

HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的制备及其激光点火性能测试

杨全成^{1,2}, 郭天冰¹, 齐秀芳^{1*}, 郭红莉³

¹西南科技大学国防科技学院核科学技术学院, 四川 绵阳

²宜宾北方川安化工有限公司, 四川 宜宾

³四川雅化集团绵阳实业有限公司, 四川 绵阳

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月7日; 发布日期: 2026年4月21日

摘要

以催化效果良好的Fe₂O₃及吸光性能良好的炭黑作HMX复合含能材料的复合成分, 并加入适量的氟橡胶作黏结剂, 采用溶剂-非溶剂法结合超声震荡的方法制备HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料, 以改善HMX的激光点火性能。通过扫描电镜(SEM)、X-射线粉末衍射(XRD)、红外光谱(FT-IR)、紫外漫反射(UV-Vis-DRS)对复合物进行形貌表征, 并对其进行1064 nm激光点火性能测试, 结果表明: 复合物中的HMX晶型为β型, 且颗粒大小分布均匀, 粒径在30 μm~60 μm区间内; 炭黑能改善HMX基复合含能材料对光的吸收效果, 炭黑含量为0.2%的HMX复合药剂对1064 nm波长的光吸收率为47.79%, 而炭黑含量为1%的HMX复合药剂对1064 nm波长的光吸收率增加到了59.71%; 加入Fe₂O₃能提高HMX基复合含能材料的质量燃速, 仅加入质量分数1%的炭黑的HMX复合药剂质量燃速为0.0279 g·cm⁻²·s⁻¹, 燃速较小, 继续向其中分别引入质量分数为1%、2%、3%的Fe₂O₃后, 药剂质量燃速分别提高到了0.0374、0.0524、0.0796 g·cm⁻²·s⁻¹。在各组药剂中, 各组分质量比(HMX:Fe₂O₃:炭黑:氟橡胶)为94:3:1:2的HMX复合药剂激光点火效果最好, 药剂能够稳定燃烧, 还赋予药剂较高的质量燃速0.0796 g·cm⁻²·s⁻¹。

关键词

复合含能材料, 激光点火, HMX, 溶剂-非溶剂, HMX/Fe₂O₃/炭黑

Preparation and Laser Ignition Performance of HMX/Fe₂O₃/Carbon Black Composite Energetic Materials

Quancheng Yang^{1,2}, Tianbing Guo¹, Xiufang Qi^{1*}, Hongli Guo³

*通讯作者。

文章引用: 杨全成, 郭天冰, 齐秀芳, 郭红莉. HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的制备及其激光点火性能测试[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 187-201. DOI: 10.12677/ms.2026.164085

¹School of National Defense & Nuclear Science & Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

²Yibin North Chuan'an Chemical Co., Ltd., Yibin Sichuan

³Yahua Group Mianyang Industrial Co., Ltd., Mianyang Sichuan

Received: March 15, 2026; accepted: April 7, 2026; published: April 21, 2026

Abstract

In order to improve the laser ignition performance of HMX. HMX/Fe₂O₃/carbon black composite energetic materials were prepared by the solvent-nonsolvent method combined with ultrasonic vibration, using Fe₂O₃ with favorable catalytic activity and carbon black with excellent light absorption performance as composite components, and an appropriate amount of fluoroelastomer as the binder. The morphology and structure of the composites were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and ultraviolet-visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-Vis-DRS). The laser ignition performance at 1064 nm was also tested. The results showed that HMX in the composites is of β -crystal form with uniform particle size distribution ranging from 30 μm to 60 μm . Carbon black can effectively improve the light absorption of HMX-based composites. The light absorption rate at 1064 nm is 47.79% for the composite with 0.2% carbon black and increases to 59.71% with 1% carbon black. The addition of Fe₂O₃ can significantly increase the mass burning rate of the composites. The composite containing only 1 wt% carbon black showed a mass burning rate of 0.0279 g·cm⁻²·s⁻¹, while the values increased to 0.0374, 0.0524 and 0.0796 g·cm⁻²·s⁻¹ after 1, 2 and 3 wt% Fe₂O₃ added, respectively. The composite with the mass ratio of HMX:Fe₂O₃:carbon black:fluoroelastomer = 94:3:1:2 displayed the best laser ignition performance, which can burn stably and presents a high mass burning rate of 0.0796 g·cm⁻²·s⁻¹.

Keywords

Composite Energetic Materials, Laser ignition, Solvent-Nonsolvent Method, HMX/Fe₂O₃/Carbon Black

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统电起爆方式易受电磁干扰而意外发火,安全性和可靠性受限。20世纪60年代末,激光技术的引入为起爆研究提供了新途径。相较于电起爆,激光起爆可有效规避杂散干扰,避免桥丝锈蚀问题,且无需敏感起爆药,在安全性、可靠性及多点同步起爆等方面具有明显优势[1]。基于上述优点,激光点火系统被迅速应用于含能材料(EM)的研究当中。与传统的电火花点火方式相比,激光点火虽优势明显,但对药剂有一定的要求,即药剂本身要有能够与激光相互作用而发生点火的能力。目前高能硝胺炸药奥克托今(HMX)的钝感火工品受到极大的关注,其单质炸药的综合性能是目前国内外所使用的各类型炸药中性能最好的单质炸药之一,具有高密度、高能量、安定性好,以及高爆轰性能等优点。但已知纯的HMX对波长大于400 nm的激光几乎不吸收,造成其激光点火比较困难[2]。因此,基于激光与含能材料的相互作用,需要对HMX进行激光增敏处理,并同时实现降感,从而满足HMX在激光火工品中的使用要求。常

用的光敏添加剂为炭黑、石墨、碳纳米管、纳米金属颗粒、氧化石墨烯[3]-[6]、铝热剂[7][8]等。但在实验研究中发现,添加炭黑和石墨的含能复合物虽易发生激光点火,但火焰较小、容易发生断火,药剂自持燃烧时间短,说明药剂存在组分不均匀分布、传火性能不良等缺点[2]。因此,开发新型功能添加剂以优化其激光点火性能,成为当前含能材料研究的一个重要方向。

激光起爆技术是一种新型的起爆炸药的手段,相较于传统的起爆手段具有更高的安全性和可靠性,符合钝感弹药的发展趋势,是未来安全可行的起爆方式之一,目前已被广泛应用于含能材料(EM)[9]。点火是导致燃烧发生化学反应的初始过程,其本质上包括EM的分解和连续点火的过程。此外,在EM上使用激光点火的的研究也有助于阐明爆燃和能量释放的机制。在武器系统方面,点火能量和点火延迟时间可以决定哪个部件更适合作为起爆器。提高复合材料的激光敏感性将使用更便宜且更可调的能源武器系统,所以激光点火的表征是EM研究的一个重要领域。

在过去的几十年里,世界范围内对含能材料(EM)的激光点火进行了研究,不仅包括点火机理的理论研究,也是对点火机理的理论理解。例如,Sarah Isert等[10]通过溶剂非溶剂方法将纳米 Fe_2O_3 /AP添加到推进剂中,与物理方法加入纳米 Fe_2O_3 相比,推进剂燃速进一步提高。John J. Granier [11]和 A.V. Khanefit [12]对临界点火能量密度的影响因素进行了分析,总结出激光光束半径的变化会影响药剂的临界点火能量。一些研究人员[13][14]还研究了激光能量和EM点火之间的关系,表明由激光光束引起的热点在点火机制中起关键作用。然而,对含能材料激光点火时药剂着火的机制还未完全理解,目前需要更详细和系统的研究来了解EM与激光作用时的反应机理,有必要研究材料的物理结构对激光能量吸收、转换和传热效果的影响,还应研究构成这些材料的成分的类型以及比例、材料的制备过程及制备条件对激光点火性能的影响,以提高EM激光点火的效果。

