文章编号：1002-2082(2009)05-0864-05

固体发动机羽烟的激光透过率测试

陈胜石，宁子立，欧秋晔，陈文胜，纪 明，高教波，薛常佳
（西安应用光学研究所，陕西 西安 710065）

摘 要：为获得羽烟对激光透过率的影响，用烟箱法对2种配方的缩比发动机羽烟在1.06 μm、10.6 μm激光波段的透过率进行测试。采用1.064 μm激光调制发射、接收、数据采集系统对1.06 μm激光波段烟雾透过率测试；用黑体、光谱辐射计、数据采集系统可测出2 μm～13 μm的光学透过率，从中提出10.6 μm激光波段烟雾透过率，得到不同推进剂配方、不同烟雾浓度情况下10.6 μm光波和1.06 μm光波的烟雾透过率测试数据。烟箱1.8 m烟道上的测试数据表明：配方2推进剂优于配方1推进剂，10.6 μm光波的烟雾透过率96%～97%大于1.06 μm光波的烟雾透过率92%～93%。

关键词：固体推进剂；发动机羽烟；激光透过率
中图分类号：TN247 **文献标志码**：A

Laser transmittance measurement technology on plume from solid-propellant engine

CHEN Sheng-shi, NING Zi-li, OU Qiu-ye, CHEN Wen-sheng,
JI Ming, GAO Jiao-bo, XUE Chang-jia
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The main performance of hyper-velocity kinetic missile and its solid propellants is described. The mechanism of laser attenuation caused by the plume of solid rocket motor is analyzed. The plume transmittance of two solid-propellant formulations was tested by the aid of a smoke-box when the laser wavebands were 1.06 μm and 10.6 μm. The plume transmittance in 1.06 μm laser was tested with 1.064 μm laser modulation emitting, receiving and data acquisition system. The plume transmittance of 10.6 μm laser was derived after the optical transmittance of 2 μm ～ 13 μm laser was tested with the blackbody radiation source, spectroradiometer and data acquisition system. The tested data indicates that formulation 2 is better than formulation 1, and the plume transmittance 96%～97% of 10.6 μm laser is higher than that 92%～93% of 1.06 μm laser.

Key words: solid propellant; plume of engine; laser transmittance

引言

高速动能导弹是一种利用弹头高速飞行以直接碰撞方式毁伤目标的现代动能武器，结合了精确制导、先进火箭推进等多项现代高技术，并已由大量试验验证了可行性和效能的高技术武器。目前国外已研制出许多高速动能导弹如以PAC-3、THAAD、GBI和标准3为代表的动能拦截导弹，以LOSAT、CKEM和SLD为代表的战术动能导弹和德国的HVM超高速导弹等[1]。美国的LOSAT视线反坦克导弹采用激光指令制导体制，其动能导弹

收稿日期：2009-02-28； **修回日期**：2009-05-10
作者简介：陈胜石(1963－)，男，陕西周至人，博士研究生，西安应用光学研究所高级工程师，主要从事激光制导研究工作。E-mail：css.chshsh@163.com

推进系统的特点:1)单推力助推/续航推进剂药柱一体化设计;2)低特征信号(微烟)XLDB推进剂;3)壳体粘结装药设计使推进剂装填系数最大;4)绝热层为R196EPDM。美国在研制LOSAT导弹武器系统时,最初采用RDX(HMV)取代部分AP的少烟复合推进剂,但在飞行试验中因推进剂排气羽流对激光信号衰减太严重而放弃,后来采用了微烟交联改性双基(XLDB)推进剂,才使激光指令得以穿透烟雾。德国HVM超高速导弹,采用了满足武器系统特征信号要求的少烟高能复合推进剂。加拿大HEMi导弹推进系统(采用单推力固体火箭发动机)也采用了不影响激光驾束制导的少烟高能推进剂。显然,国外都在大力开发各种高能、高燃速、高压然烧稳定和低特征信号的新型固体推进剂。

固体发动机羽烟是固体推进剂在燃烧时产生的烟雾和火焰,羽烟的激光透过率测试是激光制导武器和固体推进剂研制中的重要课题。利用烟箱法测量2种配方助推发动机(缩比)羽烟对1.06 μm和10.6 μm两个激光波长的透过率,并对改进前后助推发动机推进剂羽烟的激光透过率作了比较。

