

热老化对水轮发电机定子线棒端部主绝缘局部放电特性的影响

陈科元^{1,2}, 马山刚¹, 金福宝¹, 冷雪健¹

(1. 青海大学 能源与电气工程学院, 青海 西宁 810016;

2. 国网陕西省电力有限公司商洛供电公司, 陕西 商洛 726000)

摘要:水轮发电机定子线棒端部主绝缘在长期运行过程中因温升及局部放电的高能粒子轰击极易发生热老化,劣化绝缘性能,加剧局部放电强度。文中根据水电站 F 级定子线棒绝缘结构设计制作了 3 种端部典型缺陷模型,在 170℃ 环境条件下进行加速热老化;通过扫描电子显微镜和拉曼光谱分析仪对不同老化周期下的主绝缘试样进行形貌结构和分子结构分析,揭示主绝缘材料——环氧玻璃粉云母带的热老化机理;搭建局放试验平台,采用脉冲电流法和臭氧检测法测量老化前后放电量和放电次数及臭氧浓度的变化情况,并挖掘其对端部缺陷局部放电特性的影响规律。结果表明:加速热老化周期与主绝缘材料绝缘结构变化成正比,老化时间越长,试样表面越粗糙;热老化会破坏环氧玻璃粉云母带的分子链结构,苯环等芳香族和碳环上的 C-C 键及 C=C 键特征峰变化与绝缘电阻具有相关性;热老化对内部气隙放电量和放电次数的影响较小,对防晕层脱落缺陷的低放电量次数影响较大;不同绝缘缺陷模型臭氧的饱和浓度和饱和时间存在较大差异,热老化前不同放电类型的臭氧浓度变化具有阶段性,而热老化后臭氧浓度无明显的阶段性增长特征。

关键词:热老化;定子线棒;局部放电;环氧玻璃粉云母带

Effect of thermal ageing on partial discharge characteristics of main insulation at the end of hydro generator stator bar

CHEN Keyuan^{1,2}, MA Shangang¹, JIN Fubao¹, LENG Xuejian¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Shangluo Power Supply Company of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Shangluo 726000, China)

Abstract: The main insulation of hydro generator stator bar ends is susceptible to thermal ageing due to temperature rise and bombardment of high-energy particles from partial discharges during long-term operation, which would deteriorate the insulation performance and intensify the partial discharges. In this paper, three kinds of typical end defect models were made according to the insulation structure of F-class stator bar for hydropower station, and accelerated thermal ageing tests were carried out at 170℃. The morphological structure and molecular structure of the main insulation samples under different ageing cycles were analyzed by scanning electron microscope and Raman spectrometer to reveal the thermal ageing mechanism of main insulating material, which is epoxy glass mica tape. A partial discharge test platform was set up, the changes of discharge amount, discharge number, and ozone concentration before and after ageing were measured by the pulse current method and ozone detection method, and their influence law on the partial discharge characteristics of end defects were explored. The results show that the accelerated thermal ageing cycle is proportional to the insulating structure change of the main insulating material, and the longer the ageing time, the rougher the surface of the samples. Thermal ageing destroys the molecular chain structure of the epoxy glass mica tape, and the characteristic peak changes of C-C bond and C=C bond on the benzene ring and other aromatic and carbon rings have correlation with the insulation resistance. Thermal ageing has a small effect on the discharge amount and discharge number of the internal air gap, and has a large effect on the discharge number of low discharge amount of the anti-corona layer shedding defects. The saturation concentration and saturation time of ozone in different insulation defect models have large differences, and the changes of ozone concentration of different discharge types before ageing have stage growth characteristics, while the ozone

concentration after ageing has no obvious stage growth characteristics.

Key words: thermal ageing; stator bar; partial discharge; epoxy glass mica tape

0 引言

环氧玻璃粉云母带作为水轮发电机定子线棒的主绝缘材料,其绝缘性能直接影响发电机的安全稳定运行。然而,线棒端部因结构设计和安装工艺等问题导致绝缘较为薄弱,在高压作用下缺陷部位极易发生局部放电(partial discharge, PD)^[1-5]。局部放电所产生的高温以及正常运行时线棒内部的温升将导致云母带发生热老化,长期的热老化会使主绝缘材料发生一系列理化反应,破坏绝缘材料的分子结构,使绝缘材料裂化、分层、变脆等,显著降低环氧玻璃粉云母带的绝缘强度,减少定子线棒的使用寿命^[6-7]。

