

Leakage Simulation of SF₆ Gas Insulating Equipment Based on CFD and Protective Measure

Yipeng Wang¹, Dingding Liang², Lei Shi², Feng Wang¹

¹National Foundation Research Laboratory of Fault Prevention and Control in Hazardous Chemicals Production System, Beijing University of Chemical Technology, Beijing

²State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing

Email: *buct_wangyp@163.com

Received: May 22nd, 2017; accepted: Jun. 11th, 2017; published: Jun. 14th, 2017

Abstract

Due to the leakproofness of underground substation, once the SF₆ gas in the electrical equipment of the underground substation leaks, the electrical equipment will cause operation troubles and workers will be suffocated. In view of this, reasonable assumption and simplified analysis were first made based on underground substation and the leakage process. Then, based on the $k - \epsilon$ turbulence modeling, the CFD software was adopted to simulate the diffusion of gas leakage in the room. According to the results of the simulation, this paper chooses the appropriate protective equipment combined with the industry regulations. The results show that gas leakage occurs in the main transformer room, near the ground and leakage of gas concentration is high in 5 minutes, and workers need to wear the mask of positive pressure air and the airtight protective clothing to ensure safety. This study will provide a reference to ensure the equipment work properly and repair personnel safety.

Keywords

SF₆ Leakage, Diffusion; CFD, Protective Measure

基于CFD的SF₆气体绝缘设备泄漏模拟及防护措施

王一鹏¹, 梁丁丁¹, 石磊², 王峰^{1*}

¹北京化工大学国家危险化学品生产系统故障预防与监控基础研究实验室, 北京

²国家电网北京市电力公司北京电力科学研究院, 北京

*通讯作者。

Email: *buct_wangyp@163.com

收稿日期: 2017年5月22日; 录用日期: 2017年6月11日; 发布日期: 2017年6月14日

摘要

由于地下变电站的密闭性,变电站内的电气设备中的 SF_6 气体一旦发生泄漏,易造成电力设备的运行故障,并导致抢修人员窒息。通过对某地下变电站主变室内气体泄漏过程进行合理假设和简化分析,以三维湍流模型为基础,采用FLUENT软件对室内 SF_6 气体泄漏扩散进行数值模拟,并根据模拟结果结合行业法规选择合适的防护设备。结果表明,主变室内发生气体泄漏,在报警5分钟内地面及泄漏口附近浓度较高,通过穿戴正压供气式面罩及气体致密型化学防护服,可以有效保护检修人员的生命安全。该研究结果可为设备正常运行及维护检修人员的生命安全提供参考。

关键词

SF_6 泄漏, 扩散, 数值模拟, 防护措施

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

SF_6 气体绝缘设备在运行中存在诸多安全隐患,由于设计、制造和安装过程中可能存在的质量问题易引发 SF_6 气体泄漏事故[1]。一旦发生泄漏事故,一方面, SF_6 气体泄漏降低了设备的绝缘和灭弧能力,影响设备安全运行;另一方面,泄漏的 SF_6 气体包含有毒分解产物,不仅对设备运行维护人员的人身安全构成威胁,也对环境造成难以估量的破坏[2]。因此,本文将对在突发气体泄漏情况下,对主变室房间内浓度分布进行分析,计算出泄漏影响区域,并提出相应的防护措施。目前对于危化品泄漏危害影响的研究方法主要有实验研究和数值模拟。国外学者进行了具有代表性的泄漏扩散试验如 Burro [3]等,国内学者张建[4]研制了大型二氧化碳管道泄漏实验装置,罗勇等[5]搭建了泄漏及气体扩散测试实验系统来计算泄漏速率。但由于现场试验安全问题且周期长、耗资多,往往很难开展,因此成本低、耗时短以及可重复的数值模拟成为气体泄漏扩散研究中运用最广泛的方法。CFD 技术即计算流体力学技术,利用 CFD 建立研究对象的计算模型,分析研究模型中流体的动力学和热力学特征,它已广泛应用于模拟危险气体的流动和扩散。M. Siddiqui 等[6]利用 CFD 软件模拟了氯气在工业设备存储室中的泄漏扩散情况,并根据室内浓度变化规律优化气体传感器的位置。张甫仁等[7]采用 CFD 软件对建筑物群外空间天然气连续泄漏源的扩散进行了数值模拟,对比分析了环境温度、湿度对天然气扩散的影响及浓度场的变化规律。

