

文章编号: 1003-1480 (2025) 01-0032-05

高温环境对激光火工品发火性能的影响

鱼小港¹, 贺爱锋¹, 陈建华¹, 郑薇¹, 杨安民¹, 祝捷¹, 李敏杰^{1,2}

(1. 陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 陕西 西安, 710061; 2. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051)

摘要: 为了研究高温环境对激光火工品发火性能的影响, 建立了激光火工品的热力场仿真模型, 并搭建光学测试系统, 探究了激光火工品自聚焦透镜在 100 °C 高温下的激光光斑尺寸变化。仿真结果表明: 高温环境下自聚焦透镜长度产生 92.4 μm 的变形量, 导致激光光斑尺寸从 94 μm 增大至 150 μm; 试验结果表明: 高温环境下激光火工品输出光斑在 243 ~ 272 μm 之间变化, 自聚焦透镜变形量的增大导致激光火工品的刺激功率密度降低、作用时间超差。研究表明自聚焦透镜变形降低了激光火工品的发火可靠性。

关键词: 激光火工品; 自聚焦透镜; 激光光斑; 发火可靠性; 高温环境

中图分类号: TJ450.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.006

The Influence of High Temperature Environment on Firing Property of Laser Pyrotechnics

YU Xiao-gang¹, HE Ai-feng¹, CHEN Jian-hua¹, ZHENG Wei¹, YANG An-min¹, ZHU Jie¹, LI Min-jie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051)

Abstract: In order to study the influence of high temperature environment on the firing property of laser pyrotechnics, the thermal field simulation model of laser pyrotechnics was established, and the optical test system was set up, to explore the laser spot size change of self-focusing lens of laser pyrotechnics under 100 °C temperature condition. The simulation results show that there is a length deformation of 92.4 μm for the self-focusing lens under high temperature condition, which results in the laser spot size increasing from 94 μm to 150 μm; The test results show that the output laser spot of the tested laser pyrotechnic varies from 243 μm to 272 μm, the increase of self-focusing lens deformation leads to the decrease of stimulation power density of the laser pyrotechnics and the action time delay. The study indicates that the deformation of self-focusing lens under high temperature reduces the firing reliability of the laser pyrotechnics.

Key words: Laser pyrotechnics; Self-focusing lens; Laser spot; Firing reliability; High temperature environment

随着现代武器装备对火工品环境适应性要求的不断提高, 激光火工品以其抗强电磁、抗强射频等优势, 成为提升武器系统安全性与可靠性的选择之一^[1], 其中自聚焦式激光火工品技术发展迅速、技术成熟度高, 在国外已经得到了工程化应用。1996年, 美国的 Sandia National Laboratories 与 Pacific Scientific 公司联

合研制了一种自聚焦激光雷管, 计划应用在空勤人员逃逸系统^[2]。2004年, 法国航天局进行了空间飞行器用激光二极管启动烟火器的设计^[3]。国内先明春等^[4]开展了温度冲击和温度循环等温度交变环境对激光火工品发火时间的影响规律及作用机理研究, 结果表明: 在长时间经历温度交变环境后, 激光火工品发火

收稿日期: 2024-06-21

作者简介: 鱼小港 (1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事激光火工品可靠性技术研究。

通讯作者: 贺爱锋 (1978-), 男, 研究员, 主要从事激光火工品技术研究。

基金项目: 国资委资助项目 (No.2022YQG006-007)。

引用本文: 鱼小港, 贺爱锋, 陈建华, 等. 高温环境对激光火工品发火性能的影响[J]. 火工品, 2025(1): 32-36.

时间会延迟,甚至出现瞎火情况,表明高温环境对激光火工品的发火性能有影响,降低了激光火工品的可靠性。然而,针对激光火工品的可靠性设计和环境适应性机理,目前研究尚显不足。通常,激光火工品的环境测试验证是通过发火试验测得的点火时间与输出威力来判定其可靠性^[5],但对于环境试验下激光火工品的光学性能对发火可靠性的具体影响,目前的认识还不够清晰。国内曾通过光学软件对激光火工品的光路传输进行模拟,但未能充分验证光学性能测试对发火可靠性的影响^[6]。因此,本文提出了一种针对激光火工品自聚焦透镜的光学性能测试方法,采用仿真与试验相结合的方式,判定光学性能变化对于激光火工品发火可靠性的影响。

