

文章编号:1006-9941(2023)06-0539-07

MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的制备及性能研究

张蕾,卫春强,王燕兰,褚恩义,陈建华

(陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室,陕西 西安 710061)

摘要: 针对深空复杂应用环境对火工品耐高温起爆药的迫切需求,通过静电相互作用的表面自组装方式构建了一种MXene基叠氮化镉(MXene/Cd(N₃)₂)复合薄膜耐高温起爆药。采用扫描电镜、X射线能谱、X射线衍射以及红外光谱对MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的微观形貌及结构进行表征;通过差示扫描量热及热重等分析方法研究其热性能,并采用高速摄影记录其爆轰过程。结果表明:MXene纳米材料表面丰富的官能团可使Cd(N₃)₂在MXene片层上分布均匀,粒径约50 nm,且在较大空隙中无沉积堆叠现象;MXene纳米材料的高比表面积和优异的导热性能可有效促进Cd(N₃)₂的热分解,热分解温度为378.42 °C;MXene纳米材料与Cd(N₃)₂复合不会影响Cd(N₃)₂的晶型及输出威力,制备所得的MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药以较少的药量即可实现点火起爆。

关键词: MXene;叠氮化镉;复合薄膜;起爆药

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2023045

0 引言

火工品作为武器装备中的首发单元,其安全性可靠性直接影响武器系统的安全性和可靠性^[1-3]。随着武器装备应用环境的日趋复杂恶劣,其对火工品的环境适应性要求也愈发严格^[4-6]。起爆药作为火工品起爆的核心能源,如何设计满足武器装备复杂高温环境应用需求的耐高温起爆药剂成为火工品亟待解决的问题之一。

叠氮化镉(Cd(N₃)₂)是一种新型耐高温起爆药,由陕西应用物理化学研究所盛涤纶研究员于2015年首次设计合成^[9],其热分解温度可达369 °C,爆炸温度达到417~426 °C,是一种性能优异的耐高温起爆药。但是其微观结构呈棱形片状,粒径为30~60 μm,导致其使用性能还有待进一步提高。本课题组通过优化制备工艺,发现通过调整制备工艺参数可优化Cd(N₃)₂的微观结构,其耐高温性能得到进一步优化,但是如何解决Cd(N₃)₂粒径分布不均的问题从而进一步加强其

起爆可靠性成为Cd(N₃)₂合成的难点问题。

MXene是一种典型的二维纳米材料,其结构通式为M_{n+1}X_nT_x(n=1, 2, 3),其中M代表过渡金属(Ti、Ta、Nb、V、Mo),X代表C或N,T_x代表表面基团,例如:—O,—OH,—Cl或—F等^[10-12]。MXene材料通常采用化学液相蚀刻MAX陶瓷相中A层来制备,多呈现典型的多层手风琴状结构,层与层之间具有较大的空隙,层表面具有丰富的官能团,且具有良好的亲水性,极易与其他材料复合^[13-16];此外,MXene材料还具备优异的导电性能、高比表面积和高电化学性能^[17-20]等特性,目前已被广泛应用于能量存储、有机分子吸附、光催化等领域^[21-25]。

因此,本研究将MXene纳米材料引入耐高温起爆药Cd(N₃)₂的复合制备中,借助MXene纳米材料的大比表面积和较高的表面能,通过静电相互作用的表面自组装方式构建了一种新型MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药。采用扫描电镜(SEM)、X射线能谱(EDS)、X射线衍射(XRD)以及红外光谱(FTIR)对MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的微观形貌及结构进行表征;通过差示扫描量热(DSC)及热重(TG-DTG)等分析方法探究其热性能,并采用高速摄影验证其爆轰过程,通过试验结果评估MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的性能。

收稿日期:2023-03-10;修回日期:2023-04-20

网络出版日期:2023-06-05

作者简介:张蕾(1986-),女,高级工程师,主要从事微纳结构含能材料及火工品安全性研究。e-mail: ggy628@163.com

引用本文:张蕾,卫春强,王燕兰,等. MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的制备及性能研究[J]. 含能材料, 2023, 31(6):539-545.

