文章编号：1003-1480（2026）01-0100-06

典型储氢材料对RDX基温压炸药爆轰性能和热稳定性的影响研究

姚 佳[1]，汤有富[2]，张顺双[3]，王 浩[4]

（1. 易普力向红（湖南）机械化工有限责任公司，湖南 岳阳，414100；2. 深圳金源恒业科技有限公司，广东 深圳，518011；3. 山东泰山民爆器材有限公司，山东 日照，262301；4. 安徽理工大学 化工与爆破学院，安徽 淮南，232001）

摘 要：为探究典型储氢材料对 RDX 基温压炸药爆轰性能及热稳定性的影响，本研究通过空中爆炸实验与热分析实验，对分别添加 MgH_2、TiH_2 和 ZrH_2 3 种储氢材料的 RDX 基温压炸药的爆轰特性及热分解行为进行了深入分析。实验结果显示：相较于纯 RDX 炸药，RDX/MgH_2 温压炸药展示出更高的冲击波峰值压力和正冲量，分别达到 27.8 kPa 和 8.79 Pa·s，增幅分别为 3.73%和 5.52%；RDX/MgH_2 样品的热分解终止温度下降了 7℃，活化能降低了 9.7 kJ·mol^{-1}；而 RDX/TiH_2 和 RDX/ZrH_2 样品的热分解终止温度分别提升了 1.8 ℃和 4.6 ℃，活化能分别升高了 0.8 kJ·mol^{-1} 和 5.2 kJ·mol^{-1}。研究结果表明，MgH_2 能够显著增强 RDX 炸药的爆轰性能，但会对其热稳定性产生负面影响。相对而言，TiH_2 和 ZrH_2 的加入则对 RDX 炸药的热稳定性有改善作用。

关键词：储氢材料；温压炸药；爆轰性能；热稳定性；活化能

中图分类号：TJ 55；TQ564 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.016

Effects of Typical Hydrogen Storage Materials on Detonation Performance and Thermal Stability of RDX-Based Thermobaric Explosives

YAO Jia[1]，TANG You-fu[2]，ZHANG Shun-shuang[3]，WANG Hao[4]

（1.Yipri Xianghong (Hunan) Machinery Chemical Co. Ltd., Yueyang, 414100；2.Shenzhen Jinyuan Hengye Technology Co. Ltd., Shenzhen, 518011；3.Shandong Taishan Civil Explosive Equipment Co. Ltd., Rizhao, 262301；4.School of Chemical Engineering and Blasting, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001）

Abstract：To investigate the effects of typical hydrogen storage materials on the detonation performance and thermal stability of RDX-based thermobaric explosives, this study conducted air explosion experiments and thermal analysis on RDX explosives with the addition of MgH_2, TiH_2, and ZrH_2. The experimental results show that compared to pure RDX explosive, the RDX/MgH_2 thermobaric explosive exhibits higher peak shock wave pressure and positive impulse, reaching 27.8 kPa and 8.79 Pa·s, the increases are 3.73% and 5.52% respectively. The termination temperature of RDX/MgH_2 sample is decreased by 7 ℃ , and its activation energy is decreased by 9.7 kJ·mol^{-1}. In contrast, the termination temperatures of RDX/TiH_2 and RDX/ZrH_2 are increased by 1.8 ℃ and 4.6 ℃, respectively, and their activation energies are increased by 0.8 kJ·mol^{-1}and 5.2 kJ·mol^{-1} respectively. The study demonstrates that MgH_2 significantly enhances the detonation performance of RDX but reduces its thermal stability, while TiH_2 and ZrH_2 improve thermal stability to some extent.

Key words：Hydrogen storage materials; Thermobaric explosive; Detonation performance; Thermostability; Activation energy

收稿日期：2025-01-13

作者简介：姚佳（1985-），男，工程师，主要从事火工品开发设计工作。

通讯作者：汤有富（1991-），男，工程师，主要从事民爆及军工专用设备开发设计管理工作。

引用本文：姚佳，汤有富，张顺双，等. 典型储氢材料对RDX基温压炸药爆轰性能和热稳定性的影响研究[J]. 火工品, 2026(1):100-105.

