

文章编号: 1003-1480 (2024) 04-0021-07

# 延期药燃速控制技术综述

张斐然, 贾玉馨, 张 晔, 宋佳馨, 于国强, 马文喆

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

**摘要:** 基于延期药燃速控制技术研究现状, 从延期药配方、燃速调节剂和制备工艺等方面对影响延期药燃速及延期精度的因素进行了归纳总结, 讨论了延期药组分、配比及粒度对燃速的影响机理, 介绍了碳纳米材料、钙钛矿材料、增材制造技术及微流控技术在延期药制备中的应用现状, 分析了其对加快延期药燃速、改善燃烧性能以及提高燃烧过程稳定性的优化效果, 以期对延期药配方设计、延期火工品的燃速及精度控制提供参考。

**关键词:** 延期药; 碳纳米材料; 钙钛矿材料; 增材制造; 微流控技术

**中图分类号:** TJ45<sup>+</sup>5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.04.003

## Review of Control Technology for Delay Composition Burning Rate

ZHANG Fei-ran, JIA Yu-xin, ZHANG Ye, SONG Jia-xin, YU Guo-qiang, MA Wen-zhe

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** Based on the research status of delay composition burning rate control technology, the factors affecting the burning rate and delay accuracy of delay composition were summarized from the aspects of delay composition formula, burning rate regulator and preparation process. The influence mechanism of delay composition, ratio, and particle size on burning rate was discussed. The current application status of carbon nanomaterials, perovskite materials, additive manufacturing technology and microfluidic technology in the preparation of delay composition was introduced, and their optimization effects on accelerating the burning rate of delay composition, improving combustion performance and increasing combustion process stability were analyzed, in order to provide reference for delay composition formula design, burning rate and precision control of delay pyrotechnics.

**Key words:** Delay composition; Carbon nanomaterials; Perovskite materials; Additive manufacturing; Microfluidic technology

延期药是一种在传火或传爆序列中通过药剂稳定燃烧提供精确延期效果的烟火药剂, 起到点火引燃或起爆的作用<sup>[1]</sup>, 广泛应用于常规兵器、导弹武器系统、空间飞行器等领域。近年来, 随着延期火工品技术的不断发展, 对于延期药的燃速及其精度控制的要求越来越高<sup>[2-4]</sup>。延期药通常由氧化剂、可燃剂、粘合剂等组成, 是通过机械混合制备而成的非均匀体系, 其燃烧反应发生在靠近火焰的一层极薄的药剂层上, 燃烧过程从凝聚相中开始, 在气相中结束, 可分为点火

火、引燃、燃烧 3 个阶段<sup>[5]</sup>。延期药的燃速是指燃烧前沿沿药柱法线方向相对于未燃可燃物的推进速度, 是评判延期火工品延期精度的重要参数之一, 其影响因素主要包括药剂组成和制药工艺两方面。目前, 国内外对于含能材料燃速控制方面的研究已经较为广泛且成熟<sup>[6-9]</sup>, 但未对延期药燃速的影响因素进行系统总结。

基于此, 本文从延期药配方、燃速调节剂和制备工艺 3 个方面, 对延期药燃速的影响因素及机理进行

收稿日期: 2024-02-27

作者简介: 张斐然 (1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事军事化学与烟火技术研究。

通讯作者: 贾玉馨 (1985-), 女, 高级工程师, 主要从事火工药剂及制药工艺科研试制研究。

基金项目: 国防科技重点实验室稳定运行费 (No.WDYX23614260203)。

引用本文: 张斐然, 贾玉馨, 张晔, 等. 延期药燃速控制技术综述[J]. 火工品, 2024(4): 21-27.