ZHANG Lei, WEI Chun-qiang, WANG Yan-lan, et al. Preparation and Performance of a novel film Primary Explosive of MXene/Cd(N₃)₂[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(6):539-545.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:钛碳化铝(Ti_3AlC_2),400目,苏州北科纳米科技有限公司;氢氟酸(HF),40%,北京伊诺凯科技有限公司;乙醇(EtOH),成都市科隆化学品有限公司;四水合硝酸镉($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$),上海皓鸿生物医药科技有限公司;叠氮化钠(NaN_3),中国医药集团有限公司;去离子水(H_2O),陕西应用物理化学研究所自制等,所用试剂均为分析纯。

仪器:恒温油浴反应釜(上海一凯仪器设备有限公司)、恒温水浴反应釜(上海一凯仪器设备有限公司)、集热式磁力搅拌器(巩义市予华仪器责任有限公司,DF101S),离心机(湘潭湘仪仪器有限公司,TG16-WS),冷冻干燥机(宁波新芝生物科技股份有限公司,SCIENTZ-10N),FS-550T超声破碎仪(上海生析超声仪器公司),Tecnai G2 F30型扫描电子显微镜(美国FEI),INCA-300 X射线能谱仪(英国牛津),D8 advance X射线衍射仪(德国BRUKER),Spectrum 3傅里叶变换红外光谱仪(美国Perkin Elemer),DSC204F1差示扫描量热仪(德国NETZSCH),STA449F3同步热分析仪(德国NETZSCH),PWS4602直流电源(美国Tektronix),Phantom VEO710高速摄影仪(美国Vision Research)。

1.2 实验过程

1.2.1 MXene的制备

称量2 g Ti_3AlC_2 粉末加入聚四氟乙烯烧杯中,放入磁子。量取20 mL质量分数40%的HF溶液,缓慢加入聚四氟乙烯烧杯中。将烧杯放置于油浴反应釜中,加热温度设置为55 °C,磁子转速300 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,刻蚀时间95 h。待反应完毕,使用去离子水反复冲洗至 $\text{pH}=6\sim 7$,然后通过离心得到黑色沉积物。将黑色沉积物倒入塑料培养皿中,通过冷冻干燥得到刻蚀后的粉体MXene。

1.2.2 MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的制备

制备过程如图1所示。首先取一定质量MXene在去离子水溶液中超声分散30 min待用,然后配置质量分数为20%的四水合硝酸镉(0.15 mol)水溶液20 mL,将其置于水热反应釜中,水浴温度设置为55 °C;待温度恒定后,在搅拌下缓慢加入MXene分散液及叠氮化钠(0.30 mol)水溶液,缓慢搅拌使其充分反应;最后通过过滤、干燥,即可得到粒度均匀、分散均

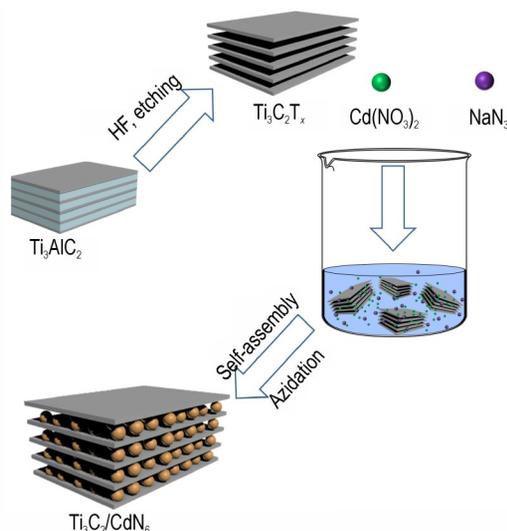
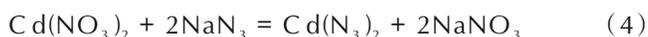
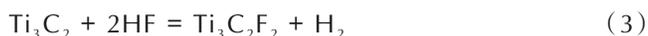
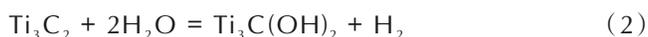
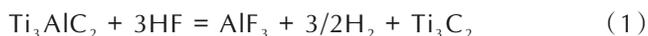