2. 实验部分

2.1. 主要试剂及仪器

HMX, 氟橡胶, 工业级, 甘肃银光化工集团; 炭黑(乙炔炭黑), 粒径范围 35~40 nm, 纯度 $\geq 99.50\%$, 山东淄博宇星新材料科技有限公司; 氧化铁; 二甲基亚砷、乙酸乙酯, 分析纯, 成都市科隆化学品有限公司。

Tensor27 型傅立叶变换红外光谱仪, 德国布鲁克光学仪器公司; EVO18 型扫描电子显微镜, 德国蔡司仪器公司; X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪, 荷兰帕纳科公司; UV-3700 型固体紫外-可见-近红外分光光度计, 日本岛津仪器有限公司; KQ5200DE 型超声仪, 昆山市超声仪器有限公司; Penny-A-500 型 Penny 激光器, 鞍山紫玉激光科技有限公司; 日本 Photron FASTCAM Mini UX100 型高速摄影仪。

2.2. 实验方法

2.2.1. 不同配比 HMX/ Fe_2O_3 /炭黑复合含能材料的制备

(1) 称取一定量的 HMX 于 50 ml 烧杯当中, HMX 具体质量依各组分分配比而定, HMX 用量在 0.942 g 到 1.0 g 范围内。向烧杯内加入 5 mL 二甲基亚砷(DMSO)溶液, 并向烧杯内放入大小合适的磁力搅拌转子。(2) 将上述装有 HMX 的 DMSO 溶液的烧杯置于恒温磁力搅拌器上, 控制加热温度为 50°C , 转速调为 300 r/min, 待 HMX 完全溶解后向烧杯内加入提前称量好的 Fe_2O_3 和炭黑, 继续搅拌 50 min 后向烧杯内加入提前制备好的氟橡胶的乙酸乙酯溶液。(3) 将装有上述混合溶液的烧杯置于超声震荡装置中超声搅拌 10 min 后重新放回恒温磁力搅拌器上搅拌, 并向烧杯内缓慢加入 15 mL 去离子水, 搅拌 10 min; (4) 关闭磁力搅拌器, 待混合液冷却后对其进行抽滤, 并将滤渣置于电热恒温干燥箱中保持 60°C 加热干燥, 得到成品。完整路线如图 1 所示。

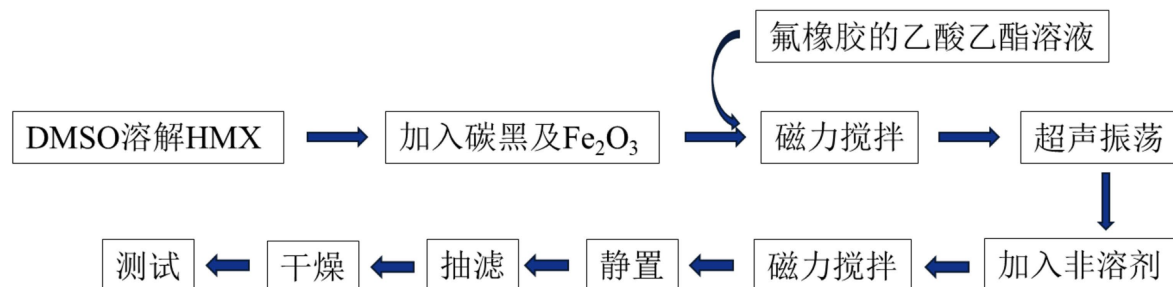


Figure 1. Diagram of preparation process of HMX/Fe₂O₃/carbon black composite energetic materials
图 1. HMX/Fe₂O₃/炭黑纳米复合含能材料制备的流程图

2.2.2. HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的表征

利用光学显微镜初步观察 HMX、Fe₂O₃ 及 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的外貌，并进一步利用扫描电镜观察复合材料的粒径，形貌及外观，对复合物粒子间的分布情况进行分析。组成结构表征：通过 X-射线粉末衍射(XRD)分析颗粒的晶体结构，分别将 HMX、Fe₂O₃、炭黑的衍射图谱与 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的衍射图谱对比，确定各成分是否在复合物中存在；利用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)观察 HMX、Fe₂O₃、炭黑及 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的红外吸收，判断材料中是否含有杂质生成或掺入；利用固体紫外可见漫反射分析炭黑含量 0.2%和 1%的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料对波长在 1064 nm 处的光的吸收情况，从而进一步了解激光与含能材料相互作用的机理。

2.2.3. HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料激光点火性能测试

采用 Penny-A-500 型 Penny 激光器和高速摄影仪对不同质量配比的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料进行点火试验。样品(30 mg)采用小型油压机压制成型为直径约 5 mm、厚度约 1 mm 的药片，压片条件为：压强 5 MPa，作用时间 1 min，无脱模剂。点火条件：室温，常压，开放环境，激光波长 1064 nm，脉宽 110 μs，脉冲重复频率 10 Hz，光斑直径约为 2 mm，(激光总行程 250 mm，透镜焦距 200 mm.)。(1) 最小发火能量测试：从 Penny 激光器安全电压对应下的点火能量 2.65 J/cm² 开始对不同质量比的 HMX 复合含能材料分别进行激光点火测试，逐渐增大激光能量进行测试，记录下能够让药剂发火时的激光能量，作为药剂的最小发火能量。(2) 点火延迟时间测试：设定激光输出能量为固定值 57.83 J/cm²，分别对成分不同或组分配比不同的 HMX 复合含能材料进行激光点火测试，用高速摄影机记录(每秒 500 帧)药剂稳定燃烧前初次产生火焰的时间，作为药剂的点火延迟时间。(3) 质量燃速测试：同样设定激光输出能量为固定值 57.83 J/cm²，分别对成分不同或组分配比不同的 HMX 复合含能材料进行激光点火测试，用高速摄影机记录(每秒 500 帧)下药剂稳定燃烧持续的时间，计算出各组药剂的质量燃速。

3. 结果与讨论

3.1. HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的表征

3.1.1. 扫描电镜(SEM)

图 2 为 HMX:Fe₂O₃:炭黑:氟橡胶质量比为 94:3:1:2 的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能新材料在扫描电子显微镜下的晶体形貌。图 2(a)为 2000 倍放大倍数下的复合物形貌，可以看出，HMX 粒子大小分布均匀，颗粒尺寸在十微米到几十微米；图 2(b)为 10,000 倍放大倍数下的复合物形貌，HMX 晶型呈六边形宝石状，可以初步判断出复合后的 HMX 为 β-HMX；HMX 颗粒大小分布均匀，尺寸在 5~15 微米区间内，颗粒度更小的纳米炭黑颗粒与 Fe₂O₃ 及粘结剂氟橡胶贴附在 HMX 晶体表面。

