

文章编号:1006-9941(2023)01-0035-06

铝基贮氢复合燃烧剂在水下炸药中的应用

宋江伟^{1,2}, 杨文进^{1,2}, 张军旗^{1,2}, 张劲松^{1,2}, 徐森³

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁 沈阳 110016; 3. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用嵌合组装的方式制备了含15%硼和15%金属氢化物MgH₂的铝基贮氢复合燃烧剂Q3, Q3粉体为类球形, 具有较高的理论热值34.8 MJ·kg⁻¹。在空气气氛下采用热重分析方法测试了球铝与Q3粉体的氧化性能, 结果表明, Q3起始氧化温度为430 °C, 比球铝降低了约100 °C; 1000 °C时, Q3氧化增重量60%, 明显优于铝粉的增重量(23%), 显示Q3具有点火性能较好和完全氧化程度较高的特点。对金属粉含量为35%的RDX基炸药开展水下爆炸试验测试, 铝基贮氢复合燃烧剂Q3等质量替代铝粉, 同比含铝炸药水下爆炸比冲击波能降低3.0%, 比气泡能提高9.5%, 爆炸总能量提高7.6%。铝基贮氢复合燃烧剂Q3中金属氢化物和铝组分有利于提高硼组分的释能效率和释能速率, 提高了炸药水下爆炸总能量。

关键词: 铝基贮氢复合燃烧剂; 嵌合组装; 水下爆炸; 金属氢化物

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2021198

0 引言

铝粉作为一种廉价且成熟的燃烧剂, 广泛应用于各类火炸药配方中, 可显著提高爆热和能量水平^[1-2]。但是铝粉的理论燃烧热明显低于铍、硼等, 难以满足高能配方的要求; 而从燃烧动力学角度看, 铝粉燃烧过程中受表面致密氧化层的限制, 点火延迟时间长, 降低了铝粉的释能速率和释能效率^[3-4]。

铝粉的优化改性研究主要围绕改善点火燃烧性能和提高粉体能量水平两个方面。为了优化铝粉在点火延迟、释能速率及效率等方面的应用性能, 很多研究采用了将不同金属燃料与铝进行合金化的方法, 比如在铝基体中加入易点火、燃速快的Mg金属形成Mg-Al合金^[5-6]; 加入高密度重金属Ti^[7]、Zr^[8]等制备高体积热

值的Ti-Al合金和Zr-Al合金; 加入促燃剂制备Al-FeF₃^[9]、Al-PTFE^[10]、Al-PE^[11]等; 也有研究将点火性能良好的Ni金属包覆修饰在铝粉表面制备Ni-Al燃烧剂^[12]; 有机聚合物表面修饰的PMMA-Al^[13]、PDA-Al^[14]、NC-Al^[15]、金属和金属氧化物@Al^[16-17]等, 在点火燃烧过程中, 这些促燃剂的加入可以破坏铝表面形成的致密氧化层, 降低铝的团聚燃烧, 提高粉体的点火性能和反应活性。但是, 这些方法在一定程度上降低了铝粉的能量性能, 比如10%含量的聚乙烯与铝粉复合后用于推进剂, 发动机比冲降低1%^[10], Al-PTFE^[9]、Ni-Al^[11]等燃烧剂同样明显降低了推进剂实测比冲。而纳米铝粉由于其活性铝含量低、成药工艺性能较差、成药药柱密度下降及机械性能变差等原因^[18-19]还不能替代铝粉大量使用。

为了提高铝粉的能量水平, 一般采用添加高能组分的方法, 常用的是铝粉中通过混合或者复合的方式加入硼组分^[20,23], 也有研究采用加入高质量热值的Li制备Li-Al合金^[21]或者含氟氧化剂提高铝基粉体的释能^[22]等方法。

综上, 研发高能量水平、高燃烧效率的新型高能燃烧剂, 目前仍是火炸药领域急迫而具有重要意义的工作。为此, 本研究将点火性能较好的金属氢化物

收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2021-08-26

网络出版日期: 2022-05-27

作者简介: 宋江伟(1978-), 男, 副研究员, 主要从事金属燃料的制备及氧化动力学研究。e-mail: jwsong@imr.ac.cn

通信联系人: 张军旗(1972-), 男, 研究员, 主要从事高能金属燃烧剂的研究。e-mail: jqzhang@imr.ac.cn

张劲松(1963-), 男, 研究员, 主要从事高性能多孔陶瓷、高能金属燃烧剂等研究。e-mail: jshzhang@imr.ac.cn

引用本文: 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 in Underwater Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(1):35-40.

