压电阻抗法表征固体推进剂老化的研究*

段磊光,王 广,强洪夫,王学仁

(火箭军工程大学 导弹工程学院,陕西西安 710025)

摘 要:为了更好地得到压电阻抗法(EMI, Electro-mechanical impedance)监测固体推进剂老化 规律并从物理特性上对其科学性、可靠性及有效性进行验证,采用理论推导分析方法将压电阻抗电学性 能参数与动态力学性能参数进行联系;对热老化HTPB推进剂进行EMI试验及动态热机械分析(DMA, Dynamic thermomechanical analysis)测试,并根据结果分析进行验证。结果表明:压电阻抗电学性能与 动态力学性能能够通过动态模量与导纳之间的关系以及电压电流滞后角与力学损耗角之间的关系进行联 系;热老化HTPB推进剂在不同测试频率下力学损耗因子 tanδ温度谱峰值随老化的变化规律一致,均随 热老化时间的延长而降低;电压电流滞后角正切值 tanβ能够很好反映HTPB推进剂的老化,共振频率处 的滞后角正切值 tanβ随热老化时间的延长而降低,并且与损耗因子 tanδ峰值呈现出明显的线性关系。

关键词:压电阻抗法;固体推进剂;热老化;机械阻抗;动态热机械分析;动态力学性能 中图分类号:V512 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2019) 11-2598-08 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180698

Research on Aging Characterization of Solid Propellants by Electro-Mechanical Impedance

DUAN Lei-guang, WANG Guang, QIANG Hong-fu, WANG Xue-ren

(College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to obtain the aging rule of solid propellant better by EMI (Electro-mechanical impedance), and verify its scientific, reliability and validity from its physical characteristics, the parameters of electro-mechanical impedance proper ties and dynamic mechanical properties were correlated by theoretical derivation and analysis method. EMI and dynamic thermomechanical analysis (DMA) tests were carried out on HTPB propellant specimens with thermal aging, and the results were verified by the analysis. The results show that the electrical properties and dynamic mechanical properties of piezoelectric impedance can be related by the relationship between dynamic modulus and admittance, and the relationship between voltage-current lag angle and mechanical loss angle. The temperature spectrum peak value of loss factor tan δ of HTPB propellant varies with aging time at different testing frequencies, and the peak value decreases with the prolongation of thermal aging time. The tangent value of voltage and current lag angle tan β can well reflect the aging of HTPB propellant. The tangent value of lag angle tan β at resonance frequency decreases with the prolongation of thermal aging time, and it has obvious linear relationship with the peak value of loss factor tan δ .

Key words: Electro-mechanical impedance; Solid propellant; Thermal aging; Mechanical impedance; Dynamic thermomechanical analysis; Dynamic mechanical properties

^{*} 收稿日期: 2018-11-06;修订日期: 2018-12-18。

作者简介:段磊光,硕士,研究领域为飞行器结构完整性分析。E-mail: 871373748@qq.com

通讯作者: 王 广,博士,教授,研究领域为飞行器结构完整性分析。E-mail: wguang601@163.com

引用格式: 段磊光, 王 广,强洪夫,等. 压电阻抗法表征固体推进剂老化的研究[J]. 推进技术, 2019, 40(11): 2598-2605. (DUAN Lei-guang, WANG Guang, QIANG Hong-fu, et al. Research on Aging Characterization of Solid Propellantsby Electro-Mechanical Impedance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11): 2598-2605.)

