

浅析盐雾环境对火工药剂安定性能的影响

于谦¹, 侯佳杏¹, 刘劲松², 张宏光², 刘闯², 杨利¹

(1. 北京理工大学, 北京 100081; 2. 长春设备工艺研究所, 长春 130000)

摘要: **目的** 获取海洋生态环境条件下火工药剂性能变化的规律, 开展火工药剂在盐雾环境中的安定性试验研究, 以保障火工药剂的可靠性。**方法** 通过 SEM 成像技术和 X-射线衍射技术表征 2 种典型起爆药叠氮化铅 (Lead Azide, LA) 和斯蒂芬酸铅 (Lead Styphnate, LS) 在盐雾试验前后微观形貌及组分的变化, 并结合 DSC 热分析技术, 从热分解动力学角度, 开展火工药剂在盐雾环境影响下失效机理的研究。**结果** 在盐雾环境应力的影响下, LA 的长柱状晶体结构发生脆化, 层裂成不规则的小片状晶型, 且随着盐雾试验时间的增加, LA 的热分解反应峰会逐渐前移, 试验后产物组分只有 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$, 其本质安定性显著下降。LS 受盐雾环境应力的影响, 其棱柱状晶体结构会层裂为小片状晶型, 且部分 LS 分解形成 $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, 导致其安定性降低。**结论** 2 种典型火工药剂 LA 和 LS 受盐雾环境应力因素的影响, 都会发生失效分解反应, 与 LA 相比, LS 在盐雾环境下具有更加稳定的安定性能。

关键词: 火工药剂; 盐雾环境; 微观形貌; 失效机理; 热分析技术; 本质安定性

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)12-0040-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.12.007

Effects of Salt Spray Environment on Stabilizing Property of Pyrotechnic Agents

YU Qian¹, HOU Jia-xing¹, LIU Jing-song², ZHANG Hong-guang², LIU Chuang², YANG Li¹

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Changchun Institute of Equipment and Process, Changchun 130000, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the change rule on the properties of pyrotechnic agents under marine ecological environment, and conduct study about the stability test of pyrotechnic agents in salt spray environment to ensure the reliability of pyrotechnic agents. The microscopic morphology and composition changes of two typical primary explosives, lead azide (LA) and lead styphnate (LS) before and after the salt spray test were characterized by SEM imaging technology and X-ray diffraction technology. The failure mechanism of pyrotechnic agents under the effects of salt spray environment was studied from the perspective of thermal decomposition kinetics by DSC. Under the effects of salt spray environmental stress, the long columnar crystal structure of LA was embrittled and cracked into irregular small flaky crystals. Moreover, the thermal decomposition reaction peak of LA gradually moved forward with the increase of salt spray test time. After the test, the product component was $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$, and its intrinsic stability decreased; Under the effects of salt spray environmental stress, its prismatic crystal structure

收稿日期: 2022-11-24; 修订日期: 2022-12-06

Received: 2022-11-24; Revised: 2022-12-06

作者简介: 于谦 (1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为含能材料的制备与性能。

Biography: YU Qian (1994-), Male, Doctoral candidate, Research focus: preparation and properties of energetic materials.

通讯作者: 杨利 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为含能材料的理论、合成与爆炸性能。

Corresponding author: YANG Li (1972-), Female, Doctor, Professor, Research focus: theory, synthesis and explosive properties of energetic materials.

引文格式: 于谦, 侯佳杏, 刘劲松, 等. 浅析盐雾环境对火工药剂安定性能的影响[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 040-047.

YU Qian, HOU Jia-xing, LIU Jing-song, et al. Effects of Salt Spray Environment on Stabilizing Property of Pyrotechnic Agents[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 040-047.

was stratified into small flake crystal, and part of LS decomposed into $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, resulting in a significant decrease on its intrinsic stability. Two typical pyrotechnic agents, LA and LS, are affected by the stress factors of the salt spray environment, and both will undergo failure decomposition reactions. Compared with LA, LS is more stable in the salt spray environment.

KEY WORDS: pyrotechnic agents; salt spray environment; microscopic morphology; failure mechanism; thermal analysis technology; intrinsic stability

火工药剂是火工序列界面中不可或缺的成分, 可以在预定刺激作用下产生燃烧或爆炸效应, 用于完成火工品的引燃、引爆、做机械功或产生特种效应等功能。其作用本质可以归纳成 3 个要点: 能量转换、能量传递和能量放大, 是武器系统中不可或缺的组分。其中叠氮化铅 (Lead Azide, LA) 和斯蒂芬酸铅 (Lead Styphnate, LS) 由于具有良好的感度和能量输出性能, 广泛应用于国防军事领域^[1-4]。随着人类需求的提升和科技水平的不断进步, 如航天航空技术的发展、星球的登陆与探索、深海矿区资源的开采、战场环境复杂化等多种应用的需要, 要求火工品的使用条件也越来越苛刻。其中火工药剂作为火工品中的核心组成部分, 易受外界因素 (如温度、湿度、盐雾、电磁辐射等) 的影响, 造成无法正常做工作, 导致火工品的失效^[5-9]。因此, 研究火工药剂在外界环境应力因素影响的失效行为具有重要意义。

