

基于超声非线性的固体火箭发动机药柱测厚方法^{*}

蔺晓煜¹ 王黎明¹ 聂鹏飞¹ 侯懿桃¹ 徐旭东² 张帅²

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 山西格盟中美清洁能源研发中心有限公司 太原 030000)

摘要:为了扩大对高衰减固体火箭发动机药柱的厚度测量范围,利用超声纵波在固体传播中产生静态分量(static components, SC)的理论。通过一发双收的反射式超声换能器组合,即发射端超声换能器工作频率为500 kHz,接收端超声换能器工作频率分别为50和500 kHz,完成多种厚度药柱的静态测量。测量结果表明,对于厚度较大的药柱,50 kHz超声换能器可以放大并接收由500 kHz超声纵波所激发的SC低频信号;对于厚度较小的药柱,500 kHz可以同时接收500 kHz基波信号和SC低频信号。相较于传统同频收发的换能器组合,该一发双收的换能器组合在不加大测厚盲区的同时,提高了可测量厚度范围,可以完成20~200 mm厚度范围内的测量,有一定的创新性和较好实用价值。

关键词:固体火箭发动机;超声换能器;静态分量 SC;一发双收

中图分类号: TN911.6 文献标识码:A 国家标准学科分类代码: 510.4010

Solid rocket motor propellant gain thickness measurement method based on ultrasonic nonlinearity

Lin Xiaoyu¹ Wang Liming¹ Nie Pengfei¹ Hou Yitao¹ Xu Xudong² Zhang Shuai²

(1. College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Gemeng Sino-US Clean Energy R&D Center Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to expand the thickness measurement range of the propellant gain of high-attenuation solid rocket motor, the theory of static component (SC) generated by ultrasonic longitudinal wave in solid propagation is used in this paper. Through the combination of reflective ultrasonic transducers with one transmitter and two receivers, the working frequency of the ultrasonic transducer at the transmitter is 500 kHz, and the working frequency of the ultrasonic transducer at the receiving end is 50 and 500 kHz respectively, to complete the static measurement of a variety of thickness of propellant gain. The measurement results show that the 50 kHz ultrasonic transducer can amplify and receive the low-frequency SC signal excited by the 500 kHz ultrasonic longitudinal wave for the larger thickness of the propellant gain, and the 500 kHz can receive the 500 kHz fundamental signal and the low-frequency SC signal at the same time for the smaller thickness of the propellant gain. Compared with the traditional transducer combination of the same frequency transceiver, the transducer combination of one transmitter and two receivers improves the measurable thickness range without increasing the blind area of thickness measurement. And it can complete the measurement in the thickness range of 20~200 mm, which has a certain degree of innovation and good practical value.

Keywords: solid rocket motor propellant gain; ultrasonic transducer; static component SC; one transmitter and two receivers

0 引言

固体火箭发动机在火箭、导弹武器、航天运载等领域

得到广泛应用^[1-2]。固体推进剂(即药柱)为固体火箭发动机提供动力,药柱在燃室内发生剧烈的化学反应,产生的高温高压气体经喷管向后喷射使火箭向前飞行。为测量

收稿日期:2024-04-22

*基金项目:中北大学校基金(XJJ201919)、2021年山西省应用基础研究计划项目(20210302124545)、国家自然科学青年基金(62203405)、山西省重点研发计划(202202110401015)项目资助

