

文章编号: 1003-1480 (2024) 04-0062-07

新型配合物点火药设计与表征

成闻川¹, 乔秀泉², 葛明成¹, 邓流¹, 李志敏¹, 张建国¹

(1. 北京理工大学 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京, 100081; 2. 山东泰山民爆器材有限公司, 山东 日照, 262300)

摘要: 为探索新型点火药, 以满足武器装备更高的需求, 以3,5-二硝基苯甲酸根(DNBA)为阴离子, 1-烯丙基咪唑(AIM)为配体, 过渡金属Mn、Co、Cu为中心离子, 合成了3种新型含能配合物燃料, 对其晶体结构、热分解特性、燃烧热和机械感度进行了测试; 基于此, 设计并制备了3种点火药, 对其燃烧热、线燃烧速率、输出压力、点火能力和感度进行了测试。结果表明: 3种新型含能配合物燃料的热分解温度处于272.93~427.85°C范围, 燃烧热处于16.69~18.91 kJ·g⁻¹范围, 对机械刺激不敏感; 3种点火药的燃烧热处于3.88~4.71 kJ·g⁻¹范围, 线燃烧速率处于153.28~187.33 mm·s⁻¹范围, 输出压力处于4.36~4.62 MPa范围, 撞击感度处于28~32 J, 摩擦感度处于216~252 N。

关键词: 含能配合物; 点火药; 配方设计; 性能测试

中图分类号: TJ55; TQ560.7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.04.008

Design and Characterization of Novel Coordination Complexes Based Ignition Powders

CHENG Wen-chuan¹, QIAO Xiu-quan², GE Ming-cheng¹, DENG Liu¹, LI Zhi-min¹, ZHANG Jian-guo¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081; 2. Shandong Taishan Civil Explosive Co. Ltd., Rizhao, 262300)

Abstract: In order to explore novel ignition powders to meet the higher demands of weapons and equipment, three new energetic coordination complex fuels were synthesized using 3,5-dinitrobenzoate (DNBA) as the anion, 1-allyl imidazole (AIM) as the ligand, and transition metals Mn, Co, and Cu as the central ions. The crystallographic structure, thermal decomposition characteristics, combustion heat, and mechanical sensitivity of these fuels were tested; Based on this, three ignition powders were designed and prepared, and their combustion heat, linear combustion rate, output pressure, ignition ability, and sensitivity were tested. The results show that the thermal decomposition temperature of three novel energetic coordination complex fuels ranges from 272.93 °C to 427.85 °C, the combustion heat of which ranges from 16.69 kJ·g⁻¹ to 18.91 kJ·g⁻¹, and they are insensitive to mechanical stimuli; The combustion heat of the three ignition powders ranges from 3.88 kJ·g⁻¹ to 4.71 kJ·g⁻¹, the linear combustion rate ranges from 153.28 mm·s⁻¹ to 187.33 mm·s⁻¹, the output pressure ranges from 4.36 MPa to 4.62 MPa, the impact sensitivity ranges from 28 J to 32 J, and the friction sensitivity ranges from 216 N to 252 N.

Key words: Energetic coordination complex; Ignition powder; Formulation design; Performance testing

点火药多用于底火、传火管、电点火管、电点火器、点火具等点火、传火类火工品中, 用以引燃火药、炸药、烟火药和推进剂等^[1-2]。随着科学技术发展, 现代战场环境日益复杂, 打击目标更加多变, 对武器系

统提出了更高要求。作为武器装备的初始引发能源, 点火药需要在不同应用环境中具有不同的点火性能。因此, 对点火药配方进行重新设计, 开发新型、性能更加全面的点火药迫在眉睫^[3]。

收稿日期: 2024-05-20

作者简介: 成闻川(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事燃烧类含能材料研究。

通讯作者: 李志敏(1986-), 男, 副教授, 主要从事含能材料研究。

基金项目: 十四五装备预研项目。

引用本文: 成闻川, 乔秀泉, 葛明成, 等. 新型配合物点火药设计与表征[J]. 火工品, 2024(4): 62-68.