图1 MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的合成过程示意图

Fig.1 Schematic diagram for the synthesis process of MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ composite films

匀的MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药。具体反应如式(1)~(4)所示:



1.2.3 性能表征与测试

采用扫描电子显微镜表征MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的微观形貌,测试电压15 kV。

采用X射线衍射仪表征MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的组分,测试电压40 kV,电流40 mA,扫描步长0.02°,收集 2θ 在10°~100°之间的衍射数据;

采用差示扫描量热仪测试MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的热分解性能,试验温度25~500 °C,升温速率10 °C· min^{-1} ,以流速为10 mL· min^{-1} 的氩气保护。

采用同步热分析仪测试MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的热性能,试验温度25~600 °C,升温速率10 °C· min^{-1} ,以流速为50 mL· min^{-1} 的氩气保护,试样量1 mg左右。

采用Phantom VEO710高速摄影机拍摄并记录爆轰过程,将MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药接入电爆炸性能测试系统,装药量为2 mg,拍摄速率为2000000 fps。

为进一步验证MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的爆轰输出性能,依照国军标GJB 5309.17-2004(K)火工品试验方法,设计如图2所示的测试装置进行测试,其中,换能元选用Ni-Cr桥,电阻为3.5 Ω ,MXene/ $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$

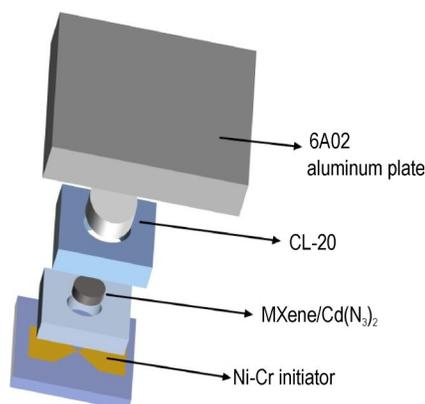


图2 MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药输出性能测试结构

Fig.2 Output performance test structure of MXene/Cd(N₃)₂ composite films

装药量为 5 mg, 传爆药选用 CL-20 进行性能验证, CL-20 装药量为 20 mg, 装药密度为 1.8 g·cm⁻³; CL-20 与 MXene/Cd(N₃)₂ 采用面-面接触方式起爆, 爆轰输出采用铝鉴定块鉴定。

2 结果与讨论

2.1 MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的结构表征

采用 SEM 对制备所得 MXene、MXene/Cd(N₃)₂ 复

合薄膜起爆药以及 Cd(N₃)₂ 起爆药的微观形貌进行分析, 并采用 EDS 对 MXene/Cd(N₃)₂ 复合薄膜起爆药进行能谱分析, 结果如图 3 所示。其中, 图 3a 所示为 MXene 的微观结构图, 可看出 MXene 呈二维层状结构分布, 其表面光滑, 片层均匀。图 3b 所示为 MXene/Cd(N₃)₂ 复合薄膜起爆药的 SEM 图像, 图 3c 为 Cd(N₃)₂ 的 SEM 图像。对比可看出, MXene/Cd(N₃)₂ 复合薄膜起爆药中 Cd(N₃)₂ 的粒径 (50 nm) 较 Cd(N₃)₂ 的粒径 (1~5 μm) 显著缩小, Cd(N₃)₂ 在 MXene 片层上分布均匀, 且在较大空隙中并无沉积堆叠。这主要是受 MXene/Cd(N₃)₂ 复合薄膜的表面官能团影响, 反应溶液中的 MXene 带负电荷, Cd⁺ 带正电荷, 通过静电相互作用的表面自组装方式形成的 MXene/Cd(N₃)₂ 复合薄膜起爆药复合均匀且粒径均匀, 同时, MXene 纳米片层膜可有效抑制 Cd(N₃)₂ 的自堆叠现象, 进而可制备得到复合性能良好的薄膜结构起爆药。分析 MXene/Cd(N₃)₂ 复合薄膜起爆药的 EDS 谱图 (图 3d) 可以看出, 其主要成分均为 Cd(N₃)₂ 和 MXene 的主要元素: Cd、N、C、Ti、F, 说明合成产物纯度较高。

