

干冰清洗对复合绝缘子用硅橡胶憎水性的影响研究

陈俊卫, 牧 灏, 胡 全, 蒋 震

(贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘 要:为了研究干冰清洗对复合绝缘子表面憎水性的影响,本试验选用高温硫化硅橡胶作为试样模拟复合绝缘子,对硅橡胶进行不同污秽程度的人工涂污,在不同参数下进行干冰清洗实验,详细研究了空气压力、清洗角度、干冰质量流量对复合绝缘子用硅橡胶表面憎水性的影响。结果表明,不同的空气压力和质量流量的干冰具有不同的动能,随着空气压力和质量流量的增大,硅橡胶表面污秽清洗效果变好,憎水性提高;但当干冰动能达到一定程度时,硅橡胶表面清洗效果达到阈值。不同的清洗角度影响干冰颗粒的垂直打击分量从而影响干冰的清洗效果。在合理的空气压力、清洗角度和质量流量下,干冰清洗能够有效的去除硅橡胶表面污秽,提高硅橡胶表面的憎水性,同时保证不对硅橡胶造成损伤。

关键词:干冰清洗;憎水性;空气压力;清洗角度;质量流量

文章编号:2096-4633(2019)09-0086-07 **中图分类号:**TM85 **文献标志码:**B

相较于传统的玻璃、电瓷绝缘子,复合绝缘子具有强度高、质量小、无零值、防污性能好等优点,被广泛用于电力系统输电线路中。近年来随着我国工业的不断发展,工业污染问题日益严重,导致输电线路污闪事故频发,复合绝缘子代替传统玻璃、电瓷绝缘子成为防止污闪事故的关键技术之一,得到迅速的发展和应用^[1-6]。

复合绝缘子优异的耐污闪性能主要得益于硅橡胶材料的良好憎水性和憎水迁移特性,能够极大的增加耐湿污闪性能,保证绝缘子的长时间安全运行^[7]。但是随着运行时间的增加,在绝缘子表面积累的污秽不断增多,当污秽积累到一定程度时可能影响绝缘子的憎水性。因此有必要定期对运行中的复合绝缘子表面进行污秽清洗,以提高绝缘子的安全性和使用寿命^[8-9]。

目前,在绝缘子清洗方面,主要分为物理清洗和化学清洗两大类。物理清洗常用水清洗和机械清扫,一定程度上可以降低绝缘子表面的污秽程度。但是水清洗要求的条件较高,不能进行带电操作,而且水对无机盐和油垢的清洗效果不是非常明显。机械清扫虽然是工业上采用的技术,而由于机械手占用空间较大,针对形状各异的绝缘子,清扫时容易产生无法清扫的死角,影响清扫效果。

另外,化学清洗则是通过喷枪将化学清洗剂喷

到绝缘子表面,在表面张力、溶解力等多种作用效果下,污垢被浸润、分解、剥离。虽然化学清洗的效果比较理想,但是由于化学清洗剂的使用,容易造成环境的污染。为此提出新的绝缘子清洗方法具有重要的意义^[10-11]。

干冰清洗是一种先进高效的绿色环保工业清洗技术,在 20 世纪 80 年代末开始应用于美国国内工业领域,经过多年的发展,技术逐渐成熟而被广泛应用于欧美航空业、制造业、核电工业等领域^[12]。目前,我国对干冰清洗绝缘子污秽技术研究尚处于起步阶段,相比其他的清洗方法,干冰清洗技术具有以下特点:①干冰清洗能够除污的种类多、效果好,清洗过程中没有产生任何污染;②干冰颗粒不具有磨损性,不会对机械设备、零件、绝缘子产生损伤,可以延长设备使用寿命;③清洗介质为干冰颗粒,具有很好的绝缘性,不会造成被清洗设备的污闪事故,不会对清洗物体造成损伤,非常适合用于绝缘子污秽清洗^[13-18]。为此针对复合绝缘子的表面污染问题,研究干冰清洗对复合绝缘子表面的影响,尤其是对复合绝缘子表面憎水性的影响具有重要的应用价值。

