

基于交流阻抗法的复合多层石墨烯丁羟推进剂老化监测研究

段磊光, 霍怡伟, 郭剑锋, 王鑫峰
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 为探索一种固体推进剂老化无损监测方法, 以复合多层石墨烯丁羟推进剂为实验对象, 在 60 °C 的高温环境下进行热加速老化实验。使用了一种新型无源无线式便携固体发动机推进剂老化数据采集系统, 利用其阻抗参数采集模块测量丁羟推进剂不同老化时间的交流阻抗实部和阻抗虚部参数, 制成交流阻抗谱; 通过交流阻抗谱分析丁羟推进剂的交流阻抗参数与老化时间的关系; 最后基于该关系, 利用BP神经网络算法对热加速老化条件下推进剂的寿命进行了预测。结果表明: 最小性能梯度为 10^{-6} 、最高失败次数为 6 时, 预测结果最佳。

关键词: 固体火箭发动机; 老化监测; 交流阻抗法; 丁羟推进剂; BP神经网络

中图分类号: V512

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-066-008

Study on Aging Monitoring of Composite Multi-layer Graphene HTPB Propellant Based on AC Impedance Method

DUAN Leiguang, HUO Yiwei, GUO Jianfeng, WANG Xinfeng
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: In order to explore an AC impedance-based non-destructive monitoring method for solid propellant aging, this paper took composite multi-layer graphene HTPB propellants as the experimental object and conducted thermal acceleration aging experiments under a high temperature environment of 60 °C. The AC impedance spectrum was drawn by real parts and imaginary parts of the AC impedance measured by the impedance parameter acquisition module and a new passive wireless portable solid engine propellant aging data acquisition system. By the AC impedance spectrum, relationship between the AC impedance parameters of HTPB and aging time was analyzed. Accordingly, the aging life of solid propellants under thermal accelerated aging conditions was predicted with the assistant of the BP neural network algorithm. Results showed that the best prediction result is achieved when the minimum performance gradient is 10^{-6} and the maximum number of failures is 6.

KEYWORDS: solid rocket motor; aging monitoring; AC impedance method; HTPB propellant; BP neural network

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (22205259)

第一作者: 段磊光 (1993—), 男, 讲师, 主要从事固体发动机装药结构完整性研究。E-mail: 731218791@qq.com

引用格式: 段磊光, 霍怡伟, 郭剑锋, 等. 基于交流阻抗法的复合多层石墨烯丁羟推进剂老化监测研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 66-73.

端羟基聚丁二烯 (Hydroxyl-terminated Polybutadiene, HTPB) 推进剂 (简称丁羟推进剂) 已经成为国内外大多数战略、战术导弹发动机的动力源材料。在长期贮存、一次消耗、不可更换的服役条件下, 固体推进剂内部组分会发生一系列不可逆的物理化学变化, 这些老化反应会使导弹武器的性能指标大大降低^[1], 严重影响军队实战能力。研究推进剂的贮存性能 (老化规律) 可对老化条件下的推进剂进行状态判定及寿命预估。为了不破坏导弹的完整性, 国外利用光、声、磁等现代光谱技术实现了对固体推进剂老化寿命的无损评估, 微机电传感器应用于固体推进剂的老化研究逐渐成为主流。美国 Sandia 国家实验室借助光学传感器系统测定推进剂老化过程中产生的 NO_2 浓度, 以此为依据对推进剂老化性能进行评估^[2]。Brouwer 等^[3]在固体火箭发动机中植入双界面应力传感器和化学传感器, 通过测量推进剂老化过程中应力状态和氧含量的变化, 实现了对推进剂老化性能的监测。Lopatin 等^[4]在 2015 年利用嵌入式光纤传感器对固体推进剂进行了健康监测试验, 获得了推进剂材料的老化模量。

国内研究起步虽比国外稍晚, 但也取得了大量研究成果, 张守诚等^[5]基于高频机电阻抗法对发动机界面结构试件进行了健康监测实验, 利用 2 种粘贴在材料表面的压电传感器检测了界面脱粘的损伤情况。艾春安等^[6]采用声-超声检测技术检测了发动机结构的粘接质量, 实现了对复合材料冲击损伤的快速检测。段磊光等^[7]从固体推进剂的电学性能和力学性能两方面入手, 基于压电阻抗法开展了一系列推进剂老化监测试验, 对推进剂的机械阻抗谱进行分析, 实现了对推进剂老化健康状态的无损原位检测。

