

环氧树脂绝缘子固化过程中的温度场仿真分析

张晋宇

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19031

[摘要] 以双酚A型环氧树脂酸酐固化体系的盆式绝缘子为研究对象,采用Comsol有限元分析软件搭建烘箱、模具、绝缘子一体化仿真模型,基于 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟烘箱内流体场与温度场的耦合变化,计算0至700 min固化过程的温度场分布规律,并开展实物试验。固化过程中绝缘子凹面与凸面存在温差,最大温差达9.81℃,仿真与实测数据最大误差1.8%。

[关键词] 环氧树脂绝缘子; 固化过程; 温度场Comsol仿真; $k-\varepsilon$ 湍流模型

中图分类号: F767.6 **文献标识码:** A

Simulation Analysis of Temperature Field during the Curing Process of Epoxy Resin Insulators

Jinyu Zhang

China Southern Power Grid UHV Transmission Company

[Abstract] This study focuses on a basin-type insulator made of bisphenol A epoxy resin with an anhydride curing system. An integrated simulation model of the oven, mold, and insulator was established using Comsol finite element analysis software. Based on the $k-\varepsilon$ turbulence model, the coupled variation of the fluid field and temperature field inside the oven was simulated. The temperature field distribution during the 0 to 700-minute curing process was calculated and subsequently validated through physical experiments. During the curing process, a temperature difference was observed between the concave and convex surfaces of the insulator, with a maximum temperature difference reaching 9.81 °C. The maximum error between simulation results and measured data was 1.8%.

[Key words] Epoxy Resin Insulator; Curing Process; Temperature Field; Comsol Simulation; $k-\varepsilon$ Turbulence Model

气体绝缘金属封闭开关设备的绝缘失效易引发电网故障。盆式环氧树脂绝缘子作为该设备的关键绝缘部件,其浇注固化过程受温度等因素影响^[1-2]。本研究以实际生产的盆式绝缘子为对象,采用Comsol开展固化温度场的仿真建模与试验验证,分析温度场的时空演变特性。

1 工况分析

环氧树脂绝缘子固化成型是将环氧树脂混合料注入浇注模具后,在设定温度下完成固化反应,混合料由悬浮液态转变为固态,形成对应尺寸的绝缘子制品。工业生产中,盆式绝缘子采用分段式固化工艺,混合料经浇注设备注入模具后进入烘箱进行一次固化,固化温度为130℃,固化时长12小时。盆式绝缘子的浇注模具为左右开模结构,烘箱为闭式循环加热结构。烘箱顶部布置8个循环风扇,风扇以2m/s的速度向上抽风,空气经顶部风扇流向烘箱两侧的加热腔体,加热后从烘箱底部两侧的入口进入中间腔体,与模具和绝缘子接触换热后再次经顶部风扇回流,形成闭式空气循环流场^[3]。

2 仿真模型建立

2.1 物理模型简化

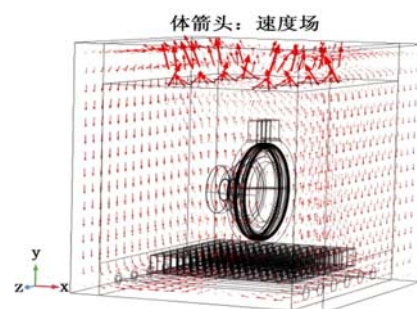


图1 烘箱流体场模型

仿真模型基于实际生产所用烘箱、模具和绝缘子的实体尺寸搭建,简化遵循以下方式:省去烘箱加热部分的腔体,在烘箱进风口处设置恒温恒速的空气流场。模具的结构尺寸按照实体参数建模^[4-5]。绝缘子模型在保持整体结构不变的前提下,对内

部折线较多的区域进行平滑处理^[6-7]。搭建的烘箱流体场模型可模拟固化过程中烘箱内的空气流动与换热特性,如图1所示:

2.2 数学模型构建

烘箱内的空气流动为完全湍流状态,选用k-ε 湍流模型开展流场与温度场的耦合模拟,该模型需求解湍动能k和耗散率ε 两个核心变量,其控制方程分别为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

式中,ρ 为流体密度,t为时间,u_i为流体时均速度,μ 为分子动力黏度,μ_t为湍流黏性系数,σ_k和σ_ε分别为与湍动能和耗散率对应的普朗特数,G_k为平均速度梯度引起的湍动能产生项,G_b为浮力引起的湍动能产生项,ε 为湍动能耗散率,Y_m为可压缩湍流中脉动扩张的贡献项,S_k和S_ε为用户定义源项,C_{1ε}、C_{2ε}、C_{3ε}为模型经验常数。

本研究中烘箱内的空气按不可压流体处理,浮力产生项G_b与脉动扩张贡献项Y_m均为0。模型经验常数取值为C_{1ε}=1.44,C_{2ε}=1.92,C_μ=0.09,σ_k=1.0,σ_ε=1.3。

3 计算条件设定

3.1 基础参数设定

仿真计算的基础参数参照工业生产的实际固化工艺设定,烘箱进风口的空气温度为403.15K,进风流速为2m/s,模具及绝缘子的初始温度为373.15K,烘箱的初始温度为403.15K,仿真计算的时间范围为0至700 min,时间步长设定为1 min。

3.2 固化放热模型

环氧树脂固化反应为放热反应,仿真模型中引入基于固化反应动力学的放热函数,定量描述单位时间内树脂固化产生的热量,其表达式为:

$$\dot{q} = \rho(1 - V_f) H_R \frac{d\alpha}{dt}$$

式中,ḡ 为单位时间内树脂固化产生的热量,ρ 为环氧树脂混合料的密度,V_f为混合料中无机填料的体积含量,H_R为单位质量树脂固化的总反应放热量,α 为树脂的固化度,da/dt 为固化度变化速率。