储氢材料是一种高能量密度、高化学活性的添加剂，广泛用于炸药、烟火药和固体推进剂[1]。与传统金属粉末不同，它在爆炸后通过脱氢反应生成金属和氢气，增强后燃反应，提升爆炸冲击波峰值压力、比冲和后燃效应[2]。氢化镁（MgH_2）、氢化钛（TiH_2）和氢化锆（ZrH_2）等储氢材料，因其高含氢量、高燃烧热值和环保特性，在含能材料领域中具有广泛的应用前景。Fang H 等[3]研究了 MgH_2、TiH_2 和 ZrH_2 与钙钛矿（DAP-4）混合体系的热分解、点火以及燃烧特性，提出了以 DAP-4 作为氧化剂的储氢材料点火与燃烧反应机理。Wu J 等[4]将 MgH_2 添加到 PTFE/ Al 混合体系，发现 MgH_2 可与气相 $C_2F_4^+$反应，提升了体系的反应能和强度。Yao Y L 等[5]用比色测温技术研究了 TiH_2 对乳化炸药爆炸温度场的影响，发现爆炸温度随着 TiH_2 含量先升后降，在 6%时达到峰值。Yang Y 等[6]制备了含 ZrH_2 的双基推进剂，揭示了 ZrH_2 的燃烧机制，指出脱氢反应生成 Zr 和 H_2，生成的熔融状态 Zr 在表面燃烧，促进热量反馈和颗粒破碎，有助于储氢材料的燃烧。

储氢材料通常以粉末形式添加到炸药中，在特定条件下会降低炸药的热稳定性，提高热分解速率，增加感度，对其安全性产生负面影响。例如，Ji D 等[7]研究发现 $Mg(BH_x)_y$ 提高了硝铵炸药的热稳定性，但降低了撞击感度。Ding X Y 等[8]利用 DSC 研究了 $LiBH_4$ 对 RDX 和 AP 热稳定性的影响，结果显示 $LiBH_4$ 会加快 RDX 和 AP 的热分解。Yao M 等[9]研究了 MgH_2 和 $Mg(BH_4)_2$ 对 TNT 热分解性能的影响，发现这两种材料使 TNT 的分解放热峰消失，并出现较平缓的放热宽峰，可能是还原氢的引入限制了–CH_3 基团的氧化。同时，MgH_2 和 $Mg(BH_4)_2$ 还降低了反应的分解初温和活化能，提高了反应活性。Jin L 等[10]通过加热量热法（ARC）研究了 MgH_2 对硝化棉（NC）热分解特性的影响，发现 MgH_2 显著催化了 NC 的分解，导致反应速度大幅增加，降低了安全性。

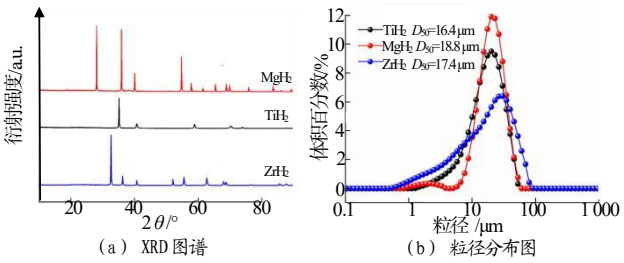
因此，本文研究了 MgH_2、TiH_2 和 ZrH_2 这 3 种储氢材料对 RDX 基温压炸药爆轰性能的影响，并评估了添加这些材料后的热稳定性。研究旨在选择合适的储氢材料，以优化温压炸药的爆轰性能和安全性。

