

圆管发动机法测定固体推进剂的泊松比^{*}

何铁山, 蒲远远, 王志强, 朱文龙

(湖北红星化学研究所, 湖北 襄樊 441003)

摘 要: 建立了一种测定固体推进剂泊松比的方法——圆管发动机法。测定了两种不同外内径比的圆管发动机药柱在固化降温后内孔的最大径向形变量, 以该形变量为依据, 利用药柱在固化降温过程的有限元计算程序, 拟合计算出该配方药柱在固化降温后于不同温度下的泊松比, 测定相对误差均不超过 0.5%。

关键词: 固体推进剂; 泊松比; 有限元法; 圆管发动机

中图分类号: V512.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2001) 02-0171-03

Determining poisson's ratio of solid propellant by means of cylindrical motors

HE Tie-shan, PU Yuan-yuan, WANG Zhi-qiang, ZHU Wen-long

(Hubei Red Star Chemical Inst., Xiangfan 441003, China)

Abstract: Cylindrical motors method was built to determine the poisson's ratios of solid propellants. According to the maximum radial deformations of the perforations of cylindrical motors with two different outer-inner radial ratios after having been cured and dropped in the temperatures, the poisson's ratios of the solid propellant grain at the different temperatures was fit out by use of FEM. The relative errors of the poisson's ratios determination at different temperatures don't exceed 0.5%.

Key words: Solid propellant; Poisson's ratio; Finite element method; Cylindrical motor

1 引 言

很早就有人指出, 对于不同状态下的固体推进剂药柱进行结构完整性分析时所用的泊松比值, 应模拟相似的状态来测量^[1]。由于固体火箭发动机几乎在所有的应用中都是与不同于固化温度的环境相接触, 因此, 对固化降温条件下的泊松比测试具有十分重要的意义。对发动机装药体积形变, 力学特性, 曾有三维有限元分析^[2,3]和采用弓形应变传感器测试^[4]的报道, 本文的目的旨在通过模拟壳体粘结式圆孔药柱在固化降温条件下的载荷条件, 测定固体推进剂在固化降温后的泊松比, 以满足药柱结构完整性分析人员对泊松比的需求。

2 测量原理与系统

固体火箭发动机药柱结构完整性分析的任务之一就是在已知固体推进剂的力学性能参数(含泊松

比)的前提下计算药柱处于某种状态时其内部各处产生的应力和应变^[5], 再根据破坏判据预估固体火箭发动机药柱在相应状态下是否发生破坏。固化降温条件下药柱结构完整性分析的有限元计算方法的支配方程^[6]为

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

$$\{F\} = \sum [\{F_0\}^e + \{F_t\}^e + \{F_l\}^e + \{R\}^e] \quad (2)$$

式中 $[K]$ 为结构的总刚度矩阵, 与推进剂药柱的泊松比以及单元的结点坐标等有关; $\{\delta\}$ 为结构中的结点位移列阵; $\{F\}$ 为结构结点载荷矢量, 与结点坐标、推进剂药柱的泊松比、线膨胀系数、模量及温差等有关; $\{F_0\}^e, \{F_t\}^e, \{F_l\}^e, \{R\}^e$ 分别为单元的热应力、体力、面力及结点集中力载荷列阵, 其含义详见文献[6]。经过将药柱结构离散化处理后可得到结构的总刚度矩阵 $[K]$, 在已知各结点的结点坐标、推进剂药柱的泊松比 ν 、线胀系数 α 、温差及模量的前提下, 解线性方程组(1), 就可得到各结点的位移, 再将各结点

* 收稿日期: 2000-06-09; 修订日期: 2000-08-25。

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

位移量纲化处理就可得到各结点在固化降温后的实际位移。通过测定两种外内径比的固体推进剂药柱在固化降温后的内孔最大径向位移,在已知药柱的长径比、外内径比、固化降温的温差及模量的前提下,针对两种结点坐标的线性方程组(1)进行泊松比和线胀系数拟合计算,就可得到固体推进剂药柱在固化降温条件下的 ν 和 α_l 。

固体推进剂的泊松比与其受力状态有关,在进行泊松比的测试过程中,不能对固体推进剂施加人为的外力载荷。为了满足该条件,在测定固体推进剂药柱的最大径向位移时,采用电涡流位移传感器进行非接触位移测量。

圆管发动机法测试系统主要包括以下几个分系统:

(1) 非接触位移测量系统,为了克服接触力对泊松比测量的影响,采用电涡流位移传感器对药柱在固化降温后的内孔径向形变实施非接触位移测量;

(2) 轴向位移的控制系统,控制电涡流传感器在发动机药柱内孔中的轴向位置,以便对内孔径向形变实施测量;

(3) 数据采集系统,以便对固体推进剂在固化降温过程中的内孔径向形变实施不间断跟踪测量;