2.2 MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的组分性能测试

为进一步研究 MXene/Cd(N₃)₂ 复合薄膜起爆药的

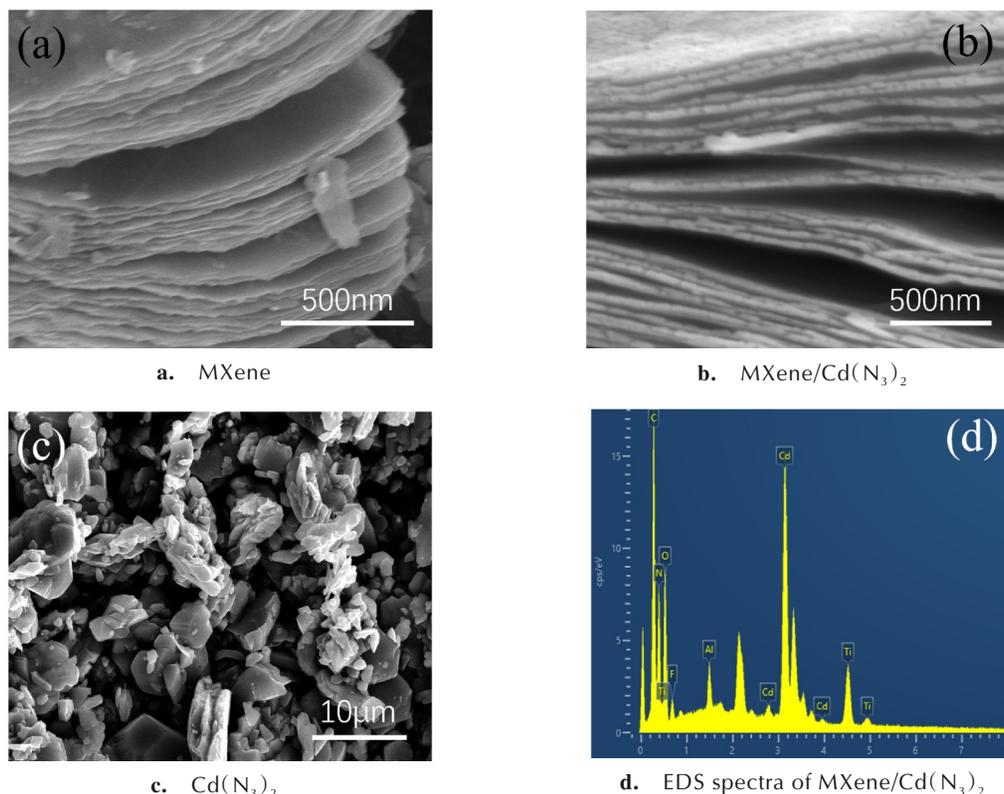


图3 MXene, MXene/Cd(N₃)₂, Cd(N₃)₂的微观结构图及MXene/Cd(N₃)₂能谱图

Fig.3 SEM images of MXene, MXene/Cd(N₃)₂ and Cd(N₃)₂ and EDS spectra of MXene/Cd(N₃)₂

性能,采用XRD和FTIR对其进行成分分析,结果如图4所示。由图4a可看出,与 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 相比, $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的XRD衍射峰出峰位没有发生明显变化,只有在 $2\theta=30.97^\circ$ 和 50.43° 处的衍射峰稍有变宽,强度变弱,分析原因主要是 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜结构起爆药中, $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的粒径由微米级变为纳米级,粒径变小,且粒径分布均匀。图4b显示了 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的红外光谱图,从图4b中可看出,位于 3396.97 cm^{-1} 附近的宽峰对应于 MXene 的 $-\text{OH}$ 伸缩振动,位于 $1628.26, 1384.36\text{ cm}^{-1}$ 和 992.88 cm^{-1} 处的峰分别对应于 MXene 的 $\text{C}=\text{O}$, $\text{O}-\text{H}$ 和 $\text{C}-\text{F}$ 的伸缩振动;在 2099.27 cm^{-1} 和 2141.95 cm^{-1} 处观察到出峰为 $\text{N}-\text{N}$ 叠氮根的典型不对称伸缩振动峰, 614.86 cm^{-1} 和 624.77 cm^{-1} 处为叠氮化物的对称振动峰。表征结果表明, $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药中的主要成分为 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$,且 MXene 与 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合不会改变 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的晶型,制备所得薄膜结构起爆药的复合结构良好。