1　实验方法与材料

1.1　原材料

本研究选取的实验材料包括商业级氢化钛粉末（TiH_2，由美国 Thermo Fisher Scientific 公司提供）、氢化镁粉末（MgH_2，由美国 Alfa Aesar 公司提供）以及氢化锆粉末（ZrH_2，由株洲润峰新材料有限公司提供）。实验中使用的炸药为经过 5%石蜡钝化的黑索今（RDX 炸药），由红星机电股份有限公司提供。

TiH_2、MgH_2 和 ZrH_2 3 种储氢材料的 XRD 图谱和粒径分布如图 1 所示。



（a）XRD 图谱　　（b）粒径分布图

图 1　3 种储氢材料的 XRD 图谱和粒径分布图

Fig.1　XRD patterns and particle size distribution of three hydrogen storage materials

由图 1（a）可知，3 种储氢材料成分单一，均未检测到任何杂质或氧化现象。为排除储氢材料粒径对能量输出规律的影响，本研究选用的 3 种储氢材料粒径保持一致，从图 1（b）可以看出，这 3 种储氢材料的中位粒径 D_{50} 分别为 16.4，18.8，17.4 μm。

3 种储氢材料的微观形貌图如图 2 所示。

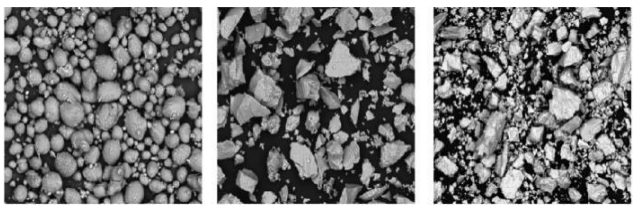

(a)　MgH_2　　(b)　TiH_2　　(c)　ZrH_2

图 2　3 种储氢材料的扫描电镜图

Fig.2　SEM image of three hydrogen storage materials

由图 2 可知，MgH_2 粉末粒径分布均匀，外表呈球形；TiH_2 和 ZrH_2 粉末呈不规则形状，且表面带有尖锐的棱角。

1.2 混合药柱的制备

为研究不同储氢材料对 RDX 基温压炸药爆轰性能的影响，制备了添加 5%不同金属氢化物的 RDX 基温压炸药，样品配方如表 1 所示。

表 1 添加不同储氢材料的温压炸药配方

Tab.1 Formulations of thermobaric explosive with different hydrogen storage materials

温压炸药	w/%				中位粒径 D_{50} / μm
	RDX	TiH_2 粉末	MgH_2 粉末	ZrH_2 粉末	
纯 RDX	100	0	0	0	-
RDX/TiH_2	95	5	0	0	16.4
RDX/MgH_2	95	0	5	0	18.8
RDX/ZrH_2	95	0	0	5	17.4

实验用温压炸药为圆柱形压装药柱，其长径比为 1，质量为 10 g，密度为 1.59 g·cm^{-3}。

1.3 空中爆炸实验

为了研究不同储氢材料对 RDX 基温压炸药爆轰性能的影响，在直径为 4 m 的半球形密闭爆炸罐内进行实验。在测试过程中，将待测药柱悬挂于爆炸罐中心，通过 2 个 PCB 压力传感器（137B24B, PCB, 美国）监测爆炸信号，测试系统如图 3 所示。

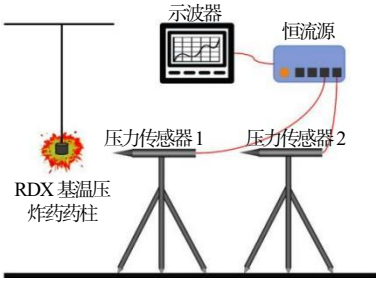


图 3 空中爆炸实验测试系统示意图

Fig.3 Schematic picture of air explosion test system

图 3 所示的压力数据由示波器（型号 LeCroy HDO4034，制造商 Teledyne LeCroy，美国）采集，其最大采样频率为 2.5 MS·s^{-1}。2 个压力传感器均与待测药柱保持一致的水平高度，并与药柱的水平距离分别为 1.0，1.2 m。每个样品的测试至少重复 3 次以上，并取其平均值，以确保实验结果的准确性。

