

交流电磁场检测技术的探头激励装置优化设计

郑文培¹, 苏义脑², 周志雄¹, 方太安¹

(1. 中国石油集团钻井工程技术研究院康布尔公司, 北京 100120;
2. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195)

摘要:利用交流电磁场检测试验台对交流电磁场检测设备的探头激励装置进行优化设计。选取 U 形磁芯结构的激励方式, 对比分析磁芯材料、磁芯结构、激励线圈结构、激励电压等因素对检测效果的影响, 完成激励装置的优化设计。使用设计的激励装置对 4 种尺寸的典型缺陷进行检测, 验证了激励装置的检测效果, 使裂纹检测的分辨率达到 3 cm。

关键词:交流电磁场检测; 激励装置; 优化设计

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2013)06-0044-05

Optimization Design of Alternating Current Field Measurement Inducer

ZHENG Wen-Pei¹, SU Yi-Nao², ZHOU Zhi-Xiong¹, FANG Tai-An¹

(1. CNPC Drilling Research Institute Kembl Petroleum Technology Co, Beijing 100120, China;
2. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China)

Abstract: Optimization design of ACFM inducer is performed by using ACFM experimental platform. The U-shaped core is used to induce magnetic field, and the core material, core structure, induction coil structure and induction voltage is considered to achieve the optimized design of ACFM inducer. By numerous experiments, testing of 4 dimensions of typical defects is performed to verify the testing effect of the optimized ACFM inducer, which provides the technical support of the development of the ACFM apparatus and engineering application.

Keywords: ACFM; Inducer; Optimization Design

交流电磁场检测技术是 20 世纪 80 年代由伦敦大学机械工程系的无损检测中心从交流电压降检测方法发展而来^[1-2]。该技术为非接触式检测, 无须清理被检测表面的油漆、涂层和杂质覆盖物, 检测速度快、操作简单, 降低检测成本, 应用前景良好。目前, 该检测技术分辨率仍有待提高, 裂纹缺陷检测分辨率为 5 mm。笔者利用交流电磁场检测试验台, 通过试验的手段, 优化交流电磁场激励装置设计, 提高交流电磁场检测技术的检测分辨率, 为其应用奠定基础。

收稿日期: 2012-10-08

基金项目: 中国石油天然气集团公司资助项目(2011B-4310); 中国博士后科学基金第 51 批面上资助项目(2012M510482)

作者简介: 郑文培(1981—), 男, 博士后, 主要从事安全检测与监测研究。

1 交流电磁场检测技术原理

交流电磁场检测技术原理如图 1 所示。在交流电磁场激励下, 工件表面产生感应电流, 感应电流生成新的感应磁场。激励磁场和感应磁场平行于缺陷长度方向, 感应电流垂直于缺陷长度方向。当不存在缺陷时, 感应电流在工件表面均匀分布, 电流线平行且密度相同。当工件表面存在如图

图 1 交流电磁场检测技术原理图

所示的缺陷时,感应电流会产生扰动。缺陷中部的电流从缺陷底部流过,造成缺陷中部电流线稀疏,生成的感应磁场(切向)较弱,对应切向磁场的波谷;缺陷边缘的电流产生聚集,电流线密集,生成的感应磁场较强,对应切向磁场的波峰。

电流在缺陷边缘的聚集使电流产生旋转效果,产生垂直于工件表面的法向磁场。缺陷一边的电流发生顺时针旋转,产生负方向的磁场,对应切向磁场的波谷;缺陷另一边的电流发生逆时针旋转,产生正方向的磁场,对应切向磁场的波峰^[3-7]。