2.3 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的热分解性能测试

采用差示扫描量热法对 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄

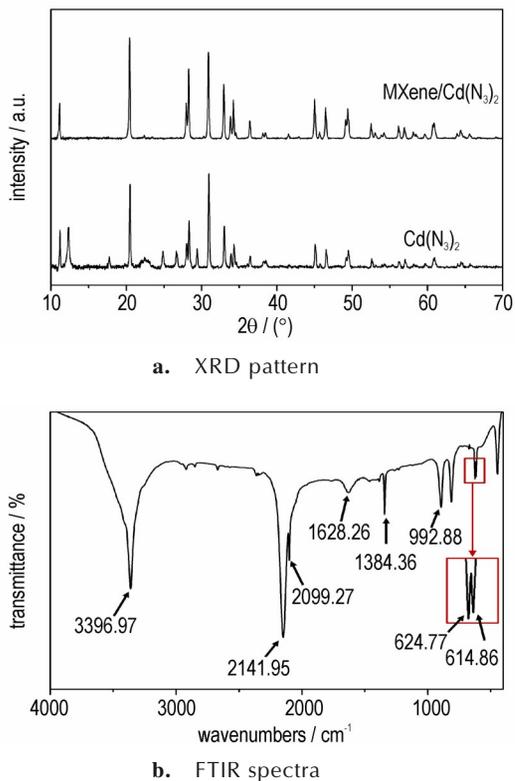


图4 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜的XRD及FTIR图谱
Fig.4 XRD pattern and FTIR spectra of $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ composite films

膜起爆药以及 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 起爆药进行热性能测试。测得的DSC曲线如图5所示。

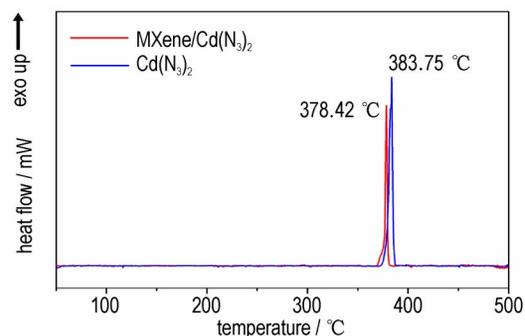


图5 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药及 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的DSC图谱
Fig.5 DSC curves of $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ composite films and $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$

对比复合 MXene 前后的 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 放热峰可看出, $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的热分解温度为 $383.75\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜的热分解温度为 $378.42\text{ }^\circ\text{C}$,即表明由于 MXene 的加入,使得 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的热分解温度稍有提前;同时, $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的热分解速率明显快于 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$,这主要是由于其结构中 MXene 与 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 呈层状复合,且 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的微观粒径明显减小,导致内部热点传播速率加快,宏观上表现为热分解速率加快,即可说明, MXene 的复合对 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的热分解速率有明显的促进作用。

采用同步热分析仪(TG-DTA)对 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药进行热分解性能测试,测试结果如图6所示。由图6可看出, $150\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内,TG曲线显示重量有 0.5% 左右的缓慢降低,这主要是因为 MXene 表面官能团在高温下被逐渐去除;样品在 $360\sim 390\text{ }^\circ\text{C}$ 之间有明显质量损失,对比DSC分析可知,此阶段为 $\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 的热分解阶段。当温度加热到 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 之后,失重量随温度的升高基本不再发生变化,

