

文章编号: 1006-9941(2015)07-0676-06

微观参量表征 RDX 含量对非均质单基发射药力学性能的影响

刘佳¹, 马忠亮¹, 张丽华¹, 肖忠良¹, 程山²

(1. 中北大学化工与环境学院, 太原 山西 030051; 2. 江河化工科技有限公司, 宜昌 湖北 444200)

摘要: 为了用界面微观参量表征非均质发射药宏观力学性能, 对黑索今(RDX)含量为 0% (即粘结剂基体), 10%, 20%, 30%, 35% 的单基发射药在 -40, 20, 50 °C 下进行抗压性能、抗冲击性能实验研究, 并测试了 20, 30, 40, 50 °C 粘结剂基体接触角, 进而测算出粘结剂基体的表面能, 粘结剂基体与 RDX 的界面能, 最终定义表征宏观力学性能的微观参量——单位质量 RDX 与粘结剂基体界面粘附能(E^d), 并将 E^d 与对应含量 RDX 发射药的力学性能参数(屈服应力 σ , 体积变形冲击功 D)由方程 $y = a + be^{-x/t}$ 拟合。发现拟 E^d 与 σ 和 D 呈指数衰减函数关系, 拟合结果与宏观性能测试结果一致, 两者结果均为: 随着 RDX 含量的增加, E^d 减小, 且屈服应力和体积变形冲击功均增大。表明可用微观参量表征单基发射药的宏观力学性能。

关键词: 发射药; 抗压性能; 抗冲击性能; 微观参量; 黑索今(RDX); 界面粘附能(E^d)

中图分类号: TJ55; TQ562

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.013

1 引言

近年来, 通过向发射药中添加固体含能组分制成高能发射药来提高发射药能量^[1]。形成的高能发射药由高分子粘结剂基体与固体填料组成, 在结构上构成非均质体系, 即非均质发射药, 其中, 粘结剂基体为连续相, 固体填料为分散相^[2]。非均质发射药在受力过程中易发生粘结剂基体从固体颗粒表面剥离的现象, 这会导致发射药的宏观弹性模量, 压缩强度, 冲击强度等力学性能发生一定改变^[3], 改变程度与粘结剂基体-填料界面结构及界面作用密切相关, 其界面结合强度对发射药力学性能的影响一直是复合材料研究领域的热点^[4-5]。目前, 对非均质发射药力学性能的研究多局限在宏观测试或是定性分析^[6-9], 与宏观方法相比, 微观方法更为直接, 经济, 省时, 从界面的微观结构研究发射药粘结剂基体与固体填料界面间的相互作用, 进而建立微观参量与宏观力学性能的定量关系将成为表征发射药宏观力学性能的有效手段, 但界面结构复杂, 二者精确的定量关系至今尚未被深入研究。

前人利用测算发射药及含能填料的表面能计算二

者界面能及粘附功, 用以表征发射药粘结剂基体与不同种类含能填料的粘合状况, 以选用较适宜的含能填料得到能量及力学性能较好的发射药^[10]; 还有学者^[11]通过测算不同粒径黑索今(RDX)的表面能, 得出不同粒径 RDX 与推进剂粘结剂基体的界面能及粘附功, 得出单位面积界面能, 用以研究 RDX 粒径对推进剂力学性能的影响, 但含能填料含量对发射药力学性能影响尚未有人研究。为此, 本研究以含 RDX 非均质单基发射药(为方便表述, 下文简称为单基发射药)为例进行实验研究, 定义了单位质量 RDX 与粘结剂基体界面粘附能($E^d, \text{mJ} \cdot \text{g}^{-1}$), 并用此来研究粘附功与 RDX 含量的关系, 从微观界面研究 RDX 含量对非均质单基发射药力学性能的影响。通过三维立体显微镜观察 RDX 含量为 0% (即单基发射药粘结剂基体, 下文均简称为粘结剂基体), 10%, 20%, 30%, 35% 的单基发射药在 20 °C 的断裂面, 并通过发射药抗压实验, 抗冲击实验及粘结剂基体表面能的测算拟合出 -40, 20, 50 °C 下对应 RDX 含量的单基发射药屈服应力, 体积变形冲击功与 E^d 的关系, 研究结果对非均质发射药配方的优化, 界面助剂的研究及力学性能的预估等有一定指导意义。

2 理论部分

2.1 表面能的测算

高聚物固体的表面能是研究其表面性能的重要参

收稿日期: 2014-15-12; 修回日期: 2014-07-17

基金项目: 火炸药青年创新基金(40406010301)