讨论, 以期为延期火工品的燃速控制提供思路和参考。

## 1 延期药配方对燃速的影响

延期药配方是决定其燃速的首要因素。在进行配方设计时, 主要考虑延期药组分、组分配比及粒度对燃速的影响。

### 1.1 延期药组分

延期药的主要成分为氧化剂、可燃剂和粘合剂, 此外, 为满足不同需要, 也常在配方中加入钝感剂和燃速调节剂等添加剂<sup>[10]</sup>。其主要组分对延期药燃速及精度的影响规律如下:

#### 1.1.1 可燃剂

可燃剂的燃烧热值越大, 燃速越快, 输出能量也越大, 更有利于点燃下一级药剂。燃烧热值低时, 可能会出现燃烧中止(即“断燃”)的情况, 从而导致整个延期火工元件失效<sup>[5]</sup>。

#### 1.1.2 氧化剂

氧化剂的有效含氧量、分解温度及吸湿性都会影响延期药的性能<sup>[11]</sup>。其中, 有效含氧量作为评定氧化剂氧化能力的重要参数之一, 是指可以用于氧化可燃剂的氧含量, 通过选用不同有效含氧量的氧化剂可以实现控制燃速的目的; 氧化剂的分解温度通常低于可燃剂的发火点, 氧化剂的分解温度越低, 则延期药的发火点越低、燃速越大; 吸湿性作为评定延期药贮存性能的重要参数之一, 是指材料在贮存过程中对环境水分的吸收程度, 氧化剂的吸湿性越小, 则延期药的燃烧性能越稳定<sup>[12]</sup>。

#### 1.1.3 粘合剂

为了降低延期药的机械感度, 从而改善其物理化学安定性、降低加工难度, 可在配方中加入少量的粘合剂<sup>[13]</sup>, 其使用量应控制在药剂的5 wt%以下, 过多的粘合剂会使反应生成的气体量过多, 从而影响延期药的燃烧性质<sup>[14]</sup>。

### 1.2 组分配比

延期药的燃烧过程是氧化还原反应, 因此, 其各组分配比可通过氧平衡来确定, 理论上零氧平衡时的燃速最大。但对于目前广泛应用的微气体延期药, 在

一定范围内, 金属可燃剂的增多会导致其燃速逐渐增大。这是由于随着金属含量的增加, 延期药在燃烧过程中的导热性升高, 加快了燃烧热的传播速度和反应体系的反应速率。因此, 延期药的组分配比需要结合实际情况来进行确定和调整。

### 1.3 粒度

延期药的延期精度与其装药密度及密度分布的均匀性有关<sup>[15]</sup>。在延期药组分中, 绝大部分为固体颗粒, 颗粒形貌、尺寸及粒径分布对其堆积有直接影响<sup>[16]</sup>。在理想状态下, 为了使颗粒排列紧密且均匀, 通常利用粒度级配(也称颗粒级配)原理, 将小尺寸颗粒填充到大尺寸颗粒之间的孔隙中, 进而获得组间最优的接触面积, 如图1所示。合理的粒度级配是获得低孔隙率和组分密度分布均匀、提高延期精度和控制燃速的重要途径<sup>[17]</sup>。

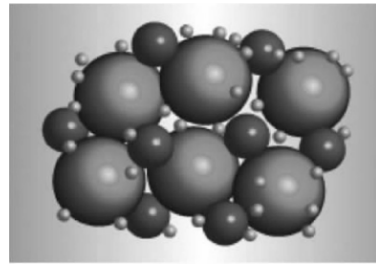


图1 粒度级配原理示意图

Fig.1 Schematic representation of the particle size grading principle

## 2 燃速调节剂对燃速的影响

为了调节延期药的燃速、改善其能量释放和燃烧性能, 通常在其配方中加入燃速调节剂。燃速调节剂具有占比小、作用效果好和催化活性高等特点<sup>[18-20]</sup>, 主要通过改变延期药柱整体的导热系数、反应时吸收或放出大量热值, 以及降低或升高某组分的分解温度等方式对延期药的燃速进行调控。在传统的延期药配方中, 应用广泛且起到降速作用的一般为惰性物质, 如氟化钙和硅藻土等, 该物质能起到“热沉”作用, 吸收反应放出的热量。如需提高燃速, 则可加入活性物质, 如高锰酸钾等, 通过放出较大热量来实现。近年来, 燃速调节剂的研究方向由微米级向纳米级发展<sup>[21]</sup>, 其中, 碳纳米材料和钙钛矿材料作为新型催化剂