3.3 材料热物性参数

仿真涉及环氧树脂混合料、模具钢和空气三种材料,三种材料的热物性参数通过材料性能测试获得,具体参数如表1所示。

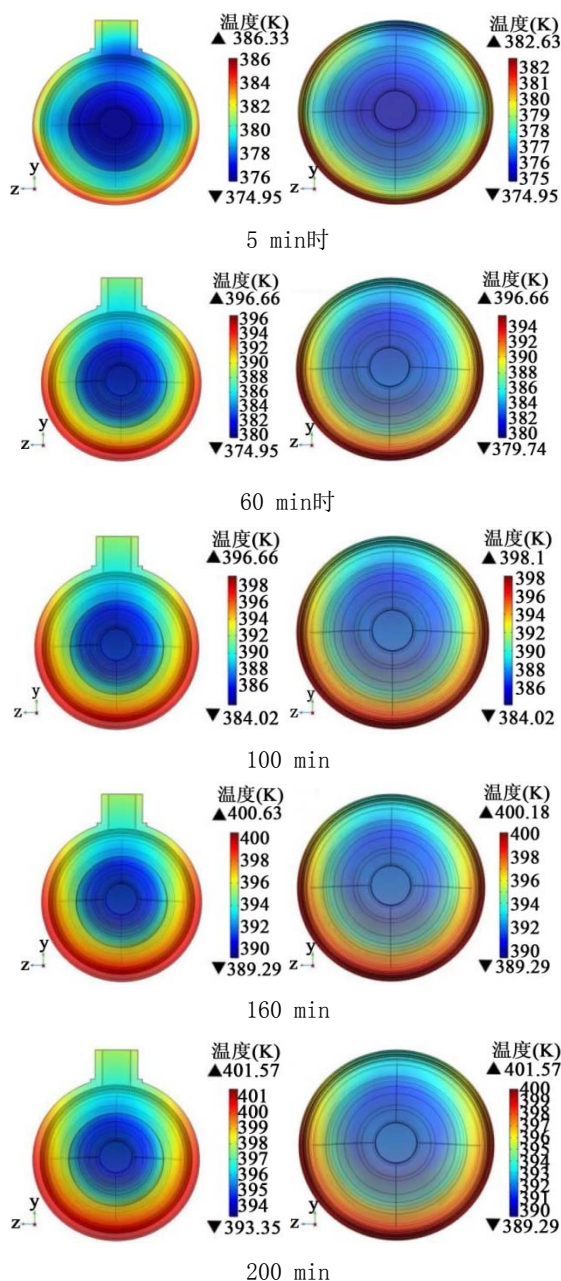
表1 仿真材料热物性参数

材料名称	比热容[J/(kg·K)]	热导率[W/(m·K)]	密度[kg/m ³]
环氧树脂混合料	1232	0.32	1862
模具钢	458	42.7	7852
空气	1007	0.026	1.18

4 温度场仿真计算

4.1 整体温度场演变规律

基于上述模型与参数,开展0至700 min绝缘子固化过程的温度场仿真计算。图2为不同固化时间下模具与绝缘子的温度分布图,清晰呈现了温度场的时空演变特性。固化初期的5 min,绝缘子整体温度偏低,仅底部与烘箱热空气接触的区域温度略有升高,整体温度维持在374.95K左右。固化60 min时,绝缘子底部温度持续升高,由下到上形成初步的温度梯度,底部温度高于上部温度。固化100 min时,绝缘子最外圈的温度显著高于中心区域,温度差值达3.81K。固化160 min至300 min,绝缘子整体温度持续上升,300 min时温度达到397.17K。固化360 min时,绝缘子温度趋于稳定,整体温度达399.03K。固化400 min时,绝缘子整体温度达到400K并保持稳定。



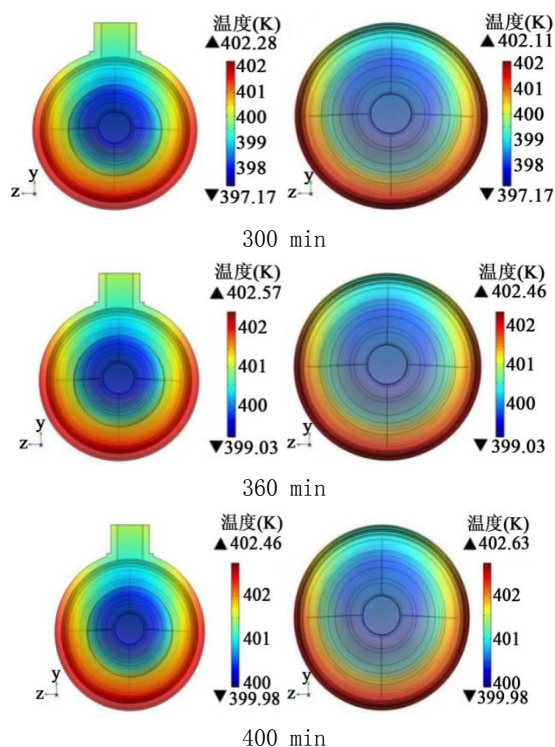


图2 不同固化时间下模具与绝缘子的温度分布图

4.2 绝缘子凹凸面温差特性

盆式绝缘子的凹面与凸面因结构差异,在固化过程中与热空气的换热效率不同,形成温度差^[8]。图3为固化80 min时绝缘子剖面的温度分布图,该时刻为凹凸面温差的峰值阶段。固化80 min时为凹凸面温差的峰值阶段,绝缘子底部凸面温度为398.01K,底部凹面温度为377.45K,凹凸面温差达9.81K。绝缘子上部凸面温度为394.21K,上部凹面温度为384.40K,凹凸面温差为4.74K。固化200 min时,凹凸面温差有所降低,底部凸面与凹面的温差为5.16K,上部凸面与凹面的温差为3.45K。绝缘子固化过程中凹面与凸面的温差均超过2℃。

