

doi: 10.7690/bgzd.2021.11.017

模拟油罐氮气惰化实验研究

王冬, 刘瑞, 梁建军, 王建, 吴婧斯, 郭子航, 党金鹏, 钱文隆
(陆军勤务学院油料系, 重庆 401331)

摘要: 为研究某典型退役覆土油罐安全处置问题, 基于原型尺寸覆土油罐设计模拟油罐开展氮气惰化实验。依据相似理论设计加工氮气惰化模拟实验系统台架, 确定实验内容和步骤, 并对油罐惰化置换氧气效率及氧气时空分布的规律进行研究。结果表明: 在相同氮气流量下, 氧气浓度与时间呈现对数变化关系, 随时间增加氧气浓度降低速率逐渐减小, 同一时刻罐内氧气浓度基本相同; 在进气口处惰化初期氧气浓度波动较大, 后期逐渐趋于稳定; 油罐内相同位置随着流量不断增加, 达到设定氧气浓度所需时间越短, 惰化效率越高。研究结果对安全处置退役覆土油罐油气泄漏具有重大意义。

关键词: 退役油库; 油罐; 氮气惰化; 处置技术; 实验研究

中图分类号: TE88 **文献标志码:** A

Study of Simulated Tank Nitrogen Inerting Experiment

Wang Dong, Liu Rui, Liang Jianjun, Wang Jian, Wu Jingsi, Guo Zihang, Dang Jinpeng, Qian Wenlong
(Department of Oil Supply, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to study the safety disposal of a typical retired soil-covered oil tank, a nitrogen inert experiment was carried out based on the design of a simulated soil-covered oil tank based on prototype size. According to the similarity theory, a nitrogen inserting simulation experimental system was designed to determine the experimental contents and steps, and the oxygen replacement efficiency and the space-time distribution of oxygen in the oil tank were studied. The results show that under the same nitrogen flow, the oxygen concentration and time show a logarithmic relationship, with the increase of time oxygen concentration decrease rate gradually, the oxygen concentration in the tank at the same time is basically the same. At the inlet, oxygen concentration fluctuates greatly at the initial stage of inerting and tends to be stable at the later stage. With the continuous increase of the flow rate in the same position of the tank, the shorter the time required to reach the set oxygen concentration, the higher the inerting efficiency. The research results have great significance for the safe disposal of oil and gas leakage from decommissioned soil-covered tanks.

Keywords: decommissioned oil depot; oil tank; nitrogen inerting; disposal technology; experimental study

0 引言

轻质油料具有低闪点和易挥发的特性, 常温常压下极易引起燃烧, 与空气混合后会形成可燃爆炸性混合物, 遇明火或者高热能极易发生燃烧爆炸, 若在受限空间中一旦发生爆炸产生冲击波造成极大超压, 就会形成极大的破坏力^[1-4]。退役油罐长期放置不再使用, 又极易产生燃烧爆炸, 需要对其进行安全处置。目前处置技术有惰化技术^[5-7]、通风技术^[8]和注水技术^[9-10]3种。相对来说, 惰化技术具有安全性高^[11-13]、作业时间短、成本相对较低和惰化后保持安全稳定时间长等优点。对于大量退役油库油罐, 惰化介质宜采用氮气, 其优点是容易获取^[14]、成本低^[15]。通风技术只能解决短时间油气浓度处于安全下限以下, 随着油气挥发, 油气浓度继续上升, 因此不适合退役油罐。注水技术^[16]适合短期, 而对

于退役油库油罐这种永久性达到本质安全型不适合。综上所述, 退役油罐使用氮气惰化技术较合适。

由于退役覆土油罐惰化过程受惰化工艺流程、流量和边界条件等影响较大, 罐内流场、传质过程复杂, 难以进行理论分析; 因此对模拟油罐氮气惰化进行实验, 研究在不同氮气流量下, 对油罐惰化置换氧气效率及氧气时空分布的规律, 对指导工程实践具有十分重要意义。

