

文章编号:1006-9941(2025)03-0246-10

三元活性金属燃料 Al/B/Mg 和 Al/B/MgH₂ 的燃烧特性

程志鹏¹,夏语¹,罗一民¹,马腾¹,徐飞扬¹,张宇¹,吴星亮¹,徐森^{1,2}

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 国家民用爆破器材质量监督检验中心, 江苏 南京 210094)

摘要: 为探究三元活性金属燃料 Al/B/Mg(ABM)和 Al/B/MgH₂(ABM-H)的燃烧特性,分别利用氧弹量热仪和哈特曼管研究样品的燃烧热与最小点火能,借助高速摄像系统与高速红外摄像系统研究火焰传播亚瞬态过程和温度场域时空分布特性。研究结果表明:ABM、ABM-H 的燃烧热值分别为 34.1 MJ·kg⁻¹和 32.2 MJ·kg⁻¹,较纯 Al 的燃烧热值(29.8 MJ·kg⁻¹)分别提高了 14.4%和 8.1%; ABM、ABM-H 和 Al 的最小点火能量分别在 160~170,100~110,20~30 mJ 之间;质量浓度为 625 g·m⁻³时,ABM 和 ABM-H 较纯 Al 燃烧持续时间分别增加了 65.5%和 34.5%,火焰传播速度峰值分别提升了 12.6%和 23.0%。质量浓度在 500 g·m⁻³条件下,ABM-H 和 ABM 的火焰传播速度峰值均最大,分别为 45.05 m·s⁻¹和 38.7 m·s⁻¹,火焰表面最高温度峰值分别为 1856 °C和 1717 °C,ABM-H 较 ABM 提高了 7.6%,同时升温速率更快。可见,ABM 和 ABM-H 配方在显著降低粉尘/空气混合物爆炸危险性的同时,燃烧性能明显提高,且 ABM 在燃烧热值和燃烧持续时间上表现出更好的热效应,ABM-H 在最小点火能量、火焰传播速度和温度上升速率方面表现出更高的反应活性。

关键词: 三元活性金属燃料;最小点火能;火焰传播特性;温度场分布

中图分类号: TJ55;O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024100

0 引言

金属燃料作为含能材料的重要组成部分,可以显著增加复合含能材料体系的能量密度,从而提升复合体系的做功能力和爆炸效果^[1]。长期以来,Al 因较高的热值、较低的成本而被广泛添加到炸药和推进剂中^[2]。然而随着武器装备技术的持续进步,对金属燃料的性能要求也日益多样化,特别是对高能量密度、高热值和高活性的需求日益凸显^[3-7]。同时在工业生产过程中 Al 粉爆炸事故越来越多,造成了巨大的人员伤亡和经济损失^[8-10]。鉴于纯 Al 粉难以满足上述需求^[11],众多学者向 Al 粉中引入其它金属或非金属对其完成针对性改良,使复合金属燃料具有较好的热效应或反应活性,以满足不同应用场景。

收稿日期:2024-04-15;修回日期:2024-07-24

网络出版日期:2024-08-16

基金项目:国家自然科学基金(12272184)

作者简介:程志鹏(2001-),男,硕士研究生,主要从事复合金属燃料在高能炸药中的应用研究。e-mail:chengzp2022@163.com

通信联系人:吴星亮(1994-),男,博士,主要从事炸药性能及炸药爆炸输出特性研究。e-mail:wuxingliang94@njust.edu.cn

引用本文:程志鹏,夏语,罗一民,等.三元活性金属燃料 Al/B/Mg 和 Al/B/MgH₂ 的燃烧特性[J].含能材料,2025,33(3):246-255.CHENG Zhi-peng, XIA Yu, LUO Yi-min, et al. Combustion Characteristics of Ternary Reactive Metal Fuels Al/B/Mg and Al/B/MgH₂[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(3):246-255.

B、Mg 等材料对于 Al 能量释放特性的优化作用已被大量研究所证实^[12-15]。王超等^[12]用高温烧结法制备了 Al/B 合金粉,并研究其燃烧性能,分析认为燃烧过程中高熔点的 Al/B 复合氧化物可阻碍低熔点的 B₂O₃ 的产生,复合体系具有较高的燃烧热值和燃烧效率。卢国菊等^[13]研究了 Al 粉及 Al/Mg 混合粉爆炸特性参数的变化规律,结果表明,Al/Mg 混合粉较 Al 粉的爆炸压力、爆炸压力上升速率和爆炸指数均有提升。同时,部分学者研究发现,复合金属燃料在受到推进剂和炸药的燃爆驱动时,在提高燃速、爆热和水中爆炸能量方面同样表现出优异的性能^[16-18]。陈愿等^[16]将 Al/B 混合添加到含铝炸药中,探究 B 含量对含铝炸药水下爆炸能量的影响,结果表明,加入 B 能提高含铝炸药的水下爆炸能量水平,且 B 质量分数为 10% 时,水下爆炸能量达到峰值。高明等^[17]制备了 Al/Mg 基水反应金属燃料推进剂,测试了燃速和爆热,同时对燃烧产物进行表征,分析认为加入 Al/Mg 合金可使样品具有更高的燃速和爆热,且样品中 Al 燃烧的较为充分。

MgH₂ 燃烧热值高达 30.9 MJ·kg⁻¹,储氢量最高达 7.6%,且化学性质稳定,长时间存储不易分解^[19]。一些学者研究发现 MgH₂ 具有优异的燃烧性能,可以提

高复合体系的敏感程度^[20-23]。张启威等^[20]研究了不同粒径 MgH₂ 粉尘云的火焰传播过程与温度场域分布,结果表明粒径较小的 MgH₂,其粉尘云火焰传播速度更快,火焰温度分布更均匀,同时 H 的参与对 MgH₂ 粉尘云的燃烧反应起促进作用,使其燃爆威力远高于 Mg 粉尘云。张洋等^[21]将 MgH₂ 加入 RDX 等 5 种典型含能材料中,对 5 种样品的点火延迟时间和火焰传播速度进行测试和计算,探究 MgH₂ 对典型含能材料燃烧性能的影响,结果表明, MgH₂ 的加入缩短了点火延迟时间,加快了火焰传播速度,对 RDX、HMx、CL-20、FOX-7、ADN 的点火燃烧性能均有一定的提升。

综上所述,利用复合材料组分间的协同效应可以获得更好的燃爆性能。为了提高安全性,满足不同应用背景对金属燃料提出的高热值、高活性等多样化需求,有必要制备复合金属燃料,并对其燃烧性能开展研究。本研究对 Al/B/Mg (ABM)、Al/B/MgH₂ (ABM-H) 两种三元活性金属燃料的燃烧热、最小点火能量、火焰传播亚瞬态过程和温度场域时空分布特性进行分析比较,研究其点火燃烧性能,并与基体燃料纯 Al 粉进行对比,期望在增强燃烧性能的同时具有较高的安全性,为 Al/B/Mg (MgH₂) 复合金属燃料的设计和粉尘爆炸风险评价与预防提供数据支持。

