

超声缓冲杆仿真研究

王 爽¹, 王召巴¹, 郑建利², 陈友兴¹

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051;

2. 山西太原国营兴安化学材料厂, 太原 030051)

摘 要:采用有限元方法对超声波在缓冲杆中的传播结果进行了仿真, 找出尾随信号产生的原因, 通过打乱圆柱/空气界面的方法, 设计出多种形状的超声缓冲杆。实验发现, 具有单锥形和双锥形结构的钢制缓冲杆能够很好的抑制尾随信号的出现, 同时随着双锥形缓冲杆锥角在一定范围内不断增大, 抑制效果愈加明显, 可以达到较高的信噪比。

关键词:超声检测; 缓冲杆; 尾随信号; 软件仿真

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)05-0307-03

Simulations of Ultrasonic Buffer Rods

WANG Shuang¹, WANG Zhao-Ba¹, ZHENG Jian-Li², CHEN You-Xing¹

(1. National Key Laboratory of Electronic Test Technology in North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Xing'an Chemical Materials Plant, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Simulations of ultrasonic in the buffer rods using the finite element methods was presented firstly. It showed the reasons of the trailing signals and designed some kinds of buffer rods with different diameters by disturbing the cylinder/air boundary. Based on the data from the experiments, it was found that Aluminum buffer rods with a tapered shape and a double-tapered shape could well constrain the trailing signals. At the same time, the effect of the constraining became better and better with the rising of the angel of the double-tapered shape buffer rods in some ranges, thus leading to a high SNR.

Keywords: Ultrasonic testing; Buffer rods; Trailing signals; Software simulation

目前, 脉冲回波式超声检测方法已经在多种材料的无损检测中得到广泛应用。主要用于检测弹性材料的超声波声速、衰减以及材料内部的缺陷分布等。通常情况下, 这些检测需要在非正常的环境(如高温高压、低温低压)中进行。为了保证超声探头能够正常工作, 避免暴露在这样的环境中, 通常采用超声探头配以超声缓冲杆的方法进行检测^[1]。

采用脉冲回波法检测时, 被检材料和超声探头分别耦合在超声缓冲杆的两端, 超声探头发射的超声波脉冲通过缓冲杆进入被检材料, 然后从材料底面返回。通过对反射回波的分析可以得到超声波的

声速和衰减。然而, 由于声波在固/气界面产生了模态转换, 致使在缓冲杆中出现了一连串形状相似的脉冲, 称其为尾随信号, 在时间上迟于纵波反射回波信号到达接收端^[2]。笔者就如何抑制尾随信号和提升信噪比进行了研究。

单晶材料(如蓝宝石和石英等)具有很低的声能损耗, 如果选择了合适的晶体取向, 衰减损耗和尾随信号将会变得很低。然而, 这些物质不仅价格昂贵, 而且在通常情况下, 其机械性质和热性质并不适合在特殊的环境下进行检测。因此, 笔者只研究各向同性材料的缓冲杆。此类缓冲杆的直径是声波波长的十几倍, 长度是声波波长的几十倍。仿真研究采用 5 MHz 纵波探头在钢质缓冲杆上完成。采用钢杆的原因是材料廉价而且易于加工成形, 并且钢还具有较低的声能损耗和较高的机械强度。

收稿日期: 2007-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672005)

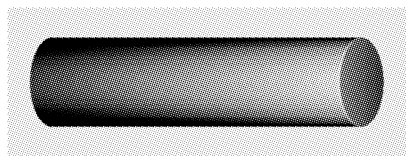
作者简介: 王 爽(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置。

1 仿真研究硬件

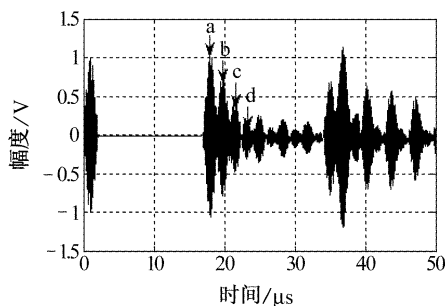
文中所有仿真实验均在 PC 机上完成。系统操作平台为 Microsoft Windows XP Professional SP2, CPU 为 Pentium(R) 42.40GHz, 内存为 256MB。

