

固体火箭发动机包覆层力学性能与交联密度的相关性建模研究

李科 郑坚 彭威 张晓 杜永强

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

文 摘 介绍了包覆层力学性能的研究进展, 综述了交联密度的测试方法和应用, 分析了现有的本构模型并提出改进意见。研究表明: 包覆层在复杂环境下的力学性能研究是下一步研究的重点; 从微观机理分析包覆层的宏观力学性能是其力学研究的趋势; 核磁共振仪等现代仪器的运用可以克服传统方法的不足, 具有较大的发展空间。

关键词 包覆层, 力学性能, 交联密度, 本构模型

中图分类号: V512⁺

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2018.05.001

Modeling of the Correlation Between Mechanical Properties and Crosslink Density of Solid Rocket Motor Coating

LI Ke ZHENG Jian PENG Wei ZHANG Xiao DU Yongqiang

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003)

Abstract The research progress of the mechanical properties of the coating is introduced, and the test methods and the application of crosslink density are summarized. The existing constitutive model is analyzed and suggestions for improvement are put forward. The mechanical properties of the coating in complex environment is the key point for the next research. Investigating macro mechanical properties of the coating through micro-mechanism analysis is the trend for mechanics analysis. Application of modern instruments like NMR can overcome the shortages of the conventional methods, which prospects a positive future.

Key words Coating, Mechanical properties, Crosslink density, Constitutive model

0 引言

固体火箭发动机因具有结构简单、安全可靠、机动性好和成本低等优点, 在航空航天和导弹类武器领域得到了广泛的应用。包覆层位于固体火箭发动机的壳体与药柱之间, 作为燃烧室内的保护层, 它可以保证壳体不被推进剂药柱燃烧产生的热量破坏, 是固体发动机重要的结构组成^[1]。此外, 壳体和药柱之间应力、应变的传递也依赖于包覆层良好的缓冲作用, 在运输、贮存和点火冲击时, 固体发动机将受到一系列复杂载荷的作用, 包覆层降低了外界环境的冲击和振动载荷对推进剂性能的不良影响。为保证固体火箭发动机的结

构完整性, 包覆层的必须要有良好的力学性能, 特别是要有较高强度和延伸率, 并且能够适用于固体发动机工作和贮存时宽泛的温度条件, 以满足复杂载荷条件下的应力应变要求^[2]。随着固体火箭和导弹类武器往远程化、高能量化和精确制导化方向的发展, 固体发动机的装药结构完整性备受重视, 在其设计和定型时对包覆层材料的力学性能要求也越来越高, 研究包覆层材料的力学性能, 建立准确的力学本构模型, 将为分析固体火箭发动机的装药结构完整性提供参考, 具有重要的军事意义和工程价值^[3]。

研究表明, 聚合物的力学性能与交联密度有着密

切的关联^[4-5],可以用交联密度来表征包覆层的微观性能。材料的模量、延伸率、强度等力学性能均受微观网络结构的影响,根据包覆层材料的微观性能测试数据,可以分析其宏观力学性能变化的机理,并将交联密度作为微观因子引入到力学本构模型的研究中,有助于进一步准确地描述包覆层的力学性能。交联密度的测试方法多种多样,其中核磁共振(NMR)法因其突出的优点引起了国内外广大学者的关注。

本文综述了包覆层力学性能的研究进展,阐述了材料交联密度的测试方法与应用,提出了从宏观和微观的角度研究包覆层,指出了包覆层性能研究的发展趋势。

1 包覆层力学性能及其改进研究现状

1.1 包覆层的力学性能及影响因素

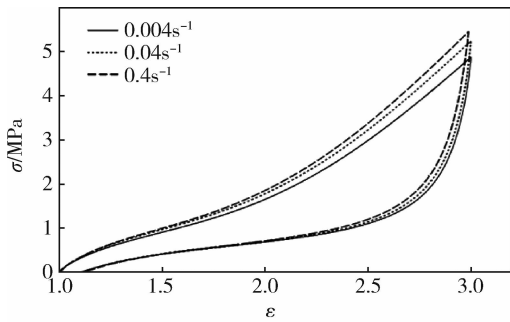
1.1.1 准静态力学性能研究

力学性能的研究之中最基本的方法是准静态拉伸试验法,M. CHENG^[6]等对 EPDM 橡胶进行了准静态拉伸和动力学试验,得到试样在不同应变率下的应力—应变曲线如图 1 所示,表明材料的拉伸性能与拉伸速