(MgH_2)和高能量的硼粉与铝粉基体采用嵌合组装的方法制备了铝基贮氢复合燃烧剂Q3,对其设计与制备、成药性、安全性、长储性能、爆炸性能和释能规律等进行了研究。

1 铝基贮氢复合燃烧剂的设计制备及表征

1.1 铝基贮氢复合燃烧剂的设计与制备

1.1.1 原材料

铝粉,鞍钢铝粉实业有限公司,型号为FLQT-4,纯度大于99.5%;镁粉,唐山威豪镁粉有限公司,325目,纯度大于99%;硼粉,丹东市化工研究所有限责任公司,中位径 $1\ \mu\text{m}$,纯度95%;正庚烷,国药集团化学试剂有限公司,分析纯。

1.1.2 样品制备

自制氢化镁(MgH_2):将镁粉与等质量的正庚烷加入到容积为2 L的钢质球磨罐中,磨球采用直径10 mm的钢质球,磨球与物料的球料比为10:1,在惰性气体手套箱中进行装料,密封后固定于行星式球磨机,以 $400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速球磨4 h后抽干液体,将球磨后的镁粉转移至高压反应器中,在4 MPa的氢气气氛下缓慢升温至 $400\ ^\circ\text{C}$ 并保温5 h即可得到氢化镁粉体。

铝基贮氢复合燃烧剂:氢化镁燃烧热值略低于铝($31\ \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)为 $29\ \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,但是具有良好的点火性能,而硼粉的能量水平虽然高达到 $58\ \text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,但其在燃烧过程中释能效率较低。兼顾燃烧剂粉体的点火性能和能量性能,铝基贮氢复合燃烧剂是以铝为基体,按照铝粉、氢化镁、硼粉质量比70:15:15加入到球磨罐中,并加入等质量的正庚烷作为分散剂。磨球采用直径10 mm的钢质球,磨球与物料的球料比为10:1,在惰性气体手套箱中进行装料,密封后固定于行星式球磨机,以 $400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速球磨24 h后抽干液体;所得粉体转入高速气流球化机中进行颗粒的整形处理,得到类球形铝基贮氢复合燃烧剂,编号为Q3。

水下爆炸测试所用的药柱:采用RDX/AP/金属粉的炸药配方,其中金属粉为铝粉或者铝基贮氢复合燃烧剂Q3,金属粉占比为35%,混合形成造型粉后,采用模具对烘干的造型粉进行压装成型,所得药柱样品为 $\Phi 76\ \text{mm}$ 圆柱形,单发400 g。

1.1.3 测试仪器与方法

粉末X射线衍射(XRD):日本理学RIGAKU D/Max-2500型X射线衍射仪,铜靶 K_α 为 $0.154\ \text{nm}$ 。

扫描电子显微镜(SEM):日本日立公司HITACHI SU-70场发射扫描电镜。

氢含量分析:美国LECO公司RHEN602氢分析仪。

差示扫描量热(DSC):美国TA公司Q-1000型差示扫描量热仪,氩气常压气氛,升温速率 $10\ ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,试样皿为铝坩埚。

热重分析(TG):德国耐驰公司STA449F3热分析仪,常压空气气氛,升温速率 $10\ ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,试样皿为氧化铝坩埚。

热值测试:美国PARR公司Parr 6200型全自动氧弹量热仪,氧气气氛,压力为3 MPa,试样量约0.5 g,试样皿为石英坩埚。

真空安定性:采用GJB 772A-1997的方法501.2真空安定性试验压力传感器法(试样 $(5.00\pm 0.01)\ \text{g}$, $100\ ^\circ\text{C}$ 处理48 h,每克试样放气量 $\leq 2\ \text{mL}$,安定性合格)。