作者简介: 刘佳(1987-), 女, 博士研究生, 研究方向: 发射药性能研究。e-mail: liujia216644@163.com

通信联系人: 马忠亮(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 应用化学。e-mail: xiaozh05@yahoo.com.cn

量之一,也是表征其粘附和吸附能力的重要参数,因此对其表面研究具有重要的实际意义。但是固体表面能的测定尚无直接可靠的方法,许多学者提出一些间接的方法从理论上计算固体聚合物的表面能^[12],本研究采用接触角法^[13]测算粘结剂基体表面能,其实验原理如下。

Yong. T. 提出了著名的杨氏方程^[14]:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos\theta \quad (1)$$

Girifalco 和 Good 导出了 γ_s, γ_l 和 γ_{sl} (固相—液相界面张力) 之间的重要关系^[15]:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2\phi(\gamma_s \gamma_l)^{1/2} \quad (2)$$

式中: ϕ 为摩尔体积因子,一般 ϕ 值近似为 1。则式(2)可变化为:

$$\gamma_{sl} = [(\gamma_s)^{1/2} - (\gamma_l)^{1/2}]^2 \quad (3)$$

因为粘附功 W_a 为^[15]:

$$W_a = \gamma_s + \gamma_l - \gamma_{sl} \quad (4)$$

联立式(3),式(4)可推导出:

$$W_a = 2(\gamma_s)^{1/2}(\gamma_l)^{1/2} \quad (5)$$

由式(1),式(4)联立得:

$$W_a = \gamma_l(1 + \cos\theta) \quad (6)$$

又因为界面能的极性分量与色散分量具有加和性^[15],即:

$$\gamma_{sl} = \gamma_{sl}^p + \gamma_{sl}^d \quad (7)$$

假定每一个分量都符合式(7),因此,式(3)与式(5)分别变为:

$$\gamma_{sl} = [(\gamma_s^p)^{1/2} - (\gamma_l^p)^{1/2}]^2 + [(\gamma_s^d)^{1/2} - (\gamma_l^d)^{1/2}]^2 \quad (8)$$

$$W_a = 2(\gamma_s^d)^{1/2}(\gamma_l^d)^{1/2} + 2(\gamma_s^p)^{1/2}(\gamma_l^p)^{1/2} \quad (9)$$

式(6)与式(9)联立可推导出:

$$\gamma_l(1 + \cos\theta) / 2(\gamma_l^d)^{1/2} = (\gamma_s^d)^{1/2} + (\gamma_s^p)^{1/2}(\gamma_l^p / \gamma_l^d)^{1/2} \quad (10)$$

由此可见,用两种已知表面张力及极性分量的液体,滴加在待测发射药粘结剂基体表面,测定其接触角,代入式(10)中解二元二次方程即得到待测发射药粘结剂基体表面能的色散分量及极性分量,进而得到发射药粘结剂基体的表面能。

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (11)$$

式中, γ_{sl} 为固液界面张力, $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$; θ 为接触角, ($^\circ$); γ_l 为液体表面张力, $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$; γ_{lp}, γ_{ld} 为液体表面张力的极性和色散分量,单位均为 $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$; γ_s 为粘结剂基体表面能, $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$; γ_{sp}, γ_{sd} 为粘结剂基体表面能极性和色散分量, $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$, W_a 为界面粘附功, $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2.3 E^d 的计算

吴人洁^[16]利用半连续模型中能量加和性概念,并

假定分子之间作用由非极性部分(色散部分)和极性部分组成。得到一个适用于低表面能体系的界面能方程,即调和平均方程:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - \frac{4\gamma_l^d \gamma_s^d}{\gamma_l^d + \gamma_s^d} - \frac{4\gamma_l^p \gamma_s^p}{\gamma_l^p + \gamma_s^p} \quad (12)$$

曾有学者用式(12)结合式(4)近似计算 RDX 与发射药粘结剂基体的粘附功^[6],本研究进而计算 E^d 。

RDX 质量分数用 $Z(\%)$ 表示,纯粘结剂的粘附功用 $W_a^c(\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$ 表示,RDX 比表面积用 $S(\text{m}^2/\text{g})$ 表示,则其计算式为:

$$E^d = W_a^c(1 - S \times Z) + W_a(S \times Z) \quad (13)$$

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

仪器: WSM-10KN 电子万能试验机,长春市智能仪器设备有限公司;落锤仪,江苏天源试验设备有限公司,锤重:自行配重,质量 100 g ~ 10 kg; 高低温试验箱,上海市林频仪器设备有限公司; 3 V 锂电数显卡尺,昆山溯源测量仪器有限公司; 三维立体显微镜,日本基恩士有限公司; 接触角测量仪,上海中晨仪器有限公司。

