

EPDM 材料热解后准静态压缩力学性能

蒋 晶¹, 陈 雄¹, 许进升¹, 张中水¹, 杜红英²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094;

2. 晋西工业集团有限责任公司 技术中心, 太原 030027)

摘 要: 为研究三元乙丙(EPDM)包覆层材料热解过程及其热解后的力学行为,采用热重分析(TGA)对 EPDM 的热稳定性进行分析,基于其 TGA 曲线与热降解温度,通过电阻炉设定不同的温度进行热解实验,然后利用万能实验机完成准静态单轴压缩实验.结果表明:EPDM 材料的抗压性能随着热解温度的升高呈先减小再升高而后降低的趋势,可大体分为 3 个阶段.通过分阶段建立模型来更好地描述材料不同热解程度下的力学行为,采用 2 阶 Polynomial 超弹模型与温度相关项相结合等方式预测不同温度热解后 EPDM 材料的力学响应,对比实验结果发现模型拟合精度良好.

关 键 词: 三元乙丙; 热重分析; 热解; 力学性能; 本构模型

中图分类号: V512

文献标志码: A

Quasi-static compression mechanical properties of EPDM material after pyrolysis

JIANG Jing¹, CHEN Xiong¹, XU Jin-sheng¹,

ZHANG Zhong-shui¹, DU Hong-ying²

(1. School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Technology Center, Jinxi Industries Group Company Limited, Taiyuan 030027, China)

Abstract: In order to study the pyrolysis process of ethylene propylene diene monomer (EPDM) insulation material and its compression mechanical behavior under high strain rate, the thermal stability of EPDM was analyzed by thermogravimetric analysis (TGA). Based on the TGA curve and the thermal degradation temperature, the resistance furnace was set at different temperatures to complete the pyrolysis test. And then quasi-static compression tests were conducted by the universal testing machine. Results showed that, the mechanical properties of EPDM can be divided into three stages, the stress-strain curves first decreased, then rose and last reduced with the increase of pyrolysis temperature. Phased models were used to give a good description of mechanical properties of EPDM material under different degrees of pyrolysis. The second order Polynomial hyperelastic model including temperature related items was built to predict the mechanical response of EPDM material after different pyrolysis temperatures. Compared with the test results, the compression models can be used

收稿日期: 2015-05-18

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20140772)

作者简介: 蒋晶(1990—),女,硕士生,主要从事固体火箭发动机绝热层力学性能研究.

通讯作者: 陈雄(1977—),男,副教授、硕士生导师,博士,主要研究方向为航空宇航推进理论与工程、火箭发动机设计与火箭总体技术. E-mail:chenxiong@njust.edu.cn

引用格式: 蒋晶,陈雄,许进升,等. EPDM 材料热解后准静态压缩力学性能[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 114-119. JIANG Jing, CHEN Xiong, XU Jinsheng, et al. Quasi-static compression mechanical properties of EPDM material after pyrolysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 114-119.

to effectively describe the mechanical behaviors of EPDM material with good accuracy.

Key words: ethylene propylene diene monomer (EPDM); thermogravimetric analysis (TGA); pyrolysis; mechanical properties; constitutive model

EPDM(三元乙丙)是乙烯、丙烯以及非共轭二烯烃的三元共聚物,EPDM 材料是以 EPDM 为基体、添加耐烧蚀填料、并与其他助剂混炼后硫化而成的一种炭化型抗烧蚀材料,具有密度低、延伸率高及抗烧蚀性能好等优点,广泛应用于固体火箭发动机^[1-3]. 其作为燃烧室的热防护结构,能够抑制某些不希望燃烧的推进剂药柱表面的燃烧,缓冲壳体应变向推进剂的传递,阻止流动化学组分在发动机内迁移,防止燃烧产物对壳体的冲刷;密封壳体、接缝和附件,以防止压力损失及热燃烧产物对其损伤,引导燃烧产物在最大可能的程度上以层流方式进入喷管等重要的辅助作用.