1 引 言

在固体火箭发动机贮存过程中,环境等因素会 使得发动机自身材料性能不断老化,这将导致发动 机各部分产生不同程度的损伤。这些损伤如果不能 得到及时的监检测和维修,将影响武器系统的正常 使用,造成严重后果^[1-3]。固体火箭发动机主要结构 中,药柱是固体火箭发动机健康监检测的主要部位。 若能对固体推进剂药柱结构中与老化状态有关的技 术参数进行有效地监检测,将对固体发动机贮存及 寿命评估起到重要的保障作用。

国内外研究者在固体推进剂老化监检测方面进 行了很多有意义的研究^[4-8]。动态热机械分析(DMA) 是通过动态力学性能研究固体推进剂老化行为的一 种十分有效的方法。Neviere等通过使用DMA对HT-PB推进剂的老化性能进行了研究,并且认为损耗因 子 tanδ峰值能够反映粘结剂的老化状况^[9]。Brouwer 等用DMA研究了发动机推进剂样品的贮能模量与热 老化温度和时间的关系,进而得出固体推进剂老化 速率与温度的关系^[10]。刘新国等通过 DMA 对 NEPE 推进剂老化动态力学性能进行了试验并根据损耗因 子 tanδ峰值对其寿命进行了预估,研究表明,NEPE 推 进剂损耗因子 tanδ峰随老化时间的延长而增大,且峰 温向高温方向移动^[11]。但是 DMA 方法需进行微损制 药片过程,对于实装导弹发动机这样会破坏推进剂 药柱结构,因此若能找到一种原位监测发动机健康 状况的手段,即将体积和质量较小的传感器永久地 粘贴于结构表面或放置在结构当中,不会影响发动 机正常工作,并能够有效地对其老化状态进行监测, 将在未来有较好的发展前景。

药柱老化状态监测常用的传感器如常规电阻应 变仪、光纤布拉格光栅传感器(FBG)粘接应力温度传 感器(DBST)等,但是皆是基于被动监测系统而工作 的,其监测对象决定了监测方式皆为嵌入或埋入式, 由于仪表和结构之间的附着力长期存在,以及环境 变化对电线连接的不利影响,将可能导致应变漂移 或信号损失,因此这类传感器在各种环境条件下对 结构进行长期监测具有较大困难。近些年来,压电 阻抗技术的发展为固体发动机装药结构老化监测及 实时健康监控提供了广阔的发展前景。压电阻抗法 作为典型主动式监测方法相比于其它传统的测试方 法具有明显的优势:在压电传感器所在位置的小范 围内工作,不受边界条件影响;可以埋入结构内部也 可粘贴在结构表面进行测试;仪器设备简单、成本低 廉;在高频条件下测量压电片驱动结构耦合阻抗,具 有对微小变化敏感。因此近期航空航天界学者尝试 应用压电阻抗法解决结构脱粘损伤的问题, Qing等 运用压电阻抗技术监测结构接头的每一侧的能量转 移从而检测复合材料层上的脱粘并最终修复。由于 在结构的两侧都需要传感器,该技术在应用上受到 限制^[12]。Tong等通过试验研究了激励器部分脱粘对 复合材料层合结构响应的影响[13]。屈文忠等基于压 电阻抗方法建立了界面脱粘检测模型,并通过精密 阻抗分析仪对固体发动机壳体界面结构进行了检测 试验,效果良好^[14]。艾春安等也对固体发动机的粘 接情况开展了较为深入的研究,并通过不同方式开 展了对结构粘结质量的研究[15]。然而国内外还没有 研究者通过压电阻抗法对固体推进剂老化性能监测 进行研究,因此在初步研究阶段,若能将压电阻抗方 法测量得到的电学性能参数与DMA测定的动态力学 性能参数进行联系,找到其相关性,将从物理特性上 对压电阻抗法监测固体推进剂老化的科学性、可靠 性及有效性进行验证。

本文首先从理论上将结构的动态模量与机械阻 抗建立联系,对损耗因子与导纳滞后角正切值进行 联系,并分析其相关性;对热老化HTPB推进剂试件 开展 DMA 测试并针对损耗因子进行结果分析,随后 粘贴 PZT 压电片的推进剂试件开展压电阻抗测试,得 到共振频率处的滞后角正切值随老化时间的变化规 律,最后对损耗因子与滞后角正切值进行了相关性 分析。

