

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.017

气炮加载下 PBXs 替代材料中的应力波幅衰减特性

黄韬¹, 陈建康¹, 李克武², 赵峰², 白树林³

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江宁波 315211; 2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川绵阳 621900; 3. 北京大学工学院材料科学与工程系, 北京 100871)

摘要: 利用白糖、环氧树脂 E-51、乙二酸、增塑剂、固化促进剂等通过配方形形成的高聚物粘结炸药 (PBXs) 替代材料, 通过一级轻气炮实验, 研究了材料在一级轻气炮加载条件下的应力波传播特性, 研究发现应力波幅衰减服从指数衰减规律。计算出冲击波波速约为 1 500 m/s, 波长约为 1.5×10^{-3} m, 通过和白糖颗粒直径的比较分析了应力波幅衰减的机理主要来自于粘结剂的粘性和颗粒滑移与破碎的能量耗散。将 PBXs 替代材料处理为黏弹性材料, 利用 Maxwell 模型来表征材料在气炮加载下的应力应变关系, 并在此基础上研究了材料松弛时间特性。研究发现, 随着应变率的增加, PBXs 替代材料的松弛时间反而减少, 并且呈现出明显的幂率关系, 在准静态条件下的松弛时间的应变率相关性在气炮加载下依然存在, 从细观尺度下材料微结构运动特征给出了这种相关性的机理解释。

关键词: PBXs 替代材料; 气炮; 应力波; 衰减; 松弛时间; 率相关

中图分类号: O347.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)05-0081-04

Attenuation Characteristics of Stress Amplitude in PBXs Substitute Materials under Air Gun Loading

Huang Tao¹, Chen Jiankang¹, Li Kewu², Zhao Feng², Bai Shulin³

(1. The Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 3. Department of Materials Science and Engineering, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Polymer-bonded explosives (PBXs) substitution materials was prepared through the formulation of sugar, epoxy resin E-51, ethyl two acid, plasticizer, curing promoter, etc. Through the first stage light gas gun experiment, the material in the first stage of light gas gun loading conditions of stress wave propagation characteristics was studied. The results show that the stress amplitude attenuation obeys exponential attenuation law. It is calculated that the velocity of shock wave is about 1 500 m/s, the wavelength is about 1.5×10^{-3} m, and the mechanism of the attenuation of the stress amplitude is mainly from the viscosity of the binder and the energy dissipation of particle slippage and fragmentation. The PBXs replacement material was treated as viscoelastic material, and the stress-strain relationship of the material under the gas gun loading was characterized by the Maxwell model, and the relaxation time characteristics of the material were studied. The results show that with the increase of strain rate, the relaxation time of PBXs substitute material decrease, and the relationship of the strain rate of relaxation time under quasi static condition is still in the air gun loading, and the mechanism explanation of the correlation is given.

Keywords: PBXs substitute material; gas cannon; stress wave; attenuation; relaxation time; rate correlation

高聚物粘结炸药 (PBXs) 是以单质炸药为主体炸药, 加入粘结剂、增塑剂、钝感剂制备而成的颗粒复合材料^[1]。目前, 关于 PBXs 的力学性能已经有了广泛的研究^[2-5]。但是人们在气炮加载下对其应

力波衰减特性和松弛时间特性的研究鲜有报道, 应力波衰减特性说明材料具有明显的黏性效应, 而松弛时间是表征材料的特征时间, 是描述材料粘性效应的一个重要的力学指标。出于安全考虑, 学者研

基金项目: 国家自然科学基金委员会 - 中国工程物理研究院 “NSAF” 联合基金项目 (U13301002), 国家自然科学基金项目 (11472141)

通讯作者: 陈建康, 博士, 教授, 主要研究复合材料细观力学 E-mail: chenjiankang1957@163.com

收稿日期: 2018-03-08

引用格式: 黄韬, 陈建康, 李克武, 等. 气炮加载下 PBXs 替代材料中的应力波幅衰减特性 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(5): 81-84.

Huang Tao, Chen Jiankang, Li Kewu, et al. Attenuation characteristics of stress amplitude in PBXs substitute materials under air gun loading [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5): 81-84.

