

文章编号:1006-9941(2019)11-0949-06

仿生聚多巴胺对 HMX、TATB 和铝粉的界面性能改性

祝青,吴束力,肖春,谢琥,李尚斌,罗观

(中国工程物理研究院化工材料研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 为了研究表面改性方法及表面包覆均匀性、浸润性等性状对含能材料的机械感度、界面力学性能以及工艺性能的影响,仿生贻贝黏附蛋白的作用原理,以多巴胺为前驱体,采用一步法使其在含能材料表面聚合形成一层致密牢固的包覆薄膜聚多巴胺(PDA),制备了改性单质炸药(HMX@PDA、TATB@PDA)和改性铝粉(Al@PDA)。通过扫描电子显微镜、X射线光电子能谱和接触角测试仪对改性含能材料的表面形貌、药柱断裂处微观形貌、元素含量以及表面浸润性能进行了表征,采用国军标(GJB-772A-1997)、巴西实验等标准测试方法对改性含能材料的机械感度、拉伸应力-应变曲线等进行了测试,并将实测性能与未改性含能材料进行了对比分析。结果表明,与 HMX 晶体比较,HMX@PDA 晶体的摩擦感度下降 30%,特性落高数值增加一倍;与 TATB 基药柱比较,TATB@PDA 基药柱的拉伸强度提高约 15%;与 Al 粉比较,Al@PDA 在 HTPB 液相中 24h 后可有效减缓沉降。聚多巴胺对晶体完整致密的包覆性能以及含有丰富活性基团的特性,对含能材料的包覆降感、界面力学性能提升和工艺稳定性提升等方面具有显著的界面改性作用。

关键词: 聚多巴胺;单质炸药;铝粉;机械感度;力学性能;界面性能

中图分类号: TJ55;O63

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019179

1 引言

随着钝感弹药的发展,现代武器装备对高聚物粘结炸药(PBX)的安全性和其它性能的要求越来越高^[1]。工业生产的单质炸药通常机械感度较高、界面粘接性能较差,使其 PBX 的实际应用存在较大限制,而高性能的含铝炸药由于铝粉的分布不均匀导致其利用率较低,始终难以达到满意效果^[2]。通常降低炸药感度和改善界面性能的方法主要是在炸药颗粒表面包覆惰性物质或钝感炸药,如石蜡、聚氨酯或 TATB 等,或添加多种功能助剂,这类包覆材料通常采用物理包覆或直接混合的方法进行制备,这种制备方法可能导致炸药表面的包覆层较厚、包裹不均匀且不完全,得到的 PBX 性能参差不齐^[3-5]。因此,发展一种简便方法使炸药颗粒和铝粉表面包裹一层均匀的改性层,且可大

批量操作,围绕浇注 PBX 中存在的表界面问题,如包覆降感、界面力学性能增强等实现性能提升,对钝感弹药和高性能弹药的发展具有十分关键的影响。

近年来生物学家研究发现,海洋生物贻贝可分泌一种黏液,在海水中凝固成足丝,可紧密粘附于基体材料表面,这种黏液发挥作用的主要成分是粘附蛋白^[6]。受这类粘附蛋白的启发,一种简易且通用的功能表面修饰方法被发展,具有儿茶酚官能团的物质,如左旋多巴或多巴胺,在水溶液条件下可发生氧化聚合,在聚合物、金属、玻璃、陶瓷等一系列固体表面均可形成一层均匀的复合膜^[7],这为复合材料的功能表面改性提供了一种简便方法。儿茶酚聚合产物聚多巴胺(PDA)在包覆物质表面时可实现薄、牢固,且表面具有良好的亲水性和粘接性能^[8]。PDA 包覆层的这些优点可能为制备钝感单质炸药和提高铝粉及炸药界面力学性能提供一种新的方法。

为此,本研究将 PDA 包覆层引入含能材料 HMX、TATB 和铝粉的表面改性中,通过简单的一步法使多巴胺在水环境中聚合沉积在含能材料表面,牢固且均匀地包覆于含能材料颗粒表面,避免了包覆层易脱落和不均匀等弊端,使含能材料表面性质得到均匀完整的改性。通过 PDA 包覆层对晶体表面缺陷的修补可实现 HMX 晶体的机械降感,通过 PDA 包覆层表面的

