

DOI: 10.3901/JME.2009.07.233

# 漏磁与涡流复合探伤时信号产生机理研究\*

宋凯<sup>1,2,3</sup> 康宜华<sup>1,2</sup> 孙燕华<sup>1,2</sup> 武新军<sup>1,2</sup>

- (1. 华中科技大学机械学院 武汉 430074;
2. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074;
3. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

**摘要:** 提出一种直流漏磁和涡流复合探伤方法,以期通过信息融合提高检测灵敏度,但试验中发现涡流探头检测到了钢管的内壁裂纹,而钢管的涡流检测规范也认为信号由涡流效应引起的。采用有限元法和磁源的测试试验分析磁导率和漏磁场对涡流检测信号的影响,结果表明,认为检测信号为涡流效应引起的观点是有误的。应用等效源法对扰动磁场进行分析,理论分析表明,裂纹处由涡流效应引起的扰动磁场相比漏磁效应引起的漏磁场要小得多,裂纹的漏磁场导致检测线圈产生感应电动势从而获得检测信号,而此时涡流效应引起的信号被淹没在漏磁信号中,钢管在磁饱和状态下的涡流检测信号是由裂纹的漏磁场引起的,饱和磁化下铁磁性构件的涡流检测结果要重新认识。

**关键词:** 漏磁检测 涡流检测 磁化 扰动磁场

**中图分类号:** TG115.28

## Study of Signal Mechanism Based on Combining Magnetic Flux Leakage and Eddy Current Testing

SONG Kai<sup>1,2,3</sup> KANG Yihua<sup>1,2</sup> SUN Yanhua<sup>1,2</sup> WU Xinjun<sup>1,2</sup>

- (1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;
2. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;
3. Key Laboratory of Nondestructive Test, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

**Abstract:** In order to improve sensitivity through information fusion technology, a combined DC magnetic flux leakage and eddy current testing method is proposed. Experimental results indicate that the inner wall cracks in the steel pipe are detected by eddy current system. In fact, the dilemma between the experimental signal and skin effect principle is obviously. Two factors including permeability and magnetic flux leakage that have influence on eddy current signal are analyzed with finite element method and verification experiments of magnetic source. So the viewpoint, that the signal of the internal crack is caused by eddy current effect may be erroneous. Perturbed magnetic field is analyzed by using equivalent source method. Theoretical analysis shows that magnetic flux leakage produced by the crack is far stronger than perturbed magnetic field induced by eddy current effect. The induced electromotive force is created by the variation of the magnetic flux within the cross section of the pick-up coil when the probe moves along the steel pipe with a crack. The signal produced by eddy current effect is submerged. Therefore, the signal of eddy current probe is induced by magnetic flux leakage produced by the crack. Eddy current testing results of ferromagnetic materials under saturation magnetization should be reinterpreted.

**Key words:** Magnetic flux leakage testing Eddy current testing Magnetization Perturbed magnetic field

## 0 前言

油管长期使用过程中,由于受到管内外介质的

腐蚀等原因,易产生裂纹、腐蚀和磨损等损伤,从而可能发生漏油现象而导致安全事故<sup>[1]</sup>。管道的定期检测与安全评估对确保其可靠运行、保证采油工作的正常开展具有十分重要的意义。原理上,多种无损检测方法都可使用,但目前漏磁、超声、涡流检测等方法较为常用<sup>[2]</sup>。由于每种方法都有其不足,

\* 国家自然科学基金(50675083)和国家十一五科技支撑(2006BAK02B02-09)资助项目。20080702收到初稿,20090401收到修改稿

为了提高探伤性能,也常采用多种方法交叉复合检测,如漏磁与超声检测、涡流与超声检测等,多种无损检测方法的信息融合技术在应用中取得了一定成果<sup>[3-5]</sup>。为此,提出一种漏磁检测与涡流检测复合的探伤方法,期望涡流检测仅能探知表面或近表面裂纹,漏磁检测可以检测内、外壁裂纹,从而进行信息融合以提高检测灵敏度。但在试验中发现,这两种方法复合探伤时,检测结果并非按单一方法检测原理之想象,涡流探头获取了内壁裂纹的信号。进一步考察钢管的涡流探伤规范,对铁磁性构件探伤时,施加磁饱和技术,认为涡流探头获得的信号是由涡流效应引起的,分析这种说法有误,遂进行了深入的理论和试验研究。

