

绝缘子表面积污规律的数值模拟研究

张林¹, 高嵩², 袁竹林¹, 王咏薇³

(1. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;
3. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 为了研究输电线路悬挂绝缘子表面的积污规律, 本文以 XWP2-160 型绝缘子为研究对象, 利用计算流体力学方法, 对大气中的污染物颗粒在绝缘子周边的运动和沉积进行数值模拟, 分析了风速、质量浓度、颗粒粒径对绝缘子表面积污速率和区域的影响。研究表明, 模拟结果与实验结果具有较好的一致性, 所建立的数学模型能够较好地反映绝缘子表面的积污规律; 绝缘子表面积污密度随风速的增加而增加并且增速逐渐增大, 上表面与下表面积污密度的比值随风速的增加逐渐减小; 绝缘子表面积污密度与质量浓度呈线性增加关系; 不同粒径的颗粒在绝缘子表面的沉积区域呈现出不同的规律; 绝缘子上表面 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒的沉积数目几乎不受粒径影响, 大于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒的沉积数目随着粒径的增加而增加并且增速逐渐增大; 绝缘子下表面 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒的沉积数目随粒径增加迅速下降, $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目回升, $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目下降, 一直 $100 \mu\text{m}$ 时接近于零。

关键词: 输电线路绝缘子; 积污规律; 计算流体力学; 数值模拟

中图分类号: TU55⁺1.31 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.09.018

引言

污秽闪络即污闪现象是指积聚在绝缘子表面具有导电性能的污秽物质, 在潮湿天气受潮后, 使绝缘子的绝缘水平大大降低, 在正常运行情况下发生的闪络事故。污闪因其跳闸重合成功率低、设备损坏十分严重已经成为电力系统安全运行的主要威胁^[1]。绝缘子在大气环境下的积污是造成污闪现象的主要原因, 随着我国雾霾天气的频繁发生, 绝缘子在大气污染条件下表面的积污显得更加突出。研究绝缘子表面的积污规律, 能帮助我们确定其在不

同环境条件下表面的积污状况, 为防治污闪的相关措施提供借鉴和参考, 从而减少污闪的发生。

目前国内外已有研究者在这方面做过研究。在实验研究方面, 具有代表性的研究包括: 王彬进行了自然积污实验^[2], 获得了交直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的积污特点; 钱之银设计了人工积污试验^[3], 研究了自然状况的各种因素(污秽量、风、雨、雾)对积污量的影响; 范建斌通过对自然积污站和风洞试验中积污数据的分析, 比较了伞形参数对绝缘子积污性能的影响^[4]。数值模拟研究方面, 孙继星建立了积污的仿真模型^[5], 以伞裙表面污秽的体积分数反映其积污状况, 得到了伞裙表面积污与风速及来流角度的关系; 江云志建立了湿润气象条件下绝缘子外部湍流流场的基本控制方程组和尘埃颗粒对流扩散基本方程^[6], 研究了绝缘子水滴撞击特性和尘埃颗粒对流扩散特性; N. Ravelomanantsoa 基于对外部流场和颗粒运动轨迹的计算^[7], 分析了绝缘子尺寸、风速、粒径对积污速度的影响。

当前对绝缘子表面积污规律的研究, 实验研究的结果切合实际, 但是在大气环境下, 绝缘子积污过程受到众多因素的影响, 如气象条件(当地温度、风速等)、细颗粒物条件(粉尘种类、浓度等)、绝缘子形状(不同绝缘子几何形状、凹凸面、迎风面等)。如果完全依靠实验进行积污规律的研究, 难以完成大量条件的组合, 也难以深入研究积污的机理。数值模拟研究可以深入全面地分析各个因素对积污的影响, 但是当前的数值模拟研究主要集中在不同因素与积污规律的关系上, 结合实际的大气环境条件, 对绝缘子表面积污规律的数值模拟研究现阶段仍相对较少。

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-04-14

基金项目: 江苏省科技计划资助项目(BY2015070-15)

作者简介: 张林(1990-), 男, 山东日照人, 东南大学硕士研究生。

本文以大气环境下的气象和污染物浓度信息为依据,对绝缘子的自然积污过程进行了数值模拟。选取两处实验点悬挂绝缘子进行积污实验,利用两处实验点的气象与污染物浓度信息同步进行模拟计算,将模拟结果与实验结果对比,以验证所建模型。对绝缘子采用三维建模,用欧拉法处理气相场,拉格朗日法处理离散颗粒场,将气象和污染物浓度信息作为计算条件,对污染物颗粒在绝缘子周边的运动和沉积进行数值模拟,分析了风速、质量浓度以及颗粒粒径等因素对绝缘子表面积污状况的影响,得到了不同气象和污染物浓度条件下污秽沉积速率与沉积区域,为分析和预测不同环境条件下绝缘子表面的积污状况提供了有效工具。

1 数学模型

以大气环境下的气象和污染物浓度信息为依据,对绝缘子的自然积污过程进行数值模拟,对绝缘子采用三维建模,分别采用欧拉法与拉格朗日法求解气相场与离散颗粒场。

1.1 物理模型

XWP2-160 型绝缘子尺寸如图 1 所示,结构高度 $H = 155 \text{ mm}$,公称盘径 $D = 300 \text{ mm}$,采用三片绝缘子作为计算模型。模型计算区域如图 2 所示,计算区域的尺寸为 $3\ 000 \text{ mm} \times 900 \text{ mm} \times 2\ 435 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高),入口面设置为速度进口,出口面设置为出流边界,上下边界采用对称边界,绝缘子表面设置为无滑移壁面。计算区域的网格划分采用非结构网格,采用局部网格加密的方法提高对绝缘子周边区域气相场的计算精度,局部网格尺寸为 6 mm ,通过更细的网格划分和比较计算可知,该网格划分细度能够完整表现绝缘子周边的流场细节。

1.2 简化假设条件

基于污秽颗粒在绝缘子周边运动和沉积实际过程的复杂性,在误差允许的范围,根据实际情况对计算模型做如下简化:

- (1) 颗粒受重力、范德华力和曳力的作用;
- (2) 将颗粒视为均匀硬质球形,忽略颗粒间相互作用力对颗粒运动的影响;
- (3) 忽略因颗粒沉积而导致流场变化对速度场和颗粒运动轨迹的作用。

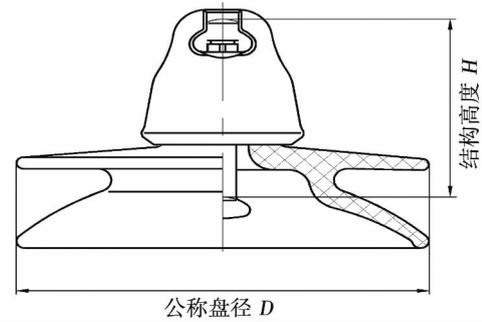


图 1 XWP2-160 型绝缘子结构示意图
Fig. 1 Schematic drawing of the structure of a XWP2-160 insulator

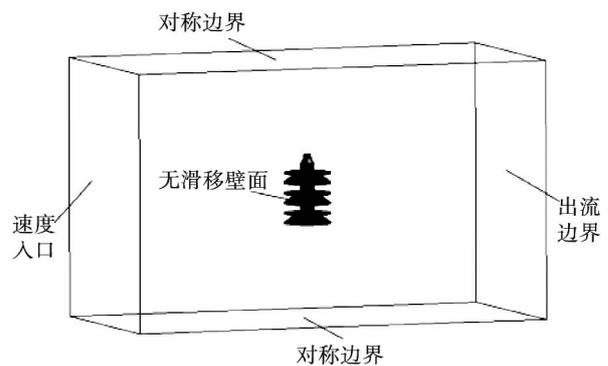


图 2 三片绝缘子模型计算区域
Fig. 2 Calculation domain of the model for three pieces of insulator

1.3 连续相数学模型

根据绝缘子周边实际气相流动的特点,将连续相设置为三维稳态、湍流和不可压缩流动。

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \tag{2}$$

式中: $i, j = 1, 2, 3$, ρ —流体的密度, kg/m^3 ; ν —流体的运动黏性系数, m^2/s 。

(3) RNG $k - \varepsilon$ 方程

由于气流流过绝缘子时,速度梯度较大且会产生涡流、回流,为提高外部流场的计算精度,本文采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型^[8]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_1}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: G_k —由平均梯度引起的湍动能 k 的产生项; C_1 、 C_2 —经验系数; σ_k 、 σ_ε —湍动能 k 和耗散率 ε 对应的普朗特数; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_T$ 。

1.4 离散颗粒相数学模型

颗粒的运动方程可用下式表示:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_v \quad (5)$$

式中右边各项分别表示颗粒受到的曳力、重力、范德华斯力。

其中曳力:

$$F_D = \frac{18\mu C_D R_e}{\rho_p d_p^2 24} \quad (6)$$

R_e 为颗粒雷诺数:

$$R_e = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (7)$$

范德华力:

$$F_v(h) = A \frac{2}{3r [(h/r)^2 - 1]^2} \quad (8)$$

式中: A —Hamaker 常数, $A = 2.0 \times 10^{-20}$; r —颗粒半径 μm ; h —颗粒的球心到绝缘子壁面的距离 μm 。

1.5 计算条件与数学模型的求解

(1) 计算条件

本文采用大气污染物扩散数值模型提供的实验点、当地气象和污染物浓度信息作为计算依据,以求达到真实有效地模拟大气环境中绝缘子积污过程的

目的。大气污染物扩散数值模型根据输入的污染源排放量、气象条件和地形状况等数据进行数值求解,获得污染源周边不同半径 0 ~ 15 km 的污染物浓度分布规律。

表 1 ~ 表 2 为实验点一的气象和污染物浓度数据。模型输出数据所取高度为 10 m,如表 1 所示,在此高度上垂直风速很小,水平风速对流场起主要作用;如表 2 所示,浓度数据的粒径范围在 0 ~ 10 μm ,这是由于大于 10 μm 颗粒主要来源于地面扬尘等无组织排放,在大气中会在重力作用下迅速沉降,因此大于 10 μm 颗粒数浓度很小且主要分布在距地面 0 ~ 5 m,大气污染物的质量主要集中在 PM_{10} ^[9~11];此外,粒径是影响绝缘表面吸附的最重要因素,粒径越小越容易吸附到绝缘表面,粒径在 0 ~ 10 μm 范围内的颗粒,可以认为只要与绝缘表面发生相互作用就能完成吸附^[12]。

以水平风速作为进口条件;模型出口表压为零;壁面条件:绝热,无滑移。对于离散颗粒相,表 1 所示三个范围的颗粒粒径都呈正态分布^[13],三个范围正态分布的峰值粒径分别为 0.03、0.3 和 6 μm ,故采用这 3 个粒径代替表 1 中 3 个粒径范围进行数值计算;颗粒密度根据数浓度、质量浓度、粒径间接求出;颗粒入口初速度与入口空气流速保持一致。

表 1 实验点 1 气象数据

Tab. 1 Meteorological data of the test point No. 1

时间	温度/°C	水平风速/m · s ⁻¹	垂直风速/m · s ⁻¹
2014. 10 ~ 2014. 12	14	2.71	0.000 386
2014. 12 ~ 2015. 2	3.12	2.66	-0.001 12
2015. 2 ~ 2015. 4	8.82	3.27	-0.006 59
2015. 4 ~ 2015. 6	19.8	3.179	-0.000 74

表 2 实验点 1 污染物数据

Tab. 2 Contaminant data of the test point No. 1

时间	数浓度/个 · cm ⁻³			质量浓度/μg · m ⁻³		
	0 ~ 0.1 μm	0.1 ~ 2.5 μm	2.5 ~ 10 μm	0 ~ 0.1 μm	0.1 ~ 2.5 μm	2.5 ~ 10 μm
2014. 10 ~ 2014. 12	639.1	8 292	1.894	0.38	75.5	20.7
2014. 12 ~ 2015. 2	1 078	9 567	4.26	0.87	84.5	42.2
2015. 2 ~ 2015. 4	1 198	7 195	3.09	1.35	69.1	30.9
2015. 4 ~ 2015. 6	898	5 993	2.53	0.98	58.2	26.7