收稿日期: 2019-06-21; 修回日期: 2019-07-23

网络出版日期: 2019-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(11772308)

作者简介: 祝青(1985-),女,助理研究员,主要从事混合炸药设计及性能研究。e-mail: zhuqing@caep.cn

通信联系人: 李尚斌(1972-),男,研究员,主要从事混合炸药设计及性能研究。e-mail: caeplisb@163.com

引用本文: 祝青,吴束力,肖春,等. 仿生聚多巴胺对 HMX、TATB 和铝粉的界面性能改性[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 Powders with Polydopamine Coating[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(11):949-954.

活性官能团可增强 TATB 基 PBX 的界面力学性能, 还可提高铝粉在粘结剂中的分散稳定性。

2 实验部分

2.1 材料制备

HMX, 平均粒径为 450 μm , 甘肃银光化学工业集团有限公司; TATB, 平均粒径 20 μm , 中国工程物理研究院化工材料研究所; 铝粉, 平均粒径 50 μm , 鞍钢实业微细铝粉有限公司。

盐酸多巴胺 (DA), 纯度 98%, 上海阿拉丁试剂有限公司; 三羟甲基氨基甲烷 (Tris), 分析纯, 上海阿拉丁试剂有限公司; 氯化铁 (FeCl_3), 分析纯, 上海阿拉丁试剂有限公司; 端羟基聚丁二烯 (HTPB), 工业品, 羟值 0.75 $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$, 黎明化工研究院; 无水乙醇, 分析纯, 天津天力化学试剂有限公司。

将单质炸药 HMX、TATB 用去离子水和乙醇清洗三遍, 铝粉用乙醇清洗两遍, 置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干备用; 配置浓度为 1.21 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的三羟甲基氨基甲烷 (Tris) 缓冲液, 溶液的 pH 值为 8.5, 取炸药粉末材料置于缓冲溶液中, 再添加 2 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度的盐酸多巴胺, 将混合液置于电动搅拌器上搅拌约 12h; 将得到的改性炸药材料过滤, 用去离子水或乙醇清洗 3 遍, 置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干, 得到改性炸药材料分别标识为 HMX@PDA 和 TATB@PDA; 配置浓度为 1.21 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的 Tris 缓冲液, 溶液的 pH 值为 8.5, 取铝粉置于缓冲溶液中, 再添加 0.1 mg/mL 浓度的氯化铁和 2 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度的盐酸多巴胺, 将混合液置于电动搅拌器上搅拌约 5 min; 将得到的改性铝粉过滤, 用乙醇清洗 3 遍, 置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干, 得到改性铝粉材料, 标识为 Al@PDA。

2.2 性能测试

采用中物院化工材料研究所自研颗粒密度仪对炸药晶体密度进行测量; 采用 CamScan Apollo300 电子扫描电镜 (SEM) 对材料表面形貌进行表征, 测试时对粉末样品进行喷金处理, 扫描电镜电压加载为 2 kV; 使用 Thermo ESCACAB250 对材料表面进行 X-射线光电子能谱 (XPS) 测试与分析; 在室温环境下 (25 $^{\circ}\text{C}$) 使用 DSA30S 接触角仪对材料进行接触角测试, 将粉末样品平铺于载玻片上, 置于接触角测试台上, 分别使用 5 μL 水滴、甲酰胺或 10 μL HTPB 液滴为接触角测试液滴, 液滴接触样品后静置约 10 s 后进行拍照, 并通过仪器软件自动计算样品接触角; 根据 GJB772A-1997 方法 602.1 摩擦感度爆炸概率法测试改性前后材料的摩擦感度, 测试条件为摆角 90 $^{\circ}$, 压力