但是, 上述方法都会不同程度上对固体推进剂的结构造成损伤, 经过长时间的贮存, 传感器与推进剂之间的粘合结构会发生变化, 从而影响推进剂老化的长期监测。目前, 国内外还没有通过交流阻抗法对推进剂的老化性能进行研究。交流阻抗法属于一种无损性质的原位监测方法, 只需将接头固定在推进剂表面两端进行阻抗测量, 分析老化期间推进剂阻抗参数的变化规律, 研究推进剂电导特性与老化时间的相关性, 最终实现对推进剂老化寿命的无损预估。基于此, 本文制备了复合多层石墨烯丁羟推进剂, 在 60 °C 的高温环境下进行热加速老化实验, 使用了一种新型无

源无线式便携固体发动机推进剂老化数据采集系统, 利用该系统的阻抗参数采集模块测量了固体推进剂老化后的交流阻抗实部和阻抗虚部参数, 制成交流阻抗谱。最后利用 BP 神经网络算法进行热加速老化条件下固体推进剂寿命的预测。

1 电导推进剂制备与性能测试

1.1 电导推进剂制备

由于石墨烯具有高比表面积 ($2\,630\text{ m}^2/\text{g}$)、高强度 ($50\sim 300\text{ GPa}$)、良好导电和导热性能 (导热率 $3\,000\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)、表面易官能化、良好电磁性能等特性, 使其在传感器、电容器、储氢等方面应用广泛。利用这种特性, 本文将石墨烯应用于固体推进剂中, 用于调节其电导性能和力学性能。

复合多层石墨烯丁羟推进剂的基础配方采用固含量为 88% 的丁羟三组元体系, 通过添加一定用量的石墨烯材料来提高电导率。实验所用的推进剂, 固体填料为高氯酸铵 (Ammonium Perchlorate, AP) 和铝粉, 其中, AP 质量分数为 69.5%, 铝粉质量分数为 18.5%。添加的复合导电石墨烯质量分数为 0.5%^[8]。

根据标准 QJ 924—1985《复合固体推进剂单向拉伸试验方法》, 按照设计配方制备好样品, 随后用立式捏合机真空捏合并浇铸成长方体状。固化完成后, 沿着浇铸方向将其切割成 $40\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的长方体状^[9]。

1.2 推进剂各项性能测试

对不同固含量的复合多层石墨烯丁羟推进剂进行电导性能测试, 多层石墨烯添加质量分数为 0.5% 的丁羟推进剂, 电阻率与固含量关系如图 1 所示。可以发现, 随着固含量的增加, 电阻率降低, 推进剂的导电性能增加。

对多层石墨烯质量分数为 0.1% 和 0.5% 的推进剂进行工艺性能和力学性能测试。表 1 是采用落球黏度计测试的 45 °C 下推进剂药浆起始黏度和药浆黏度随时间变化情况, 以此评估推进剂药浆的工艺性能。测试结果发现, 推进剂黏度随着复合多层石墨烯配比的增加而增大。

按照 GJB 770B—2005《火药试验方法》中 413.5《最大抗拉强度、断裂强度、最大伸长率和断裂伸长率单项拉伸法》进行力学性能测试, 结果见表 2。

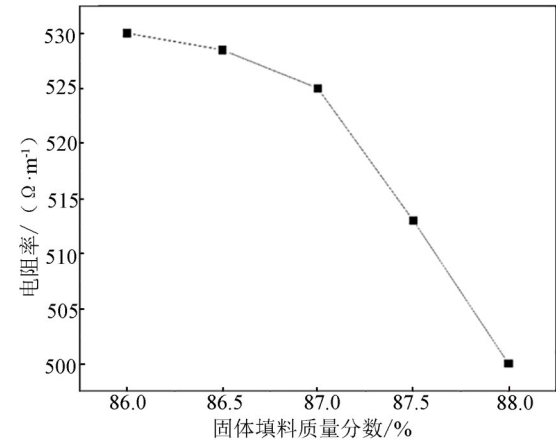


图 1 复合多层石墨烯丁羟推进剂电阻率与固含量关系
Fig. 1 Relationship between the multi-layer graphene-added HTPB propellant's resistivity and mass fraction of solid filler

表 1 推进剂药浆黏度随时间变化测试结果
Tab. 1 Test results of propellant slurries varying along with time

批号	石墨烯质量 分数/%	$\eta_{0h}/$ (Pa·s)	$\eta_{1h}/$ (Pa·s)	$\eta_{2h}/$ (Pa·s)	$\eta_{3h}/$ (Pa·s)
A	0.1	301.3	398.5	524.9	653.5
B	0.5	356.8	439.3	586.1	679.2
C	1.0	361.9	443.7	594.3	685.4

