

# 基于鲁地拉水电站主变室的 SF<sub>6</sub> 泄漏特性研究

李安桂, 黎宇伟, 张莹, 王龙涛

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**以六氟化硫作为研究气体,以鲁地拉水电站主变室为参考对象制作试验台,通过小室试验分析了受限空间内六氟化硫在自然填充状态下不同泄漏量及不同泄漏位置时的浓度变化及分布规律,研究表明:当泄漏点位置在体源上表面中心时,受限空间内六氟化硫浓度随时间的变化过程可分为两个阶段:快速上升阶段和缓慢上升阶段,且泄漏量越大,近地面处的六氟化硫浓度越高,分层特性越明显;当泄漏点位于体源上表面,但是偏离中心点时,受限空间内两侧的六氟化硫浓度值会相差较大,靠近泄漏口的一侧浓度较高,而远离泄漏口的一侧浓度较低;当泄漏位置位于体源侧边时,受限空间内的六氟化硫浓度分布会呈现底层浓度高,扩散高度低的特点,且泄漏位置越低,底层的浓度越高。

**关键词:**重气扩散;模型试验;六氟化硫;受限空间

中图分类号:U455.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2019)02-0268-07

## Study on the leakage characteristics of SF<sub>6</sub> based on main transformer room of Ludila Hydropower Station

LI Angui, LI Yuwei, ZHANG Ying, WANG Longtao

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Using SF<sub>6</sub> as research gas, the test bench was made with the main transformer room of Ludila Hydropower Station as the reference object. The concentration variation and distribution of SF<sub>6</sub> in confined space under different leakage amount and different leakage positions in natural filling state are analyzed, and the experimental results show that When the leak point is located at the center of the upper surface of the body source, the concentration variation of SF<sub>6</sub> in the confined space can be divided into two stages; the fast rising phase and the slow rising phase, and the larger the leakage, The higher the concentration of SF<sub>6</sub> near the ground, the more obvious the stratification characteristics; When the leak point is located on the upper surface of the body source, but the deviation from the center point, the concentration of SF<sub>6</sub> on both sides of the confined space will be different, the concentration near the leak port is higher, and the side far from the leak port is lower; When the leakage position is located on the side of the body source, the concentration distribution of SF<sub>6</sub> in the confined space will be characterized by high concentration of the bottom layer and low diffusion height, and the lower the leakage position, the higher the concentration of the bottom layer.

**Key words:** heavy gas dispersion; model test; SF<sub>6</sub>; confined space

六氟化硫(SF<sub>6</sub>)是惰性气体的一种,具有较高的电气绝缘强度,常温下其绝缘能力约为空气的 2.5 倍,灭弧能力约为空气的 100 倍,因而被广泛的应用于各种供配电设备中作为绝缘材料使用<sup>[1-2]</sup>。但是其可能会因为设备的老化以及操作不当等原因而发生泄漏,一旦该气体泄漏或逸散到环境中,便会在负浮力的作用下往空间下部运动沉积<sup>[3]</sup>,大大增加工作区的有害气体浓度,如果不及时处理,则会对车间内设备的安全运行甚至是工作人员的健康造成严重的侵害<sup>[4]</sup>,六氟化硫为高密度气体,属于重气的一种,对于该类气体的扩散,国内外学者进行了一定的研究, Mauricio Chavez 等<sup>[5]</sup>利

用风洞试验对六氟化硫在建筑群中的扩散进行了研究,结果发现周围环境对重气污染物羽流的运动有较大的影响; J. M. Santos 等<sup>[6]</sup>通过现场试验的方法分析了房间窗户开闭状态和通风方式对室外重气污染物进入室内的影响程度,结果表明开窗和机械通风会明显的增加室外污染物进入室内的速度;王志荣等<sup>[7]</sup>通过数值模拟研究了受限空间中二氧化碳的扩散规律,得到了泄漏量、室内风速和障碍物等对该类气体扩散的影响;秦颂等<sup>[8]</sup>通过可视化研究,分析了在清水中注入盐水以模拟重气泄漏扩散的可行性;刑冀<sup>[9]</sup>等通过缩尺试验分析了二氧化碳的井喷现象,并将试验结果和数值

收稿日期:2018-03-19

修改稿日期:2019-03-11

基金项目:中国博士后科学基金(2015M582626);陕西省教育厅科学研究计划项目(16JK1431)

第一作者:李安桂(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事建筑通风空调及建筑节能研究. E-mail: liag@xauat.edu.cn

模拟数据进行对比, 发现数值模拟可较好的还原重气扩散现象.

虽然上诉学者对重气的扩散进行了一定的研究, 但是对于水电站主变室等地下受限空间中的六氟化硫重气泄漏扩散行为, 目前的研究则相对较少<sup>[10-12]</sup>, 而在这些受限空间中, 六氟化硫等重气污染物扩散运动的影响因素较多, 作用机制尚不明确, 工作区污染物浓度及分布规律无从判断, 基于该目的, 本课题参考了鲁地拉水电站主变室结构搭建了试验台, 对非封闭状态下受限空间中的六氟化硫在不同泄漏量、不同泄漏位置时其内浓度的变化及扩散特性进行了试验研究.