2 压电阻抗电学性能与动态力学性能理论 联系

2.1 机械阻抗与动态模量关系式

在构建一维机电阻抗理论模型时仅考虑轴向变 形的情况,PZT与结构的相互作用可简化为一个质 量-刚度-阻尼系统的一维机电阻抗模型一^[16],如图1 所示。

由 PZT 驱动的一维机电耦合阻抗模型导纳表达



Fig. 1 Mechanical model of electromechanical coupling system

式如下

$$Y = i\omega \frac{b_{a}l_{a}}{h_{a}} \left(\frac{d_{31}^{2}Y_{11}^{E}Z_{a}}{Z_{s} + Z_{a}} \frac{\tan(kl_{a})}{kl_{a}} + \bar{\varepsilon}_{33}^{\sigma} - d_{31}^{2}\bar{Y}_{11}^{E} \right)$$
(1)

式中 *Y* 是 PZT 电导纳(阻抗倒数),i 是虚部单位, ω 是激励频率; l_a , b_a , h_a 分别为 PZT 的长度、宽度和厚 度; $\bar{\varepsilon}_{33}^{\sigma} = \varepsilon_{33}^{\sigma}(1 - \delta i)$ 为 PZT 应力 σ 为零或常数时的复 介电常数,其中 δ 为介电损耗因数, d_{31} 为压电常数, $\bar{Y}_{11}^{E} = Y_{11}^{E}(1 + \eta i)$ 为 PZT 在电场 *E* 为零或常数时的复 杨氏模量,其中 η 为 PZT 的机械损耗因数, 波的数目 $k = \omega/c$, Z_a 为 PZT 的机械阻抗, Z_s 为基体结构的机械 阻抗。

由于推进剂作为黏弹媒质,易于将声能转变为 热能形式耗散,根据实际建立模型二:结构设定为一 半无限长面积为A的等截面线黏弹性直杆,坐标零点 与PZT传感器相连接位移耦合(如图2所示)。根据 一维黏弹性波动原理,连续方程、运动方程以及微分 形式的线性黏弹性本构方程见式(2)~(4)

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \tag{2}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \tag{3}$$

$$P\sigma = Q\varepsilon \tag{4}$$

式中P与Q为微分算子。



Fig. 2 Mechanical model of viscoelastic structure electromechanical coupling system

为得到按位移求解黏弹性细长杆动力问题时所 需的运动方程,在本构方程(4)中对x求一阶导数,并 利用运动方程(3),有

$$\rho P \ddot{u} = Q u^{\prime \prime} \tag{5}$$

根据偏微分方程求解形式,设位移形式为

$$u = C e^{i(\omega t - \lambda x)} = e^{i\omega t} \left(C_1 e^{-i\lambda x} + C_2 e^{i\lambda x} \right)$$
(6)

代入式(5),考虑微分算子的性质和运算规律,得

$$\rho \bar{P}(i\omega)(i\omega)^2 - \bar{Q}(i\omega)(-i\lambda)^2 = 0 \qquad (7)$$

即

$$\lambda^2 = \rho \omega^2 / E^*(\omega) \tag{8}$$

式中 E^{*}(ω) 为黏弹性结构的动态模量。由文献 [17] 中的式(2.13)可知, u_a的求解为模型 2 提供了边 界条件

$$u(\infty,t)=0$$

$$u(0,t)=u_{a}=\frac{d_{31}\overline{E_{3}}}{k\cos(kl_{a})+\frac{\overline{c}_{11}^{E}Z_{s}i\omega}{b_{a}h_{a}}\sin(kl_{a})}\sin(kl_{a})e^{i\omega t}$$
(9)
将式(9)代人式(6),解得

$$u(x,t) = \frac{d_{31}\overline{E_3}}{k\cos(kl_a) + \frac{\overline{c_{11}^E}Z_s i\omega}{b_a h_a}\sin(kl_a)}\sin(kl_a)e^{i(\omega t - \lambda x)}$$

