

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.05.002

DAP-4 耐热炸药的包覆降感研究*

韩仲熙 姚李娜 王彩玲 陶俊 赵省向
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘要] 为了研究顺丁橡胶 BR 和氟橡胶 F2603 对三乙烯二铵高氯酸铵复盐 DAP-4 的表面包覆的影响,采用溶剂挥发直接法工艺制备了含不同黏结剂的 DAP-4 样品,借助表面性能、扫描电镜、X 光电子能谱和机械感度试验评价了两种黏结剂对 DAP-4 的包覆效果和安全性。结果表明:BR 在 DAP-4 粉末表面形成有效铺展,F2603 与 DAP-4 粉末表面的界面相互作用强;包覆后的 DAP-4 晶体颗粒形貌表面边界棱角模糊且粗糙,DAP-4/BR 样品的包覆度小于 DAP-4/F2603 样品,且黏结剂 BR 和 F2603 包覆 DAP-4 样品的机械感度降低。这有利于 DAP-4 化合物的应用及推广。

[关键词] DAP-4;表面性能;耐热炸药;降感;包覆

[分类号] TJ55

Study on Coating and Sensitization Reduction of DAP-4 Heat-Resistant Explosive

HAN Zhongxi, YAO Li'na, WANG Cailing, TAO Jun, ZHAO Shengxiang
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study the influence of the binder butadiene rubber BR and fluororubber F2603 on surficial coating of DAP-4, the DAP-4 samples containing different binders (BR or F2603) were prepared by direct solvent volatilization process. Coating outcome and safety of the samples were evaluated by surface performance test, scanning electron microscope, X-ray photoelectron energy spectrum and mechanical sensitivity test. The results show that BR could form the efficient spreading in the surface of DAP-4 powder, the interface action between the surface of F2603 and DAP-4 is stronger than that between the surface of BR and DAP-4. The surface edges and corners of the coated DAP-4 crystal particle are fuzzy and rough. The coating degree of DAP-4/BR sample is less than that of DAP-4/F2603. And the mechanical sensitivity of DAP-4 coated by BR or F2603 decreases, which is beneficial for the application and promotion of DAP-4.

[KEYWORDS] DAP-4; surface properties; heat-resistant explosive; sensitization reduction; coating

0 引言

耐热炸药在诸多领域(如地下资源开采和宇宙航行)中具有不可替代的重要作用。随着超深油气井的开发与发展,对耐热炸药的耐热性能和做功能力也提出了更高的要求。目前,国内石油射孔行业主要使用以黑索今(RDX)、奥克托今(HMX)、2,2',4,4',6,6'-六硝基二苯砜(PCS)、2,2',4,4',6,6'-六硝基二苯基乙烯(HNS)、2,6-二苦氨基-3,5-二硝基吡啶(PYX)为主装药的耐热混合炸药。其中,RDX、HMX、PCS 为基的混合炸药能量和安定性较高,可

在 170 ~ 200 °C 的高温环境中安全使用^[1-2];HNS、PYX 为基的混合炸药具有优良的耐热性能^[3],可在 200 ~ 260 °C 的超高温环境中安全使用,但能量较低且价格昂贵。因此,寻求一种高耐热、高能量、低成本的新型耐热混合炸药势在必行。

三乙烯二铵高氯酸铵复盐(DAP-4,分子式为 $C_6H_{18}N_3Cl_3O_{12}$)是一种性能优良的耐热单质炸药^[4-5]。作为一种新型的分子钙钛矿化合物,DAP-4 的晶体密度为 1.87 g/cm³,理论爆速 8 500 m/s,理论爆压 33.55 GPa,机械感度(撞击感度 28%、摩擦感度 90%)比 RDX、HMX、CL-20 低,热分解温度(404 °C)比 RDX、HMX 高,直接生产成本与 RDX 相

