

变压器防腐涂层导热性能提升技术研究

莫娟, 徐金, 樊宝珍, 刘蕊

中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192

摘要 以水性环氧富锌涂层为研究对象, 通过向其中添加石墨烯、碳纳米管、碳纳米角和超细石墨粉混合物来改性变压器防腐涂层导热性能。通过瞬态板式热源法、红外热像仪、热阻测试仪和扫描电子显微镜对传统溶剂型涂层、水性环氧富锌涂层以及改性高导热涂层的导热性能和微观结构进行了分析。结果显示改性高导热涂层的热阻最小(2.51°C/W), 导热系数最高(1.3450 W/(m·K)), 表明其导热性能明显优于传统溶剂型涂层(4.57°C/W)和水性环氧富锌涂层(4.28°C/W)。改性高导热涂料导热性能的提高主要与其导热方式的优化和涂层致密性的提高有关。传统溶剂型涂料主要以声子形式进行热量传递。向水性环氧富锌涂料加入高导热填料后, 一方面形成了以弹道-扩散的方式进行热量传递方式; 另一方面添加的高导热物质在涂层中填充在孔隙和裂纹位置处, 很大程度上提高了涂层的致密度, 构建了变压器金属和外部环境的热量传递通道, 因而使得涂料导热性能得到了显著提高。变压器温升模拟实验表明研制的新型高导热环保涂层可降低变压器油顶层温升 1.67 K。

关键词 变压器; 水性环氧富锌涂层; 高导热物质

变压器是电网中负责转化与输送电能的枢纽设备, 在发电、输电和配电环节都发挥着关键作用^[1]。随着社会经济发展的需要, 变压器的服役环境遍及世界各地, 包括高盐雾、重污染、大风沙和强日照等腐蚀环境地区。为了提高变压器的环境适应性, 通常需对其进行涂层防护处理。调研结果表明, 当前多采用溶剂型涂料(如双组份环氧富锌、环氧云铁以及丙烯酸防腐漆等)对其进行表面防护处

理。值得注意的是, 溶剂型涂层的 VOCs 排放量为 300~500 g/L, 严重危害人类健康和区域生态环境安全, 而且在变压器服役过程中, 会出现严重的温升问题, 过高的温度会导致损耗进一步增加, 降低电能传输效率, 影响变压器运行经济性, 同时会造成组件性能下降, 加速绝缘老化, 带来安全风险^[2-4]。因此研发变压器用环保高导热防腐涂层对改善变压器导热性能具有重要意义。

收稿日期: 2021-07-16; 修回日期: 2021-08-23

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(GCB17201900267)

作者简介: 莫娟, 教授级高级工程师, 研究方向为输变电工程技术, 电子信箱: mojuan@epri.sgcc.com.cn

引用格式: 莫娟, 徐金, 樊宝珍, 等. 变压器防腐涂层导热性能提升技术研究[J]. 科技导报, 2021, 39(17): 91-98; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.17.011

在改性材料导热性能方面,王亮亮等^[5]研究了石墨对聚丙烯材料导热性能的影响,结果显示石墨添加量小于25%(wt)时,改性聚丙烯材料的导热系数与石墨的添加量呈现线性关系;随着石墨的添加量增加,超过25%(wt)时,其导热系数显示快速增加的现象。井新利等^[6]运用天然石墨来改性环氧树脂导热性能,结果表明改性体系的导热率随着石墨添加量的增加而变大;石墨添加量达到60%(wt)时,改性环氧树脂的导热率达到了10 W/(m·K)。严栋^[7]阐述了添加石墨对酚醛树脂体系导热性能的影响,结果显示石墨粒径对体系的导热性能具有重要影响,呈现正比关系;同时发现若应用石墨与碳纤维混合填充,改性体系的导热率远优于单独石墨填充时的导热率,说明石墨与碳纤维之间显示了优异的协同改性效应。Sayata等^[8]将气相生长的碳纳米纤维、膨胀石墨和多壁碳纳米管(MWNTs)添加到树脂基材料中,测试了纳米碳材料对复合树脂导热率的影响,试验结果显示膨胀石墨对树脂复合材料的导热性能的改善效果最为明显,并且当石墨添加量达到40%(wt)时,复合材料的热导率约为6.7 W/(m·K)。Yin等^[9]研究了高温剥离得到的石墨烯对环氧树脂复合材料导热性能的影响,结果显示添加25%(vol)的石墨烯时,改性环氧树脂材料的导热率达到了6.44 W/(m·K)。

