

GIS 设备微泄漏条件下水组分增长机理的数值研究*

陈宏刚¹ 王永奇¹ 樊新鸿¹ 张正渊¹ 马玲¹ 赵睿¹ 景瑞斌¹ 罗宁²
孔令轩²

摘要: GIS 设备 SF₆ 气体泄漏往往伴随内部水组分含量上升, 对电力设备的安全稳定运行带来了巨大的隐患。为了揭示微小泄漏与水分增长二者伴生发生的物理机理, 文中以国网甘肃某 GIS 设备为对象, 开展了瞬态大时间跨度 CFD 模拟。模拟中建立 GIS 罐体、漏孔及外侧空气远场模型, 使用 Mixture 多相流模型, 获得了泄漏过程中不同时刻下的流场分布。结果表明, 漏孔外侧 SF₆ 羽流会造成局部低温, 引发空气中水蒸气凝结, 液相水在内部压力下降至 0.48 MPa 附近时会进入 GIS 罐体内部, 昼夜温度交替会加剧该现象的发生。

关键词: 气体绝缘开关; SF₆; 含水量; 多相流; 微泄漏; 数值模拟

Numerical Study on Water Fraction Growth Mechanism Under Icroleakage Conditions in GIS Equipment

Honggang CHEN, Yongqi WANG, Xinhong FAN, Zhengyuan ZHANG,
Ling MA, Rui ZHAO, Ruibin JING, Ning LUO, Lingxuan KONG

Abstract: Leakage of SF₆ gas in GIS equipment is often accompanied by an increase in water fraction, which poses a great potential danger to the safe and stable operation of electric equipment. In order to reveal the physical mechanism of the concomitant occurrence of micro leakage and water growth, this paper carries out transient large time span CFD simulation with a GIS apparatus of State Grid Gansu as the object. In the simulation, the GIS tank, the leakage orifice and the farfield of outer atmosphere are included. The flow field distributions at different moments during the leakage process are obtained by using the Mixture multiphase flow model. The results show that the SF₆ plume on the outside of the leakage hole causes local low temperature, which triggers the

收稿日期:XXXX-XX-XX

修回日期:XXXX-XX-XX

接受日期:XXXX-XX-XX

condensation of water vapor in the air, and the liquid-phase water enters the GIS tank when the internal pressure drops to near 0.48 MPa, and the alternation of day and night temperatures exacerbate the occurrence of this phenomenon.

Keywords: gas insulated switchgear; SF₆; water fraction; multiphase flow; microleakage; numerical simulation

0 引言

GIS(gas insulated switchgear)气体绝缘全封闭组合电器作为电力系统中具有控制、保护作用的电器设备,以其结构紧凑、可靠性高、配置灵活等优势,成为我国电力系统的主流绝缘灭弧方案^[1-2]。六氟化硫(SF₆)气体因其优异的绝缘和灭弧性能被广泛应用于GIS中作为保护气体。GIS设备充注SF₆气体时,需首先进行气室清洗并封装吸附剂,进一步对设备抽真空至40 Pa以下并保持,之后充注高纯高压N₂并静置数小时,在确保设备无泄漏无微水产生后再次抽真空,并充注高纯SF₆气体至0.6 MPa^[3]。上述步骤旨在保证GIS运行期间SF₆气体保持高纯度并无泄漏。

然而实际运行中,SF₆气体泄漏是GIS设备最常见的故障,约占GIS设备故障的40%左右^[4-6]。SF₆在高压电弧作用下会发生部分分解,其分解产物发生泄漏时通常在室内底层空间聚集,造成局部缺氧和带毒,对工作人员的生命安全构成的严重的威胁^[6-7]。另一方面,泄漏导致SF₆气体纯度下降,影响了其绝缘性能。同时,大量文献及案例表明,GIS设备泄漏后往往伴随内部微水增长^[8-9]。文[4]中指出,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、气体密度继电器结合面等位置。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^[10]、激光成像^[11]、红外热成像^[12-15]等多种技术手段,可实现较高精度的泄漏检测。

GIS中微水超标会直接影响气体的绝缘性能和设备的安全运行,并且SF₆气体与水组分发生反应会生成有毒物质,因此必须从各个环节出发,控制GIS内微水含量^[9,16-18]。大量学者从各个角度对微水产生的抑制技术进行了研究,韩四满^[19]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^[20]及戴伟伟^[21]等人分析了氮洗这一环节,尽可能降低GIS设备内微水;针对高湿度地区运行过程中微水增长的风险,学者也提出了相应的防控措施^[22-23]。正如前文所述,GIS泄漏往往伴随内部微水增长,然而这两者之间的伴生物理机理尚无相关研究,本文从国网电力甘肃某电场GIS微泄漏条件下内部微水增长实际案例出发,采用计算流体力学方法,分析了大时间跨度下SF₆气体泄漏和空气中水分进入罐体内部的瞬态过程,揭示了GIS在微泄漏条件下微水增长的物理机理,为后续的防控措施提供一定的指导。

