

[感应加热]

螺旋形感应器加热过程的有限元分析

文/保定四方三伊电气有限公司 柴艳鹏

螺旋形感应器的设计大多依靠经验来实现，设计误差较大，难以达到理想的加热效果。对螺旋形感应器加热工件的过程进行了有限元分析，提出了一种有限元分析方法，并将分析结果与实际加热效果进行了对比，结果表明所提出的分析方法在螺旋形感应器的设计中是可行的。

螺旋形感应器是感应加热应用中最常见的感应器形式，在金属棒材和管材的加热和热处理中占有重要的地位。在实际应用中，螺旋形感应器的设计大多是依据负载形状而定，缺乏有效的理论计算。考虑到感应加热过程是一个非线性变化，此处采用有限元分析方法，使用ANSYS软件，对螺旋形感应器的加热过程进行分析，为螺旋形感应器的设计提供了理论依据。

建立模型

螺旋形感应器的加热负载为45#碳素钢棒，磁热耦合有限元分析过程采用ANSYS软件来实现，为了提高计算效率，选取螺旋形感应器和钢棒负载的1/4形状作为建模对象。图1为螺旋形感应器、钢棒和空气包的感应加热整体模型，图2是去掉空气包后的螺旋形感应器加热模型。网格划分时除感应器附近的空气包是自由网格外，其余部分都采用映射网格，考虑到钢棒的趋肤效应，钢棒径向的网格采用比例划分单元，对钢棒表面的网格进行细化，通常在趋肤层范围内至少要划分一层或两层单元，以反映电磁感应加热的特点。对钢棒的比热容、热传导系数、电阻率和相对磁导率

等与温度相关的参数进行精确设定，以提高分析结果的准确性。另外，感应加热的热边界条件为辐射。

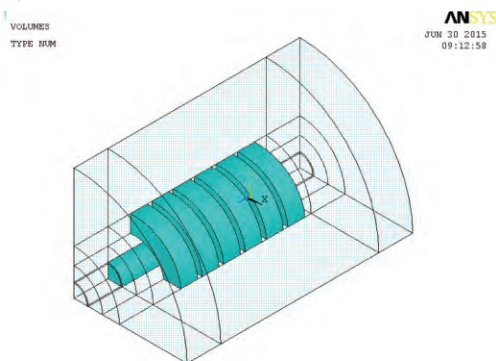


图1 感应加热整体模型

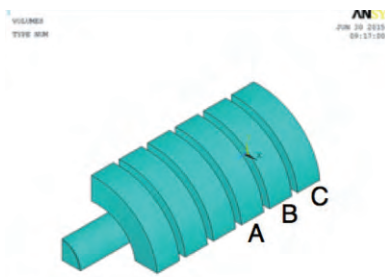


图2 螺旋形感应器加热模型

基金项目：河北省重大科技成果转化项目（15044503Z）

分析过程

螺旋形感应器加热过程有限元分析使用 ANSYS 软件, 采用多物理场间接耦合计算方法, 其电磁场和温度场计算的流程图如图3所示。在三维模型下, 计算电磁场时采用 SOLID97 单元, 温度场分析时采用 SOLID90 单元。在电磁-热耦合计算时输入感应器中的实际电流和频率, 这些参数通过感应器线圈实际测量得到。螺旋形感应器采用紫铜管制作, 通水冷却, 表1是加热时具体的感应加热物理参数。

