

文章编号: 1006-9941(2016)08-0787-06

GAP 基聚氨酯包覆单基发射药能量与燃烧性能

郑启龙¹, 田书春², 周伟良¹, 肖乐勤¹

(1. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 西安北方惠安化学工业有限公司, 陕西 西安 710302)

摘要: 为改善单基药的燃烧性能,以聚叠氮基缩水甘油醚(GAP)基聚氨酯为包覆材料,采用“预混-喷涂-固化”工艺对 4/7 单基药进行包覆。采用三维视频显微镜观察了包覆效果。差示扫描量热法研究了 GAP 基聚氨酯与单基药相容性。通过理论计算和密闭爆发器试验研究了包覆单基药能量和燃烧性能。结果表明,GAP 基聚氨酯包覆层厚度较为均一,与单基药粘结良好,且二者相容。GAP 基聚氨酯的加入使得发射药火药力和爆温均下降,但火药力降幅明显低于惰性高分子。GAP 基聚氨酯包覆单基药具有显著的燃烧渐增性,随着包覆量的增大,渐增性逐渐增强。与单基药相比,包覆量为 7.05%、9.67% 和 11.88% 时,包覆单基药的燃烧分裂点相对压力值由 0.151 分别后移至 0.453、0.480 和 0.489,燃烧渐增因子由 0.090 分别增大至 0.293、0.340 和 0.358。

关键词: 聚叠氮基缩水甘油醚(GAP)基聚氨酯; 单基药; 燃烧渐增性; 能量性能

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.011

1 引言

提高发射药的燃烧渐增性有利于降低枪炮身管武器最大膛压、提高弹丸炮口初速,从而改善火炮弹道性能^[1-2]。对发射药进行包覆可以改变其在火炮内弹道的燃气释放规律,改善膛内压力行程曲线,是获得燃烧渐增性的主要途径之一^[3]。

采用惰性高分子包覆发射药时,可以获得不同程度的燃烧渐增性^[4-8],但会显著降低发射药能量,且部分惰性高分子包覆发射药会产生点火困难、组分不相容等问题;采用与发射药基体同材质组分包覆发射药时,其燃烧渐增性通过燃烧过程中药粒燃面的增加(如破孔等)来实现^[1],一般不存在相容性问题,但对于以硝化纤维素(NC)为主体的单基药来说,由于 NC 分子的刚性和发射药中缺少增塑组分,导致包覆层与基体的粘结强度下降,在膛内高压和冲击作用下,此类包覆层易发生脱粘,导致燃面急剧变化,燃烧不能按设计要求进行^[9]。因此,亟需探索一种可以减少发射药能量损失并与发射药粘结良好的包覆材料。聚叠氮基

缩水甘油醚(GAP)是一种新型低感度含能聚合物,具有较高的生成焓,且燃速较快、燃气洁净、成气量大,将其应用于固体推进剂的相关研究较多^[10-12],但用于发射药的研究相对较少。以 GAP 基聚氨酯作为包覆材料对发射药进行包覆,一定程度上可以减少发射药的能量损失。而且,采用异氰酸酯类固化剂对 GAP 进行固化时,部分异氰酸酯可以与单基药表面的 NC 分子上的羟基进行反应,从而有利于改善包覆界面粘结性能。美国 Northrup^[13]将 GAP 包覆组分与基体发射药共同浇铸于弹体内进行固化来制备 GAP 包覆发射药,研究结果表明 GAP 包覆发射药点火正常,弹道性能良好,但显然无法实现发射药自由装填;德国 Langlotz 等人^[14]将 GAP 等高分子材料作为包覆组分对发射药进行包覆,但未说明相关包覆工艺;而国内则鲜有相关报道。

本研究选择 4/7 单基药(4/7D)为基础药,以预聚 GAP 与二异氰酸酯化合物为固化体系,采用“预混-喷涂-固化”工艺制备了不同包覆量的 GAP 基聚氨酯包覆单基药,研究了 GAP 基聚氨酯包覆单基药的能量和燃烧性能,并对 GAP 基聚氨酯与单基药基体的相容性进行了研究。