试剂: 5 类 RDX, 255 厂; B 类和 C 类硝化纤维素(NC), 兴安化工厂,无水乙醇; 分析纯,西陇化工股份有限公司; 乙醚,二苯胺,分析纯,天津市天大化学试剂厂; 蒸馏水,自制,二碘甲烷,分析纯,百顺化学科技有限公司。

3.2 含 RDX 单基发射药的制备

单基发射药依据文献^[17]制备: 将硝化纤维素、溶剂、安定剂等加入捏合机进行捏合,10 min 后将 RDX 加入捏合机继续捏合,40 min 后将捏合好的药料放入模具用油压机进行压伸成型。将成型的发射药晾干,切成所需长度,然后浸水,烘干得到最终发射药。

根据实验需要最终得到试样为药粒与药片,分别用来测试发射药的力学性能与表面能。

3.3 单基发射药力学性能测试

对此发射药进行不同温度(-40, 20, 50 $^\circ\text{C}$)下的抗压实验及抗冲实验,抗压实验原理见文献^[17],抗冲击实验原理见文献^[18]。

3.4 粘结剂基体与 RDX 间的界面能的计算

测试不同温度下(20, 30, 40, 50 $^\circ\text{C}$)蒸馏水、二碘甲烷与粘结剂基体的接触角,用式(11)测算出其不同温度下的表面能。再用(12)式计算得此发射药粘结剂基体与 RDX 间的界面能。

4 结果及讨论

4.1 单基发射药微观结构

采用三维立体显微镜对此系列发射药及其断裂面进行观察。20 °C下用相同落高(40 cm)及落锤锤重(175 g)对不同RDX含量(0%, 10%, 20%, 30%)的单基发射药进行冲击,当试样被冲击破碎后,用小刀割取其中较为平整的小片进行观察,得到断裂面的微观图象见图1。以RDX含量35%的单基发射药冲击前后的微观图象为例进行观察,结果如图2所示(RDX含量较高时冲击断裂面易观察,落高及锤重与图1中试样相同)。

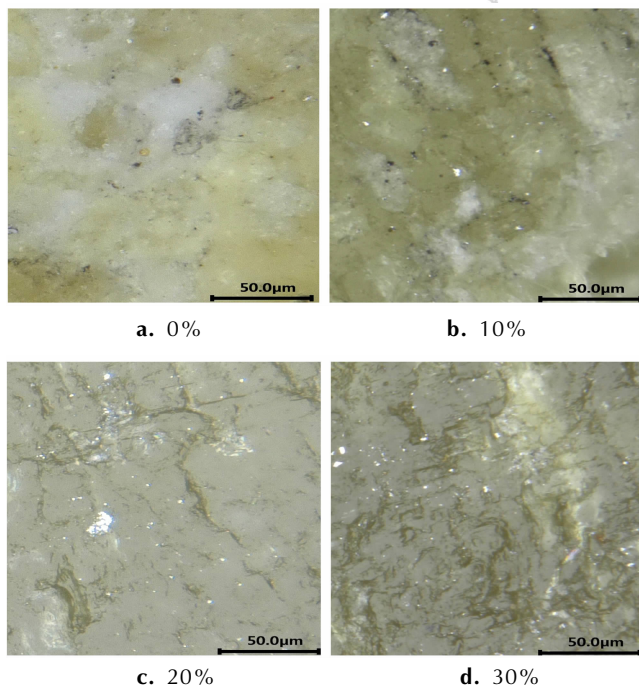


图1 20 °C下不同RDX含量的单基发射药冲击后表面图象

Fig.1 Surface images of single-base gun-propellant with different content of RDX after impact under 20 °C

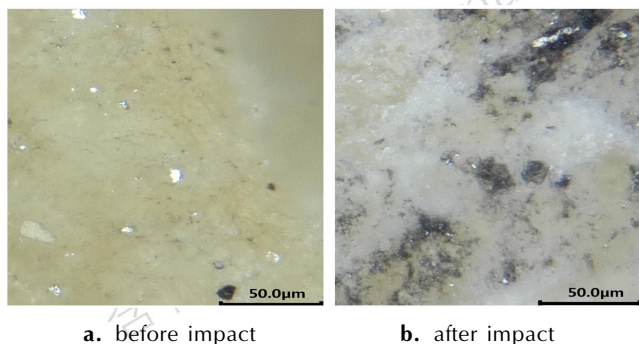


图2 20 °C下RDX含量35%的单基发射药冲击前后表面图象

Fig.2 Surface images of single-base gun-propellant with 35% RDX before and after impact at 20 °C

