

# 钢管涡流探伤中缺陷信号的相位分辨

林俊明<sup>1</sup>, 赖传理<sup>2</sup>, 任吉林<sup>3</sup>

(1. 爱德森(厦门)电子有限公司, 厦门 361004; 2. 东方锅炉(集团)股份有限公司, 自贡 643001;  
3. 南昌航空大学, 南昌 330063)

**摘要:**钢管在涡流探伤中,过饱和磁化时会出现内外壁缺陷信号相位无法分辨的问题。理论分析及试验表明,钢管涡流探伤存在涡流效应及漏磁效应两种机理,钢管过饱和磁化时由于漏磁效应强于涡流效应,使得缺陷信号相位无法分辨。为使内外壁缺陷信号的相位正常区分,应控制钢管磁化至饱和磁化强度的60%~70%。

**关键词:**涡流检测;钢管;饱和磁化;相位分辨

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2011)01-0002-03

## Phase Distinction in Eddy Current Testing for Steel Tubes

LIN Jun-Ming<sup>1</sup>, LAI Chuan-Li<sup>2</sup>, REN Ji-Lin<sup>3</sup>

(1. Eddysun (Xiamen) Electronic Co Ltd, Xiamen 361004, China;  
2. Dong Fang Boiler Group Co Ltd, Zigong 643001, China;  
3. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** In the eddy current testing for steel tubes, the problem that the phases of defect signals could not be distinguished existed when the magnetization intensity of the tubes was oversaturated. Theoretical analysis and experimental results showed that there were two testing mechanisms in the eddy current testing for steel tubes: eddy current effect and magnetic flux leakage effect. When the magnetization intensity of the tubes was oversaturated, the magnetic flux leakage effect was stronger than eddy current effect and was dominant, which made the phases of defect signals could not be distinguished.

**Keywords:** Eddy current testing; Steel tube; Magnetic saturation; Phase distinction

## 1 问题的引出

涡流无损检测技术在管道的无损探伤中得到了广泛的应用。到目前为止,阻抗分析法是涡流检测中应用最广泛的一种方法。阻抗分析法是以分析涡流效应引起线圈阻抗的变化及其相位变化之间的密切关系为基础,从而鉴别各影响因素效应的一种分析方法。对于管道涡流探伤,一般要求在阻抗平面图上不同种类的缺陷信号(内、外壁缺陷,通孔)之间要有一定的相位差,以便对缺陷种类进行分辨<sup>[1]</sup>。

对于非铁磁性材料的管道,如铜、钛和不锈钢管

的涡流探伤,假设使用外穿过式线圈(如图1所示),探伤结果中管壁上通孔缺陷信号的阻抗平面图形一般设定为与水平轴呈40°的相位差,而内壁缺陷和外壁缺陷信号则一般分别落在40°~170°和0°~40°的相位范围内,如图2所示。如果探伤探头采用内穿过式线圈,则通孔缺陷信号的相位位置不变,而内壁缺陷和外壁缺陷信号的相位位置范围与前述相反。

对铁磁性材料管道(如钢管),参照GB/T 7735—2004《钢管涡流探伤检验方法》进行涡流探伤时,需要对钢管进行饱和磁化。在实际的检测应用中发现,正常的饱和磁化过程中,钢管涡流探伤的各缺陷信号阻抗平面图形的位置分布与图2相似,即不同类型缺陷信号之间相位分辨清楚,可以通过缺

收稿日期: 2010-04-01

作者简介: 林俊明(1956—),男,研究员,全国无损检测学会常务理事,电磁(涡流)专委会主任。

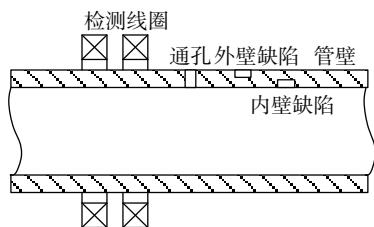


图1 非铁磁性管道探伤示意图(外穿式线圈)

