

激光点火器耐压密封及其影响

贺爱锋¹, 李骏², 曹椿强¹, 祝捷¹, 陈建华¹, 马玥¹, 井波¹, 王浩宇¹

(1. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 西安 710061;

2. 陆军装备部, 驻西安地区航空军事代表室, 西安 710065)

摘要: **目的** 促进激光点火技术在安全弹药领域的应用。**方法** 从激光点火器作用后承受高动态压力的需求出发, 研究基于玻璃封接技术的激光点火器密封性能及其影响因素。确定采用箱式电阻炉对激光点火器壳体与透镜间进行玻璃密封的温度为 430 ℃, 保温时间为 13~15 min。对不同始发装药、不同密封工艺的激光点火器透镜发火后, 其表面光学膜层变化、与激光点火器相连接的光纤端面损伤程度进行分析, 研究点火前后承受气压性能变化。**结果** 始发装药为 BPN 等点火类药剂时, 激光点火器具有较高的动态密封性能, 可稳定达到 30 MPa 下 2 min 不泄露; 始发装药为 BNCP 等起爆类药剂时, 随着装药量的增大, 密封性能变差。**结论** 改善玻璃封接工艺有利于提高密封性, 如封接长度变长, 发火后耐压密封性会有所提升。

关键词: 玻璃封接; 密封性; 激光点火器; 透镜; 光学膜层

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.008

中图分类号: TJ450 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)09-0048-05

Pressure-tight Seal of Laser Initiated Squib and Its Influences

HE Ai-feng¹, LI Jun², CAO Chun-qiang¹, ZHU Jie¹, CHEN Jian-hua¹, MA Yue¹, JING Bo¹, WANG Hao-yu¹

(1. Key Laboratory on Applied Physical and Chemistry, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. Aviation Military Respective Office of Army Equipment Department in Xi'an Area, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: **Objective** To promote the application of laser ignition technique in the field of safe ammunition. **Methods** The sealing property and influencing factors of laser initiated squib (LIS) based on glass-metal sealing were researched from demands of bearing high-dynamic pressure after the action of the laser initiated squib. A box-type resistance furnace was applied to seal the housing and lens of the laser initiated squib at 430 ℃ for 13-15 min. Comparison and analysis were conducted to the damage of the optical film for the lenses in the LIS and the surface of the connected optical fiber to discuss the pressure bearing performance of laser initiated squib with different initial loading and sealing performance before and after ignition. **Results** Pressure tests for post-fire LISs were conducted, which revealed LISs with initial loading like BPN could withstand higher pressure (e.g. 30 MPa 2 min) than LISs with initial loading like BNCP. The sealing performance got worse with the increase of loading amount. **Conclusion** Improvement of the glass sealing technique is favorable for improving the airtightness, such as prolonging the sealing length and improving the pressure tightness after ignition.

KEY WORDS: glass sealing, sealing performance, laser initiated squib (LIS), lenses, and optical film

激光点火技术是实现弹药安全点火的一项重要技术, 国外激光点火系统技术发展已经较成熟, 并形

成了标准。如美国国防部的 MIL-STD-1901A《火箭及导弹发动机点火系统设计与安全性准则》^[1]、北约

的 STANAG 4368 《火箭及导弹发动机的电和激光点火系统安全性设计要求》^[2]都将激光点火技术列为武器装备的重要点火技术。

在发动机点火等研究中,需要激光点火后能够具备较高的密封性。美国航空与航天学会在 AIAA S-113-2016 《空间及运载火箭用火工系统及装置》^[3]中规定:装备对于激光点火器具有密封性要求时,其窗口应能承受其工作压力峰值的 4 倍。该标准对发火后完整性也进行了规定。

激光点火器^[4-5]一般采用透镜等玻璃器件作为其能量耦合窗口,其与金属壳体之间的结合可通过玻璃封接的方式实现,这种结合方式的可靠性,决定了点火器作用后的密封性。文中从激光点火器的始发装药类型、装药量及玻璃封接工艺方面,通过试验研究了激光点火器的密封性及其影响因素。

1 激光点火器的组成

典型的激光点火器主要由光学耦合窗口、具有特定输入输出匹配接口的壳体以及点火装药序列组成,如图 1 所示。其中,光学耦合窗口两端镀有光学膜层,用于增强点火激光透过率。