随着发动机工作压强的提高,高燃速推进剂及高能推进剂的应用^[4-6],对 EPDM 材料各项性能要求进一步提高. 目前对绝热层的研究主要集中于绝热层的配方组成研究和绝热层烧蚀机理研究两个方面. Natali 等^[7]研究比较了不同有机纤维增强的三元乙丙橡胶的性能;刘洋等^[8]探讨了三元乙丙基础配方和抗过载配方绝热材料炭化层中致密结构形成的机理,进行了不同配方材料的烧蚀模式和机理的分析;Jovanović 等^[9]研究了炭黑填充 NBR/EPDM(丁腈/三元乙丙)混合橡胶对于固化动力学、力学性能、形态和热稳定性的效果. 而本文主要集中在研究 EPDM 材料保温热解后的力学性能,基于 EPDM 材料的热重分析结果,开展不同温度下 EPDM 材料的保温热解实验,并通过万能实验机完成准静态压缩实验,旨在揭示 EPDM 材料不同温度保温热解后材料的准静态力学特性,采用超弹本构^[10]与温度相关项相结合等方式建立材料力学模型,良好预测 EPDM 材料在不同热解程度后的力学行为,为火箭发动机内部绝热结构的设计以及 EPDM 材料烧蚀模型的建立提供有价值的理论依据.

1 实 验

实验原材料为圆盘状三元乙丙,作为发动机药柱端面绝热包覆材料,广泛应用于各类固体火箭. 为研究 EPDM 材料的热解特性,通过热重分析探究其热解过程,并通过保温热解实验制备实验样品,为后续进一步研究 EPDM 材料的力学性能做准备.

1.1 热解实验

本实验采用机械加工方法将试件加工成圆柱状,且必须保证试样两端面的平行度与光滑度,试样尺寸为 $\phi 8.0 \times 6.0$ mm,机加后静置保存一段时间,去除机加工残余应力.

采用热重分析(TGA)对 EPDM 材料的热稳定性进行研究,在氮气的环境下以 $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率对样品进行加热,得到 EPDM 材料的 TGA 曲线,如图 1 所示. 样品最初质量为 6.56 mg,从 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始升温至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,最终样品剩余 3.18mg,质量减少 51.54%. 由图 1 可知,TGA 曲线有比较明显的拐点:当升温至 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,曲线开始缓慢下降,此阶段主要是水分的析出,材料所含水分少,故质量减小较小;而后样品质量减少速率加快,曲线快速下降,之后再经历下降速率先减小后增大的过程,该阶段是所含纤维、填料、颗粒和 EPDM 的热解释放;当温度升至 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,样品剩余质量趋于定值,故热降解过程主要发生在 $200\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,最终伴随炭化过程.

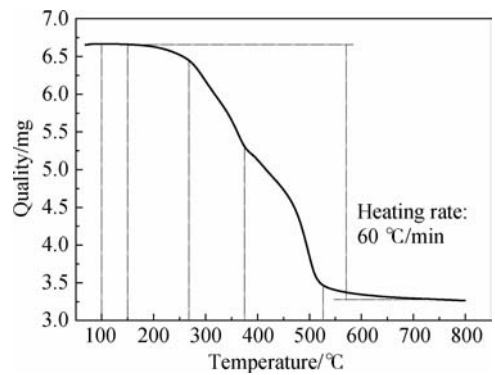


图 1 EPDM 材料 TGA 曲线

Fig. 1 TGA curve of EPDM material

在获取 EPDM 材料 TG 曲线的基础上,采用型号为 SRJX8-13 的箱式电阻炉对试件进行保温热解,设定电阻炉温度 t_r 分别为 $100, 150, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,将 $\phi 8.0 \times 6.0$ mm 的试件放入并热解 2 h. 将试样从电阻炉中取出,静置冷却后发现,当温度达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上时,热解气体由两端面溢出,故而端面有鼓包,甚至随着温度愈高鼓包破裂. 因此待试件静置冷

却至室温后用砂纸打磨圆柱状试件两端面,保证其平行度与光滑度。

1.2 准静态压缩实验

本实验利用万能实验机完成,实验过程在室温 $t_s=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行,湿度为 50%。为研究 EPDM 材料不同热解程度时的力学性能,在相同速率条件下进行准静态压缩实验,设定万能实验机的压缩速度为 1 mm/min ,对应的压缩应变率分别为 0.0025 s^{-1} ;每组实验重复 5 次,将所得到的结果换算成工程应力应变曲线,并取其平均曲线来研究 EPDM 包覆层材料不同热解程度下的力学特性。