含能配合物是一类结构丰富的含能材料^[4-5],具有能量密度高、性能可调节性强等优点,通过改变金属阳离子、配体及阴离子,可以设计出具有目标性能的多种含能配合物^[6]。以含能配合物作为燃料,能够改善点火药的性能可调节性。对于现有的高能点火药体系,常用的点火药主要为 B/KNO_3 点火药^[7]以及各类含金属粉或金属合金的复合药剂^[8-9]。有学者将含能金属配合物引入点火药中,但只进行了初步点火实验,并未进行深入的性能测试与分析^[10]。

为探索基于含能金属配合物的点火药的性能,本研究选用 3,5-二硝基苯甲酸根(DNBA)为阴离子,过渡金属 Mn、Co、Cu 为中心离子,1-烯丙基咪唑(AIM)为配体,合成了 3 种新型含能配合物,对其晶体结构、热分解特性、燃烧热和机械感度进行了测试;以 3 种新型含能配合物为燃料,设计并制备了 3 种点火药,对其燃烧热、线燃烧速率、输出压力、点火能力和感度进行了测试。

1 试验

1.1 试剂与仪器

硝酸锰水溶液($Mn(NO_3)_2$, wt.=50%),六水合硝酸钴($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$),分析纯,上海阿拉丁公司;三水合硝酸铜($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$),分析纯,北京通广精细化工公司;1-烯丙基咪唑($C_6H_8N_2$),分析纯,上海阿拉丁公司;3,5-二硝基苯甲酸($C_7H_4N_2O_6$),分析纯,上海迈瑞尔有限公司。

采用 Rigaku Saturn 724+单晶 X 射线衍射仪进行单晶测试,测试时采用 Mo $K\alpha$ 射线($\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$)靶。采用 Olex2 软件采集数据和提取初始的晶胞,用 SHELXS-97 程序解析得到金属配合物结构,并进行各向异性精修。使用上海精科天美科学仪器有限公司的 CDR-4P 型差示扫描量热仪对配合物样品进行热分析,每次称取 2 mg 左右样品,在空气氛围下,以 $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ 的升温速率,从室温升至 $500 \text{ }^\circ\text{C}$,使用电脑采集升温过程中数据。使用 Parr 6200 氧弹量热仪测试恒容燃烧热,每次称取样品 0.25 g 左右,将其置于坩埚中,封闭弹体,配合物燃料样品在 O_2 氛围下测试,

点火药样品在 N_2 氛围下测试。

采用搭建的基于密闭爆发器的点火药输出压力监测系统(图 1)测试点火药燃烧时输出压力随时间的变化规律,即 $p-t$ 曲线。获取点火药样品燃烧时曲线的峰值压力以及到达峰值压力的发火时间这 2 个特征参数。

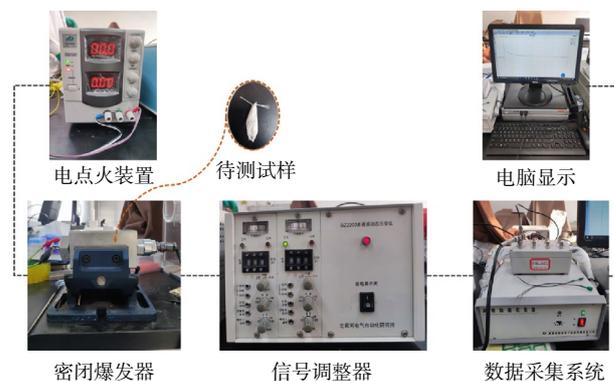


图 1 点火药输出压力监测系统

Fig.1 Monitoring system for ignition powder output pressure

采用课题组自制的燃烧速度测试模具(图 2)测定点火药样品的线燃烧速率,每次实验称量点火药样品约 300 mg,用硬纸板将样品均匀紧致地填充至 $2 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 卡槽中,利用高速摄像拍摄记录燃烧过程并计算线燃烧速度。