1 GIS设备内微水增长现象

文中的案例为国网电力甘肃省某电场GIS设备，其灭弧室充气压力为0.6~0.7MPa，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 。该电场所处环境条件见表1。



图1 国网电力甘肃某电场GIS设备

Fig. 1 GIS apparatus in this study

表1 GIS设备所在位置环境条件

Table 1 Environmental conditions of the GIS apparatus

日间温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	海拔高度/m	大气压/Pa
25	40	1 600	85 325

2 研究方法

针对前文所述问题，文中基于计算流体力学(CFD)开展数值分析，研究GIS设备在给定环境条件中微小泄漏条件下内部水组分增长的机理及其影响因素。数值分析基于Ansys-Fluent软件展开。以下将对数值模拟所采用的数值方法、建模思路及分析过程开展介绍。

2.1 控制方程、数值方法及多相流模型

本研究中对GIS设备泄漏仿真通过求解三维N-S方程实现，文中研究中需要充

分考虑 GIS 内部高压 SF₆ 气体与外部空气及水蒸气之间的多组分混合输运过程，同时在温度剧烈变化条件下可能存在水蒸气凝结、蒸发等过程。因此计算采用组分输运方程，同时纳入能量方程的求解，对于存在相变的多组分输运流动，其连续方程、动量方程及能量方程的形式见式(1)-(6)，其中：式(1)-(3)为气相流动控制方程；式(4)-(5)为液相控制方程^[24-26]

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_v u_j) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_v u_j u_i) = -\frac{\partial \rho_v}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_v u'_i u'_j) + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_v u_j E + u_j p_v) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{eff} \right) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_v u_j Y) = S_Y \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v N) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_v u_j N) = J \quad (5)$$

$$r_d = \left(\frac{3Y}{4\pi\rho_l N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式(1)-(6)中：气相与液相之间传质过程采用 Lee 模型描述^[27-30]，该模型中蒸发冷凝控制方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{lv} = coeff * \alpha_l \rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{vl} = coeff * \alpha_v \rho_v \frac{T_{sat} - T_v}{T_{sat}} \quad (9)$$

式(7)-(9)中： α_v 为蒸汽相体积分数； ρ_v 为蒸汽相密度； \vec{V}_v 为蒸汽相速度；

$\dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl}$ 表示蒸发和冷凝引起的传质速率，二者分别见式(8)、(9)。