2 实验部分

2.1 包覆单基药的制备

基础药为未经石墨光泽的制式 4/7 单基药,北方

收稿日期: 2016-01-19; 修回日期: 2016-03-04

基金项目: 总装预研基金项目资助(9140A28020415BQ2); 国家重点基础研究规划项目(973)资助(613275)

作者简介: 郑启龙(1989-),男,博士,主要从事低燃温火药相关研究。
e-mail: zhenglong2577@163.com

通信联系人: 周伟良(1964-),男,研究员,主要从事含能材料相关研究。
e-mail: wlzhou331@163.com

惠安化学工业有限公司; GAP 基聚氨酯包覆层所用固化剂二异氰酸酯, 工业纯, Aladdin-阿拉丁试剂(上海)有限公司。

采用“预混-喷涂-固化”工艺对 4/7 单基药进行包覆, 首先将预聚 GAP 及二异氰酸酯分别配成溶液备用, 喷涂过程分数次进行, 每次按配方比例分别量取相应的 GAP 溶液和二异氰酸酯溶液, 将二者混匀后进行喷涂操作。喷涂过程中, 间歇通入热风, 控制风温为 50 °C 左右。喷涂结束后, 将包覆单基药放入 50 °C 水浴烘箱中 6 h, 进一步固化和驱除残余溶剂。制备了三种不同包覆量的包覆单基药, 称量包覆前后质量, 测定实际包覆量分别为 7.05%、9.67% 和 11.88%, 分别记作 4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12, 基础药记为 4/7D。

2.2 三维视频显微镜观察

采用美国科视达 HiROX KH-1000 三维视频显微镜观察 4/7D 的结构形貌和 4/7D-B10 的包覆情况, 放大倍数为 10~100 倍。

2.3 DSC 法评估相容性

2.3.1 实验条件

采用差示扫描量热法(DSC)^[15]评估 GAP 基聚氨酯包覆层与 4/7D 的相容性。测试仪器为德国 NETZSCH-STA 409 型 DSC 差示扫描量热仪。将自制预聚 GAP 与二异氰酸酯按配比混合后在 50 °C 下固化 5 h 成膜, 粉碎后与 4/7D 粉末按质量比 1:1 充分混合, 然后进行测试。测试温度范围为 50~350 °C, 升温速率为 10 °C·min⁻¹, 氮气流速 30 mL·min⁻¹, 试样质量约为 0.6 mg, 试样皿为铝制坩埚。

2.3.2 相容性判据

参考 GJB772A-1997 方法 502.1. 差热分析和差示扫描量热法测试相容性, 评价 DSC 相容性的判据为 $\Delta T_p = T_{p2} - T_{p1}$ 。其中, T_{p1} 为含能材料单组分的分解峰温; T_{p2} 为含能材料混合体系或与接触材料混合体系的分解峰温。用 ΔT_p 评价相容性的判据是: $\Delta T_p = 0 \sim -2$ °C, 混合体系相容; $\Delta T_p = -3 \sim -5$ °C, 混合体系轻微敏感, 可短期使用; $\Delta T_p = -6 \sim -15$ °C, 混合体系敏感, 最好不用; $\Delta T_p = < -15$ °C, 混合体系危险, 禁止使用^[15]。

2.4 能量性能的理论计算

采用内能法^[16]理论计算了 4/7D、4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 的能量性能参数。计算过程中, 4/7D 组分质量比为 NC(13.0 N): 二苯胺 = 98:2; GAP 基聚氨酯包覆层组分质量比为 GAP: 二异氰酸

酯 = 90:10。

另外, 为研究不同包覆材料对发射药能量性能影响, 同时计算了以惰性高分子聚对苯二甲酸乙酯(PET)、环氧树脂(EPR)完全取代 GAP 基聚氨酯包覆层时发射药的火药力, 并将其与 4/7D 理论火药力进行对比, 分别计算不同包覆组分的发射药火药力降低百分数。

