

# 兰姆波在检测锅炉受热面管中的应用

彭碧草<sup>1,2</sup>, 龙毅<sup>1,2</sup>, 周梦保<sup>2,3</sup>, 何朋非<sup>2,3</sup>, 曹智<sup>2,3</sup>, 王泽湘<sup>2,3</sup>

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007;

2. 湖南省湘电锅炉压力容器检验中心有限公司, 长沙 410004;

3. 湖南省湘电试验研究院有限公司, 长沙 410004)

**摘要:**为提高火电厂锅炉受热面管检测的可靠性和效率,研究了针对受热面管吹损的超声兰姆波检测技术。以4.00 mm壁厚的管材为例,通过求解频散方程,分析了兰姆波传播的频散特性。结果表明:声束入射角为 $35.2^\circ$ ,激励频率为500 kHz时,对于未发生吹损的管材,S0和A0模态的端面回波在时间域上会连续叠加;对于发生吹损的管材,S0和A0模态的端面回波在时间域上存在间隔,通过时间间隔可判断吹损程度。试验结果为火电厂锅炉受热面管的检测提供了一种高效高精度的无损检测方法。

**关键词:**兰姆波;锅炉受热面管;吹损;频散分析

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2017)10-0064-04

## Application of Lamb Wave in Detecting Boiler Heating Surfaces

PENG Bicao<sup>1,2</sup>, LONG Yi<sup>1,2</sup>, ZHOU Mengbao<sup>2,3</sup>, HE Pengfei<sup>2,3</sup>, CAO Zhi<sup>2,3</sup>, WANG Zexiang<sup>2,3</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Research Institute, Changsha 410007, China;

2. Hunan Xiangdian Boiler Pressure Inspection Center Co., Ltd., Changsha 410004, China;

3. Hunan Xiangdian Boiler Test Research Institute Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** To increase the reliability and efficiency of ultrasonic inspection for the boiler heating surfaces, the ultrasonic lamb waves and their applications to the blowing inspection of blowing damages of heating surfaces were studied. The dispersion characteristics of lamb waves were analyzed by solving the dispersion equations in the pipes with a thickness of 4.00mm. The results showed that the echoes of S0 and A0 modes in the end face of non-blowing pipes were superimposed continuously at time domain, while the situation was different in the blowing pipes as the incident angle being  $35.2^\circ$  and the frequency being 500 kHz, and the extent of blowing damages in the pipes was decided by time interval of the two modes. A high accuracy and precision non-destructive testing method for the boiler heating surfaces was provided.

**Key words:** Lamb wave; boiler heating surfaces; blowing damage; dispersion analysis

确保火力发电厂锅炉受热面的安全运行是火电厂金属技术监督中最重要的工作<sup>[1]</sup>。对于高参数大容量机组,特别是超(超)临界机组,机组在运行过程中受吹灰器和烟气的影响,受热面管极易产生吹损。现阶段锅炉受热面检查以宏观检查为主,这种方法

检查效率低,对检查人员责任心要求较高,并且目不能及之处会漏检,从而给锅炉的稳定运行带来隐患。因此研究一种高效率、高精度、全覆盖的无损检测方法具有重要的工程应用价值。兰姆波作为一种在厚度与其波长数量级相同的板状导波介质中传播的由纵波和横波不断反射耦合形成的弹性波<sup>[2]</sup>,已被广泛应用于薄板类构件的检测中。国内刘振清<sup>[3]</sup>最早系统介绍了兰姆波的频散特性,并对兰姆波检测的应用前景进行了展望。裴俊峰等<sup>[4]</sup>在此基础上研究了试件厚度及密度的变化对兰姆波相速度及群速度