究 PBXs 通常是用其替代材料代替。例如, C. R. Siviour 等^[6]利用白糖作为含能颗粒替代材料,对两种混合材料的 PBXs 动态力学性能进行了研究,而 P. R. Laity 等^[7]同样利用白糖作为含能颗粒的替代材料,并通过分离式霍普金森 (SHPB) 压杆分析了 PBXs 在高应变率下的力学性能。

鉴于此,笔者利用白糖、环氧树脂 E-51、乙二酸、增塑剂等通过配方形成的 PBXs 替代材料,通过一级轻气炮实验^[8-12],研究了材料应力波幅衰减特性,并得出了材料在气炮加载下材料松弛时间与应变率的幂率关系。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂: E-51, 工业级, 上海奥电化工科技有限责任公司;

乙二酸: 工业级, 天津市福晨化学试剂厂;

501[#] 活性稀释剂: 工业级, 郑州阡陌贸易有限公司;

增塑剂: 工业级, 深圳市金腾龙实业有限公司;

固化促进剂: 工业级, 汉高乐泰中国有限公司。

1.2 主要设备及仪器

万能试验机: MTS-810 型, 美国 MTS 系统公司。

1.3 试样制备

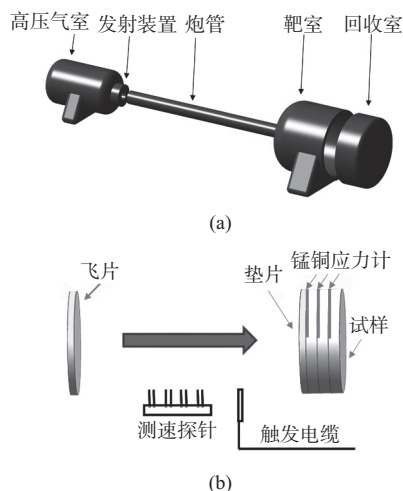
试样由白糖颗粒和粘结剂按质量比为 92 : 8 的比例混合而成, 混合后的粉末在万能试验机下压制成型。其中粘结剂主要成分是环氧树脂 E-51 与乙二酸。根据参考文献 [13], 粘结剂 SWJ-9301 胶配方为: 环氧树脂 E-51 100 份, 乙二酸 40 份, 501[#] 活性稀释剂 20 份, 增塑剂 10 份, 固化促进剂 2 份。压制好的试样见图 1, 试样尺寸为 $\varnothing 46 \times 5$ mm。



图 1 用于气炮实验的试样

1.4 一级轻气炮实验

实验在宁波大学气炮实验室的一级轻气炮上完成。炮的主体部分由发射管、高压气室和靶室组成, 其中气炮口径 57 mm, 炮管长为 4 m, 弹速范围: 40 ~ 350 m/s, 碰撞平面度为 $\leq 10^{-3}$ rad, 真空度为 -0.1 MPa。实验装置原理图如图 2 所示, 飞片材料用的是铝。



a——一级轻气炮结构示意图; b——冲击示意图

图 2 实验装置原理图

2 结果与讨论

分别在 260.97 m/s, 211.90 m/s, 198.12 m/s 速度下进行动态冲击实验, 以 260.97 m/s 速度下应力-时间曲线进行分析, 见图 3。

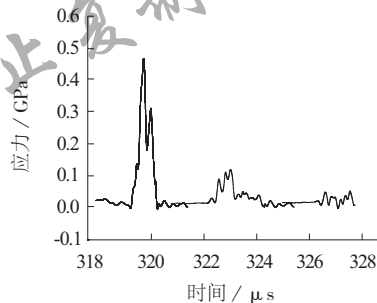


图 3 260.97 m/s 下应力-时间曲线

图 3 表明应力波在 PBXs 替代材料中传播时伴随着波幅的衰减。这表明了应力波在传播过程中有能量耗散。这种能量耗散可能来自三个方面: 1) 粘结剂的粘性耗散; 2) 颗粒的滑移与破碎的能量耗散; 3) 颗粒对应力波的散射。通过对图 3 进行估算, 冲击波的波速大约为 1500 m/s, 波长约为 1.5×10^{-3} m。而白糖颗粒直径约为 $(2 \sim 30) \times 10^{-5}$ m。因此波长大于颗粒尺寸 1 ~ 2 数量级。因此, 第 3 种的颗粒散射耗散可以忽略不计。为简化分析, 将粘结剂的粘性耗散和颗粒滑移与破碎的能量均归结为复合材料的宏观粘性耗散, 这样就可以把材料看作黏弹性材料。

根据黏弹性理论^[14-15], 黏弹性波在传播过程中的波幅衰减应服从指数衰减规律, 即:

$$A = A_0 e^{-bx} \quad (1)$$

式中 A 表示波幅, A_0 表示初始位置 ($X=0$) 时的波幅, b 表示衰减系数。

首波波幅随位置而衰减的情况绘于图 4。图 4 中显示波峰单调衰减。用 (1) 式对实验数据进行拟合,发现结果比较好地服从指数衰减规律。这也表明,可以将材料近似地处理为黏弹性材料。表 2 为波幅衰减拟合参数。

