

水轮发电机定子线棒故障产气规律研究

胡蝶^{1,2}, 莫凡^{1,2}, 魏加达^{1,2}, 李康³, 万留杰⁴

(1. 五凌电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 国家电力投资集团水电产业创新中心, 湖南 长沙 410004; 3. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 4. 河南工学院 电缆工程学院, 河南省线缆结构与材料重点实验室, 河南 新乡 453000)

摘要:研究水轮发电机定子线棒在高温和局部放电作用下的产气规律,可以为基于分解气体法的水轮发电机绝缘老化状态监测提供依据。针对水电站实际使用的定子线棒,搭建了高温热解实验平台,对100、120、150、250℃下的定子线棒热解气体进行了研究;搭建了定子线棒局部放电实验平台,对定子线棒局部放电下的臭氧生成规律进行了研究。结果表明:CO和CO₂适合作为定子线棒高温故障的早期特征气体;当定子线棒表面发生局部放电时,臭氧浓度与放电电压和放电时间有相关性;在同样放电条件下,半导体硅胶产生的臭氧浓度生成速率更大,具有更强的抗电晕性能,在定子槽中填充半导体硅胶有利于定子线棒的安全运行和在线监测。

关键词:定子线棒;热解;局部放电;分解气体法

中图分类号:TM312 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.11.013

Study on gas production law of stator bar with fault for hydrogenerator

HU Die^{1,2}, MO Fan^{1,2}, WEI Jiada^{1,2}, LI Kang³, WAN Liujie⁴

(1. Wuling Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Hydropower Industry Innovation Center of State Power Investment Corporation, Changsha 410004, China; 3. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Henan Key Laboratory of Wire and Cable Structures and Materials, School of Cable Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453000, China)

Abstract: The study on the gas production law of stator bar for hydrogenerator under high temperature and partial discharge can provide a basis for insulation ageing monitoring of hydrogenerator on the basis of decomposition gas method. Aiming at the stator bar used in hydropower station, a high temperature pyrolysis experimental platform was built to study the pyrolysis gas of stator bar at 100, 120, 150 and 250℃. A partial discharge experimental platform of stator bar was established to study the ozone generation law of stator bar under partial discharge. The results show that CO and CO₂ are suitable used as the early characteristic gases of stator bar with high temperature fault. When there is partial discharge on the stator bar surface, the ozone concentration is related to discharge voltage and time. Under the same discharge condition, the ozone concentration rate generated by semi-conductive silica gel is higher and it has stronger corona resistance. Filling stator slot with semi-conductive silica gel is beneficial to the safe operation and on-line monitoring of stator bar.

Key words: stator bar; pyrolysis; partial discharge; decomposition gas method

0 引言

作为清洁优质能源,水电对我国“双碳”战略和新型电力系统的建设具有重要意义。随着我国水电产业的发展,水电总装机容量已位居世界第一,单机极限容量达到了1 000 MW,电机温升问题日益严重^[1-2]。另外,随着水轮发电机发电电压的升高,电机定子线棒放电问题也日渐突出^[3]。目前,水轮发电机定子绕组温度测量多采用埋入式电阻检

温计,由于受安装工艺、安装位置、布线距离等因素的影响,测量结果不精确,而且不能反映电机定子绕组的整体状况^[4]。水轮发电机正常运行时不可避免地会发生局部放电,局部放电是造成水轮发电机绝缘击穿的主要原因,所以进行局部放电监测对水轮发电机的安全运行具有重要意义^[5]。目前,局部放电常用的测量方法有脉冲电流法、声测法和光测法^[6]。但大型水轮发电机运行时,电磁环境极为复杂,局部放电信号很容易被电磁干扰信号所淹没^[7]。而水轮发电机定子线棒过热和局部放电时会产生气体衍生物,可以使用气体传感器对定子线棒故障

基金项目:国家电力投资集团统筹研发经费支持项目(KYT C2021SD02)。

特征气体进行监测,即采用分解气体法来判断定子线棒是否存在过热或放电故障^[8-9]。目前,针对变压器内部故障,分解气体法的应用较为成熟^[10]。与脉冲电流法和声测法相比,分解气体法对水轮发电机局部放电的在线监测不易受电磁信号、电磁振动等干扰;与光测法相比,分解气体法可以检测到不易探测位置的放电。由于气体具有流动性,气体传感器可以和检测位置分离,实现非接触式、非侵入式监测^[11]。因此,使用分解气体法对水轮发电机定子线棒进行在线监测具有广泛的应用前景。