1 固体发动机羽烟对激光的衰减

固体发动机羽烟主要分为一次烟和二次烟。一次烟主要来自推进剂燃烧产生的固体颗粒以及包覆层裂解和燃烧物,主要是金属氧化物和碳黑等固、液相颗粒;二次烟主要指高氯酸铵及硝铵推进剂燃烧产生的氯化氢气体喷出喷管后,在特定的湿度和温度条件下,与空气相结合形成H_2O及HCl的共沸液滴烟云[2]。

由于羽烟中含有由许多固体微粒、液体微粒以及与空气作用形成的人工气溶胶体系,因此当激光入射到羽烟时,羽烟对其产生吸收和散射,吸收作用使得激光的能量发生衰减,散射作用使得激光的传播方向发生偏转,从而使沿原来方向传播的激光能量发生衰减。羽烟对激光的衰减符合"朗伯-比尔"定律[3]:

$$I(\lambda)=I_0(\lambda)\exp[-\mu_e(\lambda)cL] \tag{1}$$

式中:$I(\lambda)$为介质透射光强;$I_0(\lambda)$为介质入射光强;$\mu_e(\lambda)$为质量消光系数;c为介质的平均密度;L为介质内的光程长。由(1)式可得到羽烟的透过率T:

$$T=\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}=\exp[-\mu_e(\lambda)cL] \tag{2}$$

"朗伯-比尔"定律成立的条件是粒子对光的吸收与散射不受周围粒子的影响。这一条件只有当浓度小到一定数值(光谱透过率约大于等于5%)时成立。

2 烟箱法测试固体推进剂羽烟透过率

2.1 测试设备

烟箱[4]尺寸为5.96 m×1.58 m×2.08 m,容积约19.6 m^3。烟箱共有4个测试窗口,其中1个中远红外窗口,波段范围为2 μm ~13 μm;3个可见光测试窗口。

为适应烟箱的承受能力及烟雾浓度要求,采用Φ36 mm缩比发动机,用缩比发动机模拟固体推进剂产生羽烟特征信号。推进剂分别采用35 g和70 g2种不同配方的装药量,测试系统示意图如图1所示。

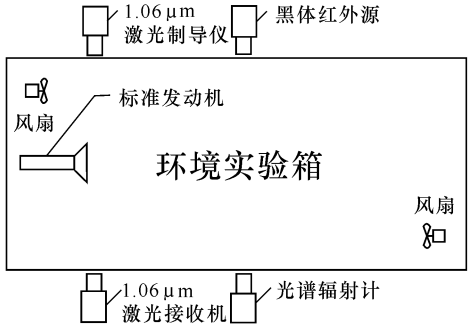

图1 测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test system

2.2 测试仪器

宽谱测试系统 包括SR5000光谱辐射计、SR20锥腔黑体及用于测量2 μm ~13 μm红外光波透过率的数据采集系统(从中提取出10.6 μm激光波段的透过率)。

1.06 μm激光测试系统 包括1.06μm激光发射机、接收机和数据采集系统。用于测量1.06 μm波长激光的发动机羽烟透过率。

2.3 发动机羽烟1.06 μm激光透过率测试数据

现场环境条件:温度28℃,湿度85%~91%。测试仪器采样率1 kHz。进行每发试验时,先启动测试仪器,然后点燃发动机。记录发动机点火前后烟箱内无烟和有烟2种状态下的光强,点火前1.06 μm激光测试系统记录时间约20 s;点火后记录时间约为1 min。将每发数据中有烟和无烟2种状态下的平均接收光强数值作比较,可得出每发烟雾的透过率数值。1.06 μm激光透过率测试数据如表1所示。1.06 μm激光透过率测试曲线如图2~图5。

表 1　1.06 μm 激光透过率测试数据

Table 1　Tested transmittance data of 1.06 μm laser

序号	推进剂配方	装药量/g	透过率/%	平均透过率/%
1	配方 1	70	92.21	92.2
2	配方 2	70	92.42	
3	配方 2	70	92.52	92.4
4	配方 2	70	92.16	
5	配方 2	35	94.23	
6	配方 2	35	92.49	93.8
7	配方 2	35	94.76	
8	配方 1	35	91.90	92.7
9	配方 1	35	93.49	