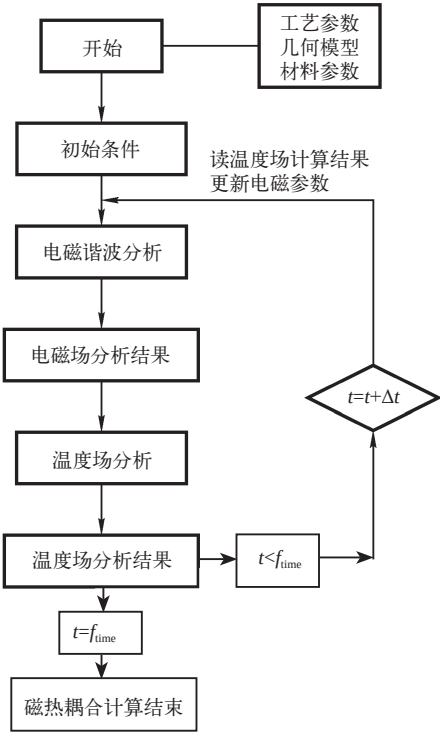


图3 感应加热有限元分析计算流程

表1 感应加热物理参数表

参数项目	型值
钢棒直径/mm	35
钢棒长度/mm	140
钢棒材料	45#碳素钢
钢棒初始温度/(℃)	30
感应器类型	螺旋形
方铜管截面尺寸/mm × mm	15 × 15
方铜管壁厚/mm	1.5
感应器匝数	6
感应器匝距	4
感应器内径/mm	50
感应器外径/mm	80

结果分析

利用 ANSYS 软件对螺旋形感应器的加热过程进行有限元仿真分析。图4是加热30 s后钢棒表面的温度场分布, 从图4中可以看出, 钢棒温度分布

由中部向两端递减。图5是钢棒厚度方向的涡流分布图(数值仿真结果), 左侧为钢棒中涡流的整体效果图, 右侧为钢棒正中截面上的涡流分布。从图5中可以看出在钢棒径向方向存在很强的集肤效应, 钢棒表面区涡流最大, 沿径向方向急剧减小。图6是感应器中源电流密度分布矢量图, 在加热过程中源电流进行了重新分布, 集中分布于靠近钢棒表面一侧的管壁, 电流在钢棒表面和感应器铜导体内部均出现了明显的趋肤效应。

