

漏孔形态对GIS设备微水增长特性的影响*

樊新鸿¹ 张正渊¹ 王永奇¹ 罗宁² 孔令轩² 王燕²

摘要: SF₆气体泄漏是GIS设备最常见的故障之一, GIS泄漏发生时通常伴随内部水组分的增长。为了揭示不同漏孔形态对GIS设备微水增长特性的影响, 选取了包含简单圆柱孔、台阶孔、锥形孔、直角孔及并排孔等7种漏孔形态, 建立数值模型开展了多组分相变输运瞬态模拟。获得了GIS压力下降过程中不同漏孔内外部流场及水组分相变输运动态特性。结果表明, 在相同的漏率规模下, 漏孔结构越复杂, 其出口位置羽流覆盖面积越小, 外部冷凝水更容易进入漏孔内部; 扩张型漏孔内会产生热力喉道等气动结构, 该结构对液相水进入泄漏通道有明显的阻碍作用, 从而导致扩张型漏孔较收缩型漏孔临界压力更低。

关键词: 气体绝缘开关; 漏孔形态; 多相流; 重力流; 微水增长; 数值模拟

Impacts of Configuration of Leakage Orifices on the Characteristics of Water Growth in the GIS Equipment

Xinhong FAN, Zhengyuan ZHANG, Yongqi WANG, Ning LUO, Lingxuan KONG, Yan WANG

Abstract: SF₆ gas leakage is one of the most common faults of GIS equipment, and it is usually accompanied by the growth of internal water components. In order to reveal the influence of different leakage shapes on the micro-water growth characteristics of GIS equipment, seven leakage configurations (including cylindrical hole, sudden expansion/contraction holes, conical holes, right-angle holes and parallel holes) were selected, and transient simulations were conducted based on numerical models with multiple components and phases considered. The dynamic characteristics of water growth in different leaking holes were obtained. The results show that, under the same leakage rate

收稿日期: XXXX-XX-XX

修回日期: XXXX-XX-XX

接受日期: XXXX-XX-XX

基金: 兰州市科技计划项目(2025-2-43); 国网甘肃省电力公司科技项目(SGGSKYHXJS2400289); 甘肃省重点研发计划(24YFGA020); 甘肃省自然科学基金(23JRRA829)。

scale, the more complicated the structure of the leak hole is, the smaller the plume coverage area at its outlet position is, and the external condensate water is more likely to enter the leak hole. Thermal throat will be produced in the expanded leakage, which obviously hinders the liquid water from entering the leakage hole, resulting in lower critical pressure of the expanded leakage than that of the contracted leakage.

Keywords: gas insulated switchgear; leakage hole configuration; multiphase flow; gravity flow; water growth; numerical simulation

0 引言

气体绝缘全封闭组合电器(gas insulated switchgear, GIS)以其优良的绝缘灭弧性能,广泛应用于电力电气设备^[1-2]。GIS 设备运行过程中对其内部 SF₆ 气体纯度十分敏感,当气体纯度未达到标准时其灭弧和绝缘性能将会大幅下降。而当杂质气体为水组分时, GIS 设备电气强度将会显著降低,并且在高温和放电条件下,水组分与 SF₆ 气体发生化学反应产生有害物质,影响到系统的性能并危及运维人员的健康安全量^[3-6]。因此必须在 GIS 设备的设计、制造、运行、维护全生命周期内严格控制其内部含水量。

在对 GIS 进行 SF₆ 气体充注时,须进行多轮抽真空、氮洗以保证初充气体微水含量合格。针对此环节,韩四满^[7]等人提出了一种基于循环气体的 GIS 设备带电干燥装置,尽可能消除充注前腔体内的水分;左稳^[8]及戴伟伟^[9]等人分析了氮洗和充气这一环节,尽可能降低 GIS 设备内微水。Gao^[10]建立了 GIS 设备的流固热多物理场耦合模型,提出并验证了一种新型氮洗和加热干燥处理方法。

在 GIS 设备运行期间, SF₆ 气体泄漏是最常见的故障,约占 GIS 设备故障的 40% 左右^[11-13]。有文[11]指出, SF₆ 气体泄漏通常发生在 GIS 设备的焊缝、密封圈所在密封面、气体密封阀等位置。GIS 设备泄漏导致严重事故的案例,在能源设备领域屡见报道。2010 年马鞍山供电公司 220 kV 阳湖变电站发现 510 开关与 IIA 母侧流变间绝缘盆出现裂纹触发低气压报警^[14]。2014 年某 220 kV 变电站 GIS 设备 2446 线副母开关气室漏气,额定压力从 0.58 MPa 降至报警压力 0.46 MPa,该事故原因是在密封圈安装时因操作不当导致密封圈发生位移造成 GIS 设备漏气^[15]。某电场主变主变侧 11014 开关气室 SF₆ 气压低报警,经检漏发现,漏点位于 GIS 室穿墙套管与室外出线瓷套的连接法兰处, GIS 渗漏的原因包括胶圈老化和瓷套老化^[16]。针对泄漏 SF₆ 气体的检测技术,目前已发展了包括紫外线电离^[17]、激光成像^[18]、红外热成像^[19-22]等多种技术手段,可实现较高精度的泄漏检测。

大量文献及案例表明, GIS 设备泄漏往往伴随内部微水增长发生^[3,23], 逆压梯度

下水组分逆向输运现象,可能由多种物理机理共同引起,包括漏孔出口处局部气体回流,液相水在重力及表面张力等因素作用下的逆向输运等。其中水蒸气凝结后在重力作用下输运的现象是两相流研究的热点之一^[24-26]。Vyskocil^[27]等人分析了垂直矩形微通道内水蒸气凝结的动态过程,通过与实验结果对比发现CFD(computational fluid dynamics)能够准确描述液膜在重力作用下的迁移过程。Li^[28]采用CFD方法模拟了竖直圆柱微管道中水蒸气冷凝现象,发现冷凝膜和蒸气交界面处的气液混合物速度不可忽略。Xiong^[29]等人基于Lee蒸发冷凝模型对微通道中的冷凝水击现象开展了研究,动态还原了水蒸气凝结引起压力骤变条件下气相与液相水振荡输运的过程。

表面张力驱动液态水位移体现为毛细现象。关于逆压梯度下液态水通过毛细现象输运的现象,在质子交换膜电池气体扩散层领域研究较为充分。Park^[30]等人通过VOF(volume of fluid)两相流数值模型研究了接触角和压力梯度对GDL(gas diffusion layer)水排除效率的影响。Lee^[31], Jeon^[32-33]等人分析了微通道的结构对液态水排出过程的影响。Zhang^[34]等人使用实验和数值模拟的手段系统解析了GDL中毛细指进的流体力学机制,发现当毛细力占主导时,液态水倾向于形成不稳定指状路径,而非均匀渗透。