基于此,国内外学者对发电机定子线棒绝缘热老化特性开展了诸多研究,揭示了相关局部放电机理。康爱亮^[8]建立电、热、湿度、油污、机械磨损等结合的端部多因子老化模型并对其进行老化试验,发现可以根据局部放电信号的特征来判断绝缘的老化程度。王新等^[9]通过脉冲电流法对槽部放电、内部放电及端部放电等典型缺陷模型进行加速热老化试验,探究了不同缺陷的放电特性。高波等^[10]通过搭建多因子老化试验平台,测试不同老化程度下发电机主绝缘试样的频域介电特性,发现温度显著影响绝缘的介电特性。刘红文等^[11]对环氧云母绝缘板材进行加速热老化试验,发现最大放电量对于分析评估发电机定子绕组的绝缘状态是有效的,且其相关性系数最大。李玮^[12]通过电热联合老化研究了不同老化阶段下的发电机定子绕组端部相间放电特性,指出温度是影响局部放电的重要因素。但是,相关文献并未对定子线棒端部主绝缘热老化机理进行深入分析,此外,放电特性研究多侧重于电气量分析,对放电特征产物——臭氧的研究却鲜有报道^[13-14]。

本研究结合F级10 kV水轮发电机定子线棒端部绝缘结构制作了主绝缘内部气隙、防晕层脱落以及主绝缘磨损与油污3种缺陷模型,借助SEM和Raman光谱分别对不同热老化周期(0、2、4、6 d)的环氧玻璃粉云母带试样进行形貌和分子结构分析,揭示定子线棒端部主绝缘的热老化机理;并采用脉冲电流法和臭氧检测法对不同老化阶段的线棒模

型开展局放试验,分析放电量与臭氧浓度的变化规律,进一步探究热老化对局部放电特性的影响机制,以为水轮发电机定子线棒局部放电在线监测和绝缘状态评估提供理论依据和数据支撑。

1 试验部分

1.1 定子线棒端部缺陷模型

本研究根据实际运行中F级10 kV水轮发电机定子线棒端部绝缘结构,并考虑消除边界电场畸变对局放试验的影响,采用直径为20 mm、长度为300 mm的不锈钢棒作为高压电极模拟铜导体,其表面缠绕厚度为2 mm的F级5440-1桐马环氧玻璃粉云母带作为端部主绝缘材料,涂刷厚度为1 mm的F级1140无溶剂环氧绝缘浸渍漆作为防晕层,表面缠绕铝箔模拟定子铁心接地,漆包线作为引出线,线棒绝缘结构如图1所示。

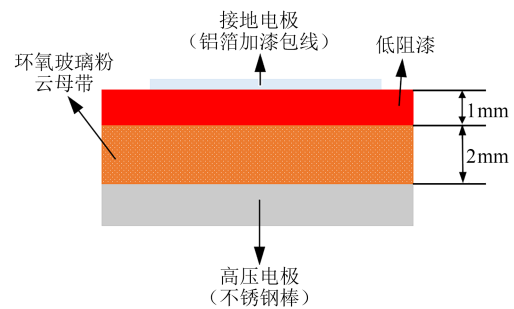


图1 线棒绝缘结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of wire rod insulation structure

由于定子线棒端部绝缘层多为人工缠绕而成,主绝缘内部难以避免存在微小气隙,气隙缺陷将使局部场强增大,引发内部放电,降低绝缘水平;而水轮发电机在长期运行过程中,端部出槽口处防晕层会因老化、机械振动等原因造成脱落,脱落区域边缘沿毛刺、坑斑等缺陷会导致电场集中,引发电晕放电;此外,定子线棒在运行中会产生巨大的电磁力,若端部垫块等发生松动将引起线棒振动,此时锋利的硅钢片会逐渐磨损主绝缘,而油污等极易附着在硅钢片磨损区域表面,并与湿气相结合形成导电层,引发表面放电。

基于以上分析,本研究设计制作3种端部缺陷模型:①主绝缘内部气隙缺陷模型,在主绝缘内部制作一个底面直径为10 mm、厚度为1 mm的微小

气腔,用于模拟人工缠绕绝缘层时产生的气隙;②防晕层脱落缺陷模型,在线棒中部去除 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 区域大小的防晕层,用于模拟防晕层脱落;③主绝缘磨损与油污缺陷模型,在线棒中部对主绝缘进行磨损处理,磨损尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,并对低阻漆切面进行光滑和防电晕处理,避免影响试验结果,同时,在磨损区域表面均匀涂抹由润滑油和灰尘组成的油污。