由图1可知,当落锤锤重和落高相同时,RDX含量为0%的发射药看不到明显的裂纹,随着RDX含量增多,试样裂纹增多,且裂纹扩展程度越大,即发射药受冲击破坏越严重。对比图2与图1可以看出,硝化纤维素与RDX为两相不相容物质,二者必会产生一定的相界面,RDX含量越多,粘结剂基体与RDX颗粒间界面越多,形成界面缺陷越多,这些缺陷会引起应力集中,使发射药从界面处产生冲击破坏;同样RDX含量越多,其颗粒之间,颗粒与硝化纤维素之间不能像纯硝化纤维素一样相互缠绕,使得界面作用力减弱,也容易使发射药发生冲击破坏。

4.2 单基发射药力学性能测试结果

不同RDX含量单基发射药试样不同温度下抗压实验结果见表1,抗冲击实验结果见表2。

表1 不同RDX含量的单基发射药在不同温度下的屈服应力(σ)和弹性模量(E)

Table 1 Yield stress(σ) and elasticity modulus (E) of single-base gun-propellants with different content of RDX under different temperature

temperature/°C	RDX content /%	σ /MPa	E /MPa
-40	0	48.826	782.842
	10	49.771	820.040
	20	50.750	876.344
	30	52.996	931.006
	35	57.384	1036.680
20	0	44.410	628.910
	10	45.382	671.576
	20	48.017	770.924
	30	52.670	841.250
	35	54.285	929.186
50	0	42.883	579.508
	10	44.320	635.786
	20	46.892	736.060
	30	48.522	795.252
	35	50.855	860.898

表2 不同RDX含量的单基发射药不同温度下的体积变形冲击功(D)

Table 2 Volume deformation impact energy (D) of single-base gun-propellants with different RDX under different temperature

temperature/°C	RDX content /%				
	0	10	20	30	35
-40	176.2	177.4	179.2	182.2	192.6
20	123.6	125.1	126.3	130.2	134.4
50	118.1	120.7	121.5	123.8	130.4

由表 1, 表 2 中三种温度下的测试数据可以看出每种温度下随 RDX 含量升高, 单基发射药屈服应力及弹性模量均增大, 即抗压强度增大; 体积变形冲击功增大, 即抗冲击强度降低。这可能是因为加入 RDX 使得发射药药体结构由均质变成非均质结构, 此时载荷由基体与微粒共同承担, 微粒以机械约束方式限制基体变形, 对粘结剂基体起到增强作用, 提高抗压强度。但是 RDX 填料的加入使得粘结剂基体与微粒间产生相界面, 易导致应力集中及脱粘现象, 使得冲击强度降低。

4.3 粘结剂基体表面能的测算结果

根据不同探针液体(蒸馏水, 二碘甲烷)在粘结剂基体表面上的接触角, 可以求得粘结剂基体表面能及其各个分量, 探针液体在 20 °C 下的表面张力及各个分量可由文献[16]查得, 液体表面张力随温度升高而降低, 同样可由文献[16]查得水的表面张力温度系数为 $-0.16 \text{ mN} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$, 小分子液体表面张力温度系数一般取 $-0.1 \text{ mN} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$, 故二碘甲烷表面张力温度系数近似取 $-0.1 \text{ mN} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$, 得不同温度下粘结剂基体的接触角, 由式(10)及式(11)计算得到粘结剂基体表面能及各分量见表 3。

4.4 单基发射药 E^d 计算结果

对于高聚物来说, 表面能与温度呈负相关, 表面张力的温度系数大约为 $-5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$ [16]。温度越高, 发射药粘结剂基体的表面能越小, 这与高聚物

表面能与温度关系相一致。由粘结剂基体表面能与温度的数据(表 3)拟合出粘结剂基体表面能(γ_1 , $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)及表面能极性分量(γ_2 , $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)与温度(x , °C)的关系分别为:

$$\gamma_1 = -0.146x + 50.412$$

$$\gamma_2 = 0.488x + 35.524$$

由此关系可以得出 -40 °C 粘结剂基体的表面能、极性分量与非极性分量分别为 $56.245 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, $55.024 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, $1.221 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, 用以求 -40 °C 粘结剂基体与 RDX 的界面能及 E^d 。