相容性:采用GJB 772A-1997的方法501.2真空安定性试验压力传感器法(混合试样 $(5.00\pm 0.01)\ \text{g}$, $100\ ^\circ\text{C}$ 处理40 h,净增放气量 $R < 3\ \text{mL}$,相容性合格)。

1.2 铝基贮氢复合燃烧剂的基本性能表征

图1给出了铝基贮氢复合燃烧剂粉体Q3的扫描电镜照片。由图1可见,Q3为微米级类球形粉体,表面比较光滑,照片中并没有看到单独的铝粉、氢化镁和硼粉的颗粒,这表明这些原材料粉体在嵌合组装过程中通过铝基体反复地焊合、破碎过程,各个物料已经均匀分布在铝基体中。

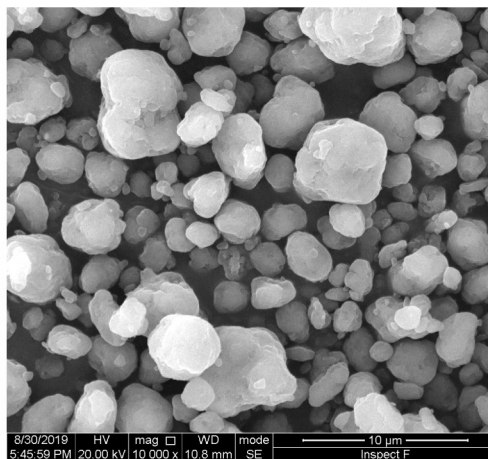


图1 铝基贮氢复合燃烧剂Q3粉体的扫描电镜照片

Fig.1 SEM image of Q3 powders

铝基贮氢复合燃烧剂粉体Q3的SEM-EDS能谱分析结果如图2所示。由图2可知,铝元素和镁元素在Q3粉体中分布均匀,这是由于各组分在球磨嵌合过

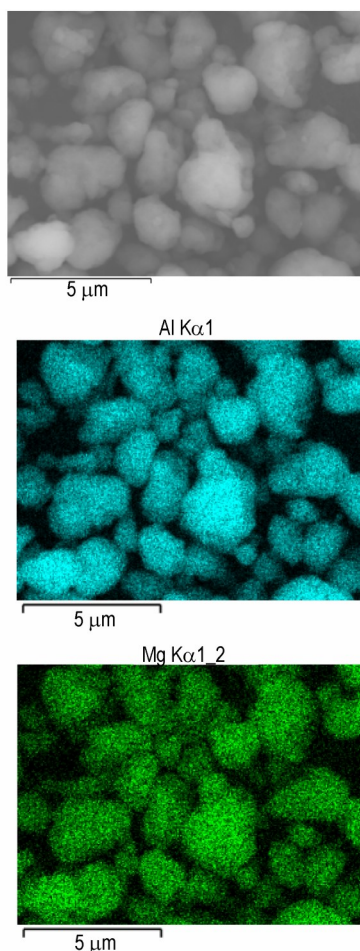


图2 铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 的 SEM-EDS 谱图
Fig.2 SEM-EDS images of Q3 powders

程中,在磨球之间及磨球和罐壁的撞击和摩擦作用下,铝粉与其他组分经过反复的冷焊和断裂过程后,各组分在铝基体中弥散均匀分布,这与图1的SEM结果中无原始组分颗粒的结果相符。

图3为原料硼、铝、自制氢化镁以及铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 的 XRD 谱图。由图3可见,原料无定形硼粉中存在少量的晶体硼,铝粉和自制氢化镁纯度较高,而 Q3 粉体给出的谱图中只有氢化镁和铝的谱峰,其中 38.4° , 44.6° , 64.8° , 77.7° 的谱峰归于铝基体, 28.0° , 35.7° , 54.5° 的谱峰归于氢化镁。由于氢化镁在粉体中含量较小为 15%,因此谱峰较小, $10^\circ\sim 20^\circ$ 左右的无定形态宽峰归因于加入的硼组分,这表明在球磨过程中氢化镁和硼颗粒仅嵌合组装在铝基体中而没有发生其他的化学反应。