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。计算流程见图2。

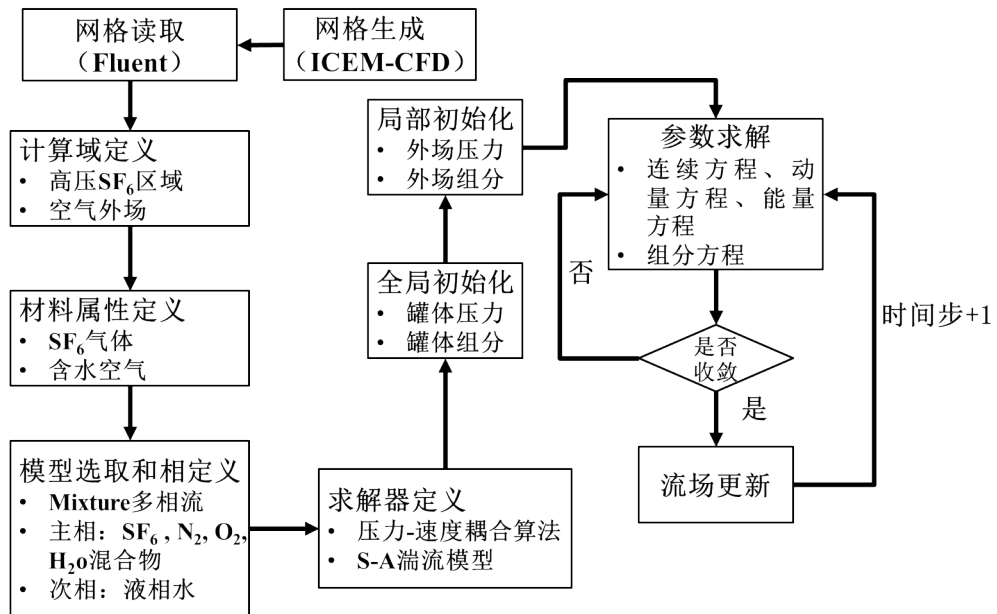


图2 计算流程

Fig. 2 Flow chart of the numerical study

2.2 算例验证

为了验证文中所采用数值计算方法的准确性，选取了比萨大学经典CONAN^[31-33]实验数据进行计算对比。如图3(a)所示，该实验布置了一个尺寸为0.34 m×0.34 m×0.005 m的矩形管道，管道一侧通有30 °C的冷却液以保持壁面温度，相对湿度为100%的湿空气从矩形管道上方进入管道内部，管道下方为两相流出口。针对该实验工况，文中建立了如图3(b)所示二维计算网格，网格数量为21 696，在流场出入口及壁面进行了网格加密。计算入口给定空气与水蒸气的混合物，水蒸气的质量分数为0.583 1，混合物温度为90 °C，气体流速给定3 m/s。冷却液所在壁面给定30 °C的等温壁面，另一侧壁面给定绝热壁面条件。其他条件根据文献中的

P30-T30-V25 工况给定。计算采用考虑多组分运输的 Mixture 多相流模型及 S-A 湍流模型，沿着 z 方向为重力方向。计算结果见图 3(c)、(d)，从 3(c)、(d) 可以看出，在达到稳态条件时，管道冷凝壁上形成了由薄变厚的液膜，冷凝壁面上的换热系数达到 $40\,000\text{ W/m}^2$ ，距离冷凝壁面 1 mm 位置处温度由 363 K 下降至 327 K ，温度曲线与实验测试结果在一定误差范围内，表明本文所采用计算方法对于两相重力流问题具有一定的适配性。

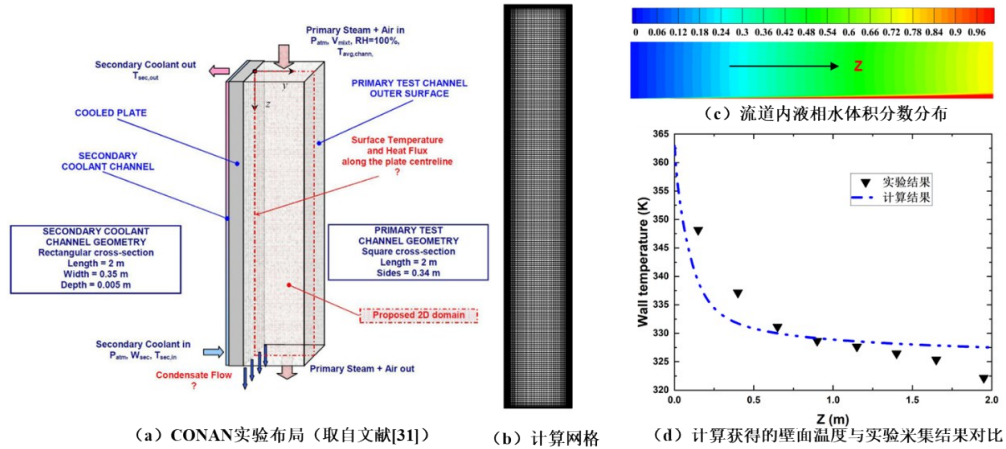


图3 文中计算方法的算例验证

Fig. 3 Validation of the numerical methods in this study

2.3 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 4(a)，其中 GIS 罐体为圆柱形，容积为 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；罐体沿着 x 轴放置，漏孔位于法兰盘正上方，沿 $-y$ 方向有重力加速度 g 。计算所采用网格见图 4(b)，网格数量 280 万。漏孔形态根据前期研究选取了突缩孔的形态见图 4(c)。

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 85325 Pa ，按照相对湿度 40% 给定水含量。初始温度均按照 298 K 给定。计算中输入 SF_6 气体的物性参数见表 2。