1.4 热分析实验

本研究采用热重分析仪（Mettler Toledo, 瑞士）对 RDX 温压炸药样品进行测试。实验过程中，将温压炸药样品置于氧化铝坩埚中，每组样品的质量控制在 1~2 mg 范围内，升温区间设定为室温到 350 ℃，升温速率设置为 5，10，15，20 K·min^{-1}。同时采用氮气作为吹扫气体，气体流速设置为 50 mL·min^{-1}。通过在不同升温速率下进行热重实验，可以计算得到温压炸药样品的热重（TG）曲线、活化能以及指前因子等关键热力学参数。

2 结果与讨论

2.1 储氢材料对爆轰性能的影响

2.1.1 典型储氢合金对冲击波参数的影响

炸药爆炸后对周围介质形成的冲击波峰值压力、正相持续时间和正冲量等冲击波参数是衡量和评定武器弹药杀伤效应的重要指标[11]。本实验采用空中爆炸测试系统研究了添加不同储氢材料的 RDX 基温压炸药爆轰特性。采用 Modified-Friedlander 方程[12]对压力数据进行降噪处理，如式（1）所示：

$$p(t)=\Delta p_{\max}\left(1-\frac{t}{t_+}\right)\exp\left(-\frac{\alpha t}{t_+}\right) \quad (1)$$

式（1）中：$\Delta p_{\max}$ 为冲击波峰值压力，kPa；t 为时间，s；t_+为正相持续时间，s；α 为冲击波衰减系数。

对降噪后的压力时程曲线计算得到正相持续时间，并且通过式（2）得到正冲量：

$$I_+=\int_0^{t_+}p(t)\mathrm{d}t \quad (2)$$

添加不同储氢材料的 RDX 基温压炸药在冲击波作用下的压力时程曲线如图 4 所示。

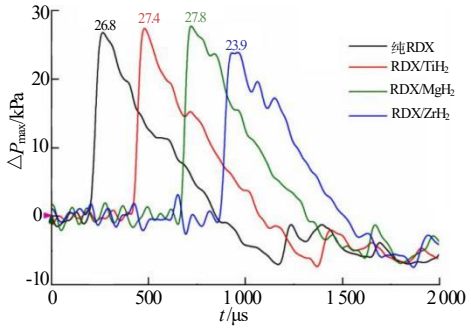


图 4 添加不同储氢材料 RDX 基温压炸药的压力时程曲线

Fig.4 Typical pressure *vs* time history curves of RDX-based thermobaric explosive containing different hydrogen storage materials

由图 4 可知，4 种温压炸药的冲击波峰值压力从大到小依次为 RDX/MgH_2、RDX/TiH_2、RDX、RDX/ZrH_2，这是由于 3 种储氢材料粉末固有属性的差异，导致它们在化学反应区域的释能机制存在差异，进而对冲击波峰值压力产生了不同的影响。

添加储氢材料的 RDX 基温压炸药的爆轰机理图[13]如图 5 所示。

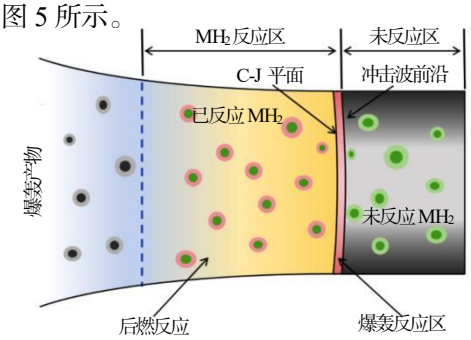


图 5　添加储氢材料的 RDX 基温压炸药爆轰机理图

Fig.5　Detonation mechanism of RDX-based thermobaric explosive with different hydrogen storage materials