图2所示为主绝缘内部气隙缺陷模型实物图,为避免铝箔边沿发生沿面放电和表面放电,在边沿两侧涂刷少量低阻漆,以减小绝缘电阻,改善电场分布,同时在模型表面均匀涂抹环氧树脂胶并进行抽真空处理,保证缺陷部位的唯一性。



图2 主绝缘内部气隙缺陷模型实物图

Fig.2 Physical drawing of the internal air gap defect model in main insulation

1.2 热老化试验方案

本研究选用F级5440-1桐马环氧玻璃粉云母带作为水轮发电机定子线棒端部主绝缘材料,其以云母纸为基材,以酚醛环氧桐马酸酐胶粘漆为胶粘剂,双面以电工用无碱玻璃布为补强材料,在常态下具有良好的柔软性。由于云母带耐热等级为F级,耐热温度为 155°C ,对其进行加速热老化试验,所选温度需大于 155°C ,根据相关文献并结合10度法则^[15],本研究将老化温度设定为 170°C 。

加速热老化的设备为山东德瑞克仪器股份有限公司生产的DZF真空干燥箱,配套智能温度控制系统,控温准确并稳定,真空干燥箱具体参数如表1所示。

将未处理的定子线棒模型与3种缺陷模型一起放入真空干燥箱内进行2、4、6 d的加速热老化试

表1 真空干燥箱具体参数

Table 1 Specific parameters of vacuum drying oven

型号	工作电源	功率	升温时间	温度范围
DZF	AC220 V/50 Hz	300 W	<100 min	20~250 $^{\circ}\text{C}$

验。当每个老化阶段结束时,采用清洁刀具割取线棒模型中靠近导体部位的主绝缘块,并用镊子取其一作为绝缘老化试样。

1.3 局部放电试验方案

本研究通过脉冲电流法和臭氧检测法分别采集热老化前及热老化6 d后3种定子线棒端部缺陷模型在局部放电中的放电量和臭氧浓度等特征参数,综合放电特征参数和主绝缘热老化机理,揭示热老化对不同缺陷模型放电特性的影响规律。

1.3.1 局部放电测量电路

局部放电试验平台如图3所示,包括试验加压装置和放电测量装置两部分。试验加压装置中 T_1 为GDYT-20kVA/200kV电源, T_2 为YDQ(W)型200 kV/50 Hz无局放变压器, R 为(200 kV/0.1 A)保护电阻, C_k 表示TAWF-200kV型耦合电容器, Z_m 为检测阻抗。

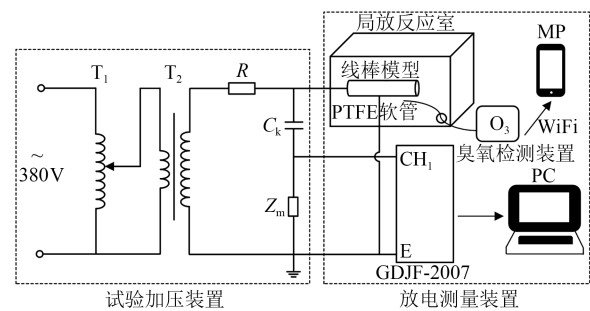


图3 局部放电试验平台

Fig.3 Partial discharge test platform

放电测量装置由武汉国电西高电气有限公司生产的GDJF-2007型局部放电检测仪和臭氧浓度检测设备组成,其中臭氧检测装置为本课题组自主研发设计,采用MQ131低浓度传感器对局部放电产生的臭氧进行采集,装置灵敏度高且体积小,便于安装与维护,可将相关数据传输到云端实时查看^[16]。根据HJ 654—2013标准^[17],臭氧采集管道采用聚四氟乙烯(PTFE)材料,能有效降低臭氧损耗,提高数据准确度。

此外,试验系统搭建完全符合IEC 60270-2015和GB/T 16927.3—2010规定^[18],经测定,试验背景噪声水平低于6 pC。

1.3.2 局放试验方法

在室温、相对湿度为40%、气压为77.3 kPa(青海省西宁市)的环境条件下对上述3种缺陷模型进行局部放电测试,测试时,将模型的一端接入高压,

并套入均压环,避免高压侧发生放电影响试验结果,漆包线端进行接地处理。使用脉冲校准发生器完成放电量校准后,采用逐级升压法和恒压法相结合的加压方式进行升压。首先以 100 V/s 的升压速率加压至出现重复性放电信号,当前电压即为起始放电电压,随后以 1 kV 间隔逐渐升高电压,考虑到放电延迟效应及瞬时增压对电网的冲击影响,每一电压等级下持续 10 min,同时记录放电信息及臭氧浓度数据,重复升压操作直至电压等级达到 10 kV。

