

金属杂质侵蚀下的大型发电机 定子线棒绝缘劣化机理

刘凌^{1,2}, 张宇^{1,2}, 靳东松^{1,2}, 娄建勇^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为揭示大型发电机全工况域内金属杂质侵蚀定子线棒环氧云母绝缘层的耦合机理,对金属杂质颗粒与定子绝缘层高应变下的材料介损进行了电磁-机械-温度多场有限元模拟与实验分析。在矢量磁位的有旋场下,构建含球型金属杂质的线棒与铁芯槽电磁-机械参数化模型,赋特征单元类型及空气域奇对称边界条件;利用矩阵等交互顺序耦合法,对该模型的体力密度值和非线性瞬态施力行为进行施力渐变分析;研究定子线棒端部环氧绝缘层相变与微观损耗增量,得出金属杂质研磨绝缘层的形变特征值及应力特征值范围;建立含球型金属杂质的电磁-温度模型,运用单向磁热耦合方式进行热侵蚀计算,得出杂质接触面的温度场范围。采用交变磁场下金属研磨实验对线棒切面绝缘层进行模拟施力验证,并对样本采用扫描电镜观测。实验与仿真结果表明:金属杂质焦耳损耗引起的异常温升不足以对环氧绝缘层造成短时热侵蚀;由杂质研磨侵蚀使环氧分子链发生断裂导致云母片缺陷加剧的机械过程是定子线棒绝缘劣化的主因。本文研究可为发电机定子线棒主绝缘的状态监测与故障诊断提供一定的参考。

关键词: 大型发电机;定子线棒;绝缘劣化;有限元分析;扫描电镜

中图分类号: TM31 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202206013 **文章编号:** 0253-987X(2022)06-0104-09



OSID 码

Mechanism of Insulation Deterioration of Large Generator Stator Bars Eroded by Metal Impurities

LIU Ling^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, JIN Dongsong^{1,2}, LOU Jianyong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reveal the coupling mechanism of metal impurities eroding the epoxy mica insulation layer of the stator bar in the whole working condition of large generators, the dielectric loss of metal impurity particles and stator insulation layer under high strain was subject to electromagnetic-mechanical-temperature multi-field finite element simulation and experimental analysis. Firstly, the electromagnetic-mechanical parametric model of bar and core slot containing spherical metal impurities is constructed under the swirl field of vector magnetic potential, and the characteristic element type and air domain odd symmetry boundary conditions are assigned. Then, the force density value and nonlinear transient force application behavior of the model are analyzed by the interactive sequence coupling method such as the matrix method. By studying the phase tran-

sition and microscopic loss increment of the epoxy insulating layer at the end of the stator bar, the characteristic value range of stress and deformation of the metal impurity grinding insulating layer are obtained. Furthermore, an electromagnetic-temperature model containing spherical metal impurities is established and the thermal erosion calculation is carried out by using the unidirectional magneto-thermal coupling method. Based on this model, the temperature field range of the impurity contact surface is rigorously analyzed. Finally, the metal grinding experiment under the alternating magnetic field is conducted on the insulating layer of the bar section for simulated force application verification and the samples were observed by the scanning electron microscope in detail. The experimental and simulation results show that the abnormal temperature rise caused by joule loss of metal impurities is not enough to cause short-term thermal erosion of the epoxy insulation layer, and the mechanical process of sheet mica's defect being aggravated due to the breakage of the epoxy molecular chain ground and eroded by impurities is the main cause of insulation deterioration of the stator bar. The conclusion provides a reference for the state monitoring and fault diagnosis of the main insulation of generator stator bars.

Keywords: large generator; stator bar; insulation deterioration; finite element analysis; scanning electron microscope

大型发电机作为电力系统运行的重要设备,其结构复杂、造价昂贵,发生故障后检验周期长、成本高。在影响发电机正常运行的安全问题中,有超过60%是由定子主绝缘系统引发的^[1-2]。定子绕组的主绝缘系统采用环氧-云母有机复合材料叠压而成。主绝缘的劣化因素可归结为热、电、机械和环境应力的耦合作用^[3-5]。由热应力导致的绝缘劣化是因在电机运行中,温度突然超过临界值后,绝缘材料内部发生化学反应,高分子电介质的导电率增大,大分子链的构造遭到破坏而引发了绝缘层脆化分离^[6-8]。由电气应力引起绝缘劣化是由于在高场强下,绝缘内部由气泡或表面污秽导致的局部放电破坏效应,以及极高场强下导致空间电荷从铜表面缺陷处放射电子进入绝缘膜,破坏了膜绝缘的化学键^[9-11]。由机械应力导致的绝缘损坏主要是因为电机本体的机械疲劳损伤使绝缘产生缺陷与分层^[12-14]。