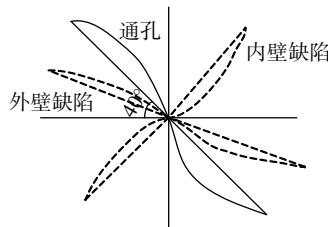


图2 管壁缺陷涡流阻抗平面示意图(内穿式线圈)

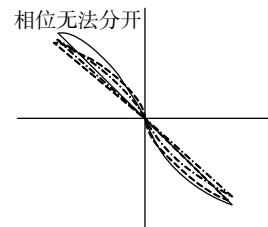


图3 过饱和状态下缺陷信号阻抗平面图

缺陷信号在阻抗平面图中的相位角来判定缺陷的类别。然而,当钢管材料磁化强度过饱和时,涡流探伤结果中的通孔以及内外壁缺陷信号在阻抗平面上相位重叠,没有相位差,相互之间无法分辨,如图3所示,此时与激励频率无关。因而,钢管在过饱和磁化状态下,不能通过相位分辨来对缺陷的类型进行识别。

本文将对上述提及的钢管在过饱和磁化状态下,缺陷检测结果中出现的信号相位无法分辨的问题进行初步分析。

## 2 钢管涡流探伤中的饱和磁化

与非铁磁性管道涡流探伤不同,钢管涡流探伤中通常需要对铁磁性钢管进行饱和磁化。这是由于被检材料磁导率的变化会产生噪声信号,一般来讲,磁噪声对线圈阻抗的影响往往远大于缺陷的影响,为缺陷的检出带来困难。另外,铁磁性金属的集肤效应很强,因而涡流渗入深度很浅,可探伤深度大约只是非铁磁性金属的 $1/100 \sim 1/1000$ 。由此可见,铁磁性金属大而变化的磁导率对探伤而言可视为一种干扰因素。克服铁磁性金属磁导率对探伤影响的方法是对其进行饱和磁化。钢管的涡流检测通常采用的磁饱和装置为通有直流电的线圈,如图4所示。钢管材料经饱和磁化后既消除了磁导率不均匀的现象,也使涡流的透入深度大大增加。经过饱和处理的铁磁性材料可作为非铁磁性材料对待。为了充分利用线圈产生的磁场,磁化装置一般都有铁磁性材料(如纯铁)制作的外壳。由于纯铁的磁导率很大,

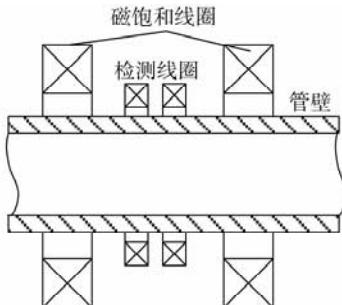


图4 钢管饱和磁化示意图

磁阻很小,这样泄漏在空间中的磁力线会被引导到管道的检测部位<sup>[1]</sup>。

钢管等铁磁材料在外磁化场作用下可被强烈磁化,且存在磁滞的特征,即磁化场作用停止后,材料仍保留磁化状态。用图形表示铁磁物质磁滞现象的曲线称为磁滞回线,如图5所示。

如果将钢管从磁中性状态开始,逐步提高磁化场强度的最大值 $H_m$ 进行磁锻炼,可以得到面积由小到大向外扩张的一簇磁滞回线,如图6所示,这些磁滞回线顶点( $a_1, a_2, a_3, a_4 \dots$ )的连线称为基本磁化曲线<sup>[3]</sup>。

## 3 相位分辨问题的分析与实验

### 3.1 相位分辨问题的机理分析

钢管涡流探伤由于引入了钢管材料的饱和磁化过程,因而检测中的空间磁场状态与非铁磁性材料检测时不相同。事实上,笔者已经在GB/T 7735—2004附录A“涡流检查方法的局限性及其他说明”中指出:“采用磁饱和装置的钢管涡流探伤,存在着两种检测机理,其一是涡流效应,其二是漏磁效应”。这两种效应在检测过程中同时存在,并且随磁化状态的不同,两者所体现的主导地位不同。

