

文章编号: 1003-1480 (2020) 02-0029-04

基于霍普金森压杆的电爆管小容腔输出压力测试

许志宇^{1,2}, 李小明¹, 谭永华^{2,3}, 胡 攀¹, 李永锋¹, 董万峰¹

(1.西安航天动力研究所, 陕西 西安, 710100; 2. 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安, 710100; 3. 航天推进技术研究院, 陕西 西安, 710100)

摘 要: 为了准确获得电爆管在电爆阀真实小容腔中的压力输出特性, 设计了 18Ni 霍普金森压杆式反射压力测试方案, 可测压力上限 1 900MPa, 频率上限 125kHz, 能够重复使用。测试了一种铝/高氯酸钾电爆管在 1mL 总容积的容腔中压力输出特性, 结果冲击波反射压力峰值为 147.5MPa, 上升时间为 6.8 μ s, 平衡压力为 104MPa, 比传统的标准密闭爆发器试验换算值约低一半。

关键词: 电爆管; 小容腔; 霍普金森压杆; 冲击波测试; 反射压力

中图分类号: TJ450.6 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.008

Pressure Measurement of Cartridge in Small Chamber Using Hopkinson Pressure Bar

XU Zhi-yu^{1,2}, LI Xiao-ming¹, TAN Yong-hua^{2,3}, HU Pan¹, LI Yong-feng¹, DONG Wan-feng¹

(1.Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an, 710100; 2. Science and Technology on Liquid Rocket Engines Laboratory, Xi'an, 710100; 3. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an, 710100)

Abstract: In order to acquire output pressure of cartridge in real small chamber of pyrovalve, a Hopkinson pressure bar was designed to measure the reflected pressure of blast wave. The Hopkinson bar gage made from M250 material can be reused and can detect limited pressure of 1 900MPa, and the maximum frequency is 125kHz. Finally, a kind of aluminum/ potassium perchlorate cartridge was tested in a 1mL chamber with 0.75mL free volume. The output pressure performance is that, peak pressure 147.5MPa, rise time 6.8 μ s, and equilibrated pressure 104MPa. The equilibrated pressure is about half lower than the predicted value by transitional standard closed bomb test.

Key words: Cartridge; Small chamber; Hopkinson pressure bar; Shock wave measurement; Reflected pressure

电爆管利用炸药爆炸快速产生高压燃气, 为电爆阀动作提供驱动力, 其输出压力直接决定了电爆阀的工作性能, 而输出压力的测定一直是一个难题。长期以来采用大容腔标准密闭爆发器试验(standard closed bomb test), 将压力峰值按理想气体绝热做功过程 ($pV=\text{const}$) 换算出在电爆阀小容腔中的输出压力。但当电爆阀实际容腔远小于标准密闭爆发器时, 这种估算会产生较大误差, 换算值大于真实值^[1], 这样可能

造成电爆阀驱动力裕度不足。而直接针对电爆阀小容腔开展动态压力测试存在以下困难^[2]: (1) 要求传感器安装尺寸足够小 (<10mm)、响应快 (<10 μ s)、可测压力高 (>100MPa); (2) 容腔小、燃气流道狭窄 (<15mm), 设置测点不可避免地对原场产生干扰; (3) 爆炸产物压力和温度高, 产物中金属氧化物凝聚相和包覆膜金属碎屑容易损坏传感器或堵塞测压孔。