1 试验条件和试验方法

本文采用高温硫化硅橡胶 (HTV) 作为复合绝缘子的模拟试样,通过对高温硫化硅橡胶进行不

同参数的干冰清洗实验和测试不同状态下试样的动态、静态接触角,参照标准 GB/T24622 - 2009,研究干冰清洗的空气压力、清洗角度和质量流量参数对复合绝缘子用硅橡胶表面憎水性的影响,以期获得干冰清洗更佳的清洗工艺,满足清洗需求。

1.1 试验条件



(a) 空气压缩机



(b) 升降旋转支架和干冰喷头



(c) 干冰清洗机

图 1 干冰清洗平台

Fig.1 Dry ice cleaning platform

如图 1 所示,本研究试验平台由干冰清洗机、空气压缩系统、升降旋转试验支架组成。由空气压缩系统提供目标压力,干冰清洗机控制干冰质量流量、升降旋转试验支架控制清洗角度、距离和

喷头转速。采用的接触角测量设备型号为 Dataphysics-OCA25,试验环境温度 23℃,相对湿度 RH = 46%,使用溶液为去离子水。

1.2 试验方法

试验中选用 HTV 试样按照国家标准 GB/T 4585 - 2004《交流系统用高压绝缘子的人工涂污试验》进行人工涂污,模拟不同程度的污秽程度。采用高岭土和商业纯氯化钠模拟自然污染对绝缘子表面进行定量刷涂,并选择加入一定量的糊精增加污秽的粘结力。试样分为无水乙醇去污,再用去离子水清洗后的原始样品 S0,涂污等级为 e 级污秽等级的样品 S1,样品具体参数如表 1 所示。

表 1 试样具体参数

Tab.1 Parameters of experiments

样 品	S0	S1
等值盐/(mg/cm ⁻²)	-	0.2
灰密/(mg/cm ⁻²)	-	2
污染等级	-	e
前接触角/°	136.9	78.9
后接触角/°	91.5	6.9
静态接触角/°	127.5	56.5
湿润性等级/WC	WC1	WC4

在干冰清洗试验中,保持清洗距离、排气体积和喷头转速固定,分别设置不同的空气压力、清洗角度和干冰质量流量进行干冰清洗 HTV 试样,研究空气压力、清洗角度和干冰质量流量三个主要参数对试样表面接触角的影响,以表征样品表面憎水性的变化。具体的清洗参数如表 2 所示。

表 2 干冰清洗工艺参数

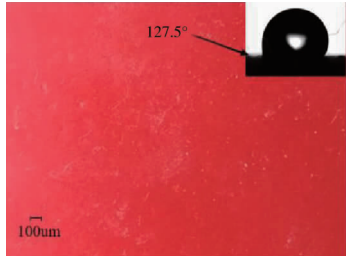
Tab.2 Technical parameters of dry ice cleaning

参 数	数 值
清洗角度/°	60, 70, 75, 80, 85, 90
清洗距离/cm	15
空气压力/MPa	0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8
排气体积/(m ³ /min)	4.5
喷头转速/(r/min)	15
干冰流量/(kg/min)	1, 1.5, 2, 2.5, 3

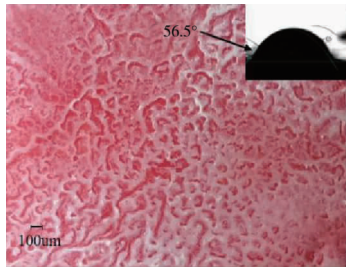
2 实验结果与分析

不同参数的干冰清洗对 HTV 试样表面的污秽

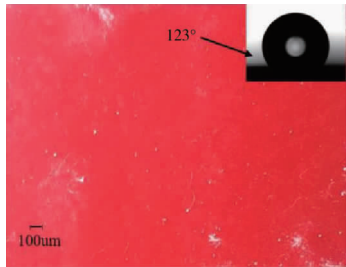
残留度有不同的影响,从而影响样品表面的憎水性。图 2 为涂污与清洗前后样品的宏观形貌图,从图中可知,干冰清洗能够明显的清洗掉样品表面的污秽,改变表面形貌和污秽残留度。值得注意的是,对于清洗后的 HTV 试样表面没有出现明显的损伤,样品表面憎水性保持良好。



