

# 环网柜可分离连接器绝缘故障模拟及典型气体释放规律研究

赵 静

云南电网有限责任公司瑞丽供电局, 云南 瑞丽

收稿日期: 2023年3月27日; 录用日期: 2023年5月29日; 发布日期: 2023年6月6日

## 摘 要

为更好的实现气体组分分析法在环网柜绝缘状态预测评估这一领域的应用, 本文对环网柜可分离连接器绝缘故障模拟及典型气体释放规律进行研究。实验对环网柜可分离连接器典型绝缘故障进行模拟, 包括可分离连接器装配不到位、套管与可分离连接器之间有金属丝、套管表面有凹陷、可分离连接器内表面有凹陷, 同时选取非甲烷总烃、氢气、一氧化碳作为监测目标物。得出如下结论: 环网柜可分离连接器典型绝缘故障模拟过程中会生成氢气、一氧化碳、非甲烷总烃气体; 氢气、一氧化碳、非甲烷总烃气体浓度大小以及变化规律存在差异; 试验箱内部位于可分离连接器上方的传感器氢气数值远大于下方传感器数值。试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的一氧化碳传感器数值大于上部传感器数值; 在可分离连接器装配不到位、套管表面有凹陷、可分离连接器内表面有凹陷绝缘故障模拟过程中, 试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的非甲烷总烃传感器数值大于上部传感器数值, 在套管与可分离连接器之间有金属丝绝缘故障模拟过程中, 试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的非甲烷总烃传感器数值小于上部传感器数值。

## 关键词

可分离连接器, 绝缘故障模拟, 气体成份分析

# Research on Insulation Failure Simulation and Typical Gas Release Law of Detachable Connectors in Ring Cabinet

Jing Zhao

Yunnan Power Grid Co., Ltd., Ruili Power Supply Bureau, Ruili Yunnan

## Abstract

In order to better realize the application of gas component analysis method in the prediction and evaluation of ring cabinet insulation state, this paper studies the insulation fault simulation and typical gas release law of the detachable connector of ring cabinet. Typical insulation failures of detachable connectors in ring cabinet were simulated in the experiment, including the assembly of detachable connectors was not in place, there were metal wires between the sleeve and the detachable connector, there were dents on the surface of the sleeve, and there were dents on the inner surface of the detachable connector. At the same time, non-methane total hydrocarbons, hydrogen and carbon monoxide were selected as monitoring targets. The following conclusions are drawn: Hydrogen, carbon monoxide and non-methane total hydrocarbon gases are generated during the typical insulation failure simulation of the detachable connector of the ring cabinet. There are differences in the concentration of hydrogen, carbon monoxide and non-methane hydrocarbon gases. The hydrogen value of the sensor above the detachable connector inside the test chamber is much greater than that of the sensor below it. The carbon monoxide sensor with the gas concentration in the test chamber located at the lower part of the separable connector is greater than the upper part of the sensor. In the insulation fault simulation process where the assembly of the detachable connector is not in place, the casing surface is concave, and the inner surface of the detachable connector is concave, the value of the non-methane total hydrocarbon sensor whose gas concentration in the test chamber is located at the lower part of the detachable connector is greater than the value of the upper sensor. In the insulation fault simulation process where there is wire between the casing and the detachable connector, the non-methane total hydrocarbon sensor with the gas concentration in the test chamber at the lower part of the separable connector is smaller than that at the upper part.

## Keywords

Detachable Connector, Insulation Fault Simulation, Gas Composition Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

环网柜作为电力系统的一个重要组成部分，其安全运行具有重要意义。环网柜一般集中于一箱体内，结构紧凑、占地面积小，可以放置于马路或者建筑物边上，方便相关供电部门进行管理，当发生电力事故的时候，电力部门可以及时地处理故障；其全封闭、全绝缘放置于户外，可以适应户外部分恶劣环境；同时制作的成本低、维护方便，经济效益高[1] [2]。部分环网柜在多年连续运行的情况下会产生绝缘缺陷，这些绝缘缺陷在开关柜的运行过程中容易引起电场畸变，从而发生局部放电(PD)。若不及早发现开关柜内部的绝缘缺陷而任其发展至严重程度，最终将导致开关柜内绝缘破坏而引发安全事故，给企业带来巨大的经济损失和负面的社会影响。因此，环网柜绝缘故障预警监测已经成为重要的研究方向之一[3]。