1 实验台架设计与组成

1.1 模拟油罐的设计

模拟油罐是氮气惰化实验最重要的实验台架之一, 采用的模拟油罐结构尺寸是按照常用 1 000 m³覆土油罐 3/1 000 比例缩小, 模拟油罐体积 3 m³, 罐体按照高压容器钢材标准制造。模拟油罐罐壁上

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-08-20

基金项目: 火灾与爆炸安全防护重庆市重点实验室资助 (CSTC:2010CA0005); 陆军勤务学院青年基金 (LQ-QN-202014)

作者简介: 王冬 (1976—), 男, 江西人, 博士, 副教授, 从事油气安全与防护技术研究。E-mail: eletterbox@126.com。

有若干测量孔、若干硼硅玻璃观察窗和压力表等。测量口在实验中用螺栓密封，需要测量实验油气与氧气浓度时拧开螺栓，并拧入测量仪器吸气管道即可。模拟油罐的附件装置布置如图 1 所示。

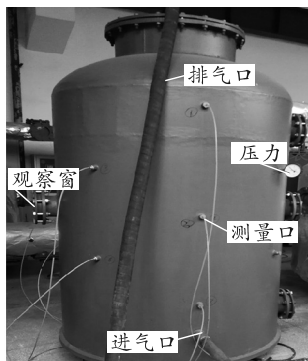


图 1 模拟油罐

1.2 气体循环系统设计

瓶装氮气价格较便宜，适合作为惰化气体来源。气体循环系统是比较重要的实验装置。该装置系统主要由油气雾化循环系统、氮气惰化系统和油罐废气排空系统组成。它主要有 3 大重要功能：1) 通过循环系统向模拟油罐中通入实验介质为 92 号汽油-空气混合气体，模拟实际退役油罐内的油气成分；2) 在模拟油罐的油气组分达到要求后，将氮气通过管路系统通入模拟油罐中，模拟惰化处置过程；3) 在惰化完成后，需要将罐内气体用风机排空，使罐内气体组分恢复正常状态，以便进行下一次实验。

模拟油罐内气体循环系统工艺流程如图 2 所示，其中模拟退役油罐内油气组分循环系统工艺流程中由真空泵、风机、雾化装置、管道、模拟油罐、阀门、流量计和氮气瓶等装置设备组成。真空泵提供整个管路系统气体流动的动力源，促使油气雾化并使其混合均匀。该实验所使用的泵和风机参数为一台流量为 2×8 旋式真空泵，功率为 1 100 W、流量为 480 L/min、进出口管直径为 40 mm；另一台是 PXG-4 旋涡风机，功率为 4 000 W、流量为 $276 \sim 328 \text{ m}^3/\text{h}$ 和全压 $22.8 \sim 32.6 \text{ kPa}$ 。

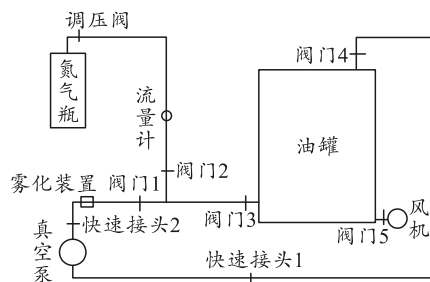


图 2 模拟油罐内气体循环系统工艺流程

模拟退役油罐内的油气循环系统，打开阀门 1、阀门 3 和阀门 4，关闭阀门 2 和阀门 5，开启真空泵，进行油气循环，使罐内油气达到设定浓度；模拟退役油罐氮气惰化系统，打开阀门 2、阀门 3 和阀门 4，关闭阀门 1 和阀门 5，断开快速接头，并将连接油罐段管道通向室外，调整调压阀调节氮气流量，使罐内氧气达到设定浓度。模拟油罐排空系统，打开阀门 4 和阀门 5，关闭阀门 3，启动风机将模拟油罐内气体通过阀门 4—管道—室外，恢复罐内气体组分为初始状态。