霍普金森压杆 (Hopkinson pressure bar) 法通过

收稿日期: 2020-01-02

作者简介: 许志宇(1989-), 男, 博士研究生, 从事液体火箭发动机控制与调节研究。

基金项目: 国家自然科学基金(11602186)。

测量细长杆中弹性应力应变反算出杆端加载情况,由于可测压力高、耐冲击、可重复使用,因此常用于爆炸近区试验研究。美国马里兰大学利用 $\Phi 6.35\text{mm}$ 和 $\Phi 7.94\text{mm}$ 的 18Ni(300) 压杆式反射压力传感器和静态压力传感器测试猛炸药在密闭空间和爆炸近区自由场中的冲击波^[3]。中国西北核技术研究所利用 $\Phi 8\text{mm}$ 的 34CrNi3 MoA 压杆式反射压力传感器对球形装药在密闭容器中壁面处反射压力开展了试验研究^[4]。美国斯坦福研究院和美国航空航天局约翰逊飞行中心在研究冗余电爆阀双起爆器(铈/高氯酸钾)起爆奥克托今主装药失效原因时,利用 $\Phi 3.2\text{mm}$ 的高速工具钢和碳化钨合金霍普金森压杆测量起爆器火焰前锋到达助爆药位置的时间和粒子冲击速度等参数^[5]。

本文利用霍普金森压杆可测压力高、耐冲击等特点,设计了电爆管小容腔动态压力测试方案,为了保证霍普金森压杆和电爆阀活塞加载方式相同,以压杆模拟活塞,测试燃气在压杆端面的反射压力。最后对一种铝/高氯酸钾电爆管在 1mL 总容腔中的输出压力进行测试和分析。

1 霍普金森压杆测压方案

1.1 测试原理

霍普金森压杆基于一维线弹性纵波假定,杆端施加载荷后以恒定速度 C_0 向另一端传播一维弹性应力波,通过测量杆中传播的应力或应变可以计算加载端施加的载荷大小和形式^[6]。利用该原理可以测试爆炸强冲击波加载情况^[7-8]。如图 1 所示。

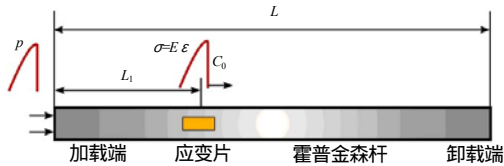


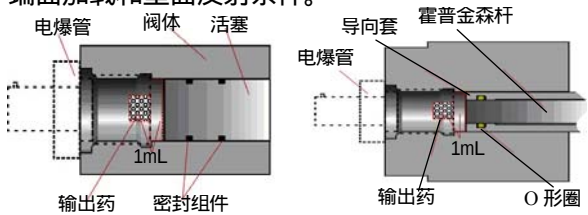
图 1 霍普金森杆测压原理图

Fig.1 Principles of pressure measurement using Hopkinson bar

图 1 中通过杆上粘贴的应变片测量动态应变 ε , 根据 Hooke 定律计算应力 σ , 大小等于压杆端面上的平均加载压力 p 。为了保证弹性应力波条件,压杆材料的弹性极限应大于加载压力。

霍普金森压杆加载端感受到的可以是爆炸燃气

的静压力、滞止压力或反射压力。但电爆阀实际容腔约为 1mL, 很难实现理想的静压力或滞止压力条件, 因此采用反射压力测试方案。另一原因为电爆阀活塞的作用力为燃气反射压力, 如图 2(a) 所示, 采用如图 2(b) 所示的反射压力测试方案能够保证压杆与活塞加载方式相同。由于满足测试要求的压杆直径小于活塞直径, 因此压杆与爆腔之间设计导向套结构, 并使导向套头部和压杆加载端面平齐, 从而使压杆满足端面加载和壁面反射条件。



(a) 电爆阀局部示意图 (b) 反射压力测试原理图

图 2 电爆管反射压力测试方案示意图

Fig.2 Sketch maps of measuring reflected pressure of cartridge

由于应力加载需要一定时间使压杆横截面上应力均匀, 因此应变片位置与加载端应有一定距离 L_1 , 为应力加载提供时间延迟, 如图 1 所示。同时, 这个时间延迟有利于在加载起始时刻将电噪音脉冲从真实的压力或冲击数据中分离^[5]。对于钢杆, 加载延迟时间约为 $25\mu\text{s}$, 一维线弹性波速度 C_0 约为 $5\,000\sim 5\,900\text{m/s}$, 因此通常应保证 $L_1 > 147.5\text{mm}$ 。

