

降低固体推进剂羽烟红外信号 的技术途径简述

江会平 帅红海

(湖北红星化学研究所,襄樊 441003)

摘要 在分析固体推进剂羽烟红外信号产生原因的基础上,对降低羽烟红外信号的技术途径进行了综述,并就这些途径给推进剂燃烧性能带来的影响进行了讨论。

关键词 固体推进剂 羽烟 红外信号 低特征信号

1 引言

降低固体推进剂的特征信号已成为推进剂发展的一个重要课题^[1-6],国外自60年代后期开始研究,至今方兴未艾。到目前为止,人们关注的特征信号已从最初的可见烟(焰)延伸至包括可见烟和不可见的微波、红外线、紫外线等电磁波信号。红外辐射是一种非常重要的可探测信号,任何温度高于0K的物体都辐射红外线,而且辐射能量随温度的升高而增大。点火后的火箭发动机及其羽烟具有比背景高得多的温度和不同的比辐射率,很容易分辨,而红外线的波长比无线电或微波的波长更短,更能细致地显示目标,因此,红外隐身已成为导弹隐身的一项重要技术。本文从分析固体推进剂羽烟红外辐射产生的原因入手,对降低羽烟红外信号的技术途径进行了综述。

2 固体推进剂羽烟红外信号的成因

2.1 红外辐射的一般概念

红外线是波长范围在 $0.75 \sim 1000\mu\text{m}$ 之间的电磁波,其产生原因是物体的分子或原子受外来刺激或干扰(如放电、受热等)而发生转动或振动能级跃迁,但这些处于激发态的分子或原子很不稳定,很快又回复到较低的能级,同时,辐射出红外线。物体的温度越高,受激的分子或原子越多,红外辐射越强。红外辐射源有两类,一类是能产生连续光谱的热辐射体,如炽热固体或液体;另一类是产生不连续光谱的选择性辐射体,如火焰、热气流、电气放电等^[1-8]。

2.2 火箭发动机中的红外辐射源

火箭发动机中的红外辐射源:一是尾喷管等热发动机部件;二是从喷管排出的推进剂燃气形成的羽烟;三是空气动力加热和来自背景辐射的反辐射。而与推进剂有关的辐

射首先是羽烟及尾喷管等热发动机部件的辐射,其辐射强度取决于材料本身的性质及与之热交换的燃气温度。发动机羽烟温度高、尺寸大,是火箭发动机的主要辐射源。

2.3 固体推进剂羽烟红外辐射的产生

推进剂羽烟的红外辐射,来源于它所包含的凝聚相微粒和气体分子。对固体推进剂而言,排气中的凝聚相微粒主要有 Al_2O_3 和其它金属化合物,有时还含有未完全燃烧的碳粒;气体分子主要有 HCl 、 CO 、 CO_2 、 H_2 、 H_2O 、 N_2 等。 Al_2O_3 等金属化合物或碳粒是热辐射体,能辐射连续的红外光谱,其辐射能量峰值随温度升高而向短波方向移动。气体分子产生红外辐射的前提是在振动过程中发生偶极矩变化。一般来说,三原子以上的分子在振动过程中偶极矩变化较大,红外辐射较严重;极性双原子分子也产生红外辐射,但相对多原子分子要弱得多;分子极性越大,红外辐射越强。 H_2O 、 CO_2 为三原子分子,红外辐射较强。 H_2O 的红外辐射波各波段波长分别为 1.1, 1.38, 1.87, 2.7, 6.3 μm 及 15 μm 以上; CO_2 的辐射波段的波长分别为 2.7, 4.3, 14.5 μm ; CO 和 HCl 的红外辐射很弱, H_2 、 N_2 为对称双原子分子,不产生红外辐射。推进剂燃气从喷口排出后,随着体积的膨胀,温度逐渐降低,但是,排气中一般都含有 CO 、 H_2 等未完全燃烧的产物,它们与空气混合后,发生二次燃烧,形成高温明亮的尾焰,使分子和原子进一步受激,红外辐射大幅度增加。

红外辐射自目标发射出来后,要在大气中传播相当长的距离,除掉几何的发散之外,红外辐射在大气中传输时会有很大的衰减,其中最主要的因素是大气中 H_2O 、 CO_2 、 O_3 等对辐射的吸收,只有在这些气体的吸收带之间的红外辐射能透过大气向远处传输。能透过大气的红外辐射基本上被分割成三个波段:1~2.5 μm (也有说 1.8~2.7 μm)、3~5 μm 、8~13 μm ,这三个波段称为“大气窗口”。目前红外导弹武器的工作波段也是对应这三个大气窗口选择的。因此红外隐身也应针对这三个波段的辐射源采取相应的抑制措施。

