

环境压强对固体推进剂力学行为的影响^{*}

何铁山, 张劲民

(湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄樊 441003)

摘 要: 为了解环境压强对固体推进剂的力学行为的影响, 以 NEPE 固体推进剂为研究对象, 利用高压材料试验机, 研究了室温中两种拉速条件下的 NEPE 推进剂力学行为变化规律。结果表明: NEPE 推进剂的抗拉强度、伸长率、断裂伸长率均随环境压强的增加而增大。建立了环境压强对 NEPE 推进剂力学行为影响的数学模型, 提出了力学性能压强指数的概念, 并对测试结果进行了简要分析。

关键词: 固体推进剂; 力学性能; 压强指数⁺; 压强

中图分类号: V512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2005) 04-0367-04

Effect of environment pressure on mechanical properties of solid propellant

HE Tie-shan, ZHANG Jin-min

(Hubei Inst. of Aerospace chemotechnology, Xiangfan 441003, China)

Abstract In order to find out the effect of the environment pressure on the mechanical properties of solid propellant, the change law of mechanical properties of NEPE solid propellant as the object of study was studied under the conditions of two different tensile rates and room temperature by means of a high pressure material testing machine. The results indicated that tensile strength, elongation and breakage elongation of NEPE propellant were increased along with increase of pressure. The mathematics models on the effect of the environment pressure on the mechanical properties of NEPE solid propellant were established, and the conception of pressure exponent about mechanical properties was put forward. A simple analysis was made for the test results.

Key words Solid propellant; Mechanical performance; Pressure exponent⁺; Intensity

1 引 言

固体推进剂在不同的温度、压强、湿度及拉速下, 其表现出的力学行为是不同的。TRAUSSAC Y^[1]与 CHAI P^[2]等人分别研究了固体推进剂与弹性体材料在不同压强环境下的单向拉伸力学行为, 研究表明: 不同压强环境下的单向拉伸力学行为变化规律明显不同于常压状态下的力学行为变化规律。赵伯华等人^[3,4]研究了固体推进剂在不同压力载荷条件下的体积形变, 并据此计算出固体推进剂的体积模量和推进剂的初始气孔率。目前, 国内只测定出固体推进剂在常压下的单向拉伸力学性能, 对高压下的力学行为, 尤其是高压状态下的单向拉伸力学行为只能凭

推测或直接应用常压下的力学性能参数代表高压下的力学行为。对高压环境下的推进剂力学行为变化规律也缺乏准确可靠的认识。因此, 为了准确评估火箭发动机在点火工作时固体推进剂所处的工作状态, 准确分析在点火工作期间药柱结构的完整性, 本文模拟了 NEPE 固体推进剂的点火增压环境, 初步研究了室温下环境压强对 NEPE 推进剂力学行为的影响。

2 试验设备及样品

试验设备为自制高压材料试验机, 其工作压强上限为 10 MPa, 同时配备 4 只载荷传感器, 每只传感器满量程为 1 kN。试验样品为哑铃形试件, 按 GJB770A-97 规定的相关方法制备。

* 收稿日期: 2004-09-27; 修订日期: 2005-03-03。

作者简介: 何铁山 (1968—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究领域为固体推进剂力学性能与燃烧性能。

3 试验条件

- (1) 压强: 0 0 0 15 0 5 0 75 1 0 1 5 2 0 2.5 3 0 4 0 5 0 6 0 MPa
- (2) 温度: 20 ℃
- (3) 拉速: 100 500 mm /m in

4 试验方法

利用高压材料试验机,以氮气为增压气体,每种测试条件下一次性同时测试 4个试件。固体推进剂试件在每种设定压强条件下保压 40 m in。每种设定条件下的力学性能测试结果平均值见表 1。

Table 1 Mechanical properties data under different pressures for NEPE propellant at constant temp and tensile rate

