

文章编号:1001-2486(2004)03-0007-04

点火瞬态过程对复合固体推进剂力学响应特性的影响*

钟涛,张为华,王中伟

(国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:根据一个有效的非线性粘弹模型,导出复合固体推进剂微分形式本构方程和应变速率关系式。分析表明点火瞬态过程中压强与推进剂应变、升压速率与推进剂应变速率之间呈线性关系,线性系数均为推进剂初始模量。

关键词:非线性粘弹性;点火瞬态过程;应变速率

中图分类号:V435 **文献标识码:**A

Influence of the Ignition Transient on the Mechanical Response of Composite Solid Propellants

ZHONG Tao, ZHANG Wei-hua, WANG Zhong-wei

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on an effective nonlinear viscoelastic model, the differential constitutive equation and strain-rate equation of solid composite propellants are induced. Pressure/strain and pressurization rate/strain rate are linear correlation during the ignition transient. And the coefficient is the initial modulus of composite solid propellants.

Key words: nonlinear viscoelasticity; ignition transient; strain rate

复合固体推进剂由氧化剂、燃料和粘合剂按一定比例混合而成,粘合剂为高交联度网状结构高分子材料,推进剂呈现非线性粘弹特性。固体推进剂结构分析一般采用 Maxwell 模型、Kelvin 模型以及它们的扩展或组合形式来表征其本构关系,如:MSC/NASTRAN 软件采用 Burgers 粘弹性模型。

固体火箭发动机点火过程属瞬态激励过程。推进剂在点火瞬态过程中,往往因点火冲击破坏推进剂结构导致产品试验失败,也可能使推进剂内微观缺陷增长,由于累积损伤导致工作过程中结构被破坏。在点火瞬态过程研究中,冲击载荷作用下的推进剂的非线性粘弹特性是一项重要内容。

高聚物的力学性质对应变速率十分敏感。根据双变量破坏准则,应变速率是判断材料破坏的一个重要参数^[1]。因此需探求具有普遍意义的非线性粘弹性模型,以便研究在点火瞬态冲击作用下复合固体推进剂应变及应变速率的有关性质。

1 物理和数学模型

1.1 非线性粘弹性本构模型

根据粘弹性材料在高低应变速率下的敏感性不同,唐志平等^[2]建议用具有两个松弛时间的 Maxwell 体描述粘弹特性,并在此基础上提出一种适用于冲击条件的非线性粘弹性模型,由两个 Maxwell 体和一个非线性弹簧并联组成,称为“朱—王—唐”模型(图 1),他们给出了积分形式的本构方程式(1)。此式反映出应变、应变率和应力三者之间的关系,其中,前三项与应变速率无关,表征非线性弹性响应;后两项积分则分别表示高低应变速率下的 Maxwell 粘弹响应。式中 7 个材料参量: E_0 、 E_1 、 E_2 、 α 、 β 、 θ_1 、 θ_2 的物理意义参见文献[2]。这些参量可由两组常规低应变率实验数据和两组 Hopkinson 杆高应变率

* 收稿日期:2004-01-20

基金项目:国家 863 高技术基金资助项目

作者简介:钟涛(1972—),男,博士生。

实验数据经最小二乘法拟合而得。上述模型也适用于分子链具有高交联度的网状结构高分子材料,如复合推进剂。

$$\sigma = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 + E_1 \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (1)$$

1.2 微分形式本构方程

(1)式包含了应变和应变速率,借助双变量破坏准则即可用来分析固体火箭发动机点火瞬态过程中推进剂的力学性质,考虑到工程应用中推进剂应变和应变速率难以观测,而压强—时间曲线容易测得,为便于从压强—时间曲线分析响应特性,本文分离出应变及应变速率,推导得到此模型微分形式的本构方程。如图1所示,有以下基本关系式:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_A \quad (2)$$