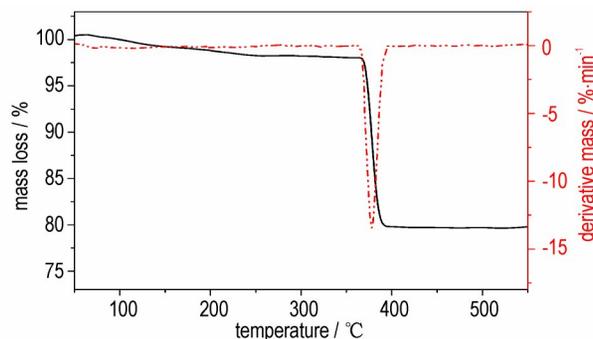


图6 $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ 复合薄膜起爆药的TG-DTG曲线
Fig.6 TG-DTG curves of $\text{MXene}/\text{Cd}(\text{N}_3)_2$ composite films

结果表明, MXene的层状结构复合不会影响Cd(N₃)₂的热稳定性。

2.4 MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的爆轰过程测试

采用Phantom VEO710高速摄影机对MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的爆轰过程进行观测。图7所示为高速摄影检测其电起爆过程的照片部分截图。从图7中可以看出MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药可

被Ni-Cr换能元成功起爆,且发生明显的爆炸现象,电起爆作用过程快速。换能元将2 mg的MXene/Cd(N₃)₂引爆后在间隔80 μs左右可看到明亮的火光,150 μs左右爆轰产物开始脱离电起爆桥区呈散射状向四面散开,整个过程持续约800 μs。电起爆产生的爆轰产物溅射现象对于起爆药的起爆可靠性十分有利。

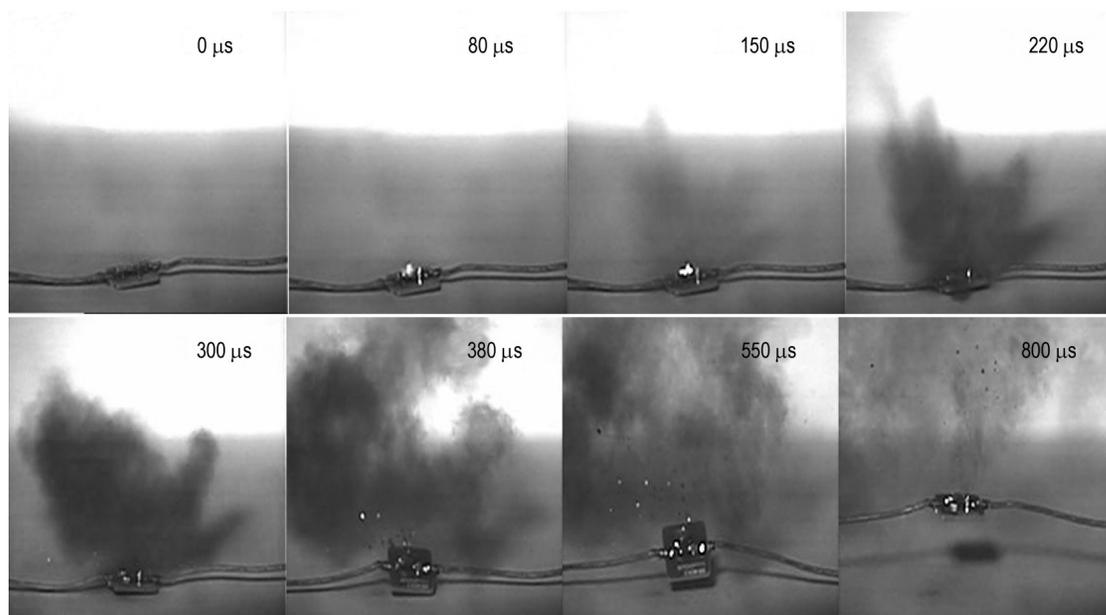


图7 MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的爆轰过程图

Fig.7 Detonation process pictures of MXene/Cd(N₃)₂ composite films

2.5 MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的输出性能测试

MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药起爆CL-20药柱后的效果如图8所示。为确保起爆后炸药爆轰所产生的爆轰波能沿轴向可靠性传递,起爆序列测试夹具的四周采用螺钉固定。输入电压分别为15, 20, 25 V。从测试结果可看出,不同输入条件下, MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药在Ni-Cr桥作用下均能起爆CL-20药柱,并在铝鉴定块上形成明显的凹痕,凹痕深度平均值为2.04 mm,依据国军标测试方法, MXene/Cd(N₃)₂

