

泄漏孔径对特高压GIL管SF₆泄漏影响的混合数值模拟

肖国锋, 何娜萍

引用本文:

肖国锋, 何娜萍. 泄漏孔径对特高压GIL管SF₆泄漏影响的混合数值模拟[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 115-121.

XIAO Guofeng, HE Naping. Hybrid Numerical Simulation of the Influence on SF₆ Leakage of UHV GIL Pipe Under Different Leakage Pore Sizes[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 115-121.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[超临界工质布雷顿循环热力学分析](#)

Thermodynamic Analysis of Supercritical Working Fluid Brayton Cycle

南方能源建设. 2018, 5(3): 42-47 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.006>

[浅谈110kV全地下变电站主变压器的选型](#)

Introduction to the Selection of Transformer in 110 kV Fully Underground Substation

南方能源建设. 2018, 5(z1): 46-51 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.009>

[城市综合管廊标准段及其节点的设计要点探讨](#)

Design Discussion of Standard Subsection and Nodes of Urban Utility Tunnel

南方能源建设. 2017, 4(3): 80-84 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.015>

[空间管桁架在±1100 kV户内直流场中的应用研究](#)

Research and Application on Space Tubular Truss in ±1100 kV Indoor DC Hall

南方能源建设. 2018, 5(3): 83-88 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.013>

[各型式预制综合管廊的特点与关注问题探讨](#)

Technical Characteristics and Related Discussion of Different Precast Utility Tunnel Types

南方能源建设. 2017, 4(2): 81-85 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.014>

泄漏孔径对特高压GIL管SF₆泄漏影响的混合数值模拟

肖国锋[✉], 何娜萍

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 为了分析具有6 km跨度特高压GIL内SF₆泄漏气体的泄压过程及其扩散形态, 提出了一种一、三维混合CFD计算方法。利用1D Flowmaster研究具有不同孔径的泄漏口对SF₆泄压过程的影响。利用3D Fluent分析SF₆在管廊内的扩散形态、浓度分布。[方法] 为了验证混合数值方法的准确性, 对比了1D Flowmaster和3D Fluent对同一管廊结构SF₆泄压过程的计算结果。[结果] 仿真对比结果表明, Flowmaster模拟泄压过程具有计算速度快、精度高的特点。[结论] 结合通风设计要求, 获得基于泄漏孔径区间的轻度、中度、重度泄漏事故分类及对应扩散形态、浓度分布等重要数据, 可为实际应用设计、事故处理提供指导。

关键词: 盾构管廊; SF₆; 重气扩散; 数值模拟

中图分类号: TM7; TM75

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)01-0115-07

开放科学(资源服务)二维码:



Hybrid Numerical Simulation of the Influence on SF₆ Leakage of UHV GIL Pipe Under Different Leakage Pore Sizes

XIAO Guofeng[✉], HE Naping

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In order to analyze the pressure relief process and diffusion pattern of SF₆ leakage gas in a 6 km span in the UHV GIL, a type of 1D and 3D hybrid CFD numerical method is proposed. 1D Flowmaster was used to study the influence of different pore size of leakage port on SF₆ pressure relief process. 3D Fluent was used to analyze the concentration distribution and diffusion pattern of SF₆ in the pipe gallery. [Method] In order to verify the accuracy of the hybrid numerical method, the calculation results of 1D Flowmaster and 3D fluent for SF₆ pressure relief process of the same pipe gallery structure was compared. [Result] The compared simulation result showed that Flowmaster simulation of pressure relief process has the characteristic of fast calculation speed and high accuracy. [Conclusion] Combining with the requirement of ventilation design, the classification of light, medium and heavy leakage accidents based on the interval of leakage aperture, the corresponding diffusion form, concentration distribution and other important data are obtained, which can provide guidance for practical application design and accident handling.

