第 51 卷 第 6 期：2620-2630 高电压技术 Vol.51, No.6: 2620-2630
2025 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241857

环保型罐式多断口真空断路器气体绝缘与沿面闪络特性

程　显[1,2]，郭龙雨[1,2]，杜　帅[1,2]，葛国伟[1,2]，鲁文龙[1,2]
（1. 郑州大学电气与信息工程学院，郑州 450001；
2. 河南省输配电装备与电气绝缘工程技术研究中心，郑州 450001）

摘　要：随着国家“双碳”政策的提出，采用自然气体绝缘与真空灭弧室开断的环保型罐式真空断路器是高压、超高压领域替代 SF_6 断路器的有效手段，其绝缘气体选型方案与真空灭弧室陶瓷沿面闪络特性尚不清晰。首先进行了自然环保型绝缘气体干燥空气与 CO_2 雷电冲击绝缘击穿试验，提出了环保型气体绝缘方案。其次，进行了环保型气体绝缘条件下真空灭弧室陶瓷外壳沿面闪络特性研究，并分析了中封环处气体-陶瓷-金属三结合点对沿面闪络特性的影响。结果表明：0.9 MPa 干燥空气与 0.9 MPa CO_2 可满足罐式多断口真空断路器绝缘配置要求；真空灭弧室沿面闪络电压随着气压增加而增大并呈现略微饱和趋势，0.9 MPa 干燥空气真空灭弧室沿面闪络电压达到 202.98 kV，中封环的引入使沿面闪络电压下降 8.47%；金属微粒长度 5 mm、距离高压端 5 mm 时陶瓷外壳沿面闪络电压幅值降低相对最大为 49.67 kV；中封环的引入使此处表面电荷密度由 6.62 μC/m^2 增至 21.54 μC/m^2，导致其沿面闪络电压下降。以上结果可为超高压领域发展环保型罐式真空断路器提供理论依据与试验支撑。

关键词：环保型绝缘气体；罐式断路器；雷电冲击电压；真空灭弧室；沿面闪络

Gas Insulation and Surface Flashover Characteristics of Environment-friendly Tank Multi-break Vacuum Circuit Breakers

CHENG Xian[1,2], GUO Longyu[1,2], DU Shuai[1,2], GE Guowei[1,2], LU Wenlong[1,2]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Engineering Research Center of Power Transmission and Distribution Equipment and Electrical Insulation, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the proposal of carbon peak and carbon neutrality target, the tank multi-break vacuum circuit breakers technology, which adopts natural gas insulation and vacuum interrupter for breaking technology, is an effective alternative to replace SF_6 circuit breakers in the field of high voltage and ultra-high voltage; however, it is not clear to realize the selection of insulating gas and to understand the surface flashover mechanism of the vacuum interrupter ceramic shell. Firstly, the natural eco-friendly insulating gas dry air and CO_2 lightning impulse breakdown tests were conducted, an environmentally friendly insulating gas scheme was proposed. On this basis, the surface flashover test of the vacuum interrupter ceramic shell was performed, and the gas-solid surface flashover mechanism was analyzed. The results show that 0.9 MPa dry air and 0.9 MPa CO_2 can meet the requirements of the insulation configuration of environment-friendly vacuum circuit breakers. The surface flashover voltage increases with the increase of gas pressure and shows a slightly saturated trend, the surface flashover voltage of the vacuum interrupter by 0.9 MPa dry air reaches 202.98 kV, and the introduction of the center seal ring decreases the surface flashover voltage by 8.47%. When the length of metal particles is 5 mm and the distance from the high-voltage end is 5 mm, the surface flashover voltage amplitude of the ceramic shell is reduced to a relative maximum of 49.67 kV. The introduction of the center seal ring increases the surface charge density herein from 6.62 μC/m^2 to 21.54 μC/m^2, leading to a decrease in its surface flashover voltage. The above results can provide theoretical basis and experimental supports for the development of environmentally friendly tank vacuum circuit breakers in the ultra-high voltage field.

Key words: environment-friendly insulating gas; tank circuit breakers; lightning impulse voltage; vacuum interrupter; surface flashover

基金资助项目：国家高层次人才特殊支持计划(SQ2022QB06966)；国家自然科学基金(52107170；52477163)。
Project supported by National Special Support Program for High-level Talents (SQ2022QB06966), National Natural Science Foundation of China (52107170, 52477163).

0　引言

SF_6 由于绝缘强度高、液化温度低与灭弧能力强等特性被广泛用于高压开关设备[1]，在我国“双碳”目标的引领下，减少、限制并最终禁止 SF_6 在电力系统中使用已成为电力开关设备发展的必然趋势[2-3]。SF_6 的环保替代主要有研发新型环保气体与采用“真空开断+环保气体绝缘”两种技术路线。法国阿尔斯通和韩国 LS 电气公司研发了以 C_4F_7N 混合气体为绝缘和灭弧介质的 145 kV 及 170 kV 气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal-enclosed switchgear, GIS)[4-5]。新型环保气体存在灭弧能力不足，产生有毒分解物[6-7]，且欧盟针对含氟气体达成了法规协议[8]。新一代环保型开关设备中，采用绿色、洁净气体绝缘加真空开断被视为一种极具潜力的 SF_6 替代技术路线[4]；明电舍公司引用美国通用真空灭弧技术，基于干燥空气研制出 145 kV/40 kA 单断口罐式断路器；Simens 公司研究了真空开断加干燥空气绝缘的 145 kV/40 kA 的环保型单断口 GIS；平高公司开发了真空开断加 CO_2 绝缘的 126 kV/40 kA 的环保型 GIS[9-10]，充气压力 0.85 MPa。上述罐式断路器均采用单断口真空灭弧室，均在 145 kV 电压等级以下应用，由于真空间隙存在饱和效应，限制其向更高电压等级的发展；采用环保气体绝缘，多断口真空灭弧，罐式结构集成 GIS/HGIS 的环保型罐式多断口真空断路器，是实现真空断路器往更高电压等级发展的技术方案，可解决单断口真空断路器绝缘饱和和环保气体灭弧能力不足的问题[11-13]。与此同时，也将衍生一系列基础理论和关键技术问题，如罐式断路器气/固界面绝缘问题、多断口真空断路器电压分布不均问题、罐式结构紧凑型均压配置问题等，本文针对罐式断路器真空灭弧室气/固界面绝缘问题，进行了环保型罐式多断口真空断路器气体绝缘与沿面闪络特性研究。

自然环保型绝缘气体具有优异的健康友好性、安全稳定性等，国内外相关学者针对自然气体干燥空气与 CO_2 绝缘性能开展研究，中国电科院王欢研究表明使用 CO_2 作为 110 kV 电气设备的绝缘介质时，设备内部压强大于等于 0.6 MPa[14]；上海交通大学满林坤研究表明，在 0.1~0.3 MPa 气压内，随着气隙距离的增加 CO_2 的雷电冲击电压也随之增大，极性效应明显[15]；李红梅研究表明，在 0.1、0.15 MPa 气压下，由于电负性氧气的作用，干燥空气的绝缘特性优于氮气，更适合作为 C-GIS 的绝缘介质[16]；法国的 Sadaoui F 研究表明，干燥空气在球板电极下正极性雷电击穿电压大于负极性雷电击穿电压[17]；虽然针对自然气体绝缘特性开展了相关研究[18]，但是对于环保型罐式多断口真空断路器绝缘薄弱环节分析较少，并未开展典型电极结构下的雷电冲击绝缘特性研究，自然气体作为环保型罐式断路器绝缘气体选型方案适用性尚不明晰。