国际上对于大型发电机绝缘破坏的分析与研究多集中于以上3个方面,而对于环境应力所引起的绝缘失效还未展开深入研究。尤其是对由于电机运行环境中带入的金属磨蚀性杂质颗粒、工业侵蚀性粉末、金属焊瘤颗粒等随机介质在电场力/磁场力等耦合作用力下造成的电机绝缘的劣化影响机理尚不清楚^[15]。附着于发电机绕组间的金属颗粒物在交变磁场作用下可等效为单个动子。当金属颗粒同时受耦合电磁力作用时,在定子绕组间将呈现随机摩擦运动并可能侵入绝缘防晕层导致主绝缘失效并产生击穿。这类环境应力下的绝缘劣化现象在实际运

行的电机机组间时有发生,且严重威胁大型发电机的安全运行。因此,开展对这类现象的研究与探索具有重要的工程意义。

文献[16]对金属颗粒侵蚀发电机定子绝缘做了现象分析,但没有具体对物理行为进行研究和实验论证;文献[17]通过编程计算分析了大型发电机定子端部绕组的电磁特性,但未进行多场对比分析;文献[18-21]通过有限元仿真的方法对发电机定子线棒绝缘进行了电磁场分析;文献[22-25]仿真分析了运行中的发电机的温度特性和力学特性。但是,目前国内外尚未报道针对这类金属杂质对发电机定子主绝缘的侵蚀和劣化影响的研究。

本文针对大型发电机内部金属杂质对定子线棒绝缘侵蚀现象,采用非线性有限元平台构建耦合精细化模型展开研究。得到叠加场下的有限元瞬态映射关系。研究金属杂质颗粒在定子绕组交变磁场作用下的全维度受力特征及迁移现象及施力行为。通过搭建可控柔性磁场研磨实验平台,对金属颗粒的受力特征进行分析及扫描电镜观测,验证了有限元分析金属杂质颗粒对定子线棒环氧绝缘层的侵蚀研磨机理。

1 多物理场数学模型的构建

1.1 电磁场有限元理论

电磁场分析问题等同于求解一定边界条件下的麦克斯韦方程问题。通过有限元法解决分析发电机内各处的电磁问题时需要从麦克斯韦方程组的微分

形式入手,分析时需要设定相应的边界条件,以电场强度、磁场强度作为待求量进行求解,也可以以电磁位作为待求量进行求解。电磁场主要分为图解法、模拟法、解析法和数值法4种分析方法。本文采用数值法中的有限元法研究了金属杂质对发电机定子绝缘的破坏机理。

1.2 电磁力的数值计算

为了分析金属颗粒在电磁场中的受力、形变情况,采用电磁-结构耦合分析,将电磁力密度作为载荷加载到结构场,并添加位移约束边界条件进行求解。金属杂质所受电磁力为

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为金属颗粒受到的电磁力; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{B}$ 为磁通密度。

电机空间数学模型的单元力微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + F_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为正应力; τ 为切应力; F_x 、 F_y 、 F_z 为均匀分布的体力分量。

应力和应变之间的关系为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; r_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \epsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]; r_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \\ \epsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; r_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ϵ 为单元线应变; r 为单元切应变; E 为材料的弹性模量; μ 为材料的泊松比; G 为材料的弹性系数。

对结构场施加位移边界条件 S_0 ,可表示为

$$u_i = \bar{u}_i \quad (4)$$

1.3 温度场计算的原理

物体间的热能传递机理通常通过热传导、热辐射和热对流3种形式。发电机定子上的热交换主要涉及热传导和热对流,工程上通常忽略热辐射的影响。

热传导基本定律称为傅里叶定律,其数学表达式可以表示为

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5)$$

式中: q 为热流密度(W/m^2); T 为物体温度(K); k

为材料导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); n 为法向标识。

热对流发生在流体中,是液体和气体热传递的特定方式,正常运行的发电机存在空气对流和液体冷却对流。对流换热基本定律即当物体的温度高于周围环境温度时会通过向周围媒介传递热量的方式进行冷却的规律,数学表达式为

$$q = \alpha(T - T_f) \quad (6)$$

式中: α 为对热换流系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),表示单位面积在单位温差作用下通过的热流量; T_f 为周围流体温度。

2 耦合模型有限元建模与分析

单个金属杂质的形状较为复杂,属于多维刚体结构。因此,为了简化建模过程并进行有效分析,本文将不规则形状单个金属颗粒设计成球形结构。建立含金属杂质颗粒的水轮发电机定子线棒等效模型,简化外部防晕层结构。建立的几何模型如图1所示。