(2) 数学模型的求解

离散相在拉格朗日框架下建立与求解,基本思路是:将污染物颗粒作为离散的球形颗粒,读取颗粒

所在位置网格的气相数据,求解每个颗粒的受力情况并获得其加速度、速度与位置,进而获得下一时刻各颗粒的参数信息,结合流场数据,从而追踪各个颗

粒的运动轨迹。结合各粒径颗粒数的浓度和模型尺寸来确定计算过程中的取样颗粒数、取样颗粒数与真实颗粒数的比值。

2 数值模拟结果的实验验证

为了验证数学模型的有效性,在江苏省徐州市选取两处污染较严重的地点悬挂绝缘子进行自然积污实验,利用两处实验点的气象与污染物浓度信息同步进行数值模拟计算,将模拟结果与实验结果进行对比验证。

实验点一和二分别靠近铁路与水泥厂,实验时间从 2014 年 10 月 1 日到 2015 年 6 月 1 日,每两个月取下三片绝缘子进行积污密度测量。积污密度分为等值盐密与等值灰密,等值盐密与灰密即单位表面积的单位盐量与灰量,灰密和盐密分别使用电子称和盐密分析仪进行测量,两者之和即积污密度。计算以周为单位进行,将每周结果累加获得每两个月的积污量。考虑到降雨对积污存在清洗作用,采用积污清洗率 η (降雨清洗量比原始积污量) 对计算值进行修正。积污清洗率 η 与降雨量 x (每 12 h) 的相关关系: $\eta = f(x)$ 通过大量实验及数据统计获得。结合实验点的降雨量信息,利用积污清洗率对模拟值进行修正。

图 3 为两处实验点 4 个实验阶段积污量的实测值与修正后模拟值的对比。如图 3 所示,模拟修正值与实测值的趋势基本吻合。经误差分析可知,实验点一模拟值的平均相对误差为 6.8%,实验点二模拟值的平均相对误差为 17.2%。实验点二的误差偏高,这是由于实验点二靠近水泥厂,环境中大于 $10 \mu\text{m}$ 颗粒相对较多,部分大于 $10 \mu\text{m}$ 颗粒沉降到绝缘子表面导致实测值偏高。综合来看,模拟值与实测值基本吻合,验证了所建模型的准确性。

3 模拟计算结果及分析

图 4 (a) 和图 4 (b) 为积污统计表面和各表面分区示意图。如图 4 (a) 所示,取绝缘子上伞裙上表面、下伞裙上表面与下表面 3 个主要积污表面进行积污量的统计;如图 4 (b) 所示,将统计表面沿圆周方向均分为 12 个区域,沿径向分别均分为 6 个、4 个和 5 个区域进行统计。本文在统计绝缘子表面总积污量时,将绝缘子分为上表面和下表面两部分,下

表面即下伞裙的下表面,上表面即下表面上方的所有表面。

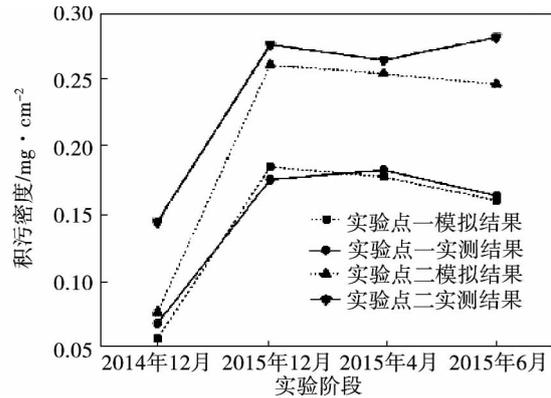
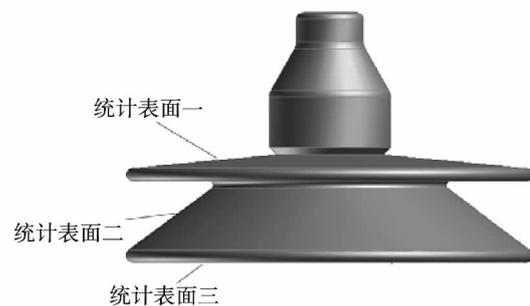
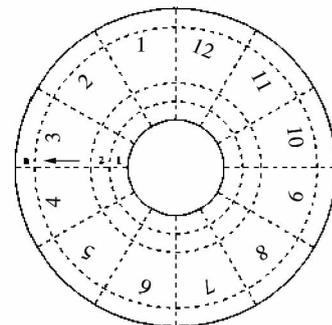


图 3 两实验点模拟值与实测值对比

Fig. 3 Contrast of the simulation values with those actually measured at the two test points



(a) 积污统计表面



(b) 统计表面分区

图 4 积污统计表面和统计表面分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the foul deposition statistic surface areas and region division

3.1 风速对绝缘子表面积污量的影响

由表 1、表 2 可知,水平风速与质量浓度为影响积污的两个主要因素。通过对大量气象和浓度数据的分析可知,自然环境中水平风速主要处于 $1.5 \sim 5 \text{ m/s}$,质量浓度主要处于 $60 \sim 120 \mu\text{g}/\text{cm}^3$,使用该范

围的风速和质量浓度作为计算初始条件。

图 5(a) 和图 5(b) 为不同风速下的积污密度曲线。由图 5(a)、(b) 可知 随着风速的增加,绝缘子表面的积污密度不断增大并且增速逐渐增大;在风速处于 4~4.5 m/s 时,上表面与下表面积污密度增速最大;在风速处于 2~2.5 m/s 时,上表面积污密度增速最小,1.5~2 m/s 时,下表面积污密度增速最小。图 6 为绝缘子上下表面积污密度平均比值曲线。由图 6 可知 随着风速的增加,上下表面积污密度的比值呈现逐渐减小的趋势,也即相对于上表面,下表面积污逐渐增多。结合图 7 分析原因,在较低的风速下,下表面下方风速较小,污染物颗粒受电力的作用速度减小较快,难以到达下表面;当风速较高时,受伞裙形状影响,下表面下方出现一个高速区且下表面下方风速整体较高,较高的风速会携带更多的颗粒到达下表面,因此绝缘子上表面与下表面积污密度的比值逐渐减小。