1 试验设计与测试

1.1 试验台介绍

如图 1, 本试验台长度为 1.1 m, 宽度为 1 m, 高为 1.23 m, 在试验台内部中心设置有长为 0.5 m, 宽为 0.4 m, 高为 0.5 m 的体源(六氟化硫储存容器), 模型两侧设有四个自然通风风口, 其中下风口宽 0.1 m, 高 0.08 m, 风口下边缘距地 0.02 m, 上风口宽 0.08 m, 高 0.05 m, 风口下边缘距地 0.4 m, 所有风口垂直中心线距相邻墙水平距离 0.15 m 远. 在试验台墙面四周预留有 42 个圆

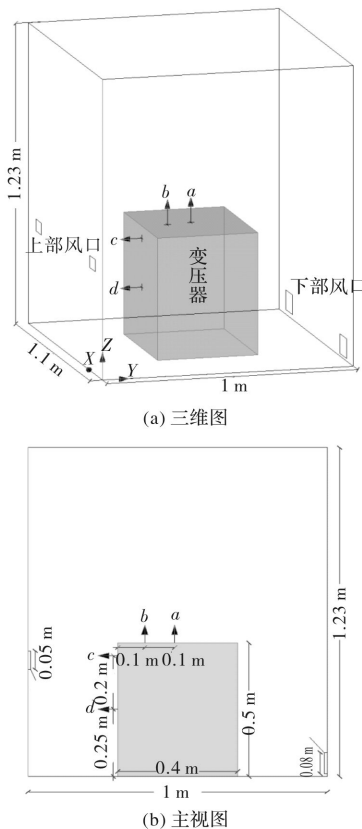


图 1 试验台构造  
Fig. 1 Test-bed structure

形小孔, 用来作为气体检测仪探头的入口, 体源上设置有四个泄漏口, 其中 *a* 泄漏口位于体源上表面中心, 位置为(0.55, 0.5, 0.5), *b* 泄漏口距 *a* 和 *c* 泄漏口水平距离 0.1 m 远, 位置为(0.55, 0.4, 0.5), *c* 泄漏口和 *d* 泄漏口位于体源的侧面, 位置分别为(0.55, 0.3, 0.45)和(0.55, 0.3, 0.25).

1.2 实验模型及测点分布

图 2 为试验台测点分布图, 为充分对整个模型中气体变化情况进行监控, 考虑到试验台的左右对称性, 在其内设有 A~G 共七纵排测点, 其中 A、B、C 三排测点位于 *Y*=0.15 m 处, D 排测点位于 *Y*=0.5 m 处, E、F、G 三排测点位于 *Y*=0.85 m 处, 字母下角标阿拉伯数字 1~6 代表测点的高度, A1~G1 代表 *Z*=0.055 m 高度处的一系列测点, A2~G2 代表 *Z*=0.15 m 高度处的一系列

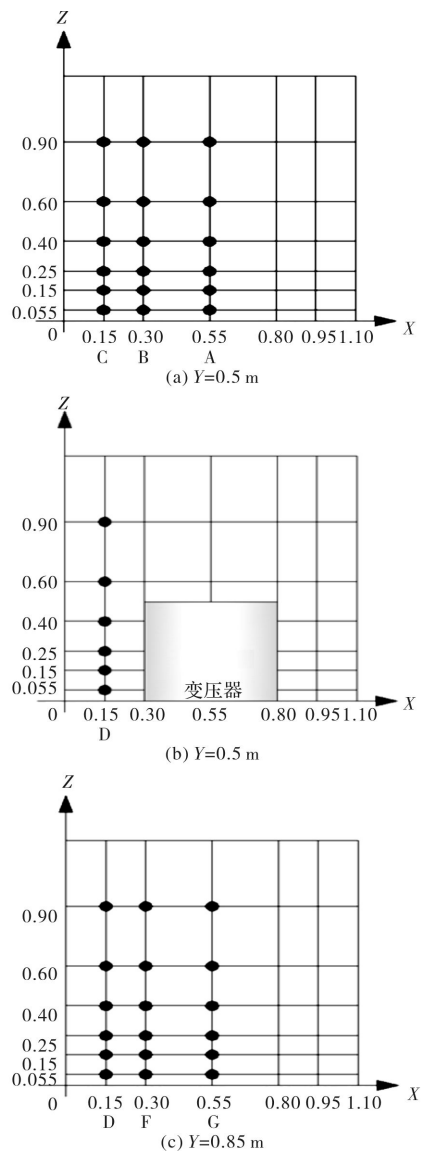


图 2 主变室各断面测点分布图  
Fig. 2 Schematic diagram of transversal surfaces measuring points

测点,以此类推,纵向六排测点高度分别为:0.055 m、0.15 m、0.25 m、0.4 m、0.6 m和0.9 m.