由图 5 可知，储氢材料中的氢以固溶体的形式存在[14-16]。RDX 起爆后，首先发生爆轰反应释放能量。储氢材料在高温高压下受热分解为基体金属和游离氢，引发二次后燃反应，促进冲击波峰值压力上升。储氢材料加入 RDX 后，其爆轰反应服从混合炸药爆轰反应机理，即反应在各组分分解面上进行。储氢材料不参与 C-J 峰面反应，但参与后燃效应，对 RDX 起到稀释作用，并吸收部分能量，抑制冲击波峰值压力上升。MgH_2 粉末的活性最高，其后燃效应对冲击波峰值压力的促进作用大于 RDX 含量减少的抑制作用，因此添加 MgH_2 粉末的 RDX 基温压炸药冲击波峰值压力最大。ZrH_2 粉末活性较低，需吸收更多能量才能发生后燃反应，其热值较低，对冲击波峰值压力的促进作用小于 RDX 含量减少的抑制作用，导致冲击波峰值压力低于纯 RDX 炸药。

添加不同储氢材料的温压炸药的冲击波峰值压力（ΔP_{max}）、正相持续时间（t_+）和正冲量（I_+）数据如表 2 所示。

表 2　添加不同储氢材料的 RDX 基温压炸药冲击波参数

Tab.2　Shock wave parameters of RDX-based thermobaric explosive with different hydrogen storage materials

样品	ΔP_{max} /kPa	增长率/%	t_+ /μs	增长率/%	I_+ /(Pa·s)	增长率/%
纯 RDX 药柱	26.8	-	689.2	-	8.33	-
RDX/TiH_2药柱	27.4	2.24	701.6	1.80	8.51	2.16
RDX/MgH_2药柱	27.8	3.73	651.2	-5.51	8.79	5.52
RDX/ZrH_2药柱	23.9	-10.82	644.8	-6.44	7.93	-4.80

由表 2 可知，3 种不同储氢材料对正冲量与对冲击波峰值压力的作用趋势保持一致。添加 MgH_2 粉末的 RDX 基温压炸药的冲击波峰值压力和正冲量最大，分别为 27.8 kPa 和 8.79 Pa·s，与纯 RDX 炸药相比分别提升了 3.73%和 5.52%，这是由于 MgH_2 粉末发生的二次后燃效应增强了冲击波强度并减缓了冲击波的衰减。对于添加 ZrH_2 粉末的温压炸药样品，由于 ZrH_2 粉末的活性较低，难以达到其反应阈值，只有少量 ZrH_2 粉末发生二次后燃效应。在爆轰反应过程中，该粉末主要起到惰性稀释的作用，导致其冲击波峰值压力、正相持续时间和正冲量均低于纯 RDX 炸药。

2.1.2　比例距离对冲击波参数的影响

为了研究添加不同种类储氢合金的 RDX 基温压炸药爆轰性能随比例距离的变化规律，本实验分别在 1.0，1.2 m 处测试了 RDX 基温压炸药的冲击波参数，实验结果如表 3 所示。

表 3　不同比例距离处的冲击波参数

Tab.3　Shock wave parameters at different proportional distances

比例距离/m	冲击波参数	纯 RDX 药柱	RDX/TiH_2 药柱	RDX/MgH_2 药柱	RDX/ZrH_2 药柱
1.0	ΔP_{max}/kPa	26.8	27.4	27.8	23.9
	增长率/%	-	2.24	3.73	-10.82
	t_+/μs	689.2	701.6	651.2	644.8
	增长率/%	-	1.80	-5.51	-6.44
	I_+/(Pa·s)	8.33	8.51	8.79	7.93
	增长率/%	-	2.16	5.52	-4.80
1.2	ΔP_{max}/kPa	20.2	21.2	21.7	20.2
	增长率/%	-	4.95	7.43	0
	t_+/μs	680	704.8	672.8	688.8
	增长率/%	-	3.65	-1.06	1.29
	I_+/(Pa·s)	6.36	6.93	7.27	6.81
	增长率/%	-	8.96	14.31	7.07