2 结果与分析

2.1 绝缘老化试样检测

为探究环氧玻璃粉云母带绝缘热老化机理,对上述经加速热老化试验的绝缘试样进行 SEM 及 Raman 光谱检测,分别从形貌结构和分子结构两个方面展开分析。

2.1.1 SEM 形貌结构分析

取绝缘试样少量,对其表面进行喷金处理后,采用德国蔡司生产的 Merlin compact 场发射扫描电子显微镜对试样形貌进行观察分析,加速电压为 5 kV,放大倍率为 200 倍,结果如图 4 所示。

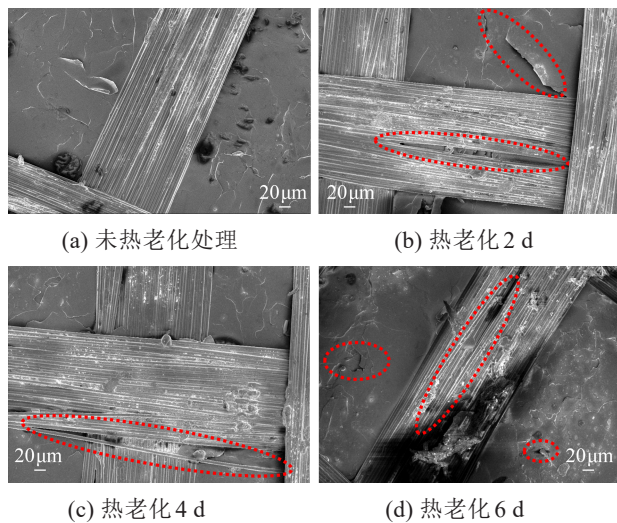


图 4 热老化前后绝缘试样表面形貌

Fig.4 Surface morphology of insulation samples before and after thermal ageing

由图 4 可知,随着老化时间增加,环氧玻璃粉云母带表面粗糙度变化明显。未热老化处理的环氧玻璃粉云母带表面光滑平整,无碱玻璃布粘合紧实;热老化 2 d 后,环氧玻璃粉云母带表面云母纸出现明显裂纹,玻璃纤维出现分层现象;热老化 4 d 后,环氧树脂的粘合度进一步降低,玻璃纤维剥离

现象严重;热老化 6 d 后,云母纸表面凹凸不平、颜色明显加深,且出现脱落现象,产生大量老化白点,同时玻璃纤维表面更为粗糙。值得说明的是,图 4 (d)中出现暗横条纹的主要原因为对试样抽真空处理不彻底,电子束轰击试样内部残存空气引起局部导电性不一致,从而造成图像衬度不同。

此外,随着老化时间的增加,试样韧性不断衰减,老化时间越长,绝缘试样越脆,其表面颜色也由棕色变为透亮的黄棕色。

综上所述,通过观察分析不同老化阶段绝缘试样表面的形貌结构,发现老化时间越长,云母纸、环氧树脂及玻璃布的绝缘结构变化越明显,试样表面粗糙度也明显增加,直接影响了环氧玻璃粉云母带的绝缘性能。当存在外部电压时,环氧玻璃粉云母带表面电场分布将更为复杂,粗糙部位成为电场集中点,极易引发局部放电。

2.1.2 Raman 光谱分子结构分析

通过法国 Horiba 生产的 LabRAM Odyssey 显微共焦拉曼光谱仪对热老化试样的分子结构变化进行检测,为避免荧光干扰,激光器波长采用 785 nm,检测结果如图 5 所示。

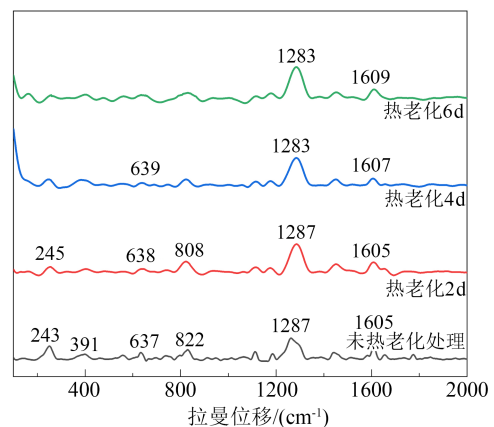


图 5 热老化前后绝缘试样表面拉曼谱图

Fig.5 Raman spectra of insulation samples surface before and after thermal ageing