图4给出了铝粉和铝基贮氢复合燃烧剂粉体 Q3 在空气气氛下升温过程中的氧化特性曲线,升温速率为 $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。由图4可见,以质量增重 1% 的温度为起始氧化温度点,铝粉起始氧化温度为 537°C ,而

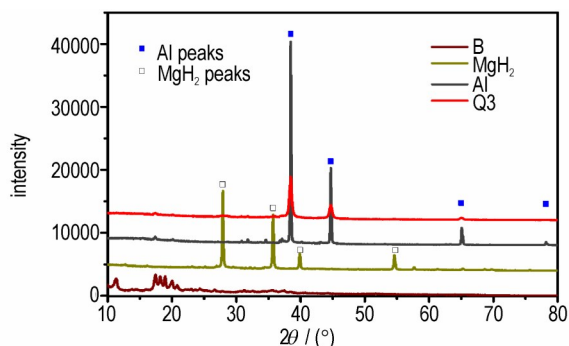


图3 Al、 MgH_2 、B 及铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 的 XRD 谱图
Fig.3 XRD patterns of Al, MgH_2 , B and Q3 powders

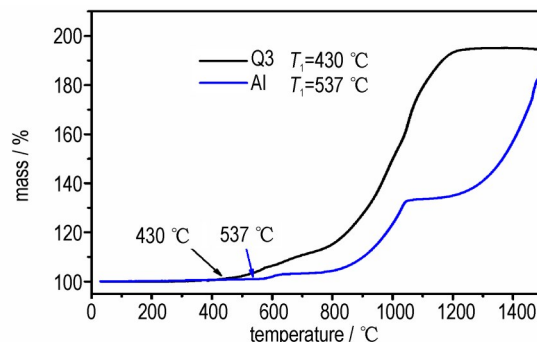


图4 铝粉及铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 在空气气氛下的热重曲线

Fig.4 TG curves of Al and Q3 powders in air

铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 起始氧化温度为 430°C ,比铝粉降低了约 100°C ^[23],这是由于金属氢化物比铝粉更容易在较低温度下发生氧化反应,复合到铝基体中后使复合粉体显示出了起始氧化温度低的特点,这有利于铝基贮氢复合燃烧剂在火炸药配方中快速点火燃烧。从氧化增重曲线来看,铝粉在 $600\sim 650^\circ\text{C}$ 氧化增重 3% 后出现了氧化反应缓慢的平台区,这可能是由于随着粉体表面铝层的氧化,形成的致密氧化铝壳层阻碍了氧气氛渗透到颗粒内部与活性铝的反应;随着温度的升高至约 800°C ,内部熔融的液态铝膨胀挤破了致密的氧化铝壳层后继续与氧气氛接触反应;这个现象也出现在 $1000\sim 1200^\circ\text{C}$ 的升温过程中。而 Q3 粉体由于弥散分布着氢化镁和硼颗粒,氧化过程中无法形成致密的氧化铝壳层,利于氧气氛持续与内部活性金属发生反应,使得 Q3 粉体能够快速地氧化增重。从氧化增重速率和氧化增重总量来看,铝基贮氢复合燃烧剂升温到 1200°C 氧化过程完成,增重量为 95%,显著高于铝粉增重量 35%;而铝粉到 1500°C 氧化增重 84%,接近其理论最大增重量 89%,这显示出了铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 粉体的氧化速率比铝粉更快,其氧化完全程度更高。

2 铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 在水下爆炸配方中的应用

2.1 铝基贮氢复合燃烧剂长储性和使用安全性评价

为了将铝基贮氢复合燃烧剂应用于炸药配方中, 对长贮性及使用安全性进行了研究。将 Q3 采用铝箔袋密封包装后置于干燥柜中室温贮存, 对相同工艺过程新制备的 Q3 及其贮存 2 年后的 Q3 粉体在 Ar 环境下进行 DSC 分析, 结果如图 5 所示。由图 5 可见, Q3 粉体长储前后均只在约 360 °C 左右出现了吸热峰, 均没有放热峰出现, 这归因于 Q3 粉体中氢化镁的分解并释放出氢气。图 5 中无其他吸热或者放热峰, 这表明粉体中 MgH_2 及分解产生的 Mg 与 Al、B 等组分之间没有发生化学反应。