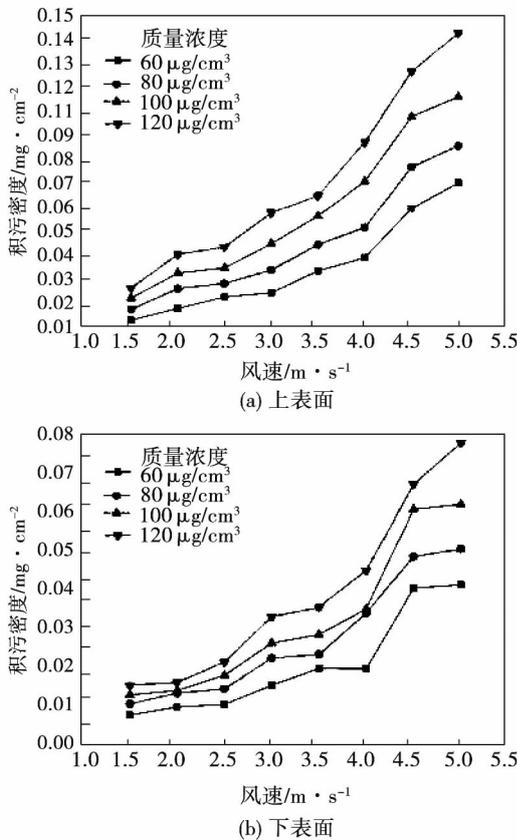


图 5 绝缘子表面积污密度曲线
Fig.5 Surface area foul deposition density curves of the insulators

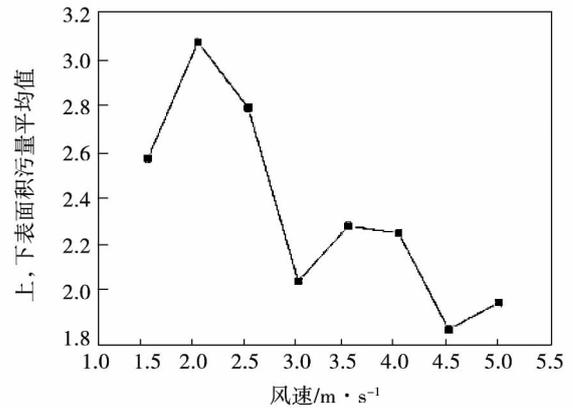


图 6 上下表面积污密度平均比值曲线
Fig.6 Top and bottom surface area foul deposition average ratio curves

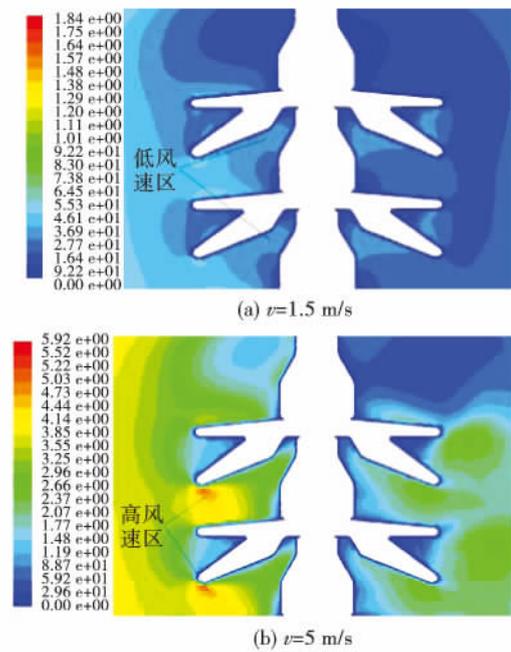


图 7 不同风速下气相场云图

Fig.7 Contours of the gas - phase field at various wind speeds

3.2 质量浓度对绝缘子表面积污量的影响

图 8(a) 和图 8(b) 为不同质量浓度下绝缘子上表面与下表面的积污密度曲线。由图 8(a) 和图 8(b) 可知,绝缘子表面的积污密度与质量浓度基本呈线性增加关系;同时,越高的风速下,积污密度随质量浓度增加的增速越高;此外,风速越高,曲线之间的距离越大,即风速越高,相同质量浓度下,积污密度增加越快。

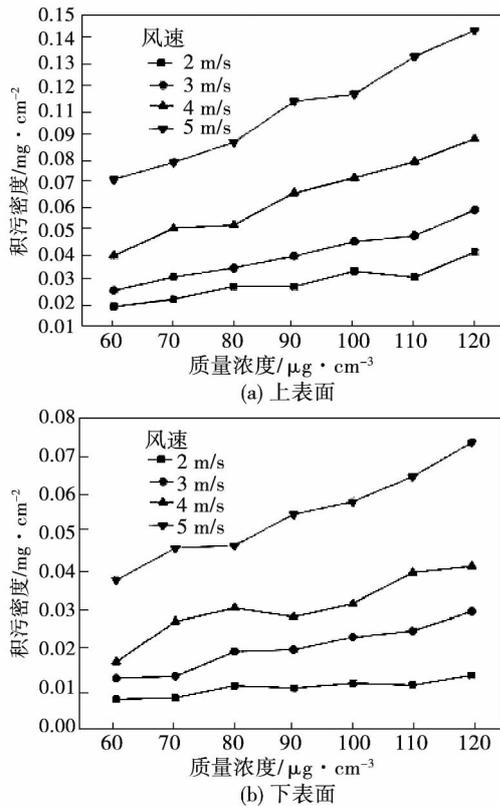


图 8 绝缘子表面积污密度曲线

Fig. 8 Surface area foul deposition density curves of the insulators

3.3 粒径对颗粒沉积数目与沉积区域的影响

3.3.1 粒径对颗粒沉积数目的影响

大气中污秽颗粒粒径主要集中在 $0 \sim 100 \mu\text{m}$ ^[14]。对于大于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒,虽然浓度较小且分布高度较低,但考虑到悬挂在低空及污染严重环境中绝缘子,对大于 $10 \mu\text{m}$ 颗粒的积污特性仍具有研究价值。图 9 (a) 和图 9 (b) 为风速 4 m/s 、浓度数 $1\,000 \text{ 个}/\text{cm}^3$,不同粒径的污染物颗粒在绝缘子上表面与下表面沉积数目曲线。