* 收稿日期:2023-01-09

基金项目:院级青年科技创新项目

第一作者:韩仲熙(1979-),男,硕士,副研究员,主要从事含能材料研究。E-mail:han_zx@163.com

通信作者:赵省向(1963-),男,博士,研究员,主要从事含能材料研究。E-mail:zxsx58@sina.com

当,且具有较高的热稳定性^[6-9],有望作为一种耐热单质含能材料用于石油射孔弹装药。

目前,国外未见 DAP-4 化合物的相关报道,而国内科研工作者对 DAP-4 化合物的研究报道主要集中在 DAP-4 的合成和热性能测试方面^[10-11],未曾开展此化合物在含能材料钝感包覆应用方面的研究。因此,以 DAP-4 为研究对象,开展了不同黏结剂对 DAP-4 化合物的表面性能、形貌和包覆钝感效果研究,分析了不同黏结剂与 DAP-4 材料的相互作用及安全性,从而为 DAP-4 化合物在含能材料配方设计及应用提供参考。

1 试验部分

1.1 材料和仪器

材料:DAP-4,粒径 40~60 μm,西安近代化学研究所;氟橡胶 F2603,中昊晨光化工研究院有限公司;顺丁橡胶 BR,分子量 9 000,中国石油化工股份有限公司北京燕山分公司;溶剂乙酸乙酯和石油醚,分析纯,陕西恒致精细化学品有限公司。

仪器:DCAT21 型动态接触角测量仪,德国 Data Physics 公司;WL-1 型落锤仪、WM-1 型摩擦感度仪,西安近代化学研究所;PH400 型 X 射线光电子能谱,美国 PE 公司;Quanta 600F 型扫描电镜,荷兰 FEI 公司。

1.2 样品制备

利用直接法制备压装炸药样品。设计了含不同黏结剂(F2603 或 BR)的 DAP-4 复合物。配方质量比为 $m(\text{DAP-4}) : m(\text{黏结剂}) = 95 : 5$ 。

以 100 g DAP-4/F2603 样品为例,制备过程为:将称好的 5.0 g 固体黏结剂 F2603 加入到盛有 50 mL 乙酸乙酯有机溶剂的烧杯中,烧杯放在 55~65 °C 的水浴锅中,搅拌黏结剂直至溶解;称取 DAP-4 化合物 95 g,加入到盛有 F2603 的乙酸乙酯溶液中,搅拌,待上述混合物料至半干状态时,造粒和过筛,将得到的样品颗粒放入 55~60 °C 的水浴烘箱中 4 h,收集样品。

DAP-4/BR 样品的制备同上,只是将黏结剂调换成 BR,有机溶剂为石油醚。

1.3 试验方法

1.3.1 表面性能试验

接触角采用 DCAT21 型动态接触角测量仪测试。F2603、BR 的接触角采用 Wilhelmy 吊片法测试,步进速率 0.2 mm/s,浸入深度 8 mm;DAP-4 粉末的接触角采用 Modified Washburn 法测试,步进速

率 0.2 mm/s。温度 20 °C,湿度为 70%。

根据 F2603、BR 和 DAP-4 材料的接触角,通过公式计算,得到材料的表面自由能和各分量、DAP-4 与不同黏结剂界面之间的黏附功 W 和铺展系数 S 。

1.3.2 X 射线光电子能谱

采用光电子能谱 XPS 表征不同黏结剂对 DAP-4 颗粒的包覆情况。进行 X-射线分析,得到包覆颗粒的表面元素含量分布情况。

将样品研成粉末,涂敷于样品板上。在样品池中抽真空 6 h,真空度为 2.67 μPa。辐射源 Al K α , (光电子能量为 1 486.6 eV),电压 13 kV,功率 400 W。以碳结合能 284.6 eV 为标准,采用 Gadssian 法对谱图进行分解和叠加。