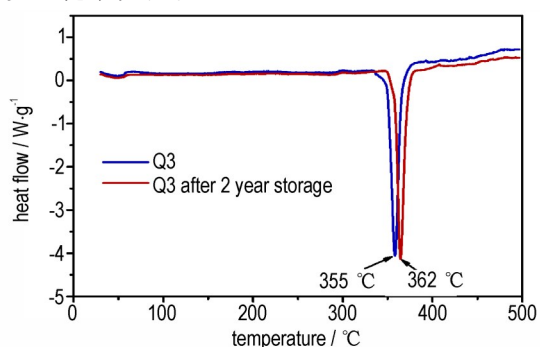


图 5 Q3 粉体贮存前后的 DSC 曲线

Fig.5 DSC curves of Q3 before and after 2 year storage

图 6 给出了 Q3 及其长储 2 年后粉体的 XRD 谱图, 长储前后均只出现 Al 和 MgH_2 的谱峰(其中 38.4° 、 44.6° 、 64.8° 、 77.7° 的谱峰归于铝基体, 28.0° 、 35.7° 和 54.5° 的谱峰归于氢化镁), 二者相对含量无明显变化, 谱图中在 $10^\circ \sim 22^\circ$ 之间的低峰归因于原材料硼粉中可能存在的少量晶体硼且长储前后无明显变化, 如图 6 所示。这表明粉体中各组分在长储过程中物相没有发生变化, 具有较好的长储稳定性。

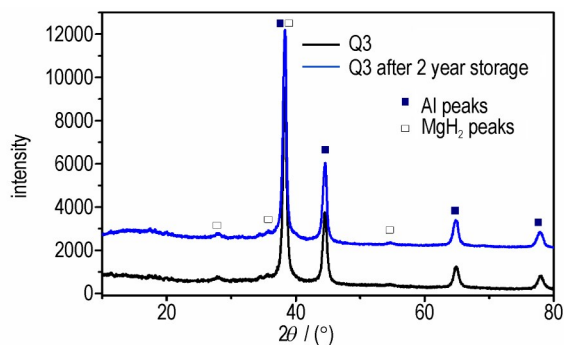


图 6 Q3 粉体贮存前后的 XRD 谱图

Fig.6 XRD patterns of Q3 and Q3 after 2 year storage

铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 及包装后长储 2 年的安定性、氢含量和热值结果见表 1。由表 1 可见, 贮存 2 年后的 Q3 的氢含量和热值与新制备的 Q3 测试结果无明显变化; 另外, 通过真空安定性测试, 贮存 2 年的 Q3 单位质量放气量为 $1.41 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 与新制备 Q3 放气量 $1.31 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 相比无显著变化, 这表明 Q3 具有良好的贮存性能, 与 DSC 热分析及 XRD 分析结果一致。

表 1 铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 及其长储 2 年后的安定性、氢含量和热值分析

Table 1 Properties of Q3 and Q3 after 2 year storage

sample	reactive gas production/ $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$	H content /%	heat value / $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q3	1.41	1.04	32.82
Q3 (after 2 year storage)	1.31	1.01	32.77

铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 及长储 2 年后 Q3 粉体在炸药配方中相容性测试结果见表 2。由表 2 可见, Q3 粉体放气量为 $1.71 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 而 Q3 粉体长储 2 年后粉体放气量为 $1.17 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 均满足炸药成药放气量小于 $2 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 的使用要求。扣除炸药配方主要组分 RDX+AP 以及 Q3 粉体自身放气量, RDX+AP 与 Q3 混合后放气量为 $0.87 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; 而 Q3 粉体长储 2 年后与 RDX+AP 混合后放气量为 $0.71 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 表明 Q3 粉体可以用于 RDX 基炸药的成药试验。