近年来, 国内外相关领域的学者开展了含能材料在相关外界环境因素影响下, 其性能退化 (失效规律) 的研究。2008 年, Giefers 等^[10]通过使用同步辐射研究化学的试验技术, 研究了压力、温度及电离辐射因素对 PETN 和 TATB 的性能退化规律的影响, 发现样品在温度和电离辐射应力的影响下, 以键重排方式改变了分子水平的爆炸机制, 且验证了 PETN 的分解率几乎不随压力变化, 而 TATB 的分解速率随着压力的增大而大大减慢。2013 年, Zbigniew 等^[11]利用形态学技术并结合金刚石对顶砧 (DAC) 装置, 研究了 PETN 在高温高压环境下的性能响应规律, 研究发现, 高温高压环境应力会影响 PETN 的分子结构和安定性能, 使 PETN 晶相由 PETN-I 到 PETN-III 过渡, 最终转化为更稳定的 PETN-IV, 其中非流体静力学对 PETN-III 在高温下转变为 PETN-IV 的压力起重要作用。2014 年, 郭雪莹等^[12]采用湿热老化试验技术方法, 进行了 LA、四氮烯和钨系延期药在高温高湿环境中性能退化的研究, 结果表明, 试验药剂受温度与湿度组合环境应力的影响, 其分子结构发生明显的变化, 并显著降低药剂预点火反应区、放热反应区所需的能量。目前, 关于火工药剂在外界环境因素影响下的研究多集中于温度、湿度及压力等条件下药剂安定性能的变化, 尚未有海洋生态环境中高温、高湿、盐雾等因素对火工药剂的性能影响的相关研究。

本文根据火工药剂在海洋生态环境中的性能变化不明确, 并未形成系统性研究这一问题, 通过选取

LA 和 LS 这 2 种典型起爆药为研究对象, 建立海洋气候环境条件——盐雾试验装置对 LA 和 LS 进行安定性表征测试。采用盐雾试验箱模拟了海洋环境高温、高湿、盐雾的组合环境因素条件, 以盐雾时间为变量, 并结合形态学与热分析表征技术分析试验前后样品微观形貌、结构、组分及热分解性能的变化, 期望获得这 2 种起爆药在海洋环境作用下的失效规律, 为火工品的应用、贮存及维护提供参考依据^[13]。

1 试验

本文以盐雾时长为变量, 设计了一系列盐雾试验。采用 SEM、XRD、DSC 表征技术, 对盐雾环境作用后的 LA 和 LS 的微形貌、组成成分及热分解性能的变化进行研究, 分析盐雾环境应力因素影响 LA、LS 的失效机理, 以阐明药剂在盐雾环境下性能响应规律。

1.1 样品制备

本试验采用 LA、LS 作为主要研究对象, 是由北京理工大学国家重点实验室提供合成, 纯度为 99.9%, 其中 LA 的平均粒径约为 50 μm , LS 的平均粒径约为 35 μm (满足实际应用的火工药剂粒径要求)。在盐雾环境试验前, 将药剂置于水浴烘箱恒温 50 $^{\circ}\text{C}$ 干燥 4 h 后, 存放在真空干燥器内备用。氯化钠为分析纯, 上海韶远试剂有限公司生产。无水乙醇为分析纯, 北京市通广精细化工公司生产。去离子水为自制。

1.2 试验装置

试验样品性能变化所涉及的主要试验仪器、仪器型号和生产厂家等信息见表 1。采用日本日立 Hitachi 公司 S4800 冷场发射扫描电子显微镜观察颗粒的微观特征形貌, 仪器加速电压范围为 2~5 kV, 分辨率为 1.0 nm (15 kV)、2.0 nm (1 kV), 放大倍数 30~800 000 倍, 测试温度为 20~25 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 50%~60%^[14]。X 射线粉末衍射采用的是德国 Bruker 公司 D8 Advance 粉末衍射仪, 测试电压为 40 kV, 测试电流为 40 mA, 以 Cu-K α 为单色衍射光束的激光放射源, 取 0.15 g 测试样品放入样品槽, 测试衍射角 (2θ) 为 10~80 $^{\circ}$, 测试步长为 0.02 $^{\circ}$, 测试频率为 0.2 s⁻¹^[15]。盐雾试验箱采用 U 型合金高速加温电热管

加热,采用塔式喷雾器,具有连续喷雾、间歇喷雾 2 种喷雾方式,试验定时范围为 0~999 h,盐雾箱容积

为 108 L,盐水箱容积为 15 L,电源电压为 220 V,功率为 2 000 W^[16-19]。

表 1 试验所用仪器信息

Tab.1 Information of instruments used in the test

仪器名称	型号	生产厂家
冷场发射扫描电子显微镜	S4800	日本日立 Hitachi 公司
X-射线衍射仪	D8 advance	德国 Bruker 公司
盐雾试验箱	HYW-60A	上海合恒仪器设备有限公司
差示扫描量热仪	CDR-4P	上海精密科学仪器有限公司
真空干燥箱	DY-ZKF-040	常州市迅驰干燥设备有限公司

1.3 试验过程

首先将盐雾试验箱温度设置在 35 ℃ (依据中性盐雾试验方法-NSS 标准),分别对在盐雾环境中贮存不同时间 (1、2、3 d) 的样品进行试验研究。然后采用形态学技术和热分析技术对试验产物进行微观形貌、结构、组分及热分解性能进行表征,探究盐雾环境应力因素对药剂形貌及安定性能的影响。具体试验步骤如下。

1) 调配盐溶液:量取 1 900.0 mL 去离子水,倒入 2 000 mL 的干净烧杯内。称取 100.0 g NaCl 倒入烧杯,用玻璃棒充分搅拌,使其混合均匀,静置 15 min。

2) 盐雾箱的预设:先检查盐雾箱水位及气密性,再将配制好的盐雾溶液倒入盐雾箱,然后打开仪器电源,设置盐雾箱温度为 35 ℃,盐雾时间设置为 1、2、3 d。调整压力表,使其盐雾沉降率为 1~2 mL/(80 cm²·h)。