2 实验结果分析

通过准静态压缩实验分析 EPDM 材料不同热解程度下的力学行为。在实验过程中可发现,当热解温度设为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上时,材料无法承受外界载荷,无稳定的力学性能。故本文并未把热解温度超过 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况列入研究范围。从图 2 来看,在经过高温热解过程后,EPDM 材料准静态压缩力学行为按热解温度的高低大致可分为 3 个阶段:分别为 $20\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; $225\sim 275\text{ }^{\circ}\text{C}$; $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上。

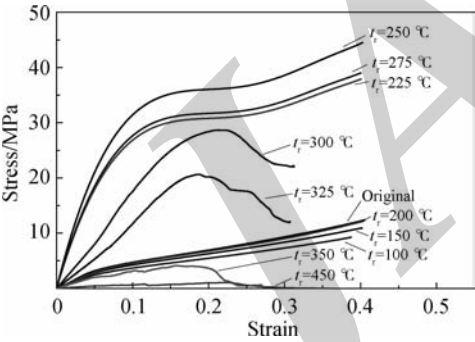


图 2 EPDM 不同热解程度应力应变曲线

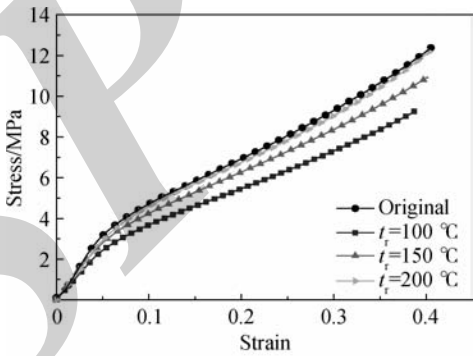
Fig. 2 Stress-strain curves of EPDM under different pyrolysis degrees

在第 1 阶段时,EPDM 基本未发生热解反应,只是材料中水分的蒸发及空气的逸出^[11],故其应力应变曲线与原始材料走势相似,认为材料性质并未发生改变;但从图 3(a)中可以发现,将 EPDM 材料在 $t_r=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温热解后,材料应力应变曲线明显低于原始材料,是因为温升软化效应即温度升高加快了分子链运动,减弱了分子间作用了,导致宏观力学性能下降,然而随着热解温度的进一步上升,材料的应力应变曲线逐渐升高,说明其抗压性能慢慢恢复。

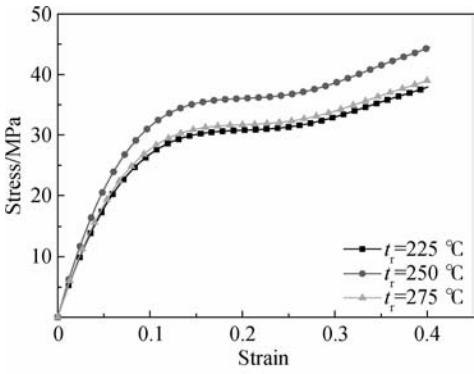
当 EPDM 材料从 $t_r=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $t_r=$

$225\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,如图 3(b)所示,材料力学行为发生突变,应力应变曲线陡然升高,压缩模量显著增大,应力应变曲线可分为弹性区、屈服区和压实致密区^[12-13]。研究表明在高温有氧环境下,橡胶类材料主要发生侧基氧化反应,导致橡胶交联硬化,所以该阶段 EPDM 材料的应力应变曲线大有不同。当热解温度升至 $t_r=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,EPDM 力学性能达到顶峰,随后其力学性能随着热解温度的上升而下降。该阶段中,材料黏弹特性比较显著,然而变形过大时,材料无法恢复原状,说明变形过大时 EPDM 材料也会发生塑性变形。