收稿日期: 2017-03-10

作者简介: 彭碧草(1982—),男,高级工程师,主要从事电力设备检测和失效分析

通信作者: 何朋非, xiaofeiji529@163.com

的影响,禹化民等<sup>[5]</sup>的研究表明根据试件选择合适参数激励兰姆波,能避免单一模态检测造成的漏检。GUO 等<sup>[6]</sup>的研究表明当小规格管材的壁厚满足条件时,管中也可产生并传播兰姆波,并能成功检测金属薄壁管材内、外壁上深度为 0.10 mm 的人工刻槽缺陷。杨齐等<sup>[7]</sup>研究了超声 Lamb 波对板材中氢鼓泡缺陷的检测。邢耀淇等<sup>[8]</sup>研究了超声导波对核燃料包壳管裂纹、分层等缺陷的检测技术。现阶段兰姆波检测的重点在于对板材裂纹、分层、鼓包等缺陷的检测,对管道吹损减薄检测案例方面的报道则较少。笔者以火力发电厂锅炉受热面中低温再热器管为研究对象,分析兰姆波在对应规格低温再热器管中传播的频散特性,通过群速度的变化获得对厚度变化最敏感和最不敏感的模式,利用两种模式在管壁厚度变化时传播速度不同的特点,检验兰姆波在吹损管中的检测效果。

## 1 试验设计

### 1.1 兰姆波基本理论

兰姆波是在具有两个平行表面的构件中由纵波和横波相互叠加而成的一种应力波,传播时质点振动受上下界面的影响,振动方式十分复杂。根据声波质点的振动特点可将兰姆波分为两种类型,一种为质点做对称运动的对称型兰姆波(S),一种为质点做反对称运动的反对称型兰姆波(A)。每种类型的兰姆波根据速度的不同又分为不同模式,如常见的低阶模式(A0、A1、S0、S1),以及高阶模式(A2、S2、A3、S3)。上述模式兰姆波的振动方式随频率、板厚等参数的变化而变化,兰姆波波速与频率、板厚的关系符合下述频散方程。

对称型(S)兰姆波的频散方程为

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} + \frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} = 0 \quad (1)$$

反对称型(A)兰姆波的频散方程为

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} + \frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} = 0 \quad (2)$$

$$p^2 = \omega^2 / c_l^2 - k^2 \quad (3)$$

$$q^2 = \omega^2 / c_t^2 - k^2 \quad (4)$$

式中: $c_l$ 、 $c_t$  分别为试件中纵波与横波的传播速度; $\omega$  为圆频率; $h$  为试件厚度; $k$  为导波波矢。

兰姆波传播时相速度与群速度间的关系可表示为

$$c_q = c_p^2 \left[ c_p - \omega \frac{dc_p}{d\omega} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中: $c_q$ 、 $c_p$  分别为兰姆波的群速度与相速度。

从上述方程可知,在特定介质中,兰姆波声速是频率和板厚的函数。利用兰姆波对试件进行检测时,首先需要确定频率和声束入射角。在检测指定试件时,由于厚度值  $h$  不变,兰姆波的声速由频率直接决定,实际上选定了频率就意味着选定了入射角。

### 1.2 兰姆波检测的频率选择

以火力发电厂壁厚为 4.00 mm 的受热面管为例,探讨兰姆波在名义壁厚和壁厚减薄情况下的传播特性。根据《火力发电厂锅炉受热面管监督检查技术导则》要求,当锅炉受热面管壁厚减薄超过设计壁厚 30% 时需对管段进行更换处理,因此笔者选择管子减薄超标的临界尺寸 30% 作为此次讨论的最大减薄量,并一同讨论在壁厚减薄 10%、20% 时兰姆波的传播特征。石欢等<sup>[9]</sup>的研究表明兰姆波在小规格管材中的频散特性与在平板中的频散特性一致,因此上文给出的平板中的频散方程同样适用于小规格管材相关检测参数的计算。

超声波在钢材中的纵波声速为  $5700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,横波声速为  $3100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,楔块采用有机玻璃制作,纵波在楔块中的传播速度为  $2700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据式(1)~(5)求解获得在名义壁厚(4.00 mm)下的频散曲线如图 1 所示。由图 1(a)可知,当激发频率小于 600 kHz 时,只存在 S0、A0 和 A1 3 种模式的兰姆波,且在 500 kHz 附近上述 3 种模式兰姆波的传播速度基本一致,此参数下用兰姆波进行检测时获得