在含能材料领域有着较好的应用前景。

## 2.1 碳纳米材料的应用

碳纳米材料具有优良的化学稳定性以及耐腐蚀性,能够有效降低体系感度,提高安全性能;同时,碳纳米材料本身具有较大的比表面积,可以作为其他纳米粒子的载体,并与之形成复合物,实现传热速率的提升以及能量释放速率的提高<sup>[22-24]</sup>。

### 2.1.1 碳纳米管(CNTs)的应用

碳纳米管是由碳原子通过  $sp^2$  杂化和相邻的 3 个碳原子构成的六边形平面围成的圆柱面,具有管壁结构、纳米级孔道、比表面积大,以及热学性能和机械强度高等优势,是一种良好的催化剂载体。

2010年, H.Ren 等<sup>[25]</sup>首次将碳纳米管加入到硅系延期药( $Si/P_3O_4$ )中,采用球磨法进行混合,对研磨后的硅粉和碳纳米管进行 TEM 测试,发现在研磨 48 h 后硅粒子均匀附着在碳纳米管表面,超过 48 h 后可能会造成硅晶格缺陷;并采用光电法测量了  $Si/P_3O_4$  与  $Si/P_3O_4/CNTs$  的燃速,发现加入碳纳米管后,环境温度对  $Si/P_3O_4$  燃速的影响减弱,并且在相同条件下,  $Si/P_3O_4/CNTs$  的燃速比  $Si/P_3O_4$  高约 50%,且延期精度也有所提高。其原因是碳纳米管具有的优异导热性能提高了延期药柱燃烧时的表面导热性,进而使反应体系燃烧相对稳定,且提高了燃速。

2021年, Gabdrashova S 等<sup>[26]</sup>将碳纳米管应用到  $Ti/BaCrO_4$  延期配方中,利用行星球磨机进行研磨,通过电镜可以观察到圆形的钛晶体和层状结构,并且预混合后的碳纳米管覆盖了钛粉末颗粒。在  $65\text{ }^\circ\text{C}$  的环境温度下进行了 1, 2, 4 周的初步测试,测试结果显示混合物的成分及燃速无明显变化,表明基于  $BaCrO_4$  的混合物和碳纳米管硬化的钛基质的复合材料有较好的贮存稳定性,因此能够保证贮存后的延期火工品具有较高的延期精度。

### 2.1.2 石墨烯(GA)的应用

2016年, 兰元飞<sup>[27]</sup>采用溶胶-凝胶法和超临界二氧化碳干燥法制备了 G/Ni 纳米复合材料,通过能谱仪对其元素分布进行表征,发现 C、O 和 Ni 3 种元素在 G/Ni 纳米复合材料中均匀分布。测试了 G/Ni 纳米复合材料对高氯酸铵(AP)热分解的催化作用,并通

过 DSC 研究了 AP 和 Ni、G、G+Ni、G/Ni 纳米复合材料共混物的热分解过程,得到 AP 的高温分解峰温为  $434.2\text{ }^\circ\text{C}$ , 分解放热量为  $593.0\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 加入 Ni、G 和 G+Ni 后, AP 的高温分解峰温分别减小至  $408.6$ ,  $406.1$ ,  $404.3\text{ }^\circ\text{C}$ , 分解放热量分别增加至  $822.0$ ,  $871.0$ ,  $968.0\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 且加入 G/Ni 纳米复合材料后, AP 的高温分解峰温降低的幅度最大,分解放热量增加的幅度最大,表明该材料对 AP 的热分解有良好的催化作用。

综上所述,碳纳米管和石墨烯等纳米碳材料在燃烧催化领域有广阔的应用前景。由于其自身结构的特殊性以及可以进行表面改性的特点,基于纳米粒子小粒径效应的原理,使其负载的纳米级金属粒子与其复合物组分之间产生催化作用,对提高燃速、改善燃烧性能以及增加燃烧过程稳定性都有着优良的催化效果。