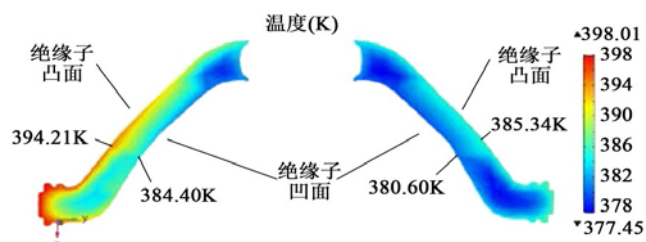


图3 绝缘子剖面80 min温度分布图

5 试验验证

5.1 试验方案设计

开展盆式绝缘子固化过程的温度场实测试验,试验采用与仿真模型一致的烘箱、模具和绝缘子,固化工艺参数与仿真设定相同,即130℃下固化12小时。在模具内部对应绝缘子的不同位置布置温度传感器,传感器沿绝缘子从上到下分布,选取4个关键测点(探针3、探针5、探针4、探针8)开展温度数据采集,

传感器的布置位置与仿真模型中的探针位置对应,温度传感器的测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,数据采集间隔为1 min,采集时间范围为0至700 min。

5.2 结果对比分析

将4个测点的实测温度数据与仿真计算数据对比,仿真曲线与实测曲线的变化趋势一致,各测点的温度差值最大不超过 2°C ,最大相对误差为1.8%。其中探针3测点在400 min时,仿真温度为 127.2°C ,实测温度为 125.1°C ,相对误差1.7%。探针8测点在400 min时,仿真温度为 121.3°C ,实测温度为 119.2°C ,相对误差1.8%。

4个测点的温度稳定时间呈现从下往上依次增加的规律,探针3作为最底部测点,在380 min时温度达到稳定,探针8作为最上部测点,在420 min时温度达到稳定。

6 结语

以双酚A型环氧树脂盆式绝缘子为研究对象,利用Comsol有限元分析软件搭建烘箱模具绝缘子一体化的仿真模型,基于k- ϵ 湍流模型模拟烘箱内流体场与温度场的耦合变化,计算0至700 min固化过程的温度场分布规律。开展实物试验后发现,实测与仿真数据的最大相对误差为1.8%,绝缘子固化过程中凹面与凸面最大温差达 9.81°C 。

参考文献

- [1]赵梦洁,杨海涛,王剑,等.高黏结性和低膨胀的玻璃粉/环氧树脂防火涂料的制备及防火性能[J].涂料工业,2026,56(01):7-12+18.
- [2]Mao R,Gu X,Jiang J,et al.Thermal Field and High-Temperature Performance of Epoxy Resin System Steel Bridge Deck Pavement[J].Materials,2025,18(13):3109-3109.
- [3]梁陈龙,杨柳青,张翀,等.干式变压器热力耦合固化仿真及工艺制度优化[J].广东电力,2025,38(10):110-118.
- [4]施敏锐,陈剑山,戴昱东,等.电热因子联合作用下环氧树脂的电荷陷阱及微观特性[J].电气技术,2025,26(10):1-7.
- [5]Liu H,Zou Y,Xu J,et al.Efficient recycling of anhydride-cured epoxy resins for electrical insulation: Green economy and tunable performance[J].Polymer Testing,2025,150108934-108934.
- [6]陈龙.基于数字孪生的环氧树脂固化过程监控系统的开发[D].西安理工大学,2025.
- [7]陈蕊,袁端鹏,阚超豪,等.环氧树脂绝缘子固化过程中的温度场仿真与验证[J].绝缘材料,2020,53(11):1-5.
- [8]刘育豪,林茨,王黎明.脂环族环氧树脂绝缘子内部固化反应与温度场数值分析[J].高电压技术,2020,46(6):1986-1993.

作者简介:

张晋宇(2000--),男,汉族,山西省大同市人,超高压输电公司,本科,助理级工程师,研究方向:电力。