

文章编号: 1006-9941(2004)06-0358-03

高聚物粘结炸药压缩疲劳特性试验研究

蓝林钢, 郝莹, 温茂萍, 庞海燕

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 介绍了高聚物粘结炸药(PBX)压缩疲劳特性试验方法, 以 JB-9014 炸药为研究对象, 分别进行最大应力 σ_{\max} 为 20.98, 22.30, 23.60, 25.50, 26.50 MPa, 频率为 2Hz 的正弦波加载方式下的疲劳试验, 得到了 JB-9014 炸药的压缩疲劳 S-N 曲线。从 S-N 曲线推知 JB-9014 炸药在 $\sigma_{\max} = 20.98$ MPa(相当于 70% 的破坏应力)时, 压缩疲劳极限 N 为 2.8×10^6 , 说明 JB-9014 炸药有良好的耐疲劳性能。

关键词: 固体力学; 高聚物粘结炸药(PBX); 疲劳; JB-9014; S-N 曲线

中图分类号: TJ55; O344

文献标识码: A

1 引言

高聚物粘结炸药(Polymer bonded explosive, PBX)是一类以高聚物粘结剂为连续相、高能炸药为分散相的复合材料, 具有高的爆炸能量、低的感度, 易于机械加工。在武器结构中, PBX 除了作为功能材料外, 还作为结构材料, 具有一定的承载能力。随着现代武器的发展, 要求 PBX 部件承受更多运输中的颠簸震动、武器投送工具的振动冲击、在存储中热应力作用、温差变化环境的热冲击等。在这些冲击中 PBX 材料会受到疲劳的作用, 在低应力下可能使其存在的微缺陷^[1]扩展成裂纹, 影响武器的安全性和有效性。

随着新材料的不断应用, 疲劳的研究范围也从金属材料拓展到高分子材料、混凝土、陶瓷、沥青材料等领域^[2,3]。对推进剂的疲劳研究, 现在已应用到可靠性研究中^[4,5], 与推进剂相类似的 PBX 材料, 温茂萍^[6]等对 JOB-9003 炸药进行有限次数的加载卸载循环试验, 发现循环的最大应力超过材料破坏强度 90% 时, 将对 JOB-9003 炸药产生明显损伤。美国利弗莫尔实验室的 Hoffman^[7]曾在 1998 年进行了 LX-14 和 LX-19 炸药的压缩疲劳试验, 研究了这两种材料的疲劳特性, 得到了 S-N 曲线。本研究通过大量试验, 初步建立了 PBX 的压缩疲劳试验方法, 并在此基础上对 JB-9014 炸药的压缩疲劳特性进行了初步研究。

收稿日期: 2004-04-09; 修回日期: 2004-08-06

作者简介: 蓝林钢(1972-), 男, 硕士, 工程师, 从事含能材料及高分子材料力学研究、测试工作。

2 疲劳试验测试方法

在疲劳试验的测试中, 比较重要的是测试系统、安全保护装置和试验条件的确立。

2.1 测试系统

试验设备为 INSTRON 1342 材料试验机, 疲劳试验的测试系统如图 1 所示, 采用动态应变引伸计和动态负荷传感器。进给系统上下往复循环运动对样品进行加载卸载, 数据处理系统将应变引伸计和负荷传感器的信号进行处理, 并存贮数据。试验在防爆小室内进行, 通过电荷耦合镜头(CCD)对样品实时监控。

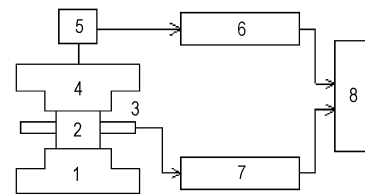


图 1 PBX 疲劳实验系统

- 1—下液压夹头, 2—样品, 3—应变引伸计,
 - 4—上液压夹头, 5—荷载传感器, 6—荷载测量放大器,
 - 7—变形测量放大器, 8—计算机
- Fig. 1 PBX fatigue experiment system
- 1—lower hydraulic grip, 2—sample, 3—extensometer,
 - 4—upper hydraulic grip, 5—load sensor, 6—load amplifier,
 - 7—strain amplifier, 8—computer

2.2 样品的保护装置

为了防止设备失控, 设计了如图 2 所示的安全保护装置。四个限位螺杆一端固定于下压板上, 另一端

粘上硬橡皮并与上压板保持 1mm 左右的距离。试验过程中一旦炸药样品破坏,横梁还会继续上升,当限位螺杆到与上压板接触时加载横梁即受到限制,从而起到保护安全和引伸计的作用。