3.92 MPa, 样品量 (30 \pm 5) mg; 按方法 601.2 撞击感度特性落高法测试改性前后材料的撞击感度, 测试条件为 001 落锤仪, 2 kg 落锤, 样品量 (30 \pm 5) mg。

将改性前后炸药分别制备成 $\Phi 20\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的药柱, 在室温环境下 (25 $^{\circ}\text{C}$) 采用万能材料试验机进行巴西实验, 对药柱的拉伸力学性能进行测试^[9-11], 测试加载速率为 0.5 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

3.1 聚多巴胺包覆 HMX 的降感

HMX 为白色晶体, 其颗粒密度为 1.9007 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, HMX@PDA 呈现浅棕色, 其颗粒密度为 1.9002 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, HMX 和 HMX@PDA 的表面形貌如图 1 所示。由图 1 可见, 包覆前后 HMX 的尺寸形状没有发生变化, HMX 原材料表面的一些凹槽在包覆时被聚多巴胺填平, 包覆后颗粒表面变得均匀平整。对 HMX 和 HMX@PDA 表面分别进行 XPS 测试, 结果见表 1。由表 1 可见, 包覆后 C 元素的含量增加, O 元素和 N 元素的含量减少, 这是因为聚多巴胺中的 C 元素含量较高的缘故。

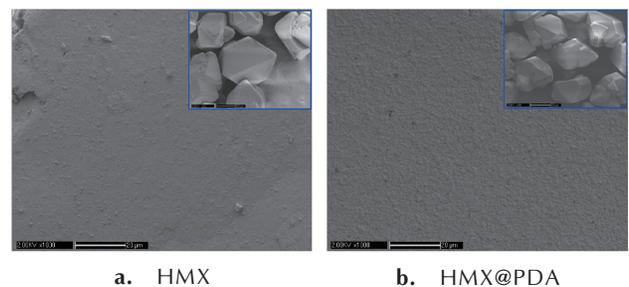


图 1 HMX 和 HMX@PDA 颗粒的 SEM 照片 (右上角为小倍数 SEM 照片, 放大倍数为 100 \times)

Fig.1 SEM images of HMX and HMX@PDA

表 1 HMX 和 HMX@PDA 颗粒的元素组成

sample	C	N	O	%
HMX	26.74	39.37	33.89	
HMX@PDA	40.98	29.86	29.16	

HMX 和 HMX@PDA 表面的润湿性分别由水接触角和端羟基聚丁二烯 (HTPB) 液滴接触角进行表征, 其结果如图 2 所示。由图 2 可见, HMX 和 HMX@PDA 表面与水的接触角分别为 125 $^{\circ}$ 和 0 $^{\circ}$, 而 HMX 和 HMX@PDA 表面与 HTPB 的接触角分别约为 91 $^{\circ}$ 和 32 $^{\circ}$ 。HMX 颗粒的表面能为 42 $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[12], HMX 自身具有超疏水特性, 而 PDA 聚合物含有丰富的羟基和氨基活性基团, 其表面能较高^[13], PDA 包覆 HMX 后则会改变晶

体的表面性状,使得 HMX@PDA 颗粒能够立即吸收水滴,表现出超亲水性能,且对 HTPB 的浸润性能更良好。固体颗粒表面与液相之间良好的浸润性能有利于液相在固体表面的铺展和附着,同时,牢固的包覆层可以消除表面的热点,从而可降低单质炸药的机械感度。

