

树脂浇注互感器的防开裂措施及缓冲设计

宋仁丰 管永秋 高琦

(大连北方互感器集团有限公司, 辽宁 大连 116299)

摘要 互感器内部树脂的开裂是导致产品不合格的一个主要因素, 一些细小的裂纹是用各种手段无法检测到的, 他会直接影响产品质量。导致这个现象的主要原因是因为树脂在固化的时候受应力的影响。本文通过科学的计算, 在产品内部增加了各种缓冲设计, 从而解决了应力的问题, 从根本上解决开裂问题, 稳定产品质量。经过多年的实践运行, 达到预想效果, 对企业的竞争力提升贡献了足够的力量。

关键词 固化 内应力 收缩 缓冲 计算

中图分类号: TH87

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2021)08-0005-03

1 概述

目前国内浇注式互感器基本选用环氧树脂和不饱和树脂, 树脂在固化过程中会产生一定的缩比, 通常不饱和树脂的固化收缩率大于环氧树脂的固化收缩率, 树脂混合胶固化过程中会产生一定应力, 在应力作用下, 互感器内部会出现裂纹, 严重时产生开裂现象; 若树脂固化的收缩应力作用到铁心上, 将使铁心导磁性下降, 影响产品误差或励磁性能。

互感器的器身是由一次绕组、二次绕组及其它金属构件组成的, 考虑产品运行发热, 尤其是短路状态下突然升至高温膨胀。为了减小浇注式互感器固化过程中的收缩应力及运行时温度变化引起的应力, 在互感器设计时, 需在器身和浇注绝缘之间加缓冲层。

2 树脂浇注互感器的内应力计算及开裂原因

浇注件中的内应力可按材料力学基本公式(应力=形变×模量)进行计算和分析:

$$\sigma_{\text{内}} \approx (\Delta L_s + \Delta L_a) \times E_r = [\Delta L_s + (a_k - a_s) \times (T_2 - T_1)] \times E_r \quad (1)$$

$\sigma_{\text{内}}$ ——内应力。

ΔL_s ——树脂固化收缩时形变量。

ΔL_a ——树脂与内部制件线膨胀系数之间差异产生的形变量。

E_r ——树脂弹性模量。

a_k ——树脂线膨胀系数。

a_s ——树脂内部制件膨胀系数。

T_2 ——树脂固化反应时温度。

T_1 ——最低使用或试验温度。

浇注式互感器的一、二次绕组、铁心、金属支承件等的收缩系数均与树脂混合料的收缩系数不同, 有些材料几乎差一个数量级, 在树脂浇注及固化过程中, 经过加热——树脂混合料反应放热——固化——冷却过程。在热状态下, 由于强烈的交联, 树脂混合料会放出更多的热量, 在浇注体冷却到常温的过程中, 加剧了制件的膨胀、收缩, 在浇

注件内部产生较大的内应力, 这些内应力的存在是导致浇注件开裂的根本原因, 特别是尺寸较大的浇注互感器, 由于体积较大, 产品收缩不均匀, 轻则在制件内产生轻微缺陷, 或不规则轻微裂纹, 轻微裂纹会给互感器造成隐患, 导致互感器局部放电电量超标; 重则会在浇注件冷却后的一段时间里直接产生贯通性开裂, 这种开裂导致绝缘破坏, 工频耐压击穿, 使整台产品报废^[1]。

从公式(1)看浇注互感器内应力的产生主要有5方面原因:

