

文章编号: 1006-9941(2025)08-0847-13

基于有机硅包覆 HMX 的推进剂界面增强研究

覃元¹, 蒲睿¹, 涂珑潇², 严启龙¹

(1. 西北工业大学 固体火箭推进国家重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 火箭军装备部驻襄阳地区军事代表室, 湖北 襄阳 441000)

摘要: 为改善丁羟四组元复合固体推进剂的力学性能, 本研究采用 3-[2-(2-氨基乙基氨基)乙基氨基]丙基-三甲氧基硅烷(A1130)和脲丙基三乙氧基硅烷(A1160)对 HMX 及强约束 HMX(qy-HMX)进行表面包覆改性, 并应用于固体推进剂中。采用扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)、X射线光电子能谱(XPS)、原子力显微镜(AFM)和差示扫描量热法-热重分析(DSC-TG)表征样品形貌结构和性能; 通过电子万能试验机和动态热机械分析仪(DMA)评估硅烷包覆层对推进剂力学性能及界面特性的影响。结果表明, 两种硅烷均能在晶体表面形成连续包覆层, 晶型未改变; 硅烷包覆抑制了 HMX 转晶, 提高了相稳定性, HMX@A1130 和 HMX@A1160 相变温度分别提升了 2.3 °C 和 9.8 °C。力学测试表明, 两种硅烷能有效提高推进剂在低温(-50 °C)条件下的抗拉强度, A1130 改性的推进剂在-50 °C、500 mm·min⁻¹ 下的黏附指数由 1.52 降至 1.24; 在-50 °C/10 mm·min⁻¹ 工况下, HMX@A1130 和 HMX@A1160 改性推进剂的抗拉强度分别提升 29.9% 和 31.6%, 最大延伸率分别提升 57.8% 和 125.3%。DMA 结果表明, A1130 改性推进剂的损耗因子 tan δ 峰值由空白配方的 0.51 降至 0.47, 降低了体系低温范围内的 tan δ 值, 表明“脱湿”现象得到改善, 断面形貌分析与拉伸及 DMA 测试结果一致。说明两种硅烷偶联剂的加入具有较显著的界面改性作用, A1130 能抑制端羟基聚丁二烯 HTPB 体系的界面“脱湿”。

关键词: 表面包覆; 硅烷偶联剂; 奥克托今(HMX); 丁羟四组元推进剂; 力学性能

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2025053

0 引言

固体推进剂的性能决定了火箭及导弹系统的生存能力和作战效能^[1-3]。力学性能影响推进剂的燃烧和贮存等性能, 是保证固体推进剂正常工作的前提。在制造、贮存、运输及服役阶段中, 固体推进剂会受到热应力、冲击和震动等载荷作用, 药柱内部会受到周期性应力应变^[4-6]。若药柱在载荷作用下发生结构性失效(如过度变形和裂痕), 将显著降低发动机性能, 严重威胁安全^[7-8]。因此, 提升推进剂的力学性能和保证发动机药柱结构完整, 对实现火箭发动机可靠运行和提升武器系统整体效能具有重要意义。

在配方基本组分确定的情况下, 固体填料和粘结剂的界面性质是影响力学等性能的关键因素^[9-11]。为满足现代武器对高能量密度的要求, 硝胺类晶体作为高能添加剂被广泛应用于固体推进剂体系。然而, 硝胺晶体属于典型非补强性材料, 表面光滑, 与粘结剂基体难以形成有效键合, 恶化了两相界面^[12]。针对此问题, Oberth 和 Bruenner^[13]指出聚合物包覆氧化剂颗粒是一种有效途径, 通过对氧化剂颗粒表面构筑一层硬而韧的包覆层, 可增强填料-基体间相互作用并抑制“脱湿”现象。李江存等^[14]和 Zhang 等^[15]采用硝化棉(NC)包覆黑索今(RDX)并研究复合材料对固体推进剂力学性能的影响, 结果表明包覆改性对提升硝胺推进剂力学性能具有显著效果。刘爽等^[16]采用液体丁腈橡胶包覆六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)晶体并将其应用于聚叠氮缩水甘油醚(GAP)推进剂, 发现引入羟基的丁腈橡胶能有效降低推进剂的力学损耗因子 tan δ , 显著改善界面“脱湿”现象。时志权等^[17]通过化学包覆法制备 RDX@聚 3,4-乙烯二氧噻吩(PEDOT),

收稿日期: 2025-03-21; 修回日期: 2025-06-02

网络出版日期: 2025-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(U2030202)

作者简介: 覃元(2001-), 女, 研究生, 主要从事炸药表面改性研究。e-mail: yuanqin@mail.nwpu.edu.cn

通信联系人: 严启龙(1983-), 男, 教授, 主要从事含能材料制备及应用研究。e-mail: qilongyan@nwpu.edu.cn

引用本文: 覃元, 蒲睿, 涂珑潇, 等. 基于有机硅包覆 HMX 的推进剂界面增强研究[J]. 含能材料, 2025, 33(8): 847-859.

QIN Yuan, PU Rui, TU Long-xiao, et al. Interfacial Enhancement Technology of Propellant Based on Silicone-coated HMX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2025, 33(8): 847-859.

使推进剂常温下抗拉强度提升 29.5%。张超^[18]和杨寅等^[19]分别采用热塑性弹性体包覆 CL-20,发现含包覆样品的改性双基(CMDB)推进剂的抗拉强度得到了显著提高,硝酸酯增塑聚醚(NEPE)推进剂体系则实现抗拉强度和最大延伸率的协同提升,黏附指数 $\varepsilon_b/\varepsilon_m$ 从 3.50 降低至 1.28。姚莹莹等^[20-21]合成的聚醚环酰胺键合剂(PAPB)显著提高了推进剂的最大延伸率。

奥克托今(HMX)是目前综合性能最佳的硝胺炸药之一,在端羟基聚丁二烯(HTPB)固体推进剂中引入 HMX 部分替代 AP 是提升固体推进剂比冲和能量的重要途径。强约束 HMX(qy-HMX)是一类经二维三氨基胍-乙二醛交联体(TAGP)掺杂和重结晶处理的 HMX,具有高密度(最高可达 $1.96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、表面光滑且晶体形态分明的特点,具有较高的工程应用价值。但光滑表面和规整的晶体形态也导致了其与粘结剂体系的界面相容性差,成为力学性能的薄弱环节。

硅烷偶联剂被广泛应用于含能材料、塑料、涂料和橡胶等领域^[22-25]。在固体火箭发动机装药中,多选用含—NH—或—NH₂的硅烷偶联剂,其对双基及硝胺推进剂具有独特的界面增强作用。其作用机制在于:氨基碱性基团可催化硅氧烷基团的自锁和反应,含—NH—或—NH₂的硅烷偶联剂因自催化作用在常温下可实现快速自缩合,形成兼具柔性和韧性的界面过渡层,从而提高界面的粘接力^[26]。

基于此,本研究选择硅烷偶联剂 3-[2-(2-氨基乙基氨基)乙基氨基]丙基-三甲氧基硅烷(A1130)和脲丙基三乙氧基硅烷(A1160)作为包覆剂,分别对 HMX 及 qy-HMX 进行包覆。采用扫描电镜(SEM)、X 射线光电子能谱(XPS)、X 射线衍射仪(XRD)等技术表征包覆前后晶体形貌、结构组成和性能;将其引入 HTPB 四组元复合固体推进剂体系后,通过万能电子试验机测定不同工况下推进剂的力学响应特性,结合 DMA 分析硅烷对体系界面特性的影响,为固体推进剂界面工程优化提供了参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

原料: β -HMX,纯度大于 99.5%,西安近代化学研究所,重结晶自制;qy-HMX,实验室自制;AP,纯度大于 99.9%,西安近代化学研究所;铝粉,活性铝含量大

于 99%,湖北航天化学技术研究所;HTPB,Ⅲ型, Sigma-Aldrich Co;癸二酸二辛酯(DOS),纯度大于 99%,Sigma-Aldrich Co;异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI),纯度大于 99%,Sigma-Aldrich Co;氨水,浓度 25%~28%,A1130,纯度大于 95%,上海麦克林生化科技股份有限公司;A1160,浓度 40%~50%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

仪器:KQ-100TDE 超声波清洗仪,昆山超声;RAMMixer G500 声共振,声共振科技;GeminiSEM 360 场发射扫描电镜(SEM)/Ultim Max 能谱分析仪 EDS,德国 ZEISS 公司、英国 Oxford Instruments 公司;Nexsa 型 X 射线光电子能谱(XPS),美国 ThermoFisher 公司;SmartLab SE 型 X 射线衍射仪(XRD),日本理学公司;Tensor 27 型傅里叶红外光谱仪(FT-IR),德国 BRUKER 公司;Bruker Dimension Icon,德国 Bruker 公司;STA449 F5 型同步热分析仪,德国耐驰公司;Instron5982 型电子万能材料试验机,美国 Instron 公司;Q800 型动态热机械分析仪(DMA),美国 TA 公司。