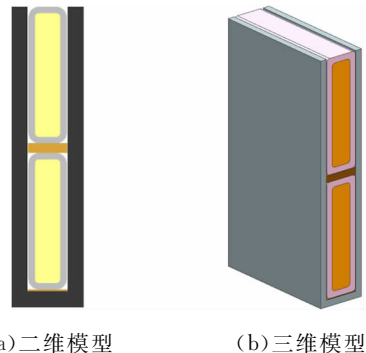


图1 含金属杂质颗粒的发电机定子线棒有限元模型

Fig. 1 Finite element model of generator stator bar with metal impurity particles

对于球形金属杂质颗粒,在两种不同位置下对其进行数值分析计算,以观察杂质对定子主绝缘的劣化影响。位置1表示类球形杂质一半在定子主绝缘外部、另外一半嵌在定子主绝缘内的仿真模型;位置2表示类球形杂质全部嵌在定子主绝缘内且靠近定子线棒,处于临近击穿状态时的仿真模型。

2.1 电磁场仿真结果分析

设置与温度场耦合的电磁场求解器类型为涡流场。设置与结构场耦合的电磁场求解器类型为瞬态磁场,求解时间为20 ms,金属杂质损坏定子主绝缘的破坏源是发电机的输出电流(频率为50 Hz),取一个周期的仿真时间足以反映破坏源的幅值和频率两大主要特征。不考虑硅钢片的涡流效应,仿真计

算得到两种不同位置下的类球形金属杂质在磁场作用下第一个运行周期内的受力情况,如图 2 所示,图中显示了类球形杂质受到的合力的模 $|\mathbf{F}|$ 以及在 x 、 y 、 z 方向上的分量 F_x 、 F_y 、 F_z 。

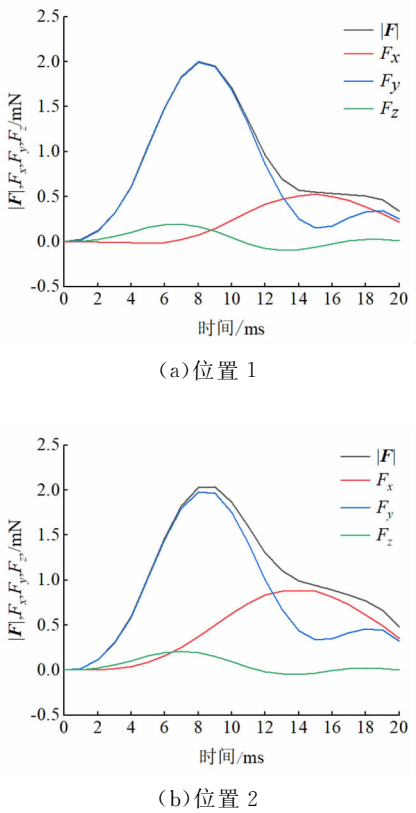


图 2 类球形杂质在电磁场作用下的受力
Fig. 2 Force diagram of spherical impurity under the action of electromagnetic field

观察两种不同位置下的类球形金属杂质受力曲线图可得以下结论。

(1)金属杂质在 8 ms 左右时受力达到最大,该时刻既不是定子线棒电流最大值时刻,也不是定子线棒电流为 0 的时刻。这是因为当定子电流最大的时候,其变化率最小,故金属杂质中感应的涡流最小,即便杂质周围的磁场此时最强,其受力也不大。当定子电流为 0 时,其变化率最大,杂质感应的涡流最大,但是由于杂质周围磁场最弱,所以杂质的受力仍然不大。

(2)金属杂质在磁场作用下所受电磁力在 x 、 y 、 z 方向上的分力有正有负,说明在三相定子电流引起的交变磁场作用下,金属杂质在 x 、 y 、 z 这 3 个方向的受力方向都是变化的。

(3)金属杂质第一个运行周期内所受分力的最大值约为 1.96 mN,进而计算得出其在电磁场中 y 轴方向上运动的加速度为 19.98 m/s²,此为重力加

速度的两倍,该结果表明无序运动的金属杂质对绝缘层将造成一定研磨侵蚀。这是金属杂质在一个方向上的加速度,而杂质在全维度均有受力,金属异物颗粒的运动轨迹为旋转研磨趋势。

(4)在仿真的第一个周期内,类球形金属杂质所受合力初始值为 0,而末值不为 0。说明在运行一个周期后,金属杂质受力的初始状态发生改变。虽然定子电流具有周期性、重复性,但是对于杂质,其受力具有随机性,且金属杂质对定子绝缘造成的破坏不是瞬时产生的,而是一定时间尺度内累积的击穿效应。

