

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.04.013

# 电磁超声检测中高温对横波声速的影响

虞雪芬, 叶凌伟, 夏立

(浙江省特种设备检验研究院, 浙江 杭州 310020)

**摘要:**针对高温蒸气管线常规方法无法在线检测的问题,采用电磁超声(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)技术高温测厚。讨论在25~400℃温度下,通过EMAT测厚仪测定不同温度及厚度下试板的壁厚,计算各温度下的横波声速,得到Q345R材料的横波声速随温度的变化规律,用以修正不同温度下EMAT实际测厚值。结果表明EMAT技术能够满足高温主蒸气管网的在线检测。

**关键词:**在线检测;高温测厚;横波声速;蒸气管线;电磁超声(EMAT)

中图分类号:TQ053 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)04-0054-03

## Influence of High Temperature on Shear Wave Velocity of EMAT Testing

YU Xuefen, YE Lingwei, XIA Li

(Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that steam pipe line can't be measured on line with conventional method, the Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) technology was adopted to measure the thickness under high temperature. Under 25~400℃, the thickness of sample plate was measured under different temperature and thickness by EMAT thickness gauge, shear wave velocity was calculated, and the change rule of shear wave velocity of Q345R material with temperature was obtained, which is used to correct the actual thickness value of EMAT at different temperature. The result shows EMAT can satisfy online detection of steam piping at high temperature.

**Key words:** on line inspection; high temperature thickness measurement; shear wave velocity; steam pipe line; Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT)

近年来,我国石化、造纸、食品等行业得到了快速发展,设备逐步向大型化高速化发展。作为配套产品的高温主蒸气管网也进行了大量的建设。然而由于设备运行周期长以及装置检修安排的错时性特点,高温主蒸气管网往往无法停车进行检验;同时国内许多企业的高温蒸气管网中的一部分服役较早的管线很少检验,有些甚至没有检验过。面临这些情况,研究和发 展高温蒸气管网在线监测技术已成为确保蒸气管网安全有效运行的必然要求。然而由于高温蒸气管网温度较高(>400℃),常规压电式超声测厚仪、探伤仪无法在该温度下应用。电磁超声技术(EMAT)是近年来发展迅速的检测方法,EMAT技术采用数字式,属于非接触超声检测,检测温度最高可达500℃,能激发各种类型的超声波,已经广泛地应用在各种锻件、钢板、钢管的手动、半自动和全自动无损检测中<sup>[1]</sup>。

目前合肥通用机械研究院和大庆石油学院在高温状态下的无损检测技术的研究较多。关卫和<sup>[2]</sup>,梁宏宝等人<sup>[3-5]</sup>通过试验分析在常温至250℃范围内,测定了随温度变化压力容器和压力管道中碳钢的横波声速的变化规律。他们均采用高温测厚探头,选用相应的高温耦合剂,测试了人工反射体的回波位置随温度变化的情况,给出了由于温度变化产生测量误差的修正方法;测量了常温至250℃范围内低碳钢的超声横波衰减系数,取得了一定的研究成果<sup>[6-7]</sup>,但上述技术还无法应用于主蒸气管网的在线检测。超声波横波速度的测量,对高温测厚起着决定性的作用。电磁超声发射出的横波超声并不是单一频率的横波,是各种横波叠加而成的波束。本文使用美国某公司的电磁超声仪,以Q345R材料为对象,测量并分析在蒸气管线正常使用温度(20~400℃)范围时,EMAT横波声速与

收稿日期:2014-11-14;修回日期:2015-03-27

作者简介:虞雪芬(1969),女,浙江杭州人,高级工程师,主要从事压力容器检验方面的工作。E-mail:zjtjyxf@163.com

材料温度的关系,为高温主蒸气管网在线状态监测技术研究提供实践经验和数据资源。

### 1 电磁超声在高温测厚上的应用

图1是电磁超声壁厚检测原理图。对换能器的高频发射线圈通较大的脉冲电压,使之在铁磁材料内感应出涡流,并在偏置磁场的的作用下,材料体内激发出频率相同的电磁超声波,通常为传播方向与振动方向相互垂直的横波。在铁磁材料边界面上电磁超声的透射能力低,所以材料内的电磁声可以多次在工件体内来回反射,回波被放置在金属材料上的线圈所接收,则超声波往返在工件中传播的时间即为2个回波信号的时间差<sup>[8]</sup>。

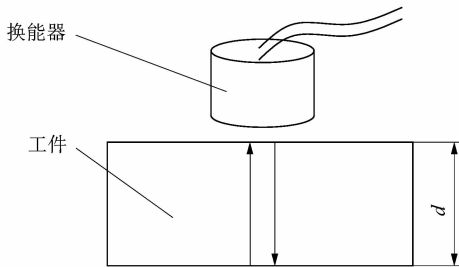


图1 电磁超声测厚图(EMAT)

