

复合绝缘子硅橡胶成分分析方法

宋新明¹, 夏云峰^{1,2}, 黎一杉², 贾志东², 陈 灿²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523000; 2. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘 要:复合绝缘子硅橡胶伞裙护套属于高分子有机材料,在长期的户外运行条件下不可避免出现褪色、粉化、龟裂、变脆、憎水性变差等老化现象,影响到输电线路的安全运行。硅橡胶老化与运行环境和自身耐老化性能相关,直接表现为硅橡胶主要成分的变化,运维单位需定期对运行复合绝缘子进行抽检分析。提出复合绝缘子硅橡胶成分分析方法,定义胶含量。首先,为对硅橡胶主要成分进行标定,制作 13 种硅氧烷含量一定、氢氧化铝和白炭黑填料含量不同的硅橡胶平板样,利用密度和热失重 2 种方法对其进行研究。然后,运用线性回归方法对结果进行拟合。最后,选取不同生产厂家退运复合绝缘子伞裙内层样品进行验证。试验分析结果表明,基于硅橡胶的密度,和基于硅橡胶热失重过程中关键转折点的质量剩余比例,均可推算出硅橡胶样品的胶含量,2 种方法具有结果的一致性,运维人员可以根据情况进行现场或者实验室离线分析,实现复合绝缘子快速、可靠的评估,保障了输电线路的安全运行。

关 键 词:复合绝缘子;硅橡胶;胶含量;密度;热失重

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.021 中图分类号:TM216 文章编号:1673-9140(2020)05-0150-09

Study on component analysis schemes for silicone rubber of composite insulator

SONG Xinming¹, XIA Yunfeng^{1,2}, LI Yishan², JIA Zhidong², CHEN Can²

(1. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523000, China;

2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The silicone rubber of composite insulator shed and housing is a kind of polymer organic material. Due to the effect of environmental stress under the long-term operating, aging phenomena such as the color fading, chalking, cracking, brittleness and decline of hydrophobicity will appear on it inevitably. The performance of insulators affects the safe operation of transmission lines directly. The aging of silicone rubber is related to the complex operating environment and the aging resistance ability, and it is represented as the change of key components directly. Therefore, the sampling inspection for composite insulators should be carried out by operating maintenance departments. In this paper, the key components of silicone rubber analysis schemes are proposed and the rubber content is defined. To measure the components of silicone rubber, 13 kinds of flat silicone rubber samples with certain content of siloxane and different content of aluminum hydroxide and white carbon black are prepared. Methods of density and thermos

收稿日期:2018-01-26;修回日期:2018-04-24

基金项目:中国博士后科学基金(2017M612606);国家重点研发项目(2017YFB0903205);国家自然科学基金(51477086)

通信作者:夏云峰(1982-),男,博士,高级工程师,主要从事输变电设备运行与检修、高电压与绝缘技术研究;E-mail:xyf0725@163.com

gravimetric analysis are adopted, then the results are fitted by the linear regression. Silicone rubber samples of the shed inner layer from different manufacturers are selected to verify the consistency of the results obtained by the two methods. It is shown that the rubber content of silicone rubber can be calculated by either the density or the remaining mass ratios at the critical turning point of thermal gravimetric (TG) curve. The field or off-line analysis can be carried out according to the actual situation. The operating status of composite insulators can be assessed by the proposed schemes conveniently and reliably, then safe operation of transmission line can be promoted.

Key words: composite insulator, silicone rubber, rubber content, density, thermal gravimetric analysis (TGA)

硅橡胶复合绝缘子由于独特的憎水性和憎水迁移性,防污闪性能优异,在架空输电线路广泛使用^[1-12]。然而随着挂网运行年限的增长,日常巡检中发现了大量的复合绝缘子出现了老化现象。根据相关调查报告,由于硅橡胶伞裙护套老化造成复合绝缘子故障的比例达到 64%^[13],主要体现在硅橡胶伞裙护套的褪色、龟裂、憎水性变差、漏电起痕、变硬等方面^[4-9]。

在电力系统外绝缘领域,硅橡胶材料通常可以分为高温硫化硅橡胶(high temperature vulcanized silicone rubber, HTV 硅橡胶)、室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone rubber, RTV 硅橡胶)以及液体硅橡胶(liquid silicone rubber, LSR)3 类。该文研究对象为复合绝缘子用的 HTV 硅橡胶(下面简称硅橡胶),其由线性高聚合度的聚有机硅氧烷配合补强填料、添加剂后硫化而成,在成型中需要经过辊筒塑化、压制成型等过程。简单地说,硅橡胶的主要成分为有机硅氧烷、氢氧化铝阻燃剂和白炭黑 SiO₂,其含量比例会直接影响到硅橡胶本身的性能和使用寿命^[14-20]。然而根据多年抽检的结果,一些厂家会在实际生产过程中减少价格较为昂贵的硅氧烷用量,反而在配方中添加过多的无机填料,实现压缩成本的目的^[17, 20]。