由表 3 可知，在 1.0，1.2 m 处，添加 TiH_2 和 MgH_2 粉末的温压炸药的冲击波峰值压力和正冲量均大于纯 RDX 基温压炸药，尤其在离 1.2 m 处冲击波参数的增幅更显著。这可归因于储氢材料粉末的燃烧速率低于炸药爆轰波的传播速度，在近场处没有足够的时间发生储氢合金的二次后燃反应。对于添加 ZrH_2 粉末的温压炸药样品，其在 1.0 m 处的冲击波峰值压力和正冲量均低于纯 RDX 炸药，而在 1.2 m 处冲击波峰值压力与纯 RDX 炸药相同，但正冲量却更高。这是由于 ZrH_2 粉末活性低，燃烧热值低，在近场处发生的二次后燃效应的反应速率较慢，导致爆轰性能降低；而在远场处，二次后燃效应反应时间更加充分，延缓了冲击波的衰减作用，使得正冲量有所提升。

2.2　典型储氢材料对热稳定性的影响

2.2.1　典型储氢材料对热分解特性的影响

为了研究不同种类储氢材料对 RDX 基温压炸药

热分解特性的影响，本研究对添加不同储氢材料的温压炸药样品进行了热重实验，升温速率为 5 K·min^{-1} 条件下的热重曲线如图 6 所示。

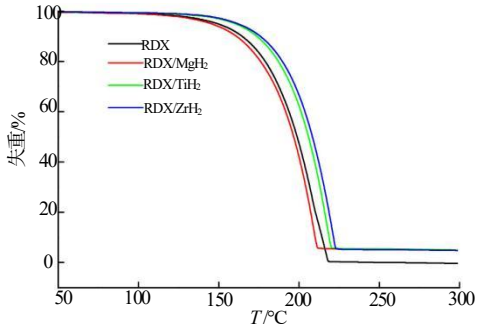


图 6 添加不同储氢材料温压炸药样品的热重曲线图

Fig. 6 TG curves of thermobaric explosive samples with different hydrogen storage materials

由图 6 可知，RDX 基温压炸药添加不同储氢材料后，热重曲线均有一个失重阶段。纯 RDX 炸药在该阶段几乎完全分解，无明显残留。而添加储氢材料的样品在第 1 阶段损失约 95%质量，对应 RDX 的热分解。添加 MgH_2 的样品的热分解终止温度为 211.5 ℃，比纯 RDX 样品的 218.5 ℃低 7 ℃；添加 TiH_2 和 ZrH_2 样品的终止温度分别为 220.3 ℃和 223.1 ℃，分别比纯 RDX 样品高 1.8 ℃和 4.6 ℃。

2.2.2 典型储氢材料对活化能的影响

为了研究不同种类储氢合金对 RDX 基温压炸药热安全性能的影响，在 5，10，15，20 K·min^{-1} 的升温速率条件下进行了热重实验，TG 曲线如图 7 所示。