Figure 1 EMAT thickness measuring diagram

应用电磁超声可以对高温、危险区域、表面粗糙、表面有锈垢和油漆层的管线直接进行检测,不需要耦合剂,尤其适用于高温、高压管道壁厚的在线测量<sup>[9]</sup>。EMAT检测技术采用非接触式检测,很好地克服压电超声的缺点,能解决板材、管材的自动测厚问题。

### 2 温度对超声波横波声速的影响

据理论计算表明,金属材料中的声速是随温度的升高而降低的,考虑材料是各向同性的传声介质时,其声速计算公式表示如下:

$$c = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

式中: $G$ 为刚性模量(称剪切弹性模量), $\rho$ 为密度, $E$ 为弹性模量, $\mu$ 为泊松比。从公式(1)可知,声速 $c$ 与密度 $\rho$ 、弹性模量 $E$ 、泊松比 $\mu$ 相关,而这些参数随着温度的变化而变化<sup>[10]</sup>。

### 3 实验测试

在EMAT高温测厚时,影响检测灵敏度的因素包括:材质随温度的变化、试块温度非均匀性、热膨胀以及仪器闸门的调节等。为表述方便,本实验忽略这些因素对测量的影响。

#### 3.1 实验条件

采用的仪器有高功率手持式电磁超声仪器、手持式激光测温仪和电加热炉。材料为Q345R,厚度规格为6,

10,12,14和20 mm的试板。实验现场如图2所示。

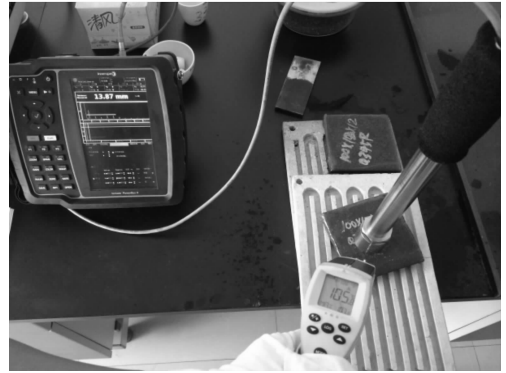


图2 现场试验

Figure 2 Field experiment

### 3.2 实验过程

通过电加热炉对试板进行加热,将加热后的高温试板放在瓷板上,用电磁超声仪器进行测厚,同时用激光测温仪测量试板的温度,试板每下降一定温度测量其厚度。电磁超声仪器设置的声速为3 152 m/s。

### 4 实验结果和数据处理

用电磁超声仪器测得各温度下的厚度见表1。

表1 各温度下电磁超声仪器所测得的厚度值和声速值

Table 1 Thickness value and sound velocity of EMAT at different temperature

温度/℃	厚度/mm	声速/ (m · s <sup>-1</sup> )	温度/℃	厚度/mm	声速/ (m · s <sup>-1</sup> )
25	10.02	3 164.6	250	10.42	3 043.1
108	10.17	3 117.9	264	10.44	3 037.3
153	10.25	3 093.6	300	10.61	2 988.6
200	10.31	3 075.6			

由表1可知,随着试样温度的上升,EMAT测厚值增大。300℃时的厚度值与25℃时的厚度值相比,其值相差近0.6 mm,超过了基准值的5%。所以在高温检测时不能采用常温时声速,必须修正。

10 mm试板游标卡尺实测厚度为10.06 mm,电磁超声常温实测值为10.02 mm,验证了EMAT技术在常温下的准确性。电磁超声仪器声速初设值为3 152 m/s,厚度值为声速乘以超声通过试板的时间。设 $a$ 温度下的材料的声速为 $c_a$ ,通过试板的时间为 $t_a$ ,则

$$c_a \times t_a = 10.06 \times 10^{-3} \quad (2)$$

在常温25℃测得的厚度值为10.02 mm,即

$$3\ 152 \times t_a = 10.02 \times 10^{-3} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)消去 $t_a$ ,得