1.2 样品制备

复合材料制备:qy-HMX 与 HMX 包覆工艺流程一致,以 HMX 为例阐述包覆工艺。

HMX@A1130 的制备方法^[27]:将 1 g HMX 完全浸入 A1130 溶液,25 ℃ 超声分散 20 min 后持续搅拌 1 h 水解。随后将混合体系转移至 80 ℃ 油浴锅中继续搅拌 1 h。将 HMX 置于纯水中超声 10 min 以除去过量和弱吸附的 A1130。去离子水洗涤、过滤,冷冻干燥 24 h,获得 HMX@A1130 复合材料。实验示意图如图 1 所示。

HMX@A1160 的制备:其包覆工艺参数均取最优。配制 5% 氨水/乙醇混合溶液($v/v=19:1$),搅拌混合均匀后加入 1 g HMX。按照 5% 质量比量取 A1160 (0.275 g, 0.6655 mL),使用移液器将其注入反应体系并混合均匀。随后将反应体系置于超声波清洗机中进

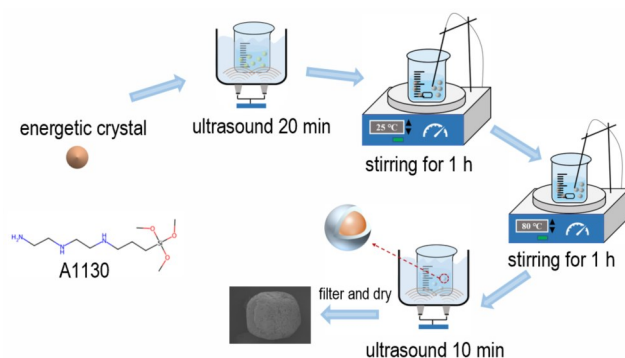


图 1 HMX@A1130 复合材料制备流程图

Fig.1 Preparation flowchart of HMX@A1130 composites

行超声分散,使晶体颗粒完全分散,每隔 30 min 超声 15 min,依次循环 1 h,温度设置为 30 ℃。去离子水洗涤,过滤并进行真空冷冻干燥 24 h,得到 HMX@A1160 复合材料。

固体推进剂制备:依据 HTPB 推进剂配方设计(质量分数),将 HMX 或其复合材料(20%)、AP(47%)、铝粉(18%)、HTPB(11.6%)、DOS(2.5%)以及 IPDI(0.9%)组分分别称量于混合装置中,利用声共振设备进行充分混合(环境条件:真空 2~4 kPa、50 ℃,混合时间 15 min)。将混合均匀的推进剂药浆在真空环境下浇注在铝制模具中,流平,保证其厚度为(5±0.5) mm,继续抽真空直至药浆无气泡,放入 70 ℃烘箱中固化 7 d。脱模后获得均匀致密、无缺陷的推进剂药块(命名及组成见表 1)。

表 1 推进剂试样表

Table 1 Abbreviation of propellant samples

abbreviation	crystal filler	abbreviation	crystal filler
T11	HMX	T1	qy-HMX
T12	HMX@A1130	T2	qy-HMX@A1130
T13	HMX@A1160	T3	qy-HMX@A1160

1.3 性能表征

采用 SEM/EDS 对硅烷包覆的复合材料进行形貌观察及表面元素分析,测试电压 5 kV,测试时样品提前进行喷金处理;使用 XRD、XPS、AFM 及 ATR-FTIR 测试对样品进行结构表征。

使用 DSC-TG 对其热性能进行分析,测试样品质量(0.4±0.05) mg,压强 0.1 MPa,温度范围在 50~500 ℃,气氛为高纯度氩气,气体流量为 50 mL·min⁻¹,升温速率为 10 K·min⁻¹。

采用电子万能试验机测试固体推进剂的静态力学性能,依据 GB/T 528-2009 2 型制备哑铃型试样,选定-50 ℃、20 ℃和 70 ℃ 3 个温度点,10、100 mm·mm⁻¹及 500 mm·mm⁻¹ 3 个拉伸速率,测试前将试件置于恒温箱中保温 40 min,进行 3 次重复实验并计算其标准差,以确保结果可靠性;将推进剂制成约 30 mm×5 mm×5 mm 的矩形试样,采用动态热机械分析仪测试,双悬臂夹具,振幅 5 μm, $f=1$ Hz,选定温度区间-100~60 ℃,升温速率为 2 ℃·min⁻¹。

1.4 模拟研究

采用 Material Studio 软件构建 HMX 的(0 1 1)表面、HTPB 分子和硅烷分子及其界面模型,通过第一性原理方法计算结合能。

2 结果与讨论

2.1 形貌结构

采用 SEM / EDS 对原料及复合材料的形貌及表面元素进行表征,结果如图 2 所示。HMX 原料存在小颗粒团聚现象,表面较为光滑,存在孔洞等缺陷,边缘清晰(图 2a~b)。在晶体表面观察到由于电子束轰击产生的黑色孔洞,说明 HMX 原料的抗电子束轰击能力弱。经 A1130 包覆后(图 2c~d),HMX@A1130 的团聚现象明显减少,分散性提高。HMX@A1130 颗粒表面明显可见一层均匀、致密粗糙的包覆层,HMX 清晰的棱角基本被覆盖(图 2d)。此外,HMX@A1130 表面并无电子束轰击产生的孔洞,说明其抗电子束轰击能力增强。

图 2f 为 HMX@A1160 的表面形貌和结构,HMX@A1160 晶体的边缘变得圆润。有两个原因:(1)乙醇/氨水体系对 HMX 晶体有一定的刻蚀作用,导致 HMX 棱角被磨平且表面变粗糙,这可能有利于后续的包覆和界面增强(图 2e 为无 A1160、其他实验条件完全相同的情况下的 HMX 形貌);(2)A1160 通过水解缩合反应在 HMX 表面形成一层致密的包覆层,进一步改变晶体轮廓。HMX@A1160 表面可见少量由电子束轰击产生的“突起”,但破坏程度远小于纯 HMX,说明包覆层的存在且致密,对 HMX 具有一定的保护。

EDS 表明 Si 元素均匀分布在两种复合粒子表面。相较于 HMX,qy-HMX 晶体表面更加光滑,基本无表面缺陷,颗粒呈规则长棱柱状,分散性良好(图 2g~h)。包覆后,qy-HMX 颗粒同样变得更“圆润”(图 2i~j),观察不到晶体的棱角和边缘,表现出与 HMX 样品类似的形貌。

通过 XRD、ATR-FTIR 和 XPS 全谱扫描表征得到样品的组成和结构,结果如图 3 所示。XRD(图 3a)显示包覆后 HMX 的 β 相特征衍射峰位和峰型保持不变,证实包覆过程并不会改变 HMX 的晶型。某些峰相对强度发生变化可归因于包覆过程诱导了 HMX 晶体的择优取向。图 3b 显示了 HMX 和 HMX 基复合材料的红外光谱。在 3006 cm⁻¹和 1560 cm⁻¹附近可以观察到 HMX 的 C—H 键和—NO₂基团的特征伸缩振动。1095 cm⁻¹和 789 cm⁻¹对应的是 Si—O—Si 的不对称伸缩振动和对称伸缩振动,N—H 的弯曲振动在 1578 cm⁻¹附近。但由于包覆层含量低于 5% 导致强度不明显,在 HMX

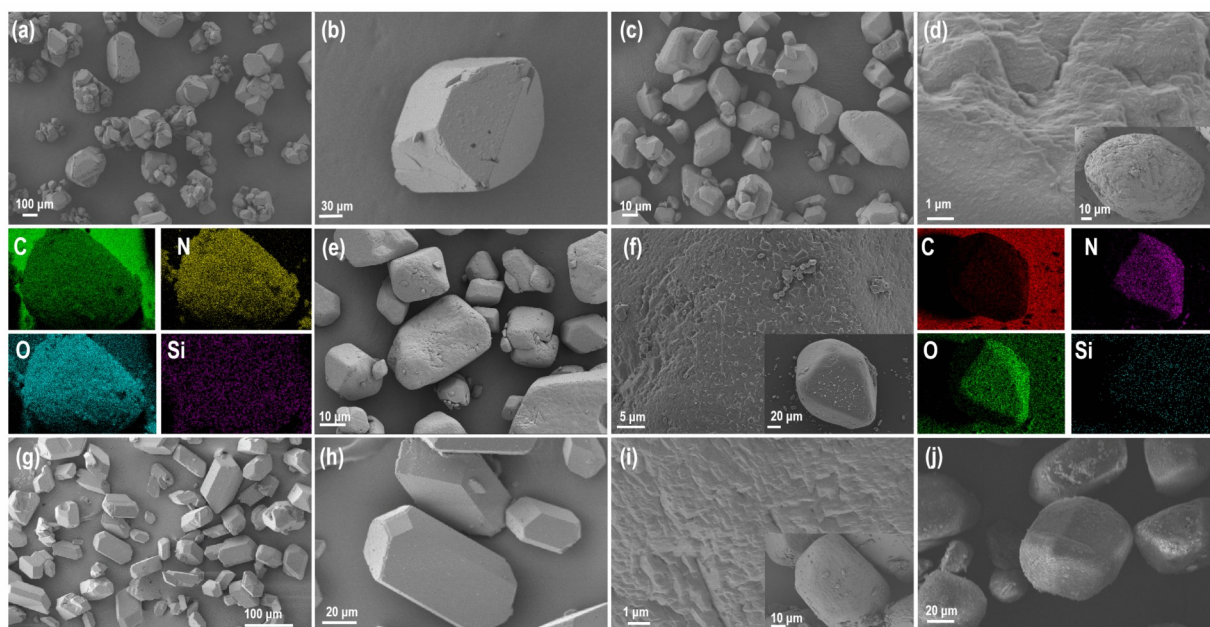


图2 不同原料与复合材料的SEM/EDS图像。(a) (b) HMX及晶体表面放大的SEM图;(c) (d) HMX@A1130及其元素分布;(e) 氨水/无水乙醇溶液中超声的HMX晶体;(f) HMX@A1160晶体SEM图及其元素分布图;(g) (h) qy-HMX;(i) qy-HMX@A1130;(j) qy-HMX@A1160