当前,与GIS设备相关的水蒸气相变研究主要聚焦在GIS的运行环境中。Tao Lin^[35]通过仿真模拟发现环境温度和湿度的变化对GIS舱室内部的水蒸气凝结有显著影响,降低空调出风口温度和增加风速有利于减少凝结量。SONG Dan^[36]针对高湿度冷凝引起断路器故障的问题,提出利用半导体冷冻干燥原理达到干燥空气的目的。Wiśniewski^[37]基于Fluent结合混合两相流体和Lee模型,研究了湿度和污染对内部流动中凝结过程的影响。发现污染颗粒增多会减少凝结水质量和水滴尺寸。Thanh-Hoang Phan^[38]采用Lee模型模拟了不同空气质量分数下垂直管内空气—蒸汽混合物的冷凝流动。结果显示,增加空气质量分数会降低出口的水凝结质量分数。

上述物理机理中,微通道的结构形态无疑对水蒸气冷凝以及液态水的输运特性存在一定的影响,大量学者从该角度出发开展了研究。Derby^[39]等人比较研究了工质气体在矩形、三角形以及半圆形截面微尺度管道内的冷凝输运现象,不同结构的表面张力差异会引起冷凝过程以及液膜输运特征的变化。Col^[40]等人系统地研究了微通道的倾斜角度对冷凝液膜的分布、流动形态及传热特性的影响。以往研究显示^[41],压力容器设备不同位置处漏孔通常呈现出不同的几何形态,如法兰连接及壳体焊接位置常见台阶型漏孔,密封材料老化造成转折型漏孔等。基于此,文中针对GIS设备微小泄漏状况,分析比较了不同漏孔形态下设备内部微水增长特性,揭示不同位置漏孔在逆压梯度下水分反向输运的机理及特征。

1 研究对象

文中的案例为国网电力甘肃省某电场 GIS 设备，故障灭弧室充气压力为 0.6~0.7 MPa，运行过程中发现压力表附近法兰处有微小泄漏，漏率在 500 $\mu\text{L}/\text{min}$ 以下。气室内压力下降至 0.45 MPa 时，测出内部微水含量达到 780 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。由于新充气体前严格按照抽真空—氮洗标准流程执行，因此初步判断 GIS 设备内部气体组分变化由气室微泄漏引起。该设备外形见图 1，罐体内部容积约为 0.54 m^3 。该电场所处环境日间平均温度 25 $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 40%，海拔高度 1 600 m，大气压强 85 325 Pa。



图 1 国网电力甘肃某电场 GIS 设备

Fig. 1 GIS apparatus in SGCC Gansu electric field

2 不同漏孔形态下 SF_6 气体漏率分析

2.1 漏率匹配计算

文中选取了简单圆柱孔、突扩台阶孔、突缩台阶孔、渐扩锥形孔、渐缩锥形孔、并排大小孔、直角转折孔等 7 种孔型，分别对应 GIS 设备中不同位置处微小漏孔，见图 2。文中为了比较同一漏率条件下不同漏孔中微水增长特性的差异，首先使用理论方法评估不同漏孔状态下 SF_6 气体泄漏状态，获得相同漏率下不同漏孔的结构尺寸。计算过程中使用 SF_6 气体的物性参数根据表 1 给定。

理论计算中，气体在通道内泄漏体积流率按照哈根泊肃叶公式(1)^[42]计算获得，其中 ΔP 为管道两端压差， ζ_0 为通道内部损失系数，对于平直管道该损失系数按照式(2)计算，其中 λ 沿程损失系数在层流下按照式(3)计算获得，文中场景下， SF_6 流

速按照 200 m/s 计，漏孔当量直径按照 0.02 mm 核算，其雷诺数 Re 约为 1 713，表明漏孔内流动处于层流状态，式(3)适用

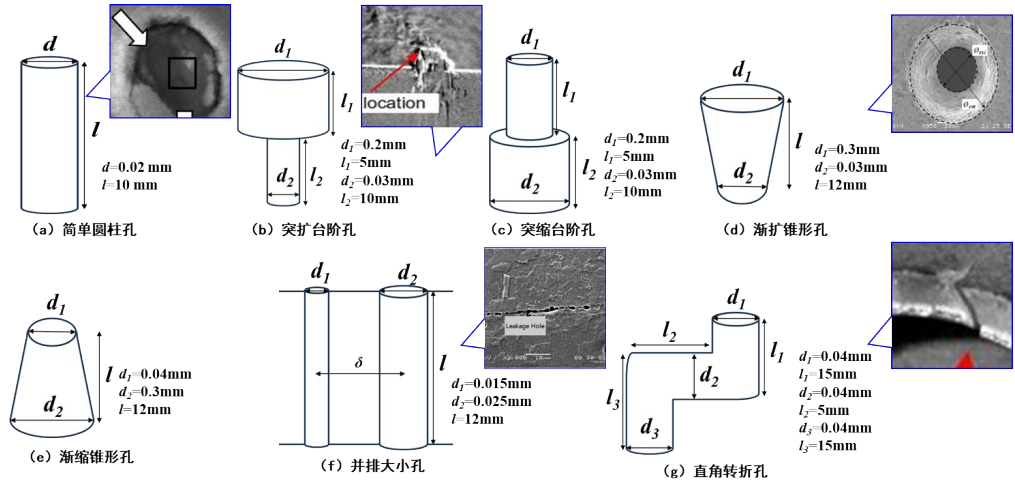


图 2 不同漏孔形态示意及其特征尺寸

Fig. 2 Schematic diagrams and the geometric parameters of the leakage holes

表 1 SF_6 气体部分物性参数

Table 1 Gas property of SF_6

分子量	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	比热容/[$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	粘度/($mPa \cdot s$)	导热系数/[$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]
146.055	6.088 6	665.18	0.014 2	0.012 06
临界压力/MPa	临界温度/ $^{\circ}C$	熔点/ $^{\circ}C$	沸点/ $^{\circ}C$	饱和蒸气压/kPa
3.76	45.6	-50.8	-63.8	2 450

$$Q = A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \zeta_0}} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{L\lambda}{D} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

对于突扩孔，流通面积突扩引起的额外压损由式(4)^[43]计算，突缩引起的压损按照式(5)计算

$$\zeta = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (4)$$

$$\zeta = \left(1 - \frac{1}{0.6 + 0.37 \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^3}\right)^2 \quad (5)$$

对于锥形孔，其局部压损系数按照式(6)进行计算

$$\zeta = \frac{\lambda}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (6)$$

式(6)中， α 为管道锥角。

在直角转折孔中，直角转弯处流率系数按照式(7)计算

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1 - 0.5\lambda_2}} \quad (7)$$

式(7)中， λ_1 、 λ_2 分别为转角前后沿程损失系数。

根据上述关系，文中建立了漏孔泄漏的一维瞬态计算程序，初步确定不同漏孔形态下 SF₆ 气体泄漏的规模。图 3 中给出了 7 种漏孔在 GIS 罐体初始压力为 0.6 MPa，外部大气压为 85 kPa，泄漏通道最小当量直径为 0.015 mm，漏孔壁面相对粗糙度均为 0.5 情况下 0~10 000 s 时间内 GIS 罐体压力下降及漏孔漏率。从图 3 可以看出，在最小当量直径相同的情况下，漏率的大小依次为：简单圆柱孔、突扩台阶孔、渐扩锥形孔、渐缩锥形孔、突缩台阶孔、直角转折孔、并排大小孔。