此外，真空灭弧室作为环保型真空开关的核心部件，高电压等级真空灭弧室的发展分为单断口与多断口两种方式。2022 年旭光电子研制出 126 kV/50 kA 单断口真空灭弧室；2024 年平高研制出 252 kV/50 kA 单断口真空灭弧室。随着单断口真空灭弧室电压等级的不断提高，其灭弧室具有多重悬浮屏蔽罩与多段陶瓷外壳串联的复杂结构，其沿面电场分布更加复杂。另一方面，罐式多断口真空断路器具有电压分布严重不均的问题，高压端真空灭弧室沿面电场分布畸变严重[11-13]，沿着陶瓷外壳的沿面闪络现象会影响高电压等级真空灭弧室的开发。因此，对自然环保气体绝缘的真空灭弧室陶瓷外壳沿面闪络特性的研究十分重要。关于 GIS、GIL 气/固界面沿面闪络特性研究方面，谢洪涛针对气体-金属-陶瓷三结合点采用外屏蔽结构提高了真空灭弧室陶瓷外壳的沿面闪络电压[19]；Makoto Miyashita 研究结果表明，干燥空气的沿面闪络电压随气压的增加出现明显的饱和趋势，金属微粒的存在会使得干燥空气绝缘性能下降[20]；中国电科院的成俊奇研究结果表明，金属微粒长度越长，绝缘子沿面闪络电压下降得越多[21]。在沿面闪络机理方面，华电邢照亮研究结果表明，工频电压下绝缘子表面电荷分布均匀并多为负电荷[22]；上海交通大学的吴振跃研究结果表明：低气压下，绝缘子的沿面闪络电弧沿着空气与气固交界面两部分发展[23]；陈韵中建立了基于固体表层电荷和气体碰撞电离耦合作用的沿面闪络模型可用于计算失效概率[24]。上述研究主要针对盆式绝缘子、环氧树脂支撑件、陶瓷绝缘子等部件的沿面闪络特性，关于罐式真空断路器中真空灭弧室陶瓷外壳气/固界面沿面闪络机理分析较少，特别是关于中封环与金属微粒对罐式断路器真空灭弧室沿面闪络特性的影响研究尚未开展。

针对以上研究存在的问题，本文首先进行了环保型罐式多断口真空断路器电场分析，得到罐体内部绝缘薄弱处环节与真空灭弧室沿面电场分布，设

计典型电极结构及缩比陶瓷绝缘子；其次，基于雷电冲击平台进行了干燥空气与 CO_2 在 0.5~1.0 MPa 气压范围内的正、负极性雷电冲击试验，基于试验与分析结果，确定了环保型罐式多断口真空断路器绝缘气体选型方案；对真空灭弧室陶瓷外壳进行了在不同气压、中封环、金属微粒等条件下的工频沿面闪络电压试验，并建立了考虑中封环的真空灭弧室陶瓷表面电荷分布模型，分阶段研究了中封环与金属微粒对真空灭弧室沿面闪络过程的影响，为更高电压等级环保型罐式真空断路器发展提供参考。

1 雷电冲击绝缘击穿试验

1.1 试验装置与试验方法

1.1.1 试验电路

如图 1 为雷电冲击试验电路图，雷电冲击电压由两级冲击电压发生器产生，其额定标称电压为±200 kV，其中试验变压器额定输出 100 kV，容量为 10 kVA，气体试验装置容积 21 L，可承受压强 1.6 MPa，该装置可带气压调节电极距离，阻容分压器测量试验电压，波前电阻 550 Ω，波尾电阻 1 400 Ω，采用非周期性双指数波来模拟电力系统中的雷电过电压波，试验波形采用±1.2/50 μs 标准雷电冲击波，容许偏差在国标规定内，试验所得雷电冲击波形如图 2 所示。

1.1.2 试验流程

(1)试验前对试验腔体内部和电极进行预处理：试验电极及绝缘子用砂纸打磨，用干净的丝绸布沾无水酒精对试验腔体内部、试验电极及绝缘子进行擦拭。确保试验处于洁净的环境中，并对试验腔体的正压、负压气密性进行检查。

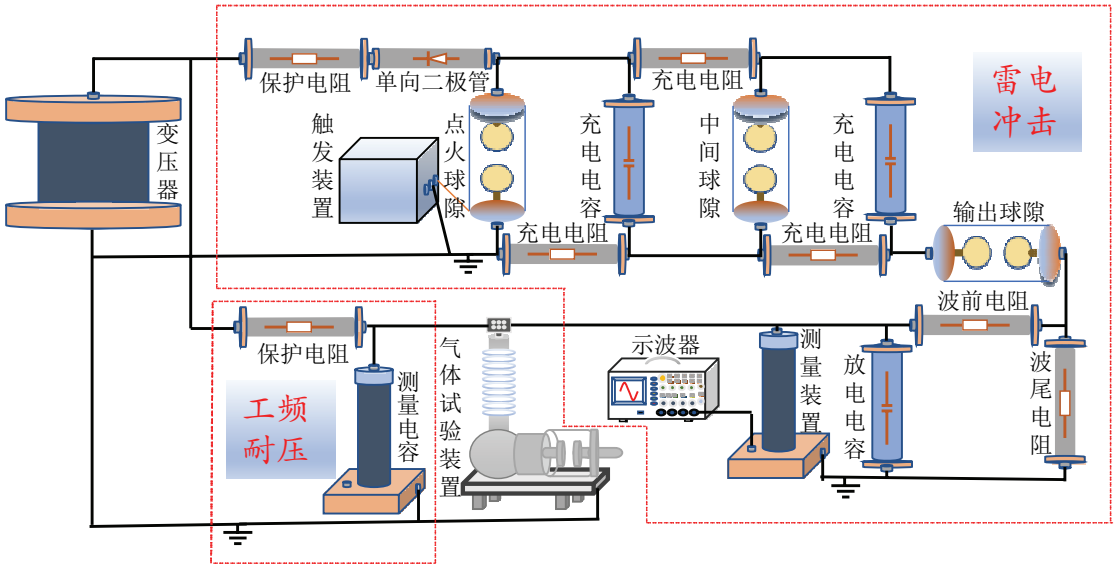
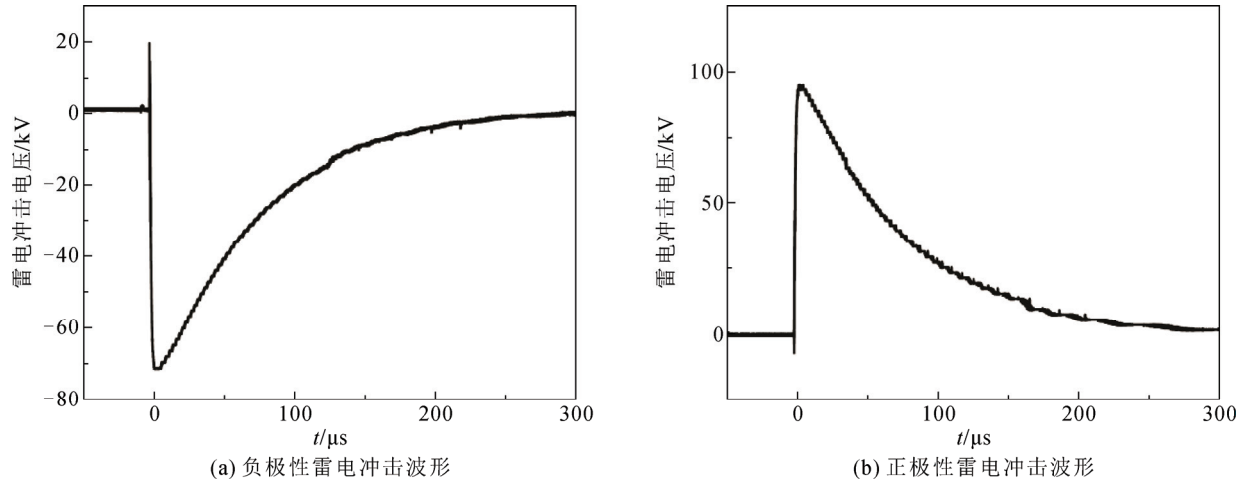