(10)

由轴力以及结构机械阻抗(速度阻抗)的定义可 推出结构机械阻抗表达式为

$$Z_{\rm s} = \frac{F_{\rm a}}{v} = \frac{K_{\rm a}u}{\partial u/\partial t} = \frac{K_{\rm a}e^{\mathrm{i}\lambda x}}{\mathrm{i}\omega}$$
(11)

由式(9)可知 $\lambda = \omega \sqrt{\rho/E^*(\omega)}$,设 $\lambda = \lambda_1 - i\lambda_2$,因而

$$Z_{\rm S} = \frac{F_{\rm a}}{v} = \frac{K_{\rm a} {\rm e}^{{\rm i}\lambda_1 x + \lambda_2 x}}{{\rm i}\omega}$$
(12)

从式(11)或式(12)不难看出,在PZT片的驱动作 用下,黏弹结构的机械阻抗与动态模量之间存在一 定的函数关系。由式(1)导纳公式中机电耦合导纳 与结构机械阻抗的关系可知,动态模量与导纳也具 有函数关系,因此式(11)与式(1)联立后,便将压电 阻抗电学性能与动态性能从导纳与动态模量方面联 系起来。

2.2 损耗因子与导纳滞后角正切值的联系

DMA 动态热机械分析对粘弹性材料施加一个稳态正弦交变应力作用,同时测定其应变的响应。当应力与应变达到平衡时,应力、应变都按正弦的形式随时间变化,但由于内耗的存在,应变始终滞后于应力。其应变和应力分别为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t \tag{13}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \tag{14}$$

式中 ω 为角频率(Hz); ε_0 与 σ_0 分别为应变幅值 和应力幅值; δ 为滞后相位差,即损耗角。

已知动态模量(复模量)为应力与应变之比,因 此可表示为

$$E^{*}(i\omega) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_{0}}{\varepsilon_{0}} (\cos\delta + i\sin\delta)$$
(15)

可表示为

$$E^{*}(i\omega) = E(i\omega) + iE^{''}(i\omega)$$
(16)

式中实部 E['](iω) 为贮存模量,虚部 E^{''}(iω) 为损耗 模量,内耗 tanδ 表示材料贮能与损耗能力的相对大 小,可表示为

$$\tan\delta = \frac{E^{''}(i\omega)}{E^{'}(i\omega)}$$
(17)

tanδ又称损耗因子,其值越高,外力对材料做的 功以热的形式耗散得越多。对于复合固体推进剂, 损耗因子 tanδ峰值与热老化时间关系密切。

由导纳的物理意义以及阻抗分析仪测量原理 可知^[18]

$$Y(i\omega) = \frac{I(i\omega)}{V(i\omega)} = \frac{u_0(i\omega)}{R_s} \cdot \frac{1}{u_i(i\omega) - u_0(i\omega)} =$$

$$\frac{V_0 e^{i(\omega t + \beta)}}{R_s} \cdot \frac{1}{V_i e^{i\omega t} - V_0 e^{i(\omega t + \beta)}} = \frac{V_0 \angle \beta}{R_s} \cdot \frac{1}{V_i \angle 0 - V_0 \angle \beta} =$$

$$\frac{V_0}{R_s} \cdot \frac{\cos\beta + i\sin\beta}{V_i - V_0 \cos\beta + iV_0 \sin\beta} =$$

$$\frac{V_0}{R_s} \sqrt{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2 + \left(V_0 \sin\beta\right)^2} \cdot \frac{\angle \beta}{\sum \arctan\left(-\frac{V_0 \sin\beta}{V_i - V_0 \cos\beta}\right)} =$$

$$\frac{V_0}{R_s} \sqrt{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2 + \left(V_0 \sin\beta\right)^2} \cdot \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2 + \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2} \cdot \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2} \cdot \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2 + \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2} \cdot \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2} \cdot \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2 + \frac{V_0}{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2} \cdot \frac{V_0}{\left(V_0 - V_0$$