由图 9 (a) 可知,对于上表面 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒的沉积数目几乎不受粒径影响,大于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒的沉积数目随着粒径的增加逐渐增加并且增速越来越大。分析原因 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒的气流跟随性较好,大部分颗粒会随气流流过上表面,只有少部分会在上表面沉积。随着粒径增大,一方面,颗粒的气流跟随性下降,更多的颗粒会在惯性的作用下从气流中分离出来,沉积到上表面;另一方面,随着粒径增大,更多的颗粒会在重力作用下沉降到上表面。

由图 9 (b) 可知,对于下表面 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目迅速下降; $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目逐渐回升; $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目下降,一直到 $100 \mu\text{m}$ 时接近于零。结合图 12 与图 13 分析原因,由图 12 可见,下表面积污大部分分布于背风面;由图 13 可见,在下表面下方,由于伞裙形状的影响,水平方向的气流先沿着迎风面向上流动,后沿着背风面向下流动,气流方向变化较剧烈。 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒所受曳力起主要作用,气流跟随性好,大部分颗粒会随着气流运动到背风面,随着粒径的增加,惯性作用增强,越来越多的颗粒会从气流中分离出来,无法到达背风面,所以在 $0 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内,随着粒径增加,沉积数目下降; $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 的颗粒,惯性将逐渐起主要作用,更多的颗粒会在自身的初速度与曳力作用下到达背风面,所以在 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 范围内,沉积数目逐渐回升; $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 的颗粒,重力将起主要作用,越来越多的颗粒会在自身重力作用下在气流中沉降,因此下表面沉积数目逐渐减少一直到零。

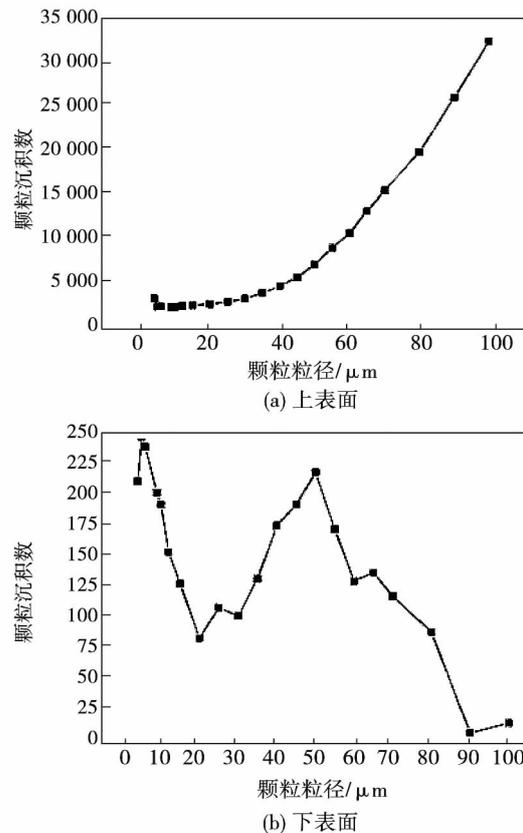


图 9 绝缘子表面沉积数目曲线

Fig. 9 Curves showing the number of insulators on which surface areas foulds have been deposited

3.3.2 粒径对颗粒沉积区域的影响

图 10 ~ 图 12 为风速 4 m/s 时不同粒径的污染物颗粒在 3 个统计表面不同区域的沉积数密度云图。

由图 10 可知,对于表面一 4 μm 与 20 μm 的颗粒主要沉积在迎风面且数密度由边缘到内部逐渐减小,背风面的颗粒主要沉积在伞裙边缘;50 μm 的颗

粒分布较为均匀。分析原因,部分 4 μm 与 20 μm 的颗粒会在惯性作用下沉积到迎风面,随着沉积量的增多,到达伞裙内部区域的颗粒数减少,因此数密度逐渐减小;在背风面上方,部分颗粒会在图 13 所示向下的气流作用下沉积到背风面边缘区域;50 μm 的颗粒由于曳力作用较小,颗粒会在重力作用下较为均匀地沉降在表面一。

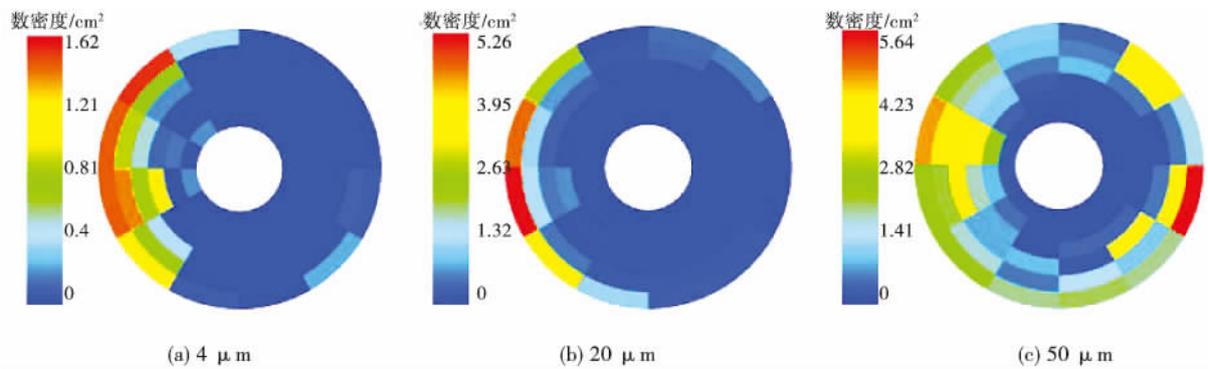


图 10 表面一沉积数密度云图

Fig. 10 Contours of the deposition Number density on the surface area No. 1

由图 11 可知,对于表面二 4 μm 颗粒大部分分布在迎风面,少部分分布在背风面;20 μm 与 50 μm 颗粒基本分布在迎风面。分析原因,由图 13 可知,表面二背风面上方气流存在回流,4 μm 颗粒的气流跟随性较强,运动到背风面上方的颗粒会在回流的

