

# 双层罐底板结构立式储罐泄漏扩散 数值模拟及结构优化

刘富君,赵力伟,孔 帅,钱岳强

(浙江省特种设备检验研究院,杭州 310020)

**摘要:**针对现有立式储罐底板承受双面腐蚀,易发生泄漏事故,且罐底板检测方法单一、被动的现状,提出了一种可实施泄漏在线监测的双层罐底板结构立式储罐方案。采用计算流体力学CFD方法,对两种不同罐底板结构进行了对比分析及优化研究,得到了一种兼顾流动均匀性及流动死区的结构形式。进一步模拟研究了泄漏位置、吹扫速度 $v$ 对夹层空间出口体积分数 $\varphi$ 及扩散稳定时间 $T$ 的影响规律。结果表明,发生在三个不同位置的泄漏对 $\varphi$ 的总体影响趋势一致,且随着 $v$ 的减小, $\varphi$ 和 $T$ 都呈增大的趋势,速度越小趋势越明显。研究成果对于促进双层罐底板结构立式储罐的国产化进程具有重要意义。

**关键词:**储罐;双层罐底板;泄漏扩散;结构优化

中图分类号:TE972;TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2012)05-0007-05

## Numerical Simulation of Leakage Diffusion and Structural Optimization of Double-Layer Structure of Oil Storage Tank

LIU Fu-Jun, ZHAO Li-Wei, KONG Shuai, QIAN Yue-Qiang

(Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** Oil and gas leak accidents easily occur in existing oil storage tanks for the double-sided corrosion and passive detection method. So a double-layer structure of oil storage tank was proposed in this paper. Computational fluid dynamics(CFD) methods were used to compare and optimize the two different bottom structures of oil storage tanks, the optimal parameters of the bottom structure met the demand of good flow uniformity and no stagnation zone was obtained. Furthermore, three dimensional numerical simulations were conducted on bottom structures with different locations of leak and inlet velocities ( $v$ ) in order to get laws of outlet volume fraction ( $\varphi$ ) and diffusion stabilization time ( $T$ ) influenced by them. The results showed that the general tendency of leakage diffusion occurring in three different positions was roughly identical, that is,  $\varphi$  and  $T$  increased with the decrease of  $v$ , and the tendency became distinct when  $v$  decreased. The result of research has great significance for speeding up localization of double bottom structure of oil storage tank.

**Keywords:** Tank; Double-layer; Leakage diffusion; Structural optimization

立式储罐是原油、中间油、成品油、化工原料和石化产品等储存、分离、外输、中转的重要设备。储罐内存储的介质大多具有易燃易爆、易挥发甚至有毒的特性,一旦发生泄漏,极易引发火灾和爆炸,造

成严重的经济损失及环境污染<sup>[1]</sup>。罐底板位于储罐的最底层,上表面接触含水的储存介质,下表面和罐基础接触,上、下表面都存在不同程度的腐蚀现象,是泄漏高发区域<sup>[2]</sup>。罐底的腐蚀状况成为评价整个储罐使用寿命的依据<sup>[3]</sup>。长期以来,罐底的缺陷一直采用定期开罐的离线方法进行检测,包括漏磁、涡流、超声、磁粉等<sup>[4]</sup>,检测需要进行停产、倒空、清洗、除锈等工序,费时费力,且停产造成的经济损失巨