3) 放样:将样品均匀平铺在盐雾箱内的试样架上,保证样品与盐雾环境充分接触。

4) 取样:盐雾箱停止运行后,取出样品,在恒

温 50 ℃ 下干燥 4 h 后,进行样品性能表征测试。

2 结果及分析

2.1 盐雾环境下叠氮化铅的失效分析

2.1.1 SEM 形态学表征及分析

通过扫描电镜成像技术对盐雾环境试验前后的 LA 晶体形貌进行表征研究,在不同的放大倍数下,观察样品的立体形貌,如图 1 所示。从图 1a 可知,原料 LA 的晶型结构均匀、致密,表面平整,为典型的 α -LA,呈规则长柱状,粒径大小为 50 μ m 左右,没有明显的层裂、空穴或其他晶体缺陷。由图 1b 可以看出,LA 的晶型受盐雾环境影响,由长柱状破碎成不规则的层状结构,其晶体表面出现大量的裂纹和空穴,且有明显分层现象。由此推断,盐雾环境会侵蚀 LA 晶体内部结构,造成不可逆的应力破坏。产生这种现象的原因并不明确,未有文献对此进行阐述,因此需结合 XRD 技术和 DSC 热分析法进行深层次的反应机理分析研究。

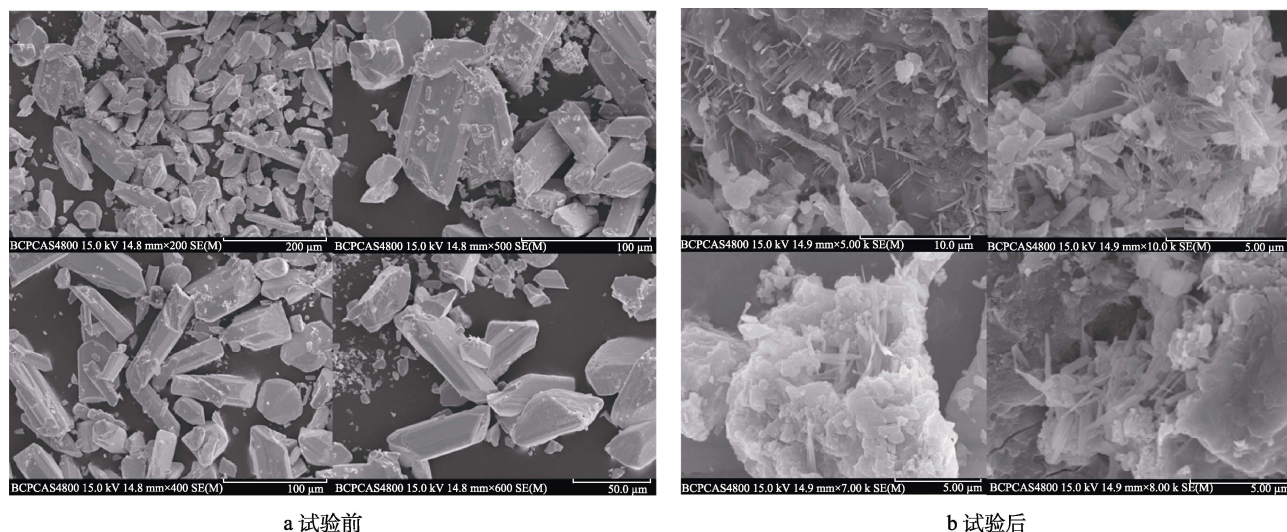


图 1 叠氮化铅在盐雾环境试验前和 3 d 后的 SEM 表面形貌

Fig.1 SEM surface morphology of LA (a) before and (b) after 3 d test in salt spray environment

2.1.2 XRD 组分表征及分析

采用 X-射线衍射仪对盐雾试验前后的 LA 进行组分的表征, 结果如图 2 和图 3 所示。首先将原料 LA 与文献[20]中 XRD 图谱标准卡片进行对比, 特征峰分别一一对应, 说明盐雾试验用的 LA 具有代表性。然后对比图 3a—d 可知, 图 3b 中产物组分在 15.58° 、 22.13° 、 25.35° 等处出现了新的特征衍射峰, 与 XRD 图谱标准卡片对比可知, 其为 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 。同样, 图 3c 中产物的主要成分为 LA、 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 。图 3d 中产物在 14.43° 、 21.28° 、 40.72° 等处的特征衍射峰消失, 表明主要成分为 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 。因此, 随着盐雾时间的增加, LA 逐渐分解为 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$, 从而失效。