## 1 涡流与漏磁复合检测试验

被检钢管规格为 $\phi 89 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,在钢管内、外壁共制作了两个周向刻槽,用以模拟裂纹,如图 1 所示,长度和宽度均为 $15 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,其中外壁裂纹深度为 $0.5 \text{ mm}$ ;内壁裂纹为内壁开口,其埋藏深度用裂纹根部与管外表面的距离表示,为 $8 \text{ mm}$ 。

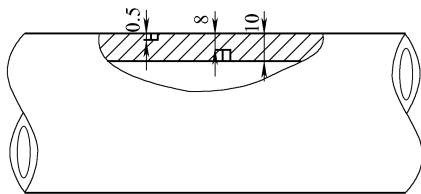
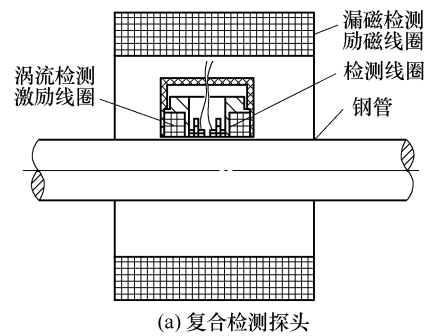


图 1 钢管试件示意图

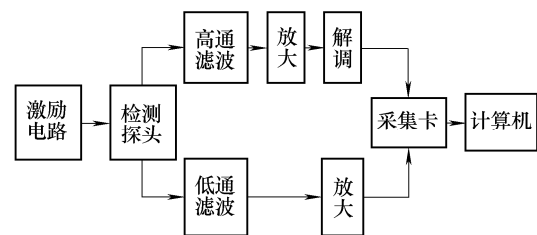
漏磁与涡流复合检测探头如图 2a 所示,由激励线圈部分和检测线圈部分组成。漏磁检测的磁化线圈为 1 200 匝,由直流稳压电源提供励磁电流,可实现 $0 \sim 20 \text{ A}$ 范围内的恒流磁化,满足钢管的饱和磁化要求。涡流检测的激励线圈的漆包线线径 $0.3 \text{ mm}$ ,共绕 400 匝。两个检测线圈差分连接,漆包线线径 $0.03 \text{ mm}$ ,每个为 600 匝,对称置于涡流检测激励线圈中,检测线圈为漏磁检测和涡流检测复用。

检测系统如图 2b 所示,包括激励电路、检测探头、信号调理电路、A/D 采集卡、计算机和信号分析软件等。漏磁励磁线圈通直流电,涡流激励线圈施加一定频率的正弦信号,共同形成复合激励场。线圈获取的信号经过两个独立通道分成低频和高频两个部分,低频部分采用低通滤波器滤除涡流检测的高频载波信号,只允许低频的裂纹漏磁信号通过,后者则相反,采用高通滤波器只允许高频的载波通过,这样就可实现两种方法信号的分离。高频部分经过放大、解调等处理,低频部分经过放大,两个

通道数据可分别采集,也可同时采集,最后由计算机对数字信号分析并记录信号波形。



(a) 复合检测探头



(b) 复合检测信号调理过程

图 2 漏磁与涡流复合检测系统

为进行对比测试,设计了如下复合探伤试验方式:① 仅施加直流励磁,进行漏磁检测;② 仅施加交流信号,进行涡流检测;③ 施加交、直流激励,仅漏磁检测通道采集数据;④ 施加交、直流激励,仅涡流检测通道采集数据;⑤ 施加交、直流激励,涡流和漏磁检测通道同时采集数据。

涡流探头激励频率为 $30 \text{ kHz}$ ,漏磁磁化器施加直流电流 $12 \text{ A}$ ,采用探头固定不动、钢管运动的方式,按照上述复合试验规划分别对内外壁裂纹开展检测,检测结果如表 1 所示。

表 1 复合检测试验结果

激励方式	检测通道	0.5 mm 深的外壁裂纹	埋藏深度 8 mm 的内壁裂纹
直流励磁	漏磁	√	√
交流激励	涡流	√	×
交、直流激励	漏磁	√	√
交、直流激励	涡流	√	√
交、直流激励	漏磁	√	√
(同时采集)	涡流	√	√

注:√表示裂纹可检出,×表示裂纹无法检出。

由表 1 试验结果可知,只加直流激励或交流激励时,复用的检测线圈作为漏磁探头或涡流探头在检测外壁裂纹时,都具有较高的检测灵敏度;当同时加交、直流激励时,线圈采集的信号经过两个独立通道分离后,检测的结果与只进行单一通道检测的结果是一致的,说明检测线圈是可以复用的,且