收稿日期:2011-06-02

作者简介:刘富君(1976—),男,博士,高级工程师,从事特种设备设计理论、结构强度、安全监控、数值模拟、风险评估及无损检测等方面的研究工作。

大。而且这些方法都是一种事后检测方法,只能进行定期检测,无法发现运行中正在发生的泄漏,而这对于储罐的安全运行至关重要。

鉴于现有检测技术的局限性和储罐罐底板腐蚀破坏的严重性,20世纪90年代中期,国外开始了双层罐底板结构立式储罐的初步研究并在近二十年内逐步成熟<sup>[5-7]</sup>,相继制定出相应的标准<sup>[8]</sup>。国内储罐建设及研究起步较晚,对于双层罐底板结构立式储罐的研究基本处于空白阶段,相关的文献也是鲜有报道。笔者所在的课题组,在吸收国外双层罐底板设计技术的基础上,提出了一种可实施泄漏在线监测的双层罐底板结构立式储罐方案。其基本工作原理为:首先,该结构能有效地避免罐底板的双面腐蚀,减少泄漏发生的可能;其次,当罐底发生泄漏时,通过通氮气吹扫的方法,将泄漏介质携带至外部监测系统,抽取并化验吹扫气体成分的变化,从而实现对储存介质的泄漏进行在线监控,一改以往的事后检测为主动监测。笔者采用计算流体力学方法,首先对两种不同罐底板结构进行了对比分析及优化研究,在此基础上,对发生在罐底夹层密闭空间内的泄漏过程进行数值模拟,分析不同泄漏位置及吹扫速度对泄漏扩散的影响规律,为开发储罐泄漏在线监测装置提供技术支撑。这对于促进双层罐底板结构立式储罐的国产化进程,以及解决储罐泄漏的安全问题具有重要意义。

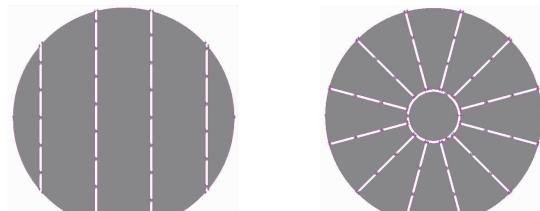
## 1 双层罐底板结构设计

双层罐底板结构由上下两层底板及其间的支撑结构组成,除必须满足一定强度和刚度要求外,还应符合一定的流体力学要求,以确保其内流体流动均匀,从而使发生在罐底任意处的泄漏都能迅速扩散并及时被检测到。为此,笔者设计了两种完全不同的罐底板结构进行分析比较,夹层空间半径 $R$ 为800mm,其结构分别为:

(1) 方案1 各支撑条之间平行排列,支撑条厚度20 mm,其间距设置为400 mm,如图1(a)所示。

(2) 方案2 中心设置内径为360 mm的钢质圆环,径向均布排列12根支撑条,圆环及支撑条的厚度均为20 mm,如图1(b)所示。

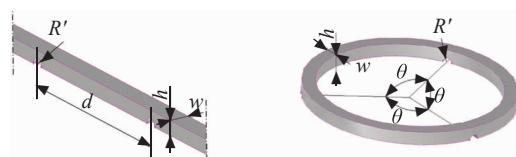
为使吹扫气在夹层空间进行流通,从而将泄漏介质携带至夹层空间出口,支撑结构上开有半径 $R'=7$  mm的半圆柱型通风孔,其中条型支撑结构上通风孔间距 $d=200$  mm,环型支撑结构则按角度均



(a) 方案 1

(b) 方案 2

图1 双层罐底板结构



(a) 条型支撑结构

(b) 环型支撑结构

图2 支撑结构示意图

布,具体结构见图2。所设计的罐底板结构尺寸是现场实际储罐按一定比例的缩小,但仍大到足以反映真实情况,具体尺寸为夹层空间半径 $R=800$  mm,通风孔半径 $R'=7$  mm,循环气进出口半径 $r=5$  mm,泄漏孔半径 $r'=2$  mm,通风孔间距 $d=200$  mm,支撑条厚度 $w=20$  mm,支撑条高度 $h=14$  mm。