近年来，电网内部多次发生因环网柜内部局放引发绝缘材料老化，进而导致环网柜烧损事件。屏蔽

型可分离连接器是环网柜绝缘故障发生频率最高的绝缘部件之一。屏蔽型可分离连接器是电缆终端的一种,可用于电缆与环网柜、变压器和其他设备之间的连接。随着 10 kV 屏蔽型可分离连接器的广泛应用,制造厂家良莠不齐和市场监管不力等因素,其在运行和使用过程中暴露出越来越多的问题和隐患,造成这些问题的因素,有的是肘型头存在设计或制造缺陷,有的是与之配套使用的套管存在设计或制造缺陷,有的是运行环境恶劣,有的是装配缺陷。随着运行时间的增加和缺陷的积累发展,造成沿面爬电、绝缘击穿和爆炸等恶性事故[4] [5] [6] [7] [8]。因此,需采用有效的监测手段在绝缘故障发生前期进行有效预判及时发现绝缘故障,将故障消除在萌芽状态。现阶段可用于环网柜可分离连接器绝缘故障检测的方法主要有:脉冲电流法、特高频法、暂态地电压法、超声波检测法、光学检测法[9] [10]。但受环网柜结构、测试时间与位置、测试人员,以及设备本身抗干扰能力的影响,难以对柜内缺陷状况进行精准判断。且以上监测方法针对局部放电本身进行监测,即使监测到有局放的发生,也无法对环网柜内绝缘件的绝缘损伤程度进行精确评估。基于以上问题近年来气体组分分析法在高压开关柜绝缘故障监测领域成为研究热点,此方法不属于电气量监测不存在电磁干扰问题,监测结果相对准确。但针对该方法的研究目前集中于局部放电与无机气体生成关系的研究,如臭氧、一氧化碳、二氧化氮等,很少涉及到局部放电以及由此引发的绝缘材料分解与有机气体生成关系的研究,臭氧为高活性物质性质不稳定不便于监测,且仅针对无机气体进行监测,无法对环网柜内绝缘件的绝缘损伤程度进行精确评估[11] [12] [13] [14]。环网柜内部绝缘件采用的材料为有机高分子材料,当环网柜内部有局部放电作用于可分离连接器时,在电子碰撞以及瞬间高温的作用下,绝缘材料会发生分解释放出挥发性有机物与无机气体。通过对环网柜内特征气体的浓度、产气速率等进行在线监测,对监测数据进行分析可实时判断环网柜内部的绝缘状态,此方法可直接判断环网柜内部绝缘损伤程度,监测系统不存在电磁干扰问题,监测结果准确。

综上所述,为更好的实现气体组分分析法在环网柜绝缘状态预测评估这一领域的应用,本文对环网柜可分离连接器绝缘故障模拟及典型气体释放规律进行研究。实验对环网柜可分离连接器典型绝缘故障进行模拟,包括可分离连接器装配不到位、套管与可分离连接器之间有金属丝、套管表面有凹陷、可分离连接器内表面有凹陷,同时选取非甲烷总烃、氢气、一氧化碳作为监测目标物。重点研究环网柜可分离连接器在产生不同绝缘故障过程中,以上目标气体浓度的变化规律。研究结论可为气体组分分析法在环网柜绝缘状态预测评估这一领域的应用提供理论依据与应用基础。

## 2. 实验装置

数字式局部放电检测仪(DPD-2012,上海松宝科技发展有限公司);可分离连接器绝缘故障模拟试验箱(定制型号);气体检测装置(JCXT-01,融研(上海)电气技术有限公司)。可分离连接器绝缘故障模拟及气体检测试验装置如图 1 所示,装置整体由数字式局部放电检测仪、气体检测装置和可分离连接器绝缘故障模拟试验箱组成,其中气体检测装置由传感器模块、主机模块、4G DTU 模块以及数据平台软件组成,非甲烷总烃传感器浓度检测范围为 0.00 ppm~500.00 ppm、一氧化碳和氢气传感器浓度检测范围为 0.0 ppm~1000.0 ppm。试验装置由数字式局部放电检测仪提供可调节测试电压,同时可检测局放量。两组气体检测传感器(一氧化碳、氢气、非甲烷总烃)置于试验箱内部并分别置于可分离连接器上方与下方位置,用于监测试验箱内上部和下部分别一氧化碳、氢气、非甲烷总烃的浓度。主机模块、4G DTU 模块置于试验箱上部,可接收显示传感器数据并上传至网络。

采用以上实验装置进行可分离连接器绝缘故障模拟及气体检测实验,分别模拟可分离连接器装配不到位、套管与可分离连接器之间有金属丝、套管表面有凹陷、可分离连接器内表面有凹陷。以上四种缺陷进行故障模拟实验前后对比如图 2 所示。