(a) 原始样品 S0



(b) 涂污的样品 S1



(c) 样品 S1 在空气压力 0.7 MPa,清洗角度 75°,质量流量 2 kg/min 清洗后

图 2 样品宏观形貌和静态接触角

Fig. 2 Images and static contact angle of samples

2.1 空气压力对 HTV 试样憎水性的影响

干冰颗粒高速运动到绝缘子表面发生撞击,干冰瞬间升华,吸收大量热量,实现动能和热能之间的转换,空气压力决定了干冰颗粒的喷出速度,干冰颗粒的不同喷出速度对试样表面污秽清洗程度不一样,导致憎水性不同。试验选用 0.3 MPa到 0.8 MPa 内不同的压力对 HTV 试样进行清洗,干冰质量流量为 2 kg/min,清洗角度 60°,其他参数如表 2 所示。试验研究了不同的空气压力对试样表面憎水性的影响,图 3 为不同空气压力清洗条件下样品 S1 的静态接触角,图 4

为静态接触角典型样图。

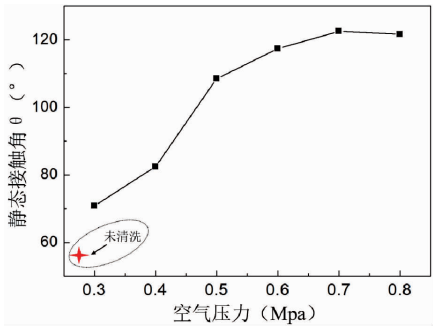
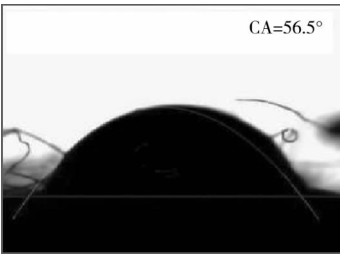
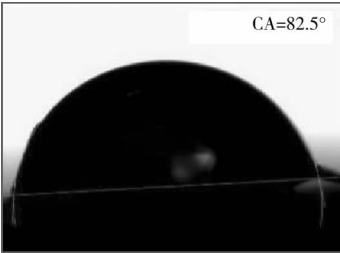


图 3 不同空气压力清洗样品 S1 的静态接触角

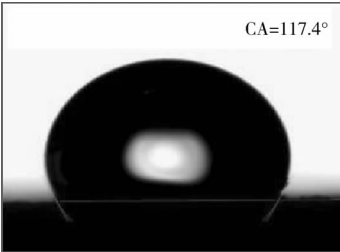
Fig. 3 Static contact angle of sample S1 cleaned under different air pressure



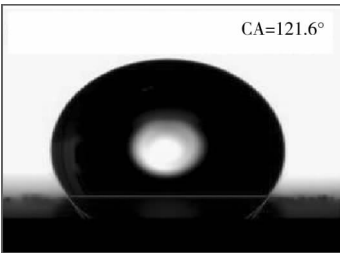
(a) 未清洗



(b) 0.4 MPa 清洗



(c) 0.6 MPa 清洗



(d) 0.8 MPa 清洗

图 4 样品 S1 的静态接触角典型样图

Fig. 4 Static contact angle typical sample diagram of sample S1

由图 3 和图 4 可知,随着空气压力的不断增大,涂污的 HTV 样品清洗后表面的静态接触角不断增大,说明样品的污秽清洗程度更高,憎水性变好,但是当压力达到 0.7 MPa 后,干冰颗粒获得了足够的动能,此时继续增大空气压力,污秽的残留度也不会明显降低,样品表面静态接触角基本不变,此时空气压力变化对憎水性基本没有影响。清洗后表面静态接触角和 SO 原始静态接触角差别不大,说明干冰清洗能够有效的去除表面污秽,同时不对表面造成明显的损伤。

