

弱密封火工品的失效模式和贮存性能研究

李芳¹, 张鹏辉¹, 屈萍¹, 胡伟¹, 刘跃仪², 谢明伟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. 中北大学 环境与安全工程学院, 太原 030051)

摘要: **目的** 获取弱密封火工品在温度和温湿度环境下的失效模式和贮存性能。**方法** 设计温度和温湿度 2 种环境下 2 种弱密封火工品的加速寿命试验, 对加速贮存后的火工品进行外观检查、性能测试和失效模式分析。**结果** 点火头这类防潮漆密封火工品的失效模式主要是作用时间变长, 点火能力不足, 其失效机理主要是脚线的氧化、药剂的潮解和药剂中还原剂的氧化。火焰雷管这类绸垫涂胶密封的火工品, 在温湿度应力下的失效模式主要为输出能力下降, 其失效机理主要是部装铅遇水发生化学反应。**结论** 弱密封火工品在温湿度环境下的贮存特性与自身密封性和装药特性有密切关系, 其失效速率取决于自身的密封性和主装药剂的吸湿性和稳定性。

关键词: 弱密封火工品; 加速寿命; 温度; 温湿度; 失效模式; 贮存性能

中图分类号: TJ450.89

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0124-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.015

Failure Modes and Storage Performance of Weakly Sealed Pyrotechnics

LI Fang¹, ZHANG Peng-hui¹, QU Ping¹, HU Wei¹, LIU Luo-yi², XIE Ming-wei¹

(1. National Key Laboratory of Applied Physics-Chemical, Shaanxi Applied Physics-chemistry

Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. School of Environment and Safety Engineering,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the failure modes and storage performance of weakly sealed pyrotechnics under temperature and humidity environments. The accelerated life tests for two types of weakly sealed pyrotechnics under temperature and humidity environments were designed, and visual inspection, performance testing, and failure mode analysis were conducted on the pyrotechnics after accelerated storage. The main failure modes of damp proof paint sealed pyrotechnics such as ignition heads were prolonged action time and insufficient ignition ability. The main failure mechanisms were oxidation of pins, deliquescence of the agent, and oxidation of the reducing agent in the agent. The failure mode of silk pad and adhesive sealed pyrotechnics such as flame detonators, under temperature and humidity stress mainly resulted in a decrease in output capacity. The failure mechanism was mainly due to the chemical reaction of carboxylic lead with water. The storage characteristics of weakly sealed pyrotechnics are closely related to their own sealing and charging characteristics under temperature and humidity environments. Their failure rate depends on their own sealing and the hygroscopicity and stability of the main charging agent.

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2023-09-21

Received: 2023-07-24; Revised: 2023-09-21

引文格式: 李芳, 张鹏辉, 屈萍, 等. 弱密封火工品的失效模式和贮存性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 124-130.

LI Fang, ZHANG Peng-hui, QU Ping, et al. Failure Modes and Storage Performance of Weakly Sealed Pyrotechnics[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 124-130.

KEY WORDS: weakly sealed pyrotechnics; accelerated life; temperature; temperature and humidity; failure mode; storage performance

火工品生产完成并交付用户后,所处的环境通常有 2 类:一类是随武器系统一起长期安装在系统(弹)上,随上级系统一起贮存,其环境主要是系统内小环境和外部大环境;另一类大部分时间是在库房单独贮存,有训练任务时装弹,其环境主要是包装箱内小环境和外部大环境^[1-5]。对于单独包装贮存的火工品,其失效模式和失效机理比较单一,以缓慢热分解和热氧化为主^[6-10]。对于随弹贮存的火工品,由于环境中存在水汽和其他气氛而导致其失效机理相对复杂^[11-15]。目前通过实验室加速模拟的方法对火工品或火工药剂的失效模式和贮存性能的研究多集中在温度和温湿度两大基本应力^[16-19]。

目前,国内的火工品按密封性可分为 2 类:全密封和弱密封。对于全密封的火工品(如激光焊接火工品),其在地面贮存过程中受外界因素的影响较小,而对于弱密封的火工品(如点火头、火焰雷管、针刺火帽等),一般是通过防潮漆、绸垫涂胶或盖片涂胶进行密封。火工品的密封程度不同,其抵抗外界环境的能力也不同,对其贮存寿命的影响也会不同^[20-24]。在火工品贮存过程中,温度应力不可避免,而对于其他环境应力,则可依据火工品的贮存性能,通过控制