图 2 燃烧速度测试模具

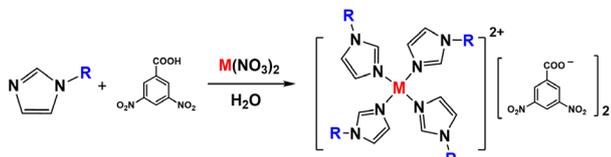
Fig.2 The combustion rate test mold

采用 BAM 落锤仪和 BAM 摩擦感度仪测试样品的机械感度。撞击感度测试时,将少量样品(10 mg)装于测试模具中,通过调整落锤质量和落下高度来获得不同撞击能量,观察有无烟雾、闪光、响声等现象,以判断是否发火。摩擦感度测试时,将少量样品(约 3 mg)放置在陶瓷片上,并通过夹具固定在测试仪上,通过调整砝码重量来调节施加的正压力,按动测试开关后,陶瓷片在短距离进行往复运动,观察有无烟雾、闪光、响声等现象,以判断是否发火。

1.2 新型配合物燃料的合成

配合物燃料的合成路线如图 3 所示。以含锰金属

配合物的制备过程为例：在 50 mL 烧瓶中，将 3, 5-二硝基苯甲酸 (4 mmol, 0.848 g) 溶于 20 mL 浓度为 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠溶液中，随后滴加 10 mL 1-烯丙基咪唑 (4 mmol, 0.432 g) 的水溶液，最后将 10 mL $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ (2 mmol, 0.358 g) 的水溶液加入烧瓶中。搅拌反应 1 h 后，产生棕黄色的沉淀物。过滤产物，用无水乙醇和去离子水洗涤，随后在 60°C 下真空干燥，得到粉末产品，产率为 91 %。将滤过的溶液在室温下缓慢蒸发结晶，获得透明的灰色块状晶体。按照上述步骤分别制备得到 3 种金属含能配合物： $[\text{Mn}_2(\text{AIM})_4(\text{H}_2\text{O})](\text{DNBA})_4$ 、 $[\text{Co}(\text{AIM})_4(\text{H}_2\text{O})_2](\text{DNBA})_2$ 、 $\text{Cu}(\text{AIM})_2(\text{DNBA})_2$ ，依次命名为 ECC-1、ECC-2 和 ECC-3。



注：M 代表 Mn (ECC-1) 或 Co (ECC-2) 或 Cu (ECC-3)；R 代表 $\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$ 。

图 3 ECC-1、ECC-2 和 ECC-3 合成路线图

Fig.3 Synthetic route of ECC-1, ECC-2 and ECC-3

1.3 点火药的制备

采用过筛法造粒制备点火药样品，其主要步骤为：配合物燃料和氧化剂原料均应先过筛，以控制其粒度，选用 200 目筛对氧化剂高氯酸钾进行筛选，选用 400 目筛对可燃剂进行过筛；然后，用真空水浴烘箱在 60°C 下进行干燥去除水分；待上述原料烘干并且晾至室温后，用分析天平按混合比例称量氧化剂高氯酸钾，随后称取可燃剂金属配合物进行干混，将二者在称量纸上用纸片轻轻混合，待混合均匀后，倒入提前配制好的酚醛树脂乙醇溶液中进行湿混，将药剂混合均匀并搅拌至类似于胶泥状态；之后放入 40 目的标准筛上，平铺薄薄一层，用橡皮板进行按压，迫使药剂通过规定大小的筛孔进而形成颗粒状，造粒前后点火药的形貌如图 4 所示。



图 4 点火药样品形貌图

Fig.4 Morphological diagram of ignition powder sample

最后，用 40 目标准筛对造粒后的点火药颗粒进

行筛分，除去那些磨碎的细粒以及相互黏结形成的一些粗大颗粒，保证造粒后点火药颗粒的均匀性。

2 结果与讨论

2.1 新型配合物燃料的晶体结构

显微镜下观察到的 3 种配合物燃料的晶体形貌如图 5 所示。由图 5 可见，ECC-1 呈现透明淡黄色，晶体长度和宽度约为 1.0 mm；ECC-2 呈现透明淡绿色，晶体尺寸较小，最长处约为 0.5 mm；ECC-3 呈现透明淡蓝色，晶体为细针状，直径为微米量级，长度约 3.0 mm。

