

绝缘子表面灰尘颗粒分布

陈 情, 王国志

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为研究绝缘子表面灰尘颗粒径分布状态,以 ZS(W)35KV/6-8 瓷棒形支柱绝缘子为研究对象,利用 DEM-CFD 耦合方法模拟绝缘子表面动态积污过程,使用离散元方法综合分析绝缘子在积污过程中各个表面灰尘颗粒的分布情况。结果表明:灰尘颗粒主要集中在绝缘子迎风面,背风面较少,颗粒主要分布在伞裙的上表面、伞棒、下表面凹陷区 3 个部位,同时绝缘子表面积污颗粒数随时间的延长而增加,积污速率基本保持不变;同尺寸的绝缘子,下表面有凸棱的积污颗粒更多,凸棱会增大绝缘子的表面积和流场扰动,容易积污。

关键词:瓷棒形支柱绝缘子;DEM-CFD 耦合方法;动态积污;颗粒分布

中图分类号:TM216

文献标志码:A

Distribution of dust particles on insulator surface

CHEN Qing, WANG Guozhi

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to study the particle size distribution of the dust particles on the insulator surface, the ZS(W)-35KV/6-8 insulator was used as the object of study. The DEM-CFD coupling method was used to simulate the dynamic fouling process of the insulator surface. The discrete element method was used to analyze the insulator distribution of dust particles on each surface of the process. The results show that the accumulation of insulator on the windward side is more serious than that of the leeward. The plot is mainly concentrated in the three parts of the surface and the umbrella transition area (umbrella rod) and the depression area of the lower surface of the umbrella skirt. The number of dirt particles sticking on insulator surface also increases with the extension of time, but the sticking rate remains unchanged basically. For different size of insulators, there is more dust particles sticking on insulator surface that has bead at lower surface, the bead can increase the surface area and increase the disturbance of the fluid, it is more available for deposition of the dust particles.

Keywords: solid core post insulator; DEM-CFD methods; dynamic contamination; particle distribution

绝缘子在电网设备中起了非常重要的作用,不仅可以使部件连接起来,而且还可以将需要保护的部件绝缘。在大多数情况下,绝缘子都是可以正常工作的,但是空气中有大量的灰尘颗粒,特别是在工业发达的沿海地区空气中的灰尘颗粒更多。空气中尺寸较大的颗粒会在重力的作用下积聚在绝缘子表面,尺寸较小的颗粒会悬浮在空气中并做无规则运

动。随着时间的推移,大量的灰尘颗粒堆积在绝缘子表面形成污秽层。在空气中湿度较高时,污秽尘中的可溶性会慢慢溶解,绝缘子表面就会形成电解质水膜,这时绝缘子表面就会产生泄露电流,这样就改变了绝缘子的绝缘特性。当绝缘子周围的电场强度增大时,绝缘子表面就会产生局部放电现象,随着污秽层的增加,局部放电就会扩展,直至发生闪络现

收稿日期:2018-10-11,修回日期:2018-10-28。

第一作者简介:陈情(1992—),男,硕士研究生,研究方向为高电压技术、铁路变电站积污及点带清洗等。E-mail:1962300176@qq.com。

通信作者简介:王国志(1968—),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为机械电子工程、驱动技术与智能控制、铁路变电站积污及点带清洗等。E-mail:gzhwang@home.swjtu.edu.cn。

象。绝缘子污闪是电力系统安全运行的主要威胁^[1],因此,就需要对污闪发生的第一个阶段中污层的形成过程进行研究,了解颗粒在空气中的运动过程以及和绝缘子的碰撞粘附过程,为以后绝缘子的抗污设计和绝缘子的清洗提供参考。

在绝缘子的积污方面,许多学者都做出了研究^[2-8],但是没有对颗粒与绝缘子的碰撞粘附过程进行研究,没有进行这方面的数值模拟仿真。本文中的研究对象为表面有、无凸棱2种支柱型绝缘子,使用流体动力学和颗粒离散元耦合的方法可视化地研究颗粒在绝缘子表面的积污过程,同时文中结合了颗粒和绝缘子接触时表面能的影响,能够更加准确地描述颗粒与绝缘子的接触粘附过程,从而更好地研究颗粒在绝缘子表面动态沉积特性。

