

# 极端环境下火工品药剂的热稳定性与储存寿命评估方法研究

刘晓勇

江西新余国科科技股份有限公司 江西 新余 338034

**【摘要】**：火工品药剂是武器装备、航空航天等领域的核心含能组件，其热稳定性、储存寿命的好坏直接关系到装备作战效能和使用安全。极端环境（高温、低温、高低温循环、高湿高盐等）容易引起药剂组分分解、性能退化，造成点火失效、意外起爆等重大安全隐患，所以建立科学的评价方法很有必要。本文主要对极端环境下火工品药剂的基本特性以及退化规律进行概述，分析热稳定性、储存寿命评价的意义，对热分析、加速老化、动力学模拟、现场实测四种评价方法的原理、流程和应用场合进行梳理，比较各种方法的优势与不足，并根据目前的研究状况提出改进方向。

**【关键词】**：极端环境；火工品药剂；热稳定性；储存寿命评估方法

DOI:10.12417/3083-5526.25.06.013

火工品是武器装备能量转换的“开关”和能量传递的“放大器”，它的效能发挥完全依靠火工品药剂的稳定性能，在陆、海、空、天等全领域作战装备以及重大工程中被广泛应用。随着装备服役环境逐渐向深海、高空、极地等极端环境扩展，火工品药剂长期处在各种恶劣环境的影响之下，热稳定性降低、储存寿命变短成了制约装备可靠性的主要障碍。因此开展极端环境下火工品药剂热稳定性和储存寿命评价方法的研究，破解极端环境胁迫下评价精度不足、方法单一等问题，对保障装备全生命周期安全、降低储存维护成本、推动火工品技术升级有重大的现实意义和工程价值，也是目前含能材料领域研究的热点和重点方向。

## 1 极端环境下火工品药剂概述

### 1.1 火工品药剂的核心类型与基本特性

火工品药剂是火工器件专用的特种含能材料，主要分为爆轰型、燃烧型、气体压力做功型三类，包括起爆药、传爆药、点火药、延期药等多种类型，具有高敏感性、高比能量密度、亚稳态等核心特性。它的主要作用是在接受微弱刺激能量之后，迅速发生化学反应并输出燃烧、爆燃或爆轰能量，完成点火、传爆、延期、动力做功等功能，是火工品实现能量转换和传递的主要载体。不同种类的药剂组分差别很大，起爆药大多采用叠氮化铅、斯蒂芬酸铅等，传爆药一般用 CL20 基、HNS4 等材料，点火药则以镁铝合金、氧化剂为主要成分，这些组分的物理化学性质直接影响药剂的热稳定性及储存性能<sup>[1]</sup>。

### 1.2 极端环境的界定与典型胁迫类型

根据火工品服役场景，极端环境是指超出常规储存和使用的环境，对火工品药剂性能产生显著不利影响的环境，核心有四种典型的胁迫类型。极端温度胁迫有高温（大于等于 60℃）、低温（小于等于负 40℃）和高低温循环，主要出现在沙漠、极地、高空等环境当中，是影响药剂热稳定性的主要因素；高湿高盐胁迫为相对湿度大于 85%、盐雾浓度大于 5%，多发生在沿海、深海环境里，容易造成药剂吸湿腐蚀；高压低压胁迫为

高压（大于等于 10MPa）和低压（小于等于 10kPa），分别在深海装备和高空飞行器上存在，会使药剂分子间的作用力以及分解动力学性质发生变化；复杂电磁、冲击胁迫包括强电磁辐射、高过载冲击，主要存在于武器发射、航天器飞行过程之中，会引发现药剂局部过热或者结构破坏，加速热分解过程<sup>[2]</sup>。

### 1.3 极端环境下火工品药剂的热退化现象

极端环境下，火工品药剂热退化主要是物理形态和化学组分的双重劣变，而且是非线性的、加速的。物理形态退化方面，高温会造成药剂熔化、结块、晶形改变，低温会使药剂变脆、开裂，高湿环境会导致药剂吸湿、潮解，这些变化都会使药剂的均匀性降低，热稳定性阈值下降。化学组分退化，极端温度会引起药剂组分的热分解反应，硝酸酯类药剂分解生成氮氧化物，叠氮类药剂分解生成氮气，使药剂有效成分含量降低；高湿高盐环境会造成组分的水解、氧化反应，生成惰性物质，阻碍能量传递；高压环境会加快药剂分子的扩散，促进分解产物的聚集，使热退化更加严重。因此，研究不同环境条件下药剂的退化效应，对合理选择药剂、保证水利工程药剂性能稳定具有重要意义<sup>[3]</sup>。