贮存环境的湿度,选择合适的包装等方式降低外界环境应力对火工品的影响,提高火工品的贮存可靠性^[25-26]。

本文主要以两型弱密封火工品为研究对象,通过设计单一温度和温湿度加速寿命试验,考察两型弱密封火工品密封和非密封状态下对外界环境的抵御能力,以获取该两型弱密封火工品的贮存特性和失效模式。

1 加速贮存试验方案设计和结果分析

两型弱密封火工品,其中一型为防潮漆密封的电点火头,一型为绸垫密封的火焰雷管。根据该两型火工品的预试验结果,分别设计了该两型弱密封火工品的高温和高湿下的加速贮存试验。试验设计参照 GJB 736.8—1990《火工品试验方法 71℃试验法》和 Q/AH0 180—98《火工品加速寿命试验高温高湿试验法》,试验设备采用标准的高温高湿试验箱,试验方案见表 1。按照表 1 设计的方案开展了该弱密封电火工品温度和温湿度条件下的加速贮存试验,按照取样方案进行了取样,对样品进行了外观检查、电阻测试、电镜和能谱及发火试验和作用时间测试。

表 1 温度和温湿度条件下加速贮存方案
Tab.1 Storage scheme under temperature and temperature-humidity conditions

序号	产品名称	试验应力	试验数量	取样	测试项目
1	点火头	90℃	100	首次 14 d, 后续取样根据前期试验结果, 每次取 10 发	外观, 电阻, 微观形貌和成分, 发火, 作用时间
2	点火头	71℃, RH 为 95%	50	首次 7 d, 后续取样根据前期试验结果, 每次 8 发	外观, 电阻, 微观形貌和成分, 发火, 作用时间
3	火焰雷管	90℃	100	首次 14 d, 后续取样根据前期试验结果, 每次取样 10 发	外观, 微观形貌和成分, 发火, 输出能力
4	火焰雷管	71℃, RH 为 95%	50	首次 14 d, 后续取样根据前期试验结果, 每次取样 10 发	外观, 微观形貌和成分, 发火, 输出能力

2 两型火工品的贮存特性分析

对 2 种产品不同加速贮存时间后取出的样品进行了取样测试,结果表明,在 90℃贮存前期,点火头的作用时间变化不大,均在 30 ms 左右,满足 50 ms 的技术指标要求;在贮存到 140 d 时,点火头出现了多发失效,10 发试验样品有 2 发测得了作用时间,分别为 27.2、29.6 ms,1 发出现了滞后的闷响,作用时间未测到,其余 7 发未发火。对未发火的试验样品进行了解剖分析,结果表明,桥丝为正常通电后熔断,但未点燃药剂。

在 71℃、95%RH 贮存过程中,该型点火头的作

用时间随贮存时间呈快速增大趋势。在贮存 7 d 时,8 发中有 1 发作用时间超差(63 ms),1 发未发火;贮存 11 d 时,有 1 发作用时间超差(74 ms),2 发未发火;贮存 14.5 d 时,有 2 发作用时间超差(68、61 ms),1 发未发火;贮存 16 d 时,1 发作用时间超差(67 ms),2 发未发火;贮存 18.5 d 时,有 5 发作用时间超差(54、65、104、85、75 ms),3 发未发火。对通电后未发火的该型点火头进行了解剖分析,结果表明,桥丝为正常通电后熔断,但未点燃药剂。该型火焰雷管在 90℃贮存至 140 d 时,性能未出现明显退化;在 71℃、95%RH 贮存至 56 d 时,出现了 2 发发火但未炸穿铅板,1 发输出端药剂未作用。

3 点火头失效模式和失效原因分析

3.1 脚线和桥丝

该型点火头在温度和温湿度条件下贮存一定时间后,脚线的包覆塑料完整,除脚线的包覆塑料由于长期高温贮存老化变黑外,外观未出现异状。对温度和温湿度贮存后的火工品进行了解剖,发现防潮漆均包覆紧密,内部药剂均相对紧实。