1.3 油气雾化装置设计

为了模拟油罐油气环境，提高油气雾化效率，设计了油气雾化装置，用于快速形成油罐内稳定的油气浓度。雾化装置基本原理：在管路系统中使用真空泵对循环系统中气体进行加压，当气体顺着管路流经收缩断面时，流速增大，压强减小，根据伯努利方程，真空度增大，油瓶中的 92 号汽油在外部大气压作用下由喷油嘴喷入气体循环系统，与空气混合形成油气混合物，不断循环油气混合物最终达到实验所需油气浓度条件。油气雾化装置结构示意图如图 3 所示(单位：mm)。

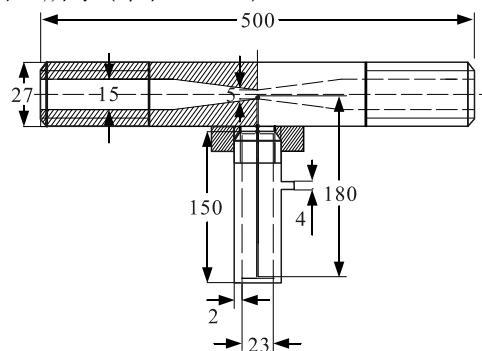


图 3 油气雾化装置结构

1.4 浓度测试系统

如图 4 所示，对模拟油罐内的油气浓度监测，采用实验室研制的油库油气浓度在线安全监测预警系统，主要用于测量油罐上 8 个监测点油气和氧气浓度。该装置系统中光学系统主要由光源、检测器与气室组成，相关参数如表 1 所示。碳氢浓度测试仪器如图 5 所示，配合前者用于测量油气浓度，该装置系统其主要参数如表 2 所示。该设备主要用于监测氮气惰化时排气口气体中氧气浓度，因为在工程实践中油罐内部监测点浓度不容易监测，但是排气口浓度比较容易监测，获取该点数据可以更好地服务于工程实践。



图 4 油库油气浓度在线安全监测预警系统

表 1 油库油气浓度在线安全监测预警系统相关参数

| | | | |
|----------|----------|--------|--------|
| 油气浓度范围/% | 氧气浓度范围/% | 湿度范围/% | 温度范围/℃ |
| 0~5 | 0~25 | 0~100 | -20~60 |



图 5 燃烧废气分析仪器

表 2 FGA-4100(5G)汽车尾气分析仪主要参数

| 参数 | 测量范围 | 测量精度 |
|--------------------|----------|------|
| HC/ppm | 0~12 000 | 1.00 |
| CO ₂ /% | 0~20 | 0.10 |
| CO/% | 0~10 | 0.01 |
| O ₂ /% | 0~25 | 0.10 |

注：响应时间为 1s。

1.5 流量测试系统

实验需要模拟不同氮气流量下油罐惰化效果实验。采用气体转子流量计(图 6 所示)进行测量以及控制氮气流量，气体转子流量计计量范围：0.5~5 m³/h，能够满足实验要求。



图 6 转子流量计

2 实验内容与步骤

2.1 实验内容

实验模拟油罐氮气惰化置换氧气过程。在常温

常压下油气爆炸的最低氧气体积分数为 11.4%，对应的可燃油气爆炸下极限为 1.22%^[17]，达到本质安全型油罐。在工程实践中，由于刚退役油罐罐底有底油和油泥会继续挥发油气，将油气浓度降低至爆炸下限没有实际意义，因此只需将氧气浓度降低至爆炸下限以下进行封存，就能达到本质安全型^[18-20]。本实验主要研究氮气惰化过程中的氧气浓度时空分布、特殊现象、特殊机理以及惰化置换效率影响因素。模拟实验主要研究：

1) 氮气惰化置换模拟油罐过程中氧气的流动特性、传质特性和不同位置浓度时空变化规律进行研究分析；

2) 模拟油罐内氧气浓度随惰化时间变化规律的实验研究分析；

3) 不同氮气流量对油罐内氧气置换效率影响因素的模拟实验研究分析。

2.2 实验步骤

根据实验内容安排，在常温常压下进行，对实验室中模拟油罐使用 92 号车用汽油(气态)和空气形成的混合物，用氮气作为油气与空气混合物的惰化置换实验介质。该实验步骤如下：