1 分离式激光火工品结构与环境设计

传统激光火工品的设计中,通常将光学透镜与药剂作为一个整体结合^[7]。这种设计虽然简化了制造过程,但将光学透镜深嵌于壳体内部,使得对其输出端面的光学性能评估变得困难,无法反映激光火工品的光学特性,以及判断光学透镜是否合格。本文设计了一种分离式激光火工品,即将光学透镜与药剂端分离,允许试验前对激光火工品的激光特性进行独立测试,包括激光光斑、传输效率等性能参数,其结构示意图如图1所示。

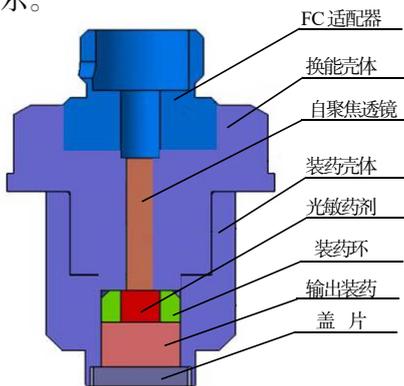


图1 分离式激光火工品结构示意图

Fig.1 Schematic structure diagram of separated laser pyrotechnics

考虑到激光火工品未来可能面临的高温环境应用场景,如火箭发动机尾焰、弹载高温环境以及火炮使用环境等,会对激光火工品造成一定的光学损伤,

评估激光火工品在高温环境下的光学性能,对于确保其可靠传输激光并完成关键动作至关重要。为此,按照 GJB 150.3A-2009^[8]的环境试验方法,设置了 100 °C 的高温环境加载条件,以考核激光火工品在高温条件下的光学性能,并进一步探究激光火工品的可靠性。具体的热加载方式如图2所示。

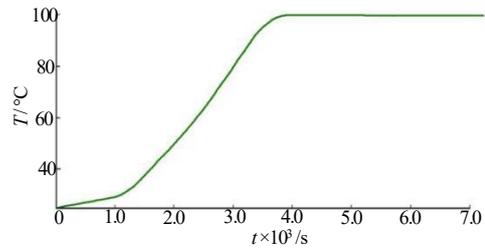


图2 高温环境试验的热载荷加载曲线

Fig.2 Thermal loading curve of the high temperature environment test

2 仿真

2.1 热力学仿真

为了获得激光火工品在高温环境加载下的温度分布和机械变形,根据图1所示的结构,构建了热力学仿真模型。采用 Abaqus 软件的顺序热力学耦合仿真功能,对激光火工品进行了热力学耦合分析。在此过程中,温度场被设定为静力学分析的预设条件,以预测结构在热影响下的变形程度。

根据激光火工品的高温环境试验设置了边界条件,采用图2的幅值曲线进行热载荷的加载,仿真环境为稳定的空气环境,传热主要通过与空气进行表面热交换。设定环境温度和初始温度均为 25 °C,激光火工品内部结构间的传热方式为热传导。将自聚焦透镜的变形量作为激光火工品光学仿真的输入变量,从而获取激光火工品在高温环境下的光学性能。

2.2 光学性能仿真

在激光火工品中,自聚焦透镜的作用是将光纤传输的激光聚焦到含能药剂表面,使药剂发生反应。因此,分析自聚焦透镜在高温环境下的激光传输和聚焦特性,对于评估激光火工品的可靠性至关重要^[9]。本研究采用的激光火工品配备了节距为 0.5 p 的自聚焦

透镜, 通过光学软件 Zemax 进行光路仿真。在序列模式下, 选择了理想的高斯光束模拟芯径为 105/125 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤传输。通过对 980 nm 激光的模拟仿真, 可以得到光线在自聚焦透镜中的传播轨迹, 获得其光斑尺寸和功率密度的变化。