考虑到碳材料尤其是石墨烯材料的高导热性能,本研究选用石墨烯、碳纳米管、碳纳米角和超细石墨粉混合物来改性水性环氧富锌涂料^[10],以此来提高变压器用涂层的环保性能和导热性能;通过瞬态板式热源法、红外热像仪和热阻测试仪对传统油性涂层、水性环氧富锌涂层以及改性高导热涂层的导热性能进行分析;采用扫描电子显微镜观察涂层的微观结构,并探讨其相应的导热机制。

1 试验方法

1.1 试验材料

以朗卫特水漆公司生产的工业水性环氧富锌涂料(LWT-水性防腐涂料)为研究对象,向其中添加6%的由石墨烯、碳纳米管、碳纳米角、超细石墨

粉组成的高导热混合物,制备高导热水性环氧富锌涂料(LWT-高导热防腐涂料A)。试验过程中,选用传统的变压器涂料(丙烯酸聚氨酯涂料,嘉宝莉工业漆)为对照。

将3种配制好的涂料喷涂在经过喷砂处理及酸洗过的Q235B碳钢试板上,在室温下进行干燥。后续开展涂层导热性能分析的涂层厚度为150 μm左右。添加6%高导热物质的涂层的附着力参照《GB/T 9286—1998 色漆和清漆漆膜的划格试验》进行评估,附着力测试涂层厚度为100 μm。

1.2 涂层导热系数测试

涂层的导热系数采用C-Therm TCi导热系数测量仪进行测试,原理为瞬态板式热源法^[10,11]。试验温度设置为40℃,待温度稳定后开始测试。测试过程中,将试验探头置于两片样品中间,随后恒定输出直流电。由于表面温度的升高,探头的电阻值发生改变,使得探头两端电压降低,随后记录探头在一段时间内电流和电压的变化曲线,从而精确地获得探头及目标试样的热流信息,再由设备软件分析处理得出涂层试样的导热系数。

1.3 涂层辐射率测试

采用以红外热像仪为核心装置搭建的试验测量平台对涂层的辐射率进行测试(图1)。测试过程中在涂层试样表面粘贴辐射率为0.95的绝缘电工胶带^[12]。

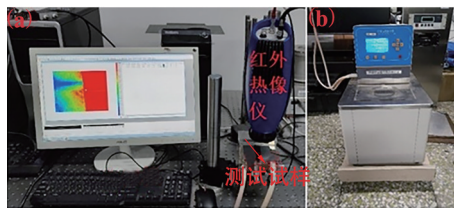


图1 辐射率测试平台

测试之前,首先将恒温平台温度设置为试验温度,等待一段时间,使得恒温平台温度与涂层试样以及表面绝缘电工胶带的温度保持恒定且一致,试验中温度设置为40℃。

开始测试试验,将红外热像仪发射率设置为0.95,且使用红外热像仪对准电工胶带,读取红外热像仪显示的温度并记录。随后,将红外热像仪对准待测涂层试样,调整红外热像仪之前输入的辐射