目前,国内电网系统对采购复合绝缘子的性能已有详细的规定和要求,但针对耐老化性能指标的评估需要经过较长时间的人工加速老化试验^[10],不利于运维人员针对近期使用的复合绝缘子耐老化性能的检测。而硅橡胶组分含量有成熟的检测手段作为支撑,能够更为便捷地应用到复合绝缘子的入网检测中,其中,密度分析、热失重分析、热传导分析等^[20-25]均为可行的手段。该文考虑到检测方法的便携性和精确度,选取密度分析和热失重分析作为

硅橡胶组分含量检测,以应对不同场合、人员的需求。

该文自制 13 种硅氧烷含量一定、填料含量不同的硅橡胶样品,根据已知各组分含量,运用密度分析和热失重分析 2 种方法,将线性回归分析结果运用于已退出运行的复合绝缘子硅橡胶伞裙,验证 2 种标定方法的一致性,探究其适用性。最后从理论上分析 2 种分析方法的物理含义,验证拟合结果。在此基础上建立一套可以在复合绝缘子入网前准确、快捷地分析硅橡胶伞裙护套组成成分的方法,用于复合绝缘子生产厂家监测生产过程中组分的波动情况,同时为电网运维部门提供复合绝缘子入网的指导意见,提高入网运行设备质量,保障电网的安全稳定。

1 样品制备

硅橡胶的主要组分包括甲基乙基硅氧烷、气相白炭黑以及氢氧化铝,前者是硅橡胶的基胶,其含量所占总体的比例在该文中定义为“胶含量”,而后两者是硅橡胶中常用的 2 种无机填料。其制备主要流程如下:

1) 将硅氧烷、气相白炭黑、氢氧化铝、过氧化物硫化剂等的混合物放置在混炼机中充分混炼;

2) 在尺寸为 320 mm×300 mm×2 mm 的平板硫化机模具中经过 135 °C、12 min 硫化成型,形成平板硅橡胶片。

该文制备样品的方法,是在不改变硅氧烷份数(100 份)的情况下,改变加入的气相白炭黑、氢氧化铝的种类和含量。具体配方以及各组分含量比例如表 1、2 所示。

表 1 自制硅橡胶配方

Table 1 Self-made silicone rubber formula

编号	基胶/ 份数	填料/份数			
		未改性	改性	未改性	改性
		氢氧化铝	氢氧化铝	白炭黑	白炭黑
B21	100	—	95	35	—
B11	100	95	—	35	—
B12	100	125	—	35	—
B13	100	155	—	35	—
B14	100	185	—	35	—
AH21	100	155	—	—	15
AH22	100	155	—	—	25
AH23	100	155	—	—	35
AH24	100	155	—	—	45
AV11	100	155	—	15	—
AV12	100	155	—	25	—
AV13	100	155	—	35	—
AV14	100	155	—	45	—

表 2 不同配方各组分含量比例

Table 2 Proportion of component content of different formula

编号	胶含量/ %	氢氧化铝含量 比例/%	白炭黑含量 比例/%
	B21	43.48	41.30
B11	43.48	41.30	15.22
B12	38.46	48.08	13.46
B13	34.48	53.45	12.07
B14	31.25	57.81	10.94
AH21	37.04	57.41	5.56
AH22	35.71	55.36	8.93
AH23	34.48	53.45	12.07
AH24	33.33	51.67	15.00
AV11	37.04	57.41	5.56
AV12	35.71	55.36	8.93
AV13	34.48	53.45	12.07
AV14	33.33	51.67	15.00

2 测量方法

2.1 密度分析

密度的测量方法为排水法,如图 1 所示,其步骤:

1)手术刀在平板混炼硅橡胶上取大小约为 1 cm×1 cm 的块状样品;

2)在样品中间部位切除一个深度约为样品厚度 1/2 的切口;

3)使用精密天平对样品进行称重,得到样品的原始质量 m_1 ;

4)在精密天平上放置一盛有蒸馏水的烧杯(深度应能完全浸没样品),并将精密天平读数置零;

5)将细线一端缠绕固定在玻璃棒上,横担在天平侧壁顶端,另一端固定在样品的“一”字切口内,然后将样品缓缓浸没在蒸馏水中,但不能触碰到烧杯壁或烧杯底;

6)待精密天平读数稳定后,读取示数 m_2 ;

7)当水的密度为 1 g/cm³ 时,硅橡胶的密度可以表示为

$$\rho_{\text{硅橡胶}} = m_1/V = m_1/(F_{\text{浮力}}/(\rho_{\text{水}}g)) = m_1/m_2 \quad (1)$$