Fig. 2 SEM/EDS images of different raw materials and composites. (a) (b) SEM images of HMX and amplification, (c) (d) HMX@A1130 and its element distribution, (e) HMX in ammonia/anhydrous ethanol solution, (f) SEM image and element distribution of HMX@A1160, (g) (h) qy-HMX, (i) qy-HMX@A1130, (j) qy-HMX@A1160

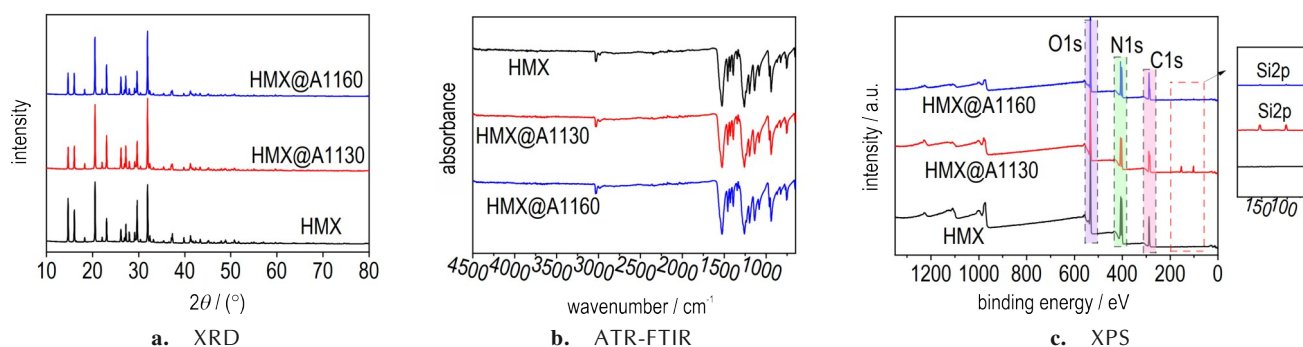


图3 HMX、HMX@A1130及HMX@A1160的结构和组成分析

Fig. 3 Structure and composition analysis of HMX, HMX@A1130 and HMX@A1160

基复合材料的红外光谱上并未观测到新的明显特征吸收峰。为更直观地分析HMX改性前后元素的变化,采用XPS进行更精确的元素确认与分析,结果如图3c所示。XPS谱图表明样品元素的主要组成为C、N和O。与纯HMX不同的是,硅烷改性的HMX谱图出现了Si元素的2p和2s轨道。

为进一步揭示复合材料的结构信息,对HMX及其复合材料在C 1s、O 1s和N 1s区域的高分辨XPS进行分析(图4),样品的C 1s、N 1s、O 1s和Si 2p元素浓度见表2。改性HMX表面的C/N比HMX表面的C/N高,说明硅烷分子在HMX表面进行了改性。对于原

料HMX,在C 1s谱图中观察到了以287.8 eV和284.8 eV为中心的两个峰,分别对应于N—C—N和C—C(或者C—H)。N 1s峰归属于—NO₂ (407.0 eV)和C—N—NO₂ (401.5 eV)。在533.2 eV处可观察到O 1s峰可以被确认为—NO₂。综上,HMX所有的拟合结果与相关文献报道有很好的的一致性^[28]。对于HMX@A1130复合材料,C 1s、N 1s和O 1s光谱同时表现出HMX和A1130的特征:C 1s图谱由3个峰组成,分别为归属于HMX的N—C—N、C—H和归属于A1130的C—NH₂ (286.7 eV)。N 1s有4个峰,依次为—NO₂、—NH₂、C—N—C和C—NH—C。O 1s峰

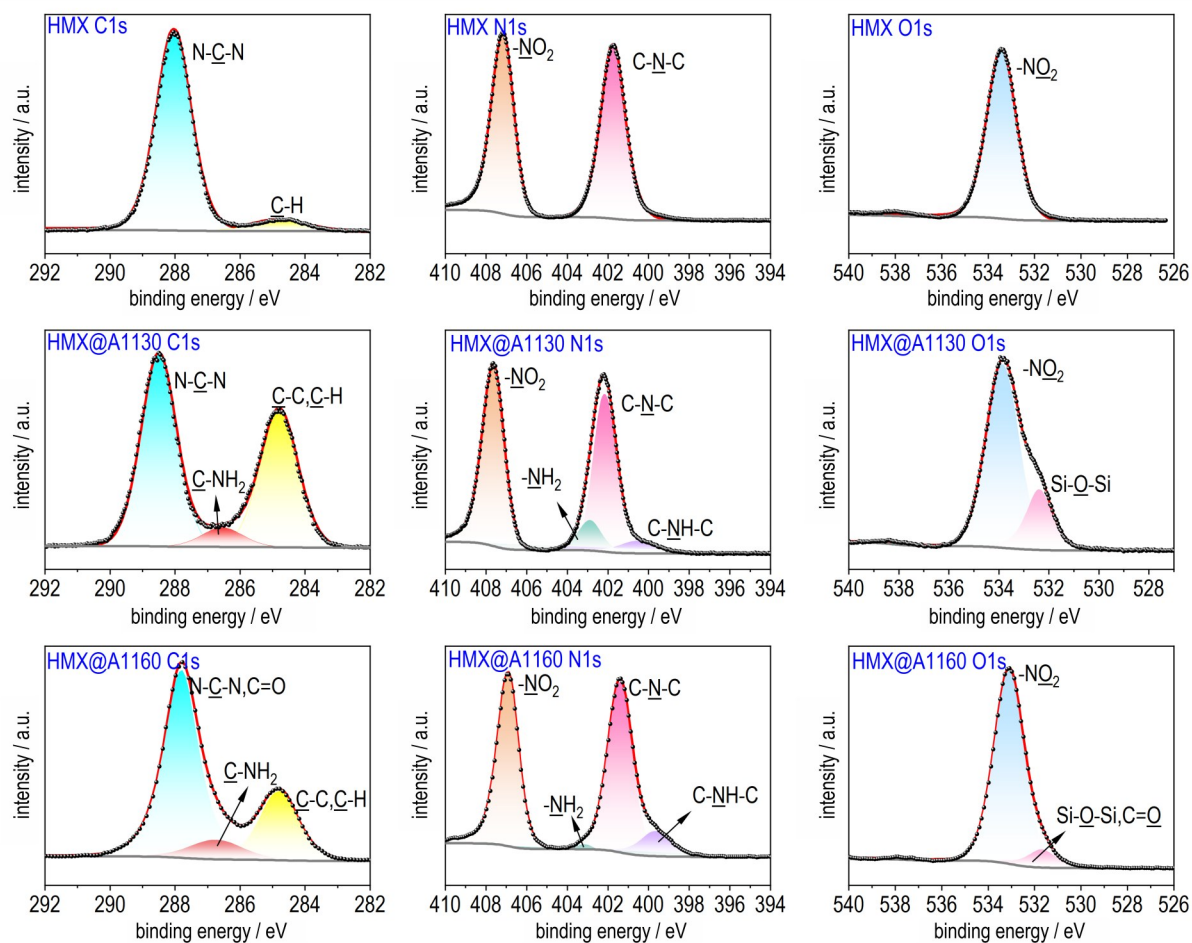


图4 HMX及相应的改性HMX粉末的C1s、N1s和O1s区域的高分辨XPS分析曲线

Fig.4 High-resolution XPS analysis curves of C1s, N1s and O1s regions of HMX and corresponding modified HMX powders

表2 HMX及复合材料表面元素浓度

Table 2 Surface element concentration of HMX and composites

sample	C1s / %	N1s / %	O1s / %	Si2p / %	C/N ratio
HMX	28.89	36.78	34.32	—	0.78
HMX@A1130	32.09	32.26	34.63	1.02	0.99
HMX@A1160	31.37	34.59	33.30	0.76	0.91

除属于HMX的 -NO_2 (533.2 eV)外,还出现了属于A1130水解交联后的 Si-O-Si ,位于532.0 eV。在HMX@A1160复合材料的图谱中,XPS的形状基本与A1130包覆的复合材料类似,对于O 1s峰,位于532.0 eV的峰归属于A1160的 Si-O-Si 和 C=O 。