图 1 试验平台

Fig.1 Experiment circuit



(a) 负极性雷电冲击波形 (b) 正极性雷电冲击波形

图 2 雷电冲击波形图

Fig.2 Diagram of lightning impact waveform

(2)电极或陶瓷绝缘子安装后，利用真空泵抽真空，然后向试验腔体中充入气体对腔体进行洗气，重复 3 次，接着充入 1.0 MPa 干燥空气进行试验。

(3)进行雷电冲击试验时采用升降法测量雷电冲击电压，根据试验条件确定初始电压和电压极差，在试验过程中，如果耐受住初始电压，则施加电压增加一个电压极差，反之减小一个电压极差。按照该方法得到至少 20 组有效试验数据，取所有有效数据的算术平均值作为雷电冲击的 50%击穿电压。考虑到气体恢复过程，2 组击穿试验的时间间隔为 10 min。试验对象为纯 CO_2 和干燥空气，充气压力为 0.5~1.0 MPa。

(4)进行陶瓷绝缘子工频沿面闪络时采用逐级升压法进行工频沿面闪络试验，取 20 组有效数据平均值，考虑到混合气体的绝缘恢复性能，2 组闪络试验的时间间隔为 10 min。试验对象为干燥空气，充气压力为 0.4~1.0 MPa。

1.2　试验电极设计

通过 COMSOL Multiphysics 软件对 126 kV 环保型罐式多断口真空断路器进行闭合状态下的雷电冲击仿真分析，图 3 所示电场仿真结果可知，罐式多断口真空断路器的绝缘薄弱处为：导电杆拐角处、灭弧室边缘处、灭弧室连接处等，罐体内部大多属于稍不均匀电场，导电杆拐角处、灭弧室边缘处最大电场强度分别为 18.5、10.3 kV/mm[10-11]。

为模拟环保型罐式多断口真空断路器内部电场，设计的不同试验电极类型如图 4 所示。

其中，球电极、针电极与板电极分别组成球板电极与针板电极。由于环保型罐式断路器内部多为稍不均匀电场，设置球板电极与同轴电极来模拟稍不均匀电场。当罐体在运行时内部存在毛刺、金属微粒等缺陷时极易产生极不均匀电场，采用针板电极来等效。设计板板电极模拟均匀电场，可了解试验气体在均匀电场中理想情况下的绝缘性能。

电场根据其场强分布的均匀程度可以分为均匀电场、稍不均匀电场和极不均匀场，电场不均匀度可由电场不均匀系数 f 描述，如式(1)所示。

$$f=\frac{E_{\max}}{E_{\mathrm{av}}} \tag{1}$$

式中：f 为电场不均匀系数；$E_{\max}$ 为最大电场强度；U_{b} 为施加电压；d 为间隙距离。

依据环保型罐式多断口真空断路器电场分析结果，选择同轴电极、球板电极等效导电杆拐角处、灭弧室边缘处电场薄弱位置，不同电极类型与电场不均匀系数计算结果见表 1，如图 5 所示罐式断路器典型位置等效示意图。

1.3　试验结果与分析

1.3.1　均匀电场下雷电冲击试验

如图 6 所示板-板电极情况下干燥空气与 CO_2 的 50%雷电击穿电压，由于板-板电极结构对称，只

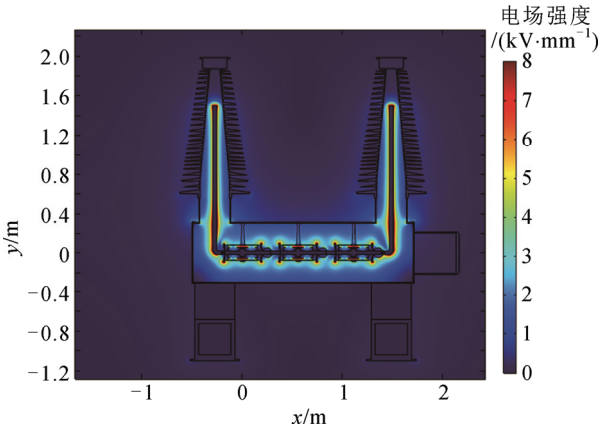


图 3　环保型罐式多断口真空断路器电场仿真

Fig.3　Electric field simulation of environment-friendly tank multi-break vacuum circuit breakers

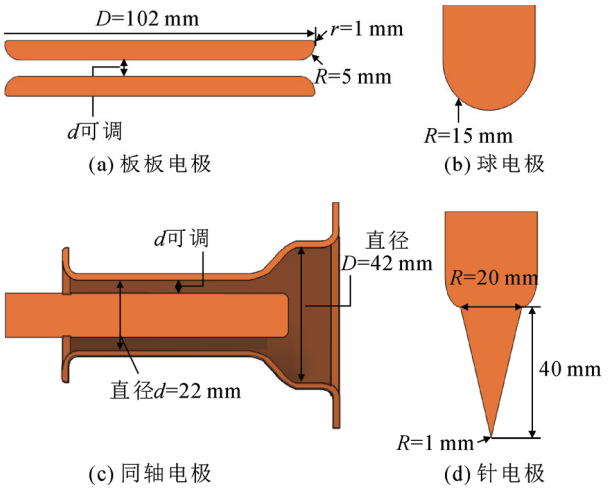


图 4　试验电极

Fig.4　Experimental electrode types

表 1　不同电极类型电场不均匀系数

Table 1　Non-uniform coefficient of electric field of different electrode types

电极类型	间隙距离 d/mm	不均匀系数 f	等效位置
针-板电极	5	8.98	极不均匀电场
板-板电极	3、5	1	均匀电场
球-板电极	5	1.13	图 5 标号 2、3 处
同轴电极	5	1.34	图 5 标号 1 处

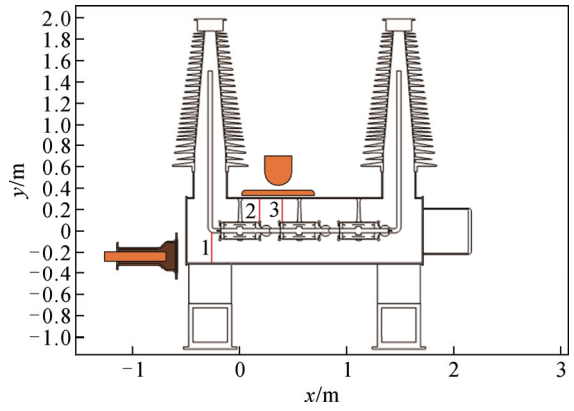


图 5 环保型罐式多断口真空断路器典型位置等效示意图

Fig.5 Typical position equivalent diagram of environment-friendly tank multi-break vacuum circuit breakers

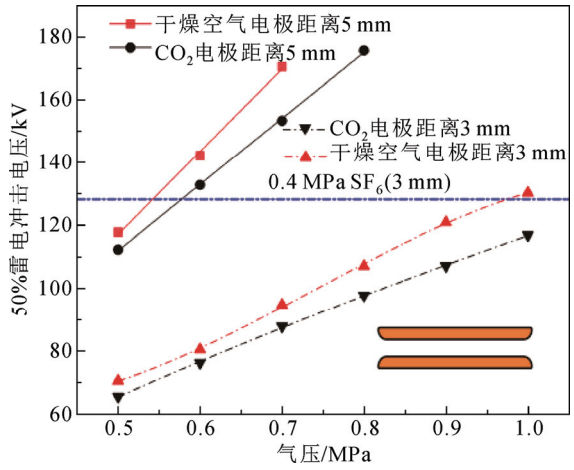


图 6 均匀电场下试验结果

Fig.6 Experimental results under uniform electric field

分析 50%负极性雷电击穿电压。由图可以看出，随着气压的增大，两种气体的击穿电压均近似线性增加，干燥空气的击穿电压明显高于 CO_2 的击穿电压，且干燥空气雷电击穿电压随气压变化的增长率高于 CO_2，两者之间的差值随着间隙距离的增加逐渐增大。在 3 mm 间隙距离下，1.0 MPa CO_2 50%雷电击穿电压为 116.8 kV，而 0.9 MPa 干燥空气 50%雷电击穿电压为 120.86 kV，高于 1.0 MPa CO_2 的 50%雷电击穿电压。