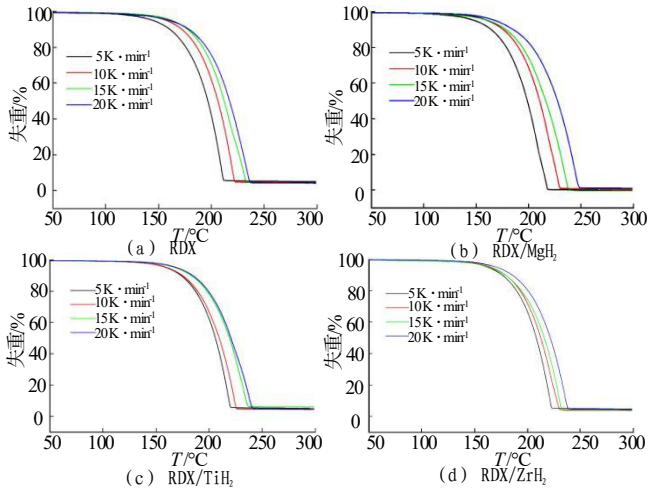


图 7 不同温压炸药样品 TG 曲线图

Fig. 7 TG curves of different thermobaric explosive samples

从图 7 可以看出，当升温速率从 5 K·min^{-1} 上升到 20 K·min^{-1} 时，热重曲线向着高温方向移动，这是因为在高升温速率条件下，温压炸药样品在低温对应的热分解反应还未反应完全便被带入更高的反应温度，使得 TG 曲线中温度具有一定的滞后性。采用 Ozawa 法对热重曲线进行处理[17]，得到温压炸药样品在不同反应深度下的表观活化能 E_a，结果如表 4 所示。

表 4 不同反应深度下的表观活化能 （kJ·mol^{-1}）

Tab.4 Apparent activation energy at different reaction depths

样品	反应度									平均值
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
RDX	105.3	111.5	107.7	108.0	105.0	100.6	95.2	91.8	90.8	103.3
RDX /MgH_2	96.0	95.8	95.5	95.4	94.5	92.1	90.7	87.7	86.2	93.6
RDX /TiH_2	107.5	104.0	103.9	103.5	104.3	104.4	104.6	99.2	94.5	104.1
RDX /ZrH_2	115.4	110.0	110.0	108.9	109	107.0	107.4	107.6	108.4	108.5

由于反应初期和末期热分解的不确定性，4 种温压炸药样品的表观活化能采用中间阶段（a=0.3~0.7）的平均值。由表 4 可知，添加 MgH_2 粉末温压炸药样品的活化能为 93.6 kJ·mol^{-1}，比纯 RDX 炸药的 103.3 kJ·mol^{-1} 降低了 9.7 kJ·mol^{-1}。这是由于 MgH_2 粉末反应活性高，其表面的游离 H 原子增加了与–NO 基团的相互作用，促进了 N–N 键断裂生成 NO_2，加速了 RDX 炸药的热分解速率，导致表观活化能降低。而添加 TiH_2 和 ZrH_2 粉末的温压炸药样品，其表观活化能分别为 104.1，108.5 kJ·mol^{-1}，较纯 RDX 炸药分别升高了 0.8，5.2 kJ·mol^{-1}。尽管 TiH_2 和 ZrH_2 粉末表面游离 H 可能促进 N–N 键的断裂生成 NO_2，但它们活性较低，需吸收更多能量，且对 RDX 炸药浓度的稀释也会导致热分解反应速率降低，因此表观活化能较纯 RDX 炸药有所上升。

3 结论

本研究实验分析了氢化镁（MgH_2）、氢化钛（TiH_2）和氢化锆（ZrH_2）对 RDX 基温压炸药爆轰性能和热稳定性的影响，得到结论如下：

（1）在爆轰性能上，4 种温压炸药的冲击波峰值压力从高到低依次为：RDX/MgH_2、RDX/TiH_2、RDX、RDX/ZrH_2。RDX/MgH_2 炸药展现了最高的冲击波峰值压力和正冲量，分别是 27.8 kPa 和 8.79 Pa·s，比纯 RDX 炸药分别高出 3.73%和 5.52%。这说明 MgH_2 在爆轰中释放能量的能力强，显著提升了炸药性能。相比之下，RDX/ZrH_2 炸药因 ZrH_2 的活性和燃烧热值较

低，导致其爆轰性能较弱。

（2）在热稳定性方面，不同储氢材料对温压炸药的热分解终止温度和活化能有显著影响。MgH_2 的加入使 RDX 炸药的热分解终止温度降低了 7 ℃，活化能降低了 9.7 kJ·mol^{-1}，说明其降低了炸药的热稳定性。相反，TiH_2 和 ZrH_2 的添加分别使 RDX 炸药热分解终止温度提高 1.8 ℃和 4.6 ℃，活化能增加 0.8 kJ·mol^{-1} 和 5.2 kJ·mol^{-1}，表明它们提升了炸药的热稳定性。

综上所述，MgH_2 作为储氢材料，能提升 RDX 基温压炸药的爆轰性能，但会降低热稳定性。TiH_2 和 ZrH_2 则提高炸药的热稳定性，但对爆轰性能的提升不如 MgH_2。因此，实际应用中应选择合适的储氢材料，平衡炸药爆轰性能和热稳定性。

参考文献：

[1] 程扬帆, 刘蓉, 马宏昊, 等. 储氢材料在乳化炸药中的应用[J]. 含能材料, 2013, 21(02): 268-272.