$T / ^\circ\text{C}$	Tensile rate/ (mm /m in)	p / MPa	$\ln(p + 0.10135)$	σ_m / MPa	$\ln(\sigma_m)$	$\varepsilon_m / \%$	$\ln(\varepsilon_m)$	$\varepsilon_b / \%$	$\ln(\varepsilon_b)$	
100		0.0	-2.289	0.84	-0.174	73.2	-0.312	80.4	-0.218	
		0.15	-1.381	0.92	-0.083	81.0	-0.211	89.6	-0.110	
		0.5	-0.508	1.01	0.010	88.6	-0.121	97.4	-0.026	
		0.75	-0.161	1.12	0.113	90.8	-0.096	102.4	0.024	
		1.0	0.096	1.18	0.166	96.4	-0.037	107.8	0.075	
		1.5	0.471	1.24	0.215	101.9	0.019	112.5	0.118	
		2.0	0.742	1.22	0.199	111.4	0.108	126.4	0.234	
		2.5	0.956	1.22	0.199	115.0	0.140	131.1	0.271	
		3.0	1.132	1.30	0.262	113.8	0.129	128.8	0.253	
		4.0	1.411	1.24	0.215	119.4	0.177	138.2	0.324	
		5.0	1.630	1.20	0.182	116.0	0.148	135.4	0.303	
		6.0	1.808	1.21	0.191	120.0	0.182	139.1	0.330	
	Regressive formula (a): $y = a + b \cdot x$			$y = 0.0921 + 0.0997x$		$y = -0.032 + 0.1306x$		$y = 0.0842 + 0.1452x$		
	Relative coefficient R			0.9177		0.9839		0.9847		
	Pressure index n			0.0997		0.1306		0.1452		
	Experience constant A			1.0965		0.9685		1.0878		
	Formula on properties and pressure			$\sigma_m = 1.0965(p + 0.1035)^{0.0997}$		$\varepsilon_m = 0.9685(p + 0.1035)^{0.1306}$		$\varepsilon_b = 1.0878(p + 0.1035)^{0.1452}$		
	500		0.0	-2.289	0.92	-0.083	79.4	-0.231	89.8	-0.108
			0.15	-1.381	0.99	-0.010	86.0	-0.151	93.8	-0.064
			0.5	-0.508	1.06	0.058	91.4	-0.090	104.2	0.041
		0.75	-0.161	1.10	0.095	98.0	-0.020	106.2	0.060	
		1.0	0.096	1.23	0.207	105.8	0.056	115.2	0.141	
		1.5	0.471	1.28	0.247	106.8	0.066	115.0	0.140	
		2.0	0.742	1.32	0.278	110.4	0.099	122.0	0.199	
		2.5	0.956	1.38	0.322	115.9	0.148	125.4	0.226	
		3.0	1.132	1.44	0.365	122.2	0.200	132.6	0.282	
		4.0	1.411	1.36	0.307	113.0	0.122	127.8	0.245	
		5.0	1.630	1.48	0.392	127.0	0.239	146.4	0.381	
		6.0	1.808	1.45	0.372	121.9	0.198	147.0	0.385	
Regressive formula $y = a + b \cdot x$			$y = 0.1717 + 0.1253x$		$y = 0.0153 + 0.1159x$		$y = 0.1205 + 0.1233x$			
Relative coefficient R			0.9748		0.9743		0.9720			
Pressure index n			0.1253		0.1159		0.1233			
Experience constant A			1.1873		1.0154		1.1281			
Formula on properties and pressure			$\sigma_m = 1.1873(p + 0.1035)^{0.1253}$		$\varepsilon_m = 1.0154(p + 0.1035)^{0.1159}$		$\varepsilon_b = 1.1281(p + 0.1035)^{0.1233}$			

$x: \ln(p + 0.10135); y: \ln(\sigma_m)$ or $\ln(\varepsilon_m)$ or $\ln(\varepsilon_b)$

5 试验结果

5.1 环境压强对 NEPE 推进剂力学行为的影响

从表 1 与图 1~图 3 可看出, NEPE 推进剂在压力环境下的力学行为具有如下特点:

(1) 在两种拉速条件下的抗拉强度 σ_m 随环境压强的增加而增大。

(2) 在两种拉速条件下的伸长率 ε_m , 断裂伸长率 ε_b 也均随环境压强的增加而增大。

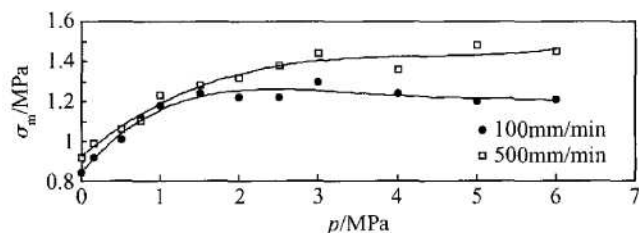


Fig 1 Change curves of tensile strength for NEPE propellant according to pressure under two different tensile rates

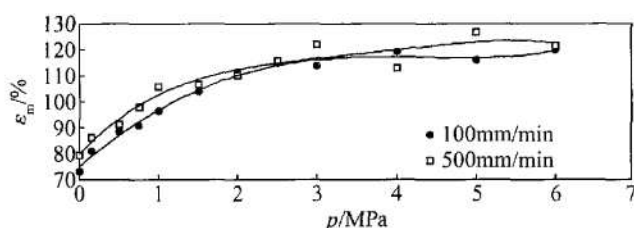


Fig 2 Change curves of elongation for NEPE propellant according to pressure under two different tensile rates

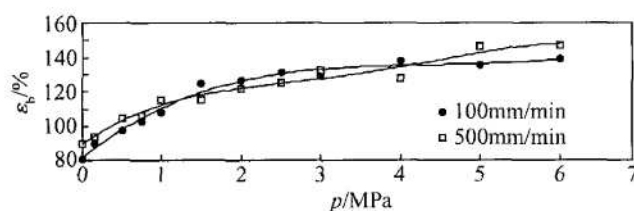


Fig 3 Change curves of breakage elongation for NEPE propellant according to pressure under two different tensile rates

5.2 在压力环境下拉速对力学行为的影响

从表 1 的压强指数值初步发现: NEPE 推进剂的抗拉强度压强指数随拉速的增加而增大; 伸长率、断裂伸长率压强指数均随拉速的增加而减小。这种现象间接反映了在相同压力条件下、相应的单项力学性能对拉速响应的敏感程度。

5.3 环境压强对抗拉强度、伸长率、断裂伸长率影响的数学模型

从图 1~图 3 与表 1 的数据可看出, NEPE 推进剂的抗拉强度、伸长率、断裂伸长率均随环境压强的增加而增大, 假设推进剂的抗拉强度、伸长率、断裂伸长率与环境压强之间均符合以下关系式

$$Prop = A \cdot (p + 0.10135)^n \quad (1)$$

式中 p 为推进剂所处环境的表压, MPa; $Prop$ 为推进剂的抗拉强度或伸长率或断裂伸长率; n 为抗拉强度或伸长率或断裂伸长率压强指数; A 为经验常数, 与测试温度、拉速等有关; 0.10135 为环境大气压默认值, MPa。

为便于对实验数据进行处理, 对式 (1) 两边取自然对数, 得式 (2)

$$\ln(Prop) = \ln A + n \ln(p + 0.10135) \quad (2)$$

对表 1 中两种拉速条件下的 $\ln(Prop)$ 与 $\ln(p + 0.10135)$ 数据进行回归处理, 得到相应的回归方程和相关系数, 将表 1 中两种拉速条件下的 $\ln(Prop)$ 与 $\ln(p + 0.10135)$ 数据绘成相应的曲线, 见图 4~图 6。表 1 中的相关系数及图 4~图 6 验证了上述假设的关系式 (1) 成立。表 1 中的压强指数反映了相应的单项力学性能对环境压强的敏感程度, 指数越大说明该项性能对环境压强越敏感。当得知单项力学性能压强指数后, 利用式 (1) 就可预知推进剂在点火增压状态下的力学性能。

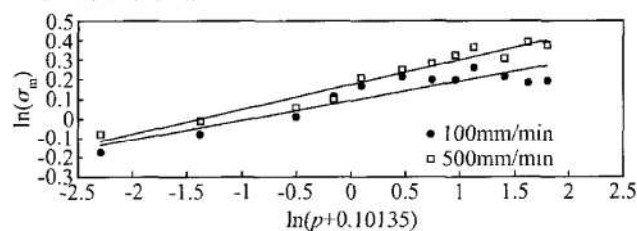


Fig 4 $\ln(\sigma_m) \sim \ln(p + 0.10135)$ curves for NEPE propellant under two different tensile rates and 20 °C

