

火工药剂燃烧稳定性影响因素研究

洪 火 刘 云

江西新余国科科技股份有限公司 江西 新余 338000

【摘要】：火工药剂作为火工品的核心功能材料，其燃烧稳定性直接决定火工品的作用可靠性与使用安全性，在军事装备、民用爆破、航天航空等领域具有不可替代的作用。本文以火工药剂燃烧稳定性为研究核心，系统梳理并分析影响其燃烧稳定性的关键因素，阐述了研究火工药剂燃烧稳定性的军事与民用价值，提出针对性的稳定性提升策略。研究结果可为火工药剂的配方优化、制备工艺改进及工程应用提供理论支撑与技术参考，对保障火工品在复杂场景下的稳定可靠工作具有重要意义。本文希望通过各影响因素与燃烧稳定性之间的内在关联，为后续相关领域的深入研究奠定基础。

【关键词】：火工药剂燃烧；稳定性；影响因素

DOI:10.12417/3083-5526.25.05.006

火工药剂是一类在外界刺激下能发生快速燃烧或爆燃反应，释放大能量量的特殊含能材料，广泛应用于武器系统的点火传火、弹药起爆、航天飞行器的分离与姿态控制、民用爆破工程的起爆等关键场景。燃烧稳定性是火工药剂的核心性能指标，其稳定性优劣直接关系到火工品作用的精准性、可靠性，甚至影响整个装备系统的安全运行。当前，火工药剂在极端温湿度、高压、振动等复杂工况下的燃烧不稳定问题时有发生，制约了相关装备性能的提升。因此，深入研究火工药剂燃烧稳定性的影响因素，明确各因素的作用机制，提出有效的稳定性提升策略，具有重要的理论与工程实践意义。本文围绕上述核心问题，展开系统研究与探讨。

1 火工药剂燃烧稳定性的主要影响因素

1.1 药剂组分特性

药剂组分是决定火工药剂燃烧特性的基础，其成分组成、配比比例、纯度等级及颗粒特性等均对燃烧稳定性产生显著影响。在成分组成方面，氧化剂、可燃剂、黏结剂等核心组分的类型直接决定燃烧反应的热力学特性，例如，选用高活性氧化剂可提升燃烧反应速率，但过量使用可能导致燃烧剧烈程度失控，降低稳定性；可燃剂的热值与反应活性则影响燃烧持续时间与能量释放稳定性^[1]。配比比例的合理性是保障燃烧稳定的关键，当氧化剂与可燃剂比例处于化学计量比附近时，燃烧反应最充分，稳定性最佳，偏离该比例则可能出现燃烧不完全、燃烧速率波动等问题。纯度等级方面，原料中的杂质可能成为燃烧反应的催化或抑制中心，破坏燃烧反应的连续性，例如，微量金属杂质可能加速局部燃烧，导致燃烧前沿不平整；水分等杂质则可能阻碍燃烧反应的传质传热过程，降低燃烧稳定性。颗粒特性包括颗粒尺寸、粒度分布及颗粒形貌，细颗粒药剂比表面积大，燃烧反应速率快，但粒度分布不均可能导致局部反应强度差异，引发燃烧波动；不规则形貌的颗粒可能造成装药过程中孔隙分布不均，影响燃烧过程中的气体扩散，进而破坏燃烧稳定性^[2]。

1.2 制备工艺参数

制备工艺是将药剂组分转化为实际使用装药的关键环节，其工艺参数的控制精度直接影响火工药剂的物理结构与化学均匀性，进而作用于燃烧稳定性。混合工艺方面，混合方式（机械混合、超声混合、气流混合等）与混合时间是核心参数。机械混合操作简单，但易出现混合不均现象，导致局部组分浓度偏差，影响燃烧一致性；超声混合与气流混合可提升混合均匀性，但过度混合可能导致药剂颗粒破碎，改变颗粒特性^[3]。混合时间不足会造成组分分布不均，混合时间过长则可能引发药剂组分间的提前反应，或导致颗粒过度细化，均会降低燃烧稳定性。干燥工艺参数对药剂含水率与物理结构影响显著，干燥温度过高可能导致可燃剂等组分热分解，破坏药剂原有性能；干燥温度过低或干燥时间不足则会导致药剂残留水分过高，阻碍燃烧传质传热。干燥过程中的气流速度与压力也会影响干燥均匀性，进而影响燃烧稳定性。造粒与压药工艺参数同样关键，造粒过程中的黏结剂用量、造粒转速会影响颗粒的强度与孔隙率，颗粒强度不足易在装药或燃烧过程中破碎，孔隙率过高则可能导致燃烧速率过快且不稳定。压药压力与加压速度直接决定装药密度，装药密度过低，内部孔隙过多，燃烧过程中气体扩散过快，易出现燃烧剧烈波动；压药密度过高，内部孔隙过少，燃烧所需的氧气供应不足，可能导致燃烧熄灭或燃烧速率骤降，均破坏燃烧稳定性^[4]。