固体火箭发动机的动力指标,就必须测量药柱的燃烧速率,本质上是对药柱进行测厚检测。目前国内用于药柱燃烧速率测量的方法有靶线法、声发射法、密闭燃烧器法、CT 和 X 射线测量法和超声测量法等^[3]。超声测量法相较于其他方法更灵活多变,无论是实验室的静态测量还是热试车现场的动态测量均可应用,且数据处理方法较为成熟^[4-5]。国外对于用超声波法计算固体燃料的燃速的研究最早可以追溯到 20 世纪 60 年代。随着研究经验的积累,近十年来国外超声燃速测量技术已趋于成熟。但国内相关研究起步较晚,研究内容较少且不够深入。罗天佑^[6]利用 500 kHz 超声同频一收一发法测得 30 mm 厚药柱信号,所测药柱厚度较薄。李伟^[7]利用 50 kHz 超声阵列对 100 mm 内不同厚度药柱进行测量,阵列法提高了超声波强度和分辨率,但换能器本身频率较低,对于较薄的药柱试件来说波长过大,分辨率不足。孙得川等^[8]提出了对多频率换能器组合技术的展望,但并未实现。邱飞等^[9]以 500 kHz 换能器自发自收法测量了厚度小于 30 mm 的药柱,自发自收法在薄药柱与高频超声的条件下较有优势,当药柱厚度变大,高频换能器和自发自收这两点都将难以实现。

针对上述问题,本文采用 500 kHz 超声换能器作为超声纵波发射器,50 和 500 kHz 超声换能器作为接收器构建测量系统对不同厚度的单层药柱进行测量。

1 静态分量(SC)理论

对 SC 的研究首先开始于 20 世纪 80 年代,学者们利用各种方法提取和证明 SC 的存在。最近几年,Deng 等^[10]利用低频超声换能器直接提取 SC 信号;赖泉青等^[11]利用 SC 理论设计了一种自发自收的双频换能器;Wang 等^[12]对 SC 信号的产生机理做了进一步研究,推动了 SC 的理论发展及应用。

关于 SC 的相关理论如下:首先,考虑一个由 $x \geq 0$ 定义的半空间,其中 x 是拉格朗日(或材料的)坐标,描述了材料质点在初始($t=0$)状态下的位置。在任意给定时间 t ,质点 x 从其初始位置的位移记为 $u(x,t)$ 。假设半空间是由具有二次非线性的弹性固体构成的,即法向应力与 x 方向上的拉格朗日应变/位移梯度有关,控制波在 x 方向传播的运动位移方程为^[10]:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: c 为纵波波速; β 为超声的非线性参量。当载波角频率为 ω 的超声纵波脉冲在具有弹性非线性的材料中传播时,除了产生载波角频率为 2ω 的二次谐波(SH)脉冲外,还会同时产生载波频率为零的 SC 脉冲:

$$U_D(x,t) = \left[U \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \frac{\beta U^2 \omega^2 x}{8c^2} \cos 2\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + \frac{\beta U^2 \omega^2 x}{8c^2} \right] P \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (2)$$

式(2)右侧的三项分别为载波频率为 ω 的主纵波脉冲、生成的载波频率为 2ω 的 SH 脉冲和生成的零载波频率的 SC 脉冲。

2 设计专用换能器

本文涉及的药柱材料参数如下:密度 1 670 kg/m³,纵波声速 1 540 m/s。50 和 500 kHz 的圆柱形压电晶体参数:材料 PZT-5H,密度 7 500 kg/m³,纵波声速 3 900 m/s。

2.1 匹配层材料和厚度的选择

超声波在介质中的传播会发生透射和反射。透射是超声波从一个介质传播到另一个介质时的现象,而反射是超声波遇到不连续界面时发生的现象。超声波的透射率指超声波从一个介质传播到另一个介质时,通过界面的能量比例。若只考虑声波垂直于介质表面入射的情况,其透射率可以表示为:

$$T = \frac{P_t}{P_0} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3)$$

式中: Z_1, Z_2 分别表示第 1、第 2 种介质的声阻抗值; P_0 和 P_t 分别表示入射声强和透射声强。

当声波从 3 种不同声阻抗值的介质中依次穿过,其透射率为:

$$T = \frac{4Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} + \left(Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}} \quad (4)$$

式中: Z_1, Z_2 和 Z_3 分别表示第 1、第 2 和第 3 种介质的声阻抗值; d_2 表示第 2 种介质的厚度; λ_2 表示声波在第 2 种介质中的波长^[8]。

由式(3)可得压电晶体和与药柱之间的透射率 $T = 0.33$,当两种材料中间加入匹配层后,其透射率会相应发生变化,由式(4)可知,当 d_2 的值为 $1/4\lambda_2$ 及其奇数倍时,令 $T = 1$,可得最佳匹配层的声阻抗值:

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} = 8.67 \text{ MRayls} \quad (5)$$

由于难以找到声阻抗值特别精确的材料,本文采用声阻抗值略高于最佳匹配声阻抗的材料如下:体积比为 33.2% 的钨粉—环氧树脂(密度 5 291 kg/m³,纵波声速 1 677 m/s,声阻抗 8.87 MRayls)。研究 50 kHz 超声换能器,利用有限元仿真软件模拟匹配层厚度对透射率的影响,其中 $\lambda_2 = c_2/f_2 = 33.54 \text{ mm}$,则 $1/4\lambda_2 = 8.39 \text{ mm}$ 。仿真的建模情况如图 1 所示,从上往下依次为超声换能器和药柱(药柱两侧均为吸收层),在底边的对测位置放置接收端换能器。

图 2 所示为各种匹配层厚度对透射率的增幅程度,不难看出匹配层较薄时无明显增幅,可将匹配薄层看作只对压电晶体具有保护作用的薄层;在匹配层厚度达到 $1/4\lambda_2$ 附近时,对透射率的增幅达到一个峰值;在匹配层厚度达到 $1/2\lambda_2$ 时,略好于无匹配层时的情况;随着匹配层的厚度继续增加,增幅又开始加大,但信号波拖尾现象越来越严重,

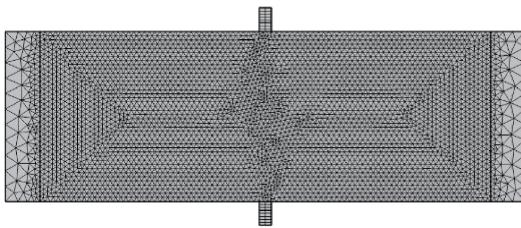


图 1 仿真模型
Fig. 1 Simulation model

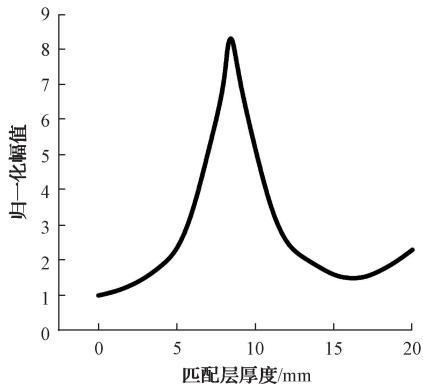


图 2 50 kHz—匹配层厚度
Fig. 2 50 kHz-thickness of Matching layers

信号混叠严重,变得难以区分。考虑到在使用过程中会对匹配层造成一定程度的磨损,故 50 和 500 kHz 超声换能器匹配层厚度分别选用略大于极值处的 8.5 与 0.9 mm。

2.2 背衬材料的选择

由于本文所涉及超声换能器均为低频换能器,对于精度要求不是特别苛刻,故采用空气背衬超声换能器。空气声阻抗为 0.000 4 Mrayls,与压电晶体之间的透射率 $T = 0.000\ 054\ 7$,几乎全反射。相比于有背衬的换能器,声能效率更高^[13]。而且,使用空气背衬能有效减小换能器的尺寸。

3 实验测量过程及结果讨论

3.1 仪器设备及材料

实验涉及的仪器设备与材料如表 1 所示。实验参数如下:激励电压 200 V,激励频率 500 kHz,半周期数 4,增益 35 dB,采样频率设为 31.25 MHz,采样点数 32 768。实验过程中采用一发双收反射法对药柱进行测量,如图 3 所示。

3.2 实测数据及分析

实验为静态测量,根据孙得川等^[8,14]的理论,药柱的导热系数小,传热较慢,故认为燃面附近的温度薄层对燃速测量结果的影响可以忽略,同时提出了一种背景干扰波的时均消除法,可以祛除一些比较稳定的噪声^[15]。认为此静态测量实验在一定程度上可以模拟热试车动态测量。实验共采集 20 组信号,50 与 500 kHz 换能器接收的信号各占 1/2。