2 等径各向同性金属缓冲杆仿真

对等直径各向同性金属缓冲杆进行脉冲回波式仿真。金属缓冲杆采用 14 mm 等直径钢杆, 长度为 50 mm (图 1a), 其纵横波声速分别为 5 900.01 m/s 和 3 200.08 m/s。纵波探头发射的脉冲信号为正弦高斯脉冲, 脉冲宽度为 2 μ s, 振幅为 1 V, 频率为 5 MHz。脉冲信号由缓冲杆右端面入射。仿真结果如图 1b 所示^[3]。



(a) 几何形状



(b) 仿真结果

图 1 等直径杆仿真

从图 1b 中可以看出, a 为主脉冲回波信号, 后跟随着一连串形状相似的尾随脉冲信号 b~d, 它们产生于圆柱/空气界面的模态转换。从图中不难发现, 这些尾随信号的时间间隔基本相同, 约为 1.78 μ s。为了对尾随信号给出合理的解释, 假设在圆柱的横截面上有一个均匀振动的纵波声源, 入射纵波 D_1 与波导轴的夹角为 α , 当入射纵波在圆柱壁上反射时, 纵波 D_1 部分的转换为横波 T_1 , 横波以速度 v 和折射角 β 穿过圆柱直径 d , 当这个横波碰到直径另一端的波导壁时, 接着又产生纵波 D_2 , 传播过程如图 2 所示。

下面计算从一个边界传播到另一个边界所需的时间 Δt 。路径长度是 $d/\cos\beta$, 时间是 $d/(v \cdot \cos\beta)$,

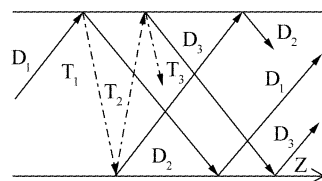


图 2 入射纵波传播过程示意图

在这段时间内, 横波在 z 方向传播了 $d \cdot \tan\beta$, 因此, 尾随信号 D_2 落后于 D_1 一段时间。

$$\Delta t = \frac{d}{v \cdot \cos\beta} - d \cdot \frac{\tan\beta}{v'}$$

式中 v' 为纵波速度。

由于尾随信号产生于圆柱/空气界面的模态转换, 因此所有尾随信号的能量总和与主脉冲回波信号能量的比值可以在一定程度上反映缓冲杆中的衰减程度。为了减少该比值, 一种方法是增加缓冲杆的直径或缩短缓冲杆的长度; 另一种方法是打乱圆柱/空气界面。

3 单锥形变直径钢杆仿真

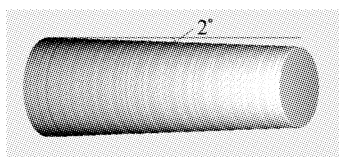
通过增加缓冲杆的直径或缩短缓冲杆的长度固然可以消除尾随信号的出现, 但这在很多工作环境下是不允许的。因此, 如何通过打乱圆柱/空气界面来抑制和消除干扰信号变得更加实用。如图 3a 所示为单锥形变直径钢杆, 其两端的直径分别为 14 和 10.5 mm, 锥角为 2°, 长度为 50 mm。发射脉冲与第 2 节相同, 从直径较小的端面入射。仿真结果如图 3b 所示。当纵波脉冲从面积较大的端面入射时, 仿真结果如图 3c 所示。

图 3b 可见, 跟随在主脉冲后面的尾随信号得到了明显的抑制, 其信噪比约为 16 dB。图 3c 可见, 仿真效果并不理想。因此, 对于单锥形缓冲杆来说, 采用从面积较大端入射并不能抑制干扰信号的产生。

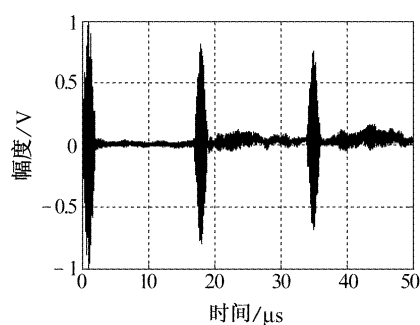
4 双锥形变直径钢杆仿真

如图 4 所示为双锥形变直径钢杆, 其两端直径均为 14 mm, 锥角为 2°, 3° 和 4°, 长度为 50 mm。发射脉冲与第 2 节相同, 从右端面入射。仿真结果如图 5 所示。