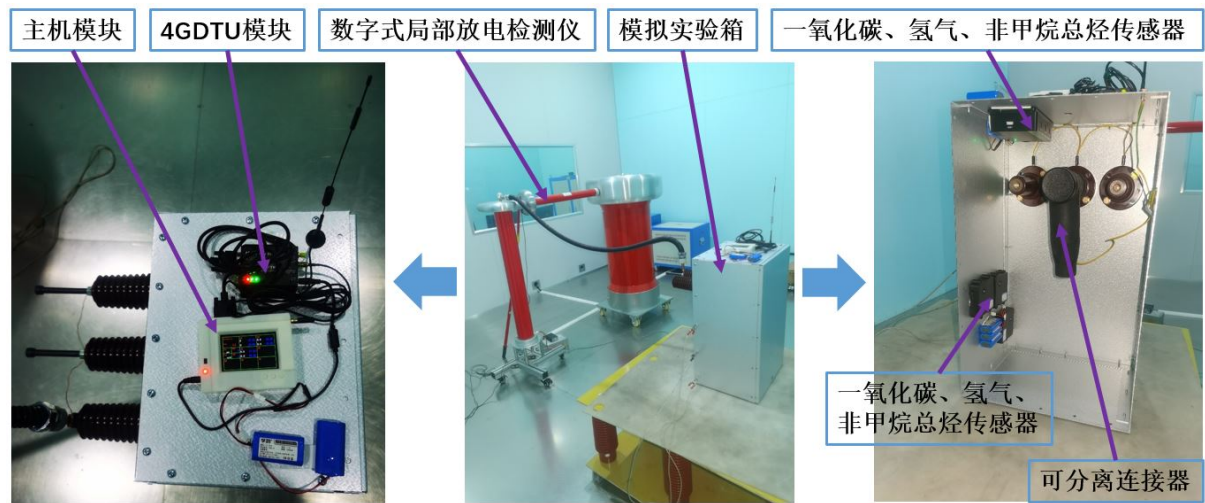


Figure 1. Detachable connector insulation fault simulation and gas detection test equipment  
图 1. 可分离连接器绝缘故障模拟及气体检测试验装置

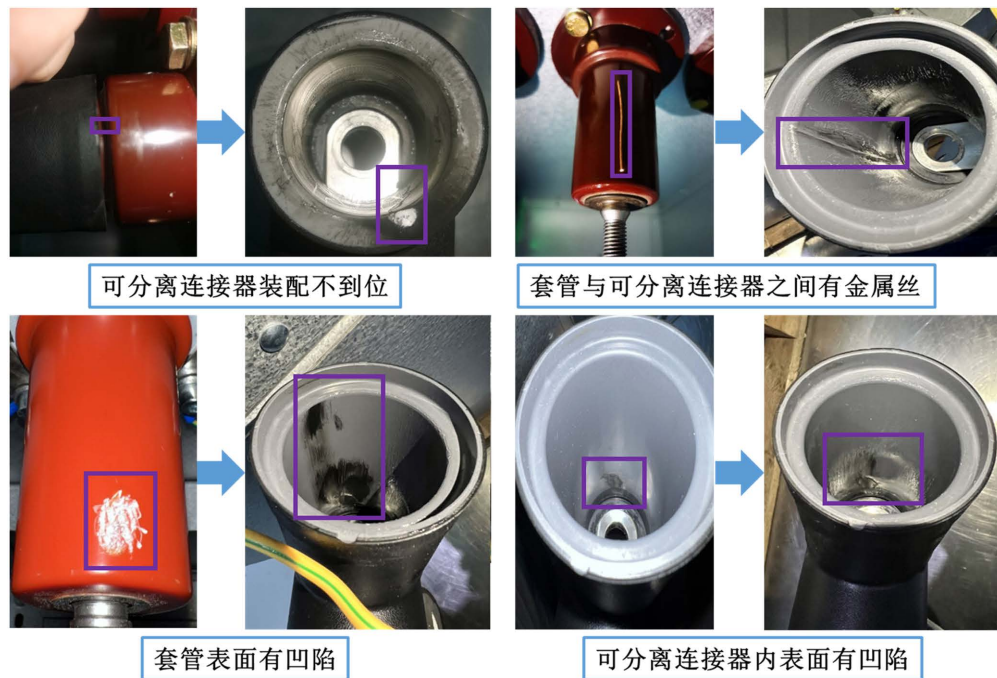


Figure 2. Comparison of before and after simulation of insulation failure of separable connectors  
图 2. 可分离连接器绝缘故障模拟实验前后对比图