1) 调试、校准测试系统，在模拟油罐上安装各种测量仪器仪表设备；

2) 将油气循环系统相关实验装置按照如图 2 所示连接好。

3) 关闭阀门 2，其余阀门均处于打开状态，打开风机对气体进行加压至 0.3 MPa，关闭阀门 5，静置 10 min，检查压力表有无压降，若无，说明整个循环系统气密性良好；

4) 向油气雾化系统储油瓶加注 92 号车用汽油，打开阀门 1、阀门 3 和阀门 4，关闭阀门 2 和阀门 5，开启真空泵，进行油气循环；

5) 油气循环过程中，监测模拟油罐内油气浓度，待其达到 5%稳定浓度后停泵，关闭阀门 1；

6) 关闭阀门 3，打开阀门 1 和阀门 2，断开快速接头 1 和快速接头 2，并将连接油罐排出口管道通向室外，拧开氮气瓶出口阀门，调整调压阀来调节氮气压力；

7) 调节阀门 2 开度，用气体转子流量计监测流量，直到氮气流量达到实验规定要求，连接快速接头 2，关闭阀门 1；

8) 测量并记下模拟油罐内各个监测点初始氧气和油气浓度；

9) 打开阀门 3, 将氮气按设定流量通入模拟油罐;

10) 每隔 5 min 记录下时间与各测量监测点的氧气体积浓度, 当罐出口氧气浓度下降至设定浓度, 关闭阀门 2;

11) 改变实验氮气流量, 重复步骤 4)–10);

12) 撤收实验装置器材, 整理并分析实验数据。

3 氮气流量对惰化效率影响的实验研究

在常温条件下, 根据实际油罐工艺要求, 以模拟油罐下部作为氮气的进气口, 模拟油罐顶部作为混合气体的排气口, 具体见图 1。根据实际工程中某退役油罐和模拟油罐氮气进口流量关系, 由两者体积比换算得来。退役油罐为 $1\ 000\ \text{m}^3$, 氮气流量按惰化工作正常流量为油罐体积 $2/3$, 约为 $666\ \text{m}^3/\text{h}$, 实验模拟油罐的体积为 $3\ \text{m}^3$ 。

模拟油罐实验中的氮气流量:

$$Q_m = (V_m/V_p)Q_p = (3/1000) \times 666 \approx 2\ \text{m}^3/\text{h}。 \quad (1)$$

其中: Q_m 为模拟油罐氮气进口流量; V_m 为模拟油罐体积; Q_p 为原型油罐氮气进口流量; V_p 为退役油罐原型氮气进口流量。

因此, 本实验将分别进行氮气流量为 1、2、 $3\ \text{m}^3/\text{h}$ 的模拟惰化实验。实验前将模拟油罐上的测量点编号, 考虑油罐的对称性, 选择了 9 个具有代表性的测量点。它们的编号分别是 1、2、3、4、5、6、7、8、9 号(排气口), 9 个测量点位置如图 7 所示。该次试验模拟油罐氮气惰化实验, 通入惰化气体各组分体积浓度为 $\text{O}_2:0.5\%$ 和 $\text{N}_2:99.5\%$ 。

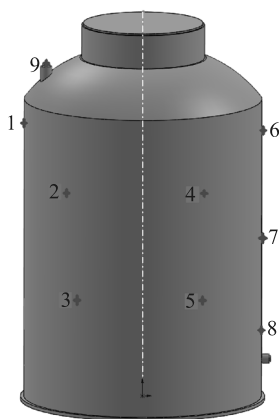


图 7 测量点分布

3.1 进口流量为 $1\ \text{m}^3/\text{h}$ 的实验结果

按 2.2 节中实验步骤进行时长 $300\ \text{min}$ 氮气惰化实验, 根据实验获取数据, 将 9 个测量点氧气体积浓度随时间变化绘制曲线如图 8 所示。