[2] Wang H, Cheng Y, Zhu S, et al. Effects of content and particle size of TiH_2 powders on the energy output rules of RDX composite explosives[J].Defence Technology,2024(32):297- 308.

[3] Fang H, Deng P, Liu R, et al. Energy-releasing properties of metal hydrides (MgH_2, TiH_2 and ZrH_2) with molecular perovskite energetic material DAP-4 as a novel oxidant[J]. Combustion and Flame, 2023(247): 112 482.

[4] Wu J, Liu Q, Feng B, et al. Improving the energy release characteristics of PTFE/Al by doping magnesium hydride[J]. Defence Technology, 2022, 18(2): 219-228.

[5] Yao Y L, Cheng Y F, Zhang Q W, et al. Explosion temperature mapping of emulsion explosives containing TiH_2 powders with the two-color pyrometer technique[J].Defence Technology, 2022, 18(10): 1 834-1 841.

[6] Yang Y, Zhao F, Huang X, et al. Reinforced combustion of the ZrH_2-HMX-CMDB propellant: the critical role of hydrogen[J]. Chemical Engineering Journal, 2020(402): 126 275.

[7] Ji D, Wei X, Du P, et al. Effect of boron-containing hydrogen-storage-alloy ($Mg(BH_x)_y$) on thermal decomposition behavior and thermal hazards of nitrate explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics,2018,43(4):413- 419.

[8] Ding X Y, Shu Y J, Chen Z Q, et al. Coating of $LiBH_4$ and its effect on the decomposition of RDX and AP[J]. Central European Journal of Energetic Materials,2017, 14(1):134 -151.

[9] Yao M, Chen L, Rao G, et al. Effect of nano-magnesium hydride on the thermal decomposition behaviors of RDX[J]. Journal of Nanomaterials, 2013, 13(1): 123-130.

[10] Jin L, Du P, Yao M. The influence of magnesium hydride on the thermal decomposition properties of nitrocellulose[J]. Journal of Energetic Materials, 2014, 32(sup1): S13-S21.

[11] Tao C, Cheng Y F, Fang H, et al. Fabrication and characterization of a novel underground mining emulsion explosive containing thickening microcapsules[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2020, 45(6): 932-941.

[12] 陈皓楠,刘锋,王锡东,等.玻璃微球含量对乳化炸药爆轰性能的影响[J].火工品,2022(5):51-55.

[13] Yang K,Chen L,Liu D,et al.Assessing the energy release characteristics during the middle detonation reaction stage of aluminized explosives[J]. Defence Technology, 2024(33): 270 -277.

[14] Fernandez J F, Cuevas F, Sanchez C. Simultaneous differential scanning calorimetry and thermal desorption spectroscopy measurements for the study of the decomposition of metal hydrides[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 298(1-2): 244-253.

[15] Borchers C, Khomenko T I, Leonov A V, et al. Interrupted thermal desorption of TiH_2[J]. Thermochimica Acta, 2009, 493(1-2): 80-84.

[16] Cheng Y F, Meng X R, Ma H H, et al. Flame propagation behaviors and influential factors of TiH_2 dust explosions at a constant pressure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(33): 16 355-16 363.

[17] 于志宏, 饶文军, 宋小兰,等. 2,4,6-三硝基-3-溴苯甲醚的热分解特性及机理研究[J].火工品, 2022 (6): 65-69.