 $M \cdot \cos \alpha + iM \cdot \sin \alpha$

式中 u_i 和 u_o 分别为电压的输入和输出信号; V_i 和 V_o 分别为电压输入与输出幅值; R_s 为等效电路中的等 效电阻; β 为输出与输入信号之间的滞后角; ω 为激励 频率;M为导纳的幅值, α 为导纳的相位角,因此

$$\alpha = \beta - \arctan\left(-\frac{V_0 \sin\beta}{V_i - V_0 \cos\beta}\right)$$
$$M = \frac{V_0}{R_s \sqrt{\left(V_i - V_0 \cos\beta\right)^2 + \left(V_0 \sin\beta\right)^2}}$$
(19)

当已知导纳相位角,由式(19)相位角与输出输 入信号滞后角的函数关系式可计算出滞后角。输出 输入信号滞后角的存在原因为:机电耦合系统工作 过程中,交变电压激励压电片时根据压电效应可知, 压电片会带动结构发生高频振动,已知推进剂属粘 弹结构,其内耗导致应力与应变存在相位差,而由于 逆压电效应的存在,因此输出与输入电信号之间存 在滞后角。不论是高频压电阻抗测试中电信号输出 与输入的滞后角还是DMA测试中的损耗角,其产生 原因均为振动过程中推进剂结构自身内耗。由式 (18)、导纳公式(1)、机械阻抗与动态模量关系式 (8)、式(11)以及力学损耗因子 $\tan\delta$,可知高频压电阻 抗测试中电信号输出与输入滞后角 β 与DMA测试损 耗角 δ 存在一定关系。然而由于DMA测试频率远低 于压电阻抗测试频率,因此无法通过关系式由 β 反推 至 δ ,或由 δ 推导至 β 。为了进一步阐释滞后角 β 与损 耗角 δ 取正切值进行分析。

3 试验方案

3.1 EMI试验装置及过程

试验使用的固体推进剂是固体颗粒(AP/Al)填充 质量分数为0.86的三组元HTPB复合固体推进剂,将 其制成几何尺寸为33mm×10mm×4mm的推进剂试 件。试验采用 PZT-5A 型压电驱动传感器(直径 7mm,厚度 0.2mm,STEMINC Ltd),对HTPB 推进剂试 件进行静态测量,并利用Agilent4294A精密阻抗分析 仪对导纳进行测量。试验前先使用二组分的环氧树 脂将 PZT-5A 传感器粘贴在 HTPB 推进剂试件几何中 心(如图3所示),用手指轻压,使压电片与推进剂试 件结合紧密,随后放置一段时间,直到环氧树脂固 化。在压电陶瓷片的上下表面引出电极,导线将两 电极与精密阻抗分析仪的夹具相连。测量时阻抗分 析仪输出幅值为1V的交流电压激励压电片,其因压 电效应而带动结构振动。与金属结构不同,HTPB 推 进剂属于高阻尼材料,因此需采用高频激励。试验 的装置与测量过程如图4所示。

未老化推进剂试件测量结束后将其放入油浴 70℃防爆油浴烘箱进行 28d,45d,56d,68d,84d 老化 处理,前一个热老化时间点后按上述方法完成测量



Fig. 3 HTPB propelled specimens with PZT piezoelectric sensor attached to surface

而后继续进行热老化,直至老化结束。

3.2 DMA试验仪器及条件

试验采用的是美国 TA 仪器公司的 Q800DMA 型 动态热机械分析仪, Q800DMA 测试系统的主体主要 包含驱动马达、光学编码器、空气轴承、夹具、铸铝骨 架等组成。另外系统附件还包括气体冷却罐和空气 压缩机, 主体和附件如图 5 所示。