## 2 数值计算的模型及方法

以汽油为泄漏介质进行数值模拟,实际模拟计算区域为双层罐底板结构立式储罐罐底夹层密闭空间,以方案2的结构为例进行说明,其数值计算的物理模型如图3所示。

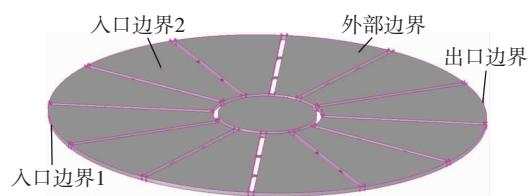


图3 数值计算的物理模型

由于支撑结构的存在,罐底夹层空间被分割成多个不同区域,各区域之间由通风孔相连通。数值计算模型的结构尺寸如前文所述。罐底夹层密闭空间的轴向尺寸很小,且远远小于其径向尺寸,给网格划分带来了困难。因此,对数值计算区域进行分块网格划分,在泄漏孔(图3中入口边界2)附近进行加密,网格数约为130万,并在计算过程中利用网格自适应功能对泄漏介质局部浓度变化梯度较大的区

域进行加密,以提高计算结果的精度,具体如图 4 和 5 所示。

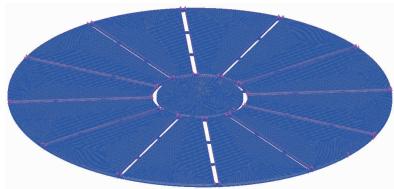


图 4 罐底夹层空间的网格划分图

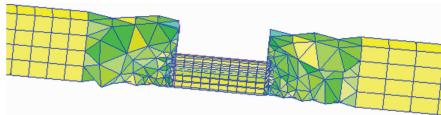


图 5 局部网格放大图

采用 Fluent 软件自带的无化学反应的组分输运模型研究泄漏介质的扩散问题,并将汽油挥发出来的混合介质简化为单一的物质,并在 Fluent 中定义其物性。在三维直角坐标系下,控制方程如下<sup>[9]</sup>:

(1) 连续方程:

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

式中  $\rho$  为混合物密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u_i$  为  $i$  方向的速度分量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

(2) 动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + (\rho - \rho_a) g_i \end{aligned}$$

式中  $\mu$  为流体动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $P$  为绝对压力,  $\text{Pa}$ ;  $\rho_a$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(3) 组分输运方程:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x_j} \right]$$

式中  $c_s$  为组分  $s$  的体积浓度;  $D_s$  为组分  $s$  的扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

边界条件如下:

(1) 入口边界条件 1 吹扫气入口,采用速度入口条件。

(2) 入口边界条件 2 泄漏入口,采用速度入口条件。

(3) 出口边界 压力出口,设定为 1.1 个大气压的压力。

(4) 外部边界 壁面边界条件,无滑移速度  $u = 0$ 。

文献[10]对受限空间内气体扩散进行数值模

拟,证明采用 RNG  $k-\epsilon$  对受限空间内气体扩散数值模拟可以取得较好的结果,且适用于有障碍物存在的情况。因此,数值计算中采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型,且近壁面采用增强壁面函数法,以提高计算精度。计算中考虑重力对扩散的影响,采用非耦合隐式求解方法,速度与压力耦合采用 SIMPLE 方法,用二阶精度的迎风格式离散。

### 3 数值计算结果及分析

#### 3.1 罐底板结构优化研究

从计算流体力学角度,对罐底夹层空间结构进行优化研究,旨在消除流动死区,使流动更加均匀,从而使发生在罐底任意处的泄漏都能迅速扩散,并及时被检测到。为了更好地判别夹层空间内流体分布优劣情况,引进气体分布不均匀度  $M_f$  对夹层空间内流体的分布情况进行定量分析,其表达式为<sup>[11]</sup>:

$$M_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2}$$

式中  $u_i$  为局部速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\bar{u}$  为平均速度,  $\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$ ,  $\text{m}/\text{s}$ 。

气体分布不均匀度  $M_f$  越小,表明气体速度分布越均匀,这里将此量作为考察流动空间内速度分布均匀与否的定量指标。

##### 3.1.1 两种罐底板结构内流场的分析比较

由于罐底夹层密闭空间的高度 14 mm,远远小于其半径 800 mm,为减少计算量,采用不带泄漏的二维数值模拟对两种不同罐底板结构的夹层空间内流场进行比较分析。为使计算结果具有可比性,两种计算模型都采用结构化六面体网格及相同的网格步长进行网格划分,并采用相同的湍流方程、边界条件及其它求解设置进行模拟计算,模拟中不需开组分输运方程,其他设置同上,这里不再赘述。