### 1.3 工况设置

本次试验共设置六个工况如表1,其中工况1~3为不同泄漏量工况,泄漏位置为体源上部面的中心,即点a位置,工况3~6为不同泄漏位置工况,泄漏位置分别为a、b、c、d,工况5和工况6为不同六氟化硫泄漏点高度对受限空间中六氟化硫浓度分布的对比工况,考虑到泄漏时间过长会造成试验台内六氟化硫浓度过高,超出测试仪器量程,因此本次测试泄漏时间统一选择为10 min.

表1 工况表  
Tab. 1 Test table

| 工况  | 泄漏量/ $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$ | 泄漏位置 | 泄漏时间/min |
|-----|--|------|----------|
| 工况1 | 25                                     | a    | 10       |
| 工况2 | 15                                     | a    | 10       |
| 工况3 | 10                                     | a    | 10       |
| 工况4 | 10                                     | b    | 10       |
| 工况5 | 10                                     | c    | 10       |
| 工况6 | 10                                     | d    | 10       |

## 2 结果分析

### 2.1 不同泄漏量对主变室六氟化硫扩散的影响

本次实验在主变室中布置了多个测点,对比同一高度7个测点,发现它们上升的速率及能够达到的浓度虽然不同,但是相差不大,因此,同一高度的一个测点几乎可以反映出该高度的六氟化硫浓度变化特性,为此,本文选取了纵向不同高度的三个测点进行了分析,如图3为模型中高度分别为0.055 m、0.15 m和0.25 m高度处的测点A1、A3、A5浓度随时间变化情况.

从图3(a)中可以看出,对比25 ml/min泄漏工况和15 ml/min泄漏工况,在A1测点处,其六氟化硫浓度在初始250 s前都开始急剧的上升,但是到250 s之后,浓度差距开始拉大,虽然泄漏还在进行,但是15 ml/min泄漏工况时该测点浓度并不会继续增大或者只是极其缓慢的增加,同时,25 ml/min泄漏工况到大约450 s时才开始增速减缓,而10 ml/min泄漏工况则是一直处于极其缓慢的增加过程,这说明,对于非封闭状态下主变室中 $\text{SF}_6$ 的自然扩散,其浓度随时间的变化可分为快速上升阶段和缓慢上升阶段两个过程,这和Siddiqui等<sup>[5]</sup>所研究的工业厂房中氯气的泄漏扩散

过程类似,在快速上升阶段, $\text{SF}_6$ 浓度会在短时间内急剧的上升到一定浓度,之后增速逐渐放缓,进入缓慢上升阶段,而且,通过对不同泄漏量工况的对比可发现,泄漏量越大,到达缓慢上升阶段所需要的时间则越长.

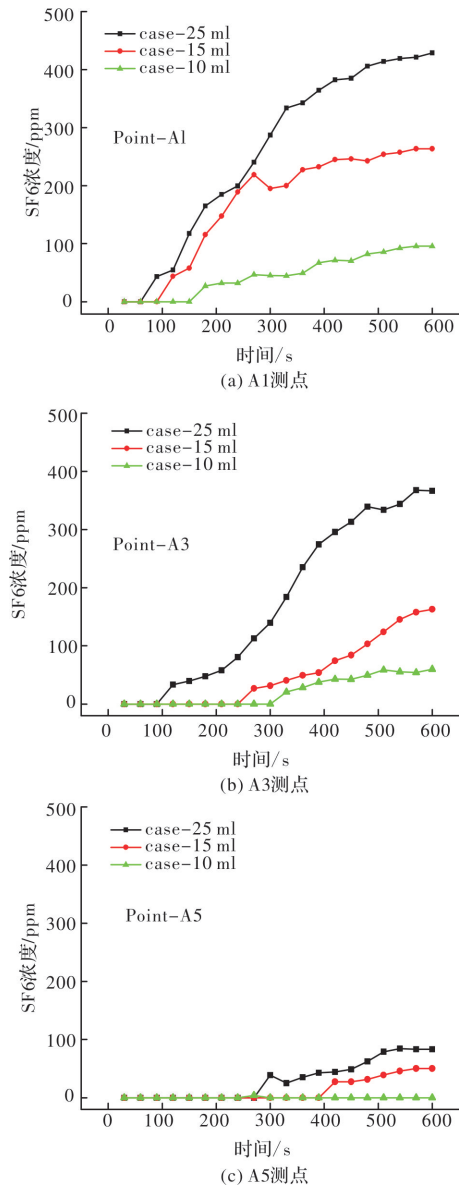
图3(b)为模型中 $Z=0.25$  m高度处的浓度随时间变化关系,在该高度处,其浓度随时间的变化同样符合快速增长阶段和缓慢上升阶段两个过程,而且对比图(a), (b)可发现,在泄漏发生600 s后,从点A1高度处到点A3高度处,25 ml/min泄漏量时浓度从约430 ppm减小为370 ppm,衰减度为14%,15 ml/min工况衰减度为44%,而10 ml/min工况的衰减度也为44%,这说明,泄漏量越大,不仅会导致地面的 $\text{SF}_6$ 浓度越高,而且浓度分层特性也不一样,泄漏量越大,六氟化硫气体在主变室底部的沉降堆积效应越明显<sup>[14]</sup>,主变室地面的高浓度区域也就越厚.