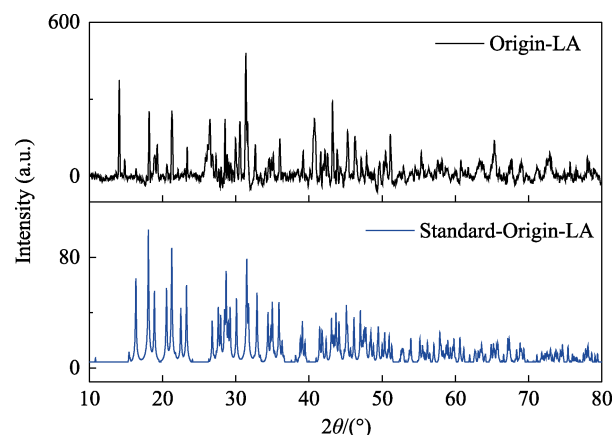


图 2 叠氮化铅的 XRD 表征
Fig.2 XRD characterization of LA

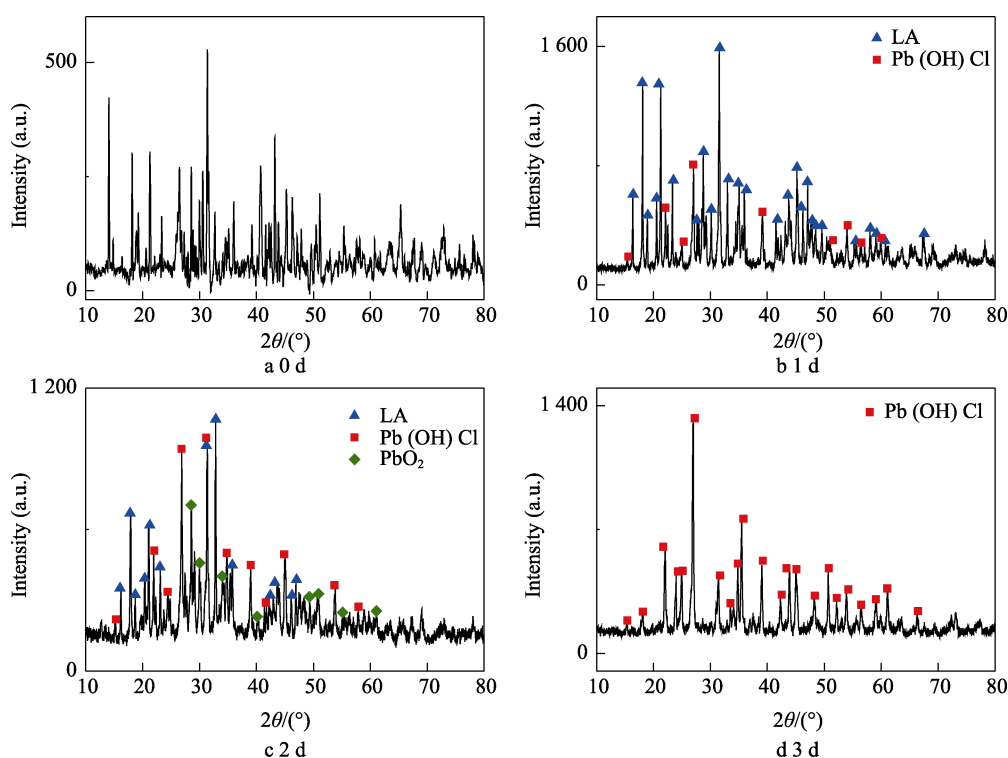


图 3 叠氮化铅在盐雾环境下贮存不同时间后的 XRD 图
Fig.3 XRD patterns of LA stored in salt spray environment for different time

2.1.3 DSC 热分解性能表征及分析

通过 DSC 热分析表征技术进行盐雾环境对 LA 失效机理的分析研究工作。从图 4 可知, 在升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 时, LA 经过一段受热诱导期后, 会发生热解反应, 热流曲线图 4a 有 1 个明显的反应放热峰, 其中 t_0 是 252.10°C , 热分解反应放热峰值温度 t_p 为 373.21°C 。结合文献[21-23]可知, LA 受热发生热分解反应是叠氮根离子 N_3^- 在受热条件下加快了有效自由基碰撞的频率, 放出了大量的 N_2 和热量, 其热分解特征参数见表 2。当把 LA 在 35°C 盐雾环境中贮存 1 d 后, 试样的热解曲线如图 4b 所示, DSC 热分解曲线出现了 3 个明显的反应放热峰。结合 XRD 表征结

果可知, 试样组分中出现了 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$, 前 2 个反应放热峰是 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 受热发生热解反应, 第 3 个反应放热峰是 LA 受热发生热分解反应。当 LA 在盐雾试验条件下贮存到 2 d 时, 从图 4c 可以看出, 试样受热分解存在 3 个阶段, 前 2 个阶段是 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 受热分解起主导作用, 后 1 个阶段是 LA 热分解起主导作用。当 LA 在盐雾环境中贮存 3 d (见图 4d) 后, 只有 2 个反应放热峰。由 XRD 组分表征结果表明, 此时样品的主要成分是 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$, 其开始放热 t_0 为 114.27°C , 热解放热峰值温度 t_p 为 227.30°C 。因此, LA 在盐雾环境应力影响下失效分解为 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$, t_0 由 252.10°C 降低至 114.27°C , 表观活化能由