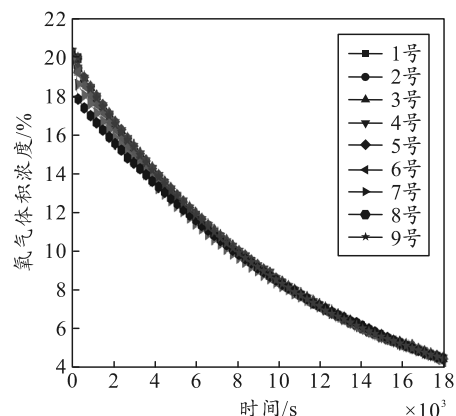


图 8 流量 $1\ \text{m}^3/\text{h}$ 各测量口氧气体积浓度

3.2 进口流量为 $2\ \text{m}^3/\text{h}$ 的实验结果

本次实验除了进口氮气流量为 $2\ \text{m}^3/\text{h}$, 实验时长 $150\ \text{min}$, 其他步骤及程序均与 $1\ \text{m}^3/\text{h}$ 氮气惰化实验相同。根据实验获取数据, 将 9 个测量点氧气体积浓度随时间变化绘制曲线如图 9 所示。

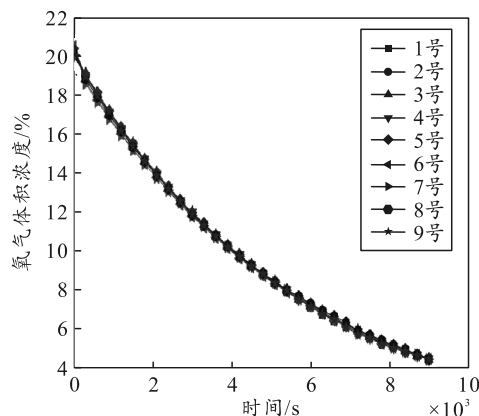


图 9 流量 $2\ \text{m}^3/\text{h}$ 各测量口氧气体积浓度

3.3 进口流量为 $3\ \text{m}^3/\text{h}$ 的实验结果

本次实验除了进口氮气流量为 $3\ \text{m}^3/\text{h}$, 实验时长 $100\ \text{min}$, 其他步骤及程序均与 $1\ \text{m}^3/\text{h}$ 氮气惰化实验相同。根据实验获取数据, 将 9 个监测点氧气体积浓度随时间变化绘制曲线如图 10 所示。

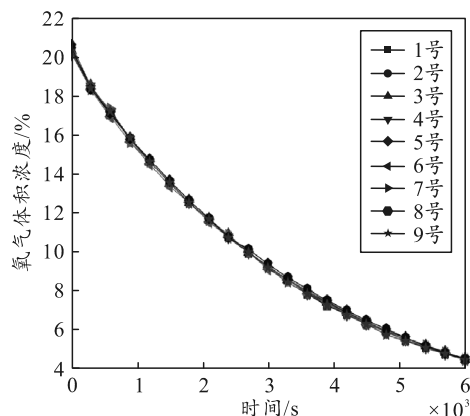


图 10 流量 $3\ \text{m}^3/\text{h}$ 各测量口氧气体积浓度

3.4 不同流量同一测量点结果

为了方便研究在不同流量下相同测量点相关规律，由前文发现在不同流量下除了 8 号测量点期初有很大波动，其他测量点基本比较稳定，选取不同高度处 4 号和 5 号测量点作为研究对象，另外结合工程实践中，在排气口 9 号测量点较容易测出，因此，选取 4、5 和 9 号测量点作为研究对象。不同流量下相同测量点比较分析见图 11—13，图中虚线为对应氧气浓度为 5% 时所对应的时间关系。