Fig. 4 Test device



(a) Main body (b) Enclosure Fig. 5 Q800DMA test system

由于HTPB推进剂是一种粘弹性材料,试验采用 单悬臂梁夹具,并且夹具尺寸为8mm。测试模式为 多频应变模式,频率为1,2,5,10,15,20Hz,振幅为 2µm,温度范围-100℃~20℃,升温速率为3℃/min。 为了控制变量,即保持与EMI试验的试验件尺寸、热 老化温度以及时间一致,参考上一节试验件尺寸选 为33mm×10mm×4mm(如图6所示),热老化温度为



Fig. 6 DMA test parts

70℃,时间点为0d,28d,45d,56d,68d和84d。

4 试验结果分析

4.1 热老化 HTPB 推进剂动态力学性能

损耗因子 tanδ 反映了粘弹性材料克服分子链段 内阻运动时耗散的能量,其峰值能够反映粘结剂的 老化状况,并且由于其与压电阻抗法中滞后角的相 似性,本节热老化 HTPB 推进剂老化动态力学性能的 研究中主要针对推进剂力学损耗因子 tanδ 曲线展开 分析。

70℃热老化 HTPB 推进剂损耗因子 tanδ 在各测试 频率下的温度谱曲线如图 7(a)~(e)所示,损耗因子 tanδ的峰值随热老化时间的延长而降低,而峰温即玻 璃化转变温度随热老化时间的延长向更高温度方向 移动,各测试频率下的变化规律基本一致。为了进 一步将变化规律量化,各测试频率下不同热老化时 间损耗因子 tanδ峰值和峰温见表1。(由于各频率下 推进剂损耗因子 tanδ参数变化规律基本一致,因此后 面研究分析均围绕 1Hz测试频率条件而展开。)

由表1以及图8可知,峰温随热老化时间的变化 规律比较明显,数据显示其随老化时间的增加而呈 递增的趋势,并且热老化后期的增幅明显高于初期。 随老化时间的延长,tanδ峰值呈递减趋势,且在初期 热老化时递减幅度较大,中期趋于平缓,而后其递减 幅度再次增大。这是因为热加速老化会使推进剂中 聚合物的自由体积逐渐减小同时大分子链的柔性降 低,增塑剂等成分挥发速度加快,这导致随老化时间 的增加玻璃化温度呈现一定的升高趋势;HTPB 推进 剂经过热老化处理后,氧化交联使得推进剂粘合剂 基体中分子网络生成新的交联点,其高分子链的长 度以及分子之间相互运动都受到影响,低于老化前 的水平,弹性贮能有一定程度的增大,因而代表分子 运动损耗的 $tan\delta$ 峰值降低,并且随着热老化时间的 延长新生成的交联点会越多, tanδ的峰值也就会 **越低**。

4.2 压电阻抗测试结果与滞后角相关性分析

根据式(1)可知,当结构阻抗Z_s与压电片Z_a匹配 时(复共轭),压电导纳和端点位移将趋于无限,因此 导纳峰值所对应的频率即为系统共振频率^[19]。使用 精密阻抗分析仪直接对HTPB推进剂在不同热老化 时间的导纳幅值与相位角进行测试,可以得到导纳 幅值在 200kHz~300kHz 频段共振峰值较为明显(如 图 9(a)所示),因此选取 200kHz~300kHz 频段内相位 角频谱曲线,再由式(19)可计算得出滞后角正切值



Fig. 7 Temperature spectrum curve of loss factor $tan \delta$

Table 1 Peak value and peak temperature of loss factor $tan \delta$ varies with thermal aging time