作用下沉积到背风面;20 μm 与 50 μm 的颗粒由于气流跟随性减弱且表面二上方空间较狭窄导致气流流速较低,气流回流对颗粒作用较弱,因此 20 μm 与 50 μm 颗粒基本沉积在迎风面。

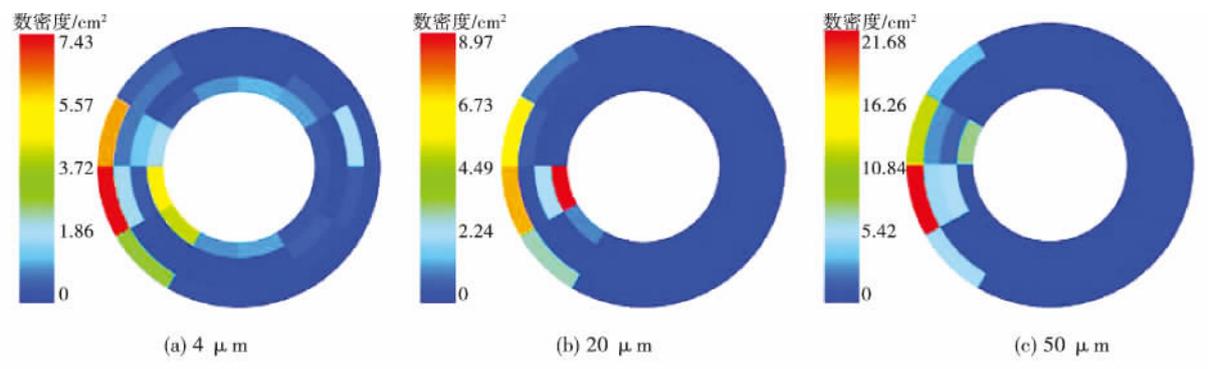


图 11 表面二沉积数密度云图

Fig. 11 Contours of the deposition Number density on the surface area No. 2

由图 12 可知,对于表面三,颗粒大部分沉积在背风面,随着粒径增大,颗粒趋向于集中在内部区域。分析原因,由图 13 可见,在下表面下方,水平方向的气流会先沿着迎风面向上流动,后沿着背风面

向下流动,颗粒会随着气流到达背风面内部区域,粒径较大的颗粒会在惯性作用下分离出来,部分粒径较小的颗粒会随着气流沿背风面向下运动,从而较为均匀地分布在背风面。

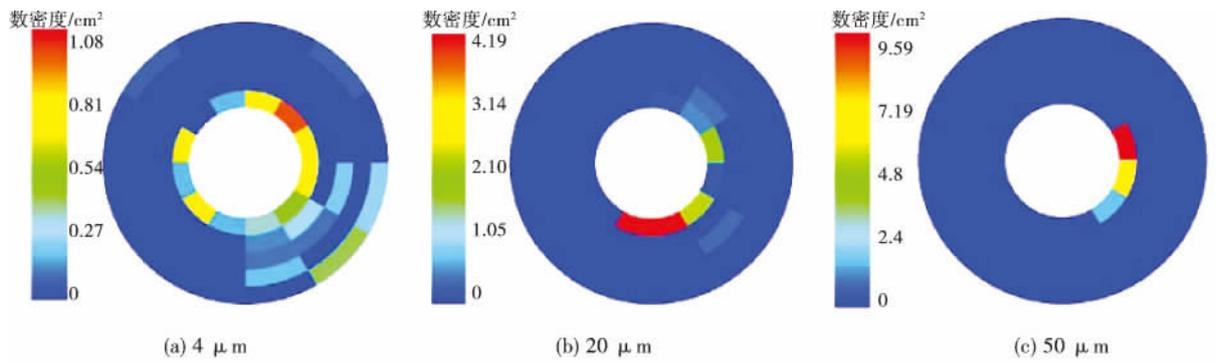


图 12 表面三沉积数密度云图

Fig. 12 Contours of the deposition Number density on the surface area No. 3

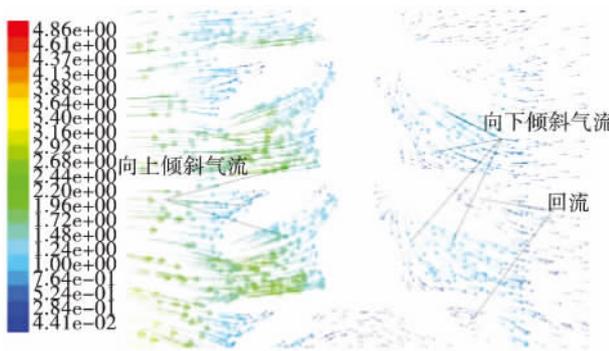


图 13 4 m/s 气相场矢量图

Fig. 13 Chart showing the vectors in the gas-phase field at a speed of 4 m/s

4 结 论

(1) 模拟结果与实验结果具有较好的一致性, 所建立的数学模型能够较好地反映绝缘子表面的积污规律;

(2) 绝缘子表面的积污密度均随风速的增加而增加并且增速逐渐增大; 绝缘子上表面与下表面积污密度的比值随风速的增加逐渐减小;

(3) 绝缘子表面的积污密度与污染物质量浓度呈线性增加关系, 风速越高, 积污密度的增速越高;