1.3 环境工况条件

火工药剂的燃烧过程多在复杂环境工况下进行，环境温度、湿度、压力及外部力学扰动等条件均会对燃烧稳定性产生显著影响。环境温度是影响燃烧反应速率的关键因素，低温环境下，药剂分子活性降低，燃烧反应速率减慢，可能出现燃烧延迟、燃烧不充分等问题，甚至无法正常点火；高温环境下，药剂分子活性增强，燃烧反应速率加快，易出现燃烧失控，导致燃烧稳定性下降。环境湿度的影响主要体现在对药剂物理化学性质的改变，高湿度环境下，药剂易吸收水分，一方面降低药剂的反应活性，另一方面水分蒸发过程会带走大量热量，破

坏燃烧反应的热平衡，导致燃烧波动。对于吸湿性较强的火工药剂，高湿度环境还可能引发药剂潮解、结块，改变其装药结构，进一步恶化燃烧稳定性。环境压力对燃烧过程中的气体扩散与反应传质影响显著，高压环境下，燃烧产生的气体扩散受阻，可能导致燃烧产物积累，抑制燃烧反应的持续进行，使燃烧速率降低且不稳定；低压环境下，气体扩散速度加快，燃烧所需的氧气供应充足，可能导致燃烧速率过快，同时低压环境下药剂的点火难度增加，易出现点火延迟与燃烧不稳定现象。外部力学扰动（振动、冲击等）会破坏燃烧前沿的稳定性，导致局部燃烧区域受力不均，引发燃烧速率波动，严重时可能导致燃烧中断或转为爆燃，尤其在军事装备机动、航天飞行器发射等场景中，外部力学扰动对火工药剂燃烧稳定性的影响更为突出^[5]。

2 研究火工药剂燃烧稳定性的重要意义

2.1 保障军事装备作战效能

在军事领域，火工药剂广泛应用于武器系统的点火、传火、起爆、发射等关键环节，其燃烧稳定性直接决定武器装备的作战效能与可靠性。例如，在导弹发射系统中，火工药剂的稳定燃烧为导弹的助推起飞提供精准的推力控制，若燃烧不稳定，可能导致推力波动，影响导弹的飞行姿态与命中精度；在弹药起爆系统中，火工药剂的稳定燃烧是保障弹药精准起爆的前提，燃烧不稳定可能导致起爆延迟、起爆失败或过度起爆，降低武器系统的作战效能。此外，军事装备的作战环境复杂多变，常面临高温、低温、高压、振动等极端工况，研究火工药剂燃烧稳定性，可明确极端工况下的稳定性规律，为武器装备的火工系统设计提供理论支撑，提升武器装备在复杂战场环境下的适应能力与作战可靠性，对保障国防安全具有重要战略意义^[6]。

2.2 提升民用领域安全水平

在民用领域，火工药剂广泛应用于爆破工程、烟花爆竹、航空航天民用领域（如民用卫星的分离系统）、汽车安全气囊等场景，其燃烧稳定性直接关系到民用设施的运行安全与人员生命安全。在爆破工程中，火工药剂的稳定燃烧是保障爆破作业精准、安全进行的关键，燃烧不稳定可能导致爆破能量释放不均，引发飞石、冲击波过大等安全事故，造成人员伤亡与财产损失；在汽车安全气囊系统中，火工药剂的快速且稳定燃烧是气囊及时、有效展开的核心，燃烧不稳定可能导致气囊展开延迟、展开不充分或过度展开，无法有效保护驾乘人员。研究火工药剂燃烧稳定性，可优化民用火工品的设计与生产，提升其安全性能，降低安全事故发生率，保障民用领域的生产生活安全，推动民用火工行业的健康发展。

2.3 推动火工品行业技术升级

火工药剂燃烧稳定性是火工品设计与生产的核心技术难点之一，深入研究其影响因素与作用机制，可推动火工品行业

的技术升级与创新。当前，火工品行业面临着高性能、高安全性、小型化等发展需求，对火工药剂燃烧稳定性提出了更高要求。通过研究燃烧稳定性的影响因素，可明确药剂配方优化、制备工艺改进、装药结构设计的方向，开发出具有更高燃烧稳定性的新型火工药剂。同时，研究过程中形成的测试方法、分析技术与优化理论，可应用于火工品生产的全流程，提升生产过程的质量控制水平，推动火工品行业从传统经验型生产向精准化、智能化生产转型。此外，相关研究成果还可带动火工药剂原材料、生产设备等上下游产业的技术进步，形成产业协同发展效应。