1.3.2 极不均匀电场下雷电冲击试验

如图 7 所示电极距离为 5 mm 情况下干燥空气、CO_2 的 50%正负雷电击穿电压随气压的变化曲线，由图 7 知，干燥空气与 CO_2 的正极性雷电击穿电压大于负极性雷电击穿电压，干燥空气与 CO_2 的负极性雷电击穿电压随气压的增加而增加，0.9 MPa 干燥空气、CO_2 负极性雷电击穿电压达到 53.64、48.48 kV；但正极性击穿电压变化规律较复杂，正极性雷电击穿电压随气压的增加具有“N 型”曲线变化趋势，其原因在于针电极尖端存在电晕放电现象。较低气压下，增大气压可以减小电子平均自由程，进而使得击穿电压增大，此时电晕层较薄，而随着气压进一步增加，针电极尖端会形成一定厚度稳定的电晕层，进而加剧气体分子的电离过程，使得击穿电压降低，当气压升高至较高压力范围内，电子平均自由程减小带来的影响大于电晕层带来的影响，此阶段击穿电压随气压的增加而增大。

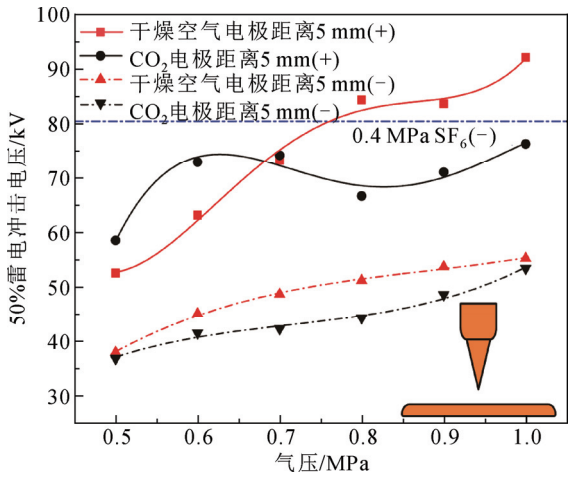


图 7 极不均匀电场下试验结果

Fig.7 Experimental results under extremely non-uniform electric field

1.3.3 稍不均匀电场下雷电冲击试验

如图 8 所示稍不均匀电场下雷电冲击试验结果，可以得到 50%正极性雷电冲击电压大于 50%负极性雷电冲击电压；图 8(a)中，干燥空气的雷电冲击电压大于 CO_2，并且在 0.5~0.7 MPa 范围内干燥空气与 CO_2 雷电冲击击穿电压随气压的增加具有较为稳定的增长趋势，在 0.9 MPa 时，干燥空气、CO_2 的 50%负极性雷电击穿电压分别达到相对最大值 144.74、118.29 kV，之后增长缓慢；图 8(b)中，干燥空气的正负极性雷电冲击电压均大于 CO_2，其中在气压从 0.9~1.0 MPa 变化时，干燥空气的 50%负极性雷电击穿电压增长较少为 7.69 kV。总的来看，两种气体的雷电冲击击穿电压随气压的增加也具有较为稳定的增长趋势。随着压力的增大，气体密度随之增加，气体分子中自由电子的碰撞次数增加，但电子间的平均自由程缩短，导致电子更难积累动能，降低气体分子的电离概率，减弱碰撞电离的发

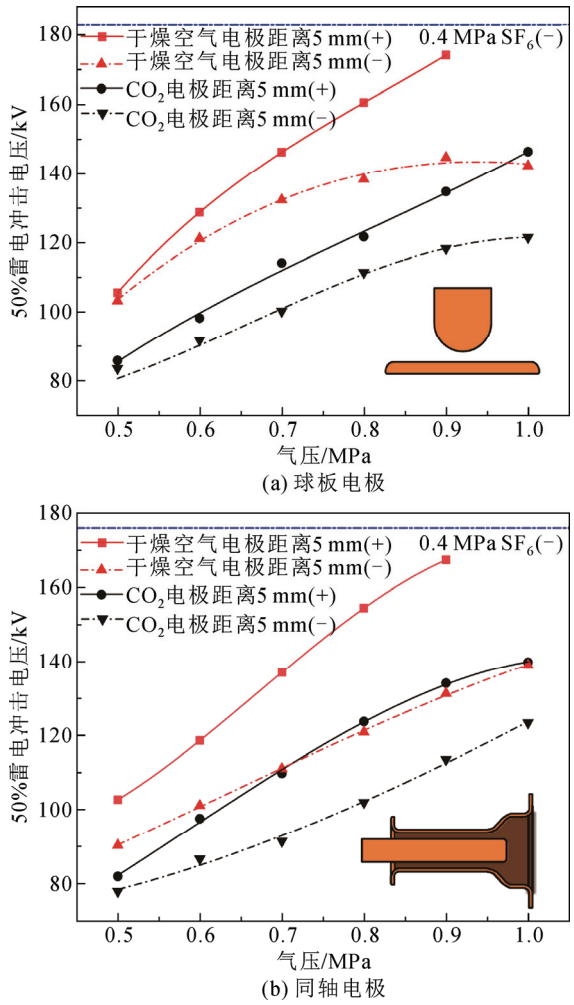


图 8　稍不均匀电场下试验结果

Fig.8　Experimental results under extremely non-uniform electric field

展，从而提高气体的绝缘性能。

气体间隙放电击穿电压受到电场不均匀度的显著影响，对于相同的间隙距离，同轴电极条件下电场不均匀系数更大，相较于球板电极具有更加不均匀的电场强度分布，局部电场更容易发生碰撞电离与电子崩塌，进而形成流注放电，从而达到气体击穿条件，导致整个间隙击穿电压降低。

126 kV 环保型罐式真空断路器以及 GIS 多采用 0.4 MPa SF_6 作为绝缘气体，定义气体相对绝缘强度系数为同一种电极类型下不同气压的干燥空气与 CO_2 的负极性雷电击穿电压相对于 0.4 MPa SF_6 负极性雷电击穿电压的比值，由于极性效应，分析 0.5~1.0 MPa 时其负极性雷电冲击相对绝缘强度系数。由图 9 可知，均匀电场下 1.0 MPa 干燥空气与 CO_2 绝缘强度与 0.4 MPa 的 SF_6 绝缘强度系数相当，稍不均匀电场下相对绝缘强度系数次之，极不均匀

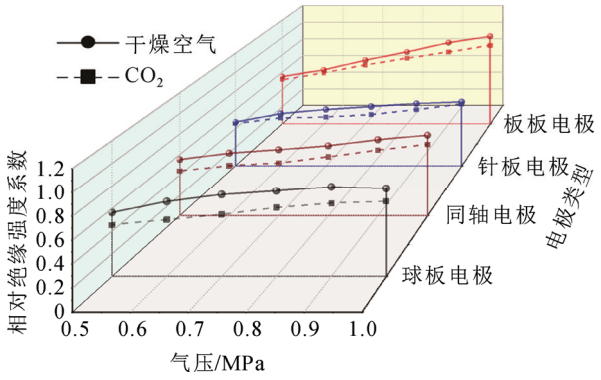


图 9　不同电场条件下气体相对绝缘强度系数

Fig.9　Relative insulating strength coefficients of gases under different electric field conditions