1 计算方法的确定

目前绝缘子的积污方面的研究主要通过风洞试验的 CFD 方法来进行。在实验研究方面,学者通过结合风洞实验和自然积污的方法进行积污实验^[9-12],但是风洞试验中如何替代非常小的颗粒存在较大难度,而且在积污的过程中存在时间长,条件不易达到等缺点;CFD 方法^[13]只能模拟颗粒在流场中的运动,并不能有效地反映颗粒与绝缘子表面的接触粘附特性。为了更好地研究绝缘子的积污特性,本文中使用了 CFD 和 DEM 耦合的方法模拟绝缘子的积污过程。根据 Hertz 理论和 Mindlin-Deresiewicz 理论,建立如图 1 所示的颗粒和绝缘子接触模型。

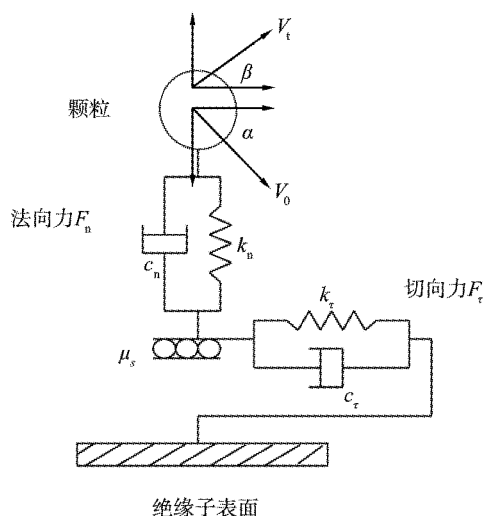


图1 颗粒与绝缘子表面接触物理模型

Fig.1 Surface contact physical model of particles and insulator

2 几何模型和仿真设置

2.1 绝缘子几何模型

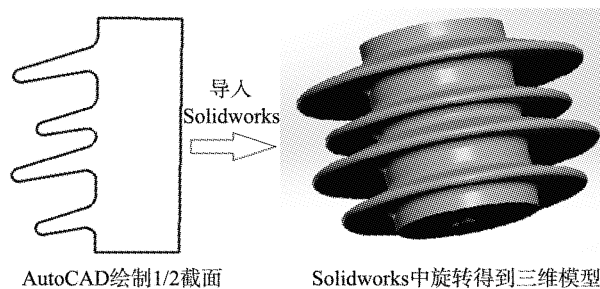
本文中的研究对象是大、小伞裙相间分布的绝缘子,其参数见表1。

表1 绝缘子参数

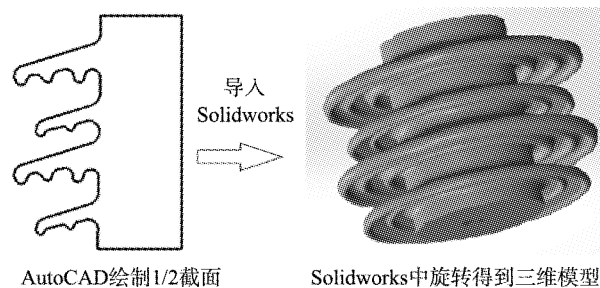
Tab.1 Insulator parameters

型号	电压等级/kV	总体高度 H/mm	最大伞径 D/mm	爬电距离 L/mm
ZS-35 kV/8	35	420	165	625
ZSW-35 kV/8	35	420	165	875

由于大、小伞裙的流场会受到其上、下伞裙的影响,因此,在综合考虑运算速度,同时又不影响到单片大、小伞裙周围流场的情况下,创建如图2所示的绝缘子模型。



a 无凸棱



b 有凸棱

图2 绝缘子模型创建

Fig.2 Model creation of insulator

2.2 计算域及网格划分

基于本文的 DEM-CFD 耦合仿真的方法,需要分别在 FLUENT 和 EDEM 软件中设置仿真区域。为了确保绝缘子附近流场的准确性,同时减小计算时间,将 FLUENT 中的流场范围设置为绝缘子直径的5倍,计算域设为 $800\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 410\text{ mm}$ 。为了不影响颗粒在绝缘子表面的粘附过程,同时考