本文以某地下变电站的主变室为研究对象,利用 Fluent 软件对变电设备泄漏产生的 SF_6 扩散进行数值模拟。首先对主变室进行实体建模,然后对设备的泄漏扩散进行瞬态模拟。对 SF_6 气体泄漏后的扩散形态进行分析,观察危险浓度的扩散范围,并根据模拟结果讨论在救援修护时该佩戴的防护设备,对含 SF_6 气体变压器的变电站的应急预案、事故预防提供理论依据。

2. SF_6 泄漏模拟理论模型的建立

泄漏扩散过程的 CFD 模拟评估是在描述泄漏扩散过程的各种数学模型的基础上进行的,包括连续方

程、动量方程、能量方程，而且在气体的泄漏扩散过程属于湍流流动，采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型可以更好的描述流动过程[8] [9]。

2.1. 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中： ρ ——流体混合物的密度；

t ——时间；

u_i ——流体速度， u_i 分别为 x, y, z 轴方向的速度分量。

2.2. 动量方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

式中， P ——绝对压力；

μ ——流体的湍流粘度；

g_i —— x, y, z 轴方向的重力加速度分量。

2.3. 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (3)$$

式中， k ——流体传热系数；

T ——绝对温度；

S_T ——粘性耗散。

2.4. 湍流流动模型

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中， ε ——耗散率；

G_k ——平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项；

G_b ——浮力引起的湍动能产生；

Y_m ——可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率影响；

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —— k 方程和 ε 方程的湍流数，取 1.0 和 1.3；

$C_{1\varepsilon} = 1.44$ ； $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ； $C_\mu = 0.09$ 。

3. 模拟算例

3.1. 研究对象

以某地下变电站内的 1 号主变室为研究对象，房间内含有变压器一台，换热器一台，还有电缆及管

道等配件，在换热器下方有一个气体回收出口。四周及顶部都是密闭墙面，空气湿度为 45%，环境温度为 25℃，变压器操作压力为 0.15 Mpa。

3.2. 模型建立及网格划分

在建模过程中，为使模型既能反映室内的实际流动状况，又能使生成的网格在允许的求解范围内，本文建立主变室内部的简化模型，其中将主变机箱的附件及小管道删除。主变室房间的尺寸为高度 7.5 m，宽度 8 m，长度 10 m，其他包括主变压器的尺寸、散热器的尺寸及主连接管道的尺寸均由现场测量获得。

选定连接管道上某处阀门出现故障，产生 SF₆ 气体的大量泄漏，泄漏口简化为直径为 0.1 m 的圆形泄漏口。在泄漏口附近，由于流体运动紊乱，流速较大且梯度变化明显，需要对网格进行加密。而相应的出口与邻近的壁面也需要采用较密的网格。根据建立的主变室内模型的几何特征，对其计算区域采用 Hex/Wedge 网格保证整体网格的质量。该模型总网格数量为 2,134,000，可以保证较高的求解精度。计算区域网格如图 1 所示。