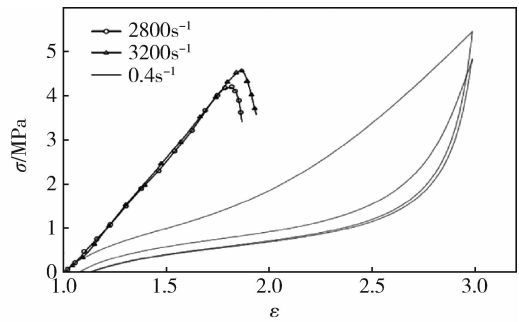
率有密切的关系,在一定范围内拉伸频率越高则材料的强度越大。李冬等^[7]采用单轴拉伸的手段,研究了不同试验温度下不同拉伸速率对三元乙丙橡胶类包覆层的拉伸应力应变性能,发现当拉伸速率设置为 100 mm/min 时,材料会发生弹性形变。杨晓红等^[8]进行单轴拉伸试验,利用获取的参数与现有的本构模型进行对比,分析了各模型的适用性和精度。

为了研究包覆层在不同热解状态下的力学性能,J. Q. YU 等^[9-10]使用准静态单轴拉伸试验的试验数据进行建模,试验测试结果与模型拟合曲线如图 2 所示。研究表明,根据热解程度不同,三元乙丙包覆层可以分别用黏超弹和超弹脆性本构模型来进行描述,模型的可靠性得到了证明。

包覆层材料的拉伸和压缩性能存在着差异性,蒋晶等^[11-12]通过准静态拉压试验对其进行了分析,结果如表 1 所示,EPDM 包覆层材料展现出了明显的超弹和率敏感特性,Polynomial 模型能够很好地预测 40% 应变内 EPDM 材料的压缩力学性能,并从微观机理上解释了材料的拉压性能差异。



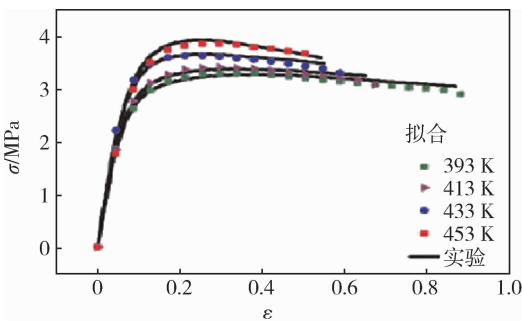
(a) 低应变率



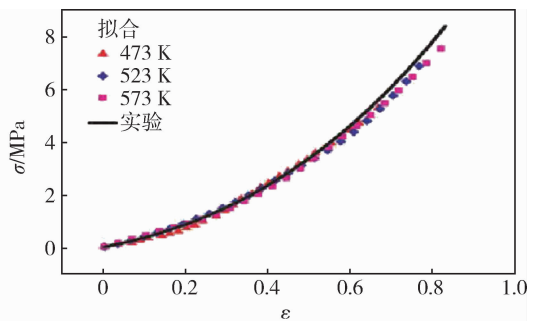
(b) 高应变率

图 1 EPDM 橡胶在不同应变速率下的应力—应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves with different stretching rates for EPDM rubber



(a) 黏超弹部分



(b) 超弹脆性部分

图 2 EPDM 在不同热解温度下拟合曲线与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of fitted results and experimental data for EPDM at different pyrolysis temperatures

表 1 EPDM 在不同应变率下的拉压力学性能

Tab. 1 Tension and compression mechanical properties at different strain rates

应变率/ 10^{-3} s^{-1}	拉压模量比/%	强度比/%	拉断伸长率/%	有效压缩应变/%
0.33	104	60	178	72
3.33	103	60	197	71
16.70	92	56	225	70
33.30	66	59	249	70

1.1.2 动态力学性能研究

包覆层材料的动态力学性能也是其力学特性的重要组成部分,李恩奇等^[13]采用频变复模量模型对某型推进剂和包覆层进行了动力学分析,对研究动载荷作用下发动机性能有重要的指导意义。

常海等^[14]研究了不同含量阻燃剂的聚氨酯包覆层的动态力学性能,得到 Pu-2 系列包覆层的低温动态性能如表 2 所示,试验说明三聚氰胺磷酸盐阻燃剂具有“补强”和增塑作用,阻燃剂的含量与其增塑作用呈正相关的关系,这也解释了包覆层的玻璃化转变温度降低的原因。