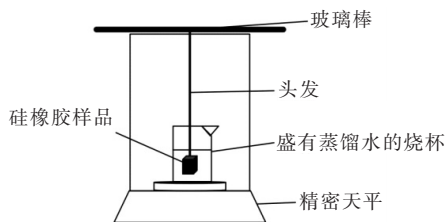


图 1 硅橡胶样品密度测量示意

Figure 1 Density measuring diagram of silicone rubber

由硅橡胶的密度推算其胶含量时,密度测量的准确性会直接影响到最终结果的精度,因而这里先从理论上探究密度测量方法的可靠性。根据各组分的含量和密度,推算的硅橡胶密度可以表示为

$$\rho_{\text{硅橡胶}} = m_{\text{硅橡胶}}/V_{\text{硅橡胶}} = (m_{\text{基胶}} + m_{\text{氢氧化铝}} + m_{\text{白炭黑}})/((m_{\text{基胶}}/\rho_{\text{基胶}}) + (m_{\text{氢氧化铝}}/\rho_{\text{氢氧化铝}}) + (m_{\text{白炭黑}}/\rho_{\text{白炭黑}})) \quad (2)$$

已知试验所用基胶密度为 0.965 g/cm³,氢氧化铝密度为 2.42 g/cm³,白炭黑密度为 2.5 g/cm³,根据对应配方的含量计算理论密度,并与排水法获得的密度进行比较,如表 3 所示。

可见,基于排水法的密度测量方法可靠性高,能作为后续胶含量推算的关键参数。

表 3 排水法密度测量结果对比

Table 3 Comparison of measurement density and theory density

编号	理论密度/ (g/cm ³)	排水法密度/ (g/cm ³)	误差/ %
B21	1.466 1	1.434 3	2.17
B11	1.466 1	1.455 3	0.73
B12	1.535 9	1.531 4	0.29
B13	1.596 2	1.583 4	0.80
B14	1.648 9	1.622 2	1.62
AH21	1.554 6	1.544 4	0.66
AH22	1.575 9	1.546 8	1.85
AH23	1.596 2	1.571 2	1.57
AH24	1.615 7	1.570 2	2.82
AV11	1.554 6	1.558 3	0.24
AV12	1.575 9	1.559 1	1.07
AV13	1.596 2	1.558 4	2.37
AV14	1.615 7	1.587 5	1.75

2.2 热失重分析

热分析方法是研究高分子材料性能的有效手段。国际热分析和量热协会(international confederation for thermal analysis and calorimetry, IC-TAC)将热分析方法定义为“在程控试样温度下监测试样性能与时间或温度关系的一组技术。试样保持在设定的气氛中。温度程序包括等速升(降)温、或恒温、或这些程序的任何组合。”

硅橡胶材料的玻璃化转变温度低于室温,常温下呈柔软有弹性的橡胶态。硫化后的硅橡胶已经形成了完整的交联体系,属于热固性高分子材料,加热后不会熔融或流动。对硅橡胶材料进行热分析,主要是研究硅橡胶材料加热过程中填料、硅氧烷链节可能出现的反应,以及这些反应发生的条件,为硅橡胶材料的老化过程研究提供参考。除此之外,还可以计算反应过程中相关参数的变化,推算出硅橡胶材料中各组分的含量和比例。

该文中所述样品采用型号为 Netzsch STA 449 F 3 的热分析仪器进行热失重分析。试验条件为氮气氛围下,升温区间为室温匀速升温至 800 °C,升温速率为 10 °C/min。