## 2.2 钙钛矿材料的应用

钙钛矿型氧化物( $ABO_3$ )是一种新型无机非金属材料,因其高度对称以及组分多样,使得钙钛矿晶体功能多样化<sup>[28]</sup>。由于结构的特殊性,可以被与钙钛矿氧化物中 A、B 位离子半径大致相同的金属离子所取代,并且在被取代的同时保持其结构基本不变,因此,在理论上  $ABO_3$  是用于催化作用的理想样品<sup>[29]</sup>。近年来,以钙钛矿材料为催化剂的应用均以 AP 为催化对象,通过改变 AP 的热分解性能进而改善含能材料的燃烧性能,除了金属粒子搭载方式以外,还可将高氯酸铵分子与钙钛矿结合<sup>[30]</sup>。

2021年,为了改善 AP 推进剂的燃速和压强指数,进而优化增产弹的压裂效果,郭帅帅<sup>[31]</sup>制备了  $LaFeO_3$  等钙钛矿金属氧化物和  $GO/LaFeO_3$  等石墨烯基钙钛矿金属氧化物,通过 DSC 分析发现,  $LaFeO_3$  低温分解阶段对 AP 分解温度影响不大,而在高温分解阶段, AP 的高温分解温度由  $425\text{ }^\circ\text{C}$  降低至  $360\text{ }^\circ\text{C}$ , 表明  $LaFeO_3$  促进了 AP 的高温分解。此外,  $GO/LaFeO_3$  的催化效果随着石墨烯含量的增加而变化,当石墨烯含量为 15% 时催化活性最高,此时,  $GO/LaFeO_3$  的分解温度降低了  $99\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2023年,安二海<sup>[32]</sup>制备了 4 种以 AP 为基的钙钛矿含能材料,分别为  $(H_2dabco)[NH_4(ClO_4)_3]$  (DAP-4)、

(H<sub>2</sub>pz)[NH<sub>4</sub>(ClO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] (PAP-4)、(H<sub>2</sub>mpz)[NH<sub>4</sub>(ClO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] (PAP-M4)、(H<sub>2</sub>hpz)[NH<sub>4</sub>(ClO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>] (PAP-H4)。其中, DAP-4 和 PAP-4 颗粒尺寸较为适中, 在 5~20 μm 之间; PAP-M4 和 PAP-H4 尺寸较大。对其热分解性能、热安全性以及引入双金属氧化物 Mg Co<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 催化后的热分解行为进行对比分析, 结果表明 DAP-4 的综合性能最优。

2022 年, 曹雨琪<sup>[33]</sup>通过 SEM、XRD 和 DSC 测试手段研究了 MAX 相过渡金属碳化物(Mo<sub>2</sub>TiAlC<sub>2</sub>)、金属有机框架材料(PB-s)和石墨烯基过渡金属氧化物(Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-rGO)对 DAP-4 热分解的催化作用, 发现 Mo<sub>2</sub>TiAlC<sub>2</sub> 具有明显的层状结构, 且相对于单一 DAP-4, DAP-4/Mo<sub>2</sub>TiAlC<sub>2</sub> 的表观活化能有所提高, 表现出更加优良的热稳定性。

### 3 制备工艺对燃速的影响

延期药的制备工艺主要包括混药工艺和压药工艺, 其对延期火工品燃速和延期精度的影响是多方面的。延期药各组分的混合均匀程度非常重要<sup>[34]</sup>, 普遍认为, 混药时间越长, 混合均匀程度越好, 配方中氧化剂和可燃剂的接触越充分, 燃速越快且燃烧越稳定, 进而延期精度越高<sup>[35]</sup>。压药工艺则主要影响延期药柱的装药密度, 进而影响延期元件的燃速及延期精度<sup>[36-40]</sup>。压药压力越大, 药柱密度越大, 孔隙率越低且整体导热率越大, 进而燃速越大, 但过大的压药压力可能会导致“压死”, 使整个延期元件失效<sup>[41]</sup>。近年来, 随着增材制造(Additive manufacturing, AM)、微流控(Microfluidics)技术等新工艺的发展, 其在含能材料领域的应用也愈加广泛。