由式(12)计算发射药粘结剂基体与 RDX 颗粒在不同温度下的界面能, 由式(4)求出粘附功, 见表 4。实验中所用 RDX 为 5 类 RDX, 查得其相应平均粒径为 0.0577 mm [11], 20 °C 下的表面能及各分量也可由文献[11]查得, 其表面能温度系数按 $0.5 \text{ mN} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$ 计算 [16]。由于 RDX 实际尺寸不规则, 故计算其比表面时按球形, 方形, 棒状等平均计算, 进而得到其比表面积近似为 $0.239 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 由式(13)最终求得 E^d 见表 4。

4.5 单基发射药微观参量与宏观力学性能定量关系

以表 1 和表 2 中屈服应力和体积变形冲击功数据为纵坐标, 表 4 中 E^d 数据为横坐标绘制 σ - E^d 曲线和 D - E^d 曲线, 如图 3, 图 4, 并将不同曲线拟合对应公式列入表 5。

表 3 不同温度下不含 RDX 单基发射药接触角、表面能及各分量

Table 3 Contact angle (θ), surface energy (γ_s), polar component (γ_s^p) and nonpolar component (γ_s^d) of single-base gun-propellant without RDX under different temperature

temperature / °C	$\theta / (^\circ)$		$\gamma_s / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	$\gamma_s^p / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	$\gamma_s^d / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$
	water	diiodomethane			
20	53.60	75.20	46.971	26.957	20.016
30	57.20	60.50	46.342	18.894	27.448
40	60.00	59.90	43.995	16.490	27.505
50	64.90	52.00	42.705	11.510	31.195

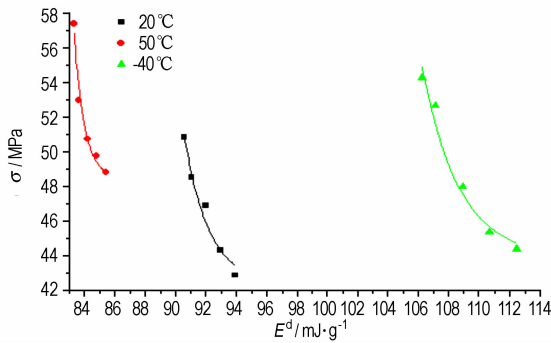
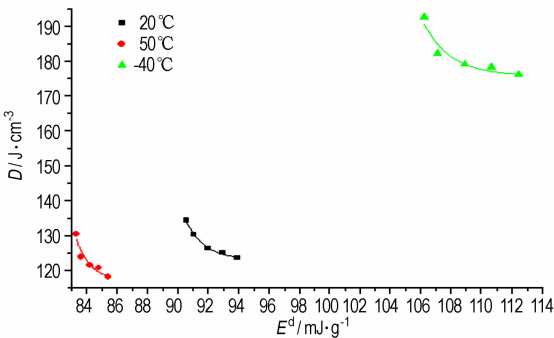
表 4 不同温度下单基发射药的 W_a^c , W_a , E^d

Table 4 Adhesive work of binder (W_a^c), adhesive work of interface (W_a) and adhesive energy per mass of RDX and binder (E^d) under different temperature

temperature / °C	$W_a^c / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	$W_a / \text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$	$E^d / \text{mJ} \cdot \text{g}^{-1}$			
			10%	20%	30%	35%
50	85.410	79.431	84.812	84.214	83.616	83.317
20	93.942	84.340	92.982	92.022	91.061	90.581
-40	112.490	94.692	110.71	108.93	107.15	106.26

表 5 不同温度下 σ - E^d 和 D - E^d 曲线Table 5 Relationship between σ and W_a^d or D and W_a^d under different temperature

temperature/°C	relationship between σ and E^d	R^2	relationship between D and E^d	R^2
20	$y=42.370+1.572E25e^{-x/1.621}$	0.973	$y=123.2+1.055E32e^{-x/1.193}$	0.994
50	$y=48.457+4.770E53e^{-x/0.686}$	0.966	$y=116.9+4.472E35e^{-x/0.989}$	0.913
-40	$y=43.875+8.063E19e^{-x/2.446}$	0.974	$y=175.8+1.109E25e^{-x/1.783}$	0.926

图 3 不同温度下单基发射药的 σ - E^d 曲线Fig. 3 σ vs E^d curves of single-base gun-propellants under different temperature图 4 不同温度下单基发射药的 D - E^d 曲线Fig. 4 D vs E^d curves of single-base gun-propellants under different temperature