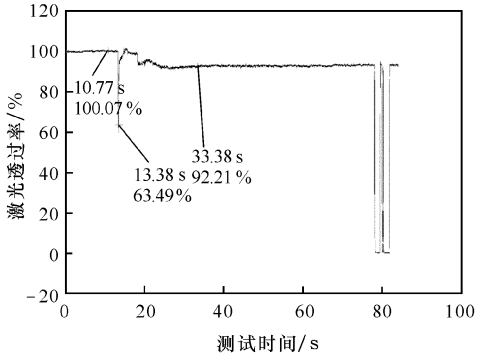

图 2　1.06 μm 激光透过率测试曲线(70 g 配方 1)

Fig. 2　Curve of 1.06 μm laser transmittance (70 g formulation 1)

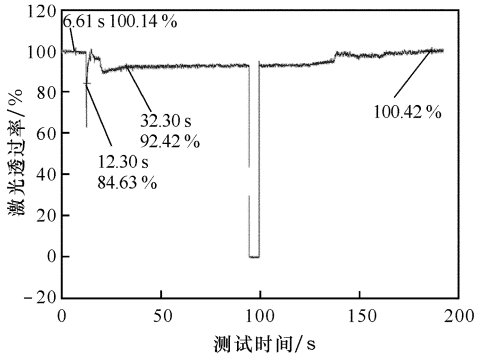

图 3　1.06 μm 激光透过率测试曲线(70 g 配方 2)

Fig. 3　Curve of 1.06 μm laser transmittance (70 g formulation 2)

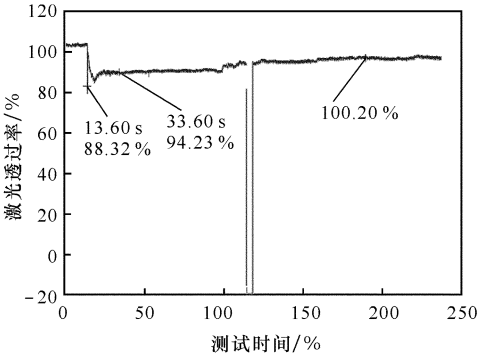

图 4　1.06 μm 激光透过率测试曲线(35 g 配方 2)

Fig. 4　Curve of 1.06 μm laser transmittance (35 g formulation 2)

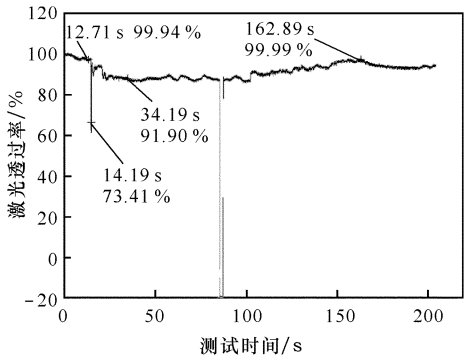

图 5　1.06 μm 激光透过率测试曲线(35 g 配方 1)

Fig. 5　Curve of 1.06 μm laser transmittance (35 g formulation 1)

2.4　发动机羽烟 10.6 μm 激光透过率测试数据

现场环境条件:温度28℃,湿度85%～91%。红外宽谱测试系统采样率选用2 Hz。在试验中发现,由于环境湿度较大,而宽谱测试系统的2个探测器采用液氮制冷,在探测器表面凝结的水气会减弱接收端接收到的信号幅值,对测试的结果带来较大的影响。通过研究、分析,发现水汽的形成对信号的衰减作用有一定规律性,其衰减的幅度是时间的函数,并随时间逐渐增大。因此,在试验过程中宽谱测试系统直接得到的是烟雾和水汽综合影响的透过率(即$T_{烟}\times T_{水汽}$)。宽谱测试烟雾透过率数据的时序图如图6所示。

将求出确定时间段纯水汽的透过率除以试验中得到的烟雾和水汽的综合透过率,即得到纯烟雾的透过率:

$$T_R(\lambda)=\frac{\lambda_{1烟}(\lambda)}{V_{0烟}(\lambda)}\Big/\frac{V_1(\lambda)}{V_0(\lambda)} \tag{3}$$

