

doi: 10.7690/bgzd.2021.10.011

火炮身管复杂缺陷检测仿真

高 望, 杭钱君, 周 远

(陆军炮兵防空兵学院南京校区作战指挥系, 南京 210000)

摘要: 针对火炮身管内复杂缺陷检测存在的问题, 提出利用超声导波检测火炮身管中单一和非单一裂纹缺陷的检测方法。在不断改变各径向磨损量的情况下, 分析导波的传播特性; 结合 Comsol 有限元软件仿真, 得出不同轴向位置的径向磨损尺寸与导波回波系数之间的多元关系式, 设计了超声导波检测的定量方法。该检测可为火炮身管内部缺陷全面检测提供理论基础。

关键词: 超声导波; 缺陷检测; 有限元仿真

中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Simulation Research on Complex Defect Detection of Gun Barrel

Gao Wang, Hang Qianjun, Zhou Yuan

(Department of Combat Command, Nanjing Campus, Army Artillery & Air Defense Academy, Nanjing 210000, China)

Abstract: In view of the problems existing in the detection of complex defects in gun barrel, proposes a detection method using ultrasonic guided wave to detect single and non-single crack defects in gun barrel. Under the condition of changing the wear amount of each radial wear, the propagation characteristics of guided wave are analyzed; combined with Comsol finite element simulation software, the multivariate relationship between the radial wear size at different axial positions and the echo coefficient of guided wave is obtained, and the quantitative method of ultrasonic guided wave detection is designed. The detection can provide a theoretical basis for the comprehensive detection of gun barrel internal defects.

Keywords: ultrasonic guided wave; defect detection; finite element simulation

0 引言

炮兵作为地面火力突击的主体作战力量, 其作战效能的发挥直接关系到作战成败。火炮身管的状态直接影响火炮的发射精度, 随着火炮身管内缺陷尺寸持续增大, 火炮射击精度则逐渐降低, 而当缺陷尺寸累积到一定程度时, 甚至会发生炸膛等安全事故, 威胁炮兵生命安全。同时, 火炮身管内缺陷具有多发性、种类较多、分布较广等特点。利用超声导波检测火炮身管, 效率和精度较高^[1]; 因此, 笔者针对当身管内壁存在 2 条裂纹缺陷问题时, 分别利用超声导波的回波系数进行检测, 为预测火炮的剩余寿命与及时修复奠定理论基础^[2]。

1 火炮身管单一径向缺陷检测仿真

Comsol 作为有限元仿真软件, 已在声学、结构力学、传动现象和波的传播等领域得到了广泛运用。利用该软件, 可对超声导波在火炮身管中的传播特性采用有限元仿真的方法进行研究。其中, 身管模型为现役某型火炮武器, 根据身管尺寸参数和材料

参数, 利用软件对其进行仿真。首先在身管内壁设置周向裂纹缺陷, 并在其身管一侧选用 5 周期单音频低频正弦信号作为导波激励对其施加压力, 激励频率为 250 kHz, 激励方向为身管轴向^[3-5]。仿真结果如图 1 所示。

从图中可以看出: 超声导波在身管中传播遇到缺陷时, 会发生反射和导波模态的转化。为观察导波状态与缺陷尺寸之间的关系, 选择传播速度较快的导波模态作为分析对象, 并选取 1 个合适的数值来反映 $L(0, 2)$ 模态传播过程发生的改变量, 有助于判断缺陷的径向深度, 实现缺陷的径向尺寸测量。为方便分析计算, 设置身管缺陷径向尺寸分别为身管壁厚的 1%~10%, 轴向位置距身管激励端 400 mm 处的径向磨损缺陷。

将处于不同径向尺寸缺陷状况下身管中导波的传播特性求解后, 观察不同径向尺寸对导波传播特性的影响, 在身管激励端内壁上取 1 个点作为观察点, 不同径向尺寸情况下身管观察点的轴向位移情况如图 2 所示。

收稿日期: 2021-06-13; 修回日期: 2021-07-20

基金项目: 武器装备军内科研(LJ20182B050101)