Key words: shield pipe gallery; SF₆; heavy gas dispersion; numerical simulation

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

GIL是气体绝缘金属封闭输电线路^[1], 常采用SF₆气体绝缘。SF₆具有优越的气体绝缘特点^[2-3], 在电力系统气体绝缘保护中得到广泛使用。高浓度

SF₆气体能造成人员窒息等安全事故的发生, 若GIL管发生泄漏, 可能严重危害工作人员健康安全。

由于设计、制造及安装隐患均存在引发SF₆气体泄漏事故的可能性^[2], 因此, 盾构管廊中除考虑排除GIL发热所需的通风外, 通过研究SF₆管廊内泄漏扩散的特点, 设计合理的SF₆气体泄漏事故的

收稿日期: 2020-06-02 修回日期: 2020-08-27

基金项目: 中国能源建设集团众筹科技项目“GIL输电管廊工程关键设计技术研究子课题五一超高压及特高压GIL管廊通风系统研究”(ER04191W)

通风方案具有十分重要的意义。

由于GIL管存在泄漏风险,国、内外SF₆泄漏扩散研究成果也颇为丰富。然而,这些研究成果^[4-8]大都偏向于局部结构,对于具有千米级大跨度的实际盾构管廊结构,还亟待研究工作的加强,以提高工程应用价值。本文针对如图1所示,具有6 km尺度的特高压盾构管廊研究泄漏孔径大小对管廊内SF₆泄漏扩散过程影响。

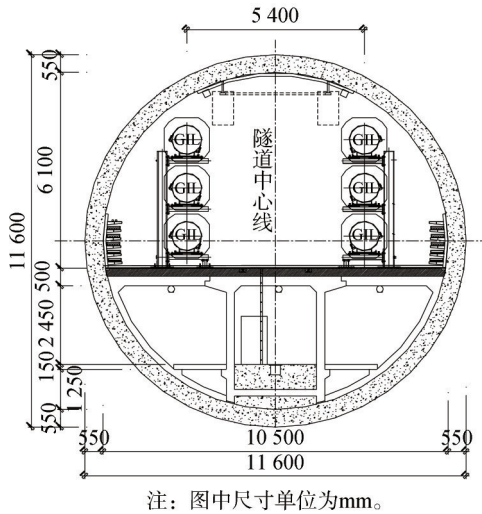


图1 特高压盾构GIL管廊截面图(长6 km)

Fig. 1 Cross section of GIL shield tunnel (6 km length)

1 SF₆泄漏扩散主要影响因素

用于表征泄漏口大小的物理量,目前工程中普遍采用孔径^[4]的概念,本文引用该定义。由于GIL管内充注高压的SF₆,其工作压力基本介于0.4~0.5 MPa,本文设计中确定为0.5 MPa。因此,具有初始压力的SF₆在泄漏口内、外压差的推动下,在泄漏位置边界处,将GIL管内SF₆的压能迅速转化为动能,获得速度并在自身流动物性影响下,在管廊内进行快速扩散。扩散受到管廊内部结构及通风条件的影响,并在通风条件影响下逐步向下游扩散,最终排出管廊。总的来看,泄露气体在管廊内的扩散过程受泄漏源性质、泄漏源初始压力、泄漏量、有限空间内风速风向、障碍物等的影响^[3]。

2 数值计算模型

2.1 基本假设

为模拟SF₆从GIL管泄漏口泄漏到空气过程及扩散过程,作如下计算假设:

1) SF₆与空气的混合物为理想气体,符合理想气体方程。

2) SF₆泄漏速度由初始压力、泄漏孔径决定,过程中SF₆不与管廊内中的气体发生化学反应。

3) SF₆在泄漏过程中为湍流流动状态。

2.2 控制方程

对于本文所研究的SF₆在空气中的扩散流动问题,其遵循的主要物理规律为质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律及组分守恒定律。这四个规律相应的控制方程如下所示:

1) 连续性方程

质量守恒定律为单位时间内,流体微元体表面流入质量的总和等于微元体质量的增量,由此可得式(1)流体连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度(kg/m³); t 为时间(s); u, v, w 为速度矢量 V 在 x, y, z 方向上的分量(m/s)。

2) 动量方程

动量守恒定律为单位时间内流体微元体动量的变化率为该微元体所受外界力之和,式(2)为动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (uV) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (vV) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (wV) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (2)$$

式中: P 为压力(N/m²); τ 为粘性应力(kg/m·s); F 为体积力(N/m³)。

3) 能量方程

能量守恒定律为单位时间内,流体微元体能量增量等于进入微元体的热流量加上体积力和表面对流体微元体所做的功,式(3)为能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho VT) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (3)$$