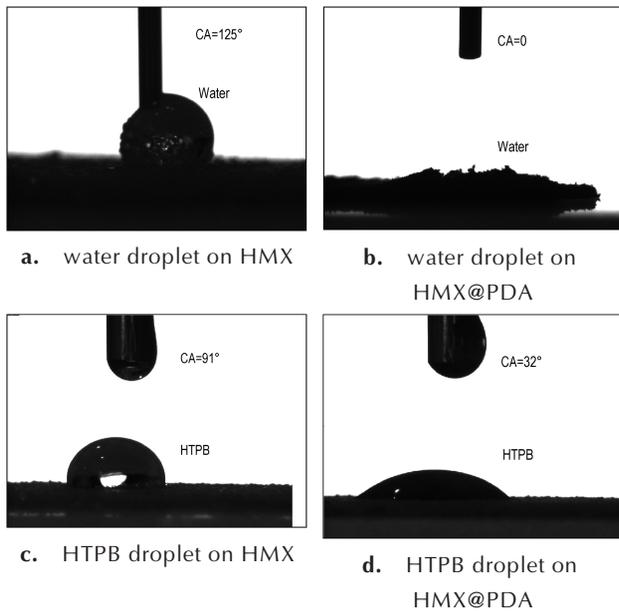


图2 水和 HTPB 在 HMX 和 HMX@PDA 颗粒表面接触时的照片
Fig.2 Optical images of water and HTPB droplets placed on the surface of HMX and HMX@PDA

HMX 和 HMX@PDA 颗粒的摩擦感度和撞击感度的测试结果见表 2。由表 2 可见,HMX@PDA 的摩擦感度为 50%,比 HMX 降低 30%,HMX@PDA 的特性落高数值比 HMX 提高了 36 cm,HMX@PDA 的机械感度明显低于 HMX。导致这一结果的原因可能有,惰性物质 PDA 均匀包覆 HMX 表面,对 HMX 表面起到了保护作用,PDA 在 HMX 表面的完整包覆性可填补 HMX 颗粒表面的微缺陷,使得晶体表面热点减少,降低了其机械感度。

表 2 HMX 和 HMX@PDA 颗粒的摩擦和撞击感度

Table 2 The friction and impact sensitivities of HMX and HMX@PDA

sample	$P / \%$	H_{50} / cm
HMX	80	33.4
HMX@PDA	50	69.4

Note: P is the explosive probability for friction sensitivity. H_{50} is the characteristic drop for impact sensitivity.

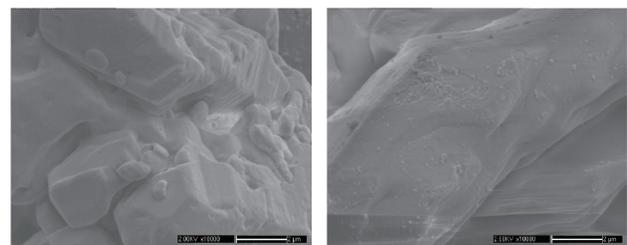
3.2 聚多巴胺包覆 TATB 的界面力学性能增强改性

TATB 表面能较低,文献报道约 $50.2 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ [12],且一般粉末颗粒粒径约为 $20 \mu\text{m}$,其表面会呈现较强的疏水特性,在实际应用中与胶粘剂和其它添加剂的

相容性较差,容易出现粉碎脱粘等现象。使用多巴胺或含有功能基团的儿茶酚物质包覆 TATB 可达到改善其界面性能的作用 [9]。聚多巴胺包覆 TATB 粉末后,黄色的粉末呈现棕色,如图 3 所示。图 4 为 TATB 和 TATB@PDA 粉末的表面形貌 SEM 照片。由图 4 可以看出,聚多巴胺包覆 TATB 后,光滑的颗粒表面形成了一些纳米级的小突起,增加了表面粗糙度。这是由于多巴胺在 TATB 表面发生聚合反应,形成了纳米级的聚多巴胺团,而聚多巴胺物质的尾部含有活性的羟基和氨基官能团,可进一步与其它物质进行反应,促使改性后的 TATB 粉末与胶粘剂等物质间形成较强的化学键或氢键,达到改善 TATB 基炸药的界面粘接性能。



图3 TATB 和 TATB@PDA 粉末的照片
Fig.3 Photo of TATB and TATB@PDA



a. TATB b. TATB@PDA

图4 TATB 和 TATB@PDA 粉末表面形貌的 SEM 照片
Fig.4 SEM images of TATB and TATB@PDA

使用水和甲酰胺分别对 TATB 和 TATB@PDA 粉末进行接触角的测试,接触角照片如图 5 所示。由图 5 可见,TATB 与水和甲酰胺的接触角分别为 65° 和 47° ,而 TATB@PDA 与水和甲酰胺的接触角均为 0° ,说明 PDA 对 TATB 的表面包覆改变了其表面能状态,使粉末与液相间的浸润性能发生了明显改变。通过不同液滴的接触角值带入 KÜSS 表面能计算公式 (YOUNG'S 方程和 FOWKES 方法) 软件中,获得 TATB 和 TATB@PDA 粉末的表面能、极性分量和色散分量结果如表 3 所示。由表 3 可以得出,PDA 包覆的 TATB 表面能增大,表面对液相的浸润性提高,且表面能的色散分量变化较小,而极性分量得到了极大提升,极性分量在表面能中占比大幅提高,说明聚多巴胺包覆 TATB 颗