率使得红外热像仪显示的温度等于胶带的温度,读取并记录下此时红外热像仪的辐射率,此辐射率便是待测涂层的辐射率。

1.4 涂层热阻测试

利用 TTE-500 热阻测试仪测量分析涂层试样的散热特性,测试平台如图 2 所示。首先将待测样品置于温度可控的恒温试样台上,随后在 SiC 二极管两端施加测试电流(1 mA)。考虑到低电流条件下,待测试样自身产生的工作温升可以忽略不计,因此可以近似将试验平台温度等于 PN 结两端温度。试验温度设定为 40℃,当恒温平台温度达到设定值时,等待 5 min 以保证试样温度等于平台温度,切断工作电流,实时采集二极管正向电压的变化,经过结构函数的处理,从而可以计算出涂层试样的热阻值。本试验中,加载的功率为 13.65 W,加热 90 s,稳定并采集数据 300 s。

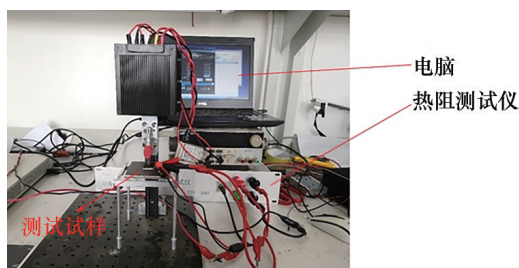


图2 试样热阻测试平台

1.5 涂层微观结构观察

由于涂层试样导电性能较差,首先对其表面进行喷金处理。随后采用扫描电子显微镜观察涂层的微观结构。

2 结果与分析

2.1 变压器涂层传热过程分析

当热量从高温物体传到低温物体时,即为发生了热传递现象。热量在传递过程中主要有热传导、热辐射和热对流 3 种形式。

热传导是由于物质中大量的分子热运动互相撞击,而使能量发生传递。电子、声子、光子是固体材料内部最为主要的 3 种导热载体,上述微观粒子间的相互作用和碰撞是材料导热的根本原因。对

金属而言,其导热载体主要为电子,由于电子质量轻,并且能迅速传递热量,因此金属具有很高的热导率。对于高分子材料和无机非金属而言,由于自由电子较少,通常通过晶体点阵或者晶格振动来实现热量的传递过程。量子化的晶格振动称为声子,是材料中的导热载体^[13]。防腐涂层由高分子材料反应固化得到,其结晶度较低,并且晶体缺陷较多,因而其热导率较低。

物体由于具有温度而辐射电磁波的现象称为热辐射,其能量的传递不需要介质^[14]。热对流作为流体进行传热的主要方式,主要是通过流动介质热微粒由空间的某一位置向另一位置进行热能传播^[15]。

结合变压器的结构特点及工作原理分析其散热过程。油浸式变压器工作时,会在铁芯、绕组以及金属结构件中形成损耗,随后损耗会在变压器内部逐渐转变为热量,热量从变压器绕组、铁芯和金属结构件内部通过热传导的方式传热至发热体表面^[16];热源与变压器油(冷却介质)存在温差,热量以热传导和热对流的形式传递至变压器油中,接受热量升温的变压器油密度减小,在浮力与重力的作用下,热油上升冷油下降,形成变压器油的初始流动;当变压器油流动接触至油箱内壁后,再次通过热传导和热对流的方式将热量传递至油箱内壁;油箱内壁到油箱外壁之间通过热传导的形式传输热量,之后同样以热传导的形式将热量传输至表面防腐涂层;最后通过热对流和热辐射将热量传递给周围环境的空气等介质^[17]。图 3 为变压器散热过程各阶段传热形式的流程图。因此对于防腐涂层自身的传热而言,其导热系数以及辐射率将决定其最终的热阻值的大小。