2.5 密闭爆发器试验

采用密闭爆发器燃烧试验表征 GAP 基聚氨酯包覆单基药的燃烧性能。所用密闭爆发器容积为 98.95 cm³, 点火药为 2[#]硝化棉, 点火压力 10.98 MPa, 压力信号经 SYC-4000 型石英压电传感器传至 FDH-5 型电荷放大器, 再到 JOVIAN 520XX 数据采集卡得到实验数据, 由 Signview 软件分析得到燃烧过程的压力-时间曲线(即 $p-t$ 曲线)。

测定了 4/7D、4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 在装填密度为 0.2 g·cm⁻³ 条件下的 $p-t$ 曲线, 并对 $p-t$ 曲线进行处理得到 $dp/dt-t$ 曲线和 $L-B$ 曲线, 用以表征包覆药燃烧渐增性。同时, 测定了 4/7D 和 4/7D-B10 装填密度为 0.12 g·cm⁻³ 时的 $p-t$ 曲线, 并计算火药力。

3 结果与讨论

3.1 GAP 基聚氨酯包覆单基药形貌

采用“预混-喷涂-固化”工艺对 4/7D 进行包覆后, 通过三维视频显微镜观察其包覆情况, 图 1 为未包覆 4/7D 和包覆后的 4/7D-B10 的三维视频显微照片。

由图 1 可以看出, 4/7D-B10 形貌完整, 药粒之间基本不粘连, 侧面和端面都涂覆有一层透明有光泽的胶层, 包覆层整体厚度较为均一, 内孔基本全被封堵, 仅少量露出。与 4/7D 相对光滑的表面相比, 4/7D-B10 局部表面不够平整, 出现褶皱, 这是由于包覆过程中, 药粒在包覆层未完全固化时相互挤压、碰撞和摩擦, 使其表面包覆层出现形变甚至流动, 进而固化成型所致。在截面局部放大图中可以看出, 包覆层厚度较为均一, 结构密实, 与单基药粘结界面处无空隙或孔洞, 说明粘结情况良好。

3.2 GAP 基聚氨酯包覆层与 4/7D 的相容性

GAP 基聚氨酯包覆层与 4/7D 直接接触, 二者的相容性对包覆操作过程及长期贮存过程中的安全性有重要影响, 因而采用 DSC 法研究了其相互作用, 结果见图 2。