电场下相对绝缘强度系数最低；干燥空气的相对绝缘强度系数大于 CO_2 的相对绝缘强度；稍不均匀电场下，气压从 0.5~0.7 MPa 变化时气体的相对绝缘强度系数随着气压的增大而增大，气压从 0.9~1.0 MPa 变化时存在饱和趋势，推荐 0.9 MPa 干燥空气与 0.9 MPa CO_2 作为罐式断路器以及 GIS 的绝缘气体，此时相对绝缘强度系数分别为 0.74、0.64。以同轴 5 mm 电极距离为例，0.9 MPa 干燥空气与 0.9 MPa CO_2 50%负极性雷电冲击电压平均值分别为 131.2 kV 与 113.4 kV，考虑 0.85 倍绝缘裕度，两者对应负极性雷电冲击电场强度分别为 22.3 kV/mm 与 19.3 kV/mm，采用 0.9 MPa 干燥空气与 0.9 MPa CO_2 作为绝缘气体时，应分别不超过 22.3 kV/mm 与 19.3 kV/mm，以满足罐式断路器的绝缘配置要求。

2　真空灭弧室工频沿面闪络特性

干燥空气绝缘性能强于 CO_2 更适合用于环保型罐式断路器中，但是当罐式断路器处于断开状态时，对其进行静电场仿真分析如图 10 所示，罐式断路器相较于柱式断路器其沿面电场畸变更为严重，并且罐式断路器最大值为 1.99 kV/mm，柱式断路器沿面电场强度最大值 1.57 kV/mm，并且高压端灭弧室沿面电场相较于中间灭弧室和低压端灭弧室沿面电场畸变更为严重，容易出现沿面闪络现象，导致罐式断路器内部绝缘破坏。

高电压等级真空灭弧室具有多段陶瓷结构，通过沿面电场分析所设计缩比试验绝缘子与 126 kV、40.5 kV 单断口真空灭弧室外部陶瓷外壳的等效性[25]，从图 11 中归一化半径对应的电场强度得到，电场强度最大值均出现在两端三结合点处及中封环处。并

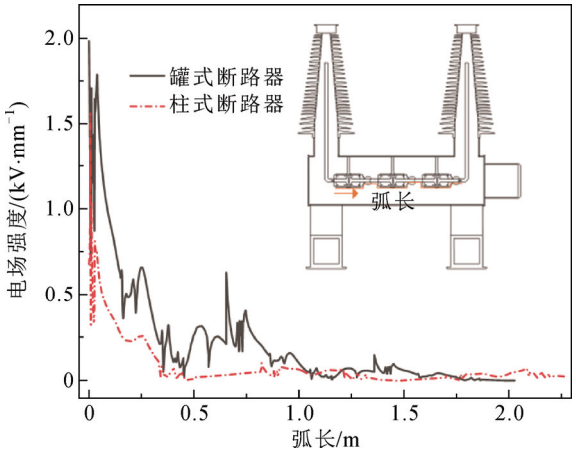


图 10 罐式与柱式真空断路器断开状态时沿面电场强度

Fig.10 Surface electric field in the disconnected state of tank and column vacuum circuit breakers

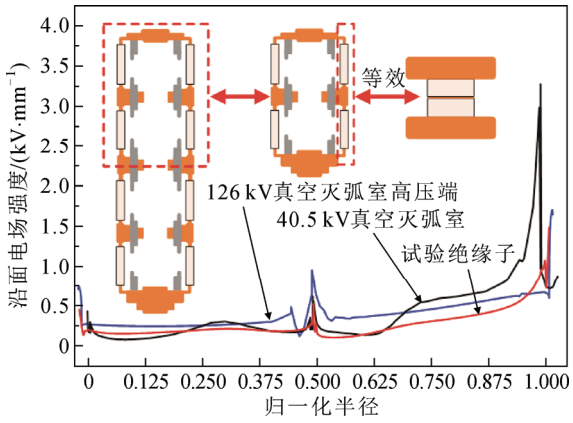


图 11 真空灭弧室沿面电场与试验绝缘子沿面电场分析

Fig.11 Surface electric field analysis of vacuum interrupter and experimental insulator

且罐式断路器结构与 GIL/GIS 类似，在运行过程中也需面对金属微粒污染问题[26-29]。开展气压、中封环、金属微粒对陶瓷沿面闪络特性影响的研究，采用陶瓷外壳缩比绝缘子模型，绝缘子表面附着金属微粒来模拟金属微粒的影响。

2.1 中封环影响

高电压等级真空灭弧室采用多段瓷壳结构主要有以下方面的考虑，首先从制造方面，使用多段瓷壳结构可以降低加工难度与成本，而且多段瓷壳结构可以优化真空灭弧室的内外电场分布，提升整体耐压水平。而多段瓷壳结构会引入中封环，因此分析有无中封环对陶瓷外壳沿面闪络特性的影响。

图 12 为有无中封环时陶瓷外壳沿面闪络电压，存在中封环时会使其沿面闪络电压下降，并且随着气压的增大而变大，其中在 0.8、0.9、1.0 MPa 时其沿面闪络电压分别下降了 18.11、17.2、29.76 kV，占比分别为 9.57%、8.47%、14.10%。中封环会引入三结合点，通过静电场仿真分析可以得到：中封环的引入使得此处电场强度由 0.22 kV/mm 畸变为 0.51 kV/mm，三结合点处电场强度的增大，产生更多初始电荷，初始电荷降低陶瓷外壳沿面闪络电压，相关学者也证明主屏蔽罩处裸漏中封环会使得其中封环处具有电荷，电荷来源于三结合点处的电子发射，这些电子为初始电子崩提供源电荷，降低陶瓷外壳的沿面闪络电压。

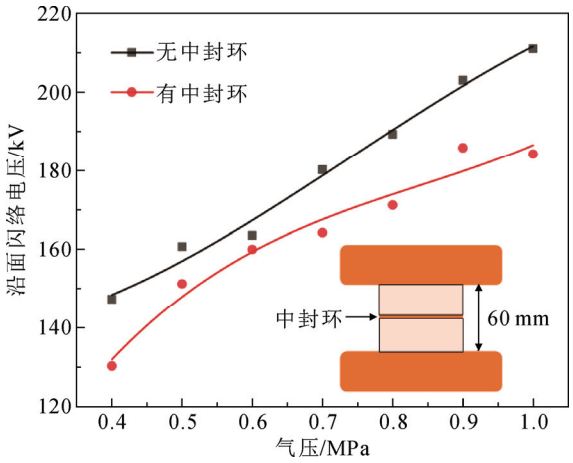


图 12 中封环对陶瓷外壳沿面闪络电压的影响

Fig.12 Influence of middle seal ring on surface flashover voltage of ceramic shell

2.2 金属微粒影响

图 13 是金属微粒对陶瓷外壳沿面闪络电压的影响，对比了 4 种不同条件下的陶瓷外壳沿面闪络电压。由图 13 可知，金属微粒在高压端时对陶瓷外壳沿面闪络特性影响较大，金属微粒越长，沿面闪络电压降低越多。具体分析如下：2 mm 金属微粒情况下，气压为 0.9 MPa 时，金属微粒在高压端、低压端时的沿面闪络电压较无金属微粒时的沿面闪络电压分别降低了 40.73、9.16 kV，占比 21.92%、4.93%；在金属微粒距离高压端 5 mm 距离情况下，气压为 0.9 MPa 时，金属微粒长度为 2、5 mm 时其沿面闪络电压相较于无金属微粒时沿面闪络电压分别降低了 40.73、49.67 kV，占比分别为 21.92%、26.74%。金属微粒使得沿面闪络电压在较高气压下出现随气压升高降低的趋势，主要是因为其局部电场为极不均匀电场，由于金属微粒尖端形成了稳定的电晕放电，加剧了气体分子的电离过程，电晕放电更易发展为流注放电，故闪络电压会有随着气压