#### 3.1 增材制造技术

传统的药柱成型工艺主要采用压药机器, 在压药过程中, 可能会因为药柱受力不均而导致药柱密度不一致, 从而影响反应时的燃烧状态, 对燃速和延期精度等性能参数影响较大。此外, 由于压药机器由人工操作, 导致不同批次的延期药性能存在一定差异, 且压药过程存在安全隐患。近几年, 随着增材制造技术<sup>[42-46]</sup>的发展, 研究人员将数字光处理(DLP)3D 打

印技术应用于药柱成型<sup>[47]</sup>。

2021 年, 沈红旗<sup>[48]</sup>设计并优化了以黑索今(RDX)、AP 和镁粉(Mg)作为填料的紫外光固化延期药浆料配方, 通过紫外光固化技术打印出延期药柱, 并与传统浇铸成型的药柱进行了对比试验。其 3D 打印过程主要包括前处理、分层叠加成型和后处理 3 个阶段, 在前处理阶段设计打印参数并对药柱进行建模。该延期药柱的燃速测试结果表明: 打印成型的药柱燃速和延期精度分别是浇铸成型药柱的 1.491 倍和 3.769 倍, 表明通过 3D 打印技术可以提高光固化延期药柱的燃速和延期精度。

2019 年, McClain M S 等<sup>[49]</sup>设计了一种新型 AM 编写系统, 能够将具有高粘度的低推进剂打印成高精度的几何形状。AM 编写系统使用羟基端接聚丁二烯(HTPB)和紫外可固化的聚氨酯粘合剂, 在 85% 固体载荷下打印 AP 复合推进剂。利用高速摄影观察成型药柱的燃烧状态及燃速, 发现药柱燃烧稳定, 表明该系统可以产生足够的高负荷含能材料, 无需添加溶剂、特殊粘合剂(低粘度、热软化等), 或限制使用具有较低粘度的配方, 并可以制造出复杂几何形状的含能材料。

目前, 增材制造技术已经较为成熟, 可通过药柱建模、打印参数设定以及选择添加剂达到理想的药柱尺寸、强度以及较为稳定的燃烧状态, 并且逐层打印方式使药柱整体密度分布均匀, 因此, 该技术在延期药柱成型方面有着广泛的发展前景。

#### 3.2 微流控技术

微流控是指在微观尺度(数十到数百微米)上操作和控制流体的科学和技术<sup>[50]</sup>。由于微流体具有尺度效应和大比表面积, 微流控技术具有较高的选择性、原位性和可控的微区反应环境等特点, 已经广泛的应用于化学、化工、生物、医药等领域, 并且取得了显著成效<sup>[51]</sup>。近些年, 微流控技术在含能材料合成方面也发展迅速<sup>[52-54]</sup>。

2022 年, 成雅芝等<sup>[55]</sup>利用微流控技术制备了以铝粉、含六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)和粘合剂聚偏二氟乙烯(PVDF)为组分的复合含能材料 nAl@PVDF 和 nAl@PVDF@CL-20, 并对其进行表征

及性能研究。制备 nAl@PVDF 复合微颗粒的步骤如图 2 所示。通过对其进行 SEM 以及粒径分析可以看出,复合微颗粒表面光滑,无缺失和团聚现象的出现,粒径分布也较为均匀。

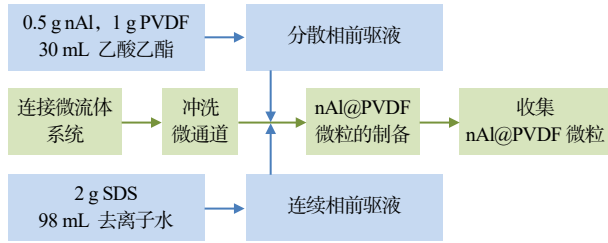


图 2 制备 nAl@PVDF 复合微颗粒的实验步骤

Fig.2 Experimental procedures for the preparation of the nAl@PVDF composite microparticles