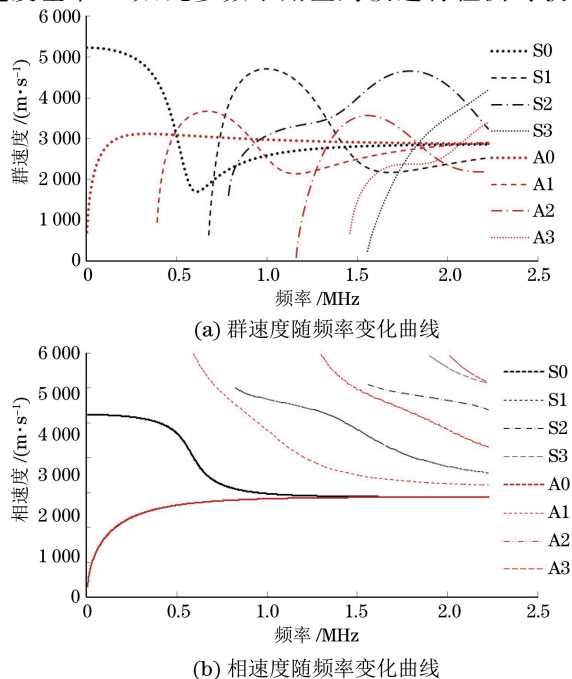


图1 壁厚 4.00 mm 管材中的兰姆波频散曲线

的 S0、A0 和 A1 模态的端面回波在时域上会连续叠加。然而, SHEIRETOV 等<sup>[10]</sup> 研究表明除 S0 与 A0 模态兰姆波能在任意频率下传播外, 其他兰姆波的传播下截止频率的存在, 需群速度稳定在一定频率范围内才能以稳定速度传播, A1 模态兰姆波的下截止频率约为 600 kHz。因此, 当检测频率小于 600 kHz 时, 实际上传播的只有 S0 和 A0 两种模态; 为了利用 S0 和 A0 模态在 500 kHz 时群速度相同, 两种模态的波在端面反射时会出现连续叠加的特性, 笔者选用的检测频率为 500 kHz。

当受热面管吹损减薄时, 厚度对 S0 和 A0 两种模态频散特性是有影响的, 通过计算获得不同减薄量下(10%, 20% 和 30%) S0 和 A0 模态兰姆波的频散曲线, 如图 2 所示(图中 0% 表示未出现减薄情况)。由图 2 可知, A0 模态的传播速度, 几乎不随壁厚的变化而变化, 但 S0 模态兰姆波在 300 kHz~1.5 MHz 频段内, 群速度对厚度的变化十分敏感。因此, 在此参数下采用兰姆波进行检测, 当管子发生吹损时, 由于 S0 和 A0 模态端面回波在时间域上会产生间隔, 仪器检测理论上会显示两个回波; 而当管子未发生吹损时, S0 和 A0 模态由于声速相同, 端面回波在时间域上是连续的, 仪器检测理论上只显示一个回波, 故在实际检测中可通过回波的个数来判断管子是否存在吹损。

