

文章编号: 1671-8909(2013)06-0016-05

工业锅炉沉积物在线测厚传感器的研究

李茂东¹, 张雅静², 叶伟文¹, 刘时风², 毛力¹, 董屹彪²

(1. 广州市特种承压设备检测研究院, 广东广州 510700;

2. 北京声华兴业科技有限公司, 北京 100810)

摘要: 工业锅炉受热面结生沉积物会导致锅炉能耗升高, 受热面材料损坏、锅炉爆管等事故。定期监测受热面沉积物厚度可有效防止沉积物厚度超标引发的问题。本文基于超声波测厚原理设计了一种独特的锅炉内高温水环境沉积物测厚装置, 研制了一种能够在锅炉高温水环境中长时间实时监测沉积物厚度的超声波测厚传感器和外部显示装置, 并在模拟锅炉水环境下进行了时间、水温变化等有关静态试验。

关键词: 工业锅炉; 沉积物测厚; 超声波; 高温传感器

中图分类号: TK228

文献标识码: B

Research of sensor in measuring deposit thickness on line in industrial boiler

LI Maodong ZHANG Yajing YE Weiwen LIU Shifeng MAO Li DONG Yibiao

(1. Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510700, China; 2. Beijing Soundwei Technology Co., Ltd., Beijing 100810, China)

Abstract: Deposit creat in tubes' surface of industrial boiler, which would cause increasing energy consumption, damage of tube and failure of boiler. Regular measurement to deposit thickness can prevent thickness overproof deposit. The paper designed a particular scheme of scale deposit thickness measurement about high temperature water environment inside boiler based on thickness measurement theory by ultrasonic method, and developed a sensor about thickness measurement theory by ultrasonic method. The sensor with display device can be used to real-time test scale deposit thickness for long time in high temperature water environment inside boiler, and conduct static test for simulating condition in boiler water about time and temperature of water.

Key words: industrial boiler; measurement of deposit thickness; ultrasonic; high temperature sensor

据国家特设局统计, 至 2011 年底, 全国在用锅炉为 62.03 万台^[1], 其中 95% 以上为工业锅炉。由

收稿日期: 2013-01-24

作者简介: 李茂东(1972-) 男, 辽宁葫芦岛人, 高级工程师, 长期从事锅炉检验检测、能效测试、锅炉水质检测和沉积物清洗工作。

于工业锅炉补给水主要是软化水和运行水质管理不到位等原因,运行过程受热面上结生传热系数低的沉积物情况比较普遍,有的火管锅炉受热面沉积物厚度达到(5~6) mm。这不仅造成锅炉能源消耗的增加,而且还会引发沉积物下受热面管腐蚀、穿孔、鼓包、蠕变、爆管等事故,严重的甚至导致爆炸事故^[2]。目前,传统的锅炉受热面管壁沉积物厚度的测量方法是停炉打开锅炉进行测量,火管炉可以直接测量,而水管炉还必须进行割管测量。这不仅会影响企业生产供气,而且由于位置等原因,准确度也不够高,对于小型立式工业锅炉有时难以实现。由于锅炉是密封承压设备,而且受热面炉管是在锅壳内部,运行过程检测沉积物难以实现。如果研究开发在锅炉受热面上安装的一种耐高温传感器测厚装置,则可实时在线检测炉管沉积物的厚度,并以仪表数显的形式表示出来。那么锅炉使用单位就可以随时掌握锅炉水质情况和锅炉受热面清洁状况,进而采取有效措施进行及时处理,控制锅炉受热面沉积物在允许范围,保持锅炉安全高效运行。

目前,国内外还没有成功的工业锅炉沉积物在线检测装置和技术。报道的都是间接的沉积物厚度检测方法。比如日本某公司针对自身锅炉产品研究的沉积物厚度检测是根据炉管温度变化来判断的。这种方法是先根据试验数据,针对某种锅炉绘制出锅炉炉管表面温度与沉积物厚度的曲线,建立温度场。然后在锅炉炉管上安装若干个热电偶,利用红外热像检测仪或直接高温测温装置测出炉管管壁温度,然后根据曲线查找出对应的沉积物厚度。这种方法的不足是,管壁温升不仅同沉积物厚度有关,而且同沉积物类型有关。不同沉积物尽管厚度相同,造成的温升程度是不同的。而且预先设定的曲线需要考虑各种炉型,前期工作量大,而且对前期试验要求高。还有资料介绍一种沉积物厚度检测技术。其原理是,沉积物使炉管传热受阻,导致管道局部过