进一步采用原子力显微镜(AFM)对qy-HMX及其复合材料的表面粗糙度和形貌进行表征,结果如图5所

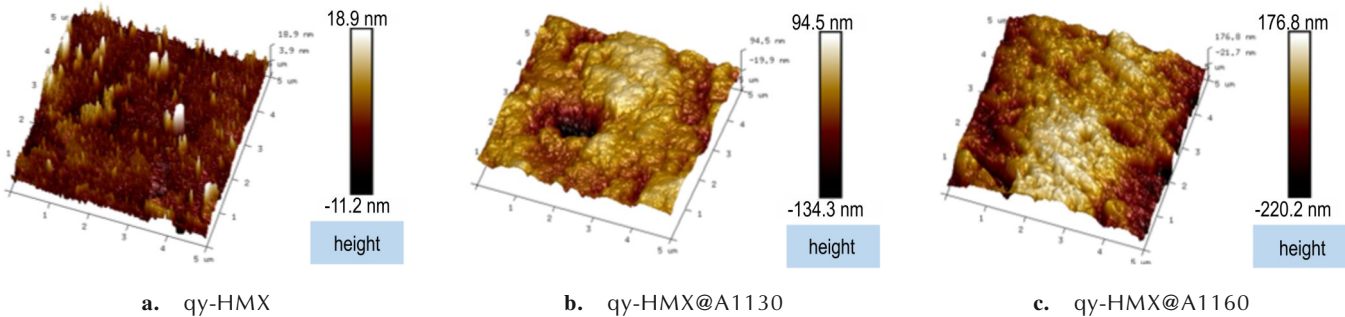


图5 qy-HMX及相关复合材料的AFM图像

Fig.5 AFM images of qy-HMX and related composites

示,表3给出了样品的表面粗糙度。原料 qy-HMX 晶体表面呈现轻微的起伏表面,表面光滑平整,与 SEM 结果一致(图 5a)。硅烷偶联剂修饰后,qy-HMX 表面变化明显,可观察到明显起伏,被致密团状硅烷聚合物完全覆盖,形成牢固而持久的壳层。从表3可知,硅烷包覆后的晶体表面粗糙度均大幅增加,而 qy-HMX@A1160 表面更粗糙, $R_a=61.9\text{ nm}$ 。从包覆均匀性上看,A1160 形成的包覆层更均匀,A1130 包覆层存在深谷(图 5b~c)。

表 3 qy-HMX 晶体的表面粗糙度参数

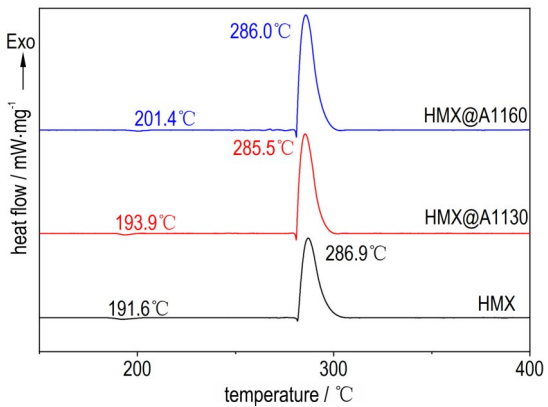
Table 3 Surface roughness parameters of qy-HMX crystals

samples	R_a / nm	R_q / nm	$R_{\text{max}} / \text{nm}$
qy-HMX	2.62	4.44	131
qy-HMX@A1130	21.5	32.0	279
qy-HMX@A1160	61.9	49.6	508

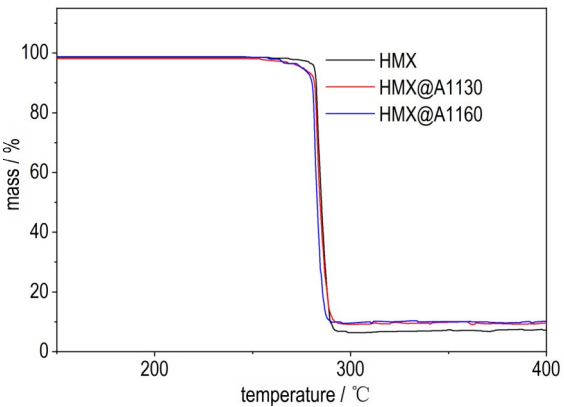
Note: R_a , R_q and R_{max} denote the mean value of roughness, root mean square roughness and the maximum height value from peak to valley, respectively.

2.2 热性能分析

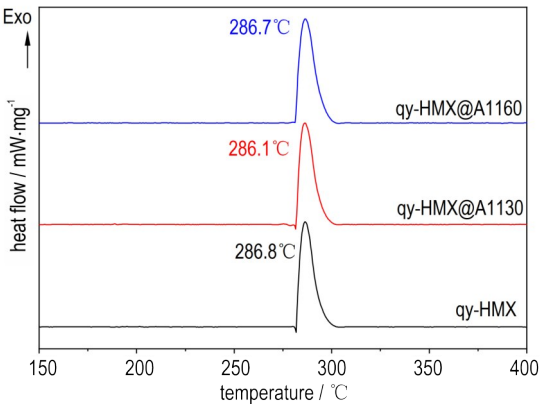
为了研究硅烷包覆层对 HMX 及 qy-HMX 热性能产生的影响,采用 DSC-TG 测试对样品的热性能进行分析(图 6)。HMX 原料在 $191.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处有一个吸热峰,对应 HMX 的 $\beta \rightarrow \delta$ 相变;在 $286.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处 HMX 发生剧烈放热分解(图 6a)。硅烷包覆未显著改变 HMX 的热分解温度,但 HMX@A1130 和 HMX@A1160 的相变温度分别提高至 $193.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $201.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明包覆层吸收消耗了部分热量,因此 HMX 的相变温度得到提高。两种硅烷抑制 HMX 转晶的同时不影响其热分解行为的现象,与众多已报道的核壳型复合材料的特征一致,如 HMX@聚多巴胺(PDA)和 HMX@Fe-酚基网络(MPN)^[29-31]。 δ 相晶核的形成被认为是多晶型转变过程中的限速步骤,它与 HMX 分子在表面的椅式到船式构象转变紧密相关。因此包覆样品的相变延迟可能的原因是形成了完整的核壳结构,包覆层和基体之间的界面相互作用抑制了 δ -HMX 的成核,并在固-固相变中带来了热传导障碍。包覆降低了多晶型转变速



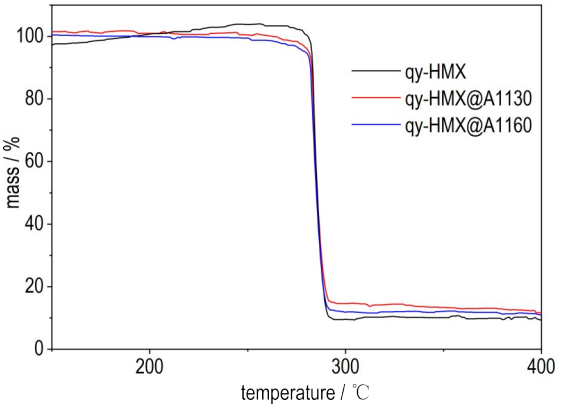
a. DSC curves of HMX-based samples



b. TG curves of HMX-based samples



c. DSC curves of qy-HMX-based samples



d. TG curves of qy-HMX-based samples

图 6 不同样品的 DSC 及 TG 曲线
Fig.6 DSC and TG curves of different samples

率,尤其是成核过程。TG 曲线表明所有样品均经历一步失重,改性样品的残余质量增加(图 6b,6d)。相比于 HMX, qy-HMX 原料并未发现明显转晶峰,这与 qy-HMX 的高晶型稳定性密切相关。硅烷改性的 qy-HMX 的热分解温度与纯 qy-HMX 没有较大的差异(图 6c)。

2.3 力学性能

为了分析硅烷包覆的界面改性作用对固体推进剂力学性能的影响,通过单轴拉伸试验测试推进剂试件在不

同温度和拉伸速率下的应力应变,计算抗拉强度 σ_m 和最大延伸率 ε_m 。T1、T2 和 T3 在拉伸速率为 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,3 个不同温度下的应力-应变曲线如图 7 所示。硅烷改性推进剂在低温 -50°C 环境下实现了 σ_m 和 ε_m 的协同提升,T2 的 σ_m 和 ε_m 相较于 T1 分别提升了 11.2% 和 73.6%,而 T3 的 σ_m 和 ε_m 分别提升了 9.1% 和 30.1% (图 7a)。在 20°C 和高温环境 70°C 下,硅烷包覆对固体推进剂的 σ_m 无明显提升,但在高温 70°C 下 T2 和 T3 的 ε_m 有所提升(图 7b~c)。

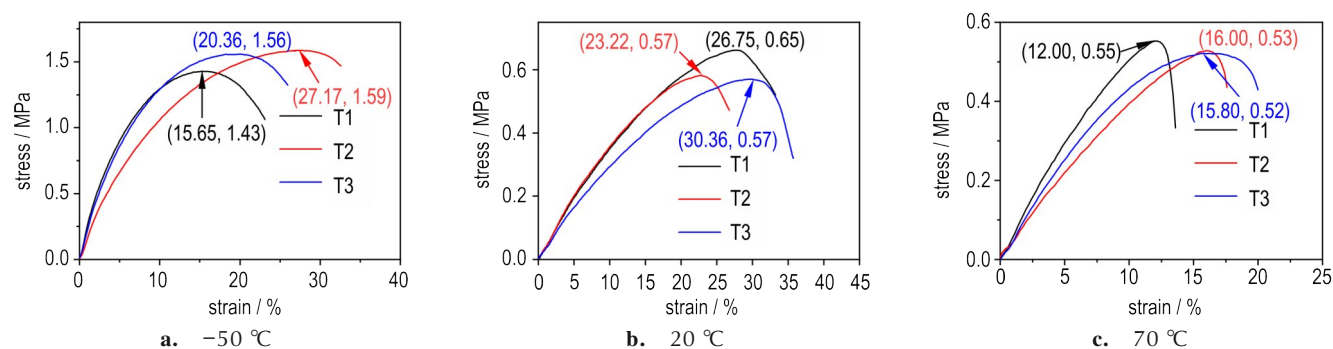


图 7 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 拉伸速率下 qy-HMX 基固体推进剂 T1~T3 应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of qy-HMX based solid propellants T1-T3 at $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ tensile rate