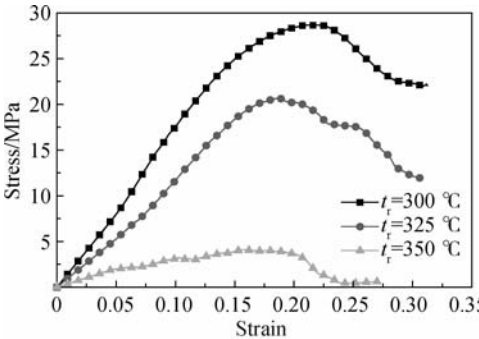
当 $t_r=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时(见图 3(c)),材料力学性能发生质的改变,基本从黏弹特性转为脆性材料,且



(a)



(b)



(c)

图 3 EPDM 的 3 个阶段力学性能

Fig. 3 Three stages of mechanical properties of EPDM

随着热解温度的上升其应力应变曲线反而下降。其性能突变的原因可能是材料中所添加的氯丁橡胶的大幅热解^[14],导致黏性的减小,材料内部孔隙变大、微裂纹产生,故而压缩变形至 20% 左右时,材料就会产生宏观裂纹。

3 模型建立

3.1 第 1 阶段模型

在研究橡胶材料时,人们一般认为它是各向

$$\sigma = 2(\lambda - \lambda^{-2}) \left\{ C_{10} + 2C_{20} \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) + C_{11} \left(\frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda - 3 \right) + \lambda^{-1} \left[C_{01} + C_{11} \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) + 2C_{02} \left(\frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda - 3 \right) \right] \right\} \tag{1}$$

式中 $C_{10}, C_{20}, C_{11}, C_{01}$ 和 C_{02} 为材料的超弹性参数, λ 为伸长量, 且 $\lambda = 1 - \epsilon$, ϵ 为加载方向上的应变。通过式(1)拟合室温下 EPDM 原始材料在压缩速度为 1 mm/min 下的应力应变曲线, 如图 4

$$\sigma = 2(\lambda - \lambda^{-2}) \left\{ C_{10} + 2C_{20} \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) + C_{11} \left(\frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda - 3 \right) + \lambda^{-1} \left[C_{01} + C_{11} \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) + 2C_{02} \left(\frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda - 3 \right) \right] \right\} \cdot \left[1 - \frac{(t - t_{\text{basic}})(t - t^*)}{\alpha t^2} \right] \tag{2}$$

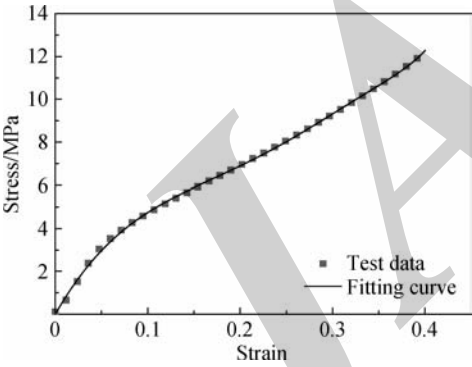


图 4 EPDM 室温实验结果拟合曲线
Fig. 4 Fitting curve of EPDM test data at room temperature

式中 t 为热解温度, t_{basic} 为参考温度, 在第 1 阶段 $t_{\text{basic}} = 20^\circ\text{C}$, t^*, α 均为温度相关项模型参数。选用热解温度 $t_r = 100^\circ\text{C}$ 下的应力应变曲线拟合得到温度项参数, 所以第 1 阶段本构模型建立完全, 其所有模型参数如表 1 所示。通过式(2)可以预测其他温度下 EPDM 材料的力学性质, 将其预测结果与实验结果相对比, 如图 5 所示, 发现该模型能够很好地描述 20~200 °C 这一阶段 EPDM 材料在应变为 0~0.4 范围以内的力学行为。

3.2 第 2 阶段模型

在 $t_r = 225 \sim 275^\circ\text{C}$ 这段热解温度范围内, 虽然材料力学行为较 $t_r = 200^\circ\text{C}$ 之前的力学行为有

同性不可压缩的超弹性体, 其非线性弹性行为可以用超弹性本构模型来描述。通常超弹模型有: 基于连续介质力学理论的 Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型、Polynomial 模型、Ogden 模型、Neo-Hookean 模型以及基于统计热力学的高斯统计模型、Arruda-Boyce 模型等^[15-16]。本研究选用 2 阶 Polynomial 超弹模型作为 EPDM 材料第 1 阶段的基本模型, 含高阶项的 Polynomial 模型能更好地适应填充与非填充橡胶材料, 其表达式为