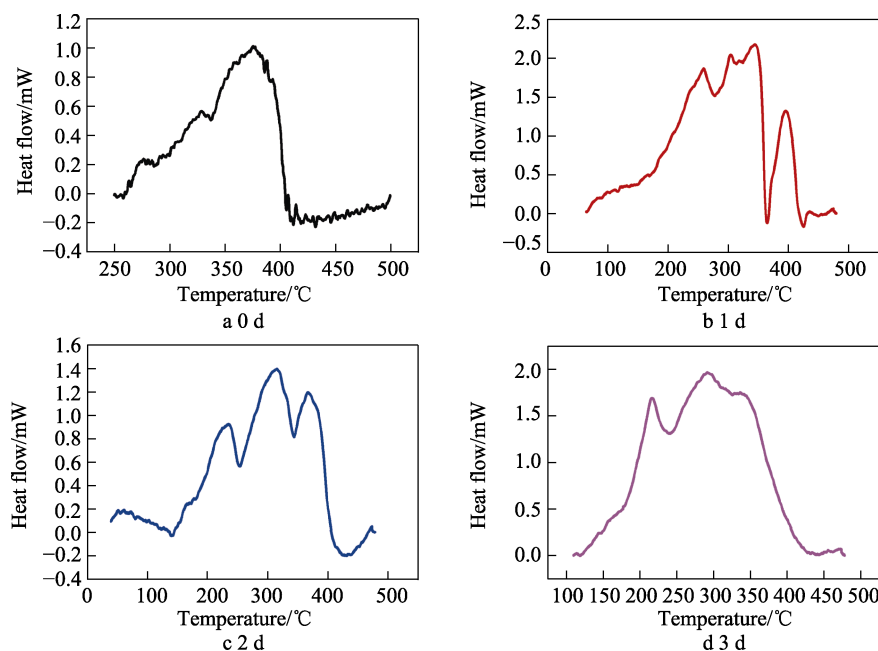


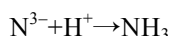
图4 叠氮化铅在盐雾环境下贮存不同时间后的 DSC 图
Fig.4 DSC charts of LA stored in salt spray environment for different time

表2 盐雾环境下贮存不同时间的 LA 热分解动力学特征参数

Tab.2 Characteristic parameters of thermal decomposition kinetics of LA stored in salt spray environment for different time

Time/d	$\beta/({}^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	$t_0/{}^{\circ}\text{C}$	$t_{p1}/{}^{\circ}\text{C}$	$t_{p2}/{}^{\circ}\text{C}$	$t_{p3}/{}^{\circ}\text{C}$	$E_a/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\Delta H_d/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
0	10	252.10	373.21	—	—	128.93	144.31
1	10	146.83	258.80	342.01	394.34	110.10	199.88
2	10	140.44	236.75	315.13	367.04	110.81	204.45
3	10	119.02	216.62	292.10	—	90.32	203.33

128.93 kJ/mol 降低为 90.32 kJ/mol, 其本质安定性能随盐雾试验时间的增加而逐渐下降。这是因为 LA 分子中 N^{3-} 和 Pb^{2+} 之间是介于离子键和共价键之间的过渡键, 在盐雾环境中受 Cl^- 和 OH^- 的侵蚀, 使 LA 分解生成 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 而失效, 具体的反应机理为^[24]:



2.2 盐雾环境下斯蒂芬酸铅的失效分析

2.2.1 SEM 形态学表征及分析

对原料 LS 样品采用 SEM 成像技术进行形貌表征, 结果如图 5 所示。从图 5a 中可以看出, LS 在电子显微镜下呈规则棱柱状, 颗粒分散, 大小均匀一致, 粒径在 $35\ \mu\text{m}$ 左右, 表面光滑无层裂, 完整性较好,

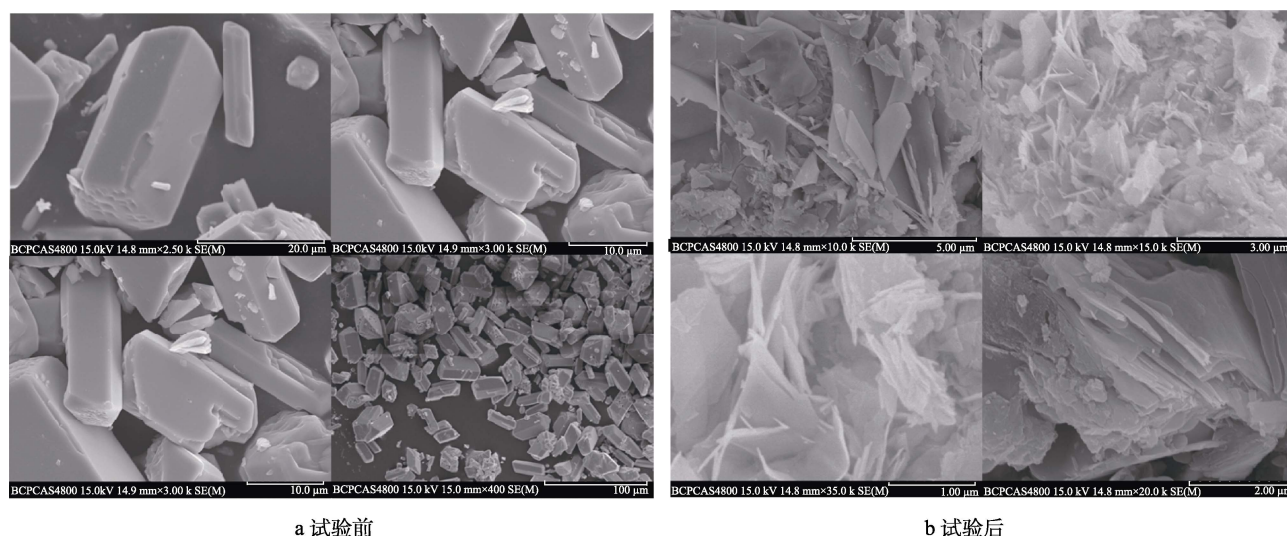


图5 斯蒂芬酸铅在盐雾环境下试验 3 d 后的 SEM 表面形貌

Fig.5 SEM surface morphologies of LS (a) before and (b) after 3d test in salt spray environment

空穴和缺陷少。然后将 LS 放入盐雾试验箱恒温 35 °C 贮存 3 d 后, LS 的晶体形貌发生了明显改变, 如图 5b 所示。LS 的晶型结构发生层裂, 形成不规则的小片状晶型, 晶体表面出现空穴和大量裂纹。这可能会导致 LS 的晶体表面出现大量的活性位点, 使其易于发生化学反应, 从而削弱 LS 的本质安定性能, 导致失效。