1 实验部分

1.1 实验样品

Al、ABM、ABM-H 样品均由中科院金属所提供,其中活性金属燃料 ABM、ABM-H 由高能球磨法制备,配方见表 1。

采用扫描电子显微镜 (SEM) 对样品原料的微观形貌结构进行了表征,如图 1 所示。样品原料粒径均分布在 1~10 μm,其中 Al 为表面较为粗糙的球形颗粒 (图 1a), B 颗粒呈不规则形状 (图 1b), Mg 为表面较为光滑的球形颗粒 (图 1c), MgH₂ 颗粒整体呈球形,表面较为凹凸不平 (图 1d)。

图 2 与图 3 分别为 ABM 和 ABM-H 扫描电镜和元

表 1 样品配方各组分质量百分比

Table 1 Mass percentage of each component in the sample formulations %

| sample | Al | B | Mg | MgH ₂ |
|--------|-----|----|----|------------------|
| Al | 100 | — | — | — |
| ABM | 60 | 25 | 15 | — |
| ABM-H | 70 | 15 | — | 15 |

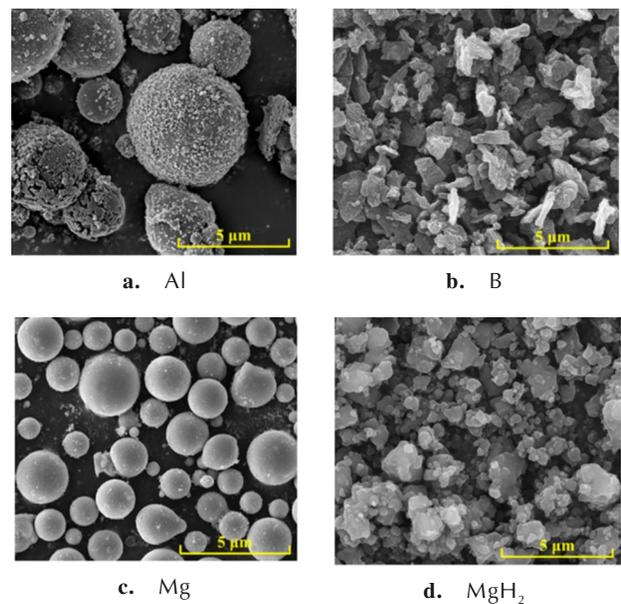


图 1 原料样品扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrograph of sample materials

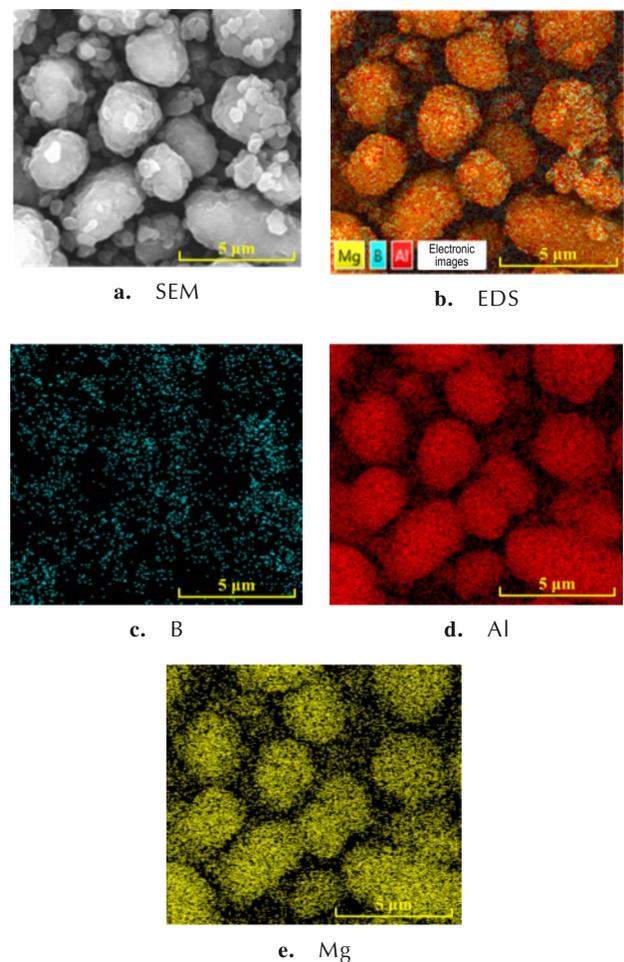


图 2 样品 ABM 的扫描电镜和元素分析图

Fig.2 Scanning electron microscope and elemental analysis diagram of ABM sample

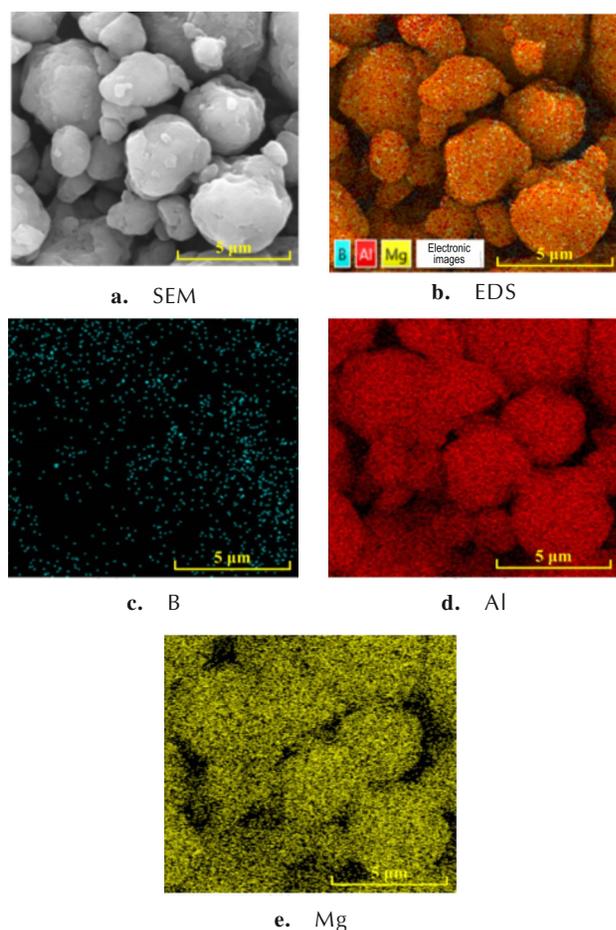


图3 样品ABM-H的扫描电镜和元素分析图

Fig.3 Scanning electron microscope and elemental analysis diagram of ABM-H sample