加载信号从卸载端返回至应变片位置时, 入射应力波和反射应力波叠加, 导致信号难以区分, 从而决定了有效测试时间 t_r , 如式 (1) 所示^[5]。电爆管爆炸冲击波传播速度为 $2\,000\text{m/s}$ 量级, 电爆阀容腔特征尺度为 10mm 量级, 反射周期为 $10\mu\text{s}$ (100kHz)。通常经过 2~3 个周期容腔内压力达到相对均匀的状态, 即平衡压力, 因此有效时间应大于 $30\mu\text{s}$ 。由于压力信号波动频率 f 大约为 100kHz , 为了抑制色散效应, 压杆半径应满足式 (2)^[7], 对于钢杆, 半径 $r < 5\text{mm}$ 。

$$t_r = \frac{2(L - L_1)}{C_0} \quad (1)$$

$$r < \frac{C_0}{10f} \quad (2)$$

1.2 测试系统

测试系统如图 3 所示。根据电爆管密闭爆发器试验估算的电爆阀小容腔内压力为数百兆帕量级, 因此

霍普金森压杆选用弹性极限为 1 900MPa 的 18Ni 材料, 参数如表 1 所示。

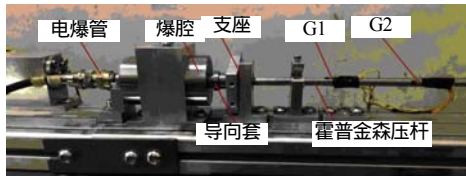


图 3 霍普金森压杆测试系统实物图

Fig.3 Picture of the Hopkinson pressure bar measurement system

表 1 霍普金森压杆材料 18Ni 参数

Tab.1 Parameters of the Hopkinson bar material 18Ni

参数	p_m/MPa	E/GPa	$C_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	μ
数值	1 900	190	5 000	0.27

压杆直径 $d=8\text{mm}$, 能够有效抑制小于 125kHz 信号的色散效应。压杆总长 $L=500\text{mm}$, 为了防止测试失败, 设置 2 组应变片 G1 和 G2, 距离加载端 $L_1=150\text{mm}$, $L_2=250\text{mm}$, 均满足加载延迟要求, 有效测试时间分别为 $140\mu\text{s}$ 和 $100\mu\text{s}$, 满足大于 $30\mu\text{s}$ 的要求。为了保证爆腔在测试期间近似为密闭空间, 导向套与爆腔的配合间隙控制为 0.1mm , 尾部由支座限位支撑。压杆加载端侧面与导向套径向配合间隙约为 $10\sim 20\mu\text{m}$, 间隙内均匀涂一层二硫化钼润滑脂, 距离加载端 2.5mm 位置设置 O 形橡胶圈, 防止高压燃气进入配合间隙形成周向加载和破坏。

18Ni 材料的泊松比 $\mu=0.27$, 根据式 (3) [8] 估算压杆在 G2 处的上升时间 τ_b 为 $2.1\mu\text{s}$ 。

$$\tau_b = 3\sqrt{\mu^2 \frac{L_2}{d} \frac{d}{C_0}} \quad (3)$$

应变片栅长 $\delta=3\text{mm}$, 材料为康铜, 弹性应力波速为 $C_1=5\,200\text{m/s}$, 根据式 (4) [4] 估算应变片上升时间 $\tau_s=0.46\mu\text{s}$ 。

$$\tau_s = \frac{0.8\delta}{C_1} \quad (4)$$

应变测试仪频响 100kHz , 对阶跃信号的上升时间 $\tau_g=3.33\mu\text{s}$ 。根据式 (5) 计算得到测试系统的上升时间 $\tau=3.96\mu\text{s}$, 满足小于 $10\mu\text{s}$ 的要求。应变片动态应变 $\varepsilon(t)$ 和测试电压信号 $U_0(t)$ 的关系如式 (6) 所示, 结合 Hooke 定律得到压杆应力 $\sigma(t)$ 和测试电压 $U_0(t)$ 的换算关系, 如式 (7) 所示。

