

烟箱法测试固体推进剂羽烟光学透过率

张劲民, 袁 华, 何铁山, 刘俊峰

(中国航天科技集团公司四院四十二所, 湖北 襄樊 441003)

摘 要: 为了准确评价推进剂的羽烟水平, 采用美军 SCF (Signature Characterization Facility) 烟箱法的原理, 研制了推进剂环境实验箱以及可见光、近、中、远红外透过率测试系统。利用该系统进行了透过率测试, 系统测试精度小于 3%。制定了羽烟光学透过率测试标准, 据此对不同配方的推进剂一次烟、二次烟进行了研究, 结果表明, 一次烟的光学透过率随铝粉含量增加而降低, 而二次烟的光学透过率主要与 AP 含量密切相关, 产生几率与环境温湿度有关。

关键词: 固体推进剂; 特征信号; 羽烟; 测试装置

中图分类号: TJ 55; V 512

文献标识码: A

文章编号: 1007-7812(2005)01-0012-03

Measurement of the Signal Transmittance of Solid Propellant Plume with Smoke-box Method

ZHANG Jin-min, YUAN Hua, HE Tie-shan, LIU Jun-feng

(The 42nd Institute of the Fourth Academy of CAS, Xiangan 441003, China)

Abstract A signal (including visible light, near mid-far infrared radiation) transmittance measuring system and a smoke-box were studied and established to evaluate the signature of solid propellant formulation base on the framework of SCF (Signature Characterization Facility). In order to validate this system, a number of tests performed by adopting different propellant formulations under different experimental conditions. The result shows that the testing accuracy of the system is less than 3%. Based on the experimental data, a standard to characterize the signals transmittance of primary and secondary smoke has been established. The results indicate that the signal transmittance decreases with increasing the content of Al powder for primary smoke and closely relates to the content of AP in propellant formulation for secondary smoke, and the occurrence of secondary smoke is related to the temperature and humidity in the smoke-box.

Key words: solid propellant; signature transmittance; plume; measuring apparatus

引 言

衡量推进剂的烟雾水平, 一般采用它对制导信号如微波、红外、激光、可见光的衰减即信号透过率进行表征, 测试方法通常分为两大类: 开放试车法(或风道法)和烟箱法^[1]。

法国和英国主要采用风道和开放试车的方式, 测试系统光源为可见光和近红外(经过调制), 采用窄带滤光后模拟制导信号。美国使用 SCF 标准烟箱法进行配方研究, 可控环境箱 5.96 m × 1.58 m × 2.08 m, 试验采用缩比发动机, 装药量为 70 g, 采用无烟点火剂点火, 测试精度达到 5%。测试系统包括: 200 W (50 Hz) 卤钨灯、硅二极管探测器、多个

不同谱段的滤光片、粒度分析仪(0.3~10 μm)、傅立叶干涉光谱仪(0.5~25 μm)等。

国内早期多使用透明窗密闭燃烧器测试推进剂及其绝热层、衬层烟雾的光学透过率^[2,3]。该方法所需样品少, 制样要求简单, 操作方便, 费用小。但是, 测量时由于加热温度范围有限(1000 以下), 无法达到发动机工作的温度; 烟室中对材料直接加热, 升温速度有限, 不能充分反映样品在发动机中的实际情况。对不同药量的样品进行测试, 发现与朗贝尔定律不吻合。所以, 该方法对配方研制的直接指导作用有待进一步论证。

此外, 动态激光粒度仪^[4]也被应用于表征推进剂烟雾的粒度、浓度等特性, 也适用于分析二次烟的演进规律。

收稿日期: 2004-04-12

基金项目: 固体推进剂特征信号检测与评估研究(413280308)

作者简介: 张劲民(1968-), 男, 高级工程师, 从事固体推进剂特征信号检测与表征技术研究。

国内风道法透过率测试方法发展较为成熟^[2,3], 开展了比较全面的研究工作, 建立了相应的国军标测试方法。风道法在测试时, 烟雾的生成、扩散、凝聚等现象与真实的飞行状态接近, 较真实地模拟了发动机的工作情况。但由于测试只能在发动机工作的短短几秒内进行, 烟雾因为紊流的存在而分布不均, 重现性差, 所以该方法精度不高; 并且因为该方法只能测试发动机工作阶段的光学透过率, 而二次烟的产生一般在发动机工作结束几秒钟以后出现, 所以该方法不能用于二次烟的测试。

相对于上面几种测试手段, 烟箱法有其特殊的优点, 如受环境影响小、精度高、成本低、温湿度可控, 可以测试二次烟等, 尤其在推进剂配方研制阶段用途很广。作者研制了发动机环境试验箱, 并进行了测试方法的研究工作, 制定了测试方法。