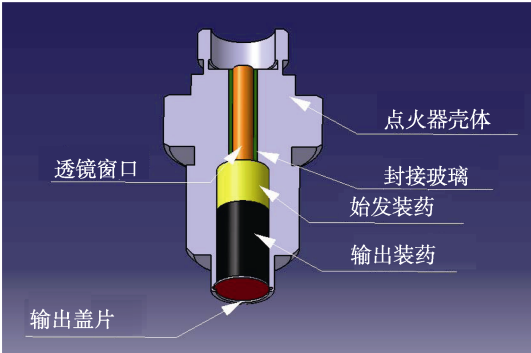


图 1 典型激光点火器

2 玻璃密封参数的确定

目前国内主要以掺杂金属离子的封接玻璃(见表 1)作为熔接材料。表 1 中 CDW-301、SD-8、SB-4-10 三种玻璃都属于富含 PbO 的低熔点玻璃。低熔点玻璃具有烧结温度低,结晶性能好,非匹配封接后封接应力小的特点,富含 PbO 的重金属氧化物。Pb²⁺所组成的化合物具有 18+2 个电子构成的阳离子^[6],具有较大的极化率和较低的化学能,使其能够与金属、非金属表面形成浸润。其中 CDW-301 型低熔点玻璃线膨胀系数、封接温度最低,有利于保证所形成的封接玻璃具有较好的气密性和较低的封接应力,并能保持透镜光学性能的稳定性。因此确定自聚焦透镜的封接玻璃为低熔点玻璃 CDW-301。

为了实现低熔点玻璃-自聚焦透镜-金属壳体的封

接,需要选择合适的封接设备。利用普通推盘烧结炉、真空退火炉、箱式电阻炉等三种封接设备,分别选取 3 个自聚焦透镜在这三种烧结炉中做封接试验,封接情况及其质量检验见表 2。

表 1 低熔点玻璃性能指标对比

玻璃 型号	封接温度/ ℃	软化点/℃	线膨胀系 数/℃	化合物组 成	结构 类型
CDW-301	390~430	290~320	70×10 ⁻⁷	PbO、ZnO 等	结晶 型
SD-8	520~550	410~450	80×10 ⁻⁷	PbO、 Bi ₂ O ₃ 等	结晶 型
SB-4-10	420~450	300~330	90×10 ⁻⁷	PbO 等	结晶 型

表 2 不同封接设备下封接情况的对比

封接设 备	试验数 量/个	封接工艺	试验结果	氦质谱检漏 /(Pa·m ³ ·s ⁻¹)
推盘烧 结炉	3	烧结温度: 430 ℃ 保温时间: 15 min 推盘速率: 8 min/盘 氮气流量: 2 L/min	目视观察: 封接玻璃与 金属壳体不 浸润,与透 镜基本浸润	>×10 ⁻⁷ (不合格)
		烧结温度: 430 ℃ 保温时间: 15 min 封接方式: 氮气注入, 正压封接	目视观察: 封接玻璃与 金属、自聚 焦透镜均不 浸润	完全漏气 (不合格)
		烧结温度: 430 ℃ 保温时间: 15 min	目视观察: 封接玻璃与 金属、自聚 焦透镜浸润 良好	<×10 ⁻⁹ (合格)

推盘式烧结炉和真空退火炉烧结时有氮气保护,在 430 ℃时,12Cr18Ni9 不锈钢无法形成氧化膜层,不但影响玻璃的浸润,还使玻璃相与金属无法形成可靠的化学键,因此气密检查不合格。箱式电阻炉由于没有气体保护,会形成浅棕色氧化层,有利于保证封接质量。对封接参数进行了试验确定(见表 3、表 4),最终优选参数为 430 ℃,保温时间为 13~15min。另外在封接过程中应严格控制温度,否则容易造成光学薄膜的脱落或损伤(如图 2 所示)。研究表明,由于热损伤会造成光学反射膜的反射性能变差(如图 3 所示)。

考核激光点火器密封性测试方法主要有两种:氦质谱检漏法、气压检漏法。氦质谱检漏法可作为密封性检查的初步检测,检测按照 GJB 5309.3—

2004《火工品试验方法 第3部分:泄漏试验 氦气法》^[7]执行,其压力差最大为1 atm(约0.1 MPa)。气压检测作为密封性检查的进一步检测,主要用于

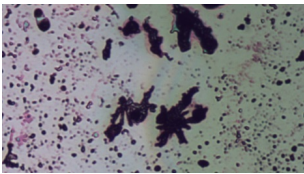
发动机等武器装备使用的激光点火器,这些武器装备作用后需维持发动机内部的压力状态,因此检测要求较高。