1. 树脂固化收缩形变量 ΔL_s 引起的内应力。

2. 树脂与内部制件线膨胀系数差异产生的内应力 ΔL_a E_r , 表现为浇注体在冷热循环、短时热电流试验、长期运行时发热产生的内应力。

3. 树脂配方体系弹性差, 树脂模量 E_r 大, 产生内应力大。

4. 浇注体尺寸越大, 树脂层的厚度尺寸差异越大, ΔL_s 和 ΔL_a 值差异越大, 产品内应力越大。

5. 树脂耐热性差, 在高温或低温条件下丧失弹性和机械强度。使 E_r 发生变化导致应力变化。

3 浇注互感器从浇注材料及固化工艺方面采取的防开裂措施

浇注互感器从选择材料及浇注固化工艺采取的防开裂措施, 其目的均为使浇注体产生的内应力尽量小或尽量被吸收, 从而提高浇注体的耐开裂性。

3.1 浇注材料选择

浇注体固化收缩与多种因素有关, 要取得高质量的浇注体, 要有针对性地选择放热量低、韧性好, 能消除或缓解混合料应力的配方或有关材料。

1. 选择放热量低的树脂或固化剂, 保证浇注件在长期运行时仍有弹性。

2. 提高树脂填料比例。填料的作用除提高浇注件的耐热性、耐寒性、耐磨性和导热性外, 降低浇注件的收缩率和热膨胀系数, 减少树脂混合料与内部制件热膨胀系数差异。树脂粘度一定的情况下多加入填料, 稳定混合料的热固性

收缩。防止大粒度硅微粉形成沉淀。

3. 使用线膨胀系数小的填料, 如熔球形硅微粉, 或成本较低天然亚球形硅微粉, 其线膨胀系数较小。

4. 采用“海岛结构”的新型增韧剂材料, 使材料的断裂韧性增大, 提高树脂混合料的断裂韧性, 降低弹性模量。

5. 适当加入增韧剂或活性增韧剂。但过多加入会影响材料耐热性能。

3.2 固化温度的控制

1. 树脂混合料通过温度控制固化速度, 较低温度下进炉预胶化, 通过阶梯升温再固化。

2. 控制冷却速度。浇注体经固化、熟化反应后缓慢冷却。

4 互感器内部构件的形状要设计成分散应力的尺寸形状

浇注体内的一次绕组、二次绕组及定位支架等构件的形状最好设计成圆弧形, 内制件尖角、锐棱都要加工成圆角。

5 互感器缓冲设计

从树脂混合胶材料选择、固化温度及内部构件形状方面考虑, 措施在实际应用中是有效的, 但仅从这几个方面采取措施, 不能完全解决应力引起的铁心性能下降, 造成误差及励磁特性变化的质量问题, 也不能完全避免内部出现开裂的问题。因此在互感器的器身和浇注绝缘之间设有缓冲层。

缓冲层材料的选择没有固定的方式, 缓冲厚度可以通过试验的方法确定的。也可以通过计算确定, 下面以微孔橡胶为基础的缓冲层材料为例研究浇注绝缘电工产品中的最佳缓冲层厚度的计算方法:

环氧混合胶的总的线收缩率 δ 是由固化进的化学线收缩率 δ_x 和冷却到最低使用温度时的温度收缩率 δ_T 叠加的, 并按下式确定:

$$\delta = \delta_x + \delta_T \quad (2)$$

$$\text{式中 } \delta_x = [1 - (1 - x)^{1/3}] \quad (3)$$

$$\delta_T = [(T_2 - T_1) (a_k - a_s)] \quad (4)$$

X——体积化学收缩系数。

l——浇注件的最大线尺寸。

T_2 ——混合胶的固化温度。

T_1 ——最低使用或试验温度。

a_k ——混合胶的线膨胀系数。

a_s ——浇注件的线膨胀系数。

为了使得环氧浇注体中不致产生危险应力, 浇注件的缓冲层就有足够的厚度、弹性和疏松度。由于环氧混合胶收缩, 导致缓冲层体积压缩, 并使得其气泡中的压力 P 增加。气泡中的压力由浇注件及环氧混合胶承受, 它首先应小于混合胶的断裂强度极限, 其次不应超过对压缩敏感的浇注件的允许压力。

可近视认为包含在缓冲层中气泡的排布是规律且均匀,

即可得出缓冲层中气泡在最大压缩状态下的总体积方程:

$$V_1 = P_a T_1 V / (P T_2) \quad (5)$$

式中:

P_a ——大气压力。

P——缓冲层气泡中的最大允许压力。

V——初始状态下缓冲层中气泡的总体积。

引用符号 $k = V_0 / V$ 作为缓冲层疏松度系数, 这里的 V_0 是初始状态下缓冲层所占有的体积, 即可得出所需之缓冲层厚度:

$$d = l_0 k [1 - (1 - x)^{1/3} + (T_2 - T_1) (a_k - a_s)] / 2 [1 - P_a T_1 / (P T_2)] \quad (6)$$