所示, 得到表达式中各材料参数。为描述 EPDM 材料在不同热解温度下的力学行为, 在原始材料表达式(式(1))中引入温度相关项^[17], 因此, 在 0~200 °C 这一阶段, 其本构模型表达式如下:

表 1 第 1 阶段模型参数
Table 1 Parameters of the first stage model

Parameters		Value
Material parameters	$C_{10}/10^2$	-0.859 98
	$C_{01}/10^2$	0.734 16
	$C_{20}/10^2$	-1.308 58
	$C_{11}/10^2$	1.202 68
	$C_{02}/10^2$	-0.350 68
Temperature parameters	$t^*/^\circ\text{C}$	210
	α	3.91

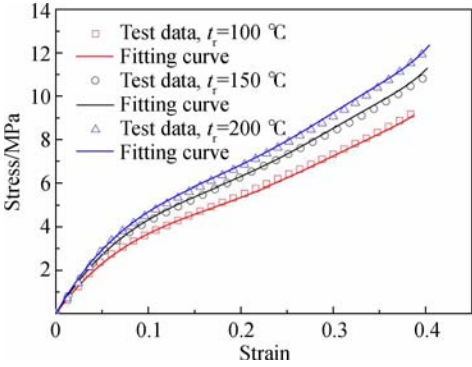


图 5 $t_r = 100 \sim 200^\circ\text{C}$ 实验结果与预测曲线对比图
Fig. 5 Comparison of test data and predict curves under $t_r = 100 \sim 200^\circ\text{C}$

很大的不同,但其应力总是随着应变的增大而增大.该阶段的应力应变曲线可分为弹性区、屈服区和压实致密区,可以看出此时材料仍表现出黏弹特性.故而可采用与第 1 阶段相同的模型作为第 2 阶段 EPDM 材料的力学本构模型(式(2)),通过 $t_r=225\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的准静态压缩实验结果拟合模型中的超弹参数,如图 6 所示,因此式(2)中参考温度 $t_{\text{basic}}=225\text{ }^{\circ}\text{C}$;采用 $t_r=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下实验结果拟合模型温度项参数,并预测 $t_r=275\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 EPDM 材料的力学响应,将其与实际实验结果相比较,来验证该阶段本构模型的有效性,如图 7 所示.从图中可以发现第 2 阶段所建立的模型的预测结果非常准确,基本贴近实验结果.表 2 显示了第 2 阶段本构模型所有参数.

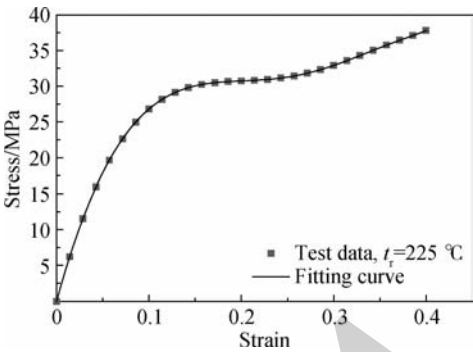


图 6 EPDM 材料在 $t_r=225\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下实验结果拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of test data at $t_r=225\text{ }^{\circ}\text{C}$ of EPDM material

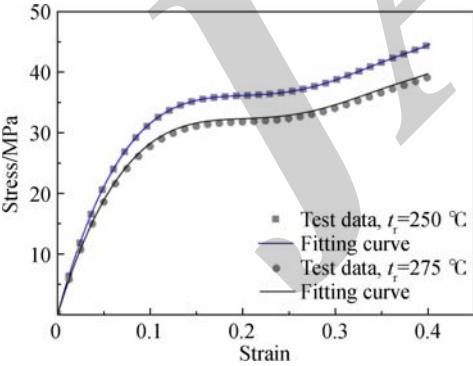


图 7 $t_r=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $t_r=275\text{ }^{\circ}\text{C}$ 实验结果与预测曲线对比图
Fig. 7 Comparison of test data and predict curves under $t_r=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $t_r=275\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.3 第 3 阶段模型