2.2.2 XRD 组分表征及分析

对原料 LS 进行了 X 射线衍射分析, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, LS 的特征衍射峰位置为 11.29°、14.05°、20.32°、21.93°、23.75°、25.03°、26.24°、27.25°、29.14°、30.41°、31.96°、34.93°、36.88°、39.70°、41.99°、43.14°、44.89°、45.77°、47.31°, 与 XRD 图谱标准卡片——对应^[25]。然后对比图 7a、b 可知, 盐雾试验 1 d 后, 产物的成分组成无明显变化, 说明 LS 在盐雾试验 1 d 时较为稳定。由图 7c、d 可以看出, 盐雾 2 d 时, 产物的主要成分为 PbO₂、LS; 盐雾 3 d 后, 产物

主要组分为 LS 和 Pb₃(CO₃)₂(OH)₂。说明随着盐雾时间的延长, 部分 LS 发生分解失效, 其铅元素受盐雾环境应力的影响, 先转移到铅的氧化物 PbO₂ 中, 然后形成碱式碳酸铅。

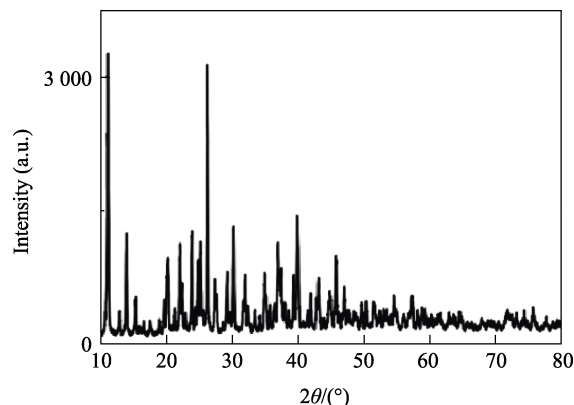


图 6 斯蒂芬酸铅的 XRD 图
Fig.6 XRD pattern of LS

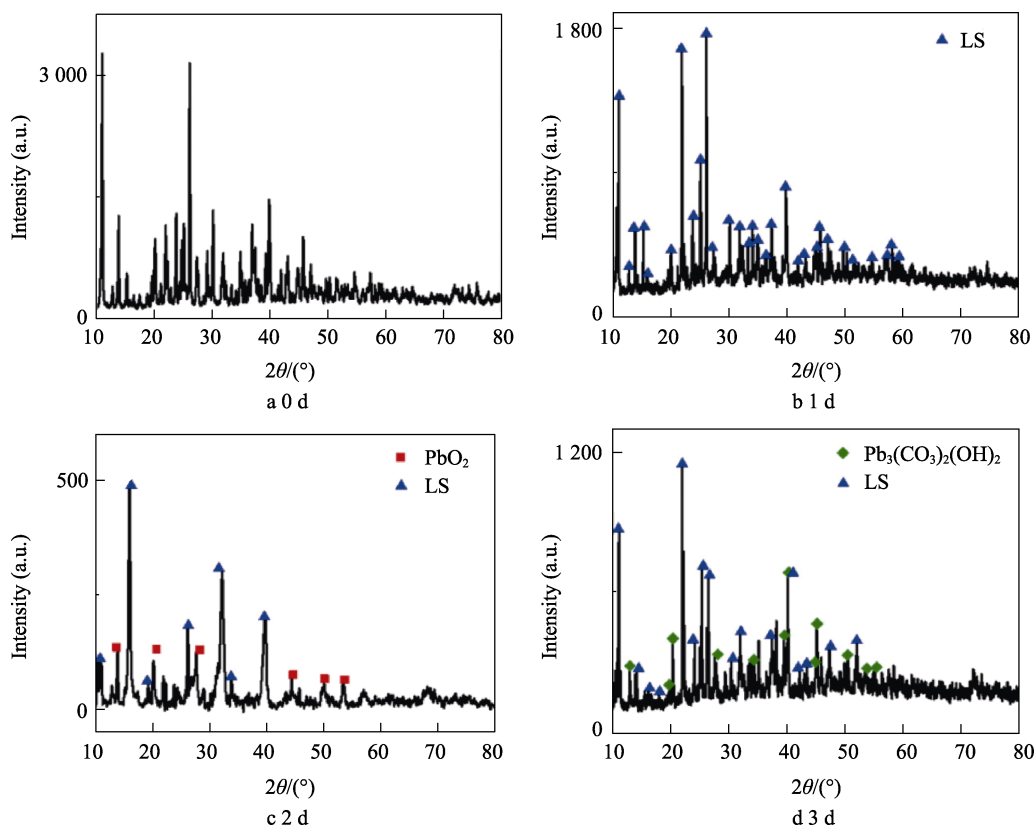


图 7 斯蒂芬酸铅在盐雾环境下贮存不同时间后的 XRD 图
Fig.7 XRD patterns of LS stored in salt spray environment for different time

2.2.3 DSC 热分解性能表征及分析

采用 DSC 热分析技术表征 LS 在盐雾试验恒温 35 °C 贮存 1、2、3 d 后热分解性能的变化, 并结合反应动力学理论, 探究 LS 分解失效机理。通过对比图 8a—d 的热流曲线可知, LS 在发生热分解反应的起始阶段, 会发生晶型转换而出现明显的熔融吸热峰。随着盐雾试验贮存时间的增加, LS 热分解反应的放热