2 交流电磁场检测试验台

交流电磁场检测试验台结构如图 2 所示,其中检测探头包括激励装置和磁敏传感器^[8]。

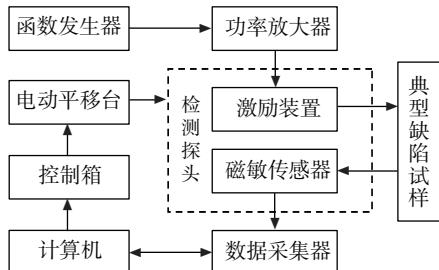


图 2 交流电磁场检测试验台结构图

函数发生器和功率放大器为激励装置提供正弦交变信号,产生交流电磁场;磁敏传感器用于检测交变磁场作用下缺陷试样处的畸变磁场;数据采集器用于将磁敏传感器测量的磁场信号采集到计算机中;典型缺陷试样使用常用结构钢 Q345 材料制作,包含 4 种尺寸规格的半椭圆形缺陷,如图 3 所示;检测探头在电动平移台拖动下实现对典型缺陷试样的检测扫描运动。4 种缺陷尺寸 $l \times w \times h$ 分别为 $4 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, $8 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$, $12 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ 和 $16 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$,图 3 的下图为缺陷的放大示意图。

3 激励装置设计

交流电磁场检测技术的关键是探头激励装置的设计。根据交流电磁场检测技术的原理,激励装置应在工件表面一定区域内形成匀强交变磁场。为实现理想的检测效果,应在限定的探头空间尺寸范围内,实现交变磁场区域和强度的最大化。因此,必须实现激励装置的最优设计。

产生均匀交变磁场的激励方式包括亥姆霍兹线圈,平行线圈对和 U 形磁芯结构等。亥姆霍兹线圈

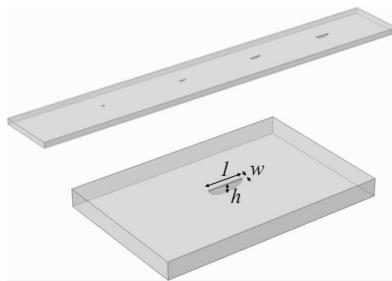
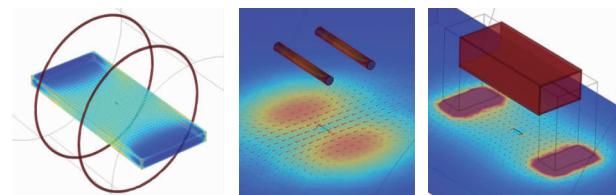


图 3 典型缺陷示意图

可在较大范围内产生匀强交变磁场,但是需将工件置于一对平行亥姆霍兹线圈组成的圆柱体中心,对亥姆霍兹线圈结构尺寸要求较大,而且在被测工件尺寸较大的情况下无法应用;平行线圈对产生的匀强交变磁场提高效应不明显,但是匀强磁场范围狭小,产生的磁场较弱;U 形磁芯结构可形成矩形的匀强磁场区域,而且磁场强度可通过磁芯材料优选,磁芯结构设计,激励线圈结构设计和激励电压优选实现交变磁场强度的最大化。三种激励方式产生交变磁场的示意图如图 4 所示。现选取 U 形磁芯结构作为交流电磁场激励装置的激励方式。



(a) 亥姆霍兹线圈 (b) 平行线圈对 (c) U 形磁芯结构
图 4 三种激励方式产生交变磁场示意图

磁芯材料、磁芯结构、激励线圈结构、激励电压等都对磁场强度有显著的影响。为确定磁芯材料,使用 U100 型结构尺寸,设计了 20 号钢、锰锌铁氧体两种材料的磁芯对其检测效果进行对比;为确定磁芯结构,使用锰锌铁氧体设计了 U20、U60、U100 三种结构尺寸的磁芯对其检测效果进行对比;为确定激励线圈结构,对比分析了单层、多层激励线圈的检测效果;为确定最佳激励电压,使用 U60 磁芯,对比了不同激励电压条件下的检测效果。笔者以缺陷处切向磁场磁感应强度的峰峰值作为衡量指标,通过试验的方法对比分析各影响因素对检测结果的影响,完成激励装置的优化设计。