2.2 漏孔形态及尺寸

使用上述一维计算程序，通过调节各漏孔特征尺寸，调整各漏孔形态下漏率至 500 $\mu\text{L}/\text{min}$ ，获得了不同漏孔形态下特征尺寸见图 2。

3 不同漏孔形态下微水增长动态特性

3.1 计算模型及数值方法

3.1.1 数值方法与算例验证

文中针对不同漏孔形态下 GIS 设备内微水增长的特性研究基于 Fluent 软件开展，采用 Mixture 两相流模型计算 SF₆、空气以及液态水的输运过程，气相与液相之间传质过程采用 Lee 模型描述。计算中采用一方程的 S-A 模型分析流场内的湍流特

性，该模型对受逆压梯度的边界层有较为理想的处理效果。求解器采用压力—速度耦合算法，离散格式采用二阶迎风格式。为了模拟GIS罐体内 SF_6 气体泄漏及内部微水增长的动态特性，文中采用瞬态计算，时间步长选取0.01 s，单个时间步内进行20次迭代计算。

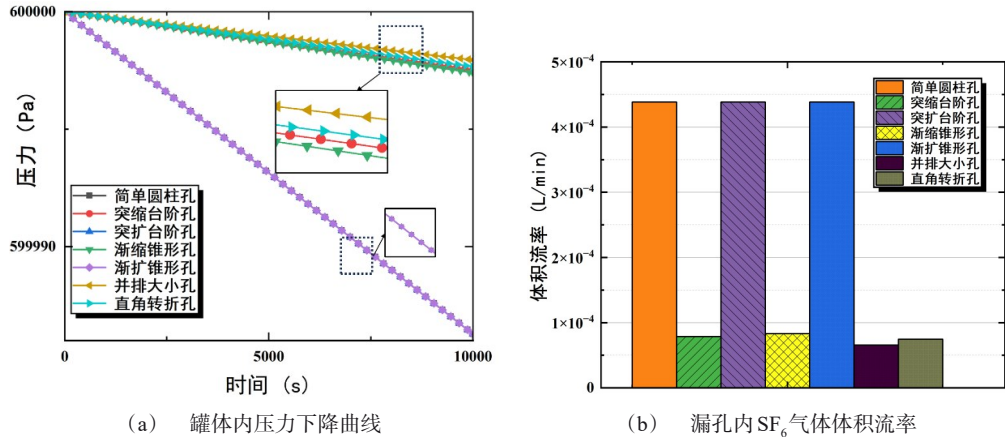


图3 不同漏孔形态下泄漏特性

Fig. 3 Leakage characteristics of different types of orifices

为了验证文中所采用CFD方法对水蒸气在重力作用下相变运输过程模拟的准确性，文中选取了文献中CONAN^[27,44-45]实验数据进行了算例验证。该实验概况见图4(a)，湿空气从上方进入 $0.34\text{ m}\times 0.34\text{ m}\times 0.005\text{ m}$ 的矩形管道，在一侧为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温壁上发生凝结，并在重力作用下向下运输。计算中建立的计算网格见图4(b)，入口条件给定速度入口，空气与水蒸气速度为 3 m/s ，水蒸气质量分数为 0.5831 ，混合气体温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 。采用上述数值方法开展仿真计算，并给定 z 方向为重力方向。计算结果见图4(c)，计算达到稳态时，冷凝壁上形成了由薄变厚的液膜，表面换热系数达到 $40\text{ }000\text{ W/m}^2$ ，距离冷凝壁面 1 mm 位置处温度由 363 K 下降至 327 K ，图4(d)中给出了实验与计算壁面温度对比，二者误差在一定范围内，这表明文中所选数值方法对水蒸气相变重力运输问题有较好的处理能力。

3.1.2 几何模型、计算网格及边界条件

根据所研究对象特征，建立的简化分析模型见图5(a)，其中GIS罐体为圆柱形，容积约为 0.54 m^3 ；漏孔位于罐体前侧法兰侧壁面处，连接漏孔设置有一定容积的外场区域，用于模拟泄漏过程中 SF_6 射流与外部空气的交互作用；罐体沿 x 轴水平放置，漏孔位于法兰盘正上方，沿 $-y$ 方向有重力加速度 g 。

计算区域生成网格见图5(b)，不同漏孔附近局部网格见图6。计算模型按照罐

体及空气外场分别进行初场定义，罐体内 SF_6 气体初始压力为 0.6 MPa，外场空气初始压力为 85 325 Pa，按照相对湿度 40% 给定水含量。初始温度均按照 298 K 给定。计算模型的边界条件及初始条件见表 2、3。

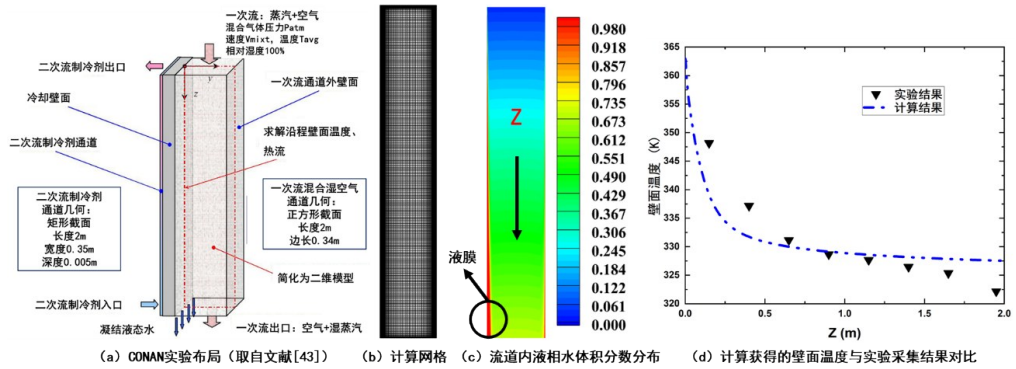


图 4 文中计算方法的算例验证

Fig. 4 Validation of the numerical methods in this study

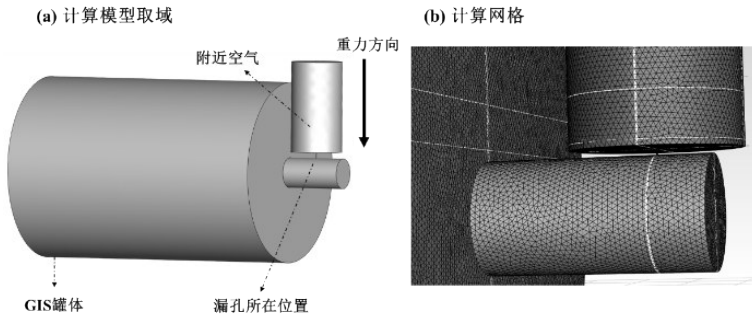


图 5 GIS 泄漏及微水增长现象计算模型

Fig. 5 Numerical domain on the GIS leakage and water growth phenomenon

表 2 计算采用的边界条件

Table 2 Boundary conditions of the calculation

3.2 不同构型漏孔内流场特性分析

3.2.1 简单圆柱孔

瞬态计算中获取了不同时刻下圆柱孔附近的流场，见图 7。从图 7 可以看出，随着时间推进，压力容器内气体压力持续降低， SF_6 气体在漏孔外侧形成了羽流区域，最高速度达到 220 m/s，并在羽流区域外侧形成了低温区。外侧的低温区域造成了空气中的水蒸气凝结，见图 7(c)，液相水的最大体积分数达到了 1×10^{-6} 。然而，