分别对经高温和高温高湿加速贮存了140、18.5 d的该型点火头进行电阻测量,结果表明,单一温度贮存后,脚线的电阻有所增大,但增大不明显(从 $1\ \Omega$ 增大到 $1.3\ \Omega$ 左右)。温湿度贮存条件下,电阻增大较快,达到十几甚至几十欧姆。分别对2种条件下贮

存后未经打磨的脚线进行外观形貌和成分分析,脚线贮存后的外观形貌如图1所示,脚线中氧元素的原子分数如图2所示。

从图2的成分分析结果可知,在 $71\ ^\circ\text{C}$ 、95%RH下贮存18.5 d后,其脚线表面的氧原子含量大大超过 $90\ ^\circ\text{C}$ 下贮存140 d后脚线表面的氧原子含量,说明湿度的存在加剧了脚线的氧化程度。同时对温湿度贮存18.5 d后的试验样品进行了解剖,对解剖出的桥丝进行了超声波清洗,并进行了外观和成分分析,其外观形貌和各组成成分的百分比如图3所示。从图3a可以看出,解剖清洗后的桥丝仍有部分药剂附着在桥丝表面,但桥丝外观紧致,看不到腐蚀痕迹。图3b桥丝表面的能谱分析结果表明,氧原子含量较低,也验证了桥丝未被腐蚀。

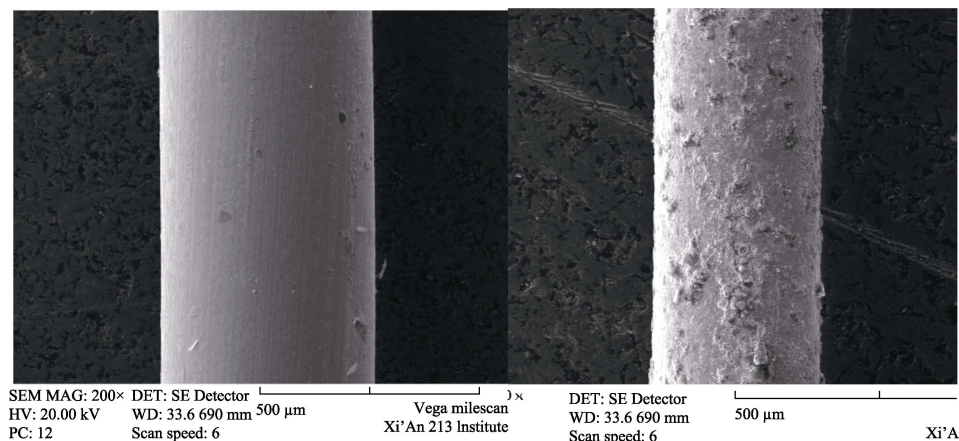


图1 $90\ ^\circ\text{C}$ 和 $71\ ^\circ\text{C}$ 、95%RH下贮存后脚线的外观形貌
Fig.1 Appearance of pins after $90\ ^\circ\text{C}$ and $71\ ^\circ\text{C}$, 95%RH storage

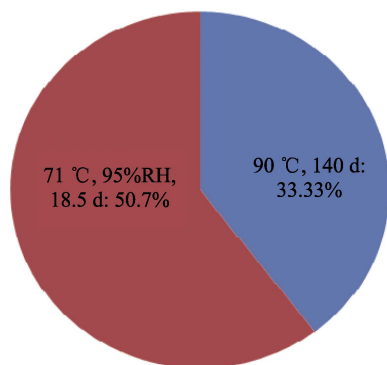


图2 $90\ ^\circ\text{C}$ 和 $71\ ^\circ\text{C}$ 、95%RH贮存后脚线
中氧元素的原子分数
Fig.2 Oxygen element percentage of pins after $90\ ^\circ\text{C}$
and $71\ ^\circ\text{C}$, 95%RH storage

通过以上分析可知,该点火头的失效模式之一是电阻增大,失效原因为在湿气的作用下合金脚线发生了快速氧化。通过采用细砂纸对脚线进行打磨去除氧化层,或直接将裸露的脚线剪去,重新剥离部分漆包线,可以降低电阻增大这种失效模式对火工品发火性能的影响。