当 $t_r=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,材料应力曲线很明显不同于其他温度,EPDM 材料力学性质发生很大变化,其应力应变曲线可以分为弹性上升区、屈服区以及碎裂卸载区 3 部分,认为此时 EPDM 材料为脆性材料,所以仿照混凝土本构建立单轴受压应力应变关系^[18],其模型表达式如下:

表 2 第 2 阶段模型参数

Table 2 Parameters of the second stage model

Parameters		Value
Material parameters	$C_{10}/10^2$	-5.755 84
	$C_{01}/10^2$	4.968 04
	$C_{20}/10^2$	-6.537 44
	$C_{11}/10^2$	5.166 84
	$C_{02}/10^2$	-1.401 72
Temperature parameters	$t^*/^{\circ}\text{C}$	280
	α	0.07

$$\sigma = \frac{E_0 \epsilon}{1 + \left(\frac{E_0}{E_s} - 2 \right) \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2}$$

(3)

式中 ϵ_0 为相应于峰值应力 σ_0 的应变, E_0 为原点切线模量, E_s 为最大应力点的割线模量,即 $E_s = \sigma_0/\epsilon_0$, ϵ 为加载方向上的应变.考虑到随着热解温度的升高,材料的抗压性能变差,所以在模型中引入温度相关项,该阶段本构模型如下式:

$$\sigma = \frac{E_0 \epsilon}{1 + \left(\frac{E_0}{E_s} - 2 \right) \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2} \left[1 - \left(\theta \frac{t - t_b}{t} \right)^\beta \right]$$

(4)

式中 $t_{\text{basic}}=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, θ 和 β 均为模型参数.通过拟合 $t_r=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $t_r=325\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温热解后的实验结果,可以得到该模型中的所有参数,如表 3 所示.拟合结果如图 8 所示,第 3 阶段模型可大致预测该段温度范围内材料热解后的力学行为.

表 3 第 3 阶段模型参数

Table 3 Parameters of the third stage model

E_0	E_s	ϵ_0	θ	β
145	128	0.223 3	6	1.5

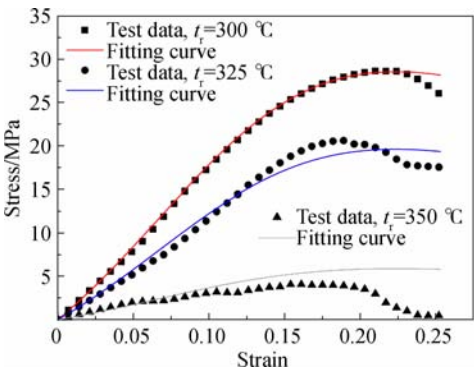


图 8 第 3 阶段实验结果与预测曲线对比图
Fig. 8 Comparison of test data and predict curves of the third stage

4 结 论

本文通过完成 EPDM 材料的热重分析、保温碳化和准静态压缩等实验,对保温热解后材料的力学行为进行了研究,得到如下结论:

1) EPDM 材料的热降解过程主要发生在热解温度为 200~500℃之间,然而当热解温度高于 350℃时,材料基本不具备稳定的抗压性能。

2) 从原始材料至 350℃保温热解后的 EPDM 材料,其应力应变曲线随着热解温度的升高呈先降低再升高后减小的趋势,并可以明显分为 20~200℃,225~275℃,300℃及以上 3 个阶段。前两个阶段材料黏超弹特性显著,第 3 阶段材料转为弹脆性材料。

3) 本文所建立的本构模型(式(2)与式(4))能很好地描述材料在不同温度热解后的力学行为,且拟合精度非常高。

参考文献:

[1] 杨飒,何国强,李江,等.炭化层疏松/致密结构的三元乙丙烧蚀模型[J].航空动力学报,2012,27(5):1172-1178.
YANG Sa, HE Guoqiang, LI Jiang, et al. EPDM ablation model considering of porous/compact structure of charring layer[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1172-1178. (in Chinese)

[2] Song B, Chen W. One-dimensional dynamic compressive behavior of EPDM rubber[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2003, 125(3): 294-301.

[3] Jiang Y, Zhang X, He J, et al. Effect of polyphenylsilsesquioxane on the ablative and flame-retardation properties of ethylene propylene diene monomer (EPDM) composite[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(5): 949-954.