外侧形成的液态水一直到罐体内压力下降至0.2 MPa时依然未进入到漏孔内部。这是由于光滑圆柱孔在泄漏条件下，其入射到空气中的羽流形态保持稳定，凝结水蒸气聚集在孔口周围壁面附近，无法穿透羽流区域进入孔口。

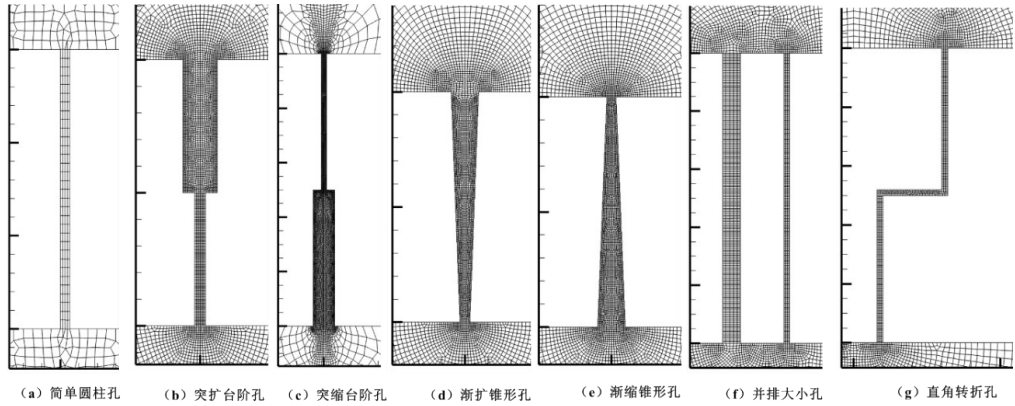


图6 漏孔附近局部网格

Fig. 6 Mesh grid in leakage orifices

表3 计算采用的初始条件

Table 3 Initial parameters of the calculation

壁面温度/K	壁面粗糙度常数	出口类型	远场压力/ Pa
298	0.5	压力远场	85 325
远场温度/K	远场H ₂ O质量分数	远场O ₂ 质量分数	远场N ₂ 质量分数
298	0.009 2	0.227 9	0.762 9
罐体初始压力/MPa	罐体组分	远场压力/ Pa	远场H ₂ O质量分数
0.6	SF ₆	85 325	0.009 2

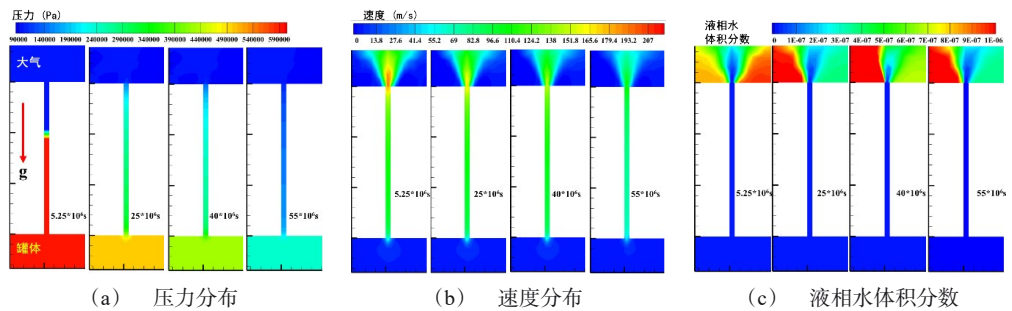


图7 圆柱孔附近流场动态特性

Fig. 7 Flow characteristics along the cylindrical hole

3.2.2 突扩台阶孔

对于突扩孔，其沿程损失远高于光滑圆柱孔，且出口直径大于圆柱孔，其在泄漏发生的初始阶段最高流速为 195 m/s，最高流速位置出现在突扩台阶处，漏孔与大气连接位置最高流速仅为 85 m/s。这种情况下，漏孔外侧形成的液相水无法及时被气流吹除，液相水在重力作用下沉积在罐体外侧壁面上。同时，从图 8(c)中注意到，随着罐体内压力的持续下降，在漏孔内部壁上出现了大量的冷凝区域，这是由于漏孔大直径区域壁面上存在极大的速度梯度，水蒸气沿着壁面发生了部分回流。在液相水冷凝下移和水蒸气回流两个因素共同作用下，液相水持续进入到漏孔内部，文中的计算中，当罐体内压力下降至 0.3 MPa 时，漏孔在压力容器侧的液相水体积分数达到 2.8×10^{-6} ，但是依然尚未进入到罐体内部。

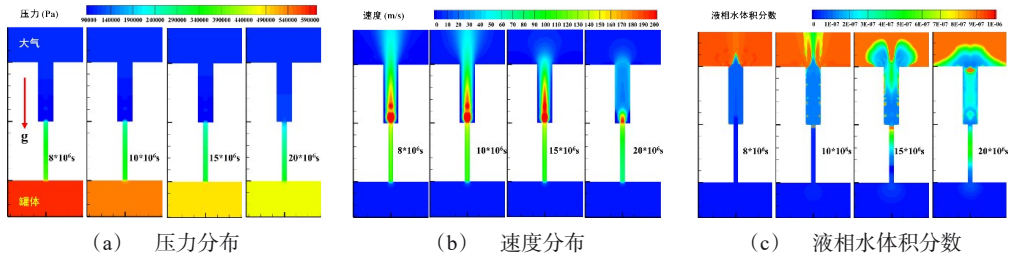


图 8 突扩台阶孔附近流场动态特性

Fig. 8 Flow characteristics along sudden expansion hole

3.2.3 突缩台阶孔

与突扩孔不同的是，突缩孔内液相水下移进入到罐体的进程明显加快了，在罐体内部压力为 0.4 MPa 时，液相水已经进入到罐体内部，见图 9。相比圆柱形漏孔，突缩台阶孔漏孔流动损失增大，导致出口处羽流区域明显减小，罐体内部压力下降后液相水沿孔口边缘进入漏孔内，并在重力作用下持续向罐体内部输运。与突扩台阶孔不同的是，突扩孔中台阶位置对液相水的迁移存在明显的阻碍作用，而突缩孔中液相水只要突破了孔口位置，就会持续进入罐体内部。