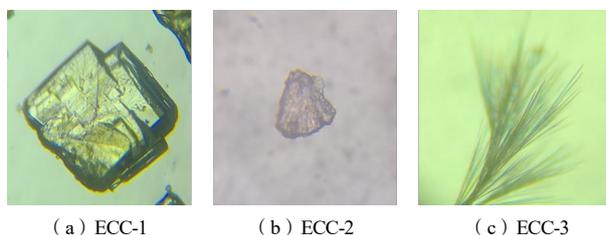


图 5 3 种配合物燃料晶体形貌

Fig.5 The crystal morphologies of three coordination complex fuels

通过单晶 X-射线衍射解析得到 3 种配合物燃料的晶体学参数，如表 1 所示。由表 1 可见，ECC-1 配合物燃料属于三斜晶系， $P-1$ 空间群，其晶胞内最小不对称单元个数为 2，晶胞体积是 3 种配合物中最大的，达到 $3\,059.9 \text{ \AA}^3$ ，理论晶体密度为 $1.525 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。ECC-2 配合物属于三斜晶系， $P-1$ 空间群，其晶胞体积为 $1\,076.85 \text{ \AA}^3$ ，晶胞中最小不对称单元数为 1，理论晶体密度为 $1.465 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。ECC-3 配合物属于单斜晶系， $P2_1/c$ 空间群，其晶胞体积为 $1\,409.8 \text{ \AA}^3$ ，晶胞中最小不对称单元数为 2，理论晶体密度为 $1.654 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

ECC-1 的分子结构如图 6 所示，其分子由金属中心锰离子、2 个烯丙基咪唑配体、1 个水分子配体以及 3 个 3,5-二硝基苯甲酸阴离子组成。中心金属锰离子与 2 个烯丙基咪唑配体上的氮原子以配位键连接，同时与 2 个 3,5-二硝基苯甲酸阴离子以离子键形式连接，与 1 个 3,5-二硝基苯甲酸阴离子上的氧原子以配位键连接，还有 1 个水分子参与配位，形成一个六配位八面体结构。

表 1 3种配合物燃料晶体学参数

Tab.1 The crystallographic parameters of three coordination complex fuels

参数	ECC-1	ECC-2	ECC-3
分子式	C ₅₂ H ₄₆ Mn ₂ N ₁₆ O ₂₅	C ₃₈ H ₂₂ CoN ₁₂ O ₁₄	C ₂₆ H ₂₂ CuN ₈ O ₁₂
相对分子质量	1 404.93	949.77	702.06
<i>T</i> /K	115.90(14)	120.35(17)	115.6(3)
晶系	三斜晶系	三斜晶系	单斜晶系
空间群	<i>P</i> -1	<i>P</i> -1	<i>P</i> 2 ₁ / <i>c</i>
<i>a</i> /Å	14.374 7(13)	8.323 1(7)	10.895(5)
<i>b</i> /Å	14.472 4(16)	8.480 7(7)	5.189(4)
<i>c</i> /Å	16.492 6(17)	15.456 3(13)	25.162(16)
α /°	80.692(9)	81.316(7)	90.00
β /°	85.146(8)	87.120(7)	97.64(5)
γ /°	64.671(10)	88.299(7)	90.00
<i>V</i> /Å ³	3 059.9(5)	1 076.85(16)	1 409.8(16)
<i>Z</i>	2	1	2
ρ /(g·cm ⁻³)	1.525	1.465	1.654
μ /mm ⁻¹	0.509	0.479	0.857
<i>F</i> (000)	1 440	493	718
基于 <i>F</i> ² 的 GOF 值	0.993	1.031	0.920
<i>R</i> ₁ (<i>I</i> ≥ 2σ(<i>I</i>))	0.083 1	0.056 3	0.094 9
<i>R</i> ₁ (所有数据)	0.192 7	0.086 3	0.235 3
<i>wR</i> ₂ (<i>I</i> ≥ 2σ(<i>I</i>))	0.134 7	0.082 1	0.135 0
<i>wR</i> ₂ (所有数据)	0.188 6	0.099 3	0.194 7