不影响检测结果。但试验中出乎意料的是，在交、直流同时激励时，内壁裂纹也被涡流探头检测到。

取频率为 30 kHz，磁饱和后磁导率取 1，电导率为  $7.576 \times 10^6 \text{MS/m}$ ，根据趋肤效应原理计算，趋肤深度  $\delta=1.1 \text{ mm}$ ，埋藏深度为 8 mm 的内壁裂纹能够被检测到不符合趋肤效应的计算结果。进一步考察钢管的涡流检测规范，在钢管涡流探伤检验规范<sup>[6-7]</sup>就磁饱和下的涡流检测做了详细规定，承认检测到内部缺陷，但认为检测信号是涡流效应引起，且未解释上述试验与计算不符的现象，而这种检测方法至今仍在工程中广泛使用<sup>[8-9]</sup>。下面对这一问题从机理和试验上进行深入分析。

### 2 外磁场对涡流检测的影响

当涡流探头通以交变信号时，线圈产生交变磁场，其下方导体中引起涡流，涡流产生的磁场反作用于线圈，在线圈上引起感应电动势，使线圈阻抗发生变化。当导体表面或近表面出现缺陷时，将影响到涡流的强度和分布，从而通过线圈的阻抗变化可知缺陷的存在<sup>[10]</sup>。裂纹处磁导率或电导率发生变化，会引起涡流探头的输出，而裂纹的漏磁场在漏磁和涡流的复合探伤中，并不能排除对涡流探头影响的可能性，下面将分述其影响。

#### 2.1 磁导率对检测信号的影响

试件进入磁化线圈的部分处于近饱和区，磁导率会发生变化，其电导率不受影响，从而使涡流探头的灵敏度提高。由于此时裂纹的漏磁场也同时存在，使之无法区分它们对涡流检测信号的影响。为反映单一因素的作用，建立了涡流检测的二维轴对称有限元模型，不考虑漏磁场的影响，仅试件改变磁导率，分析其检测灵敏度，如图 3 所示。

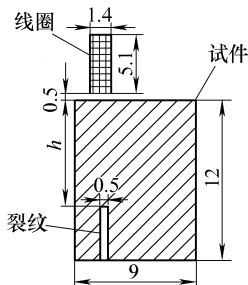


图 3 涡流检测的有限元模型

钢板中内壁裂纹为内壁开口，其埋藏深度用裂纹的根部与试件外表面的距离  $h$  表示。有限元模型参数如表 2 所示。仿真结果如图 4 所示， $\Delta R$  为含内壁裂纹与无裂纹时的线圈阻抗实部差值，仿真结果表明，无论磁导率如何变化，即相当于钢管磁化至

深度饱和时，当内裂纹的埋藏深度为 3 mm 时， $\Delta R$  趋近于零，已经无法检出缺陷，符合涡流检测的趋肤效应原理。表 1 试验的交流激励频率为 30 kHz，与仿真结果相比，检出的裂纹深度应更小，但对钢管实施磁饱和后，埋藏深度为 8 mm 的内壁裂纹却为涡流探头检测到，这说明涡流探头受到了其他因素影响而获得内壁裂纹的信号。

表 2 有限元模型参数

裂纹		激励信号		
宽度 $b/\text{mm}$	埋藏深度 $h/\text{mm}$	电压 $U/\text{V}$	频率 $f/\text{kHz}$	匝数 $N/\text{匝}$
0.5	0.2~3.0	24	10	400

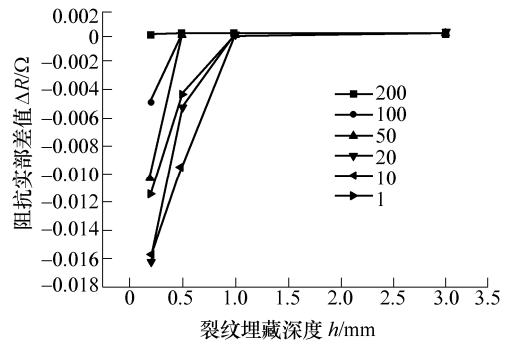


图 4 磁导率对结果的影响

#### 2.2 漏磁场对检测信号的影响

设计如下试验，使涡流探头在一个  $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  钕铁硼永磁体磁极附近扫描，发现涡流仪有信号显示。进一步地考察磁场对信号的影响，在 10 mm 厚的铝板中制作直径为 3, 6 mm 的 6 个小孔，深度分别 3, 5, 7 mm，涡流传感器激励频率 30 kHz，激励电压有效值 24 V。涡流探头置于无孔的一侧，检测各个小孔，如图 5 所示，结果发现各小孔均无法检出。在相应小孔中分别放入  $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  和  $\phi 6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的钕铁硼永磁体，涡流检测的结果如表 3 所示。