为便于比较,图 6(a)和(b)显示的速度矢量放大倍数是相同的。由图 6 和 7 可以看出,两种结构具有较类似的流动规律,即在入口区域,由于流动未经衰减,具有较大的速度和湍流强度;由于前续流动损失及流动空间的扩大,当流体流至中间区域时,流体速度及湍流强度明显下降;在出口区域,由于流动空间的急剧缩小,流体流动速度及湍流强度又有所提高;且在两种结构各单独区域的拐角处都存在不同程度的流动死区。为分析比较出两种罐底板结构的优劣,分别计算了其气体分布不均匀度  $M_f$ ,结果表明,方案 1 的气体分布不均匀度  $M_{f1} = 1.61$ ,大于

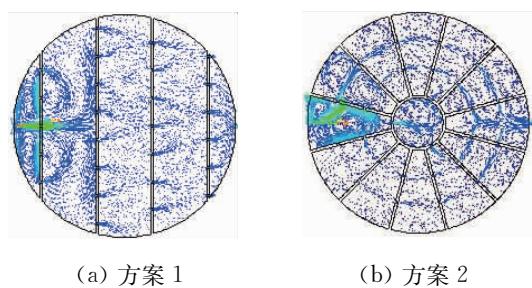


图 6 速度矢量图

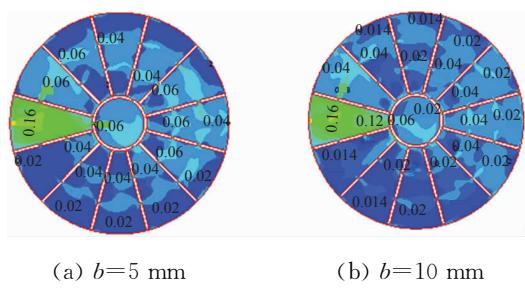


图 7 湍流强度图

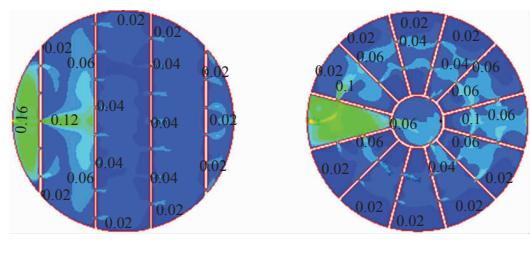


图 8 不同边缘距离下的湍流强度图

方案 2 的气体分布不均匀度  $M_{f2} = 1.47$ , 说明方案 2 具有更好的流动均匀性。因此,选定罐底板结构方案 2 作为基础结构进行优化研究,以得到一种全面考虑流动均匀性及流动死区的结构形式。

### 3.1.2 罐底板结构内流场优化

选定的罐底板结构方案 2 虽然具有较好流动均匀性,但其流动区域内仍存在流动薄弱区域,倘若泄漏发生在这些地方,将很难被检测到。为消除流动死区,对选定的罐底板结构方案 2 做进一步改进,主要是在条型支撑结构与壁面、条型与环型支撑结构之间预留了一定的边缘距离  $b$ 。对边缘距离  $b$  分别为 0, 5, 10, 15 mm 的四种不同结构的罐底板结构进行数值模拟,研究边缘距离  $b$  对流动死区及流动均匀性的影响规律。

图 8 给出三种不同边缘距离  $b$  时,罐底板夹层空间内流体流动的湍流强度图。结合图 7(b)分析可知,当边缘距离  $b=0$  mm 时,在罐底夹层空间的个别区域,尤其是拐角处存在明显的流动死区。而当存在一定边缘距离  $b$  时,由图可见,在拐角处产生不同程度的湍动,且湍动的范围随  $b$  的增大而增大,这就有有效地强化了该区域的流动,有利于泄漏的扩散。