作者简介: 高 望(1990—), 男, 江苏人, 硕士, 从事无损检测研究。E-mail: 176583166@qq.com。

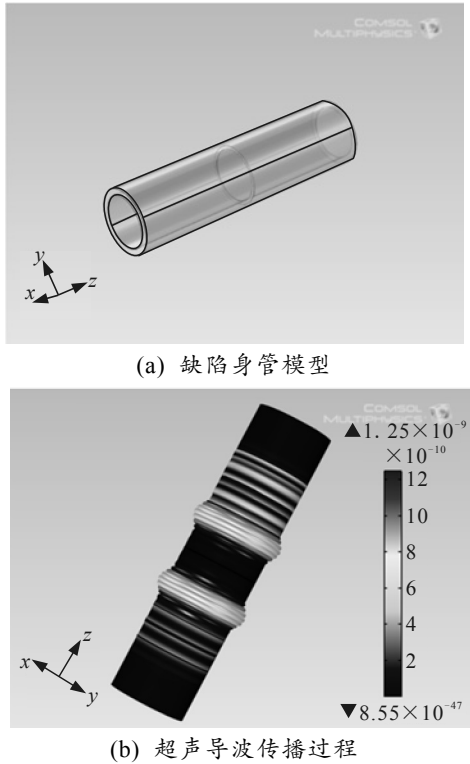
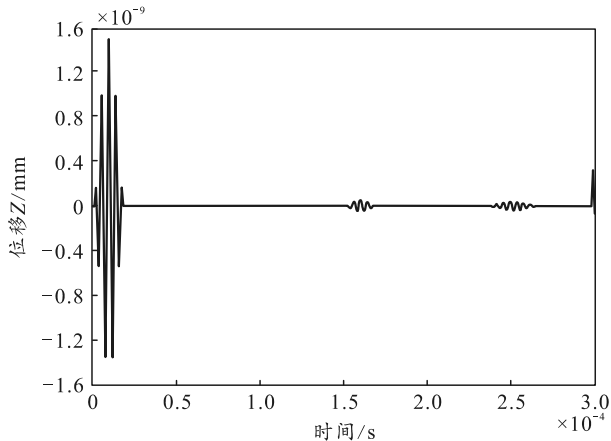
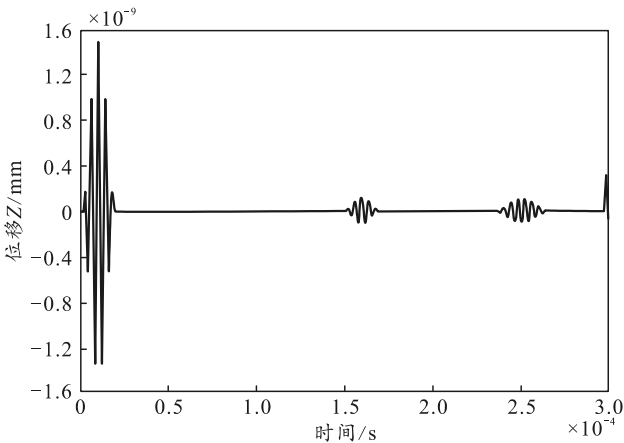


图 1 超声导波在缺陷身管中传播过程



(a) 5%身管壁厚



(b) 10%身管壁厚

图 2 不同径向尺寸接收信号的轴向位移

利用软件的后处理功能，可分别得出径向尺寸为 1%~10%的身管壁厚，1 次缺陷回波的最大幅值和回波系数。将每个数据点绘制在以回波系数为纵坐标、缺陷径向尺寸为横坐标的坐标系中，并利用数据分析软件对数据点拟合，建立关系曲线如图 3 所示。

