

# 圆筒形容器漏磁内检测 ANSYS 仿真分析与试验

戴 光, 孙立强, 杨志军, 崔 巍

(东北石油大学 机械科学与工程学院, 大庆 163318)

**摘 要:** 针对石油化工业圆筒形容器特点, 将漏磁检测应用于圆筒形容器检测上。应用 ANSYS 软件对圆筒形容器漏磁内检测进行仿真分析, 分析了缺陷尺寸、容器壁厚、内、外壁缺陷等影响缺陷漏磁信号的因素; 在此基础上对圆筒形容器漏磁内检测进行试验研究, 对部分分析结果进行试验验证, 验证了有限元分析结果的正确性。

**关键词:** 圆筒形容器; 漏磁; 内检测; ANSYS 仿真; 试验研究

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)03-0025-05

## ANSYS Simulation Analysis and Experiment on Internal Magnetic Flux Leakage Testing of Cylindrical Vessels

DAI Guang, SUN Li-Qiang, YANG Zhi-Jun, CUI Wei

(Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** In view of the petroleum and petrochemical cylindrical vessels characteristics, this article applied the magnetic flux leakage testing to such vessels. The application of ANSYS software simulation for magnetic flux leakage testing of cylindrical vessels was analyzed together with those influencing factors on defects magnetic flux leakage signals, such as the defect size, vessel wall thickness, inside and outside wall defect etc. On the basis of this, experimental studies were carried on cylindrical vessels, which confirmed part of the analysis results and verified the accuracy of finite element analysis.

**Keywords:** Cylindrical vessels; Magnetic flux leakage; Internal detection; ANSYS simulation; Experimental study

目前圆筒形容器的检测方法有射线检测法、超声波检测法、磁粉检测法、磁记忆检测法、渗透检测法等。但是有些圆筒形容器外带保温层, 这使得一些检测方法受到限制, 不能实现对整个容器进行检测。而漏磁检测凭借其特有的优势, 在无损检测领域得到了迅猛的发展。目前我国在漏磁检测方面取得了许多成果, 并应用于立式储罐罐底板检测、管道检测等方面, 但是对于卧式储罐、大直径管道等大直径圆筒形容器的研究还较少<sup>[1]</sup>。笔者结合国内外现有漏磁检测研究进展, 提出圆筒形容器内部漏磁检测方法, 对确定的结构进行了有限元分析, 分析缺陷

漏磁场的分布情况和影响缺陷漏磁场的因素<sup>[2]</sup>, 得出不同深度、直径缺陷、不同容器壁厚和内、外壁缺陷的漏磁场分布曲线。其结论可为后续现场实际操作及定量分析缺陷尺寸提供理论依据。对部分有限元分析结果进行了验证, 验证结果表明, 漏磁检测应用于圆筒形容器内检测是可行的, 检测效果明显。

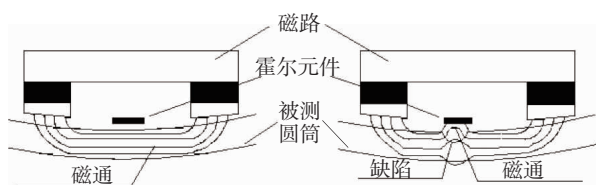
### 1 圆筒形容器漏磁检测原理

漏磁检测是利用材料中存在不连续性造成磁力线发生畸变的磁现象来检测铁磁材料工件表面及近表面缺陷的一种无损检测方法。圆筒形容器漏磁检测基本原理为: 容器壁在外加磁场的作用下被磁化, 若材料中无缺陷时, 磁力线绝大部分通过容器壁, 并在其内部呈均匀分布, 在容器壁表面有很少的或几乎没有漏磁场; 若容器壁存在缺陷, 由缺陷造成的不