图 3 为类球形金属杂质在磁场作用下受到的电磁力密度矢量图,图中观察角度为正视。可以得出:从场的角度来看,类球形金属杂质的两端涡流明显,呈现出来的受力效果为外端往外拉,内端往内拉,合力效果表现为类球形金属杂质向绝缘层方向挤压。此图再次验证了金属杂质对定子绝缘层有旋转研磨和钻的趋势。

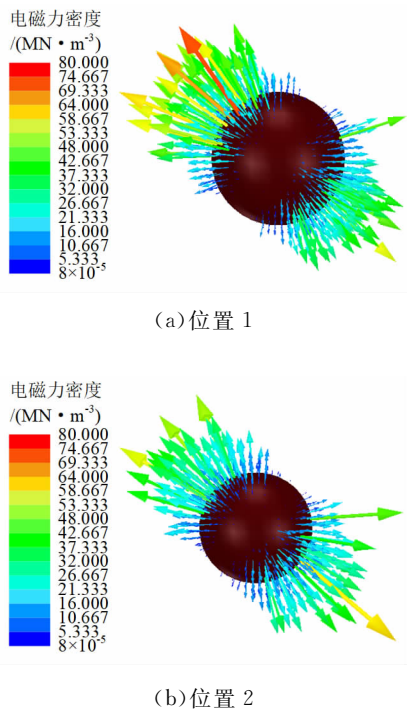


图 3 8 ms 时刻类球形杂质所受的电磁力密度分布
Fig. 3 Distribution of electromagnetic force density of spherical impurities at 8 ms

2.2 结构场仿真结果分析

在对金属杂质进行结构场分析时,由于金属杂质仅影响其附近的定子主绝缘,故本文只对金属杂质和与其匝链的定子绝缘进行分析。由图 2 可得,金属杂质在 8 ms 左右时所受电磁力达到最大值,将

8 ms 时刻的电磁力密度导入结构场进行分析。两种不同位置下的类球形金属杂质在磁场作用下的形变和受力情况如图 4~7 所示。为了更清晰地观察金属杂质的形变趋势,本文所示图像为放大一定倍数的形变和应力结果。

图 4 为放大 130 倍的类球形金属杂质形变特征云图,图中最大形变的特征值发生在金属杂质上,金属杂质的形变量计算阈值范围为 28~63 μm 。图 5 为放大 32 倍的类球形杂质形变特征云图,图中最大形变特征值发生在金属杂质周围的定子绝缘部分,该部位形变阈值范围为 84~252 μm 。说明金属杂质在单次作用于定子绝缘时引起的形变量并不大。

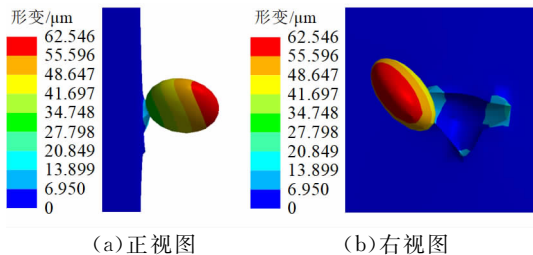


图 4 类球形金属杂质处于位置 1 时在电磁场作用下的形变特征云图
Fig. 4 Deformation characteristic cloud map of spherical metal impurities under the action of electromagnetic field at position 1

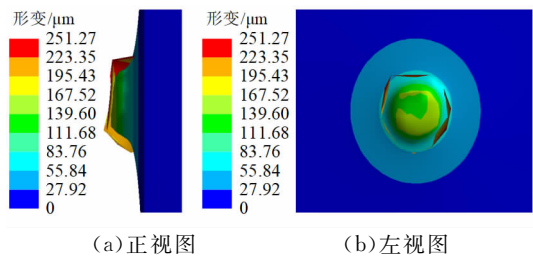


图 5 类球形金属杂质处于位置 2 时在电磁场作用下的形变特征云图
Fig. 5 Deformation characteristic cloud map of spherical metal impurities under the action of electromagnetic field at position 2

图 6 为放大 130 倍的类球形金属杂质应力云图,图中最大应力发生在金属杂质上,其值为 139.51 MPa。图 7 为放大 32 倍的类球形金属杂质应力云图,图中最大应力发生在金属杂质上,其值为 964.01 MPa,此值远大于大气压强(0.1 MPa),说明微小杂质受到的电磁力是很大的。比较两种不同位置下类球形金属杂质在磁场作用下的形变和应力结果,可以发现:类球形金属杂质在磁场作用下产生的形变量很小,但是最大应力值较大,表明金属杂质