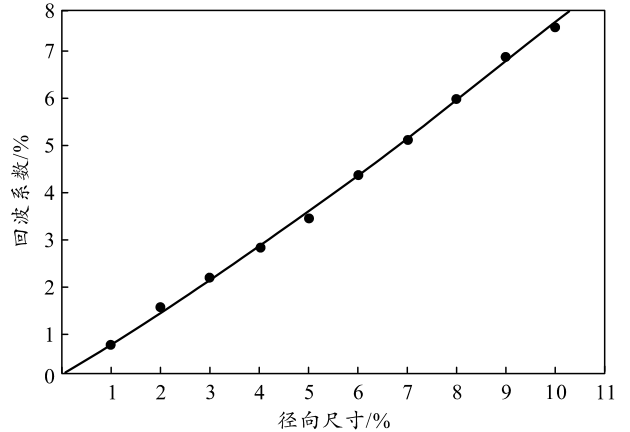


图 3 回波系数与缺陷径向尺寸变化

从上图中可发现：各个数据点之间满足二次多项式的关系，二次多项式方程为：

$$y = 0.01072x^2 + 0.6535x - 0.004833 \quad (1)$$

式中： x 为缺陷尺寸与身管厚度的比值； y 为一次回波的回波系数。从拟合结果可知：该曲线拟合度 R^2 为 0.99，近似为 1；两者满足上述关系式。

2 非单一径向缺陷检测仿真

取身管长为 400 mm，火炮身管自身其他参数保持不变，改变身管内壁上磨损缺陷径向尺寸参数。在身管中段(距离激励端 200 mm 处)和身管中后段(距离激励端 260 mm 处)内壁上分别建立径向磨损缺陷，可有效地消除有用信号的信号叠加现象。为方便数据获取与分析，分别设置径向磨损缺陷的周向尺寸为 $\theta_1=360^\circ$ 、径向尺寸 r_1 为 1%~10%身管壁厚、轴向长度为 1 mm 的 2 处径向磨损缺陷。通过不断改变身管内壁上 2 处缺陷的径向尺寸，观察其对导波传播时所产生的回波信号的影响。为了能够分析身管中 2 处不同径向缺陷的径向尺寸给导波传播过程中产生的回波系数引起的变化，需首先通过分别改变 2 处缺陷的径向尺寸，观察回波信号情况。运用同样方法将身管激励端内壁上 1 个点设置为观察点，通过有限元软件的后处理功能查看该点在身管缺陷径向尺寸分别为 30%和 40%、40%和 30%身管壁厚时，接收到的导波信号 Z 向(轴向)位移情况如图 4 所示。

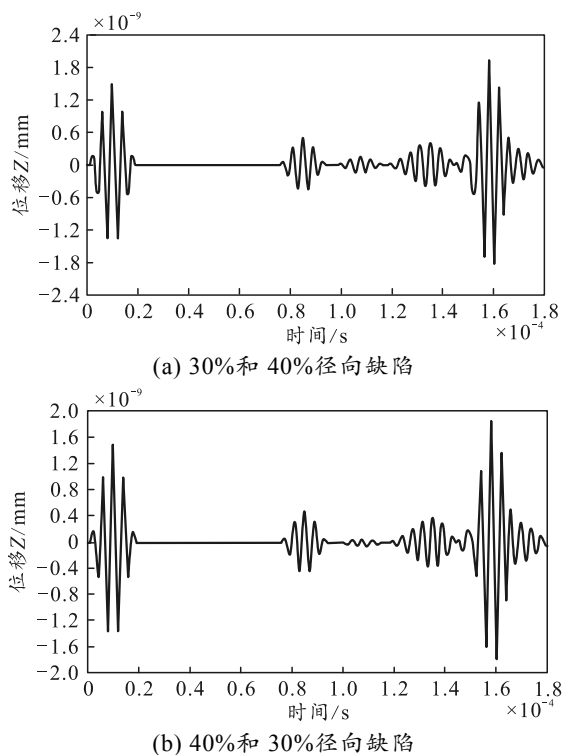


图 4 不同径向尺寸身管接收信号轴向位移

由于二次回波系数不仅受到身管第 1 处缺陷尺寸影响，也受到身管第 2 处缺陷尺寸影响；因此，需通过分别设置 2 处缺陷的径向尺寸（尺寸变化范围在 1%~10% 身管壁厚），观察其对二次回波系数的影响。通过多次仿真实验，分别得到第 1 处缺陷径向尺寸为 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10% 身管壁厚时，二次回波的回波系数与第 2 处缺陷径向尺寸的对应关系。由于此关系涉及 3 个变量；因此，需利用数据分析软件来构建 3 维关系曲线如图 5 所示。