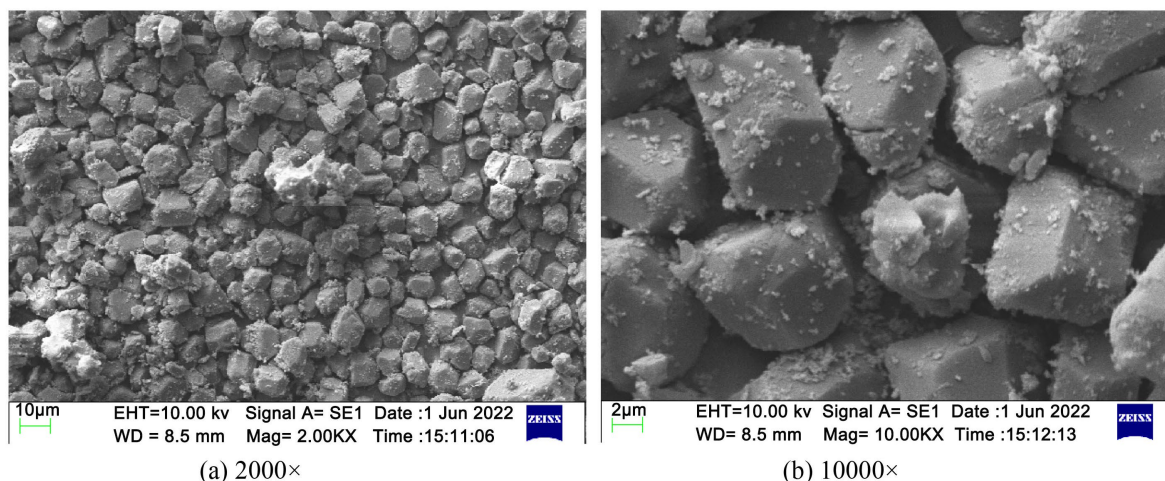


Figure 2. SEM images of HMX/Fe₂O₃/carbon black composite energetic materials

图 2. HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的 SEM 图

3.1.2. 红外光谱(FT-IR)

图 3 展示了 HMX、Fe₂O₃ 以及 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合物的红外光谱图。在 HMX 红外光谱图中 3037 cm⁻¹ 处的峰为 C-H 伸缩振动, 1573 cm⁻¹ 处的峰为 N-O 不对称振动, 1456、1428、1391、1345 cm⁻¹ 处的峰为 C-H 弯曲振动, 1269 cm⁻¹ 处的峰为 N-O 对称伸缩振动, 1183 cm⁻¹ 处的峰为 N-N 伸缩振动, 962 cm⁻¹ 处的峰为环伸缩振动, 948 cm⁻¹ 处的峰为环弯曲振动, 757 cm⁻¹ 处的峰为 N-O 弯曲振动。Fe₂O₃ 的特征峰在 547 cm⁻¹ 和 475 cm⁻¹ 左右, 炭黑未出现吸收峰。可以看出, 在 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料的红外图谱中基本上包含了所有 HMX 单质的特征吸收峰。其中 Fe₂O₃ 在 475 cm⁻¹ 的特征峰被其他强度较大的峰遮盖, 小部分特征峰的位置发生了轻微偏移, 形状和大小发生了轻微变化。复合物的图谱中并没有新的特征峰出现, 所以 HMX、Fe₂O₃、炭黑三者复合过程中并没有相互发生反应生成新物质。

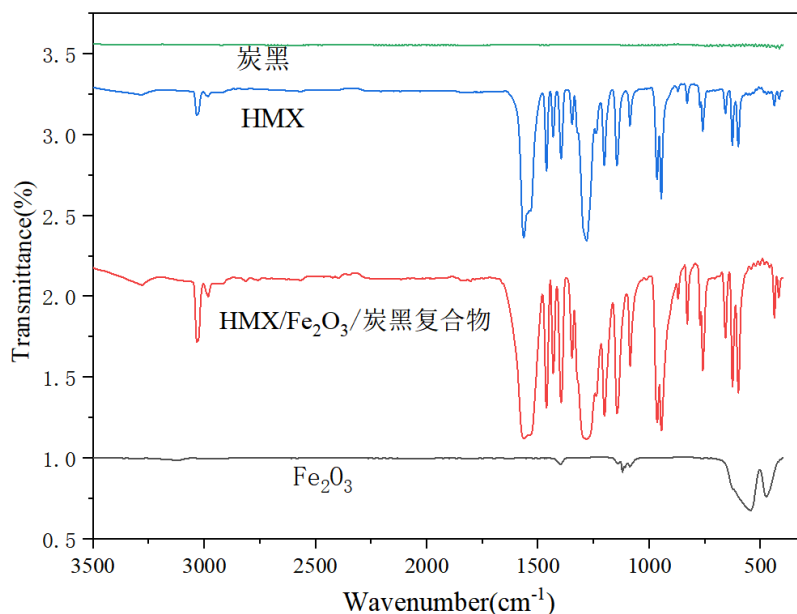


Figure 3. FT-IR spectra of HMX, Fe₂O₃, and HMX/Fe₂O₃/carbon black composite energetic materials

图 3. HMX, Fe₂O₃ 和 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的红外光谱

3.1.3. X 射线衍射分析(XRD)

X-射线粉末衍射常用于检测样品成分及物相，图 4 为 HMX、 Fe_2O_3 以及 HMX/ Fe_2O_3 /炭黑复合物的 XRD 图谱。由图 4 可知，HMX 原材料单质的三强峰出现在 14.68° 、 20.48° 、 31.88° ，为稳定的 β 型晶型衍射峰[15]，在复合材料的 XRD 图谱中均能一一对应，但是复合物的峰型较宽一些，说明复合后 HMX 晶型未发生改变，但粒径有所减小。图中原材料 Fe_2O_3 的三强峰出现在 33.19° 、 35.59° 、 40.81° ，在复合材料的 XRD 图谱中均有与之对应的峰出现，且峰型未发生太大改变，说明 Fe_2O_3 在复合过程中晶型未发生改变，且粒度变化也不大。炭黑的衍射峰[16]主要出现在 24.6° 、 41.5° ，在 HMX/ Fe_2O_3 /炭黑衍射图谱的该位置上也有对应的峰出现，但复合物的峰要大得多，可能是复合物中其他物质的衍射峰遮挡了炭黑对应的峰。因此，复合材料中 HMX 的晶型为稳定性较高的 β 型 HMX。

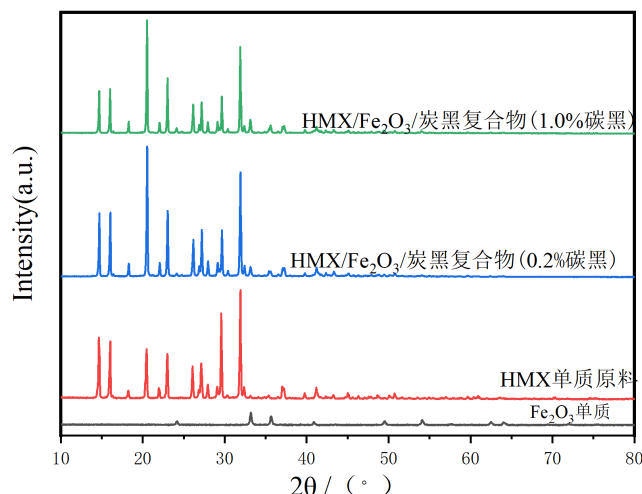


Figure 4. FT-IR spectra of HMX, Fe_2O_3 , and HMX/ Fe_2O_3 /carbon black composite energetic materials
图 4. HMX, Fe_2O_3 和 HMX/ Fe_2O_3 /炭黑复合含能材料的红外光谱

3.1.4. 固体紫外 - 可见 - 近红外漫反射光谱(UV-Vis-NIR DRS)

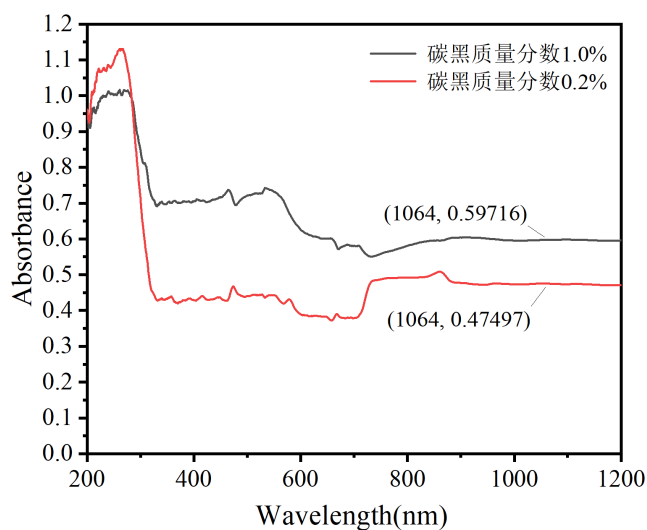


Figure 5. UV-Vis-NIR DRS spectra of HMX/ Fe_2O_3 /carbon black composites containing 0.2% and 1% carbon black
图 5. HMX, Fe_2O_3 和 HMX/ Fe_2O_3 /炭黑复合含能材料的红外光谱