4 优化结果

4.1 磁芯材料

使用 U100 型磁芯结构,设计 20 号钢、锰锌铁氧体两种材料的磁芯,对比了激励电压峰峰值分别

为 40 V, 60 V 时对 4 号典型缺陷切向磁场的检测效果。绕线直径为 0.5 mm, 激励信号频率为 6 kHz。两种材料切向磁场信号曲线如图 5 所示, 缺陷处切向磁场磁感应强度的峰峰值如表 1 所示。

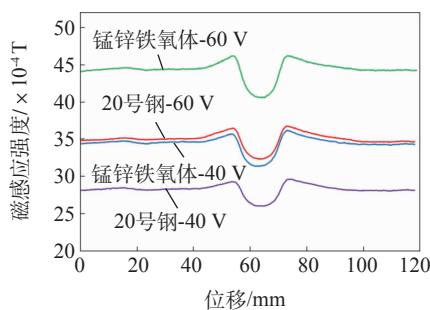


图 5 两种材料切向磁场信号曲线

表 1 两种材料缺陷处切向磁场磁感应强度

材料	电压峰峰值 /V	电流 /A	切向磁感应强度 峰峰值 / $\times 10^{-4}$ T
20 号钢	40	1.95	3.59
锰锌铁氧体	40	1.09	4.84
20 号钢	60	2.67	4.45
锰锌铁氧体	60	1.51	5.61

从检测结果不难看出, 锰锌铁氧体磁芯激励下缺陷处的磁场信号均明显强于 20 号钢磁芯激励的信号。20 号钢磁芯激励线圈的电流明显高于锰锌铁氧体磁芯激励线圈, 这更加说明锰锌铁氧体材料的励磁效果显著优于 20 号钢的。而且试验中发现, 20 号钢有比较严重的发热现象, 而锰锌铁氧体材料发热现象不明显, 这是由于 20 号钢存在较大的涡流损耗。因此, 选取锰锌铁氧体材料为交流电磁场检测激励装置的材料。

4.2 磁芯结构

使用锰锌铁氧体材料设计了 U20、U60、U100 三种结构尺寸的磁芯, 如图 6 所示, 磁芯尺寸为(长×高×宽×厚):20 mm×10 mm×10 mm×5 mm, 60 mm×30 mm×30 mm×10 mm, 100 mm×50 mm×50 mm×10 mm。

使用直径为 0.5 mm 的绕线, 在激励电压峰峰值为 20 V, 频率为 6 kHz 条件下, 对 4 号典型缺陷切向磁场进行了检测。三种尺寸磁芯类型切向磁场信号曲线如图 7 所示, 其电流分别为 2, 1, 0.5 A, 这时对应的缺陷处切向磁场磁感应强度的峰峰值为 3.68×10^{-4} , 4.77×10^{-4} , 2.85×10^{-4} T。