热,温度分布异常。检测时,在管道外一定距离向管道照射红外线,测量由管壁反射回来的红外线强度,输入计算机将此数值与预先存储的原管道该部位的红外线反射强度进行分析计算,就可测出沉积物厚度。同样,这种方法也属于间接方法,准确度与沉积物类型、结垢部位和炉管局部热负荷都有关系。近年来,也有相关文献报道了监控锅炉内沉积物的方法及装置,相关文献^[3-4]证明,测量误差大,测量范围小,数据量过大,分析复杂,不能长时间耐高温,因此无法实现长时间实时检测。

本文利用超声波测厚原理,设计独特的应用方案,专门设计了适合测量工业锅炉内高温水环境沉积物超声测厚传感器,能够长时间在高温下实时监测锅炉内沉积物厚度,然后通过信号线把信号引出到外面的显示装置,达到监测锅炉受热面沉积物和调节控制锅炉水质的作用。

1 理论方案设计

本文设计的沉积物超声测厚传感器是将声音信号转换为电信号的传感器。该传感器能够结合显示装置实时监测沉积物厚度。沉积物测厚采用超声波脉冲方法测厚,包含直接接触法测厚和非接触式测厚。直接接触法需要将传感器通过耦合剂耦合在被测沉积物表面直接测量沉积物厚度;或者将传感器耦合在锅炉外表面,超声波穿过钢基体,测量锅炉内部沉积物。前者需要将传感器固定耦合在被测沉积物表面,此方法无法实时监测沉积物厚度的增长趋势,因此此方案不可行。后者,理论分析发现钢的声阻抗远大于沉积物的声阻抗,超声波传播到钢与沉积物的分界面时,几乎全部反射,传感器接收不到从沉积物底面的反射波,无法实现测量,实验也证明了此方案不可行,实验结果见图 1。

本文采用了另一种超声脉冲测量方法,即非接触型测量。把传感器通过钢支架安装在锅炉内一定

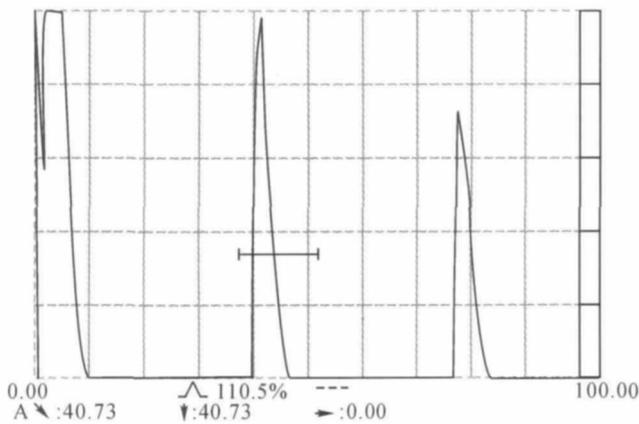


图 1 一种超声波法测量带有沉积物的钢试块波形
水深处,测量探头表面到沉积物表面的距离,通过该距离与无沉积物时探头表面至锅炉内表面的距离的差值间接计算沉积物的厚度。传感器安装方式如图 2 所示,传感器靠钢支架固定。

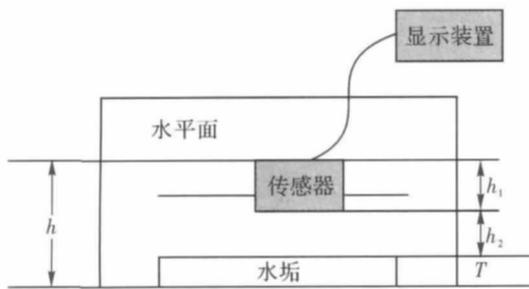


图 2 沉积物测量传感器安装示意

从图 2 可得出测量沉积物厚度公式:

$$t = h - h_1 - h_2 \quad (1)$$

式(1)中:

- t——沉积物厚度,mm;
- h——表示水平面到钢内表面深度,mm;
- h₁——表示传感器高度,mm;
- h₂——表示传感器表面到沉积物表面的深度,mm。

此方案重点在于长时间耐高温超声测厚传感器设计。

2 长时间耐高温超声测厚传感器设计

2.1 传感器的构成

传感器是超声检测中实现电声转换的器件,也

称为超声换能器。目前用得最为有效和广泛的是压电效应原理制成的压电材料超声换能器,由保护膜、压电晶片、阻尼块、匹配线圈、外壳和接头组成。

2.2 传感器压电晶片的选择

2.2.1 压电晶片材料选择

压电晶片是传感器的核心部件,由它来实现电-声能量转换,压电对传感器晶片的常规要求如下:机电耦合系数较大,以便获得较高的转换效率;机械品质因子较小,以便获得较高的分辨力和较小的盲区;压电应变常数和压电电压常数较大,以便获得较高的发射灵敏度和接收灵敏度;频率常数较大,介电常数较小,以便获得较高的频率。压电材料与铁磁材料一样,其压电效应与温度有关。它只能在一定的温度范围内产生,随着温度升高,压电材料的压电效应会逐渐减弱,当超过一定温度,压电效应会消失。使压电材料的压电效应消失的温度称为压电材料的居里温度。通常情况下,工业锅炉内水环境温度约为 200℃,因此经过查表^[5],选择 PZT-5 较为合适。

