



# 热交换器和锅炉管道缺陷的 电磁声换能器快速定位

## GUIDED WAVES BY EMAT TRANSDUCERS FOR RAPID DEFECT LOCATION ON HEAT EXCHANGER AND BOILER TUBES

M Gori S Giamboni ED Alessio S Ghia F Cernuschi GM Piana

**摘要** 对热交换器和锅炉管道进行在役检测,需高速和高检出率的无损检测技术。介绍一种快速的热交换管( $\phi_{内径}=10\sim 20\text{mm}$ )和锅炉管( $\phi_{外径}=25\sim 100\text{mm}$ )检测及缺陷定位的无损检测方法,该方法基于非接触式的电磁声换能器(EMAT),该换能器能远距离作用并产生水平剪切(SH)导波。

**关键词** 电磁声换能器 导波 管道检测

### 1 引言

热交换器通常用涡流法或漏磁法进行检测,因探头须在管道内推进拉出,故这些方法也要求检测前除去管道内的硬壳/氧化层。对炉管而言,则使用常规压电(PZT)探头,但主要用于测厚。另外,老化管表面有很厚的氧化层,也应在测量前去除。

### 2 系统描述

用电磁声探头产生和探测超声波是基于涡流与静磁场的相互作用。当高频电流通过靠近试样的线圈时,就会在试样表层产生罗伦兹力,引起晶格结构以相同的频率振动,从而产生超声波,因为相反的机制,同一发射设备亦可用作接收器。在非磁性导电材料中(铜、铝等),罗伦兹力是仅有的一种作用机制,而在铁磁材料中(钢、镍、磁性氧化物等),磁致伸缩作用可提供振幅较高的信号和较好的信噪比。

探头和材料之间的电磁相互作用,允许进行无机械接触的测量,允许提离量高达1mm。当在在役零件上操作时,因零件表面可能覆盖着厚而致密的氧化层,此时信号灵敏度可提高20dB,故提离量还能进一步增加。

对电磁声探头作适当设计可产生各种类型的波,某些探头可对热交换器和炉管之类的部件作快速检测。该探头有一个带印制电路的柔性线圈和一个适当的永久磁铁阵列,通过该阵列,能产生频率为250~750kHz脉动于管壁全截面的水平导波。按照

材质衰减和表面状况的差异,在被缺陷反射之前,轴向传播的导波有可能传播若干米,因此,能在远处检测缺陷。若提前标定好声波速度,就能确定反射体的精确位置。由于回波振幅既受缺陷形状/指向性影响,也受材质影响(例如波衰减、粗糙度和氧化层),故只能对缺陷性质和严重程度作出定性评价。

与PZT相比,EMAT的效率较低,为此,研制了具有高灵敏度低噪声放大器和实时平均器的专用电子设备,以增加信噪比。还设计了进行信号控制与数字化处理的专用PC插卡及具备先进功能的适用软件,从而有能力作快速信号分析和高分辨力声时测量。

### 3 热交换管的检测

最近10a(年),实验室和现场检测都使我们对用于热交换管检测的EMAT技术的特点和局限性有了深刻的了解,检测可在管内进行。电磁声探头(图1)产生沿管轴传播的超声波,其结构包括发射线圈和接收线圈,对其中的永久磁铁阵列作适当安排以适应250kHz的工作频率。探头能加工成适应10~15mm直径管道的检测,当然也可以做得更大些,而且不存在任何技术限制。

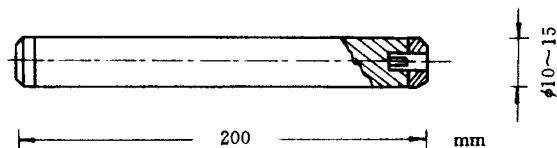


图1 用于检测热交换器管的电磁声换能器

迄今,已检测过意大利电力公司热电厂热交换器上的 5 000 多根管子。这些管子有两个直部和一个 U 型弯部,对直部的检测可使用紧配合插入式探头,对弯部的检测,则将该探头刚好移至弯部过渡线前沿处。包括信号分析在内,每天能检测管子 150 根以上。检测前须对管道进行预清洗。

在检测现场,探头放置于每根管子的端口处并开始获取信号。不管是体积形缺陷,还是表面缺陷都能检测到,包括裂纹、尖锐刻痕、凹坑或夹杂等。灵敏度最好的是周向延伸的尖锐裂纹,可检测的其它缺陷是厚度减小、腐蚀和斑点,特别是带有放射状裂纹的斑点以及孔洞。其中的一例是检测在役 C14 型铁素体钢管,管长 20m(直部+弯部)、壁厚 1.8mm、外径 16mm。如图 2 所示,很多回波产生于管外壁的局部压痕,这些压痕是由于管子与管支架之间的磨损引起的,其它检出的缺陷大部分存在于靠近蒸气入口的管子上。超声和涡流数据的比较说明,它们给出的缺陷位置是一致的。已经证明,由 DAC 程序给出的回波幅度与缺陷大小之间的相关性并不可靠,原因是回波幅度对管子状态,尤其是表面粗糙度和磁性氧化物有很强的依赖性。然而,由于检测速度快,电磁声换能器能迅速检查管子状态,然后再用涡流等其他技术进行局部检测,以评价那些可疑缺陷的深度和严重性。