通过固体紫外-可见-近红外漫反射分析复合药剂对 1064 nm 波段的光的吸收效果, 图 5 为炭黑含量为 0.2% 与 1% 的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合物固体紫外可见漫反射光图谱。从图中可以看出, 炭黑含量为 0.2% 和 1% 的复合药剂对 1064 nm 波长的光吸收率分别为 47.79%、59.71%。这表明炭黑能有效提高 HMX 基含能材料对近红外激光的响应灵敏度, 其原因在于碳基纳米材料的高光吸收效率[17]。所以, 炭黑的添加可以改善药剂对红外波段的光的吸收率; 且在适当范围内, 炭黑含量越高, 药剂对光的吸收能力越强。该结果也可以预示在红外波段激光与药剂作用时, 通过“热机理”作用, 即激光与药剂作用时一部分激光能量被药剂吸收转化为热能, 药剂局部温度升高并达到发火点后导致含能材料被引燃。

3.2. HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料激光点火性能测试

3.2.1. 氟橡胶对复合含能材料激光点火表现效果的影响

因激光与药剂相互作用时, 对药剂有一定的冲击力, 药剂的力学性能过低, 则在激光的作用下容易被击穿或者击散。实验中在做激光点火性能测试时, 先将一定量的药剂压成紧实的直径为 5 mm 的片状药剂, 置于专门为激光点火准备的盛药器皿内, 再进行激光点火。氟橡胶作为粘结剂对 HMX 基复合材料的力学性能和安全性具有重要影响。文献[18]采用通道组装技术制备了 HMX/氟橡胶(F2603)复合微球, 研究表明氟橡胶的均匀包覆能够显著改善 HMX 的力学性能。当氟橡胶质量分数为 5% 时, HMX/F2603 复合微球的最大承载力和抗压强度分别达到 121.52 N 和 6.20 MPa, 相比物理混合样品(99.44 N, 4.39 MPa)分别提高了 22.2% 和 41.2%。在安全性方面, 均匀包覆氟橡胶的 HMX/5%F 微球的特性落高(H₅₀)达到 48.5 cm, 远高于物理混合样品的 36.5 cm。此外, 高速摄影观测表明, 氟橡胶包覆层能够有效延迟热点形成时间, 在相同落高下, HMX/F2603 复合微球的热点形成时间始终长于纯 HMX 和物理混合样品。

表 1 为含氟橡胶的 HMX 复合材料在固定波长为 1064 nm, 能量密度为 57.83 J/cm² 的激光作用下的点火实验数据, 从表中数据可以看出, 未添加氟橡胶的所有 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料均被击散弹出, 从而使药剂的激光点火测试无法顺利进行, 不能准确测出药剂的激光点火性能及燃烧性能; 产生此现象的直接原因, 就是药剂的力学性能较差, 为了解决这个问题, 将在各组药剂中添加氟橡胶, 并进行点火测试。表 2 为含氟橡胶的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料激光点火效果记录, 点火条件为固定波长 1064 nm, 能量密度为 57.83 J/cm² 的激光作用下进行测试。表中数据可以看出在引入质量分数为 2% 的氟橡胶后, 药剂的力学性能得到明显改善, 所有药品都未被激光击散弹出。

Table 1. Laser ignition of HMX/Fe₂O₃/carbon black composite without fluoroelastomer

表 1. 不含氟橡胶的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料激光点火的效果

Fe ₂ O ₃ (wt%)	HMX (wt%)	炭黑(wt%)	氟橡胶(wt%)	点火效果
1%	98%	1%	0%	药品弹出
2%	97%	1%	0%	药品弹出
3%	96%	1%	0%	药品弹出
4%	95%	1%	0%	药品弹出
5%	94%	1%	0%	药品弹出

Table 2. Laser ignition of HMX/Fe₂O₃/carbon black composite with fluoroelastomer

表 2. 含氟橡胶的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料激光点火的效果

Fe ₂ O ₃ (wt%)	HMX (wt%)	炭黑(wt%)	氟橡胶(wt%)	点火效果
1%	98%	1%	2%	完全燃烧

续表

2%	97%	1%	2%	完全燃烧
3%	96%	1%	2%	完全燃烧
4%	95%	1%	2%	未完全燃烧
5%	94%	1%	2%	未完全燃烧

3.2.2. 不同组分配比的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合含能材料的激光点火现象

在波长为 1064 nm, 能量密度为 57.83 J/cm² 的固定激光点火条件下, 通过对组成成分及不同质量比的 HMX 复合药剂进行激光点火测试, 将药剂的火焰燃烧效果分为三类, 并对燃烧时的火焰形貌进行分析。一类是激光作用下药剂不能发火, 其中不含炭黑的复合药剂及 HMX 单质在激光作用下均不能发火; 第二类是能发火, 但火焰不能保持连续稳定的状态, 其中 Fe₂O₃ 含量超过 3% 以及炭黑含量低于 1% 的药剂均是间断发火, 药剂不能完全燃烧; 第三类是能发火, 且火焰能够保持连续稳定的燃烧状态直至燃完。

图 6 为 C-5 组药剂(Fe₂O₃ 质量分数 5%)的火焰形貌图。本实验室的激光发射装置发射的激光能量是每隔 100 ms 一次强脉冲, 所以药剂每隔一百毫秒会在激光脉冲的作用下剧烈强发火一次。从图 6 中可以看出, 火焰形状为抖动分散的长条形状, 每次火焰的产生都是在激光的每一次强脉冲作用下出现, 此类药剂的火焰不能保持平稳的状态, 且火焰持续时间非常短, 表明其传火效果极差。

图 7 为 B-2 组药剂 HMX/炭黑复合物(成分 HMX:炭黑:氟橡胶质量比为 97:1:2)的火焰形貌图。HMX/炭黑复合物的燃烧经历了五个阶段: 着火、发展、稳定燃烧、下降和熄灭, 取开始稳定燃烧发火时刻为零时刻, 发火时刻有激光的强脉冲作用, 所以火焰明亮, 且呈现大面积的喷发状, HMX/炭黑稳定燃烧时火焰整体呈发散的椭圆形, 火焰面积较小, 火焰稳定燃烧持续 5473 ms 后开始衰弱并熄灭。

