

定子线圈硫化过程参数等效分析

权媛华¹ 裴晓梅¹ 高红玲² 王蓉娟¹

(1. 工艺部,山西 永济 044502

2. 电机分公司线圈车间,山西 永济 044502)

摘要 硅胶结构的线圈硫化是通过加热导体使硅橡胶绝缘层交联固化。本文针对某发电机硅胶结构的线圈硫化过程做对比试验,在保证硫化效果不变的前提下,结合电阻加热及吸热公式对硫化过程参数进行等效分析,在成熟工艺的温度和时间范围内,通过改变过程参数实现可调的节拍化生产。

关键词 线圈 硫化 硅胶结构 等效分析

0 引言

旋转电机在最苛刻操作环境下长期使用并具有高可靠性是人们对电机绝缘性能的期望。线圈是电机的核心,其绝缘结构关系着电机的电气性能及运行寿命等。线圈的绝缘结构有少胶、多胶、硅胶(或称为硅橡胶)、环氧等多种结构。多年来,硅胶被证明对于线圈具有高绝缘性能,其硅胶结构的密封性、高弹性、防湿防尘都利于电机的电气绝缘性能,这是硅胶结构经硫化而具有的绝缘效果。其独特化学特性抗氧化脆裂、臭氧及耐候性、热稳定可以使电机在高温高寒环境下运行多年后仍然耐热氧化降解,且保持柔性和弹力。硅胶基材的绝缘材料具有绝佳的介电强度,在较大的温度范围内介电性一致,并且耐电弧径迹,耐漏电起痕和耐电晕损伤等。我厂引进EMD发电机技术中的主发定子线圈就是采用这种绝缘结构,有成熟的硫化工艺,后续衍生产品的硫化参数亦是根据理论计算所得。研究硫化过程参数,在成熟的工艺参数范围里控制变量,确保硫化效果,在不影响电气绝缘性能的前提下,通过改变加热电流和加热时间来调节生产节拍就成为可能。

1 线圈硫化

硫化又称交联、熟化,微观分子变化是链状高分子交联形成三维网状高分子。硫化分为三类:冷硫化,室温硫化和热硫化;影响硫化的主要因素有三个:硫化剂用量,硫化温度和硫化时间。硫化的整个过程有4个阶段:诱导,预硫,正硫化和过硫。

线圈的硅胶硫化是包覆绝缘层以后的一种处理方法,其目的就是让辅助体系里的硫化体系发挥作用,使橡胶永久交联,包裹在导线上成为一个整体,

隔离导线和外界,有良好的密封性。本文研究的硅胶硫化又叫硅胶固化,属于热硫化。

2 现行硫化过程

此发电机定子线圈绝缘材料是玻璃纤维补强的硅橡胶复合带,基材是半固化的硅橡胶,将直线和端部包裹该材料后,进行一次硫化和二次硫化。

2.1 一次硫化

这个过程属于正硫化阶段,在硫化罐中加热加压进行:6.5MPa压力下,接通直流大电源,电流值I进行电阻加热,持续时间2~10min,到达温度180~200℃后切断电流,保压3min。

2.2 二次硫化

在常压下烘焙:线圈自由状态放置在鼓风烘箱中烘焙8h。目的是进一步提高硅橡胶的交联密度,优化硅胶的物理化学性能。

3 硫化等效分析

硫化过程参数的等效分析是正硫化阶段的等效分析,是指控制硫化温度不变,保证绝缘料硅橡胶可以实现正硫化,这是等效分析的前提。在这个时间范围内,对加热时间和加热电流等效计算。

3.1 导线物理参数

表1 两种产品物理参数对比

物 理 参 数	引进产品	衍生产品
导线总长 L/m	20.701	11.616
导线截面积 S/m ²	3.038x10 ⁻⁵	5.443x10 ⁻⁵
导线质量 m ₁ /kg	5.5972	5.6271
R(20℃)/Ω (R = $\frac{\rho L}{S}$)	0.0116	0.0036
硅胶绝缘料质量 m ₂ /kg	0.3658	0.3055

注:ρ 为电阻率,铜线 ρ(20℃) = 1.7x10⁻⁸Ω·m。

3.2 理论计算

①接通直流稳流电源加热,计算线圈电阻加热的热量 Q_热:

$$Q_{热} = I^2 R t \dots\dots\dots (1)$$

Q_热—加热公式,J;

R —电阻,Ω;