收稿日期: 2012-07-30

**作者简介:** 戴 光(1954—), 男, 东北石油大学, 教授, 博士生导师, 长期从事化工机械和无损检测的教学和科研工作。

连续性使磁力线发生畸变,部分磁力线溢出,在缺陷部位形成漏磁场,漏磁原理如图 1 所示。通过采用磁敏元件对缺陷漏磁场进行检测,将磁场信号转换成电信号并进行相应处理,就可以得到缺陷的信息。



(a) 无缺陷 (b) 有缺陷

图 1 圆筒形容器漏磁检测原理图

## 2 ANSYS 软件的 3D 仿真

为研究圆筒形容器缺陷的漏磁场分布情况,取带缺陷的圆筒形容器为研究对象,分析模型主要包括磁铁、衔铁、极靴、带缺陷的容器壁<sup>[3]</sup>。因为此类容器缺陷大多是腐蚀缺陷,因此采用接近腐蚀缺陷形状的圆柱形缺陷作为分析的缺陷类型。根据圆筒形容器内部检测特点,对磁化结构进行了一些改进,把极靴改造成梯形结构,这样能便于周向行走不受阻碍。对设计的模型进行 3D 仿真分析,以管径为 2 m,壁厚为 8 mm 圆筒形容器为例,具体步骤如下。

### 2.1 有限元几何模型建立

由于三维有限元分析计算量较大,为了缩短计算时间,同时又保证一定的计算精度,在满足局部磁化饱和的情况下,对圆筒形容器圆周的 1/12 进行建模分析,模型宽度为 30 mm,这样就在满足分析精度和准确性的前提下大大提高有限元分析的效率。采用实体建模方法建立圆筒形容器漏磁检测有限元分析模型,其结构主要由磁化结构、被测容器壁、容器壁缺陷、空气层等几部分组成,有限元几何模型如图 2 所示。

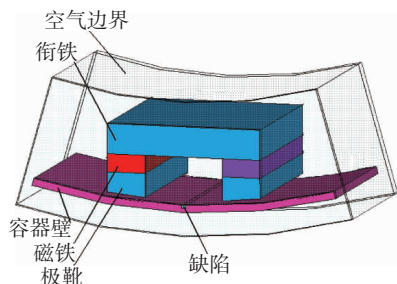


图 2 有限元几何模型

### 2.2 单元类型选择和材料属性定义

3D 静态磁场有限元分析方法包括标量势法和

单元边法,采用单元边法进行分析,定义材料的单元类型为每个单元有 20 个节点的 Solid 117。

每种材料都有其特定的特性,材料特性可以是线性的也可以是非线性的。线性材料通过其相对磁导率  $\mu_{rx}, \mu_{ry}, \mu_{rz}$  来定义,非线性材料则是通过  $B-H$  曲线来描述其导磁特性。现已知:

(1) 空气相对磁导率为 1.0。

(2) 衔铁、极靴和被测容器三者都为非线性材料,需要设置相应的  $B-H$  曲线。

(3) 永磁铁作为整体结构的励磁源,需要根据其励磁方向定义其矫顽力方向和大小。

### 2.3 网格划分

对于有限元分析来说,网格划分是其中最关键的一步,划分的好坏直接影响到解算的精度和速度。在 ANSYS 中,网格划分有三个步骤:定义单元属性、在几何模型上定义网格属性、划分网格。

对于由面经过拖拉、旋转、偏移等方式生成的复杂三维实体而言,可先在原始面上生成壳单元形式的面网格,然后在生成体的同时自动形成三维实体网格;对于已经形成好了的三维复杂实体,如果其在某个方向上的拓扑形式始终保持一致,则可用人工或全自动扫略网格划分(VSWEEP 命令)功能来划分网格;这两种方式形成的单元几乎都是六面体单元。文章采用映射网格划分把模型划分成规则的六面体,可有效控制模型中各部分的网格精度,保证较高的计算精度,图 3 为模型的网格划分结果。