注： η_{0h} 为推进剂药浆混合结束后黏度。

表 2 力学性能测试结果
Tab. 2 Test results of mechanical properties

编号	批号	温度/℃	拉伸强度/MPa	伸长率/%
1	A	20	0.605	68.9
2	B	20	0.623	64.7
3	C	20	0.650	58.4
4	A	55	0.286	76.4
5	B	55	0.267	65.5
6	C	55	0.240	55.0
7	A	-40	1.585	50.9
8	B	-40	1.604	48.5
9	C	-40	1.665	44.7

由表2可以发现，推进剂常温、高温和低温力学性能优良，复合多层石墨烯与推进剂其他组分相容性良好，对推进剂力学性能影响较小。推进剂配方试验表明，添加了复合多层石墨烯的丁羟推进剂具有良好的导电性能，同时具备较好的工艺性能，能够完成装药测试。并且复合多层石墨烯对HTPB固体推进剂力学性能的影响较小。

2 固体推进剂老化监测系统实验

2.1 交流阻抗法原理

推进剂在贮存过程中由于HTPB黏合剂与AP颗粒之间的交联反应，导致推进剂机械性能下降的同时产生缩聚，影响石墨烯在推进剂中的分布，从而使得推进剂产生电导特性的变化。

交流阻抗法的原理是通过复杂阻抗的测定来对材料的电导特性进行分析。交流阻抗法测量推进剂阻抗的简单构造如图2所示，在固体推进剂系统的输入端施加交流信号，利用探针在输出端获取响应信号，通过分析激励信号与响应信号之间的关系来研究固体推进剂材料的电导特性^[10]。对于推进剂材料而言，其电导特性随着老化时间的增加而发生变化。通过交流阻抗法测量老化前后推进剂的复杂阻抗，可以得到其电导特性的变化情况。具体来说，老化过程可能引起推进剂中离子导电机理变化、化学吸附机制变化以及晶体结构演变等，从而影响其电导特性。

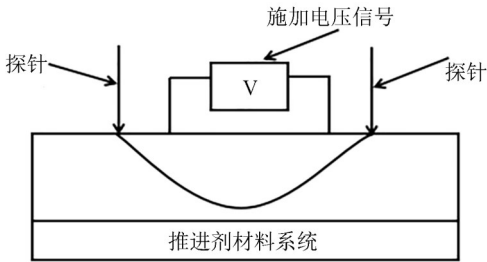


图 2 交流阻抗法测量推进剂阻抗的简单构造
Fig. 2 Simple structure of AC impedance method-based propellant impedance measurement

电解质表征部分是由HTPB推进剂在老化过程中产生的氧化还原反应和离子交换而引起的。电解质中的离子在电极表面发生反应，生成电荷，在电解质/电极界面形成双层电容 C_d ，又由于电解质的电导率不同，所以会出现电荷转移电阻 R_d 。电解质表征部分的阻抗 Z_d 可以表示为

$$Z_d = R_d - j \frac{1}{\omega C_d}$$
 (1)

式中： ω 为频率。

阻抗表征部分用来描述HTPB推进剂的热效应，其电路模型是2个RLC电路并联，分别表示固相和孔隙相。固相的热效应主要体现在化学键的断裂和形成、分子结构的改变等方面。这些变化可能导致材料电导率发生改变，因为电导率与

材料中的载流子浓度和迁移率有关, 而这些因素受材料结构和化学键的影响^[11]。固相电路由电感 L_s 、电阻 R_s 和电容 C_s 组成, 电阻 R_s 表示固相电极的电阻, 电感和电容表示固相中的热效应。因此, 表征固相热效应的阻抗 Z_s 可以表示为

$$Z_s = R_s + j\omega L_s - j\frac{1}{\omega C_s} \quad (2)$$

孔隙相的热效应主要体现在孔隙形态和大小变化、孔隙中存在的气体种类和浓度变化等方面。这些变化可能影响载流子的扩散和迁移, 从而影响材料的电导特性。孔隙相电路由电感 L_p 、电阻 R_p 和电容 C_p 组成, 电阻 R_p 表示孔隙相电极的电阻, 电感和电容表示孔隙相中的热效应。因此, 表征孔隙相热效应的阻抗 Z_p 可以表示为

$$Z_p = R_p + j\omega L_p - j\frac{1}{\omega C_p} \quad (3)$$

推进剂等效电路模型总阻抗 Z 可表示为

$$Z = Z_d + \frac{Z_s Z_p}{Z_s + Z_p} \quad (4)$$

将式 (1)、(2)、(3) 代入式 (4) 可得

$$Z = R_d - j\frac{1}{\omega C_d} + \frac{(R_s + j\omega L_s - j\frac{1}{\omega C_s})(R_p + j\omega L_p - j\frac{1}{\omega C_p})}{R_s + R_p + j(\omega L_s + \omega L_p - \frac{1}{\omega C_s} - \frac{1}{\omega C_p})} \quad (5)$$