从检测结果可以看到, 在相同激励参数条件下,

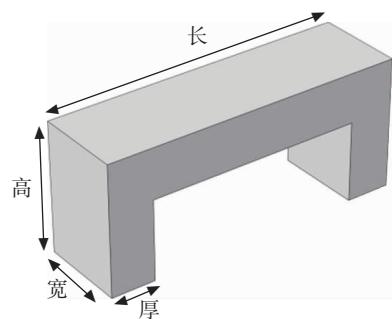


图 6 U5020 型、U50 型磁芯形状

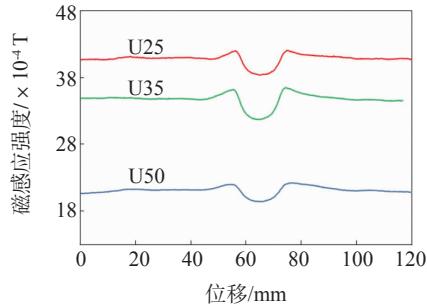


图 7 三种尺寸类型切向磁场信号曲线

U60 磁芯检测效果最佳, 切向磁感应强度达到 4.77×10^{-4} T, 激励电流为 1 A。而 U20 磁芯在电流高达 2 A 的情况下, 缺陷处切向磁感应强度仅为 3.68×10^{-4} T。U100 磁芯缺陷处切向磁感应强度为 2.85×10^{-4} T, 但此时电流很小, 仅为 0.5 A。为验证 U100 磁芯激励电流提高以后的检测效果, 将其激励电流同样提升至 1 A, 缺陷处切向磁感应强度达到 5.33×10^{-4} T, 比 U60 略高, 但此时激励电压峰峰值高达 45 V。而 U60 磁芯在激励电压峰峰值仅为 20 V 的情况下已经达到了理想的检测效果, 选取合适的激励电压可以达到比 U100 更好的检测效果, 因此交流电磁场检测激励装置磁芯结构选择 U60 结构。

4.3 激励线圈结构

用 U100 型锰锌铁氧体磁芯, 用直径为 0.7 mm 的绕线绕制单层、双层激励线圈对 4 号典型缺陷的检测效果进行了对比分析。激励信号频率为 6 kHz, 峰峰值为 40 V。使用 U100 型锰锌铁氧体磁芯检测到的缺陷切向磁场信号曲线如图 8 所示, 在单层线圈 1.89 A 和双层线圈 0.56 A 的电流激励下, 其缺陷处切向磁场磁感应强度的峰峰值分别为 4.82×10^{-4} T 和 2.83×10^{-4} T。

从检测结果可以看到, 单层激励线圈效果较好。这是由于双层绕制线圈由于两层线圈间的邻近效应, 线圈的交流电阻增大, 在相同激励条件下, 激励电流减小, 形成的交变磁场也较弱, 因此缺陷信号较

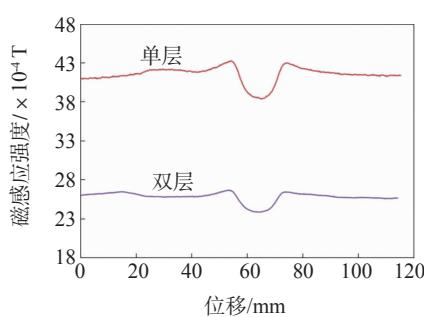


图 8 U100 型锰锌铁氧体磁芯切向磁场信号曲线

弱。尽管双层线圈的匝数是单层的两倍,但匝数增加对检测效果的贡献远远不及邻近效应对检测效果的弱化。由此不难推出,多层线圈的邻近效应更显著,检测效果更差。

4.4 激励电压

使用 U60 磁芯,对比了不同激励电压条件下对 4 号缺陷的检测结果。激励信号频率为 6 kHz。缺陷切向磁场信号曲线如图 9 所示,缺陷处切向磁场磁感应强度的峰峰值如表 2 所示,峰峰值随激励电压变化曲线如图 10 所示。

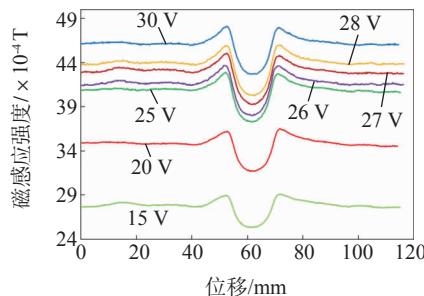


图 9 不同激励电流条件下缺陷切向磁场信号曲线

表 2 不同激励电流条件下缺陷处切向磁场磁感应强度

激励电压峰峰值/V	激励电流/A	切向磁感应强度峰峰值/ $\times 10^{-4}$ T	激励电压峰峰值/V	激励电流/A	切向磁感应强度峰峰值/ $\times 10^{-4}$ T
15	0.74	3.74	27	1.31	5.82
20	0.99	4.77	28	1.35	5.75
25	1.22	5.57	30	1.44	5.42
26	1.26	5.67			