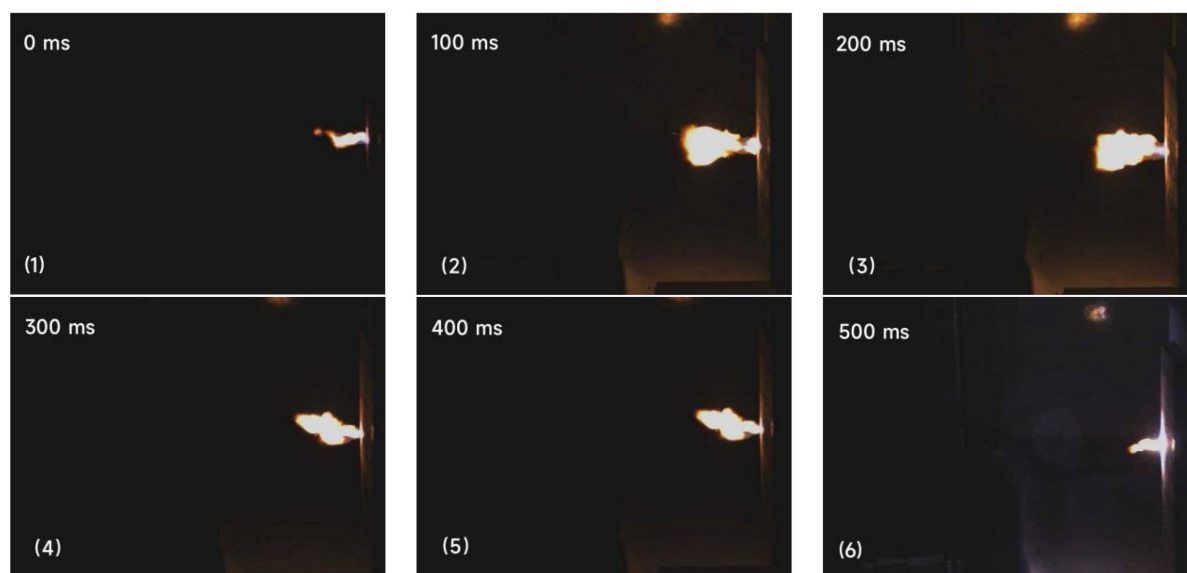


Figure 6. Flame images of the C-5 formulation ignited by a 1064 nm laser

图 6. 波长 1064 nm 激光作用下 C-5 组药剂的火焰形貌图

图 8 为 C-1 组药剂(成分 HMX:Fe₂O₃:炭黑:氟橡胶质量比为 96:1:1:2)的火焰形貌图。从图中可以看出, 该发火历程跟 B-2 组药剂相同, 对于能够稳定燃烧的药剂, 其燃烧历程都经历着火、发展、稳定燃烧、衰弱、熄灭五个阶段。相较于未加 Fe₂O₃ 的 B-2 组药剂, C-1 组药剂火焰状态更加平稳, 稳定燃烧过程中

没有明显的火星出现，火焰不抖动，且燃烧时间较短，燃烧 4080 ms 后开始熄灭。

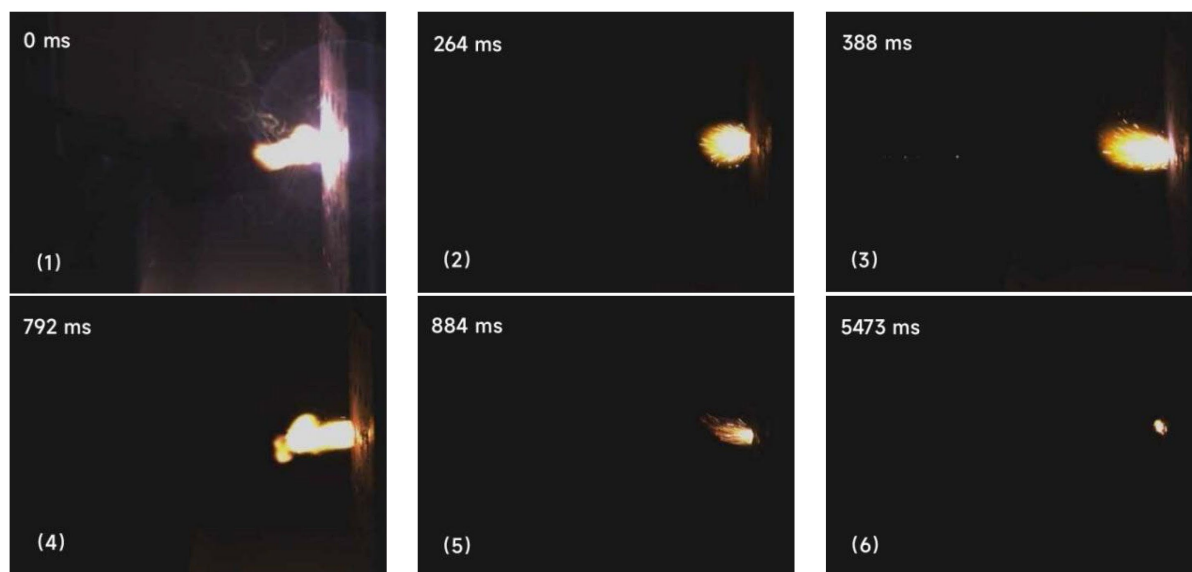


Figure 7. Flame images of the B-2 formulation ignited by a 1064 nm laser

图 7. 波长 1064 nm 激光作用下 B-2 组药剂的火焰形貌图

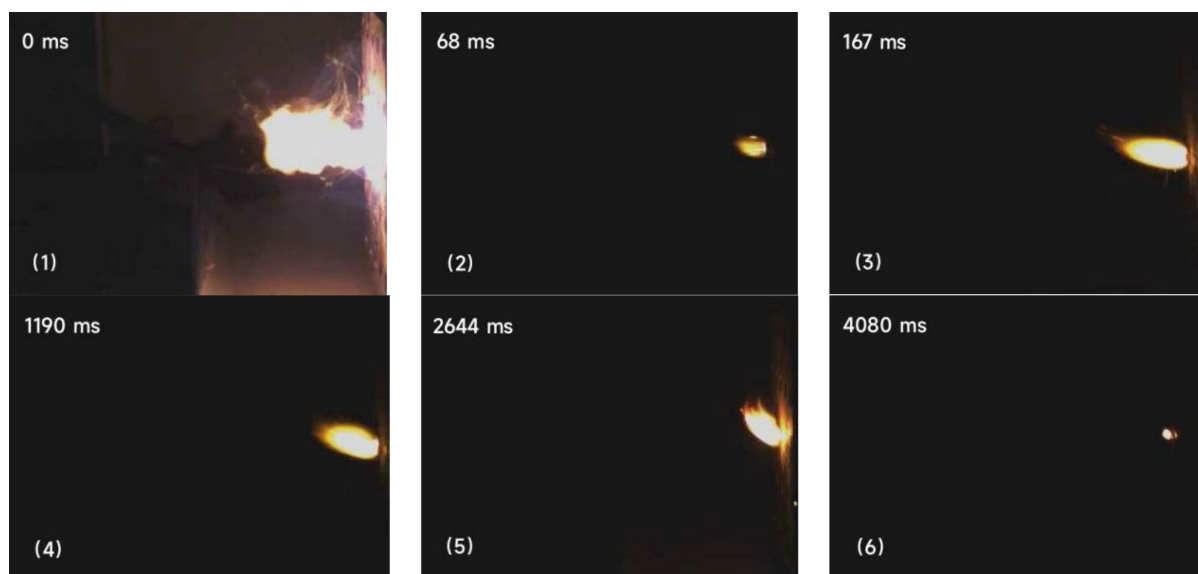


Figure 8. Flame images of the C-1 formulation ignited by a 1064 nm laser

图 8. 波长 1064 nm 激光作用下 C-1 组药剂的火焰形貌图

图 9 为 C-2 组药剂(成分 HMX:Fe₂O₃:炭黑:氟橡胶质量比为 95:2:1:2)的火焰形貌图。从图中可以看出，该组药剂与 C-1 组药剂火焰形态相似，稳定燃烧状态下火焰均很稳定，但随着 Fe₂O₃ 含量的增加，可以看出火焰体积明显增大，火焰持续时间明显缩短，说明药剂的燃速加快。