素分析结果。球磨后,三元活性金属燃料ABM、ABM-H大部分呈不规则球形,不同金属间形成了均匀分布的结构,表面嵌合较为均匀,机械合金化效果较好。

1.2 实验系统与测试

1.2.1 燃烧热测试

燃烧热采用氧弹量热仪(美国Parr Instrument Company公司产,Parr 6200)进行测试,表征样品的热力学性能,样品燃烧热由式(1)计算:

$$Q = \frac{E \cdot (\Delta T + C) - q \cdot l}{m} \quad (1)$$

式中, E 为氧弹热容量值, $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$; ΔT 为测试前后去离子水的温差, K ; C 为矫正值,用于消除搅拌做功产热、热传递损失、蒸发吸热等的影响; q 为点火丝单位长度的燃烧热, $\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$; l 为点火丝的长度, cm ; m 为样品质量, g 。

在环境温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,取样品 0.75 g 均匀铺于石英坩埚底部,连接电阻丝后旋紧氧弹盖,充入 3.0 MPa 氧气进行燃烧热测试。3种样品均测试3次,

结果取平均值。

1.2.2 最小点火能量测试

最小点火能量采用 1.2 L 哈特曼管(东北大学工业爆炸及防护研究所研制)进行测试,测试系统由半径 34 mm 、高 300 mm 的石英玻璃管、底部的高压喷气装置和伞状喷嘴、位于底部上方 100 mm 处的黄铜点火电极组成,同时在哈特曼管前方 2 m 处架设高速摄像机(美国Vision Research公司产,Phantom v1212)和高速红外摄像机(加拿大Telops公司产,L200),帧率分别设置为 20000 帧/s 和 400 帧/s ,实验系统如图4所示。

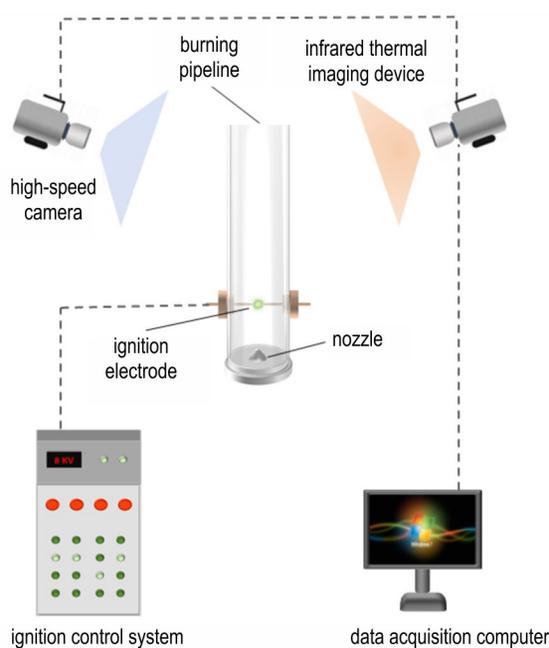


图4 哈特曼管实验系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of Hartmann tube experimental system

高速红外摄像系统原始数据为每一个像素点在所捕获的同辐射强度下黑体温度,真实温度需按式(2)校准:

$$T_{\text{obj}} = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau} T_r^n - \left(\frac{1}{\tau} - \varepsilon \right) T_{\text{atm}}^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式中, T_{obj} 为表面真实温度, $^\circ\text{C}$; ε 为发射率,样品的主要成分为Al,燃烧产物为 Al_2O_3 ,参考文献[24],火焰发射率以 Al_2O_3 热辐射为基准,取 75% ; τ 为大气透过率,试验中红外相机与哈特曼管相距 2.0 m ,可认为 $\tau=1$; T_r 为黑体温度,即红外相机拍摄所得的原始温度, $^\circ\text{C}$; T_{atm} 为环境温度, $^\circ\text{C}$; n 为传感器系数。

对Al、ABM、ABM-H3种样品在 375.0 、 437.5 ,

500.0, 562.5, 625.0 g·m⁻³ 5种质量浓度下,分别进行15组最小点火能量测试。把样品均匀铺撒在喷嘴周围,用0.6 MPa压缩空气将样品均匀分散,固定点火延时为60 ms,使用不同点火能量进行测试,每个点火能量重复10次。最小点火能量 E_{\min} 介于至少点燃1次的能量值 E_1 和均未点燃的能量值 E_2 之间,即 $E_1 < E_{\min} < E_2$ 。同时通过高速摄像系统和高速红外摄像系统记录火焰传播亚瞬态过程与管口外部火焰温度场域变化。

2 结果与讨论

2.1 燃烧热

表2为纯氧气氛中3种样品燃烧热的实测值与理论值。结果表明,Al、ABM和ABM-H的实测燃烧热值分别为29.8, 34.1, 32.2 MJ·kg⁻¹,其中ABM在燃烧热值方面具有较好的热效应。

表2 燃烧热测试结果

Table 2 Heat of combustion test results

| sample | q / MJ·kg ⁻¹ | \bar{q} / MJ·kg ⁻¹ | s | Q / MJ·kg ⁻¹ | η / % |
|--------|---------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------|------------|
| Al | 29.9 | 29.8 | 0.0577 | 31.0 | 96.1 |
| | 29.8 | | | | |
| | 29.8 | | | | |
| ABM | 34.0 | 34.1 | 0.1155 | 37.6 | 90.7 |
| | 34.0 | | | | |
| | 34.2 | | | | |
| ABM-H | 32.4 | 32.2 | 0.1528 | 35.2 | 91.5 |
| | 32.2 | | | | |
| | 32.1 | | | | |

Note: q is the measured heat of combustion. \bar{q} is the measured heat of combustion. s is the standard deviation. Q is the theoretical heat of combustion. η is the system combustion efficiency.

分析认为,由于B理论质量热值是Al(31.0 MJ·kg⁻¹)的1.9倍,为58.8 MJ·kg⁻¹[25]。引入B,将提高复合体系的理论燃烧热值,同时由于理论燃烧热值与B含量呈正相关。ABM和ABM-H的B含量分别为25%和15%,二者实测燃烧热值较纯Al提高了14.4%和8.1%,但燃烧效率低于纯Al,这是由于B在燃烧过程中表面会产生黏性强、沸点高的液态氧化层[26],会阻碍反应的进行,使复合体系不能充分燃烧。

2.2 最小点火能量

图5为3种样品点火能量测试结果。结果表明,纯Al的粉尘云对电火花敏感度最高,最小点火能在20~30 mJ之间;ABM-H的粉尘云对电火花敏感度较低,最小点火能在100~110 mJ之间,且最小点火能随着质

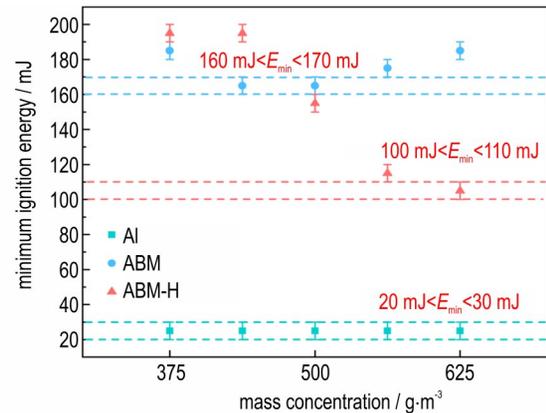


图5 不同质量浓度下3种样品点火能测试结果

Fig.5 Ignition energy test results of three samples at different mass concentrations