3.2.4 渐扩锥形孔

对于渐扩型的锥形孔，漏孔内 SF_6 气体的流速呈现先加速、后减速的特征，如图 10(b)所示，漏孔外侧附近存在明显的“热力学喉道”。在该流场特征作用下，漏孔外侧的平均流速为 60 m/s 左右。从图 10(c)中可以看出，“热力学”喉道对液相水的回流存在明显的阻碍作用，在罐体内压力下降至 0.4 MPa 时，漏孔外部液相水体积分数已经达到 10^{-4} 量级，但是液相水依然无法大面积进入漏孔内部。随着罐体压

力持续下降, 达到 0.32 MPa 附近时, 漏孔内流速持续下降, 热力学喉道外移至漏孔出口位置处, 这时液相水跨越屏障大面积进入到漏孔内部。

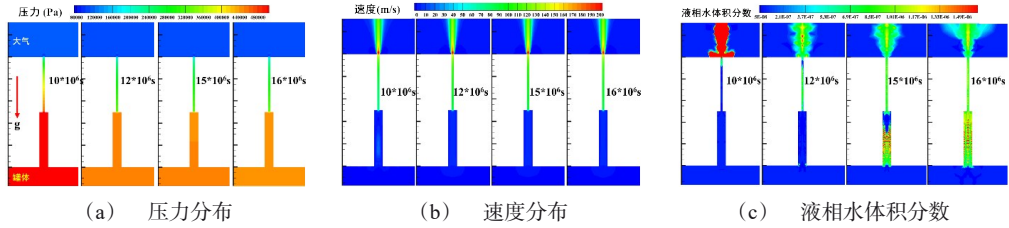


图9 突缩台阶孔附近流场动态特性

Fig. 9 Flow characteristics along sudden contraction hole

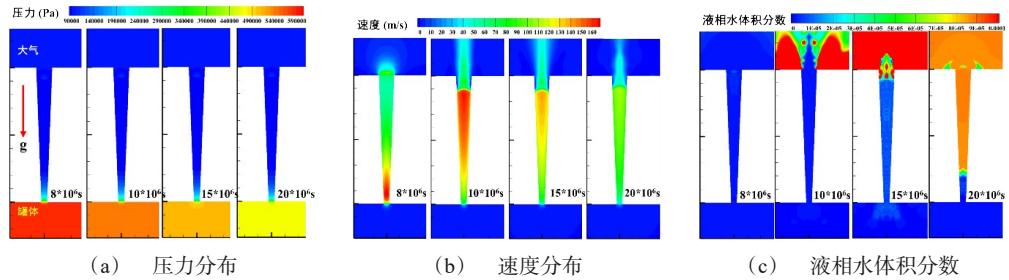


图10 渐扩锥形孔附近流场动态特性

Fig. 10 Flow characteristics along expansion conical hole

3.2.5 渐缩锥形孔

不同于渐扩孔, SF_6 气体在渐缩锥形孔中的流程为单纯的加速过程, 并在漏孔外形成羽流区域。收缩型漏孔中由于没有热力学喉道的阻碍作用, 液相水持续进入到漏孔内部, 进而进入到罐体内部。渐缩锥形孔附近流场动态特性见图 11, 从图 11 可以看出, 在罐体内压力为 0.48 MPa 时刻, 罐体内局部区域液相水体积分数达到了 9×10^{-6} 。总结而言, 无论是突扩孔还是渐扩孔, 由于越接近罐体内部, 漏孔截面积越小, 气体流速越高, 导致液相水较难进入罐体内部; 而突缩孔及减缩孔, 其对液相水的阻碍作用主要集中在漏孔孔口处, 冷凝水突破出口位置后, 就会在重力的作用下持续向罐体内部输运。

3.2.6 并排大小孔

对于大小不一的漏孔平行存在的工况, 文中使用并排布置的大小孔进行模拟, 非定常计算结果见图 12。从图 12 可以看出, 在上游压力较高时, 大孔内部流速低于小孔, 这导致外侧液相水更早地进入大孔。随着罐内压力持续下降, 小孔流速低

于大孔，这时液相水开始进入到小孔内部。在罐体内压力为 0.47 MPa 时，罐体内漏孔附近处液相水体积分数最大达到 3.9×10^{-6} 。值得注意的是，凝结后的液相水同时存在蒸发的现象，图 12(c) 中沿着羽流区向外，依次出现了气动加速低温区，冷凝放热高温区，以及液相水二次蒸发低温区。当 GIS 设备上存在位置相近，大小不一的一系列漏孔时，由于漏孔内气体流速大小不同，外侧冷凝水便会沿流速较小的通道进入漏孔以及罐体内部。