表 3 不同封接温度下封接性能统计

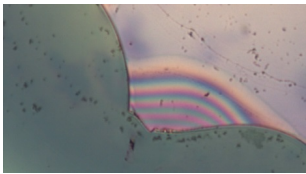
封接温度/℃	试验数量/发	保温时间/min	氦质谱检漏/(Pa·m ³ ·s ⁻¹)	封接状态
390	3	15	>1×10 ⁻⁷ (不合格)	不浸润,润湿角很大
410	3	15	>1×10 ⁻⁹ (不合格)	浸润较差,润湿角较大
430	3	15	<1×10 ⁻⁹ (合格)	浸润较好,润湿角小
450	3	15	<1×10 ⁻⁹ (合格)	玻璃溢出

表 4 430 ℃ 烧结温度下不同保温时间封接性能统计

封接时间/min	封接温度/℃	试验数量/发	氦质谱检漏/(Pa·m ³ ·s ⁻¹)	封接状态
12	430	3	>1×10 ⁻⁷ (不合格)	不浸润,润湿角很大
13	430	3	<1×10 ⁻⁹ (合格)	浸润较好,润湿角小
15	430	3	<1×10 ⁻⁹ (合格)	浸润较好,润湿角小
17	430	3	<1×10 ⁻⁹ (合格)	玻璃轻微溢出

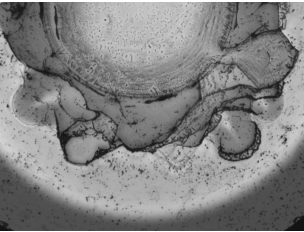


a 透镜增透膜烧伤

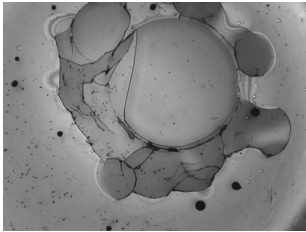


b 透镜反射膜烧伤

图 2 激光点火器光学窗口薄膜烧伤情况



a 透镜反射膜效果降低 80%



b 透镜反射膜效果降低 40%

图 3 激光点火器光学窗口反射薄膜烧伤情况

采用已确定的工艺封接完成 300 余发激光点火

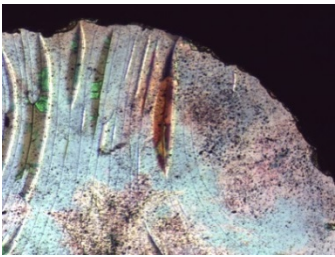
器,氦质谱检漏小于 1×10⁻⁹ Pa·m³/s。气压测试结果表明,其承压能力能够达到 25 MPa、2 min 不泄漏。

3 激光点火器承压密封性研究

3.1 始发装药为起爆药

3.1.1 起爆药量较大时

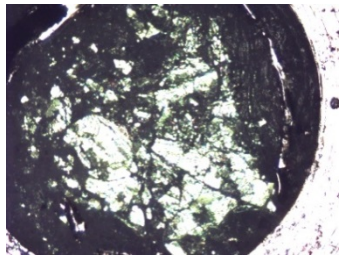
对以 BNCP^[8-9]为始发装药(药量 60 mg)的激光点火器进行了发火后状态分析,发现与药面接触处透镜端面原镀膜破坏严重,封接玻璃变成粉末状(如图 4 所示)或被冲击波破碎为块状(如图 5 所示),透镜强度变差,易于破断。透镜另一端面及与之相接触的光纤亦破坏严重(如图 6、图 7 所示)。发火后气压承压测试(25 MPa、2 min)表明,所有 10 发激光点火器发火后都出现了较严重的泄漏。



a 药面处透镜镀膜面

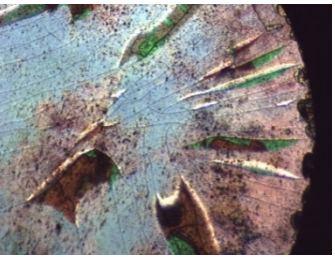


b 透镜及封接玻璃(粉末状)



c 接收光纤入射能量的透镜端面

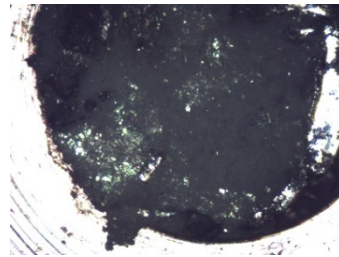
图 4 激光点火器发火后破坏情况



a 药面处透镜镀膜面



b 透镜及封接玻璃(块状)