3 试验结果

3.1 基于密度的成分标定方法

以硅橡胶样品的密度为横坐标,以胶含量、氢氧化铝含量比例以及白炭黑含量比例为纵坐标分别作散点图,分析硅橡胶密度与各组分含量之间的关联,所得结果如图 2~4 所示。

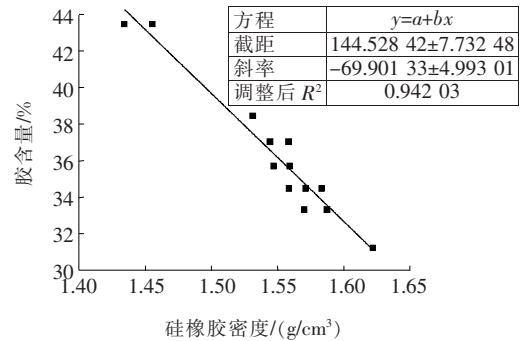


图 2 硅橡胶密度—胶含量散点及拟合曲线

Figure 2 Scatter plot and fitting curve of density-rubber content

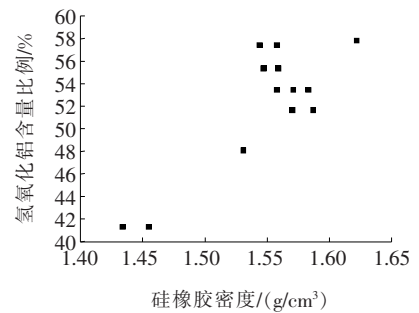


图 3 硅橡胶密度—氢氧化铝含量比例散点

Figure 3 Scatter plot of density-aluminum hydroxide content

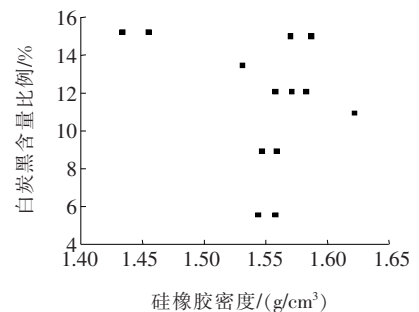


图 4 硅橡胶密度—白炭黑含量比例散点

Figure 4 Scatter plot of density-white silica black content

可以看到,硅橡胶组分中胶含量与其密度线性相关性较好,具体的硅橡胶密度—胶含量函数关系式为

$$y = -69.9013x + 144.5284 \quad (3)$$

式中 x 为硅橡胶密度,单位为 g/cm^3 ; y 为硅橡胶的胶含量。拟合直线的 R^2 为 0.942 0,最大误差为 4.36%,线性相关度高,这与其他研究者所得结果相似^[10, 15]。

3.2 基于热失重的成分标定方法

热失重分析是热分析方法中最常用的一种方法,也是有机材料成分定量分析中的常用手段。对于 HTV 硅橡胶来说,其主要成分包括硅氧烷基胶、氢氧化铝和白炭黑 3 种。其中,氢氧化铝的热分解温度最低,约 $250\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$;硅氧烷的分解温度较高,约在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 以上;白炭黑则具有很好的热稳定性,在高温下也几乎不会分解。三者热稳定区间有所差异,因此硅橡胶样品的热失重曲线呈现出如图 5 所示的特征。

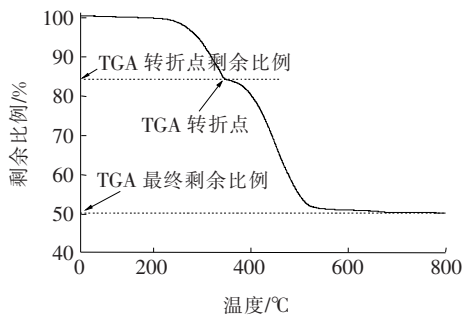


图 5 典型硅橡胶的热失重曲线

Figure 5 Typical thermogravimetric curve of silicone rubber

从图 5 中可以看到,硅橡胶热失重过程中的质量剩余比例曲线有 2 个明显的变化点。第 1 个点变化大约出现在剩余比例 84%、 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 附近的地方,该文将其定义为“TGA 转折点”,对应的剩余比例称为“TGA 转折点剩余比例”,用符号 $Mass_{\text{转折}}$ 表示;第 2 个点变化是失重过程结束、曲线不再下降的点,该文将其定义为“TGA 终结点”,对应的剩余比例称为“TGA 最终剩余比例”,用符号 $Mass_{\text{剩余}}$ 表示。

同样使用自制的不同配方硅橡胶样品进行热失重分析实验,并获取其 $Mass_{\text{转折}}$ 和 $Mass_{\text{剩余}}$ (每种配方测量 5 次取平均值),统计在表 4 中。

在 SPSS 软件中将 $Mass_{\text{转折}}$ 和 $Mass_{\text{剩余}}$ 作为自变量,胶含量、氢氧化铝含量比例以及白炭黑含量作为因变量,利用多元线性回归的方法分析其间的联系。拟合得到的函数关系式:

表 4 不同配方转折点和终结点质量剩余比例

Table 4 Remaining mass ratio of turning point and termination point for different formula

编号	$Mass_{\text{转折}}$	$Mass_{\text{剩余}}$
B21	0.886 3	0.457 7
B11	0.876 6	0.472 7
B12	0.865 9	0.522 0
B13	0.847 1	0.527 0
B14	0.832 3	0.548 2
AH21	0.837 8	0.475 3
AH22	0.840 5	0.505 6
AH23	0.844 6	0.517 1
AH24	0.850 3	0.538 2
AV11	0.836 6	0.494 5
AV12	0.843 4	0.507 7
AV13	0.844 6	0.527 0
AV14	0.852 7	0.544 9

$$y_1 = 115.259Mass_{\text{转折}} - 80.041Mass_{\text{剩余}} - 20.848 \quad (4)$$

$$y_2 = -343.707Mass_{\text{转折}} - 7.488Mass_{\text{剩余}} + 348.332 \quad (5)$$

$$y_3 = 228.271Mass_{\text{转折}} + 87.427Mass_{\text{剩余}} - 227.280 \quad (6)$$

其中, y_1 表示胶含量, y_2 表示氢氧化铝含量比例, y_3 表示白炭黑含量比例。3 个拟合公式的 R^2 分别为 $R_{y_1}^2 = 0.956 6$, $R_{y_2}^2 = 0.972 1$, $R_{y_3}^2 = 0.903 4$ 。此外,三者相加的结果近似于 1,说明拟合结果合理。用上式计算得到各组份含量误差如表 5 所示。

