壁面偏转的力, 气流拖拽力主要贡献顺气流方向的力。小循环水量下, 随着粒径增大, 气流拖拽力减小, 壁面法向方向的拖拽力也减小, 颗粒收集降低; 循环水量增加, 有利于颗粒充电和电场力的增大, 颗粒收集效率增加。两者分别为下降趋势和增加趋势, 结合起来出现图 6 的  $V$  形曲线。而在大循环水量下, 电场力迅速成为主要力, 影响颗粒收集, 因此颗粒收集效率先下降后上升的现象消失。

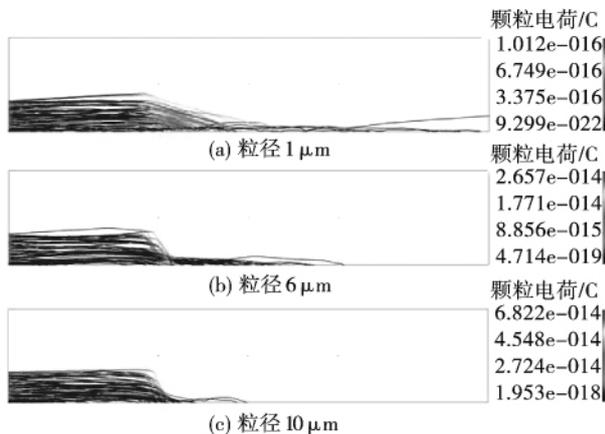


图 9 循环水量 140 t/h 工况下, 从 B 处射出不同粒径颗粒运动轨迹

Fig. 9 Movement trajectory of particles in various diameters jet from the location B at a circulating water flow rate of 140 t/h

### 3 结 论

本文对湿式电除尘器内部电场、流场进行了模拟, 并通过实验验证的方式, 建立湿式电除尘器内部颗粒的荷电模型, 研究了在水雾存在条件下, 颗粒的荷电情况和收集情况。主要结论如下:

(1) 在电场充电和扩散充电机理的基础上, 添加与水雾有关联的附加项, 通过匹配实验数据—总收集效率与出口处颗粒粒径分布, 来确定未知参量的值, 完成湿式电除尘器充电模型的建立。结果显

示, 数值计算模型与实验数据匹配程度较好, 能一定程度上体现湿式电除尘器内部特性。

(2) 循环水量增加, 颗粒收集效率随之增加, 但是增长速率也随之减缓。由于湿式电除尘器存在废水处理 and 循环水回收的问题, 在保证出口满足颗粒收集量的前提下, 对本文所研究的湿式电除尘器 105 t/h 的循环水量可以满足要求。

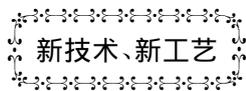
(3) 在高循环水量的情况下, 收集效率随着粒径的增大而增大。但是在低循环水量下, 随着粒径增大, 循环效率下降, 然后随着粒径的增大而升高。低循环水量下, 小颗粒主要受气流拖拽力的作用, 随着粒径增大, 电场力的作用不断增强, 成为主要作用力, 影响颗粒的收集。由于循环水量直接影响颗粒充电速率, 在高循环水量下, 电场力迅速成为主要作用力, 收集效率随着粒径的增大而增大。

### 参考文献:

- [1] 张志荣. 火电厂湿法烟气脱硫废水喷雾蒸发处理方法关键问题研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
ZHANG Zhi-rong. Study of the key problems relating to the methods for treating the waste water through atomization and vaporization in the wet-method flue gas desulfurization in a thermal power plant [D]. Chongqing: Chongqing University 2011.
- [2] 陈招妹, 赵琴霞, 杨艳霞, 等. 湿式电除尘技术及其在电厂的应用前景 [C], 第 14 届中国电除尘学术会议论文集, 2011: 137-141.  
CHEN Zhao-mei, ZHAO Qin-xia, YANG Yan-xia, et al. Wet type electrostatic dust removal technology and prospects of its applications in power plants [C]. Proceedings of China 14th Academic Conference on ESP 2011: 137-141.
- [3] 刘云. 湿式电除尘技术发展现状及其在燃煤电厂的应用探讨 [C], 第 15 届中国电除尘学术会议论文集, 2013: 387-191.  
LIU Yun. Status quo of the development of wet type electrostatic dust removal technology and exploratory study of its applications in coal-fired power plants [C]. Proceedings of China 15th Academic Conference on ESP 2013: 387-191.
- [4] 张东辉, 庄焯, 朱润儒, 等. 燃煤烟气污染物超低排放技术及经济分析 [J]. 电力建设, 2015, 36(5): 125-130.  
ZHANG Dong-hui, ZHUANG Ye, ZHU Run-ru, et al. Coal combustion flue gas pollutant ultra low emissions technology and its economic analysis [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 125-130.
- [5] 熊跃辉. 超低排放驱动力及其发展方向研究 [J]. 环境保护, 2014(22): 33-35.