由图 9 可以看出,随着边缘距离  $b$  的增大,气体分布不均匀度  $M_f$  呈递增的趋势,说明随着  $b$  的增大,气速差异逐渐增大,气体的分布越来越不均匀。究其原因,可能是由于边缘距离  $b$  存在增大了单个区域的出口面积,导致该区域的出口速度相应地降低,而该区域的出口速度又将作为入口速度进入下

(a) 方案 1 (b) 方案 2

(a) 方案 1 (b) 方案 2

(c)  $b=15$  mm

一个区域,如此循环,整个流动区域的速度将大幅降低,并最终影响到其流动的均匀性。但由于边缘距离的存在能有效地消除流动死区,使发生在任意区域的泄漏介质都能快速地扩散,并及时被检测到,故综合考虑边缘

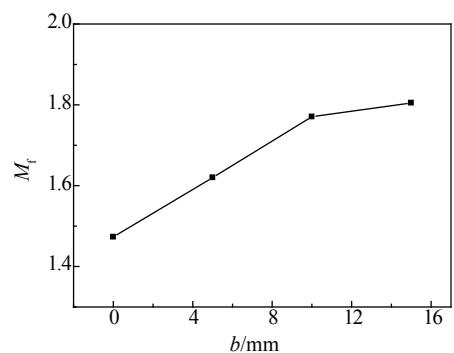


图 9 气体分布不均匀度随边缘距离的变化趋势

距离对流动死区及流动均匀性影响,最终选定边缘距离  $b=5$  mm 的罐底板结构进行后续研究。

### 3.2 罐底板泄漏扩散研究

在罐底板结构优化基础上,进一步对发生在罐底板夹层空间内的泄漏进行数值模拟,分析泄漏位置及吹扫速度对泄漏扩散的影响规律,以更好地指导下一步的试验研究。

#### 3.2.1 泄漏位置的影响

固定泄漏孔半径  $r'=2$  mm 不变,对罐底板夹层空间内流动相对薄弱的区域进行泄漏模拟,以罐底板的中心为坐标原点建立直角坐标系,则泄漏点中心位置分别为:① 钢质圆环内  $(0, 0)$ ;② 钢质圆环外且在圆环附近  $(0, 250)$ ;③ 钢质圆环外且靠近壁面  $(0, 750)$ 。在发生泄漏的初期,泄漏速度往往极小,取 10 g/h 的泄漏速度进行模拟,模拟以惰性气体氮气为吹扫介质,吹扫速度为 1 m/s。查文献可

知<sup>[12]</sup>,油气和氮气的质量扩散系数  $D=0.03\text{ m}^2/\text{h}$   
 $\approx 8.3 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ,油气摩尔质量  $65.52\text{ g/mol}$ 。

图 10 给出了在一定泄漏速度下,罐底夹层空间内三个不同位置发生泄漏时出口体积分数  $\varphi$  随时间  $T$  的变化规律。由图可见,在该种罐底结构内,发生在位置(0,0)处的泄漏,其出口体积分数  $\varphi$  要明显高于其余两个位置,且  $\varphi$  达到稳定的时间也稍长。总体来讲,发生在三个位置的泄漏对夹层出口处体积分数  $\varphi$  总的影响趋势是一致的,即在泄漏初始阶段,  $\varphi$  几乎不随时间  $T$  的增长而增长;随着时间推移,出口体积分数  $\varphi$  迅速增长;当泄漏扩散趋于稳定时,  $\varphi$  不再随时间的变化而变化。