c 接收光纤入射能量的透镜端面

图 5 激光点火器发火后破坏情况

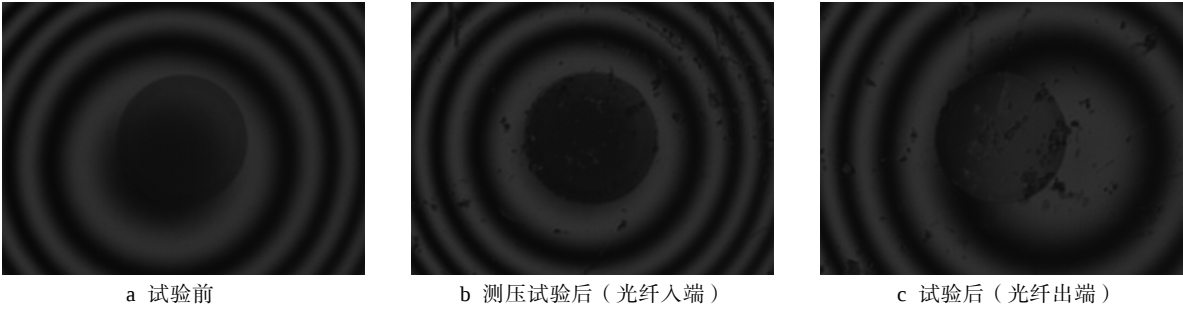


图 6 激光能量输入光纤发火前后干涉对比（平面）

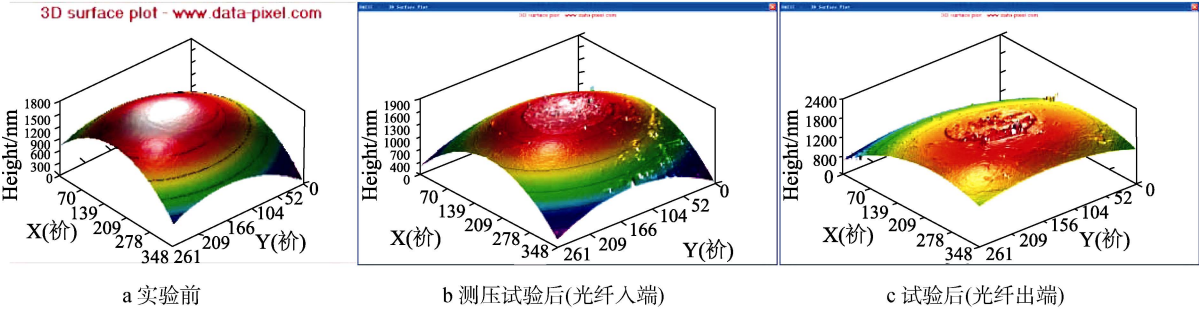


图 7 激光能量输入光纤发火前后干涉对比（3D）

3.1.2 起爆药量减少后

为提高激光点火器发火后的密封性，将始发装药 BNCP 的药量减少至 20 mg。作用后，观察封接玻璃，无破坏，透镜保持较好强度。由于起爆药作用对透镜造成的冲击破坏依然存在，并且 5 发接收光纤入射能量的透镜端面都有不同程度的镀膜脱落或碎裂情况出现（如图 8 所示）。虽然 BNCP 药量减少，激光点火器发火后的破坏情况得到改善，但发火后气压承压测试（25 MPa、2 min）表明，所有 16 发激光点火器发火后亦出现了泄漏。

3.1.3 改进封接长度

为进一步提高激光点火器发火后的密封性，对始发装药 BNCP 的激光点火器玻璃封接长度进行了改进，将封接长度由 2 mm 增长为 5 mm 后，完成了 9 发激光点火器的制备与发火试验。从试验结果看，玻璃封接长度进行了改进后，起爆药作用对透镜造成的冲击破坏以及接收光纤入射能量的透镜端面镀膜脱落情况得到缓解（如图 9 所示）。发火作用后，进行气压承压测试（25 MPa、2 min），发现仅有 2 发出现微漏。