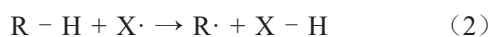
定子线棒主绝缘是水轮发电机绝缘系统中最重要的部分,它直接影响电机的经济、技术指标,也在很大程度上决定了水轮发电机运行的安全性和可靠性^[12]。目前,对水轮发电机定子线棒故障分解气体的研究相对较少。L LOUIS 等^[13]、C MILLET 等^[14]研究了水轮发电机定子槽部放电产生的臭氧浓度,提出可以通过臭氧浓度来反映水轮发电机故障,并认为可以通过不同位置的臭氧浓度情况确定故障位置。

使用分解气体法对水轮发电机定子线棒过热和放电早期故障进行监测,需要研究定子线棒在过热和局部放电故障下的气体生成规律。本研究针对水电站实际使用的新、旧定子线棒搭建热解和放电实验平台,并使用高灵敏度的气体分析仪器对实验过程中的气体衍生物进行分析,得到定子线棒在过热和放电故障中分解气体的生成规律。

1 定子线棒故障产气基本原理

1.1 定子线棒热解气体生成原理

定子线棒热解气体主要来自自主绝缘中的环氧树脂材料,环氧树脂热解属于大分子无规则裂解,对于无规则裂解和热解气体的形成机理可以用自由基反应理论进行解释^[15]。自由基也称游离基,是指由于共价键均裂而生成的带有未成对电子的碎片。自由基反应是指具有未成对电子的原子或分子参与的化学反应,可以用式(1)~(4)表示。



式(1)表示自由基的引发,式(2)和式(3)表示自由基链的增长,式(4)表示自由基链的终止。在热解过程中,定子线棒中环氧树脂的分子链发生无规则裂解生成自由基,然后自由基发生分子内或分子间转移反应,夺取其他碳原子上的氢或氧,从而导致化学键断裂而生成各种烃类以及含氧有机气体。

1.2 定子线棒表面局部放电气体生成基本原理

水轮发电机定子线棒表面的局部放电是在空气背景下的放电,在空气中放电生成 O_3 和 CO 的主要反应路径如表1所示,其中R1、R2、R3、R4是反应的最初驱动力^[11,16]。当空气中电场强度较大时,会产生能量较大的自由电子,空气分子与之碰撞后发生电离或分解为原子,自由电子能量越大,空气分子电离和分解的概率也越大。所以,自由电子密度越大,反应物的产量也越大。从空气放电衍生物反应路径也可以看出,在放电中产生和消耗 O_3 的反应同时存在。

表1 空气放电衍生物主要化学反应

Tab.1 Main chemical reactions of air discharge derivatives

序号	反应	序号	反应
R1	$e + O_2 \rightarrow O + O + e$	R9	$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$
R2	$e + O_3 \rightarrow O + O_2 + e$	R10	$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2$
R3	$e + O_2 \rightarrow O_2^* + e$	R11	$O_2^* + O_2 \rightarrow O_3 + O$
R4	$e + CO_2 \rightarrow CO + O + e$	R12	$OH + O_3 \rightarrow O_2 + HO_2$
R5	$O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$	R13	$O_3 + HO_2 \rightarrow 2O_2 + OH$
R6	$O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + N_2$	R14	$H + O_3 \rightarrow OH + O_2$
R7	$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	R15	$H + O_3 \rightarrow HO_2 + O$
R8	$N + O_3 \rightarrow NO + O_2$		

定子线棒表面局部放电会使线棒表面SiC半导体层分解,半导体层被破坏后还会导致线棒主绝缘材料分解,主绝缘材料中含有C元素,在放电过程中这些C元素会与O结合生成 CO ^[17]。

2 实验

2.1 试样

实验中使用的的水轮发电机定子线棒主绝缘为F级绝缘,主绝缘材料为环氧玻璃粉云母,它是以粉氧云母为基础、环氧树脂为胶黏剂、玻璃纤维补强的热固性复合绝缘材料,厚度为2 mm,耐热温度为155℃。为防止发生局部放电,通常在定子线棒主绝缘外表面刷SiC半导体涂层。另外,在安装定子线棒时向定子线棒和铁心之间注入半导体胶。实验的研究对象为两种水轮发电机的定子线棒,一种为新线棒,另一种为使用10年的旧线棒,旧线棒部分表面覆盖有半导体硅胶。实验中,沿轴向截取长为40 mm的定子线棒,再沿轴向剖开后去除内部铜导体,试样实物如图1所示。