图 10 为 C-3 组药剂(成分 HMX:Fe₂O₃:炭黑:氟橡胶质量比为 94:3:1:2)的火焰形貌图(点火条件：激光波长为 1064 nm，能量密度为 57.83 J/cm²)。从图中可以看出，48 ms 时药剂开始平稳燃烧，火焰发展阶段时火焰形态呈椭圆球状；经 84 ms 后火焰达到了最佳状态，经 242 ms 后火焰便开始衰弱，而在火焰发展

阶段及稳定燃烧阶段火焰面积都比较大,说明火焰在短时间内便在药剂内部传播开来,并在 1920 ms 后燃完熄灭。与实验中的其他药剂相比较,该组分药剂的传火性能良好,燃速较快,是测试的所有药剂中燃烧效果最好的一组药剂。

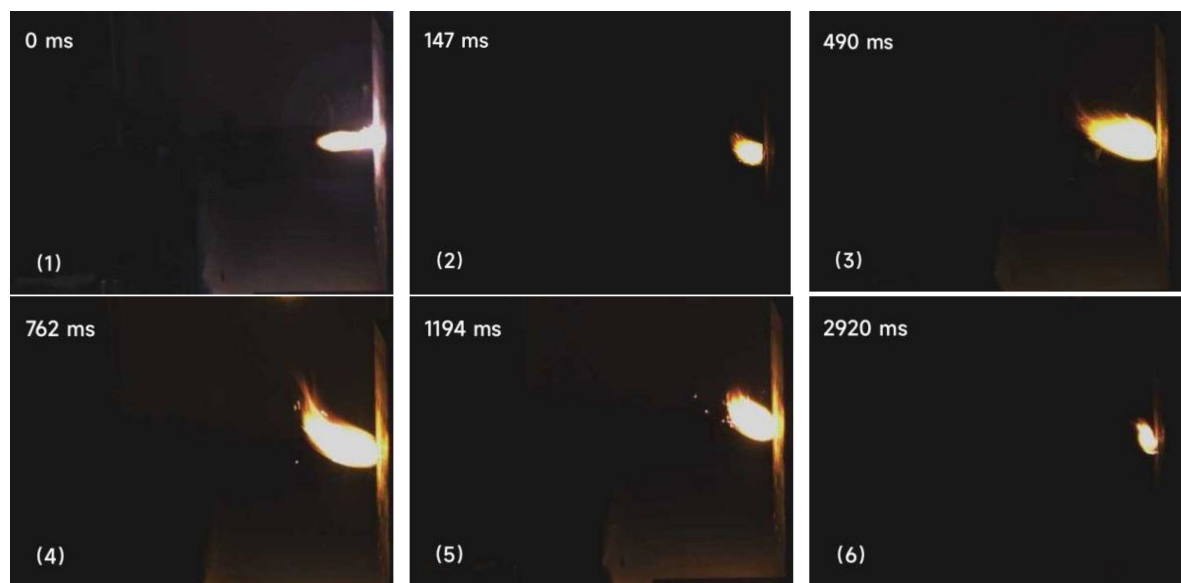


Figure 9. Flame images of the C-2 formulation ignited by a 1064 nm laser

图 9. 波长 1064 nm 激光作用下 C-2 组药剂的火焰形貌图

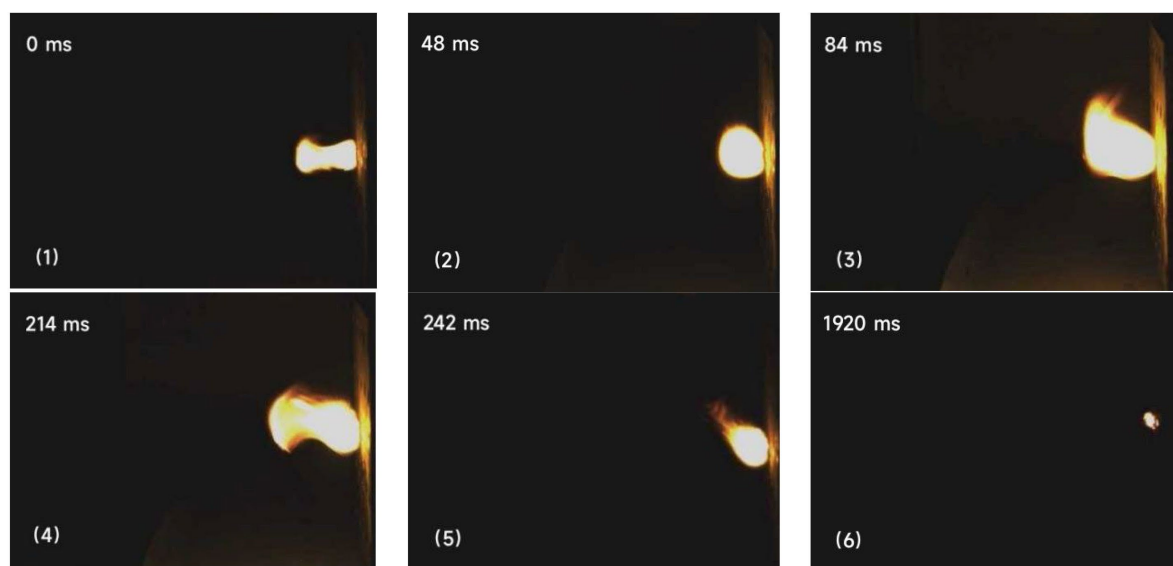


Figure 10. Flame images of the C-3 formulation ignited by a 1064 nm laser

图 10. 波长 1064 nm 激光作用下 C-3 组药剂的火焰形貌图

3.2.3. 最小发火能量

采用 Penny 激光器对所有不同组分配比的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合药剂进行激光点火测试,从安全电压对应下的点火能量 2.65 J/cm² 开始对不同质量比的 HMX 基复合含能材料分别进行激光点火测试,逐渐增大激光能量进行测试,记录下能够让药剂发火时的激光能量,作为药剂的最小发火能量。

表 3 为不同组分配比的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料的最小发火能量,从表中数据可以看出影响药剂发火能量的主要因素是药剂成分的组成,本实验制备的复合物组成成分相对简单,仅由 Fe₂O₃、炭黑、HMX 以及氟橡胶四种成分组成。当复合物的组成成分不同时,对最小发火能量的影响直接表现为“药剂发火与不发火”。即当复合药剂成分中含有炭黑时,药剂发火,反之则不发火。而对于组成元素相同的复合药剂组成成分间的对比对最小发火能量的影响效果微弱,从表中数据可以看出,改变 Fe₂O₃ 或是炭黑的质量分数,复合药剂的最小发火能量不变,均保持在 20.89 J/cm²。

Table 3. Minimum ignition energy of HMX/Fe₂O₃/carbon black composites with different formulations

表 3. 不同组分配比的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料的最小发火能量

编号	Fe ₂ O ₃ (wt%)	HMX (wt%)	炭黑(wt%)	氟橡胶(wt%)	最小发火能量(J/cm ²)
A-1	0	100	0	0	不发火
A-2	0	98	0	2	不发火
A-3	5	95	0	0	不发火
A-4	5	93	0	2	不发火
B-1	0	99	1	0	20.89
B-2	0	97	1	2	20.89
C-1	1	96	1	2	20.89
C-2	2	95	1	2	20.89
C-3	3	94	1	2	20.89
C-4	4	93	1	2	20.89
C-5	5	92	1	2	20.89
D-1	3	94.8	0.2	2	20.89
D-2	3	94.6	0.4	2	20.89
D-3	3	94.4	0.6	2	20.89
D-4	3	94.2	0.8	2	20.89
D-5	3	94.0	1.0	2	20.89