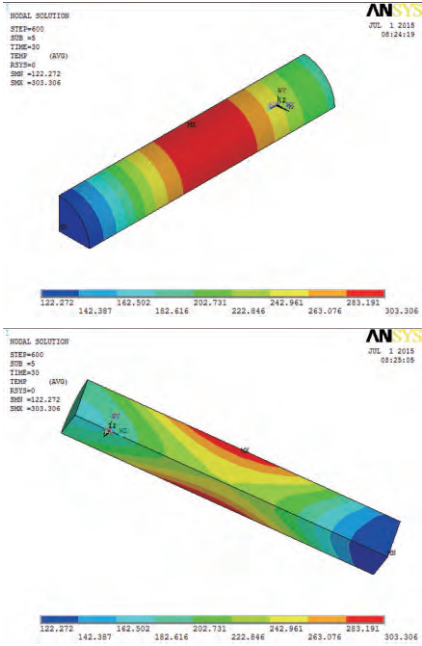


图4 钢棒表面温度分布

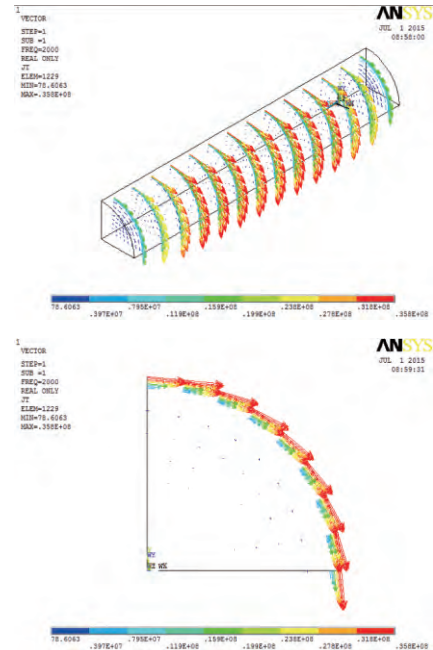


图5 钢棒中涡流分布

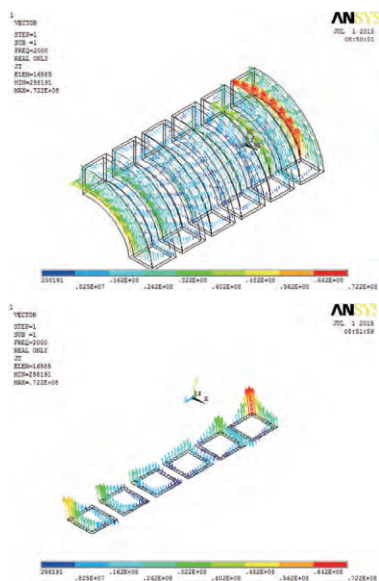


图6 感应器在30 s时的源电流分布图

实测对比

将图2中钢棒表面上A、B和C对应点处温度随时间变化的仿真结果与实际加热测试结果进行对比,对比结果如表2所示。通过对比仿真与试验结

果,可以看出螺旋形感应器在加热过程中,不同位置的负载受热效果不同。同时由于测量误差、钢棒摆放的位置、参数条件限制等原因,导致实测结果与仿真结果存在一定误差,但是在允许范围内。

表2 测试结果与仿真结果对比

测试点	实测结果/℃	仿真结果/℃
A	433	428
B	395	391
C	352	350

结束语

采用ANSYS软件有限元分析方法,对螺旋形感应器加热过程进行了仿真分析,与实测对比结果表明,该方法可用于螺旋形感应器的参数设计,以提高螺旋形感应器的设计效率。同时此分析方法也可以用于为棒形或管形负载制定感应加热工艺方法,减少重复性试验,具有一定的工程应用价值。EA

(收稿日期:2019.10.15)

(编辑:朱金凤)

(上接第38页)

绝缘老化,并最终发生绝缘击穿现象,使得绝缘材料完全丧失电气性能。绝缘老化又主要分为热老化和局部放电引起的老化。

1. 热老化

干式变压器的热老化指变压器在运行中产生的损耗转换为热能,使绝缘温度升高并最终引起绝缘材料的机械、电气性能逐渐变坏,缩短了绝缘寿命。干式变压器的损坏,一般多由热老化开始,但绝缘中温度分布是不同的,因此绝缘的热老化主要决定于最热点温度。本次发生故障的变压器在故障前一直处于热备用状态,长期处于空载运行下,因此外部条件不足以构成热老化,因此排除热老化是造成本次故障的主要原因。

2. 局部放电老化

局部放电是引起绝缘老化并导致击穿的主要原因。由于浇注工艺不够完善以及绝缘材料存在某些缺陷,干式变压器树脂绝缘中总是存在气隙或气泡。绝缘中的气隙和气泡在变压器运行时引起绝缘材料种的局部放电,局部放电会对绝缘结构起很大腐蚀作用。当局部放电现象逐渐累积并发展到严重程度时,会导致绝缘结构发生击穿现象,并最终引起变压器故障。

在本次故障中,由于长时间未对此变压器进行全面检查,未及时发现变压器中出现绝缘腐蚀。本次故障发生时,局部放电在腐蚀处积累,造成该变压器本体A相发生绝缘击穿现象并引起烧毁故障。

改进措施及建议

1) 生产厂家在生产树脂绝缘干式变压器过程中,应严格按照工艺流程进行作业。尤其在绕制绕组过程中应细心,以防将细小的金属丝或碎铁屑带入绕组,造成匝间绝缘损伤或击穿的隐患。

2) 绕制绕组的专用工具应光滑无棱角,防止在绕制过程中损伤导线表面绝缘漆,造成匝间短路的隐患。

3) 注意保持变压器安装环境干燥,无太多的灰尘和污秽,通风良好。

4) 加强设备出厂验收技术监督,对局部放电量严格要求,严把设备入网质量关。

5) 定期开展干式变压器带电检测,及时发现局部放电老化对变压器的影响。EA

(收稿日期:2019.10.22)

(编辑:朱金凤)