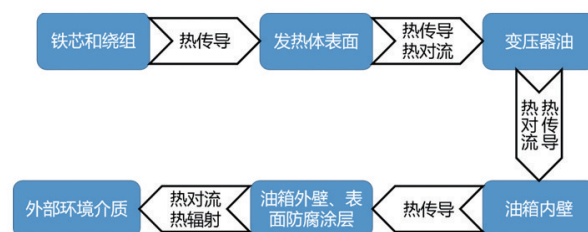


图3 变压器散热过程各阶段传热形式

热量从发热源铁芯和绕组产生,在向外传递的过程中,会经过变压器油、变压器金属外壳、防腐涂层,最终传递到外部空气中。而在每一个步骤之间均是串联关系,也就是说某一阶段向后所传递的热量完全来源于上一阶段。因此可以认为一个近似理想的情况:铁芯和绕组向外部空气中所传递的热量必须依次经过期间所穿过的每种材料。

不同材料的热阻不同,热阻的大小决定温度降低的程度以及热量传递的效率。热阻越小,材料整体热传递的效率越高,相反,热阻越大,效率就越低。在整个热传递过程中对传热效率影响最大的是热阻最大的传热阶段,称之为“散热的控制阶段”。而作为通过声子进行传热的涂层材料,很显然在其内部的散热过程是变压器散热的控制阶段。

2.2 涂层导热性能参数测量结果

为了对比高导热涂层以及传统溶剂型涂层和环保水性涂层的导热性能,分别测试了试样的导热系数、辐射率、热阻值,每个测试项目重复3次,最终取平均值(表1)。

表1 涂层导热性能参数测量结果

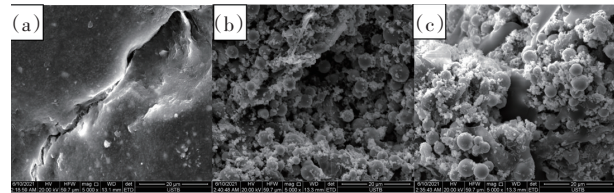
涂层类型	导热系数 $/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	辐射率	热阻 $/(^{\circ}C \cdot W^{-1})$
传统溶剂型涂层	0.1546	0.9178	4.57
环保水性涂层	0.2564	0.8513	4.28
高导热涂层	1.3450	0.8539	2.51

通过测量结果可以看出,高导热涂层的导热系数要明显高于传统溶剂型涂层和环保水性涂层;传统溶剂型涂层的辐射率略高于其他2种水性涂层。但从热阻值来看高导热环保涂层的热阻最小,环保水性涂料次之,传统溶剂型涂层的热阻最大,表明高导热环保涂层的传热性能最为优异,相比较其他2种涂层具有了较大幅度的提升。

2.3 涂层微观结构及附着力分析

为了分析导热物质添加对涂层导热性能影响机制,采用扫描电镜对传统溶剂型涂层、水性环氧富锌涂层、高导热涂层的微观结构进行观察,结果如图4所示。

根据图4(a)丙烯酸聚氨酯涂层的微观形貌观



(a) 传统溶剂型涂层 (b) 水性环氧富锌涂层 (c) 高导热涂层

图4 涂层微观形貌

察结果,可以看出传统溶剂型涂层存在着2种比较典型的微观缺陷:孔隙和裂纹。这主要是因为当涂料喷涂在金属基体表面上后,需要经历一段时间的固化过程,在这个阶段内,尚处于半固态的涂料中存在大量的有机溶剂,而涂料变为涂层的过程就是有机溶剂挥发的过程。随着溶剂的挥发,在涂层内部留下了孔隙等缺陷^[8],再加上涂层体积的收缩,固化后涂层的不同部位之间会出现一定的内应力,导致在缺陷附近相对薄弱的位置可能会出现微小的裂纹。由于涂层内部存在这种缺陷尺寸十分微小,孔隙的尺寸通常在 $20 \mu\text{m}$ 内,而微裂纹的宽度一般也小于 $5 \mu\text{m}$,再加上涂层的厚度往往可以达到几百甚至上千微米,因此该涂层仍能起到对金属基体良好的防护效果^[9]。