$$\tau = \sqrt{\tau_b^2 + \tau_s^2 + \tau_g^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2U_0(t)}{U_b K_s K_g} \quad (6)$$

$$\sigma(t) = E \frac{2U_0(t)}{U_b K_s K_g} \quad (7)$$

式 (6) ~ (7) 中: 桥压 $U_b=2\text{V}$; 应变片灵敏度系数 $K_s=2$; 应变测试仪增益 $K_g=100$ 。

2 电爆管输出压力测试和分析

针对一种输出药为 350mg 铝/高氯酸钾电爆管, 测试其在 1mL 总容腔中的输出压力。其中电爆管装药占据 0.25mL 体积, 另外 0.75mL 自由容积通过压杆端面至电爆管出口的距离保证, 如图 2 所示, 容积误差小于 1.5%。图 4 所示为同次试验 G1 和 G2 测试的应力变化, 可以看出 G1 比 G2 提前 $20.03\mu\text{s}$ 达到应力峰值, 接收到卸载端反射的拉伸应力信号滞后 $20.6\mu\text{s}$, 理论值约为 $20.0\mu\text{s}$; G1 和 G2 有效测试时间分别约为 $140\mu\text{s}$ 和 $100\mu\text{s}$, 也与一维线弹性应力波理论值一致, 表明应变片响应和数据采集正常。

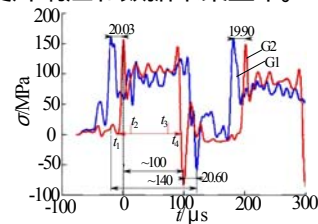


图 4 2 组应变片测试结果对比

Fig.4 Comparison of the signals of the two strain gauges

由于试验无法保证压杆绝对声绝缘, 电爆管起爆后产生的振动信号沿金属工装最先到达应变片位置, 其中距离加载端较远的应变片组 G2 测试的振动较小。随后爆炸冲击波作用于压杆端面发生壁面发射, 应力上升, 并沿压杆传播一维线弹性应力波。加载应力到达卸载端后形成拉伸波反射, 当反射波达到应变片位置时, 测试的信号为入射波和反射波叠加的结果。反射波到达加载端时, 压杆开始具有整体运动速度, 测试的应力波信息不再能够表征电爆管在固定容腔中的输出特性。在爆腔内部, 冲击波在电爆管底部和压杆加载端面之间反射, 每反射一次, 压力更趋于均匀[8]。在压杆有效测试时间内, 压力振幅减小, 但无下降趋势; 另一方面, 导向套头部端面和侧向均出现严重烧蚀和破坏, 而压杆仅端面有明显烧蚀破坏痕迹, 但侧向无明显烧蚀痕迹, 表明压杆、导向套与爆腔之间的配合设计满足预定的密封要求。

由于压力具有显著的波动特性, 因此引入 3 个平

均压力综合表征燃气作用水平。

$$p_{i,j} = \frac{\int_{t_i}^{t_j} \sigma dt}{t_j - t_i} \quad (8)$$

式(8)中：积分项为燃气单位面积冲量，压力 p 的下标 (i,j) 分别为 $(1,2)$ 、 $(1,4)$ 、 $(2,3)$ ，表示3个时间段内的平均压力。如图4所示， t_1 、 t_4 分别为应力(加载压力)从0开始上升和下降至0的时刻，时间差与有效测试时间近似相等； $t_2=t_1+20\mu\text{s}$ ，用于表征电爆阀工作时活塞(50mm)加载应力返回至加载端的时刻； $t_3=t_4-20\mu\text{s}$ ，该 $20\mu\text{s}$ 内压力下降前的波动较为显著。

针对1mL总容腔重复试验，图5给出了其中5次试验应变片G2的测试结果。可以看出，应力上升、下降以及波动特征一致性较好。表2统计了峰值压力、压力上升时间和平均压力，5次测试的峰值压力平均值为147.5MPa，上升时间 $6.8\mu\text{s}$ ，3类平均压力均值分别为 $p_{1,2}=94.9\text{MPa}$ 、 $p_{1,4}=100.5\text{MPa}$ 和 $p_{2,3}=104\text{MPa}$ 。其中， $p_{2,3}$ 消除了压力上升和下降阶段波动的影响，标准差和相对偏差最小，因此以其均值表征燃气平衡压力，即104MPa。