复合薄膜起爆药以较少的药量即可正常起爆,并可实现微爆炸序列的正常传爆,结果表明MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药起爆性能良好。

3 结论

(1)通过静电相互作用的表面自组装方式构建了一种新型MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药,该薄膜结构起爆药呈纳米片层结构分布。

(2)借助MXene纳米材料层表面丰富的官能团, Cd(N₃)₂在MXene片层上分布均匀,且在较大空隙中无沉积堆叠;借助MXene纳米材料的层状复合, Cd(N₃)₂的微观粒径明显减小,内部热点传播速率加快,有效促进了Cd(N₃)₂的热分解速率,且不影响其热稳定性。

(3)MXene纳米材料与Cd(N₃)₂复合不会影响Cd(N₃)₂的晶型及输出性能,制备所得MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜起爆药的复合结构良好,且以较少的药量即可实现点火起爆。



图8 MXene/Cd(N₃)₂复合薄膜输出性能测试结果

Fig.8 Output performance test result of MXene/Cd(N₃)₂ composite films

参考文献:

- [1] 阙文星, 褚恩义, 刘卫, 等. 微起爆系统用MEMS安全保险装置研究现状与展望[J]. 含能材料, 2022, 30(1):78-94.
KAN Wen-xing, CHU En-yi, LIU Wei, et al. A review on MEMS safety and arming devices for micro-initiation system [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(1):78-94.
- [2] 顾伯南, 徐建勇, 石伟, 等. 电火工品换能元增效技术研究进展[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2022216.
GU Bo-nan, XU Jian-yong, SHI Wei, et al. Research progress on efficiency improvement of electrical initiator transducers [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, DOI:10.11943/CJEM2022216.
- [3] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. MEMS火工品换能元的研究进展[J]. 含能材料, 2017, 25(5):428-436.
ZHANG Bin, CHU En-yi, REI Wei, et al. Research progress in energy conversion components for MEMS initiating explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(5):428-436.
- [4] 中国人民解放军总装备部. GJB 150-2009军用装备实验室环境试验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版. 发行部, 2009.
General furnishment ministry of people's liberating army of China. GJB 150-2009 Laboratory environmental test methods for military materiel[S]. 2009.
- [5] SHADRAVAN A, AMANI M. HPHT 101-what every enigneer or geoscientist should know about high pressure high temperature wells [C]//SPE Kuwait Internationnal Petroleum Conference and Exhibition.Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [6] 潘鹏阳, 王可欣, 易镇鑫, 等. 起爆药研究最新进展[J]. 含能材料, 2021, 29(6):557-566.
PAN Peng-yang, WANG Ke-xin, YI Zhen-xin, et al. Recent advances in primary explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(6):557-566.
- [7] LIU Lijuan, SHENG Dilun, ZHU Yahong, et al. Thermostable performance research of disilver 5-amino-1H-tetrazolium perchlorate [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2016, 25(1): 196-202.
- [8] 刘丽娟, 刘斌. 几种起爆药的耐高温性能对比研究[J]. 火工品, 2021, 2:37-40.
LIU Li-juan, LIU Bin. Study on high temperature resistance performance of some kinds of primary explosives [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021, 2:37-40.
- [9] 盛涤伦, 陈利魁, 朱雅红, 等. 耐高温起爆药叠氮化镉的合成与性能研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(3):12-15.
SHENG Dilun, CHEN Likui, ZHU Yahong, YANG Bin. Synthesis and performance of a primary explosive resisting high temperature named cadmium azide [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(3):12-15.
- [10] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(37):4248-4253.
- [11] LEVITT A S, ALHABEB M, HATTER C B, et al. Electrospun MXene/carbon nanofibers as supercapacitor electrodes [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(1): 269-277.
- [12] NAGUIB M, MOCHALIN V N, BARSOUM M W, et al. 25th Anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(7):992-1005.
- [13] ZHANG R, DONG J, ZHANG W, et al. Synergistically coupling of 3D FeNi-LDH arrays with $Ti_3C_2T_x$ -MXene nanosheets toward superior symmetric supercapacitor [J]. *Nano-Energy*, 2022, 91:106633.
- [14] SANG X H, XIE Y, LIN M W, et al. Atomic defects in monolayer titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$) MXene. *ACS Nano*, 2016, 10(10):9193.
- [15] HANTANASIRISAKULK, ZHAO M Q, URBANKOWSKI P, et al. Fabrication of $Ti_3C_2T_x$ MXene transparent thin films with tunable optoelectronic properties [J]. *Advanced Electron Materials*, 2016, 2(6): 1600050.
- [16] LINPATOVA A, ALHABEB M, LUKATSKAYA M R, et al. Effect of synthesis on quality, electronic properties and environmental stability of individual monolayer Ti_3C_2 MXene flakes [J]. *Advanced Electron Materials*, 2016, 2(12): 1600255.
- [17] ZHANG C F, MCKEON L, KREMER M P, et al. Additive-free MXene inks and direct printing of micro-supercapacitors [J]. *Nature Communication*, 2019, 10: 1795.
- [18] DE S, MAITY C K, SAHOO S, et al. Polyindole booster for $Ti_3C_2T_x$ MXene based symmetric and asymmetric supercapacitor devices [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2021, 4(4): 3712-3723.
- [19] WEN D, WANG X, LIU L, et al. Inkjet printing transparent and conductive MXene ($Ti_3C_2T_x$) films: A strategy for flexible energy storage devices [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(15): 17766-17780.
- [20] ZHANG C F, ANASORI B, SERAL-ASCASO A, et al. Transparent, flexible, and conductive 2D titanium carbide (MXene) films with high volumetric capacitance [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(36):1702678:1-9.
- [21] DONG Y., SHI H., WU Z.S. Recent advances and promise of mxene-based nanostructures of high-performance metal ion batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(47): 202000706.
- [22] YAN J, REN C E, MALESKI K, et al. Flexible MXene/graphene films for ultrafast supercapacitors with outstanding volumetric capacitance [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(30): 1701264:1-10.
- [23] CHEN X Z, KONG Z Z, LI N, et al. Proposing the prospects of Ti_3CN transition metal carbides (MXenes) as anodes of Li-ion batteries: A DFT study [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, 18(48): 32937-32943.
- [24] PAN Z H, CAO F, HU X, et al. A facile method for synthesizing CuS decorated Ti_3C_2 MXene with enhanced performance for asymmetric supercapacitors [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(15):8984-8992.
- [25] MIN Y X, YUAN H, WANG W G, et al. Design of heterostructures of MXene/two-dimensional organic frameworks for Na-O₂ batteries with a new mechanism and a new descriptor [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2021, 12(11): 2742-2748.

