

一种用于高温无损检测的超声薄膜换能器

李 衍

(江苏太湖锅炉股份有限公司, 无锡 214187)

摘要:介绍一种新型压电薄膜换能器在 400 ℃ 以上高温无损检测中的应用。压电薄膜的最大优点是可直接贴在金属工件上, 也可贴在曲表面上, 无需大量表面制备, 无需声耦合剂, 能实时监测在线高温设备的管壁腐蚀状态, 为设备安全运行提供了有效保证。

关键词:超声检测; 压电薄膜; 换能器; 高温; 壁厚腐蚀

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2007)05-0285-03

Piezoelectric Thin Film Ultrasonic Transducers Used in High Temperature Nondestructive Testing

LI Yan

(Jiangsu Taihu Boiler Co. Ltd., Wuxi 214187, China)

Abstract: For nondestructive testing at high temperatures over 400 ℃, a new type of transducer as piezoelectric thin film transducer was utilized. Neither extensive surface preparation nor coupling gel was needed. The films were deposited directly onto metal components and curved surface, enabling to real-timely monitor the corrosion condition of high temperature plant, thus providing useful data for safe operation of plant.

Keywords: Ultrasonic testing; Piezoelectric thin films; Transducers; High temperature; Pipe-wall corrosion

锅炉类承压设备在长期运行过程中, 由于高温氧化(烟气侧)和蒸汽腐蚀(蒸汽侧), 会产生普遍性的壁厚减薄, 超过腐蚀余量, 就会影响元件强度。另外, 由于硫、钒、垢下腐蚀、氧腐蚀和氢腐蚀等, 某些部位的壁厚损伤表现为斑点或局部凹坑型、穿孔型或晶间型, 达到一定程度, 也会严重影响元件强度, 甚至危及使用寿命, 造成爆裂等危害性事故。运用无损检测手段, 在设备正常运行的高温环境下, 对壁厚腐蚀或内部缺陷进行实时快速检测, 具有实用意义和经济价值。

常规的超声换能器, 其居里温度 T_c 较低, 如钛酸钡 (BaTiO_3) $T_c = 115 \text{ }^\circ\text{C}$, 锆钛酸铅 (PbZrTiO_3) T_c 为 $300 \sim 365 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温度超过 T_c , 压电效应即消失, 而在低于居里温度的高温区, 灵敏度也会有不同程度的下降。另外, 还有高温声耦合的困难。笔者

介绍一种用于 400 ℃ 以上高温无损检测的新型超声压电薄膜换能器, 它能弥补常规换能器的不足, 既可在高温工件上探伤, 又可对高温设备管壁厚度进行实时监测。

1 特点概述^[1]

压电薄膜(高分子压电材料)已被广泛地用于频率范围为 100 MHz 到 GHz 级的高频电子设备。但一般认为, 对超声检测之类频率相对较低的范畴, 压电薄膜似难有作为。而且, 压电薄膜通常所具有的机电耦合系数 K 往往低于目前超声换能器常用的压电陶瓷晶片, 但其接收性能特优, 且薄膜与试件可直接紧贴, 在一定程度上可使灵敏度得到补偿。该薄膜是用真空法贴合在金属试件上, 也可贴合在曲表面上。不需要作大量的表面制备。因为是薄膜状态, 耦合很好, 即使在常温下, 也可用于检测; 而在高温下的实际检测能力很有价值。

收稿日期: 2005-10-25

作者简介: 李 衍 (1940—), 男, 高级工程师, ASME 产品责任工程师, 负责重大和出国产品的无损检测工作。

2 高分子压电材料及基本特性^[2-4]

2.1 压电高分子

超声薄膜换能器是用高分子压电材料制作的。某些高分子材料经强电场极化处理后,就会产生压电特性。高分子压电材料有柔性、耐变形、声阻抗小,可做成薄膜且易于加工成多种形状,具有一般无机压电材料欠缺的许多特长。目前在医疗超声诊断和工业超声检测上作为新型换能器得到推广应用。

压电高分子材料有多种,最常用的是聚偏氟乙烯 PVDF [偏氟乙烯(CF₂-CH₂)的聚合物]和 P(VDF/TrFE) [偏氟乙烯与三氟乙烯(CHF-CF₂)的共聚物],其电声特性与常用压电体 PZT 的特性比较见表 1。

PVDF 通过高压结晶和固相挤压延伸法等制作工艺,可得 $k_t = 0.27$ 的压电薄膜。P(VDF/TrFE) 的 VDF(偏氟乙烯)与 TrFE(三氟乙烯)摩尔数比为 70/30~80/20 时,可得最大 k_t 值。