3.2 药剂

作为火工品重要的组成部分,贮存后药剂的性能对火工品的发火性能起决定作用。分别对贮存前的该型点火头和高温、高温高湿贮存后出现作用时间超差的同批取样的该型点火头进行了解剖,对其内部药剂(主要是药剂中的还原剂镁粉)的成分进行了能谱分析,结果如图4~6所示。

从图4~6可以看出,贮存前该型点火头的主装药剂中镁原子的含氧量很低,表明贮存前镁粉是以还原剂的形式存在。在经过温度、温湿度贮存一定时间后,药剂中的含氧量明显增大,说明大部分镁粉被氧化。因此,作用时间超差是该点火头的另一失效模式。作用时间超差的原因为,点火药剂中的还原剂镁粉被氧化而失活。

对比图4~6还可以发现,高温贮存过程中镁粉氧化的速度远远低于高温高湿贮存过程中镁粉氧化的速度。究其原因主要是,在高温贮存环境下,由于没有水分子的浸入,药剂中的黏结剂未失效,药剂内部结合紧密,空气中的氧原子不易到达内部,因而点火头从外到内镁粉的氧化速度较慢。在高温高湿贮存环

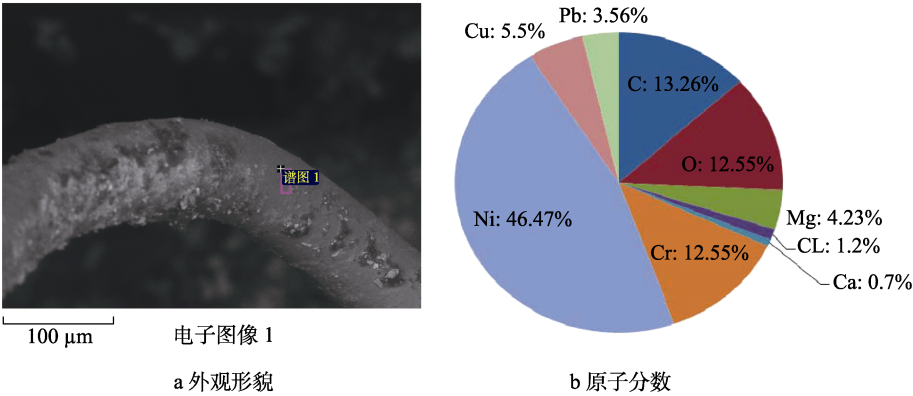


图 3 温湿度贮存 18.5 天后桥丝的外观形貌和各元素原子分数
Fig.3 Appearance and element percentage of bridge wire after 18.5 days storage under temperature and humidity environments: a) appearance; b) atom fraction

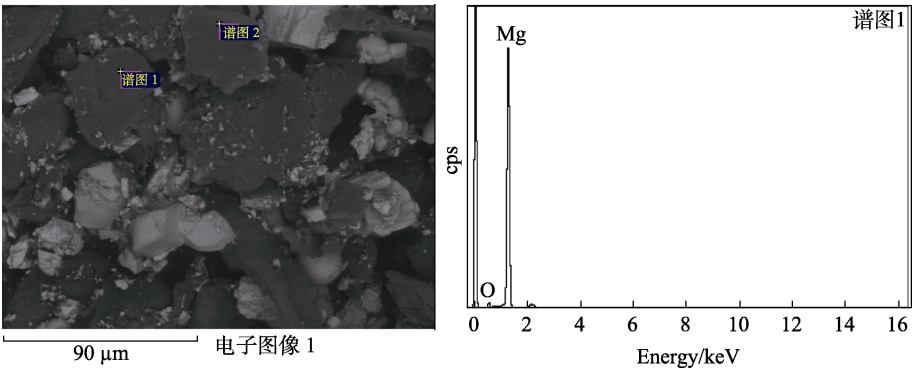


图 4 贮存前镁粉的的成分分析结果
Fig.4 Component analysis result of magnesium powder before storage