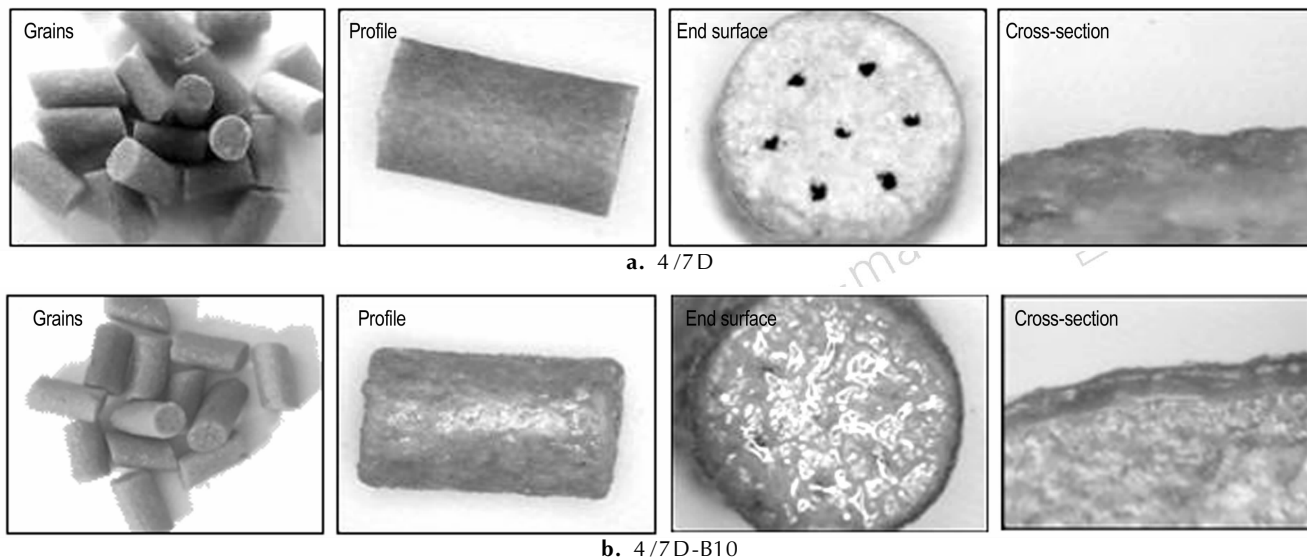


图 1 4/7D 和 4/7D-B10 的三维视频显微照片

Fig. 1 Three-dimensional video microscope photographs of 4/7D and 4/7D-B10

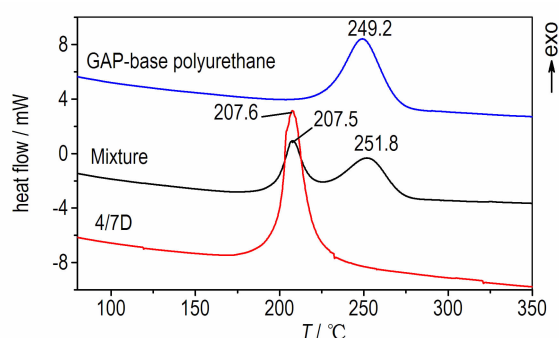


图 2 GAP 基聚氨酯与 4/7D 相互作用的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curves on the interaction of GAP-base polyurethane with 4/7D

由图 2 可知,4/7D 和 GAP 基聚氨酯在测试温度范围内都仅有一个分解放热峰,峰温分别为 207.6 °C 和 249.2 °C。二者等量混合后,曲线在 207.5 °C 和 251.8 °C 出现两个放热峰,分别对应于 4/7D 和 GAP 基聚氨酯的分解放热峰,对应的 ΔT_p 分别为 -0.1 °C 和

2.6 °C,根据 DSC 法评价相容性的判据(2.3.2 节),可以认为二者混合后仍各自分解,组分间相互作用弱,混合体系相容。

3.3 GAP 基聚氨酯包覆单基药的能量性能

理论计算了 4/7D、4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 的火药力(f)、定容爆温(T_v)、比容(V)及燃气产物中 N_2 生成量(n_{N_2}),计算结果见表 1。作为对比,将 4/7D 和 4/7D-B10 实测火药力一并列入表 1。

由表 1 可以看出,通过密闭爆发器试验获得的火药力实测值略低于理论计算值。随着包覆量的增加,发射药的火药力和定容爆温均逐渐下降,比容和燃气中的 N_2 产量逐渐增大。其中,当包覆量为 9.67% 时(即 4/7-B10),火药力理论值较 4/7D 下降了 5.5%,实测值下降了 6.0%,而爆温降低达 13.5%。可以看出,爆温的下降幅度显著大于火药力的下降幅度,发射药爆温的下降能够降低燃气对身管表面的烧蚀,而且燃气中 N_2 组分的增加,可以促进铁的氮化物的生成,

表 1 GAP 基聚氨酯包覆单基药的能量性能参数

Table 1 Energy property parameters of single-base propellants coated by GAP-based polyurethane

No.	content of coating layer /%	$f/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		T_v/K	$V/\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$	$n_{N_2}/\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$
		theoretical	experimental			
4/7D	—	1046	1028	3081	915	4.61
4/7D-B7	7.05	1005	—	2785	973	5.19
4/7D-B10	9.67	988	966	2678	994	5.41
4/7D-B13	11.88	972	—	2588	1013	5.59

Note: f is powder force; T_v is detonation temperature; V is specific volume; n_{N_2} is the nitrogen moles in combustion gases.