在 Zemax 软件中, 采用了物高距离法来模拟光纤芯径的尺寸, 以面光源为基准, 在传光孔至自聚焦透镜的传输过程中, 理想的激光传输轨迹如图 3 所示。

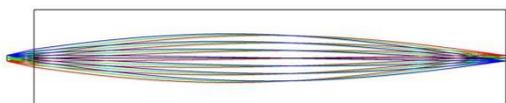


图 3 激光传输轨迹图

Fig.3 Laser transmission trajectory diagram

采用 Zemax 得到波动光学和几何光学条件下的光斑大小, 如图 4 所示。

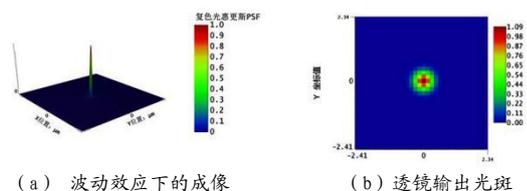


图 4 两种不同效应下的光学特性

Fig.4 Optical properties under two different effects

在理想条件下, 输入光斑为 105 μm 的高斯光束在透镜末端的惠更斯点扩散函数下的光斑尺寸约为 92 μm , 而在几何光学下末端的光斑尺寸为 94 μm 。这表明在波动光学和几何光学条件下, 自聚焦透镜均展现出良好的聚焦特性, 满足激光火工品换能元的光学要求。在热力学影响下, 自聚焦透镜的变形会影响末端的光学聚焦特性。因此, 通过对比试验与仿真模拟的结果, 可以评估激光火工在热力学影响下的光学性能是否稳定可靠。

3 激光火工品光斑测试

激光火工品的光学聚焦特性, 即激光光斑, 是评估其性能的关键指标。然而, 由于激光火工品结构件较小, 且自聚焦透镜焊接于壳体内部^[10], 使得光斑难以测量。因此, 针对图 1 所示的分离式激光火工品, 对换能壳体进行独立的光学测试。搭建的光学测试系统示意图如图 5 所示, 实物如图 6 所示。

测试系统由 980 nm 单模激光器、激光光束观察仪和 PC 机软件等组成。采用的低功率 980 nm 单模激光器能够稳定输出高斯光束。当高斯光束通过激光火工品的自聚焦透镜聚焦后, 由激光光束观察仪采集其光学特性信息, 通过控制线将光学特性信息显示于电脑端的软件界面。为了解决换能壳体与激光光束观察仪之间的装配问题, 采用 3D 打印技术设计并制造了专用的夹具, 以确保换能壳体与光电探测器之间的近距离接触, 从而使由距离引起的光学测试误差最小化。激光光斑测试样品装配结构如图 7 所示。



图 5 光学测试系统示意图

Fig.5 Diagram of the optical test system



图 6 光学测试系统实物图

Fig.6 Physical map of the optical test system

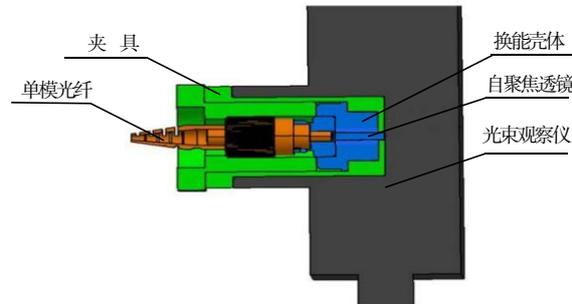


图 7 激光光斑测试样品装配结构图

Fig.7 Structure diagram of sample assembly of laser spot testing

通过这套测试系统, 进行了常温下激光火工品的光学性能测试, 测试结果能够显示 980 nm 单模激光的高斯光束的三维成像及其光斑尺寸, 获得了激光火工品的光学特性的详细信息, 测试结果界面如图 8 所示。

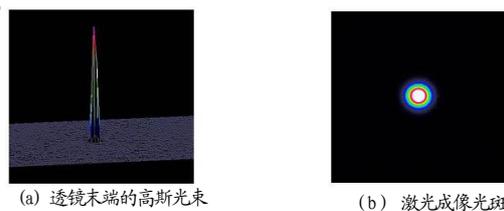


图 8 常温下激光火工品的光学聚焦特性

Fig.8 Optical focusing properties of laser pyrotechnics under room temperature condition

4 结果与分析

4.1 仿真结果与分析

高温环境下的温度梯度变化对激光火工品结构件的变形有着显著影响,尤其是自聚焦透镜的变形会导致激光火工品聚焦特性的变化,进一步导致激光功率密度的变化。通过仿真计算,获得激光火工品自聚焦透镜经过 1 h 升温至 100 °C 并保温 1 h 环境条件下的温度分布云图,如图 9 所示。图 9 结果显示,自聚焦透镜表面最高温度可达到 98 °C,而末端温度最低,表明温度沿径向递减。