2.2 固体推进剂阻抗测量原理

为了实现便携、灵活度高及远程实时监测结构健康状态的目标, 实验采用基于 AD5933 阻抗测量芯片的无线阻抗测量仪器, 原理如图 3 所示。

AD5933 是一款高精度阻抗测量芯片, 内部集成的直接数字频率发生器可以产生特定频率来激励推进剂试件, 试件上得到的响应信号被模拟数字转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 采样, 并通过芯片上的数字信号处理 (Digital Signal Process, DSP) 模块进行离散傅立叶变换, 从而得到试件在输出频率下的阻抗实部值和虚部值。

2.3 推进剂试件的阻抗测量

依据国标 QJ 2328—1992《复合固体推进剂贮存老化试验方法》, 在 60 °C 下进行热加速老化实验。根据经验^[12], 热加速老化前期的采样时间间隔要短, 后期逐步拉大时间间隔, 因此选用采样老化点为 1、2、4、7、14 和 28 d。在每个采样老化点随机抽取 4 个推进剂试件进行阻抗测量, 每个试件测量 2 次以保证数据的准确性和一致性。图 4 为固体推进剂老化数据采集系统整体结构, 表 3 为每个采样点随机测量推进剂试件序号。

3 交流阻抗谱绘制与分析

根据各频率下测量的阻抗实部 Z 和阻抗虚部 Z' , 计算得到推进剂试件的阻抗模量 $|Z|$, 然后将这些量绘制成交流阻抗谱。通过分析对比不同老化点的交流阻抗谱, 发现推进剂试件电导特性的老化规律, 从而找到判定固体推进剂老化状态的特征指标。