1.3.3 扫描电镜

采用扫描电子显微镜 SEM 表征不同黏结剂包覆 DAP-4 化合物前、后的形貌。测试前,对样品进行喷金处理。

1.3.4 机械感度试验

撞击感度试验:根据 GJB 772A—1997 标准中 601.1 方法,采用 WL-1 型落锤仪测定包覆前、后 DAP-4 样品的爆炸概率。落锤质量 10 kg;药量 (50 ± 1) mg。

撞击感度试验:根据 GJB 772A—1997 标准中 601.2 方法,采用 WL-1 型落锤仪测定包覆前、后 DAP-4 样品的特性落高 H_{50} 。落锤质量 5 kg;药量 (50 ± 1) mg。

摩擦感度试验:根据 GJB 772A—1997 标准中 602.1 方法,采用 WM-1 型摩擦感度仪测定包覆前、后 DAP-4 样品的爆炸概率。表压 3.92 MPa;摆角 (90 ± 1)°;药量 (50 ± 1) mg。

2 结果与讨论

2.1 DAP-4 与黏结剂的表面作用估算

2.1.1 DAP-4 与黏结剂的表面能

探针液体对试样不溶解、不发生化学反应。片状试样在探针液体中移动时,会产生质量变化。质量变化的幅度与试样的接触角有关。

$$\cos \theta = \frac{F}{L\sigma} \quad (1)$$

式中: θ 为接触角; F 为提升时的力; L 为润湿长度; σ 为液体表面张力。

粉末试样装填到试管中,在颗粒之间会形成微小的毛细管。粉末的接触角的测定是根据液体毛细管上升原理,接触角不同,液体上升的速度不同,从

而得到上升液体质量随时间的变化曲线。

$$\cos \theta = \frac{m^2}{t} \times \frac{\eta}{\rho^2 c \sigma} \quad (2)$$

式中: c 为粉末的毛细常数,由正己烷测试获得^[12]; m 为达到终点后试样质量的增加值; η 为探针液体的黏度; t 为达到终点所需时间; ρ 为探针液体的密度; σ 为探针液体的表面张力; θ 为接触角。

通过在两种探针液体中不同的接触角 θ ,计算得到试样表面自由能的非极性分量和极性分量。

$$1 + \cos \theta = 2 \left(\frac{\sqrt{\gamma_{sd}} \times \sqrt{\gamma_{ld}}}{\gamma_s} + \frac{\sqrt{\gamma_{sp}} \times \sqrt{\gamma_{lp}}}{\gamma_s} \right) \quad (3)$$

式中: γ_s 为固体试样的表面自由能; γ_{ld} 为液体试样的非极性分量; γ_{lp} 为液体试样的极性分量; γ_{sd} 为固体试样的非极性分量; γ_{sp} 为固体试样的极性分量。

选择 BR 和 F2603 作为 DAP-4 的包覆剂。因 DAP-4、BR 和 F2603 为固体,不能直接测定表面能,需要通过标准测试液体在固体上的接触角进行计算得到。因此,利用 DCAT21 型动态接触角测量仪测试 BR 在乙二醇、甘油和蒸馏水中的接触角,F2603 在蒸馏水、甘油和甲酰胺中的接触角和 DAP-4 在乙二醇、甘油和正己烷中的接触角。根据接触角测试结果,选择 DCAT21 软件中的通用模型 WORK 拟合,利用式(1)~式(3)计算了 BR、F2603 和 DAP-4 材料的表面自由能 γ_s 及非极性分量 γ_{sd} 和极性分量 γ_{sp} ,结果见表1。

从表1可以看出:F2603的表面自由能最高,达到37.01 mN/m,可能是由于F2603分子链上一CF₃上的极性大的缘故;BR的表面自由能小于DAP-4的表面能,计算结果表明,BR可对DAP-4产生良好的浸润效果。从表1还可以看出:DAP-4和黏结剂BR的表面自由能中,分子键的非极性分量(非极性作用)起主要作用;而黏结剂F2603的表面自由能