通过 DSC-TG 对传统工艺制备的 nAl/PVDF/CL-20 与微流控技术制备的 nAl@PVDF@CL-20 进行对比,发现 nAl@PVDF@CL-20 比 nAl/PVDF/CL-20 提前了 23.02 °C 进行分解反应,且放热量更高。这可能是因为 nAl@PVDF@CL-20 的粒径分布更加均匀,促进了 PVDF 的分解,同时加剧了 nAl 与 PVDF 分解产物的反应。并且,通过的二者 TG 曲线(图 3)可见, nAl/PVDF/CL-20 和 nAl@PVDF@CL-20 均有 3 段失重过程且失重相等,这说明微流控技术制备的复合材料对反应的最终产物并无较大影响。

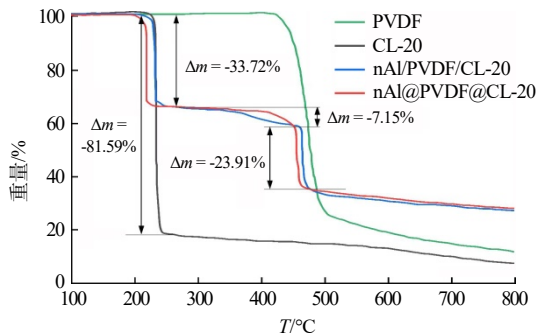


图 3 nAl@PVDF@CL-20 复合微颗粒、nAl/PVDF/CL-20 材料及原料 PVDF、CL-20 的 TG 曲线

Fig.3 TG curves of nAl @ PVDF @ CL-20 composite microparticles, nAl / PVDF / CL-20 materials and raw materials PVDF and CL-20

综上所述,微流控技术在组装复合含能材料方面,与宏观合成相比显示出明显的优势。微流控技术可以进行快速的反应混合,并且能够精确控制参数,提高整个过程的选择性、效率和安全性,适用于含能材料的安全合成与粒度调控,进而实现对延期药燃速的调控以及延期精度的优化。

## 4 结论

本文探讨了延期药参数(组分、配比及粒度),燃速调节剂(碳纳米材料、钙钛矿材料),制备工艺(增材制造技术、微流控技术)等因素对延期药燃速及延期精度的影响机理及应用现状,得出以下结论:

(1) 可燃剂的燃烧热值以及氧化剂的含氧量、分解热和吸湿性等因素对延期药性能起决定性作用;

(2) 新型材料纳米碳材料和钙钛矿金属氧化物的出现可以更加精准对含能材料燃速进行调控,通过不同的负载方式和复合元素会展现出不同的降速或增速效果,并且会改善燃烧性能和燃烧稳定性,具有很大的应用前景;

(3) 新型工艺中增材制造技术可使药柱具有成型快、精度高、药柱密度分布均匀等特点;

(4) 微流控技术在组装复合含能材料方面,能够精确控制参数,提高整个过程的选择性、效率和安全性。

综上所述,调控延期药燃速以及改善性能方面已经出现不同的新材料及新工艺,但并没有广泛应用于延期火工品中。建议今后将新型材料和工艺制备的延期药应用于成熟的延期火工品中,进行应用验证并开展各项性能测试,与传统工艺下的性能进行对比,分析其优缺点。

## 参考文献:

- [1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 国防工业出版社,2014.
- [2] 吴幼成, 宋敬埔. 延期药技术综述[J]. 爆破器材, 2000(02): 23-27.
- [3] 邹志兵, 吴建波. 延期药和延期体种类及延期精度分析[J]. 当代化工研究, 2017(08): 129-132.
- [4] Al-Kazraji S S, Rees G J. The fast pyrotechnic reaction of silicon and red lead: heats of reaction and rates of burning[J]. Fuel, 1979, 58(2): 139-143.
- [5] 龚锦梅, 刘建斌. 成一. 研究延期药燃烧过程及规律的分段