观察图4(b)环保水性涂层微观形貌特征,可以发现与溶剂型丙烯酸聚氨酯涂层结构差别较大,涂层整体略显松散,但同样存在着较多的缝隙。涂层中均匀分布着大量球状和絮状物质,球状物质为锌粉,絮状物质可能是环氧树脂。

从图4(c)改性高导热涂层微观形貌可以看出,除了表面分布有球状锌粉和絮状物质外,表面还分布有片层状的高导热添加物,该物质在涂层中分布较为均匀。

对添加6%高导热物质涂料的附着力参照《GB/T 9286—1998 色漆和清漆漆膜的划格试验》进行测试,结果如图5所示。可以看出切割边缘完全平滑,无一格脱落,对附着力进行评级为0级。表明该涂层在试样表面具有很好的附着性能。

2.4 涂层导热性能提升分析

3种不同涂层的传热机理如图6所示。丙烯酸聚氨酯涂层以及环氧树脂本身属于高分子材料,没有金属的自由电子,主要需要依靠声子进行热量传

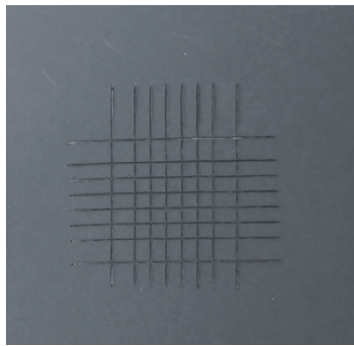
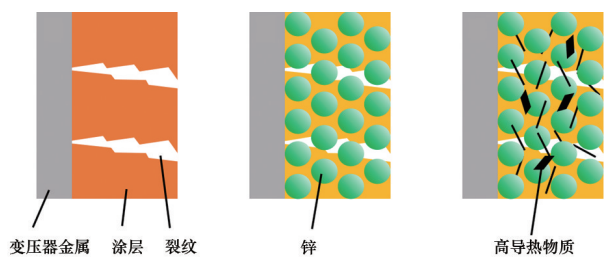


图5 添加6%高导热物质涂料的附着力测试结果



(a) 传统溶剂型涂层 (b) 环保水性涂层 (c) 高导热涂层
图6 3种涂层传热机理

递^[20]。因此传统溶剂型涂层的传热性能相比其他2种涂层最差。

环保水性涂层中富含大量Zn粉微小颗粒,金属锌中存在着大量的自由电子,可以作为良好的传热介质,但通过对微观形貌分析(图4(b))发现绝大多数Zn颗粒之间并没有良好的接触,反而是由絮状的环氧进行交联固定,这导致锌颗粒之间依然是相对孤立,并没有形成导热通路或传热网络。最终在导热性能上表现的结果则是相比传统油性涂层具有一定的提升,但并没有较大的改变。

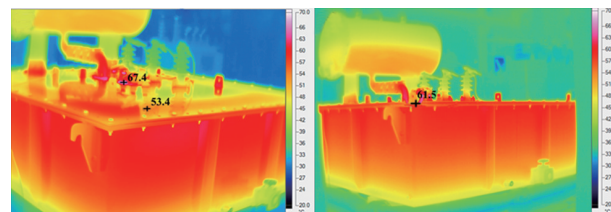
而针对高导热水性环氧富锌涂料而言,添加高导热物质后,一方面对碳材料而言,尤其是石墨烯,碳碳原子间共价键强而碳原子质量小,声子声速较高,以弹道-扩散的方式进行热量传递,因而导热性能增强;另一方面,添加的高导热物质在涂层中填充在孔隙和裂纹位置处,很大程度上提高了涂层的致密度,构建了变压器金属和外部环境的热量传递通道^[21,22]。因而进一步使得涂层导热性能得到提升。同时由于涂层缺陷数量减少,使得其耐腐蚀性和防护性能增强。