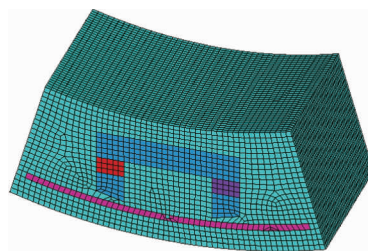


图 3 模型网格划分结果

### 2.4 加载和边界条件定义

模型中载荷是两块永磁铁,故模型无需再进行加载;采用的单元变边法的边界条件只需设置磁力线平行于整体模型表面即可,磁力线垂直边界条件自然满足。

### 2.5 计算求解和后处理

通过软件计算求解,得到计算结果。在 ANSYS 软件的后处理中可以以不同形式得到容器缺陷处漏磁场分布,图 4 为磁场强度等值云图。从图中看出

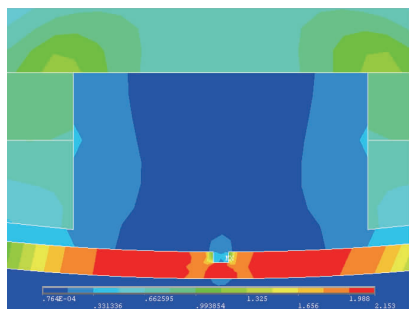


图4 磁场强度等值云图

圆筒壁缺陷处有明显漏磁场产生。

### 3 基于 ANSYS 仿真的圆筒缺陷漏磁信号的影响因素分析<sup>[4-5]</sup>

#### 3.1 缺陷尺寸对漏磁信号的影响

##### 3.1.1 缺陷深度对漏磁信号的影响

为分析缺陷深度对漏磁信号的影响,建立管径为 2 m,壁厚为 8 mm 圆筒形容器内部漏磁检测模型,分别建立直径为 5 mm,深度为壁厚的 20%,40%,60%,80%的圆柱形缺陷,提取路径上的磁场参量,得到相同直径、不同深度缺陷上方距容器壁 1 mm 处的漏磁场水平分量( $B_x$ )与垂直分量( $B_y$ )的分布曲线,如图 5 所示。

从图 5 中漏磁场曲线分布特点可以看出,随着缺陷深度的增加,漏磁场水平分量和垂直分量幅值在一定范围内随着腐蚀缺陷深度的增加近似线性增长。

##### 3.1.2 缺陷直径对漏磁信号的影响

在壁厚为 8 mm 的圆筒上建立缺陷深度为容器壁厚 40%,即 3.2 mm,缺陷直径分别为 4~12 mm 的圆柱形缺陷来分析缺陷直径对漏磁信号的影响。同样提取缺陷上方距容器壁 1 mm 处的漏磁场水平分量( $B_x$ )与垂直分量( $B_y$ )的分布曲线,如图 6 所示。

由图 6 中漏磁场分布曲线可以看出,缺陷漏磁场的水平分量与垂直分量幅值在一定缺陷直径范围内(4~8 mm),随缺陷直径的增大而增大。当直径增加到一定数值时(>8 mm 时),缺陷漏磁场水平分量与垂直分量幅值与缺陷直径呈递减关系;漏磁场垂直分量峰-峰值间距随着缺陷直径的增加而变大。

#### 3.2 容器壁厚对漏磁信号的影响

根据圆筒形容器常用壁厚范围,分别对直径均为 5 mm,深度均为壁厚的 60%的缺陷及壁厚为 4~

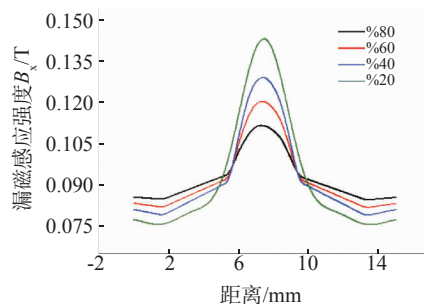
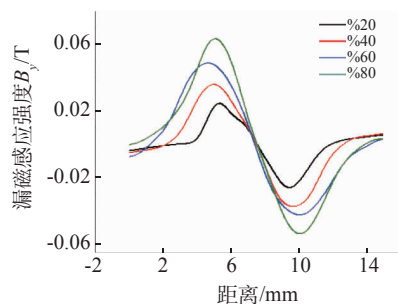
(a) 水平分量  $B_x$ (b) 垂直分量  $B_y$ 