3.1 阻抗实部随频率变化情况

图 5 为在 0~50 kHz 频率下, 所有老化点的阻

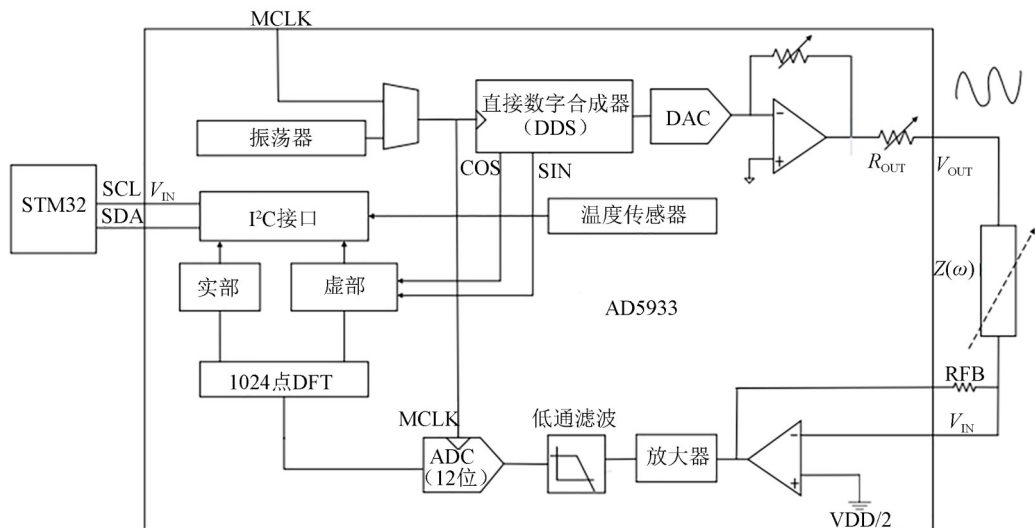


图 3 AD5933 阻抗测量原理

Fig. 3 Diagram of AD5933 impedance measurement device

抗实部变化（拟合）曲线。

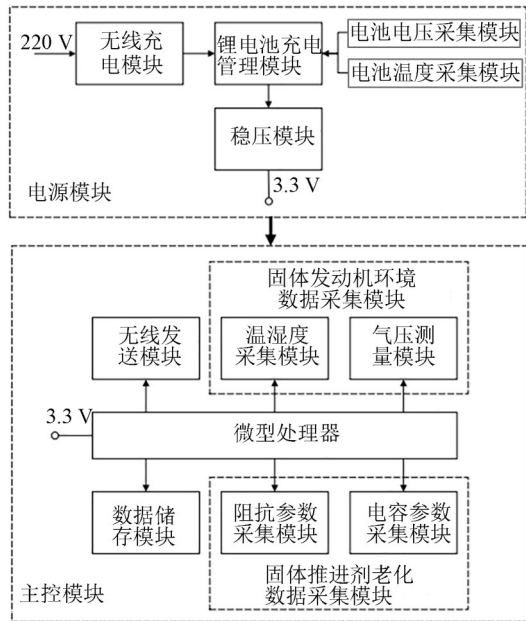


图 4 固体推进剂老化数据采集系统整体结构

Fig. 4 Overall structure of solid propellant aging data acquisition system

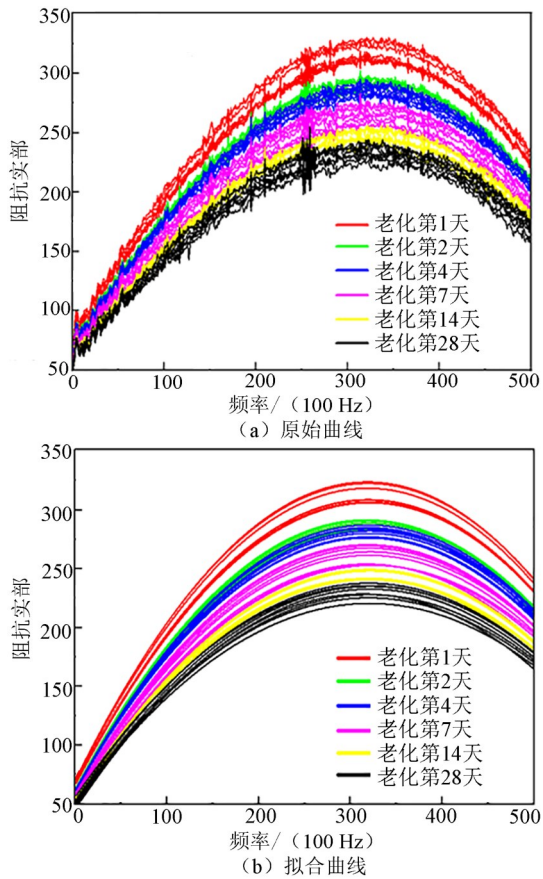


图 5 阻抗实部随频率变化曲线

Fig. 5 Curves of impedance real parts varying with frequencies

表 3 推进剂试件实验测序

Tab. 3 Material parameters of concrete

老化时间点	环境温度为 60 ℃ 的推进剂试件
第 1 天	15 号、16 号、39 号、40 号
第 2 天	33 号、34 号、21 号、22 号
第 4 天	35 号、36 号、31 号、32 号
第 7 天	23 号、24 号、25 号、26 号
第 14 天	07 号、08 号、27 号、28 号
第 28 天	29 号、30 号、03 号、04 号