2.2 定子线棒热解实验平台

定子线棒热解实验平台由加热装置、冷却管、气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)和CO分析仪等部分组成,如图2所示。

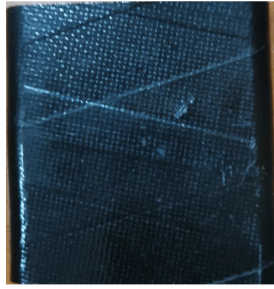


图1 试样实物图

Fig.1 Physical image of sample

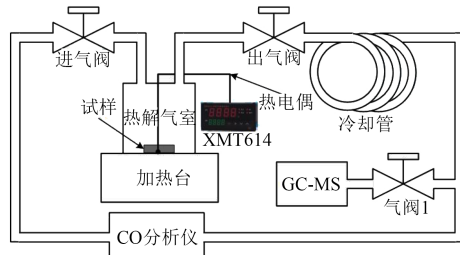


图2 定子线棒热解实验平台

Fig.2 Experimental platform of pyrolysis for stator bar

加热装置由加热台、热解气室和测温系统组成,加热台温度设置为 $50\sim 350^{\circ}\text{C}$;热解气室由不锈钢加工而成,容积为 1.4 L ,通过两个阀门和外部气路相连,实验过程中热解气室为气密状态,为避免橡胶或塑料O型密封圈分解产生气体对实验结果造成影响,实验中使用空心金属O型密封圈对热解气室进行密封;测温系统由T型热电偶和温度显示仪表XMT614组成,测试温度为 $-200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 。

定子线棒热解气体主要来自空气环境下环氧树脂的热解产物,主要气体产物包括 CO 、 CO_2 和各种烃/醛类气体。实验中使用GC-MS和CO分析仪对热解气体产物进行定性和定量分析。GC-MS仪器为岛津公司生产的GCMS-QP2010SE型,其可以对气体产物进行定性和定量分析,进样方式为微量注射器进样,试样气体积为 $500\ \mu\text{L}$;气相毛细管色谱柱为Agilent公司生产,规格为 $60\text{ m}\times 0.32\text{ mm}\times 5\ \mu\text{m}$,载气为氦气,其纯度大于 99.999% ^[18]。质谱检测条件为:离子源为 70 eV EI 源,接口温度为 200°C 。由于GC-MS测试时 O_2 和 CO 出峰时间重合,导致无法对 CO 进行有效的定性和定量分析,研究中使用CO分析仪对热解实验中的 CO 浓度进行检测。CO分析仪型号为GXH-3011N型,是根据不分光红外线(NDIR)原理、朗伯-比尔定律和气体对红外线有选择性吸收的原理设计而成。光学结构采用气体滤波相关技术及高灵敏度探测器,仪器对 CO 的检测范围为 $0\sim 500\ \mu\text{L/L}$,灵敏度为 $1\ \mu\text{L/L}$ 。

为避免热解产生的高温气体对仪器造成损坏,

在热解气室的出气口串联长为 2 m 的无氧铜管使气体冷却后再进行分析,实验中气路气体流速控制为 1 L/min 。

2.3 定子线棒放电实验平台

为模拟定子线棒表面的局部放电,搭建了定子线棒放电模拟实验平台,实验平台由电路和气路两部分组成,如图3所示。

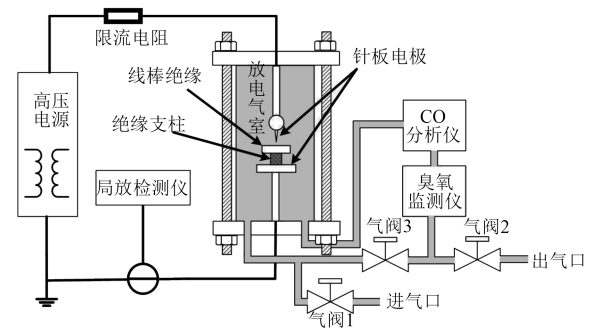


图3 定子线棒表面局部放电实验平台

Fig.3 Experimental platform of surface partial discharge for stator bar

电路部分主要由高压电源、限流电阻、针板电极和局放检测仪等组成。其中高压电源为 150 kV 无局放试验变压器;限流电阻阻值为 $10\text{ k}\Omega$;针板电极为不锈钢材料,针尖曲率半径约为 0.05 mm ,板电极直径为 75 mm ,板电极上放置直径为 20 mm 、高为 30 mm 的绝缘支柱,试样被绝缘支柱支撑在板电极上。为模拟定子线棒外表面的局部放电,将线棒外表面和针尖距离设置为 0.5 mm 。局部放电检测采用脉冲电流法的检测系统,可以测量放电次数、最大放电量等参数。

