

文章编号: 1003-1480(2025)01-0013-05

靶机用红外指示器的性能提升研究

李积珍, 冯帅, 贾博, 李钊, 杨军, 李晓平, 高艳侠

(西安北方庆华机电有限公司, 陕西 西安, 710025)

摘要: 针对传统靶机用红外指示器在辐射强度、稳定性和持续时间方面存在的不足, 对指示器的药剂配方、装药结构和装药密度进行了优化, 设计了一种新型红外指示器。通过环境试验和发火试验, 验证了新型红外指示器在经受振动、发射冲击和温度冲击后的可靠性, 并测试了其红外辐射性能。结果表明: 新型红外指示器在中波段(3.6~4.9 μm)的辐射强度达到1200 W/sr, 稳定辐射时间达到120 s, 离散度控制在90 W/sr以内, 且无团聚物现象, 有效模拟了轻型战斗机的红外辐射特征。本研究的优化设计显著提升了靶机用红外指示器的性能, 为提高空军部队实弹打靶训练的模拟真实性和安全性提供了技术支持。

关键词: 靶机; 红外指示器; 红外辐射; 离散度

中图分类号: TJ45+9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.003

Study on the Performance Improvement of Infrared Indicators for Target Aircraft

LI Ji-zhen, FENG Shuai, JIA Bo, LI Zhao, YANG Jun, LI Xiao-ping, GAO Yan-xia

(Xi'an North Qinghua Electromechanical Co. Ltd., Xi'an, 710025)

Abstract: To address the issues of low radiation intensity, poor radiation stability, and short duration associated with traditional target drone's infrared indicators, this study conducted a systematic optimization of the indicator's pyrotechnic composition formula, charge structure, and charge density, then a new type of infrared indicator was designed. The reliability of the new infrared indicator was verified after environmental tests and firing test, and its infrared radiation performance was tested. The results show that the new infrared indicator has a radiation intensity of 1200 W/sr in the medium waveband (3.6 ~4.9 μm), a stable radiation time of 120 s, a dispersion within 90 W/sr, and no agglomeration, which effectively simulates the infrared radiation characteristics of light fighter aircraft. The optimization design in this study significantly enhances the performance of the target drone's infrared indicator, providing technical support for improving the authenticity and safety of live ammunition training for air force units.

Key words: Target drone; Infrared indicator; Infrared radiation; Dispersion

红外指示器^[1]在工作时能产生特定波段及强度的红外辐射信号, 可真实模拟轻型战斗机和直升机尾焰红外特征, 被广泛应用于空军部队的实弹打靶训练中。随着载机型号不断升级和实战化水平的提高, 对于红外指示器的功能稳定性、模拟真实性提出了更高的要求。如何在提高指示器辐射强度的同时保持辐射稳定

性已成为红外指示器面临的主要技术难题。M.Chen等^[2]通过对比镁铝合金和镁粉与聚四氟乙烯的反应过程, 发现镁铝合金对红外辐射性能有较为明显的提升。Koch^[3]通过在MTV型诱饵材料中添加硅和三氧化二铁对聚四氟乙烯材料进行优化, 发现两种添加剂可以降低燃烧速率和提高燃烧稳定性。李世祥^[4]对燃烧反

收稿日期: 2024-08-27

作者简介: 李积珍(1983-), 男, 正高级工程师, 主要从事红外干扰、红外指示类产品的研制、研究工作。

引用本文: 李积珍, 冯帅, 贾博, 等. 靶机用红外指示器的性能提升研究[J]. 火工品, 2025(1): 13-17.