注: *T* 为测试温度; *a* 为晶胞长度; *b* 为晶胞宽度; *c* 为晶胞高度; α 为晶胞轴 *a*, *b* 间夹角; β 为晶胞轴 *a*, *c* 间夹角; γ 为晶胞轴 *b*, *c* 间夹角; *Z* 为晶胞中最小不对称单元数; ρ 为晶胞理论密度; μ 为吸收系数; *F*(000) 为晶胞内电子数目; *R*₁ 为非权重一致性因子; *wR*₂ 为权重一致性因子。

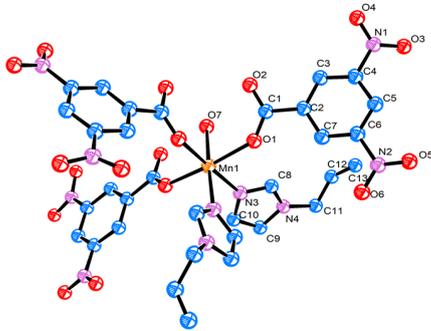


图 6 ECC-1 的分子结构

Fig.6 The molecular structure of ECC-1

ECC-2 的晶体结构如图 7 所示, 其分子结构由金属中心钴离子、4 个烯丙基咪唑配体、2 个水分子以及 2 个外界 3, 5-二硝基苯甲酸阴离子构成。与 ECC-1 不同, ECC-2 中的阴离子不直接参与配位, 而是以外界的形式存在, 中心金属钴离子与 4 个烯丙基咪唑配体上的氮原子形成配位键, 同时也与 2 个水分子上的氧原子以配位键连接, 形成一个六配位八面体结构, 由于阴离子以外界形式存在, 使得晶体密度有所下降, 因此, ECC-2 在 3 种配合物中密度最低。

ECC-3 的分子结构如图 8 所示, 其分子由中心金

属铜离子、2 个烯丙基咪唑配体以及 2 个 3, 5-二硝基苯甲酸阴离子组成, 分子结构具有中心对称性。中心金属铜离子分别和 2 个烯丙基咪唑配体上的氮原子形成配位键, 同时和 2 个 3, 5-二硝基苯甲酸阴离子上的氧原子形成离子键连接, 同样地, 在空间上形成四配位平面结构。

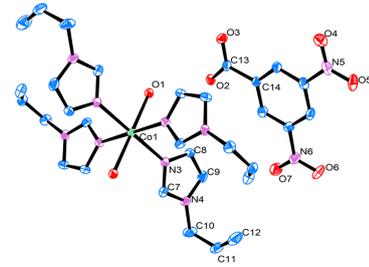


图 7 ECC-2 的分子结构

Fig.7 The molecular structure of ECC-2

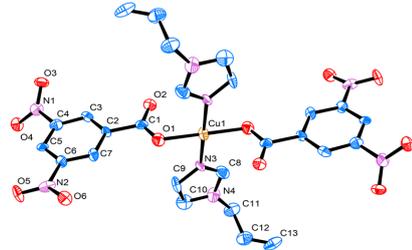


图 8 ECC-3 的分子结构

Fig.8 The molecular structure of ECC-3

2.2 新型配合物的基础性能

采用差示扫描量热法 (DSC) 对 3 种配合物进行热分析, 结果表明: ECC-3 的分解峰温为 272.93 °C, 相对较低; ECC-1 和 ECC-2 都具有较高的分解峰温, 分别为 402.41, 427.85 °C, 具有良好的耐高温特性。

根据 3 种配合物燃料完全燃烧的化学反应方程式, 利用盖斯定律计算了 3 种配合物燃料的标准摩尔生成焓 $\Delta_f H_m^\theta$, 并测试了其定容燃烧热和感度, 相关结果如表 2 所示。

表 2 3种配合物的基本性质

Tab.2 Physicochemical properties of three coordination complex fuels

样品	<i>T_p</i> /°C	<i>Q_v</i> /(kJ·g ⁻¹)	$\Delta_f H_m^\theta$ /(kJ·mol ⁻¹)	撞击感度 <i>IS</i> /J	摩擦感度 <i>FS</i> /N
ECC-1	402.41	18.91	-1 866.66	>40	>360
ECC-2	427.85	17.84	-4 242.14	>40	>360
ECC-3	272.93	16.69	-1 815.31	>40	>360

