

# 钢管端部交流磁化时的集肤效应

王海峰

(美柯达探伤器材有限公司, 上海 200437)

**摘要:**针对钢管管端以交流线圈纵向磁化方式探伤时内壁周向缺陷难以检出,以及以交流电穿棒周向磁化方式探伤时内、外表面磁探灵敏度差异很大等现象,参照解释交流电磁场集肤效应的方法,建立了两个定性模型进行推导,得到结论:圆筒类工件采用交流线圈纵向磁化时,磁场主要集中在外表面,内壁磁场削弱甚至抵消;采用交流电中心导体法周向磁化时,磁场集中在内、外表面,但两处磁场的强度会有不遵循磁探经验公式的较大的差异。此结论能解释试验现象,有助于对圆筒类工件磁化方法的选择。

**关键词:**磁粉检测;交流电磁场;集肤效应;钢管;圆筒类工件

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2009)03-0195-03

## The Skin Effect Performance in AC Magnetization for End of Steel Tube

WANG Hai-Feng

(Shanghai Marktec Flaw Detection Material Co. Ltd, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** Two qualitative models were established by referring to the method to explain skin effect of alternating current magnetic field. Those models could deduce and interpret the phenomena that longitudinal discontinuities defects in the pipe inner surface which were difficult to disclose when longitudinal magnetization using alternating current coils was carried out, and there was a big difference of sensitivity in inner and outer surface when workpieces were magnetized using central conductor through alternating current. Conclusion was drawn that, when alternating current was passing through the coil, magnetic fields in tube-shaped workpieces were mainly collected in outer surface and that in inner surface were weakened or even counteracted. On the other hand, when the workpiece was magnetized by central conductor through alternating current, magnetic fields were in both sides, but the intensity was different, which appeared not to follow empirical formula. This conclusion could explain experiment phenomenon and help to select magnetization methods to detect tube-shaped workpieces.

**Keywords:** Magnetic particle testing; Alternating current magnetic field; Skin effect; Steel pipe; Tube-shaped workpieces

磁粉探伤是检测铁磁性材料及其制件表面和近表面缺陷的一种有效手段。钢管管端长约400 mm的区域一般采用管端磁粉探伤机进行探伤,采用较多的一种磁化装置是对管端区的内撑杆式穿棒通电周向磁化,及套在管端区的线圈进行纵向磁化。为保证必要的检测速度,一般采用复合磁化方式,以便一次磁化检测出各方向缺陷。为获得复合磁化(磁

场旋转或摆动)的效果,一般采用三种磁化电流类型的组合,即①交流周向磁化-交流纵向磁化。②交流周向磁化-直流纵向磁化。③直流周向磁化-交流纵向磁化。

对于采用内撑杆式穿棒通电周向磁化和线圈纵向磁化装置的管端磁探机,目前在用的国内外设备中,包括钢管类磁探设备著名生产厂商意大利CGM公司的产品,用得较多是直流周向磁化-交流纵向磁化的组合方式。周向磁化选择直流,是因为有实验资料表明,用中心导体法对圆筒件作交流周向磁化

收稿日期:2008-05-21

作者简介:王海峰(1944—),男,高级工程师,长期从事无损检测常规方法应用与设备开发工作。

时,由于感生涡流产生的磁场与中心导体电流产生的磁场的叠加,导致对内外表面轴向缺陷的探伤灵敏度差异很大。因此有些标准和文献提出,用中心导体法对圆筒件作周向磁化时,应尽量用直流电或整流电<sup>[1]</sup>。内撑杆式穿棒通电实际是一种变异的中心导体法,钢管内外表面缺陷发生几率最高的方向正是轧制方向,这就是中心导体法采用直流或整流电的原因。纵向磁化多采用交流线圈,是因为一般都认为由于交流电具有集肤效应,钢管内外壁的磁化场都能得到加强,对内外表面缺陷的检测有利,而且用交流线圈退磁比起直流线圈退磁的装置简便得多,过程快速得多。

但对于此类设备,包括 CGM 公司的类似设备,通过在钢管管端区内壁贴 A 型试片进行试验的结果表明,无论是采取复合磁化方式,还是单独进行纵向磁化,内壁的纵向磁化效果都很差。当外表面上的 A1-30/100 试片的周向缺陷很清楚显示时,内壁上的 A1-60/100 试片的周向缺陷往往不能显示,即使将磁化电流加到设备额定值也如此。