从检测结果可以看到,当激励电压峰峰值小于 27 V 时,缺陷切向磁感应强度随着激励电压的增加而增大;当激励电压峰峰值大于 27 V 时,缺陷切向磁感应强度随着激励电压的增加而减小。这是由于当激励电压峰峰值大于 27 V 时,切向磁场磁感应强度已经接近磁敏传感器的量程 50×10^{-4} T,虽然还

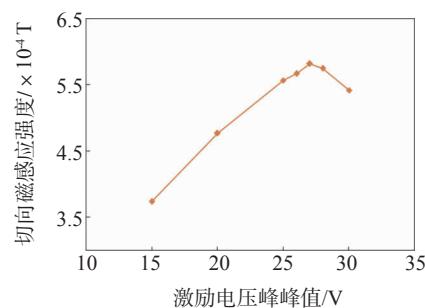


图 10 磁感应强度的峰峰值随激励电压的变化曲线

未超过磁敏传感器的量程,但此时磁敏传感器线性度已经有所降低。因此,U60 激励装置的激励电压峰峰值选取为 27 V。

5 激励装置优化后的检测结果

经上述对比分析,激励装置优化设计如下:选用锰锌铁氧体材料,使用 U60 型磁芯结构尺寸,单层激励线圈,绕线直径为 0.5 mm,激励信号频率为 6 kHz,激励电压峰峰值为 27 V,激励电流为 1.31 A。

使用优化的探头对 1—4 号缺陷的切向磁场和法向磁场进行了检测,检测结果如图 11 所示。

从检测结果可以看到,随着缺陷深度的增大,缺陷切向磁场的峰峰值逐渐增大;随着缺陷长度的增加,缺陷法向磁场波峰与波谷的距离逐渐增大。为验证二者之间的数值关系,对其进行线性拟合。当缺陷深度为 0.8, 1.6, 2.4, 3.2 mm 时,其切向磁场峰峰值为 1.40×10^{-4} , 3.12×10^{-4} , 4.43×10^{-4} , 5.78×10^{-4} T, 缺陷深度与切向磁场峰峰值的线性拟合如图 12 所示。

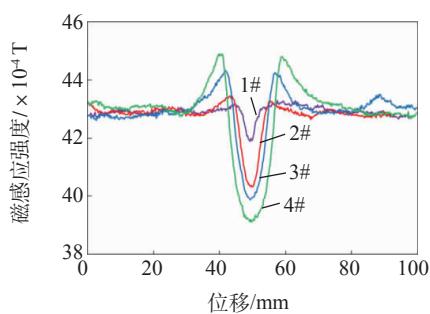
线性拟合结果为: $y = 1.8071x + 0.0687$, 相关系数 $R^2 = 0.9957$, 缺陷深度与切向磁场峰峰值呈现理想的线性关系。

缺陷长度为 4, 8, 12, 16 mm 时,其法向磁场波谷距离为 6.4, 8.4, 11.0, 14.4 mm, 缺陷长度与法向磁场波谷距离的线性拟合如图 13 所示。

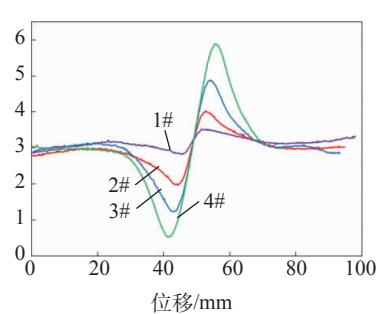
线性拟合结果为: $y = 0.665x + 3.4$, $R^2 = 0.9863$, 缺陷长度与法向磁场峰谷距离也呈现理想的线性关系。

为标定探头对缺陷的检测分辨率,制作了长度分别为 2, 3, 4 mm, 深度分别为 0.4, 0.6, 0.8 mm, 宽度均为 0.2 mm 的半椭圆形微小缺陷试样, 使用设计的检测探头对其进行了检测。检测结果如图 14 所示。