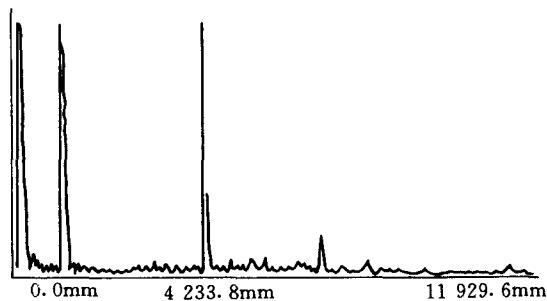


图 2 由管道和管架之间的磨损引起的回波信号

#### 4 锅炉管道的检测

最近,该法也已用于电站锅炉管道(水管、过热管、再热管)的检测。应该为老化部件提供一种快捷的检测方法,因这些部件可能在母体或焊接接头处存在缺陷。EMAT 技术比较灵活,人们可设计适应管道直径 50~100mm、频率范围 250~750kHz 的各种探头。现有探头可使波沿轴向、周向和螺旋形方向传播,因而既能检出纵向缺陷,也能检出横向缺陷。

对炉管样品进行了试验性检测,以深入研究声波的传播和对缺陷的灵敏度。将一套备用新管(外径  $\phi$ 54mm、壁厚 5.6mm、长 5m)加工成带有不同深度

(1~3mm)、不同取向(周向和轴向)、不同位置(外壁和内壁)几何反射体的试管。在无缺陷试管中,轴向波能非常有效地传播,以至于脉冲传播 30 多 m 后仍能被检测到。在有缺陷的试管中,内外表面的缺陷都能被检测到,其平均定位精度为 1%(图 3),此时缺陷离探头几米远,而且与缺陷在圆周线上的位置无关。若产生的水平导波作螺旋线传播,则该探头能检测轴向类的裂纹。将深度为 1mm 的轴向缺陷的反射波与无缺陷时的波形进行比较,即可作出上述评价。对探头位置(包括轴向和周向)的影响也进行了研究。若沿周向发射 SH 导波,就能进行局部检测,从而提供了检测轴向缺陷的附加能力。

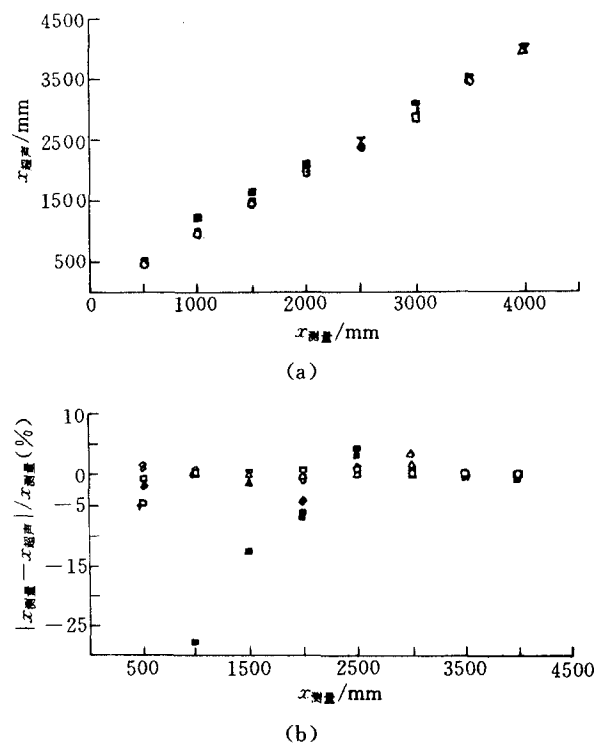


图 3 各类横向缺陷的定位及定位精度

(a) EMAT SH 导波在炉管上的定位数据

(b) EMAT SH 导波对炉管缺陷的定位误差

■ 外壁深 1mm □ 外壁深 2mm ◆ 外壁深 2.5mm  
◇ 外壁深 3mm ▲ 内壁深 1.5mm △ 内壁深 3mm

对 130MW 电站中过热元件上的多相焊缝进行了现场检测。为了分析由铁素体/奥氏体焊缝产生的信号特性,提供信号分析和缺陷检测的参考信息,检测了若干根管材,检测能力得到满意证实,图 4 给出某反射体的超声指示,该反射体已由渗透法检测证实位于焊缝热影响区存在横向裂纹。