可以看到,利用 TGA 结果能够推算硅橡胶样品中胶含量和氢氧化铝含量比例,最大误差分别为 3.32% 和 5.35%,但是对于白炭黑含量比例,会存

表 5 TGA 结果—含量拟合误差

Table 5 Fitting error of actual content and calculate content from TGA results

编号	胶含量/%	氢氧化铝含量/%	白炭黑含量/%
B21	2.73	2.46	1.13
B11	2.59	5.35	7.11
B12	3.32	2.68	19.04
B13	0.37	0.43	0.84
B14	0.16	0.63	2.84
AH21	1.69	1.01	0.91
AH22	0.45	0.57	1.69
AH23	1.80	1.37	11.20
AH24	2.24	0.75	7.58
AV11	2.81	0.57	24.55
AV12	0.06	1.30	7.87
AV13	0.48	1.23	4.06
AV14	1.49	0.99	0.09

在几个异常点。

3.3 运行样品验证

该文从新疆电网退运复合绝缘子中选取一批样品作为试验研究对象。考虑到运行环境、运行时间均有所差异,因而在检测硅橡胶相关参数的时候,试验样品取自伞裙中部内层、几乎没有老化的硅橡胶。此时的硅橡胶相关参数能在很大程度上反映复合绝缘子出厂时硅橡胶初始的状态。

这里将密度法推算的胶含量记为胶含量 1,而由热失重试验方法得到的胶含量记为胶含量 2,两者之间进行对比,结果如表 6 所示。

表 6 运行样品内层硅橡胶胶含量验证

Table 6 Verification of rubber content of inner layer of actual samples

编号	胶含量 1/%	胶含量 2/%	误差/%
t1	32.25	35.00	7.86
t7	32.61	35.21	7.40
t12	40.34	40.49	0.39
t17	39.91	37.47	6.50
t19	40.45	37.67	7.39
y2	33.36	34.83	4.23
y4	34.08	35.28	3.38
y6	31.18	32.37	3.67
y13	33.25	33.76	1.53
y15	39.78	39.96	0.44
y17	39.41	40.02	1.52
y20	36.07	38.64	6.65
y23	31.15	32.56	4.34
k4	38.14	38.94	2.07
a2	32.59	34.74	6.19
a7	34.23	34.92	1.98
a10	31.40	33.35	5.83
a12	38.90	39.80	2.27

从以上结果可以看到,对于实际运行样品,2 种标定方法得到的结果是接近的,这说明这些方法同样适用于其他厂家的硅橡胶,具有普适性。

4 讨论与分析

4.1 热失重分析法推算胶含量理论分析

假定基胶、氢氧化铝和白炭黑在失重第 1 阶段的质量变化率分别为 a_1 、 a_2 和 a_3 ,该段质量变化率可以表示为

$$\Delta M_1 = 1 - Mass_{\text{转折}} =$$

$$(m_1 a_1 + m_2 a_2 + m_3 a_3) / (m_1 + m_2 + m_3) \quad (7)$$

类似的,假定整个失重过程中 3 种组分总的质

量变化率分别为 b_1 、 b_2 和 b_3 ,那么总质量变化率为

$$\Delta M_2 = 1 - Mass_{\text{剩余}} =$$

$$(m_1 b_1 + m_2 b_2 + m_3 b_3) / (m_1 + m_2 + m_3) \quad (8)$$

根据式(6)、(7),可以分别求得 m_2 、 m_3 ,即

$$m_2 =$$

$$m_1 \frac{\Delta M_2(a_1 - a_3) + \Delta M_1(b_3 - b_1) + a_3 b_1 - a_1 b_3}{\Delta M_2(a_3 - a_2) + \Delta M_1(b_2 - b_3) + a_2 b_3 - a_3 b_2} \quad (9)$$

$$m_3 =$$

$$m_1 \frac{\Delta M_2(a_1 - a_2) + \Delta M_1(b_2 - b_1) + a_2 b_1 - a_1 b_2}{\Delta M_2(a_2 - a_3) + \Delta M_1(b_3 - b_2) + a_3 b_2 - a_2 b_2} \quad (10)$$

代入胶含量的定义公式,化简可得

$$m_{\text{胶含量}} =$$

$$\frac{\Delta M_1(b_3 - b_2) + \Delta M_2(a_2 - a_3) + a_3 b_2 - a_2 b_3}{b_1(a_2 - a_3) + b_2(a_3 - a_1) + b_3(a_1 - a_2)} \quad (11)$$