式中:$V_0(\lambda)$为水汽背景的电压平均值;$V_1(\lambda)$为水汽信号的电压平均值;$V_{0烟}(\lambda)$为烟幕背景的电压平均值;$V_{1烟}(\lambda)$为烟幕信号的电压平均值;$T_R(\lambda)$为烟幕的光谱透过率。10.6 μm 激光波段透过率测试数据见表2所示。10.6 μm 激光波段透过率测试曲线见图7～图10。

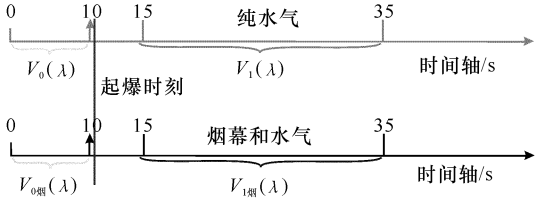

图 6　宽谱测试烟雾透过率数据时序图

Fig. 6　Data sequence for plume transmittance tested with wide spectral system

表2　10.6 μm 激光波段透过率测试数据

Table 2　Tested transmittance data of 10.6 μm laser

序号	推进剂配方	装药量/g	透过率/%	平均透过率/%
1	配方1	70	95.311	95.3
2	配方2	70	95.490	
3	配方2	70	96.742	96.4
4	配方2	70	97.090	
5	配方2	35	97.624	
6	配方2	35	97.236	97.8
7	配方2	35	98.485	
8	配方1	35	96.352	97.01
9	配方1	35	97.681	

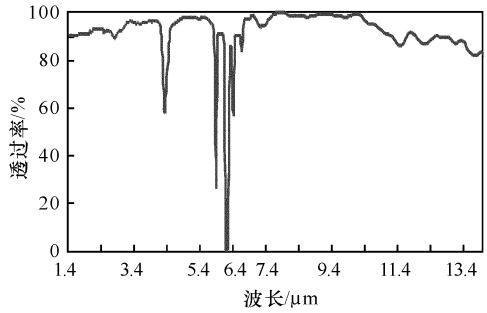

图7　光谱透过率(70 g 配方1)

Fig. 7　Spectral transmittance (70 g formulation 1)

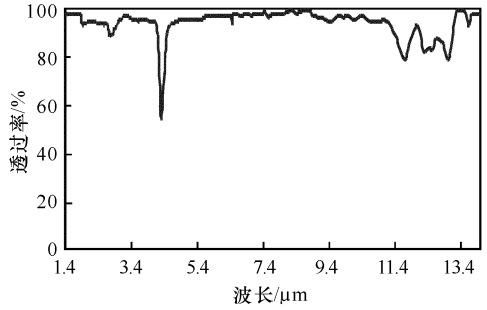

图8　光谱透过率(70 g 配方2)

Fig. 8　Spectral transmittance (70 g formulation 2)

2.5　外场瞬时烟道透过率的推算

理论上质量消光系数不变,由(2)式可知,知道了外场瞬时烟道的浓度和烟程长,即可求出激光的透过率。质量消光系数 $\mu_e(\lambda)$ 的物理意义是指在烟雾粒子以稀薄云团展开时,单位质量烟雾的电磁消光截面积,它仅与烟雾自身的物理化学性质和光电辐射的波长有关,而与烟雾浓度和厚度无关,是烟雾消光性能的首要参数。由(2)式可得:

$$\mu_e(\lambda)=-\frac{\ln(T)}{cL} \tag{4}$$

式中:T 为透过率(%);L 为烟箱的烟程长度(1.8 m);c 为羽烟的烟雾密度(装药量/烟雾容积);烟箱体积为19.6 m^3;$\mu_e(\lambda)$ 为质量消光系数(m^2/g)。由烟箱测试的平均透过率可推算出质量消光系数,计算结果见表3。

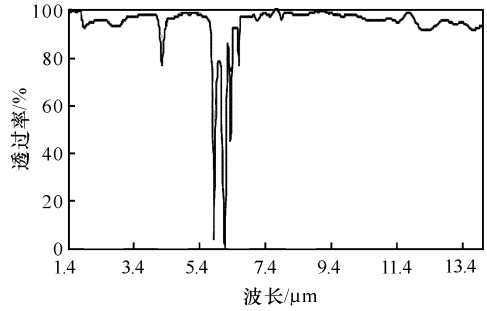

图9　光谱透过率(35 g 配方2)

Fig. 9　Spectral transmittance (35 g formulation 2)