量呈先降低、后增加的趋势, 相关的热分解特征参数见表 3。从表 3 可知, LS 发生热分解反应的表现活化能受盐雾环境应力的影响, 由 112.52 kJ/mol 降低为 97.02 kJ/mol, 后增加为 100.253 kJ/mol。结合 XRD 测试结果推断出, 在盐雾环境应力的影响下, 部分 LS 先分解生成 PbO₂, 然后与 CO₂ 和 OH⁻ 反应, 生成碱式碳酸铅^[26]。反应焓变量总体呈下降趋势, 其本质

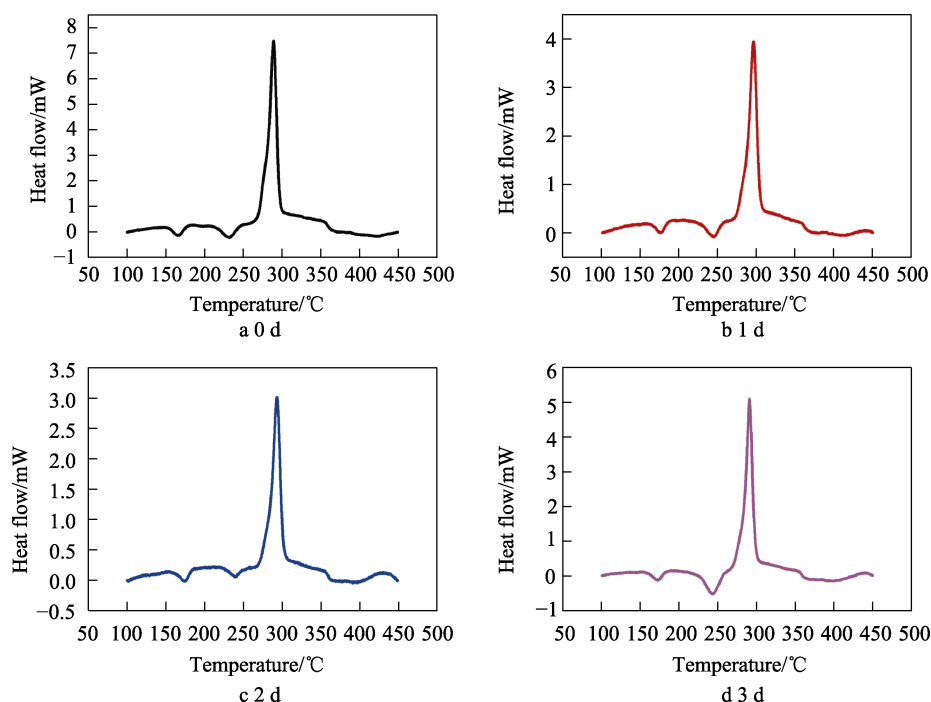


图8 斯蒂芬酸铅在盐雾环境下贮存不同时间后的 DSC 图
Fig.8 DSC charts of LS stored in salt spray environment for different time

表3 盐雾环境下贮存不同时间的 LS 热分解动力学特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of thermal decomposition kinetics of LS stored in salt spray environment for different time

Time/d	$\beta/(\text{°C} \cdot \text{min}^{-1})$	$t_0/\text{°C}$	$t_p/\text{°C}$	$E_a/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H_d/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
0	10	264.00	289.80	112.52	85.10
1	10	261.80	295.30	98.77	45.20
2	10	262.10	293.70	97.02	41.10
3	10	260.90	291.20	100.253	46.08

安定性能降低。

3 结论

1) 2 种典型火工药剂 LA 和 LS 受盐雾环境应力的影响, 会发生失效分解反应, 本质安定性能下降。其中, LA 受盐雾环境应力的影响尤为明显, 在盐雾试验贮存 3 d 后, LA 全部分解为 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 而失效。

2) 通过 SEM 成像技术发现, LA 的长柱状晶型受盐雾环境应力的侵蚀, 层裂形成不规则的小片状晶体结构。借助 XRD 结果表明, LA 在盐雾环境下会逐渐发生失效分解反应, 生成 $\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ 。结合 DSC 法, 从热分解动力学角度, 阐述了 LA 的失效分解机理, 发现 LA 在盐雾环境下本质安定性能下降。

3) 通过 SEM 成像技术发现, LS 的长柱状晶型受盐雾环境应力的侵蚀, 层裂形成不规则的小片状晶体结构。借助 XRD 结果表明, LS 在盐雾环境下会发生部分失效分解反应, 先生成 PbO_2 中间产物, 然后 $\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ 覆盖在 LS 表面, 阻碍盐雾环境应力的进一步侵蚀。结合 DSC 法, 从热分解动力学角度, 印证了 LS 的失效分解机理。研究发现, LS 在盐雾环

境下本质安定性能呈下降趋势。

4) 盐雾环境中的氯离子在高湿、高温下, 会引起典型火工药剂 (如 LA、LS) 发生失效分解化学反应, 这会造成它们的安定性能下降, 进而影响到武器装备的使用可靠性。

下一步研究计划将分析盐雾环境因素对 2 种火工药剂感度性能与输出性能的影响, 深入探讨盐雾环境对火工药剂性能响应规律, 为火工品的应用、贮存及维护提供参考依据。

参考文献:

- [1] 劳允亮, 黄浩川. 起爆药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1979.
LAO Yun-liang, HUANG Hao-chuan. Primary Explosives[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1979.
- [2] 劳允亮, 盛涤伦. 火工药剂学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
LAO Yun-liang, SHENG Di-lun. The Science of Initiating Explosives and Relative Composition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011.