应过程中的氧化剂进行研究,发现 TiCl_4 可以提高中波段的辐射强度。

综上所述, TiCl_4 、 Fe_2O_3 、Al 等添加物对指示器的红外辐射性能有着明显的提升效果。本文通过对传统红外指示器的药剂配方、装药结构、装药密度进行优化,设计出一种新型红外指示器。依据打靶环境需求对新型指示器的抗振动、发射冲击、温度冲击能力进行考核,通过地面静态试验对指示器的发火性能、辐射强度和辐射稳定性进行了测试。

1 设计部分

1.1 指示器结构设计

红外指示器主要由整流罩、底座、管壳、主装药、发火组件等组成,结构如图 1 所示。

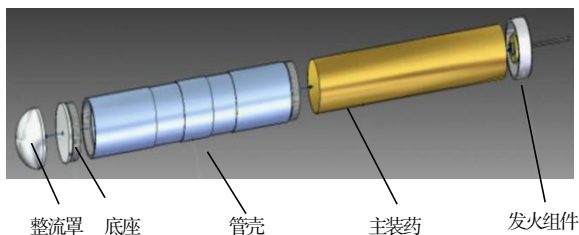


图 1 红外指示器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of infrared indicator

红外指示器主要配用于亚音速、超音速等无人靶机,通过连接装置挂载于靶机机翼下方。地面控制站根据时机向靶机发送点火指令,靶机在接收到发火指令后向红外指示器通入规定电流,指示器点火,并点燃主装药,发火组件被剪切掉,火焰向外输出,产生稳定的红外辐射,达到模拟轻型战斗机和直升机飞行时的红外特征效果。

1.2 药剂配方设计

轻型战斗机的尾焰温度较高,红外辐射能量主要集中在中波段 ($3.6 \sim 4.9 \mu\text{m}$)。指示器的主装药为传统的 MTV 药剂 (镁/聚四氟乙烯),在中波段的平均辐射强度为 700 W/sr 。要真实模拟战斗机的红外特征,就需要提高指示器在中波段的辐射强度。由于靶机的挂载能力有限,指示器的装药量受到限制,因此需对药剂配方进行设计。

Al、Ti 的燃烧产物为白色 Al_2O_3 、 TiO_2 ,白色氧化物在选择性辐射体中具有更鲜明的选择性,因此可以提高中、长波段的辐射强度^[5]。为了筛选最佳的添加比例,在基础配方的基础上开展了试验研究,试验结果见表 1。

从表 1 中可以看出,当加入 5 wt% TiCl_4 和 7 wt% Al 时,药剂在中波、长波段的辐射强度最大。混合药剂经相容性测试,与指示器的相容性良好。

表 1 添加剂含量和辐射强度数据表

Tab.1 Data table of additive content and radiation intensity

添加剂	$w_{\text{添加剂}}/\%$	$I_{3.6-4.9\mu\text{m}}/(\text{W} \cdot \text{sr}^{-1})$	$I_{8-14\mu\text{m}}/(\text{W} \cdot \text{sr}^{-1})$
TiCl_4	3	980	360
	5	1 140	419
	7	1 091	366
	10	1 061	326
	3	1 075	319
Al	5	1 093	333
	7	1 169	370
	10	1 117	359

1.3 装药优化设计

1.3.1 装药密度优化设计

指示器的持续时间也是衡量指示器性能的重要指标。相同装药量,装药密度越大,燃烧速度越慢^[6]。为满足指示器稳定辐射持续时间不小于 100 s 的指标要求,对指示器的装药密度进行设计。借鉴同类型其他指示器装药密度,对 1.6, 1.8, $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 3 种装药密度的指示器燃烧时间和中波段平均辐射强度进行测试,测试结果见表 2。

表 2 不同装药密度指示器的红外辐射性能

Tab.2 Infrared radiation performance of indicators with different charge densities

序号	装药密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	燃烧时间/s	平均辐射强度/ $(\text{W} \cdot \text{sr}^{-1})$
1	1.6	101~115	1 380
2	1.8	118~128	1 335
3	2.0	112~135	1 130

从表 2 中可以看出,装药密度为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的指示器燃烧时间最长,但燃烧时间并不稳定,且平均辐射强度较低,因此选定指示器装药密度为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.3.2 装药结构优化设计

由于指示器内装药量较大,为保证装药密度均匀,药剂一般分 7 次倒入,前 6 次为主装药,最上层为 B/KNO_3 高能点火药,均使用平口压药冲进行压制。由于平口压药冲在压制过程中相邻两道药剂结合面