式中: c_p 为比热容[J/(kg·K)]; T 为温度(K); k 为传热系数[W/(m²·K)]; S_T 为粘性耗散(W)。

4) 组分方程

组分守恒定律为单位时间系统内某化学组分质量变化等于该组分通过系统表面的净流量及化学反应产生的该组分质量之和。由于本文所研究内容不包含气体之间的化学反应, 因此忽略化学反应一项。式 (4) 为组分 s 的组分方程:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_s V) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中: c_s 代表组分 s 的体积密度 (kg/m^3); D_s 为扩散系数 (m^2/s)。

2.3 边界条件

结合本文研究对象的特点及物理过程, 计算中对模型的边界采取如下类型进行设置:

- 1) 管廊壁面采用 wall 边界。
- 2) 管廊进、出口采用速度或压力边界。
- 3) 管廊内空气设置温度、速度边界条件。
- 4) SF₆ 泄漏源采用初始压力或速度边界。

3 SF₆ 泄漏一、三维数值模拟对比

一维 (1D) CFD 模拟具有计算速度快的特点, 但对详细内部结构流动特性缺乏详细解析; 三维 (3D) CFD 模拟具有内部流动特性解析精度高, 但对于大跨度盾构管廊存在计算相对耗时的缺点。为能够实现具有千米级大跨度的特高压盾构管廊 SF₆ 的扩散模拟, 结合 SF₆ 扩散的时域特点, 1D+3D CFD 耦合模拟的思想将被采用, 即对于泄漏口附近复杂扩散区域进行详细 Fluent 模拟^[9-11], 而对于扩散形态稳定后, 随通风条件向下游推进段采用 Flowmaster 来模拟, 实现通过 1D+3D CFD 耦合分析手段达到 6 km 大跨度尺度下整体管廊 SF₆ 扩散模拟目的。为此, 对图 1 所示特高压盾构管廊结构计算对比 Flowmaster 和 Fluent 在管廊压降和泄漏源泄压过程之间的相对误差 (如表 1 所示)。

3.1 压力平衡时间计算对比

利用 Flowmaster 元件库相关元件并设置表 1~表 3 对应边界条件, 获得图 2 所示 Flowmaster 1D 流动计算模型。如图 3 所示, 利用三维 CAD 建模并完成网格剖分, 设置相同边界条件, 获得图 3 所示 Flu-

ent 3D 流动计算模型。

表 1 SF₆ 泄漏气体 t=0 时刻状态
Tab. 1 State of SF₆ leakage gas at t=0

方法	初压/MPa	体积/m ³	泄漏孔径/m
1D Flowmaster	0.5	54	0.5
3D Fluent	0.5	54	0.5

表 2 盾构管廊气体 t=0 时刻状态
Tab. 2 Gas state in the UHV shield tunnel at t=0

方法	初压/MPa	管廊直径/m	管廊长度/m
1D Flowmaster	0.1	10	300
3D Fluent	0.1	10	300

表 3 盾构管廊流阻计算对比参数设置
Tab. 3 Parameters setting for flow resistance calculation and comparison

方法	风温/°C	风速/(m·s ⁻¹)	风压/MPa
1D Flowmaster	35	5	0.1
3D Fluent	35	5	0.1

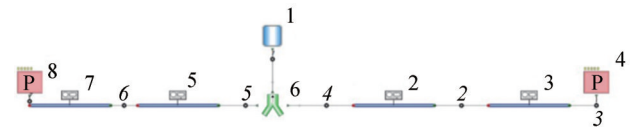


图 2 Flowmaster 计算模型
Fig. 2 Flowmaster calculation model

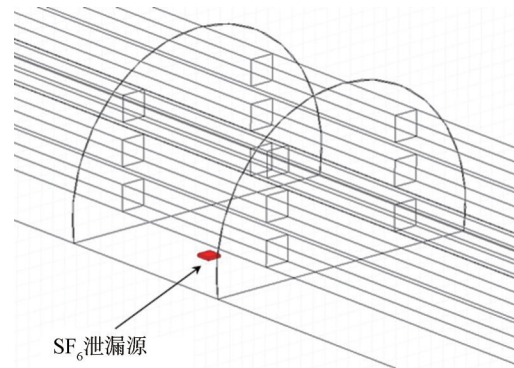


图 3 Fluent 计算模型
Fig. 3 Fluent calculation model

分别对图 2 和图 3 模型完成计算, 获得如图 4 所示泄漏口出口压力随时间变化结果。计算结果表明, 对于盾构管廊采用相同边界设置条件下, Flowmaster 和 Fluent 获得计算结果高度一致。SF₆ 泄漏源大气压力平衡时间计算对于管廊 SF₆ 泄漏事故处理十分重要: 较小的泄漏孔径将对应较长的自然泄漏排放时间。Flowmaster 完成模型单次计算所需