## 2 极端环境下火工品药剂评估研究的意义

### 2.1 工程应用保障装备全寿命周期安全可靠

火工品被广泛应用于导弹、航天器、鱼雷、火炮等关键装备，其药剂的热稳定性及储存寿命直接决定着装备的作战效能和使用安全，有着重要的工程应用价值。在极端环境服役场景下，深海鱼雷火工品要承受高压高湿胁迫，高空航天器火工品要经受极端高低温循环，如果药剂热稳定性不够或者储存寿命到点，可能造成装备点火失败、传爆中断，甚至发生意外起爆、装备损坏等重大安全事故。通过对极端环境下药剂的热稳定性和剩余储存寿命进行科学评估，可以给装备储存管理、维护保养、更换更新提供科学依据，避免由于药剂失效导致的装备故障，保障装备从生产、储存、运输到服役全寿命周期的安全可靠，降低装备运维成本和安全风险<sup>[4]</sup>。

## 2.2 技术创新完善火工品药剂评估技术体系

目前我国火工品药剂热稳定性、储存寿命评估技术大多采用常规环境下的研究方法,针对极端环境的专项评估技术还不完善,存在评估精度低、方法单一、适配性差等问题,不能满足极端环境的评估要求。开展本研究可以弥补极端环境下评估技术方面的空缺,创新发展评价思路与方法,改进评价指标体系,健全火工品药剂评价技术体系。对极端环境胁迫机理、药剂退化规律及评价方法展开系统探究,能够破解传统评价方法的局限性,提高评价技术针对性和精准度,促使火工品药剂评价技术向着极端化、精准化、智能化方向发展,为之后相关研究提供技术参考与理论支撑,助推火工品技术更新升级。

## 2.3 安全防控规避极端环境下的安全隐患

火工品药剂属于高敏感含能材料,在极端环境下容易发生热分解、燃烧、爆炸等危险反应,给储存、运输、使用过程带来严重的安全隐患。极端高温会使得药剂自燃,极端高低温循环会导致药剂开裂漏出,高湿高盐环境会造成药剂腐蚀失效,这些情况都会引发安全事故,威胁到人员和设备的安全。研究评价方法能够准确找到极端环境条件下药剂热稳定性薄弱之处、预测药剂性能衰退趋势及失效的风险,及时采取相应安全防护措施如改善储存环境、改进包装防护、及时更换失效药剂等。因此在极端环境下使用火工品药剂,必须要有安全储存和使用标准以及规范,避免出现安全隐患,保证人员及设备的安全<sup>[5]</sup>。

## 2.4 产业发展推动含能材料产业高质量发展

火工品药剂属于含能材料产业的一个子领域,它的技术水平会直接决定整个含能材料产业的发展水平和核心竞争力。随着装备向极端环境服役发展,对火工品药剂性能要求越来越高,对评价技术的要求也越来越高。进行本研究可以推动火工品药剂评价技术取得创新和突破,带动含能材料检测设备、防护技术、配方优化等领域的进步,促使含能材料产业技术更新。同时精准的评估方法可以降低药剂研发和生产过程中试验的成本,缩短研发周期,有助于研发出热稳定性更好、储存寿命更长、适合于极端环境的新型火工品药剂,提高我国含能材料产业的核心竞争力,推动含能材料产业高质量发展,满足国防建设与航空航天产业的发展需求。

# 3 极端环境下火工品药剂热稳定性与储存寿命评估方法

## 3.1 热分析评估基于热效应的快速检测技术

热分析评价方法是检测火工品药剂在加热过程中热效应变化的方法,具有快速、高效、样品用量少等优点,适用于极端环境下药剂热稳定性的初步筛选和定性分析。该方法的核心原理就是利用热分析仪器模拟极端温度胁迫条件,对药剂进行程序升温或者恒温处理,监测药剂在加热过程中温度、热量、

质量等参数的变化,通过分析这些参数来确定药剂的热稳定性。常用的热分析技术有差式扫描量热法(DSC)、热重分析法(TG)、差热分析法(DTA)等,其中DSC可以准确测出药剂的初分解温度、最高分解温度和放热量等指标,TG可以检测出药剂热分解时质量的变化率,DTA可以研究药剂热分解时的热效应差别。在极端环境评价中,可以通过调节加热速率、温度范围来模拟极端高温、高低温循环等胁迫条件,快速评价药剂的热稳定性,但此方法不能反映长期储存后的性能退化规律,不能直接用来评价储存寿命,需要和其他方法结合起来使用。