$$c_a = 3\ 152 \times \frac{10.06}{10.02} = 3\ 164.6 \text{ m/s.}$$

同理可得各温度下的横波声速  $c_a$ , 其计算结果见表 1。

其他厚度试板的横波声速随温度变化的试验曲线见图 3。

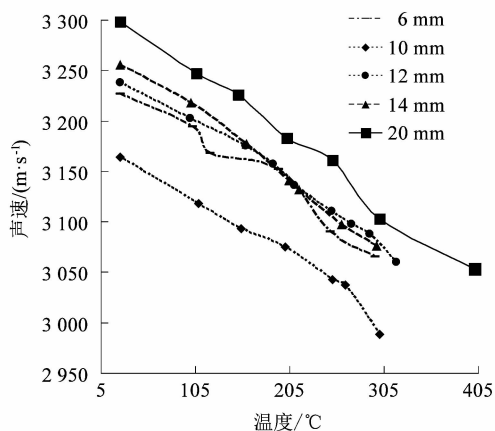


图 3 随温度变化横波声速的试验曲线

Figure 3 Test curve of shear wave velocity with the change of temperature

## 5 分析讨论

由图 3 的整体数据可知, EMAT 的横波声速呈直线衰减, 可采用拟合直线来揭示 EMAT 声速随温度变化的规律。一般情况下, 直线拟合规律可以完全满足工程上的要求。利用线性回归方程进行拟合, 得到厚度为 20 mm 试板的直线拟合方程, 即  $v = -0.726 3 \Delta t + 3 323.2$ 。其中  $v$  为横波声速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\Delta t$  表示温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。如图 4 所示。其横波声速随温度变化率为  $0.726 3 \text{ m}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。同理得到其他厚度试板的声速随温度变化率, 如表 2 所示。

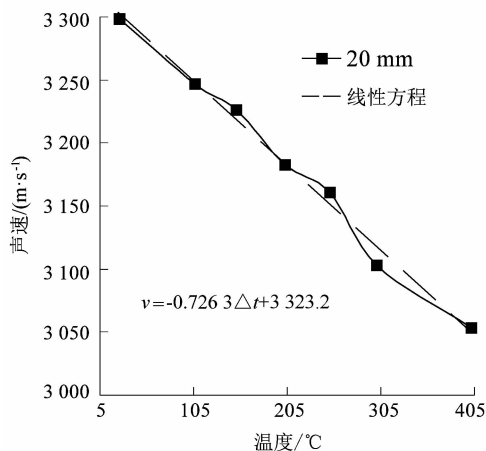


图 4 EMAT 横波声速与温度的关系

Figure 4 Relationship between shear wave velocity and temperature

表 2 各厚度的 EMAT 横波声速随温度变化率

Table 2 Change rate of shear wave velocity with temperature

厚度/mm	变化率/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	厚度/mm	变化率/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
6	0.653 4	14	0.739 9
10	0.636 6	20	0.726 3
12	0.656 4		

由表 2 可知, 由于不同厚度下温度分布的不同, 及影响实验的各个因素, 不同厚度试板所得的横波声速随温度变化率略有不同。为了得到工程上 Q345R 材料横波声速随温度变化的规律, 将 5 块试板的数据取平均值, 为  $0.682 5 \text{ m}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。这样在已知一个温度下的 EMAT 横波声速, 就可以计算出各个温度下的横波声速。

## 6 结语

电磁超声作为无损检测新技术, 具备了传统超声检验的全部优势, 可以对高温、危险区域、表面粗糙、表面有锈垢和油漆层的管线直接进行检测, 尤其适合高温主蒸气管网的在线检测。本文通过实验验证了 EMAT 技术在常温测量时的准确性; 得到在  $25 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  范围变化内, EMAT 横波在 Q345R 钢内的传播速度值, 按其趋势拟合了 EMAT 横波声速随温度变化规律关系式。不同厚度试板所得的 EMAT 横波声速随温度变化率略有不同, 其平均值为  $0.682 5 \text{ m}/(\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 用以修正 Q345R 材料不同温度下 EMAT 横波声速的实际值, 解决目前 EMAT 技术在主蒸气管线高温在线检测应用上急需解决的问题。

## 参考文献:

- [1] 林乃昌. 基于变型波的超声 TOFD 近表面检测新方法[J]. 机电工程, 2013, 30(8): 967-970.
- [2] 关卫和, 艾志斌, 阎厂周. 承压设备基于风险检验的无损检测技术[J]. 压力容器, 2010, 27(4): 47-50.
- [3] 梁宏宝, 朱安庆, 李子芳. 温度对超声波在 16MnR 钢中传播速度的影响[J]. 化工机械, 2007, 34(3): 134-137.
- [4] 朱安庆. 高压压力容器超声波检测关键技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008: 19-22.
- [5] 梁宏宝, 朱安庆. 高温超声横波波速规律与影响因素研究[J]. 机械设计与制造, 2007(8): 27-29.
- [6] 关卫和, 阎长周, 陈文虎, 等. 高温环境下超声波横波检测技术[J]. 压力容器, 2004, 21(2): 4-6.
- [7] 关卫和. 高温环境下压力容器与管道超声横波检测方法研究及影响因素分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 17-25.
- [8] 任晓可. 电磁超声技术在钢板缺陷检测中的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 4-5.
- [9] 齐水宝, 高会栋, 徐延稳, 等. 电磁超声高温测厚原理及应用案例[J]. 远东无损检测新技术论坛论文集精选, 2013, 35(12): 53-57.
- [10] 陈世涛, 徐志东. 金属材料中声速随温度变化规律的探讨[J]. 数学·力学·物理学·高新技术研究进展, 2006(11): 327-329.