时间为分钟级别, Fluent模型完成单次计算所需时间为小时级别, 计算速度二者差别约为200倍。因此, 充分利用Flowmaster的计算高效性, 可快速获得不同泄漏孔径条件下的SF₆泄漏源大气压力平衡时间。

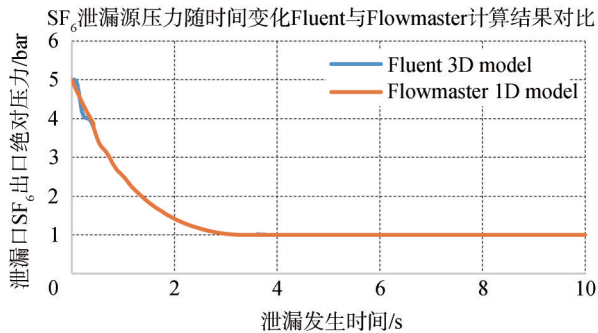


图4 泄漏源压力随时间变化计算对比

Fig. 4 Calculation and comparison when leakage source pressure varies with time

3.2 管廊流阻特性计算对比

分别对上述模型建立表3边界条件, 当管廊壁面粗糙度为3 mm, 风速为5 m/s条件下, Fluent计算获得管廊上层结构6 km等效压降为708 Pa; Flowmaster计算获得管廊上层结构6 km等效压降为732 Pa, 两者相对误差为3.28%。

计算结果表明, 无论对于泄压时间还是管压降计算, Flowmaster和Fluent对于具有统计意义的参数能够获得较为一致的计算结果。更进一步, 对于大跨度盾构管廊泄漏模拟, 采用1D+3D耦合分析模型在耦合界面处具有良好的压力、质量流量耦合条件, 具备满足1D+3D耦合分析的完备条件。

4 SF₆泄漏区域压力平衡时间

泄漏事故发生并触发报警后, 管廊随即转入泄漏事故待处理状态。对于泄漏事故报警设置、人员逃生及维护维修, 问题归结为实际已发生泄漏量、管廊内SF₆浓度分布以及剩余泄漏气体量^[12]。

此外, 对于具体已经投入运营的管廊, 泄漏扩散存在较大的不确定性, 在于实际发生的泄漏口面积未知。以下通过Flowmaster软件, 给出泄漏口不同孔径下, SF₆压力平衡时间的计算结果。表4结果建立在表1~表2的计算假设之上, 仅对泄漏孔径进行改变, 由此获得不同泄漏孔径下泄漏源压力平衡所需时间。

表4 不同泄漏孔径下SF₆压力平衡时间表

Tab. 4 Table of SF₆ pressure balance time under different leakage pore sizes

泄漏孔径/m	泄漏口等效面积/m ²	大气平衡所需时间/s
0.5	0.196 349 541	2.73
0.25	0.049 087 385	17.09
0.125	0.012 271 846	102.71
0.062 5	0.003 067 962	667.91
0.031 25	0.000 766 99	4 486.4
0.015 625	0.000 191 748	31 053.2

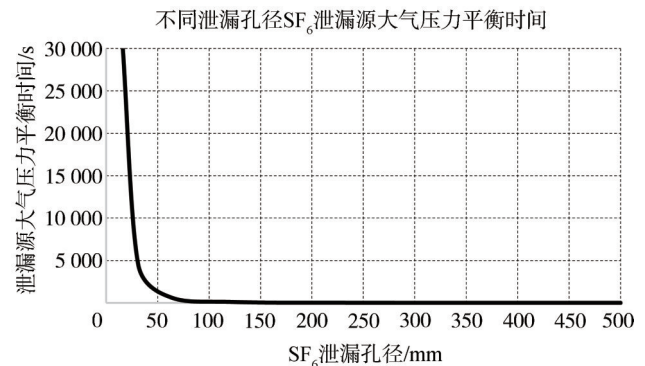


图5 不同泄漏孔径下泄漏源大气平衡所需时间

Fig. 5 Time required for atmospheric balance of leakage source under different leakage pore sizes