2.2 高分子薄膜的压电特性

高分子薄膜的压电效应有五种,即厚度伸缩[TE]一种,长度伸缩[LE]两种和厚度切变[TS]两种。用电子仪器测出与其相应的五种压电振子自由振动的共振频率特性,就能定量评价这些压电效应。图 1 表示 P(VDF/TrFE)(75/25) 的单晶薄膜机电耦合系数与温度的关系,可见 k_t 和 k_{24} 数值较大,与温度相关性较少。P(VDF/TrFE) 薄膜,可在低温到 100 ℃ 的温度范围内,作发收纵横波的换能器,其频谱很宽(至少到 1 GHz)。P(VDF/TrFE) 的居里点取决于 VDF 与 TrFE 的组成比,组成比越高,居里点越高,探头的使用限界温度也越高。

3 超声压电薄膜检测能力的验证

3.1 模拟缺陷的检测

用模拟试块作为试件进行试验。试块中钻有 $\phi 1$ mm 横孔,压电薄膜贴在试块表面。薄膜通过其

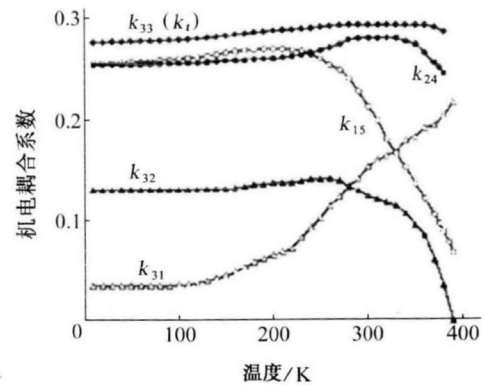


图 1 P(VDF/TrFE)单晶薄膜的机电耦合系数与温度的相关性

顶面设置的涂银电极(正极)通电,而金属试块起负极作用。压电薄膜与普通 50 MHz 的脉冲回波式超声波检测仪(JSR DPR300)相连,受到高频电脉冲激励后发生高频振动,将超声波传入试件。从试块底面或内部缺陷反射返回的脉冲回波,由压电薄膜接收并转换为高频电振荡信号,经仪器电子放大后,显示在 A 扫描示波器上。

图 2a 清晰地给出了厚 27 mm 的铝试块底面的多次反射波形,可见由压电薄膜产生的超声波,在试块中通过了四次声程相当于 108 mm。图 2b 表示压电薄膜能有效检出试块中埋藏深度为 20 mm 的 $\phi 1$ mm 横孔。将薄膜贴在在磨光或抛光或用砂纸擦光的表面上,就能进行电-声-电的换能过程,无需作大范围的表面制备工作。

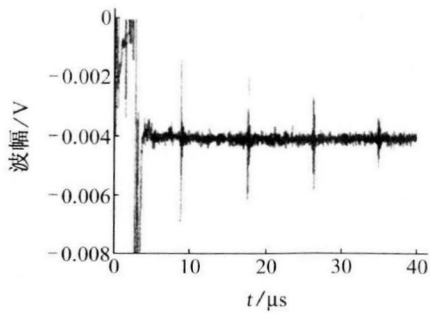
3.2 工作频率

由谐振条件可知,当压电薄膜的厚度 t 等于该频率下的半波长时,压电薄膜将产生谐振(共振),即 $t = \lambda/2 = C/2f$ 。典型压电薄膜的纵波声速很大,在厚度方向产生的共振频率非常高,约为 1.5 GHz。试验用 500 MHz 的脉冲回波检测仪(JSR DPR500)作了高频检测。因超声波在各种材料中的衰减随频率增大而增大,在厚试件中就很难观察到高频回波信号,为此使用了一块厚 1.36 mm 的表面抛光的铝

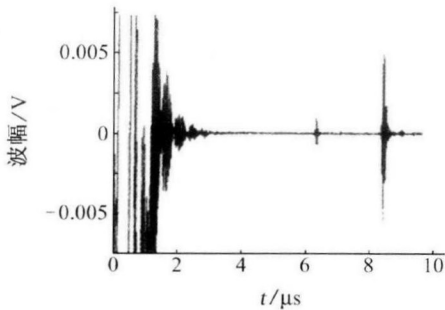
表 1 压电高分子的电声特性(室温)