2.2 清洗角度对 HTV 试样憎水性的影响

干冰清洗角度的大小影响干冰颗粒和污垢层撞击过程能量转移的效率、作用面积,从而影响干冰的垂直打击分量,最终影响干冰和污垢层的相互作用,使得干冰的清洗效率不同。试验选用 60°到 90°内不同的清洗角度对 HTV 试样进行清洗,空气压力为 0.7 MPa,质量流量为 2 kg/min,其他参数如表 2 所示。试验研究了不同的干冰清洗角度对试样表面憎水性的影响,由图 5 和图 6 可知,随着干冰清洗角度从 60°到 90°的不断增大,涂污的 HTV 样品清洗后表面静态接触角先增大后减小,清洗效果在 75°时最佳。当清洗角度较小时,干冰颗粒的垂直打击分量较小,清洗效果不理想;当清洗角度超过 75°时,喷出的干冰颗粒较为集中,清洗面积较小,使得清洗效果不明显。

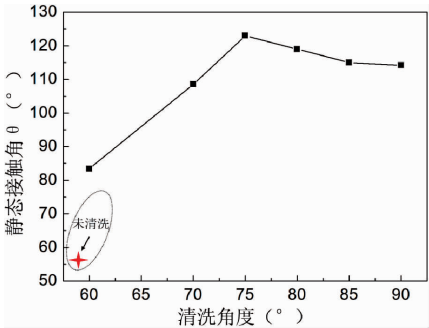
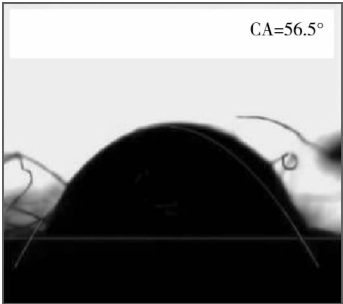
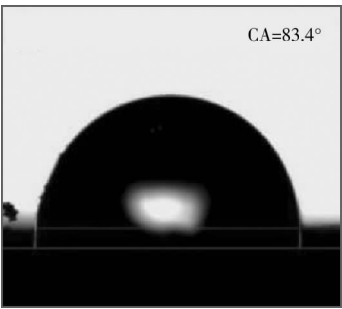


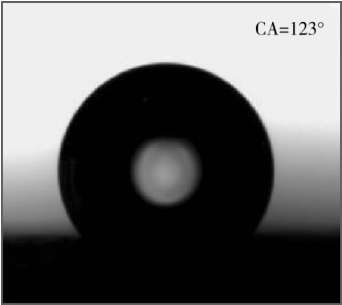
图 5 不同清洗角度清洗样品 S1 的静态接触角
Fig. 5 Static contact angle of sample s1 cleaned at different cleaning angles



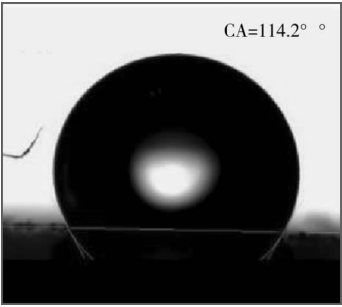
(a) 未清洗



(b) 60°清洗



(c) 75°清洗



(d) 90°清洗

图 6 样品 S1 的静态接触角典型样图
Fig. 6 Static contact angle typical sample diagram of sample S1

2.3 干冰质量流量对 HTV 试样憎水性的影响

干冰质量流量直接决定了和被清洗表面的碰撞数量,从而影响样品清洗效果。试验选用 1.0 kg/min到 3.0 kg/min 内不同的质量流量对 HTV 试样进行清洗,空气压力为 0.7 MPa,清洗角度 75°,其他参数如表 2 所示。试验研究了不同的干冰质量流量对试样表面憎水性的影响,由图 7 和图 8 可知,随着干冰质量流量的增大,涂污的 HTV 样品清洗后的表面接触角不断增大,说明样品表面污秽残留度逐渐降低,清洗效果变好,憎水性逐渐恢复。但是当干冰质量流量达到 2.0 kg/min时,干冰颗粒获得了足够的打击力,此时再增大流量,污秽的残留度也不会明显降低,样品表面接触角基本保持不变。