量浓度的增加呈下降趋势;ABM的粉尘云对电火花敏感度最低,最小点火能在160~170 mJ之间。样品的最小点火能量排序为ABM>ABM-H>Al,相较于纯Al粉,ABM和ABM-H的粉尘/空气混合物的爆炸危险性显著降低,且ABM-H的反应活性更高。

研究已证实[20,27-28],微米级无定型B粉的最小点火能量大于1000 mJ,点火燃烧难以进行;微米级MgH₂的最小点火能在5~10 mJ之间,同时受热分解放出活性H,易被点燃产生高温。因此,随着复合体系中B含量的增加,最小点火能量增大,ABM的最小点火能量较ABM-H更高;MgH₂本身对电火花敏感,且分解产生的活性H极易燃烧,致使复合体系最小点火能有所降低,同时随着ABM-H质量浓度的增加,更多的MgH₂分解释放出更多活性H参与反应过程,促进点火燃烧,最小点火能量进一步降低。

2.3 火焰传播特性

为探究不同样品的火焰亚瞬态传播特性,用高速摄像系统记录了5种浓度下Al、ABM、ABM-H的火焰传播过程。图6为高速摄像系统捕捉到的200 mJ点火能量下3种样品(质量浓度625 g·m⁻³)的火焰传播过程。计电火花出现时刻为0时刻,样品被点燃后,火焰从电极位置向周围传播,Al燃烧形成了明亮的黄色火焰,ABM、ABM-H中含有B元素,燃烧形成了明亮的青绿色火焰。火焰前锋阵面到达管口处向周围扩散,呈光滑的蘑菇状。随后火焰继续向上传播,燃烧加剧。随着反应的进行,火焰不断衰减,亮度减弱,最终逐渐熄灭。

同时,图6表明,质量浓度为625 g·m⁻³的Al、ABM、ABM-H燃烧持续时间分别为145, 240, 195 ms, ABM、ABM-H较纯Al的燃烧持续时间分别增长了

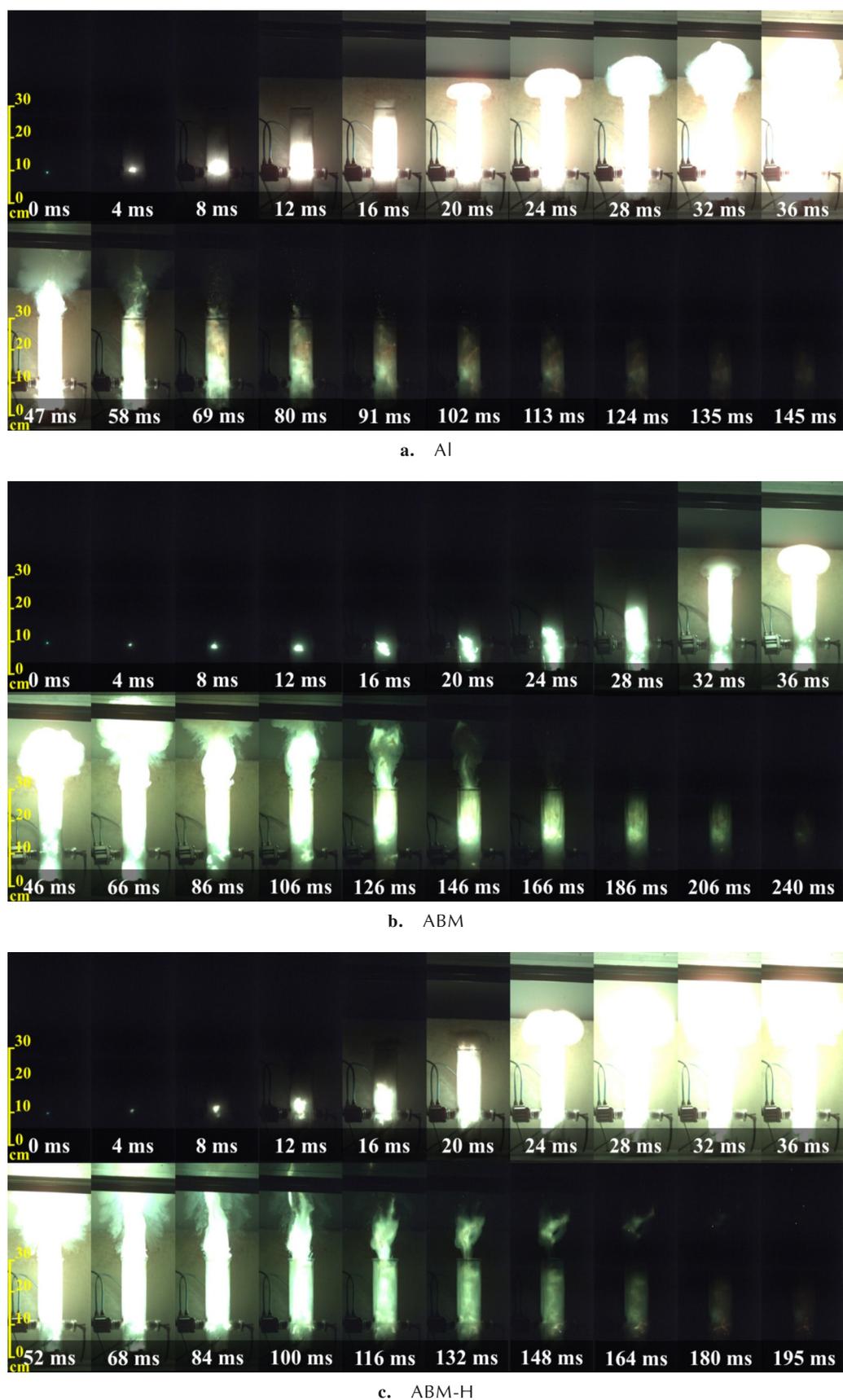


图6 质量浓度为 $625 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的3种样品火焰传播过程

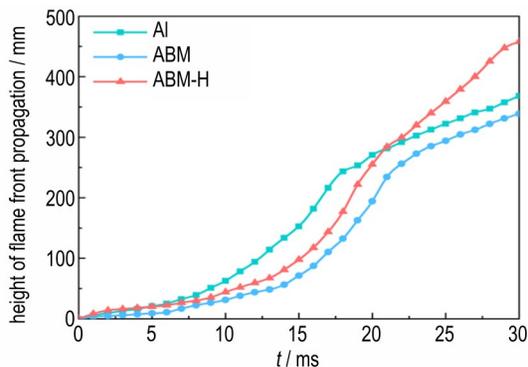
Fig.6 Flame propagation process of three samples with mass concentration of $625 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$