由表 2 可见, ECC-1、ECC-2 和 ECC-3 的定容燃烧热 (*Q_v*) 分别 18.91, 17.84, 16.69 kJ·g⁻¹, 燃烧过程释放大量热量, 接近高能金属燃料镁的燃烧热 (实

验室自测值为 $20.57 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。3种配合物燃料具有较高的安全性,对撞击和摩擦不敏感,撞击感度均大于40 J,摩擦感度均大于360 N。

2.3 配合物点火药的配方设计

点火药的配方设计应考虑配方组分的选择和配方组分含量的确定。进行氧化剂的选择时,采用ECC-1作为燃料,分别以 KNO_3 、 KClO_4 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、 Pb_3O_4 以及 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 作为氧化剂进行预实验,通过火焰大小和亮度初步判断上述氧化剂对输出能力的影响,实验结果如图9所示。由图9可见,从火焰大小、火焰亮度以及燃烧反应速度来判断, KClO_4 的性能更优,因此后续实验均选择 KClO_4 作为氧化剂。

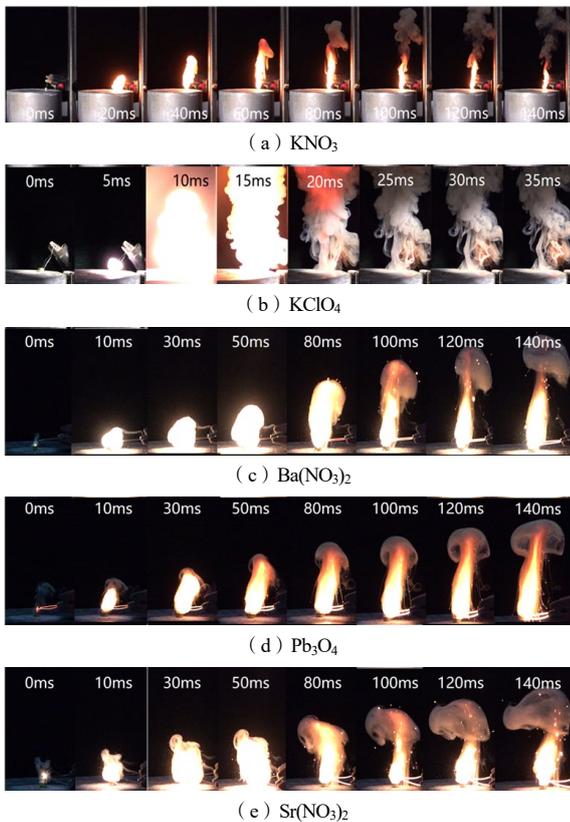


图9 不同氧化剂的燃烧过程

Fig.9 The combustion process of different oxidizer formulations

点火药的燃烧反应具有不稳定性和气固多相共存的复杂性,目前还很难通过实验来表征整个反应变化过程^[11-12],因此,在点火药配方筛选时,还需要结合理论计算来确定相关的热力学参数。为了使点火药配方能够最大程度释放能量,选用CEA(Chemical Equilibrium and Application)软件计算了高氯酸钾作为氧化剂,3种配合物作为燃料时,不同氧燃比条件

下的燃烧温度,计算结果如表3所示。根据计算结果绘制了点火药燃烧温度与燃料质量百分含量的关系曲线,如图10所示。

由表3和图10可见,随着可燃剂占比的增大,点火药燃烧温度呈先升高后降低的趋势。理论计算结果表明点火药处于微负氧平衡下具有最高燃烧温度,据此对配方组分含量进行设计,通过计算得到点火药达到最高燃烧温度时的燃料质量百分含量,并确定氧化剂和粘结剂含量。

表3 不同氧燃比燃烧温度

Tab.3 Combustion temperature under various oxygen-to-fuel ratios

氧燃比	燃烧温度/K		
	ECC-1	ECC-2	ECC-3
9 : 1	1 520.2	1 398.4	1 433.7
8 : 2	2 544.1	1 995.9	2 155.0
7 : 3	2 721.3	2 347.6	2 583.8
6 : 4	2 236.9	1 428.7	2 085.7
5 : 5	1 612.2	1 018.2	1 409.6
4 : 6	1 335.8	937.5	1 104.3
3 : 7	1 253.1	-	1 037.7
2 : 8	1 160.5	-	980.7
1 : 9	1 093.9	-	927.4