粒表面后,使其表面具有丰富的极性活性基团,不仅利于液相在固相表面的的浸润铺展,也为进一步的反应提供了固相表面的活性连接点。

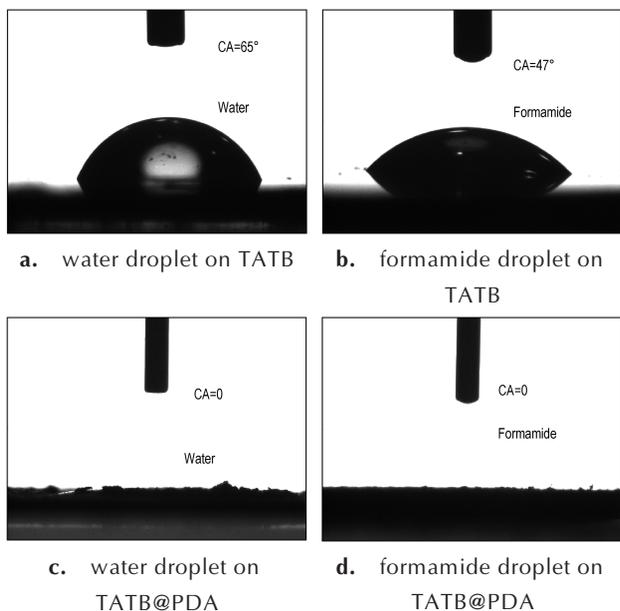


图5 水和甲酰胺液滴分别在TATB和TATB@PDA表面的接触角照片

Fig. 5 Optical images of water and formamide droplets placed on the surface of TATB and TATB@PDA

表3 TATB和TATB@PDA粉末的接触角及表面能

Table 3 The surface free energies and contact angles of the TATB and TATB@PDA

	$CA_{\text{water}} / (^\circ)$	$CA_{\text{formamide}} / (^\circ)$	$E_{\text{se}} / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	$E_{\text{polar}} / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	$E_{\text{disp}} / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$
TATB	65	47	39.64	13.84	25.81
TATB@PDA	0	0	69.38	45.77	23.60

Note: E_{se} is surface free energy. E_{polar} is polar component of surface free energy. E_{disp} is dispersive component of the surface free energy

将改性前后的TATB粉末与123树脂混合,经固化后成型为PBX药柱,使用巴西实验对TATB基和TATB@PDA基药柱分别进行力学性能测试,结果如图6所示。由图6可知,改性TATB@PDA基药柱的拉伸应力为20.24 MPa,而未改性TATB基药柱的巴西拉伸应力为17.61 MPa,改性后界面力学性能的拉伸强度提高约15%。说明经过聚多巴胺改性后的TATB粉末与123树脂间的作用力增强,这可能由几点原因所致:改性后TATB表面粗糙度增大,使树脂和粉末表面的内摩擦增大;改性TATB表面能提高,浸润性能更良好,使树脂和粉末的包裹性更佳;改性TATB表面具有丰富的活性基团,可与树脂间形成化学或非化学键,提