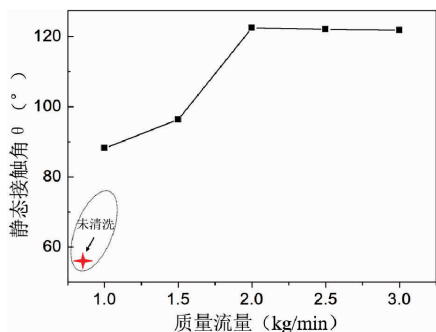
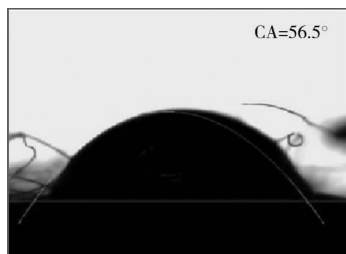
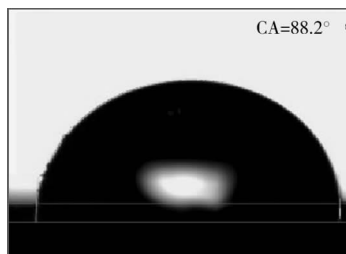


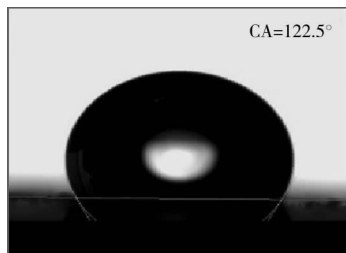
图 7 不同质量流量清洗样品 S1 的静态接触角
Fig. 7 Static contact angle of sample S1 cleaned with different mass flow



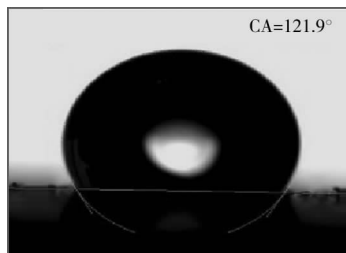
(a) 未清洗



(b) 1 kg/min 清洗



(c) 2 kg/min 清洗



(d) 3 kg/min 清洗

图 8 样品 S1 的静态接触角典型样图
Fig. 8 Static contact angle typical sample diagram of sample S1

3 结论

本试验通过不同参数干冰清洗复合绝缘子用硅橡胶试样,模拟干冰清洗复合绝缘子表面污秽。研究干冰清洗对硅橡胶试样表面接触角的影响,从而判断干冰清洗对硅橡胶憎水性的影响,得出以下结论:

(1)当空气压力为 0.3 MPa 至 0.7 MPa,随着空气压力的增大,硅橡胶表面污秽清洗程度加深,憎水性逐渐变好;当空气压力继续增大,此时干冰颗粒获得足够的动能,硅橡胶表面污秽清洗程度几乎不变,憎水性也保持不变。

(2)当清洗角度为 60°至 75°时,随着清洗角度的增大,硅橡胶表面污秽清洗效果变好,憎水性提高;当清洗角度继续增大时,干冰颗粒作用空间变小,从而影响干冰清洗效果,硅橡胶表面憎水性恢复效果不理想。

(3)当干冰质量流量为 1.0 kg/min 至 2.0 kg/min,随着质量流量的增大,硅橡胶表面污秽残留度逐渐降低,憎水性逐渐恢复;当质量流量继续增大,干冰颗粒已经获得足够的打击力,所以硅橡胶表面污秽残留度也不会明显降低,憎水性保持不变。