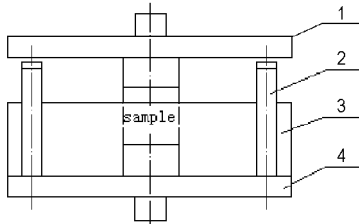


图 2 安全保护装置示意图

1—上压板,2—限位螺杆,3—接药盆,4—下压板

Fig. 2 Sketch of safety-protecting device

1—upper board, 2—specing pole, 3—container, 4—lower board

2.3 试验条件

样品尺寸为 $\text{Ø}25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。疲劳试验前,进行样品密度测量和超声探伤,剔除有缺陷样品。先进行准静态压缩试验,测得 JB-9014 炸药准静态压缩破坏强度 σ_b 为 30.17 MPa。本试验采用正弦波加载,频率为 2 Hz。由于材料压缩破坏应变很小 ($< 1.5\%$),采用应力控制试验,为防止回到零点时样品滑移,设定最小应力 σ_{\min} 为 0.8 MPa。样品的失效以破坏为准。在试验过程中没有对样品温度进行实时监控,在试验后发现样品温度变化不大。选择最大应力 σ_{\max} 为 20.98, 22.30, 23.60, 25.50, 26.50 MPa 五个应力水平,进行 JB-9014 炸药的压缩疲劳试验。

3 JB-9014 疲劳试验结果及分析

JB-9014 炸药样品典型的疲劳破坏应力应变曲线如图 3 所示。由图 3 可见,随着循环周数的增加,循环曲线有明显的疏-密-疏的特点。将每周的最大应变连接起来,可得波峰应变随循环周数的变化曲线,如图 4 所示,从图 4 可更明显看出应变发展的三阶段:第一阶段变形发展较快,可能是由于蠕变变形的影响,占据疲劳寿命的 10%~20%;第二阶段变形速率较小且基本稳定,是稳态扩展阶段,所占疲劳寿命的比重最大,占据疲劳寿命的 80%~90%;第三阶段加速发展破坏,所占比例极小。

表 1 是样品在不同压缩应力水平下的循环周数。由表 1 可见,除了最大应力 (20.98 MPa) 下样品未被破坏外,其它应力下样品都发生破坏。在 88% 的应力水平下,仅经过 950 周样品就被破坏,而在 69.9% 的应力水平下,经过 3.8×10^5 周样品还未发生破坏。

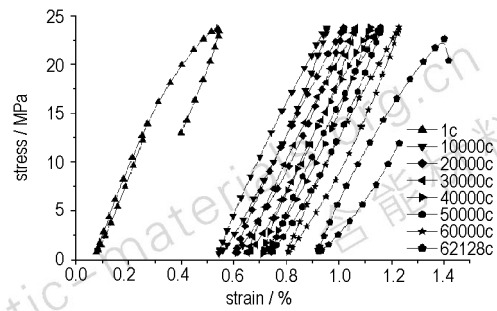


图 3 78.7% 破坏应力下应力-应变图

Fig. 3 Stress-strain curves at 78.7% of breaking strength σ_b

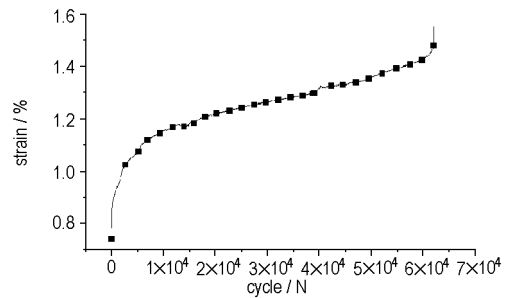


图 4 78.7% 破坏应力下波峰应变-循环次数图

Fig. 4 Peak strain vs. circle curve at 78.7% of breaking strength σ_b

表 1 不同应力水平的疲劳试验结果

Table 1 Fatigue testing result in different stress level

number	σ_{\min} /MPa	σ_{\max} /MPa	σ_a /MPa	σ_m /MPa	Cycle /N	σ_{\max}/σ_b /%
1	0.80	26.50	12.85	13.65	950	88.0%
2	0.80	25.50	12.35	13.15	1494	85.0%
3	0.80	23.60	11.40	12.20	62128	78.7%
4	0.80	22.30	10.75	11.55	200000	74.0%
5	0.80	20.98	10.09	10.89	380000 (undestroyed)	69.9%

note: σ_a is stress amplitude, $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$;