虑运算时间,将耦合区域设置在流场域之内,其范围为 $550\text{ mm} \times 410\text{ mm} \times 255\text{ mm}$ 。仿真计算域如图3所示。

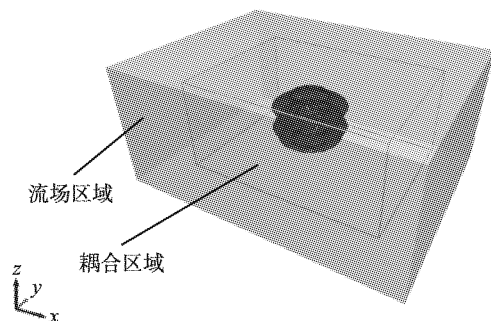


图3 仿真计算域

Fig. 3 Simulation calculation domain

由于绝缘子几何模型曲面复杂,绝缘子附近颗粒的流场和颗粒运动受到的影响更大,因此,为了提高计算精度,在仿真时采用非结构网格,同时细化绝缘子附近的网格,如图4所示。

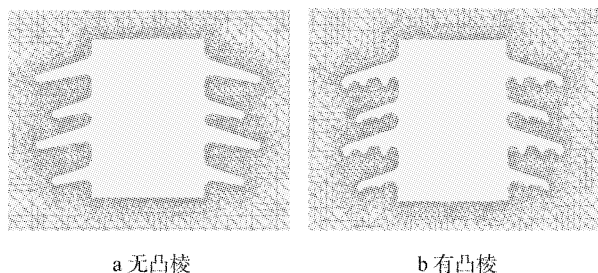


图4 绝缘子网格

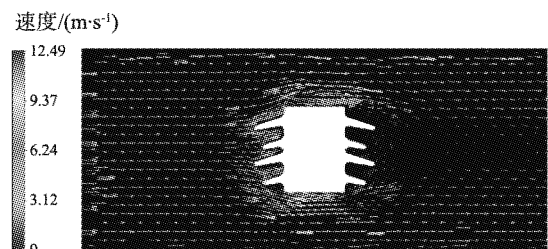
Fig. 4 Insulator grid

3 计算结果及分析

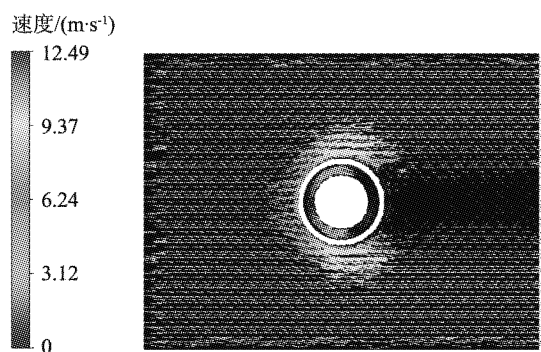
3.1 空气流场速度特性分析

绝缘子表面附近的流场可以通过绝缘子表面速度矢量图表示,见图5,分别给出了绝缘子表面、小伞裙平面和大伞裙平面3个位置速度矢量图。由图5a可以看出,流体经过绝缘子时会发生分流现象,伞裙上表面流体速度增大,下表面流体速度减小。而在绝缘子背风面流体出现短暂真空现象,随着气流重新汇聚,会产生明显涡流现象,背风面的气流压力明显减小,流体速度较迎风面的小。由图5b—c可以看出,小伞裙平面的流体速度比大伞裙平面的流体速度小,这是因为当流体经过大伞裙表面时产生分流,其中的一条流体在经过小伞裙时又会发生分流现象,从而小伞裙平面的流体速度就会比大伞裙的小。对于空气中同样的灰尘颗粒来说,是否能

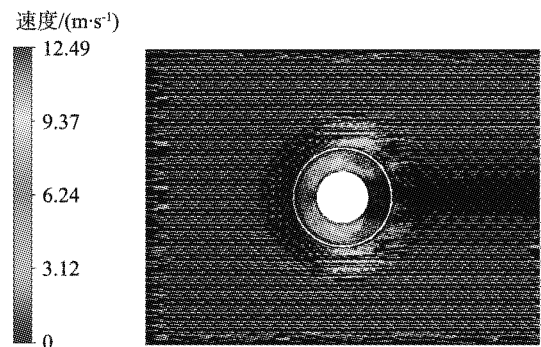
够在绝缘子表面沉积主要取决于流体曳力的大小,流体曳力较小的位置更容易积污,因此我们可以得到在绝缘子的下表面、大小伞裙连接处和绝缘子背风面更容易发生积污。