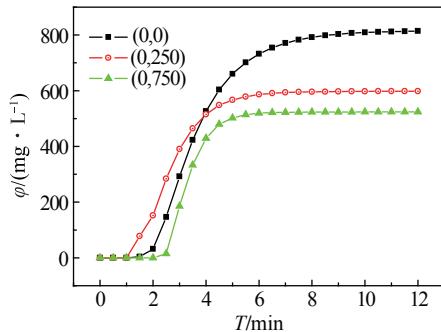


图 10 出口体积分数随时间的变化规律

### 3.2.2 吹扫速度的影响

循环速度大小主要影响氮气与油气之间的传质过程,进而影响出口处扩散介质的出口浓度及扩散达到稳定状态所需的时间。以泄漏位置(0,250)、泄漏速度  $10\text{ g/h}$  为例,分别对吹扫速度  $v=0, 0.5, 1, 1.5, 2\text{ m/s}$  进行模拟,分析吹扫速度对夹层空间出口浓度的影响规律。模拟中以  $30\text{ s}$  为时间间隔进行数据保存,当前后出口体积分数相差小于  $1\text{ mg/L}$  时,认为泄漏扩散达到稳定。

图 11 和 12 分别给出了相同泄漏位置、泄漏速度下,罐底夹层空间内泄漏扩散达到稳定时的出口体积分数  $\varphi$  及达到稳定所需时间  $T$  与吹扫速度  $v$  的关系曲线。由图可见,随着  $v$  的减小,  $\varphi$  呈增大的趋势,且速度越小趋势越明显。同样,时间  $T$  随  $v$  的增大而增大,并在  $v=0$  时达到一个极限。 $v=0$  时,  $\varphi$  取到最大值  $24092\text{ mg/L}$ ,然而泄漏扩散所需的时间也同样达到最大值  $135\text{ min}$ 。

## 4 结论

(1) 采用计算流体力学 CFD 方法,对两种不同罐底板结构的罐底夹层空间进行二维数值模拟。研究发现两种结构具有较类似的流动规律,且都存在

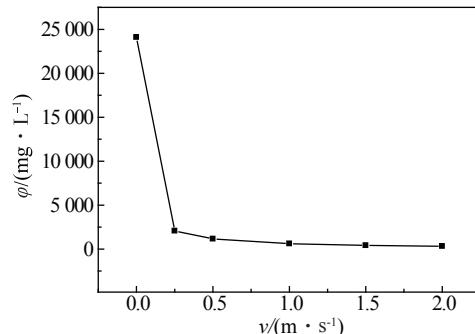


图 11 出口体积分数与吹扫速度的关系曲线

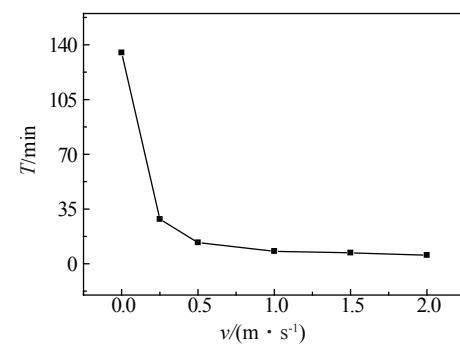


图 12 泄漏扩散达到稳定所需时间与吹扫速度的关系曲线  
 不同程度的流动死区。但由于方案 2 的气体分布不均匀度  $M_{f2}=1.47$  比方案 1 的  $M_{f1}=1.61$  小,即方案 2 具有更好的流动均匀性,因此,选定罐底板结构方案 2 作为基础结构进行优化研究,以得到一种全面考虑流动均匀性及流动死区的结构形式。

(2) 对选定的罐底板结构方案 2 进行结构优化研究,主要是在条型支撑结构与壁面之间预留了一定的边缘距离  $b$ 。研究发现,增设边缘距离  $b$  后在原先的流动死区处产生明显的湍动,且湍动的范围随  $b$  的增大而增大。同样,气体分布不均匀度  $M_f$  随边缘距离  $b$  的增大而增大。故综合考虑边缘距离对流动死区及流动均匀性影响,最终选定边缘距离  $b=5\text{ mm}$  的罐底板结构进行下一步模拟计算。

(3) 在确定罐底板结构的基础上,模拟研究泄漏位置、吹扫速度  $v$  对夹层空间出口浓度的影响规律。结果表明,随着  $v$  的减小,  $\varphi$  和  $T$  都呈增大的趋势,且速度越小趋势越明显。 $v=0$  时,出口体积分数  $\varphi$  及达到稳定所需的时间  $T$  都取到极限值,  $\varphi=24092\text{ mg/L}$ ,  $T=135\text{ min}$ 。