## 3.2 加速老化评估基于寿命加速的量化预测技术

加速老化评估方法是用极端环境胁迫来加速药剂性能退化过程,根据老化试验数据来预测其储存寿命的量化方法,具有周期短、可量化、适配性强等优势,是现阶段极端环境下储存寿命评估的主流方法。该方法的主要原理就是利用极端环境胁迫(高温、高湿、高压等)的加速作用,把药剂放在模拟极端环境的加速老化试验箱里,加大胁迫强度、延长试验时间,加快药剂热分解和性能退化速度,监测药剂老化过程中性能的变化,建立性能退化模型,进而外推得到药剂在实际极端环境下的储存寿命。加速老化试验有高温加速老化、高湿加速老化和高低温循环加速老化,试验中定期测定药剂有效成分含量、点火灵敏度、输出能量等性能指标,分析性能退化的规律。该方法的关键就是确定合理的加速因子,保证加速老化过程与实际储存过程的退化机理一致,防止由于加速因子不合理而造成的评价误差。该方法已经被广泛应用到航空航天、国防领域火工品药剂的储存寿命评价中,但是试验成本较高,试验周期还需进一步优化。

## 3.3 动力学模拟评估基于理论计算的精准预测技术

动力学模拟评估方法是通过建立火工品药剂热分解动力学模型,在极端环境胁迫条件下,从理论层面评估火工品药剂热稳定性和储存寿命的精准方法,具有不需要大量的试验、预测性强的优点,适合于在极端环境下不能进行现场试验的场合。该方法的主要原理是利用热分析试验或者加速老化试验的数据,确定药剂热分解反应的动力学参数(反应级数、活化能、频率因子等),建立热分解动力学模型,结合极端环境的温度、湿度等胁迫参数,模拟药剂在极端环境下的热分解过程,从而评价药剂的热稳定性及储存寿命。动力学模型主要有Arrhenius模型、Coats-Redfern模型、Ozawa模型等,Arrhenius模型可以准确地描述温度对药剂热分解速率的影响,是极端环境储存寿命预测的主要模型。该方法可以弥补试验方法的不足,对药剂在极端环境下的热稳定性和储存寿命进行准确预测,但是要求动力学参数的准确性较高,模型建立过程比较复杂,需要不断利用试验数据来优化。

### 3.4 现场实测评估基于实际服役的验证技术

现场实测评估方法是在火工品实际服役的极端环境里，对药剂的热稳定性、储存状况实施即时检测并加以评价的验证手段，具备真实性强、可靠性高、贴合实际等优点，是评价结果验证的主要方式。该方法的基本原理就是利用便携式检测设备，在火工品实际服役环境（深海、高空、极地等）里实时检测药剂的温度、湿度、压力等环境参数，同时检测药剂的有效成分含量、点火灵敏度、输出能量等性能指标，与标准指标对比来评价药剂热稳定状况及剩余储存寿命。常用的现场实测技术有便携式热分析检测、红外光谱检测、电化学检测等，红外光谱检测能迅速测定药剂组分的变化，便携式热分析检测可以实时监测药剂的热效应变化。该方法可以检验实验室评估方法的准确性，修正评估模型，使评价结果和实际服役状态一致，但是受极端环境条件的影响，检测难度大，检测设备需要耐高

温、耐高压、抗腐蚀等特性，检测成本高，难以大面积推广。

### 4 结语

综上所述，极端环境下的火工品药剂热稳定性与储存寿命评价，是保证装备安全可靠服役、促进火工品技术进步的关键环节，面对复杂胁迫下传统评价方法的局限性，开展专项评价方法研究具有重要的理论意义和工程价值。本文对极端环境下火工品药剂的概述、评估研究的意义以及四类主要的评估方法进行了梳理，分析了各种方法的优点和不足，确定多方法融合是提高评估精度和可靠性的主要方向。目前，评估方法还存在着加速因子确定不准确、动力学模型不匹配、现场实测困难等不足，未来要继续探究极端环境与药剂相互影响的机理，改进评价指标体系，创新多种方法融合的评价思路，研发适应极端环境的便携式检测设备，提高评价技术的精准化、智能化水平。

### 参考文献：

- [1] 金翰林,鞠一非,廖芸,等.基于 PLC 的火工药剂高精度称量系统设计[J].兵工自动化,2025,44(06):78-81.
- [2] 柏席峰,许彩霞,廖海华,等.国外绿色火工药剂研究进展[J].火工品,2024,(04):28-34.
- [3] 王燕兰,张方,张松,等.火工药剂微装药技术现状及后续发展思考[J].火工品,2024,(04):55-61.
- [4] 张建国,李志敏,张陆,等.关于火工药剂发展的几点思考[J].含能材料,2022,30(04):291-293.
- [5] 李瑞,李明,解煜晨,等.火工药剂静电火花试验仪校准方法研究[J].火工品,2021,(04):56-60.