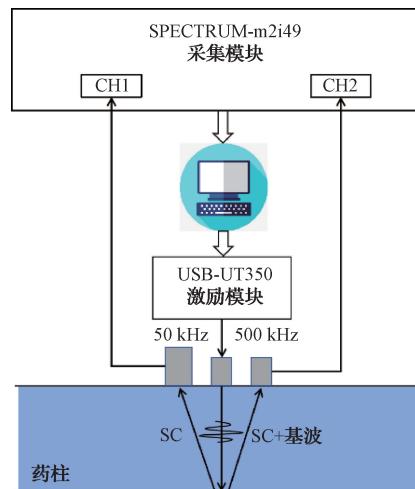


图 3 实验流程
Fig. 3 Experimental flow chart

表 1 仪器设备与材料型号

Table 1 Instrument equipment and material model

| 名称 | 型号 |
|--------|----------------|
| 超声激励模块 | USB-UT350 |
| 超声采集模块 | SPECTRUM-m2i49 |
| 单层药柱 | 20~200 mm |
| 超声换能器 | 50 kHz/500 kHz |

采集信号示意图如图 4 所示。其中第 1 个幅值很小的波为表面直达波,第 2 个幅值较大的波为一次回波,紧随其后的第 3 个波为二次回波。一般二次回波的幅值应小于一次回波,但从式(2)中第 3 项可以看出,幅值与声程 x 成线性关系,故出现这种现象。

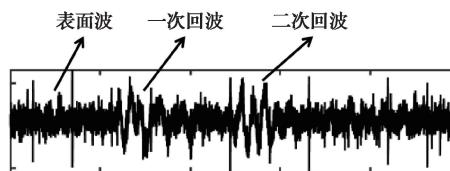


图 4 波形示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the waveform

50 与 500 kHz 换能器接收信号示意图如图 5 所示,所测药柱厚度为 100 mm。从图 5(a)频域可以看出高频信号完全被衰减,工作频率为 500 kHz 的换能器对低频的 SC 信号有所响应,只是其幅值很小。图 5(b)所示为相同情况下 50 kHz 换能器接收信号,时域和频域中幅值相比于 500 kHz 换能器有大幅提升。

当药柱厚度超过 100 mm 时,500 kHz 换能器几乎接收不到有效信号,如图 6(a)所示,所测药柱厚度为 120 mm。而同条件下,50 kHz 换能器依旧可以在工作频率下接收信号。这种情况下,对于药柱的厚度计算以