3.3. 模拟参数及边界条件的设置

计算采用瞬态计算，选用组分输运模型，湍流模型选择标准模型，假定 SF₆ 流动为不可压缩流动，采用有限体积法建立离散方程，PISO 算法对控制方程组进行求解。

边界条件：气体泄漏口为质量入口边界，方向垂直于出口面；门口和地面回收口为压力出口；设备及室内地面、墙面等设置为固壁边界。

4. 模拟结果及应用

4.1. 模拟分析

按照《DL/T 639-1997 SF₆ 电气设备运行、试验及检修人员安全防护细则》及《GBZ 2-2002 工作场所有害因素职业接触限制》规定空气中 SF₆ 气体不应高于 1000 ppm，氧气含量不应低于 18% [10] [11] [12]。如果气体浓度超标，电气设备检修人员无法进入变电站主变室中，对相应故障进行快速有效的处理。因此本文以 SF₆ 浓度为 1000 ppm 及以上作为最大浓度显示，观察应急响应时间 5 min 内主变室内的浓度影响范围，图 2 是主变室内气体浓度变化云图。并在泄漏口下方地面处设置浓度监测点，观察该位置浓度变化，浓度变化曲线见图 3。

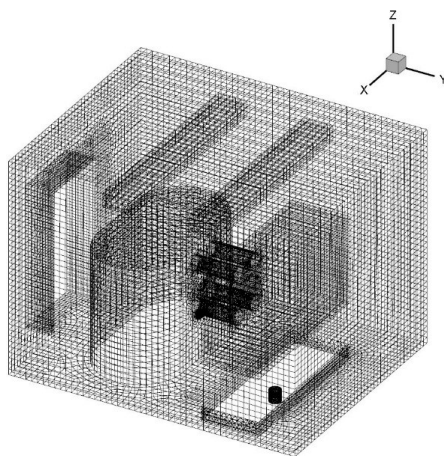


Figure 1. Computing mesh
图 1. 计算域网格

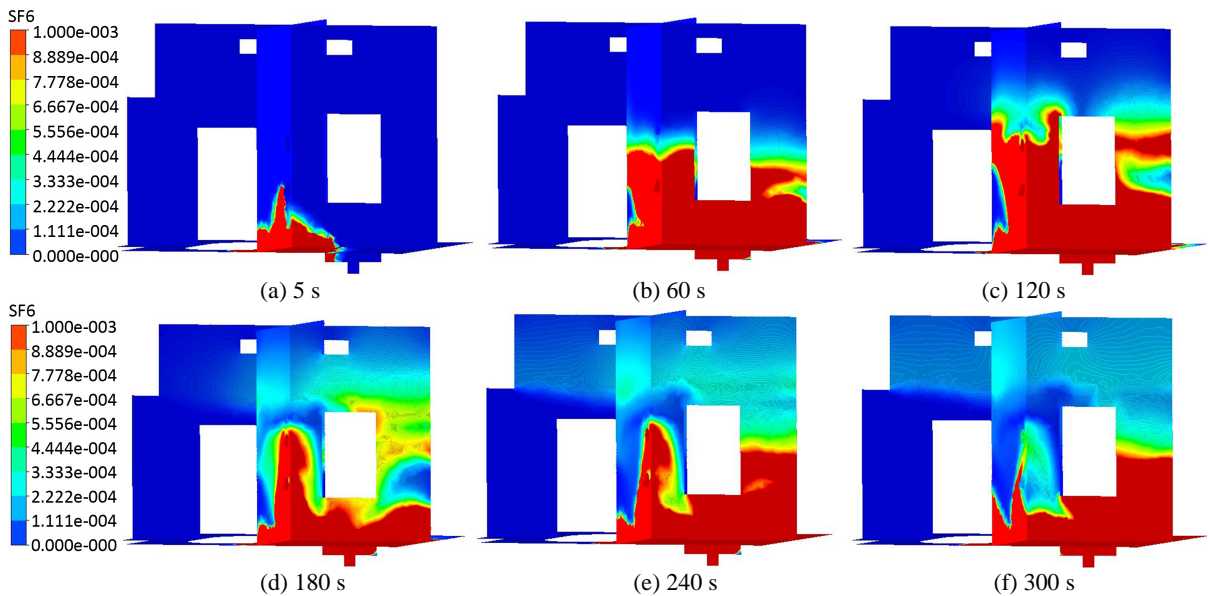


Figure 2. The variation of concentration of SF₆ at underground substation

图 2. 主变室内 SF₆ 浓度随时间变化

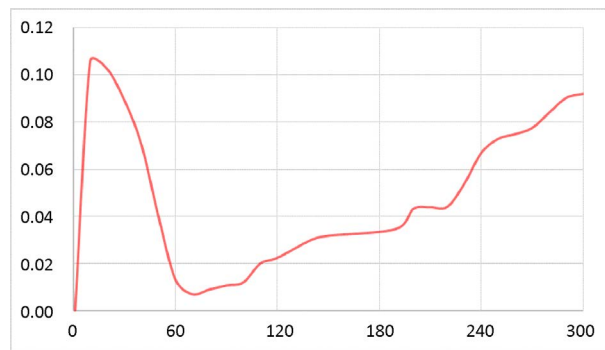


Figure 3. The variation of concentration of SF₆ below leakage source on the ground

图 3. 泄漏口下方地面位置处 SF₆ 浓度随时间变化曲线