为更全面分析 qy-HMX 基固体推进剂的力学性能,计算各工况下 qy-HMX 基固体推进剂的抗拉强度 σ_m 和最大延伸率 ε_m ,结果如图 8 所示。在低温拉伸环境下,当拉伸速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,推进剂 T2 和 T3 的 σ_m 相较于 T1 分别提升了 29.9% 和 31.6%, ε_m 提升了 57.8% 和 125.3%(图 8a)。当拉伸速率为 $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,T2 的 σ_m 和 ε_m 均大于 T1。在高温环境下 A1130 改性的推进剂表现出较明显的速率敏感性,其 σ_m 和 ε_m 随着拉伸速率的提升变化更明显。其中 T2 的抗拉强度在拉伸速率为 $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 σ_m 为 0.47 MPa 和 0.72 MPa,相较于 T1 分别提高了约

20.5% 和 28.6%(图 8a 与 8c)。

HMX 基复合固体推进剂 T11、T12 和 T13 在拉伸速率为 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,3 个不同温度下的应力-应变曲线如图 9 所示。在 -50°C 下,T12 和 T13 的 σ_m 分别提升了 19.6% 和 22.3%,但最大延伸率无明显改变(图 9a)。在 20°C 和 70°C 时,A1160 改性的推进剂 T13 的 σ_m 降低但 ε_m 提高;而 A1130 改性推进剂 T12 在 20°C 时力学性能与 T11 无明显差别,在高温(70°C)下 σ_m 和 ε_m 均有所降低(图 9b~c)。

各工况下 HMX 基固体推进剂的力学性能参数如图 10 所示。常温下,推进剂 T12 力学性能并无明显变

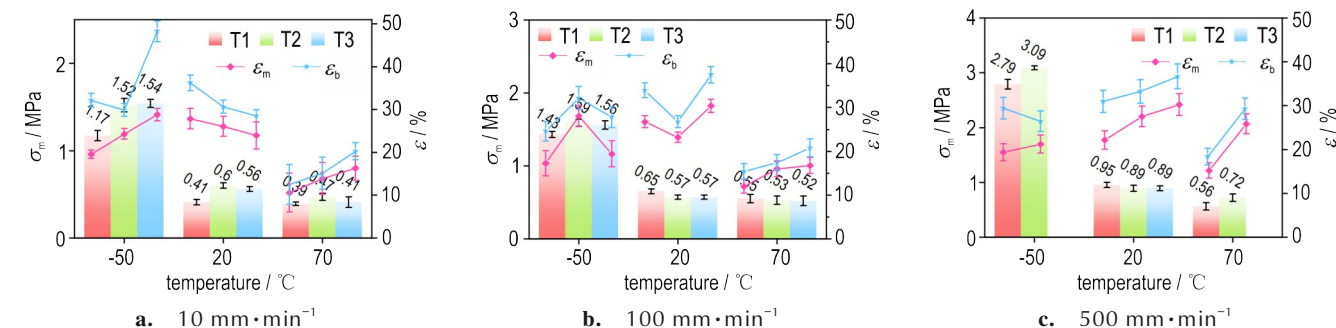


图 8 不同工况下 qy-HMX 基固体推进剂的力学参数

Fig.8 Mechanical parameters of qy-HMX based solid propellants under different working conditions

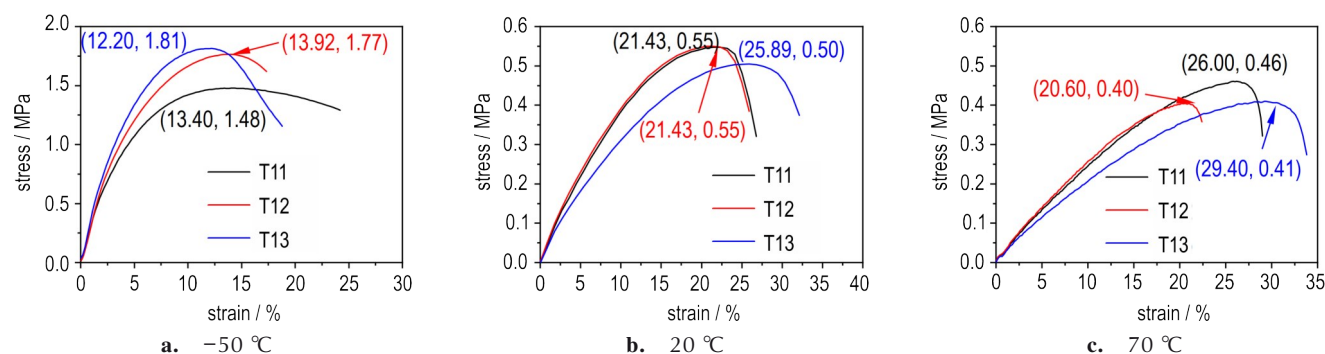


图9 100 mm·min⁻¹拉伸速率下HMX基固体推进剂T11~T13应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of T11~T13 HMX based solid propellants at the tensile rate of 100 mm·min⁻¹

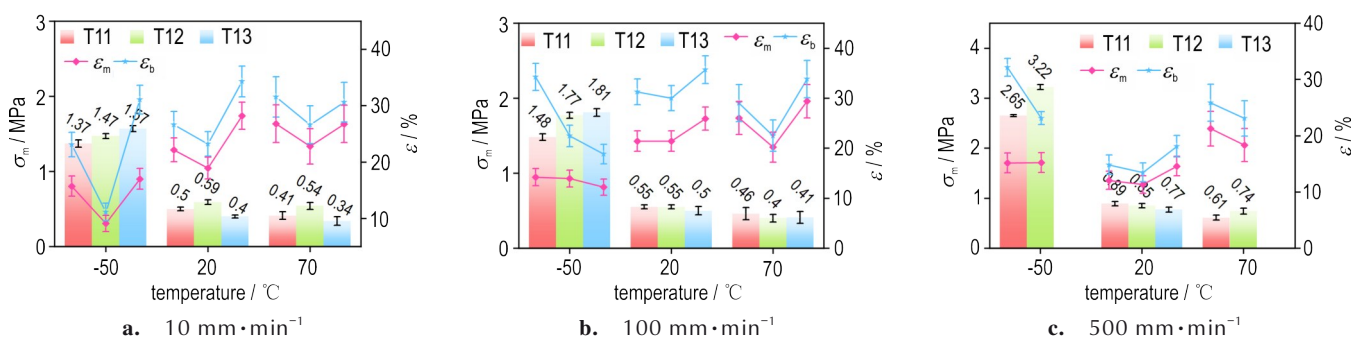


图10 不同工况下HMX基固体推进剂的力学参数

Fig.10 Mechanical parameters of HMX based solid propellants under different working conditions

化, T13的 ε_m 有一定提升。在70 °C/10 mm·min⁻¹条件下, 推进剂T13的 σ_m 下降至0.34 MPa($\Delta\sigma_m = -17.1\%$), 而T12的 σ_m 增至0.54 MPa($\Delta\sigma_m = 31.7\%$)但延伸率降低(图10a)。低温下硅烷改性推进剂 σ_m 提升, 高速下增幅更大, T12在500 mm·min⁻¹时的 σ_m 达3.22 MPa($\Delta\sigma_m = 21.5\%$), ε_m 维持基准水平(图10c)。高拉伸速率抑制了黏弹弛豫过程, 凸显了硅烷界面的承载优势。

HMX基推进剂试样的力学性能表现出与qy-HMX基推进剂类似的规律, 但qy-HMX体系界面增强效果优于HMX体系, 这是因为qy-HMX表面存在部分裸露的掺杂物TAGP提供了活性位点, 与硅烷活性基团产生强氢键作用, 因此表现出优于HMX基体系的力学增强效果。硅烷A1130和A1160分子结构中的一NH₂和—NH—与HMX及qy-HMX的一NO₂形成氢键作用, 并与HTPB分子链末端的一OH和固化剂IPDI的一NCO基团发生反应, 参与了粘结剂体系的交联网络, 从而将晶体与基体有效结合, 增加了界面粘接强度。