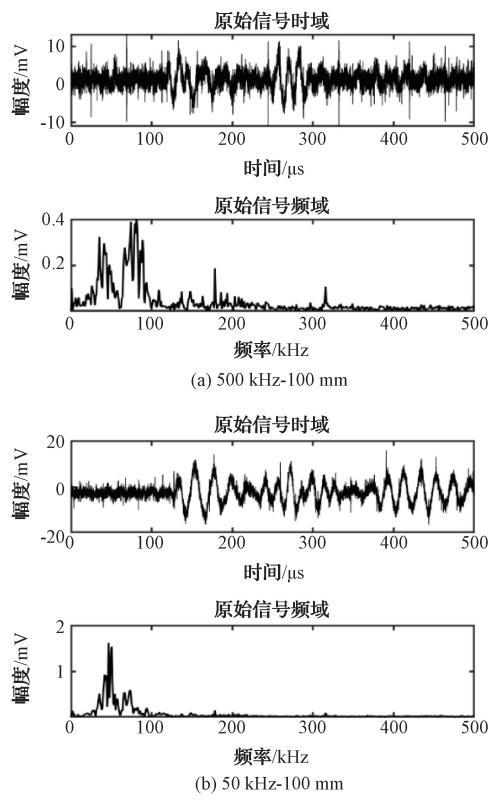


图 5 100 mm 厚药柱信号

Fig. 5 signal of 100 mm propellant gain

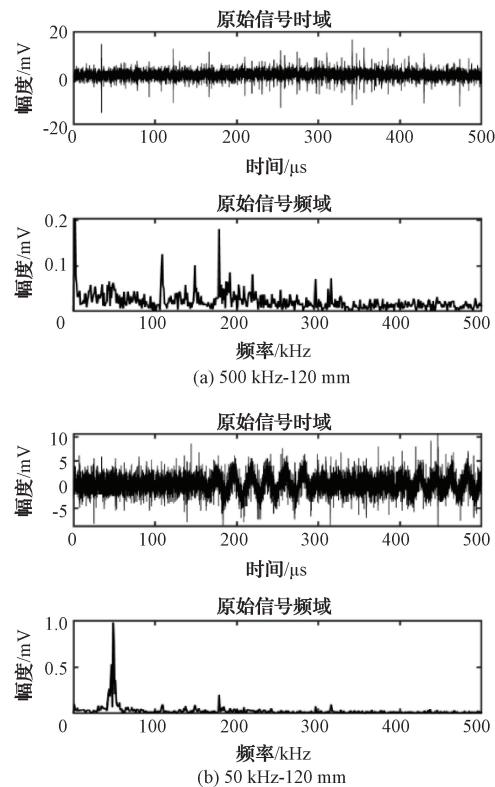


图 6 120 mm 厚药柱信号

Fig. 6 Signal of 120 mm propellant gain

50 kHz 换能器接收的信号为主。

当药柱厚度低于 100 mm 时,对于药柱的测厚计算便以 500 kHz 换能器接收的信号为主。因为药柱厚度低于 100 mm 时,500 kHz 换能器对于有效信号的响应足以进行测厚计算。而且,500 kHz 换能器对于 SC 信号的响应频率高于 50 kHz。而 50 kHz 换能器接收的信号有略微变形和粘连,不易分辨,如图 7(a)和(b)所示,所测药柱厚度为 60 mm。

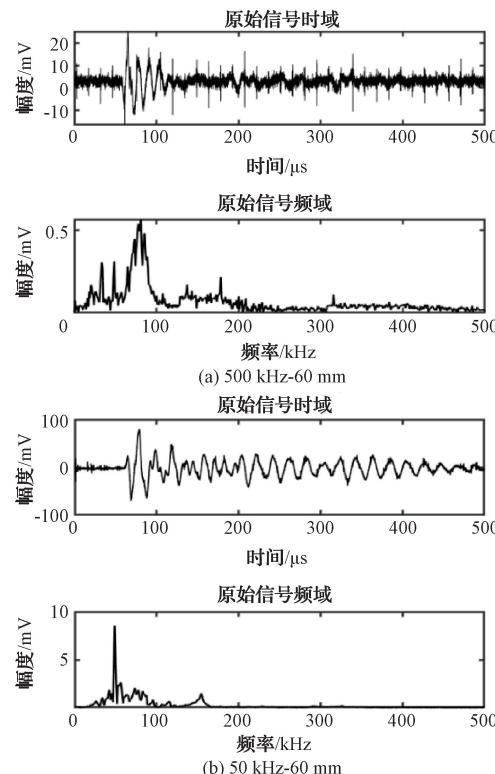


图 7 60mm 厚药柱信号

Fig. 7 Signal of 60mm propellant gain

当药柱厚度进一步减小至 20 mm 时,500 kHz 换能器接收的信号中,一次回波的主频为基波频率 500 kHz,可直接进行药柱厚度计算,如图 8 所示。

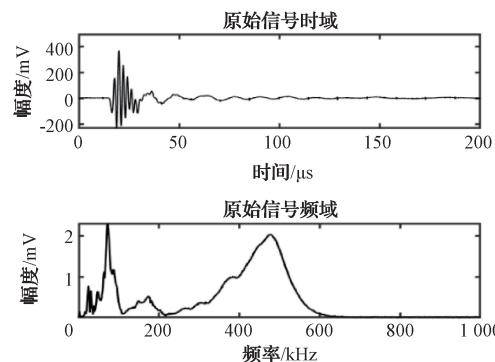


图 8 20 mm 厚药柱 500 kHz 信号

Fig. 8 500 kHz signal of 20 mm propellant gain

药柱燃烧速度的测量是对药柱相对厚度变化的计算，并非绝对厚度的计算。因此，换能器接受的信号只需包含一次回波即可，利用一次回波峰值的移动便可计算出相应厚度的变化，从而推算出燃烧速度。