从图中可以看到,探头对长度为 3 mm、4 mm 的缺陷有良好的识别能力,对长度为 2 mm 的缺陷无法有效识别。因此,优化设计后的探头能检测的



(a) 切向磁场



(b) 法向磁场

图 11 1-4 号典型缺陷切向和法向磁场分布曲线

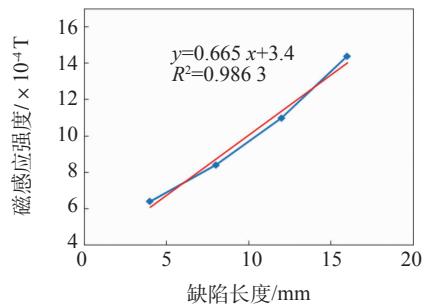


图 13 缺陷长度与法向磁场峰谷距离的线性拟合

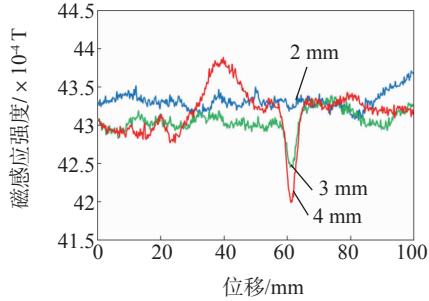


图 4 优化后的探头对微小缺陷的检测结果

最小裂纹长度为 3mm。

6 结论

使用设计的激励装置对 4 种尺寸规格的典型缺陷进行了检测验证,取得了理想的检测效果,裂纹的检测分辨率达到了 3 mm。

参考文献:

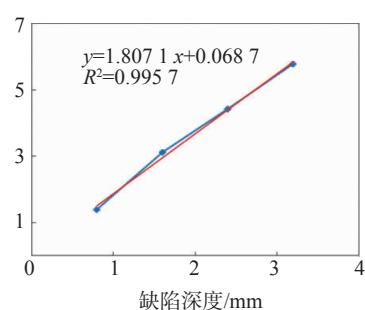
[1] DOVER W D, MONAHAN C C. The measurement of

~~~~~

(上接第 22 页)

[4] 刘竹琴,白泽生. 传感器电路的噪声及其抗干扰技术的研究[J]. 现代电子技术, 2011, 14(34): 161—165

[5] 曾庆勇. 微弱信号检测[M]. 杭州: 浙江大学出版社.

图 12 缺陷深度与切向  
磁场峰峰值的线性拟合

surface breaking cracks by the electrical systems ACPD/ACFM [J]. Fatigue fract. Engng Mater. Struct, 1994, 17 (12): 1485—1492.

- [2] CHEN K, BRENNAN F P, DOVER W D. Thin-skin AC field in anisotropic rectangular bar and ACPD stress measurement [J]. NDT&E International, 2000 (33): 317—323.
- [3] GAYNOR T M, ROBERTS D L, HOMAN E, et al. Reduction in Fatigue Failures Through Crack Detection by Alternating Current Field Measurement [J]. SPE Drilling & Completion, 1997, 12(1): 37—42.
- [4] LeTessier R, COADE R W, GENEVE B. Sizing of cracks using the alternating current field measurement technique [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79: 549—554.
- [5] ZHOU Jian-wei, MARTIN C. LUGG, Roy Collins. A non-uniform model for alternating current field measurement of fatigue cracks in metals [J]. Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics, 1999 (10): 221—235.
- [6] HASANZADEH R P R, SADEGHIS H H, RAVAN M. A fuzzy alignment approach to sizing surface cracks by the AC field Measurement technique [J]. NDT&E International, 2011, 44: 75—83.
- [7] TOPP D, SMITH M. Application of the ACFM inspection method to rail and rail vehicles [J]. Insight, 2005, 47(6): 354—357.
- [8] 郑文培,苏义脑,方太安,等. 基于 LabVIEW 的交流电磁场检测实验台 [J]. 石油机械, 2012, 40(10): 22—25.

1996, 101—109.

- [6] 王忠,林君,吴国强. TEM 接收机低噪声抗饱和前置放大设计 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2002, 20(4): 1—4.