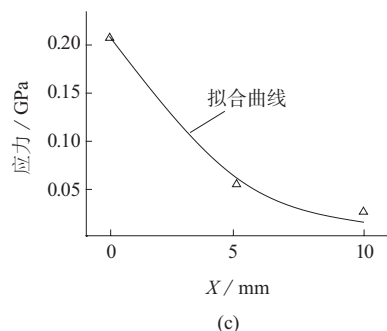
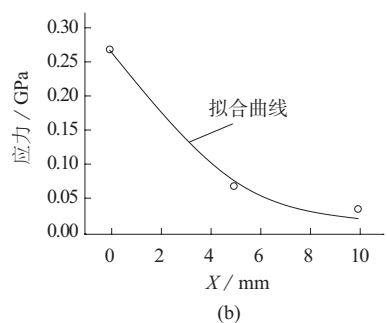
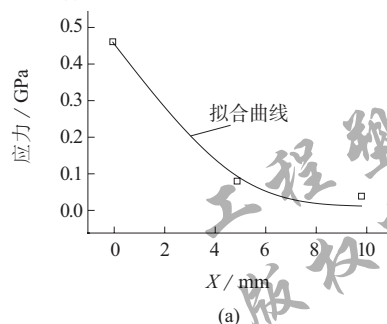
表 2 波幅衰减拟合参数

速度 / (m · s ⁻¹)	波幅 / GPa	衰减系数
260.97	0.446 7	0.300 3
211.90	0.270 4	0.246 1
198.12	0.207 8	0.231 8

对于一般黏弹性的本构关系,可以表示为如下的单积分形式,

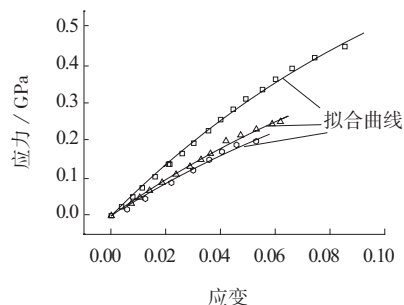
$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t Y(t-\tau) \dot{\varepsilon}(\tau) d(\tau) \quad (2)$$

其中, $Y(t)$ 为松弛柔量, σ 为应力, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, τ 为松弛时间。为方便分析,选用 Maxwell 模型来描述这一变形过程。应力应变拟合结果如图 5 所示,拟合参数的参数见表 3。



冲击速度: a—260.97 m/s; b—211.90 m/s; c—198.12 m/s

图 4 首波波幅随位置而衰减的拟合曲线



□— $1.8 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$; △— $0.62 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$; ○— $0.52 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$

图 5 不同应变率下应力-应变拟合曲线

表 3 应力应变拟合参数

应变率 / s ⁻¹	松弛时间 / s	拟合度
0.520×10^5	2.500×10^{-6}	0.984 3
0.620×10^5	2.110×10^{-6}	0.995 5
1.800×10^5	0.717×10^{-6}	0.997 1

对应变率与松弛时间之间的关系用幂律函数表征,关系式如下,

$$\tau = \tau_0 (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}^*)^{-a} \quad (3)$$

其中, $\dot{\varepsilon}^*$ 为参考应变率值,这里取 $\dot{\varepsilon}^* = 1 \text{ s}^{-1}$ 。 τ_0 为当 $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^* = 1 \text{ s}^{-1}$ 时的材料松弛时间。通过对图 5 的实验结果进行曲线拟合可以得到: $\tau_0 = 0.1105 \text{ s}$, $a = 0.985$ 。可以得到在气炮加载下材料的松弛时间和应变率的关系如图 6 所示。

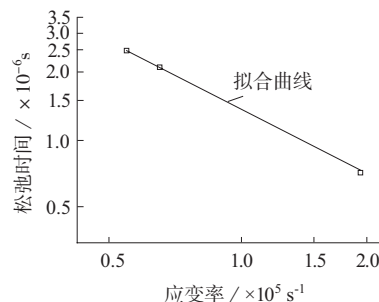


图 6 应变率和松弛时间关系

需要说明的是,松弛时间不是常数,而随应变率的增加而降低。Chen Jinhan 等^[16]曾针对 7 种高分子材料的准静态实验结果进行分析,得到松弛时间与应变率之间服从负幂律关系,指出了松弛时间随应变率的增加而单调减小的现象。研究表明,这一现象在气炮加载下依然成立。其机理是:松弛时间的长短取决于材料的微结构尺度。黄筑平等^[17]指出,高分子材料的黏性来自于分子链相对伸长与相对有效伸长之差,而这种差量来自于分子链变形过程中的相对滑移。滑移分子链会卸去荷载形成应力松弛。基于这一观点可以明了,高分子尺度是大小不同的。较小尺度的分子链容易在较高的应变率的扰动下发生相对滑移而应力松弛,表现为松弛时