- 压制测试法[J]. 爆破器材, 2004, 32(4): 17-20.
- [6] Al-Kazraji S S, Rees G J. The fast pyrotechnic reaction of silicon and red lead: heats of reaction and rates of burning[J]. Fuel, 1979, 58(2): 139-143.
- [7] Moghaddam A Z, Rees G J. The fast pyrotechnic reaction of silicon with lead oxides: differential scanning calorimetry and hot-stage microscopy studies[J]. Fuel, 1981, 60(7): 629-632.
- [8] Shachar E, Gany A. Investigation of slow-propagation tungsten delay mixtures[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1997, 22(4): 207-211.
- [9] Kai-Tai Lu, Ching-Chyuan Yang, et al. Investigation of the burning properties of slow-propagation tungsten type delay compositions[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2008 (33): 219-266.
- [10] 许俊峰, 彭加斌, 王秀芝, 等. 粘合剂对钨系延期药燃速的影响[J]. 含能材料, 2007(02): 144-147.
- [11] Khan A, Malik A Q, Lodhi Z H, et al. Study of effect of binders and loading pressures on the performance of the time delay pyrotechnic compositions[J]. Journal of Energetic Materials, 2018, 36(4): 386-397.
- [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.
- [13] Han T F, Yan S L. Effects of the binders on the storage stability of the silicon delay composition[J]. Advanced Materials Research, 2014(977): 135-140.
- [14] Potgieter G, Focke W W, Del Fabbro O, et al. Fluoroelastomer pyrotechnic time delay compositions[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016(126): 1 363-1 370.
- [15] 任冬梅, 吴红波, 张洪, 等. 硅粉粒度对铅丹硅系延期药延期精度影响的实验研究[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(03): 1-4.
- [16] 黄辉. 颗粒级配技术及其在含能材料中的应用[J]. 含能材料, 2001(04): 161-164.
- [17] 张建富, 胡延臣. 延期药粒度级配对延期精度的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(01): 84-88.
- [18] 赵凤起, 仪建华, 安亭, 等. 固体推进剂燃烧催化剂[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [19] 严启龙. 浅谈固体推进剂燃烧催化剂的评判标准[J]. 含能材料, 2019, 27(04): 266-269.
- [20] Zhang Y, Liu X, Nie J, et al. Improve the catalytic activity of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles in decomposition of ammonium perchlorate by coating amorphous carbon on their surface[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2011, 184(2): 387-390.
- [21] 张正中, 邓重清, 屈蓓, 等. 纳米材料在固体推进剂中的应用进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14(06): 37-44.
- [22] Vara A J, Dave N P. Investigation the catalytic profile of Eu and Pr doped CeO<sub>2</sub> nanoparticles for the thermal behavior of AP[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(5): 432.
- [23] Qi-Long Y, Michael G, Feng-Qi Z, et al. Highly energetic compositions based on functionalized carbon nanomaterials[J]. Nanoscale, 2016, 8(9): 4 799-4 851.
- [24] Gao HX, Zhao FQ, Luo Y, et al. Synthesis of nanocomposite PbO·SnO<sub>2</sub> and its effect on the combustion properties of DB and RDX-CMDB propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(6): 15-18.
- [25] Ren H, Jiao Q J, Chen S C. Mixing Si and carbon nanotubes by a method of ball-milling and its application to pyrotechnic delay composition[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2010, 71(2): 145-148.
- [26] Gabdrashova S, Tulepov M, Korchagin M, et al. Development of pyrotechnic delay mixtures based on a composite material hardened with carbon nanotubes[J]. Dig. J. Nanomater. Biostruct, 2021(16): 1 341-1 350.
- [27] 兰元飞. 石墨烯基纳米复合材料的制备、表征及其对高氯酸铵催化作用的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [28] 李翠翠, 张婷, 等. 三维有序大孔钙钛矿金属氧化物作为高效燃烧催化剂的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(06): 3 181-3 190.
- [29] Tanaka H, Misono M. Advances in designing perovskite catalysts[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2001, 5(5): 381-387.
- [30] Zang M, Zhao C, Wang Y, et al. A review of recent advances in catalytic combustion of VOCs on perovskite-type catalysts[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2019, 23(6): 645-654.
- [31] 郭帅帅. 石墨烯基钙钛矿金属氧化物的制备及其对高氯酸铵热分解催化性能的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.