表 2 铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 及长储 2 年后 Q3 粉体在炸药配方中的相容性

Table 2 Compatibility of Q3 and Q3 after 2 year storage with the components in RDX-based explosive

No.	Q3	reactive gas production / $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$	Q3 after 2 years storage	reactive gas production / $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$
1	RDX+AP	0.20	RDX+AP	0.04
2	Q3	1.71	Q3	1.17
3	RDX+AP+Q3	0.87	RDX+AP+Q3	0.71

2.2 铝基贮氢复合燃烧剂在水下爆炸中的应用性能测试

水下爆炸是评估炸药爆炸总能量的可靠手段, 通常使用冲击波能量、气泡能量和总能量等参数来表征爆炸物的爆炸性能。将上述制备的铝基贮氢复合燃烧剂 Q3 等量替代铝粉用于 RDX 基金属化炸药, 采用压装法制备得到了用于水下爆炸试验的炸药药柱, 为了进行能量性能比较, 同时测试了含铝炸药和 TNT 炸药, 药柱质量均为 400 g。在 $8.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$ 水池中进

行,样品和传感器入水深度为4.0 m,传感器距离爆心的水平距离为3.0 m,如图7所示。

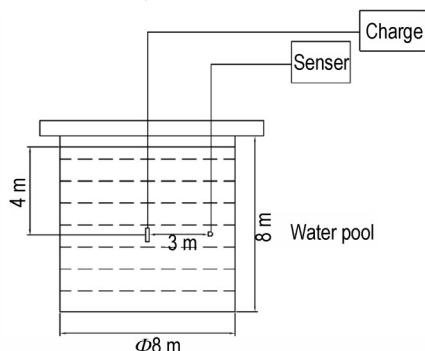


图7 水下爆炸测试示意图

Fig.7 Scheme of the underwater explosion test

水下爆炸测试结果见表3,其中TNT和含铝炸药为2发测试平均值,含Q3炸药为3发测试平均值。由表3可见,含Q3炸药爆炸比冲击波能 E_s 为 $1.085 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,比含铝炸药爆炸比冲击波能 $1.118 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低了3.0%,这可能是由于硼粉虽然潜热较高,但是在爆炸初始阶段的燃烧释能速率较低,难以为传播速度较快的水下冲击波贡献高能量,因此降低了爆炸的比冲击波能;但是含Q3炸药的比气泡能 E_b 为 $6.530 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,比含铝炸药的 $5.963 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著提高,提高值为9.5%,这是由于硼粉高热潜在爆炸高温环境中持续地释放出大量热量,提高了爆炸过程的比气泡能。含Q3炸药的爆炸总能量 E_0 为 $7.615 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,比含铝炸药 $7.310 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高了7.6%,这是因为在水下爆炸过程中金属氢化物和铝的快速释能燃烧促进高潜热硼粉的释能,从而提高了炸药爆炸总能量。

表3 TNT炸药和含Al、Q3的RDX基炸药水下爆炸结果

Table 3 Results of the underwater explosion energy of TNT and RDX-based explosives containing Al and Q3

explosive	specific shock wave energy $E_s/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	specific bubble energy $E_b/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	total explosion energy $E_0/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
TNT	0.819	2.524	3.343
Al/RDX-based	1.118	5.963	7.080
Q3/RDX-based	1.085	6.530	7.615

值得注意的是,由于硼粉的释能速率较低,硼粉和铝粉简单混合后用于金属化炸药比含铝炸药的爆炸比冲击波能降低约15%~26%^[24],而含Q3的金属化炸药比含铝炸药的爆炸比冲击波能降低约3%,可见,通过复合的方式将硼引入金属化炸药中能够有效提高硼的释能速率,改善硼的加入导致金属化炸药比冲击波能

大幅降低的问题。这可能是由于Q3粉体中的金属氢化物 MgH_2 快速点火燃烧促进了铝的燃烧释能,产生的高温环境有效提高了硼组分的释能速率,从而改善了含硼炸药爆炸总能量高但是比冲击波能明显降低的不足。