升高而下降的趋势。

2.3　沿面闪络机理分析

沿面闪络是一种沿着固体表面的气体放电现象，单段陶瓷绝缘子的沿面闪络过程如图 14(a)所示，主要分为 3 个阶段，首先是阴极处陶瓷-气体-金属三结合点处由于电场强度较大会发射初始电子，初始电子沿着陶瓷表面进行二次电子崩传播，最后传播至阳极，进而贯穿形成沿面闪络。引入一个中封环时的沿面闪络机理如图 14(b)所示，此时把中封环处等效划分为“准阴极”与“准阳极”两个电极，中封环相较于高压端为准阳极，相较于低压端为准阴极，而沿面闪络过程也分为 3 个阶段：阶段 1，高压端处阴极发射初始电子并完成初始电子崩过程，中封环准阴极处也完成初始电子的发射过程；阶段 2，高压端发射的电子崩传播至中封环准阳极，中封环准阴极发射的初始电子沿着低压侧陶瓷外壳进行二次电子崩的传播过程；阶段 3，由于高压端电子崩已到达中封环准阳极处，会进一步促进低压端二次电子崩的传播过程，降低陶瓷外壳的沿面闪络电压。

为了分析上述阶段，对真空灭弧室进行二维轴对称表面电荷仿真，主要考虑了气体侧、固体侧及气固界面的表面电荷传播过程，气体侧方程：

$$\frac{\partial n^+}{\partial t}=\frac{\partial n_{\mathrm{IP}}}{\partial t}-k_{\mathrm{r}}n^+n^-+\mathrm{div}(n^+b^+E)+D^+\nabla^2n^+ \tag{2}$$

$$\frac{\partial n^-}{\partial t}=\frac{\partial n_{\mathrm{IP}}}{\partial t}-k_{\mathrm{r}}n^+n^-+\mathrm{div}(n^+b^+E)+D^+\nabla^2n^+ \tag{3}$$

$$J_{\mathrm{G}}=\frac{\partial D}{\partial t}+eE(n^+b^++n^-b^-)-e\mathrm{grad}(n^+D^++n^-D^-) \tag{4}$$

固体侧：

$$J_{\mathrm{I}}=\frac{\partial D}{\partial t}+\gamma_{\mathrm{i}}E \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho_{\mathrm{i}}}{\partial t}=(\nabla\gamma_{\mathrm{i}})(\nabla\varphi_2)-\frac{\gamma_{\mathrm{i}}\rho_{\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{i}}} \tag{6}$$

气固界面：

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t}=J_{\mathrm{In}}-J_{\mathrm{Gn}}-\nabla(\gamma_{\mathrm{s}}\cdot E_{\tau}) \tag{7}$$

式中：n^+、n^-为正负离子个数；$\partial n_{\mathrm{IP}}/\partial t$ 为离子对生成速率；E 为电场强度；D 为电位移矢量；k_{r} 为正负离子复合系数；b^+、b^-为正负离子迁移率；D^+、D^-分别为正、负离子扩散系数；J_{G} 为绝缘气体体积电流密度，J_{I} 为绝缘子固体侧电流密度，J_{Gn}、J_{In} 分别为其法向分量；γ_{i} 为绝缘子体电导率；γ_{s} 为表面电导率；σ 为表面电荷密度；e 为单位电荷量；div 表示散度，grad 表示梯度。

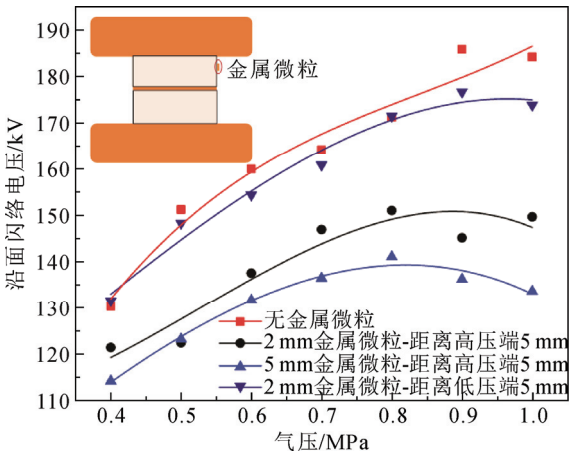
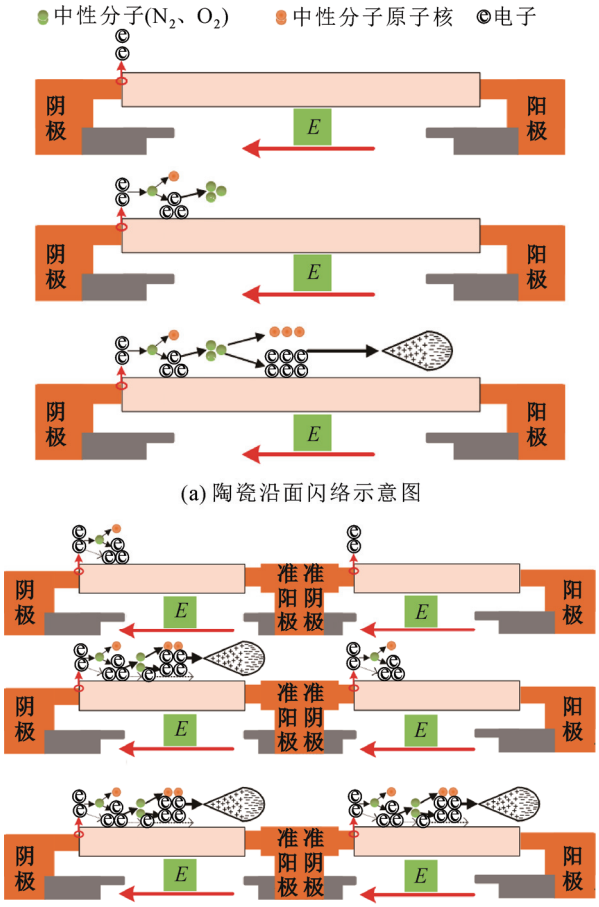


图 13　金属微粒对陶瓷外壳沿面闪络电压的影响

Fig.13　Influence of metal particles on surface flashover voltage of ceramic shell



(a) 陶瓷沿面闪络示意图

(b) 存在中封环时陶瓷沿面闪络示意图

图 14　沿面闪络示意图

Fig.14　Surface flashover diagram

陶瓷外壳外部有无中封环时的真空灭弧室的电荷特性仿真结果如图 15 所示，图中为流线图与等值线图。第 1 阶段：此阶段为初始负电荷产生阶段，图 15(a)左图中，此时等值线在高压端处较为明显，

表明负电荷从此产生，此时高压端及中封环处其表面电荷密度分别为 22.39、2.63 μC/m²，图 15(a)右图中，此时等值线在高压端及中封环处较为明显，表明负电荷从这两个地方产生，此时其表面电荷密度分别为 27.17、8.73 μC/m²；第 2 阶段：此阶段为负电荷向阳极传播阶段，图 15(b)左图中高压端、中封环表面电荷密度分别为 39.67、4.37 μC/m²，图 15(b)右图中高压端、中封环处表面电荷密度分别为 47.75、14.18 μC/m²，表明中封环的存在加剧了此处表面电荷密度；第 3 阶段：此阶段为负电荷传播至阳极阶段，由负电荷等值线图在两端分布较为均匀，且流线图中负电荷由高压端流向低压端，表明负电荷传播到低压端，此时图 15(c)左图高压端、中封环处表面电荷密度分别增至 62.73、6.62 μC/m²。而图 15(c)右图高压端、中封环处表面电荷密度分别增至 78.61、21.54 μC/m²，更易引起沿面闪络。