压电材料	密度/ $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	纵波声速 $V_{33}/$ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	横波声速 $V_{44}/$ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	声阻抗 $Z_3/$ Mral	机电耦合系数		压电应力 常数 $e_{33}/$ $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$	压电电压 常数 $g_{33}/$ $\text{V}_m \cdot \text{N}^{-1}$	比介电 常数 ϵ_3/ϵ_0	介电损 耗系数 $\tan \delta_3$	机械损 耗系数 $\tan \delta_3$
					k_t	k_{24}					
PVDF	1.78	2.26	0.95	4.02	0.20	0.12	0.14	0.25	6.20	0.25	0.10
P(VDF/TrFE)(LCF) ¹⁾	1.900	2.45	1.14	4.51	0.285	0.20	0.175	0.33	5.30	0.12	0.04
P(VDF/TrFE)(SCF) ²⁾	1.935	2.37	1.16	4.58	0.295	0.28	0.185	0.38	5.0	0.05	0.04
PZT	7.5	4.6	2.3	34.4	0.41	0.28	15.1	0.026	13.00	0.005	0.004

注:1) 层状结晶薄膜。2) 单晶薄膜。

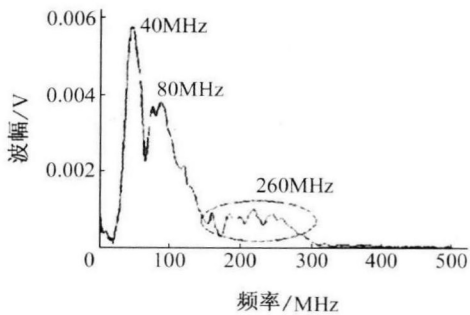


(a) 试块底面的多次反射波

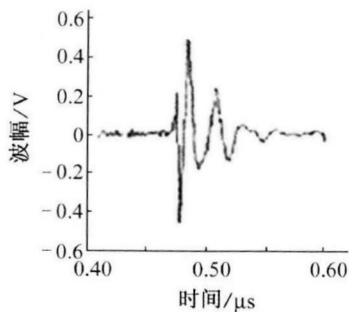


(b) $\phi 1$ mm 横孔(离表面 20 mm)的反射波

图 2 用压电薄膜探测铝试块(厚 27 mm)所得回波信号



(a) 300 MHz 以下的超声频谱



(b) 超声时域中的单一脉冲

图 3 由压电薄膜产生的高频超声脉冲

板。图 3 表示对反射脉冲的傅里叶分析给出的 300 MHz 以下的超声频谱。在低频端,超声信号可在 5~10 MHz 时被检出。

3.3 穿透法检测

若压电薄膜能贴到试件另一面,也可用穿透法进行检测。图 4 表示两薄膜分别置于试件两侧作一发一收的检测布置,必要时可插入铝基电极。压电薄膜穿透法检测也可用于冶金厂热轧板材或管材的壁厚检测。

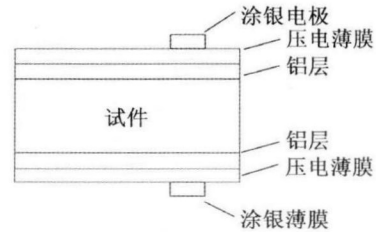


图 4 压电薄膜超声穿透法检测

4 高温检测

常规的超声换能器若无一定的屏蔽或冷却设施,很难在高温下进行检测。用了耐高温的压电薄膜,就不必等热态工件冷却下来,即可进行超声测量。压电薄膜的另一大优点是无需耦合剂,因为即使是高温专用耦合剂,在高温下也会变质失效。高温检测是用贴在 1.5 mm 厚的玻璃基片(衬底)上的压电薄膜进行的,铝薄膜层则用作负电极。试验时,将被检试样放在一块热板上加热到最高热板温度。图 5 为试样温度从室温升到 100,200,300,乃至 400 和 430 $^{\circ}\text{C}$ 时,在显示屏上所观察到的试样底面多次反射波形。

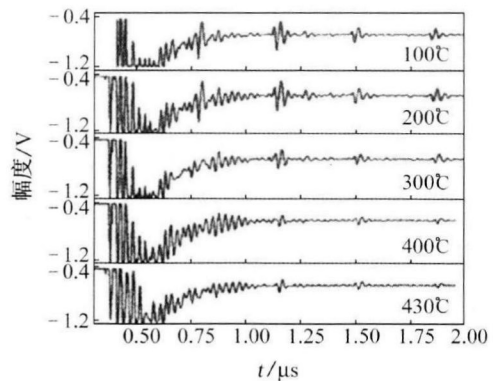


图 5 1.5 mm 厚玻璃试样高温检测中显示的底面回波

5 结果与结论

(1) 用给定的压电薄膜进行无损检测已见成效。该薄膜可直接贴合在金属试件上,对试件表面

(下转第 290 页)