65.5% 和 34.5%。分析认为,相同质量浓度和点火能量下,复合体系的燃烧持续时间主要取决于 B 含量,B 含量越多燃烧持续时间越长。反应过程中 MgH₂、Mg、Al 先行燃烧释放能量加速 B 表面氧化层的蒸发与破裂,进而使 B 更充分快速的释能,然而 B 燃烧的过程中表面会继续产生黏性强、沸点高的液态氧化层,其吸收能量去除氧化层和燃烧释放能量的循环过程会延长复合体系的燃烧持续时间。ABM 的燃烧持续时间较长,从而在提升复合体系后燃烧效应方面有较大潜力,在温压炸药或其它应用场景中可有效的提升热毁伤效果。

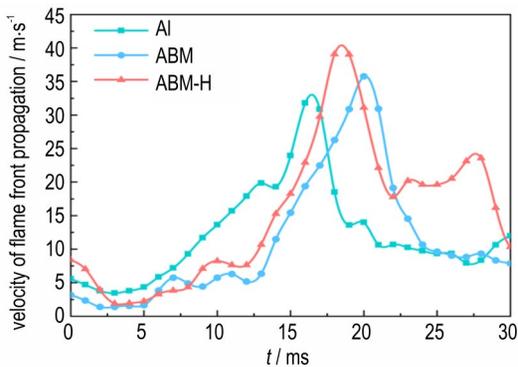
为更好地分析火焰传播过程,取点火电极平面为 0 mm 基准面,测量火焰前锋阵面高度,图 7a 为质量浓度为 625 g·m⁻³ 的 3 种样品火焰传播高度随时间变化曲线,火焰前锋阵面整体上呈现先加速再减速的上升趋势。对图 7a 曲线处理获得 7b 所示的 3 种样品火焰传播速度随时间变化曲线,各样品的火焰传播速度均呈现先增大到峰值再震荡减小的趋势。Al、ABM、

ABM-H 的火焰传播速度分别在 16, 20, 18 ms 达到峰值,速度为 31.8, 35.8, 39.1 m·s⁻¹。ABM、ABM-H 较纯 Al 的火焰传播速度峰值分别增加了 12.6% 和 23.0%。已有研究表明,粒径 0~20 μm 的 Mg 最小点火能在 5~10 mJ 之间^[29],易被点燃释放能量,促进复合体系反应的进行,加快火焰的传播速度。MgH₂ 受热会分解释放活性 H,与分散的金属燃料颗粒形成可燃的气-固连续相混合物,消除了燃料颗粒间的“间隙效应”^[30-31],提高了传热效率,同时活性 H 的迅速燃烧会释放大能量,提高复合体系火焰传播阶段的燃烧速率。MgH₂ 分解释放的活性 H 对于燃烧过程的正面效应,使复合体系火焰传播速度在 Mg 促进作用的基础上得到进一步提升。ABM-H 较快的火焰传播速度,表明了其具有更高的燃烧反应活性,添加在炸药或推进剂中可有效的提升复合体系的能量输出效率。

对高活性样品 ABM-H 做进一步分析,图 8 为不同质量浓度下 ABM-H 火焰传播高度和速度随时间变化曲线。结果表明,质量浓度为 375.0, 437.5, 500.0,



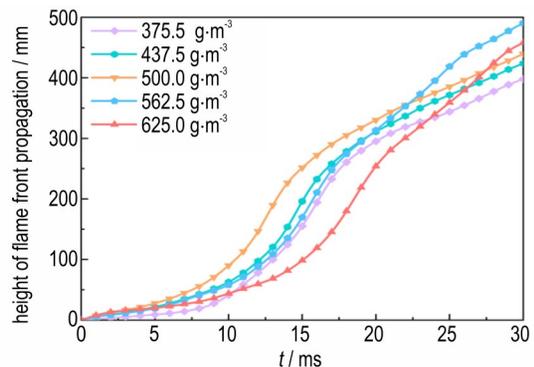
a. flame propagation height



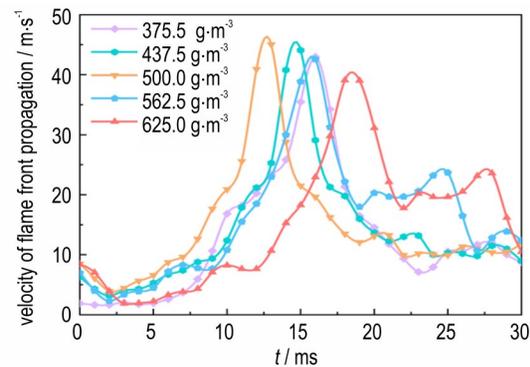
b. flame propagation velocity

图 7 质量浓度为 625 g·m⁻³ 的 3 种样品火焰传播高度和传播速度与时间的关系曲线

Fig. 7 Curves of flame propagation height and propagation speed versus time for three samples with mass concentration of 625 g·m⁻³



a. flame propagation height



b. flame propagation velocity

图 8 不同质量浓度 ABM-H 样品火焰传播高度和传播速度与时间的关系曲线

Fig. 8 Curves of flame propagation height and propagation speed versus time for ABM-H samples with different mass concentrations

562.5, 625.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 ABM-H 火焰传播速度分别在 16, 15, 13, 16, 18 ms 时达到峰值, 为 43.0, 44.1, 45.1, 42.6, 39.1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着 ABM-H 质量浓度的增加, 火焰传播速度峰值呈先增大后减小趋势, 当质量浓度为 500.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 其火焰传播速度在较短的时间达到峰值, 且峰值最大。分析认为, 质量浓度低于 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 燃烧管内空气含量充足, 火焰传播速度随着样品浓度的增加而增加。当质量浓度超过 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 燃烧管内粉尘颗粒增加, 空气相对减少, 不足以为燃烧反应提供足量氧气, 火焰传播速度随着样品浓度的增加而下降。

图 9 是质量浓度为 375.0, 437.5, 500.0, 562.5, 625.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 Al, ABM, ABM-H 燃烧持续时间与火焰传播速度峰值汇总。图 9a 的结果表明, 3 种样品的燃烧持续时间均与质量浓度呈正相关, 样品量越多, 燃烧反应所需时间越长, 因此样品的燃烧持续时间不仅和 B 的添加量有关, 同时也与质量浓度有关; 图 9b 的结果表明, 三种样品的火焰传播速度峰值均随着质量浓度的上升呈先增大后减小的趋势, 燃烧管内空气的相对含量是造成这种一致性趋势的原因。