当放电发生在线棒外表面时,会使空气和线棒外表面材料分解,产生 O_3 、氮氧化合物和 CO 等气体衍生物。根据文献[11]的研究结果,空气环境放电的主要气体产物中, O_3 的浓度远大于氮氧化合物的浓度,所以选取 O_3 和 CO 作为研究对象。

气路部分主要由放电气室、CO分析仪和臭氧监测仪等组成。放电气室的容积为 4 L ;CO分析仪与定子线棒热解实验中的相同。紫外光度法是目前环境行业推荐的臭氧监测方法,它是利用臭氧对 253.7 nm 处紫外光的特征吸收,检测紫外光通过不含有臭氧的空气样品和样品气进入吸收池后的光强 I_0 和 I ,根据朗伯-比尔定律,得到臭氧浓度,其原理如式(5)所示^[19]。

$$\ln(I/I_0) = \alpha C l \quad (5)$$

式(5)中: α 为臭氧在光波长为 253.7 nm 处的吸收系数,其值为 $1.44\times 10^{-5}\text{ m}^2/\mu\text{g}$;C为臭氧浓度,单位为

$\mu\text{g}/\text{m}^3$; l 为吸收池中的光程,单位为m。实验中使用的臭氧监测仪为美国2B公司生产的Model106L型,其量程为100 $\mu\text{L}/\text{L}$,分辨率为0.1 pL/L 。

根据环保部标准 HJ 590—2010^[20]和 HJ 654—2013^[21]对空气中臭氧的测量要求,测量臭氧的气路管线须采用玻璃、聚四氟乙烯等不与臭氧反应的材料。实验中气路管线采用聚四氟乙烯塑料管,气路中气体流速为1 L/min。

3 结果与讨论

3.1 定子线棒热解实验

每次实验前,拆开热解气室并使用无水乙醇擦拭气室内壁,待无水乙醇挥发后,将线棒外表面朝下放置于热解气室底部,组装热解气室,然后进行定子线棒热解实验。

先将定子线棒的热解温度设置为250 $^{\circ}\text{C}$,对实验3 h后的热解气室气体使用GC-MS的全扫描模式进行定性分析,只识别到气体组分中含有 N_2 和 CO_2 ,这可能是由于其他气体浓度太低而无法识别。环氧树脂热解时可能的气体产物有 CO 、 CO_2 和各种烃/醛类气体,所以可以选择合适的质荷比,再使用GC-MS的离子监测(SIM)模式对热解气体进行分析。通过比对美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)质谱数据库,所选择的气体组分及其质荷比如表2所示。

表2 气体组分及其质荷比

气体	质荷比	气体	质荷比
CO	12	C_2H_6	28
CO_2	44	C_3H_4	40,39
CH_2O	29	C_3H_6	41,39,38
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	29,44,43	C_3H_8	29,28,27
CH_4	16,15	C_4H_8	41
C_2H_2	26,25	C_4H_{10}	43
C_2H_4	28,27,26		

将热解温度设置为250 $^{\circ}\text{C}$,实验3 h后,使用GC-MS的离子监测模式分别对新、旧定子线棒热解气体进行分析,热解气体组分如表3所示。

3.1.1 新定子线棒热解实验

将热解温度分别设置为100、120、150 $^{\circ}\text{C}$,对新定子线棒进行9 h的热解实验,每隔3 h对热解气体进行一次分析,结果如图4所示。从图4可以看出,热解温度不高于150 $^{\circ}\text{C}$ 时,定子线棒热解气体中只检测到 CO 和 CO_2 两种气体。温度为100、120、150 $^{\circ}\text{C}$ 时, CO 浓度变化率分别为0.97、2.27和3.93

表3 热解气体组分

气体	检测时间/min	气体	检测时间/min
CO	4.70	C_3H_6	36.82
CH_4	4.86	C_4H_{10}	39.56
C_2H_6	7.02	CH_3Cl	39.82
CO_2	7.40	C_6H_6	55.90
C_2H_4	9.06	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	58.00
C_3H_8	18.76		