对钢管施加饱和磁化,当磁化至合适的强度时,如图6所示的I区,此时管壁中由涡流效应产生的磁场在探头检测线圈中感应的信号强于缺陷漏磁场所引起的信号,即涡流效应在检测结果中占主导地位。因而,检测结果阻抗平面图上的各缺陷信号的

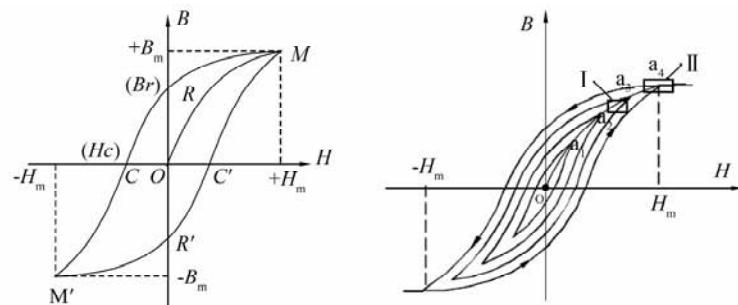


图5 铁磁材料磁滞回线图

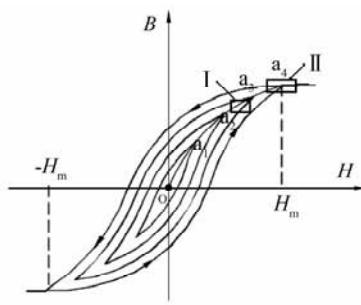


图6 不同退磁位置时的磁滞回线

形式与非铁磁性涡流探伤结果类似,缺陷相位分辨清楚。

如果钢管的磁化强度过饱和,如图 6 所示的 II 区,此时缺陷的漏磁场在探头检测线圈中产生的信号强于涡流效应产生的涡流信号(因为漏磁场是磁化场的一部分,但对于运动的钢管而言,该部分磁通可认为不随时间变化),即漏磁效应在检测线圈中感应的磁场强度占主导地位。虽然此时涡流效应依然存在,但涡流信号湮没在漏磁信号中。由于缺陷的漏磁信号不含有相位信息,因而检测结果阻抗平面上各类缺陷信号混叠在一起,造成信号相位之间无法分辨的问题。事实上,这种状态下阻抗平面上的检测信号结果并非一般所理解的涡流效应的响应信号,而是缺陷的静态漏磁场信号。

### 3.2 钢管饱和磁化过程中的涡流检测试验

为了观察钢管饱和磁化过程中的涡流探伤结果,组建图 7 所示的钢管涡流探伤试验系统。系统采用 EEC-30S 型涡流探伤仪,通过调整直流激励源输入磁饱和线圈中电流的大小,从而控制钢管的磁化强度。需要注意的是,由于磁饱和线圈中的电流很大,会使线圈发热而导致线圈材料电导率变化,因此,直流激励源一般采用恒流源而非恒压源,以保证磁饱和线圈中电流值的稳定,产生稳恒磁化磁场。

试验中在  $\phi 57 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$  标准试件钢管,其上加工有不同的缺陷(通孔、盲孔和人工槽)(如图

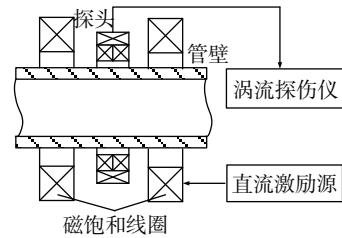


图 7 钢管涡流检测实验示意图

8 所示)。样管上共有六个人工缺陷,分别为  $\phi 1.4 \text{ mm}$  的通孔;  $\phi 2.2 \text{ mm}$  的通孔;  $\phi 2.8 \text{ mm}$  的外表面盲孔,孔深为  $5.4 \text{ mm}$ ;  $\phi 4.8 \text{ mm}$  的外表面盲孔,孔深为  $3.5 \text{ mm}$ ; 外表面半个圆槽,槽深为  $1.1 \text{ mm}$ ; 内表面环形槽,槽深为  $0.5 \text{ mm}$ 。检测时采用内径  $\phi 60 \text{ mm}$  的外穿探头。