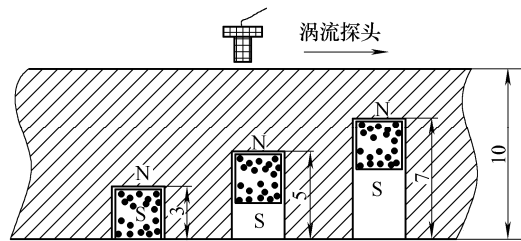


图 5 磁源影响的测试试验

表 3 磁源影响的试验结果

小孔直径 $d/\text{mm}$	小孔深度 $h/\text{mm}$		
	3	5	7
3	×	×	√
6	×	√	√

注：√表示小孔可检出，×表示小孔无法检出。

试验结果说明, 永磁体的磁场对涡流探头有较大影响。涡流探头获取的信号是永磁体的磁场, 而非试件的小孔处的涡流畸变引起的。值得注意的是, 永磁体的磁场梯度变化相比磁饱和时钢管缺陷的漏磁场要平缓的多, 因此实际钢管磁化时, 能对涡流探头产生影响的磁场则小。

利用基于阻抗分析的涡流仪进行了相关试验, 试验结果也同样表明获取的信号为裂纹的漏磁场。

### 2.3 分析与讨论

以上仿真和试验结果表明, 在直流漏磁和涡流检测复合探伤时, 存在两种效应, 即涡流效应和漏磁效应, 并且漏磁效应占据主导地位, 涡流检测系统获取的信号主要为裂纹的漏磁信号。主要原因分析如下。

无直流磁场激励时, 涡流检测导体含有裂纹情况时的场分解为两部分场的迭加: 一为无裂纹时的涡流场, 另一为裂纹存在时产生的扰动磁场。以  $E^u$ 、 $H^u$  表示无裂纹时的涡流场,  $\sigma^u$  表示无裂纹存在时的空间电导率的分布。用  $E^d$ 、 $H^d$  表示裂纹引起的扰动磁场, 则有<sup>[11]</sup>

$$E = E^u + E^d \quad (1)$$

$$H = H^u + H^d \quad (2)$$

忽略低频位移电流, 则试件中含有裂纹时的控制方程为

$$\nabla \times H = \sigma E + J_s \quad (3)$$

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (4)$$

式中  $\sigma$  为含有裂纹时的空间电导率分布,  $J_s$  为线圈电流密度分布,  $\mu$  为磁导率,  $\omega$  为激励电流的角频率。

无裂纹时的场分布的控制方程为

$$\nabla \times H^u = \sigma^u E^u + J_s \quad (5)$$

$$\nabla \times E^u = -j\omega\mu H^u \quad (6)$$

由式(3)–式(5), 式(2)–式(6), 并将式(1)、(2)代入, 则有

$$\nabla \times H^d = \sigma^d E^d + J^d \quad (7)$$

$$\nabla \times E^d = -j\omega\mu H^d \quad (8)$$

式  $J^d = (\sigma - \sigma^u)E^u = \sigma^d E^u$ , 即为扰动场的等效电流密度分布。

式(7)表示把裂纹等效成一个电流源, 裂纹引起的扰动磁场等效成电流源引起的场, 缺陷场实际上是无裂纹时的均匀场和扰动磁场之和, 这是涡流检测等效源法表示之基本原理。在有磁饱和器进行磁化时, 缺陷场的空间磁场既包括涡流激励引起的均匀场和裂纹引起的扰动磁场, 同时还有因裂纹导致的静态漏磁场, 此漏磁场相对于移动的涡流探头, 是一个突变的磁场, 实际上也是个扰动磁场, 按照等效源法也可把该磁场等效成一个电流源, 从而对

检测结果产生影响。从信号传输的角度看, 在缺陷上方, 磁力线畸变, 使得穿过传感器检测线圈的磁通量发生变化。根据法拉第电磁感应定律: 只要穿过回路的磁通量发生变化电路中就会产生感应电动势。依如前所述的涡流检测原理, 这将引起线圈阻抗发生变化。

传感器拾取上述场源的信息, 经过前置放大, 裂纹的漏磁场信号被调制在载波上, 再通过检波电路获取探头的阻抗信号的两个分量或直接获取磁场信息, 信号调理过程如图 6 所示, 因此检测系统就获取了裂纹的漏磁场信号。