3 提升火工药剂燃烧稳定性的有效策略

3.1 优化药剂组分配比与纯度控制

针对药剂组分对燃烧稳定性的影响，首要策略是优化组分配比并严格控制原料纯度。在组分配比优化方面，可采用正交实验、响应面法等实验设计方法，结合燃烧动力学仿真分析，确定氧化剂、可燃剂、黏结剂等核心组分的最佳配比范围，确保燃烧反应处于稳定的热力学平衡状态。同时，可引入微量功能添加剂（如燃烧稳定剂、催化剂），调节燃烧反应速率，提升燃烧稳定性，例如，添加适量的惰性稳定剂可抑制局部过度燃烧，添加微量高效催化剂可保障低温环境下的燃烧启动稳定性。在纯度控制方面，建立严格的原料筛选标准，对氧化剂、可燃剂等原料进行精细化提纯处理，去除杂质、水分等有害成分，确保原料纯度符合设计要求。此外，在药剂储存与运输过程中，采取防潮、防污染措施，避免药剂组分发生化学变化或引入新的杂质，保障药剂组分的稳定性。

3.2 改进制备工艺与过程控制

通过改进制备工艺并加强过程控制，可提升火工药剂的混合均匀性、物理结构稳定性，进而保障燃烧稳定性。在混合工艺改进方面，根据药剂组分特性选择合适的混合方式，对于粒度差异较大的组分，可采用分级混合工艺，先将细颗粒组分混合均匀，再逐步加入粗颗粒组分；引入超声混合、气流混合等高精度混合设备，提升混合均匀性。同时，通过实验确定最佳混合时间，避免混合不足或过度混合。在干燥工艺优化方面，采用分段干燥工艺，控制不同阶段的干燥温度与气流速度，确保药剂均匀干燥，降低残留水分含量；引入在线水分检测设备，实时监测干燥过程中药剂的含水率，保障干燥质量。在造粒与压药工艺改进方面，优化黏结剂用量与造粒转速，制备具有均匀粒度分布与适宜强度的药剂颗粒；采用精准控压设备，实现压药压力与加压速度的闭环控制，确保装药密度均匀一致。此外，建立制备过程的全流程质量检测体系，对混合均匀性、颗粒特性、装药密度等关键指标进行严格检测，及时发现并解决工艺过程中的问题。

3.3 改善储存与使用环境工况

针对环境工况对燃烧稳定性的影响，需从储存环境优化与使用工况适配两方面制定策略。在储存环境优化方面，建立标准化的储存库房，控制库房内的温度、湿度在适宜范围，采用防潮、隔热、通风设备，避免环境温湿度剧烈波动；对易吸潮、易氧化的火工药剂，采用密封包装，并添加干燥剂，防止药剂潮解、氧化。同时，合理规划储存时间，避免药剂长期储存导致性能退化。在使用工况适配方面，根据火工品的实际使用环境，开展针对性的燃烧稳定性测试，明确药剂在不同温湿度、压力、力学扰动条件下的稳定工作范围。对于极端工况下使用的火工品，采用环境适应性设计，例如，在低温环境下使用的火工药剂，可通过添加低温启动助剂提升燃烧稳定性；在振动环境下使用的火工品，优化装药结构的缓冲设计，减少外部力学扰动对燃烧前沿的影响。此外，在火工品使用前，对环境工

况进行实时监测，确保使用环境符合药剂燃烧稳定的要求。

4 结语

综上所述，火工药剂燃烧稳定性是决定火工品可靠性与安全性的核心指标，其受药剂组分、制备工艺、环境工况、装药结构等多方面因素的综合影响，研究其影响规律并制定针对性提升策略具有重要的军事、民用、行业及学术意义。本文系统分析了各关键影响因素的作用机制，从组分优化、工艺改进、环境适配、结构设计四个维度提出了提升燃烧稳定性的有效策略。通过优化药剂组分配比与纯度控制，可从源头保障燃烧反应的热力学稳定性；改进制备工艺与过程控制，能提升药剂物理结构与混合均匀性；改善储存与使用环境工况，可减少外部环境对燃烧过程的干扰；优化装药结构与点火系统设计，能保障燃烧反应的均匀启动与稳定传播。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李朝振,赵非玉,严楠,等. 高温环境对硼酸钾药剂性能影响分析研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(08):218-224.
- [4] 曹晓峰. 水性胶黏剂在火工药剂制备中的应用[J].广州化工,2023,51(08):71-73.
- [5] 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):40-47.
- [6] 胡艳,郑军,叶迎华,等. 低燃速压力指数做功类火工药剂研究[J].宇航总体技术,2022,6(05):26-33.