2.5 变压器温升模拟试验

为了进一步验证石墨烯、碳纳米管、碳纳米角和超细石墨粉混合物添加后对涂层导热性能的影响,采用变压器温升模拟实验分别对涂装传统溶剂型涂层和改性高导热涂层的变压器的温升进行测试。采用的变压器型号为S13-200/10,电压等级为10 kV。变压器外壁和内壁涂层厚度约为356.2 μm和413.2 μm,变压器油箱尺寸为2 m×2 m×0.65 m,油箱壁厚度为6 mm。图7显示了变压器温升测试装置,将变压器置于油箱中,施加的功率损耗为3.5 kW。采用红外测试仪测试变压器油箱表面温度分布(图8)。可以看出油箱内顶层油温度明显高于底层油温度,相差达到了18 K。



图7 变压器温升模拟试验



(a) 传统溶剂型涂层 (b) 改性高导热涂层

图8 变压器表面温度分布

同时采用2个温度探头测试变压器油顶层温度、3个温度探头测试环境温度,按照式(1)计算顶层油温升

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta_a \quad (1)$$

其中, θ_0 为在施加总损耗的试验阶段测定的油顶层温度; θ_a 是在施加总损耗的试验阶段结束时的外部冷却介质温度,即环境温度。

环境温度和油顶层温度测试结果如图9所示,其中B、C、D表示环境温度,E、F表示油顶层温度。采用式(1)进行计算后发现,传统溶剂型涂层变压

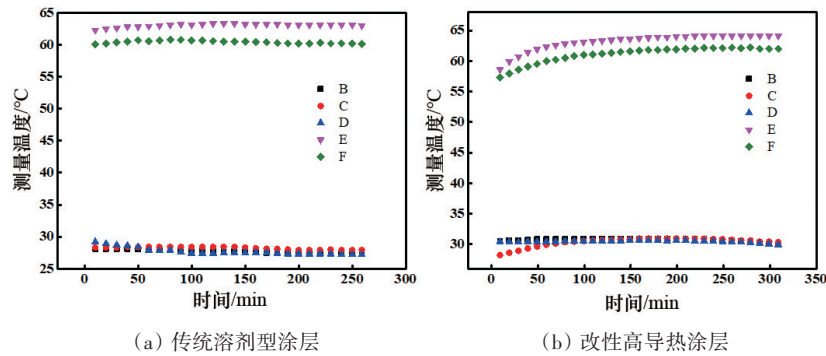


图9 变压器5个温度探头的测试结果

器顶层油温温升为 34.1 K; 改性高导热涂层的顶层油温温升为 32.4 K, 表明研制的新型高导热环保涂层可降低变压器温升 1.7 K。

为了进一步验证变压器温升模拟实验的可靠性, 同时比较未添加高导热物质的水性环氧富锌涂层的温升现象, 对变压器温升值进行理论计算。

电力变压器在运行时, 热量由绕组、铁芯和各部件产生, 通过变压器油以热对流方式将热量传递给油箱的内壁漆, 内壁漆通过热传导把热量传递油箱壁, 油箱壁在传导给油箱外壁漆, 最后油箱外壁漆以热对流和热辐射方式向周围环境散热。其中外壁漆对空气散热以热对流占据主导, 因此温升推导过程中假定外壁漆对空气的散热均以热对流的方式进行。

热传导是依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热能传递。可通过式(2)进行计算

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

式中, Φ 为热量, W; λ 为热导率, W/(m·K); A 为面积, m²。

当变压器散热过程达到稳态时, 传输的热量为从 0 到介质厚度稳态的积分, 可得到

$$q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{\delta} \quad (3)$$

即热传导导致的温差为

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{q\delta}{\lambda} \quad (4)$$