从图 5 可以看出，阻抗实部 Z 的变化曲线呈抛物线状，各老化点曲线的峰值随着老化时间的延长而逐渐下降。

3.2 阻抗虚部随频率变化情况

图 6 为 0~50 kHz 频率下，所有老化点阻抗虚部 Z' 的变化（拟合）曲线。

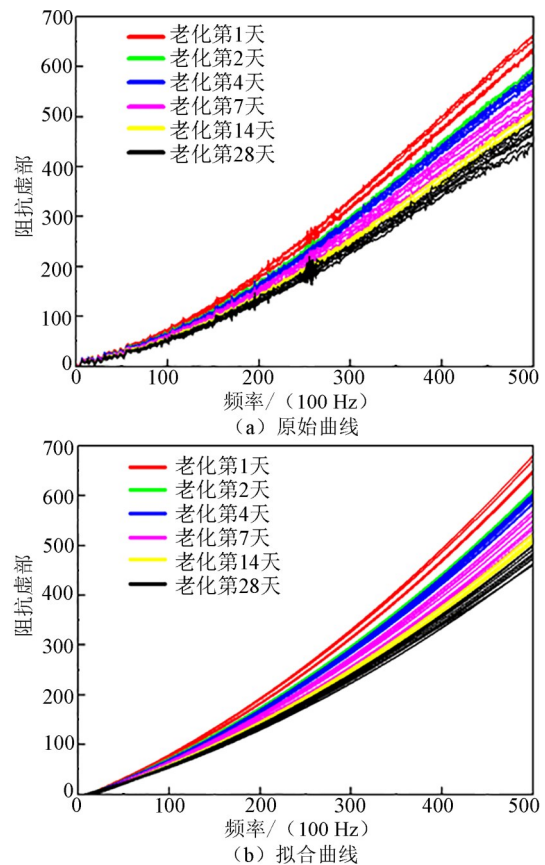


图 6 阻抗虚部随频率变化曲线

Fig. 6 Curves of impedance imaginary parts varying with frequencies

从图 6 可以看出，阻抗虚部 Z' 随着频率的增

加呈上升趋势, 各老化点曲线的整体线形随着老化时间的延长而逐渐下降。

3.3 阻抗模量随频率变化情况

图 7 为在 0~50 kHz 频率下, 所有老化点的阻抗模量 $|Z|$ 的变化(拟合)曲线。从图 7 可以看出, 阻抗模量 $|Z|$ 与频率之间具有一定的线性相关性, 各老化点曲线的斜率随着老化时间的延长而逐渐降低。

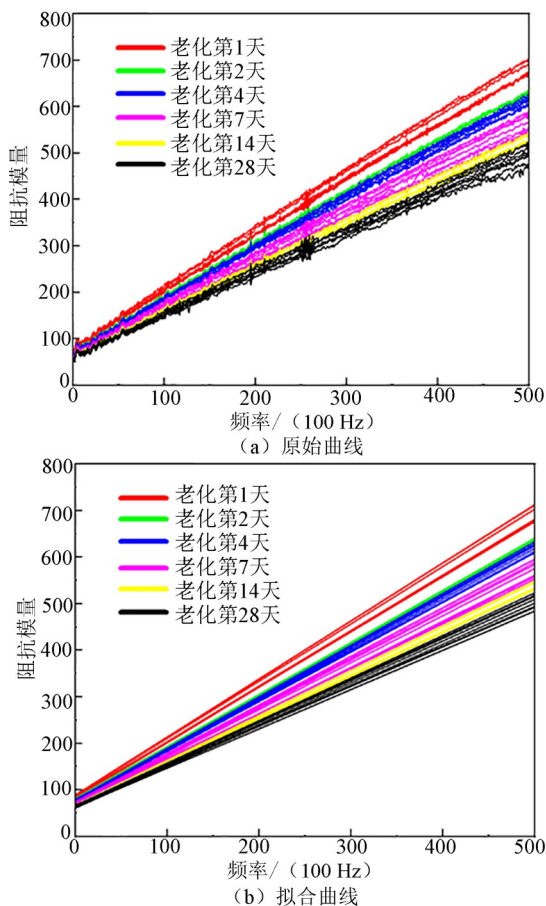


图 7 阻抗模量随频率变化曲线

Fig. 7 Curves of impedance moduli varying with frequencies

3.4 推进剂的交流阻抗谱

以阻抗虚部 Z' 为横轴, 阻抗实部 Z 为纵轴, 所有老化点的交流阻抗谱如图 8 所示。从图 8 可以看出, 阻抗谱呈半圆弧状, 随着老化时间的增加, 各老化点圆弧曲线的半径越来越小。

通过分析 4 种变化曲线发现, 老化期间推进剂阻抗参数的变化具有一定的规律性。因阻抗模量 $|Z|$ 可以同时反映实部和虚部的变化规律, 且线性关系较容易分析, 所以, 将阻抗模量 $|Z|$ 设置为表征推进剂老化的特征指标。

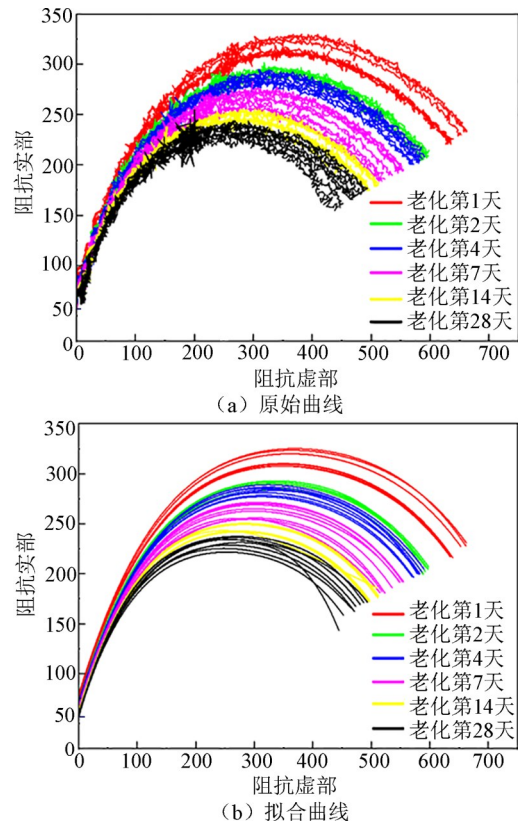


图 8 推进剂在各老化点的交流阻抗谱

Fig. 8 Impedance spectra of propellants at different aging points

4 基于 BP 神经网络的推进剂老化寿命分类预测

BP 神经网络具有分类功能, 可用于实现推进剂老化寿命的预测。

4.1 模型设计

输入层: 每个推进剂试件的阻抗模量 $|Z|$ 有 500 个测量数据, 为减小网络训练的难度, 每隔 100 个数据点选取 1 个数据作为推进剂试件的特征属性, 因此, 设置的输入层节点数为 5。