$$\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_A \quad (3)$$

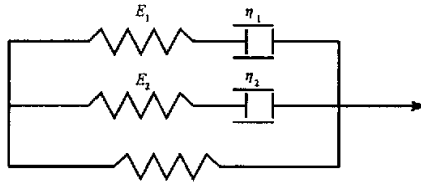


图1 朱—王—唐非线性粘弹性模型

Fig.1 Zhu-Wang-Tang's nonlinear viscoelastic model

下标 1、2、A 分别对应于 Maxwell 体 1、2 和非线性弹簧 A,下同。

对第一个 Maxwell 体,定义 ϵ' 为弹性应变, ϵ'' 为粘性应变,则有:

$$\sigma_1 = E_1 \epsilon' = \eta_1 \dot{\epsilon}'' \quad (4)$$

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' \quad (5)$$

对(4)、(5)式进行拉氏变换得:

$$\bar{\sigma}_1 = E_1 \bar{\epsilon}' = \eta_1 s \bar{\epsilon}'' \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}' + \bar{\epsilon}'' \quad (7)$$

联立(6)、(7)式:

$$\bar{\sigma}_1 = s E_1 \eta_1 \bar{\epsilon}_1 / (E_1 + \eta_1 s) \quad (8)$$

经拉氏反变换: $\sigma_1 = E_1 (1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}) \epsilon_1$ 。

令 $\theta_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$, 为第一个 Maxwell 体的松弛时间,则

$$\sigma_1 = E_1 (1 - e^{-\frac{t}{\theta_1}}) \epsilon_1 \quad (9)$$

同理,第二个 Maxwell 体有:

$$\sigma_2 = E_2 (1 - e^{-\frac{t}{\theta_2}}) \epsilon_2 \quad (10)$$

非线性弹簧 A 采用朱—王—唐模型提供的形式^[2]:

$$\sigma_A = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 \quad (11)$$

联立(2)、(3)、(9)、(10)、(11)式:

$$\sigma = (E_0 + E_1 + E_2 - E_1 e^{-\frac{t}{\theta_1}} - E_2 e^{-\frac{t}{\theta_2}}) \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 \quad (12)$$

上式虽无微分项,但采用微分形式推导,因而是微分形式的非线性粘弹性本构关系,具有和积分形式本构方程相同的 7 个参量,方程物理意义相同。数学表达式是三次多项式,一次项系数式中包含时间项,反映时间历程,表征其粘弹性响应。

1.3 应变速率关系式

对(12)式求导:

$$\dot{\sigma} = \left(\frac{E_1}{\theta_1} e^{-\frac{t}{\theta_1}} + \frac{E_2}{\theta_2} e^{-\frac{t}{\theta_2}} \right) \dot{\epsilon} + (E_0 + E_1 + E_2 - E_1 e^{-\frac{t}{\theta_1}} - E_2 e^{-\frac{t}{\theta_2}}) \epsilon + 2\alpha \epsilon \dot{\epsilon} + 3\beta \epsilon^2 \dot{\epsilon} \quad (13)$$

(13)式描述了应变、应变速率和加载速率的相互关系,也包含了载荷信息,但是比较复杂。

瞬态冲击条件下,由于载荷作用时间太短,认为没有产生应变,但具有应变速率^[3],即: $\epsilon = 0, \dot{\epsilon} \neq 0$,则(13)式简化为:

$$\dot{\sigma} = (E_0 + E_1 + E_2 - E_1 e^{-\frac{t}{\theta_1}} - E_2 e^{-\frac{t}{\theta_2}}) \dot{\epsilon} \quad (14)$$

此外,瞬态过程持续时间很短,约为 10^{-1} s量级,复合推进剂的松弛时间较长,如按文献[4]给定的松弛模量,其松弛时间为 $10^3 \sim 10^4$ s量级,故可认为: $t/\theta_i \approx 0 (i = 1, 2)$ 。

于是,(14)式进一步简化为:

$$\dot{\sigma} = E_0 \dot{\epsilon} \quad (15)$$

(15)式为非线性粘弹性体在瞬态冲击作用即加载速率高但应变量很小的条件下加载速率和应变速率间的相互关系,两者呈线性关系,线性系数为 E_0 ,即粘弹性体初始模量。