(4)在干冰清洗过程中,空气压力、清洗角度、质量流量的大小会明显影响硅橡胶表面的污秽清洗程度,从而影响憎水性,合适的清洗参数能够的去硅橡胶表面污秽,提高表面憎水性。同时当空气压力为 0.3 MPa 至 0.8 MPa,清洗角度为 60°至 90°时,干冰质量流量为 1.0 kg/min 至 3.0 kg/min 时,对复合绝缘子用硅橡胶进行干冰清洗,硅橡胶表面不受损伤,表面结构保持完整。

参考文献:

- [1] 关志成,彭功茂,王黎明,等. 复合绝缘子的应用及关键技术研究[J]. 高电压技术,2011,37(03):513-519.
GUAN Zhicheng, PENG Gongmao, WANG Liming, et al. Application and key technical study of composite insulators [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(03): 513-519.
- [2] 李恒真,刘刚,李立涅. 绝缘子表面自然污秽成分分析及其研究展望[J]. 中国电机工程学报,2011,31(16):128-137.
LI Hengzhen, LIU Gang, LI Licheng. Study status and prospect of natural contamination component on insulator surface [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 128-137.
- [3] 赵锋,张福增,杨皓麟,等. 复合绝缘子憎水性及直流污闪特

- 性的影响因素[J]. 中国电机工程学报,2009,29(01):107-112.
- ZHAO Feng, ZHANG Fuzeng, YANG Haolin, et al. Influence factors of hydrophobicity and DC flashover performance for composite insulators[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(01):107-112.
- [4] 黄军凯,杨涛,许逵,等. 振动冲击电压下 SF₆ 气体中绝缘子气隙局部放电特性研究[J]. 电力大数据,2018,21(04):37-44.
- HUANG Junkai, YANG Tao, KUI Xu, et al. Characteristics of partial discharges for insulator air gap under oscillating impulse voltages in SF₆ gas[J]. Power Systems and Big Data,2018,21(04):37-44.
- [5] 李伟,马佳,王世蓉,等. 精细化气象要素下输电线路覆冰预测预警研究[J]. 电力大数据,2018,21(02):1-7.
- LI Wei, MA Jia, WANG Shirong, et al. Research on prediction and warning of overhead line icing under refined meteorological elements[J]. Power Systems and Big Data,2018,21(02):1-7.
- [6] 杨滴,刘燕,王世蓉,等. 输电线路覆冰监测的 OPGW 传感应用研究[J]. 电力大数据,2018,21(04):7-11.
- YANG Di, LIU Yan, WANG Shirong, et al. Research on icing monitoring of OPGW transmission line[J]. Power Systems and Big Data,2018,21(04):7-11.
- [7] 张福增,宋磊,屠幼萍,等. 500 kV 复合绝缘子运行特性分析[J]. 高电压技术,2012,38(10):2536-2541.
- ZHANG Fuzeng, SONG Lei, TU Youping, et al. Analysis of operating performance for the 500 kV composite insulator[J]. High Voltage Engineering,2012,38(10):2536-2541.
- [8] 徐志钮,律方成,张翰韬,等. 影响硅橡胶静态接触角测量结果的相关因素分析[J]. 高电压技术,2012,38(01):147-156.
- XU Zhiniu, LV Fangcheng, ZHANG Haotao, et al. Influencing factors of silicone rubber static contact angle measurement[J]. High Voltage Engineering,2012,38(01):147-156.
- [9] 曹宏伟,张炜婕,郭洛伽,等. 退役复合绝缘子污秽成分分析及清洗工艺研究[J]. 应用化工,2017,46(12):2403-2407.
- CAO Hongwei, ZHANG Weijie, GUO Mingjia, et al. The composition analysis and cleaning process research for contamination on retired composite insulator surface[J]. Applied Chemical Industry,2017,46(12):2403-2407.
- [10] 张晋,汲胜昌,曹涛,等. 电力设备带电清扫技术的现状及展望[J]. 绝缘材料,2009,42(02):63-66.
- ZHANG Jin, JI Shengchang, CAO Tao, et al. Present and prospect of power equipment's electriferous cleaning technique[J]. Insulating Materials,2009,42(02):63-66.
- [11] 王志龙,张晋,李荣立,等. 电气设备带电水蒸汽清洗技术[J]. 绝缘材料,2009,42(03):69-72.
- WANG Zhilong, ZHANG Jin, LI Rongli, et al. Technique of cleaning by water vapor for live power equipment[J]. Insulating Materials,2009,42(03):69-72.
- [12] 刘溟,王家礼,马心良,等. 干冰清洗变电站绝缘子试验[J]. 高电压技术,2011,37(07):1649-1655.
- LIU Ming, WANG Jiali, MA Xinliang, et al. Cleaning experiment of substation insulators by dry ice[J]. High Voltage Engineering,2011,37(07):1649-1655.
- [13] 刘世念,马存仁,苏伟,等. 变电站绝缘子干冰清洗方形喷嘴流场模拟研究[J]. 中国电力,2014,47(06):75-79.
- LIU Shinian, MA Cunren, SU Wei, et al. Flow field simulation of quadrate dry-ice blasting nozzle for substation insulators[J]. Electric Power,2014,47(06):75-79.
- [14] 郑俊杰,邹建明,姜锋,等. 220 kV 变电站绝缘子带电干冰清洗车载系统[J]. 中国电力,2014,47(04):118-122.
- ZHENG Junjie, ZOU Jianming, JIANG Feng, et al. Vehicle-based dry ice cleaning system for live-line insulators in substations of 220 kV[J]. Electric Power,2014,47(04):118-122.
- [15] WENJUN ZHOU, MING LIU, SHINIAN LIU, et al. On the mechanism of insulator cleaning using dry ice[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(05):1715-1722.
- [16] 龚先鹤,王臻,易永利,等. 绝缘液带电清洗二次设备表面污秽技术的研究及应用[J]. 浙江电力,2017,36(02):5-9.
- GONG Xianhe, WANG Zhen, YI Yongli, et al. Application and research of the technology of contamination cleaning on secondary equipment surface with insulating liquid[J]. Zhejiang Electric Power,2017,36(02):5-9.
- [17] JIANG ZIDAN, JIANG XINGLIANG, GUO YUJUN, et al. Pollution accumulation characteristics of insulators under natural rainfall[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(06):1479-1485.
- [18] LI ZHENGZHU, JIANG FENG, ZHENG JUNJIE, et al. The development and the field application of the on-line dry ice washing vehicle system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,3372(1230):58-65.