3 结论

(1)铝基贮氢复合燃烧剂Q3是一种具有点火性能好、能量水平高、释能效率高的新型高能金属燃烧剂,粉体理论热值达到了 $34.8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$,起始氧化温度为 $430 \text{ }^\circ\text{C}$,比铝粉的起始氧化温度 $537 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低了约 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,氧化完成温度为 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$,比铝粉的氧化完成温度 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低了约 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这种金属燃烧剂是通过嵌合组装的方式将点火性能好的金属氢化物以及能量密度高的硼燃料弥散分布在铝基体中,其中金属氢化物 MgH_2 和无定形硼含量均为15%。

(2)铝基贮氢复合燃烧剂Q3具有良好的贮存性能,在RDX基炸药配方中显示出良好的相容性,其替代铝粉应用于水下炸药配方的制药工艺和条件与含铝粉炸药相当。

(3)水下爆炸测试结果显示:铝基贮氢复合燃烧剂Q3替代铝粉用于RDX基炸药配方,比冲击波能降低了3.0%,比气泡能提高了9.5%,水下爆炸总能量提高了7.6%。

参考文献:

- [1] VERMA S, RAMAKRISHNA P A. Effect of specific surface area of aluminum on composite solid propellant burning[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2013, 29(5): 1200-1206.
- [2] 姚二岗,赵凤起,高红旭,等. 油酸包覆纳米铝粉/黑索今复合体系的热行为及非等温分解反应动力学[J]. *物理化学学报*, 2012, 28(4): 781-786.
YAO Er-gang, ZHAO Feng-qi, GAO Hong-xu, et al. Thermal behavior and non-isothermal decomposition reaction kinetics of aluminum nanopowders coated with an oleic acid hexogen composite system[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(4): 781-786.
- [3] 罗观,李海波,郑宝辉,等. 高活性金属在炸药中的应用思考[J]. *含能材料*, 2021, 29(10), 885-887.
LUO Guan, LI Hai-bo, ZHENG Bao-hui, et al. Application of highly active metal in explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(10): 885-887.
- [4] DREIZIN E L. Metal-based reactive nanomaterials[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(2): 141-167.
- [5] 刘洋. 铝基微纳米金属粉缓慢加热相应机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
LIU Yang. Study on the reaction mechanism of micron- and nano-sized aluminum-based powders in general heated system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [6] WANG Yi, JIANG Wei, LIU Hong-ying, et al. Thermal reactivity of nanostructure $\text{Al}_0.8\text{Mg}_{0.2}$ alloy powder used in thermites[J].

- Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(1): 9-13.
- [7] SHOSHIN Y L, TRUNOV M A, ZHU X, et al. Ignition of aluminum rich Al-Ti mechanical alloys in air[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144(4): 688-697.
- [8] 李林福,蔡水洲,徐长娟,等. 高活性集中放热的Al-Mg-Zr合金燃料的制备与性能[J]. 含能材料, 2016, 24(2): 137-143.
LI Lin-fu, CAI Shui-zhou, XU Chang-juan, et al. Preparation and performance of high reactive Al-Mg-Zr alloy fuels with intensive heat release[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(2): 137-143.
- [9] 朱朝阳,张思,夏德斌,等. Al-FeF₃复合燃料的制备及应用性能[J]. 含能材料, 2019, 27(9): 720-728.
ZHU Chao-yang, ZHANG Si, XIA De-bin, et al. Preparation and Application Performance of Al-FeF₃ composite fuel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(9): 720-728.
- [10] SIPPEL T R, SON S F, GROVEN L J. Aluminum agglomeration reduction in a composite propellant using tailored Al/PTFE particles[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161: 311-321.
- [11] SIPPEL T R, SON S F, GROVEN L J. Exploring mechanisms for agglomerate reduction in composite solid propellants with polyethylene inclusion modified aluminum [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162: 846-854.
- [12] VUMMIDI S L, ALY Y, SCHOENITZ M, et al. Characterization of fine nickel-coated powder as potential fuel additive[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 26(3): 454-460.
- [13] HUI L, YE H, ZHANG Y. Preparation of PMMA grafted aluminum powder by surface-initiated in situ polymerization[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(17): 7219-7224.
- [14] 祝青,吴东力,肖春,等. 仿生聚多巴胺对HMX、TATB和铝的界面性能研究[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 949-954.
ZHU Qing, WU Shu-li, XIAO Chun, et al. Bioinspired improving interfacial performances of HMX, TATB and aluminum power with polydopamine coating[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(11): 949-954.
- [15] LIU S, YE M, HAN A, et al. Preparation and characterization of NC/Al Nano-composite energetic materials[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 288(1): 349-355.
- [16] WANG Z, HU M, CHEN Z, et al. Study on the structure and properties of core-shell Fe/Al composite powder synthesized by MOCVD in fluidized bed[J]. *Advanced Powder Technology*. 2014, 25(2): 676-681.
- [17] HE W, TAO B, YANG Z, et al. Mussel-inspired polydopamine-directed crystal growth of core-shell n-Al@PDA@CuO metastable intermixed composites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 369:1093-1101.
- [18] BABUK, V, DOLOTKAZIN I, GAMSOV A, et al. Nanoaluminum as solid propellant fuel[J]. *Journal of Propulsion and Powder*, 2009, 25(2): 482-489.
- [19] JAYARAMAN K, ANAND K V, CHAKRAVARTHY S R, et al. Effect of nano-aluminium in plateau-burning and catalyzed composite solid propellant combustion [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156: 1662-1673.
- [20] ARKHIPOV V A, ZHUKOV A S, KUZNETSOV V T, et al. Ignition and combustion of condensed systems with energy fillers [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2018, 54(6): 689-697.
- [21] 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 characterization of spherical Al-Si alloy fuel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(8): 766-772.
- [22] VALLURI S K, SCHOENITZ M, DREIZIN E. Fluorine-containing oxidizers for metal fuels in energetic formulations[J]. *Defence Technology*, 2019, 15(1): 1-22.
- [23] MICHAEL L W. Synthesis, characterization and energetic performance of metal boride compounds for insensitive energetic materials[M]. USA, Utah University, 2012.
- [24] 封雪松,赵省向,刁小强,等. 含硼金属炸药水下能量的试验研究[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 21-24.
FENG Xue-song, ZHAO Sheng-xiang, DIAO Xiao-qiang, et al. Experimental Research of underwater energy of explosive containing boron/metal [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 21-24.

Application of Aluminum Based Hydrogen Storage Composite in Underwater Explosive

SONG Jiang-wei^{1,2}, YANG Wen-jin^{1,2}, ZHANG Jun-qi^{1,2}, ZHANG Jin-song^{1,2}, XU Sen³

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Shenyang 110016, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aluminum based hydrogen storage composite fuel namely Q3 with a content of boron 15% and MgH₂ 15% was prepared by means of chimeric assembly. The powder had a spheroidic morphology. Its theoretical combustion heat was as high as 34.8 MJ·kg⁻¹. Thermogravimetric Analysis (TGA) was employed to test the oxidation performance of spherical aluminum and Q3. The results indicated that the initial oxidation temperature of Q3 was 430 °C, which was around 100 °C lower than that of spherical aluminum. When the temperature was up to 1000 °C, the weight of Q3 increased by 60% due to the oxidation, which was higher than that of spherical aluminum (23%). This result indicated that the aluminum based hydrogen storage composite fuel had a better ignition performance and higher oxidability. The tests of underwater explosion with two RDX based explosive formulas containing 35% metal powder or equivalent Q3 were carried out respectively. The test results showed that for the formula with equivalent Q3, the explosion specific shock wave energy was reduced by 3.0%, the specific bubble energy was increased by 9.5%, and the total explosion energy was increased by 7.6% in contrast to the counterpart formula containing aluminum. The metal hydride and aluminum in aluminum based hydrogen storage composite fuel could effectively improve the energy release efficiency and rate of boron, resulting in increasing the total energy of the explosive in underwater explosion.

Key words: aluminum based hydrogen storage composite; chimeric assembly; underwater explosive; metal hydride

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021198

(责编: 王艳秀)