(4) 对于上表面 $\rho \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒的沉积数目几乎不受粒径影响, 大于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒随粒径增加沉积数目逐渐增加并且增速越来越大。对于下表面 $\rho \sim 20 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目随粒径增加迅速下降; $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目回升; $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 颗粒沉积数目下降, 一直到 $100 \mu\text{m}$ 接近于零;

(5) 表面一 $4 \mu\text{m}$ 与 $20 \mu\text{m}$ 颗粒主要沉积在迎风面且数密度沿由边缘到内部逐渐减小, 背风面的颗粒主要沉积在伞裙边缘; $50 \mu\text{m}$ 颗粒分布较为均匀。表面二 $4 \mu\text{m}$ 的颗粒大部分分布在迎风面, 少部分分布在背风面; $20 \mu\text{m}$ 与 $50 \mu\text{m}$ 颗粒基本分布在迎风面。表面三, 颗粒均大部分沉积在背风面, 随着粒径的增大, 颗粒趋向于集中在内部区域。

参考文献:

- [1] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
SUN Cai-xin, SIMA Wen-xia, SHU Li-chun. Atmospheric environment and electrical external insulation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 王 彬, 梁曦东, 张轶博. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (9): 2322 - 2328.
WANG Bin, LIANG Xi-dong, ZHANG Yi-bo. Natural foul deposition test of a composite and porcelain insulator under the direct and alternative current voltages [J]. High Voltage Technology, 2009, 35 (9): 2322 - 2328.
- [3] 钱之银, 肖 嵘. 华东电网 500 kV 线路绝缘子人工和自然积污比较 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (3): 705 - 710.
QIAN Zhi-yin, XIAO Rong. Comparison of the artificial and natural foul deposition on insulators in the 500 kV transmission lines of east China power grid [J]. High Voltage Technology, 2010, 36 (3): 705 - 710.
- [4] 范建斌, 宿志一, 李武峰, 等. 高压直流支柱绝缘子和套管伞形结构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (21).
FAN Jian-bin, SU zhi-yi, LI Wu-feng, et al. Research of the bevel structure of HVDC pillar insulators and bushings [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2007, 27 (21).
- [5] 孙继星, 吴广宁, 陈维荣, 等. 强风环境下棒形绝缘子积污动态

仿真分析[J].西南交通大学学报 2012 47(3):414-419.
SUN Ji-xing ,WU Guang-ming ,CHEN Wei-rong ,et al. Dynamic simulation and analysis of the fouls deposited on the bar insulators under the strong wind environment [J]. Journal of Southwest Jiaotong University 2012 47(3):414-419.

[6] 江云志,何 钢,张林元.复合绝缘子表面湿润积污过程的数值模拟方法[J].华中电力 2010 1(23).
JIANG Yun-zhi ,HE Gang ,ZHANG Lin-yuan. Method for numerically simulating wet foul deposition process on the surface of composite insulators[J]. Central China Electric Power 2010 1(23).

[7] N. Ravelomanantsoa ,M. Farzaneh ,and W. A. Chisholm. Insulator Pollution Processes under Winter[J]. Conditions 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.

[8] 袁竹林,朱立平,耿 凡,等.气固两相流动与数值模拟[M].南京:东南大学出版社 2012.
YUAN Zhu-lin ,ZHU Li-ping ,GENG Fan ,et al. Gas-solid two phase flow and numerical simulation [M]. Nanjing: Southeast University Press 2012.

[9] 李恒真,王颖凯,刘 刚.电力外绝缘污秽颗粒等效模型和粒径分布探讨[J].电瓷避雷器 2013 1.
LI Heng-zhen ,WANG Ying-kai ,LIU Gang. Exploratory study of the equivalent model for foul particles in electric power external insulation and distribution of the particles diameters [J]. Electrical Porcelain Arresters 2013 1.

[10] 李令军,王 英,李金香,等.北京市冬春季大气颗粒物的粒径分布及消光作用[J].环境科学研究 2008 21(2):90-94.
LI Ling-jun ,WANG Ying ,LI Jin-xiang ,et al. Partical diameter distribution and extinction action of particulate matters in atmosphere in winters and springs in Beijing City [J]. Research of Environmental Sciences 2008 21(2):90-94.

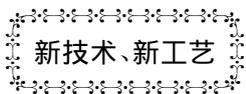
[11] 沈恒华,黄世鸿,李如祥. TSP 的来源与气象因素对 TSP 测试的影响[J].环境监测管理与技术,1996 8(4):15-24.
SHEN Heng-hua ,HUANG Shi-hong ,LI Ru-xiang. Effects of the TSP Sources and meteorological factors on the TSP testing [J]. Environmental Monitoring Management and Technology ,1996 ,8(4):15-24.

[12] 李恒真,赖江宇,雷 乾.污秽颗粒在绝缘表面的碰撞和吸附[J].高电压技术 2012 38(10):2596-2603.
LI Heng-zhen ,LAI Jiang-yu ,LEI Qian. Collision and Adsorption of the foul particles on the surface of insulators [J]. High Voltage Technology 2012 38(10):2596-2603.

[13] 陶 俊.重庆市大气总悬浮颗粒物污染特征及来源解析[D].重庆:重庆大学.2003.
TAO Jun. Atmospheric pollution characteristics and analysis of the source of the total suspended particulate matters in Chongqing City [D]. Chongqing: Chongqing University. 2003.

[14] 付宗敏.大气降尘和 TSP 的地质化学特点及来源分析[D].长沙:湖南大学.2003.
FU Zong-min. Geochemical features of the atmospheric dustfall and TSP and analysis of the sources [D]. Changsha: Hunan University. 2011.