会存在密度差,因此指示器在燃烧过程中经常出现掉块、蹿火现象,严重影响指示器的点火、传火可靠性。

为提高指示器的传火可靠性,设计了一种塔形装药结构,如图2所示。药剂在燃烧过程中,灼热粒子在燃烧面相互碰撞,使更多的药剂参与到燃烧进程中,在保证传火可靠性的同时提高了指示器的红外辐射强度。同时塔形装药结构增大了上下两道药剂的接触面积,结构强度得到提升,避免了燃烧过程中掉块、蹿火现象的出现,提高了燃烧稳定性。

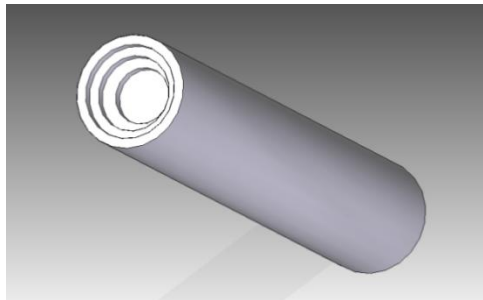


图2 塔形药剂结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the structure of tower-shaped charge

1.3.3 点传火序列优化设计

为提高指示器的点火可靠性,对指示器的点传火序列进行了优化设计,如图3所示。由于主装药火焰敏感度较低,点火端面较大,使用 B/KNO_3 直接点火存在瞎火风险。因此,在点火药和主装药中间增加了过渡药层,过渡药层由主装药和 B/KNO_3 点火药按1:1均匀混合。 B/KNO_3 的加入使主装药火焰敏感度明显提升,进而提高了指示器点火可靠性。

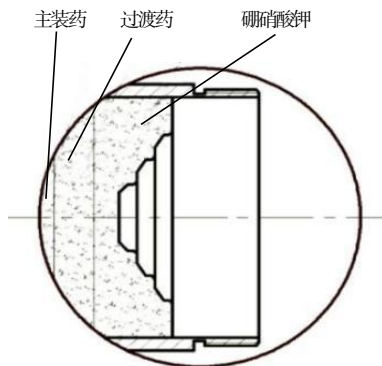


图3 点传火序列示意图

Fig.3 Schematic diagram of the ignition transmission sequence

2 试验

为分析药剂配方优化和装药优化设计对指示器性能的提升效果,选取了8发指示器(4发改进前、4发改进后)进行性能测试。在性能试验前,进行了振动、冲击等环境试验,对环境稳定性进行验证。

为了准确测试指示器的相关参数,搭建了红外测试系统。测试系统主要由红外测量设备、空间位置测量设备、大气与环境参数测量设备、红外标定与检测设备、数据采集与处理分析设备组成,如图4所示。使用红外标定与检测设备对测试设备进行校准;使用空间位置测量设备对距离进行测量;使用大气与环境参数测量设备对温湿度、风速进行测量。

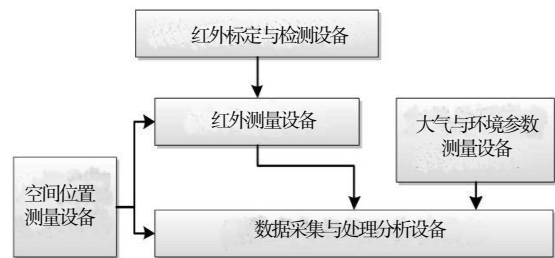


图4 测试系统组成结构图

Fig.4 Test system composition structure diagram

红外测量设备:SR5000N 光谱辐射度计,以色列CI公司,光谱范围:1.3~14 μm ;采样和扫描速率:30次/s;工作温度:-5~40 $^{\circ}C$ 。红外标定与检测设备:SR200 高温腔式黑体;空间位置测量设备:激光测距仪;大气与环境参数测量设备:温湿度计、风速仪。

3 试验结果与分析

3.1 启动时间测试结果与分析

启动时间是指指示器达到最大辐射强度的70%所用时间。相关研究表明,指示器的启动时间越短,出现断火、瞎火的几率更低。通过光谱辐射度计测试的8发指示器启动时间分布如图5所示。