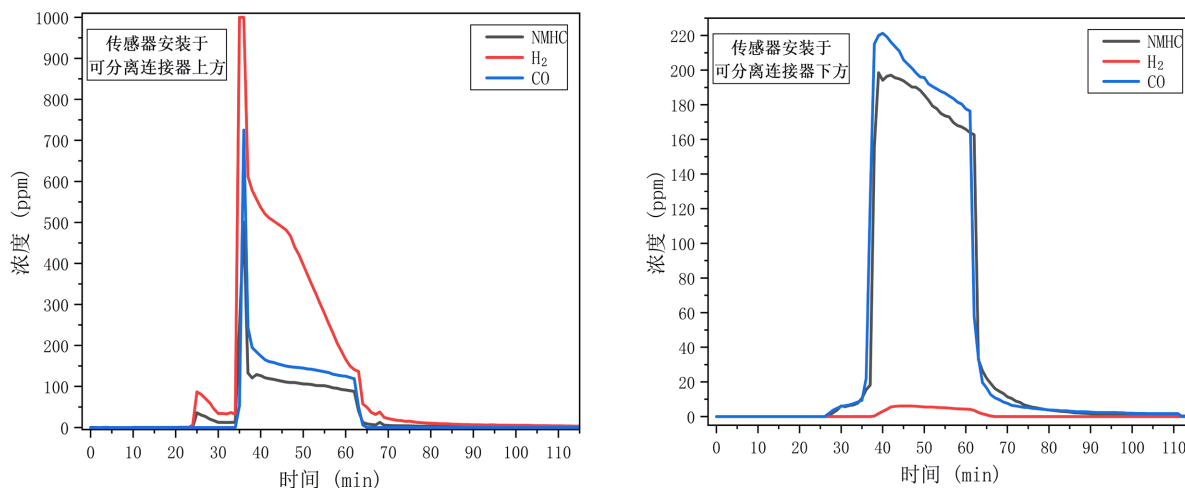
### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 可分离连接器装配不到位故障模拟实验

采用以上实验装置进行可分离连接器绝缘故障模拟及气体检测实验，模拟可分离连接器装配不到位。如图 2 所示，可分离连接器安装时没有装配到位，套管端面与可分离连接器前端面有 5 mm 的缝隙。可分离连接器绝缘故障模拟施加电压从 20 kV 起直至 43 kV 绝缘击穿，电压变化过程及相关参数如表 1 所示，可分离连接器装配不到位绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律如图 3 所示。

**Table 1.** Detachable connector assembly is not in place test voltage change process and related parameters**表 1.** 可分离连接器装配不到位实验电压变化过程及相关参数

施加电压(kV)	20	30	40	42	43
保持时间(min)	5	5	10	10	
泄漏电流(mA)	5.0	7.6	10.0	10.5	绝缘击穿
局放量(pC)	986	1092	1403	1430	

**Figure 3.** Variation law of gas concentration during insulation failure simulation process when detachable connector assembly is not in place**图 3.** 可分离连接器装配不到位绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律

由表 1 可知, 绝缘故障模拟可分离连接器装配不到位电压施加过程, 电压在 20 kV~42 kV 总停留时间为 30 min, 之后升高电压至 43 kV 时, 绝缘瞬间击穿。由图 3 可知, 安装于可分离连接器上方的传感器, 三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势, 且氢气浓度 > 一氧化碳浓度 > 非甲烷总烃浓度。氢气和非甲烷总烃浓度在 25 min~30 min 时, 浓度呈先增加后减小的趋势, 在 26 min 时达到此区间的最大值, 氢气浓度为 87.0 ppm, 非甲烷总烃浓度为 35.72 ppm, 在此时间范围内没有一氧化碳生成。在 35 min~40 min 内三种气体浓度急剧增高后又急剧降低, 在此时间范围内氢气最高浓度已超过 1000 ppm 满量程, 一氧化碳最高浓度为 725.5 ppm, 非甲烷总烃最高浓度为 243.76 ppm。说明在 30 min 绝缘击穿后会瞬间产生大量气体, 且在绝缘击穿瞬间产生大量的热, 生成气体随热量上升。因此, 在 35 min~40 min 内安装于可分离连接器上方的传感器数值远大于安装于可分离连接器下方的传感器数值。在 40 min~60 min 内安装于可分离连接器上方的传感器, 检测到的三种气体数值呈下降趋势且氢气浓度下降速率大于非甲烷总烃和一氧化碳。60 min 时打开试验箱前面板, 随后三种气体的浓度急剧降低。安装于可分离连接器下方的传感器, 三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势, 且一氧化碳浓度 > 非甲烷总烃浓度 > 氢气浓度, 在试验过程中氢气最大浓度为 6.1 ppm、非甲烷总烃最大浓度为 198.46 ppm、一氧化碳最大浓度为 221.3 ppm。对比安装于可分离连接器上方和下方的传感器数值可知, 位于可分离连接器上方的传感器氢气数值远大于下方传感器数值, 由于氢气在空气中的相对密度较低。试验箱内部气体浓度相对稳定后位于可分离连接器下部的非甲烷总烃和一氧化碳传感器数值略大于上部传感器数值, 由于非甲烷总烃和一氧化碳的相对密度与空气密度相差不大。