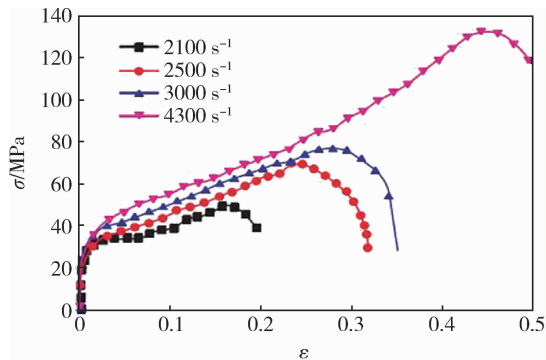
表 2 Pu-2 系列包覆层低温动态性能

Tab.2 Dynamic properties of Pu-2 coating at low temperature

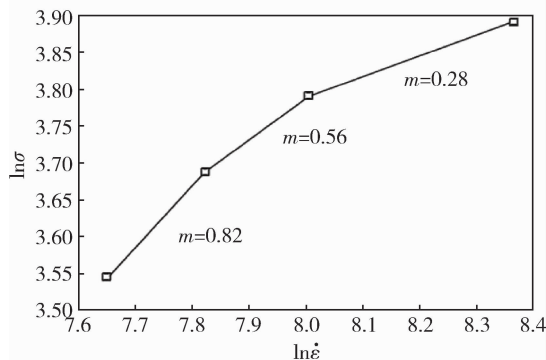
阻燃剂含量/%	E'/MPa (-100℃)	$T_{\alpha}^{(1)}/\text{℃}$	$\tan\delta$ 峰强度	$\tan\delta$ 峰面积/min
0	1069	15.38	0.9816	23.86
10	2195	9.34	0.6633	22.69
20	898	9.34	0.6686	22.07
30	708	9.27	0.5988	17.97
18(全配方)	898	9.40	0.6980	22.07

注:1) T_{α} 为 $\tan\delta$ 取峰值时对应的温度。

蒋晶等^[15-16]对比了分离式霍普金森杆动态压缩实验数据,得到图 3 所示动态特性,证明了 EPDM 包覆层具有明显的率敏感特性,应变率的增加会使相同应变下的应力增幅变大,应变越大其率敏感性越低,且会出现材料硬化现象。



(a) 动态应力—应变曲线



(b) 率敏感特性曲线

图 3 EPDM 的动态特性曲线

Fig. 3 Dynamic mechanical properties curves for EPDM

1.1.3 新型研究方法的应用

随着研究的不断深入,一些新的方法被应用到包覆层的力学性能的研究中。王永昌等^[17]用正交试验法研究了不同因素对包覆层力学性能的影响,根据试验数据得到了力学预示模型。王广等^[18-19]用数值模拟的方法将包覆层看成线弹性体,准确地模拟了固体推进剂/包覆层的脱黏过程。

以上学者用不同的手段对包覆层进行了研究,得到了大量的力学性能数据,具有一定的指导意义。但是在实际的运输和工作状态下,包覆层所处的环境远比样品的实验条件复杂,试验的到的数据与实际装备环境中的性能存在偏差。此外,上述研究还存在测试方法单一,结果受环境影响大,不够系统化等缺点。因此,需要改进试验条件,进一步开展更为深入和系统的包覆层在复杂环境下的力学性能研究。

1.2 包覆层力学性能的改进研究

包覆层材料作为一种复合材料,由橡胶基体和功能填料(主要为阻燃剂和其他一些性能改进助剂)构成,其性能也由这两部分来决定。包覆层材料对力学性能、导热性能和相容性等都有很高的要求^[20],能够直接满足要求的材料是几乎不存在,只有从基体和填料上进行改进才能满足固体发动机的结构完整性对包覆层性能的要求。

包覆层基体是固体发动机衬层的主要组成部分,很大程度上决定了包覆层材料性能的优劣。从 20 世纪中叶开始世界各国就已经着手于开发高性能的包覆层基体,至今已经取得了一定的成果。俄罗斯研制了新型 CA2 基包覆层材料并加入有机燃消烟剂 LDA,明显改善了其烟雾特性、耐热性和力学性能^[21]。有机硅橡胶因具备较高的耐热、耐烧蚀、耐老化和抗硝化甘油迁移等能力,比较适合用作包覆层基体材料,但其粘结性能、力学性能较差的问题一直困扰着国内外学者^[22]。聚酯型聚氨酯的常低温力学性能非常突出,将其作为基体材料并加入有机填料和无机抑烟剂,增加强度、减少烟雾生成量,可以得到性能良好的包覆层^[23]。三元乙丙橡胶具有较好的线烧蚀率以及良好的拉伸强度、断裂伸长率和邵氏硬度,并且与推进剂和发动机壳体之间有优良的相容性,近年来,其作为新型包覆层基体得到了广泛的应用^[24]。三元乙丙橡胶与聚酯均为有机聚合物,燃烧会产生 CO 有毒气体,并释放大量烟雾,与之相比芳氧基聚磷腈燃烧产生无色无毒氮气,且耐烧蚀、耐高温,火焰传播速率低,力学性能优良,有很好的应用前景^[25]。随着对新材料的不断研发,包覆层基体的性能也得到了很大的提高,在接下来的研究中,基体材料的研究要着眼于使其兼备良好的燃速控制能力、力学性能、相容性和粘结性等优良性能,同时材料在燃烧时要保证生成烟雾少或者没有烟雾生成。