抑制铁的碳化物生成,亦可减缓燃气对身管的烧蚀^[17],这有利于延长武器使用寿命。GAP基聚氨酯的加入,降低了发射药的氧平衡,使得燃烧产物中CO₂及H₂O的产量减少,导致发射药爆热降低,爆温下降,火药力也随之降低。但GAP含有大量含能的一N₃基,本身生成焓较高,且可以增加发射药比容,因而一定程度上减缓了火药力下降幅度。

以惰性高分子聚对苯二甲酸乙酯(PET)、环氧树脂(EPR)完全取代GAP基聚氨酯包覆层时,发射药理论火药力下降百分数如图3所示。由图3可明显看出,与惰性高分子相比,GAP基聚氨酯作为包覆层时发射药火药力下降幅度较小,当包覆量为9.67%时,PET、EPR包覆发射药的火药力分别下降了8.70%和15.5%,降幅显著高于GAP基聚氨酯包覆发射药。

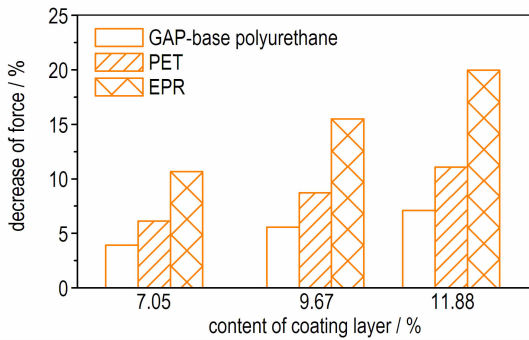


图3 不同包覆材料火药力降低百分数

Fig. 3 Decrease percentage of force of the propellant with different coating layers

3.4 GAP基聚氨酯包覆单基药的定容燃烧性能

3.4.1 定容燃烧 $p-t$ 曲线及 $dp/dt-t$ 曲线分析

通过密闭爆发器试验获得了4/7D、4/7D-B7、4/7D-B10和4/7D-B12四个样品的 $p-t$ 曲线,处理后得到 $dp/dt-t$ 曲线,结果如图4所示,相关特征参数列于表2。

由图4及表2可知,与4/7D相比,4/7D-B7、4/7D-B10和4/7D-B12定容燃烧的最大压力(p_m)和压力增速 dp/dt 最大值(p'_m)均降低,而到达 p_m 和 p'_m 所需时间 t_m 和 t'_m 均显著增长。在燃烧前期,三者 dp/dt 均显著小于4/7D,初始压力增长缓慢,这种压力增长特性有利于降低弹丸运动前火炮膛内的压力增长速率,降低火炮最大膛压。而在燃烧后期,三者 dp/dt 递增过程均延长,压力持续快速增加,这在一定程度上可以抑制弹后压力过快降低,有利于提高弹丸初速。而且,随着包覆量的增加,4/7D-B7、4/7D-B10

和4/7D-B12的 p_m 依次降低,说明其火药力逐渐下降,这与表1理论计算结果相一致;而三者的 t_m 和 t'_m 随之逐渐增大,说明包覆量的增加可以延长发射药燃烧时间和增速燃烧过程,这有利于改善膛内压力行程曲线的形状,增强其燃烧渐增性。

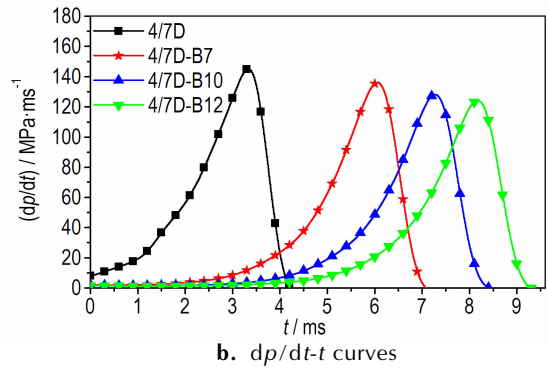
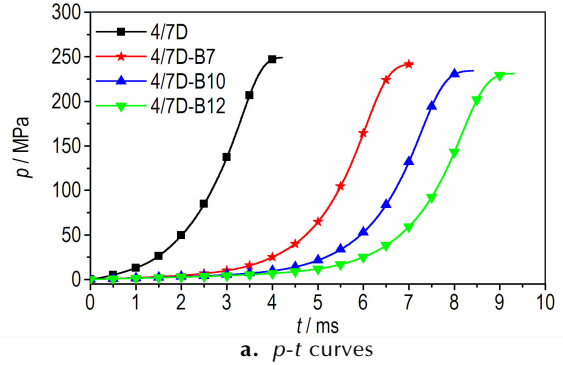