进一步将此热传导分析结果作为 Abaqus 静力学的预定义场,采用顺序热力耦合方法来评估激光火工品的热力学变形量,尤其是自聚焦透镜的变形量。激光火工品的位移分布云图如图 10 所示。

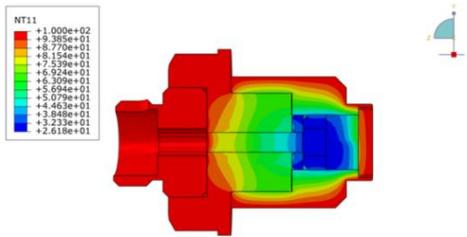


图 9 激光火工品温度云图

Fig.9 Temperature contour of laser pyrotechnics

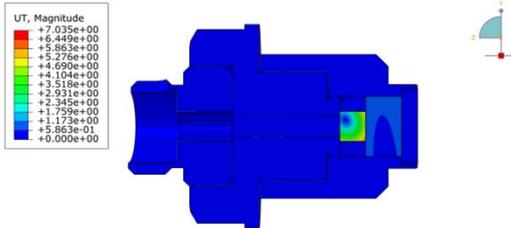


图 10 激光火工品位移云图

Fig.10 Displacement contour of laser pyrotechnics

在 Abaqus 后处理数据中提取了激光火工品自聚焦透镜的位移变化曲线,位移与加热时间的关系如图 11 所示。由图 11 可见,激光火工品自聚焦透镜的最大变形量约为 0.092 4 mm。

将激光火工品自聚焦透镜的最大变形量 0.092 4 mm 与测试设备之间的距离 2 mm 作为自聚焦透镜的变量输入到 Zemax 光学软件,进一步模拟光学聚焦特性,结果如图 12 所示。结果表明在 0.092 4 mm 变形

量下,自聚焦透镜的输出光斑直径为 150 μm,比理想状态下自聚焦透镜的光斑直径增大了约 50 μm。因此,在高温环境下,激光火工品自聚焦透镜会沿径向膨胀,致使透镜末端的光学性能发生变化,特别是输出光斑的变化,以此可更为细致地判定激光火工品发火的可靠性与安全性。

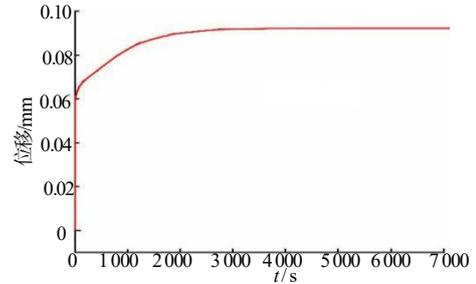
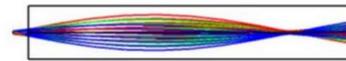
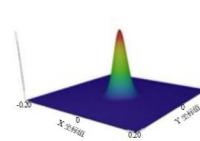


图 11 自聚焦透镜位移变化曲线

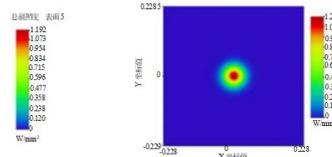
Fig.11 Displacement curve of the self-focusing lenses



(a) 变形后光线传播轨迹



(b) 变形后的高斯光束



(c) 激光光斑图

图 12 自聚焦透镜变形的光学聚焦特性

Fig.12 Optical focusing properties of the deformed self-focusing lenses

4.2 试验结果与分析

为了评估自聚焦透镜的光学聚焦特性,利用图 6 所示的测试系统,对高温环境下激光火工品的输出光斑尺寸进行了测试。高温下 10 组三维光束图像与光斑尺寸测试结果如图 13 所示。

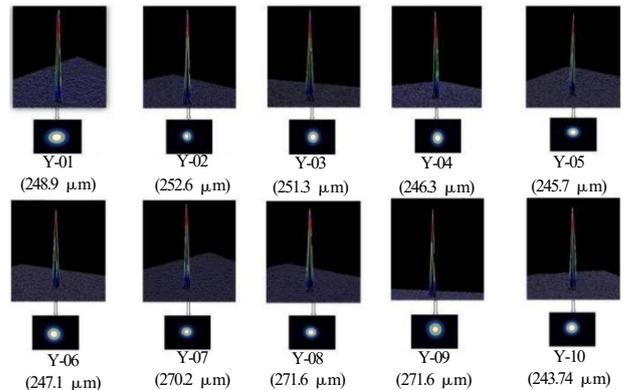


图 13 高温下激光火工品光学测试结果

Fig.13 Optical test results of laser pyrotechnics under high temperature condition