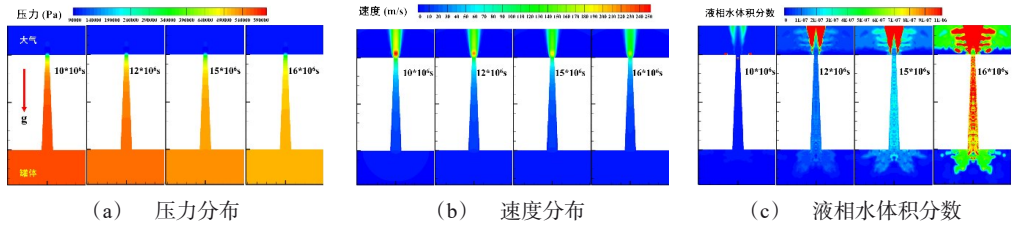


图 11 渐缩锥形孔附近流场动态特性

Fig. 11 Flow characteristics along the contraction conical hole

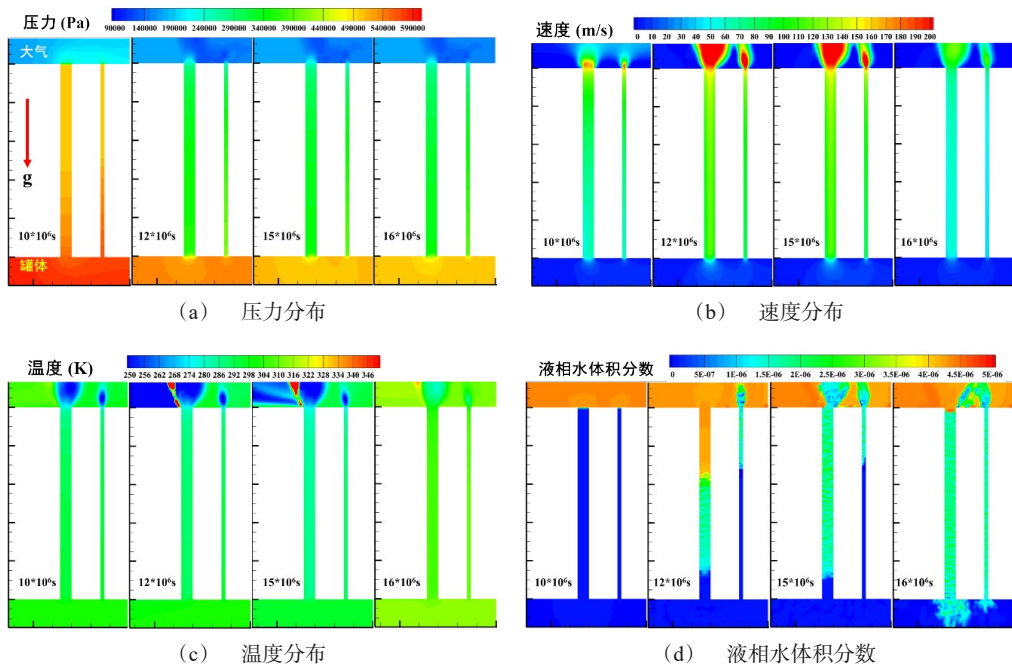


图 12 并排孔附近流场动态特性

Fig. 12 Flow characteristics along parallel leaking orifices

3.2.7 直角转折孔

相较于其他形态的漏孔，直角转折孔流阻最大，因此其外侧形成的羽流区域最小。 SF_6 气体最大喷射速度仅为 54 m/s，但是在平直段中存在一段高速区域，最高速度达到 150 m/s。随着罐体压力的逐步下降，液相水首先进入到外侧竖直段，进一步跨越高速平直段，最终沿着内侧竖直段进入到罐体内部。在罐体内压力为 0.41 MPa 时，罐体内液相水最大体积分数达到 1.2×10^{-6} 。转折孔作为 GIS 设备微小漏孔的一种典型形态，由于其漏孔内局部损失较高，导致漏孔外羽流覆盖面积小，气体流速低，无法及时将冷凝水吹除，导致液相水在重力等因素下容易进入到压力容器内部。直角孔附近流场动态特性见图 13。

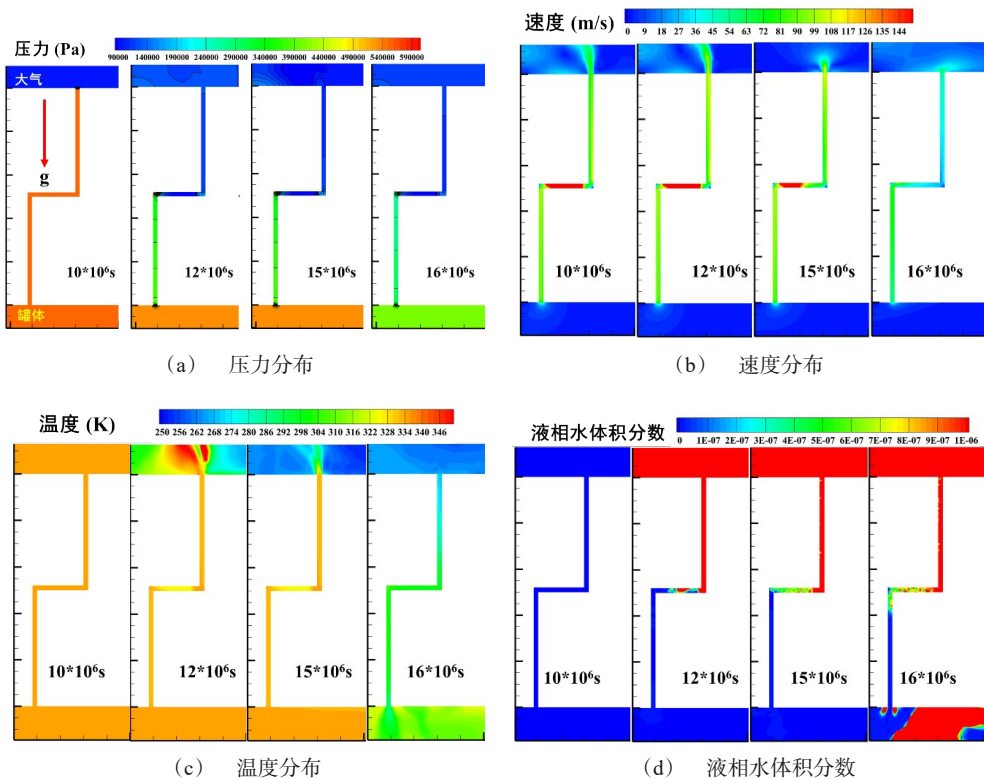


图 13 直角孔附近流场动态特性

Fig. 13 Flow characteristics along right-angled orifice

3.3 临界压力及含水量比较

3.3.1 水组分进入 GIS 内临界压力

随着计算进行，完整获得了不同孔型下随着罐体内压力下降水组分进入设备的

动态过程，截取了不同孔型下液相水进入漏孔内部和进入罐体内部时罐体 SF_6 气体压力见表 4，其中临界压力越高，表明液相水越容易进入该型漏孔。从表 4 可以看出，在相同漏率条件下，水分更容易进入到直角转折孔、并排孔以及突扩孔内部，但是由于扩张型孔对液相水进一步转移有明显的抑制作用，突扩型台阶孔在罐内压力下降至 0.3 MPa 时液相水才进入到罐体内部。从液相水进入罐体内的临界压力来看，微小泄漏条件下水分进入 GIS 罐体从易到难依次为：并排大小孔、渐缩锥形孔、直角转折孔、突缩台阶孔、突扩台阶孔、渐扩锥形孔、简单圆柱孔。

表 4 不同孔型下液相水进入漏孔及压力容器的临界压力

Table 4 Critical pressures of liquid water entering leakage holes and GIS under different hole patterns

漏孔形态	液相水进入漏孔时压强/MPa	液相水进入罐体压强/MPa	漏孔内侧液相水体积分数
简单圆柱孔	—	—	—
突扩台阶孔	0.50	0.30	2.8×10^{-6}
突缩台阶孔	0.48	0.40	1.6×10^{-6}
渐扩锥形孔	0.32	0.20	1.0×10^{-6}
渐缩锥形孔	0.49	0.46	9.0×10^{-6}
并排大小孔	0.51	0.47	3.9×10^{-6}
直角转折孔	0.52	0.41	1.2×10^{-6}

3.3.2 压力下降至 0.4 MPa 时含水量

为了更为直观比较不同孔型下进入到 GIS 设备内的含水量，0.4 MPa 时刻 GIS 罐体中心位置沿着长度方向气相水的质量分数分布见图 14。沿着长度方向，水蒸气含量均呈上升趋势，距离漏孔位置越近，含水量越高。在 0.4 MPa 时刻，直角转折孔所在罐体内部主要区域含水量已经达到 10^{-3} 量级，突缩台阶孔达到 10^{-4} 量级，均达到可检出水平。并排平行孔与渐缩锥形孔含水量相当，在罐体内压力进一步下降时进入可检测水平。简单圆柱孔、突扩台阶孔及渐扩锥形孔罐体内含水量均处在 10^{-10} 量级以下，属于安全水平。值得注意的是，对于简单圆柱孔型，计算过程中未观察到液相水进入到罐体内部，但是沿着长度方向水蒸气含量也呈现出上升趋势，其主要原因是少量空气通过局部回流进入到罐体内部。

4 结论

文中针对 GIS 电力设备 SF_6 气体泄漏与内部微水增长间的伴生现象，以国网甘肃某电场故障 GIS 设备为对象，数值分析了不同漏孔形态对内部微水增长特性的影响。研究选取了包含简单圆柱孔、台阶孔、锥形孔、直角孔及并排孔等七种漏孔形