3 降低固体推进剂羽烟红外信号的技术途径

根据上面的分析,降低固体推进剂羽烟的红外辐射应从以下两方面入手:一是减少燃气中红外辐射源的浓度;二是降低燃气温度,尤其是抑制未完全燃烧产物的二次燃烧。

3.1 减少燃气中红外辐射源的浓度

3.1.1 减少燃气中固体微粒的浓度

推进剂中常加入铝粉等金属以及作为稳燃剂或弹道调节剂用的金属化合物,致使排气羽烟中含有 Al_2O_3 或其它金属化合物微粒,贫氧推进剂羽烟中还含有碳粒,这些物质都是较强的连续性红外辐射源,红外辐射波主要位于 8~13 μm 波段,极易被长波红外导引头探测。因此推进剂中:一应尽量不用或少用金属或金属化合物,宜改用非金属化合物作为弹道调节剂或稳燃剂;二应有足够的氧平衡,以避免燃气中出现碳粒。

3.1.2 减少燃气中 H_2O 、 CO_2 等多原子气体分子的浓度

减少燃气中 H_2O 、 CO_2 等多原子气体分子的浓度,主要通过引入新的推进剂组分来实现。如高含氮量化合物不仅具有高的生成热,而且使推进剂组分中 C、H 的含量相对降低,燃烧产物中 N_2 的含量增加, H_2O 、 CO_2 的浓度减少。这类物质主要有:富氮粘合剂(如 GAP、BAMO、硝化纤维素),富氮氧化剂(如硝胺、硝基胍、叠氮硝胺、氮杂环化合物),富氮增塑剂(如硝酸酯、叠氮增塑剂),以及其它富氮添加剂等。

3.2 降低燃气温度

3.2.1 降低推进剂的燃烧温度

降低推进剂的燃烧温度：一是选择适当的粘合剂和氧化剂，如硝胺、硝酸铵等；二是在配方中加入致冷剂；三是推进剂的氧平衡要适中，否则氧含量太高，燃温也会升高，而氧含量降低会使 H_2 、 CO 含量增加。

3.2.2 提高发动机燃烧室压力，增加喷喉比

当喷管出口压力一定时，提高燃烧室压力，并相应增加喷喉比，可使燃气热能较多地转化为动能，排气温度降低。

3.2.3 抑制羽烟的二次燃烧

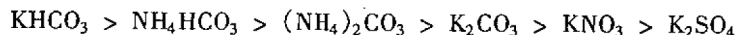
二次燃烧是推进剂羽烟红外辐射加剧的重要原因，抑制二次燃烧能使红外辐射大幅度降低。如英国皇家军械火箭发动机分部对某种硝胺改性双基推进剂羽烟的二次燃烧抑制前后的红外辐射强度进行对比后发现， $3 \sim 5\mu m$ 波段的辐射强度由 $5230W/sr$ 降至 $597W/sr$ ， $8 \sim 13\mu m$ 波段的辐射强度由 $445W/sr$ 降至 $135W/sr$ ^[6]。美国 Mchale 发现双基无烟推进剂的二次燃烧被抑制后，羽烟的红外信号大部分被消除。

二次燃烧是燃气中 H_2 和 CO 与空气中的 O_2 反应产生的。一般认为是通过如下链增长反应完成的：



抑制二次燃烧的方法：一是增加推进剂中的氧含量使燃料燃烧完全；二是在推进剂配方或羽流中加入抑制剂。但增加氧化剂含量将使燃烧温度升高，使燃速和力学性能有所改变，故不是理想的办法。而目前普遍采用的办法是加入少量的添加剂^[9-15]，目前已报道的二次燃烧抑制剂主要有：① 碱金属盐（主要是钾盐），如 K_2SO_4 、 KNO_3 、 K_2CO_3 、 $KHCO_3$ 、 $K_2C_2O_4$ 等无机钾盐和邻苯二甲酸钾、硬酯酸钾、山梨酸钾、六羟基铈酸钠等有机钾盐；② 铵盐，如 $(NH_4)_2CO_3$ 、 NH_4HCO_3 等；③ 胺类，如草酰胺等；④ 有机金属化合物，如 $Pb(C_2H_5)_4$ 、 $Fe(CO)_5$ 等；此外还有有机卤化物。这些抑制剂有些是用作枪炮消焰剂，有些是用作推进剂消焰剂，但二者的抑制原理都是相同的。

美国 Mchale 的研究发现，双基推进剂中加入 3% $KHCO_3$ 、 $K_2C_2O_4$ 、 K_2SO_4 ，二次燃烧被完全抑制。美国 MK66 火箭中使用 K_2SO_4 作为抑制剂，已有效地抑制二次燃烧。据文献 [14] 报道，添加剂对枪炮二次火焰抑制的有效性顺序为：



邻苯二甲酸钾、硬酯酸钾、山梨酸钾、六羟基铈酸钠等是国外枪炮发射药中的新型消焰剂。这些添加剂对火药的均匀性、安定性及对工艺的影响比无机添加剂优越。

关于添加剂抑制二次燃烧的化学机理，报道较多的是钾盐。很多研究表明，钾盐在抑制二次燃烧过程中首先是它经过反应生成气态的 KOH ，通过 KOH 与 H 和 OH 反应来终止 CO 和 H_2 二次燃烧的连锁反应。