a 绝缘子



b 小伞裙



c 大伞裙

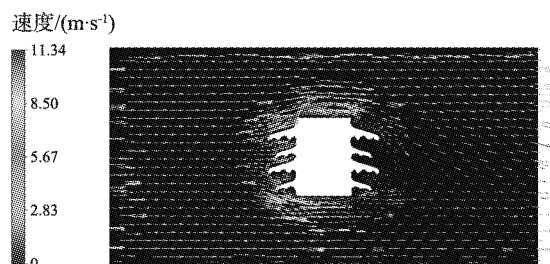
图5 无凸棱绝缘子平面速度矢量图

Fig. 5 Plane velocity vector diagram of insulator without bead

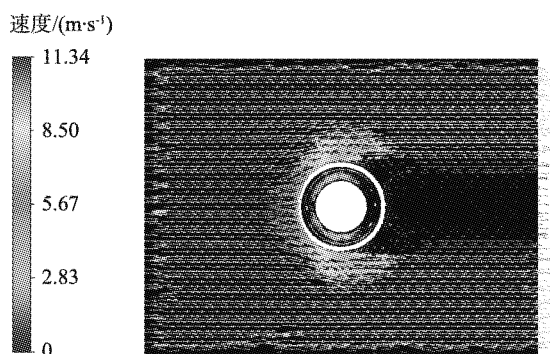
图6为有凸棱绝缘子速度平面矢量图。由图可以看出,下表面有凸棱的绝缘子在绝缘子背风面产生的涡流现象更加严重,颗粒更容易沉积。

3.2 风速和粒径对积污特性的影响

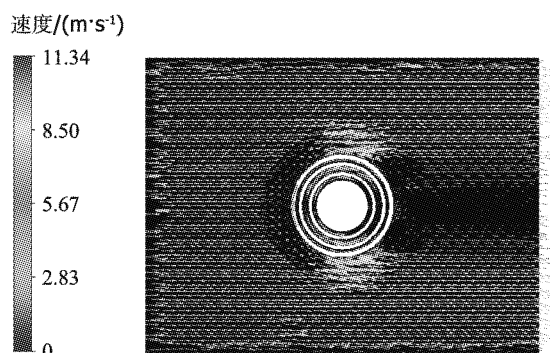
风速的大小很大程度上决定了颗粒在绝缘子表面的粘附状态。图7为绝缘子表面粘附颗粒数随时间变化图。从图中可以看出,在一定时间范围内,绝



a 绝缘子



b 小伞裙



c 大伞裙

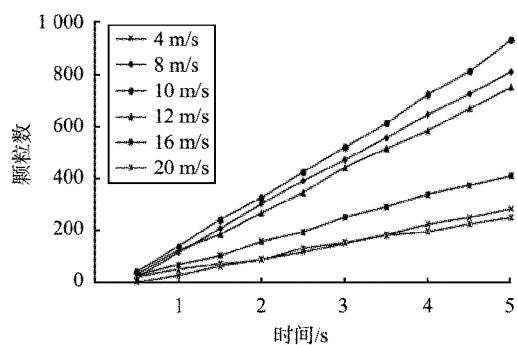
图6 有凸棱绝缘子平面速度矢量图

Fig.6 Plane Velocity vector diagram of insulator with bead

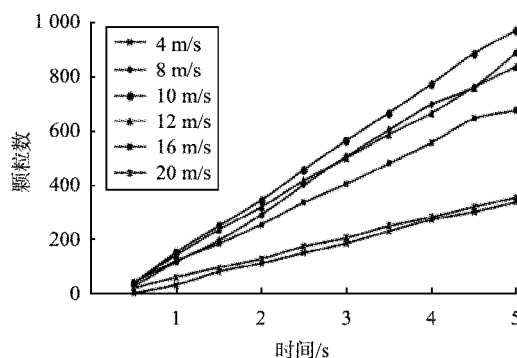
缘子表面粘附颗粒随着时间的增加逐渐增多。

图8为颗粒在绝缘子表面粘附速率随风速变化图。从图中可以看出,随着水平风速的增加,颗粒在绝缘子表面粘附速率先逐渐增大,风速达到一定值后,粘附速率开始减小。

图9为不同粒径的颗粒在2种绝缘子下积污速率。当颗粒粒径小于 $40\text{ }\mu\text{m}$ 时,下表面有凸棱的绝缘子的积污速率大于下表面无凸棱的绝缘子,这是因为此时颗粒的重力较小,积污速率主要取决于流体曳力的大小,下表面有凸棱的绝缘子在下表面会