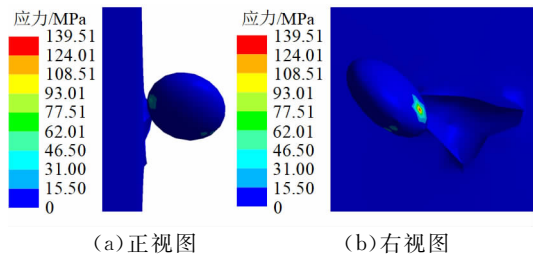


图 6 类球形金属杂质处于位置 1 时在电磁场作用下的应力云图
Fig. 6 Stress cloud diagram of spherical metal impurity under the action of electromagnetic field when it is in position 1

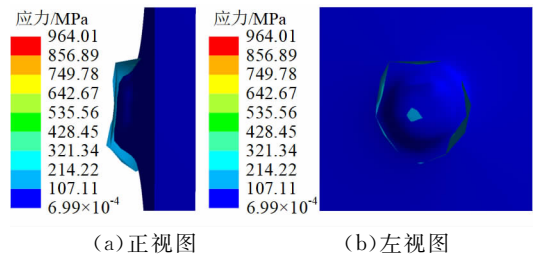


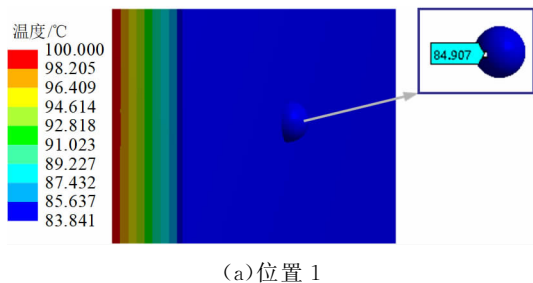
图 7 类球形金属杂质处于位置 2 时在电磁场作用下的应力云图
Fig. 7 Stress cloud diagram of spherical metal impurity under the action of electromagnetic field when it is in position 2

在大时间尺度内的研磨作用能裂解并磨穿环氧绝缘层。

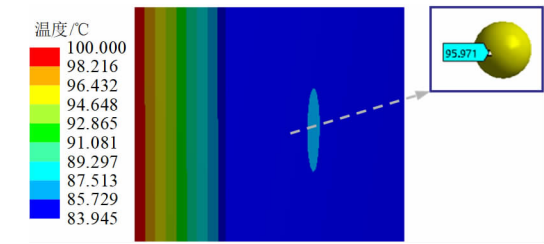
2.3 温度场仿真结果分析

同结构场分析一样,进一步对金属杂质和与其匝链的定子绝缘层进行温度场分析。将电磁场分析计算得出的热生成率即金属杂质的焦耳损耗导入温度场进行分析。研究定子线棒分别在 80、100 和 120 $^{\circ}\text{C}$ 时的含金属杂质温度分布特征,分析定子散热最差条件下由金属杂质导致的温升情况。不同定子线棒温度下,金属杂质在电磁场作用下的温度分布情况相同。因此,给出定子线棒在 100 $^{\circ}\text{C}$ 时两种不同位置下的类球形金属杂质在电磁场作用下的温度分布,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在存在金属杂质的情况下,定



(a) 位置 1



(b)位置 2

图 8 类球形金属杂质在电磁场作用下的温度分布
Fig. 8 Temperature distribution diagram of spherical metal impurities under the action of electromagnetic field

子绝缘层上的温度分布是由内层到外层逐渐降低,绝缘层的温度都不超过定子线棒温度,即使有金属杂质产生热量,其附近的温度也是低于定子线棒温度的。说明金属杂质产生的焦耳损耗不严重,在散热条件最差的情况下也没有导致其匝链的定子绝缘产生很高的温升。

3 实验验证

依据有限元分析结果,搭建金属杂质颗粒在全维度耦合场力研磨模拟平台,验证金属颗粒对定子线棒主绝缘的研磨侵蚀作用。

3.1 平台搭建

以某型水轮发电机真机定子线棒切面为分析对象,发电机主要电气参数及定子线棒结构设计参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 水轮发电机电气参数

Table 1 Electrical parameters of hydro-generator

参数	数值
额定容量/MW	300
额定电压/kV	18
额定电流/A	10 692
功率因数	0.9(滞后)
定子绕组接法	4Y

表 2 发电机定子线棒设计参数

Table 2 Design parameters of stator bar mm

参数	数值
线棒绝缘层厚度	4.43
线棒截面长度	73.80
线棒截面宽度	14.95
定子铁芯槽深	157.60
定子铁芯槽宽	23.80

定子线棒主绝缘为环氧云母绝缘体系,截取一段线棒进行研究,图 9 为实验用定子线棒。



图 9 实验用定子线棒纵向图
Fig. 9 Longitudinal view of stator bar for test

为了直观地获取研磨作用下主绝缘材料老化及受损的物理表征,并验证有限元数值模型中金属颗粒在磁场作用下对定子线棒绝缘破坏性的研磨的数值结果,通过柔性交变磁场下的金属颗粒研磨定子线棒实验平台进行模拟实验。通过该平台实现了金属异物颗粒对线棒主绝缘样本环氧云母表面破坏性摩擦力模拟。图 10 为定子线棒研磨实验平台。图 11 为金属杂质研磨后的定子线棒绝缘层表面劣化图。