管材尺寸的均一性表示满意。

3 测量误差分析

经分析,影响系统测量精度的原因主要有以下几点。

(1) 尺寸标准样管 超声波测量管材尺寸技术应用的前提是要有符合要求的尺寸标准样管,该样管需要由计量部门进行计量,而计量所产生的误差就不可避免地带入到系统校准中,成为影响系统测量精度的一个因素。

(2) 设备偏心的影响 如果两个尺寸测量探头的主声束与被测管材不同心,或管材在移动过程中产生震动,都会引起测量位置的改变,从而影响被测时间 t ,使系统的检测出现偏差。而且管材规格越小,偏心所造成的系统误差越大。

(3) 温度变化的影响 测量系统采用水作耦合剂,随着探头的高速旋转,水温会发生变化。由文献[2]可知,探头在水中的声速 C_L 与水温 t_0 的关系为:

$$C_L = 1557 - 0.0245 \times (74 - t_0)^2$$

水温的变化引起水中声速的变化,使系统对管材的外、内径测量和计算出现偏差。同时,金属随温度变化的线性膨胀系数约 $10^{-5} \text{ m}/^\circ\text{C}$,水温的变化也会影响到声速在金属中的传播速度,这也是影响系统测量精度的原因之一。

(4) 测量方法自身存在的局限性 在声学测量

中,若要测量值精确,要求样品具有好的平面特性、声波垂直入射、工作在近场范围内同时材料对声波的吸收应尽可能小。但对于小径薄壁管材尺寸的测量,为了提高分辨力,只能使用极窄的脉冲。这样就导致脉冲的幅度在管材曲面的多次反射中衰减较快(直径越小,衰减越快)。声波的人射角在管材运动的过程中,也会因管材本身的挠度发生一定的变化,形成测量误差。

4 结论

超声方法测量精密管材尺寸技术先进可靠、简便易行,具有检验速度快、测量数据多、测量精度高和可显示管材的整体尺寸特征的显著优点。利用该技术可有效地提高产品尺寸的一致性,适应大规模管材生产要求,是当前核用锆合金管材及其他精密无缝管材尺寸测量的发展方向。

参考文献:

- [1] Rumbold J G. Ultrasonic dimensional tube testing techniques[C]. Presented at the National Fall Conference of the American Society for Nondestructive Testing. Detroit:1974:21-23.
- [2] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会编写. 超声波探伤[M]. 北京:中国锅炉压力容器安全杂志社,1995:13.

(上接第 287 页)

的制备要求并不严格,薄膜已能成功贴合到各种粗糙度的表面上,也能贴合到曲表面上。使用一般的高压脉冲发射-接收器,将高频电脉冲施加到压电薄膜上,就能使该薄膜作为超声换能器使用。检测系统有宽带特性,频率范围为 $5 \sim 250 \text{ MHz}$ 。该薄膜可一直用到 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温范围。

(2) 压电薄膜对金属试件无损检测,特别是高温下的实时检测具有潜力。因薄膜直接贴合到试件上,免除了高温耦合剂的弊端。该种薄膜换能器体积小,可用于一般探头难以接近的部位。检测试验证明,该薄膜换能器可检出铝试块和低碳钢试块中的底面回波,也能检出试块中 $\phi 1.0 \text{ mm}$ 的模拟缺陷,可用于高温无损检测。

(3) 压电薄膜可用于动力锅炉类高温在用承压

设备管壁厚度的实时监测,对承压设备的安全使用及运行状态下的剩余寿命估判具有很大价值。

参考文献:

- [1] Kirk K J, Lee C K, Cochran S. Ultrasonic thin film transducers for high-temperature NDT [J]. INSIGHT, 2005, 47(2): 85-87.
- [2] Hiroji, Takao Miya. Piezoelectric polymer ultrasonic transducers[J]. JSNDI, 2002, 51(11): 692-697.
- [3] Hattori T, Kanaoka M, Ohigashi H. Improved piezoelectricity in thick lamellar β -form crystals of poly(vinylidene fluoride) crystallized under high pressure[J]. J Appl Phys, 1996, 79: 2016-2022.
- [4] 横野泰和, 宫隆雄. ポリマ振動子をもちいた高分解能斜角探触子特性[J]. 超音波テクノ, 1997, 9(1): 14-19.