由图 5 可知,在不同老化阶段下,环氧玻璃粉云母带的 Raman 光谱存在一定差异。未热老化处理的环氧玻璃粉云母带中主要在 243、391、637、822、1 100~1 300、1 605 cm^{-1} 处出现特征峰,热老化各阶段绝缘试样的拉曼频移及振动模式具体见表 2。

由表 2 可知,在热老化初期硅氧键对应的振动峰会随着老化时间的延长向高波数方向偏移,这可能是由于晶体中的硅氧键断裂或变形,导致其相邻

表2 热老化各阶段绝缘试样拉曼谱分析

Table 2 Raman spectral analysis of insulation samples at various stages of thermal ageing

热老化试样	拉曼位移/(cm^{-1})	振动模式
未热老化处理	243	硅氧拉伸振动
	391	Si-O-Si 拉伸振动
	637	Si-O-Si 弯曲振动
	822	芳香族 C-C 键拉伸振动
	1 100~1 300	Si-O-C 伸缩振动区
热老化 2 d	1 605	苯环中 C=C 键的拉伸振动
	245	硅氧拉伸振动
	638	Si-O-Si 弯曲振动
	808	芳香族 C-C 键拉伸振动
	1 100~1 300	Si-O-C 伸缩振动区
热老化 4 d	1 605	苯环中 C=C 键的拉伸振动
	639	Si-O-Si 弯曲振动
	1 100~1 300	Si-O-C 伸缩振动区
热老化 6 d	1 607	苯环中 C=C 键的拉伸振动
	1 100~1 300	Si-O-C 伸缩振动区
	1 609	苯环中 C=C 键的拉伸振动

的化学键长度发生变化,从而改变振动频率,导致振动峰的位置发生偏移;随着老化时间的增加,硅氧键相关振动峰逐渐减弱并最终消失,这是由于硅氧键发生断裂,分子空间构型发生显著改变,进而导致相关振动峰消失。此外,当热老化进行至第 4 d 时,芳香族 C-C 键消失,而 C=C 键位置向高波数方向移动,且振动强度减弱。出现该现象的原因同样是由于环氧树脂分子链在老化过程中断裂,导致该键的振动频率和强度发生变化。

综上所述,热老化会破坏环氧玻璃粉云母带的分子链结构,相关结构和化学组成的改变将进一步降低其抗拉强度和耐磨性。

此外,采用 GD3126A 绝缘电阻测试仪对热老化前后不同绝缘缺陷线棒模型的绝缘电阻进行测量,结果见表 3。通过表 3 数据看出,随着老化时间的增加,不同定子线棒端部绝缘缺陷模型的绝缘电阻均呈现减小的趋势。进一步分析发现热老化 4 d 后,绝缘电阻值明显下降,结合上述 Raman 光谱分析,此时环氧玻璃粉云母带中苯环等芳香族和碳环上的 C-C 键逐渐消失,C=C 键振动强度减弱。这一相关性表明,环氧玻璃粉云母带中分子结构的改变直接影响其绝缘性能。因此,采用 Raman 光谱进行定量分析,可以有效判断出环氧玻璃粉云母带绝缘电阻的变化趋势,为评估定子线棒端部主绝缘状态提

供了一种新手段。

表3 绝缘电阻测量结果

Table 3 Insulation resistance measurement results

绝缘缺陷模型	热老化阶段	绝缘电阻/ $\text{M}\Omega$
主绝缘内部气隙缺陷模型	未热老化处理	468
	热老化 2 d	452
	热老化 4 d	381
	热老化 6 d	259
防晕层脱落缺陷模型	未热老化处理	392
	热老化 2 d	364
	热老化 4 d	275
	热老化 6 d	135
主绝缘磨损与油污缺陷模型	未热老化处理	376
	热老化 2 d	361
	热老化 4 d	243
	热老化 6 d	101

2.2 局放试验结果及分析

2.2.1 热老化对线棒端部放电量的影响

当外施电压为 10 kV 时,3 种缺陷模型热老化前后的最大放电量及放电次数变化分别如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,由于老化后环氧玻璃粉云母带出现裂纹、分层等现象,加之分子结构的改变,导致其绝缘性能显著降低,局部放电强度明显提升。不同放电类型的最大放电量均有所上升,但相对而言,内部放电的最大放电量增幅最小,原因在于气隙缺陷位于主绝缘层间,热老化后环氧玻璃粉云母带发生热膨胀,气隙部位体积减小,因此局部放电程度较小。