Aging time/d	Test frequency/Hz					
		1	2	5	10	20
0	Peak value	0.648	0.651	0.659	0.674	0.686
	Peak temperature/°C	-73.75	-72.02	-71.46	-70.88	-68.79
28	Peak value	0.444	0.449	0.467	0.483	0.489
	Peak temperature/°C	-72.76	-71.77	-69.36	-67.75	-62.33
45	Peak value	0.418	0.422	0.435	0.437	0.454
	Peak temperature/°C	-70.83	-68.69	-67.57	-64.19	-61.76
56	Peak value	0.398	0.408	0.410	0.425	0.435
	Peak temperature/°C	-70.62	-66.96	-65.68	-62.69	-61.49
68	Peak value	0.327	0.335	0.345	0.365	0.383
	Peak temperature/°C	-67.06	-66.35	-64.32	-61.61	-60.37
84	Peak value	0.294	0.308	0.326	0.339	0.352
	Peak temperature/°C	-63.31	-62.75	-62.03	-61.58	-59.47





tanβ的频率谱曲线(如图9(b)所示)。

由图 9 可知,在 282.5kHz 导纳幅值出现共振峰 值,为了更方便看出滞后角正切值在共振频率附近 其值随热老化时间的变化规律,在该频率附近的局 部放大图如图 10 所示。HTPB 推进剂在共振频率点 滞后角正切值随热老化时间变化规律如图 11 所示。

可以看出 HTPB 推进剂在共振频率点滞后角正切 值 tanβ 随热老化时间的延长而降低,对比图 8 其与损 耗因子 tanδ 温度谱峰值变化规律一致。为了更好反映



Fig. 9 Admittance and lag angle tangent spectrum curve in 200kHz~300kHz



Fig. 10 Lag angle tangent spectrum curve in 280kHz~ 285kHz

变化规律相关性,对共振频率点滞后角正切值 tan β 和 损耗因子 tanδ温度谱峰值进行了皮尔逊相关性分析, 由图 12可以看出共振频率点的 tan β 与 tanδ峰值之间 呈现出明显的线性关系,线性拟合关系式为 tan β = 0.2001 tan δ + 0.5538,相关系数 R^2 = 0.9946。



Fig. 11 Variation of the lag angle tangent with the thermal aging time at resonance frequency point



resonance frequency point $tan\beta$ of thermal aging HTPB propellant

5 结 论

根据本文推导过程以及试验结果与数据分析, 可以得到以下结论:

(1)本文建立的粘弹性结构机电耦合系统的力 学模型能够将压电阻抗电学性能参数与动态力学性 能参数联系起来,即建立机械阻抗与动态模量的函 数关系,从另一个角度更好反映机电耦合导纳变化。

(2)通过输出信号滞后角与导纳相位角、导纳与结构机械阻抗、结构机械阻抗与动态模量以及动态 模量与损耗因子之间的相互联系,可知滞后角β与损 耗角δ理论上存在关系。

(3)由于 HTPB 推进剂中聚合物大分子链的柔性 降低,增塑剂等成分挥发速度加快,以及新生成的交 联点会越多,70℃热老化 HTPB 推进剂损耗因子 tanδ 温度谱峰值随热老化时间的延长而降低,峰温随热 老化时间的延长而升高。

(4)由热老化 HTPB 推进剂导纳幅值与滞后角频 谱曲线可知,在共振频率附近不同热老化时间推进 剂结构输出信号滞后角正切值 tanβ有着明显的变化 规律,其随老化时间的延长而降低,可知,共振频率 处滞后角正切值 tanβ能够较好表征 HTPB 推进剂的 老化;通过与损耗因子 tanδ峰值变化规律进行相关性 分析可知,滞后角正切值 tanβ与损耗因子 tanδ峰值呈 线性相关。

本文的 EMI 方法是一种非破坏性的原位监测方法,并且对于固体推进剂的老化有着很强的敏感性及规律性,而通过 DMA 方法研究固体推进剂老化已 经是国内外认可的一种有效的方法,EMI 与 DMA 的 相关性能够使得 EMI 从物理特性上得到验证,并在固体推进剂老化监测技术领域拥有广阔的发展前景。