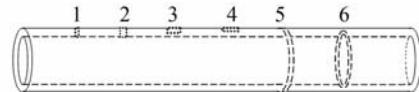


图 8 样管示意图

向磁饱和线圈中施加  $1\sim3\text{A}$  的磁化电流,使钢管处于不同的磁化状态,观察探伤仪上检测结果的阻抗平面图显示。检测结果表明,当电流值接近  $1\text{A}$  时,内外壁缺陷信号的相位可以清楚地分辨,如图 9(a)~(f) 所示。1 号和 2 号通孔缺陷相位分别为  $48^\circ$  和  $40^\circ$ ; 3 号, 4 号和 5 号外表面缺陷相位分别为  $27^\circ$ ,  $15^\circ$  和  $14^\circ$ ; 6 号内表面缺陷的相位为  $154^\circ$ 。此时

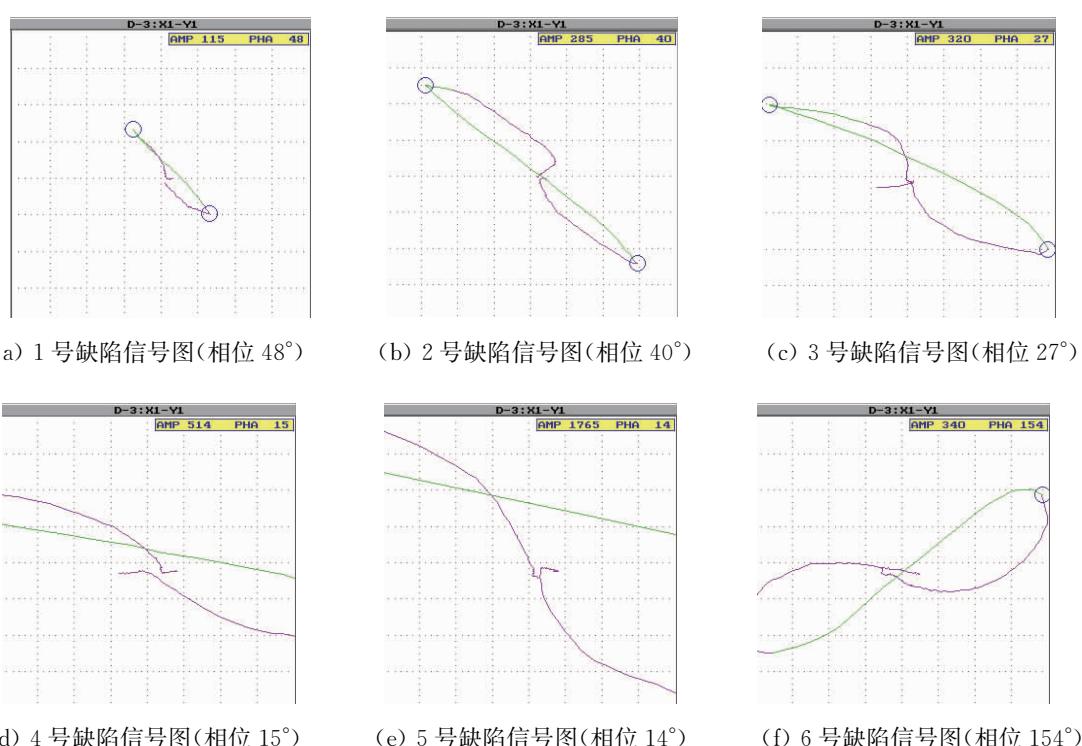


图 9 各人工缺陷的信号图

(下转第 8 页)

模型计算短横孔的最大回波声压,计算结果如图6(b)所示:同深度的短横孔一次回波与二次回波声压相近,最大差值也仅为1.9 dB,这是声束轴线附近反射体的回波信号受管内壁曲率影响较小导致的;在相同声程条件下,短横孔的二次回波声压小于DL-1试块中孔的回波声压,且差值随探头至缺陷距离的增大而增大,其中最大差值达4.2 dB。