#### 5 结论

已研制了一套检测管状元件的 SH 导波超声  
(下转第 41 页)

表 2 铝和铁的散射和光电吸收系数

射线能量 $\epsilon$ MeV	铝 ( $Z=13$ )				铁 ( $Z=26$ )			
	截面/ $10^{-28}\text{m}^2$		衰减/ $\text{cm}^{-1}$		截面/ $10^{-28}\text{m}^2$		衰减/ $\text{cm}^{-1}$	
	散射 $\sigma_{c,a}$	光电 $\tau_a$	$\sigma_c$	$\mu$	散射 $\sigma_{c,a}$	光电 $\tau_a$	$\sigma_c$	$\mu$
0.05	8.70	7.30	0.524	0.964	24	155	2.040	15.2
0.10	6.82	0.78	0.142	0.459	15.4	19.1	1.308	2.93
0.15	5.96	0.20	0.361	0.373	12.3	5.4	1.045	1.54
0.20	5.39	0.08	0.324	0.329	11.3	2.2	0.960	1.15

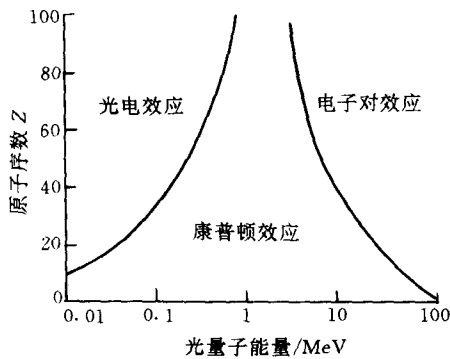


图 2 主要作用和  $\epsilon, Z$  的关系

大于铁<sup>[3]</sup>, 见图 2。

### 2.2 $\sigma_c$ 和射线能量的关系

$\sigma_c$  随射线能量的升高而减小, 大约和射线能量  $\epsilon$  成反比<sup>[2]</sup>。这本属无争议的问题。

但由于一些教材对  $\sigma_c$  和  $\epsilon$  的关系, 与康普顿效应为主要作用(即  $\sigma_c/\mu \geq 50\%$ )和  $\epsilon$  的关系混淆了, 所以只能含糊其词地说“康普顿效应发生的可能性与入射光量子的能量有关”“对中等能量的光子,

康普顿效应对各种元素都是主要作用”<sup>[1]</sup>。

### 3 结论

(1) 当入射光子的能量远大于物质原子 K 壳层电子的结合能时, 物质原子的所有壳层电子(轨道电子)都可能与光子作用, 产生康普顿效应。

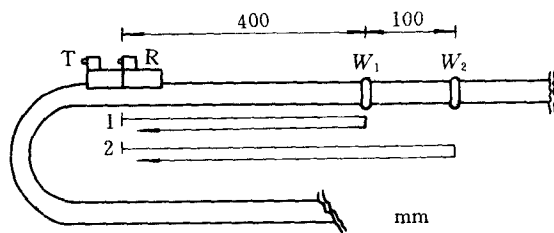
(2) 康普顿散射的线衰减系数  $\sigma_c$  大约与物质的原子序数  $Z$  成正比, 与射线能量  $\epsilon$  成反比。

### 参 考 文 献

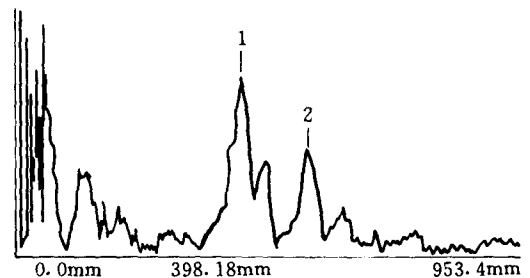
- 1 中国无损检测学会和航空航天无损检测人员资格鉴定委员会编. 射线检测. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- 2 美国无损检测学会编. 美国无损检测手册译审委员会译. 美国无损检测手册·射线卷. 上海: 世界图书出版公司, 1992.
- 3 日本无损检测学会编. 李衍译. 射线探伤 B. 北京: 机械工业出版社, 1990.

收稿日期: 1997-05-26

(上接第 38 页)



(a) 管道探测示意图



(b) 反射体波形图

图 4 来自过热元件热影响区横向裂纹的回波

EMAT 系统, 可根据管子形状设计不同探头, 以检测横向或纵向缺陷, 检测操作可从管子的内表面或外表面进行。

实验性检测已使我们对该技术的能力和局限性有了深入的了解。在热交换器和过热管上进行的现

场检测证实了对自然缺陷进行远距离检测和定位的能力, 不过, 自然缺陷的最小深度应有 1mm 左右。

彭应秋译自 Ultrasonics 34 卷(1996)p. 311-314

收稿日期: 1997-09-24