在金属微粒存在的情况下对真空灭弧室表面电荷分布进行仿真，有中封环的真空灭弧室陶瓷外壳外部有金属微粒时会使得负电荷也从金属微粒处产生，并且金属微粒使得负电荷更容易从高压端传播至中封环处。金属微粒的工频沿面闪络试验中得到金属微粒在高压端的影响较大，从侧面反映了上述表面电荷传播过程，金属微粒在高压端时不仅影响上述第2阶段与第3阶段高压端电荷的传播过程，而且影响低压端电荷的传播过程；而金属微粒在低压端时，只影响上述第 2 阶段与第 3 阶段低压端电荷的传播过程。如图 16 所示为有无金属微粒及有无中封环的陶瓷外壳表面电荷分布图，中封环的引入会使中封环处表面电荷密度由 6.62 μC/m² 增至 21.54 μC/m²，金属微粒的存在使得金属微粒处表面电荷密度由 26.91、29.40 μC/m² 畸变为−42.48、40.49 μC/m²，影响了其表面电荷传播过程，金属微粒的存在使得表面电荷密度分布畸变，造成沿面闪络电压的降低以及内部绝缘的破坏。

3 结论

1）均匀电场下干燥空气与 CO_2 雷电冲击击穿电压随气压变化近似线性增加；不均匀电场中存在明显的极性效应。稍不均匀电场同轴电极 5 mm 间隙情况下，0.9 MPa 下干燥空气、CO_2 气体负极性雷电冲击绝缘强度分别为 22.3、19.3 kV/mm，建议使用 0.9 MPa 干燥空气作为 126 kV 环保型罐式断路器绝缘气体。

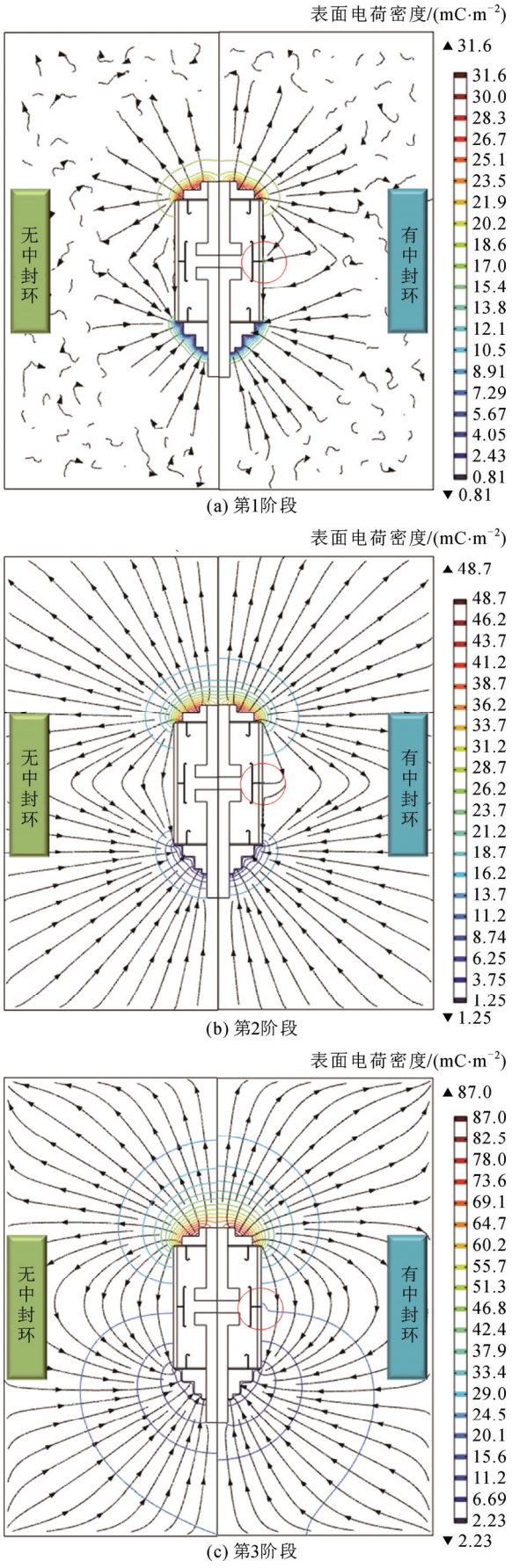


图 15 真空灭弧室表面电荷仿真

Fig.15 Simulation of surface charge on vacuum interrupter

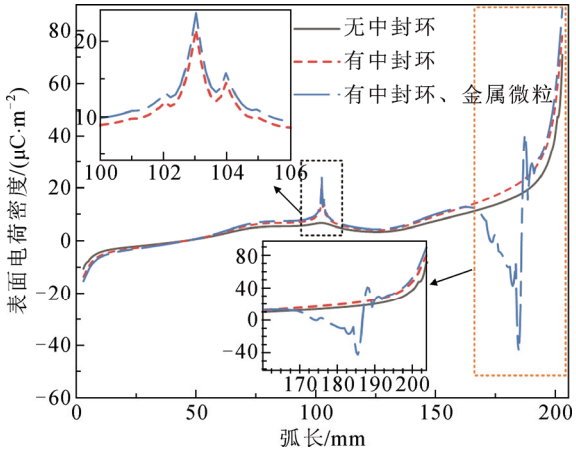


图 16　中封环及金属微粒对陶瓷外壳表面电荷密度的影响

Fig.16　Effect of center seal ring and metal particles on the surface charge density of ceramic shells

2）中封环的引入会使得真空灭弧室陶瓷外壳工频沿面闪络电压下降，其中在 0.9 MPa 时相对于其他气压下其沿面闪络电压下降较少为 8.47%；金属微粒在高压端时的沿面闪络电压下降更大，金属微粒越长，沿面闪络电压下降越多，气压为 0.9 MPa 时，金属微粒在高压端、长度为 5 mm 时其沿面闪络电压下降 49.67 kV，占比 26.74%。

3）中封环的存在不仅能接收真空灭弧室陶瓷外壳来自高压端的电荷，还会产生初始电荷并向低压端传播，中封环处表面电荷密度由 6.62 μC/m^2 增至 21.54 μC/m^2，沿面闪络现象具有较高的发生概率；金属微粒的存在畸变了陶瓷外壳表面电荷分布，金属微粒处表面电荷密度由 26.91、29.40 μC/m^2 畸变为−42.48、40.49 μC/m^2，更易发生陶瓷外壳沿面闪络。在高电压等级罐式真空断路器设计时，要考虑真空灭弧室中封环的引入对陶瓷外壳沿面闪络特性的影响。

参考文献　References

[1] KIEFFEL Y, IRWIN T, PONCHON P, et al. Green gas to replace SF_6 in electrical grids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(2): 32-39.

[2] 张　咪，高克利，侯　华，等. SF_6 替代绝缘气体的虚拟筛选与分子设计综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2816-2830.
ZHANG Mi, GAO Keli, HOU Hua, et al. Review on computational screening and molecular design of replacement gases for SF_6[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2816-2830.

[3] 贾申利，贾荣照，朱　璐. 真空开断型环保 GIS 发展现状及趋势[J]. 高压电器，2022，58(9)：1-12.
JIA Shenli, JIA Rongzhao, ZHU Lu. Advances in the development of vacuum-based eco-friendly GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 1-12.