由此可知,该文用热失重曲线中 2 个关键转折点的质量剩余比例来线性表示胶含量是合理的。

4.2 密度法推算胶含量理论分析

胶含量的定义方式可以表示为

$$m_{\text{胶含量}} =$$

$$m_{\text{基胶}} / (m_{\text{基胶}} + m_{\text{氢氧化铝}} + m_{\text{白炭黑}}) \quad (12)$$

基胶的质量和密度分别用 m_1 和 ρ_1 表示;由于氢氧化铝和白炭黑的密度比较接近,为了简化公式这里均用 ρ_2 表示,质量分别为 m_2 和 m_3 。由式(2)、(4)可得

$$m_{\text{胶含量}} =$$

$$[\rho_1 \rho_2 / (\rho_2 - \rho_1)] (1 / \rho_{\text{硅橡胶}}) - [1 / (\rho_2 - \rho_1)] \quad (13)$$

可以看到,简化后硅橡胶胶含量与其密度倒数呈线性正相关,可利用新制硅橡胶样品作图验证,如图 6 所示。

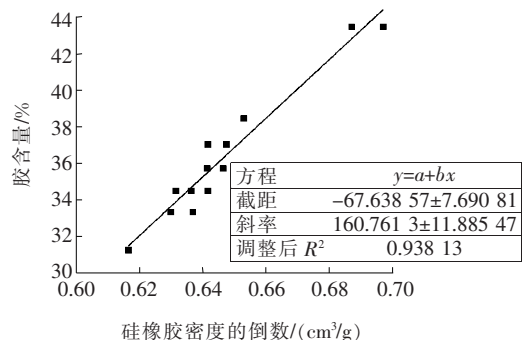
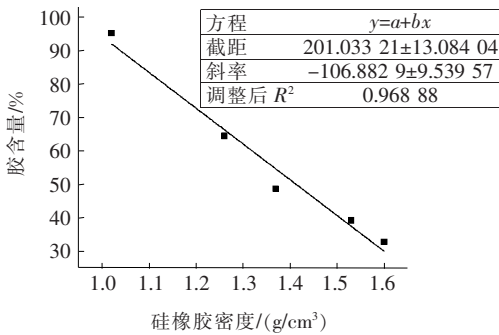


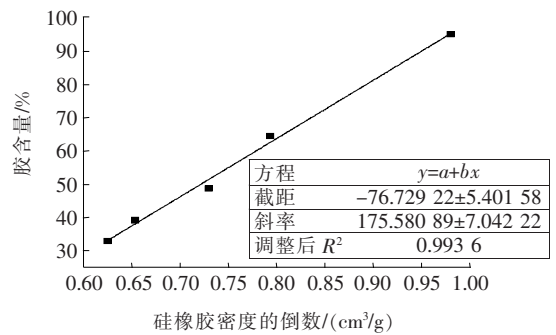
图 6 硅橡胶密度倒数—胶含量拟合结果
Figure 6 Fitting results of reciprocal of density-rubber content

可以看到,此时线性拟合的 R^2 为 0.938 13,说明拟合度同样很高。为了排除偶然性并验证该理论

论推导的结果,将文献[10,15]中的数据作同样的处理再进行拟合,结果如图 7、8 所示。



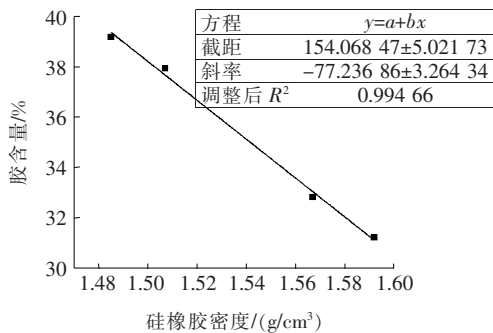
(a) 硅橡胶密度与胶含量关系



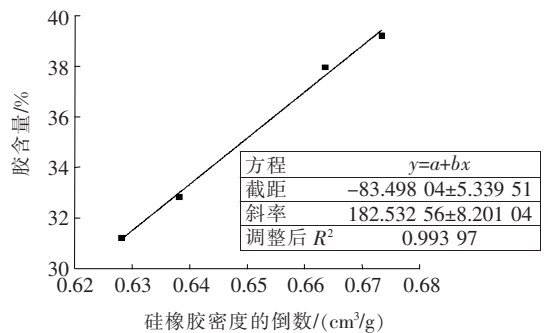
(b) 硅橡胶密度的倒数与胶含量关系

图 7 硅橡胶密度与胶含量关系(参考 1)

Figure 7 Relationship between density and rubber content of silicone rubber(Reference 1)



(a) 硅橡胶密度与胶含量关系



(b) 硅橡胶密度的倒数与胶含量关系

图 8 硅橡胶密度与胶含量关系—参考 2

Figure 8 Relationship between density and rubber content of silicone rubber(Reference 2)