图5所示的计算结果表明, 当泄漏孔径小于15 mm时, 泄漏区域达到大气压力平衡所需时间将超过8.6 h。当泄漏孔径较小时, 压力平衡时间过长, 可能导致无法获得计算结果。因此, 计算从泄漏开始到1 000 s的压力值。

改变泄漏孔径进行, 计算泄漏发生1 000 s后SF₆泄漏源出口的压力值, 如表5所示。泄漏发生1 000 s后, 当泄漏孔径小于一定数值, 泄漏源出口压力几乎保持不变。

如图6和图7分别为泄漏孔径0~500 mm和0~100 mm范围内, 泄漏发生1 000 s后SF₆泄漏源出口的绝对压力情况。图6~图7计算结果表明, 当泄漏孔径大于62.5 mm时, 1 000 s后SF₆泄漏源取得大气平衡结果, 由于重力作用, GIL管内SF₆将不再排放到管廊内。当泄漏孔径小于5.5 mm时, 1 000 s后, SF₆泄漏源出口压力几乎保持不变。当泄漏孔径介于5.5~62.5 mm范围时, 泄漏发生1 000 s后, SF₆泄漏源出口压力随泄漏孔径增大而迅速降低。

综合上述分析结果, 可得出如下基本结论:

表 5 不同泄漏孔径下 1 000 s 后 SF₆ 绝对压力
Tab. 5 SF₆ absolute pressure after 1 000 s under different leakage pore sizes

泄漏孔径/m	泄漏口等效面积/m ²	1 000 s 后压力/bar
0. 500	0. 196 349 541	1. 00
0. 250	0. 049 087 385	1. 00
0. 125	0. 012 271 846	1. 00
0. 062 5	0. 003 067 962	1. 00
0. 05	0. 001 963 495	1. 18
0. 031 25	0. 000 766 99	3. 07
0. 015 625	0. 000 191 748	4. 65
0. 007 812 5	4. 793 69 E-05	4. 95
0. 005 468 75	2. 348 91 E-05	5. 00

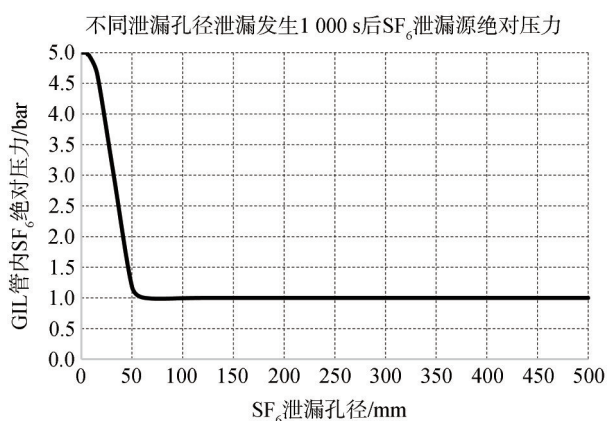


图 6 0~500 mm 泄漏孔径 1 000 s 后泄漏源绝对压力
Fig. 6 Absolut pressure of leakage source after 1 000 s during which the leakage pore size remains within the range 0~500 mm

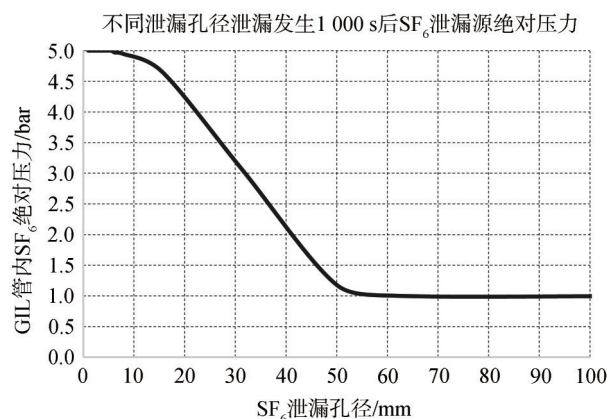


图 7 0~100 mm 泄漏孔径 1 000 s 后泄漏源绝对压力
Fig. 7 Absolut pressure of leakage source after 1 000 s oduring which the leakage pore size remains within the range 0~100 mm