图5 圆筒壁厚 8 mm,直径 5 mm,深度不同缺陷的漏磁场分布曲线

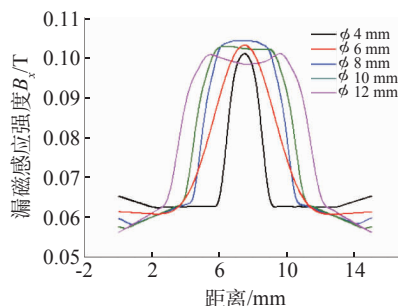
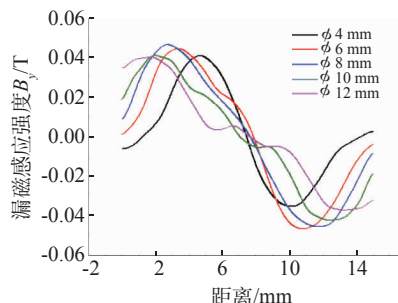
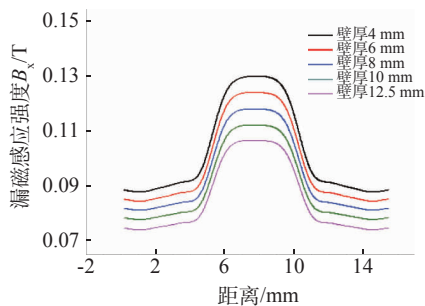
(a) 水平分量  $B_x$ (b) 垂直分量  $B_y$ 

图6 圆筒壁厚 8 mm,深度 3.2 mm 直径不同缺陷的漏磁场分布曲线

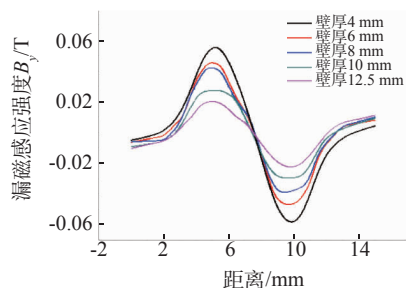
12.5 mm 的容器建立有限元模型进行分析计算,提取磁通路径上的磁场参量,得到相同直径和壁厚减



薄(下称壁减)缺陷上方距容器壁 1 mm 处的缺陷,漏磁场水平分量( $B_x$ )与垂直分量( $B_y$ )的分布曲线。如图 7 所示。



(a) 水平分量  $B_x$



(b) 垂直分量  $B_y$

图 7 不同容器壁厚直径 5 mm 壁减 60%圆筒缺陷的漏磁场分布曲线

从图 7 中曲线分布特点可以看出,随着容器壁厚度的增加,水平分量和垂直分量峰值都成近似线性减小趋势,出现这一现象主要由被测容器壁的磁化饱和和强度不同所致,容器壁厚的增加会导致被测容器壁磁化饱和强度的下降,漏磁信号也就越弱。

### 3.3 内、外壁缺陷对漏磁信号的影响

为分析筒壁内、外壁缺陷对漏磁信号差别,以壁厚 8 mm,直径 2 m 圆筒为研究对象,在内、外壁分别建立两组相同缺陷,直径为 5 mm,深度为壁厚 20%~80%的圆柱形缺陷,在内侧提取筒壁缺陷上方 1 mm 处漏磁场垂直分量进行对比,图 8 是深度 40%壁减的内、外缺陷漏磁场垂直分量曲线;同时为了对比分析,表 1 还给出了不同深度内、外壁缺陷漏磁场垂直分量的峰谷差值。