图3(c)为模型中 $Z=0.6$  m高度处的浓度随时间变化情况,由图可知,在该高度层,10 ml/min泄漏量工况时的六氟化硫浓度为0 ppm,而其他泄漏量工况的浓度也偏低,这是因为 $\text{SF}_6$ 高密度气体在泄漏后会因为负浮力的作用而堆积沉降,不易扩散到高处<sup>[13]</sup>,因而导致主变室高层区域六氟化硫浓度偏低,且泄漏量越小,底层的六氟化硫堆积量越小,因此所能扩散到主变室高层的六氟化硫也越少<sup>[15]</sup>.

图4为不同工况时不同高度六氟化硫最大浓度分布图,从中可知,当泄漏量为25 ml/min时, $Z=0\sim0.25$  m区域都是高浓度区域,而0.25 m以上区域浓度相对较低,其他两组低泄漏量工况,则是随着高度的变化,逐渐的发生衰减,这和之前分析点浓度时的结论一致,即泄漏量越大,整个主变室底层浓度越高,六氟化硫堆积沉降现象越明显,浓度分层也越明显,对工作区人员的危害越大.在图4(a)中,底层浓度沿A~G测点方向浓度明显的发生了横向衰减,而在其他层则各测点浓度相近,图4(b)和4(c)中,底层浓度同样发生了一定程度的衰减,但是中高层却没有衰减,这说明,主变室的六氟化硫在自然扩散状态,下部排风口的存在会对该侧的 $\text{SF}_6$ 具有一定的排出效果,但是对高层的 $\text{SF}_6$ 浓度,则几乎没有影响<sup>[13]</sup>,而且泄漏量越大,排出六氟化硫的量也越大,主变室不同侧浓度差越明显.

### 2.2 不同泄漏位置对主变室六氟化硫扩散的影响

图5为b泄漏点时主变室中A、D、G三纵排

图3 不同泄露量时SF<sub>6</sub>浓度随时间变化图Fig. 3 Variation of SF<sub>6</sub> concentration with time at the different leakage

测点六氟化硫浓度变化情况,因为泄漏点靠近A排测点,所以点A1浓度比其他测点浓度要高,最大浓度达到225 ppm,为相同高度G1测点浓度的4倍,可见,虽然泄漏点只偏移了一个单位,但是使得相同高度的不同点最大浓度相差达到了数倍,因此,当泄漏位置为主变室的上端面时,泄漏点越靠近主变室的边缘,其导致的主变室局部浓度越大<sup>[16]</sup>,因此对工作区人员的威胁也越大。

图6为b泄漏点时不同高度的六氟化硫最大浓度分布图,从该图中可以直观的看出,在该工况下, $Z=0.055$  m高度处,测点A1处为高浓度点,B1、C1、D1三排测点处为次高浓度区域,而E1、F1、G1三排测点处为低浓度区域,因此,分析可知,当泄漏点为点b时,会造成主变室底部的六氟

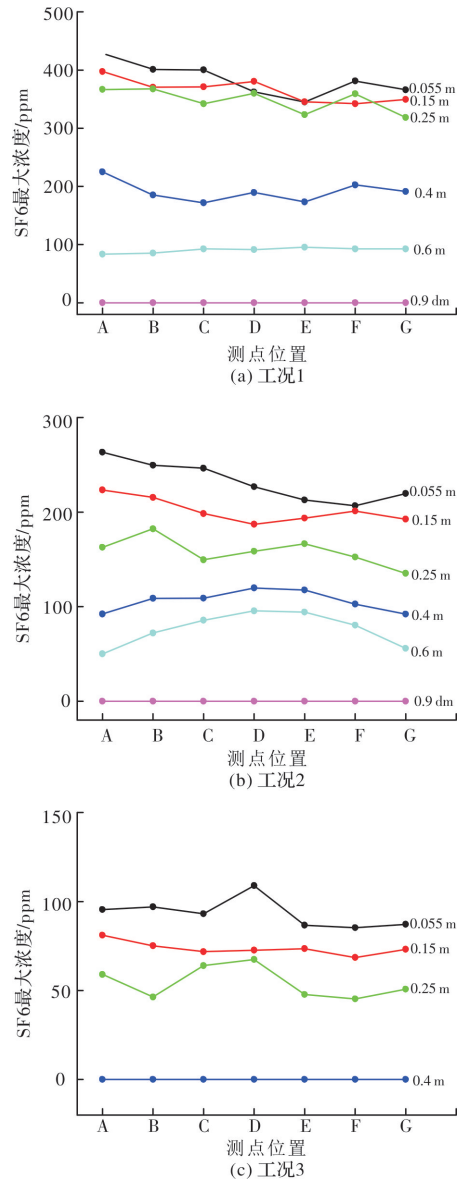


图4 不同工况时不同高度最大浓度分布图

Fig. 4 SF<sub>6</sub> maximum concentration at different heights under different condition