计算模型的边界条件及初始条件见表 3、4。

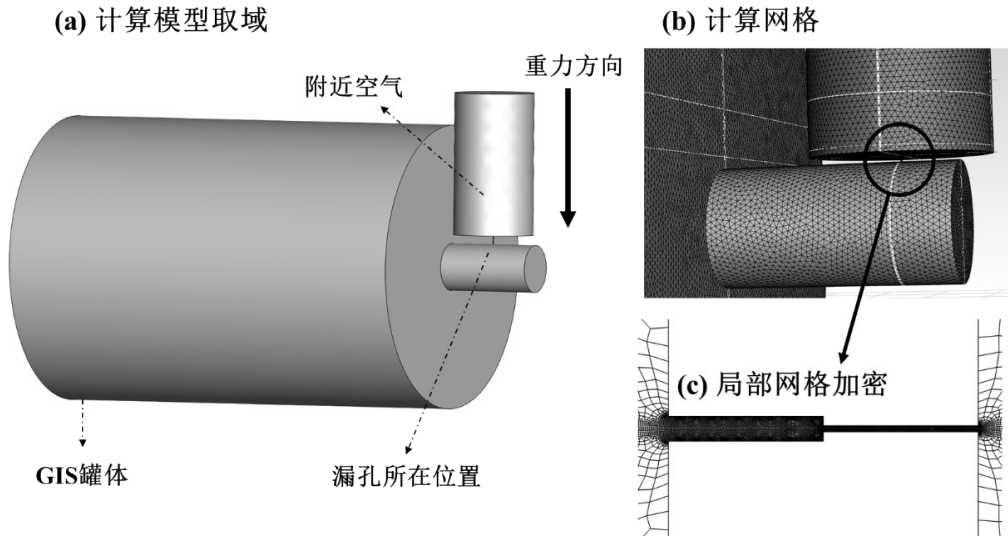


图4 计算模型及网格划分

Fig. 4 Numerical domain and the calculating mesh grid

表2 SF₆气体部分物性参数

Table 2 Gas property of SF₆

分子量	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	动力学粘度/(mPa·s)	导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]
146.055	6.088 6	665.18	0.014 2	0.012 06
临界压力/MPa	临界温度/°C	熔点/°C	沸点/°C	饱和蒸气压/kPa
3.76	45.6	-50.8	-63.8	2 450

表3 计算采用的边界条件

Table 3 Boundary conditions 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

表4 计算采用的初始条件

Table 4 Initial parameters of the calculation

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

3 结果与讨论

3.1 漏率标定

在探究微小泄漏导致GIS内部水分增长机理之前，首先需要确定设备SF₆气体泄漏的规模以及漏孔的几何尺度。文中选取了当量直径在0.2 mm到0.01 mm的5种尺寸规格的漏孔，建立计算模型，罐体内初始压力为0.6 MPa，漏孔外侧为大气压，开展瞬态计算。计算获得了0~10 000 s时间内罐体压力的下降过程以及漏孔内SF₆气体的体积流率，见图5。

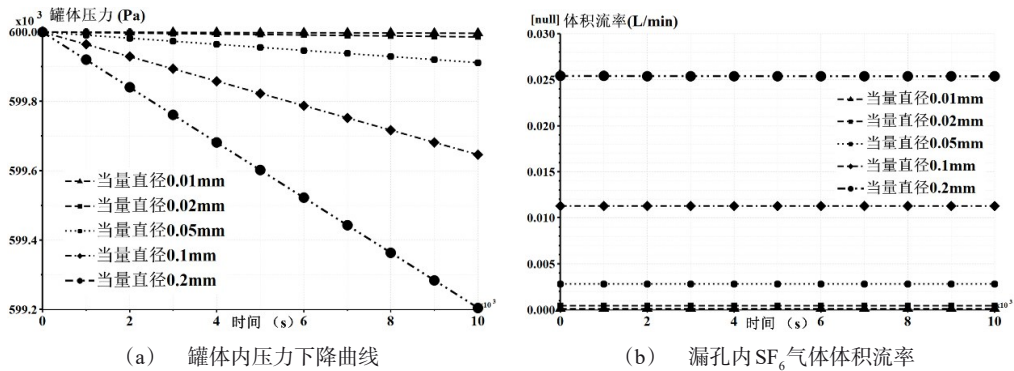


图5 不同漏孔尺寸下泄漏特性

Fig. 5 Leakage characteristics of different orifices

从结果可以看出，在该时间段内罐体压力下降缓慢，压力—时间呈线性关系，五种尺寸下漏孔内流量系数均在0.05附近。不同当量直径的漏孔所对应的压降及体积流率见表5，当直径小于0.02 mm时，其漏率低于500 μL/min，仪器无法检出。因此在后续的分析中选取当量直径为0.02 mm的漏孔。

表5 不同尺度漏孔对应泄漏规模

Table 5 Scale of leakage with different orifices

漏孔当量直径/mm	计算时长/s	容器内压降/Pa	体积流率/(L·min ⁻¹)	是否可检出
0.20	10 000	795	2.54×10^{-2}	是
0.10	10 000	353	1.13×10^{-2}	是
0.05	10 000	88	2.82×10^{-3}	是
0.02	10 000	14	4.52×10^{-4}	否
0.01	10 000	3	1.13×10^{-4}	否