图4 4/7D、4/7D-B7、4/7D-B10和4/7D-B12的 $p-t$ 曲线和 $dp/dt-t$ 曲线

Fig. 4 The $p-t$ and $dp/dt-t$ curves of 4/7D, 4/7D-B7, 4/7D-B10 and 4/7D-B12

3.4.2 燃烧渐增性分析

将 $p-t$ 曲线中数据进行处理,可以得到燃烧活度-相对压力($L-B$)曲线,结果图5所示。

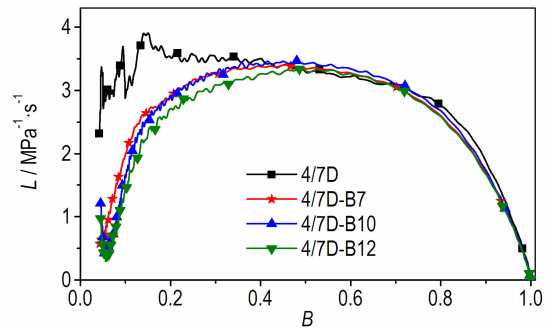


图5 4/7D、4/7D-B7、4/7D-B10和4/7D-B12的 $L-B$ 曲线

Fig. 5 $L-B$ curves of 4/7D, 4/7D-B7, 4/7D-B10 and 4/7D-B12

由图5可见,4/7D-B7、4/7D-B10和4/7D-B12

的 L - B 曲线变化趋势基本一致。在燃烧前期,尤其是 B 小于 0.5 时,4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 的燃烧活度均显著低于 4/7D,具有明显的燃烧渐增性。这是由于包覆在发射药外表面的 GAP 基聚氨酯燃速明显低于 4/7D,在燃烧前期,4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 主要为包覆层和部分暴露出来的内孔共同燃烧,包覆层的存在使得其等效燃面和表观燃速均小于 4/7D,因而燃烧活度显著低于后者。随着燃烧的进行,GAP 基包覆层逐渐燃尽,4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 表观燃速均迅速增大,且前期的内孔燃烧占优使得其燃面在本阶段要大于前期内外表面同时

燃烧的 4/7D,因而在燃烧中后期表现为燃烧活度与 4/7D 相当,甚至略高于后者。

根据文献[18],可用燃烧渐增因子 P_r 来定量表征发射药燃烧渐增性,计算公式如下:

$$P_r = B_s \times L_s / (L_{0.1} + L_{0.3})$$

式中, L 为燃烧活度, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; B 为相对压力; B_s 为燃烧分裂点对应的 B 值; L_s 为燃烧分裂点对应的燃烧活度值, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; $L_{0.1}$ 为相对压力 0.1 对应的燃烧活度值, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; $L_{0.3}$ 为相对压力 0.3 对应的燃烧活度值, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。将密闭爆发器试验燃烧曲线中的相关特征参数和计算所得的 P_r 列于表 2 中。

表 2 密闭爆发器试验特征参数和发射药 P_r 值

Table 2 Characteristic parameters of the closed bomb test and the value of P_r of gun propellants

sample	t_m /ms	p_m /MPa	t'_m /ms	p'_m /MPa · ms ⁻¹	B_s	L_s /MPa ⁻¹ · s ⁻¹	$L_{0.1}$ /MPa ⁻¹ · s ⁻¹	$L_{0.3}$ /MPa ⁻¹ · s ⁻¹	P_r
4/7D	4.27	249.10	3.33	145.10	0.151	3.905	3.029	3.528	0.090
4/7D-B7	6.88	240.34	6.05	136.01	0.453	3.402	1.991	3.268	0.293
4/7D-B10	8.37	233.66	7.27	128.16	0.480	3.466	1.634	3.259	0.340
4/7D-B12	9.27	231.13	8.17	124.18	0.489	3.343	1.480	3.090	0.358

Note: p_m , t_m is the maximum pressure and its corresponding time; p'_m , t'_m is the maximum value of dp/dt and its corresponding time; B_s is the relative pressures at split point; L_s , $L_{0.1}$, $L_{0.3}$ is the dynamic vivacity at split point, $B=0.1$ and $B=0.3$, respectively; P_r is the progression factor.