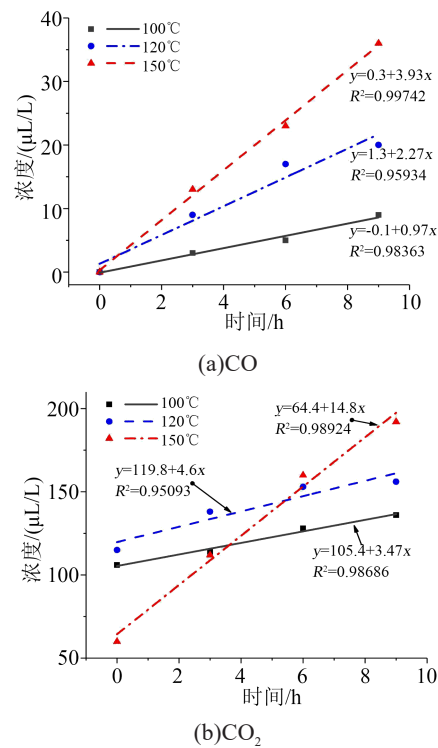


图4 新定子线棒热解气体生成规律

Fig.4 Pyrolysis gas generation law of new stator bar

($\mu\text{L}/\text{L}$)/h, CO_2 浓度变化率分别为3.47、4.60和14.8 ($\mu\text{L}/\text{L}$)/h。当热解温度升高到250 $^{\circ}\text{C}$,实验3 h后在热解气体中检测到 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 、 C_4H_{10} 、 CH_3Cl 、 C_6H_6 和 $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ 等气体,其中浓度较大的气体组分有 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 和 CH_3Cl ,实验结果如图5所示。从图5可以看出,250 $^{\circ}\text{C}$ 时, CO 、 CO_2 浓度增速非常大,浓度变化率分别为883、1 182.7 ($\mu\text{L}/\text{L}$)/h; CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 、 CH_3Cl 的浓度增速相对较小,浓度变化率分别为13、3.43、3.37、24.6、7.3 ($\mu\text{L}/\text{L}$)/h,浓度变化率从大到小依次为 CO_2 、 CO 、 C_3H_6 、 CH_4 、 CH_3Cl 、 C_2H_4 、 C_2H_6 。

3.1.2 旧定子线棒热解实验

将热解温度分别设置为100、120、150 $^{\circ}\text{C}$,对旧定子线棒进行9 h的热解实验,每隔3 h对热解气体进行一次分析,结果如图6所示。从图6可以看出,热解温度不高于150 $^{\circ}\text{C}$ 时,旧定子线棒的热解气体

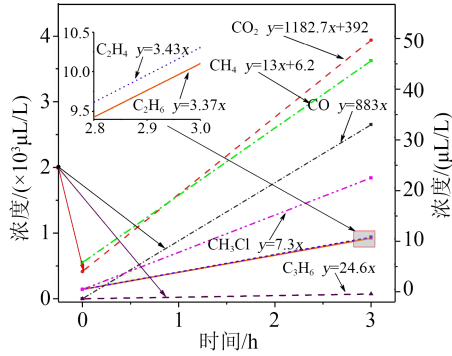


图5 250℃时新定子线棒主要热解气体生成规律

Fig.5 Main pyrolysis gas generation law of new stator bar at 250℃

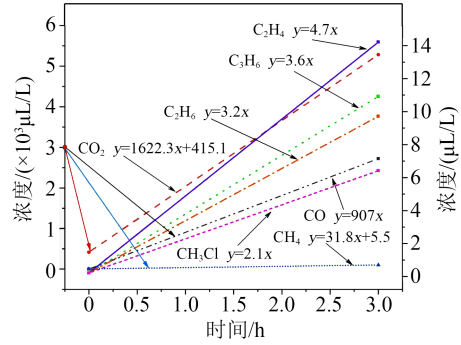
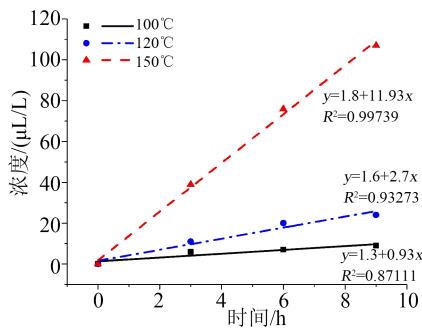
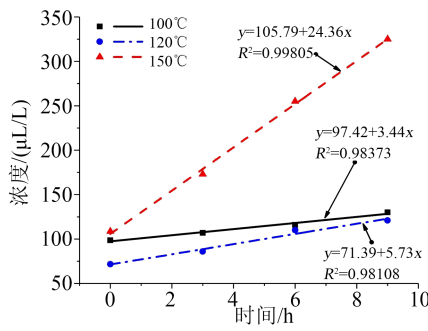


