

基体特性对 HTPB 推进剂力学性能的影响

韩 龙, 许进升, 周长省

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 按工程生产工艺要求, 制得 hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) 固化胶片, 通过控制试验环境温度 (-50 、 -35 、 -20 、 0 、 20 、 35 $^{\circ}\text{C}$), 得到了基于 Prony 级数形式的具有不同松弛特性的复合基体材料的松弛行为描述, 为细观模型的建立提供了必要参数。随后基于分子动力学方法, 结合具有内聚本构的黏接单元, 建立了推进剂的细观计算模型。为验证所建数值模型的准确性, 对固体推进剂在常温条件下进行宏观松弛力学试验, 将仿真结果与试验数值的对比, 试验结果与仿真结果相差在 20% 范围之内。最后对具有不同随机分布及不同基体松弛特性的推进剂细观模型进行有限元计算, 结果表明: 颗粒随机性不影响推进剂的宏观力学行为, 而基体松弛特性显著影响固体推进剂的宏观力学性能, 基体松弛特性获取环境温度与推进剂的宏观初始模量、延伸率以及强度均呈指数型关系。

关 键 词: 复合固体推进剂; 黏弹性; 细观模型; 分子动力学方法; 黏接单元; 松弛特性

中图分类号: V512⁺.3

文献标志码: A

Effect of matrix material properties on the mechanical behavior of HTPB composite propellant

HAN Long, XU Jinsheng, ZHOU Changsheng

(School of Mechanical Engineering,

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

Abstract: The matrix material of hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) composite propellant was manufactured according to the requirement of production process. To obtain the matrix material with different relaxation characteristics, the relaxation tests of material specimens were conducted under different temperatures (-50 , -35 , -20 , 0 , 20 , 35 $^{\circ}\text{C}$), and the test results were fitted by Prony series. The experimental results provided necessary parameters for the follow-up simulation calculation. Then the meso-scale model of the composite propellant was generated by combining molecular dynamics method with cohesive element. To verify the applicability of the random packing numerical model, the relaxation tests of HTPB propellant were conducted under room temperature. The simulation results agreed well with the real relaxation tests and the error between the two curves was less than 20%. This shows that the developed meso-scale numerical model is capable of reflecting the mechanical behavior of HTPB propellant. Finally, the numerical simulation of HTPB propellant with different random spatial distributions and matrix material properties was con-

收稿日期: 2016-02-28

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20140772); 中央高校基本科研业务费专项资金(30915011301)

作者简介: 韩龙(1988—), 男, 博士生, 主要从事固体火箭发动机装药结构完整性分析的研究。

引用格式: 韩龙, 许进升, 周长省. 基体特性对 HTPB 推进剂力学性能的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(10): 2553-2560. HAN Long, XU Jinsheng, ZHOU Changsheng. Effect of matrix material properties on the mechanical behavior of HTPB composite propellant[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2553-2560.

ducted on the Abaqus program. The results show that the random distribution of particles does not affect the macroscopic mechanical properties of HTPB propellant. However, the matrix properties have a significant impact on macroscopic mechanical behavior of HTPB propellant, and the relationship between macroscopic mechanical parameters (initial modules, elongation and strength) and the environment temperatures of binder follows the rule of exponential equation.

Key words: composite propellant; viscoelastic; mesomechanics model; molecular dynamics method; cohesive element; relaxation characteristic

复合固体推进剂作为一种以高分子黏合剂体系为基且具有特定性能的复合含能材料,是固体火箭发动机的动力供给者,同时也是保障以固体火箭发动机为动力装置的各类飞行器(火箭类武器,运载器等)的机动性能及作战能力的重要决定因素。

复合固体推进剂一般通过特定的装药方式装填于火箭发动机之内,由于在制造、贮存以及使用过程中,推进剂会承受各类外界载荷作用,为了保证装药结构的完整性,有必要对复合固体推进剂的力学性能进行研究。