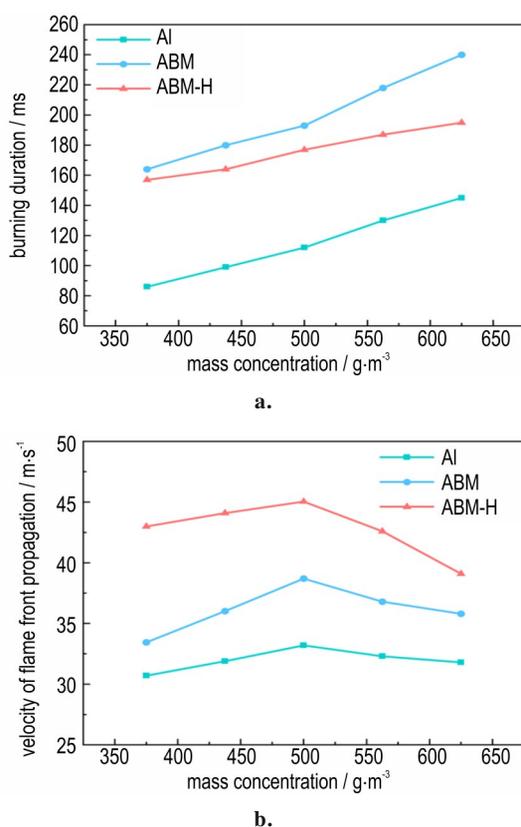


图 9 3 种样品燃烧持续时间和火焰传播速度峰值
Fig. 9 Combustion duration and peak flame propagation velocity for three samples

2.4 火焰红外瞬态温度场

对火焰传播速度最快的样品浓度做进一步分析, 通过红外高速摄像系统记录燃烧管口火焰瞬态温度场域时空分布特性, 计火焰冲出管口平面时刻为 0 时刻。图 10 为质量浓度 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时 3 种样品火焰表面最高温度随时间变化曲线。结果表明, 随着燃烧的进行 3 种样品的火焰表面最高温度均呈现先突跃式上升再缓慢下降的变化趋势, 火焰表面最高温度达到峰值是一个瞬态过程。纯 Al、ABM、ABM-H 的火焰表面最高温度的峰值分别为 1828, 1717, 1856 $^{\circ}\text{C}$; ABM 的温度峰值和升温速率均低于纯 Al; ABM-H 的温度峰值和升温速率均高于纯 Al。此外, ABM 与 ABM-H 的温度下降速率均低于纯 Al, 其中 ABM 的温度下降速率最低。分析认为: 在火焰燃烧过程中, Mg、Al 燃烧释放的能量一部分被用于蒸发去除 B 表面具有较高黏性的液态氧化膜, 因此, ABM 的温度场域整体温度降低, 火焰表面最高温度的上升速率和峰值均低于纯 Al。MgH₂ 受解放出的活性 H 形成了可燃气-固连续相混合物, 提高了传热效率^[30-31], 并且活性 H 参与反应产生高温, 提高了 ABM-H 温度场域的整体温度、火焰表面最高温度的上升速率和峰值。同时复合体系中的 B 在燃烧过程中黏性液态氧化物不断产生与去除使火焰持续时间显著延长, 火焰表面最高温度下降速率降低。

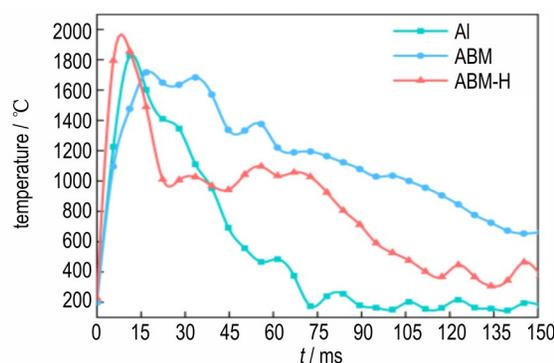


图 10 3 种样品火焰表面最高温度随时间的变化曲线
Fig. 10 Variation curves of maximum flame surface temperature with time for three samples

综合高速摄像系统与高速红外系统记录的结果, ABM 的火焰表面最高温度的峰值较纯 Al 略低, 但燃烧持续时间最长, 温度下降速率最低; ABM-H 的火焰传播速度峰值、火焰表面最高温度的峰值、升温速率均最高。两种样品火焰传播过程与火焰表面温度场域变化过程间的一致性表明: ABM 在燃烧持续时间上表现出较好的热效应, ABM-H 在火焰传播速度和温度上升速率上表现出较高的反应活性。

图 11 为 3 种样品表面火焰温度达到峰值时的二维与三维红外温度分布云图。结果表明,3 种样品均在燃烧管上方形成近似蘑菇状的温度场,整体上以燃烧管纵向对称轴呈轴对称分布,火焰中心温度最高,并向周围逐渐降低。这是由于样品被高速气流喷出,脱离燃烧管壁束缚后继续向上运动的同时,均匀向四周扩散,先于火焰到达管外形成了蘑菇状的粉尘云,同时大量粉尘被气流裹挟仍沿燃烧管纵向继续运动,燃烧反应区主要集中在燃烧管正上方中心粉尘浓度较大的区域,而管口周围粉尘浓度较低,反应相对不剧烈。其中,相较于纯 Al,ABM 中 B 的引入明显减少了高温区域的分布,ABM-H 中引入 MgH₂ 后,高温区域明显扩大,造成这种现象的原因与图 10 火焰表面最高温度的峰值变化原因一致。

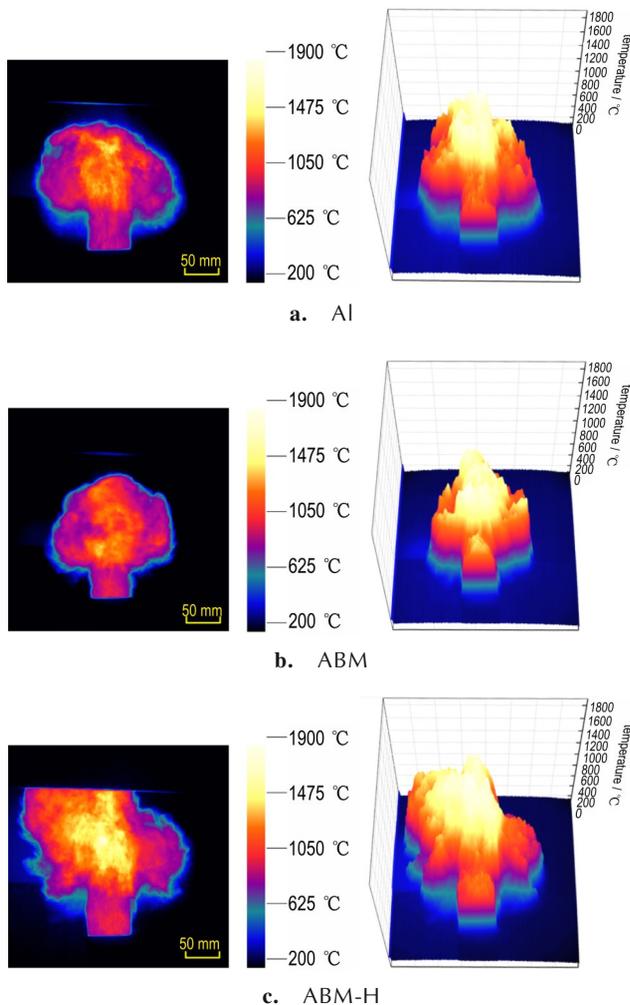


图 11 不同样品火焰表面最高温度达到峰值时的红外瞬态温度场

Fig. 11 Infrared transient temperature field of different samples at the peak of the highest flame surface temperature