为精确分析硅烷的抑制“脱湿”的效果, 并排除力学测试误差的影响, 采用DMA技术研究了固体推进

剂的动态力学性能, 结果如图11所示。

从图11a与图11d可以看出, 所有体系的储能模量(E')均随温度升高而下降。在qy-HMX基推进剂体系中, A1160改性的T3在低温段的 E' 降低幅度大于T1, 表明A1160界面修饰推进剂的弹性大于T1, 而T2则与之相反。T1至T3的最大 E' 分别为3799.0, 3415.4 MPa和3940.0 MPa, 说明A1160包覆层增强了推进剂的刚性, T3在受力时更难发生弹性变形。由图11d所示, 含HMX@A1130的T12在-100 °C时的 E' 最大, 达到4180 MPa, 较空白配方提升48.0%, 硅烷使得两相界面处具有较强结合力, 减少界面滑移, 提高了推进剂的弹性性能, 在推进剂受到外力作用时能更好地保持形状和结构, 不易发生永久变形。与qy-HMX基推进剂产生差异的可能原因可归因于粒径和包覆层与颗粒的界面相互作用的差异。

由图11b与图11e可知, 低温时各体系损耗模量 E'' 随温度的升高先上升后下降。T2和T3分别为664.4 MPa和742.0 MPa, 相比于T1分别提升了10.0%和22.7%, 说明在玻璃态时, 推进剂T2和T3还存在较多的未被冻结的小运动单元, 仍可做一定程度

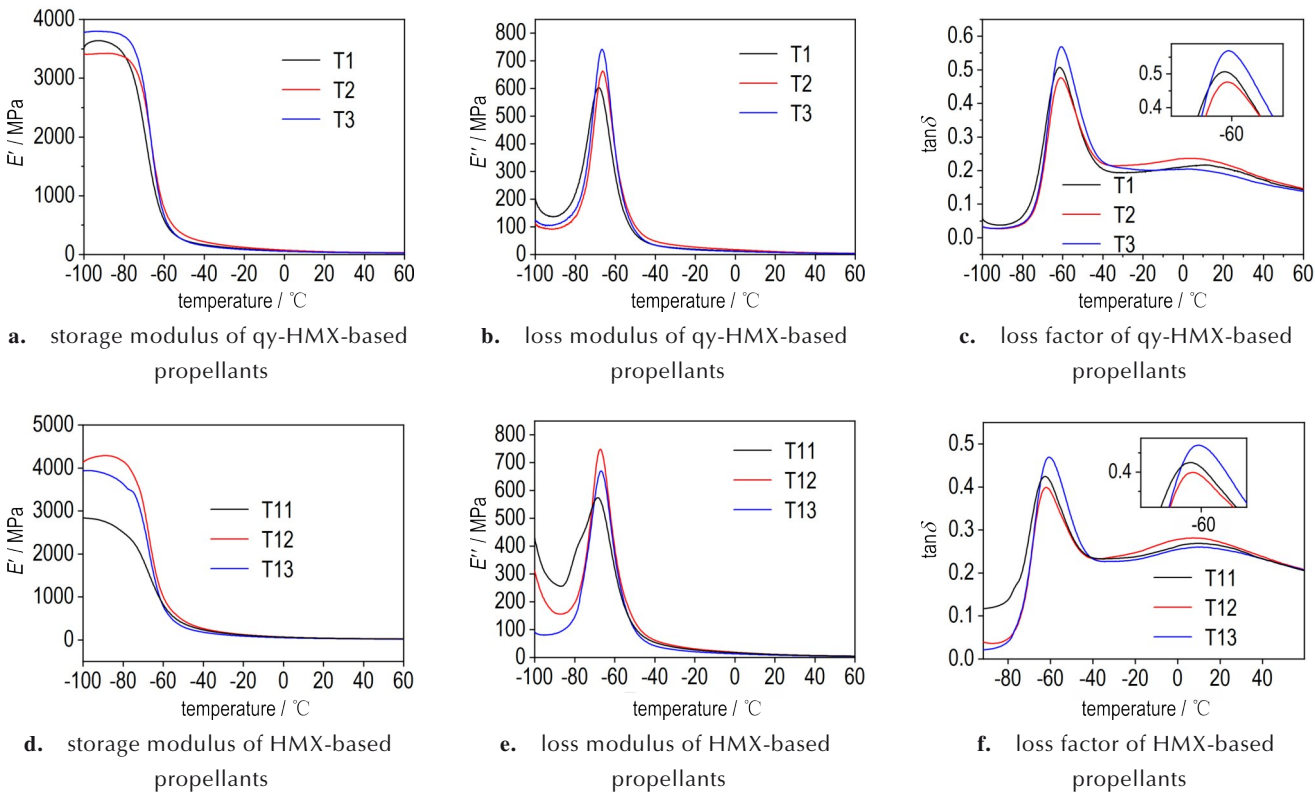


图 11 推进剂 T1~T3 及 T11~T13 的(a)(d)储能模量曲线,(b)(e)损耗模量曲线和(c)(f)损耗因子曲线
Fig.11 Storage modulus curves (a)(d), loss modulus curves (b)(e) and loss factor curves (c)(f) of T1~T3 and T11~T13 propellants

的运动,界面处的粘性行为增强,导致损耗模量提高。高损耗模量说明推进剂基体与固体填料之间的界面相互作用增强,在一定程度上可以提高材料的整体强度与稳定性。与 qy-HMX 基推进剂类似,硅烷改性 HMX 基推进剂相比于空白配方推进剂具有更高的损耗模量。

损耗因子($\tan\delta$)是材料的重要参数,为损耗模量和储能模量的比值,其结果如图 11c、f 和表 4 所示。两组推进剂的空白配方 $\tan\delta$ 峰值和峰值温度(玻璃化转变温度 T_g)分别为 0.51/-61.3 °C(T1)和 0.42/-62.6 °C(T11)。A1130 改性的 T2 和 T12 的 $\tan\delta$ 峰值分别降至

0.47 和 0.38,说明 A1130 能更有效地限制分子链的运动,直观反映了对界面“脱湿”现象的抑制效果。硅烷改性体系的 T_g 均有所提升,A1160 改性的 T3 和 T13 的 T_g 提升更显著,这可归因于包覆层与粘结剂基体之间的氢键和范德华力等相互作用和包覆层的刚性效应。

为了进一步探究 HTPB、硅烷和 HMX 之间界面相互作用对结合强度的影响,采用第一性原理方法分别研究了 HTPB、A1130 和 A1160 和 HMX 的结合能,构建了相应的复合体系模型如图 12a~c 所示,模型的构建在 Materials Studio 软件中完成,HMX 晶面选择(0 1 1)面进行切割。

所构建模型的系统结合能如图 12d 所示。HMX/HTPB、HMX/A1130/HTPB 和 HMX/A1160/HTPB 的结合能分别为 0.08、-1.36 eV 和 -0.36 eV,结构稳定顺序为 HMX/A1130/HTPB>HMX/A1160/HTPB>HMX/HTPB,说明 HMX/A1130/HTPB 构型相互作用较强,HMX/A1160/HTPB 次之,从界面结合能上进一步证实硅烷包覆可提升固体推进剂的界面强度。

本研究的硅烷偶联剂在包覆层特性和界面增强机制上区别于常见的聚合物包覆(如聚氨酯弹性体包覆

表 4 不同配方的 $\tan\delta$

Table 4 $\tan\delta$ values of different samples

sample	$\tan\delta$	
	peak temperature / °C	peak value
T1	-61.3	0.51
T2	-61.0	0.47
T3	-60.7	0.56
T11	-62.6	0.42
T12	-62.2	0.38
T13	-60.6	0.47

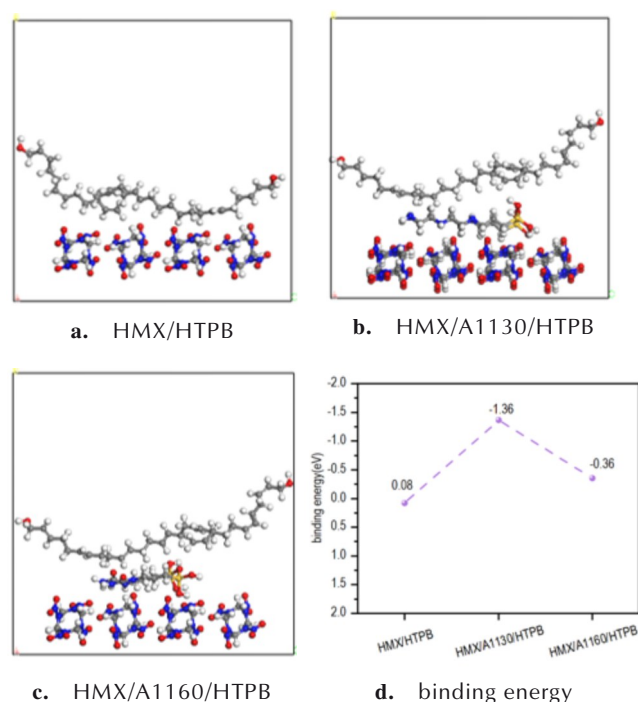


图12 三种优化结构的模型和体系结合能

Fig. 12 Models of three optimized structures and system binding energy

CL-20^[16-17])。聚合物包覆层通常较厚,可能会引入较多的惰性成分,且主要通过物理包覆和增强界面韧性来改善推进剂特性。XPS和AFM分析证实,硅烷A1130和A1160在HMX/qy-HMX表面形成纳米级厚度包覆层;且硅烷在含能晶体和HTPB粘结剂体系之间充当分子桥的作用。这种机制能在显著提升界面粘接强度的同时最大限度保持了含能材料的能量水平。