结果分析: $t = 5 \text{ s}$ 时, 泄漏口附近区域气体浓度较高, 一方面是泄漏量大, 泄漏速度快; 另一方面是 SF₆ 属于重气, 一旦泄漏会逐渐向地面堆积扩散, 监测点处浓度迅速达到 10%。因此在地面位置处安装检测报警装置非常必要。

$t = 60 \text{ s}$ 时, 随着泄漏继续进行, 一部分气体流出了地面的回收口, 一部分气体由于气流扰动作用和分子扩散作用, 泄漏点上方的少量区域的浓度开始升高。监测点处浓度有一个回落, 是由于气体在接触地面后开始向四周扩散。

$t = 120 \text{ s}$ 到 $t = 240 \text{ s}$ 时, 由于室内各障碍物的影响, 气体浓度会出现区域性堆积, 导致某些区域在较短时间内会出现浓度攀升。但随着时间的进行, 气体的扩散由于密度作用会自然向下扩散, 逐渐达到平衡状态。监测点处浓度也由于气体密度作用开始逐步升高。

$t = 300 \text{ s}$ 时, 室内气体浓度分布逐渐达到平衡, 监测点处浓度趋于稳定, 在 10% 左右。高浓度区域主要分布在泄漏点下方, 主要由于其自身重力使其向地面沉降堆积, 从而使浓度的分布呈现出垂直地面向上而成递减分布的规律。整个主变室内, 最高浓度在泄漏口附近, 利用 FLUENT 软件可以查看到气体浓度约为 30%。

Table 1. Protection factor of protective equipment
表 1. 防护用品制定防护系数

呼吸防护用品类型	面罩类型	正压式	负压式
自吸过滤式	半面罩	不适用	10
	全面罩		100
送风过滤式	半面罩	50	
	全面罩	200-1000	
	开放性头罩	25	不适用
	送气头罩	200-1000	
供气式	半面罩	50	10
	全面罩	1000	100
	开放性头罩	25	不适用
	送气头罩	1000	
携气式	半面罩	>1000	10
	全面罩		100

4.2. 模拟分析

主变室内安装有气体检测装置，一旦检测到 SF₆ 的浓度超过 1000 ppm，就会立刻启动报警装置。抢修人员会迅速穿戴呼吸防护设备及化学防护服进行应急响应。本文以数值模拟的结果为理论基础，结合相关法律法规提出人员防护措施的选取。