Preparation and Performance of a novel film Primary Explosive of MXene/Cd(N₃)₂

ZHANG Lei, WEI Chun-qiang, WANG Yan-lan, CHU En-yi, CHEN Jian-hua

(Shaanxi Applied Physic-Chemistry Research Institute, State Key Laboratory of Applied Physics-Chemistry Research, Xi'an 710061, China)

Abstract: In view of the urgent demand for high-temperature resistant initiators for pyrogenic products in complex application environments in deep space, primary explosive based on composite films of MXene/Cd(N₃)₂ with high-temperature resistant was prepared by surface self-assembly of electrostatic interaction. The morphology and structure of the composite film primary explosive were characterized by scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, X-ray diffraction and infrared spectroscopy. The thermal properties were studied by differential scanning calorimetry and thermogravimetry, and the detonation process was recorded by high-speed photography. The results show that cadmium azide was evenly distributed on the MXene layer, and there was no deposition and stacking in the large gap. The introduction of MXene can effectively promote the thermal decomposition rate of cadmium azide. The combination of MXene material and cadmium azide didn't affect the crystal form and detonation performance of cadmium azide. The prepared MXene/Cd(N₃)₂ composite film primary explosive can realize ignition and detonation with less charge.

Key words: MXene; cadmium azide; composite film; primary explosive

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023045

(责编:王馨逸)