目前对于复合固体推进剂力学性能的研究,按研究尺度主要微观、细观及宏观研究。微观研究由于受限于试验设备及方法,其应用尚未得到大量推广。而宏观研究方法一般都从唯象学方法出发,以刻画宏观力学表象为目的,通过引入适当的损伤及软化因子来描述复合固体推进剂的宏观力学行为,但是复合推进剂在细观构成上为复杂的多相机械混合体系,各相间界面分明,具有细观尺度上的非均质性,通过宏观研究方法难以考虑到细观结构因素对材料宏观力学行为的影响,所以有必要从细观角度出发,通过建立相应的细观数值模型来研究复合固体推进剂细观结构与宏观力学行为之间的联系。另外,在工程固体火箭发动机的设计中,首先需根据飞行器总体设计要求,预先选定能够满足能量及力学性能要求的复合推进剂及相应的装药方式,然后根据飞行器期望工作环境中所涉及到的典型载荷情况对发动机的装药结构完整性进行分析,如果未能达到设计需求,则只能返回修改或更改推进剂配方,由于推进剂的配方及装药调整与火箭发动机的设计为并列进行,且存在相互依赖及制约关系,推进剂配方不断修改完善的过程中,会牵一发而动全身,造成设计方案的重新调整,对整个发动机的研制工作带来极大的人力及物力消耗。而通过对复合固体推进

剂细观尺度的数值仿真研究,可以获取材料的有效性能预测,从而大大减少试验耗资和整体设计周期,提高了研制工作的时效性。

复合固体推进剂为了提高能量密度,通常会采用较大的颗粒填充系数,这导致发展较为成熟的早期细观力学方法,如等效夹杂理论^[1-2],自治法^[3-4]以及 Mori-Tanaka 方法^[5-6]已不能满足当前推进剂的研究需求。计算细观力学方法是依靠计算机技术的发展而逐步建立起来的研究材料细观力学行为的一种有效手段,目前发展较为迅速。Buryachenko^[7]建立了双峰分布的推进剂随机填充模型,并将其视为线弹性复合材料,对其有效弹性模型进行了预测。Ingilis 等^[8-9]结合均匀化数学理论及有限元方法,对颗粒填充材料的细观力学行为及其对材料宏观力学性能的影响进行了研究。李高春等^[10]结合细观填充模型及双线性黏接界面单元对复合固体推进剂的界面脱粘进行了仿真研究。常武军^[11]通过顺序算法生成复合固体推进剂的细观模型,并对推进剂在载荷作用下的细观损伤演化进行了研究。职世君等^[12-13]基于分子动力学算法建立了复合固体推进剂的细观填充模型,结合黏接接触计算模拟出了推进剂的细观损伤形貌,并对推进剂的导热系数进行了预测。张建伟等^[14]结合分子动力学及有限元均匀化方法对复合固体推进剂的松弛模量进行了预测。

上述文献研究主要集中于复合固体推进剂细观界面及颗粒分布对推进剂力学行为的影响,而复合固体推进剂基体材料也是影响其力学性能的重要因素,目前针对基体材料特性对推进剂力学行为影响的研究较少。本文通过建立复合固体推进剂的细观模型,并赋予基体材料不同的松弛属性,来研究基体材料力学行为与推进剂宏观力学响应之间的联系。本文的研究内容对复合固体推进剂的配方及固体火箭发动机的设计具有一定指导意义。

1 复合固体推进剂基体材料制备及力学参数获取

为了获取 HTPB 固体推进剂基体的力学性能,首先应根据生产工艺要求制备出相应的基体材料,进而通过力学试验来确定材料的力学参数。

1.1 HTPB 基体材料试件制备

依据工程实际中端羟基聚丁二烯黏合剂体系的制备工艺,搭建出的复合固体推进剂基体固化胶片制备装置由自动搅拌装置、压力显示计、电动抽气泵、真空干燥保温箱、数字化显示恒温水浴箱以及三颈圆底烧瓶所构成,如图 1 所示。

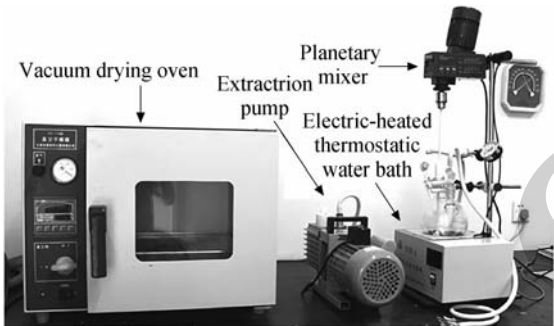


图 1 HTPB 胶片制作设备

Fig.1 Equipment for material processing of HTPB binder

固化胶片的制作原料主要为端羟基聚丁二烯 (HTPB)及固化剂异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI),两者混合比例为 92.9% : 7.1%(以质量计算)。固化参数为 $R(-NCO/-OH) = 1.05$ 。根据制定的混合比例,通过精确称重后,按照预定流程进行试件材料的制备:

- 1) 将 HTPB 及 IPDI 置于容器中进行初步混合,然后放置在 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的水浴箱内水浴 30 min,其间电子抽气泵及行星搅拌机始终保持工作状态。
- 2) 在预先准备的模具的表面涂上硅橡胶,将已制出的混合物浇筑至模具内,放入真空干燥保温箱内,温度设置为 70°C ,静置固化 7 天后,置于常温环境下再固化 7 天。
- 3) 取出固化胶片,平铺至干净的试验平台之上,通过定制尺寸的钢制哑铃刀,从胶片板材上切出所需尺寸的试件即可,具体尺寸如图 2 所示。

1.2 HTPB 基体材料应力松弛试验

HTPB 基体是一种黏弹性材料,松弛模量是衡量其力学性能的重要参量,通过指定应变水平下的单轴应力松弛实验,可有效获取材料的力学

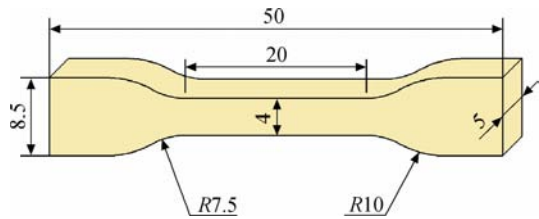


图 2 HTPB 固化胶片试件尺寸(单位:mm)

Fig.2 Size of test sample of HTPB binder (unit:mm)

松弛行为描述。另外,为了研究 HTPB 复合固体推进剂基体材料对其宏观力学行为的影响,需要考虑具有不同松弛特性的基体材料,为了排除材料制作过程中出现的配方差异导致的材料力学行为不一致以及后续验证实验的可行性,可以简单的选取制备出的同一批基体材料试件,通过改变试验环境温度来改变其松弛行为,从而得到具有不同松弛行为的基体材料。

HTPB 基体材料的松弛试验,按照国军标关于复合推进剂松弛试验的要求及操作规程,在微电脑控制万能材料试验机上进行。试验准备阶段,将胶片试件置于保温箱内,在相应试验温度下保温 2 h,以保证试件内外温度的一致性,本文选定 6 个温度点作为基体松弛试验温度,分别为: -50 、 -35 、 -20 、 0 、 20 、 35°C 。材料试件在预定试验环境下,以 100 mm/min 的拉伸速率拉伸至 50%应变水平后,保持位移 1800 s,记录下该时间段试件力载荷的变化。单个工况下保证 5 组有效数据的获取,最终结果为 5 组数据的平均数值。图 3 给出来了不同温度下,HTPB 复合固体推进剂基体材料的应力松弛试验结果,从图中可以看出,基体材料的松弛性能具有明显的温度相关性,且环境温度越高,松弛模量数值越小,温度越低,

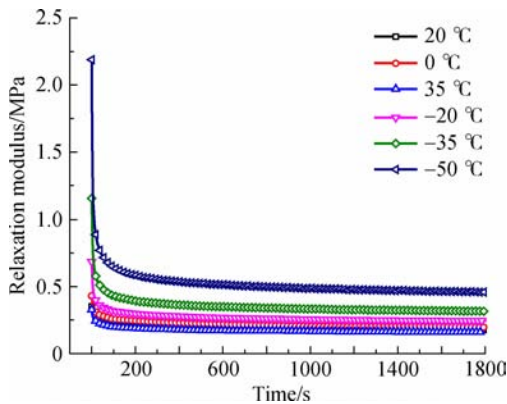


图 3 不同温度下 HTPB 胶片松弛试验结果

Fig.3 Relaxation tests of HTPB binder under different temperatures

对应的材料松弛模量数值越高。

对于松弛试验结果,通过 Prony 级数形式拟合,得到不同温度下 HTPB 基体材料的松弛行为描述,为后续复合固体推进剂细观模型的建模及计算提供必要参数。具体拟合表达式为

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (1)$$

式中 E_{∞} 为平衡模量; E_i 、 τ_i 分别为第 i 个 Maxwell 单元的模量及松弛时间。

2 复合固体推进剂细观模型的建立

为了从细观尺度研究复合固体推进剂的力学行为,需首先建立起可以反映推进剂真实构成的颗粒堆积分析模型。本文选用分子动力学方法来生成复合固体推进剂的细观结构,并结合可有效描述颗粒与基体黏接性能的黏接单元(cohesive element)来建立复合固体推进剂的最终数值模型。

2.1 HTPB 复合固体推进剂组分力学属性

HTPB 复合固体推进剂是一种主要由粘合剂体系及颗粒填充料所构成的具有黏弹性的多相复合材料,其中填充颗粒主要为高氯酸铵(AP)颗粒。根据文献[15]中所给出的依据真实试验获取到体积分数为 76% 的复合固体推进剂内 AP 颗粒的尺寸分布情况,可计算出相应颗粒尺寸的数量分数,进而可用于复合固体推进剂细观结构的分子动力学方法建模,如图 4 所示。