其它添加剂的作用机理尚未见报道。

4 降低羽烟红外信号的技术途径对推进剂带来的某些不利影响

4.1 去掉铝粉对燃烧稳定性的影响

推进剂中不含铝粉,将带来燃烧不稳定的问题。目前抑制和消除不稳定燃烧大致有三条途径^[16]:①采用某种抑制振荡燃烧的机械装置,如共振棒、隔板等;②改变推进剂装药设计参数和几何形状;③调整推进剂配方,增加微粒阻尼使声能损耗最大。在少烟无烟推进剂配方中,通常添加TiO₂、SiC、ZrC、Ni₂O₃等难熔金属化合物作为燃烧稳定剂,最近报道添加耐热聚苯并咪唑纤维和酞花菁染料也能抑制不稳定燃烧。在低红外信号推进剂中,选择稳燃剂的原则一是这些化合物用量要少,二是其微粒红外辐射率较低。

4.2 二次燃烧抑制剂对推进剂燃烧性能的影响

某些二次燃烧抑制剂对推进剂燃烧性能会产生不利影响,如平台燃烧可能会因这些抑制剂的加入而改变。

文献[17]报道,在RDX-CMDB推进剂中,用于枪炮发射药的无机钾盐型消焰剂使基础配方的压力指数由0.41上升到0.71~0.79,且随抑制剂含量的增加,对推进剂燃烧性能的影响增大。而非金属化合物对推进剂燃烧性能的不利影响则很小。因此,重要的是寻找非金属抑制剂和消除抑制剂对燃烧性能的不利影响。

5 结论

综上所述,推进剂羽烟红外信号产生的原因是由于燃气中的Al₂O₃等凝聚相微粒和H₂O、CO₂等气体分子在高温下受激,发生转动和振动能级的跃迁,当它们衰变时,辐射出红外线。

降低推进剂羽烟红外辐射的技术途径:一是减少燃气中红外辐射源的浓度,不用或少用金属添加剂,降低产物中H₂O、CO₂的浓度;二是降低燃气温度,尤其是抑制未完全燃烧产物的二次燃烧。

去掉铝粉后要解决推进剂的不稳定燃烧,消除二次燃烧抑制剂对推进剂燃烧性能的不利影响,仍是今后低红外信号推进剂研究的重要课题。

参 考 文 献

- 1 李一苇. 国外低特征信号推进剂的发展. 国防科工委固体推进剂专业组 9410 会议论文, 1994.
- 2 克罗塞 P W 等著. 红外技术基础. 洪怀瑞译. 上海: 科学技术出版社, 1965.
- 3 纪红著. 红外技术基础及应用. 北京: 科学出版社, 1979.
- 4 小哈德逊 R D 著. 红外系统原理. 《红外系统原理》翻译组译. 北京: 国防工业出版社, 1975.
- 5 美国国防部关键技术计划. 中国国防科技信息中心译, 1992.
- 6 Royal Ordnance Rocket Motors Division. Plume Technology, 1991.
- 7 北约空中目标红外辐射模型. 张赛金等编译. 现代防御技术. 1994(5): 40
- 8 李春明. 军用飞机雷达与红外隐身技术综述. 现代防御技术. 1995(2): 20~24
- 9 AIAA75-1233.

- 10 徐海明. 新型消焰剂. 火炸药, 1986(4): 18 ~ 21
- 11 Mchale E T. Flame Inhibition by Potassium Compounds. Combustion and Flame. 1975, 24: 277 ~ 279
- 12 AD-A 114 222.
- 13 AD-A 130 876.
- 14 AD-A 182 641.
- 15 AD-A 952 693.
- 16 张端庆等编. 固体火箭推进剂. 兵器工业出版社, 1991.
- 17 杨栋等. 二次火焰抑制剂对 RDX-CMDB 推进剂压力指数的实验研究. 兵工学报, 1994(2): 16 ~ 19

A REVIEW ON TECHNICAL APPROACHES TO REDUCE INFRA-RED SIGNATURE OF SOLID PROPELLANT PLUME

Jiang Huiping Shuai Honghai

(Red Star Institute of Chemistry, Xiangfan 441003)

ABSTRACT Based on analyzing the origin of infra-red signature of solid propellant plume, the technical approaches to reduce the infra-red signature are systematically reviewed, and some side effects on propellant properties resulted from these approaches are discussed.

KEYWORDS infra-red signature, low signature, plume, solid propellant.



作者简介 江会平(Jiang Huiping), 30岁, 高级工程师。1987年毕业于国防科技大学复合固体推进剂专业, 1990年在该校获应用化学专业硕士学位, 之后一直在湖北红星化学研究所从事复合固体推进剂研究。曾从事过高分子材料合成、推进剂力学及贮存性能研究、推进剂配方研究。现为研究室副主任。已编写科技报告30多篇, 在国内专业学术会议或刊物上发表文章八篇, 其中“国外含 HMX 推进剂的弹道调节剂研究综述”一文被《中国科学技术文库》收集。