从图 8 和表 1 中二者的比较来看,外壁缺陷的

表 1 内、外壁不同深度缺陷漏磁场对比

深度 (%壁厚)	垂直分量峰谷差值/T 内壁缺陷	垂直分量峰谷差值/T 外壁缺陷	深度 (%壁厚)	垂直分量峰谷差值/T 内壁缺陷	垂直分量峰谷差值/T 外壁缺陷
20	0.042	0.038	60	0.096	0.093
40	0.068	0.062	80	0.118	0.110

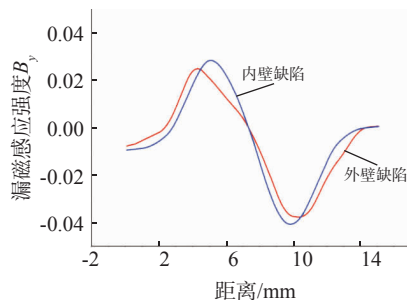


图 8 圆筒壁厚 80 mm,深度 3.2 mm,直径 5 mm 的内、外壁缺陷漏磁场垂直分量分布曲线

漏磁场强度比内壁缺陷漏场磁强度略弱,但信号形状差别并不十分明显。因此在实际检测中,要根据检测圆筒的实际情况,加以分析才能确定是内壁缺陷还是外壁缺陷。

## 4 试验验证

选取 3 块壁厚分别 6,8,10 mm;宽度为 30 mm,直径 2 m 的 16MnR 钢圆筒的一部分作为试件;在圆筒内、外壁分别建立两组相同圆柱形缺陷,缺陷直径均为 8 mm,缺陷深度分别为壁厚的 20%~80%。图 9 为根据有限元分析尺寸加工组装的圆筒形容器漏磁内检测试验设备,分别对制作的几组内、外壁缺陷进行漏磁检测。



图 9 模拟圆筒检测试验

采用 10 个高精度霍尔元件传感器,传感器平行于极靴底面布置,一次扫描直径 100 mm,提离值 1 mm,选用 PCI 总线数据采集卡,动态采集缺陷漏磁场垂直分量及传感器位移信息。

图 10 是对容器壁厚为 8 mm,内壁不同深度圆柱形缺陷的漏磁扫描信号图,从采集的信号图可以看出缺陷信号幅值与缺陷深度在一定范围内呈近似线性关系,这与有限元分析结果一致。

图 11 为壁厚 8 mm 圆筒,缺陷分别分布在容器内、外壁时,扫描得到的单通道检测信号曲线,从曲线可以看出对相同结构尺寸的缺陷,外壁缺陷漏磁

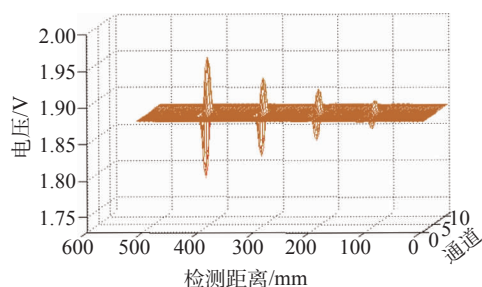


图 10 不同深度圆筒内壁缺陷漏磁信号

信号强度要比内壁缺陷信号强度稍弱,但曲线形状差别不大,这就要求我们在实际检测中结合实际情况加以具体区分。

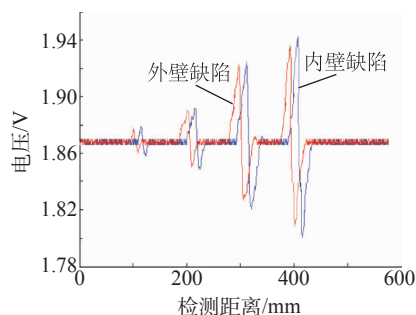


图 11 单通道对内、外壁缺陷检测的信号比较

图 12 是在对容器壁厚分别为 6, 8, 10 mm 圆筒扫描的三组扫描信号中提取的壁减 60% 缺陷的漏磁信号,从信号的对比可以看出,容器壁厚度与缺陷漏磁信号强度都成近似线性减小趋势,这与有限元分析结果一致。