中,分子键的极性分量起主要作用。

2.1.2 DAP-4 与黏结剂的界面作用

DAP-4 与黏结剂的界面作用可通过界面自由能^[13] γ_{12} 、黏附功 W_{12} 和铺展系数 S_{12} 等热力学参数来表征。

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2\sqrt{\gamma_{1d}\gamma_{2d}} - 2\sqrt{\gamma_{1p}\gamma_{2p}} \quad (4)$$

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} = 2\sqrt{\gamma_{1d}\gamma_{2d}} + 2\sqrt{\gamma_{1p}\gamma_{2p}} \quad (5)$$

$$S_{12} = \gamma_2 - \gamma_1 - \gamma_{12} \quad (6)$$

式中: γ_1 为黏结剂的表面自由能; γ_2 为 DAP-4 的表面自由能; γ_{1d} 和 γ_{1p} 分别为黏结剂表面自由能的非极性分量和极性分量; γ_{2d} 和 γ_{2p} 分别为 DAP-4 表面自由能的非极性分量和极性分量。

要在固体炸药表面形成包覆层,要求黏结剂必须能够润湿固体炸药颗粒。润湿分为沾湿、浸润和铺展3类过程。对于同一体系而言,凡能自行铺展的润湿过程可自动进行,故 S_{12} 可作为体系润湿性指标^[14]。 $S_{12} > 0$ 为铺展自发进行的判据, S_{12} 越大意味着铺展效果越好。另外,黏结剂的表面自由能要低于炸药的表面自由能,黏结剂和固体炸药之间要有较大的黏附功而相对较小的界面自由能,二者之间才会产生较强的界面作用,包覆效果才好^[15]。依据表1和式(4)~式(6),计算得到了 DAP-4 与不同黏结剂界面之间的黏附功 W_{12} 和铺展系数 S_{12} ,如表2所示。

从表2来看,黏结剂 F2603 在 DAP-4 表面的铺展系数 $S_{12} < 0$;而黏结剂 BR 在 DAP-4 表面的铺展系数 $S_{12} > 0$,说明 BR 在 DAP-4 表面上的铺展效果优于 F2603。究其原因,F2603 是一种极性强的黏结剂,DAP-4 作为一种无机盐而极性较弱,碳氢类黏结剂 BR 的极性较弱,两相的极性差异而导致 F2603 在 DAP-4 表面上的润湿效果较差。因此,在后期的

表1 黏结剂和 DAP-4 的接触角和表面自由能

Tab. 1 Contact angle and surface free energy of binders and DAP-4

样品	探针液体	$\theta/(\circ)$	$\gamma_s/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_{sp}/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_{sd}/(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
BR	蒸馏水	98.00			
	甘油	93.00	14.51	2.48	12.03
	乙二醇	82.50			
F2603	蒸馏水	98.26			
	甘油	97.90	37.01	36.61	0.39
	甲酰胺	97.36			
DAP-4	乙二醇	89.92			
	甘油	76.74	16.38	0.32	16.06
	正己烷	29.90			

表 2 DAP-4 与黏结剂的界面作用参数

Tab. 2 Interface thermodynamic parameters of DAP-4 and binders

mN/m

样品	γ_{1d}	γ_{2d}	γ_{1p}	γ_{2p}	γ_{12}	γ_1	γ_2	W_{12}	S_{12}
DAP-4/BR	12.03	2.81	2.48	10.43	1.31	14.51	16.38	13.95	0.56
DAP-4/F2603	0.32	2.81	36.61	10.43	13.52	37.01	16.38	115.55	-62.16