- [3] MEHTA N, OYLER K, CHENG G, et al. Primary Explosives[J]. Zeitschrift Für Anorganische und Allgemeine Chemie, 2014, 640: 1309-1313.
- [4] TALAWAR M B. Primary Explosives: Electrostatic Discharge Initiation, Additive Effect and Its Relation to Thermal and Explosive Characteristics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(2): 1074-1078.
- [5] 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.
- [6] 张同来, 武碧栋, 杨利, 等. 含能配合物研究新进展[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 137-151.
ZHANG Tong-lai, WU Bi-dong, YANG Li, et al. Recent Research Progresses in Energetic Coordination Compounds[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(2): 137-151.
- [7] 张光全. 绿色四唑类起爆药研究的最新进展[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 473-478.
ZHANG Guang-quan. Recent Progress in Green Tetrazoles Primary Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 473-478.
- [8] 张志刚, 张建国, 张同来, 等. 新型起爆药 GTX 的制备工艺与性能研究[J]. 含能材料, 2001(2): 49-52.
ZHANG Zhi-gang, ZHANG Jian-guo, ZHANG Tong-lai, et al. Preparation Technique and Explosive Properties of $[Zn(CH_2)_3](ClO_4)_2$ [J]. Energetic Materials, 2001(2): 49-52.
- [9] DU Li-cheng, CHEN Jin-hu, HU En-lai, et al. A Reactive Molecular Dynamics Simulation Study on Corrosion Behaviors of Carbon Steel in Salt Spray[J]. Computational Materials Science, 2022, 203: 111142.
- [10] GIEFERS H, PRAVICA M. Radiation-Induced Decomposition of PETN and TATB under Extreme Conditions[J]. J Phys Chem A, 2008, 112: 3352-3359.
- [11] DREGER Z A, GUPTA Y M. High Pressure-High Temperature Polymorphism and Decomposition of Pentae-rythritol Tetranitrate (PETN)[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2013, 117(25): 5306-5313.
- [12] 郭雪莹. 几种典型火工药剂湿热环境下的特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
GUO Xue-ying. Characteristic Research on Explosive Materials under Hygrothermal Environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [13] 唐毅, 宋爱民. 盐雾试验条件对试验结果的影响[J]. 微电子学, 2009, 39(2): 289-292.
TANG Yi, SONG Ai-min. Effect of Salt Spray Conditions on Test Results[J]. Microelectronics, 2009, 39(2): 289-292.
- [14] 戈尔茨坦. 扫描电子显微技术与 X 射线显微分析[M]. 张大同译. 北京: 科学出版社, 1988.
GOLDSTEIN J I. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis[M]. ZHANG Da-tong Translated. Beijing: Science Press, 1988.
- [15] 王明, 潘清, 李晓宇, 等. XRD 结合化学计量学方法测定 HMX 晶型纯度研究[J]. 火工品, 2022(1): 68-71.
WANG Ming, PAN Qing, LI Xiao-yu, et al. Study on the Determination of HMX Crystal Purity by XRD and Chemometrics[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2022(1): 68-71.
- [16] 高宏. 海军弹药失效机理分析[J]. 包装工程, 2009, 30(9): 67-70.
GAO Hong. Failure Mechanism Analysis of Naval Ammunition[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 67-70.
- [17] 巫铭礼. 自然界中的盐雾[J]. 环境技术, 1993, 11(4): 3-8.
WU Ming-li. Salt Fog in Nature[J]. Environmental Technology, 1993, 11(4): 3-8.
- [18] 何俊, 陶小创, 石高荣. 导弹地面装备自然环境适应性评价方法探讨[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 91-97.
HE Jun, TAO Xiao-chuang, SHI Gao-rong. Discussion on Evaluation Methods of Natural Environmental Worthiness of Missile Surface Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 91-97.
- [19] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.
ZHAO Peng-fei, SU Xiao-qing, WU Jun-sheng. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.
- [20] 谭恋. 近红外 PbS 胶体量子点的可控合成[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
TAN Lian. Controllable Synthesis of Near-Infrared PbS Colloidal Quantum Dots[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [21] 劳允亮, 李振煜. α -Pb(N₃)₂ 热分解和热爆炸机理的实验与论证[J]. 含能材料, 1994, 2(2): 1-6.
LAO Yun-liang, LI Zhen-yu. Verification of Mechanism for Thermal Decomposition and Thermal Explosion of α -Pb(N₃)₂[J]. Energetic Materials, 1994, 2(2): 1-6.
- [22] GARNER W E, GOMM A S. The Thermal Decomposition and Detonation of Lead Azide Crystals[J]. Journal of the Chemical Society, 1931(0): 2123-2134.
- [23] LI Zhi-min, ZHOU Ming-rui, ZHANG Tong-lai. Graphene Nanoplatelets/Lead Azide Composites for the Depressed Electrostatic Hazards[J]. Materials Letters, 2014, 123: 79-82.
- [24] CHEN Yun, WU Qing-sheng, YIN Rong-hui, et al. Facile Fabrication and Optical Properties of Novel Pb(OH)Cl Nanotubes[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2007, 9(2): 283-287.
- [25] 徐栋, 朱雅红, 王培勇, 等. 斯蒂芬酸铅的微纳化及性能研究[J]. 火工品, 2020(1): 34-37.
XU Dong, ZHU Ya-hong, WANG Pei-yong, et al. Study on Micro-Nano Refinement and Performance of LTNR[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(1): 34-37.
- [26] YAMAGUCHI J, SAWADA Y, SAKURAI O, et al. Thermal Decomposition of Hydrocerussite ($2 PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$) in Carbon Dioxide Atmosphere (0-50 Atm)[J]. Thermochimica Acta, 1980, 37(1): 79-88.

责任编辑: 刘世忠