(刘 瑶 编辑)



MGT6100/6200 燃气轮机的单位数 NO_x

据《Gas Turbine World》2014 ~ 2015 年年度手册刊报道,性能试验运行已经证实,对于从 100% 一直到 50% 部分负荷运行的单轴 MGT6100 燃气轮机和对于从 100% 一直到 70% 部分负荷运行的双轴 MGT6200 燃气轮机,NO_x 排放都小于 10 ppm(mg/kg)。

管形燃烧室根据预混技术原理工作,利用预混技术在进入燃烧室以前就可以使燃料和燃烧室空气均匀地预混。这有助于消除在燃烧后形成富燃料停留,后者将产生大量的 NO_x。

这二型燃气轮机具有先进的燃烧室设计,在其中,对于启动和很低的负荷下,燃烧器以扩散方式工作。然后在数字发动机控制下,随着增加功率的要求自动地转换成 DLE(干式低排放)预混方式。

(吉桂明 摘译)

gies will be the cement kiln co-disposal technology and the chain grate furnace disposal technology respectively of which the corresponding mass concentrations of dioxins will vary in a range from 1.05 to 4.68 ng/m³ and from 0.11 to 1.63 ng/m³ respectively and the total toxicity equivalent I-TEQ will fall in a range from 0.006 6 to 0.009 5 ng I-TEQ/m³ and from 0.010 to 0.060 ng I-TEQ/m³ respectively, all of which being better than the corresponding national standards for the emissions. **Key words:** incineration of municipal solid wastes, cement kiln co-disposal, dioxins, optimization

定功率条件下低压省煤器对机组热经济性的影响 = **Influence of a Low Pressure Economizer on the Thermal Cost-effectiveness of Its Unit at a Constant Power Output** [刊, 汉] / PANG Le (Huadian Electric Power Science Research Institute, Hangzhou, China, Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(9). - 100 ~ 103

Based on the heat rate convertible coefficient theory, a mathematical derivation was performed and a mathematical model for calculating the influence of a low pressure economizer on the thermal cost-effectiveness of its unit at a constant power output and applications of the low pressure economizer thermal cost-effectiveness theory and the heat rate convertible coefficient method in low pressure economizers were investigated. With the thermal system of a domestically-made 300 MW unit serving as an example, the quantities of energy saved were calculated respectively at the 75% and 100% load under the condition of the turbine heat acceptance (THA). It has been found that when operating at the 75% and 100% load under the condition of the turbine heat acceptance (THA), the heat rates of the low pressure economizer unit can decline by 39.88 kJ/(kW·h) and 33.95 kJ/(kW·h) respectively and the power supply coal consumption rate can decrease by 1.44 g/(kW·h) and 1.19 g/(kW·h) respectively. The magnitude of the influence of the heat quantity absorbed by the low pressure economizer on the heat quantity absorbed in the cyclic processes of the unit after having being input into the thermal system of the steam turbine was obtained, thus facilitating to optimize the connection with the pipelines at the water side of the low pressure economizer. **Key words:** constant power method, low pressure economizer, thermal cost-effectiveness of a unit, heat rate convertible coefficient

绝缘子表面积污规律的数值模拟研究 = **Study of the Numerical Simulation of the Law Governing the Foul Deposition on the Surface of an Insulator** [刊, 汉] / ZHANG Lin, YUAN Zhu-lin (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), GAO Song (Electric Power Science Academy, Jiangsu Provincial Electric Power Company, Nanjing, China, Post Code: 211103), WANG Yong-wei (College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing, China, Post Code: 210044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(9). - 104 ~ 112

To investigate the law governing the foul deposition on the surface insulators in transmission lines, with model XWP2-160 insulators serving as the object of study and by employing the CFD method, a numerical simulation was

performed of the movement and deposition of pollutant particles in the atmosphere around the insulators to analyze the influence of the wind speed, mass concentration and particle diameters on the foul deposition speed and areas on the surface of the insulators. It has been found that the simulation results are in relatively good agreement with the test ones and the mathematical model thus established can relatively good reflect the law governing the foul deposition on the surface of the insulators. The density of fouls deposited on the surface of the insulators will increase with an increase of the wind speed and such an increment speed will gradually increase. The foul density ratio of the top and bottom surface will gradually decrease with an increase of the wind speed and the foul density and mass concentration on the surface of the insulators will increase in a linear relationship. The particles in various particle diameters will assume their different laws in the foul deposition areas on the surface of the insulators. On the top surface of the insulators, the number of particles at a diameter ranging from 0 to 20 μm deposited on the surface of the insulators will be almost not influenced by the particle diameter while that at a diameter bigger than 20 μm deposited on the surface will increase with an increase of the particle diameter and such an increment speed will gradually increase. On the bottom surface of the insulators, the number of particles at a diameter ranging from 0 to 20 μm deposited on the surface of the insulators will decrease rapidly with the particle diameter but that at a diameter ranging from 20 to 50 μm will go up and that at a diameter falling in a range from 50 to 100 μm will decrease approaching to zero until the particle diameter reaches 100 μm . **Key words:** insulator in transmission lines, foul deposition law, computational fluid dynamics, numerical simulation

350 MW 超临界四角切圆锅炉冷态空气动力场试验及仿真研究 = **Experimental and Simulation Study of the Cold-state Aerodynamic Field in a 350 MW Supercritical Tangentially-fired Boiler** [刊, 汉] / LI Zhi, WANG Yi-song (Shenyang Engineering College, Shenyang, China, Post Code: 110136), SONG Zhen-yu (Liaoning Electric Power Science Research Institute, Shenyang, China, Post Code: 110006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(9). -113 ~ 118

In combination with the commissioning test of a 350 MW unit newly built in Huarun Electric Power Corporation Panjin thermal power plant, a simulation study was performed of the in-furnace aerodynamic characteristics of its boiler. By making use of the CFD software Fluent, with the parameters under the actual test conditions serving as the boundary conditions, a full spectrum of three-dimensional simulation of the internals inside the furnace was performed. The in-furnace speed field was obtained through calculation and the simulation and calculation results were contrasted and verified with the speed field actually measured in a section of the furnace. It has been found that the calculation results are basically in agreement with the values actually measured, therefore, the rationality of the simulation model and the simulation calculation method are verified. In the meantime, the calculation results show that the distribution of the primary air, secondary air and SOFA air in various sections is rational and the air flow intersection locations are good. In addition, the distribution of the turbulent flow intensity in the furnace relatively difficult to be actually measured can be obtained through the simulation calculation and the calculation results indicates that the distribution is rational, thus instrumental to the stable combustion inside the furnace and enhancing the com-