3.2 漏孔处流场分析

计算初始时刻，对GIS罐体及周围空气流场进行初始化，罐体及漏孔通道内部压力为0.6 MPa，气体组分为 SF_6 气体，漏孔外侧环境为压力为85 325 Pa的空气，相对湿度为40%，初始流场见图6。

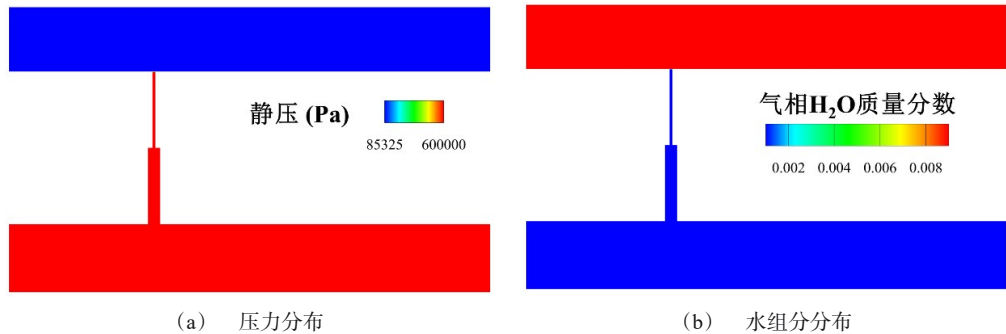


图6 计算初始时刻流场

Fig. 6 Initial flow field

随着计算进行， SF_6 气体从漏孔处喷出，罐体内压力开始缓慢降低，此时漏孔附近流场见图7。 SF_6 气体在漏孔外侧形成羽流区域，羽流区域直径约为0.06 mm，深度约7 mm，羽流核心区域最高速度达到245 m/s，值得注意的是漏孔壁面附面层内速度为0，且与容器外壁附面层相连接。由于气动作用，高速区域气体静温较大幅度下降，在羽流核心区域 SF_6 气体最低温度达到242 K。水蒸气质量分数在流场内的分布见图7(d)，从图7(d)可以看出在该时刻水蒸气主要存在于漏孔周围的环境中，尚未进入容器内部。

计算中发现，在上述高速低温区域，出现了空气中水蒸气凝结的现象，见图8(a)，在羽流区域，凝结水所占体积分数最高达到 1.7×10^{-6} ，图7(c)中静温分布的特征也印证了这一点，在羽流区域边缘，由于水蒸气凝结释放潜热，出现了局部高温区域。同时凝结产生的液态水在喷射流作用下向漏孔外部流动，最高流速达到245 m/s，见图8(b)。

3.3 水分进入GIS设备过程分析

在罐体内压力较高时，漏孔外部羽流仍保持较高速度，冷凝形成的液相水只有向外的移动速度，此时水分无论是以气态还是液态均无法进入到漏孔甚至罐体内部。随着泄漏的持续，罐体内部 SF_6 气体压力持续降低，喷射羽流速度不断降低。在该过程中水蒸气凝结速率提高，并且所受气动力减小，在这两方面的因素共同作