2.4 推进剂细观损伤表征

不同拉伸条件下qy-HMX基推进剂T1~T3的试样断面SEM图像如图13所示。

常温、拉伸速率为 $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的拉伸试样断面(图13a~c)未呈现显著形貌差异,qy-HMX颗粒裸露在拉伸断面上或者嵌在推进剂基体中,相界面清晰,与2.3节常温拉伸测试的结果相对应。

低温高速拉伸($-50^\circ\text{C}/500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)工况下推进剂断面的电镜图如图13d~f所示。相较于常温 20°C 拉伸,可以观察到低温下推进剂T1的qy-HMX更多地裸露在断面上,qy-HMX颗粒表面清晰光滑,粘结剂基体与HMX颗粒间的界面分明,两相间无明显

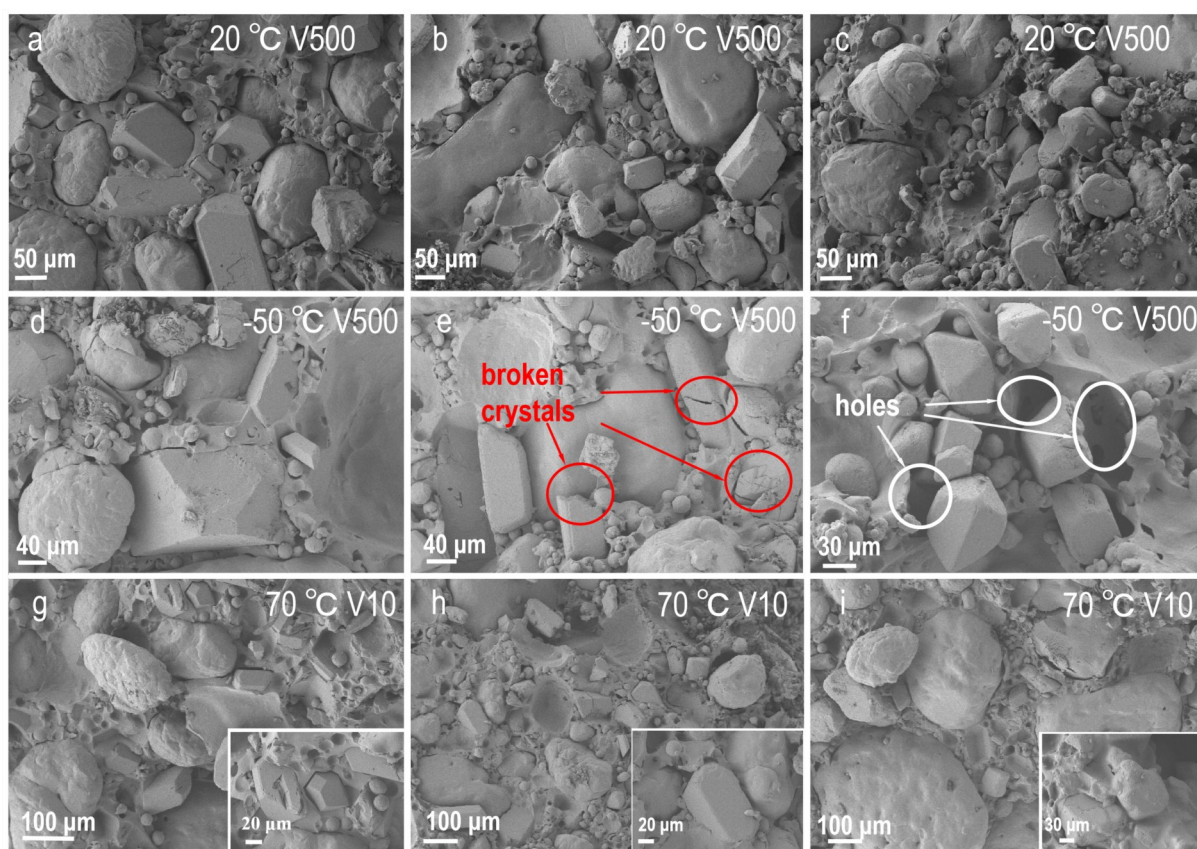


图13 不同工况下推进剂拉伸断面:(a,d,g)T1;(b,e,h)T2;(c,f,i)T3

Fig.13 SEM images of propellant tensile section under different conditions. (a,d,g)T1, (b,e,h)T2, (c,f,i)T3

相互作用且界面处可见微米级间隙,粘结性能较差,在外力作用下发生“脱湿”,失效发生于晶体与粘结剂界面。A1130改性的T2推进剂断面(图13e)的qy-HMX颗粒表面粗糙,可见晶体穿晶断裂特征(红色标记),表明界面黏附强度已超越晶体本体内聚力。推进剂T3断面与空白配方推进剂类似,qy-HMX@A1160与基体的相界面清晰,两相间可以观察到较多空洞(白色圆圈)和缺陷(图13f),存在较明显的“脱湿”现象,反映A1160包覆层在极端工况下的界面稳定性不足。

高温低速拉伸($70\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)工况下推进剂拉伸断面的电镜图像如图13g~i所示。T1断面有较多裸露晶体,其表面未见粘结剂分布,呈现典型界面失效形貌,颗粒易脱落(图13g)。硅烷改性的推进剂T2和T3断面上裸露在外的qy-HMX远少于空白配方T1(图13h~i)。从放大图可知,qy-HMX晶体与基体相界面模糊,结合紧密,推进剂T3可见晶体-基体界面过渡区存在连续渐变结构,表明硅烷包覆层与粘结剂形成了键合网络。

3 结论

(1)采用化学包覆方法实现了硅烷偶联剂A1130和A1160分别对HMX和qy-HMX晶体的表面包覆,通过SEM、XRD、XPS证实硅烷在晶体表面形成了连续包覆层,未改变晶体晶型,分散性良好。

(2)热分析表明,包覆层对HMX及qy-HMX的热分解无明显影响,HMX的相稳定性有一定提高。与原料HMX相比,HMX@A1130和HMX@A1160颗粒的相变温度分别提高了 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,HMX $\beta\rightarrow\delta$ 相变受到抑制。

(3)力学测试显示,硅烷可提升推进剂高低温条件下的抗拉强度,尤其是低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的抗拉强度。DMA分析表明,在低温条件下,A1130改性的推进剂 $\tan\delta$ 相较于空白配方推进剂大致呈减小趋势,有效抑制了“脱湿”,A1160则使 $\tan\delta$ 有所增加。

(4)断口形貌分析表明,A1130改性推进剂在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}/500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况下存在明显晶体穿晶断裂现象,高温低速拉伸($70\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)条件下硅烷改性推进剂晶体颗粒与粘结剂结合更紧密,相界面模糊,硅烷改性推进剂改善了推进剂的力学性能。

参考文献:

[1] 袁申,刘海青,齐铭,等.复合推进剂力学性能及其改善技术研究

究进展[J].兵工自动化,2022,41(12):114-121.

YUAN Shen, LIU Hai-qing, QI Ming, et al. Research status of mechanical properties for composite propellant and its improvement technology [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2022, 41(12): 114-121.

[2] CHATURVEDI S, DAVE P N. Solid propellants: AP/HTPB composite propellants [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, 12(8): 2061-2068.

[3] 孙鑫科,石柯,史钰,等.丁羟三元组推进剂的增材制造及性能研究[J].火炸药学报,2024,47(2):172-179.

SUN Xin-ke, SHI Ke, SHI Yu, et al. Study on additive manufacturing and performance of HTPB tripropellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47(2): 172-179.

[4] 杜永强,郑坚,彭威,等.HTPB推进剂贮存老化建模及寿命预估研究综述[J].化工进展,2016,35(S2):219-224.

DU Yong-qiang, ZHENG Jian, PENG Wei et al. Review of the research of aging modeling and life prediction for HTPB propellant [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(S2): 219-224.

[5] 秦浩,杜仕国,闫军,等.固体推进剂老化性能研究进展[J].化工进展,2013,32(8):1862-1865+1897.

QIN Hao, DU Shi-guo, YAN Jun, et al. Research progress of aging properties of solid propellant [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(8): 1862-1865+1897.

[6] 陈广南.固体火箭发动机机械撞击载荷作用下安全性研究[D].长沙:国防科学技术大学,2005.

CHEN Guang-nan. Investigation of the safety for solid rocket motor under mechanical impact [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2005.

[7] WU W, CHEN C, FU X, et al. The correlation between chemical stability and binder network structure in NEPE propellant [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42 (5): 541-546.

[8] SOJOURNER T, RICHARDSON D E, ALLEN B D, et al. Solid rocket motor reliability and historical failure modes review [C]//51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Orlando, FL: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[9] 刘新国,刘佩进,强洪夫.复合固体推进剂脱湿研究进展[J].固体火箭技术,2018,41(3):313-318+337.

LIU Xin-guo, LIU Pei-jin, QIANG Hong-fu. Recent advances on research of the dewetting in composite solid propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41 (3): 313-318+337.

[10] 李思恒,曲文刚,赵凤起,等.金属氧化物催化剂表界面效应对AP热分解性能影响进展[J].含能材料,2024,32(10):1118-1135.

LI Si-heng, QU Wen-gang, ZHAO Feng-qi, et al. Progress in the influence of surface and interface effects of metal oxide catalysts on the thermal decomposition performance of AP [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(10): 1118-1135.