化硫浓度分布不均,靠近泄漏点的一侧为高浓度区域,而远离泄漏点一侧为低浓度区域,此外,在 $Z=0.055$  m高度以上区域,同样会有这一现象的存在,但是浓度差远小于主变室底部。

图7为c泄漏点时模型内部分测点浓度变化情况,该工况为体源上的侧泄漏工况,由图可知,当受限空间内发生侧泄漏时,其内浓度分布规律为:底层浓度高,扩散高度低,在 $Z=0.055$  m高度处,其浓度变化会一直处于快速上升阶段,短时间内便可达到危险浓度点,对近地面处工作人员造成巨大的安全风险<sup>[17]</sup>,同时,对比各个测点处六氟化硫重气到达的时间可知,虽然这些测点距泄漏点距离不相同,但是重气云团到达这些测点的时间却接近,这是因为当体源上发生侧泄漏

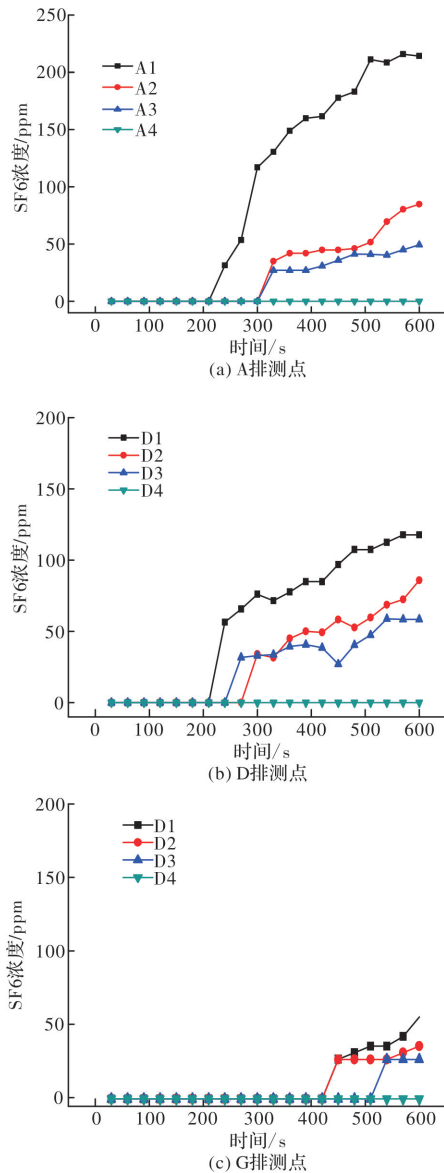
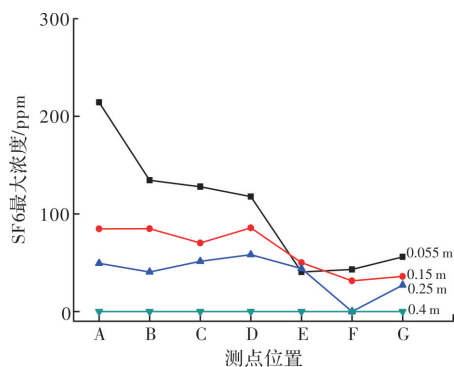
图5 工况4时SF<sub>6</sub>浓度随时间变化图Fig. 5 variation of SF<sub>6</sub> concentration with time under working condition 4

图6 工况4时不同高度最大浓度分布图

Fig. 6 SF<sub>6</sub> maximum concentration at different heights under working condition 4

时,落到地面的六氟化硫重气云团会快速的向低浓度区域运动,在极短的时间内便可在受限空间

底层各区域聚集大量的六氟化硫气体<sup>[18]</sup>,从这一层面而言,也可说明受限空间中体源上的测泄漏所造成的危害要远比在其他位置上发生泄漏的危害要大,同时,A2~G2所处的0.15 m高层处,六氟化硫浓度相对要低很多,同时增速也相对较平缓,大部分时间都处于低浓度区域。