用下，液相水开始在重力的作用下向漏孔内部移动。

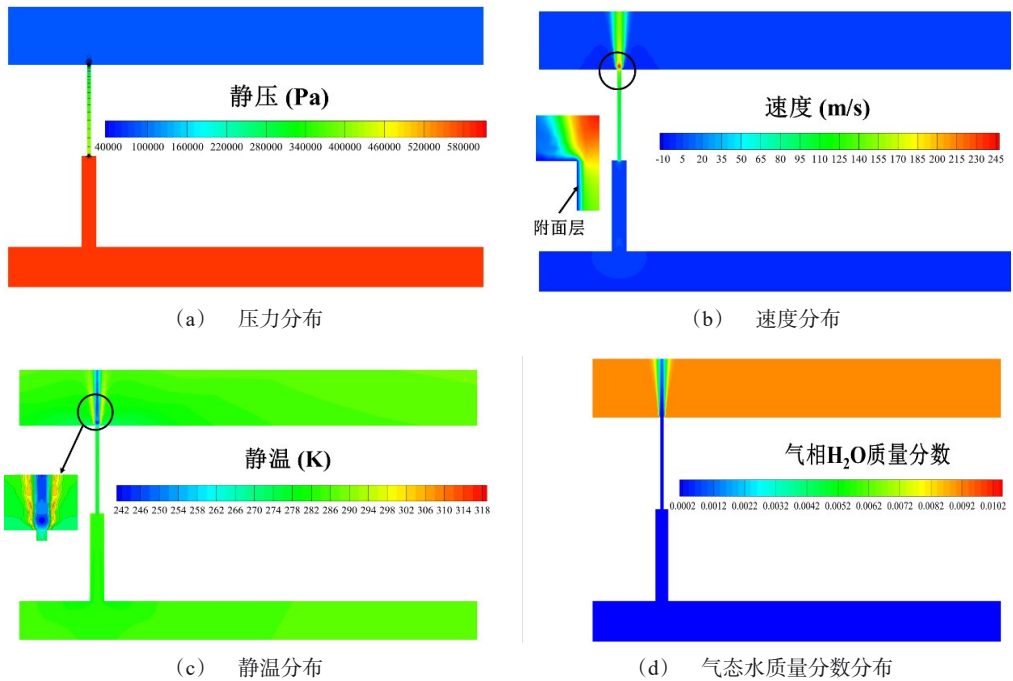


图 7 泄漏前期漏孔周围流场分布

Fig. 7 Flow field around the orifice at an early stage of leakage

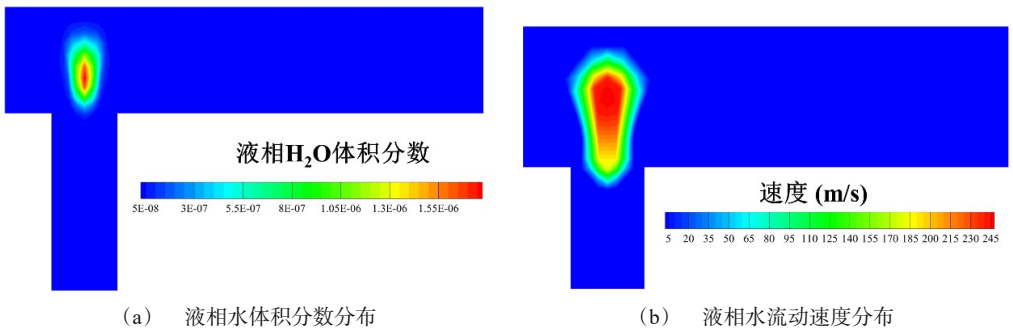


图 8 漏孔外侧水蒸气凝结现象

Fig. 8 Water vapor condensation phenomenon at the outside of the orifice

4个不同时刻下漏孔周围压力分布，速度分布及液态水体积分数分布见图9-11，从图9-11可以看出，当GIS罐体内压力下降至0.48 MPa时，羽流核心区域速度下降至190 m/s，压力梯度主要集中在漏孔直径最小处，相较图8(a)，此时漏孔

出口附近水蒸气凝结面积大幅增大，生成的液相水体积分数约为 1.6×10^{-6} 。随着泄漏进行，罐体内压力依次到达 0.45, 0.42, 0.40 MPa，随着压力的减小，压差逐渐扩展到整个竖直空间上。生成的液相水逐步向漏孔内部移动，在 0.42 MPa 时液相水进入大直径区域，在 0.4 MPa 时进入罐体内部。值得注意的是，液相水下移过程中其占据体积不断增大，但是最大体积分数在逐渐减小。