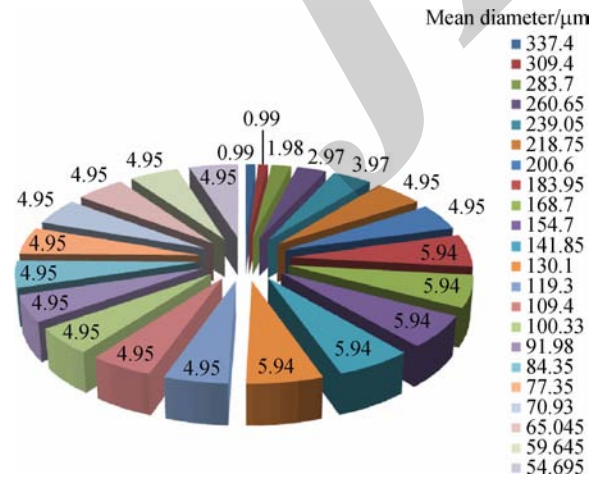


图 4 复合固体推进剂填充颗粒尺寸分布

Fig. 4 Particle size distribution of composite propellant

由文献[16]可知,可将 AP 颗粒视为弹性体,其力学参数分别为:弹性模量为 32 447 MPa,泊松比 0.1433。基体材料的力学属性可由文中第 1.2

节中材料的应力松弛试验得到。

2.2 颗粒填充模型

对于颗粒填充复合材料,目前已有多种算法来数值化生成可近似描述真实材料细观结构的随机填充模型,大体可分为两类:连续算法和并列算法。

连续算法的主要思想在于:计算域内的颗粒为多次逐个投入,投入的颗粒依靠指定规则(如重力作用)来达到最终的平衡状态。而并列算法与连续算法最大的不同之处在于颗粒的投放次序,并列算法在初时刻所有颗粒的投放都是同时进行的,颗粒投放至计算域后,再按照预定规则,对颗粒的空间位置进行调整,目前较为常用是分子动力学方法(molecular dynamics)^[17-18]。分子动力学方法的基本实现方式为:首先划分计算区域,给定边界,将零粒径的颗粒投放至计算域内,赋予每个颗粒随机的位置坐标及速度,且每个颗粒都有一个与其最终尺寸成比例的粒径增长率;随着颗粒在计算域内运动,增长并相互碰撞,计算域内颗粒体积分数不断增长,直至满足预定的体积分数或计算域内已无空间容纳颗粒的运动时,算法终止,得到最终的材料颗粒填充模型。

本文基于上述分子动力学算法,并结合图 4 给出的颗粒尺寸分布,通过 Fortran 程序编制来实现 HTPB 复合固体推进剂细观模型的建立。由于推进剂颗粒填充系数较高,通过算法所生成的细观模型中,相邻颗粒之间的距离过于紧密,甚至会出现相互接触的情况,这对于后期有限元网格划分及仿真计算会带来一定的不便及不可预知的问题。为了解决该问题,可在算法初始赋予颗粒尺寸数值时,临时调高各颗粒的粒径大小,即暂时增大颗粒填充分数,在算法结束后,将所有颗粒调回至预定尺寸,从而保证相邻颗粒之间存在合理的间隙,以便于复合固体推进剂有限元模型的建立。

为了考虑细观模型中颗粒随机性对复合固体推进剂宏观力学行为的影响,运用分子动力学算法对颗粒填充分数为 76% 的推进剂细观结构进行 4 次建模,模型结果如图 5 所示。