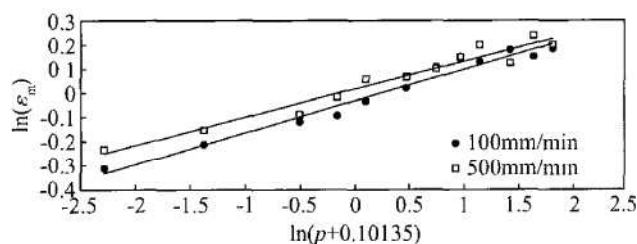


Fig 5 $\ln(\varepsilon_m) \sim \ln(p + 0.10135)$ curves for NEPE propellant under two different tensile rates and 20 °C

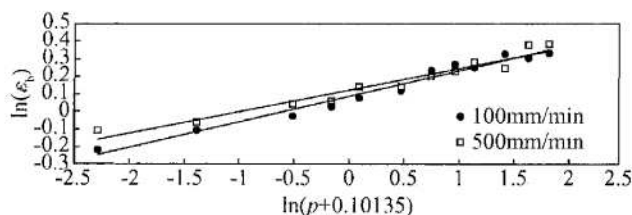


Fig 6 $\ln(\varepsilon_b) \sim \ln(p + 0.10135)$
curves for NEPE propellant under two different
tensile rates and 20 °C

5.4 结果分析

(1) 从表 1 与图 1~图 3 发现: σ_m , ε_m , ε_b 均随环境压强的增加而增大, 并且在不同压强范围变化规律不同, 其中 0~3 MPa 内的压强对 σ_m , ε_m , ε_b 影响明显, 而 3~6 MPa 内的压强对 σ_m , ε_m , ε_b 影响很小。这种现象主要是因为固体推进剂体系内部存在初始气孔^[3,4], 随着体系外部压强的增加, 推进剂内部原有气孔逐渐减少, 推进剂的致密性逐渐增加, 表现为随着推进剂所处环境的压强增加, 表现为 σ_m , ε_m , ε_b 也增加。当外部压强增加到一定程度后 (如 3 MPa), 原有的气孔几乎消失, 推进剂的致密性几乎不变, 推进剂的体积形变很小, 从而表现为 σ_m , ε_m , ε_b 受压强影响很小。

(2) 在拉速为 100 mm/min 时, 0~3 MPa 内, σ_m 随压强增加而增加。在 3~6 MPa 范围内, σ_m 随压强增加有减小的趋势 (变化很小, 仅在小数点后第二位有变化), 这可能与测试的压强点较少和试件尺寸测量有关。

(3) 压力环境下拉速对力学行为的影响, 需更多

的试验以验证上述结果。在此仅作初步介绍。高、低温条件下环境压强对 NEPE 推进剂力学行为的影响有待进一步研究。

6 结 论

(1) 室温下 NEPE 推进剂的抗拉强度、伸长率、断裂伸长率均随环境压强的增加而增大。

(2) 室温下 NEPE 推进剂的抗拉强度、伸长率、断裂伸长率与环境压强之间存在以下关系

$$Prop = A \cdot (p + 0.10135)^n$$

(3) 初步发现室温下 NEPE 推进剂的抗拉强度压强指数随拉速的增加而增大; 伸长率、断裂伸长率压强指数均随拉速的增加而减小。

参考文献:

- [1] TRA ISSAC Y, et al Mechanical behavior of a solid composite propellant during motor ignition[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1994, 68: 146~157.
- [2] PAI P C-H, et al The effect of pressure on the ultimate properties of elastomers[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1991, 65: 396~410.
- [3] 赵伯华. 固体推进剂的体积模量与体积蠕变[J]. *兵工学报*, 1993(1): 88~91.
- [4] 赵伯华, 沈月萍. 火箭装药体积形变力学特性的研究[J]. *推进技术*, 1994, 15(2). (ZHAO Bo-hua SHEN Yue-ping A study on volume deformation mechanical properties of rocket grain[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1994, 15(2).)

(编辑: 朱立影)