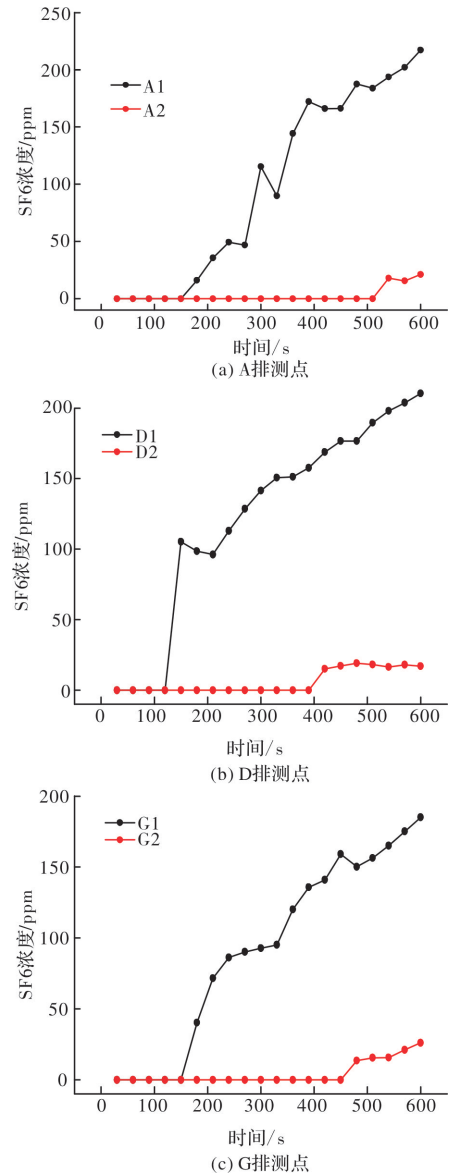
图7 工况5时SF<sub>6</sub>浓度随时间变化图Fig. 7 variation of SF<sub>6</sub> concentration with time under working condition 4

图8为泄漏点为点c时各高度层最大浓度分布也即泄漏后600 s时的浓度分布情况,从图中可以更直观的看出,当发生侧泄漏时,整个空间各区域的浓度分布都符合底层浓度高,扩散高度低这一特性.从图中同样可以看出,在0.055 m高度处,从A1到G1测点沿线,六氟化硫浓度同样发生了明显的衰减,而高度为0.15 m的A2~G2沿线浓度却相差不大,这和前面分析的结论是相一

致的,即空间内六氟化硫浓度越高,下部风口排出重气污染物的效果越明显,但下部风口对空间中较高层区域六氟化硫浓度的影响相对较小。

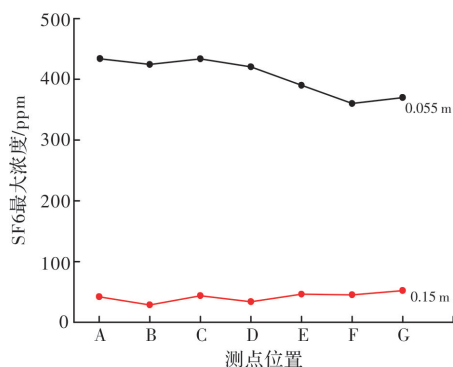


图8 工况5不同高度最大浓度分布图

Fig. 8 SF<sub>6</sub> maximum concentration at different heights under working condition 5

### 2.3 不同泄漏高度对主变室六氟化硫扩散的影响

图9为不同泄漏高度时点A1、A2浓度随时间的变化情况,从图中可以看出,当泄漏高度为 $Z=0.25\text{m}$ 时,SF<sub>6</sub>重气云团到达A1和A2测点的时间都要早于泄漏高度为 $Z=0.45\text{m}$ 的工况,且两个测点的浓度明显都要高于泄漏高度为 $Z=0.45\text{m}$ 时的浓度,这说明,随着泄漏高度的增加,泄漏点以下的区域浓度将减小,这是因为SF<sub>6</sub>重气泄漏后会迅速的在地面沉降堆积,泄漏源越高,则重气云团撞击地面的速度越大,因而逸散到空气中的六氟化硫也越多,导致泄漏点以下空间的浓度相对较低<sup>[12]</sup>,因此,不仅侧泄漏时对主变室人员活动区域的危害大,当发生低位置的侧泄漏时对人员的潜在危害更大。

图10为不同泄漏高度时主变室中各测点的最大浓度分布图,从该图中可以看出,当泄漏点位于点c,即泄漏高度位于 $Z=0.25$ 时,主变室中大部分测点的浓度都要比泄漏高度位于 $Z=0.45$ 时的高,符合之前的分析结果,但是在点F1和点G1两排底层测点,则是泄漏高度越低,浓度越低,这可能和之前分析的主变室中底层浓度越高,下部排风口排出SF<sub>6</sub>效果越明显的特性有关。

## 3 结论

通过对主变室非封闭状态下不同六氟化硫泄漏量,不同泄漏位置时主变室中SF<sub>6</sub>气体的自然扩散及分布规律进行了研究,结论可归纳为以下几点:(1)对于非封闭状态下主变室中SF<sub>6</sub>的自然扩散过程,当泄漏位置位于变压器上部面时,其浓度随时间的变化可分为快速上升阶段和缓慢上