从图5中可以明显看出,改进前指示器的 $t_{启动} \geq 3$

s, 最长启动时间为 3.5 s, 改进后指示器 $t_{启动} < 3$ s, 最短启动时间为 2.4 s, 一致性较好。这主要是因为塔型装药结构点火接触面积更大, 在点火瞬间有更多的药剂参与反应, 产生的热值更高。同时过渡药中的 B/KNO₃ 降低了主装药的火焰感度, 使得主装药更易被点燃, 使指示器在更短的时间达到辐射强度最大值。

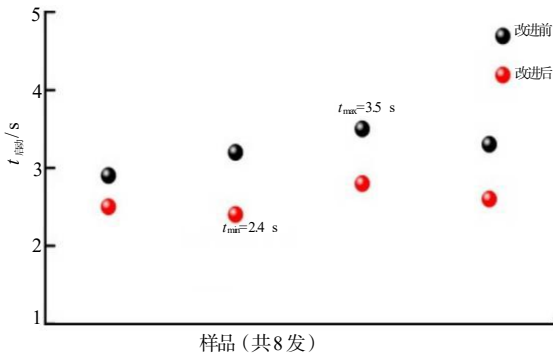


图5 8发样品启动时间分布

Fig.5 Distribution of start-up time of 8 samples

3.2 稳定辐射持续时间测试结果与分析

8发样品的稳定辐射持续时间测试结果见图6。

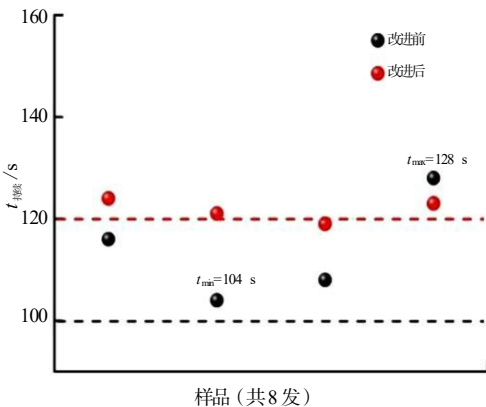


图6 8发样品稳定辐射持续时间

Fig.6 The duration time of stable radiation of 8 samples

从图6可以看出, 所有指示器的稳定辐射持续时间均满足要求, 这也验证了装药密度大于 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 稳定辐射持续时间大于 100 s。改进前指示器的最长持续时间为 128 s, 最短时间为 104 s, 指示器一致性较差, 这主要是由于压药过程中上下两道药剂结合面存在密度差, 燃烧过程中出现掉块现象, 进而影响燃烧进程, 改进后指示器的持续时间基本在 120 s 左右, 说明塔型装药结构燃烧过程更为稳定。同时, Ti 与氧气反应表面容易形成致密的氧化膜, 阻碍反应进行, 降低局部燃烧温度, 使反应更加稳定, 持续时

间更长。

3.3 红外辐射强度测试结果与分析

为分析添加剂对指示器辐射强度的影响, 对 8 发指示器中波段的红外平均辐射强度进行测试, 结果如图 7 所示。

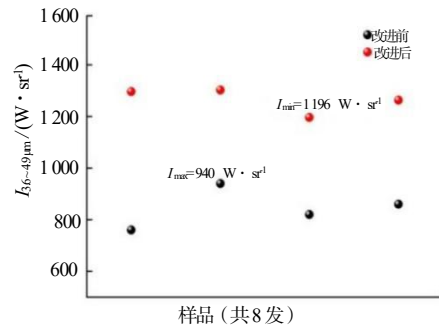


图7 8发样品 3.6 ~ 4.9 μm 波段辐射强度

Fig.7 Radiation intensity in the 3.6-4.9 μm bands of 8 samples

从图7中可以看出, 改进前指示器在中波段的辐射强度均低于 $1000 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$, 最大辐射强度为 $940 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。优化配方后, 红外辐射强度提升至 $1200 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 左右, 最低辐射强度为 $1196 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$, 这主要是铝粉与氧气发生了氧化反应, 生成 Al_2O_3 的同时产生大量的生成热, 使燃烧更加剧烈, 辐射强度也就更大。