输出层: 输出层为预测的推进剂老化天数, 所以输出层节点数为 1。

隐藏层: 本文设计的网络为 3 层, 所以只设置 1 个隐藏层。根据经验, 将隐藏层节点数设置为输入层节点数的 75%, 且经过大量训练测试发现, 当隐藏层节点数为 4 时, 网络可以达到较好的训练效果^[13]。

为确保训练不失普遍性, 将 48 个推进剂试件的阻抗模量数据集随机打乱, 前 90% 的数据 (43 个) 作为训练集, 后 10% 的数据 (5 个) 作为测试

集,并将每个推进剂试件实际的老化天数作为训练模型的期望输出值。

4.2 模型训练

在模型训练前对所有输入数据进行归一化处理,使得其范围统一,可以提升训练速度及模型泛化能力。通过大量测试发现,当BP神经网络的训练次数为3 000、学习速率为0.01、训练目标最小误差为0.001、最小性能梯度为 1×10^{-6} 、最高失败次数为6时,预测结果最佳,拟合效果最好。

4.3 模型测试

由于在模型训练时BP神经网络各层的权值和阈值是随机产生的,所以,需要进行大量训练,最后选出预测精确度高且拟合效果好的网络模型。图9是5个测试试件的预测老化天数与实际老化天数的对比,预测准确率为100%。图10是推进剂试件训练集与测试集的训练预测效果。可以发现,拟合效果良好,可以准确地预测出推进剂试件的老化寿命。

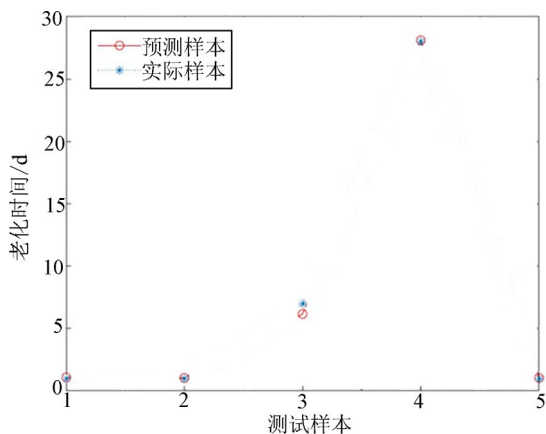


图9 预测老化点与实际老化点对比

Fig. 9 Comparison of predicted and actual aging points

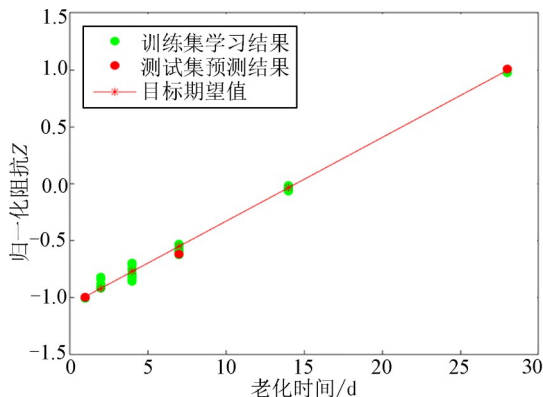


图10 推进剂试件训练集与测试集的训练预测结果

Fig. 10 Training Prediction results of training sets and test sets of propellant specimens

5 结论

本文研究了一种新型的无损监测方法——交流阻抗法,并将其用于固体推进剂的老化监测,以复合多层石墨烯丁羟推进剂为研究对象进行试验,测量了其在热加速老化条件下第1、2、4、7、14、28天的交流阻抗参数,通过数据分析得到如下结论:

(1) 分析对比热加速老化期间推进剂的交流阻抗谱,发现推进剂试件的阻抗参数随着老化时间的延长会逐渐减小,表明推进剂材料的电阻率越来越小。

(2) 以阻抗模量 $|Z|$ 为老化特征指标,利用BP神经网络算法实现了推进剂老化寿命预测,比较了预测结果与目标期望值之间的差值,发现模型预测的结果准确,拟合效果良好,验证了将交流阻抗法用于固体推进剂老化监测的可行性。