### 2.3 球孔的回波信号

假设小径管中分别埋藏5个 $\phi 3$  mm的球孔,孔中心点距探测面为3~11 mm,间隔2 mm,对其进行二次波检测;与一次波检测对比,与图6(a)的试块尺寸相同,球孔中心距离检测面17~25 mm,间隔2 mm,利用UT-CAS计算模型计算球孔的最大回波声压,计算结果如图7所示:同深度球孔的一次回波与二次回波声压相近,最大差值仅为0.1 dB,这同样也是声束轴线附近反射体的回波信号受管内壁曲率影响较小导致的;在相同声程条件下,球孔一次回波声压小于DL-1试块中横孔回波声压,且差值随探头至缺陷距离的增大而增大,最大值达3.3 dB。

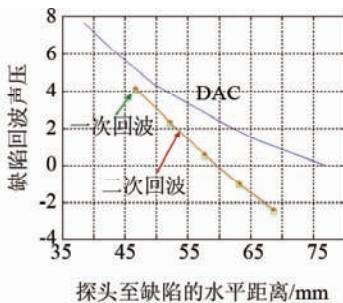


图7 球孔回波声压与DAC曲线的对比

从以上仿真计算的结果及对比,结合实际小径管焊缝二次波检测,可以知道:

(1)小径管内壁曲率对点状缺陷影响小,而对

(上接第4页)

钢管磁化状态处于图6所示的I区,涡流效应占主导地位;当电流值增加至约3A时,内外壁缺陷信号的相位重叠,无法分辨缺陷种类,此时钢管磁化状态处于图6所示的II区,漏磁效应占主导地位。另外,大量的实验以及实践经验表明:当钢管磁化至饱和磁化强度的60%~70%时,涡流探伤效果最佳。

### 4 结语

在钢管涡流探伤中,由于管道磁饱和过程的引入,会在实际的检测过程中出现缺陷信号在阻抗平

条状缺陷影响大。

(2)小径管内壁曲率对焊缝根部条状缺陷的影响较大,而对焊缝表面的条状缺陷的影响较小。

(3)小径管内壁曲率对焊缝根部点状缺陷的影响较小,而对焊缝表面的点状缺陷的影响较大。

### 3 结语

将UT-CAS声场计算模型应用于小径管焊缝二次波检测。计算结果发现,小径管内壁曲率对不同形状和埋藏深度的缺陷检测结果均存在影响,其中点状缺陷的影响较小,条状缺陷的影响较大,其中两种长条状缺陷的回波声压差值最大达7 dB,因此实际小径管焊缝的二次波检测必须考虑管材曲率对回波信号的影响。

### 参考文献:

- [1] Calmon P. Recent development in NDT simulation [C]. WCU2003, Paris, 2003: 443—446.
- [2] Wirdelius H. The application of mathematical modeling of ultrasonic NDT in the qualification process [J]. ECNDT, 1998, 13(11): 1—4.
- [3] Michael Garton. Refining automated ultrasonic inspections with simulation models [EB/OL]. 1997-10/2007-06-08. <http://www.ndt.net/article/garton/garton.htm>.
- [4] 丁辉,张俊,等.超声检测声场计算模型的建立与仿真软件的开发应用[J].无损检测,2009,31(8):614—618.
- [5] Lhemery A. Impulse response method to predict echo responses from defects in solids, Part1, Theory [J]. J. Acoust. Soc. Am, 1995, 98(4): 2197—2208.
- [6] DLT 820—2002 管道焊接接头超声波检验技术规程 [S].

面图上相位无法分辨的问题。实质上,这是由于漏磁效应的作用强于涡流效应的原因。为了更好地进行钢管的涡流探伤,就要避免钢管处于过饱和磁化状态,这对于缺陷的检出至关重要。以上研究内容也可以看成是对GB/T 7735—2004《钢管涡流探伤检验方法》标准的补充说明。

### 参考文献:

- [1] 任吉林,林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 雷银照.电磁场[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [3] GB/T 7735—2004 钢管涡流探伤检验方法[S].