热对流是冷、热流体相互掺混所导致的热量传递过程, 其表达式为

$$\Phi = hA\Delta t \quad (5)$$

通过热对流传输的单位热量为

$$q = h\Delta t = h(t_w - t_f) \quad (6)$$

式中, q 为单位热量, W/m²; h 为表面传热系数, W/(m²·K); A 为面积, m²。

因此可得到热对流导致的温差为

$$\Delta t = t_w - t_f = \frac{q}{h} \quad (7)$$

根据上述分析可得到对流到油箱温度降差值为

$$\Delta t_1 = \frac{q}{h_{\text{油}}} \quad (8)$$

油箱内壁漆的温度降差值为

$$\Delta t_2 = \frac{q\delta_1}{\lambda_1} \quad (9)$$

油箱壁的温度降差值为

$$\Delta t_3 = \frac{q\delta_2}{\lambda_2} \quad (10)$$

油箱外壁漆的温度降差值为

$$\Delta t_4 = \frac{q\delta_3}{\lambda_1} \quad (11)$$

对流到空气中的温度降差值为

$$\Delta t_5 = \frac{q}{h_{\text{空气}}} \quad (12)$$

式中, $h_{\text{油}}$ 为油与内壁漆对流系数, 依据散热条件不同一般在 50~100 W/(m·K), 本研究取 80 W/(m·K); δ_1 、 δ_3 为涂层厚度, μm ; δ_2 为油箱壁壁厚, mm; $h_{\text{空气}}$ 为空气外壁漆与空气对流系数, 依据散热条件不同一般为 5~20 W/(m²·K), 本研究取 14 W/(m²·K); λ_1 为涂层热导率, W/(m·K); λ_2 油箱壁碳钢材

料热导率, $W/(m \cdot K)$, 本研究取 $49 W/(m \cdot K)$ 。

因此, 变压器油顶层对于环境温度的总温度降为

$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 \\ &= \frac{q}{h_{\text{油}}} + \frac{q\delta_1}{\lambda_1} + \frac{q\delta_2}{\lambda_2} + \frac{q\delta_3}{\lambda_1} + \frac{q}{h_{\text{空气}}} \\ &= q \left(\frac{1}{h_{\text{油}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_1} + \frac{1}{h_{\text{空气}}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

通过式(13)可计算获得油性丙烯酸聚氨酯涂层的温升为 33.83 K; 水性环氧富锌涂层的温升为 33.08 K; 添加高导热物质的水性环氧富锌涂层的温升为 32.16 K。因此与丙烯酸聚氨酯和水性环氧富锌涂料相比, 添加高导热物质后, 变压器的温升分别降低了 1.67 K 和 0.92 K。这与变压器温升模拟实验结果基本吻合。

3 结论

1) 添加了高导热物质后, 水性环保涂层导热性能显著提高, 达到 $1.3450 W/(m \cdot K)$, 水性环氧富锌涂层之 ($0.2564 W/(m \cdot K)$), 丙烯酸聚氨酯涂层较差 ($0.1546 W/(m \cdot K)$)。从热阻来看, 高导热涂层的热阻最小, 为 $2.51^\circ\text{C}/W$, 水性环氧富锌涂层次之, 传统溶剂型涂层的热阻最大。

2) 本研究的改性高导热涂料导热性能的提高主要与其导热方式的优化和涂层致密性的提高有关。传统溶剂型涂料主要以声子形式进行热量传递。向水性环氧富锌涂料加入高导热填料后, 一方面增加了弹道-扩散的热量传递方式。另一方面添加的高导热物质在涂层中填充在孔隙和裂纹位置处, 很大程度上提高了涂层的致密度, 构建了变压器金属和外部环境的热量传递通道, 因而使得涂料导热性能得到了显著提高。

3) 与传统溶剂型涂层和水性环氧富锌涂料相比, 本研究得到的新型高导热环保涂层可降低变压器油顶层温升 1.67 K 和 0.92 K。

参考文献 (References)