(4) 药柱的温度控制系统,控制药柱的温度,测出药柱在相应热应力状态下的内孔径向形变。

圆管发动机法泊松比测试系统见图 1。

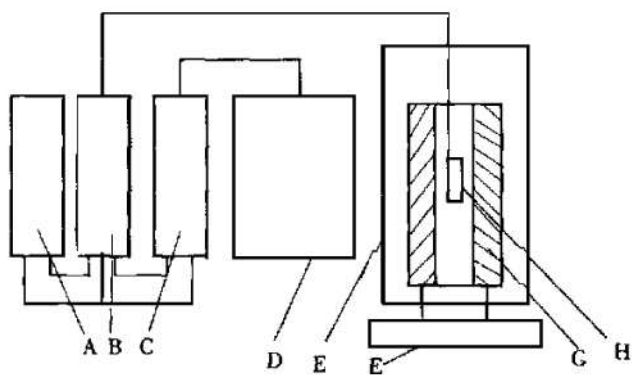


Fig. 1 Diagram of the testing system of poisson's ratio determination by cylindrical motors method

A — power (— 24V); B — converter; C — multimeter; D — data processor system; E — temperature control chest; F — control system of axial distance; G — cylindrical motor grain; H — eddy current sensor

3 实验与结果

3.1 发动机药柱的测定

圆管发动机法测定固体推进剂泊松比的关键是

准确测定圆管发动机药柱在固化降温后内孔的最大径向位移形变。其测定方法示意图如图 2 所示。

为使测定有效,必须对电涡流位移传感器在相应测定温度下的输出特性进行标定(零应变温度下的数据是在零应变温度测定以后进行的)。经测定,70 °C 固化的药柱其零应变温度为 78 °C。各温度下的输出特性数据用于后面的数据处理。

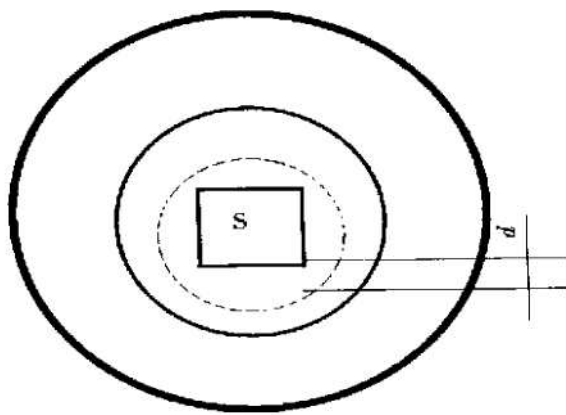


Fig. 2 Sketch of determining radial deformations of perforations

—: outer edge of cross section of the grain
—: cross- section of the perforations at temperature $T < 78\text{ }^{\circ}\text{C}$
- - : cross- section of the perforations at $78\text{ }^{\circ}\text{C}$
d : the min. distance of the sensor to the perforation surface
S : eddy current sensor

利用测试系统测定 SR-1, SR-2, SR-3 三种 HTP 固体推进剂,长径比为 3.61,外内径比 m 分别为 4,5 的圆孔药柱(事先在圆管发动机药柱内孔沿轴向粘贴有铝箔,在 78 °C, 50 °C, 25 °C, - 20 °C 时,传感器在内孔轴向中截面处的输出电压。

5 数据处理

利用样条插值方法将两种外内径比的药柱($i = 1, 2$)、四种测定温度($j = 1 \sim 4$)下电涡流位移传感器在药柱轴向中截面处的输出电压 U_{ij} 转化成传感器探头距内孔铝箔表面的最小距离 d_{ij} ,从而得到两种药柱在 50 °C, 25 °C, - 20 °C 三种温度下传感器探头距内孔铝箔表面的最小距离变化量 Δd_{ij} ($i = 1 \sim 2; j = 2 \sim 4$) 值($\Delta d_{ij} = d_{ij} - d_{i1}$)。由图 3 可知 Δd_{ij} 与内孔最大径向形变 ΔR_{ij} 之间存在如下关系:

$$\Delta R_{ij} = \sqrt{\Delta d_{ij} + \sqrt{R_i^2 - r^2}}^2 + r^2 - R_i \quad (i = 1 \sim 2; j = 2 \sim 4) \quad (3)$$

式中 R_i 为两种药柱的内孔半径、 r 为传感器探头的半径。利用(3)式很容易由 Δd_{ij} 计算出 ΔR_{ij} 。

针对两种药柱在相同测试温度下的 ΔR_{ij} , 利用线性方程组 (1) 进行有限元拟合计算, 可同时得到固体推进剂药柱在固化降温后在 50 °C, 25 °C, - 20 °C 的泊松比 ν 和线胀系数 α_l 。