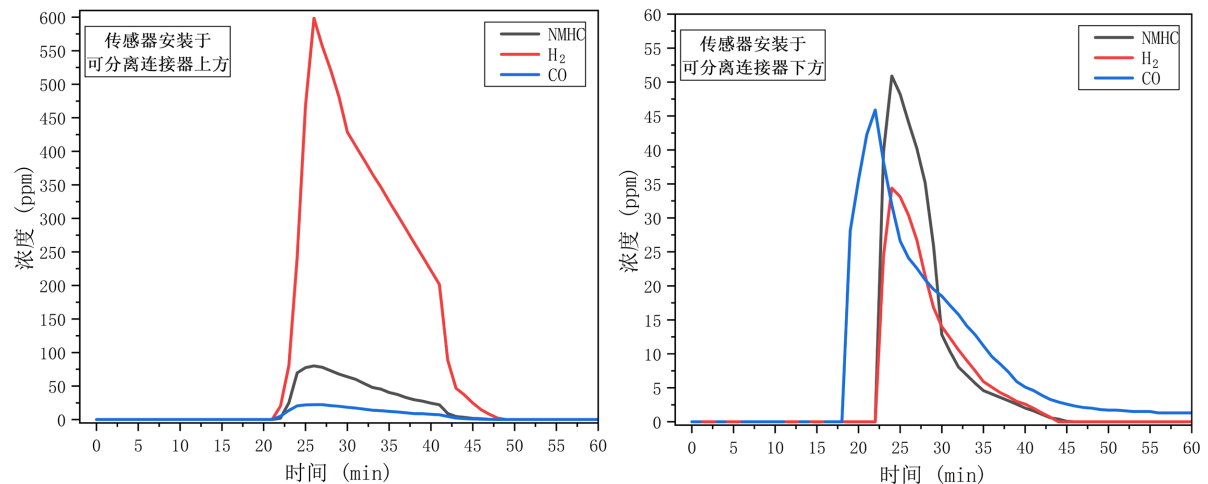
### 3.2. 套管与可分离连接器之间有金属丝故障模拟实验

采用以上实验装置进行可分离连接器绝缘故障模拟及气体检测实验, 模拟套管与可分离连接器之间有金属丝。如图 2 所示, 先将直径为 1~2 mm 的铜丝置于套管之上, 然后将可分离连接器安装在套管上, 安装时保证套管端面与可分离连接器内部端面完美贴合。可分离连接器绝缘故障模拟施加电压从 20 kV 起直至 37 kV 绝缘击穿, 电压变化过程及相关参数如表 2 所示, 套管与可分离连接器之间有金属丝绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律如图 4 所示。

**Table 2.** The test voltage change process and related parameters of there is a wire between the casing and the detachable connector

**表 2.** 套管与可分离连接器之间有金属丝实验电压变化过程及相关参数

施加电压(kV)	20	25	30	35	37
保持时间(min)	5	5	5	5	
泄漏电流(mA)	5.1	6.3	7.5	8.8	绝缘击穿
局放量(pC)	1092	1150	1205	1211	



**Figure 4.** Variation law of gas concentration during insulation failure simulation process when there is a wire between the casing and the detachable connector