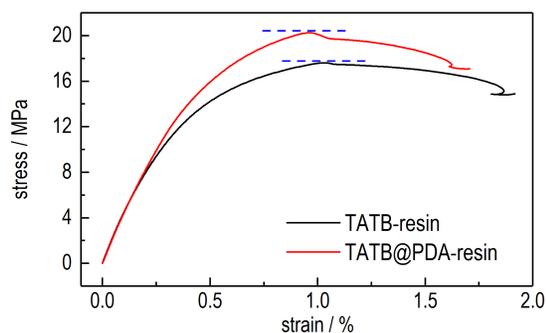
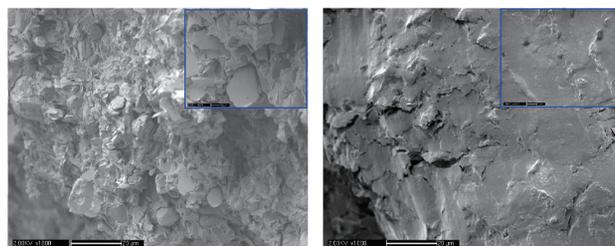


图6 TATB基和TATB@PDA基药柱分别在巴西实验下的应力应变曲线

Fig. 6 Strain-stress curves for the TATB-resin and TATB@PDA-resin grains under Brazilian splitting tests

高界面力学性能。

在外力作用下,药柱产生裂纹并发生破坏往往是从力学强度最薄弱的地方起始,通过对破坏界面形貌的观察与比较,可有助于理解晶体与粘结剂间的相互作用。对巴西实验破坏的TATB基和TATB@PDA基药柱的断裂面进行微观形貌观察,其破坏界面形貌如图7所示。由图7对比可见,在TATB基药柱的破坏界



a. grains based on TATB

b. grains based on TATB@PDA

图7 TATB基和TATB@PDA基药柱断裂面的SEM照片(右上角为大倍数(5000×)SEM照片)

Fig. 7 SEM images of the damaged surfaces for the TATB-resin and TATB@PDA-resin grains

面可见较多裸露的炸药晶体颗粒,说明药柱断裂主要为晶体与粘结剂间的界面脱粘导致,而在TATB@PDA基药柱的破坏界面只见少量粘结剂的微缺陷,未见裸露的晶体表面,说明此药柱断裂时主要是在粘结剂自身处发生破坏,而非炸药晶体与粘结剂的界面处。这说明TATB晶体经过PDA改性后增强了界面作用,使得其界面破坏方式发生了变化。

采用机械切削方式对TATB基和TATB@PDA基药柱进行加工,切削出的药柱残渣如图8所示。由图8可见,TATB基药柱的残渣呈现较多不连续断裂处,残渣呈分散状态,而TATB@PDA基药柱的残渣呈现完整致密连续状态,说明TATB@PDA基药柱的成型加工性

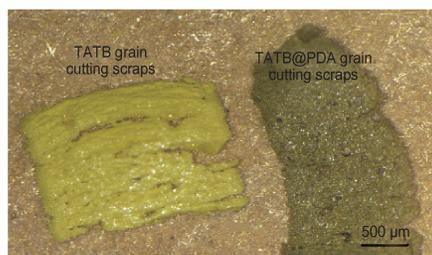


图 8 TATB 基和 TATB@PDA 基药柱切削残渣照片
Fig.8 Photo of the cutting scraps for TATB and TATB@PDA grains

能更优异。

3.3 聚多巴胺包覆铝粉的界面改性

铝粉分散的多巴胺水溶液中加入 Fe^{3+} 后,可观察到悬浮液立刻变成棕红色,这是由于多巴胺分子与 Fe^{3+} 可形成 Fe-DA 的络合物^[14],络合物在铝粉表面形成一层膜,这层 PDA 聚合物膜表面的羟基或氨基活性基团可为进一步反应提供活性点,可改善铝粉在混合炸药浆料中的悬浮性能和均匀性。图 9 为 Al 和 Al@PDA 粉末的 SEM 照片。由图 9 可以看出,铝粉颗粒大小虽然不均匀,表面形貌粗糙不光滑,但包覆了 PDA 的铝粉颗粒尺寸和表面形貌并未发生显著变化,说明聚多巴胺在铝粉表面形成了一层均匀致密的薄膜,未对铝粉颗粒造成团聚等不利影响。