[4] Dubey R, Chawla M, Siril P F, et al. Bi-metallic nanocomposites of Mn with very high catalytic activity for burning rate enhancement of composite solid propellants[J]. Thermochimica Acta, 2013, 572(43): 30-38.

[5] 张涛,孙冰.固体火箭发动机绝热层温度场的有限元计算方法[J].航空动力学报,2009,24(6):1407-1412.
ZHANG Tao, SUN Bing. Numerical computation of solid rocket motor insulation layer temperature by finite element method[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1407-1412. (in Chinese)

[6] Kokan T S, Olds J R, Seitzman J M, et al. Characterizing high-energy-density propellants for space propulsion applications[J]. Acta Astronautica, 2009, 65(7): 967-986.

[7] Natali M, Rallini M, Puglia D, et al. EPDM based heat shielding materials for solid rocket motors: a comparative study of different fibrous reinforcements[J]. Polymer Degradation and Stability, 2013, 98(11): 2131-2139.

[8] 刘洋,李江,何国强,等.颗粒冲刷条件下三元乙丙绝热材

料烧蚀特性实验[J].推进技术,2010,31(5):612-617.

LIU Yang, LI Jiang, HE Guoqiang, et al. Experiment on ablation characteristic of EPDM insulator under particles erosion condition[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(5): 612-617. (in Chinese)

- [9] Jovanović V, Samaržija-Jovanović S, Budinski-Simendić J, et al. Composites based on carbon black reinforced NBR/EPDM rubber blends[J]. Composites, Part B Engineering, 2013, 45(1): 333-340.
- [10] 朱艳峰,刘锋,黄小清,等.橡胶材料的本构模型[J].橡胶工业,2006,53(2):119-125.
ZHU Yanfeng, LIU Feng, HUANG Xiaoping, et al. The constitutive model of rubber material[J]. China Rubber Industry, 2006, 53(2): 119-125. (in Chinese)
- [11] 杨性坤,胡付欣.氯丁橡胶接枝甲基丙烯酸丁酯的热降解动力学[J].合成橡胶工业,2008,30(5):343-347.
YANG Xingkun, HU Fuxin. Thermal degradation kinetics of chloroprene rubber grafting butyl methacrylate[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2008, 30(5): 343-347. (in Chinese)
- [12] 卢子兴,严寒冰,王建华.聚氨酯复合泡沫塑料的准静态压缩力学性能[J].中国塑料,2004,18(3):31-34.
LU Zixing, YAN Hanbing, WANG Jianhua. Mechanical properties of polyurethane syntactic foams under quasi-static compression[J]. China Plastics, 2004, 18(3): 31-34. (in Chinese)
- [13] 庞宝君,杨震琦,王立闻,等.橡胶材料的动态压缩性能及其应变率相关的本构模型[J].高压物理学报,2011,25(5):407-415.
PANG Baojun, YANG Zhenqi, WANG Liwen, et al. Dynamic compression properties and constitutive model with strain rate effect of rubber material[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(5): 407-415. (in Chinese)
- [14] 蒋晶,许进升,陈雄,等. WJ9 发动机涡轮转子叶片包容性研究[C]//中国航空学会(直升机)第3届动力与传动学术讨论会论文集.北京:中国航空学会,2000:76-81.
- [15] 李晓芳,杨晓翔.橡胶材料的超弹性本构模型[J].弹性体,2005,15(1):50-58.
LI Xiaofang, YANG Xiaoxiang. A review of elastic constitutive model for rubber materials[J]. China Elastomerics, 2005, 15(1): 50-58. (in Chinese)
- [16] 龚科家,危银涛,叶进雄.填充橡胶超弹性本构参数试验与应用[J].工程力学,2009,26(6):193-198.
GONG Kejia, WEI Yintao, YE Jinxiong. Constitutive parametric experiment of tire rubber hyperelastic laws with application[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 193-198. (in Chinese)
- [17] Wang X, Huang C, Zou B, et al. Dynamic behavior and a modified Johnson-Cook constitutive model of inconel 718 at high strain rate and elevated temperature[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 580(37): 385-390.
- [18] 梁兴文,叶艳霞.混凝土结构非线性分析[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.