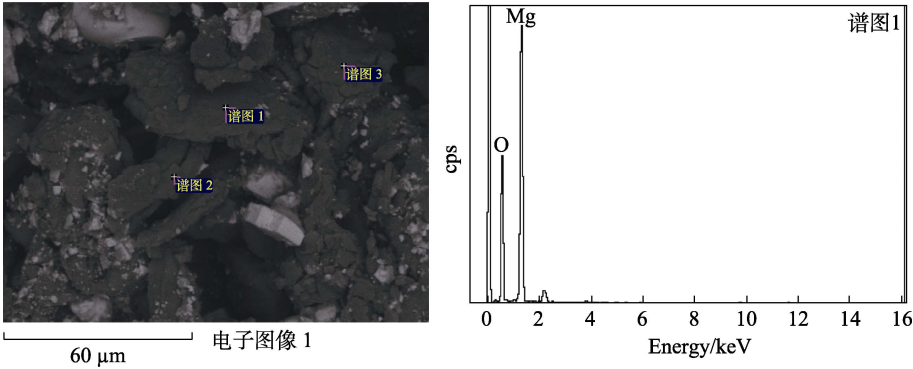


图 5 90 °C 贮存后作用时间镁粉的成分分析结果
Fig.5 Component analysis result of magnesium powder after 90 °C storage

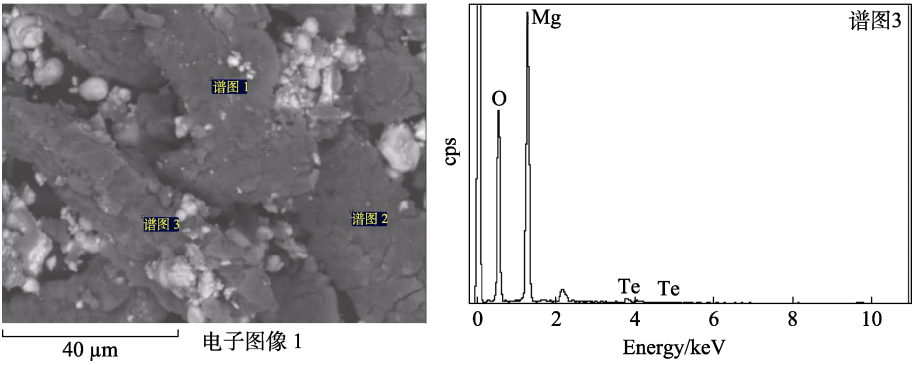


图 6 71 °C、95%RH 贮存 18.5 d 后镁粉的成分分析结果
Fig.6 Component analysis result of magnesium powder after 71 °C-95%RH storage for 18.5 days

境下,由于水分子的存在,药剂受热膨胀时,防潮漆和药头内部形成的空隙使水分子容易浸入,水分子携带氧分子进入内部,与镁原子结合,生成氧化镁,使得镁粉从外到内的氧化速度加快,从而致使火工品中药剂加速失效,进而导致点火头的性能降低。

4 火焰雷管的失效模式和失效机理分析

火焰雷管中的装药由输入端至输出端依次为斯蒂芬酸铅、羧铅和太安。为探究火焰雷管的失效原因,对在 71 °C、95%RH 条件下贮存 56 d 后输出性能下降的同批火焰雷管进行了解剖,按装药顺序对药剂进

行分解。因为解剖出来的药剂为混合药,故采用红外和 XRD 衍射进行了分析,通过与 3 种药剂的标准谱图进行对比分析,获取该型火焰雷管的输出能力下降的原因。

斯蒂芬酸铅的红外谱图和 XRD 衍射谱图如图 7 所示。通过对比 XRD 衍射谱图与标准谱,并结合红外分析结果,显示样品主体为斯蒂芬酸铅,混有氮化铅,推测有变质成分(碳酸铅或碱式碳酸铅)。

羧铅的红外谱图和 XRD 衍射谱图如图 8 所示。通过对比 XRD 衍射谱图与标准谱,并结合红外分析结果,显示样品中有羧铅及碱式碳酸铅,样品发生变质,产生了碱式碳酸铅。