在计算 k 时, 用比重的比值代替了体积比值, 亦即取:

$$k = \rho_p / (\rho_p - \rho_n)$$

例如: ρ_p ——以丁基橡胶为基础的再生橡胶的比重, 取值: 1.25 g/cm^3 ;

ρ_n ——实验得出的微孔橡胶缓冲层的比重 $\rho_n = 0.5 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$ 。

铁心和一次绕组缓冲层气泡中的最大允许压力 P 是按不同方法计算的。对于铁心, P 值是铁心的允许压力 P_1 与混合胶在浇注时的静压力 P_0 之差 $P = P_1 - P_0$ 。

铁心的允许压力 P_1 与铁心的内外、径尺寸、高度及铁心形状有关, 对于圆环形铁心, 内外径差越大其允许压力越大, 对于方形铁心或长孔铁心其允许压力较圆环形铁心要小, 例如: 10KV 真空浇注的支柱式结构互感器, 在铁心外径相同的情况下, 大变比的铁心内径较大, 铁心厚度相对较薄, 相同工艺加工的产品, 铁心较薄的出现误差及励磁特性变差的几率大; 对于带壳的铁心则由外壳的允许压力确定。

混合胶层的静压力由注型高度 h 和混合胶的比重 ρ_k 下式确定:

$$P_0 = \rho_k g h$$

缓冲设计应考虑到在一次绕组短路电流下一次绕组的急剧膨胀所需缓冲层厚度 d 计算公式:

$$d = l_0 k [1 - (1 - x)^{1/3} + (T_2 - T_3) (a_k - a_s) + (T_4 - T_3) a_s] / 2 [1 - P_a T_3 / (P T_4)] \quad (7)$$

公式 (7) 中, $T_3 = 273 \text{ K}$; T_4 ——在短路电流下一次绕组的最高发热温度。

取: 树脂混合胶体积化学收缩系数 $x = 0.015$; 混合胶的线膨胀系数 $a_k = 35 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; 铜线膨胀系数, $a_M = 17.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

以某电流互感器一次绕组长度尺寸为 200mm 为例, 考虑一次绕组短路状态, 及耐寒条件按公式 (7) 缓冲层所需厚度计算如下:

混合胶的最佳断裂强度取 $P = 0.3 \text{ MPa}$, 对应于互感器耐寒性试验温度取 $T_1 = 233 \text{ K}$, 混合胶的浇注和固化温度取 $T_2 = 403 \text{ K}$, $T_3 = 273 \text{ K}$; T_4 ——在短路电流下一次绕组的最高发热温度, 取: $T_4 = 523 \text{ K}$ 。

(下转第 35 页)

适的菜品。在点菜的过程中,要善于倾听客人在点菜时的相互称谓,把称谓在菜单上进行登记,方便在服务过程中准确的称呼客人。

从酒店需求的角度看,智能酒店业务发展的主要项目包括智能交互酒店管理理念、智能酒店产业联盟、酒店产品销售网络。在酒店的智能化管理概念中,智能技术是酒店的整体管理,主要结合先进的智能化方法实现酒店的监控和智能化管理,提高监控的整体质量,创造良好的管理水平。在酒店产品的品质和开发中发挥着重要的作用,运用高度智能化的技术提高酒店管理水平是酒店行业可持续发展的前提。另外,结合其他酒店的先进管理模式和经验,智能酒店管理的主要发展目标是智能接待、餐饮、客房管理系统、方便客人和互动服务系统,酒店智能化服务是酒店的核心服务,是推动酒店发展的主要因素。原则上,智能酒店是通过智能酒店满足消费者的所有需求,提高智能酒店的服务质量,以智能方式为消费者提供服务。目前,智能酒店服务的主要发展目标是智能客房项目和国际客户服务门户的开发,在电子旅游和移动商务的支持下,智能酒店事业得到了广泛发展,是一种利用智能服务开展商务活动的新型智能酒店事业服务方式。原则上,为了电子商务、移动商务和其他商业活动组合不同的智能解决方案,反映其智能性,意味着创造更高水平的商业价值。