**图 4.** 套管与可分离连接器之间有金属丝绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律

由表 2 可知, 绝缘故障模拟套管与可分离连接器之间有金属丝电压施加过程, 电压在 20 kV~35 kV 总停留时间为 20 min, 之后升高电压至 37 kV 时, 绝缘瞬间击穿。由图 4 可知, 安装于可分离连接器上方的传感器, 三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势, 且氢气浓度 > 非甲烷总烃浓度 > 一氧化碳浓度。在 26 min 时氢气、非甲烷总烃、一氧化碳同时达到最大值, 此时氢气浓度为 595.5 ppm、非甲烷总烃浓度为 80.08 ppm、一氧化碳浓度为 22.3 ppm。安装于可分离连接器下方的传感器, 三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势, 且非甲烷总烃浓度 > 一氧化碳浓度 > 氢气浓度。在 22 min 时一氧化碳浓度达到最大值为 45.9 ppm, 在 24 min 时非甲烷总烃和氢气浓度达到最大值分别为 50.90 ppm 和 34.4 ppm, 实验过程中一氧化碳气体优先被检测到。对比安装于可分离连接器上方和下方的传感器数值可知, 位于可分离连接器上方的传感器氢气数值远大于下方传感器数值, 由于氢气在空气中的相对密度较低。试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的一氧化碳传感器数值大于上部传感器数值, 由于一氧化碳的相对密度与空气密度相差不大。试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的非甲烷总烃传感器数值小于

上部传感器数值，由于非甲烷总烃为混合物，成份发生变化其相对密度也随之变化。

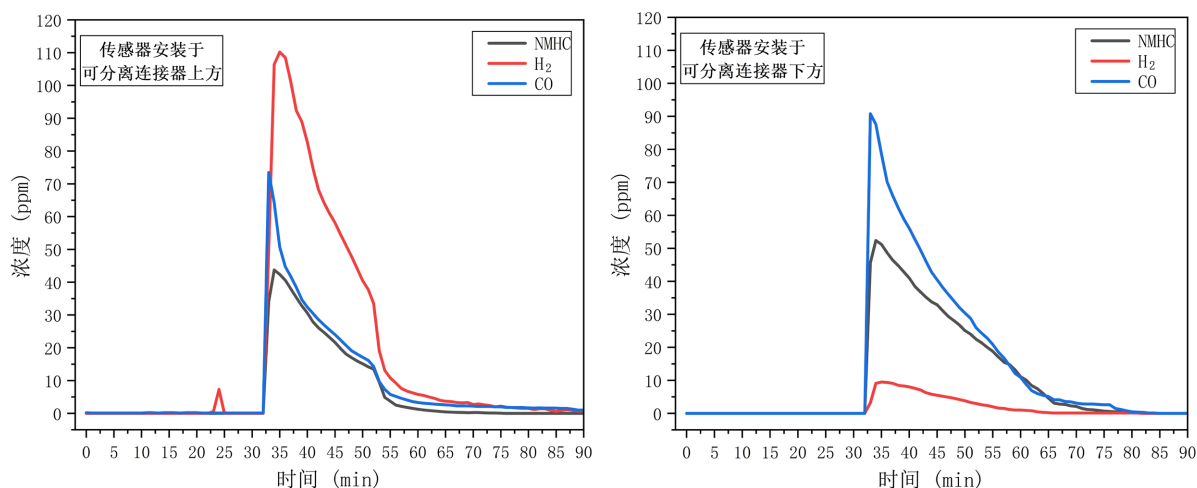
### 3.3. 套管表面有凹陷故障模拟实验

采用以上实验装置进行可分离连接器绝缘故障模拟及气体检测实验，模拟套管表面有凹陷。如图 2 所示，先用刀片在套管表面刻划出凹痕，然后将可分离连接器安装在套管上，安装时保证套管端面与可分离连接器内部端面完美贴合。可分离连接器绝缘故障模拟施加电压从 20 kV 起直至 41 kV 绝缘击穿，电压变化过程及相关参数如表 3 所示，套管表面有凹陷绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律如图 5 所示。

**Table 3.** The test voltage change process and related parameters of casing surface sag

**表 3.** 套管表面有凹陷实验电压变化过程及相关参数

施加电压(kV)	20	25	30	35	40	41
保持时间(min)	5	5	5	5	10	
泄漏电流(mA)	5.0	6.9	8.4	9.2	11.5	绝缘击穿
局放量(pC)	1200	2200	2700	3500	3800	



**Figure 5.** Variation law of gas concentration during insulation failure simulation process when the casing surface is dented