图7 250℃时旧定子线棒主要热解气体生成规律

Fig.7 Main pyrolysis gas generation law of old stator bar at 250℃



(a)CO



(b)CO₂

图6 旧定子线棒热解气体生成规律

Fig.6 Pyrolysis gas generation law of old stator bar

组分只有CO和CO₂。温度为100、120、150℃时,CO浓度变化率分别为0.93、2.70、11.93 (μL/L)/h,CO₂浓度变化率分别为3.44、5.73、24.36 (μL/L)/h。当热解温度升高到250℃时,实验3 h后在热解气体中出现了CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆、C₄H₁₀、CH₃Cl、C₆H₆和C₂H₄O等气体,其中浓度较大的气体组分有CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆和CH₃Cl,如图7所示。从图7可以看出,当温度250℃时,CO、CO₂浓度增速非常大,浓度变化率分别为907、1 622.3 (μL/L)/h;CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆和CH₃Cl的浓度增速相对较小,浓度变化率分别为31.8、4.7、3.2、3.6、2.1 (μL/L)/h,浓度变化率大到小依次为CH₄、C₂H₄、C₃H₆、C₂H₆、CH₃Cl。

根据水轮发电机新、旧定子线棒的热解实验结

果,定子线棒热解会产生CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆、C₄H₁₀、CH₃Cl、C₆H₆和C₂H₄O等气体。其中CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆、CH₃Cl在常温下呈气态,适合作为水轮发电机定子线棒高温故障特征气体。CO和CO₂在100℃时就已经产生,随着温度的升高,CO和CO₂的浓度增速最快,热解气体中出现了CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆和CH₃Cl。对于新、旧定子新棒,CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆和CH₃Cl的生成速率大小有所区别,这可能是由于线棒型号及使用时间不同所致。

3.2 定子线棒局部放电实验

每次放电实验前,拆开放电气室并使用无水乙醇擦拭电极及气室内壁,待无水乙醇挥发后,将线棒内表面朝下放置于板电极的绝缘支柱上,然后组装放电气室,将气室抽真空后充入1个大气压空气,此过程重复5次,然后进行定子线棒放电实验。

打开气阀1和气阀2,关闭气阀3,使气路处于开放式状态。分别对新定子线棒外表面材料、旧定子线棒外表面材料和半导体硅胶进行局部放电实验,对实验中的O₃和CO气体进行在线监测。

3.2.1 新定子线棒局部放电实验

将放电电压设置为8.1 kV,试样为新定子线棒,使用臭氧检测仪检测到的O₃浓度如图8所示。从图8可以看出,O₃浓度在放电起始阶段增速较快,在放电20 min左右达到饱和。实验中CO分析仪未在气路中检测到CO。

为了研究更高放电强度下是否会检测到CO,另外也为了验证O₃浓度与放电电压的正相关性,更换新定子线棒试样,将放电电压提高到8.7 kV。结果放电过程中CO分析仪仍未检测到CO,放电后的试样表如图9所示。从图9可以看出,放电后新定子线棒表面有碳化坑和电腐蚀痕迹,碳化坑是由于电离后的离子轰击线棒表面形成的,电腐蚀是由于

放电过程中产生的腐蚀性气体衍生物,如硝酸、臭氧,和线棒材料发生化学反应,定子线棒材料会在电离和电腐蚀作用下逐渐劣化。使用臭氧监测仪检测到的 O_3 浓度如图10所示。从图10可以看出, O_3 浓度在放电约120 min后才达到饱和,说明随着放电电压的升高, O_3 的生成速率增大。