1) 当泄漏孔径不大于 5.5 mm 时, 泄漏区域内已泄漏的 SF₆ 体积量十分有限, 泄漏区域气体自然排出时间到年级别。

2) 当泄漏孔径不小于 62.5 mm 时, 在 17 s 内泄漏区域达到大气平衡, 即理论上不再有泄漏气体排出到管廊内。

3) 当泄漏孔径介于 5.5 ~62.5 mm 范围时, SF₆ 泄漏源压力平衡时间对泄漏孔径十分敏感。

以上结果, 对于 SF₆ 泄漏发生后, 泄漏口处理对 GIL 管更换及修复具有十分重要的技术意义。当泄漏口初始孔径大于 5.5 mm 时, 通过将泄漏孔径处理到 62.5 mm 以上, 能够实现快速抢修目标。

5 SF₆ 泄漏扩散形态模拟

利用 Flowmaster 软件可获得泄漏出口质量流量随时间变化结果, 并利用 Fluent UDF 功能作为 Fluent 计算入口边界条件。其他技术条件如表 6~表 7 所示:

表 6 泄漏工况泄漏源 t=0 时刻状态
Tab. 6 SF₆ leakage source state in working condition with leakage, at t=0

方法	初压/MPa	泄漏体积/m ³	泄漏孔径/m
3D Fluent	0. 5	54	0. 125

表 7 泄漏工况管廊气体 t=0 时刻状态
Tab. 7 Gas state in the UHV shield tunnel, at t=0

方法	初压/MPa	管廊直径/m	管廊长度/m
3D Fluent	0. 1	10	300

5.1 静止空气条件下 SF₆ 泄漏扩散模拟

实际泄漏报警装置触发报警后, 特高压盾构管廊上部通风装置关闭后, SF₆ 在管廊上部顺着风速方向继续向前推动的物理条件被关闭, 这更利于管廊下部结构侧吸、排出系统的工作效率发挥。因此, 对该条件下 SF₆ 扩散形态进行模拟。计算中管廊风速取值为 0 m/s, 其他条件见表 6~表 7。

图 8~图 9 计算结果表明, 对于 SF₆ 重质气体, 在流动扩散过程中, 扩散形态会受到障碍物影响。同时, 在静止空气中, SF₆ 扩散过程受大密度影响, 呈现整体底部堆积, 并向四周快速扩散形态。因此, 建议 SF₆ 报警装置布置于管廊底部。

5.2 5 m/s 通风条件下 SF₆ 泄漏扩散模拟

计算假设管廊上腔通风系统设计始终保持开启, 上腔平均风速取值为 5 m/s, 其他计算条件见表 6~表 7。图 10~图 11 计算表明, 当管廊风速达到 5 m/s 时, SF₆ 泄漏后将在管廊上部沿风速向管廊下

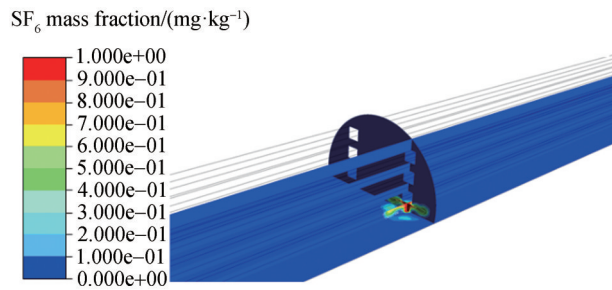


图8 空气静止下泄漏 $t=1.0$ s 管廊 SF_6 浓度分布/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Fig. 8 SF_6 concentration distribution in the UHV shield tunnel at $t = 1.0$ s and 0 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ventilation speed

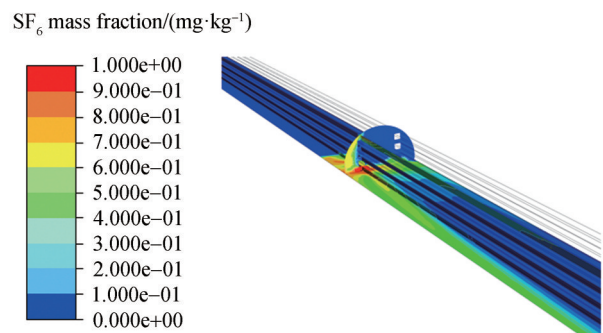


图11 泄漏 $t=110.0$ s 管廊 SF_6 浓度分布/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Fig. 11 SF_6 concentration distribution in the UHV shield tunnel at $t=110.0$ s and 5 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ventilation speed