笔者利用电磁学对交流电集肤效应的定性解释方法对此现象进行了讨论。

## 1 交流线圈法纵向磁化的集肤效应

### 1.1 物理模型

物理模型如图 1 所示,图中 1 为纵向磁化交流线圈;2 为交流线圈磁化电流  $I$ ;3 为线圈产生磁场(钢管上感应磁场方向与其相同);4 为钢管截面;5 为钢管上感应电动势  $\epsilon$ ;6 为涡流产生磁场的假设方向(如无相位差);7 为涡流产生磁场实际方向。

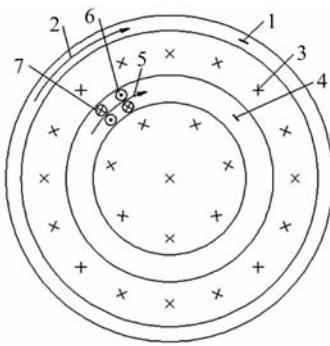


图 1 交流线圈对钢管纵向磁化模型图

### 1.2 分析

(1) 磁化线圈中的交流电流  $I$  在线圈包围区域产生交变磁通  $\Phi$ 。根据毕奥-沙伐尔定律,交变磁通  $\Phi$  与线圈电流  $I$  同相位。因此方向关系可用右手法

则确定。

(2) 钢管包围交变磁通,根据法拉第电磁感应定律,在钢管沿周向产生感生电动势  $\epsilon$ ,根据楞次定律,感生电动势  $\epsilon$  相位落后于线圈产生交变磁通  $\Phi$  的相位  $\pi/2$ 。

(3) 钢管沿周向形成电流回路,由于有电动势,因此可产生电流(即涡流),回路中有阻抗,也有感抗,因此回路中涡流的相位要落后于感生电动势的相位  $0 \sim \pi/2$ 。也即涡流的相位要落后于线圈产生交变磁通的相位  $\pi/2 \sim \pi$ 。

(4) 涡流也要产生磁场,根据毕奥-沙伐尔定律,两者同相位。也即涡流产生磁场的相位要落后于线圈产生交变磁通的相位  $\pi/2 \sim \pi$ 。

(5) 由于两交流量的相位差为  $\pi/2 \sim \pi$ ,说明在每个交变周期中有大半时间两者方向相反,因此须将按右手定则(涡流与线圈磁场同相位)画出的涡流磁场方向倒过来画。

从模型图上不难看出,在钢管外表面涡流磁场与线圈磁场同向,即集肤加强,而在内表面却反向,因而削弱甚至抵消。这也就定性地解释了用交流线圈进行纵向磁化时,钢管管端内壁周向缺陷磁探灵敏度低的原因。

## 2 交流电中心导体法周向磁化的集肤效应

### 2.1 物理模型

物理模型如图 2 所示,图中 1 为中心导体电流在管壁里产生周向磁场的方向;2 为钢管外表面上假设涡流磁场与中心导体电流同相位时的涡流磁场方向;3 为由于有  $\pi/2 \sim \pi$  的相位差,外表面上实际涡流磁场方向;4 为钢管内壁上假设涡流磁场与中心导体电流同相位时的涡流磁场方向;5 为由于有  $\pi/2 \sim \pi$  的相位差,内壁上的实际涡流磁场方向。