除最大放电量外,放电次数也是评估局部放电强度的重要参数。从图 7 可以看出,内部放电仍由

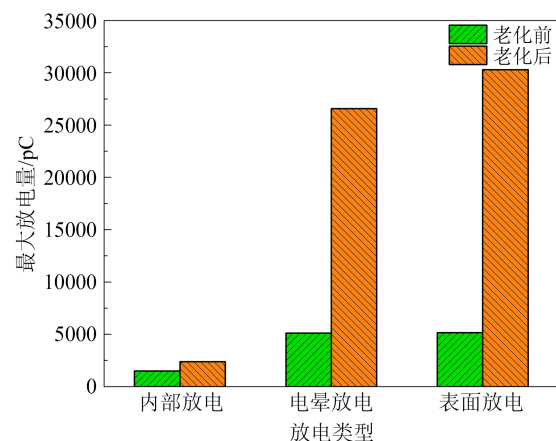


图6 热老化前后缺陷模型最大放电量变化

Fig.6 Change in maximum discharge of defect models before and after thermal ageing

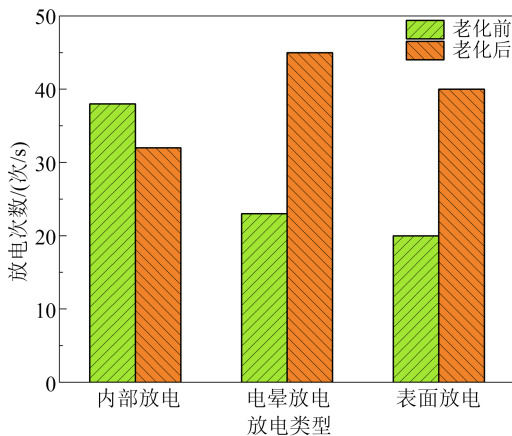


图7 热老化前后缺陷模型放电次数变化

Fig.7 Change in discharge number of defect models before and after thermal ageing

于主绝缘发生热膨胀导致老化后的放电次数有所下降,而电晕放电和表面放电的放电次数均出现上升。与最大放电量不同,热老化后电晕放电的放电次数多于表面放电,说明老化后防晕层脱落区域毛刺等尖端缺陷的脆化增强了尖端附近电场,同时增加了低放电量次数。

2.2.2 热老化对线棒端部臭氧浓度的影响

在局部放电过程中,高能电子通过与氧气、氮气的碰撞电离、三体碰撞反应会产生腐蚀性气体——臭氧,其会劣化绝缘材料,降低材料的绝缘性能。3种缺陷模型热老化前后的臭氧浓度变化分别如图8和图9所示。由图8可知,热老化前不同放电类型的臭氧浓度变化具有阶段性。放电开始时臭氧浓度急剧增加,随着加压时间增加,氮氧化物引发臭氧发生分解反应,导致臭氧浓度增速逐渐减缓,并最终达到饱和。对于不同缺陷模型,臭氧的饱和浓度与饱和时间存在较大差异,表面放电的臭氧浓度饱和时间最短,约为10 min,饱和浓度达到 5.2×10^{-6} ;其次是电晕放电,饱和时间约为12 min,饱和浓度达到 4.0×10^{-6} ;内部放电由于气隙缺陷位于绝缘内部,透气性较差,导致臭氧浓度生成速率缓慢,约20 min时才达到饱和,且饱和浓度仅为 2.3×10^{-6} 。

由于热老化降低了主绝缘材料的绝缘电阻,当电压升至10 kV时,放电十分剧烈,同时伴随着刺耳的“滋滋”声,短时间可嗅到类似鱼腥味的臭氧气体。如图9所示,热老化后臭氧浓度增加更为迅速,此时,氮氧化物对于臭氧的抑制作用减小,导致臭氧无明显的阶段性增长特征,但随着时间的延长臭氧浓度最终也趋于饱和。正是由于热老化前后臭