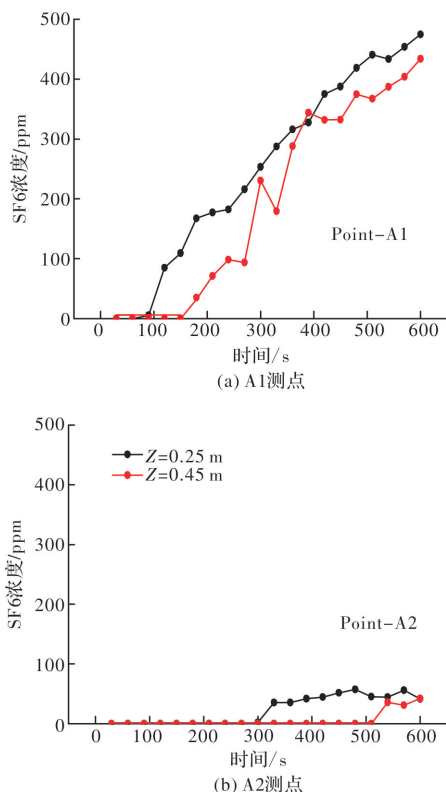


图9 工况4和工况5时SF<sub>6</sub>浓度随时间变化图

Fig. 9 Variation of SF<sub>6</sub> concentration with time under working condition 4 and 5

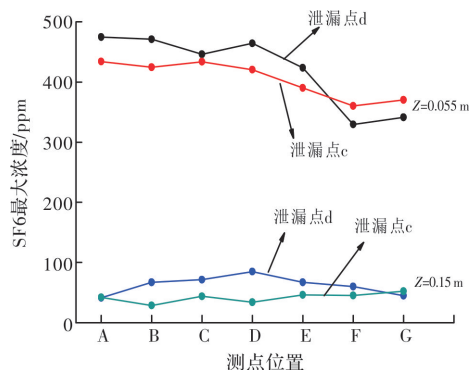


图10 工况4和工况5时不同高度SF<sub>6</sub>最大浓度分布图

Fig. 10 SF<sub>6</sub> maximum concentration at different heights under working condition 5

升阶段两个过程,在快速上升阶段,SF<sub>6</sub>浓度会在短时间内急剧的上升到一定浓度,之后增速逐渐放缓,进入缓慢上升阶段,而且,泄漏量越大,到达稳定阶段所需要的时间则越长。

(2)泄漏量越大,主变室地面的高浓度区域也就越厚,浓度分层也越明显,对工作区人员的危害越大

(3)下部排风口的存在会对该测的SF<sub>6</sub>具有一定的排出效果,但是对高层的SF<sub>6</sub>浓度,则几乎没有影响.而且泄漏量越大,下部风口排除SF<sub>6</sub>的

作用越明显。

(4)当泄漏点位于变压器上部面,但是偏离变压器中心时,会造成主变室底部的六氟化硫浓度分布不均,靠近泄漏点一侧为高浓度区域,而远离泄漏点一侧为低浓度区域

(5)当主变室发生变压器上的侧泄漏时,其底层浓度会急剧的上升,短时间便可成为高浓度区域,对人员等造成巨大的安全风险,其浓度分布最大特点为底层  $\text{SF}_6$  浓度高,扩散高度低。