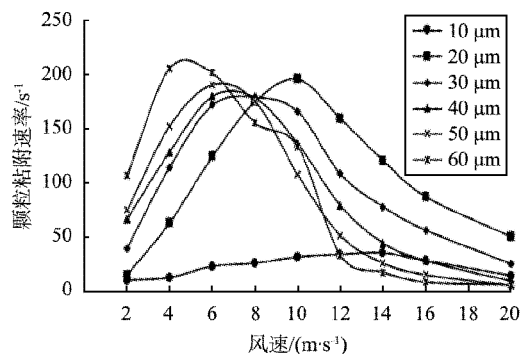
a 无凸棱绝缘子



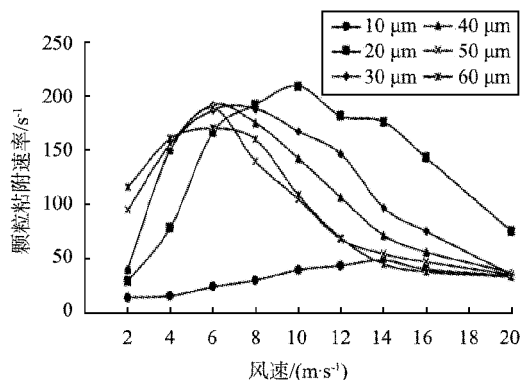
b 有凸棱绝缘子

图7 绝缘子表面粘附颗粒数

Fig.7 Number of sticking particles on insulator surface



a 无凸棱绝缘子



b 有凸棱绝缘子

图8 颗粒在绝缘子表面黏附速率

Fig.8 Particle sticking rate on insulator surface

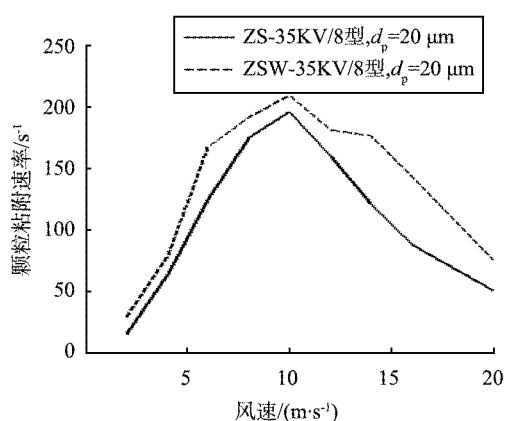
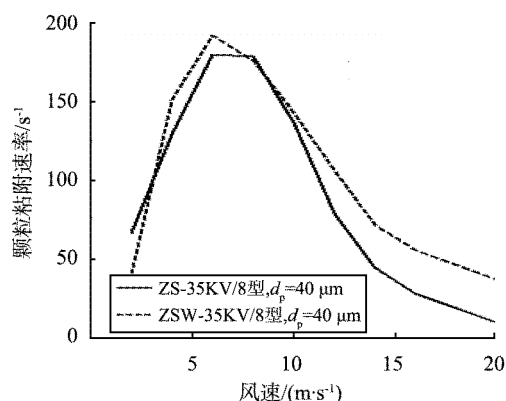
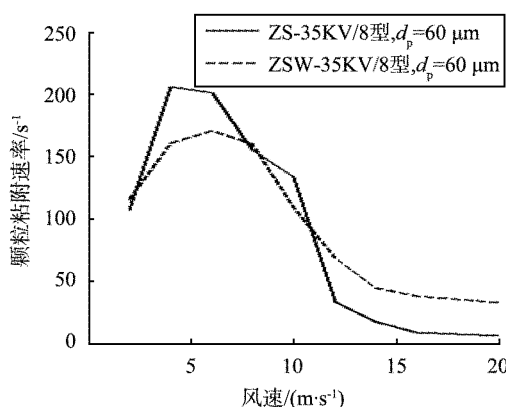
a 粒径 20 μm 的颗粒b 粒径 40 μm 的颗粒c 粒径 60 μm 的颗粒