2.2.2 压电晶片频率选择

频率的选择基于半扩散角、盲区及衰减,对于测厚,盲区可以忽略,但测量误差必须考虑。那么,半扩散角、衰减和测量误差的公式如下:

$$\theta_0 = \arcsin 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

$$\alpha = kf^4 \quad (3)$$

$$E_{rr} = \frac{c}{f} \quad (4)$$

其中,λ为超声波波长,θ₀为半扩散角,D为压电晶片直径,k为常数,α为超声波衰减,c为超声波在介质中的声速。

当 D 一定时,如超声波在水中传播,c = 1 400 m/s,超声波检测传感器频率一般选择(0.5 ~ 10) MHz,晶片尺寸选择 Φ(10 ~ 30) mm,假设 D = 10 mm,k = 1。不同频率对应的半扩散角、衰减如表 1 所示。

表 1 不同频率对应的半扩散角、盲区和衰减

f/MHz	$\theta_0/^\circ$	α	测量误差 E_r
0.5	20.0	0.062 5	2.8
1	9.8	1	1.4
2.5	3.9	39	0.56
5	2.0	625	0.28
7.5	1.3	3 164	0.18
10	1.0	10 000	0.14

从表 1 可以看出: 当频率 f 太低时, 半扩散角太大, 指向性不好; 当 f 太大时, 则超声波衰减又太大。当在同一温度下同一被测介质测量时, 声速一定, 则不同频率对测量结果产生不同的误差。因此, 根据表 1, 频率选择为 2.5 MHz。

2.2.3 压电晶片直径选择

压电晶片的直径选择取决于半扩散角和盲区, 根据上述频率选择结果 (2.5 MHz), 及假设 $c = 1\ 400\ \text{m/s}$, 不同晶片直径对应的半扩散角和盲区如表 2 所示。

表 2 不同晶片直径对应的半扩散角和盲区

D/mm	$\theta_0/(^\circ)$	N/mm
10	3.9	45
20	2.0	178
30	1.3	402

根据表 2, 可以看出压电晶片直径为 10 mm 时, 扩散角较大, 声束指向性不好, 能量不集中; 直径为 30 mm 时, 盲区大。安装传感器时, 传感器表面到水与锅炉内壁的距离要大于盲区。盲区大时, 传感器支架部分不好设计。因此, 压电晶片的直径选择 20 mm。

2.2.4 压电晶片厚度计算

经过查超声探头常用压电材料主要性能参数表, PZT-5 的 $N_1 = 1.89\ \text{MHz} \cdot \text{mm}$, 依据公式

$$T = N_1 / f, \quad (5)$$

计算得出, 晶片厚度 $T = 0.76\ \text{mm}$ 。

2.3 传感器的封装

传感器结构如图 3 所示, 实现保护膜、压电晶片、阻尼块等之间的有效封装并保证压电元件输出信号不失真地反映待测介质声音变化是传感器的封装关键所在。能够长时间在 250 °C 高温下工作的胶粘剂主要有聚酰亚胺胶。聚酰亚胺胶是以芳香族二胺和二醇缩聚而成的, 对各种无机非金属材料的粘结性能最好^[6]。聚酰亚胺胶常需在较高温度下固化以达到较高的封接强度。因此本文选择聚酰亚胺胶的粘接技术封装传感器。传感器的外壳采用聚四氟乙烯材料。传感器的实物照片如图 4 所示。

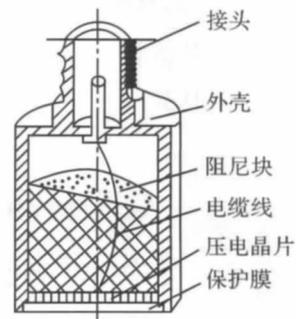


图 3 传感器结构

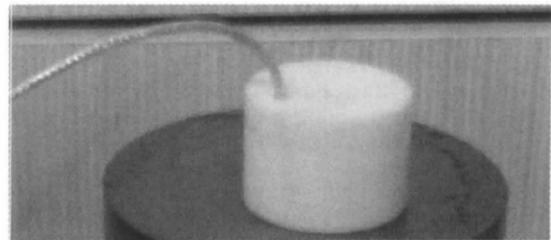


图 4 传感器实物照片

3 实验室模拟实验

高温实验模拟工业锅炉高温水在高温箱中进行。将传感器通过高温耦合剂耦合在 62 mm 厚的钢试块上, 整体放置在高温箱中, 传感器引出连线连接到显示装置(超声波探伤仪)上。高温箱的温度设置为 200 °C, 温度逐渐升高, 在接近 200 °C 时, 实时观测显示装置。当温度稳定在 200 °C 后, 每隔 20 min 观测一次, 测量传感器长时间实时测量干燥高温环境的被测介质厚度。(下转第 27 页)