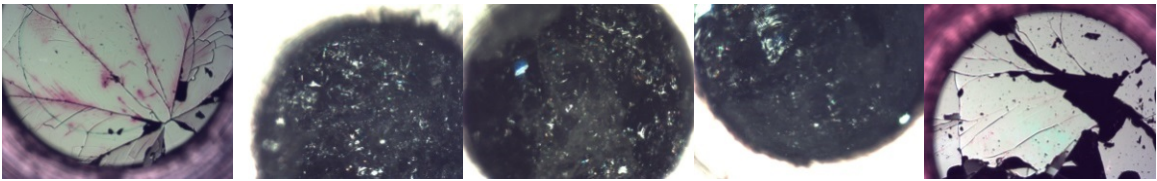


图 8 减少 BNCP 药量后接收光纤入射能量的透镜端面发火后的破坏情况

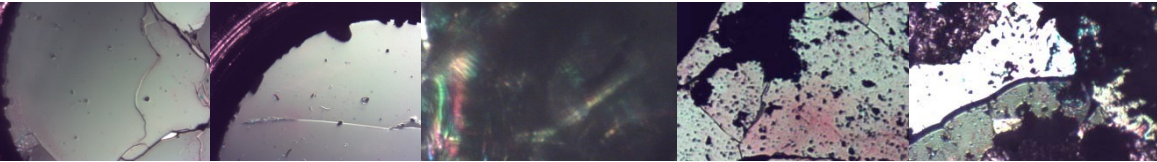


图 9 改进封接长度后接收光纤入射能量的透镜端面发火后的破坏情况

3.2 始发装药为 BPN 的激光点火器

由于 BNCP 起爆药爆热 4000 J/g，比热容为 487 mL/g，作用后对玻璃窗口及封接位置有较大冲击，而 BPN^[10-11]等点火药反应以产生固体残渣和热量为主，对于保持作用后玻璃窗口及封接玻璃的完整性

有益。因此，探索了以 BPN 为首发装药的激光点火器技术，封接玻璃长度为 2 mm，其他封接参数不变。完成了 5 发激光点火器装药与发火试验，试验后观察封接玻璃无破坏，透镜保持较好强度。接收光纤入射能量的透镜端面除 1 发有轻微损伤外，其余均完好（如图 10 所示）。

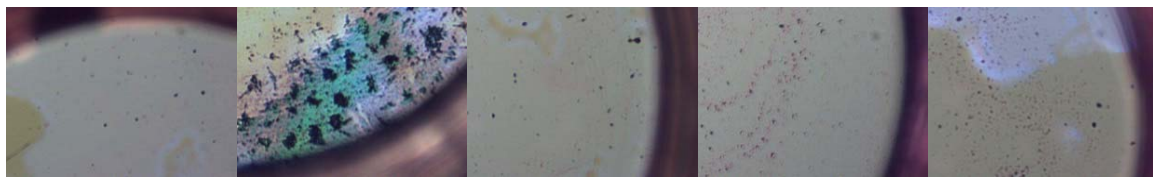


图 10 始发药剂为 BPN 时接收光纤入射能量的透镜端面发火后情况

因为起爆药作用后产生兆帕甚至吉帕量级的冲击波压力,在点火过程中,对激光点火器的光学器件、封接玻璃等会产生一定的破坏作用。因此为提升激光点火器的密封性能,特别是发火后的承压性能,应做好始发装药的选择,宜选用点火类药剂。如选用起爆药,应慎重,尽量选择威力较小的起爆药,并对其装药量进行控制,同时采取提升透镜等光学元件的力学强度、加长封接玻璃长度等措施。

5 结语

对激光点火器作用后承压密封性能试验及工艺方案还有待进一步研究,后续工作中,在封接过程中可通过严格控制封接温度、辅以退火等工艺处理,使封接玻璃整体性能均一,降低缺陷概率,使激光点火器的密封性能得到较大改善。对于工作温度要求不高的应用场合,可采取金属焊料填充的方式,使点火器的作用后密封性能得到大幅提升。

参考文献:

- [1] MIL-STD-1901A, 火箭及导弹发动机点火系统设计与安全性准则[S].
- [2] STANAG 4368, 火箭及导弹发动机的电和激光点火系统安全性设计要求[S].
- [3] AIAA S-113—2016, 空间及运载火箭用火工系统及装置[S].
- [4] 贺爱锋, 褚恩义, 曹椿强, 等. 低温对激光起爆系统能量传输效率的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(7): 698-702.
- [5] CAO Chun-qiang, HE Ai-feng, JING Bo, et al. Design of Integrated Laser Initiator[J]. SPIE, 2018, 10710: 43-52.
- [6] 董福惠. 铋系低熔点电子玻璃结构与性能的表征[D]. 上海: 华东办学, 2009.
- [7] GJB 5309.3—2004, 火工品试验方法 第3部分: 泄漏试验 氦气法[S].
- [8] 阿格拉沃尔. 高能材料——火药、炸药和烟火药[M]. 欧育湘, 韩廷解, 芮久后, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [9] 盛涤伦, 朱雅红, 陈利魁 等. 激光与含能化合物相互作用机理[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 481-486.
- [10] LIEN C Y, DIANE M M, JAMES A R, et al. Testing of Mini-Igniter Containing 35-Year-Old B/KNO₃ Pellets[C]// 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California, 2006.
- [11] KOHSEI M. Combustion of Boron-Pyrotechnics[C]// 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Salt Lake City, Utah, 2001.