- [1] 栾福明. 智能电网趋势下北京N公司发展战略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [2] 刘腾跃. 纳米 SiO_2 改性变压器油的热物性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [3] 郭亚丽. 电力变压器油纸绝缘老化分析及其机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [4] Redline S. IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers[R]. New York: IEEE, 2012.
- [5] 王亮亮, 刘方. 高导热聚丙烯复合材料导热性能的研究[J]. 广东塑料, 2005(8): 49-52.
- [6] 井新利, 李立匣. 石墨-环氧树脂导热复合材料的研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(10): 106-107.
- [7] 严栋. 导电/导热纳米复合材料的制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [8] Sayata G, Kent A W, Donavon M D, et al. Incorporation of multi-walled carbon nanotubes into high temperature resin using dry mixing techniques[J]. Composites Part A, 2005, 37(3): 465-475.
- [9] Yin Yu, Shao Junpeng, Zhang Lin, et al. Study on heat conduction and adsorption/desorption characteristic of MIL-101/few layer graphene composite[J]. Journal of Porous Materials, 2021(28): 1197-1213.
- [10] 翟德怀. 基于 Hot Disk 的薄板材料导热系数测量方法的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [11] 徐慧, 杨杰. 瞬态热带法和瞬态平面法测量材料热传导系数[J]. 测控技术, 2004(11): 71-73.
- [12] 侯成刚, 张广明, 赵明涛, 等. 用红外热成像技术精确测定物体发射率[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(3): 193-198.
- [13] 袁世平, 姜培学. 固态金属中声子热传递的分子动力学模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(S1): 175-178.
- [14] 西格尔, 豪厄尔. 热辐射传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [15] 郝恒东, 孙超, 夏克青. 湍流热对流中的动力学和传热研究[J]. 物理, 2006, 35(4): 265-268.
- [16] 张志伟, 张志慧. 10 kV 配电变压器发热原因分析[J]. 农村电工, 2019, 27(10): 42.
- [17] 李晓宁. 电力变压器发热分析[J]. 中国科技投资, 2017, 27: 80-84.

- [18] Antonio Campo. Statistical heat transfer from uniform annular fins with high thermal conductivity coating[J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 2001, 15(2): 242-245.
- [19] 张玉平. 脉冲电沉积技术制备硅烷/氧化石墨烯复合涂层及其电化学性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [20] 薛杨. 导热绝缘硅橡胶复合材料的结构设计及性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [21] Li J, Liang J, Liu Y M. High-thermal conductive coating used on metal heat exchanger[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, 22(5): 596-601.
- [22] Andrey M A, Sergey V K, Fedor M S. High thermal conductivity composite of diamond particles with tungsten coating in a copper matrix for heat sink application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 48(1): 72-80.

Research on improving thermal conductivity of transformer anti-corrosive coating

MO Juan, XU Jin, FAN Baozhen, LIU Rui

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Abstract This study aims to develop a new type of environmentally friendly high thermal conductivity anti-corrosive coating for transformers. Graphene, carbon nanotube, carbon nano-horn and ultrafine graphite powder mixture are used to modify the thermal conductivity of the coating on the transformer surface. The thermal conductivity and microstructure of traditional solvent-based coatings, water-based epoxy zinc-rich coatings, and modified high thermal conductivity coatings are analyzed. Results show that the modified high thermal conductivity coating has the smallest thermal resistance (2.51 °C/W) and the highest thermal conductivity (1.3460 W/(m·K)), indicating that its thermal conductivity is significantly better than those of the other two traditional coatings. This enhancement is mainly related to the optimization of the type of thermal conductivity and the improvement of coating density. After adding high thermal conductivity filler to the waterborne epoxy zinc-rich coating, a ballistic-diffusion scheme of heat transfer is formed. On the other hand, the added high thermal conductivity material fills the pores and cracks in the coating, which greatly improves the density of the coating and builds a heat transfer channel between transformer metal and external environment. The transformer temperature rise simulation experiment shows that the high thermal conductivity coating can reduce the top layer temperature rise of transformer oil by 1.67 K.

Keywords transformer; water-based epoxy zinc-rich coatings; high thermal conductivity materials ●



(责任编辑 陈广仁)