有缓蚀剂品种的复配技术及协同缓蚀机理研究,这种基础性研究是提高缓蚀效果和减少缓蚀剂用量的基石;加强绿色环保型缓蚀剂的研究和应用;缓蚀剂的研究方法应朝高效灵敏、真实无损、微观、即时、使用范围广等方向发展,以便更好地指导新型缓蚀剂的研究开发、配方的优化及其实际应用。

参 考 文 献

[1]白雪,程世超. 苯并三氮唑铜缓蚀剂的研究进展[J]. 化学工业与工程技术, 2011, 32(6): 21-27.
 [2]徐群杰,周国定,陆柱,等. 苯并三氮唑及其衍生物在硫酸溶液中对铜的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(3): 172-176.
 [3]陈瑜,夏明珠,雷武,等. 苯并三氮唑及其羧基烷基酯衍生物缓蚀性能的量子化学研究[J]. 材料保护, 2006, 39(7): 14-18.

[4]张胜涛,薛茗月,王艳波,等. 苯并三氮唑缓蚀铜合金的原位椭圆偏振研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(6): 342-345.
 [5]王献群,刘瑞泉,朱丽琴,等. 碱性介质中 BIT、BIOHT 和 BIMMT 对铜的缓蚀性能和吸附行为[J]. 物理化学学报, 2007, 23(1): 21-26.
 [6]张大全,高立新. 苯并三氮唑和 8-羟基喹啉对铜缓蚀作用的研究[J]. 材料保护, 2002, 35(4): 10-11.
 [7]李自托,贾丰春,董泉玉,等. 新型复合型铜缓蚀剂的实验研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(1): 58-60.
 [8]徐群杰,周国定. BTA 系列缓蚀剂对铜缓蚀作用的光电化学比较[J]. 太阳能学报, 2005, 26(5): 665-670.
 [9]田清波,初福民,相欲兵,等. 稀土铈转化膜在高氯离子溶液中的缓蚀作用[J]. 材料保护, 2005, 38(5): 5-7.
 [10]陈一胜,陈颢,李明茂. 稀土在铜及其合金缓蚀剂中的研究[J]. 表面技术, 2003, 32(2): 36-38.

(上接第 19 页)

此外,还研究了不同水温对传感器测量沉积物精度的影响。结果表明,水中声速随着温度的升高逐渐曲线型增大,当增大到一定程度后,开始随着温度的升高逐渐降低。在此温度范围内,测量沉积物的绝对误差的整体变化趋势如同声速的变化。不同之处在于呈线性增大或降低。产生测量误差的原因可能是涌动的水面和水面上浮有气泡对超声波的测量产生了干扰的作用。

4 结 论

基于超声波测厚原理设计的工业锅炉受热面沉积物在线测厚方案对工业锅炉高温水环境检测沉积物厚度具有指导意义。本文理论方案的研究中研制的工业锅炉内高温水环境下沉积物超声测厚传感器,具有如下特点:

- (1) 能够安装在工业锅炉高温 200 ℃ 的环境中进行沉积物厚度的测量;
- (2) 能够长时间浸没安装在水中沉积物厚度测量,配合显示装置实时检测沉积物厚度;

(3) 超声测厚传感器测量沉积物厚度存在一定的绝对误差,产生测量误差的原因可能是水面动态变化和水面上浮的气泡对超声波的测量产生了干扰的作用。

参 考 文 献

[1]黄杰鹏. 2011 年特种设备统计分析[J]. 中国特种设备安全, 2012, 28(5): 37-40.
 [2]李茂东等. 工业锅炉除垢技术现状与展望[J]. 清洗世界, 2006, 22(11): 33-36.
 [3]李显勋. YOO-2 型锅炉沉积物测厚仪[J]. 机车车辆工艺, 1982, (14) 3: 22-24.
 [4]Min - Kyoung KIM, Chang - Jae YIM. Development of scale measurement technologies for steam generator tubing SINCE 2011 Singapore International NDT Conference & Exhibition, 2011(11): 3-4.
 [5]中国船级社无损检测人员资格认证委员会. 超声检测技术[M].
 [6]何潜. MEMS 耐高温压力传感器封装工艺研究[J]. 传感器技术学报, 2008, 18(2): 24-27.