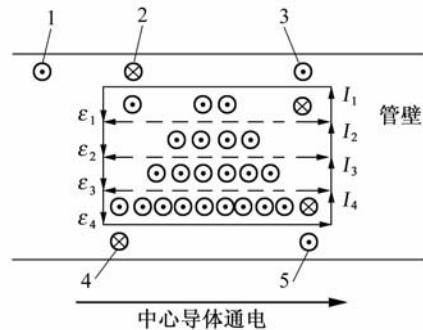


图 2 中心导体交流通电对钢管周向磁化模型图

### 2.2 分析

(1) 中心导体交流传导电流在管壁上产生交变周向磁场,根据毕奥-沙伐尔定律,磁场相位与电流相位相同。以右手定则画之。

(2) 根据安培环路定律,管壁上的磁场强度与距中心导体轴线的距离成反比。因此管壁上的磁通分布不均匀,离内壁越近,磁感应线越密,磁感应强度越大。

(3) 在管壁上由于存在交变磁通,根据法拉第电磁感应定律,围绕交变磁通将产生感生电动势。可以设想沿壁厚方向划分为许多子回路,由于包围的磁通及变化率不同,产生的感生电动势越靠近内壁越大,即  $\epsilon_4 > \epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$ 。根据楞次定律,这些感生电动势的相位落后于中心导体交流电流产生的磁通  $\pi/2$ 。由于分别形成闭合回路,因此形成涡流,且  $I_4 > I_3 > I_2 > I_1$ 。由于每个子回路中既有电阻量,又有电感量,因此这些涡流的相位要落后于感生电动势  $0 \sim \pi/2$ ,也即涡流的相位要落后于中心导体交流电流产生的磁通  $\pi/2 \sim \pi$ 。设想把子回路分得很薄,则每两个回路的交叠部分上的电流正好抵消。

(4) 对于钢管外表面和内壁面上的涡流产生的磁场,根据毕奥-沙伐尔定律,涡流和其产生的磁场两者相位相同。因此涡流产生的磁场的相位要落后于中心导体交流电流产生的磁通  $\pi/2 \sim \pi$ 。这说明两个交流量在每个周期的大部分时间里方向是相反的,因此须将按同相位关系画出的假设涡流磁场的方向反过来。

从模型图上可以看出,在中心导体交流电磁化

(上接第 194 页)

方法,而且原理简单、计算快速,适用于高分辨率图像的处理。

#### 4 结语

提出了一种焊缝 X 射线图像的计算机判读系统,将胶片图像转化为数字图像并把部分基于人眼视觉特性的图像算法用于焊缝图像增强,另外增加了图像数据库存储检索功能。该系统有助于焊缝缺陷的判读和识别。将基于人眼视觉特性的图像处理算法应用到焊缝 X 射线图像是该系统的一大特色。进一步的工作主要集中在算法研究和软件实现。

的情况下,在管壁里产生的涡流引起的磁场,无论是在钢管的外表面,还是内壁面,都与中心导体电流产生的磁化场基本同方向,而在管壁内部,却基本为反方向。说明这种情况下,集肤效应表现为磁场在钢管内、外表面集中与加强。且无论是中心导体电流产生的磁场,还是涡流产生的磁场,都是在管内壁处的要大于在管外表面上的。这两种磁场在两处都是叠加关系,这就解释了为什么当采用交流电中心导体法对钢管等圆筒类工件进行周向磁化时,虽然磁场集肤于内、外表面,但若根据安培环路定律推出的经验公式确定电流(由于管壁薄,接内外径计算结果相差极小),钢管内外表面将有较大检测灵敏度差异。

#### 3 结论

(1) 钢管等圆筒类工件采用交流线圈纵向磁化时,磁场主要集肤于外表面,内壁磁场削弱甚至抵消,影响内壁面周向缺陷的检出。

(2) 钢管等圆筒类工件采用交流电中心导体法周向磁化时,磁场集肤于内、外表面,但两处磁场的强度会有不遵循磁探经验公式的较大的差异。

#### 参考文献:

- [1] 周志伟,郭伟灿,徐立功,等. JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》答疑—磁粉检测部分(Ⅱ)[J]. 无损检测, 2006, 28(8): 431—432.

#### 参考文献:

- [1] 杨乐平,李海涛,赵勇,等. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [2] 王新成. 高级图像处理技术[M]. 北京:中国科学技术出版社,2000.
- [3] 陈光. 焊缝 X 射线数字图像处理及缺陷检测方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2007.
- [4] 朱志刚,译. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,1998.
- [5] 张晓光,林家骏. X 射线检测焊缝的图像处理与缺陷识别[J]. 华东理工大学学报,2004,4(2):199—202.
- [6] 杨词银. 基于人眼视觉特性的数字 X 线医学图像增强方法的研究[D]. 北京:中国科学院,2003.
- [7] 张风超. 医学数字 X 射线图像处理与分析算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2005.