可见通过 2 种模型均能很好拟合密度与胶含量之间的关系, R^2 相差不大, 为了方便研究人员的使用, 建议采用表达式更为简单的线性相关模型。

4.3 标定方法比较

胶含量是决定硅橡胶性能的关键参数, 电网运维人员有必要了解复合绝缘子投运前硅橡胶的胶含量, 从而判定复合绝缘子硅橡胶伞裙护套的耐老化性能可否达到行业标准, 同时避免不良复合绝缘子投入运行使用, 给电网稳定运行带来隐患。热失重的方法能够准确测量硅橡胶样品的胶含量, 同时对样品需求量少, 仅通过边角料即可判断硅橡胶伞裙护套的胶含量, 但其需要比较贵重的仪器支持, 适合于运行复合绝缘子样品的抽样离线分析。而基于密度的方法, 虽然需要对样品切块, 但无论是生产厂家还是电网运维人员, 仅通过一台天平就能够较为精确地判定硅橡胶的胶含量, 适合进行现场快速评估。

5 结语

1) 通过文中所述排水法能够较为准确地测量硅橡胶的密度, 并且通过绘制散点图, 发现其与硅橡胶的胶含量相关程度最大, 基本呈线性负相关。即通过硅橡胶的密度可以推算样品的胶含量。

2) 热失重曲线中转折点的剩余比例和终结点的剩余比例可以作为研究分析硅橡胶各组分含量比例的重要参数, 由多元线性回归拟合出的胶含量及氢氧化铝含量比例的 R^2 值均在 0.95 以上, 效果较好。对于白炭黑含量比例, 虽然 R^2 值也有 0.903 4, 但是会存在某几个点拟合效果较差的情况。

3) 对于退运复合绝缘子伞裙内层的硅橡胶样品, 通过密度分析和热失重分析获得的胶含量基本一致, 说明这 2 种方法的可行性和普适性。

4) 通过理论的分析, 推导出硅橡胶的胶含量与

其密度的倒数呈线性正相关,并通过多组数据验证。此外,通过分析热失重过程各组分失重率,可以得到仅用转折点和终结点质量剩余比例即可线性标出胶含量的公式,进一步验证先前拟合结果的正确性。

5)基于密度和热失重的分析方法得到的胶含量具有很好的一致性。前者简单、易行,但需要对样品切块,后者对样品需求量很小,但需要专门的仪器设备。实际情况下可以根据不同需要选择其中的一种方法,从而实现复合绝缘子入网成分检测的目的。

参考文献:

[1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[2] 梁曦东,高岩峰,王家福,等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术,2016,42(9):2888-2896.
LIANG Xidong, GAO Yanfeng, WANG Jiafu, et al. Rapid development of silicone rubber composite insulator in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2888-2896.

[3] 闫康,汪佛池,张重远. 基于Canny算子的复合绝缘子憎水性图像边缘检测[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(3):45-49+56.
YAN Kan, WANG Fochi, ZHANG Zhongyuan. Hydrophobic image edge detection for composite insulator based on Canny operator [J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2013, 28(3): 45-49+56.

[4] Cheng L., Mei H, Wang L, et al. Research on aging evaluation and remaining lifespan prediction of composite insulators in high temperature and humidity regions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2850-2857.

[5] Moghadam M K, Taheri M, Gharazi S, et al. A study of composite insulator aging using the tracking wheel test [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1805-1811.

[6] 李智琦,罗日成,吴东,等. 500 kV 变电站绝缘子串均压环结构优化分析[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(1):171-176.
LI Zhiqi, LUO Richeng, WU Dong, et al. Optimization analysis of grading ring structure for insulator string in a 500kV substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 171-176.

[7] 申巍,高华,张鹏,等. 高聚物复合绝缘子紫外老化性能研究[J]. 中国电力,2019,52(9):73-78+85.

SHEN Wei, GAO Hua, ZHANG Peng, et al. Study on UV aging properties of polymer composite insulators [J]. Electric Power, 2019, 52(9): 73-78+85.

[8] 彭向阳,黄振,张中浩,等. 高湿热地区高温发热复合绝缘子分析[J]. 智慧电力,2019,47(8):83-90.
PENG Xiangyang, HHANG Zhen, ZHANG Zhonghao, et al. Analysis of high temperature heating composite insulators in hot and humid areas [J]. Smart Power, 2019, 47(8): 83-90.

[9] 杨春波,陶青,张健,等. 基于综合健康指数的设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):104-109.
YANG Chunbo, TAO Qing, ZHANG Jian, et al. Equipment status evaluation based on comprehensive health index [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 104-109.

[10] Cheng, L, Wang L, Guan Z, et al. Aging characterization and lifespan prediction of silicone rubber material utilized for composite insulators in areas of atypical warmth and humidity [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3547-3555.