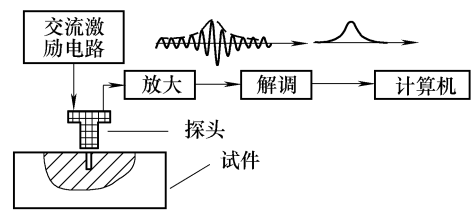


图 6 信号调理过程

在漏磁和涡流复合检测中, 裂纹的漏磁场可分解为与钢管轴向相垂直和平行的两个分量, 裂纹干扰涡流场引起的扰动磁场方向为钢管表面的法向, 同时感应线圈的敏感方向也为法向。根据矢量场线性叠加原理, 在钢管的探伤工作区域内, 漏磁场法向分量与涡流效应引起扰动场在钢管的法向叠加, 其场强的大小为矢量合成的模。涡流效应与漏磁效应相比, 前者的激励场弱而后者很强, 则裂纹由涡流效应引起的磁场变化相比漏磁效应引起的漏磁场要小得多。由于裂纹的漏磁场和涡流效应引起的扰动场都调制在交流激励的载波上, 因而裂纹产生的扰动磁场合成场强中, 裂纹的直流励磁引起的漏磁场占居主导地位。裂纹处的涡流信号和漏磁信号进入信号采集系统后, 作用于检测线圈产生的漏磁效应引起的感应电压要远高于涡流效应引起的感应电压, 涡流效应的信号被淹没于漏磁效应的信号中了, 因此涡流检测系统获取的主要为裂纹的漏磁信号。根据上述分析, 试验中涡流检测系统能检出钢管的内壁裂纹就可以理解了。

## 3 结论

(1) 铁磁性材料磁导率不均匀易对涡流效应产生干扰, 故施加饱和磁化, 以减小磁导率的不均匀。实际应用中又发现, 这一措施使得涡流检测还检测到了内壁缺陷, 因而认为饱和磁化措施很有效。研究发现, 这种理解是错误的。

(2) 仿真和试验结果表明, 在饱和磁化状态下, 即使采用涡流探头, 但检出信号也是漏磁信号。

(3) 涡流检测中的相位、多频等技术已不能再使用和产生实质性效果,因此饱和磁化下涡流检测结果要重新认识。

### 参 考 文 献

- [1] 康宜华, 武新军. 数字化磁性无损检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
KANG Yihua, WU Xinjun. Digital magnetic non-destructive testing technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [2] 徐江, 武新军, 康宜华. 国外油管在线无损检测技术的研究与应用现状[J]. 石油机械, 2006, 34(5): 81-84.  
XU Jiang, WU Xinjun, KANG Yihua. The study and present state of non-destructive testing on-line for foreign oil tube [J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(5): 81-84.
- [3] EDWARDS R S, SOPHIAN A, DIXON S, et al. Data fusion for defect characterization using a dual probe system [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 144(1): 222-228.
- [4] LI C Y, HEINEMANN P, SHERRY R. Neural network and Bayesian network fusion models to fuse electronic nose and surface acoustic wave sensor data for apple defect detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 125(1): 301-310.
- [5] HORN D, MAYO W R. NDE reliability gains from combining eddy-current and ultrasonic testing[J]. NDT & E International, 2000, 33(6): 351-362.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7735-2004 钢管涡流探伤检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration the People's Republic of China. GB/T 7735-2004 Eddy current examination of steel pipes and tubes[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM E309-95(2006) Standard practice for eddy-current examination of steel tubular products using magnetic saturation[S]. ASTM Press, 2006.
- [8] 李富成. 钢管涡流探伤设备的技术改造[J]. 无损检测, 2006, 28(2): 84-85.  
LI Fucheng. Renovation of the eddy current equipment for steel tubes[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(2): 84-85.
- [9] SUKHIKH A V. Application of the magnetic saturation method for eddy-current inspection of spent fuel elements from fast reactors[J]. Atomic Energy, 2007, 102(2): 139-145.
- [10] 任吉林, 林俊明, 高春法, 等. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
REN Jilin, LIN Junming, GAO Chunfa, et al. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [11] 段耀勇, 陈荣华, 盛剑霓, 等. 涡流检测中的微扰模型[J]. 计算物理, 1997, 14(4-5): 693-695.  
DUAN Yaoyong, CHEN Ronghua, SHENG Jianni, et al. Disturbance model for eddy current testing[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1997, 14(4-5): 693-695.

---

作者简介: 宋凯, 男, 1975年出生, 博士研究生。主要研究方向为电磁无损检测技术。

E-mail: songkainiat@tom.com

康宜华(通信作者), 男, 1965年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为无损检测技术及仪器。

E-mail: yhkang@263.net