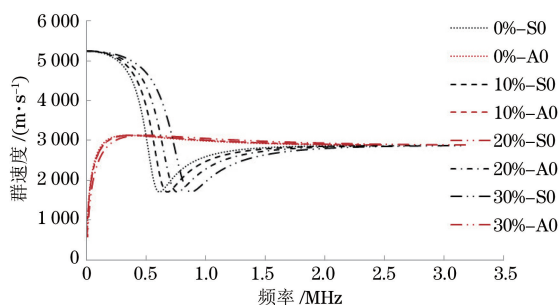


图2 受热面管在不同壁厚减薄量下 A0 与 S0 模态兰姆波的频散曲线

### 1.3 声束入射角选择

兰姆波在不同试件中各模态的相速度及群速度不同, 实际检测中为了获取特定模态的兰姆波, 在激励过程中需计算探头的声束入射角, 入射角的计算如式(6)所示。

$$\alpha = \arcsin(c_l/c_p) \quad (6)$$

式中:  $c_l$  为纵波在楔块中的传播速度;  $c_p$  为兰姆波在被检试件中的相速度。

由式(6)可知, 当楔块中纵波的传播速度一定时, 只要确定兰姆波在试件中的相速度, 即可计算出

声束入射角。

## 2 试验制备、方法与结果分析

### 2.1 试验制备与方法

取一根名义规格(外径×壁厚)为  $\phi 63.5 \text{ mm} \times 4.00 \text{ mm}$ , 总长度为 1 000 mm, 吹损长度为 400 mm 的受热面管(吹损区域以 20 mm 的间隔对其进行测厚, 获得 20 个点的厚度数据后取平均值, 求得吹损区域的平均厚度为 3.22 mm)和一根未吹损总长度 1 000 mm 的受热面管, 采用 HS610e 超声探伤仪激励 500 kHz 脉冲信号, 探头型号为 OLYMPUS-0.5P-6×6KB。由图 1(b)可知在壁厚 4.00 mm 管中, S0 模态相速度为  $4\,688 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 将此速度代入式(6)求得声束入射角为  $35.2^\circ$ 。试验采用自发自收方式, 试验装置连接示意图如图 3 所示, 超声探伤仪获取回波信号后通过数据线连接至 PC 机后做定量分析。

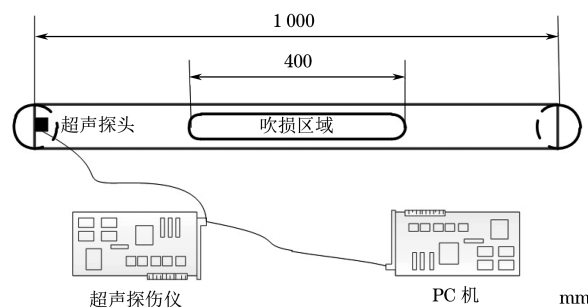


图3 试验装置连接示意

### 2.2 检测结果分析

通过 HS610e 超声探伤仪采集兰姆波回波信号, 获得不同厚度下(未吹损管壁厚 4.00 mm, 吹损管壁厚 3.22 mm) S0 和 A0 模态兰姆波端面回波, 如图 4 所示。由图 4(a)可知端面回波只有一个波峰, 这是由于 S0 和 A0 模态兰姆波在此厚度下传播速度一致, 因此端面回波在时间域上出现了连续叠加。

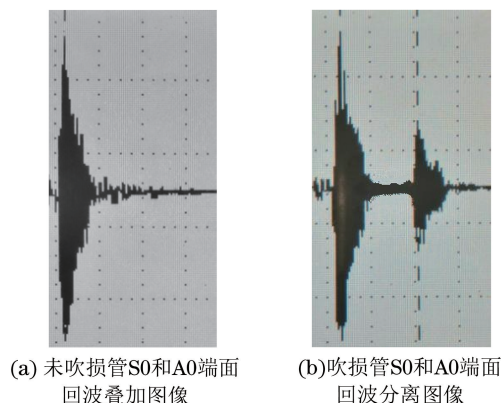


图4 未吹损管与吹损管的 S0 和 A0 模态兰姆波端面回波图像



由图 4(b)可知端面回波存在两个波峰,这是由于 S0 和 A0 模态兰姆波在此厚度下传播速度不同,此时 S0 模态兰姆波传播速度大于 A0 模态兰姆波,因此端面回波在时间域上出现了时间间隔形态。