**图 5.** 套管表面有凹陷绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律

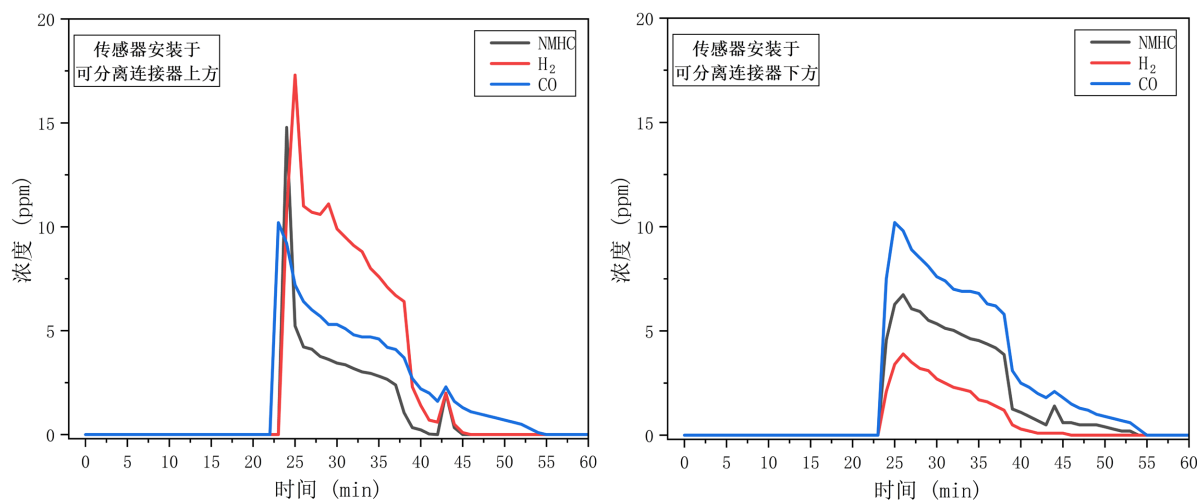
由表 3 可知，绝缘故障模拟套管表面有凹陷电压施加过程，电压在 20 kV~40 kV 总停留时间为 30 min，之后升高电压至 41 kV 时，绝缘瞬间击穿。由图 5 可知，安装于可分离连接器上方的传感器，三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势，且氢气浓度 > 一氧化碳浓度 > 非甲烷总烃浓度。氢气浓度在 23 min~25 min 时，浓度呈先增加后减小的趋势，在 24 min 时达到此区间的最大值，氢气浓度为 7.3 ppm。32 min 起三种气体浓度呈先增加后减小的趋势，在 34 min 时非甲烷总烃和一氧化碳浓度同时达到最大值，此时非甲烷总烃浓度为 43.73 ppm、一氧化碳浓度为 73.5 ppm。安装于可分离连接器下方的传感器，三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势，且一氧化碳浓度 > 非甲烷总烃浓度 > 氢气浓度。在 33 min 时一氧化碳浓度达到最大值为 90.8 ppm，在 34 min 时非甲烷总烃浓度达到最大值为 52.40 ppm，在 35 min 时氢气浓度达到最大值为 9.5 ppm。对比安装于可分离连接器上方和下方的传感器数值可知，位于可分离连接器上方的传感器氢气数值远大于下方传感器数值，试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的一氧化碳和非甲烷总烃传感器数值略大于上部传感器数值。

### 3.4. 可分离连接器内表面有凹陷故障模拟实验

采用以上实验装置进行可分离连接器绝缘故障模拟及气体检测实验, 模拟可分离连接器内表面有凹陷。如图 2 所示, 先用刀片在可分离连接器内表面刻划出凹痕, 然后将可分离连接器安装在套管上, 安装时保证套管端面与可分离连接器内部端面完美贴合。可分离连接器绝缘故障模拟施加电压从 20 kV 起直至 36 kV 绝缘击穿, 电压变化过程及相关参数如表 4 所示, 可分离连接器内表面有凹陷绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律如图 6 所示。

**Table 4.** The test voltage change process and related parameters of the inner surface of the detachable connector is dented  
**表 4.** 可分离连接器内表面有凹陷实验电压变化过程及相关参数

施加电压(kV)	20	25	30	35	36
保持时间(min)	5	5	5	5	
泄漏电流(mA)	6.3	8.9	10.4	11.2	绝缘击穿
局放量(pC)	634	1000	1500	1800	



**Figure 6.** Variation law of gas concentration during insulation failure simulation process when the inner surface of the detachable connector is dented