1 测试系统研制

中国航天科技集团公司四院四十二所于“九五”期间仿照美军 SCF 烟箱, 建立了发动机环境试验箱, 容积约 19.6 m³, 是国内最大的推进剂环境试验箱, 并在此基础上研制了烟雾可见光、近、中、远红外透过率测试系统。图 1 是测试系统示意图。

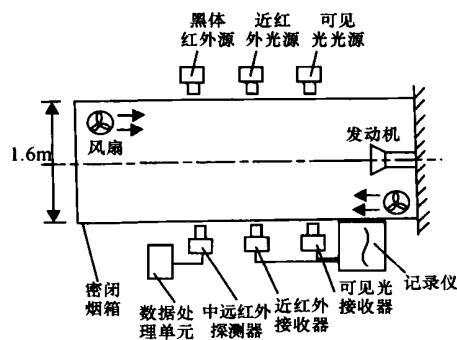


图 1 烟箱法羽烟透过率测试装置示意图

Fig. 1 Signal transmittance measuring system used in the smoke-box method

1.1 环境实验箱

环境温度箱主要包括箱体和温湿度调节单元。前者还包括电气线路、发动机台架、风扇、加热除雾装置(防止在探测窗口凝结烟雾而造成测试误差)等; 后者包括加热、制冷、加湿、排风、测控仪表等设备。烟箱温度调节范围为室温以下 10 至室温以上 15, 湿度为 30% ~ 95% RH。

1.2 缩比发动机

为了适应烟箱的承受能力及烟雾浓度等要求,

设计出 $\Phi 36$ mm 缩比发动机, 装药量约为 70 g, 肉厚 6 mm; 为避免点火药烟雾产生的误差, 采用硝化棉无烟点火药, 药量约 2 g。经过发动机装药、试车等考核, 证明该设计合理, 工作安全可靠, 能作为复合固体推进剂特征信号测试的标准发动机。

1.3 光学透过率测试系统

1.3.1 可见光与近红外测试系统

可见光与近红外测试系统组成基本相同, 如图 2 所示。光源选碘钨灯, 光束经光阑衍射为近似点光源, 经透镜后变为平行光, 入射烟箱。经烟雾衰减后, 依次通过减光板、滤光片、透镜、漫射器, 到达探测器。减光板对各波段的衰减相同, 可以降低光强, 避免探测器输出饱和, 并且可以对系统进行校正; 根据制导信号选取波长为 0.9 μm 和 1.06 μm 的两种窄带滤光片; 漫射器为探测器提供均匀输入, 避免当光束或探测设备震动时位移偏差而产生的误差; 探测器选用硅光电二极管; 前置放大器对探测器输出的电流进行放大, 放大电路原理图见图 3; 数据采集为记录仪与计算机接口两路可选。

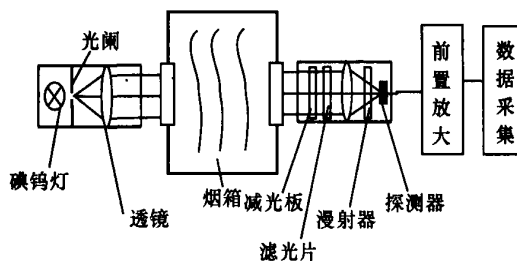


图 2 可见光与近红外烟雾透过率测试系统

Fig. 2 The system of measuring the visible light and near IR transmittance of smoke

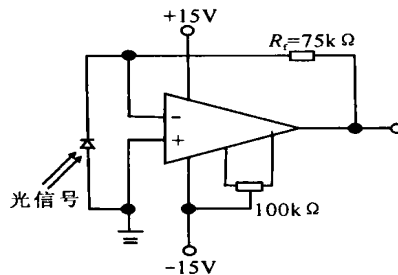


图 3 探测器前置放大器电路

Fig. 3 Head amplifier circuit of the detector

1.3.2 中、远红外测试系统^[5]

中远红外测试系统见图 4, 辐射源为标准黑体; 调制盘将辐射信号调制为某一频率的交流信号, 这样可避免因高温烟雾而产生的红外辐射测试误差; 中红外波段选取 3~ 5 μm , 采用光伏型碲化铟 (InSb) 红外探测器; 远红外波段选取 8~ 12 μm , 采

用光导型碲镉汞 (MCT) 探测器, 前置放大器将探测器输出的只有几十微伏的信号放大; 选频放大器选通已调制的信号, 滤除其他信号, 例如工频干扰信号和背景直流信号等; 放大后的信号为直流电压信号, 输出至计算机数据采集卡。采集卡的采样频率为 1000 Hz, 计算机接收数据后调用红外辐射标定曲线, 将电压信号转换为辐射强度打印输出。