(6)侧泄漏时,随着泄漏高度的增加,泄漏点以下的  $\text{SF}_6$  浓度都将相应的变小。

## 参考文献 References

- [1] TANG J. Partial discharge recognition through an analysis of  $\text{SF}_6$  decomposition products part I: decomposition characteristics of  $\text{SF}_6$  under four different partial discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 29-36.
- [2] 王先培, 李晨, 赵宇, 等. 基于紫外光谱  $\text{SF}_6$  电气设备内  $\text{SO}_2$  组分在线监测法[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 152-158.  
WANG Xianpei, LI Chen, ZHAO Yu, et al. Online detection methodology of decomposition Product  $\text{SO}_2$  in  $\text{SF}_6$  electrical equipment based on ultraviolet spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 152-158.
- [3] RICCIARDI L, Prévost C, BOUILLLOUX L, et al. Experimental and numerical study of heavy gas dispersion in a ventilated room[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 493-505.
- [4] 丁慧心, 肖益民, 周铁成. 地下水电站出线竖井中  $\text{SF}_6$  泄漏扩散的数值模拟分析[J]. 制冷与空调: 四川, 2016, 30(6): 623-629.  
DING Huixin, XIAO Yimin, ZHOU Tiecheng. Numerical simulation analysis of  $\text{sf}_6$  diffusion in the shaft of underground Hydropower station[J]. Refrigeration and Air conditioning, 2016, 30(6): 623-629.
- [5] CHAVEZ M, HAJRA B, STATHOPOULOS T. Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2011, 99(4): 330-339.
- [6] SANTOS J M, MAVROIDIS I, NCREIS. experimental investigation of outdoor and indoor mean concentrations and concentration fluctuations of pollutants[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(36): 6534-6545.
- [7] WANG Zhirong, HU Yuanyuan, JIANG Juncheng. Numerical investigation of leaking and dispersion of carbon dioxide indoor under ventilation condition[J]. Energy & Buildings, 2013, 66(6): 461-466.
- [8] 秦颂, 董华, 张启波等. 重气连续泄漏扩散的盐水模拟实验[J]. 环境化学, 2007, 26(5): 666-670  
QIN Song, DONG Hua, ZHANG Qibo, et al. Salt water simulation experiment for dispersion of continuous leaked heavy gas[J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(5): 666-670
- [9] XING Ji, LIU Zhenyi, HUANG Ping, et al. CFD validation of scaling rules for reduced-scale field releases of carbon dioxide[J]. Applied Energy, 2014, 115(4): 525-530.
- [10] ZHANG Qiping, MA Dexian. Effect of heavy gas of dangerous material in diffusion process[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 1998, 25(3): 86-90.
- [11] 刘佳. 液氯泄漏扩散数值模拟[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.  
LIU Jia. Studies on the numerical simulation of chlorine leakage and diffusion[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012.
- [12] 丁宗果, 何天祺, 刘勇等. 某水电站 GIS 电缆层  $\text{SF}_6$  重气扩散的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2008(1): 68-71.  
DING Zongguo, HE Tianqi, LIU Yong, et al. The numerical simulation study of the pervasion about the  $\text{SF}_6$  heavy gas in the GIS cable layer of the hydroelectric power station[J]. Building Energy & Environment, 2008(1): 68-71.
- [13] SIDDIQUI M, JAYANTI S, SWAMINATHAN T. CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 209-210(1): 177-185.
- [14] RICCIARDI L, C Prévost, BOUILLLOUX L, SESTIERCARLIN R. Experimental and numerical study of heavy gas dispersion in a ventilated room[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 493-505.
- [15] DONG Longxiang, ZUO Hongchao, LIANG Hu. Simulation of heavy gas dispersion in a large indoor space using CFD model[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 46: 1-12.



- [14] AMANN R I. In situ identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes[M]//Molecular Microbial Ecology Manual. Switzerland:Springer,1995:331-345.
- [15] DAIMS H, LÜCKER S, WAGNER M. Daime, a novel image analysis program for microbial ecology and bio-film research[J]. Environmental Microbiology, 2006, 8(2):200-213.
- [16] CHEN C, REN N, WANG A, et al. Microbial community of granules in expanded granular sludge bed reactor for simultaneous biological removal of sulfate, nitrate and lactate[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2008, 79(6):1071-1077.
- [17] 李军, 张文文, 王立军, 等. 硫自养反硝化同步脱氮除硫启动试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(1):162-165.
- LI Jun, ZHANG Wenwen, WANG Lijun, et al. Start-up test of simultaneous nitrogen and sulfur removal by sulfur autotrophic denitrification[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(1):162-165.
- [18] 郑香凤, 汪莉, 郑天龙, 等. 生物填料塔同步脱氮除硫的研究[J]. 环境工程, 2013(s1):433-436.
- ZHENG Xiangfeng, WANG Li, ZHENG Tianlong, et al. Study of Simultaneous Denitrification and Desulfurization by Biological Packed Tower[J]. Environmental Engineering, 2013(s1):433-436.
- [19] WANG A J, DU D Z, REN N Q, et al. Tentative study on a new way of simultaneous desulfurization and denitrification[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005, 13(3):422-425.
- [20] 李巍, 赵庆良, 刘颢. 缺氧附着生长反应器同步脱氮除硫除碳运行效果探讨[J]. 环境科学, 2008, 29(7):1855-1859.
- LI Wei, ZHAO Qingliang, LIU Jing. Simultaneous removal of sulfide, nitrogenous compounds and organic carbon by anoxic attached-growth bioreactor[J]. Environmental Science, 29(7):1855-1859.
- (编辑 沈 波)

---

(上接第 274 页)

- [16] 胡园园, 王志荣, 蒋军成. 自然通风条件下室内 CO<sub>2</sub> 扩散浓度变化的数值模拟[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, 34(3):129-133.
- HU Yuanyuan, WANG Zhirong, JIANG Juncheng. Numerical simulation of indoor concentration change of carbon dioxide dispersion under natural ventilation condition[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 34(3):129-133.
- [17] HANNA S, BRITTER R, ARGENTA E, et al. The Jack Rabbit chlorine release experiments: Implications of dense gas removal from a depression and downwind concentrations[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 213-214(3):406-412.
- [18] 周宁, 滕欣, 袁雄军等. 基于可视化理论的重气泄漏扩散研究[J]. 环境工程, 2016, 34(10):147-152.
- ZHOU Ning, TENG Xin, YUAN Xiongjun, et al. Research of heavy gas leakage and diffusion based on the visualization theory[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(10):147-152.
- [19] 周超, 王志荣, 蒋军成. 室内空间重气泄漏扩散过程的影响因素[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, 33(4):88-92.
- ZHOU Chao, WANG Zhirong, JIANG Juncheng. Influence factors of dense gas leakage and dispersion indoor[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(4):88-92.
- (编辑 沈 波)