相对厚度变化计算公式为：

$$\begin{aligned}x &= 2 \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2} \\ \Delta x &= v \cdot \Delta t \\ x' &= x - \Delta x \\ h' &= \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{x'}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}\end{aligned}\quad (6)$$

式中： x 表示参考声程； d 表示换能器中心间距 35 mm； h 表示参考厚度； Δx 表示相对声程差； v 表示药柱声速 1 540 m/s； Δt 表示相对时间差（即一次回波峰值时间差）； x' 表示算得声程。

表 2 所示为 500 和 50 kHz 接收信号算得的药柱厚度，分别以 100 和 200 mm 的信号为基准测量药柱的相对厚度变换。

表 2 500 kHz 和 50 kHz 换能器信号

Table 2 Signal from 500 kHz transducer and 50 kHz transducer

| 厚度/mm | 500 kHz | | | 50 kHz | | |
|-------|------------------|---------|-------|------------------|---------|--|
| | $\Delta t/\mu s$ | h'/mm | 厚度/mm | $\Delta t/\mu s$ | h'/mm | |
| 100 | 0 | 100 | 200 | 0 | 200 | |
| 80 | 23.9 | 81.2 | 180 | 23.0 | 182.2 | |
| 60 | 49.7 | 60.8 | 160 | 53.6 | 158.5 | |
| 40 | 75.6 | 39.6 | 140 | 75.3 | 141.7 | |
| 20 | 96.9 | 20.4 | 120 | 104.8 | 118.8 | |

从表 2 可以看出，计算厚度误差最大为 2.2 mm，对药柱厚度的计算精度随着药柱的厚度变大而减小，这也是信号频率随厚度变大而变小所致。

3.3 与传统检测方法的对比

药柱检测的传统方法为，利用同一频率超声换能器一发一收式的反射法测量。在此，分别对比了传统方法 50KHz 换能器、传统方法 500 kHz 换能器和本文所提检测方法的测量范围。综合所接收信号的幅值、换能器的电气特性和回波分辨率作为各检测方法的测量范围指标，可得出如下结论。

500 kHz 同频收发检测方法的药柱检测范围为 20~100 mm，低于 20 mm 易发生回波信号粘连，分辨率降低，高于 100 mm 回波信号太弱；50 kHz 同频收发检测方法的药柱检测范围为 80~300 mm，低于 80 mm 易发生回波信号粘连，分辨率降低，高于 300 mm 回波信号太弱；本文所提检测方法的测量范围为 20~200 mm，结合了以上两种方法的优点，虽然检测上限有一定程度的降低，但由于发射端频率较高，故在精度上有所提高。

4 结 论

在超声纵波穿透材料的过程中会伴随低频 SC 信号的产生，结合一发双收的超声换能器组合可以拓宽药柱厚度的检测范围。该换能器组合可以完成 20~200 mm 厚度范围内的测量，对于 100 mm 以上厚度的药柱，采用 50 kHz 换能器接收的信号进行厚度计算；对于 100 mm 以下厚度的药柱，采用 500 kHz 换能器接收的信号进行厚度计算。测量方式简单且又灵活多变，可以根据实际情况更换换能器组合达到检测目的。