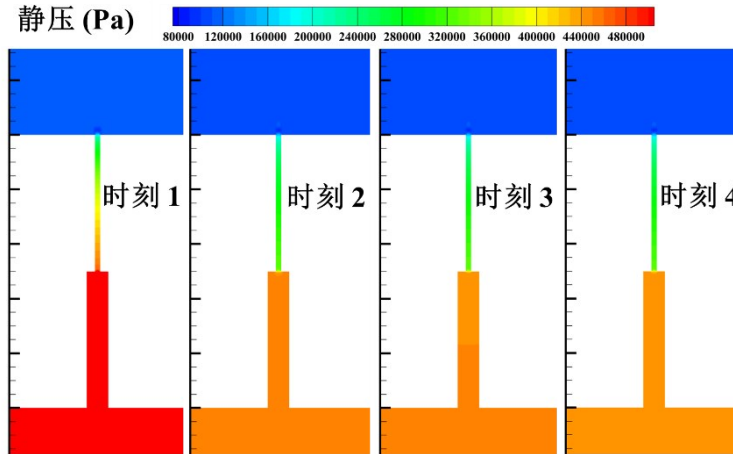


图 9 不同时刻漏孔附近压力分布

Fig. 9 Pressure distribution at different times

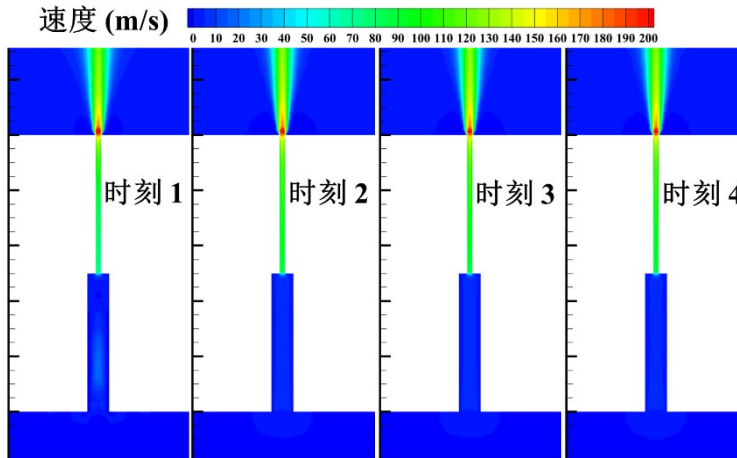


图 10 不同时刻漏孔附近速度分布

Fig. 10 Velocity distribution at different times

在罐体压力为 0.4 MPa 时刻计算获取了罐体壁面及轴线位置处水蒸气摩尔组分分布，见图 12，从图 12 可以看出在漏孔所在法兰头壁面上水蒸气摩尔组分最大达

到0.02，沿着罐体壁面从罐底到罐顶水蒸气摩尔组分呈指数上升趋势，显然在该工况下容易测出内部的水组分。值得注意的是，在实际GIS设备运行过程中，由于昼夜交替，漏孔外部空气湿度及温度周期性波动，内部微水增长现象更易发生。

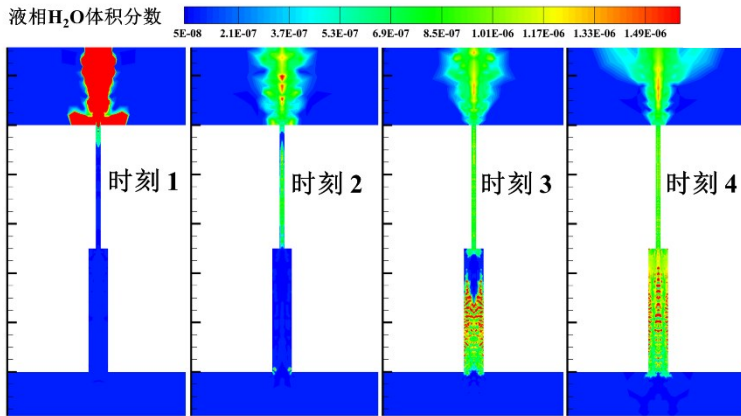


图 11 不同时刻漏孔附近液相水体积分数分布

Fig. 11 Distribution of liquid water volume fraction at different times

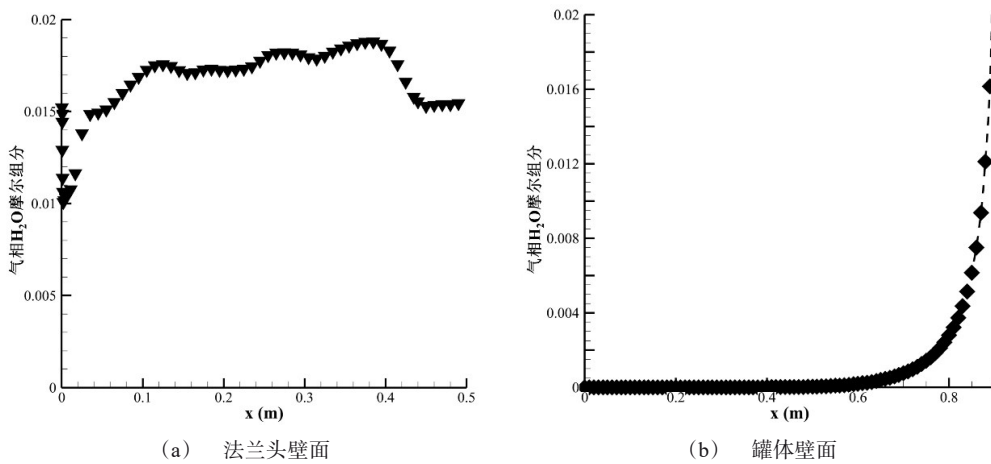


图 12 水组分在GIS罐体内的分布

Fig. 12 Distribution of H_2O mole fraction inside the GIS tank

4 结论

文中基于甘肃某电场内GIS设备在微小泄漏条件下出现内部微水增长的现象，开展了瞬态大时间跨度数值模拟研究。研究中建立了GIS罐体、泄漏通道及外部空气远场的数值模型，分析了不同漏孔规模下 SF_6 气体泄漏的流场特性，采用多相流