σ_m is mean stress, $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$

材料的应力-寿命曲线(S-N 曲线),是材料疲劳性能的基本曲线,通过 S-N 曲线,能了解材料在不同应力下的寿命,估计材料的使用极限。将表 1 中这些不同应力水平的疲劳寿命连接起来,即是材料的 S-N 曲线。疲劳试验中,常用幂函数或者指数式对 S-N 曲线进行拟合:

$$\text{幂函数形式: } \lg S = A + B \lg N \quad (1)$$

$$\text{指数形式: } S = A + B \lg N \quad (2)$$

对表 1 数据分别用幂函数与指数式进行拟合,发现用指数函数拟合的误差较小,以指数函数得出的应力-寿命曲线关系式为:

$$S = 30.3195 - 1.4491 \lg N \quad (3)$$

拟合出的曲线如图 5。通过(3)式,计算了当最大应力为 $\sigma_{\max} = 20.98$ MPa,相当于 69.9% 的破坏强度时(在表 1 中未破坏的应力水平)的疲劳寿命 N 为 2.8×10^6 周,这说明 JB-9014 炸药有良好的耐疲劳性能。

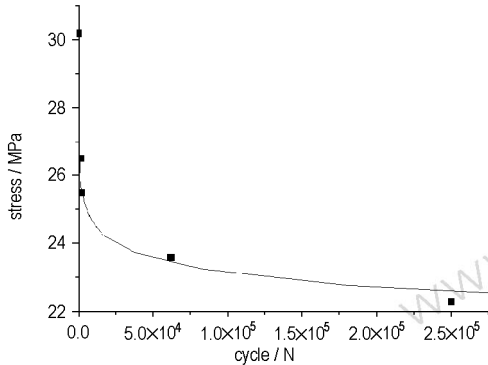


图 5 拟合的 S-N 曲线

Fig. 5 Fitting S-N curve from experimental data

4 结 论

当压缩应力水平超过破坏强度的 85% 时,JB-9014 炸药试验样品很快被破坏;当压缩应力水平低于破坏强度的 70% 时,样品的疲劳寿命很长,从实验所得 S-N 曲线可以推知 JB-9014 炸药在 σ_{\max} 为 20.98 MPa(相当于 70% 的破坏应力)时压缩疲劳极限 N 为 2.8×10^6 周,说明 JB-9014 炸药有良好的耐疲劳性能。

参考文献:

- [1] 李英雷,李大红,胡时胜,等. TATB 钝感炸药本构关系的实验研究[J]. 爆炸与冲击,1999,19(4):353-359.
LI Ying-lei, LI Da-hong, HU Shi-sheng, et al. An experimental study on constitutive relation of TATB explosive[J].

Explosions and Shock Waves, 1999,19(4):353-359.

- [2] 鞠杨,樊承谋,潘景龙,等. 变幅疲劳载荷下钢纤维混凝土的损伤演化行为研究[J]. 实验力学,1997,12(1):110-118.
JU Yang, FAN Cheng-mou, PAN Jing-long. A study on fatigue damage evolution of SFRC under variable amplitude loads [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997,12(1):110-118.
- [3] 张婧娜,朱希岭,张肖宁. 沥青混合料疲劳损伤的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1997,30(5):106-111.
ZHANG Jing-na, ZHU Xi-ling, ZHANG Xiao-ning. A study on fatigue damage of asphaltum mixture[J]. *Journal of Harbin Architecture institute*,1997,30(5):106-111.
- [4] 王铮,胡永强. 固体火箭发动机[M]. 宇航出版社. 1993.
- [5] 张世英,姜洪开,陈家照. 固体推进剂药柱强度可靠性蒙特卡罗法数字仿真[J]. 固体火箭技术,2001,24(4):29-32.
ZHANG Shi-ying, JIANG Hong-kai, CHEN Jia-zhao. A Monte-Carlo simulation of solid propellant grain strenyth[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*,2001,24(4):29-32.
- [6] 温茂萍,田勇,庞海燕,等. 交变应力与恒定应力对 JOB-9003 炸药性能影响研究[J]. 测试技术学报,2002,16(增刊):1118-1120.
WEN Mao-ping, TIAN Yong, PANG Hai-yan, et al. A study on the JOB-9003 mechanical properties after fatigue and creep [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*(supplement),2002,16:1118-1120.
- [7] Hoffman D. Fatigue of LX-14 and LX-19 plastic bonded explosives[R]. NTIS No: DE98057934/XAB.

Experimental Study on Compressive Fatigue of PBX

LAN Lin-gang, HAO Ying, WEN Mao-ping, PANG Hai-yan

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: A compressive fatigue testing method of polymer bonded explosive (PBX) was introduced and experimental studied with JB-9014. The frequency of fatigue loading sine was fixed at 2 Hz and the maximum compressive stress was 20.98,22.3,23.6,25.5,26.5 MPa. The S-N curve which is fitted well with exponential law has been obtained. Based on S-N curve, compressive fatigue limit at 20.98 MPa (70% of the comparative strength limit of the PBX) is computed out, Viz. 10^6 cycles. It indicates that JB-9014 has nice assist-fatigue characteristic.

Key words: solid mechanics; polymer bonded explosive (PBX); fatigue; JB-9014; S-N curve