太安的红外谱图和 XRD 衍射谱图如图 9 所示。

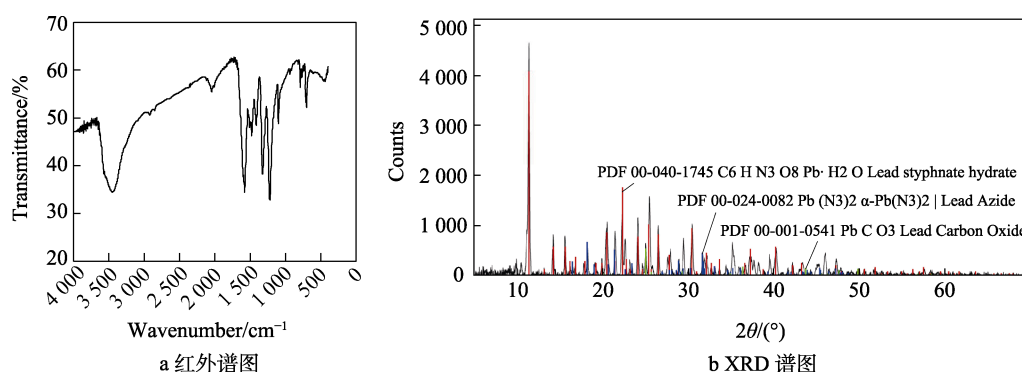


图 7 71 °C、95%RH 贮存 56 d 后火焰雷管中斯蒂芬酸铅的分析结果

Fig.7 Analysis results of LTNR in flame detonators stored at 71 °C and 95%RH for 56 days: a) infrared spectra; b) XRD spectra

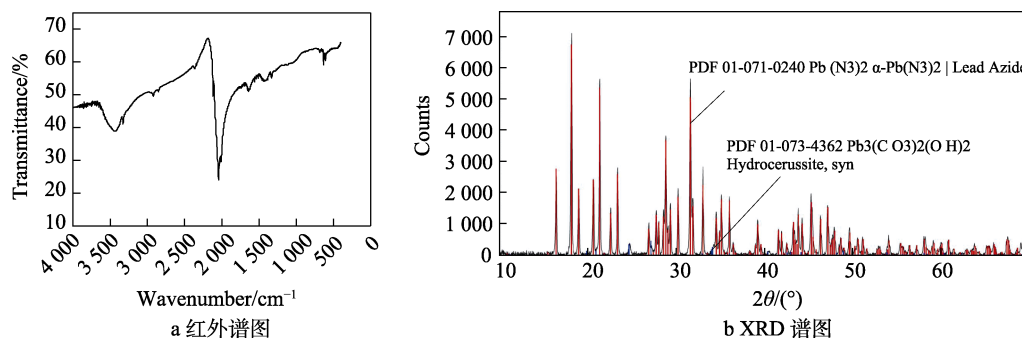


图 8 71 °C、95%RH 贮存 56 d 后火焰雷管中羧铅的分析结果

Fig.8 Analysis results of CMC-PbN6 in flame detonators stored at 71 °C and 95%RH for 56 days: a) infrared spectra; b) XRD spectra

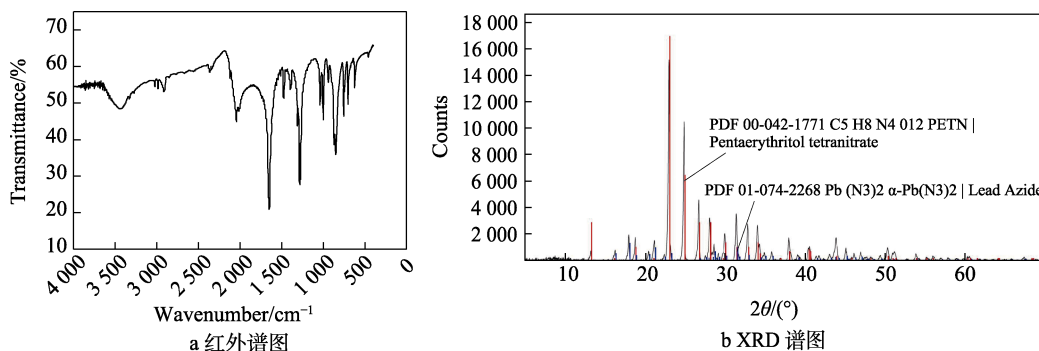


图 9 71 °C、95%RH 贮存 56 天后火焰雷管中太安的分析结果

Fig.9 Analysis results of CMC-PbN6 in flame detonators stored at 71 °C and 95%RH for 56 days: a) infrared spectra; b) XRD spectra