[11] 余天昊,闫亚宾,王晓媛.复合固体推进剂界面多尺度数值模拟研究进展[J].含能材料,2024,32(5):554-569.

YU Tian-hao, YAN Ya-bin, WANG Xiao-yuan. Advancements in multiscale numerical simulation of composite solid propel-

- lant interfaces[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(5): 554-569.
- [12] 刘轩, 庞爱民, 洪昕林, 等. 硝胺类复合固体推进剂用键合剂的研究进展[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(6): 714-719+724.
LIU Xuan, PANG Ai-min, HONG Xin-lin, et al. Research progress of bonding agents for nitramine-based composite solid propellants[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(6): 714-719+724.
- [13] OBERTH A E. Principle of strength reinforcement in filled rubbers[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1967, 40(5): 1337-1363.
- [14] 李江存, 焦清介, 任慧, 等. 层层组装法制备 NC-BA-RDX 包覆球[J]. 固体火箭技术, 2008(3): 247-250+261.
LI Jiang-cun, JIAO Qing-jie, REN Hui, et al. Preparation of NC-BA-RDX coating ball particles by means layer-to-layer assembly technique[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008(3): 247-250+261.
- [15] ZHANG W, FAN X, WEI H, et al. Application of nitramines coated with nitrocellulose in minimum signature isocyanate-cured propellants[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33(4): 279-285.
- [16] 徐爽, 武卓, 庞爱民, 等. 丁腈橡胶类键合剂在 CL-20/GAP 体系中的应用[J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 578-581.
XU Shuang, WU Zhuo, PANG Ai-min, et al. Application of nitrile butadiene rubber bonding agents in CL-20/GAP system[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(6): 578-581.
- [17] 时志权, 王惠, 陆德炜. PEDOT/RDX 复合粒子的制备与性能研究[J]. 推进技术, 2017, 38(11): 2628-2633.
SHI Zhi-quan, WANG Hui, LU De-wei. Study on preparation and properties of PEDOT/RDX composite particles[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(11): 2628-2633.
- [18] 张超, 王存权, 陈俊波, 等. 热塑性聚氨酯弹性体包覆 CL-20 及对改性双基推进剂性能影响[J]. 火工品, 2017(4): 57-60.
ZHANG Chao, WANG Cun-quan, CHEN Jun-bo, et al. Study on CL-20 coated by thermoplastic polyurethane elastomers (TPU) and the influence on mechanical properties of CMDB propellant[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017(4): 57-60.
- [19] 杨寅, 罗运军, 酒永斌, 等. 热塑性聚氨酯弹性体包覆 CL-20 及对 NEPE 推进剂性能影响[J]. 固体火箭技术, 2008(4): 358-362+373.
YANG Yin, LUO Yun-jun, JIU Yong-bin, et al. Influence of CL-20 coated with thermoplastic polyurethane elastomers (TPU) on mechanical properties of NEPE propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008(4): 358-362+373.
- [20] 姚莹莹, 张教强, 季铁正, 等. 聚醚环酰胺固体推进剂用键合剂的合成及使用性能[J]. 应用化学, 2010, 27(9): 1004-1007.
YAO Ying-ying, ZHANG Jiao-qiang, JI Tie-zheng, et al. Synthesis and performances of polyether heretocycle amide bonding agent[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2010, 27(9): 1004-1007.
- [21] 姚莹莹, 张教强, 赵庆鹏, 等. 聚醚环酰胺类键合剂与 HMX 粘附性能的研究[J]. 粘接, 2010, 31(5): 41-44.
YAO Ying-ying, ZHANG Jiao-qiang, ZHAO Qing-peng, et al. Study on interaction between HMX and bonding agents containing polyether of hereocycle amide[J]. *Adhesion*, 2010, 31(5): 41-44.
- [22] GUO W, LI Y, WEN Z, et al. Improvement of interfacial properties between cis-1,4-polybutadiene rubber and HMX crystal[J]. *ChemistrySelect*, 2020, 5(45): 14247-14250.
- [23] 吉祥波, 鲜晓斌, 唐贤臣, 等. 硅烷偶联剂 KH550 对 Parylene C 膜与金属铝基体结合强度的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(3): 57-59.
JI Xiang-bo, XIAN Xiao-bin, TANG Xian-chen, et al. Influence of KHH550 silane coupling agents on adhesive properties of parylene C film aluminum substrates[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2012, 28(3): 57-59.
- [24] 党文伟, 李晓升, 周玉龙. 硅烷偶联剂在防热涂料中的应用前景分析[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(4): 27-30.
DANG Wen-wei, LI Xiao-sheng, ZHOU Yu-long. Application prospect of silane coupling agent in heat resistant coatings[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2022, 52(4): 27-30.
- [25] 王含, 罗理达, 汪庆卫. 硅烷偶联剂改性对气相 SiO₂ 电缆绝缘复合材料性能的影响[J]. 化工新型材料, 2024, 52(8): 142-146.
WANG Han, LUO Li-da, WANG Qing-wei. Effect of silance coupling agent modification on the properties of gas phase SiO₂ cable insulation composite materials[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(8): 142-146.
- [26] 赵凤起, 单文刚, 李上文. 有机硅烷偶联剂在固体火箭发动机装药中应用及其作用机理综述[J]. 含能材料, 1998(1): 37-42.
ZHAO Feng-qi, SHAN Wen-gang, LI Shang-wen. A review on silane coupling agents used in solid rocket motor charges and their action mechanical[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1998(1): 37-42.
- [27] 陈迪, 黄杉, 杨园园, 等. 超浸润性 γ -氨丙基三乙氧基硅烷-TiO₂ 包覆织物的制备及其水净化性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4620-4630.
CHEN Di, HUANG Shan, YANG Yuanyuan, et al. Preparation of superwetting γ -aminopropyltriethoxysilane-TiO₂ coated fabric and its water purification performances[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2022, 39(10): 4620-4630.
- [28] DUAN B, MO H, TAN B, et al. Interfacial reinforcement of core-shell HMX@energetic polymer composites featuring enhanced thermal and safety performance[J]. *Defence Technology*, 2023: S2214914723000260.
- [29] 杨学林, 曾诚成, 巩飞艳, 等. 聚多巴胺改性的 CL-20 和 FOX-7 炸药力学性能及热稳定性[J]. 含能材料, 2021, 29(11): 1049-1060.
YANG Xue-lin, ZENG Cheng-cheng, GONG Fei-yan, et al. Mechanical properties and thermal stabilities of CL-20 and FOX-7 explosives modified by polydopamine[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(11): 1049-1060.
- [30] LI Z, ZHAO X, GONG F, et al. Catechol-modified polymers for surface engineering of energetic crystals with reduced sensitivity and enhanced mechanical performance[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 572: 151448.
- [31] MAO C, QU Y, WANG J, et al. Strengthening and toughening energetic polymer composites via assembly of metal-phenolic network[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 226: 109546.

Interfacial Enhancement Technology of Propellant Based on Silicone-coated HMX

QIN Yuan¹, PU Rui¹, TU Long-xiao², YAN Qi-long¹

(1. National Key Laboratory of Solid Rocket Propulsion, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Rocket Force Equipment Department in Xiangyang Area Military Representative Room, Xiangyang 441000, China)

Abstract: To enhance the mechanical properties of HTPB four-composite solid propellants, 3-[2-(2-aminoethylamino)ethylamino]propyl-trimethoxysilane (A1130) and *N*-(Triethoxysilylpropyl)urea (A1160) were employed to modify the surface of HMX and qy-HMX, followed by their application in solid propellant formulation. Scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), atomic force microscope (AFM) and thermal analysis (DSC-TG) were used to test the morphology, structure and performance of samples. The interfacial enhancement effects were systematically investigated using an electronic universal testing machine and dynamic thermomechanical analyzer (DMA) to assess mechanical properties and adhesion characteristics. Results demonstrate that the silane treatment forms continuous coating layers without changing the crystalline structure. Silane coating inhibits effectively the transformation of HMX, increasing the phase transition temperature of HMX@A1130 and HMX@A1160 to 193.9 °C and 201.4 °C, which are 2.3 °C and 9.8 °C higher than that of raw HMX. The mechanical tests reveal significant improvements in propellant tensile strength across both high temperature (70 °C) and low temperature (−50 °C) conditions. Notably, A1130-modified propellant exhibits an enhanced tensile strength with the adhesion index reduced from 1.52 to 1.24 at −50 °C/500 mm·min^{−1}. The tensile strength of propellants modified with HMX@A1130 and HMX@A1160 increases by 29.9% and 31.6%, and the maximum elongation increase by 29.9% and 31.6%, respectively. DMA results show that the peak value of loss factor for the A1130-modified propellant decreases from 0.51 to 0.47, indicating a mitigation of the interfacial ‘dewetting’ phenomenon at low temperatures. The fracture surface morphology analysis results are in good agreement with the tensile test and DMA test. The addition of two silane coupling agents has a significant interfacial modification effect, and A1130 can inhibit the interfacial ‘dewetting’ on hydroxyl-terminated polybutadiene system.

Key words: surface coating; silane coupling agent; octogen (HMX); HTPB propellants; mechanical properties

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025053

Grant support: National Nature Science Foundation of China (No. U2030202)

(责编: 姜梅)