3.2.4. 点火延迟时间

图 11 为 Fe₂O₃ 质量分数与点火延迟时间关系图。激光点火实验测得, B-2 组药剂未加 Fe₂O₃, 点火延迟时间较短, 在 5746 ms 时发火燃烧; 而添加了 Fe₂O₃ 的 C-1、C-2、C-3 三组药剂的点火延迟时间相较于 B-2 组药剂更长, 且随着 Fe₂O₃ 质量分数的增加, 药剂点火延迟时间随之变长, 分别为 6864、7174、9220 ms。已知炭黑的添加与否直接决定了复合药剂能不能发火, 再结合图 5 可以看出, 炭黑的含量可以明显影响复合药剂对 1064 nm 波段对应光的吸收效果。所以, 可以认为在激光与药剂作用初始阶段, 炭黑对激光点火性能的改善更大, 而 Fe₂O₃ 的加入使得 HMX 的质量分数降低, 在激光与药剂作用的初始阶段, 反而降低了药剂对激光能量的吸收积累效果, 导致点火延迟时间变长。也可能是 Fe₂O₃ 的加入使得直接与 HMX 接触的炭黑的量减少, 在激光与药剂作用的初始阶段, 炭黑所吸收的激光能量一部分传递给了

氧化铁颗粒, 减少了传递给主体炸药 HMX 的热量, 从而导致炭黑添加量一定时, 随着氧化铁质量分数的增加, 药剂的点火延迟时间变长。文献[17]中采用碳点(CDs)替代传统炭黑, 在 0.65 wt% 的低添加量下, CDs/Cu 复合催化剂使 HMX-CMDB 的激光点火延迟时间从 45 ms 大幅降低至 15 ms, 降幅达 66.7%。这说明催化剂与光敏添加剂的复合方式及配比对主体含能材料的激光点火延迟时间有很大影响。

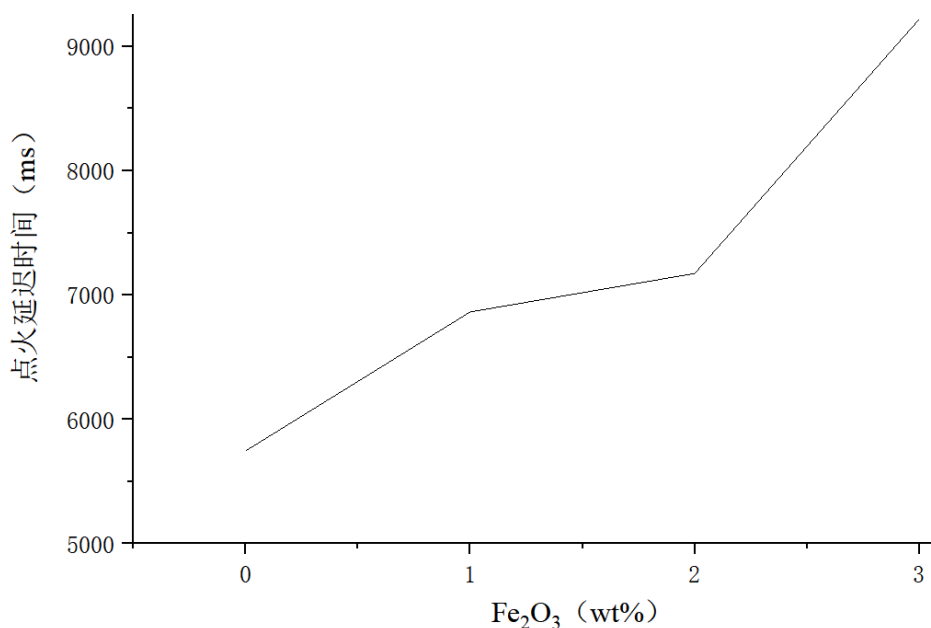


Figure 11. Plot of ignition delay time versus Fe₂O₃ mass fraction for the composites.

图 11. Fe₂O₃ 质量分数与药剂点火延迟时间的关系

3.2.5. 质量燃速

表 4 为不同组分配比的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料的质量燃速数据记录, 所有药剂均含有质量分数为 2% 的氟橡胶。B-2 组药剂未加氧化铁, 仅加入了质量分数 1% 的炭黑, 质量燃速为 0.0279 g·cm⁻²·s⁻¹, 在几组点火药剂中质量燃速最小; C-1 到 C-3 组药剂在 B-2 组药剂的基础上, 分别还加入了质量分数为 1%、2%、3% 的氧化铁, 三组药剂质量燃速分别为 0.0374 g·cm⁻²·s⁻¹, 0.0524 g·cm⁻²·s⁻¹, 0.0796 g·cm⁻²·s⁻¹。图 12 为 Fe₂O₃ 质量分数与复合物质量燃速关系图。(点火条件: 激光波长为 1064 nm, 能量密度为 57.83 J/cm²)。可以看出, 加入 Fe₂O₃ 后复合药剂的质量燃速明显增大, 且随着 Fe₂O₃ 质量分数的增加, 燃速随之增大。所以, 相对于炭黑对药剂激光点火初始阶段的性能改善, Fe₂O₃ 的改善作用则主要发挥在药剂发火后, 于燃烧反应中降低反应所需的活化能[19] [20], 使得药剂燃烧速率加快。

Table 4. Mass burning rate data of HMX/Fe₂O₃/carbon black composites with different mass ratios

表 4. 不同组分配比的 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合材料的质量燃速

编号	Fe ₂ O ₃ (wt%)	HMX (wt%)	炭黑(wt%)	氟橡胶(wt%)	质量燃速(g·cm ⁻² ·s ⁻¹)
B-2	0	97	1	2	0.0279
C-1	1	96	1	2	0.0374
C-2	2	95	1	2	0.0524
C-3	3	94	1	2	0.0796

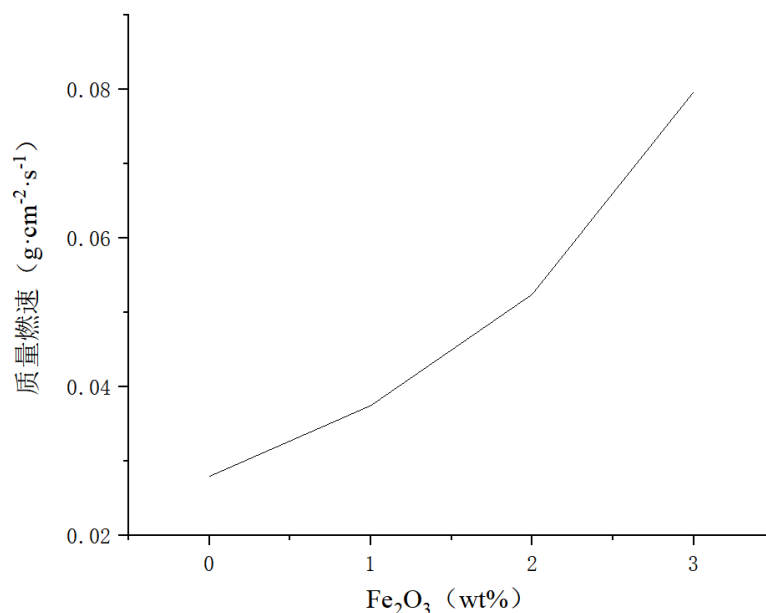


Figure 12. Plot of ignition delay time versus Fe₂O₃ mass fraction for the composites

图 12. Fe₂O₃ 质量分数与药剂质量燃速的关系

3.2.6. 小结

通过对各组不同 HMX/Fe₂O₃/炭黑复合药剂的激光点火数据分析得知, Fe₂O₃、炭黑作为复合含能材料的复合成分, 炭黑和 Fe₂O₃ 的质量分数都需保持在合理范围内才能保证药剂有良好的点火效果。Fe₂O₃ 的质量分数大于 3% 后, 复合药剂在燃烧时的传火性能会变得很差, 使得药剂不能完全燃烧而造成点火失败; 所以 Fe₂O₃ 的质量分数在 3% 最佳, 既能保持较高的质量燃速, 又能保证药剂能够持续稳定地燃烧。