通过对比 XRD 衍射谱图与标准谱,并结合红外分析结果,显示样品中含有太安及少量氮化铅,成分未发生明显变化。

火焰雷管中,由输入端至输出端的3种装药的红外和 XRD 分析结果表明,该型火焰雷管在高温高湿下的失效原因为,经高温高湿贮存后,其中间层的羧铅遇水生成碱式碳酸铅,导致雷管的输出威力下降。

5 结论

通过以上研究,可以得出以下结论:

1) 弱密封火工品的贮存特性与自身密封性和装药特性有密切关系。防潮漆密封的点火头的贮存特性较绸垫涂胶密封的火焰雷管弱。

2) 点火头这类防潮漆密封的火工品的失效模式主要是作用时间变长,点火能力不足。其在温度应力下的失效机理是点火药中还原剂的氧化;在温湿度双应力下的失效原因主要是脚线的氧化、药剂的潮解和药剂中还原剂的氧化。

3) 火焰雷管这类绸垫涂胶密封的火工品,在温湿度应力下的失效模式主要输出能力下降,失效原因是内部羧铅遇水发生化学反应导致。

4) 温湿度贮存环境下,水分的加入催化了弱密封火工品内部药剂的化学反应,这是导致火工品在温湿度环境下快速失效的主要原因。

5) 对于内部药剂和桥丝相容性好的弱密封火工品,温湿度贮存环境不易导致桥丝腐蚀。

6) 弱密封火工品较易受外界环境影响,建议单独密封贮存或控制贮存环境的湿度。在使用过程中,确保使用小环境中各物质之间的相容性和湿度,以延长其失效的时间,提高其贮存或使用的可靠性。

参考文献:

- [1] 张福光,崔旭涛,洪亮. 导弹火工品贮存寿命的影响因素分析[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 24-27.
ZHANG Fu-guang, CUI Xu-tao, HONG Liang. Influencing Factor Analysis of Storage Life of Missile Initiating Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(6): 24-27.
- [2] 戎永杰,刘文举,苏坡,等. 基于末敏弹的战场环境复杂度研究[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(3): 61-64.
RONG Yong-jie, LIU Wen-ju, SU Po, et al. Research on Complicated Battlefield Environment Based on Terminal Sensing Ammunition[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2022, 42(3): 61-64.
- [3] 张仕念,吴勋,颜诗源,等. 贮存使用环境对导弹性能的影响机理[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 17-22.
ZHANG Shi-nian, WU Xun, YAN Shi-yuan, et al. Influencing Mechanism of Storage /Use Environment on Missile Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 17-22.
- [4] YANG L C. Correlation between the Accelerated Aging Test (AAT) and Real World Storage Temperature, [J]// Proceedings of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Flintridge: AIAA, 2007.
- [5] 刘洪于. 基于模糊理论的导弹贮存使用环境分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(12): 95-100.
LIU Hong-yu. Analysis of Missile Storage/Use Environment Based on Fuzzy Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(12): 95-100.
- [6] 赵伟,王成. 火工品失效模式[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(7): 14-16.
ZHAO Wei, WANG Cheng. Failure Mode of Initiating Explosive Device[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2010, 31(7): 14-16.
- [7] 杨国辉. 典型装备温度响应测量及平衡时间研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 128-135.
YANG Guo-hui. Temperature Response Measurement and Balance Time of Typical Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 128-135.
- [8] UDLOCK D E. Storage of Solid Propellants in a Dry Environment[R]. NASA-CR-158073, 1978.
- [9] 张蕊,李芳,都振华,等. 电火工品单一温度下的贮存特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 329-333.
ZHANG Rui, LI Fang, DU Zhen-hua, et al. Research on Storage Characteristics of Electric Explosive Devices under Single Temperature Storage Condition[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 329-333.
- [10] 严楠. 火工品失效分析概论[J]. 失效分析与预防, 2006, 1(1): 10-14.
YAN Nan. Generality of Analysis on Initiating Explosive Device Failure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2006, 1(1): 10-14.
- [11] 李芳,张蕊,都振华,等. 不同贮存环境下 SCB 电极塞的失效机理[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 168-172.
LI Fang, ZHANG Rui, DU Zhen-hua, et al. Failure Mechanism of SCB Electrode Plugs under Different Storage Conditions[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(2): 168-172.
- [12] 赵志兵. 导引头故障模式、影响与危害性分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
ZHAO Zhi-bing. Failure mode Effect Criticality Analysis for Seeker[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [13] 唐科,汪锐琼,曲展龙,等. 温度-湿度-高度环境对航天火工装置性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 7-13.
TANG Ke, WANG Rui-qiong, QU Zhan-long, et al. Influence of Temperature-Humidity-Altitude Environment on the Performance of Aerospace Explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 7-13.
- [14] 刘琦,郁大照,王琳,等. 航空电连接器海洋环境加速试验与腐蚀仿真研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 18-27.