图 10 定子线棒研磨整体平台
Fig. 10 Overall platform for stator bar abrasiveness



(a)正面 (b)切面
图 11 定子线棒研磨表面局部

Fig. 11 Partial view of abrasive surface of stator bar

3.2 样本观测与分析

为对样本进行进一步观测,采用扫描电镜 (SEM)观测金属颗粒表面及金属异物颗粒侵入定子绝缘式样环氧表面微观本征结构,结果如图 12 和 13 所示。对不同放大倍数下的微观摩擦-断裂表面

进行了特征观测,结果表明,基于有限元分析的金属颗粒在绝缘表面的破坏结果与实验观测结果较为一致。

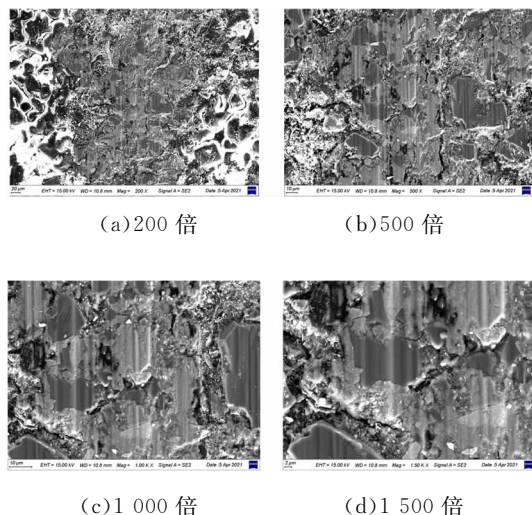


图12 不同放大倍数下 SEM 观测的金属颗粒表面微观结构

Fig. 12 Surface microstructure of SEM metal particles under different magnifications

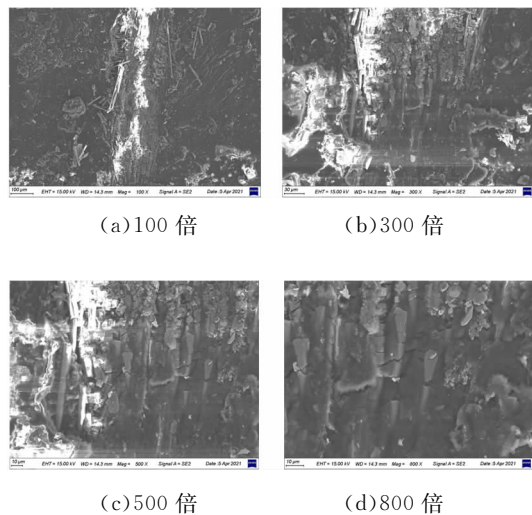


图13 不同放大倍数下 SEM 观测的环氧表面微观结构

Fig. 13 Surface microstructure of SEM epoxy under different magnifications

4 结 论

本文针对运行中的大型发电机受金属颗粒异物侵蚀而造成定子线棒主绝缘劣化的现象,建立了含金属颗粒的定子线棒非线性有限元模型。分析了金属杂质颗粒在电磁场作用下对定子线棒绝缘层的施力变形和温升的耦合影响,通过搭建模拟研磨验证平台进行了线棒绝缘层切面耦合受力分析,采用扫

描电镜进行了线棒环氧绝缘层沿面劣化观测。本文结果表明,金属杂质颗粒在电磁场作用下对定子线棒绝缘环氧沿面的机械研磨应力侵蚀大于涡流产生的热作用破坏。

参考文献:

- [1] 胡建林, 赵禹来, 刘剑, 等. 大型水轮发电机定子线棒绝缘参数对线棒槽部表面电位分布及电场分布的影响 [J]. 绝缘材料, 2020, 53(4): 39-46.
HU Jianlin, ZHAO Yulai, LIU Jian, et al. Influence of insulation parameters on surface potential and electric field distribution on slot part of large hydro-generator stator bar [J]. Insulating Materials, 2020, 53(4): 39-46.
- [2] 高俊国, 孟睿潇, 胡海涛, 等. 电机定子绝缘老化寿命预测研究进展 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3065-3074.
GAO Junguo, MENG Ruixiao, HU Haitao, et al. Research progress on prediction of aging life of motor stator insulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(14): 3065-3074.
- [3] 葛臣忠, 宁苏辉, 付强, 等. 大型发电机定子绕组绝缘性能影响因素 [J]. 大电机技术, 2014(3): 35-40.
GE Chenzhong, NING Suhui, FU Qiang, et al. Impact factors on large generator stator windings insulation property [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2014(3): 35-40.
- [4] 刘向东, 聂靓靓, 金海云. 抽水蓄能发电机定子线棒绝缘击穿理化性能分析 [J]. 绝缘材料, 2020, 53(11): 74-81.
LIU Xiangdong, NIE Liangliang, JIN Haiyun. Analysis on breakdown, physical and chemical properties of stator bar insulation for pumped storage generator [J]. Insulating Materials, 2020, 53(11): 74-81.
- [5] 张跃, 梁智明, 胡波, 等. 采用混合核函数支持向量机算法的大型发电机定子线棒绝缘状态评估方法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 44-50.
ZHANG Yue, LIANG Zhiming, HU Bo, et al. An evaluation method for insulation state of large generator stator bar based on support vector machine with hybrid kernel function [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 44-50.
- [6] 杜炎森, 黄学良, 刘磊, 等. 大型汽轮发电机端部三维温度场研究 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 95-101.
DU Yansen, HUANG Xueliang, LIU Lei, et al. Study on temperature distribution in the end region of large turbogenerators [J]. Proceedings of the CSEE,

- 1996, 16(2): 95-101.
- [7] 张芳芳. 大电机定子线圈端部防晕特性损耗仿真分析与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018: 9-15.
- [8] 王新, 杨敏, 金洪, 等. 基于热老化的发电机定子线棒局部放电特性研究 [J]. 绝缘材料, 2021, 54(4): 58-63.
- WANG Xin, YANG Min, JIN Yang, et al. Partial discharge characteristics of typical defects in generator stator after thermal ageing [J]. Insulating Materials, 2021, 54(4): 58-63.
- [9] 黄涛, 阮江军, 张宇娇, 等. 多相异步电机端部绕组电磁与结构耦合场分析 [J]. 大电机技术, 2011(3): 1-4, 9.
- HUANG Tao, RUAN Jiangjun, ZHANG Yujiao, et al. Magneto-structural coupling field analysis on the end winding of multi-phase asynchronous motor [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2011(3): 1-4, 9.
- [10] 张宇娇, 吴刚梁, 翁杰, 等. 发电电动机定子端部绕组电磁-结构耦合场计算 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(10): 141-144.
- ZHANG Yujiao, WU Gangliang, WENG Jie, et al. Magneto-structural coupling field calculation of stator end windings of generator-motor [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(10): 141-144.
- [11] 陈文聪, 叶坤, 杜巍. 大型水轮发电机组定子线棒端部电晕放电预防与研究 [J]. 自动化应用, 2021(6): 31-34.
- CHEN Wencong, YE Kun, DU Wei. Study on corona discharge prevention of stator rod end of large hydro-generator set [J]. Automation Application, 2021(6): 31-34.
- [12] 刘石, 仲继泽, 冯永新, 等. 使用磁流变阻尼器的大型汽轮发电机定子端部绕组振动控制 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 39-43.
- LIU Shi, ZHONG Jize, FENG Yongxin, et al. Magneto rheological technology of vibration isolation for stator end-winding of large generators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 39-43.
- [13] 刘向东, 肖发福, 黄明浩, 等. 抽水蓄能发电机定子线棒绝缘击穿故障分析 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 145-148, 175.
- LIU Xiangdong, XIAO Fafu, HUANG Minghao, et al. Insulation breakdown fault analysis of stator bar for pumped storage generator [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(12): 145-148, 175.
- [14] 王晓剑, 何天磊, 徐俊元, 等. 基于 HN 介电弛豫模型评估环氧云母绝缘的老化状态 [J]. 绝缘材料, 2019, 52(8): 41-46.
- WANG Xiaojian, HE Tianlei, XU Junyuan, et al. Evaluation on ageing state of epoxy mica insulation based on HN dielectric relaxation model [J]. Insulating Materials, 2019, 52(8): 41-46.
- [15] 马倩倩. 水轮发电机转子绕组匝间短路故障特征与检测方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 6-16.
- [16] 苏燕民. 基于“电蚀虫”入侵的发电机定子线棒绝缘损坏 [J]. 大电机技术, 2015(6): 39-42.
- SU Yanmin. Damage to generator stator bar insulation from “Electric Erosion Worm” invasion [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2015(6): 39-42.
- [17] 胡宇达, 邱家俊, 黄良. 大型发电机定子端部绕组的电磁特性 [J]. 机械强度, 2006, 28(1): 20-24.
- HU Yuda, QIU Jiajun, HUANG Liang. Electromagnetic characteristics on stator end windings of large turbo-generator [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(1): 20-24.
- [18] 曹铁男. 大电机定子线棒的参数化建模及数值仿真系统的开发 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018: 6-7.
- [19] 刘剑, 汪江昆, 徐晖, 等. 大型水轮发电机定子绕组端部电场分布特性研究 [J]. 大电机技术, 2021(5): 8-14, 20.
- LIU Jian, WANG Jiangkun, XU Hui, et al. The research on the distribution characteristics of electric field at the end of stator winding of large hydro-generator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021(5): 8-14, 20.
- [20] 胡建林, 赵禹来, 刘剑, 等. 大型水轮发电机定子线棒绝缘参数对线棒槽部表面电位分布及电场分布的影响 [J]. 绝缘材料, 2020, 53(4): 39-46.
- HU Jianlin, ZHAO Yulai, LIU Jian, et al. Influence of insulation parameters on surface potential and electric field distribution on slot part of large hydro-generator stator bar [J]. Insulating Materials, 2020, 53(4): 39-46.
- [21] 朱南龙, 齐琳, 祁安博. 抽水蓄能发电机转子结构的电磁力分析与结构优化 [J]. 科技风, 2019(34): 157.
- ZHU Nanlong, QI Lin, QI Anbo. Electromagnetic force analysis and structural optimization of pumped storage generator rotor structure [J]. Technology Wind, 2019(34): 157.
- [22] 马明晗. 汽轮发电机励磁绕组匝间短路故障复合特征分析与诊断 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 23-43.