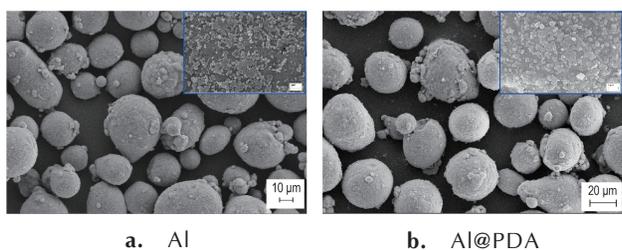


图 9 Al 和 Al@PDA 粉末的 SEM 照片(右上角为局部放大(1000×)SEM 照片)

Fig.9 SEM images of Al and Al@PDA

将 Al 和 Al@PDA 分别分散于丁羟胶中,悬浮液静置 24 h 后的结果如图 10 所示。由图 10 可见,未改性铝粉 Al(1#)由于重力作用很快发生沉降,分散液放置 24 h 后,未改性铝粉的沉降更加明显,而改性后的铝 Al@PDA(3#)几乎看不出沉降,仍然很稳定的分散于丁羟胶中。这说明改性后的铝粉其表面的活性基团与丁羟胶发生了一定的键合作用,能有效地对抗重力作用,减缓了铝粉的沉降作用。在搅拌均匀的 Al/HTPB 和 Al@PDA/HTPB 分散液中添加固化剂使其在 3 h 内固化,将固化样品从中间切开后,在同等位置处取样观察粉末在丁羟胶中的分散状态,观测的微观形貌如图

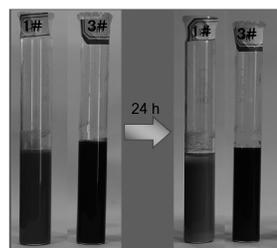


图 10 Al(1#)和 Al@PDA(3#)粉末分散于丁羟胶中经过 24 h 的对比照片

Fig.10 Photos of Al(1#) and Al@PDA(3#) particles dispersed in HTPB

11 所示。由图 11 可见,粒径稍小的 Al 粉颗粒更多分布在丁羟胶上部分,粒径稍大的 Al 粉颗粒更多分布在下部分,而 Al@PDA 颗粒无论粒径大小,混合分布在丁羟胶中的上下部分。说明 Al 粉颗粒在固化过程中已经逐渐出现了沉降现象,而 Al@PDA 颗粒在 3 h 的固化过程中仍然较均匀的分散于液相体系中,有效减缓 Al 粉由于重力作用发生的沉降和分层效应。



图 11 Al 和 Al@PDA 分别在 HTPB 中固化后内部颗粒分布的 SEM 照片

Fig.11 SEM images for the internal grains of Al/HTPB and Al@PDA/HTPB

4 结论

(1) 采用仿生聚多巴胺改性单质炸药 HMX 颗粒,可在 HMX 表面形成一层纳米级均匀且附着力强的包覆层,有效覆盖了颗粒表面的缺陷,减少 HMX 表面的热点,使单质炸药 HMX 的摩擦感度下降 30%,特性落高数值提高一倍

(2) 采用仿生聚多巴胺改性 TATB 颗粒,在光滑的炸药颗粒表面形成均匀的纳米级小突起,提高了 TATB 的表面能和极性分量,可使改性 TATB 基炸药的拉伸力学强度提高约 15%。

(3) 采用仿生聚多巴胺改性铝粉,可在铝粉表面形成一层致密均匀的薄膜,为铝粉与其它胶黏剂相互作用提供了均匀的表面活性基团,有效减缓铝粉在胶粘体系中的沉降作用,可提高铝粉在 PBX 中的分散性和均匀性。

参考文献:

[1] Tang P, Jiang Z H, Lu Z H. Analysis of the key technicals of in-

- sensitive munitions [C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, Las Vegas, NV, USA, 2012, 572.
- [2] Song X L, Wang Y, An C W, et al. Dependence of particle morphology and size on the mechanical sensitivity and thermal stability of octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159 (2-3): 222-229.
- [3] 李玉斌, 黄亨建, 黄辉, 等. 高品质HMX的包覆降感技术. 含能材料, 2012, 20 (6): 680-684.
LI Yu-bin, HUANG Heng-jian, HUANG Hui, et al. Desensitizing technology of high quality HMX by coating [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20 (6): 680-684.
- [4] 孙杰, 黄辉, 张勇, 等. TATB原位包覆HMX的研究. 含能材料, 2006, 14 (5): 330-332.
SUN Jie, HUANG Hui, ZHANG Yong, et al. In-situ coating of TATB on HMX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14 (5): 330-332.
- [5] Risse B, Schnell F, Spitzer D. Synthesis and desensitization of nano- β -HMX [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39 (3): 397-401.
- [6] Lin Q, Gourdon D, Sun C, et al. Adhesion mechanisms of the mussel foot proteins mfp-1 and mfp-3 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(10): 3782-3786.
- [7] Lee H, Dellatore S M, Miller W M, et al. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings [J]. *Science*, 2007, 318(5849): 426-430.
- [8] Wu J, Zhang L, Wang Y, et al. Mussel-inspired chemistry for robust and surface-modifiable multilayer films [J]. *Langmuir*, 2011, 27(22): 13684-13691.
- [9] Zhu Q, Xiao C, Xie X, et al. Enhanced mechanical performances for the pbxs based on the modified TATB with the polydopamine coating [C]// *Proceedings of the 21st Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials*, Pardubice, 2018: 402-410.
- [10] Rachele A, Christophe C. Identification of anisotropic tensile strength of cortical bone using brazilian test [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, 38: 134-142.
- [11] Li Y, Zhang J, Liu Y. Effects of loading direction on failure load test results for Brazilian tests on coal rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(6): 2173-2180.
- [12] 宋华杰, 董海山, 郝莹. TATB、HMX与氟聚合物的表面能研究. 含能材料, 2000, 8 (3): 104-107.
SONG Hua-jie, DONG Hai-shan, HAO Ying. Study on the surface energies of TATB, HMX and fluor-polymers [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8 (3): 104-107.
- [13] 江雷, 冯琳. 仿生智能纳米界面材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 92-95.
JIANG Lei, FENG Lin. Bioinspired intelligent nanostructured interfacial materials [M]. *Beijing, Chemical Industry Press*, 2007: 92-95.
- [14] Sever M, Weisser J, Monahan J, et al. Metal-mediated cross-linking in the generation of a marine-mussel adhesive [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2004, 43 (4): 448-450.

Bioinspired Improving Interfacial Performances of HMX, TATB and Aluminum Powders with Polydopamine Coating

ZHU Qing, WU Shu-li, XIAO Chun, XIE Xiao, LI Shang-bin, LUO Guan

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: In order to study the effects of surface modification on the mechanical sensitivity, interfacial mechanical and processing properties of energetic materials, inspired by the mussel adhesion protein, the modified explosives (HMX@PDA, TATB@PDA) and aluminum powder (Al@PDA) were prepared by polymerization of dopamine on the surface of energetic materials with one-step method, in which PDA formed a compact and firm coating film. The surface morphology, grain fracture morphology, element content and surface wettability of the modified energetic materials were characterized by scanning electron microscope, X-ray photoelectron spectroscopy and contact angle test. The mechanical sensitivity and tensile stress-strain curve of the modified energetic materials were measured by national military standard (GJB-772A-1997), Brazil experiment and other standard testing methods. Compared with HMX crystal, the friction sensitivity of HMX@PDA crystal decreased by 30%, and the characteristic drop-off value increased by 100%. The Brazilian tensile strength of TATB@PDA-based PBX cylinders was 15% higher than that of the TATB-based PBX cylinders. After 24 h in HTPB liquid phase, sedimentation was effectively slowed down for Al@PDA, as compared with naked aluminum powders. The characteristic complete and compact coating abilities on the crystal and rich active groups endow polydopamine remarkable interfacial modification effect on sensitivity reduction, interface mechanical properties improvement, processing stability improvement and other aspects of energetic materials.

Key words: polydopamine; explosives; aluminum particles; mechanical sensitivities; mechanical property; interfacial performances

CLC number: TJ55; O63

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019179

(责编: 王艳秀)