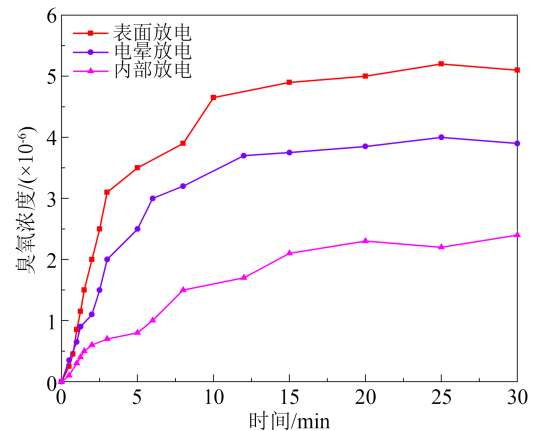


图8 热老化前缺陷模型臭氧浓度变化

Fig.8 Variation of ozone concentration in defect models before thermal ageing

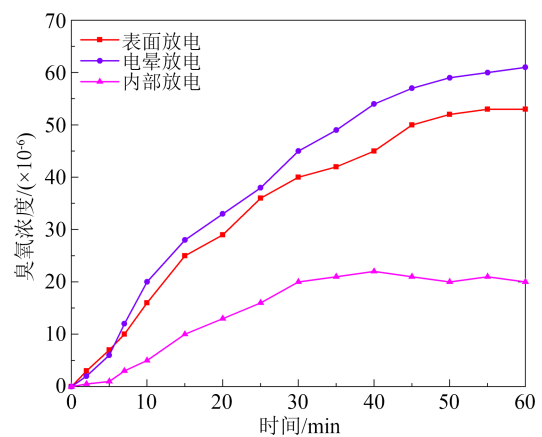


图9 热老化后缺陷模型臭氧浓度变化

Fig.9 Change in ozone concentration in defect model after thermal ageing

氧浓度增长规律具有较大差别,采用臭氧浓度检测为定子线棒端部局部放电在线监测和绝缘缺陷识别提供了一种新的研究方法。

3 结论

本研究设计了3种水轮发电机定子线棒端部绝缘缺陷模型并进行加速热老化试验,通过绝缘老化试样检测及热老化前后缺陷模型局部放电试验,得到如下结论:

(1)加速热老化周期与主绝缘材料绝缘结构变化成正比,老化时间越长,试样表面越粗糙;热老化会破坏环氧玻璃粉云母带的分子链结构,苯环等芳香族和碳环上的C-C键及C=C键特征峰变化与绝缘电阻具有相关性,Raman光谱检测可为评估定子线棒端部主绝缘状态提供一种新思路。

(2)不同绝缘缺陷模型热老化前后最大放电量

和放电次数的变化规律不尽相同。气隙缺陷老化后气腔内部发生热膨胀,其放电量和放电次数变化幅度较小;而防晕层脱落模型老化后毛刺等尖端缺陷脆化,尖端电场增强,低放电量次数明显增加。

(3)不同绝缘缺陷模型臭氧的饱和浓度和饱和时间存在较大差异。热老化前不同放电类型的臭氧浓度变化具有阶段性,而热老化后臭氧浓度无明显阶段性增长特征。臭氧浓度检测可适用于水轮发电机定子线棒端部局部放电在线监测和绝缘缺陷识别。