态，分别对应GIS设备原因造成的微小漏孔。建立数值模型开展了多组分相变运输瞬态模拟，获得了不同漏孔形态下罐体—漏孔—外场区域流场的动态特性，及液—气相水的动态运输过程，截取了水组分进入到罐体时刻的临界压力。研究过程中得到了如下结论：

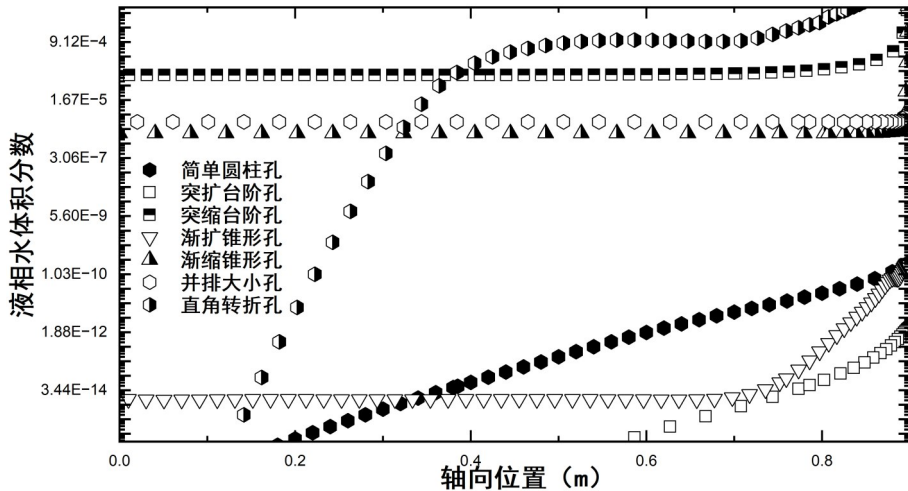


图 14 不同漏孔形态下罐体中心位置沿长度方向水蒸气质量分数

Fig. 14 Variations of water mass fraction with axial position under different hole patterns

1)在相同规模的泄漏条件下，漏孔内部结构越复杂(漏孔内部存在转角，存在多个漏点等)，出口位置羽流覆盖面积越小，外侧凝结液相水更容易进入漏孔内部。

2)在罐体内外侧压差作用下，扩张型漏孔内部会出现 SF_6 气体先加速后减速的热力喉道气动结构，该结构对液相水进入泄漏通道有明显的阻碍作用，收缩型漏孔对凝结水的阻碍作用局限在漏孔位置处，从而导致收缩型漏孔更容易发生内部微水增长现象。

参考文献

- [1] 张 铎, 赵云学, 郑宇宏, 等. 1 100 kV GIS用 SF_6 断路器的研究开发[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 26-31.
ZHANG Duo, ZHAO Yunxue, ZHENG Yuhong, et al. Development of 1 100 kV SF_6 circuit breaker for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 26-31.
- [2] 袁镜江. 110 kV 八达站 GIS 设备 SF_6 气体微水超标原因分析及其临时处理方法[J]. 电气开关, 2014, 52(1): 89-91.
YUAN Jingjiang. Analysis of causes and interim measures of overstand and SF_6 gas micro-water of GIS equipment of 110 kV badaling substation[J]. Electric Switcher, 2014, 52(1): 89-91.

- [3] 严文群. GIS 中 SF₆ 气体水分含量测试结果分析[J]. 高压电器, 2002, 38(2): 58-60.
YAN Wenqun. Analysis of the test results of SF₆ gas moisture content in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(2): 58-60.
- [4] 陈小刚. GIS 设备中 SF₆ 的微水含量检测系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
CHEN Xiaogang. Research on H₂O concentration detecting system of SF₆ in GIS instruments[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [5] WANG H L, SHEN J W. Quantitative Analysis for SF₆ and its Compositions in GIS[J]. Advanced Materials Research, 2010(562-564): 1336-1339.
- [6] 冯颖姣, 沈建位, 黄晓霞, 等. GIS 气室 SF₆ 气体微水密度在线监测实用技术[J]. 电工技术, 2015(4): 32-33.
FENG Yingjiao, SHEN Jianwei, HUANG Xiaoxia, et al. On-line detection of micro water density in GIS chamber[J]. Electric Engineering, 2015(4): 32-33.
- [7] 韩四满, 李秀广, 郭林. 基于循环气体的 GIS 设备带电干燥装置研制与应用[J]. 电工材料, 2021(4): 31-34.
HAN Siman, LI Xiuguang, GUO Lin. Development and application of charged drying device for GIS equipment based on circulating gas[J]. Electrical Engineering Materials, 2021(4): 31-34.
- [8] 左稳, 依马木买买提·瓦阿甫, 单德帅, 等. 基于温升控制的 GIS 气室微水加热氮洗干燥研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1186-1191.
ZUO Wen, Yimam Maimaiti Wafu, SHAN Deshuai, et al. Research on the drying-treatment of heating and nitrogen washing for GIS micro water in the air chamber based on the temperature rise control[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2017, 34(10): 1186-1191.
- [9] 戴伟伟, 高凯, 刘坚钢, 等. 基于 GIS 气室微水处理的热流固耦合仿真模型研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 254-259.
DAI Weiwei, GAO Kai, LIU Jiangan, et al. Research of heat-fluid-solid coupling simulation model based on the micro water treatment inside GIS gas chamber[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 254-259.
- [10] GAO Kai, QIAO Xinlei, DAI Weiwei, et al. Analysis of factors influencing the internal insulation performance of GIS equipment based on multiphysics coupling[C]//2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). [S.l.]: IEEE, 2018: 119-122.
- [11] 黄文宏, 章保东, 包其富, 等. 重质气体泄漏扩散模型研究综述[J]. 浙江化工, 2009, 40(7): 18-22.
HUANG Wenhong, ZHANG Baodong, BAO Qifu, et al. A review of the heavy gas dispersion mathematical models[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2009, 40(7): 18-22.
- [12] 李香华, 王军. 500 kV GIS 设备 SF₆ 气体泄漏缺陷分析及处理[J]. 水电与新能源, 2016(4): 1-3.
LI Xianghua, WANG Jun. Analysis and treatment of SF₆ gas leakage in 500 kV gas insulated substation equipment[J]. Hydropower and New Energy, 2016(4): 1-3.