[11] Rowland S M, Xiong Y, Robertson J, et al. Aging of silicone rubber composite insulators on 400 kV transmission lines [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 130-136.

[12] Haddad G, Wong K L, Petersen P. Evaluation of the aging process of composite insulator based on surface characterisation techniques and electrical method [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 311-318.

[13] 彭向阳,李子健,黄振,等. 基于TG-DSC法的复合绝缘子硅橡胶主组分含量研究[J]. 南方电网技术,2017,11(1):36-44.
PENG Xiangyang, LI Zijian, HUANG Zhen, et al. TG-DSC coupling techniques based investigation on main component content of silicone rubber composite insulators [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1): 36-44.

[14] Sundararajan R, Soundarajan E, Mohammed A, et al. Multistress accelerated aging of polymer housed surge arresters under simulated coastal florida conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 211-226.

[15] 肖雨,张翀,李飞,等. 室温硫化硅橡胶防污闪涂料有机含量的测试方法研究[J]. 绝缘材料,2017,50(2):81-86.

- XIAO Yu, ZHANG Chong, LI Fei, et al. Research on test methods of organic solid content in RTV anti-pollution flashover coatings [J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(2): 81-86.
- [16] 谢从珍, 刘珊, 袁超, 等. 氧化铁对复合绝缘子用高温硫化硅橡胶性能的影响[J]. *高电压技术*, 2014, 40(12): 3674-3679.
- XIE Congzhen, LIU Shan, YUAN Chao, et al. Influence of Fe_2O_3 on properties of high-temperature vulcanized silicone rubber for composite insulators [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(12): 3674-3679.
- [17] 王康, 王建国, 郑峰, 等. 氢氧化铝含量对硅橡胶结构及憎水恢复性的影响[J]. *高电压技术*, 2015, 41(2): 468-473.
- WANG Kang, WANG Jianguo, ZHENG Feng, et al. Study on the microstructure and hydrophobicity recovery of silicon rubber with different content of ATH [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(2): 468-473.
- [18] 王康, 王建国, 郑峰, 等. 白炭黑含量对硅橡胶结构和憎水恢复性影响[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(12): 31-39.
- WANG Kang, WANG Jianguo, ZHENG Feng, et al. Effect of fumed silica content on the microstructure and hydrophobicity recovery of silicon rubber [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(12): 31-39.
- [19] 梁曦东, 张轶博, 殷禹, 等. 复合绝缘子的 5 000 h 多因素试验及长期性能评价[J]. *高电压技术*, 2012, 38(10): 2492-2498.
- LIANG Xidong, ZHANG Yibo, YIN Yu, et al. 5 000 h multi-stress test procedure for silicone rubber composite insulators and its applications in long term performance evaluation [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(10): 2492-2498.
- [20] 李晓明, 林荣伟. 用比重法测定混炼硅橡胶中橡胶的含量[J]. *电瓷避雷器*, 2009(3): 9-11.
- LI Xiaoming, LIN Rongwei. Measurement of the rubber content in the silicone rubber compound using specific gravity method [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2009(3): 9-11.
- [21] 郝艳捧, 谢恒堃. 基于热重和红外光谱分析研究大电机定子绝缘中环氧的老化过程[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(13): 15-19.
- HAO Yanpeng, XIE Hengkung. Degradation behaviour of epoxy in stator insulation based on thermogravimetry and infra-red spectrometry [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(13): 15-19.
- [22] 鲍棋铭, 高乃奎, 马小芹, 等. 大型发电机主绝缘老化的热分析研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(7): 99-101+106.
- BAO Qiming, GAO Naikui, MA Xiaoqin, et al. Study on the aging of stator insulation of large generators using thermoanalysis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(7): 99-101+106.
- [23] 陈晓春, 周仲康, 王康, 等. 复合绝缘子多因素环境老化性能分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2017, 32(4): 90-95.
- CHEN Xiaochun, ZHOU Zhongkang, WANG Kang, et al. Shed properties analysis of composite insulators under multi-factor aging test [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2017, 32(4): 90-95.
- [24] 谢庆, 王幼男, 刘利珍, 等. 基于功率谱密度分析的针对电极下环氧树脂不同老化程度表面形貌研究[J]. *绝缘材料*, 2017, 50(4): 56-60+66.
- XIE Qing, WANG Younan, LIU Lizhen, et al. Study on surface morphology of epoxy resin with different ageing degrees under pin-pin electrode based on power spectral density analysis [J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(4): 56-60+66.
- [25] 彭向阳, 许志海, 王康, 等. D4 含量对硅橡胶微观结构和憎水恢复的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(8): 2097-2104.
- PENG Xiangyang, XU Zhihai, WANG Kang, et al. Study on the microstructure and hydrophobicity recovery of silicon rubber with different content of D4 [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(8): 2097-2104.