3 结论

(1) ABM 的最小点火能量为 160~170 mJ, 显著高于 Al; 燃烧热值为 34.1 MJ·kg⁻¹, 相较于 Al 提高了 14.4%; 在质量浓度 625 g·m⁻³ 时, ABM 相较于 Al 的燃烧持续时间增加了 65.5%, 火焰传播速度峰值增加了 12.6%。ABM 的最小点火能量高, 燃烧热值和燃烧持续时间均有明显提升, 在安全性和燃烧性能提升的同时具有较好的热效应。

(2) ABM-H 的最小点火能量为 100~110 mJ, 高于 Al; 燃烧热值为 32.2 MJ·kg⁻¹, 相较于 Al 提高了 8.1%; 在质量浓度 625 g·m⁻³ 时, ABM-H 相较于 Al 的燃烧持续时间增加了 34.5%, 火焰传播速度峰值增加了 23.0%。相比于 ABM, ABM-H 的最小点火能量低, 火焰传播速度快, 反应较为迅速, 在安全性和燃烧性能提高的同时具有较高的反应活性。

(3) ABM-H 在质量浓度 375~625 g·m⁻³ 范围内, 火焰传播速度峰值呈先增后减的趋势, 在 500 g·m⁻³ 时最大, 为 45.05 m·s⁻¹。质量浓度继续上升, 燃烧管内空气相对减少, 不利于反应的进行, 火焰传播速度峰值下降。同时在质量浓度 500 g·m⁻³ 时, ABM-H 的火焰表面最高温度的上升速率最快, 峰值为 1856 °C, 相较于 Al 和 ABM 分别提高了 1.5% 和 7.6%。

参考文献:

- [1] 刘鹤欣, 赵凤起, 秦钊, 等. 固体含能材料点火引燃技术研究进展[J]. 火炸药学报, 2023, 46(8): 669-687.
LIU He-xin, ZHAO Feng-qi, QIN Zhao, et al. Progress in research on ignition and combustion technologies of solid energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(8): 669-687.
- [2] 邓正亮, 王亚军, 刘瑞华, 等. 铝热剂应用研究进展[J]. 火炸药学报, doi: 10.14077/j.issn.1007-7812.202312003.
DENG Zheng-liang, WANG Ya-jun, LIU Rui-hua, et al. Progress in research on applications of aluminothermic agents [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, doi: 10.14077/j.issn.1007-7812.202312003.
- [3] 胡宏伟, 宋浦, 邓国强, 等. 温压炸药的特性及发展现状[J]. 力学进展, 2022, 52(1): 53-78.
HU Hong-wei, SONG Pu, DENG Guo-qiang, et al. Characteristics and development status of thermobaric explosives [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(1): 53-78.
- [4] NIKITA M, YURII F, ALLA P, et al. Influence of particle size and mixing technology on combustion of HMX/Al compositions [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010, 35(3): 226-232.
- [5] 宋江伟, 杨文进, 张军旗, 等. 铝基贮氢复合燃烧剂在水下炸药中的应用[J]. 含能材料, 2023, 31(1): 35-40.
SONG Jiang-wei, YANG Wen-jin, ZHANG Jun-qi, et al. Application of aluminum-based hydrogen storage composite propellant in underwater explosives [J]. *Chinese Journal of Ener-*