- [13] 郭程. GIS运行中的SF₆气体管理与泄漏处理[J]. 供用电, 2007, 24(4): 40-42.
GUO Cheng. Management and leakage handling of SF₆ gas in operation of gas insulated switchgear [J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(4): 40-42.
- [14] 王红伟. 一起典型GIS设备漏气处理案例分析[J]. 机电信息, 2015(33): 58-59.
WANG Hongwei. Case analysis of a typical gas leakage treatment of GIS equipment[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015(33): 58-59.
- [15] 张浩, 吴凯, 管敏渊, 等. 一起GIS设备SF₆气体泄漏故障的分析与处理[J]. 浙江电力, 2016, 35(9): 35-38.
ZHANG Hao, WU Kai, GUAN Minyuan, et al. Analysis and treatment on a SF₆ gas leakage fault of GIS device[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(9): 35-38.
- [16] 汤铭华. GIS组合电器典型故障分析及改进[D]. 广州: 华南理工大学
TANG Minghua. Fault analysis and improvement of gas insulated substation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [17] 姜宝林, 孙吉权, 许亮, 等. 紫外线电离型SF₆气体检漏仪[J]. 现代仪器, 2005, 11(4): 56-58.
JIANG Baolin, SUN Jiquan, XU Liang, et al. Apparatus measuring SF₆ gas leak utilized ultraviolet radiation for generating ion[J]. Modern Instruments, 2005, 11(4): 56-58.
- [18] 高树国, 郑爱全, 耿江海, 等. 应用激光成像技术检测SF₆电气设备气体泄漏[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 103-105.
GAO Shuguo, ZHENG Aiquan, GENG Jianghai, et al. Application of laser imaging technology to detection of SF₆ leakage in electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 103-105.
- [19] 胡连清, 刘卫东, 李哲文, 等. SF₆气体红外成像检漏仪与定量检漏仪现场使用经验探讨[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 126-130.
HU Lianqing, LIU Weidong, LI Zhewen, et al. Discussion of on-site using experience of infrared image leakage detector and quantitative leakage detector for SF₆ gas[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 126-130.
- [20] 黄柏, 杨帆, 邓剑平, 等. 基于累积帧间差分法和掩膜的SF₆红外检漏视频定位算法研究[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 104-108.
HUANG Bai, YANG Fan, DENG Jianping, et al. Study of an accumulated interframe difference and mask based SF₆ leakage infrared video location method[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(7): 104-108.
- [21] 梁群锋. SF₆红外检漏成像仪在GIS检修的应用[J]. 电力设备管理, 2023(13): 23-25.
LIANG Qunfeng. Application of SF₆ infrared leak detector in the maintenance of GIS equipment [J]. Electric Power Equipment Management, 2023(13): 23-25.
- [22] STEILL J D, OOMENS J, EYLER J R, et al. Gas-phase infrared multiple photon dissociation spectroscopy of isolated SF₆⁻ and SF₅⁻ anions[J]. Journal of Chemical Physics, 2008, 129(24): 244302.
- [23] 王琦, 马江泓, 邱毓昌. GIS中SF₆气体含水量超标原因分析[J]. 华东电力, 2003, 31

- (6): 82-83.
- WANG Qi, MA Jianghong, QIU Yuchang. Analysis overproof of water content in SF₆ of GIS [J]. East China Electric Power, 2003, 31(6): 82-83.
- [24] EL KADI K, ALNAIMAT F, SHERIF S A. Recent advances in condensation heat transfer in mini and micro channels: A comprehensive review[J]. Applied Thermal Engineering, 2021 (197): 117412.
- [25] KIM S M, MUDAWAR I. Review of databases and predictive methods for heat transfer in condensing and boiling mini/micro-channel flows[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014(77): 627-652.
- [26] KENIAR K, EL FIL B, GARIMELLA S. A critical review of analytical and numerical models of condensation in microchannels[J]. International Journal of Refrigeration, 2020(120): 314-330.
- [27] VYSKOCIL L, SCHMID J, MACEK J. CFD simulation of air - steam flow with condensation [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014(279): 147-157.
- [28] LI Junde. CFD simulation of water vapour condensation in the presence of non-condensable gas in vertical cylindrical condensers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57 (2): 708-721.
- [29] XIONG Feng, ZHAO Jiaming, TU Ruiyang, et al. Improved CFD simulation of water hammer caused by condensation with an enhanced phase change model[J]. Progress in Nuclear Energy, 2024(173): 105242.
- [30] PARK J W, JIAO Kui, LI Xianguo. Numerical investigations on liquid water removal from the porous gas diffusion layer by reactant flow[J]. Applied Energy, 2010, 87(7): 2180-2186.
- [31] LEE K J, KANG J H, NAM J H. Liquid water distribution in hydrophobic gas-diffusion layers with interconnect rib geometry: An invasion-percolation pore network analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(12): 6646-6656.
- [32] JEON D H. Effect of channel-rib width on water transport behavior in gas diffusion layer of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2019(423): 280-289.
- [33] JEON D H. Effect of gas diffusion layer thickness on liquid water transport characteristics in polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2020(475): 228578.
- [34] ZHANG Libin, LIU Shuai, WANG Zhong, et al. Experimental and simulation analysis of liquid capillary fingering process in the gas diffusion layer[J]. Journal of Power Sources, 2023 (554): 232276.
- [35] LIN Tao, HAN Fengqin, DAI Tonghua, et al. Numerical investigation of multi-physical field dehumidification control technology for prefabricated chambers[J]. Journal of Building Engineering, 2023(80): 108156.
- [36] SONG Dan, CAO Yaxu, Xu Hui. Reduce the factor of space humidity on the incorrect action of circuit breakers[C]//International Conference on Advanced Power System Automation & Protection. Beijing China: IEEE, 2011: 93-96.
- [37] WIŚNIEWSKI P, DYKAS S, YAMAMOTO S, et al. Numerical approaches for moist air con-

- densing flows modelling in the transonic regime[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020(162): 120392.
- [38] PHAN T H, WON S S, PARK W G. Numerical simulation of air-steam mixture condensation flows in a vertical tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, Part C(127): 568-578.
- [39] DERBY M, LEE H J, PELES Y, et al. Condensation heat transfer in square, triangular, and semi-circular mini-channels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(1/3): 187-197.
- [40] DEL COL D, BORTOLATO M, AZZOLIN M, et al. Effect of inclination during condensation inside a square cross section minichannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014(78): 760-777.
- [41] LI Jingcui, WAN Jifang, LIU Hangming, et al. Numerical study of casing microleakage flow field sensitivity and acoustic field characteristics[J]. *Materials*, 2022, 16(1): 386.
- [42] BINDER R C. *Fluid mechanics*[M]. USA: Prentice-Hall, 1955.
- [43] IDELCHIK I E. *Handbook of Hydraulic Resistance*, 4th Edition Revised and Augmented[M]. USA: Begell House Inc., 2008.
- [44] AMBROSINI W, BUCCI M, FORGIONE N, et al. Comparison and analysis of the condensation benchmark results[J]. *The 3rd European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2008)*. Nesseber, Vigo Hotel, Bulgaria: [s.n.], 2008: 1-12.
- [45] AMBROSINI W, FORGIONE N, DURAND S. Analysis of Experimental Data of Condensation in the Presence of Non-Condensable Gases by a CFD Code[EB/OL].[2025-11-17]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 123365325>.

樊新鸿(1990—), 男,

硕士, 高级工程师, 主要从事电气设备绝缘介质状态检测及监测方面的研究(E-mail fanxhong@qq.com)。

孔令轩(1988—), 男,

博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新能源装备研发及仿真分析(E-mail lxxkong@lut.edu.cn)。