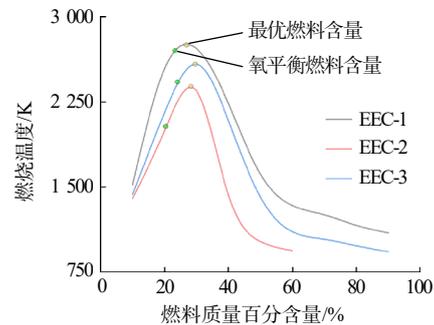


图10 燃烧温度与燃料质量百分含量的关系曲线

Fig.10 Curve of the combustion temperature vs fuel percentage

使用过筛造粒法制备了基于ECC-1、ECC-1和ECC-3配合物燃料的点火药D1、D2和D3,其外观如图11所示。



图11 点火药样品形貌图

Fig.11 The sample morphology of ignition powders

2.4 配合物点火药的性能

点火药的性能主要包含4个方面。一是点火药的

基本物理化学性质,包括假密度、吸湿性、安定性和相容性等;二是点火药的燃烧性能,包括发火点、燃烧热、燃烧温度、燃速、比容、燃烧残渣等;三是点火药的安全性能,包括火焰感度、静电火花感度、撞击感度、摩擦感度等;四是点火药的输出性能,即点火药燃烧过程中的压力变化,通常采用密闭爆发器进行测试。

对3种新型配合物点火药的燃烧热、线燃烧速率、输出压力、点火能力和感度进行了测试研究,得到3种点火药样品的恒容燃烧热(Q_v)、线燃烧速率、输出压力、发火时间(点火到压力最大值所需的时间)、撞击感度和摩擦感度,并与黑火药及BPN进行对比,如表4所示。高速摄像记录的点火药燃烧过程如图12所示。

表4 点火药性能参数

Tab.4 The performance parameters of initiators

样品	燃烧热 Q_v ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	燃速 u ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	输出压力 /MPa	发火时间 /ms	IS/J	FS/N
D1	4.71	187.33	4.55	49.33	31	216
D2	3.88	153.28	4.36	59.99	28	216
D3	4.25	176.74	4.62	46.22	32	252
黑火药	3.08	875.92	3.22	17.38	-	-
BPN	6.21	190.75	3.87	25.74	-	-

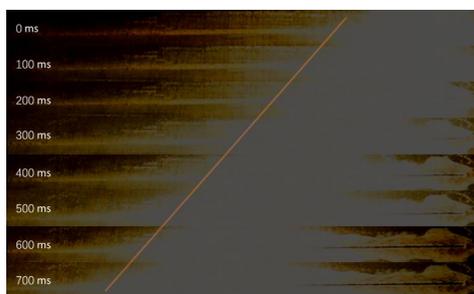


图12 高速摄像记录的点火药燃烧过程

Fig.12 High-speed photography documentation of the combustion process of ignition powder

由表4可见, D_1 、 D_2 和 D_3 的燃烧热分别4.71, 3.88, 4.25 $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, 高于常见黑火药的燃烧热 3.08 $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。点火药 D_1 的线燃烧速率最快, 达到 187.33 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 与BPN相当。3种样品输出压力和发火时间相近, 其中点火药 D_3 的输出压力最高, 为 4.62 MPa, 较黑火药提高了 43%, 较BPN提高了 19%。3种点火药样品的感度值接近, 其中, 点火药 D_2 对撞击最为敏感, 其撞击感度为 28 J; 点火药 D_1 和 D_2 对摩擦较敏感, 其摩擦感度均为 216 N。

使用 B-CuO 延期药作为下一级装药来测试点火药的点火能力, 测试时, 首先称取 100 mg 延期药样品和 30 mg 点火药样品, 然后利用压药模具压装成点火序列小药柱, 如图 13 所示。将压制成型的药柱放置于有机玻璃块中, 对药柱进行约束; 接入电热桥丝, 使用直流电源提供 10 V 点火电压进行点火测试, 利用高速摄像机记录点火过程, 结果表明 3 种点火药均能成功点燃下一级延期药, 其典型点火过程如图 14 所示。首先, 电热桥丝引燃点火药; 然后, 点火药迅速燃烧, 产生大量的灼热固体颗粒, 引燃下一级延期药; 最后, 延期药稳定燃烧。