单纯的包覆层基体的性能不能完全符合要求,可以加入适当的功能填料使包覆层能够满足生产和使用的性能需求。为了提高包覆层的力学性能,FROGLEY等^[26]将碳纳米材料作为填料加入包覆层基体中取得了预期效果。张嘉慧等^[27]在EPDM基体中添加增黏剂,发现其黏接性能得到了一定的提升,添加其他特定材料的微粒,可改善EPDM包覆层力学性能和烧蚀性能。将三溴化铋颗粒填充在包覆层中能够改善其燃烧性能,材料表面形成碳保护层,既能减缓外界空气的氧化作用,也可以降低温度对包覆层性能的影响^[28]。通过添加功能填料来改进包覆层的性能取得了显著的成效,但是某一种性能的提升必定会导致一些其他性能的降低(比如往丁羟橡胶基体中加入氧化石墨烯,使原材料的强度增加了,但对应的延伸率却有所下降^[29]),实际应用中,应当根据需求权衡得失对填料的材料和含量进行适当的调整,保证能够满足工程需求。

随着研究的不断深入,除了从基体和填料的角度出发来改善包覆层的性能,还可通过改进生产工艺和严格质量检测提高产品质量,避免包覆层因质量缺陷或受损而导致其性能下降。

2 高聚物交联密度测试方法与应用

交联密度是聚合物交联程度的定量描述,定义为单位体积内有效网络链的浓度,即单位体积内有效网络链的摩尔数^[2]。聚合物的力学性能与交联密度有密切的联系^[30],根据橡胶的黏弹性统计理论,交联橡胶在单向拉伸下的弹性应力 σ 与交联密度 ν_e 成正比^[4],即

$$\sigma = \nu_e RT(\lambda - \lambda^{-2}) \quad (1)$$

式中, $R = 8.314 \text{ J/K/mol}$,为摩尔气体常数, T 为热力学温度, λ 为形变率($\lambda = L/L_0 = 1 + \varepsilon$), ν_e 为交联密度, σ 为弹性应力。

聚合物的交联网络结构影响甚至决定着其强度、伸长率、模量、溶胀率和硬度等性能^[31],一般情况下,聚合物微观交联程度增加,材料结构变得致密,其拉伸强度和弹性模量增大,材料硬化导致变形能力和韧性降低。

2.1 交联密度测试方法及其优缺点

常用的交联密度的测试方法有平衡溶胀法、应力-应变法、动态热机械分析(DMA)法和流变法等,随着分析手段和现代仪器的进步,出现了核磁共振(NMR)法等新型研究方法^[32]。

平衡溶胀法是根据橡胶在溶胀平衡时溶剂分子在橡胶分子的压力与网络链挤出溶剂分子的回弹力共同作用下受力平衡,橡胶的体积稳定。平衡下的交联网络结构可以由溶胀状态表征,此时的吉布斯自由能为零,结合Flory-Rehner理论和橡胶弹性统计论可

以算出聚合物的交联密度^[33]。该方法忽略了末端链和物理缠结的影响,无法区分物理缠结和化学交联,测试精度不高。此外,温度、时间等因素的影响也会引起极大的测量误差。

应力-应变法是诸多交联密度测试方法中最简单的一种,只需用万能材料试验机对试样进行单向拉伸试验即可实现。根据材料弹性统计理论以及杨氏模量与交联密度的关系,便可计算出材料的交联密度。因在制备标准哑铃件时,易受环境和设备的影响,导致测试精度不高,并且测试对象只能是没有添加任何填充剂的聚合物^[34]。

DMA法测交联密度时,用动态热机械分析仪使样品发生小变形,模量得到提高,根据模量与交联密度之间的关系,可以推导出交联密度计算公式^[35]。该测试要求样品有很高的均匀性,试验中样品的滑动也会引起很大的误差

流变法的基本原理是流变学原理。试验时将设定好的动态剪切力施加到试样上,可以测出准确的频率、模量、阻尼等数值,通过计算可得到交联密度^[36]。流变法测试方便、快速,对样品要求不高,不管是固体还是液体都可以直接进行试验。

核磁共振(NMR)法是一种新型的、优势非常明显的交联密度测试手段,因其具有快速、无损、精确度高、重复性好、不限样品状态和全程实时监控等优点,得到了越来越多的关注与发展^[37]。NMR法的基本原理利用了横向弛豫时间对于氢原子的交联状态的高敏感性,交联网络的运动分为两部分:与交联键相连的网链各自的运动;末尾链和自由链以及其他自由小分子等的运动。据此,高分子聚合物的弛豫过程可当作这两种运动共同作用的结果,可以分别用高斯函数和指数函数描述这两部分的运动,结合测试信号和构建的数学模型可以得到材料的横向弛豫时间和交联密度^[32]。