从生成的复合固体推进剂的细观模型中可以看出,颗粒在基体内随机均匀分布,颗粒排布有致,小颗粒嵌布于大颗粒之间,与真实复合固体推进剂的细观构成较为一致。

2.3 黏接界面模型

复合固体推进剂是由黏合剂体系及填充颗粒

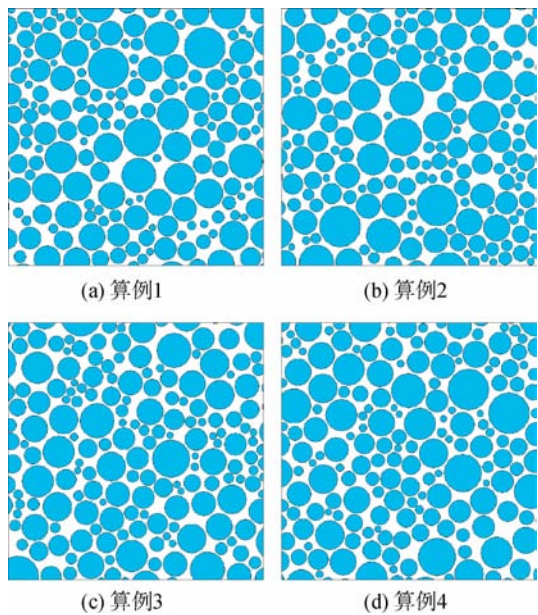


图 5 具有不同颗粒随机分布性的复合固体推进剂
细观模型

Fig. 5 Random packing model of composite propellant
with different particle spatial distribution

经混合固化而形成的多相复合材料,在其生产制造过程中,颗粒与基体间会形成具有一定黏附能力的界面层,推进剂固相颗粒与基体间的载荷传递皆是经由界面层实现,所以界面层是影响复合固体推进剂力学行为的重要因素之一。

为了较好的描述颗粒与基体间界面层的力学行为,本文采用具有指数型内聚本构的黏接单元来实现,该模型能够有效地模拟材料的损伤萌生及扩展过程。

内聚力模型认为材料在载荷作用下,界面会历经一个应力迅速上升,随后损伤软化,最终破坏失效的过程。具体而言,即是界面在承载初期,界面性能完好,界面应力随张开位移迅速上升,直至张开位移触及临界位移数值后,界面内损伤萌生,承载能力随之变弱,界面应力逐步降低,随着张开位移达到失效位移后,界面不再具备承载能力,成为自由面。指数型内聚力模型的本构关系由下式给出:

$$\begin{cases} T_n = \frac{\phi_n}{\delta_n} \cdot \frac{\Delta_n}{\delta_n} \exp\left(-\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right) \exp\left(-\frac{\Delta_t^2}{\delta_t^2}\right) \\ T_t = 2 \frac{\phi_t}{\delta_t} \cdot \frac{\Delta_t}{\delta_t} \left(1 + \frac{\Delta_n}{\delta_n}\right) \exp\left(-\frac{\Delta_n}{\delta_n}\right) \exp\left(-\frac{\Delta_t^2}{\delta_t^2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中角标 n、t 分别代表法向及切向参数; Δ 为张开位移; T 则为界面牵引力; $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ 分别定义法、

切向界面强度; δ^0 为临界位移; D 为损伤参量; ϕ 为断裂能。断裂能与界面强度之间存在如下关系:

$$\begin{cases} \phi_n = \sigma_{\max} \delta_n e \\ \phi_t = \tau_{\max} \delta_t \sqrt{e/2} \end{cases} \quad (3)$$

由于 Abaqus 中未能涵盖指数型内聚力模型,所以须将模型本构关系通过 Fortran 语言编制以 UMAT 子程序的形式导入至数值计算中。另外,细观界面参数是决定界面力学性能的决定性数据,但目前对于界面参数的获取还存在较大的困难,通过试验手段直接获取难以实现。现阶段细观参数的获取主要源自宏观试验数据及经验性估算。根据文献[13]所提供的界面参数估值,通过多次数值计算并优化后,本文界面强度取为 0.612 MPa 区间内,失效位移取 0.169 mm。

3 计算结果与验证

按照前述模型建立方法得到复合固体推进剂的细观有限元计算模型之后,便可依据研究需求对模型进行数值计算,本文的有限元计算均是在 Abaqus 有限元软件平台上实现。首先通过真实试验结果与数值计算结果的对比来验证所建立细观数值模型的准确性。随后为了研究基体特性对 HTPB 复合固体推进剂力学行为的影响,并考虑到填充颗粒的分布随机性,对具有相同力学属性材料组分的 4 个不同细观模型进行计算,以得到颗粒分布随机性对复合固体推进剂宏观力学行为的影响;最后通过改变单一细观模型中基体材料的力学属性,来寻求出基体材料特性与推进剂宏观力学行为之间的有效关系。

3.1 数值模型验证

为了验证所建立细观数值模型的准确性,选用具有相同配比的真实复合固体推进剂试件在常温下的宏观松弛试验来验证。图 6 给出了试验结果与仿真结果的对比图。从图中可以看出,数值结果与实际试验结果较为一致,仿真结果数值要高于试验结果,但整体趋势基本吻合。对于曲线差距导致的原因,本文认为主要在于以下几点:

1) 本文建立的复合固体推进剂的数值模型为二维层面,与实际复合固体推进剂的三维结构应力状态存在一定异同,但由于目前三维模型的建立及计算存在诸多困难,特别是三维球形颗粒与基体间的黏接模拟较难收敛,且三维模型对硬件要求极高,而二维简化模型能够在一定程度上较好的反应出固体推进剂的宏观力学行为,所以

目前针对固体推进剂的细观数值研究均是在二维层面上进行。

2) 本文建立的细观模型中,初始无载阶段颗粒与基体间均黏接完好,而实际固体推进剂在制造中会因生产工艺导致推进剂存在颗粒破碎,空穴及黏结剂包裹不全的初始缺陷,从而导致实际推进剂的初始刚度要比不含缺陷完美黏接的推进剂低。

3) 本文所建立的推进剂细观模型中,填充颗粒均为圆形颗粒,而在实际固体推进剂的构成中,除球形颗粒外,还存在一些异状颗粒,异状颗粒相对于规则形状的颗粒更容易发生脱黏现象,故而导致推进剂的力学性能出现一定程度的劣化。

上述问题也将是本文后期期望解决的具体研究方向。

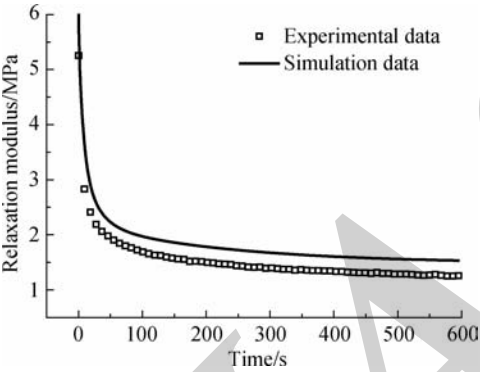


图 6 仿真松弛曲线与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between simulation result and experimental data

3.2 颗粒分布随机性对推进剂宏观力学行为的影响

基于图 5 中的 4 个具有不同颗粒随机分布性的复合固体推进剂细观模型,给定相同的组分及界面参数后,进行有限元计算,可以得到不同颗粒随机分布模型在 600s 内的松弛曲线计算结果,如图 7 所示。从图中可以看出,不同随机性的细观模型计算结果基本一致,无较大差别,说明颗粒分布的随机性不影响复合固体推进剂的宏观松弛行为。

3.3 不同基体材料特性对推进剂宏观力学行为的影响

为了研究基体特性对复合固体推进剂力学行为的影响,选用图 7 中的算例 1 模型,将基体胶片试验获取的不同松弛特性参数赋值给模型中的基体材料,保持其他组分及界面参数不变,对推进剂

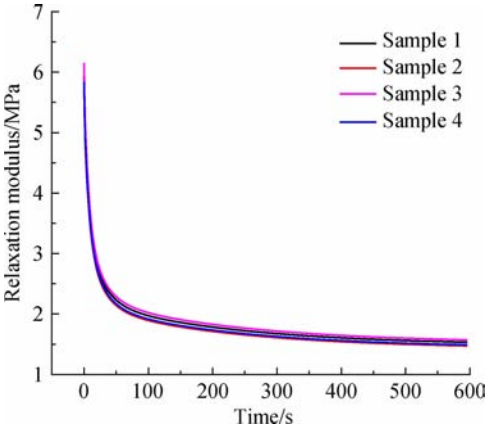


图 7 不同颗粒随机分布性细观模型数值计算结果
Fig. 7 Caculation results of composite propellant with different spatial distribution of particles

细观模型进行仿真计算,从而得到具有不同基体特性的复合固体推进剂的宏观应力应变曲线计算结果,如图 8(a)所示。

图 8(b)给出了不同基体材料下,复合固体推进剂仿真结果随基体特性的变化趋势,由于 HT-PB 基体固化胶片作为黏弹性材料,单一应变率下,温度是决定其黏弹特性的本质因素,基体松弛特性的改变主要源于其外界温度的异同,所以追根溯源,固体推进剂宏观力学行为与基体材料之间的关系可等效于其与所处环境温度之间的关系。图 8(b)及图 8(c)给出的为温度与固体推进剂宏观力学参数的关系。

图 8(b)和图 8(c)分别为复合固体推进剂初始模量、延伸率以及单轴拉伸强度与基体材料参数获取温度之间的关系。从图中可以看出,推进剂初始模量及拉伸强度随温度升高而降低,低温下,模量及强度随温度变化较大,随着温度的升高,模量及强度随温度的变化速度逐渐变小,整体变化趋势近似服从指数形式规律。另外,复合固体推进剂的延伸率随温度上升而增大,低温下延伸率数值上升较快,随着温度的升高,延伸率随温度的变化速度逐渐变小,整体变化趋势同样近似服从指数形式规律。通过指数函数分别对初始模量及延伸率与温度之间的关系进行拟合,拟合结果如图 8(b)及图 8(c)中所示。