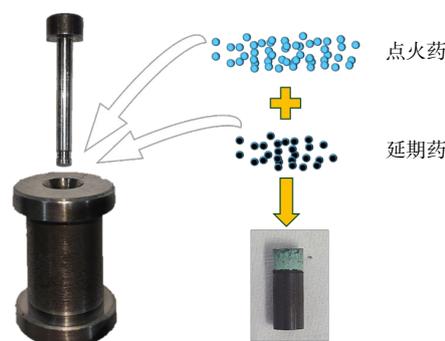


图13 点火序列装药示意图

Fig.13 Schematic diagram of ignition sequence charging



图14 高速摄像记录的点火过程

Fig.14 High-speed image of the ignition process

3 结论

(1) 基于 3,5-二硝基苯甲酸阴离子合成制备了 3 种配合物燃料, 并对其结构和理化性质进行了表征。ECC-1 和 ECC-2 配合物的金属中心均为 6 配位模式, 在 ECC-1 分子结构中, 3, 5-二硝基苯甲酸阴离子参与配位, 而在 ECC-2 中阴离子未参与配位; ECC-3 属于 4 配位模式, 中心金属通过配位键连接 2 个烯丙基咪唑配体和 2 个 3, 5-二硝基苯甲酸阴离子。

(2) 基于 3 种配合物燃料, 通过多种氧化剂、粘结剂的初步性能对比, 确定使用高氯酸钾作为点火

药配方的氧化剂；通过 CEA 理论计算确定了 3 种配合物点火药的最佳配方，并制备出 3 种点火药样品。

(3) 测试了 3 种点火药的燃烧热、输出压力、燃烧速度、点火能力以及机械感度等性能参数，结果表明 3 种配合物燃料点火药具有优异的燃烧性能和点火能力，有较好的应用潜力。

参考文献：

- [1] 劳允亮, 盛涤伦. 火工药剂学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- [2] 常双君. 烟火技术及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
- [3] 刘攀, 吴欣欣, 李艳春, 等. B/KNO₃ 点火药低压燃速规律研究[J]. 火工品, 2023(3): 43-46.
- [4] Bushuyev O S, Brown P, Maiti A, et al. Ionic polymers as a new structural motif for high-energy-density materials[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(3): 1422-1425.
- [5] Tang Y X, He C L, Mitchell L A, et al. Potassium 4, 4'-bis(dinitromethyl)-3, 3'-azofurazanate: a highly energetic 3D metal-organic framework as a promising primary explosive[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2016, 55(18): 5565-5567.
- [6] Maiti Amitesh. Ionic liquids and energetic materials[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38(3): 319.
- [7] Zhong Q, Li , Chen J, et al. Boron/potassium nitrate microspheres fabricated by electrostatic spraying and their combustion characteristic as pyrotechnic ignitor[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2019, 138(5): 3349-3355.
- [8] Wu Z, Liu J, Guo Y, et al. Influence of composition and microstructure on the properties of PTFE/Mg reactive materials[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1965(1): 012104.
- [9] Kim D W, Kim K T, Lee D U, et al. Synergetic enhancement in the reactivity and stability of surface-oxide-free fine Al particles covered with a polytetrafluoroethylene nanolayer[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14560.
- [10] 梁琳娜, 雷国荣, 李志敏, 等. 高活性配合物及其复合点火药剂的制备与性能[J]. *含能材料*, 2022(4): 294-300.
- [11] 霍继飞, 侯伟, 潘功配, 等. FTIR 遥感测量烟火药燃烧红外辐射出射度的方法研究[J]. *现代科学仪器杂志*, 2008(3): 86-87.
- [12] Olofsson J, Richter M, Aldén M, et al. Development of high temporally and spatially (three-dimensional) resolved formaldehyde measurements in combustion environments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(1): 13101-13104.