图9 不同粒径时绝缘子表面积污速率变化

Fig. 9 Rate change of sizes of particles sticking on insulator surface

产生严重的涡流,更加有利于积污。当颗粒粒径为 $60\ \mu\text{m}$ 时,风速较小的情况下,重力起主要作用,颗粒在绝缘子表面的运动轨迹发生了变化,颗粒并没有直接随流场沉积到绝缘子表面上,而是在重力和流体曳力的综合作用下发生沉积,此时下表面无凸

棱的绝缘子积污速率较快;风速较大时,颗粒受到流体曳力的影响增大,此时由于下表面有凸棱的绝缘子下表面积较大,积污速率也较快,因此当颗粒粒径大于 $60\ \mu\text{m}$ 时,流体速度小于 $12\ \text{m/s}$ 时,下表面有凸棱的绝缘子积污速率较慢,流体速度大于 $12\ \text{m/s}$ 时,下表面有凸棱的绝缘子积污速率较快。

通过分析不同粒径颗粒的积污速率,可以知道最适合绝缘子的积污风速,如图 10 所示,绝缘子的最适积污风速与颗粒的粒径大小呈反比例关系。

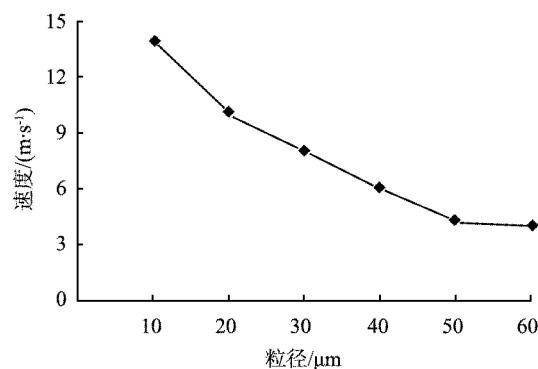


图 10 最适积污风速与粒径的关系

Fig. 10 Relationship between particle size and most suitable wind speed for sticking

结合图 8 可知,下表面有凸棱的绝缘子在最适合积污的速度范围内速度波动比较小,这也可以说明下表面有凸棱的绝缘子更适合积污。同时这也在一定程度上表明下表面有凸棱的绝缘子会扰动绝缘子附近的流场分布,会影响颗粒在绝缘子表面的黏附状态,使得更多颗粒粘附在绝缘子的下表面。

图 11 为粘附在绝缘子表面不同粒径颗粒所占比例。当风度较小时,污秽颗粒占比随着颗粒粒径的增加逐渐增大;当风速达到 $8\ \text{m/s}$ 左右时, $20\ \mu\text{m}$ 以上污秽颗粒为主要成分;在风速较大时,可以看到粒径较大颗粒所占比例明显下降,而粒径小的颗粒开始增多,粒径为 $20\ \mu\text{m}$ 左右的颗粒所占的比例最大;这是因为当风速较小时,粒径很小的颗粒受流体作用明显,易随流体绕流离开绝缘子,而粒径较大的颗粒主要受颗粒与绝缘子的碰撞作用力离开绝缘子;在风速很小的天气状况下,粘附在绝缘子表面的灰尘颗粒的粒径大都在 $50\ \mu\text{m}$ 之下。