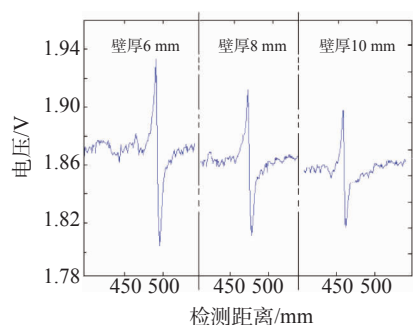


图 12 不同壁厚检测信号对比

## 5 结论

(1) 缺陷的尺寸影响漏磁场分布,在一定范围内漏磁信号强度与缺陷深度成近似线性关系;缺陷漏磁场在一定范围内随缺陷直径的增加而增大,当直径大于 8 mm 时,则呈现出递减的趋势。

(2) 有限元分析和试验研究都表明容器壁厚的

增加会导致被测容器壁磁化饱和强度的下降,一定范围内,缺陷漏磁信号强度随着容器壁厚的增加而近似线性减小,但相同几何参数的缺陷漏磁场分布曲线形状却相似;此次试验的圆筒内检测可实现容器内、外壁缺陷的检测,内、外壁缺陷漏磁信号差别不大,可做进一步分析加以区分。

(3) 试验验证了 ANSYS 仿真分析结果。试验证明圆筒形容器漏磁内检测结果与 ANSYS 仿真分析结果基本相符;经过仿真与试验分析证明本次研究圆筒形容器漏磁内检测效果显著。

## 参考文献:

- [1] 李路明,杨海青,黄松岭,等. 便携式管道漏磁检测系统[J]. 无损检测,2003,25(4):181-183.
- [2] 王贤琴,阮江军,杜志叶. 钢管漏磁探伤中孔洞缺陷的漏磁场分析[J]. 无损检测,2005,27(12):249-241.
- [3] 张国光. 储罐漏磁检测中漏磁信号与缺陷特征关系的研究[J]. 检测与仪表,2008,35(2):39-41.
- [4] 戴光,崔巍,杨志军,等. 基于三维有限元的换热管缺陷漏磁场数值模拟[J]. 压力容器,2009,26(8):21-26.
- [5] 李光海,刘时风,沈功田. 压力容器无损检测—漏磁检测技术[J]. 无损检测,2004,26(12):638-642.



(上接第 8 页)

验,统计出材料在使用过程中的声发射变化规律;发现缺陷扩展的信号特征及典型干扰的信号特征。

将这些分析结果应用于新防喷器强度声发射检测中,结果证明这些分析结果非常准确,对分析疲劳试验有极大的帮助。

## 参考文献:

- [1] 刘时风. 焊接缺陷声发射检测信号谱估计及人工神经网络模式识别研究[D]. 北京:清华大学机械工程系,1996.
- [2] 刘国光,程青珊. 声发射神经网络模式识别[J]. 仪器仪表学报,2003(8):406-407.
- [3] 蒋仕良,董志勇. 碳四球带的在役声发射检测[J]. 无损检测,2002(9):407-409.
- [4] 沈功田,段庆儒,周裕峰,等. 压力容器声发射信号人工神经网络模式识别方法的研究[J]. 无损检测,2001,23(4):144-149.
- [5] 沈功田,李金海. 压力容器无损检测—声发射检测技术[J]. 无损检测,2004,26(9):457-463.
- [6] 宋明大,赵亚凡. 声发射技术在冷库压力容器检验中的应用[J]. 压力容器,2003(11):51-55.
- [7] 朱祥军. 新型防喷器内表面声发射模拟源[J]. 无损检测,2011,33(5):28-31.