[4] 靳梦磊，夏亚龙，肖　淞，等. 环保绝缘气体设备研发与应用进展[J]. 四川电力技术，2023，46(4)：12-16，90.
JIN Menglei, XIA Yalong, XIAO Song, et al. Research and application progress of environmentally friendly insulating gases[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(4): 12-16, 90.

[5] SILVANT S, GAUDART G, HUGUENOT P, et al. Detailed analysis of live tanks and GIS circuit breakers using a new environmental friendly gas[C]//International Council on Large Electric Systems(CIGRE Session 46). Paris, France: CIGRE, 2016: A3-114.

[6] 高克利，杨　圆，周文俊，等. SF_6 替代型环保绝缘气体：研究、应用和展望[J]. 中国电机工程学报，2024，44(18)：7395-7411.
GAO Keli, YANG Yuan, ZHOU Wenjun, et al. SF_6 alternative environmentally friendly insulating gas: research, application and outlook[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7395-7411.

[7] 宋　宇，林　莘，徐建源，等. 高压断路器中 C_4F_7N/CO_2 混合气体的开断性能[J]. 高电压技术，2023，49(3)：971-981.
SONG Yu, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Interruption performance of C_4F_7N/CO_2 gas in high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 971-981.

[8] EICKHOUT B. Review of EU rules on fluorinated greenhouse gases: in “A European Green Deal”[EB/OL]. (2022-04-05)[2024-09-24]. https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-review-of-eu-rules-on-fluorinated-greenhouse-gases.

[9] 钟建英，陈　刚，谭盛武，等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2769-2782.
ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.

[10] 钟建英，孙广雷，杨葆鑫，等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术，2024，50(2)：451-466.
ZHONG Jianying, SUN Guanglei, YANG Baoxin, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.

[11] 程　显，田小倩，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器电场分析与优化[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3200-3207.
CHENG Xian, TIAN Xiaoqian, GE Guowei, et al. Electric field analysis and optimization of 126 kV environmental protection gas insulated tank circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3200-3207.

[12] 程　显，杜　帅，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器均压配置研究[J]. 电工技术学报，2021，36(15)：3154-3162.
CHENG Xian, DU Shuai, GE Guowei, et al. Study on voltage-sharing configuration of environment-friendly tank type multi-break vacuum circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3154-3162.

[13] CHENG X, DU S, GE G W, et al. Electromagnetic-thermal-flow field calculation and optimal design of environment-friendly live tank multi-break vacuum circuit breakers[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 217: 109081.

[14] 王　欢，汪　泉，项　琼，等. 电极间距 10~40 mm 时 CO_2 气体的放电特性[J]. 高电压技术，2014，40(7)：2013-2017.
WANG Huan, WANG Quan, XIANG Qiong, et al. CO_2 gas discharge characteristics with electrode spacing of 10~40 mm[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2013-2017.

[15] 满林坤，肖登明. 球板电极下的低压 CO_2 绝缘性能研究[J]. 绝缘材料，2016，49(12)：52-54，61.
MAN Linkun, XIAO Dengming. Research on insulating properties of low pressure CO_2 in sphere-plate electrode[J]. Insulating Materials,

2016, 49(12): 52-54, 61.

[16] 李红梅，周柏杰，谭东现，等. 用于环保型 C-GIS 的氮气及干燥空气正极性雷电冲击特性研究[J]. 高压电器，2019，55(4)：25-30.
LI Hongmei, ZHOU Baijie, TAN Dongxian, et al. Study on positive lightning impulse characteristics of nitrogen and dry air for eco-friendly C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 25-30.

[17] SADAOUI F, BEROUAL A. Influence of polarity on breakdown voltage of gases in divergent electric field under lightning impulse voltages[C]//2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Shanghai, China: IEEE, 2012: 496-499.

[18] DU S, CHENG X, GE G W, et al. AC breakdown and decomposition products detection characteristics of eco-friendly insulating medium in gas insulated switchgear[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1), 19491.

[19] FENG W G, XIE H T, YUE Y X, et al. Enhancement of external insulation performance for vacuum interrupters by external shields[C]//2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology(ICPST). Kunming, China: IEEE, 2023: 376-381.

[20] MIYASHITA M, SATO M, NAKAUCHI S, et al. Insulation characteristics of quasi-uniform electric field and effect of metallic particle contamination in highly compressed dry air[C]//22nd International Symposium on High Voltage Engineering(ISH 2021). Xi'an, China: IET, 2021: 1688-1692.

[21] 成俊奇，丁立健. SF_6、N_2 和合成空气中绝缘子沿面闪络性能的研究[J]. 绝缘材料，2014，47(6)：83-86.
CHENG Junqi, DING Lijian. Surface flashover performance of insulators in SF_6, N_2, and synthetic air[J]. Insulating Materials, 2014, 47(6): 83-86.

[22] 邢照亮. GIS 绝缘子表面电荷分布对沿面闪络的影响[D]. 北京：华北电力大学，2013.
XING Zhaoliang. Influence of surface charge distribution on flashover of GIS insulator[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2013.

[23] 吴振跃. 低压力 N_2 的绝缘特性研究[D]. 上海：上海交通大学，2015.
WU Zhenyue. Research on the insulating properties of low pressure N_2[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[24] 陈韵中，蔡姝娆，闵道敏，等. 环氧介质与 SF_6 气体的气固耦合沿面闪络与失效概率分布特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：6145-6154，6188.
CHEN Yunzhong, CAI Shurao, MIN Daomin, et al. Simulation on gas-solid coupling surface flashover and failure probability distribution between epoxy resin and SF_6[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6145-6154, 6188.

[25] 程　显，李　鑫，葛国伟，等. 串联用一体化自均压真空灭弧室绝缘配置与优化[J]. 高电压技术，2022，48(3)：820-828.
CHENG Xian, LI Xin, GE Guowei, et al. Insulation configuration and optimization of integrated voltage self-sharing interrupter for series connection[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 820-828.

[26] 胡新文，李晓昂，王舒啸，等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动及其诱发间隙击穿特性[J]. 高电压技术，2024，50(1)：339-347.
HU Xinwen, LI Xiaoang, WANG Shuxiao, et al. Free metal particles movement and its induced gap breakdown characteristics in GIS under impact vibration[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 339-347.

[27] 张丕沛，李　杰，李秀卫，等. 一起 252kV 罐式断路器内部放电故障的分析及仿真验证[J]. 高压电器，2022，58(9)：216-220.
ZHANG Pipei, LI Jie, LI Xiuwei, et al. Analysis and simulation verification on internal discharge fault of 252 kV dead tank circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 216-220.

[28] 杨　旭，韦晓星，张长虹，等. 550kV 罐式断路器放电原因分析及金属微粒对 CT 罐体电场影响研究[J]. 高压电器，2022，58(2)：214-220.
YANG Xu, WEI Xiaoxing, ZHANG Changhong, et al. Analysis on discharge of 550 kV dead tank circuit breaker and study on influence of metal particles on electric field of CT enclosure[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 214-220.

[29] FUKUDA H, YAMAMURA K, FUJITA I, et al. Charging potential measurement of floating electrode modeled on the arc shield of vacuum interrupter under AC voltage application[J]. Electrical Engineering in Japan, 2021, 214(2): e23328.



程　显
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事新型电力开关技术、电器设备高可靠性技术等方面的研究工作
E-mail: chengxian@zzu.edu.cn

CHENG Xian
Ph.D., Professor



郭龙雨
1999—，男，硕士生
主要从事气体绝缘技术、多断口真空开关技术的研究
E-mail: 2567517237@qq.com

GUO Longyu



杜　帅(通信作者)
1994—，男，博士(后)
主要从事高压电器技术研究，着重研究多断口真空开关技术
E-mail: dushuai94@163.com

DU Shuai
Post-doctorate
Corresponding author

收稿日期　2024-11-21　修回日期　2025-02-11　　编辑　曹昭君