由表 2 可知,4/7D 燃烧分裂点 B_s 值为 0.151,燃烧渐增因子 P_r 为 0.090;与之相比,4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 的 B_s 值均后移至 0.453 以后, P_r 增大了 2~3 倍,均表现出良好的渐增性。这是由于 GAP 基聚氨酯包覆层的存在,使得发射药燃烧前期表观燃速降低, $L_{0.1}$ 和 $L_{0.3}$ 值较小;而且内孔燃烧占优,增面燃烧过程延长, B_s 值增大,因而 P_r 显著变大。此外,可以看出随着包覆量的增大,4/7D-B7、4/7D-B10 和 4/7D-B12 的 B_s 值和 P_r 均依次增大,这说明包覆单基药燃烧渐增性随着包覆量的增大而显著增加。但需要指出的是,包覆量的增大会降低发射药的能量,因而实际使用中应综合考虑来确定包覆量,以平衡渐增性增大和能量降低之间的矛盾。

4 结论

(1) 通过“预混-喷涂-固化”工艺制备的 GAP 基聚氨酯包覆 4/7D 包覆层厚度较为均一,与单基药粘结良好。

(2) GAP 基聚氨酯包覆层与单基药混合后仍可认为是各自分解,组分间相互作用弱,混合体系相容。

(3) GAP 基聚氨酯的加入使得发射药火药力和

爆温均下降,当包覆量为 9.67% 时,火药力实测值较未包覆时下降了 6.0%,定容爆温由 3081K 降低至 2678 K;但 GAP 基聚氨酯包覆单基药的火药力降幅明显低于惰性高分子包覆单基药。

(4) GAP 基聚氨酯包覆单基药具有良好的渐增性,随着包覆量的增大,燃烧渐增性显著增加。单基药的燃烧分裂点 B_s 为 0.151,燃烧渐增因子 P_r 为 0.090;当包覆量为 7.05%、9.67% 和 11.88% 时,GAP 基聚氨酯包覆单基药 B_s 分别后移至 0.453、0.480 和 0.489, P_r 由分别增大至 0.293、0.340 和 0.358。

参考文献:

- [1] 王泽山,何卫东,徐复铭.火药装药设计原理与技术[M].北京:北京理工大学出版社,2006:219-221.
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. The principle and technique for propellant charging design[M]. Beijing: Beijing institute of Technology Press, 2006: 219-221.
- [2] Zebregs M, Van Driel A. Experimental set-up and results of the process of co-extruded perforated gun propellants[C]// 39th Int Ann Conf of ICT. Karlsruhe: ICT, 2008.
- [3] 王琼林,杨文宝,郝宁.国外发射药钝感包覆技术研究进展[J].火炸药,1994,17(3):40-43.
WANG Qiong-lin, YANG Wen-bao, HAO Ning. The progress of study on deterrent-coated technique of overseas propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1994, 17(3): 40-43.