参 考 文 献

- [1] 汪芊芊，苏晗，林臻，等. 运载火箭电子设备测试性验证方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报，2024, 38(2): 241-248.
WANG Q, SU H, LIN ZH, et al. Research on testability verification of launch vehicle electronic equipment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2): 241-248.
- [2] 宁泓淘，金永，刘静静. 固体火箭发动机绝热层三维可视化技术研究 [J]. 国外电子测量技术，2022, 41(10): 80-84.
NING H T, JIN Y, LIU J J. Research on three-dimensional visualization technology of insulationlayer of solid rocket engine [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 80-84.
- [3] 裴庆，赵凤起，罗阳，等. 固体推进剂燃速测试技术研究进展 [J]. 火炸药学报，2015, 38(3): 9-14, 21.
PEI Q, ZHAO F Q, LUO Y, et al. Research progress in the burning rate measurement technology of solid propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(3): 9-14, 21.
- [4] 韩晓东，李光亚，胡雅妮，等. 基于一维 CNN 的时域超声信号识别技术研究 [J]. 电子测量技术，2022, 45(12): 20-25.
HAN X D, LI G Y, HU Y N, et al. Research on time-domain ultrasonic signal recognition technology based on one-dimensional CNN [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(12): 20-25.
- [5] 王辰辰，姚贞建，杨梦冉，等. 基于经验与变分混合分解的超声回波信号噪声消除方法 [J]. 仪器仪表学报，2023, 44(6): 197-204.
WANG CH CH, YAO ZH J, YANG M R, et al. Noise elimination method of ultrasonic echo signal based on empirical and variational hybrid decomposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 197-204.
- [6] 罗天佑. 超声波测量固体推进剂燃速的应用研究 [D]. 大连：大连理工大学，2021.

- LUO T Y. Research on the application of ultrasonic in the measurement of solid propellant burning rate [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [7] 李伟. 固体火箭发动机燃面退移阵列超声测试系统设计 [D]. 太原: 中北大学, 2024.
- LI W. Design of ultrasonic test system for solid rocket motor combustion surface retreating array [D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [8] 孙得川, 贤光. 超声波测量大尺寸固体火箭发动机燃速的关键技术 [J]. 兵工学报, 2023, 44(4): 1097-106.
- SUN D CH, XIAN G. Key technology for ultrasonic measurement of burning rate in large-scale solid rocket motors [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(4): 1097-106.
- [9] 邱飞, 高永刚, 张荣, 等. 基于超声的标准发动机动态燃速测试技术 [J]. 固体火箭技术, 2024, 47(1): 128-134.
- QIU F, GAO Y G, ZHANG R, et al. Dynamic burning rate measurement of standard SRM based on ultrasonic technology [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2024, 47(1): 128-134.
- [10] DENG M X. An experimental approach for detection of the acoustic radiation induced static component in solids [J]. Chinese Physics Letters, 2020, 37(7): 074301.
- [11] 赖泉青, 卢露, 许才彬, 等. 一种新型自发自收式双频超声换能器 [J]. 电子器件, 2022, 45(6): 1517-1522.
- LAI Q Q, LU L, XU C B, et al. A novel pulse-echo dual-frequency ultrasonic transducer [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(6): 1517-1522.
- [12] WANG J, LAI Q, XU C, et al. High-frequency ultrasound-based thickness measurement of highly attenuating materials [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(3): 035004.
- [13] 张雪晴, 尹冠军, 张家裕, 等. 超声换能器辐射特性的优化 [J]. 应用声学, 2023, 42(3): 540-547.
- ZHANG X Q, YIN G J, ZHANG J Y, et al. Optimization of radiation characteristics of ultrasonic transducer [J]. Journal of Applied Acoustics, 2023, 42(3): 540-547.
- [14] 孙得川, 权恩, 曹梦成. 超声波实时测量技术在固体火箭发动机中的应用 [J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 1969-1975.
- SUN D CH, QUAN E, CAO M CH. Application of ultrasonic real-time measurement technology in solid rocket motor [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(11): 1969-1975.
- [15] 刘宗魁, 汪太琨, 王鸿丽, 等. 固体火箭发动机装药动态燃速辨识方法 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(3): 181-184.
- LIU Z K, WANG T K, WANG H L, et al. Dynamic burning rate identification of solid rocket motor propellant [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(3): 181-184.

作者简介

蔺晓煜,硕士研究生,主要研究方向为超声成像。

E-mail:lxy18855314262@163.com

王黎明(通信作者),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无损检测。

E-mail:wlm@nuc.edu.cn