呼吸防护设备的选用应该严格遵循 GB/T 18664-2002《呼吸防护用品的选择、使用及维护》标准。标准中通过比较物质危害因数、防护用品指定防护因数来选取合适的呼吸防护用品。防护用品指定防护系数如表 1 所示。危害因数即空气污染物浓度与国家职业卫生标准规定的浓度限值的比值，取整数。具体表达式为：

$$\text{危害因数} = \frac{\text{空气污染物浓度}}{\text{国家职业卫生规定标准浓度}} \quad (6)$$

上文中由模拟计算得知，在应急响应时间内，室内最高浓度为 30%，带入公式(6)可以计算得到危害因数。查询表 1，查看防护用品指定防护因数大于 300 的防护用品，因此可选用正压供气式全面罩防护设备或者正压式送风过滤全面罩防护设备。

$$\text{危害因数} = \frac{\text{空气污染物浓度}}{\text{国家职业卫生规定标准浓度}} = \frac{300000}{1000} = 300 \quad (7)$$

现以正压供气式全面罩防护设备为例，由公式(6)可以得预计暴露浓度为 300 ppm，在面罩尺寸合适的情况下，预计暴露浓度小于国家职业卫生标准规定浓度，因此正压供气式全面罩防护设备是合适的。化学防护服的选用标准严格遵循 AQT 6107/2008《化学防护服的使用、选择和维护》标准[13]，根据本文模拟工况对应“化学气体泄漏事故处理”，因此应选用气体致密型化学防护服。

5. 结论

本文基于 CFD 的方法对地下变电站内的主变电压室进行了数值模拟，以流体力学的基本理论为基础，

建立了室内主变设备泄漏扩散的理论模型，研究了 SF_6 气体从泄漏到扩散的演变过程，得到了室内气体浓度的空间分布。并根据模拟结果，结合相关法律法规，选择了合适的防护设备，为维修人员进行设备抢修时的安全防护提供了理论依据。进而可以有效避免环境污染和人员伤害，而且可以很好的确保设备的正常运行以及维护检修人员的人身健康安全。

基金项目

国家电网北京市电力公司项目(H2015331)；北京市重点学科项目(21510028008)；中国石油天然气股份有限公司项目(H2016042)；中国工程院咨询项目(2016-XZ-08)。

参考文献 (References)

- [1] 金长德. 六氟化硫气体泄漏事故分析[J]. 安全, 2008, 29(4): 26-27.
- [2] 杜学超, 成保, 白亚礼. 六氟化硫开关类设备现场检修安全技术管理[J]. 机械研究与应用, 2008, 21(6): 142-144.
- [3] 庄学强. 大型液化天然气储罐泄漏扩散数值模拟[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [4] 张建. 工业规模 CO_2 管道泄漏试验装置设计与安装[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [5] 罗勇, 张扬. 输气管道小孔泄漏压力响应实验与仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014(2): 11-15.
- [6] Siddiqui, M., Jayanti, S. and Swaminathan, T. (2012) CFD Analysis of Dense Gas Dispersion in Indoor Environment for Risk Assessment and Risk Mitigation. *Journal of Hazardous Materials*, **209**, 177-185.
- [7] 张甫仁, 杨佳玲, 阚正武, 等. 建筑群外空间城市燃气泄漏扩散浓度场模拟[J]. 天然气工业, 2013, 33(4): 114-119.
- [8] 马健, 房春花. 风速对储油罐气体扩散影响的 CFD 模拟方法研究[J]. 广东化工, 2012, 39(17): 18-19.
- [9] 李俊杰, 李奇, 姜巍巍. 基于 CFD 的大型原油储罐火灾风险评估[J]. 安全, 健康和环境, 2008, 8(9): 30-32.
- [10] 吕琳, 杨璇. 职业病危害评价中个体防护措施评价实践与探讨[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2011, 29(10): 795-796.
- [11] 卜新宇. 六氟化硫电气设备运行, 试验及检修人员的安全防护[C]//中国电机工程学会. 中国城市供电学术年会论文集. 泰安: 中国电机工程学会, 2010.
- [12] 中华人民共和国卫生部发布. 工作场所有害因素职业接触限值[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
- [13] 何晴芳. 化学防护服的选择使用维护[J]. 劳动保护, 2015(3): 97-99.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jsst@hanspub.org