相比于其他方法,核磁共振法具有诸多优点,但因其设备造价较高,只有少部分学者在用核磁共振仪进行相关研究。此外,根据核磁基本原理,横向弛豫时间只有在同等温度下跟交联密度才有较好的相关性,不同温度下测得的交联密度是没有可比性的,所以用核磁共振法测交联密度必须在同一温度下进行。

2.2 力学性能与交联密度的相关性研究进展

准静态力学性能是材料力学特性的基础,研究其与交联密度的关系,能够从微观机理来解释聚合物的宏观力学性能。杨树颜等^[38-39]研究了不同交联密度下橡胶力学性能,发现样品交联密度越大,则弹性模量和拉伸强度就越大,断裂伸长率和韧性就越小。火炸药在老化过程中,其交联密度和力学性能都会发生明显的变化。王芳芳等^[40]对浇注PBX炸药进行了70℃条件下的加速老化试验,对比了平衡溶胀法与核

磁共振法测交联密度的差异,发现 NMR 法优势明显,并借此分析了 PBX 炸药在老化过程中的力学性能。得出结论,样品的交联密度在老化初期增加、中期略降低、后期又增加;老化过程中,浇注 PBX 炸药的交联密度和力学性能变化呈线性相关,样品的老化交联和降解是性能变化的主要原因。

研究聚合物在不同交联密度下的动态力学性能,能够为材料的性能改进提高提供一定的参考,具有重要的工程意义。韩庆国等^[41]采用同步法合成了聚氨酯/聚苯乙烯(PU/PS)互穿聚合网络(IPN),研究了交联密度对其动态力学性能的影响,研究表明,交联密度的增加和交联网络固化速度的加快均能促使相容性差的体系之间强行互容。郭建等^[42-43]研究了不同温度、应变对橡胶的动态热机械性能的影响。在测试温度区间,高交联密度的试样呈现出玻璃态、过渡态和橡胶态特征,低交联密度的试样只表现出玻璃态和过渡态的力学行为;损耗模量与损耗角正切的图谱均为单峰,且数值与交联密度的增长呈相反的变化趋势,测试的动力学参数表现出对测试温度和应变率具有强烈的依赖性。

上述研究分别讨论了聚合物的准静态和动态力学性能与交联密度的关系,对于分析材料宏观力学性能变化的微观机理研究具有一定的指导意义。但是,微观结构的分析单靠交联密度测试数据是不全面的,应当结合其他微观分析仪器,对交联变化机理进行深

一步的剖析。

3 包覆层的本构模型研究进展

近年来固体火箭的远程化、科技化程度越来越高,其发动机的结构完整性研究越来越受到重视^[44]。研究包覆层的力学行为并且建立准确的本构模型将能为结构完整性的评估提供重要的理论参考。

3.1 包覆层本构模型的发展

计算力学的发展,使试验与数值计算结合的研究方式被越来越多的学者用于力学建模与分析。包覆层在拉伸或压缩后,会产生 Mullins 效应,表现出超弹性,材料的松弛试验又证明了它具有黏弹性特征。现有的非线性黏弹性或超弹性本构模型都不足以很好地描述包覆层的力学性能,因此,黏超弹本构模型被引入来研究相关特性^[20]。

黏超弹本构模型由超弹性和黏弹性模型两部分组成,最早是 1994 年由 LEU 等^[45]提出来的,一般采用以下两种方法构建黏超弹本构模型:一种是考虑材料的率相关性,修正超弹本构而建立黏超弹本构模型^[46-47];另一种方法是将黏弹性模型与超弹性模型进行串联或者并联重组形成黏超弹本构模型^[48-51]。

超弹本构模型分为热力学统计模型和唯象学本构模型,其中后者包括基于伸长率的模型和基于不变量的连续介质模型^[52]。在众多模型中,Neo-Hookean 模型、Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型和 Oden 模型等超弹本构模型的应用最为广泛^[53-56],具体形式如表 3 所示。

表 3 常用的超弹本构模型

Tab. 3 The common super-elastic constitutive models

模型	形式	适用范围	特点
Neo-Hookean 模型	$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$	不可压缩橡胶材料	形式最简单
Mooney-Rivlin 模型	$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$	不可压缩橡胶材料	形式简单,误差小
Yeoh 模型	$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0}(\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i}(J - 1)^{2i}$	不可压缩橡胶的大变形单轴拉伸	可以通过简单变形试验预测其他变形行为
Oden 模型	$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2}(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i}(J - 1)^{2i}$ 其中: $\bar{\lambda}_1 = J^{-1/3}\lambda_1$, $\bar{\lambda}_1\bar{\lambda}_2\bar{\lambda}_3 = 1$	不可压缩橡胶的有限应变	灵活性高、精度高,适用范围广