- XIONG Yue-hui. Ultra low emissions driving force and study of its development tendency [J]. Environmental Protection ,2014 (22) : 33 - 35.
- [6] 屈晓凡,熊学云,张林等.燃煤电厂 PM2.5 排放控制技术—湿式电除尘[C].第十七届二氧化硫、氮氧化物、汞污染防治技术暨细颗粒物(PM2.5)控制与监测技术研讨会论文集.杭州:中国环境科学学会,2013:126-129.
- QU Xiao-fan ,XIONG Xue-yun ,ZHANG Lin ,et al. PM2.5 emission control technology for coal-fired power plants: wet type electrostatic dust removal [C]. Proceedings of 17th Conference on SO<sub>2</sub> ,Oxynitride ,Mercury Pollution Prevention Technology & PM 2.5 Emissions Control and Monitoring Technology ,2013: 126 - 129.
- [7] 沈浩.湿式电除尘器用于控制燃煤烟气污染物的测评[J].电力与能源,2014,35(1):54-58.
- SHEN Hao. Comprehensive evaluation for wet electrostatic precipitator used to control the coal-fired flue gas pollutants [J]. Power and Energy 2014 ,35(1) : 54 - 58.
- [8] Long Z W ,Yao Q ,Song Q ,et al. A second-order accurate finite volume method for the computation of electrical conditions inside a wire-plate electrostatic precipitator on unstructured meshes [J]. Journal of Electrostatics ,2009 ,67(4) : 597 - 604.
- [9] McDaniel E W ,Mason E A. The mobility and diffusion of ions in gases [M]. New York: Wiley ,1973.
- [10] Gosman A D ,Joannides E. Aspects of computer simulation of liquid fuelled combustors [J]. Journal of Energy ,1983 ,7(6) : 482 - 490.
- [11] Kaptzov N A. Elektricheskiye Yavleniya v Gazakh i Vakuume [M]. Moscow: OGIZ ,1947.
- [12] Peek F W. Dielectric phenomena in high voltage engineering [M]. New York: McGraw-Hill ,1929.

(刘瑶 编辑)



## MT7 船舶燃气轮机的应用

《Gas Turbine World》2014 ~ 2015 年年度手册介绍了 Rolls-Royce MT7 船舶燃气轮机的应用范围。

发动机额定值基于海军标准工况,即 100 °F (37.8 °C) 环境空气温度和 40% 相对湿度,规定气垫艇装置进口压损为 12 英寸(30.5 cm) (水柱高,表压) 和排气压损为 20 英寸(50.8 cm)。

气垫艇有 2 个关键输出功率,即,最大连续功率 3 902 kW(在 37.8 °C 日) 和最大冲刺速度下最大间歇功率 4 252 kW。

二种情况下,可按照要求在 95% 到 100% 涡轮输出轴转速下达到所需输出功率。

Rolls-Royce 工程师指出 MT7 燃气轮机适用于各种配置,船舶设计和建造者在推进系统配置上将更加灵活,即可用于机械驱动,也可电力驱动。

MT7 发动机另一个潜在应用是海军高速攻击艇。在柴燃联合装置中,2 台高速柴油机可用作为巡航机组,1 台 MT7 燃气轮机作加速机组。

作为船用发电机组,以船用柴油为燃料,船用化和耐冲击结构的 MT7 发动机将提供 4 000 到 5 000 kW 电力,效率超过 33%。

通过行星减速齿轮箱,驱动 1 台 50 或 60 Hz 空气冷却发电机,小型 MT7 燃气轮机可以组装成 1 个紧凑模块,用于海上平台和 FPSO(浮动式生产、储存和卸油) 船。

(吉桂明 摘译)

be still relatively uniform. When various single loops are being interrupted and blocked, the law governing changes of the particle concentration in the middle and on the top of the furnace will not be significantly different while the law governing changes of the particle concentration in the dense phase zone will be relatively complicated. **Key words:** six loop, circulating fluidized bed, particle condensation, interruption and blockage of a single loop