为进一步对上述时间域上的间隔进行定量分析,提取图 2 中频率为 500 kHz 的 S0 模态与 A0 模态兰姆波在不同壁厚管子中的传播速度,如表 1 所示。由表 1 可知,未发生吹损时,S0 模态与 A0 模态兰姆波的群速度基本一致;当管壁厚度发生变化时,A0 模态兰姆波群速度基本稳定在  $3\,100\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,而 S0 模态兰姆波的群速度从  $3\,051\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  剧烈增大至  $4\,678\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (壁厚减薄量达 30% 时),并且速度变化与减薄量成正比,减薄量越大 S0 模态与 A0 模态兰姆波速度差异越大,两个回波的时间间隔越大,通过时间间隔即可判断受热面管的吹损程度。

表 1 不同模态兰姆波的传播速度  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

模态	吹损程度/%			
	0	10	20	30
A0 模态	3 095	3 107	3 117	3 122
S0 模态	3 051	3 847	4 348	4 678

根据上文计算获得此参数下理论时间间隔为  $72\text{ }\mu\text{s}$ , 试验中时间间隔为  $68\text{ }\mu\text{s}$ , 误差约为 5.5%。由于试验过程中未对兰姆波模态信号进行分离,S0 与 A0 模态回波在端面反射时发生波型转换,产生高阶次模态波。模态波的声速差异,导致 S0 与 A0 在时域上产生叠加与偏移,使得回波波包的时域刻度加宽,从而导致 S0 与 A0 模态回波时间的确定产生误差。如需准确提取回波时间,还需采用信号处理方法提取 S0 与 A0 模态回波。

### 3 结论

(1) 对 4.00 mm 壁厚的受热面管进行兰姆波频散特性分析,得出结论:管子未发生吹损时,频率为 500 kHz 时,S0 和 A0 模态兰姆波的传播速度基本一致;管子壁厚发生变化时,A0 模态兰姆波传播速度基本保持不变,S0 模态兰姆波传播速度剧烈变化。

(2) 利用上述兰姆波中 S0 和 A0 模态的传播特

性,将兰姆波应用于锅炉受热面管的吹损检测中。试验结果表明:管子未发生吹损时,S0 和 A0 模态的端面回波在时间域上出现连续叠加;管子发生吹损时,S0 和 A0 模态的端面回波在时间域上存在间隔,并且通过时间间隔大小可判断吹损程度(减薄量)。

(3) 针对壁厚为 4.00 mm 的受热面管,采用  $35.2^\circ$  入射角和 500 kHz 的频率能有效检测出受热面管的吹损缺陷;对于其他壁厚的受热面管可采用类似的方法确定入射角和频率,从而实现吹损的检测。

### 参考文献:

- [1] 龙会国,龙毅,陈红冬. 300 MW 机组锅炉“四管”泄露检修分析[J]. 热力发电,2010,39(4):46-48.
- [2] SG P, WR P, LECUYER F, et al. Broadband Lamb wave measurements in aluminium and carbon/glass fibre reinforced composite materials using non-contacting laser generation and detection [J]. Ultrasonics, 1997, 35(2):105-114.
- [3] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波[J]. 无损检测, 1999,21(9):409-413.
- [4] 裴俊峰,邓明晰. 固体板材参数变化对超声兰姆波模式的影响[J]. 声学技术,2007(5):1016-1017.
- [5] 禹化民,王维斌,吕小青,等. 储罐底板缺陷兰姆波检测的影响因素[J]. 无损检测,2015,37(7):19-24.
- [6] GUO D, KUNDU T. A new transducer holder mechanism for pipe inspection [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 110(1): 303-309.
- [7] 杨齐,陈定岳,陈虎,等. 压力容器板材中氢鼓泡缺陷的超声 Lamb 波检测[J]. 无损检测,2016,38(10): 53-59.
- [8] 邢耀淇,高佳楠,陈以方. 超声近场导波在薄壁管检测中的应用[J]. 无损检测,2016,38(2):5-8.
- [9] 石欢,周飞旭,彭应秋. 压力管道检测中单探头导波的激励与接收[J]. 无损探伤,2008,32(2):21-22.
- [10] SHEIRETOV Y, GRUNDY D, ZILBERSTEIN V, et al. MWM-array sensors for in situ monitoring of high-temperature components in power plants [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11):1527-1536.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告