致 谢:感谢武汉大学土木建筑工程学院工程力学系屈 文忠教授课题组的老师同学们为本文试验的开展提供 试验设备以及在论文撰写中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 邢耀国,熊 华,李高春.固体火箭发动机健康监测 技术的发展和应用[J].海军航空工程学院学报, 2008,23(6):601-605.
- [2] Jim Buswell. Lessons Learned from Health Monitoring of Rocket [C]. Arizona: 41stAIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.
- [3] 邢耀国,李高春,王玉峰,等.固体火箭发动机状态 监测和失效判定技术的发展和展望[J].海军航空工 程学院学报,2006,21(5):552-556.
- [4] 张 昊, 彭 松, 庞爱民, 等. NEPE 推进剂力学性能 与化学安定性关联老化行为及机理[J]. 推进技术, 2007, 28(3): 327-330. (ZHANG Hao, PENG Song, PANG Ai-min, et al. Coupling Aging Behaviors and Mechanism Between Mechanical Properties and Chemical Stability of NEPE Propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3): 327-330.)
- [5] Cerri S, Bohn M A, Menke K, et al. Aging Behaviour of HTPB Based Rocket Propellant Formulations [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2009, 6 (2): 149-165.
- [6] 张兴高,张 炜,芦 伟,等.定应变贮存条件下HT-PB 推进剂填料/黏合剂界面性能[J].推进技术,2009,30(4):484-489.(ZHANG Xing-gao, ZHANG Wei, LU Wei, et al. Interfacial Property of the Filler/Binder Matrix for HTPB Propellant under Constant Strain [J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(4):484-489.)
- [7] 阳建红,俞茂宏,侯根良,等.HTPB 复合固体推进剂

含损伤和老化本构研究[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 509-512. (YANG Jian-hong, YU Mao-hong, HOU Gen-liang, et al. Research on the Constitutive Equations of HTPB Composite Solid Propellant with Damage and Aging[J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23 (6): 509-512.)

- [8] 任宁莉,赵新强,邓 凯,等.HTPB固体推进剂老化性能检测新方法[J].推进技术,2011,32(5):728-731. (REN Ning-li, ZHAO Xin-qiang, DENG-Kai, et al. A New Method for Detecting the Aging Property of HTPB Solid Propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(5):728-731.)
- [9] Neviere R, Guyader M. DMA: A Powerful Technique to Assess Aging of MED[C]. Karlsruhe: 37th International Annual Conference of ICT, 2006.
- [10] Brouwer G R, Weterings F P, Keizers H. Evaluation of Aging in Composite Propellant Grains Part 2[C]. California: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.
- [11] 刘新国,王 广,强洪夫,等.NEPE推进剂老化性能的动态力学表征[J].含能材料,2008,16(4):462-464.
- [12] Qing X P, Beard S J, Kumar A, et al. A Real-time Active Smart Patch System for Monitoring the Integrity of Bonded Repair on an Aircraft Structure [J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15(3).
- [13] Tong L, Sun D, Atluri S N. Sensing and Actuating Behaviours of Piezoelectric Layers with Debonding in Smart Beams[J]. Smart Materials & Structures, 2001, 10(4).
- [14] 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.
- [15] 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.
- Liang C, Sun F P, Rogers C A, et al. An Impedance Method for Dynamic Analysis of Active Material Systems
 J. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 116(1): 323-334.
- [17] 吴 迪.一维梁结构 PZT 压电阻抗法理论与试验研究[D].大连:大连理工大学,2011.
- [18] Zhu X, Rizzo P. A Unified Approach for the Structural Health Monitoring of Waveguides [J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(6): 629-642.
- Bois C, Hochard C. Monitoring of Laminated Composites Delamination Based on Electromechanical Impedance Measurement[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2004, 15(1): 59-67.