分布式冷热电联供系统变工况性能实验研究 = **Experimental Study of the Off-design Condition Performance of a Distributed Type Cooling, Heating and Power Cogeneration System** [刊, 汉]/JIANG Run-hua, HUANG Si-min, YIN Hui-bin, YANG Min-lin (Department of Energy and Chemical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, China, Post Code: 523808) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(11). - 74 ~ 79

On the test platform of distributed CCHP systems, off-design performance of units and system has been studied according to the output power of internal combustion engine. The power unit of experimental platform was diesel engine, and the rated power was 50 kW. With the output power of the diesel engine increasing, the primary energy rate (PER) and the relative energy saving ratio (RPESR) are the first to increase and then decrease. When output power is 40 kW, the PER is 76%, and RPESR is 29.5%. When the output power was too low, the RPESR was negative. It means that the CCHP system was not energy saving relative to the production system. The measures to improve the performance of CCHP system have been discussed in this paper. **Key words:** off-design; combined cooling, heating and power system; lithium bromide absorption refrigeration unit; energy utilization ratio

湿式电除尘器充电模型建立与收集效率的数值研究 = **Establishment of a Charging Model for Wet Type Electrostatic Precipitators and Numerical Study of the Collection Efficiency** [刊, 汉]/ZHOU Xiao-ying, CHEN Xiao-ping, DOU Hua-shu (College of Mechanical and Automatic Control, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310018), ZHANG Hai-zhen (Huadian Electric Power Science Academy, Hangzhou, China, Post Code: 310030) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(11). - 80 ~ 86

The finite volume method was used to calculate the particle movement trajectory inside a wet type electrostatic precipitator and the particle collection efficiency of the precipitator. By making use of the test data obtained from the wet type electrostatic precipitator in a 330 MW coal-fired power generation unit, a particle charging model was established and the particle collection efficiency at various circulating water flow rates were analyzed. The Euler multi-phase flow method was employed to calculate a gas-liquid two-phase flow and in combination with a discrete phase model, the ion trajectories were tracked to simulate the three-phase flow inside the precipitator. It has been found that the results calculated by using the numerical calculation model are in relatively good agreement with the

test data and reflect to a certain extent the internal characteristics of the precipitator. The research results show that in a certain range , the collection efficiency will increase with an increase of the circulating water flow rate and at the meantime , at a high circulating water flow rate , the collection efficiency will increase with an increase of the particle diameter , however , at a low circulating water flow rate , the collection efficiency will first decrease and then increase with an increase of the particle diameter. **Key words:** wet type electrostatic precipitator , collection efficiency , circulating water flow rate , force in an electric field

**基于地面试验系统的船舶动力多分支排气系统阻力特性模拟 = Simulation of the Resistance Characteristics of a Marine Power Multi-branch Exhaust Gas System Based on the Ground Test System** [刊 汉]/SUN Hai-ou , YE Nan , WANG Zhong-yi ( College of Power and Energy Source Engineering , Harbin Engineering University , Harbin , China , Post Code: 150001 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31 ( 11 ). - 87 ~ 91

To realize an aim of simulating respectively the resistance characteristics of various branches of a marine power multi-branch exhaust gas system on a ground single machine test system and fulfill an experimental study of the overall performance of the power plant corresponding to the resistance characteristics of each branch exhaust gas system in the marine power plant , a numerical simulation was performed of the marine power multi-branch exhaust gas system and the single machine ground test exhaust gas system. In compliance with the corresponding requirements for difference compensation , an additional resistance simulation configuration version was optimized , of which the resistance characteristics of various marine power branch exhaust gas systems reoccurred respectively to the ground test exhaust gas system. It has been found that the resistance simulation configuration in question can avoid a demerit difficult to precisely set the target values of the resistances of butterfly valves and similar throttling parts or components and the ground test system provided with the resistance simulation configuration can realize a high precision simulation of the resistance characteristics of various marine power branch exhaust gas systems. **Key words:** marine power , exhaust gas system , resistance characteristics , resistance simulation

**不同工况下漂浮式风力机整机动态特性对比分析 = Contrast and Analysis of the Whole Machine Dynamic Characteristics of a Floating Type Wind Turbine Under Various Operating Conditions** [刊 汉]/TANG Jinhua , LI Chun , DING Qin-wei , YANG Yang ( College of Energy Source and Power Engineering , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 , 31 ( 11 ). - 92 ~ 99

To study offshore floating type wind turbines has become a focus and hot point in the domain of wind power. On the basis of a 5 MW floating type wind turbine on the OC<sub>3</sub>-Hywind Spar platform , a whole machine model was estab-