(下转第 194 页)

- 的优化覆盖控制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 86-92.
- SUN Zeyu, LI Chuanfeng, XING Xiaofei, et al. An optimal coverage control algorithm with joint sensing for wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 86-92.
- [16] FENG Juan, ZHAO Hongwei. Dynamic nodes collaboration for target tracking in wireless sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 21069-21079.
- [17] 张超, 周光辉, 肖佳诚, 等. 数字孪生制造单元多维多尺度建模与边-云协同配置方法 [J/OL]. 计算机集成制造系统 [2021-11-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210601.0907.004.html>.
- ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, XIAO Jiacheng, et al. Multi-dimensional and multi-scale modeling and edge-cloud collaborative configuration method for digital twin manufacturing cell [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems [2021-11-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210601.0907.004.html>.
- [18] DING Chuntao, ZHOU Ao, LIU Yunxin, et al. A cloud-edge collaboration framework for cognitive service [J/OL]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2020 [2021-11-27]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9099432>.
- [19] LEI Jingyuan, HUI Jizhuang, DING Kai, et al. A framework for planning and scheduling shop floor logistics via cloud-edge collaboration [C] // Journal of Physics: Conference Series. Bristol, UK: IOP Publishing, 2021: 012109.
- [20] LI Jian, MOHAPATRA P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2007, 3(3): 233-254.
- [21] YANG Dejun, MISRA S, FANG Xi, et al. Two-tiered constrained relay node placement in wireless sensor networks: computational complexity and efficient approximations [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(8): 1399-1411.
- [22] ZAMALLOA M Z, KRISHNAMACHARI B. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links [J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2007, 3(2): 7es.
- [23] BHATTACHARYA A, KUMAR A. A shortest path tree based algorithm for relay placement in a wireless sensor network and its performance analysis [J]. Computer Networks, 2014, 71: 48-62.
- [24] ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, LI Han, et al. Manufacturing blockchain of things for the configuration of a data- and knowledge-driven digital twin manufacturing cell [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(12): 11884-11894.
- [25] BECHKIT W, KOUDIL M, CHALLAL Y, et al. A new weighted shortest path tree for convergecast traffic routing in WSN [C] // 2012 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 187-192.

(编辑 陶晴 刘杨)

(上接第 111 页)

- [23] 王婷婷. 空冷汽轮发电机定子主绝缘的电-热场研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 31-57.
- [24] 周源远, 范小军, 李亮, 等. 燃气轮机叶片前缘旋流冷却的热流耦合数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 135-142.
- ZHOU Yuanyuan, FAN Xiaojun, LI Liang, et al. Numerical research on the swirl cooling using thermal-fluid-structure coupled method for turbine blade leading edge [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 135-142.
- [25] 王辉, 汪小芳. 贴壁式结构水轮发电机定子温度场有限元法研究 [J]. 大电机技术, 2018(2): 40-44.
- WANG Hui, WANG Xiaofang. Thermal field analysis for holistic bulb turbine generator stator using finite element method [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2018(2): 40-44.

(编辑 刘杨)