(3) 所提出的交流阻抗法是非破坏性的原位监测,由于电导特性与老化的相关性,以及其对于推进剂老化的敏感性及规律性,使得该方法在固体推进剂监测领域拥有广阔的发展前景。

本文的研究处于初步阶段,尚有不足需要进一步研究:为了更加全面地分析交流阻抗法对推进剂老化的敏感性,有必要开展多温度点下的HTPB推进剂老化监测试验;开展推进剂材料微观层次的监测试验,观察推进剂材料内部组分发生的反应,探究老化期间推进剂材料电导特性变化的根源,从而为失效模型的提出及寿命预测模型建立提供坚实基础。

参考文献:

- [1] 王虎干, 职世君, 曹付齐, 等. 某固体发动机推进剂加速老化及自然贮存解剖试验研究[J]. 固体火箭技术, 2021, 44(3): 350-356.
WANG H G, ZHI S J, CAO F Q, et al. Study on accelerated aging and natural storage dissection test results of a solid rocket motor propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021, 44(3): 350-356.
- [2] RUFFIN P B, EDWARDS E, BRANTLEY C, et al. Exploratory procedures with carbon nanotube-based sensors for propellant degradation determinations[C]//Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems 2010. San Diego, California,

- USA: SPIE, 2010, 7646: 11-21.
- [3] BROUWER G R, WETERINGS F P, KEIZERS H. Evaluation of ageing in composite propellant grains part 2[C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona, USA: AIAA, 2005: 3803.
- [4] LOPATIN C, GRINSTEIN D. Active sensing for monitoring the properties of solid rocket motor propellant grains[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(2): 295-302.
- [5] 张守诚, 屈文忠, 肖黎. 固体发动机界面结构试件脱粘健康监测研究[J]. *固体火箭技术*, 2017, 40(3): 319-324.
- ZHANG S C, QU W Z, XIAO L. Research on health monitoring of insulator / propellant interface debonding in solid rocket motor[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(3): 319-324.
- [6] 艾春安, 刘瑜, 赵文才, 等. 固体火箭发动机结构粘接质量的声-超声检测[J]. *无损检测*, 2009, 31(12): 974-976, 979.
- AI C A, LIU Y, ZHAO W C, et al. Acousto-ultrasonic testing for bond quality in solid rocket motor structure[J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(12): 974-976, 979.
- [7] 段磊光, 王广, 强洪夫, 等. 压电阻抗技术监测固体推进剂老化研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(8): 1912-1920.
- DUAN L G, WANG G, QIANG H F, et al. Impedance characterization and validation of solid propellant based on electro-mechanical impedance method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8): 1912-1920.
- [8] 郭宇, 申志彬, 李海阳, 等. 长贮过程中发动机HTPB推进剂老化机理分析[J]. *国防科技大学学报*, 2023, 45(1): 95-101.
- GUO Y, SHEN Z B, LI H Y, et al. Investigation on the aging mechanism of HTPB propellant in SRM long-term storage[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, 45(1): 95-101.
- [9] 魏小琴, 吴护林, 张伦武, 等. HTPB推进剂自然环境加速老化试验方法研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(12): 104-108.
- WEI X Q, WU H L, ZAHNG L W, et al. Natural environment accelerated aging test method of HTPB propellant[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(12): 104-108.
- [10] 林旭梅, 刘振东, 马士强, 等. 基于变步长LMS算法的交流阻抗测钢筋腐蚀[J]. *测控技术*, 2019, 38(7): 93-96, 103.
- LIN X M, LIU Z D, MA S Q, et al. Measurement of rebar corrosion AC with impedance method based on variable step size LMS algorithm[J]. *Measurement & Control Technology*, 2019, 38(7): 93-96, 103.
- [11] 鲍桐. HTPB复合固体推进剂静电放电危险性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- BAO T. Study on the electrostatic discharge hazard to HTPB composite solid propellant[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [12] 张晓军, 邢鹏涛, 朱佳佳, 等. HTPB推进剂老化性能湿热影响分析[J]. *装备环境工程*, 2022, 19(2): 45-50.
- ZHANG X J, XING P T, ZHU J J, et al. Analysis of the effect of humidity and heat on aging performance of HTPB propellant[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2022, 19(2): 45-50.
- [13] 周俊博, 刘光蓉, 曾山. 改进的BP神经网络在鸢尾花分类识别中的应用[J]. *武汉轻工大学学报*, 2021, 40(6): 41-46.
- ZHOU J B, LIU G R, ZENG S. Application of improved BP neural network in iris classification and recognition[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2021, 40(6): 41-46.