- [32] 安二海. 高氯酸铵基分子钙钛矿含能材料的热行为及燃烧性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [33] 曹雨琪. 过渡金属化合物对分子钙钛矿含能材料的热分解催化研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [34] 张彦. 混药工艺对延期药延期时间精度影响的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- [35] 张君. 硅系延期药水混工艺的应用[J]. 煤矿爆破, 2012(01): 22-23.
- [36] 陈昆, 韩体飞, 金晓艳, 等. 压药压力对硅系延期药燃烧性能的影响[J]. 火工品, 2019(3): 51-54.
- [37] 韩体飞, 钟帅, 张涵, 等. 微气体延期药柱燃烧传播与装药密度的关系[J]. 煤炭技术, 2014, 33(11): 282-284.
- [38] 张涵, 韩体飞, 吴红波, 等. 铅丹-硼系延期药的储存稳定性研究[J]. 爆破器材, 2017, 46(01): 49-54.
- [39] 徐康. 硅系延期药配方及延期元件工艺研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [40] 成春莲, 魏艳敏, 邓涛. B/BaSO<sub>4</sub>/BaGrO<sub>4</sub> 延期药制备工艺的优化[J]. 世界有色金属, 2020(16): 226-227.
- [41] 朱帅, 刘锋, 张彦, 等. 压药压力对硅系延期药燃速影响的试验研究[J]. 爆破器材, 2017, 46(02): 51-54.
- [42] McClain S M, Afriat A, Rhoads F J, et al. Development and characterization of a photopolymeric binder for additively manufactured composite solid propellant using vibration assisted printing[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(6): 853-863.
- [43] Straathof H M, Driel A C, Lingen J N J, et al. Development of propellant compositions for vat photopolymerization additive manufacturing[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(1): 36-52.
- [44] Dolman B, Hart A, Johnston I, et al. Advanced munitions: 3dprinted firepower[C]/ICSILP. Edinburgh: International Conference on Science and Innovation for Land Power, 2018.
- [45] Chandru R A, Balasubramanian N, Oommen C, et al. Additive manufacturing of solid rocket propellant grains[J]. Journal of Propulsion and Power, 2018, 34(4): 1 090-1 093.
- [46] Komissarenko D A, Sokolov P S, Evstigneeva A D, et al. DLP 3D printing of scandia-stabilized zirconia ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 4(1): 684-690.
- [47] 霸书红, 杨雨龙, 沈红旗, 等. DLP光固化3D打印含能药柱及延期性能[J]. 含能材料, 2022, 30(04): 363-369.
- [48] 沈红旗. 紫外光固化延期药的制备及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
- [49] McClain M S, Gunduz I E, Son S F. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 3 135-3 142.
- [50] 申峰, 李易, 刘赵森, 等. 基于微流控技术的微液滴融合研究进展[J]. 分析化学, 2015, 43(12): 1 942-1 954.
- [51] Gutmann B, Cantillo D, Kappe C O. Continuous-flow technology—a tool for the safe manufacturing of active pharmaceutical ingredients[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 54(23): 6 688-6 728.
- [52] Zhao S, Chen C, Zhu P, et al. Passive micromixer platform for size-and shape-controllable preparation of ultrafine HNS[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(36): 16 709-16 718.
- [53] Shi J, Zhu P, Zhao S, et al. Continuous spheroidization strategy for explosives with micro/nano hierarchical structure by coupling microfluidics and spray drying[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 412(1): 128 613.
- [54] Zhou X, Zhu P, Shi J, et al. Self-assembly assisted by microdroplet templates confinement for the preparation of ultramixed composite energetic particulates[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 454(2): 140 204.
- [55] 成雅芝, 王前, 任慧, 等. 微流控组装 nAl@PVDF@CL-20 复合含能微颗粒的制备与表征[J]. 含能材料, 2022, 30(04): 341-348.