- getic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(1): 35-40.
- [6] 闫石, 潘兵, 袁庆庆, 等. 球形 Al-Si 合金燃料的制备及其反应特性[J]. 含能材料, 2020, 28(8): 766-772.
YAN Shi, PAN Bing, YUAN Qing-qing, et al. Preparation and reaction characteristics of spherical Al-Si alloy fuel[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(8): 766-772.
- [7] REN Li, WANG Jian, MAO Yao-feng, et al. Synthesis of Al/B/graphite fluoride microspheres with enhanced energetic properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 477:147013.
- [8] 陈记合, 时训先, 孟祥豹, 等. 典型金属粉尘燃爆抑制技术研究现状[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(S2): 159-165.
CHEN Ji-he, SHI Xun-xian, MENG Xiang-bao, et al. Current status of research on suppression technology for typical metal dust deflagration[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(S2): 159-165.
- [9] 李红玉, 樊运晓. 基于系统思考的 AL Solutions 粉尘爆炸事故分析[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(2): 90-95.
LI Hong-yu, FAN Yun-xiao. Dust explosion accident analysis of AL Solutions based on systems thinking[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(2): 90-95.
- [10] 吕辰, 王信群, 徐海顺, 等. 超细 Al(OH)₃ 惰化粉体对铝合金抛丸废弃物粉尘的爆炸防控效果试验研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(11): 3950-3959.
LÜ Chen, WANG Xin-qun, XU Hai-shun, et al. Experimental study on the effectiveness of ultra-fine Al(OH)₃ inert powder in explosion prevention and control of aluminum alloy shot peening waste[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(11): 3950-3959.
- [11] 宋江伟, 杨文进, 张军旗, 等. 铝基贮氢复合燃烧剂在水下炸药中的应用[J]. 含能材料, 2023, 31(1): 35-40.
SONG Jiang-wei, YANG Wen-jin, ZHANG Jun-qi, et al. Application of aluminum-based hydrogen storage combustion agents in underwater explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(1): 35-40.
- [12] 王超, 张皓, 王迎春, 等. 铝-硼合金粉体的显微结构与燃烧特征[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(4): 568-574.
WANG Chao, ZHANG Hao, WANG Ying-chun, et al. Microstructure and combustion characteristics of aluminum-boron alloy powders[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2021, 39(4): 568-574.
- [13] 卢国菊, 于丽雅, 高彩军. 铝粉及铝镁混合粉的爆炸特性[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(6): 82-85.
LU Guo-ju, YU Li-ya, GAO Cai-jun. Explosion characteristics of aluminum powder and aluminum-magnesium mixed powder[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2022, 32(6): 82-85.
- [14] 张建侃, 赵凤起, 秦钊, 等. 铝基合金燃料的研究及其在固体推进剂中的应用进展[J]. 火炸药学报, 2023, 46(2): 101-116.
ZHANG Jian-kan, ZHAO Feng-qi, QIN Zhao, et al. Research on aluminum-based alloy fuels and their application progress in solid propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(2): 101-116.
- [15] 王德海, 林国忠, 高大元, 等. 硼铝复合粉在含能材料中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 157-163.
WANG De-hai, LIN Guo-zhong, GAO Da-yuan, et al. Application of boron-aluminum composite powders in energetic materials[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(8): 157-163.
- [16] 陈愿, 陈相, 蒋伟, 等. 硼含量对含铝炸药水下爆炸能量的影响[J]. 爆破器材, 2015, 44(6): 1-4.
CHEN Yuan, CHEN Xiang, JIANG Wei, et al. The effect of boron content on the underwater explosion energy of aluminum-containing explosives [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(6): 1-4.
- [17] 高明, 郭晓燕, 邹美帅, 等. 镁/铝合金水反应金属燃料推进剂的燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2015, 38(2): 75-80.
GAO Ming, GUO Xiao-yan, ZOU Mei-shuai, et al. Combustion performance of magnesium/aluminum alloy water reaction metal fuel propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(2): 75-80.
- [18] 徐敏潇, 刘大斌, 徐森. 硼含量对燃料空气炸药爆炸性能影响的试验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(5): 886-891.
XU Min-xiao, LIU Da-bin, XU Sen. Experimental study on the influence of boron content on the explosive performance of fuel-air explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(5): 886-891.
- [19] 陈曦, 邹建新, 曾小勤, 等. 镁基储氢材料在含能材料中的应用[J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 1-8.
CHEN Xi, ZOU Jian-xin, ZENG Xiao-qin, et al. Application of magnesium-based hydrogen storage materials in energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(3): 1-8.
- [20] ZHANG Qi-wei, CHENG Yang-fan, ZHANG Bei-bei, et al. Deflagration characteristics of freely propagating flames in magnesium hydride dust clouds [J]. *Defence Technology*, 2024, 31: 471-483.
- [21] 张洋, 徐司雨, 赵凤起, 等. MgH₂ 对含能材料点火燃烧性能影响的实验研究[J]. 火炸药学报, 2021, 44(4): 504-513.
ZHANG Yang, XU Si-yu, ZHAO Feng-qi, et al. Experimental study on the effect of MgH₂ on the ignition and combustion performance of energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(4): 504-513.
- [22] 张云, 赵懿明, 许张归, 等. MgH₂ 粉尘爆炸的能量释放特性规律[J]. 火炸药学报, 2022, 45(6): 898-904.
ZHANG Yun, ZHAO Yi-ming, XU Zhang-gui, et al. Energy release characteristics of MgH₂ dust explosions[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(6): 898-904.
- [23] 张云, 贾月, 杨振欣, 等. MgH₂ 粉尘火焰传播过程与热辐射特性[J]. 火炸药学报, 2023, 46(2): 157-162.
ZHANG Yun, JIA Yue, YANG Zhen-xin, et al. Flame propagation process and thermal radiation characteristics of MgH₂ dust [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(2): 157-162.
- [24] ZHAO Wan-xia, SUN Zhi-wei, ALWAHABI Z T. Emissivity and absorption function measurements of Al₂O₃ and SiC particles at elevated temperature for the utilization in concentrated solar receivers[J]. *Solar Energy*, 2020, 207: 183-191.
- [25] 张志苗. 无定形硼粉的改性及复合粒子的制备与点火性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
ZHANG Zhi-miao. Modification of amorphous boron powder and preparation and ignition properties of composite particles [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [26] CHEN Bin-bin, XIA Zhi-xun, HUANG Li-ya, et al. Ignition and combustion model of a single boron particle[J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 165:34-43.
- [27] WU Xing-liang, XU Sen, PANG Ai-min, et al. Hazard evaluation of ignition sensitivity and explosion severity for three typical MH₂ (M=Mg, Ti, Zr) of energetic materials[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 1262-1268.
- [28] LIU Lei-li, LI Jie, ZHANG Ling-yao, et al. Effects of

- magnesium-based hydrogen storage materials on the thermal decomposition, burning rate, and explosive heat of ammonium perchlorate-based composite solid propellant[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342: 477–481.
- [29] 钟英鹏. 镁粉爆炸特性实验研究及其危险性评价[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
ZHONG Ying-peng. Experimental study on the explosive characteristics of magnesium powder and its hazard assessment [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [30] JULIEN P, VICKERY J, GOROSHIN S, et al. Freely-propagating flames in aluminum dust clouds[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(11): 4241–4253.
- [31] CHENG Yang-fan, MENG Xiang-rui, MA Hong-hao, et al. Flame propagation behaviors and influential factors of TiH₂ dust explosions at a constant pressure[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(33):16355–16363.

Combustion Characteristics of Ternary Reactive Metal Fuels Al/B/Mg and Al/B/MgH₂

CHENG Zhi-peng¹, XIA Yu¹, LUO Yi-min¹, MA Teng¹, XU Fei-yang¹, ZHANG Yu¹, WU Xing-liang¹, XU Sen^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. China National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials, Nanjing 210094, China)

Abstract: To investigate the combustion characteristics of ternary active metal fuels Al/B/Mg (ABM) and Al/B/MgH₂ (ABM-H), the heat of combustion and minimum ignition energy were studied by using an oxygen bomb calorimeter and a Hartmann tube, respectively. The sub-transient process of flame propagation and the spatiotemporal distribution characteristics of temperature fields were determined by using a high-speed camera system and a high-speed infrared camera system. The results indicate that the calorific values of ABM and ABM-H are 34.1 and 32.2 MJ·kg⁻¹, respectively, exhibiting increases of 14.4% and 8.1% over pure Al (29.8 MJ·kg⁻¹). The minimum ignition energies of ABM, ABM-H, and Al are 160–170, 100–110, and 20–30 mJ, respectively. Compared to pure Al, the combustion duration of ABM and ABM-H increase by 65.5%, 34.5% and the peak flame propagation velocities increase by 12.6%, 23.0%, respectively, at a mass concentration of 625 g·m⁻³. At a mass concentration of 500 g·m⁻³, ABM-H and ABM exhibit the largest peak flame propagation velocities by 45.05, 38.7 m·s⁻¹, and the maximum temperatures peak of flame surface by 1856, 1717 °C, respectively, where ABM-H shows a 7.6% improvement on temperatures peak of flame surface and a faster heating-rate compared to ABM. It suggests that the ABM and ABM-H formulations significantly reduce the explosion risk of the dust/air mixture, and significantly improving the combustion performance. ABM demonstrates superior thermal effects in calorific value and duration of combustion, whereas ABM-H exhibits higher reactivity in terms of minimum ignition energy, flame propagation speed, and temperature rise rate.

Key words: ternary reactive metallic fuels; minimum ignition energy; flame propagation characteristics; temperature field distribution

CLC number: TJ55;O64

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024100

Grant support: National Natural Science Foundation of China(No. 12272184)

(责编:高毅)