研究中,可以对 DAP-4 的表面极性进行改性,从而改善 F2603 的润湿效果。

表 2 中, F2603 与 DAP-4 之间的界面自由能 γ_{12} 和黏附功 W_{12} 大于 BR 与 DAP-4 的 γ_{12} 和 W_{12} , 从热力学上反映了 DAP-4 固体颗粒与氟聚合物 F2603 的界面作用较大, 这主要是 F2603 与 DAP-4 的范德华作用(极性分量)及类似于氢键的短程酸碱作用大的缘故。

2.2 黏结剂包覆 DAP-4 样品的形貌表征

采用电子扫描电镜 SEM 分别对不同黏结剂包覆的 DAP-4 样品的微观形貌进行表征, 如图 1 所示。可以看出, 未包覆的 DAP-4 样品颗粒呈方块状, 形状规则, 表面平整, 棱角分明。放大 1 000 倍时, 清晰可见 DAP-4 颗粒存在一定的晶体缺陷, 比如少量的位错和表面的破损。

包覆后的 DAP-4 晶体颗粒表面附着了一层包覆物, 颗粒形态不规则, 边界棱角模糊, 呈弧形, 但颗粒表面显得有些粗糙, 出现团聚现象。DAP-4/F2603 颗粒团聚、黏附紧密; DAP-4/BR 样品颗粒略显分散。这表明黏结剂 BR 能较好地铺展在 DAP-4 晶体表面并形成有效包覆。

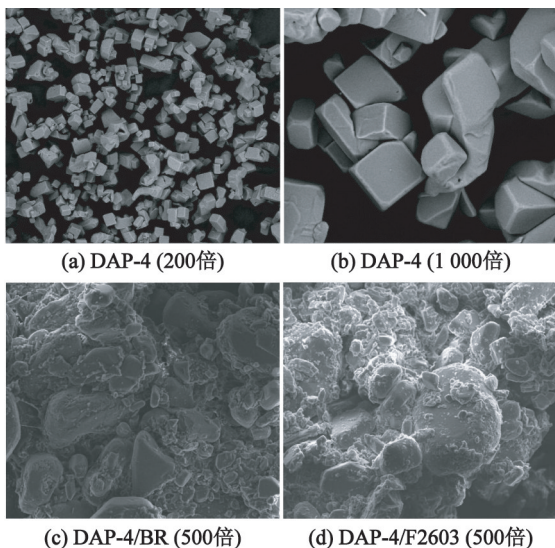


图 1 样品的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of samples

2.3 DAP-4 与黏结剂的包覆效果表征

包覆度指炸药晶体被包覆的表面积与总表面积

之比, 一般用来表征 PBX 造型粉的包覆效果。在黏结剂含量相同情况下, 表面包覆度主要受黏结剂物理性质的影响。

采用 XPS 测试了 BR 和 F2603 对 DAP-4 的包覆效果。黏结剂 BR(由碳、氢两种元素组成)和 F2603(由碳、氢、氟 3 种元素组成)分子中不含氮元素。因此, 采用氮元素的峰值强度和元素含量表征黏结剂 BR、F2603 对 DAP-4 的包覆度。

原理是基于只存在于单质炸药中的氮或其他元素的 XPS 峰强度(或峰面积), 通过式(7)^[16-20]计算得到:

$$R = \frac{w_0 - w_1}{w_0} \quad (7)$$

式中: R 为包覆度; w_0 为未包覆炸药颗粒表面的氮原子质量分数; w_1 为包覆样品表面的氮原子质量分数。

氮原子的质量分数通过相应的 XPS 峰强度(或峰面积)得到。未包覆 DAP-4 和黏结剂包覆 DAP-4 的样品 XPS 谱图见图 2。由图 2 看出, 与未包覆的 DAP-4 样品对比, 黏结剂包覆 DAP-4 样品的 N 1s 峰值均呈不同程度的减小。