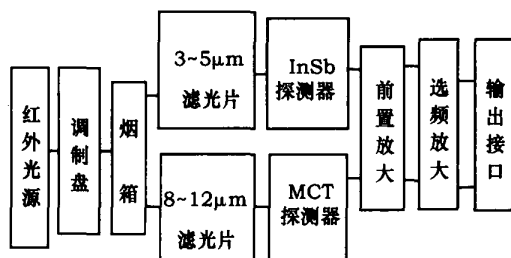


图 4 中、远红外烟雾透过率测试系统

Fig 4 Measuring system of the mid and far IR transmittance of smoke

2 试验结果与数据分析

综合几年来烟箱法的测试经验, 并对烟箱的试验条件进行了规范化, 使之便于操作、测试, 制定了《固体火箭发动机羽烟光学透过率测试方法》。该方法主要规定了以下内容: 测试用仪器、发动机、点火药、环境温湿度的控制等; 一次烟起止时间的判定及透过率的计算; 二次烟起止时间的判定及透过率的计算。一般推进剂的测试结果如图 5 所示。

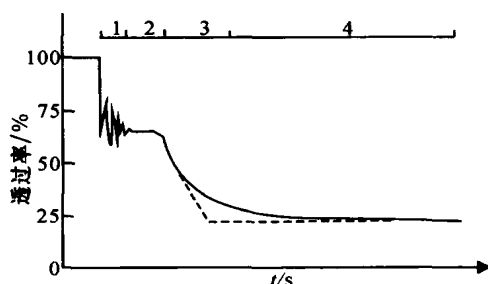


图 5 烟箱法测试光学透过率的测试结果

Fig 5 The optical signal transmittance curve with time

图中, 阶段 1 是点火后的紊流稳定阶段, 烟气经风扇逐步混匀, 透过率的波动渐渐变小, 持续时间一般在 10 s 以内。阶段 2 是稳定后的一次烟, 这两个阶段的烟雾主要成分是金属氧化物、碳黑等固、液相颗粒。如果温湿度合适, 在约 20 s 以后, 燃烧产物中的 HCl 气体就会与空气中的水气结合, 形成 H₂O 和 HCl 的共沸液滴, 即二次烟 (阶段 3), 随着液滴数量

和尺寸的增长, 在阶段 4 二次烟达到最大浓度。

采用该方法进行了透过率测试试验及数据处理, 部分结果见表 1 和表 2 (温度为 29~ 30 , 湿度为 80% RH)。从表 1、2 中可见, 烟箱法测试烟雾透过率的精度较高, 小于 3%。同时, 还进行了一次烟、二次烟的透过率与配方关系、二次烟的演进规律等研究内容。

结果表明, 一次烟水平的最重要影响因素为配方铝粉含量, 若以铝粉含量表征烟雾浓度, 其结果与朗贝尔定律吻合; 二次烟水平的影响因素主要是配方中氯元素 (主要由 AP 引入) 的含量; 而二次烟的发生几率与湿度关系最大, 在进行的 19 发试验中 (温度为 28~ 30), 湿度大于 70% 的 10 发均出现明显的二次烟, 湿度小于 40% 的 9 发则没有二次烟或者不明显。

表 1 烟箱法光学透过率测试结果 (一次烟)

Table 1 Results of measuring the optical signal transmittance primary smoke with the smoke-box method

配方	含量/%		可见光透过率/%		近红外透过率/%	
	A1	AP	均值	精度	均值	精度
1	1	51.5	81.20	0.99	91.60	1.93
2	6	51.5	37.20	2.13	54.50	2.28
3	1	54.0	79.20	0.18	89.67	0.63
4	1	37.0	80.05	0.42	90.69	0.70
5	3	52.0	51.90	2.45	72.08	2.73

表 2 烟箱法光学透过率测试结果 (二次烟)

Table 2 Results of measuring the optical signal transmittance of secondary smoke with the smoke-box method

配方	含量/%		可见光透过率/%		近红外透过率/%	
	A1	AP	均值	精度	均值	精度
6	1	37	68.87	0.55	91.68	1.10
7	1	53	66.42	0.67	89.07	0.44
8	3	53	43.84	1.11	72.26	0.77

为了深入开展二次烟的演进规律, 下一步还可以利用动态激光粒度仪进行烟雾颗粒的粒度、浓度、分布等方面的研究工作。

3 结论

(1) 本系统测试一次烟、二次烟的精度均小于 3%, 使用性能良好。 (下转 21 页)