间短;而应变率较低时,不仅小尺度的分子链,也包括较大尺度的分子链都容易发生相对滑移,表现为松弛时间长。同样地,对于颗粒,小的颗粒因质量较小容易在高应变率扰动下产生滑移或破碎而卸载造成应力松弛,表现为松弛时间短,而大颗粒因质量较大,只能在较低应变率的扰动下产生滑移或破碎而卸载造成应力松弛。综合结论是较高应变率对应着较短的松弛时间,而较低的应变率对应着较长的松弛时间。

3 结论

通过对 PBXs 替代材料实验研究和相关理论分析,得到了以下新的结果:

(1) 在气炮飞片的冲击波作用下,应力波传播过程中出现了波幅衰减现象,说明材料的粘性效应在高应变率条件下依然存在。而波幅的衰减可以近似地用指数衰减规律表征。

(2) 气炮加载下的 PBXs 替代材料的应力应变关系可以近似地用 Maxwell 模型来表征,可以得到形式简单的本构模型。

(3) 通常黏弹性材料的松弛时间对应应变率的增加而减少。这一规律在高应变率条件下依然成立,并且可以近似用幂率关系来表征。

参考文献

- [1] 松全才,扬崇惠,金韶华. 炸药理论[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
Song Quancai, Yang Chonghui, Jin Shaohua. Explosive theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997.
- [2] Xu Xiaojuan, Xiao Heming, Xiao Jijun, et al. Molecular dynamics simulations for pure ϵ -CL-20 and ϵ -CL-20-based PBXs[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(14):7203-7207.
- [3] Yan Qilong, Zeman S, Elbeih A. Recent advances in thermal analysis and stability evaluation of insensitive plastic bonded explosives (PBXs)[J]. Thermochimica acta, 2012, 537:1-12.
- [4] Qiu Ling, Xiao Heming. Molecular dynamics study of binding energies, mechanical properties, and detonation performances of bicyclo-HMX-based PBXs[J]. Journal of hazardous materials, 2009, 164(1):329-336.
- [5] Xiao Junji, Wang Wenrui, Chen Jun, et al. Study on structure, sensitivity and mechanical properties of HMX and HMX-based PBXs with molecular dynamics simulation[J]. Computational and Theoretical Chemistry, 2012, 999:21-27.
- [6] Siviour C R, Laity P R, Proud W G, et al. High strain rate properties of a polymer-bonded sugar: their dependence on applied and internal constraints[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2008, 464(2093):1229-1255.
- [7] Laity P R, Siviour C R, Church P D, et al. High strain rate characterisation of a polymer bonded sugar[C]// AIP Conference Proceedings. AIP, 2006, 845(1):905-908.
- [8] Jones A H, Isbell W M, Maiden C J. Measurement of the very - high - pressure properties of materials using a light - gas gun[J]. Journal of Applied Physics, 1966, 37(9):3493-3499.
- [9] Bonev S A, Militzer B, Galli G. Ab initio simulations of dense liquid deuterium: Comparison with gas-gun shock-wave experiments[J]. Physical Review B, 2004, 69(1):014101.
- [10] Kondo K, Sawaoka A, Saito S. Magnetoflyer method for measuring gas - gun projectile velocities[J]. Review of Scientific Instruments, 1977, 48(12):1581-1582.
- [11] Nagayama K, Mori Y, Shimada K, et al. Shock Hugoniot compression curve for water up to 1 GPa by using a compressed gas gun[J]. Journal of Applied physics, 2002, 91(1):476-482.
- [12] Gebhart T E, Combs S K, Baylor L R. Comparison of an electrothermal plasma source to a light gas gun for launching large cryogenic pellets for tokamak disruption mitigation[J]. Fusion Science and Technology, 2018, 73(1):25-33.
- [13] 董海山,周芬芬. 高性能炸药及其相关物性[M]. 北京:科学出版社,1989.
Dong Haishan, Zhou Fenfen. High performance explosives and their related properties[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [14] Christensen R M. Theory of viscoelasticity: An introduction [M]. New York: Academic Press, 1982.
- [15] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1992.
Yang Tingqing. Visco-elasticity[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and technology Press, 1992.
- [16] Chen Jinhan, Hu Hongjiu, Li Shang, et al. Quantitative relation between the relaxation time and the strain rate for polymeric solids under quasi - static conditions[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(42):001-006.
- [17] 黄筑平,陈建康,王文标. 有限变形热粘弹性本构关系的内变量理论[J]. 中国科学(A辑), 1999, 29(10):939-944.
Huang Zhuping, Chen Jiankang, Wang Wenbiao. The internal variable theory of thermal viscoelasticity constitutive relationship on finite deformation[J]. Science in China: Series A, 1999, 29(10):939-944.

欢迎投稿、欢迎订阅、欢迎刊登广告