黏弹性模型一般分为线黏弹性和非线性黏弹性模型,前者为线弹性体和理想弹性体组合,如 Maxwell 模型、Kelvin 模型和三参量固体模型等^[57]。实际材料的力学性能一般都是非线性弹性的,相关学者提出了基于经验型的 Johnson-Cook 模型和基于物理学的 Steinberg-Guinan 模型、朱-王-唐(ZWT)模型等^[58-60]。

3.2 黏超弹本构模型的应用

随着技术的成熟,黏超弹本构模型被应用在了生物软组织^[61]、推进剂^[51]、高聚物^[62]等材料领域的研究中。包覆层因具有变形能力强、非线性黏弹性和应力软化等特征,且对于温度、周围的介质的影响非常

敏感,使得获取一个准确而全面的描述包覆层力学性能的本构模型成为了困扰众多学者的难题。

M. CHENG 等^[6]研究了 EPDM 包覆层材料在准静态下的 Mullins 效应,用应变率函数来描述黏超弹模型中的率相关性。B. CHEN 等^[63]以超弹性本构模型乘上相关率函数建立的黏超弹模型以及杨晓红等^[8-64-65]建立了 Mooney-Rivlin 超弹模型和线性黏弹性模型相结合的黏超弹本构模型,经验证均能较准确地预测包覆层在准静态单轴拉伸下力学特性。

短纤维增强三元乙丙橡胶包覆层能够解决复杂构型自由装填药柱外表面的包覆问题,为了描述其相对复杂的力学行为,谈炳东^[66]等提出各向异性的超

弹性本构模型,并用纤维方向对应变能进行修正,该模型用于预测纤维方向 0° 到 45° 时的各向异性力学特性误差在5%以内。

包覆层在生产、加工过程中,因为工艺或外部环境的影响,难免会导致材料内部产生缺陷,裂纹、凹坑等不同的形式的缺陷存在材料的各个部位,其大小和方向均不确定,难以测量和排除,初始缺陷将会导致包覆层在工作过程中承受不确定的冲击甚至失效。为了描述初始缺陷的影响,文献[67]在经典的Ogden模型中加入随机损伤参数函数,建立能够描述包覆层初始缺陷的本构模型,取得了较好的效果。

上述研究中的本构模型均是从材料的宏观力学性能入手而建立的,在本构模型中引入微观性能因子的研究还未见报道。在现有的本构模型上进行修正,并引入含交联密度的参数因子,将有利于更全面建立力学性能与交联密度的关系,更系统地分析包覆层的力学特性,对于固体火箭发动机的结构完整性评估具有重要意义。

4 发展趋势

(1)开展包覆层在复杂环境下的性能研究。模拟其工作、运输、贮存状态下的环境,进行不同温度、湿度、载荷耦合下的力学性能测试。

(2)开展包覆层微观性能研究。从微观交联网络结构的角度分析包覆层宏观力学性能的变化机理,更加系统地研究交联密度与力学性能的相关性,并建立含交联密度因子的本构模型。

(3)充分利用NMR等现代技术,并将其与传统手段的有效结合。鉴于NMR法测交联密度时无损、快速、准确的显著优点,应大力加强该方法在包覆层性能研究中的应用,并合理引入动态热机械分析仪等现代分析仪器,从多方面分析,提高测试结果的全面性和准确性。

参考文献

[1] 杨建华. 多口径发动机包覆层表面缺陷检测方法研究[D]. 山西:中北大学,2016:1-6.
[2] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京:宇航出版社,1994:431-446.
[3] 张炜. 火箭推进剂[M]. 北京:国防工业出版社,2014:322-334.
[4] SEKKAR V, BHAGAWAN S S, PRABHAKARAN N, et al. Polyurethanes based on hydroxyl terminated polybutadiene: modelling of network parameters and correlation with mechanical properties[J]. Polymer, 2000, 41: 6773-6786.
[5] RAO B N, YADAV P P, MALKPPA K, et al. Triazine functionalized hydroxyl terminated polybutadiene polyurethane: Influence of triazine structure[J]. Polymer, 2015, 77: 323-333.
[6] CHENG M, CHEN W. Experimental investigation of the stress-stretch behavior of EPDM rubber with loading rate effects[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(18): 4749-4768.