收稿日期:2019-02-09

作者简介:



陈俊卫(1976),男,本科,高级工程师,主要从事电力系统应用化学方面的生产、监督及研究工作。

(本文责任编辑:范斌)

Effect of dry ice cleaning on hydrophobicity of silicone rubber for composite insulators

CHEN Junwei, MU Hao, HU Quan, JIANG Zhen

(Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co. ,Ltd. ,Guiyang 550002 Guizhou, China)

Abstract: In order to study the effect of dry ice cleaning on the surface water repellency of composite insulators, high-temperature vulcanized silicone rubbers were used as samples to simulate composite insulators, and the silicone rubbers were artificially smeared with different levels of contamination. The dry ice cleaning experiments were carried out under different parameters. The effects of air pressure, cleaning angle and mass flow rate on the hydrophobic properties of the silicone rubbers for composite insulators were studied in detail. The results show that dry ice with different air pressure and mass flow has different kinetic energy. As the air pressure and mass flow rate increase, the cleaning effect of the surface of the silicone rubber is improved, and the water repellency is improved; However, when the kinetic energy of dry ice reaches a certain level, the cleaning effect of silicone rubber surface reaches the threshold. Different cleaning angles affect the vertical impact component of dry ice particles, thus affecting the cleaning effect of dry ice. Under reasonable air pressure, cleaning angle and mass flow rate, dry ice cleaning can effectively remove the surface contamination of silicone rubber, improve the water repellency of the silicone rubber surface, and ensure that the silicone rubber is not damaged.

Key words: dry ice cleaning; hydrophobic property; air pressure; cleaning angle; mass flow rate