4. 结论

(1) 通过扫描电镜(SEM)观察复合物形貌得知, 复合物中的 HMX 晶体形貌呈宝石状, 且颗粒大小分布均匀, 粒径在 30 μm~60 μm 区间内。结合 X-射线粉末衍射(XRD)及红外光谱(FT-IR)分析结果得知, 复合物中的 HMX 为稳定性较高的 β-HMX;

(2) 纳米炭黑作为良好的光敏药剂, 加入到 HMX 基复合含能材料中可以大大改善复合物对激光的吸收效果。在 1064 nm 波长的激光作用下, 只有加入了炭黑后的几组 HMX 复合药剂才能够发火, HMX 单质与 HMX/Fe₂O₃ 复合物均不能发火; 通过固体紫外-可见-近红外漫反射光谱分析结果得知引入炭黑后 HMX 基复合含能材料对 1064 nm 波段光的吸收效果良好, 炭黑含量为 0.2% 的 HMX 复合药剂对 1064 nm 波长的光吸收率为 47.79%, 炭黑含量增加到 1% 后 HMX 复合药剂对 1064 nm 波长的光吸收率增加到了 59.71%;

(3) Fe₂O₃ 作为良好的含能材料分解催化剂, 可以明显提高 HMX 基复合含能材料的质量燃速, 且随着 Fe₂O₃ 质量分数的增大, 复合物的质量燃速也随之增大。本研究只加入质量分数 1% 的炭黑的 HMX 复合药剂燃速为 0.0279 g·cm⁻²·s⁻¹, 燃速较小, 继续向其中分别引入质量分数为 1%、2%、3% 的 Fe₂O₃ 后, 药剂的质量燃速分别提高到了 0.0374、0.0524、0.0796 g·cm⁻²·s⁻¹; 此外, Fe₂O₃ 的加入会使复合物的点火延迟时间变长, 含 Fe₂O₃ 质量分数为 1%、2%、3% 的药剂点火延迟时间分别达到了 6864、7174、9220 ms。且 Fe₂O₃ 质量分数超过 3% 时复合物的传火性能会变得极差。说明在激光与药剂作用的初始阶段, Fe₂O₃ 对 HMX 基复合含能材料的燃烧没有改善效果; 另外, 为了使复合药剂拥有较大燃速的同时还能保持良

好传火效果, Fe_2O_3 质量分数在 3%最佳;

(4) 氟橡胶作粘结剂改善了 HMX 基复合含能材料的力学性能, 在复合物中加入质量分数 2%的氟橡胶后, 药剂的力学强度得到很大改善, 能够耐受点火测试时能量密度为 57.83 J/cm^2 的激光束带来的较大冲击力, 保证了激光点火实验能够顺利进行。

基金项目

四川省科技计划项目(No. 2024ZHCG0060): 药头药成型工艺优化及智能化生产成果转化运用。

参考文献

- [1] 刘建, 蒋小华. 含能材料激光起爆技术[J]. 激光杂志, 2013(6): 11-13.
- [2] 张慧卿, 严楠, 华光. 掺杂物对药剂激光点火感和延迟时间的影响[J]. 含能材料, 2001, 9(4): 176-178.
- [3] Fang, X., Sharma, M., Stennett, C. and Gill, P.P. (2017) Optical Sensitisation of Energetic Crystals with Gold Nanoparticles for Laser Ignition. *Combustion and Flame*, **183**, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.05.002>
- [4] Churchyard, S., Fang, X. and Vrcelj, R. (2019) Laser Ignitibility of Energetic Crystals Doped with Gold Nanoparticles. *Optics & Laser Technology*, **113**, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.021>
- [5] Ahmad, S.R., Russell, D.A. and Golding, P. (2009) Laser-Induced Deflagration of Unconfined HMX—The Effect of Energetic Binders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **34**, 513-519. <https://doi.org/10.1002/prep.200800090>
- [6] 王惠娥, 沈瑞琪, 叶迎华, 等. 碳纳米管和碳黑掺杂对 RDX 激光点火特性的影响[J]. 爆破器材, 2012, 41(6): 16-18.
- [7] Hu, P., Xian, M., Wu, L., Zhang, H., Ye, Y. and Shen, R. (2021) Laser Ignition of a Laser-Thermal Differential Composite System Based on Non-Uniform Absorption. *Chemical Engineering Journal*, **421**, Article ID: 127869. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127869>
- [8] 张亚杰, 董佳杰, 张莹, 等. Al/HMX 复合含能材料的激光点火和燃烧性能研究[J]. 火工品, 2025(3): 21-27.
- [9] Deng, H., Wang, L., Tang, D., Zhang, Y. and Zhang, L. (2021) Review on the Laser-Induced Performance of Photothermal Materials for Ignition Application. *Energetic Materials Frontiers*, **2**, 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.enmf.2021.08.001>
- [10] Isert, S., Groven, L.J., Lucht, R.P. and Son, S.F. (2015) The Effect of Encapsulated Nanosized Catalysts on the Combustion of Composite Solid Propellants. *Combustion and Flame*, **162**, 1821-1828. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.11.040>
- [11] Granier, J.J. and Pantoya, M.L. (2004) Laser Ignition of Nanocomposite Thermites. *Combustion and Flame*, **138**, 373-383. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.05.006>
- [12] Khanef, A.V. and Dolgachev, V.A. (2014) Simulation of Initiation of PETN by a Nanosecond Laser Pulse in the Weak Absorption Region. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **50**, 105-112. <https://doi.org/10.1134/s0010508214010134>
- [13] Yan, Q., Liu, P., He, A., Zhang, J., Ma, Y., Hao, H., et al. (2018) Photosensitive but Mechanically Insensitive Graphene Oxide-Carbohydrazide-Metal Hybrid Crystalline Energetic Nanomaterials. *Chemical Engineering Journal*, **338**, 240-247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.140>
- [14] 韦爱勇, 郭学彬, 张杰涛. 常用火工品药剂激光起爆试验研究[J]. 含能材料, 2004, 12(4): 243-245.
- [15] 王明, 潘清, 李晓宇, 等. XRD 结合化学计量学方法测定 HMX 晶型纯度研究[J]. 火工品, 2022(1): 68-71.
- [16] 曹劲楠. 改性炭黑/橡胶纳米复合材料的制备与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- [17] Zhang, Z., Zhang, Y., Jiang, Y., Pang, W., Gao, H., Yuan, Z., et al. (2026) Effects of Carbon Dots and Their Composites on the Burning Performance of HMX-CMDB Propellant. *Defence Technology*, **57**, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.10.011>
- [18] Zhou, J., Gu, K., Guo, X. and Liu, R. (2025) Fabrication of HMX/Fluororubber Composite Microspheres with Enhanced Mechanical and Safety Properties via Channel Assembly Technology. *Polymer Testing*, **151**, Article ID: 108957. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108957>
- [19] Elbasuney, S., Yehia, M., Hamed, A., Mokhtar, M., Gobara, M., Saleh, A., et al. (2021) Synergistic Catalytic Effect of Thermite Nanoparticles on HMX Thermal Decomposition. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and*

Materials, **31**, 2293-2305. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01916-3>

- [20] Wu, Z., Pei, J., Song, X., Liu, N., Li, J., Zhang, M., *et al.* (2020) The Catalytic Effects of Nano-Fe₂O₃ and rGO-Fe₂O₃ on the Thermal Decomposition Properties of CL-20/HMX Cocrystals. *New Journal of Chemistry*, **44**, 1858-1864. <https://doi.org/10.1039/c9nj05619j>