模型及多组分输运方法复现了微小泄漏条件下空气中水组分进入 GIS 罐体内部的具体过程及物理机理，研究过程中得到了如下结论：

1)GIS 设备 SF₆ 气体漏率为 500 μL/min 以下时，对应漏孔的当量直径在 0.02 mm 以下。漏孔附近气体泄漏会形成小范围的羽流，羽流周围气体静温显著下降，出现水蒸气冷凝现象，液相水在重力等多种作用下会发生迁移。

2)随着罐体内部气体压力逐渐减小，液相水从泄漏通道进入到罐体内部，文中案例中，液相水在 0.48 MPa 时刻开始进入漏孔，在 0.40 MPa 时刻进入到罐体内部。

3)进入 GIS 罐体内的水分主要富集在漏孔所在的壁面附近，昼夜温湿度交替会加剧该现象的发生。

需要指出的是，逆压梯度下水组分反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。本文的分析中只考虑了漏孔位于 GIS 设备正上方单一工况，明确了重力作用下 GIS 设备内微水增长的机理。在后续的研究中，需要进一步分析漏孔所在方位、漏孔结构形态以及漏孔壁面的表面属性等因素对 GIS 设备微水增长特性的影响，评估重力作用、毛细效应以及局部回流对水分增长现象的影响权重。

参考文献

- [1] 张 铎, 赵云学, 郑宇宏, 等. 1 100 kV GIS 用 SF₆ 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 SF₆ 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 SF₆ 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 SF₆ gas micro-water of GIS equipment of 110 kV badaling substation[J]. Electric Switcher, 2014, 52(1): 89-91.
- [3] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
LUO Xuechen. SF₆ gas insulated switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [4] 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.
- [5] 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 Nwe Energy, 2016(4): 1-3.
- [6] 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 isulated switchgear

- [J]. *Distribution & Utilization*, 2007, 24(4): 40-42.
- [7] 季严松, 王承玉, 杨韧, 等. SF₆气体分解产物检测技术及其在GIS设备故障诊断中的应用[J]. *高压电器*, 2011, 47(2): 100-103.
JI Yansong, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Measuring technique of SF₆ decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2011, 47(2): 100-103.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 ultra-violet radiation for generating ion[J]. *Modern Instruments*, 2005, 11(4): 56-58.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] WANG H L, SHEN J W. Quantitative Analysis for SF₆ and its Compositions in GIS[J]. Advanced Materials Research, 2010(562-564): 1336-1339.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 陈振生. GIS高压电器SF₆气体密度、湿度及泄漏检测技术[J]. 电气技术, 2007, 8(4): 16-20.
- CHEN Zhensheng. On line test technology for SF₆ gas density and humidity and leakage in GIS H.V electrical apparatus[J]. Electrical Engineering, 2007, 8(4): 16-20.
- [23] 龙爱平, 种芝艺, 张玮, 等. 高湿度地区GIS安装中SF₆气体水分控制[J]. 电力建设, 2010, 31(6): 44-46.
- LONG Aiping, CHONG Zhiyi, ZHANG Wei, et al. Control of SF₆ water content during GIS installation in high humidity area[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(6): 44-46.
- [24] 漆映荷. 低温表面微量水蒸气结霜理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- QI Yinghe. Study on frosting mechanisms of extra-low content water vapor on a cryogenic surface [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [25] BINDER R C. Fluid mechanics[M]. USA: Prentice-Hall, 1955.
- [26] INCROPERA F P. Fundamentals of heat and mass transfer - Fourth Edition[M]. 4th ed. Wiley, 1996.
- [27] YOUNG J B. The fundamental equations of gas-droplet multiphase flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(2): 175-191.

- [28] LEMON G, KING J R, BYRNE H M, et al. Mathematical modelling of engineered tissue growth using a multiphase porous flow mixture theory[J]. *Journal of Mathematical Biology*, 2006, 52(5): 571-594.
- [29] 杨婷婷, 杨景华. 基于Lee模型与VOF方法的ACC基管内凝结性能的比较与数值模拟[J]. *动力工程学报*, 2018, 38(12): 996-1003.
YANG Tingting, YANG Jinghua. Numerical comparison and investigation of condensation heat-transfer performance in ACC base tubes with lee model and VOF method[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, 38(12): 996-1003.
- [30] KEKAULA K, CHEN Y, MA Ting, et al. Numerical investigation of condensation in inclined tube air-cooled condensers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017(118): 418-429.
- [31] VYSKOCIL L, SCHMID J, MACEK J. CFD simulation of air - steam flow with condensation [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014(279): 147-157.
- [32] 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.
- [33] 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>.

作者简介

陈宏刚(1979—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事绝缘油气介质诊断分析方面的研究(E-mail: 526967284@qq.com)。

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)。