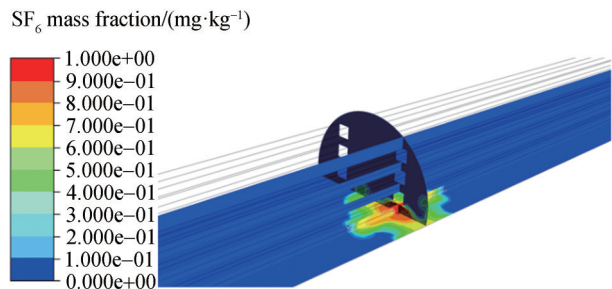


图9 空气静止下泄漏 $t=4.0$ s 管廊 SF_6 浓度分布/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Fig. 9 SF_6 concentration distribution in the UHV shield tunnel at $t = 4.0$ s and 0 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ventilation speed

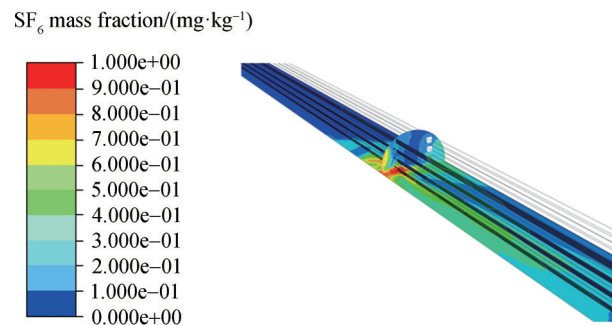


图10 泄漏 $t=10.0$ s 管廊 SF_6 浓度分布/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Fig. 10 SF_6 concentration distribution in the UHV shield tunnel at $t = 10.0$ s and 5 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ventilation speed

游迅速扩散。此外,针对泄漏孔径为5.5 mm条件进行了最低平均风速设计优化。结果表明,当廊内平均通风风速大于3.5 m/s时,管廊内由于 SF_6 单位时间内泄漏量极少,廊内除泄漏出口位置外,其余任意位置的 SF_6 浓度始终低于1 000 ppm。因此,当泄漏孔径不大于5.5 mm,且廊内通风风速不低于3.5 m/s时,可考虑自然排风处理泄漏。

6 SF_6 泄漏事故工况基本分类

考虑到 SF_6 气体存在工程允许的自然微漏,即

在该条件下,通过正常排风实现 SF_6 泄漏气体排出,同时满足不触发泄漏报警,实现轻微泄漏条件免维护的设计要求。考虑到实际 SF_6 泄漏口存在不确定性,因此应对泄漏事故可能存在的恶性程度进行基本分类,并建立起相应的设计准则。由于尚未有针对该问题的明确分类定义,本文给出可供后续共同探讨的分类思路如下:

1) 轻度泄漏工况:泄漏孔径不大于5.5 mm时,当廊内平均风速不低于3.5 m/s时,无需额外考虑 SF_6 吸收通风设计、并满足不触发泄漏报警装置条件。

2) 中度泄漏工况:泄漏孔径介于5.5~62.5 mm,泄漏报警后,采取 SF_6 强制性侧吸、下层风机排风处理;10 min内,并设计合理条件,确保距离 SF_6 泄漏点位置前、后150 m范围以外区域内, SF_6 浓度降低至1 000 ppm安全限值内;60 min后,距离 SF_6 泄漏点前、后150 m范围内, SF_6 浓度降低至1 000 ppm安全限值内,管廊内报警装置完全解除报警。

3) 重度泄漏工况:泄漏孔径大于62.5 mm时,泄漏报警装置报警后,采取 SF_6 强制性下层侧吸、排风处理;10 min内,管廊内 SF_6 浓度降至1 000 ppm安全限值内,管廊内报警装置完全解除报警。