- [4] Mellow D. Nitrocellulose propellant containing diffused linear polyester burning rate deterrent: US,3743554 [P], 1973.
- [5] Williams Pafelix A. Process for deterrent coating of triple base propellant compositions: US 4300961 [P], 1981.
- [6] Randall J C, Peters S, Simmons R, et al. Energetic deterrent coating for gun propellant: US 6345577 [P], 2002.
- [7] 何卫东, 董朝阳. 高分子钝感发射药的低温感机理[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 9-11.
HE Wei-dong, DONG Chao-yang. Study of low temperature coefficient mechanism of polymer deterred propellants[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2007, 30(1): 9-11.
- [8] 杨春海, 何卫东, 堵平, 等. 环氧树脂复合材料端面包覆多孔粒状发射药的初步研究[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 161-166.
YANG Chun-hai, HE Wei-dong, DU Ping, et al. Preliminary study of multiperforated granular end-surface-coated propellant by epoxy resin composite materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2): 161-166.
- [9] 王焯军, 王泽山. 老化过程中单基包覆药力学性能和界面粘结强度研究[J]. 含能材料, 1997, 5(3): 97-101.
WANG Xuan-jun, WANG Ze-shan. Mechanical properties and interfacial bonding strength of coated single base propellants during aging[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 1997, 5(3): 97-101.
- [10] Frankel M, Grant L, Flanagan J. Historical development of GAP [R]. AIAA 80-2307.
- [11] 宋晓庆, 周集义, 王文浩, 等. 聚叠氮缩水甘油醚改性研究进展[J]. 含能材料, 2007, 15(4): 42-430.
SONG Xiao-qing, ZHOU Ji-yi, WANG Wen-hao, et al. Research progress of glycidyl azide polymers modification[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(4): 425-430.
- [12] Arun Kanti Sikder, Sreekanta Reddy. Review on energetic thermoplastic elastomers (ETPEs) for military science[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, 38: 14-28.
- [13] Northrup, James R. Energetic gun propellant coating: EP 0633236 [P], 1995.
- [14] Walter L, Dietmar M. Propellant Charge Powder for Barrel-type Weapons: US 2001003295 [P], 2001.
- [15] 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 194-195.
LIU Zi-ru. Thermal Analysis for Energetic Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:194-195.
- [16] 王德才. 火药学[M]. 南京: 华东工学院印刷厂, 1988.
- [17] Klapeotke T M, Stierstorfer J. High-Nitrogen Compounds for Use in Low-Erosivity Gun Propellants[R]. Ludwig -Maximilians Univ Munich (Germany) Dept Of Chemistry And Biochemistry, 2008.
- [18] 王琼林, 赵小锋, 刘少武, 等. 一种基于密闭爆发器试验的发射药燃烧渐增性定量评价方法[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 71-74.
WANG Qiong-lin, ZHAO Xiao-feng, LIU Shao-wu, et al. A quantitative assessment method of gun propellant combustion progressivity based on closed bomb test[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(3): 71-74.

Energy and Combustion Properties of the GAP-base Polyurethane Coated Single-base Propellants

ZHENG Qi-long¹, TIAN Shu-chun², ZHOU Wei-liang¹, XIAO Le-qin¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Xi'an North Huian Chemical Industries Co., LTD., Xi'an 710302, China)

Abstract: To improve the combustion performances of single-base propellant, GAP-base polyurethane was used as the coating material, the 4/7 single-base propellant was coated by using premixed-sprayed-cured technology. The effect of coating was observed by a three-dimensional video microscope. The compatibility of GAP-base polyurethane and single-base propellant was investigated by differential scanning calorimetry(DSC). The energies and combustion performances of coated single-base propellant were studied through theoretical calculation and closed-bomb test. The results show that the thickness of GAP-base polyurethane layer is relatively uniform, which has good adhesion and good compatibility with the single-base propellant. The introduction of GAP-base polyurethane makes the powder force and detonation temperature of gun propellant decrease, but the powder force is significantly lower than that of the inert polymer. GAP-base polyurethane coated single-base propellant has significant combustion progressivity, with increasing the coated amount, the progressivity gradually increases. Compared with the single-base propellant, the relative pressures at split point (B_s) of the GAP-base polyurethane coated single-base propellant with the coated amount of 7.05%, 9.67% and 11.88%, increases from 0.151 to 0.453, 0.480 and 0.489 respectively, and the values of the progression factor (P_r) increases from 0.090 to 0.293, 0.340 and 0.358, respectively.

Key words: GAP-base polyurethane; single-base propellant; combustion progressivity; energy property

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.011