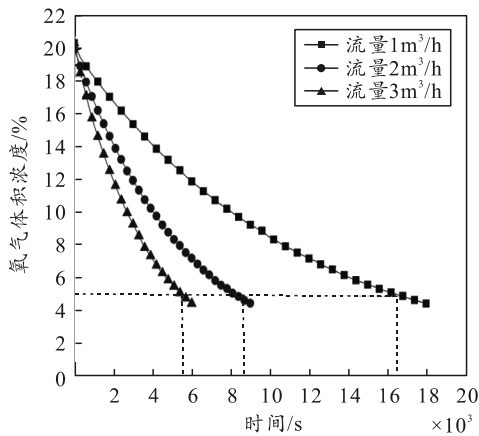


图 11 不同流量下 4 号测量口氧气体积浓度曲线

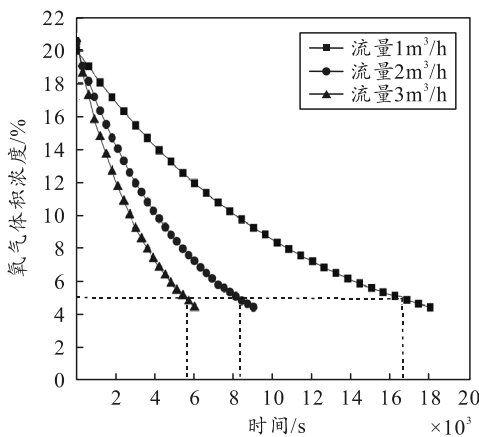


图 12 不同流量下 5 号测量口氧气体积浓度曲线

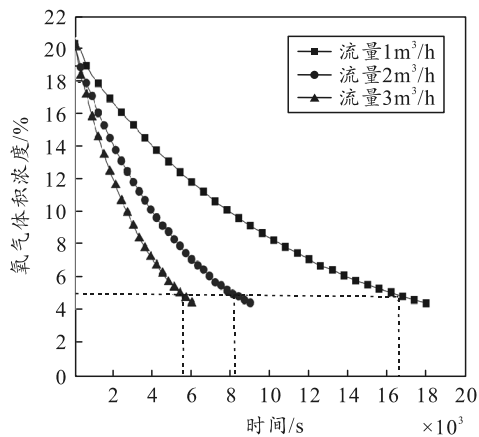


图 13 不同流量下 9 号测量口氧气体积浓度曲线

3.5 实验结果分析与规律总结

由 3.1—3.4 节的实验数据曲线图可以得出如下结论：

1) 由图 8—10 可知，在相同氮气流量下，各个测量口的氧气浓度与时间呈现出非线性关系变化，随着时间增加，氧气体积浓度不断降低，且降低速率逐渐减小。在相同流量下模拟油罐内各测量口氧气体积浓度基本同步变化。7 号和 8 号测量口在起初阶段氧气体积浓度出现较大波动，是因为 7 号和 8 号测量口位于氮气进气口处，起初阶段氮气通入，致使周围氧气浓度迅速降低，随后由于氮气不断对流扩散，逐渐趋于稳定；

2) 由图 8—10 可知，油罐上各个测量点，在同一时刻氧气浓度有所不同，测量点 9 在任一时刻氧气浓度均略大于其他测量点，即排气口处的氧气浓度均略大于其他测量点。这些数据表明油罐氮气惰化并不是均匀进行，同时也表明在实际油罐氮气惰化过程中，在测量排气氧气浓度时要考虑惰化死角以及必要安全余量，否则极易引发安全事故，这也是后面数值模拟要解决的问题。

3) 由图 11—13 可知，在不同氮气进口流量下，4 号测量口，流量为 1、2 和 3 m³/h 时，氧气由初始浓度降至最低浓度 5% 时的耗时分别为 277、141 和 91 min，达到同样 5% 氧气浓度，随着流量增大，惰化所需时间大体上成反比例线性关系变化。相同测量点随着流量不断增加，达到设定氧气浓度所需时间越短，惰化效率越高。同理 5 号和 9 号测量口可以得到类似结论。

4 结论

以退役油罐氮气惰化实际工程需要为研究背景，依据相似理论设计加工氮气惰化模拟实验系统台架。对油罐惰化实验流程进行分析，并确定了实验内容和步骤。通过实验研究通入不同流量氮气，对油罐惰化置换氧气效率及氧气时空分布的规律进行研究。

1) 在相同氮气流量条件下，油罐内各位置的氧气浓度与时间呈现出对数关系变化，随着时间增加，氧气体积浓度不断降低，且降低速率逐渐减小。在相同流量下同一时刻模拟油罐内各位置氧气体积浓度基本同步变化。进气口处在惰化起初阶段氧气体积浓度出现较大波动，经不断对流扩散，逐渐趋于稳定。