上述准则的建立考虑了泄漏孔径、 SF_6 工作压力、管廊大气压力、安全逃生时间及泄漏事故处理时间等基本因素。

7 结论

盾构管廊内特高压GIL管采用 SF_6 作为绝缘性保护气体,存在可能发生的泄漏安全事故。 SF_6 泄漏扩散时间受初始工作压力、灌注气体量、不同泄

漏孔径的影响。SF₆在管廊内的扩散形态受SF₆重质气体特性、泄漏孔径、工作压力、管廊结构及通风条件的影响。泄漏孔径作为关键不确定因素之一对泄漏事故程度定级、泄漏报警安全监控、逃生方案设计、泄漏事故处理涉及到的SF₆气体吸收、排放方式有重要影响。当泄漏孔径不大于5.5 mm为轻度泄漏事故,当廊内平均风速不低于3.5 m/s时,可采取自然通风进行排放,进入免维护条件。当泄漏孔径介于5.5~62.5 mm时为中度泄漏事故,若要求泄漏发生数小时内,取得廊内SF₆浓度低于1 000 ppm的条件,应采取气体快速吸收、排放通风设计方案的同时,采取合理的事故后期处理方式,明确危险工作区域。当泄漏孔径大于62.5 mm时为重度泄漏事故,为人体安全逃生设计带来巨大挑战,若要求泄漏发生后,将非安全距离(SF₆浓度>1 000 ppm)控制在距离泄漏点前、后150 m范围内,且数分钟后管廊内SF₆浓度即低于1 000 ppm条件时,应考虑SF₆气体快速吸收、排放通风设计方案。

参考文献:

- [1] 尚涛,李果. 气体绝缘输电线路的特点及其应用[J]. 南方电网技术,2011,5(1):81-84.
SHANG T, LI G. Discussion on the characteristics of GIL and its application in power systems [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 81-84.
- [2] 郭程. GIS运行中的SF₆气体管理与泄露处理[J]. 电气时代, 2008(1): 98-101.
GUO C. Management and leakage handling of SF₆ gas in operation of gas insulated switchgear [J]. Electric Age, 2008(1): 98-101.
- [3] 赵柳. 浅谈110 kV全地下变电站主变压器的选型[J]. 南方能源建设, 2018, 5(增刊1): 46-51.
ZHAO L. Introduction to the selection of transformer in 110 kV fully underground substation [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(Supp. 1): 46-51.
- [4] 王治华. 受限空间内气体扩散的数值模拟及分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
WANG Z H. The numerical study on diffusion of gases in limited space [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [5] 丁慧心. 地下水电站出线竖井中SF₆泄露扩散的数值模拟分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
DING H X. Line well of underground hydropower station experimental and numerical simulation analysis of SF₆ leakage diffusion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [6] 丁慧心,肖益民,周铁成. 地下水电站出线竖井中SF₆泄露扩散的数值模拟分析[J]. 制冷与空调(四川), 2016, 30(6): 623-629.
DING H X, XIAO Y M, ZHOU T C. Numerical simulation analysis of SF₆ diffuses in the shaft of underground hydropower station [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2016, 30(6): 623-629.
- [7] 马尚权,吴姗姗,王科迪. 基于FLUENT的SF₆气体扩散数值模拟[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017(9): 6-9+15.
MA S Q, WU S S, WANG K D. Numerical simulation of SF₆ gas diffusion based on FLUENT [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2017(9): 6-9+15.
- [8] NIELSEN P V. Computational fluid dynamics and room air movement [J]. Indoor Air, 2004, 14: 134-143.
- [9] 魏利军. 重气扩散过程的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2000.
WEI L J. Numerical simulation of heavy gas dispersion [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2000.
- [10] JACOBSEN B F. 3D numerical simulation of heavy gas dispersion [J]. Journal of Hazardous materials, 1987, 16(11): 215-230.
- [11] BLACKMORE D R, HERMAN M N, WOODWARD J L. Heavy gas dispersion models [J]. Journal of Hazardous Materials, 1982, 6(82): 107-128.
- [12] 冯志华, 聂百胜. 危险气体泄漏扩散的实验方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2006(7): 18-23+2.
FENG Z H, NIE B S. Experimental methodology for study diffusion of leaked hazardous gas [J]. China Safety Science Journal, 2006(7): 18-23+2.

作者简介:



肖国锋

肖国锋 (通信作者)

1981-, 男, 湖南桃江人, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力工程暖通设计 (e-mail) xiaoguofeng@gedi.com.cn。

何娜萍

1990-, 女, 瑶族, 湖南郴州人, 硕士, 工程师, 主要从事电力工程暖通设计 (e-mail) henaping@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)