I —电流,A;

t —时间,s。

其中,R 是温度的敏感变量,关系式为:

$$R_2 = R_1(T + T_2)/(T + T_1) \dots\dots\dots (2)$$

R₂—换算升温后得出的电阻值,Ω;

R₁—升温前的电阻值,Ω;

T —电阻温度常数,铜线取 235;

T₁—绕组升温前温度,℃;

T₂—绕组升温后温度,℃。

式(2)可得:温度从 20℃ 升高到 200℃ 两种产品的电阻平均值

$$R(\text{引进}) = 0.01578\Omega, R(\text{衍生}) = 0.0049\Omega。$$

②线圈吸热有两部分,一是铜线吸收的热量 Q_{吸1},二是硫化所吸收的热量 Q_{吸2},由下式计算:

$$Q_{吸} = cm\Delta T \dots\dots\dots (3)$$

Q_吸—吸收热量,J;

c —比热容,J/(kg·℃);

m —吸热物体的质量,kg;

ΔT—温度差,℃;

将硫化过程中的其他热传导损失总量计为 ΔQ,则电阻加热产生的热量与硫化吸收及热损失关系为

$$Q_{热} = Q_{吸1} + Q_{吸2} + \Delta Q \dots\dots\dots (4)$$

$$I^2 R t = c_1 m_1 \Delta T + c_2 m_2 \Delta T + \Delta Q \dots\dots\dots (5)$$

经查,铜的比热容 c₁ = 390 J/(kg·℃),橡胶的比热容 c₂ = 1700 J/(kg·℃),已知 I = 380A, t = 5min,可计算出(5)式中的热损失 ΔQ = 178731.36J。

$$\text{则, } I = \sqrt{\frac{c_1 m_1 \Delta T + c_2 m_2 \Delta T + \Delta Q}{R \cdot t}} =$$

$$\sqrt{\frac{390 \times 5.6271 \times \Delta T + 1700 \times 0.3055 \times \Delta T + 178731.36}{0.0049 \cdot t}}$$

令 ΔT = 200℃ - 20℃,得到表 2 理论数据。

表 2 衍生产品的加热电流等效理论值

加热条件		升温后导体温度 T/℃
加热时间 t/s	设定电流 I/A	
300	200	674
340	200	633
360	200	615

4 硫化等效实验

4.1 实验操作

本实验所用线圈属于衍生产品。

标记 6 支线圈,分别为 1#~6#,按照工艺要求对线圈进行绝缘。硫化前,在直线段贴上测温纸,然后固定好专用夹具,将线圈放入一次硫化罐中,引出线头接直流大电源,放入硫化罐中密封加压(6.5 MPa),设置电流 I 并计时。过程中根据表 2 理论计算和实际测温纸温度显示,微调 I 和加热时间 t,加热时间到后切断电流并保压 3min,然后泄压取出线圈,拆除夹具,读出测温纸温度。

4.2 实验记录

下表是通过具体的实验得到的一次硫化数据。

表 3 线圈试样实验结果

实验顺序	线圈试样号	硫化参数		测温纸温度/℃
		电流/A	加热时间/s	
1	1#	550	300	<160
2	2#	630	300	160
3	4#	606	340	166
4	6#	645	360	193
5	5#	620	360	177
6	3#	620	360	188

注:试验温度 20℃。

4.3 数据分析

(1) 按照表中实验顺序,1#线圈是开罐硫化的第一支线圈,热传导损失 ΔQ 最大,数据失去对比意义;2#数据也不具备参考价值。热传导损失 ΔQ 在密闭的硫化罐中经过一段时间趋于稳定,因此我们可以取设备工作 10min 之后的数据,即 4#、6 #、5# 和 3#线圈对应的数据。

(2) 将表 3 与表 2 中数据对比分析,表 3 中的温度是绝缘料与硫化夹具之间的温度。在硫化过程中,导体通过热传导提供硫化所需热量,而热量传导的动力是温度梯度,因此绝缘料外的温度低于内部温度。

5 结语

本文利用控制变量法,从理论上对硫化过程中的电流和时间计算得到的结果与实验结果对比可得出结论:在定子线圈硅胶硫化过程中,控制硫化效果不变,根据电阻加热公式和吸热原理,可以推算得到同步变化的加热时间和对应的电流值,实现硫化参数的等效。

参考文献

- [1]许莉,腾雅娣,华远达,等.硅橡胶的研究与应用进展.特种橡胶制品,2007.
- [2]何曼君.高分子物理,复旦大学出版社,2007.
- [3]EMD, A12647.
- [4]杨世铭,陶文铨.传热学,高等教育出版社,2006.