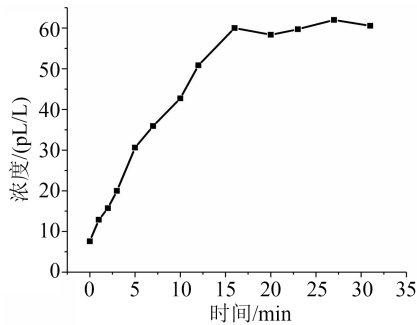


图8 O_3 浓度随时间变化曲线

Fig.8 The curve of O_3 concentration change with time

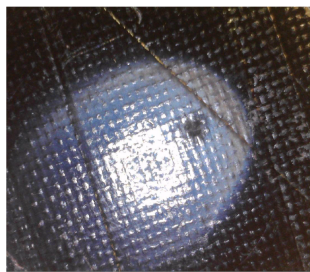


图9 放电后新定子线棒表面

Fig.9 Surface of the new stator bar after discharge

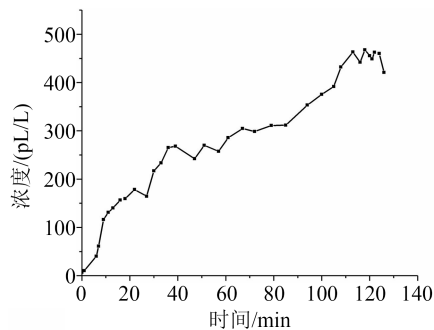


图10 新定子线棒 O_3 浓度随时间变化曲线

Fig.10 The change curve of O_3 concentration of new stator bar with time

在对新定子线棒进行8.7 kV放电实验后,将放电电压调低至0 kV,关闭气阀1和气阀2,打开气阀3,使气路处于封闭循环状态,记录 O_3 浓度随时间的变化,结果如图11所示。由图11可知, O_3 浓度在放电结束后迅速减小,所以对发电机局部放电中产生的 O_3 浓度进行监测时,只能采用在线监测的方式。

3.2.2 旧定子线棒局部放电实验

将放电电压设置为8.1 kV,试样换为旧定子线

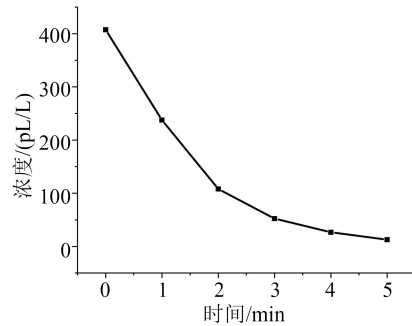


图11 放电结束后 O_3 浓度随时间的变化曲线

Fig.11 The curve of O_3 concentration change with time after discharge

棒,放电后旧定子线棒表面如图12所示。从图12可以看出,线棒表面由于电离而形成的碳化坑。使用臭氧监测仪检测到的 O_3 浓度如图13所示,与图8对比可以看出,在同样的放电电压下,旧定子线棒的 O_3 生成速率更大。

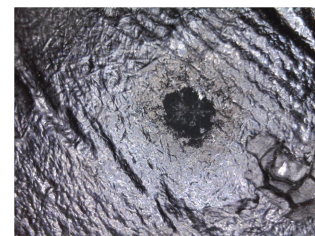


图12 放电后旧定子线棒表面

Fig.12 Surface of the old stator bar after discharge

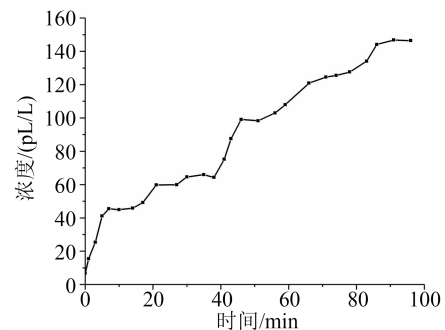


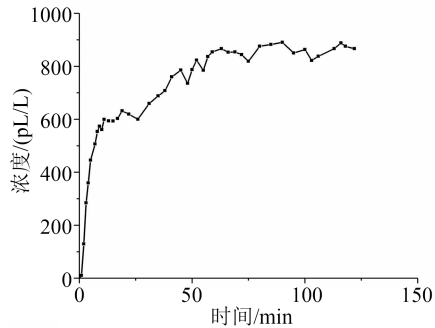
图13 旧定子线棒 O_3 浓度随时间变化曲线

Fig.13 The change curve of O_3 concentration of old stator bar with time

3.2.3 半导体硅胶局部放电实验

将放电电压设置为8.1 kV,将旧定子线棒表面半导体硅胶置于针电极下。使用臭氧监测仪检测到的 O_3 浓度如图14所示。由图14可知, O_3 浓度在放电开始后迅速增大,说明此时 O_3 的生成速率很大,放电10 min后 O_3 浓度增速明显缓慢。实验后,半导体硅胶表面没有发现碳化坑和电腐蚀痕迹,说明半导体硅胶具有较强的抗电晕能力。

根据对新、旧定子线棒表面材料和半导体硅胶

图14 O₃浓度随时间变化曲线Fig.14 The curve of O₃ concentration with time

的局部放电实验,O₃很适合作为定子线棒表面局部放电的特征气体,新定子线棒表面局部放电中O₃的生成速率最低,半导体硅胶表面局部放电中O₃的生成速率最高。放电后,新、旧定子线棒表面有明显的放电破坏痕迹,而半导体硅胶表面则观察不到放电破坏痕迹,说明半导体硅胶具有较强的抗电晕能力。实验中可能由于CO浓度过低,未检测到CO的存在。