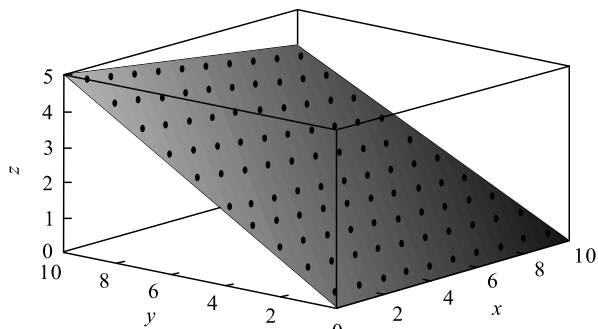


图 5 二次回波系数与 2 处缺陷径向尺寸 3 维关系

利用软件对数据点拟合，发现在利用二元二次多项式拟合时，各个数据点拟合度相对较高，输出二元二次多项式方程为：

$$z_2 = -0.000\ 925\ 9x^2 + 0.006\ 156y^2 - 0.011\ 58xy + 0.013\ 8x \quad (2)$$

式中： x 为身管内壁上第 1 处缺陷的径向尺寸（与身管壁厚之比值）； y 为身管内壁上第 2 处缺陷的径向尺寸（与身管壁厚之比值）； z_2 为超声导波的二次回波系数。从拟合结果分析：该二元二次多项式与仿真检测数据之间的曲线拟合度 R^2 为 0.99，近似为 1，3 个变量之间满足上述二元二次多项式关系。

根据之前对火炮身管中存在 2 处不同轴向位置的径向缺陷时超声导波的传播过程分析来看，身管接收端接收的一次回波信号仅仅携带了第 1 处缺陷信息，与第 2 处缺陷无关；因此，结合之前分析，综合形成方程组：

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= 0.010\ 72x^2 + 0.653\ 5x - 0.004\ 833 ; \\ z_2 &= -0.000\ 925\ 9x^2 + 0.006\ 156y^2 - \\ &0.011\ 58xy + 0.013\ 8x + 0.439y - 0.043\ 04 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： z_1 为一次回波系数； z_2 为二次回波系数； x 为第 1 处缺陷径向尺寸； y 为第 2 处缺陷径向尺寸。该方程组对于实际检测当身管中存在非单一缺陷时，分别检测 2 处缺陷的径向尺寸具有指导意义。在实际检测中，可利用超声导波检测设备分别得到一次回波信号和二次回波信号；对信号进行相应处理分别得到 z_1 和 z_2 数值，代入方程组进行计算，即可分别得出 x 和 y 值，即 2 处缺陷径向尺寸与身管壁厚之间的比值；身管壁厚已知，最终得到 2 处缺陷径向尺寸，实现此类身管在非单一径向缺陷情况下的径向尺寸检测。同时，记录在一段时间内检测身管中导波的一次回波系数和二次回波系数变化情况，与此关系式进行计算和对比分析，可得到该段时间内 2 处缺陷的径向成长情况，有利于掌握火炮身管随着射弹数量的增加，缺陷径向尺寸的变化规律。笔者设置的 2 处缺陷的各项尺寸都相对理想化，在实际检测中，缺陷情况更加复杂，需加强更为复杂情况下相关理论的分析。

3 结论

笔者在 Comsol 有限元仿真的基础上，得出单一径向磨损的数值与导波回波系数之间的关系式，提出利用超声导波来有效检测身管单一缺陷的定量检测方法。在不断改变各径向磨损的磨损量的情况下，分析导波的传播特性，通过有限元仿真得出不同轴向位置的径向磨损尺寸与导波回波系数之间的多元关系式，并分析得出利用超声导波检测火炮身管复杂缺陷的定量方法。