4 结论

1) 粒径较小的颗粒受流体曳力影响严重,主要沉积在伞裙下表面;粒径较大的颗粒受重力影响较大,沉降在伞裙上表面。

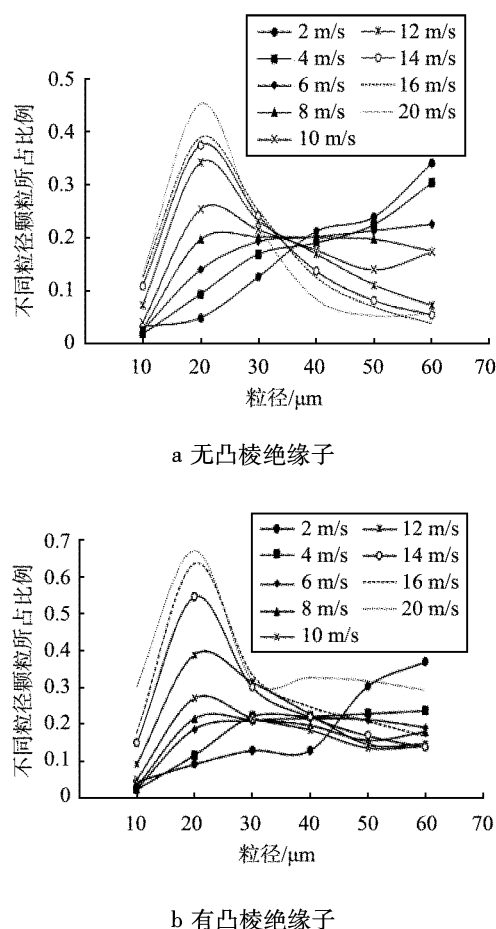


图 11 不同绝缘子表面颗粒粒径分布

Fig. 11 Different particle size distribution of insulator without bead

2) 灰尘颗粒主要集中在伞裙迎风面的伞裙上表面和伞棒区域以及带凸棱绝缘子伞裙下表面凹陷区域。

3) 适合下表面有凸棱的绝缘子积污的风速范围较下表面无凸棱绝缘子大,下表面有凸棱绝缘子比无凸棱绝缘子更容易积污。

4) 在风速很小的天气状况下,粘附在绝缘子表面的灰尘颗粒的粒径大都在 $50\ \mu\text{m}$ 以下。

参考文献 (References):

- [1] FARZANEH M. 覆冰与污秽绝缘子[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 马振良. 不带电绝缘子和带电绝缘子积污程度的对比实验[J]. 高电压技术,1993(4):33-35.
- [3] 张开贤. 悬式绝缘子串自然积污规律的探讨[J]. 电网技术,1997(3):39-43.

- [4] RAVELOMANANTSOA N, FARZANEH M, CHISHOLM W A. Insulator pollution processes under winter conditions[C]//Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005 Annual Report Conference, 2005:321-324.
- [5] ZHOU W, LIU M, LIU S, et al. On the mechanism of insulator cleaning using dry ice[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(19):1715-1722.
- [6] PIETERSEN D, HOLTZHAUSEN J P, VOSLOO W L. An investigation into the methodology to develop an insulator pollution severity application map for South Africa[C]//AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa. IEEE, 2004:697-703.
- [7] CHAOU K A, MEKHALDI A, TEGUAR M. Classification of pollution severity on insulator model using recurrence quantification analysis[C]//2014 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition (T&D), 2014:1-5.
- [8] CHUN S, PARK C. Analysis of contaminants adhered on polymeric insulator used in coastal and industrial areas[C]//Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 2008, Annual Report Conference, 2008:1-4.
- [9] GUBANSKI S M, WANKOWICZ J G. Distribution of natural pollution surface layers on silicone rubber insulators and their UV absorption[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(4):689-697.
- [10] TOPALIS F V, GONOS I F, STATHOPOULOS I A. Dielectric behavior of polluted porcelain insulators[J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2001, 148(4):269-274.
- [11] 宋云海. 基于表面电导的绝缘子积污在线监测系统[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [12] 刘琴. 线路绝缘子自然积污差异性分析[C]//中国电机工程学会年会,2012.
- [13] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [14] 刘凯,朱天容,刘庭,等. 绝缘子污秽成分分析与清洗剂去污机理研究[J]. 高电压技术,2012,38(4):892-898.
- [15] 屠幼萍,孙佑飞,彭庆军,等. 雾霾环境下自然积污绝缘子的污秽颗粒粒径分布特性[J]. 高电压技术,2014,40(11):3318-3326.
- [16] 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [17] 蒋兴良,李海波. 计算流体力学在绝缘子积污特性分析中的应用[J]. 高电压技术,2010,36(2):329-334.
- [18] 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):413-419.
- [19] 孙继星,徐跃,胡学永,等. 高速气流环境中电气化铁路绝缘子表面积污分布特性[J]. 高电压技术,2014,40(1):95-102.
- [20] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2010.