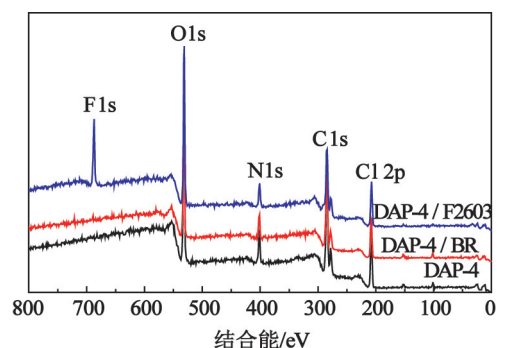


图 2 样品的 XPS 谱图

Fig. 2 XPS spectra of samples

利用 Advantage 软件分别对单质 DAP-4 和不同黏结剂包覆后的 DAP-4 样品的表面元素含量进行分析, 并采用样品表面的氮原子质量分数进行包覆度计算, 计算结果见表 3。

未包覆的 DAP-4 由碳、氢、氮、氯和氧 5 种元素组成。DAP-4 经黏结剂包覆后, 表面氮元素的质量分数明显下降, 表明黏结剂 BR 和 F2603 能在 DAP-

表3 包覆前、后 DAP-4 样品表面元素的质量分数和包覆度

Tab.3 Mass fraction of elements on the surface and coating degree of DAP-4 before and after coating %

样品	C 1s	N 1s	O 1s	Cl 2p	F 1s	包覆度 R
DAP-4	46.63	10.12	35.87	7.38	0	-
DAP-4/BR	53.45	7.11	33.12	6.32	0	29.74
DAP-4/F2603	53.26	6.70	26.55	3.94	9.54	33.79

4 表面形成有效包覆。从表 3 数据还可以看出,黏结剂 BR 对 DAP-4 的包覆度小于 F2603 对 DAP-4 的包覆度。与 BR 包覆 DAP-4 相比,采用 F2603 包覆 DAP-4 后,样品表面的氮元素含量明显降低,且降低幅度较大。分析原因,F2603 在 DAP-4 表面的界面自由能和黏附功较大,界面作用较强,包覆体系稳定性较好,故 DAP-4/F2603 样品表面氟元素含量增加而氮元素含量明显降低;而黏结剂 BR 在 DAP-4 表面的润湿性较好,能在表面有效分散,但 BR 的力学性能(拉伸强度和撕裂程度)较低,在造粒、过筛工序可能容易从化合物的表面脱落,从而导致包覆度降低。

基于黏结剂 F2603、BR 包覆 DAP-4 的包覆度数据分析,两种黏结剂对 DAP-4 的包覆效果欠佳。导致这样的结果可能因为,作为一种新型无机材料,DAP-4 为工业级粗品,合成工艺及参数的研究不够完善,DAP-4 与有机化合物的相互作用较差。因此,后期在合成工艺中需要优化工艺参数,合成出一种形貌规整、粒度分布均匀的 DAP-4 化合物;且需对 DAP-4 化合物表面进行改性,提高表面性能,进而增强与有机化合物的相互作用。这对 DAP-4 化合物的应用及推广具有重要意义。

2.4 黏结剂对 DAP-4 的钝化效果

DAP-4 及 DAP-4/F2603、DAP-4/BR 样品的机械感度测试结果见表 4。

表4 含不同黏结剂的 DAP-4 样品的机械感度

Tab.4 Mechanical sensitivity of DAP-4 containing different binders

样品	撞击感度/ %	特性落高 H_{50} /cm	摩擦感度/ %
DAP-4	28	95.6	92
DAP-4/F2603	28	101.2	88
DAP-4/BR	20	107.8	76

由表 4 可知:F2603 包覆 DAP-4 后,样品的撞击感度特性落高由 95.6 cm 升高至 101.2 cm,摩擦感度由 92% 降到 88%;BR 包覆 DAP-4 后,样品的撞击感度特性落高由 95.6 cm 升高至 107.8 cm,摩擦

感度由 95% 降到 76%。说明与未包覆的 DAP-4 相比,包覆样品的撞击感度和摩擦感度都有不同程度的降低。此外,与 F2603 相比,采用 BR 包覆 DAP-4 的降感效果相对较好一些。