4 结论

本文搭建了水轮发电机定子线棒热解实验平台和放电实验平台,使用气体监测仪器对高温和局部放电故障下的分解气体进行研究,得到如下主要结论:

(1)虽然定子线棒为F级绝缘,但在100℃时已经发生热解,所以即使在允许的工作温度范围内,定子线棒的工作温度也不宜偏高。

(2)CO和CO₂可以作为水轮发电机定子线棒高温故障的早期特征气体组分,CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆和CH₃Cl可以作为高温故障进一步恶化的特征气体组分。

(3)O₃适合作为发电机定子线棒放电故障的特征气体,因其性质非常活泼,必须对其进行在线监测;定子槽中填充的半导体硅胶具有较强的抗电晕能力,且在放电发生时,半导体硅胶O₃的生成速率更大。

水轮发电机内部电磁环境恶劣、振动较强,不利于使用接触式传感器对其进行在线监测,而采用气体传感器则可以对水轮发电机实现非接触式在线监测,具有明显的优势。

参考文献:

[1] 兰紫君.水轮发电机定子绕组温度预警研究[D].重庆:重庆理工大学,2021.

- [2] 王康铭,宋昕熠.气候变化对水力发电影响研究进展[J].水利水电技术,2022,54(2):129-141.
- [3] 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.
- [4] 丁韬.水轮发电机温度异常诊断及处理的探索与实践[D].成都:西华大学,2020.
- [5] 万元,李朝晖,薛松,等.水轮发电机局部放电在线监测中的脉冲识别方法[J].高电压技术,2009,35(9):2169-2175.
- [6] 李亚楠.大型水轮发电机局部放电模式识别方法研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [7] 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.
- [8] 祁伟健,张秀丽,贾明静,等.发电机绝缘材料过热裂解挥发有机物成分分析[J].热固性树脂,2021,36(4):52-60.
- [9] 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.
- [10] 李予全,吴司颖,董曼玲,等.SF₆气体绝缘设备局部放电分解特征组分三角形诊断法[J].绝缘材料,2022,55(11):86-92.
- [11] 李康,郭润睿, JAVED H,等.空气局部放电衍生物气体生成规律的研究[J].电工电能新技术,2017,36(8):1-7.
- [12] 付岚贵,金英兰.云母带等主绝缘材料在发电机和高压大电机工业中的应用[J].绝缘材料通讯,2000,32(5):9-17.
- [13] LOUIS L, DENISE L D, MARIO B, et al. Understanding ozone distribution inside stator core and measurements inside air-cooled generators to assess partial discharges problems[C]//Iris Rotating Machine Conference. San Antonio, USA:IEEE,2007.
- [14] MILLET C, NGUYEN D N, LEPINE L, et al. Case study-high ozone concentration in hydro generators[C]//2009 IEEE Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada:IEEE,2009.
- [15] 黄金保,伍丹,童红,等.聚乙烯热裂解行为的分子动力学模拟[J].材料导报,2013,27(1):130-132.
- [16] CHEN J H, DAVIDSON J H. Ozone production in the positive DC corona discharge: Model and comparison to experiments[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,2002,22(4):495-522.
- [17] 张昕冉.开关柜绝缘缺陷气体特征检测研究[D].沈阳:沈阳工程学院,2021.
- [18] 周朕蕊,韩冬,赵明月,等.电晕放电下C₅F₁₀O混合气体的分解特性[J].电工技术学报,2021,36(2):407-416.
- [19] 王树杰,田彪,丁明虎,等.基于紫外光度法新型臭氧自动监测仪Model 205的性能研究[J].光学仪器,2017,39(2):58-63,88.
- [20] 沈阳市环境监测中心站.环境空气 臭氧的测定 紫外光度法:HJ 590—2010[S].北京:中国环境科学出版社,2010.
- [21] 中国环境监测总站.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.

收稿日期:2022-12-13;修回日期:2023-02-02.

作者简介:胡蝶(1991-),女(汉族),湖南长沙人,工程师,主要从事发电设备试验、检测与故障诊断技术的研究;通信作者:万留杰(1983-),男(汉族),河南新郑人,讲师,博士,主要从事电气设备的在线监测技术的研究。