参考文献 References

- [1] 张斯翔,彭代晓,张跃,等. 高海拔大型水轮发电机定子线棒及绕组防晕性能研究[J]. 绝缘材料,2024,57(2):80-85.
ZHANG Sixiang, PENG Daixiao, ZHANG Yue, et al. Study on anti-dizziness performance of stator bars and windings of high-altitude large hydro generators[J]. Insulating Materials, 2024, 57(2):80-85.
- [2] 倪鹤立,傅晨钊,胡海敏,等. 电气设备局部放电脉冲电流法检测技术述评[J]. 高压电器,2023,59(11):1-14.
NI Heli, FU Chenzhao, HU Haimin, et al. Review of detection technology of partial discharge pulse current method for electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(11):1-14.
- [3] 陈科元,马山刚,金福宝,等. 大型水轮发电机定子线棒局部放电在线监测研究进展及展望[J]. 西北水电,2022(5):35-40.
CHEN Keyuan, MA Shangang, JIN Fubao, et al. Progress and prospect of online monitoring research on partial discharge of stator wire rod of large hydro generator[J]. Northwest Hydropower, 2022(5):35-40.
- [4] 李冠良,白鹭,晋涛,等. 不同湿度环境下空冷发电机定子线棒端部表面放电特性[J]. 绝缘材料,2019,52(9):53-57.
LI Guanliang, BAI Lu, JIN Tao, et al. Surface discharge characteristics of air-cooled generator stator wire rod ends under different humidity environments[J]. Insulating Materials, 2019, 52(9):53-57.
- [5] 李寅伟,李强,李岩,等. 大型水轮发电机绝缘参数对定子线棒端部电场和电位分布的影响[J]. 绝缘材料,2022,55(1):73-79.
LI Yinwei, LI Qiang, LI Yan, et al. Influence of insulation parameters of large hydro generator on electric field and potential distribution at stator wire rod ends[J]. Insulating Materials,2022,55(1):73-79.
- [6] 杨敏,王新,童小忠,等. 热老化对发电机定子线棒用环氧—云母绝缘频域介电特性的影响[J]. 高压电器,2021,57(1):94-99.
YANG Min, WANG Xin, TONG Xiaozhong, et al. Effect of thermal aging on frequency domain dielectric properties of epoxy-mica insulation for generator stator wire rods[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(1):94-99.
- [7] 郝艳捧,谢恒堃. 红外光谱法研究运行23年大电机定子绝缘中环氧的老化机理[J]. 电工技术学报,2008(3):19-23.
HAO Yanpeng, XIE Hengkun. Aging mechanism of epoxy in stator insulation of a large motor running for 23 years by infrared spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008(3):19-23.
- [8] 康爱亮. 高压电机定子绕组多因子老化方法及其局部放电机理研究[D]. 太原:太原理工大学,2016.
KANG Ailiang. Research on multi-factor aging method of high-voltage motor stator winding and its partial discharge mechanism [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2016.
- [9] 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 characterization of generator stator wire rods based on thermal ageing [J]. Insulating Materials,2021,54(4):58-63.
- [10] 高波,郝长金,尹小兵,等. 发电机主绝缘加速老化的频域介电特性[J]. 电机与控制学报,2019,23(3):57-64.
GAO Bo, HAO Changjin, YIN Xiaobing, et al. Frequency domain dielectric properties of generator main insulation with accelerated aging[J]. Electric Machines and Control,2019,23(3):57-64.
- [11] 刘红文,王科,马仪,等. 发电机定子线棒主绝缘老化规律与击穿电压预测研究[J]. 高压电器,2015,51(3):105-110, 116.
LIU Hongwen, WANG Ke, MA Yi, et al. Research on aging law and breakdown voltage prediction of main insulation of generator stator wire rod[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 105-110,116.
- [12] 李玮. 高压电动机定子绕组端部绝缘相间放电和电痕放电机理研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.
LI Wei. Research on the mechanism of phase-to-phase and trace discharge of stator winding end insulation of high-voltage motors[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2020.
- [13] 胡蝶,莫凡,魏加达,等. 水轮发电机定子线棒故障产气规律研究[J]. 绝缘材料,2023,56(11):80-86.
HU Die, MO Fan, WEI Jiada, et al. Research on the gas production law of hydro generator stator wire rod failure[J]. Insulating Materials,2023,56(11):80-86.
- [14] 牛勃,马飞越,丁培,等. 臭氧浓度检测技术在开关柜局部放电检测中的应用[J]. 绝缘材料,2018,51(8):69-74.
NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, et al. Application of ozone concentration detection technology in partial discharge detection of switchgear[J]. Insulating Materials,2018,51(8):69-74.
- [15] 石颀,王晓剑,张海松,等. 基于统计检验的发电机定子线棒绝缘热老化寿命评估[J]. 绝缘材料,2019,52(12):46-52.
SHI Jie, WANG Xiaojian, ZHANG Haisong, et al. Thermal aging life assessment of generator stator wire rod insulation based on statistical test[J]. Insulating Materials, 2019, 52(12):46-52.
- [16] 陈科元,刘新贺,马山刚,等. 一种用于发电机定子局部放电产生臭氧的检测装置:CN220231894U[P].2023-12-22.

- CHEN Keyuan, LIU Xinhe, MA Shangang, et al. A detection device for ozone generation from partial discharge of generator stator: CN220231894U[P]. 2023-12-22.
- [17] 环境保护部科技标准司. 环境空气气态污染物(SO₂、NO₂、O₃、CO)连续自动监测系统技术要求及检测方法:HJ 654—2013[S]. 北京:中国环境科学出版社,2013.
- Department of Science and Technology Standards, Ministry of Environmental Protection. Technical requirements and detection methods of continuous automatic monitoring system for ambient air gaseous pollutants (SO₂, NO₂, O₃, CO): HJ 654—2013[S]. Beijing: China Environmental Science Press,2013.
- [18] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. 高电压试验技术 第3部分:现场试验的定义及要求:GB/T 16927.3—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- National Technical Committee for Standardization of High Voltage Testing Techniques and Insulation Fitting. High voltage test technology Part 3: Definition and requirements for field test: GB/T 16927.3—2010[S]. Beijing: China Standard Press,2010.
-
- 收稿日期:2024-03-06;修回日期:2024-03-31。
- 作者简介:
- 陈科元(1999-),男(汉族),陕西商洛人,硕士生,研究方向为水轮发电机定子线棒局部放电在线监测;
- 通信作者:马山刚(1983-),男(回族),青海门源人,教授,博士,主要从事新能源发电与电气新技术研究的工作。