5 结语

信息时代的发展对酒店的信息管理提出了新的要求,为顾客提供舒适、快速高效的服务,根据不同客户的需求提供定制服务,把使用成本控制在最小限度。为了提高劳动生产率,必须活用新的高科技信息技术。利用先进技术,不仅改善了酒店的网络信息平台,还实现了酒店的信息需求和智能定位。网络营销得到了实现,利用商业情报收集信息,形成竞争优势,提高酒店管理与决策能力,实现了管理的统一和多元化,提高酒店管理能力,促进酒店全面发展。

参考文献:

- [1] 邢卫平.新兴信息技术在酒店信息管理中的应用[J].中外企业文化,2020(11):45-46.
- [2] 丁蕾颖,兰海翔,卢涵宇,祁小军,薛安琪.餐饮酒店信息管理系统设计与实现[J].电脑知识与技术,2019,15(25):152-154.
- [3] 唐启政.酒店信息管理系统的设计与实现[D].吉林大学,2016.
- [4] 靳静,于愿昭.酒店信息管理系统结构分析[J].科技信息,2012(24):143.
- [5] 施蓓琦,陈能,杨荫雅.新兴信息技术在酒店信息管理中的应用[J].商场现代化,2007(30):92-94.

(上接第6页)

按公式: $k = \rho_p / (\rho_p - \rho_n)$

式中 ρ_p ——以丁基橡胶为基础的再生橡胶的比重,取值: 1.25g/cm^3 ;

ρ_n ——实验得出的微孔橡胶缓冲层的比重 $\rho_n = 0.51\text{g/cm}^3$ 。

计算 $k=1.69$ 。

则缓冲层厚度: $d = 200 \times 1.69 [1 - (1 - 0.015)^{1/3} + (403 - 273) (35 - 17.5) \times 10^{-6} + (523 - 273) \times 17.5 \times 10^{-6} / 2 [1 - 1.01 \times 10^5 \times 273 / (3 \times 10^5 \times 523)]] \approx 2.4\text{mm}$

此计算实例仅是采用丁基微孔橡胶时的情况,当采用其它缓冲材料时应按具体材料压缩状态下的体积变化量来考虑,采用不同缓冲材料时,缓冲厚度是有差别的。常用的缓冲材料有皱纹纸、软橡胶带或橡胶板、发泡硅胶板、聚胺脂板、泡沫塑料等。

目前常用互感器浇注工艺主要有常压浇注和真空浇注两种,对常压浇注的互感器缓冲材料可以采用皱纹纸。对真空浇注的电流互感器的缓冲材料在没有封闭处理的情况下建议不采用皱纹纸作缓冲材料,因为真空浇注状态下,环氧树脂容易渗入皱纹纸,固化后皱纹纸与树脂固为一体,起不到缓冲作用。缓冲材料可以选用软橡胶带或橡胶板、发泡硅胶板、聚胺脂板、泡沫塑料等,需要考虑真空浇注后恢复常压过程中缓冲材料的微气孔不应被树脂胶填充而导致缓冲失效,在设计缓冲方案时应考虑缓冲的密封,避免

树脂填充微气孔^[2]。采用软橡胶带或橡胶板做为缓冲材料时,由于缓冲材料是实体的,压缩状态下的体积变化量不大,因此缓冲层的厚度要设计得略大一些。

缓冲材料要求柔软、有弹性,在较高温度下不变硬,缓冲量应能补偿树脂固化的收缩量及产品加工及运行过程的高低温金属构件产生热胀冷缩的尺寸变化量,以保证产品不产生裂纹甚至开裂。缓冲层的厚度既要考虑缓冲材料的弹性,还要考虑构件尺寸,包括断面尺寸及轮廓尺寸,尺寸越大缓冲厚度应越大,而且各个方位所加的缓冲层的轮廓大小应略大于构件的轮廓。

6 结语

本文介绍了浇注互感器的内应力产生原因,从浇注材料及固化工艺方面采取的浇注互感器防开裂措施,互感器内部构件的形状设计成圆弧形状或圆角可以消除应力集中,重点介绍了互感器的缓冲设计。笔者认为互感器缓冲的合理设计是防开裂和防铁心性能下降的重要措施,能有效提升产品合格率以及提高运行的稳定性、可靠性及使用寿命。

参考文献:

- [1] 肖耀荣.浇注互感器缓冲层最佳厚度的计算[J].变压器,1986(04):30.
- [2] 李北光.氧树脂浇注互感器开裂原因及预防措施[J].变压器,1994(11):45.