- LIU Qi, YU Da-zhao, WANG Lin, et al. Acceleration Test and Corrosion Simulation of Aviation Electrical Connectors in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 18-27.
- [15] 涂小珍, 李敬明, 韦兴文, 等. 某火工品贮存老化效应分析研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 539-542.
- TU Xiao-zhen, LI Jing-ming, WEI Xing-wen, et al. Study on the Aging Effect of a Detonator[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 539-542.
- [16] 张志华. 加速寿命试验及其统计分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.
- ZHANG Zhi-hua. Accelerated Life Test and Its Statistical Analysis[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2002.
- [17] 刘晓娣, 韩建立, 姜普涛. 弹上电子部件加速因子估计方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 7-12.
- LIU Xiao-di, HAN Jian-li, JIANG Pu-tao. Acceleration Factor Estimation of Missile-Borne Electronic Components[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 7-12.
- [18] 刘朝阳, 赵晓利, 杨岩峰, 等. 制导弹药火工品单应力水平加速寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5): 29-31.
- LIU Chao-yang, ZHAO Xiao-li, YANG Yan-feng, et al. Study on Single Stress Level Accelerated Life Test of Guided Ammunition Initiating Device[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 29-31.
- [19] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 81-87.
- QIN Qiang, ZHANG Sheng-peng. Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environmental Stresses[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 81-87.
- [20] 董海平, 张静静, 魏小琴, 等. 温度交变条件下固体推进剂贮存寿命评估[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(5): 479-484.
- DONG Hai-ping, ZHANG Jing-jing, WEI Xiao-qin, et al. Storage Life Evaluation of Solid Propellant under Alternating Temperature Conditions[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(5): 479-484.
- [21] 吴建国, 田军挺, 李凌江, 等. 基于多源信息融合分析的导弹贮存寿命评估方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(2): 255-260.
- WU Jian-guo, TIAN Jun-ting, LI Ling-jiang, et al. Assessment Method of Missile Storage Life Based on Multi-Information Fusion Analysis[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(2): 255-260.
- [22] 姜普涛, 韩建立, 马俊慧, 等. 弹用电连接器湿热环境下寿命预测[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 13-20.
- JIANG Pu-tao, HAN Jian-li, MA Jun-hui, et al. Life Prediction of Missile Electrical Connector in Hot and Humid Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 13-20.
- [23] 王蓓. 某型号导弹整机加速贮存延寿研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- WANG Bei. Study on Accelerated Storage and Life Extension Of a Certain Missile[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [24] 丰雷. 某弹用电子部件贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2016, 13(6): 114-119.
- FENG Lei. Storage Life Assessment of Electronic Component in a Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(6): 114-119.
- [25] 滕克难, 韩建立. 海军战术导弹贮存延寿工程实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- TENG Ke-nan, HAN Jian-li. Research on the Application for Tactical Missile Storage Life Extension Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [26] 曹火焰, 王振华, 姚玉林. 岛礁环境下火工品储存影响因素分析及对策[J]. 科技创新与应用, 2020(34): 121-122.
- CAO Huo-yan, WANG Zhen-hua, YAO Yu-lin. Analysis of Influencing Factors of Explosive Devices Storage under Island Reef Environment and Countermeasures[J]. Technology Innovation and Application, 2020(34): 121-122.

责任编辑: 刘世忠