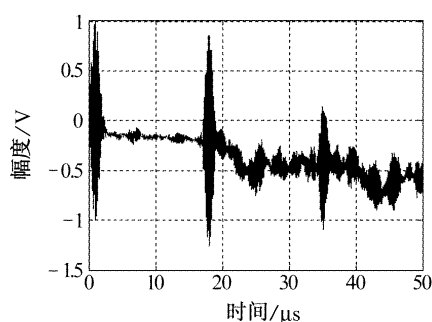
图 5a 可见, 尾随信号在双锥形钢杆中得到了较好的抑制, 其信噪比约为 16.2 dB。由于在相同的长度下, 锥角越大, 单锥形钢杆的两个端面的差异越大, 越不利于装置的安装与信号的采集, 因此双锥杆的研究更具实用价值。通过比较可以发现, 随着锥



(a) 几何形状



(b) 从直径较小端入射



(c) 从直径较大端入射

图3 单锥形杆的仿真结果

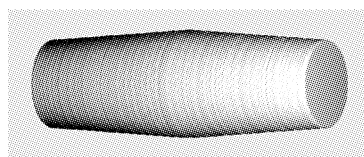


图4 双锥形杆的几何形状

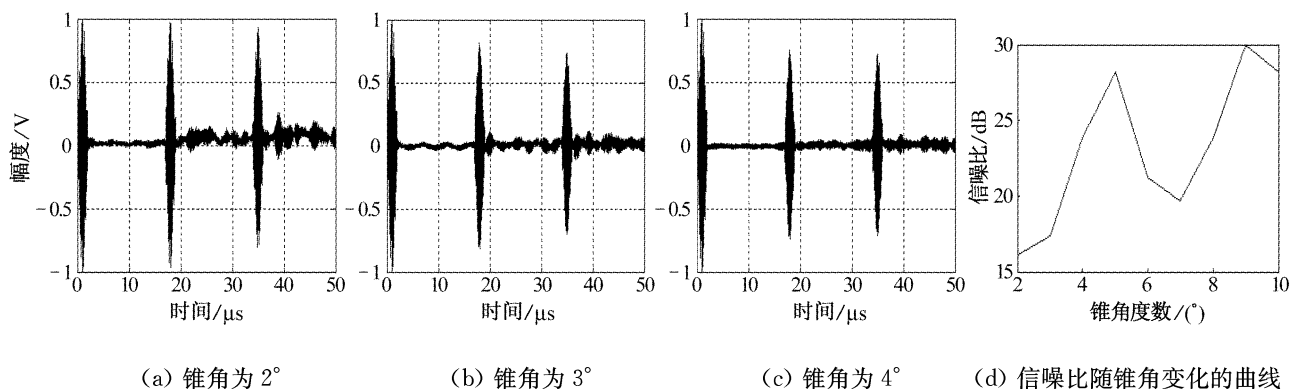
角的增大,抑制尾随信号的能力不断地增强,信噪比由图 5b 的 17.4 dB 提升为图 5c 的 23.8 dB。

通过实验可知,随着双锥形缓冲杆锥角的不断增大,信噪比不断增强,但这种趋势是否会一直延续下去还有待考证。分别对锥角为 5° , 6° , 7° , 8° , 9° 和 10° 的双锥形缓冲杆进行了仿真,其信噪比(SNR)见图 5a~d。

从图 5d 可以看出,当锥角在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内变化时,随着锥角度数的增加,缓冲杆抑制尾随信号的能力不断增强,信噪比不断提升。当锥角 $> 5^\circ$ 后,虽然信噪比可以再次达到新高,但此后的时基线上已经出现了大量的密集噪声,十分不利于微弱特征信号的提取。

5 结论

利用有限元方法对超声波在钢杆中的传播特性进行了仿真,实验发现,超声波在单锥形杆和双锥形杆中传播时,尾随信号得到了明显的抑制,同时在一定范围内,随着锥角度数的增加,信噪比有明显的提升。研究为在非正常环境下工作、要求具有较高信噪比的超声缓冲杆的设计提供了一定的参考。

(a) 锥角为 2° (b) 锥角为 3° (c) 锥角为 4°

(d) 信噪比随锥角变化的曲线

图5 双锥形杆仿真结果

参考文献:

- [1] Jen C K, Piche L, Bussiere J F. Long isotropic buffer rods[J]. Acoustical Society of America, 1990, 88(1): 23—25.
- [2] Jen C K, Legoux J G, Parent L. Experimental evalua-

tion of clad metallic buffer rods for high temperature ultrasonic measurements[J]. NDT & E International, 1999, 33(2000): 145—153.

- [3] Garcia-Alvarez J, Yanez Y, Prego J L. Noise level analysis in buffer rod geometries for ultrasonic sensors [J]. Ultrasonics, 2006, 44(2006): 1093—1100.