[7] 李冬,陈竦,任黎,等. 三元乙丙基固体推进剂包覆层拉伸性能影响因素研究[J]. 化工新型材料, 2011, 39(9): 98-99.
[8] 杨晓红,周长省,常武军,等. 丁腈包覆层力学特性及本构模型研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(4): 94-97.
[9] YU J Q, ZHENG J, ZHOU Q C, et al. Research on debonding property of CMDB/EPDM coating interface[J]. Gutu Huojian Jishu/Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(4): 528-532.
[10] 张中水,许进升,陈雄,等. EPDM 包覆层热解状态下的力学行为及本构模型[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(4): 560-564.
[11] 蒋晶,陈进升,陈雄,等. EPDM 包覆层材料准静态压缩实验及力学模型研究[J]. 推进技术, 2015, 36(8): 1268-1273.
[12] 张中水,陈进升,陈雄. 基于 EPDM 绝热层拉压不同性的研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(3): 170-172.
[13] 李恩奇,雷勇军,袁端才,等. 某固体火箭发动机药柱的动力学分析[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 486-493.
[14] 常海,张腊莹,刘子如,等. 磷酸盐阻燃剂对聚氨酯酯包覆层动态力学性能的影响[J]. 火炸药学报, 2009, 32(2): 60-63.
[15] 蒋晶,周长省,赵磊,等. EPDM 包覆层材料静动态压缩实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(5): 95-98.
[16] SONG B, CHEN W. One-dimensional dynamic compressive behavior of EPDM rubber[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2003, 125(3): 294-301.
[17] 王永昌,黄庆,陈支厦. 丁腈包覆层力学性能研究[J]. 船舶防化, 2010(5): 18-22.
[18] 王广,赵奇国,武文明. 复合固体推进剂/衬层黏结界面的细观结构数值建模及脱黏过程模拟[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 7972-7979.
[19] 孟红磊. 改性双基推进剂装药结构完整性数值仿真方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012: 2-14.
[20] 张中水. EPDM 绝热包覆层热解特性及本构模型研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016: 2-12.
[21] 曹继平,姜振,任黎,等. 俄罗斯固体推进剂装药注射包覆工艺研究进展[J]. 飞航导弹, 2016, 1(4): 78-84.
[22] 武威,陈军,杨月. 双基推进剂用硅橡胶材料包覆设计研究[J]. 含能材料, 2016, 45(5): 29-34.
[23] 史爱娟,覃光明,王吉贵. 聚氨酯包覆层的现状及展望[J]. 火炸药学报, 2002, 25(3): 58-60.
[24] 贾登. 三元乙丙橡胶黏结界面的变温力学特性及应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016: 2-12.
[25] 王志锋,王建中,曹继平,等. 芳氧基聚磷腈绝热包覆材料研究进展[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(1): 119-122.
[26] FROGLEY M D, RAVICH D, WAGNER H D. Mechanical properties of carbon nanoparticle-reinforced elastomers [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(9): 1647-1654.
[27] 张嘉惠. 固体火箭发动机壳体内绝热层的概况与三元乙丙胶绝热层的现状[J]. 固体火箭技术, 1983, 4(1): 112-122.
[28] 汪建丽,王红丽,熊志荣. 三元乙丙橡胶绝热层在固体发动机中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(2): 12-14.
[29] ZHANG X, ZHENG J, FANG H M, et al. Surface modified graphene oxide cross-linking with hydroxyl-terminated poly-

butadiene polyurethane; effects on structure and properties [J].

Composites; Part A, 2017, 103: 208–218.

[30] 姜其斌, 杨军, 孙建军, 等. 甲基丙烯酸缩水甘油酯增强 EPDM 的力学性能和交联密度 [J]. 合成橡胶工业, 2004, 27(1): 52.

[31] 陈荣盛, 郑剑, 熊中年. 化学交联型 PU 弹性体网络结构参数的理论计算方法 [J]. 火炸药学报, 1996, 19(1): 35–42.

[32] 王芳芳, 常海, 张林军, 等. 交联密度测试方法及其在火炸药中应用的研究进展 [J]. 火炸药学报, 2016, 39(2): 8–15.

[33] 毕薇娜. 天然橡胶交联密度和动态性能的研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2008: 5–8.

[34] 林丽, 张红, 李远. 热固性聚合物的交联密度测试方法研究进展 [J]. 热固性树脂, 2012, 27(5): 60–63.

[35] SEKKAR V, NARAYANASWAMY K, SCARIAH K J, et al. Evaluation by various experimental approaches of the crosslink density of urethane networks based on hydroxyl-terminated polybutadiene [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103: 3129–3133.

[36] ZHANG C, EASTEAL A J. Rheological properties of poly (ethylene glycol)/poly (N-isopropylacrylamide-co-2-acrylamido-2-methylpropanesulphonic acid) semi-interpenetrating networks [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 109: 3578–3589.

[37] 赵菲, 毕薇娜, 张萍, 等. 用核磁共振法研究促进剂对硫磺硫化天然橡胶结构的影响 [J]. 合成橡胶工业, 2008, 31(1): 50–53.

[38] 杨树颜, 贾志欣, 刘岚, 等. 冰点下降法研究交联网络结构对天然橡胶力学性能的影响 [J]. 高分子学报, 2014(7): 943–947.

[39] 王炳昕, 冯晓萌, 刘莉. 炭黑对 NBR 复合材料交联密度和力学性能的影响 [J]. 弹性体, 2013, 23(6): 16–20.