研究固体推进剂在点火瞬态过程中的力学响应特性时,先由点火瞬态过程的压强—时间曲线得到升压速率,进而求得加载速率,再用(15)式得到应变速率。

2 计算与分析

积分式(14),初始条件: $t = 0, \epsilon = 0, \sigma = 0$,得到:

$$\sigma = E_0 \epsilon \quad (16)$$

这表明在瞬态冲击条件下,非线性粘弹性材料的应变和应力关系服从虎克定律,比例系数为初始模量。文献[5]利用改进的Hopkinson杆测试结果,描述了复合固体推进剂在高应变速率情况下的非线性粘弹性本构关系,给出相同结论:在瞬态冲击条件下,应变和应力表现出明显的线性特征,这一特性称为“初始线弹性”。

文献[4]采用NASTRAN软件计算了点火过程中固体火箭发动机星型药柱危险点的应变状况,本文在此基础上采用中心差分求得应变速率,由升压方程求得升压速率,结果如表1所示。

表1 计算结果
Tab.1 Calculation results

时间(s)	应变	压强(MPa)	压强/应变 (MPa)	应变速率 (s ⁻¹)	升压速率 (MPa/s)	升压速率/应 变速率(MPa)
0.00	0.00	0.00			280	
0.01	0.0464	2.5378	54.7	4.2365	229.2446	54.1
0.02	0.08473	4.6155	54.5	3.455	187.6896	54.3
0.03	0.1155	6.3166	54.7	2.8235	153.6673	54.4
0.04	0.1412	7.7094	54.6	2.43	135.8121	55.9
0.05	0.1617	8.8497	54.7	1.925	103.0062	52.8
0.06	0.1797	9.7833	54.5	1.545	84.33438	54.6
0.07	0.1926	10.5476	54.8	1.285	69.04715	54.06
0.08	0.2054	11.1734	54.4	1.026	56.53102	55.1
0.09	0.21312	11.6858			46.28369	

分别计算各时间点对应的压强(相当于载荷)/应变比和升压速率(相当于加载速率)/应变速率比,比例系数曲线如图2所示。从图中不难看出 NASTRAN 计算结果和本文导出的结果几乎完全重合,相对误差小于5%。载荷与应变、加载速率与应变速率呈线性关系,且线性系数均等于推进剂的初始模量值。因此分析点火瞬态过程对发动机装药力学响应特性的影响时,直接采用这一结论和方法,能够得到与非线性粘弹性模型相一致的结论。

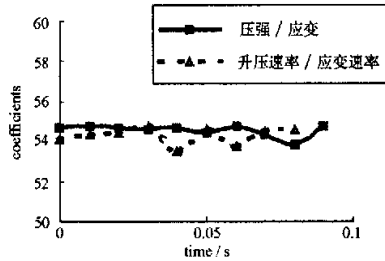


图2 比例系数曲线图

Fig.2 The curves of coefficients

3 结论

(1)基于“朱—王—唐”非线性粘弹性模型推导得到复合固体推进剂微分形式的非线性粘弹性本构方程式,与文献提供的积分形式的本构方程具有相同参数和物理意义。

(2)微分形式本构方程推导得到的应变速率关系式描述了加载速率与复合固体推进剂应变以及应变速率之间的相互关系。

(3)点火瞬态过程中,复合固体推进剂所受载荷与应变呈线性关系、加载速率与应变速率呈线性关系,线性系数均为推进剂初始模量。工程中利用这一关系可以简便地分析点火瞬态过程对推进剂力学响应特性的影响。

参考文献:

- [1] 周风华,王礼立,胡时胜. 有机玻璃在高应变速率下的损伤型非线性粘弹性本构关系及破坏准则[J]. 爆炸与冲击,1992,12(4).
- [2] 唐志平,田兰桥,朱兆祥,等. 高应变率下环氧树脂的力学性能研究[C]. 第二届全国爆炸力学会议文集,1981,4.
- [3] 贺兴书. 机械振动学[M]. 上海:上海交通大学出版社,1989.
- [4] 蒙上阳,唐国金,雷勇军,等. Burgers 模型的参数获取方法[J]. 固体火箭技术,2003,26(2).
- [5] Ho Sook-Ying. High Strain-rate Constitutive Models for Solid Rocket Propellants[J]. Journal of Propulsion and Power,2002,18(5).