为了验证上述关系的正确性,在-10℃下对 HTPB 固化胶片进行应力松弛试验,得到对应的松弛曲线及 Prony 级数描述后,代入至复合固体推进剂细观模型中进行数值计算,得到推进剂的初始模量、拉伸强度及延伸率数值,与基于所建立关系得到的数值进行比较,如表 1 所示,可以看

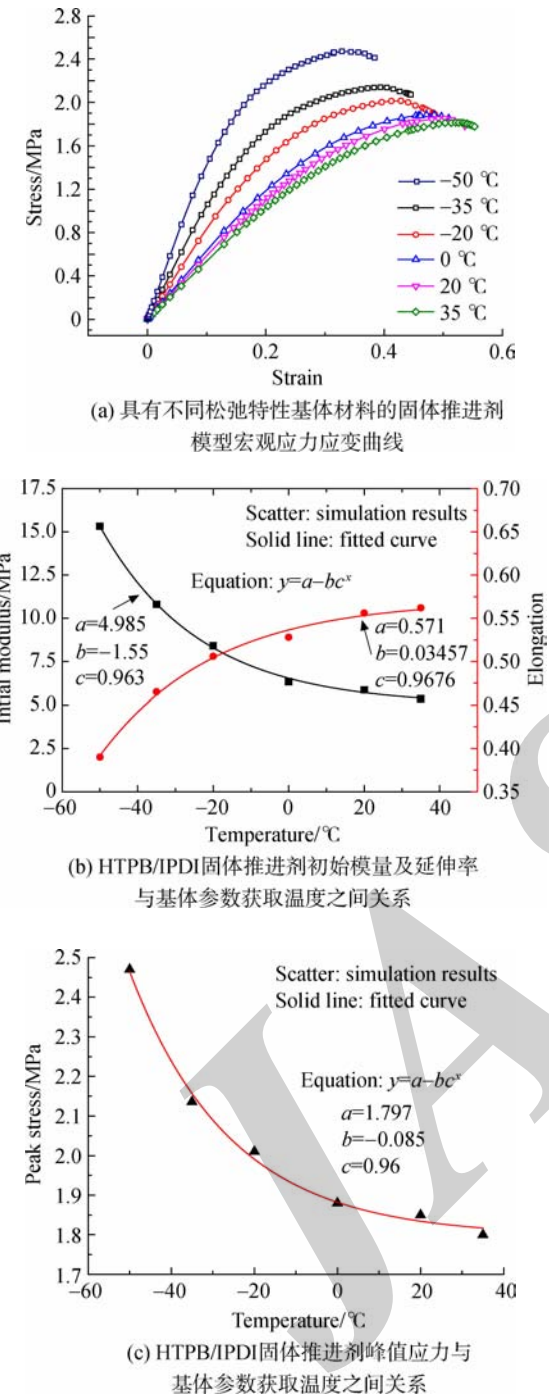


图 8 细观模型仿真结果及分析

Fig. 8 Simulation result of meso-numerical model and results analysis

表 1 模型预测值与实际数值计算结果比较

Table 1 Comparison between predicted value and calculated value

参数	初始模量/MPa	延伸率	峰值应力/MPa
预测值	7.24	0.523	1.926
计算值	6.93	0.547	1.895
误差/%	4.3	4.6	1.6

出,预测值与实际计算较为接近,说明所构建的模型能够较好的反映出推进剂的力学行为与其基体材料特性之间的有效关系。

4 结 论

本文基于分子动力学方法生成复合固体推进剂细观数值模型,结合不同温度下的 HTPB 基体固化胶片的应力松弛试验,对具有不同基体特性的固体推进剂模型进行仿真计算,得到如下结论:

- 1) 基于分子动力学方法,结合具有指数型内聚力本构的黏接单元所建立起的复合固体推进剂细观模型可以有效反映其宏观力学行为,并能够对其宏观松弛曲线进行预测。
- 2) 复合固体推进剂细观填充颗粒的空间分布随机性不影响其力学性能。复合固体推进剂基体材料特性显著影响其宏观力学性能,直接决定复合固体推进剂的宏观初始模量,且其初始模量及延伸率与基体参数获取温度之间关系均服从指数形式规律。通过指数函数可分别对初始模量及延伸率与温度之间的关系进行拟合,拟合所得模型能够较好的预测 -10 °C 温度下复合固体推进剂的宏观力学参量,说明本文建立的细观数值模型及关系描述可以有效体现出基体材料特性与复合固体推进剂宏观力学行为之间的关联关系。

参考文献:

[1] ZHOU K, HOH H J, WANG X, et al. A review of recent works on inclusions[J]. Mechanics of Materials, 2013, 60 (7):144-158.