[40] 王芳芳, 常海, 张林军, 等. 浇注 PBX 炸药老化过程中交联密度与力学性能的关系 [J]. 火炸药学报, 2017, 40(2): 69–74.

[41] 韩庆国, 王静媛, 刘瑞瑛, 等. 交联密度对聚氨酯/聚苯乙烯互穿聚合物网络动态力学性能的影响 [J]. 高等学校化学学报, 1995, 16(4): 653–656.

[42] 郭建, 闵召辉, 张占军, 等. 不同交联密度环氧树脂沥青的动态力学性能 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(6): 26–30.

[43] 张宏亮, 刘大晨. 交联密度对软丁腈 N41 动态力学性能的影响 [J]. 沈阳化工大学学报, 2015, 29(2): 140–143.

[44] 许进升, 鞠玉刚, 周长省, 等. 模数对药柱热应力的影响 [J]. 弹道学报, 2011, 32(2): 74–78.

[45] LEU L J, MUKHERJEE S. Sensitivity analysis of hyperelastic-viscoplastic solids undergoing large deformations [J]. Computational Mechanics, 1994, 15(2): 101–116.

[46] SONG B, CHEN W, CHENG M. Novel model for uniaxial strain-rate-dependent stress-strain behavior of ethylene-propylene-diene monomer rubber in compression or tension [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(3): 1553–1558.

[47] CHAND S, SAHAV K, SAXENA R. Nonlinear visco-hyperelastic constitutive relation for brain tissue with parametric sensitivity study [J]. Engineering in Medicine and Biology Society, 1995, 14(3): 91–92.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 5 期

[48] ANANI Y, ALIZADEH Y. Visco-hyperelastic constitutive law for modeling of foam's behavior [J]. Material and Design, 2011, 32(5): 2940–2948.

[49] YANG L, SHIM V, LIM C. A visco-hyperelastic approach to modeling the constitutive behavior of rubber [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(6): 545–560.

[50] 张君发, 鞠玉涛, 孙朝翔, 等. NEPE 推进剂动态力学性能研究 [J]. 固体火箭技术, 2013, 36(3): 358–362.

[51] 胡少青, 鞠玉涛, 常武军, 等. NEPE 固体推进剂黏-超弹性本构模型研究 [J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 168–173.

[52] 张少实. 复合材料与黏弹性力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 134–147.

[53] BEGLEY M R, CRETON C, MCMEEKING R M. The elastostatic plane strain mode I crack tip stress and displacement fields in a generalized linear neo-hookean elastomer [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 84: 21–38.

[54] HOLZAPFEL G A, GASSER T C. A viscoelastic model for fiber-reinforced composites at finite strains: continuum basis, computational aspects and applications [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(34): 4379–4430.

[55] YEOH O H. Some forms of the strain energy function for rubber [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 66(5): 754–771.

[56] EHERT A E. On a molecular statistical basis for Ogden's model for rubber elasticity [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 78: 249–268.

[57] 阿克洛尼斯. 聚合物黏弹性引论 [M]. 北京: 宇航出版社, 1984: 196–202.

[58] 张君发. 宽泛应变率下 NEPE 推进剂热黏弹性本构模型研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 1–17.

[59] 周风华, 王礼立, 胡时胜. 有机玻璃在高应变率下的损伤型非线性黏弹性本构关系及破坏准则 [J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(4): 333–342.

[60] JING J, XU J S, ZHANG Z S, et al. Rate-dependent compressive behavior of EPDM insulation: experimental and constitutive analysis [J]. Mechanics of Material, 2016, 96: 30–38.

[61] NATALI A N, FONTANELLA C G, CARNIEL E L. Constitutive formulation and analysis of heel pad tissues mechanics [J]. Medical Engineering and Physics, 2010, 32: 516–522.

[62] ZRIDA M, LAURENT H, RIO G, et al. Experimental and numerical study of polypropylene behavior using an hyper-visco-hysteresis constitutive law [J]. Computational Materials Science, 2009, 45: 516–527.

[63] SONG B, CHEN W. Dynamic compressive behavior of EPDM rubber under nearly uniaxial strain conditions [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, 126(2): 213–217.

[64] 杨晓红, 许进升, 孙俊丽, 等. 三元乙丙材料黏超弹本构模型研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(8): 1205–1209.

[65] 张中水, 陈雄, 周清春, 等. EPDM 绝热层的黏超弹本构模型 [J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2): 273–277.

[66] 谈炳东, 许进升, 贾云飞, 等. 短纤维增强 EPDM 包覆薄膜超弹性本构模型 [J]. 力学学报, 2017, 49(2): 317–323.

[67] 张中水, 许进升, 陈雄, 等. 初始缺陷的随机统计规律在三元乙丙本构模型中的应用 [J]. 推进技术, 2016, 37(6): 1189–1194.