## 参考文献:

- [1] 李一博,孙立瑛,勒世久,等.大型常压储罐底板的声发射在线检测[J].天津大学学报,2008,41(1):11–16.
- [2] 刘志平,康宜华,武新军.储罐底板泄漏检测传感器设

欢迎索取——

# 《2011'中国无损检测年度报告》

——实时记录中国 NDT 技术与行业发展进程

**学术指导:**全国无损检测学会  
 全国无损检测标准化技术委员会  
**策划出版:**《无损检测》编辑部  
**价值呈现:**汇聚精英观点,点评年度热点  
 展示发展进程,引领行业方向  
**出版时间:**2012 年 3 月

## 栏目策划:

- 一 特别策划:NDT 技术
  - 全程保障中国铁路运行安全
- 二 2011'中国 NDT 技术发展年度报告
  - 各类 NDT 技术的研究进展
  - 各行业 NDT 技术的应用进展
  - NDT 仪器设备的发展
- 三 2011'中国 NDT 标准化进程年度报告
  - 2010'中国国家 NDT 标准发展进程
  - 2010'中国行业 NDT 标准发展进程
- 四 2011'中国 NDT 技术服务发展年度报告
- 五 2011'NDT 新设备展示
  - 国内 NDT 新设备展示
  - 国外 NDT 新设备展示
- 六 2011'中国 NDT 专利汇总
- 七 2011'年度人物访谈

## 发行与赠阅:

· 《无损检测》杂志 2012 年度订户免费赠阅  
 注:请在完成邮局订阅程序后,将邮局订单传真至《无损检测》杂志发行中心(Fax:021-65527634),并请在订单上注明您的联系电话和联系人

- 全国无损检测学会理事会成员赠阅
- 全国无损检测标准化技术委员会成员赠阅
- 《无损检测》编辑部专家库专家赠阅
- 2012 年度全国无损检测学会资格考证 3 级班赠阅
  - 2012 年度各行业学会无损检测资格考证 3 级班赠阅
  - 2012 年度各类无损检测技术交流会赠阅
  - 2012 年度各类行业及专业展览会赠阅
  - .....

## 联系方式:

策划出版:《无损检测》编辑部  
 联系人:符艳  
 电话:021-65556775-225  
 E-mail:ndt@mat-test.com

- 计[J]. 无损检测,2004,26(12):612—615.
- [3] 邢菲菲. 储罐罐底腐蚀声发射信号模式识别研究[D]. 天津:天津大学硕士论文,2008.
- [4] Charlton P C, Drury J C. High speed inspection of bulk liquid storage tank floors using the magnetic flux leakage method[J]. British Journal of Non-Destructive Testing, 1993, 35(4):119—172.
- [5] Ron Rials, Ty Hagen. Leak-detection method ensures integrity of double-bottom storage tanks[J]. Oil and Gas Journal, 1994, 92(46):74—80.
- [6] Stephen F, Mcjones. Retrofitting hot service storage tanks with double bottoms and improved cathodic protection[J]. Cathodic & Anodic Protection, 1992(5):25—29.

- [7] Michael B, Surkein, John Collins. Evaluation of galvanic anodes: cathodic protection design for double bottom tanks[J]. Cathodic & Anodic Protection, 1996 (5):25—29.
- [8] API 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage[S].
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [10] 王治华. 受限空间内气体扩散的数值模拟及分析 [D]. 大连:大连理工大学硕士论文,2009.
- [11] 杜明. 双列叶片式气体分布器分布性能及结构研究 [D]. 天津:天津大学硕士论文,2008.
- [12] 黄维秋,钟秦. 非稳态油品蒸发的数值分析 II-数值分析及应用实例[J]. 石油学报(石油加工), 2003, 20 (1):52—57.