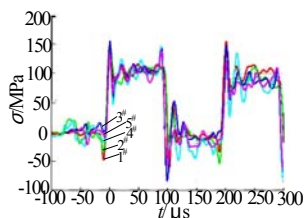


图5 电爆管加载应力曲线

Fig.5 Load stress histories of the cartridge

表2 电爆管在1mL容腔中压力输出特性

Tab.2 Output pressures of the cartridges in 1mL chamber

试验 次序	峰值压 力/MPa	上升时 间/ μs	平均压力/MPa		
			$p_{1,2}$	$p_{2,3}$	$p_{1,4}$
1 [#]	155.4	6.7	101	104	102.8
2 [#]	148.7	7.3	96.3	104	101
3 [#]	156.9	8.3	82.4	106	101
4 [#]	140.8	5.7	84.7	104	98
5 [#]	135.6	6.0	110	102	99.7
均值	147.5	6.8	94.9	104	100.5
标准差	9.2	1.04	11.5	1.4	1.8
相对偏差/%	5.0	11.7	9.6	0.77	1.3

该型电爆管27mL标准密闭爆发器试验所测峰值为 $(7.4\pm 0.6)\text{MPa}$ ，根据换算关系式 $pV=\text{const}$ ，预估的输出压力峰值为 $(199.8\pm 16.2)\text{MPa}$ 。由于传感器频响为2kHz，无法反映密闭爆发器内压力波动现象，所测压力峰值实际表征的是平衡压力，而压力快速衰减是由于热量损失和产物凝结。因此，根据标准密闭爆发器试验的换算值约为小容腔实测值104MPa的2倍。

试验表明霍普金森压杆满足电爆管小容腔测试需求，方法可行，结果一致性较好。后续将增加测试样本，减小随机误差；通过减小压杆直径和增加应变测试仪频响提高时间分辨率；针对不同容积小容腔开展测试，获得电爆管输出压力随容积变化的规律。

3 结论

针对电爆管密闭爆发器试验和传统压力传感器测试的不足，设计了一种抗冲击、耐烧蚀、可重复使用的霍普金森压杆式反射压力传感器，可测压力上限1900MPa，频率上限125kHz。利用设计的传感器和试验方案测试了一种输出药为350mg铝/高氯酸钾的电爆管在1mL容腔中的输出压力。测试结果一致性较好，冲击波反射压力峰值约为147.5MPa，上升时间 $6.8\mu\text{s}$ ，平衡压力104MPa，比标准密闭爆发器试验换算压力约低一半。

参考文献：

- [1] A Dibbern, W Sipes, M Hagopian. Implications of dynamic pressure transducer mounting variations on measurements in pyrotechnic test apparatus[R]. AIAA 2009-4992, 2009.
- [2] 陈栋, 邓坤秀, 李佳, 等. 小型电爆阀中火工品输出压力测试方法研究[J]. 火工品, 2017(6): 45-48.
- [3] R D Dick, J D Williams, X J Wang, et al. Measurement of pressure from explosives in a closed chamber and the free field[R]. ARL-CR-309, 1996.
- [4] 张德志, 李焰, 钟方平, 等. 冲击波壁面反射压力的压杆测试法[J]. 兵工学报, 2007, 28(10): 1257-1260.
- [5] M A Groethe, S H McDougale, R L Saulsberry. Measurement of debris in the flow from pyrotechnic reactions using an instrumented hopkinson pressure bar[R]. AIAA 2008-4800, 2008.
- [6] 卢芳云, 陈荣, 林玉亮, 等. 霍普金森压杆实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] 朱明武, 梁人杰, 柳光辽, 等. 动压测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [8] Huang Zhengping, He Yuanhang. Explosion measurement techniques[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.