对起爆机理的研究,目前比较公认的理论是热点学说^[21]。当 F2603 包覆 DAP-4 后,DAP-4/F2603 样品颗粒受到外界冲击载荷作用时,感度降低。F2603 分子链中—CF₃ 旁边的碳原子与其他原子结合的键能有所提高,当冲击受力后,黏结剂的塑性形变会消耗一部分能量,导致能量不会集中在个别点上,形成的热点较少,从而降低撞击感度;相比之下,BR 的石油醚溶液流动性较好,均匀分散在 DAP-4 表面,填充于 DAP-4 表面结构的凹陷处,导致内部空穴减少,不易形成热点的情况增加,表现为 DAP-4/BR 样品撞击感度降低。

根据热点理论,DAP-4 化合物经 F2603 和 BR 包覆后,摩擦感度降低,但降低幅度不同。可能是由于两种黏结剂自身特性的不同。F2603 和 BR 包覆 DAP-4 后,DAP-4/F2603 和 DAP-4/BR 样品的表面能降低,表面原子活性降低,从而对外界能量较钝感,导致样品与击柱下表面的相互作用降低;另外,包覆后,DAP-4/F2603 和 DAP-4/BR 样品颗粒之间直接接触的几率变小,摩擦生热产生的热点减少;同时,BR 在 DAP-4 表面的润湿作用(DAP-4/F2603 的润湿度小于 DAP-4/BR 的)可缓解 DAP-4 颗粒在冲击作用下的摩擦效应,减少了局部热点的形成。因此,BR 包覆 DAP-4 后的摩擦感度与 F2603 包覆 DAP-4 相比大为降低。

综合以上分析,使用 F2603 和 BR 包覆工业级 DAP-4 化合物,都可以使 DAP-4 的感度不同程度地降低。使用 BR 包覆 DAP-4,在撞击或摩擦过程中产生的热点减少,感度降低更加明显。然而,单纯地强调对 DAP-4 的钝感包覆有可能导致 DAP-4 基混合炸药的密度和力学性能降低,甚至会使炸药在压制过程中出现断裂、裂纹等问题,影响到炸药的使用安全性。因此,对 DAP-4 基混合炸药进行配方设计时,应综合考虑钝感包覆材料的特点,使设计的配方

能够满足超高温聚能射孔弹或宇航太空应用平台的使用要求。

3 结论

以工业级 DAP-4 为研究对象,分别选用 F2603 和 BR 作为高分子黏结剂,采用溶剂挥发直接法对 DAP-4 进行表面包覆,结论如下:

1) 黏结剂 F2603 与 DAP-4 的界面作用强于 BR 与 DAP-4 的界面作用,两种黏结剂包覆 DAP-4 化合物后,样品表面粗糙,棱角边界模糊。

2) 黏结剂 F2603 对 DAP-4 的包覆度大于黏结剂 BR 对 DAP-4 的包覆度,说明用 F2603 和 BR 对工业级 DAP-4 的包覆是可行的,还需继续探索 DAP-4 的合成工艺和表面改性。

3) 与 DAP-4 化合物对比,两种黏结剂 F2603 和 BR 包覆 DAP-4 后,样品机械感度降低。F2603 可使 DAP-4 撞击感度特性落高由 95.6 cm 升高至 101.2 cm,摩擦感度由 92% 降到 88%;BR 可使 DAP-4 撞击感度特性落高由 95.6 cm 升高至 107.8 cm,摩擦感度由 95% 降到 76%。

参 考 文 献

[1] 陈鲁英,张川,杨培进,等. 以六硝基二苯砷为基的耐热混合炸药的性能[J]. 火炸药学报, 2004, 27(2): 26-27, 34.
CHEN L Y, ZHANG C, YANG P J, et al. Hexanitrodiphenyl sulfide based heat resistance explosive [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004, 27(2): 26-27, 34.