**图 6.** 可分离连接器内表面有凹陷绝缘故障模拟过程气体浓度变化规律

由表 4 可知, 绝缘故障模拟可分离连接器内表面有凹陷电压施加过程, 电压在 20 kV~35 kV 总停留时间为 20 min, 之后升高电压至 36 kV 时, 绝缘瞬间击穿。由图 6 可知, 安装于可分离连接器上方的传感器, 三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势, 且氢气浓度 > 非甲烷总烃浓度 > 一氧化碳浓度。在 23 min 时一氧化碳浓度达到最大值为 10.2 ppm, 在 24 min 时非甲烷总烃浓度达到最大值为 14.78 ppm, 在 25 min 时氢气浓度达到最大值为 17.3 ppm, 实验过程中一氧化碳气体优先生成。安装于可分离连接器下方的传感器, 三种气体浓度整体上呈先增加后减小的趋势, 且一氧化碳浓度 > 非甲烷总烃浓度 > 氢气浓度。在 25 min 时一氧化碳浓度先达到最大值为 10.2 ppm, 在 26 min 时非甲烷总烃和氢气浓度达到最大值分别为 6.74 ppm 和 3.9 ppm。对比安装于可分离连接器上方和下方的传感器数值可知, 位于可分离连接器上方的传感器氢气数值远大于下方传感器数值。试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的一氧化碳和非甲烷总烃传感器数值略大于上部传感器数值。



## 4. 结论

本文对环网柜可分离连接器典型绝缘故障进行模拟, 包括可分离连接器装配不到位、套管与可分离连接器之间有金属丝、套管表面有凹陷、可分离连接器内表面有凹陷, 同时选取非甲烷总烃、氢气、一氧化碳作为监测目标物, 得出结论如下:

- 1) 环网柜可分离连接器典型绝缘故障模拟过程中会生成氢气、一氧化碳、非甲烷总烃气体;
- 2) 在不同绝缘故障模拟过程中, 氢气、一氧化碳、非甲烷总烃气体浓度大小以及变化规律存在差异;
- 3) 在不同绝缘故障模拟过程中, 试验箱内部位于可分离连接器上方的传感器氢气数值远大于下方传感器数值。
- 4) 在不同绝缘故障模拟过程中, 试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的一氧化碳传感器数值大于上部传感器数值;
- 5) 在可分离连接器装配不到位、套管表面有凹陷、可分离连接器内表面有凹陷绝缘故障模拟过程中, 试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的非甲烷总烃传感器数值大于上部传感器数值, 在套管与可分离连接器之间有金属丝绝缘故障模拟过程中, 试验箱内部气体浓度位于可分离连接器下部的非甲烷总烃传感器数值小于上部传感器数值。

## 参考文献

- [1] 陈宇. 配电网中箱变及环网柜技术应用[J]. 中国科技纵横, 2012 (21): 146.
- [2] 金琪, 李烽, 顾临峰, 等. 新型智能化环网柜的设计及实现[J]. 华东电力, 2014, 42 (7): 1373-1376.
- [3] 苗爱敏, 邹勋, 李鹏, 等. 环网柜故障监测方法综述[J]. 工业工程, 2017, 20(36): 64-70.
- [4] 黄晨奕, 李红梅, 黄佳宁, 等. 10 kV 屏蔽型可分离连接器应力锥典型故障分析[J]. 高电压技术, 2022, 12(58): 69-74.
- [5] 方春华, 潘明龙, 易满成, 等. 环网柜电缆室电缆过长对套管受力分析[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 23-28.
- [6] 潘明龙, 方春华, 易满成, 等. 环网柜电缆室电缆屈曲对套管受力的影响规律[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 94-99.
- [7] 潘长明, 刘刚, 熊炬, 等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 90-93.
- [8] 周凤争, 孟庆霖, 朱晓辉, 等. 10 kV 电缆附件典型缺陷仿真与绝缘故障分析[J]. 绝缘材料, 2011, 44(4): 67-69.
- [9] 邱昌容, 王乃庆, 等. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [10] 彭超, 雷清泉. 局部放电超高频信号时频特性与传播距离的关系[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 348-353.
- [11] 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.
- [12] 张振宇, 李永祥, 杨罡, 等. 开关柜故障衍生气体实验模拟及分析[J]. 武汉大学学报, 2021, 8(54): 769-776.
- [13] 吴佳玮, 韩若愚, 周海滨, 等. 大电流气体火花开关聚四氟乙烯绝缘子绝缘劣化产物分析[J]. 电工技术学报, 2018, 2(33): 459-466.
- [14] 唐传佳, 刘志存, 陈立新, 等. 基于臭氧检测的高压开关柜初始放电预警技术[J]. 上海电气技术, 2018, 11(3): 50-52.