[2] MOLNÁR G, BOJTÁR I. Effects of manufacturing inhomogeneities on strength properties of float glass[J]. Mechanics of Materials, 2013, 59(3):1-13.

[3] CLEARY M P, LEE S M, CHEN I W. Self-consistent techniques for heterogeneous media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 2015, 106(5):861-887.

[4] PENG X, HU N, LONG X, et al. Extension of combined self-consistent and Mori-Tanaka approach to evaluation of elastoplastic property of particulate composites[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2013, 26(1):71-82.

[5] LU P. Further studies on Mori-Tanaka models for thermal expansion coefficients of composites[J]. Polymer, 2013, 54 (6):1691-1699.

[6] MORTAZAVI B, BANIASSADI M, BARDON J, et al. Modeling of two-phase random composite materials by finite element, Mori-Tanaka and strong contrast methods [J]. Composites, Part B Engineering, 2013, 45 (1): 1117-1125.

[7] BURYACHENKO V A. Modeling of random bimodal

- structures of composites (application to solid propellants): II estimation of effective elastic moduli[J]. Computer Modeling in Engineering and Science, 2012, 85(5): 417-445.
- [8] INGLIS H M, GEUBELLE P H, MATOUŠ K, et al. Cohesive modeling of dewetting in particulate composites: micromechanics vs. multiscale finite element analysis[J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(6): 580-595.
- [9] INGLIS H M. Modeling the effect of debonding on the constitutive response of heterogeneous materials[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
- [10] 李高春, 邢耀国, 戢治洪, 等. 复合固体推进剂细观界面脱粘有限元分析[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 229-235.
LI Gaochun, XING Yaoguo, JI Zhihong. Finite element analysis of microscale interfacial debonding in composite solid propellants[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(3): 229-235. (in Chinese)
- [11] 常武军. 复合固体推进剂细观界面脱粘有限元分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
CHANG Wujun. Research on microstructural damage and its numerical simulation method for composite solid propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 职世君, 孙冰, 张建伟. 基于细观颗粒夹杂模型的固体推进剂导热系数预测[J]. 航空动力学报, 2013, 28(5): 1187-1191.
ZHI Shijun, SUN Bing, ZHANG Jianwei. Estimation of thermal conductivity of solid propellants based on particle packing model[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(5): 1187-1191. (in Chinese)
- [13] 职世君, 孙冰, 张建伟. 基于表面粘结损伤的复合固体推进剂细观损伤数值模拟[J]. 推进技术, 2013, 34(2): 273-279.
ZHI Shijun, SUN Bing, ZHANG Jianwei. Numerical simulation of solid propellant mesoscopic damage using surface-based cohesive approach[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 28(5): 1187-1191. (in Chinese)
- [14] 张建伟, 职世君, 孙冰. 基于细观颗粒夹杂模型的复合固体推进剂松弛模量预测[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10): 2370-2375.
ZHANG Jianwei, ZHI Shijun, SUN Bing. Estimation of relaxation modulus of composite solid propellant based on particle packing model[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10): 2370-2375. (in Chinese)
- [15] BUKMASTER J, JACKSON T L, ULRICH M. Numerical modeling of heterogeneous propellant combustion[R]. AIAA-2001-3579, 2001.
- [16] MATOUŠ K, GEUBELLE P H. Finite element formulation for modeling particle debonding in reinforced elastomers subjected to finite deformations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 196(2): 620-633.
- [17] 史佩, 李高春, 王玉峰, 等. 复合推进剂颗粒填充模型的分子动力学模拟方法[J]. 计算机与应用化学, 2007, 24(5): 665-668.
SHI Pei, LI Gaochun, WANG Yufeng, et al. Generation of composite propellant filler packing model by molecular dynamics method[J]. Computers and Applied Chemistry, 2007, 24(5): 665-668. (in Chinese)
- [18] JACKSON T L, STAFFORD D S. Random packs and their use in grain-scale modeling, with applications to energetic materials[J]. International Journal for Multiscale Computational Engineering, 2010, 8(5): 473-487.

(编辑: 叶 青)