[2] 黄亚峰,王晓峰,冯晓军,等. 高温耐热炸药的研究现状与发展[J]. 爆破器材, 2012, 41(6): 1-4.
HUANG Y F, WANG X F, FENG X J, et al. Preset research and perspective of the high-temperature heat-resistance explosive [J]. Explosive Materials, 2012, 41(6): 1-4.

[3] 王军,黄靖伦,廖龙渝,等. 一种 PYX 制备新技术[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 480.

[4] SHANG Y, SUN L Y, YE Z M, et al. Phase transition and thermal expansion of molecular perovskite energetic crystal $(C_6N_2H_{14})(NH_4)(ClO_4)_3$ (DAP-4) [J]. Fire-PhysChem, 2022, 2(3): 221-225.

[5] ZHANG W X, CHEN S L, SHANG Y, et al. Molecular perovskites as a new platform for designing advanced multi-component energetic crystals [J]. Energetic Materials Frontiers, 2020, 1(3/4): 123-135.

[6] CHEN S L, YANG Z R, WANG B J, et al. Molecular perovskite high-energetic materials [J]. Science China Materials, 2018, 61(8): 1123-1128.

[7] CHEN S L, SHANG Y, HE C T, et al. Optimizing the oxygen balance by changing the A-site cations in molecular perovskite high-energetic materials [J]. CrystEngComm, 2018, 20(46): 7458-7463.

[8] SHANG Y, HUANG R K, CHEN S L, et al. Metal-free molecular perovskite high-energetic materials [J]. Crystal Growth & Design, 2020, 20(3): 1891-1897.

[9] SHANG Y, YU Z H, HUANG R K, et al. Metal-free hexagonal perovskite high-energetic materials with $NH_3OH^+/NH_2NH_3^+$ as B-site cations [J]. Engineering, 2020, 6(9): 1013-1018.

[10] ZHOU J, DING L, ZHAO F Q, et al. Thermal studies of novel molecular perovskite energetic material $(C_6H_{14}N_2)[NH_4(ClO_4)_3]$ [J]. Chinese Chemical Letters, 2020, 31(2): 554-558.

[11] 张坤,冯博,王晓峰,等. DAP-4 / TKX-50 混合物的热分解机理[J]. 含能材料, 2022, 30(7): 673-680.
ZHANG K, FENG B, WANG X F, et al. Thermal decomposition mechanism of DAP-4/TKX-50 mixtures [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(7): 673-680.

[12] 田宏远,周文静,马亚南,等. HNS 与 NQ 的表面能研究[J]. 含能材料, 2011, 19(1): 98-101.
TIAN H Y, ZHOU W J, MA Y N, et al. Surface energy of HNS and NQ [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(1): 98-101.

[13] 宋华杰,董海山,郝莹. TATB、HMX 与氟聚合物的表面能研究[J]. 含能材料, 2000, 8(3): 104-107.
SONG H J, DONG H S, HAO Y. Study on the surface energies of TATB, HMX and fluor-polymers [J]. Energetic Materials, 2000, 8(3): 104-107.

[14] 朱步瑶,赵振国. 界面化学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 205-208.

[15] 李玉斌,黄亨建,黄辉,等. 高品质 HMX 的包覆降感技术[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 680-684.
LI Y B, HUANG H J, HUANG H, et al. Desensitizing technology of high quality HMX by coating [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(6): 680-684.

[16] 蒋跃强,刘永刚,张建虎. 造型粉包覆质量表征及其对机械感度的影响[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(7): 118-120.
JIANG Y Q, LIU Y G, ZHANG J H. Coating quality characterizing and effect on mechanical sensitivity of molding powder [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(7): 118-120.

[17] 黄菊,王伯良,刘伟,等. 添加剂对黑索今颗粒包覆