3.4 辐射稳定性测试结果与分析

离散度是衡量指示器辐射稳定性的重要指标, 离散度越大, 产品燃烧过程越不稳定, 指示效果越差。其计算见式(1):

$$\text{离散度} = \frac{A - B}{A + B} \times C \quad (1)$$

式(1)中: A 为测试辐射强度最大值, $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$; B 为测试辐射强度最小值, $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$; C 为平均辐射强度, $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。改进前后辐射强度离散度结果见图8。

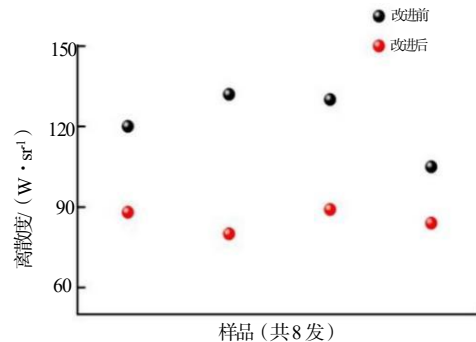


图8 8发样品辐射强度离散度

Fig.8 The radiation intensity dispersion of the 8 samples

由图8可见,改进前指示器的离散度最高为 $132\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$,且一致性较差,这主要是由于压药接口处密度不一致,燃烧过程稳定性较差。改进后指示器的离散度均小于或等于 $90\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$,比改进前产品降低了 $42\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$,且不同产品的离散度差别较小,说明改进后产品的质量稳定性较好。

4 结论

本文通过对指示器的药剂配方、装药密度、装药结构、点传火序列进行优化,设计出一种高辐射强度、低离散度红外指示器。具体结论如下:

(1) 对指示器的药剂配方进行了优化,加入 $5\text{ wt}\%$ TiCl_4 和 $7\text{ wt}\%$ Al 时,药剂在中波段的辐射强度可达 $1\,200\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。

(2) 设计了塔形装药结构和过渡药点传火序列,提高了指示器的点传火可靠性。

(3) 选取了8发指示器进行性能试验,改进后指示器的最短启动时间为 2.4 s ,稳定辐射持续时间提

升至 120 s ,中波段的辐射强度为 $1\,200\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$,离散度平均值为 $90\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$,比改善前降低了 $42\text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 赵楠,李晓霞,马森.靶机IR特性模拟技术发展现状及展望[J].红外技术,2011,11(33):625-629.
- [2] M.Chen, Q.Jiao, Y.Wen. Research on thermal and burning performance of Mg/PTFE and $\text{Mg}_4\text{Al}_3/\text{PTFE}$ infrared compositions[C]//International Autumn Seminar Propellants, Explosives, Pyrotechnics. Beijing, China, 2005.
- [3] E.-C. Koch. Performance modification of magnesium/Teflon/Viton[C]//6th Workshop on Pyrotechnic Combustion Mechanisms. Fort Collins, USA, 2008.
- [4] 李世祥.光电对抗技术[M].长沙:国防科技大学出版社,2000.
- [5] 潘功配,朱长江,王昭群.红外辐射烟火剂研究[J].华东工学院学报,1991(4):45-49.
- [6] 焦清介,霸书红.烟火辐射学[M].北京:国防工业出版社,2009.

欢迎订阅《火工品》

刊物简介

主管单位:中国兵器工业集团有限公司; 主办单位:中国兵器工业第213研究所 应用物理化学重点实验室

刊号:ISSN 1003-1480 CN 61-1179/TJ; 刊期:双月刊,双月底出版

办刊宗旨:满足火工烟火专业科研、生产、教学、管理及使用的需要,为促进国防现代化及火工烟火专业事业的发展服务。

订阅方式及价格

银行汇款:开户银行:招商银行西安分行小寨支行 帐号:298081569710001

收款单位:陕西应用物理化学研究所 纳税人识别号:9161000043523114XR

电话:029-85333149 地址:西安市朱雀大街中段20号

期刊单期定价15元,全年征订价格90元

订阅及合作

杂志订阅请致电:029-85333475 Email: huogongpin@sina.com; huogongpin@163.com

告知您的订阅份数,收刊地址。

编辑部通信地址:陕西省西安市99号信箱《火工品》编辑部 邮编:710061