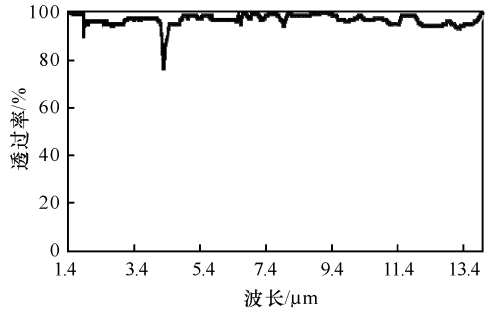

图10　光谱透过率(35 g 配方1)

Fig. 10　Spectral transmittance (35 g formulation 1)

表3　质量消光系数计算结果

Table 3　Calculated results of mass extinction coefficient

烟程	装药	浓度/g·m^{-3}	T 均值		1.06 μm		10.6 μm	
			1.06 μm	10.6 μm	$\mu_e(\lambda)$	$\mu_e(\lambda)$均值	$\mu_e(\lambda)$	$\mu_e(\lambda)$均值
1.8 m	35 g 配方1	1.785	0.927	0.964	0.023 58	0.021 1	0.011 4	0.009 4
	70 g 配方1	3.571	0.92	0.953	0.018 65	0.007 4		
	35 g 配方2	1.785	0.938	0.978	0.019 91	0.016 1	0.006 9	0.006 3
	70 g 配方2	3.571	0.924	0.964	0.012 29	0.005 7		

在计算质量消光系数时会产生一定的误差,其原因是:试验时没有测量每发烟雾浓度,用装药量和烟箱体积的比值作为烟雾浓度,与真实的烟雾浓度有一定差别。另外测试数据中隐含了各种随机因

素的影响(如环境因素、地面振动等),这也会引起一定的测量误差。

3　结束语

分析表1和表2中的透过率数据,从单发数据看,虽然不同状态的缩比发动机形成的羽烟透过率存在数据交错现象,但取平均值后,从总的趋势看,是与理论分析结果相一致的。

1) 推进剂配方2优于配方1,改进后发动机(配方2)羽烟的激光透过率有一定提高。如在35 g装药量时,1.06 μm激光波段对配方1的平均透过率为92.7%,对配方2的平均透过率为93.8%。

2) 对同一波段,烟雾浓度越大,透过率越低。如在采用配方2时,1.06 μm激光波段对70 g的透过率为92.4%,对35 g的透过率为93.8%。

3) 对相同配方、相同烟雾浓度的介质,烟雾对1.06 μm波长的衰减大于对10.6 μm波长的衰减。如在采用配方2、70 g装药量时,1.06 μm波长的平均透过率为92.4%,10.6 μm波长的平均透过率96.4%。

4) 通过烟箱法对固体推进剂质量消光系数计算,还可以进一步计算出激光穿透烟道的长度,为高速动能导弹分析模型提供定量数据。

参考文献:

[1] 莫红军,张海燕.高速动能导弹及超高速导弹用固体火箭推进剂[J].火炸药学报,2005,28(1):1-4.
MO Hong-jun, ZHANG Hai-yan. Solid propellants applying for kinetic or hyper-velocity missiles[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 28(1):1-4. (in Chinese with an English abstract)

[2] 张波,杨坤涛,张南洋生.固体发动机羽烟的激光透过率动态测试[J].激光与红外,2006,36(8):675-677.
ZHANG Bo, YANG Kun-tao, ZHANG Nan-yang-sheng. Laser transmittance dynamic measurement technology on plumes of solid-propellant motor[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(8):675-677. (in Chinese with an English abstract)

[3] 姚禄玖, 高均麟, 肖凯涛, 等. 烟幕理论与测试技术[M].北京:国防工业出版社,2004.
YAO Lu-jiu, GAO Jun-lin, XIAO Kai-tao, et al. Theory and testing technigue of smoke[M]. Beijing: National Defence Press, 2004. (in Chinese)

[4] 张劲民,袁华,何铁山,等.烟箱法测试固体推进剂羽烟光学透过率[J].火炸药学报,2005,28(1):12-14.
ZHANG Jin-min, YUAN Hua, HE Tie-shan, et al. Measurement of the signal transmittance of solid propellant plume with smoke-box method [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 28(1):12-14. (in Chinese with an English abstract)