HM X 配方进行了对比, 结果如表 5 所示。添加 CL-20、FOX-12、DN TF 的推进剂感度试验结果均在双基和改性双基正常范围内。

表 5 表 1 配方的机械感度

Table 5 Mechanical sensitivity of the formulations in table 1

编号	高能 添加剂	含量 /%	摩擦感度 /%	H_{50} /cm
GL-178	HM X	50		
GL-236	CL-20	50	34	34.2
GL-237	FOX-12	50	16	26.9
GL-238	DN TF	50	14	24.6

注: 试验温度为 16

2.5 安定性试验

用甲基紫试验研究推进剂的安定性, 试验结果如表 6 所示。

表 6 表 1 所示配方的安定性

Table 6 Methyl violet test of the formulations in table 1

编号	高能 添加剂	含量 /%	高能 添加剂	含量 /%	甲基紫变色 时间/m in	燃爆 实验
GL-178	HM X	50	HM X	50	70	5 h 不爆
GL-236	CL-20	50	CL-20	50	80	5 h 不爆
GL-237	FOX-12	50	FOX-12	50	45	5 h 不爆
GL-238	DN TF	50	DN TF	50	55	5 h 不爆

由表 6 可见, 添加 CL-20 后推进剂的甲基紫安定性优于 HM X 基础配方; 添加 FOX-12、DN TF 后推进剂的甲基紫安定性较低, 可能是杂质所致, 但爆燃实验均为 5 h 不爆。

2.6 讨论

上述试验所用工艺能够保证完成添加 CL-20、FOX-12、DN TF 的改性双基推进剂样品制造和工艺过程的安全性。安定性试验结果表明, 所制得的推进剂的安定性符合双基推进剂的基本要求。但是添加

CL-20、DN TF 的改性双基推进剂, 其燃速变化规律与添加 HM X 和 FOX-12 改性双基推进剂相反, 试验结果表明, 添加 HM X 后推进剂的燃速降低, 平台向低压移动^[5], 与 HM X 相比, 添加 CL-20、DN TF 的改性双基推进剂的燃速比前者提高 5~10 mm/s (12~22 MPa), 所以存在两种可能性, 一是 CL-20、DN TF 本身有提高燃速的作用; 二是 CL-20、DN TF 和 HM X 在推进剂中的燃烧机理不同。这两种可能性是今后研究工作需要解决的问题。

3 结 论

(1) 在实验配方中 CL-20、FOX-12、DN TF 表现了较好的燃烧性能, 压力指数达到了工程应用的要求。

(2) 添加 CL-20 推进剂的能量最高, DN TF 次之, FOX-12 最低。这些推进剂的感度和安定性可以保证其试制时的安全。

参考文献

- [1] 郑剑 新型含能材料——CL-20[J] 推进技术, 1994, 72(1): 65-72
- [2] 胡焕性, 张志忠, 赵凤起, 等 高能量密度材料 3, 4-二硝基咪唑基氧化咪唑性能及其应用研究[J] 兵工学报, 2004, 25(2): 155-158
- [3] 王亲会 DN TF 基熔铸炸药的性能研究[J] 火炸药学报, 2003, 26(3): 57-59
- [4] 陈鲁英, 杨培进, 张林军, 等 CL-20 炸药性能研究[J] 火炸药学报, 2003, 26(3): 65-67
- [5] 王江宁 双基和改性双基推进剂催化燃烧规律研究[D] 北京: 北京理工大学, 2004

(上接第 14 页)

(2) 一次烟透过率随铝粉含量的增加而降低。

(3) 二次烟的透过率与 AP 含量密切相关, 产生几率与温湿度有关。

(4) 因为本方法的测试结果与国军标所规定的风道法在原理及实验条件上存在一定差异, 下一步应对这两种方法进行对比研究, 基于朗贝尔定律找出两者数据之间的对比关系。

参考文献

- [1] A 达维纳 固体火箭推进技术[M] 张德雄译 北京: 宇

航出版社, 1997.

- [2] 王宏, 王吉贵, 王林梅 固体推进剂包覆层烟雾测试与表征技术研究[J] 火炸药学报, 2001, 24(3): 60-61
- [3] 邹德荣, 王宏, 刘桂生, 等 烧蚀材料烟雾信号测试研究[J] 特种橡胶制品, 2001, (2): 40-42
- [4] 盛德仁 激光角散射诊断气固两相流粒度及浓度的研究[J] 激光技术, 2000, (6): 163-166
- [5] 克利克苏诺夫, 红外技术原理手册[M] 俞福堂, 孙星南译 北京: 国防工业出版社, 1986
- [6] 徐根兴 目标和环境的光学特性[M] 北京: 宇航出版社, 1995