6 实验结果

以两种发动机药柱的 ΔR_{ij} 的值为依据, 利用固化降温过程的有限元计算程序拟合计算出三种温度下固体推进剂药柱的泊松比和线胀系数。测试结果列于表 1 中。

Table 1 Determining results of the poisson's ratios and linear expansion coefficients

Temperature/ °C		50	25	- 20
SR-1	ν	0.4990	0.4966	0.4923
	$\alpha_l(1/^\circ\text{C})$	0.870×10^{-4}	1.098×10^{-4}	1.057×10^{-4}
SR-2	ν	0.4991	0.4973	0.4926
	$\alpha_l(1/^\circ\text{C})$	0.660×10^{-4}	0.920×10^{-4}	0.820×10^{-4}
SR-3	ν	0.4990	0.4970	0.4925
	$\alpha_l(1/^\circ\text{C})$	0.650×10^{-4}	0.875×10^{-4}	0.838×10^{-4}

图 3 绘出了 SR-1 推进剂的圆管发动机法和有限元计算方法得到的内孔径向形变曲线 (D_a 表示传感器探头中心距药柱上端的距离)。由图 3 可看出圆管发动机法测得的数据几乎都分布在有限元拟合计算曲线上, 说明圆管发动机法可用于测定固体推进剂在固化降温条件下的泊松比和线胀系数。

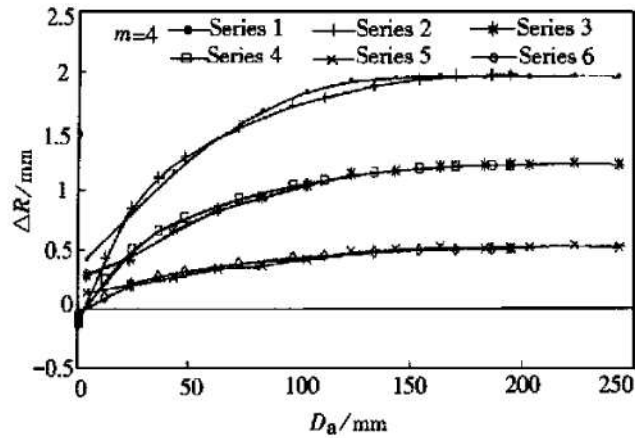


Fig. 3 Distribution curves for radial deformations of the perforations of the grain along the axial direction

Series 1, 3, 5: Tested curves; Series 2, 4, 6: Fitted curves by FEM

7 误差分析

针对 SR-1 的泊松比测试, 我们作了较详细的误差分析。在实测过程中 Δd , r 及 R 的测定是相互独立的。根据误差传递理论和微小误差的取舍原则, 得

到了内孔最大径向形变相对误差 $E_{\Delta R}$, 有限元位移计算的相对误差 E_{FEM} , 泊松比与线胀系数的测定相对误差 E_{ν} E_{α} 。见表 2。由表 2 可以看出, 尽管发动机药柱中截面处的径向形变测定相对误差有的达到了 1.76%, 但折合到泊松比后, 使泊松比的测定相对误差均低于 0.5%; 线胀系数的测定相对误差也不大于 3.5%, 其可靠性也是很高的。

Table 2 Diagrame of testing errors of the poisson's ratios and linear expansion coefficients(SR-1)

Relative errors		- 20 °C	25 °C	50 °C
$E_{\Delta R}/\%$	$m=4$	0.95	0.74	1.30
	$m=5$	0.45	0.86	1.76
$E_{FEM}/\%$	$m=4$	0.47	0.27	0.50
	$m=5$	0.53	0.21	0.79
$E_{\nu}/\%$	$m=4$	0.32	0.16	0.12
	$m=5$	0.17	0.19	0.17
$E_{\alpha}/\%$	$m=4$	3.36	1.55	1.26
	$m=5$	1.70	1.96	2.18

8 结 论

(1) 圆管发动机法直接模拟了固体推进剂圆管发动机药柱在固化降温条件下的受力状态, 测出了固体推进剂在该状态下的泊松比, 测得的泊松比具有实用性。

(2) 圆管发动机法测定固体推进剂泊松比的相对误差均小于 0.5%, 测试精度满足药柱结构完整性分析的要求。

参考文献:

[1] Freudenthal M. A. On poisson's ratio in linear visco-elastic propellant in solid propellant rocket research[M]. In: Martin Summerfield ed. Solid Propellant Rocket Research, Vol. 1, Academic Press Inc. (London) LTD, 1964: 33~ 66.

[2] 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).

[3] 李录贤, 沈亚鹏, 朱祖念, 等. 三维药柱的热粘弹性有限元分析[J]. 推进技术, 1997, 18(3).

[4] 蒋辉国, 孙福合. 发动机装药应变测试方法实验研究[J]. 推进技术, 1994, 15(4).

[5] 朱祖念. 药柱结构完整性分析. 固体火箭发动机设计与研究(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.

[6] 殷家驹. 计算力学教程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.

(编辑: 龚士杰)