由图 13 可知, 在高温测试环境中, 自聚焦透镜输出的光斑尺寸多集中在 250 μm 左右, 最大值达到 271.6 μm 。测试值与仿真值之间存在 10%~15% 的误差, 该误差可能来自温度对于自聚焦透镜折射率的影响、结构对光学透镜的约束, 以及仿真计算过程中材料参数和边界条件的设置。

进一步探究了自聚焦透镜变形量对激光火工品发火性能的影响。试验中, 使用节距为 0.5 p 的自聚焦透镜, 通过调整输入光纤与自聚焦透镜之间的距离来模拟变形量, 试验结果如表 1 所示。

表 1 自聚焦透镜变形量对发火性能的影响

Tab.1 Effect of deformation of self-focusing lens on the firing property

序号	变形量 L/mm	激光功率 P/W	光斑尺寸 $D/\mu\text{m}$	功率密度 $\rho_p/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$	作用时间 t/ms
1	0.34	1.62	180	1 592.35	0.87
2	0.36	1.63	181	1 584.53	1.07
3	0.62	1.63	360	400.54	1.20
4	0.71	1.62	400	322.45	瞎火

表 1 结果表明, 随着变形量的增加, 功率密度降低, 导致作用时间超差, 甚至出现了瞎火现象。试验证明了自聚焦透镜的变形会显著影响激光火工品的发火可靠性, 严重变形则会导致瞎火。

5 结论

在高温环境下, 通过对激光火工品自聚焦透镜的光学性能进行仿真研究及试验, 得到如下结论:

(1) 在理想条件下, 自聚焦透镜光学特性保持稳定。然而, 经过 1 h 升温至 100 $^{\circ}\text{C}$ 并保温 1 h 的高温环境处理后, 自聚焦透镜发生了变形。仿真计算结果显示, 自聚焦透镜的变形量约为 92.4 μm 。

(2) 理论上, 激光火工品的自聚焦透镜能够产生 94 μm 的聚焦光斑。但在高温环境和结构焊接约束的共同作用下, 自聚焦透镜的径向变形导致聚焦光斑尺寸在 243~272 μm 之间变化。光斑的变化影响了激光的功率密度, 严重时可能会导致激光火工品的失效。

(3) 自聚焦透镜模拟变形试验表明, 变形量的增加, 会导致激光火工品光斑尺寸增大、功率密度降低、作用时间超差, 从而影响激光火工品的发火性能。

在未来的应用中, 激光火工品需要不断完善环境适应性技术, 以保证激光火工品在复杂环境中可靠作用。

参考文献:

- [1] 鲁建存, 贺爱锋, 陈建华. 激光火工品技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2022.
- [2] Thomas J Blachowski, Edwin A Spomer. Preliminary screening results for an optical detonator utilizing BNCP as the principle energetic material[C]/33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1997.
- [3] Munger A C, Thomas K A, Kennedy J E, et al. Laser detonator development for test-firing applications[R]. Los Alamos National Lab.(LANL), 2004.
- [4] 李明春, 佟乐乐, 矫金福, 等. 温度交变中光纤接触式激光火工品的失效原因及抑制研究[J]. 含能材料, 2023, 31(3): 243-250.
- [5] Hafenrichter E S, Pahl R J. The effects of scale and heating rate on microscale ignition criteria of laser diode ignited explosives[R]. SAND2005-1583C, 2005.
- [6] 陈建华, 鲁建存, 贺爱锋, 等. 自聚焦激光换能元模拟仿真分析[J]. 火工品, 2010(1): 48-52.
- [7] 王浩宇. 面向机载乘员逃逸的激光火工及控制关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [8] 程丛高. GJB 150.3A 高温试验方法的应用及分析 [J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 91-96.
- [9] 湛赞, 严楠, 李朝振, 等. 双光纤自聚焦透镜组件设计及光路仿真 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 203-206, 236.
- [10] 刘亮亮, 陈建华, 曹椿强, 等. 弹射救生系统用激光火工装置探索研究 [J]. 火工品, 2023(6): 79-82.