由图 3、图 4 和表 5 可以看出,不同温度下单基发射药宏观力学性能与其 E^d 呈现指数衰减的函数关系,随着 E^d 减小 (RDX 含量增加),发射药屈服应力及体积变形冲击功均增大,进而得出发射药抗压强度增强,抗冲击强度降低,与宏观力学性能测试结果一致。

5 结论

(1) 含 RDX 单基发射药随着 RDX 含量增加,抗压强度提高,抗冲击强度降低,且随着 RDX 含量增多,发射药受冲击时裂纹扩展越严重。

(2) 定义单位质量 RDX 与粘结剂基体界面粘附能 (E^d) 用以表征 RDX 含量对发射药体系宏观力学性

能的影响,并且得出此参量与发射药宏观力学性能参量在不同温度下均呈现指数衰减函数关系,可由方程 $y=a+be^{-x/t}$ 拟合。表明可用定义的微观参量 E^d 表征发射药宏观力学性能,在发射药制备前用以预估其力学性能。

参考文献:

- [1] 田苏明,钟建华,苏军燕,等.黑索今对变燃速发射药力学性能及燃烧性能的影响[J].山西化工,2009,29(3):25-29.
TIAN Su-ming, ZHONG Jian-hua, SU Jun-yan, et al. Effect of RDX on mechanical and combustion property of variable burning rate gun propellant[J]. Shanxi Chemical Industry, 2009, 29(3): 25-29.
- [2] 喻鸿钢.复合固体推进剂界面粘结的预估,表征及优化[D].长沙:湖南大学,2008.
YU Hong-gang. Characterization, prediction and optimization of the interfacial adhesion of composition solid propellant[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [3] 季素屏.组分对含聚醚聚氨酯发射药力学性能影响研究[D].南京:南京理工大学,2009.
JI Su-ping. Study on the influence of formulation to the mechanical properties of gun-propellant with TPUE[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [4] 周文静,马亚南,王克勇,等. NTO 与粘结剂的界面作用[J]. 火炸药学报,2010,33(4):40-46.
ZHOU Wen-jing, MA Ya-nan, WANG Ke-yong, et al. Interfacial interaction between NTO and bindings[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(4): 40-46.
- [5] 李江存,焦介清,任慧,等.不同键合剂与 RDX 表界面作用[J]. 含能材料,2009,17(3):274-277.
LI Jiang-cun, JIAO Jie-qing, REN Hui, et al. Interfacial bonding between RDX and bonding agents[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2009, 17(3): 274-277.
- [6] 涂善.改善新型发射药力学性能研究[D].南京:南京理工大学,2010.
TU Shan. The study of improving the mechanical properties of the new-type gun-propellant[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [7] 徐皖育,何卫东,王泽山. JMZ 发射药力学性能研究[J]. 含能材料,2007,15(3):235-239.
XU Wan-yu, HE Wei-dong, WANG Ze-shan. The study on the mechanical properties of JMZ gun-propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2007, 15(3): 235-239.
- [8] 堵平,何卫东,王泽山.低温感发射药包覆层的力学性能[J]. 火炸药学报,2005,28(2):35-40.
DU Ping, HE Wei-dong, WANG Ze-shan. Mechanical performance of coating-layer of LTSC propellant[J]. Chinese Journal of

- Explosives & Propellants*, 2005, 28(2): 35–40.
- [9] 宋华杰. TATB/氟聚合物复合材料的界面作用和力学性能研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2000.
- SONG Hua-jie. Interfacial interactions and mechanical properties of TATB / Fluoropolvmer composites[D]. Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2000.
- [10] 赵毅, 黄振亚, 刘少武, 等. 改善高能硝胺发射药力学性能研究[J]. 火炸药学报, 2005, 28(3): 1–3.
- ZHAO Yi, HUANG Zhen-ya, LIU Shao-wu, et al. The study of improving the mechanical properties of the high-energy nitramine gun-propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(3): 1–3.
- [11] 杜美娜, 罗运军. RDX 粒径和表面能对 HTPB 推进剂力学性能的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 441–447.
- DU Mei-na, LUO Yun-jun. Effect of particle size and surface free energy of RDX on the mechanical properties of HTPB propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 441–447.
- [12] 宋华杰, 董海山, 郝莹. 计算固体表面能的 Young-Good-Girifalco-Fowkes 方程的理论基础[J]. 粘接, 2000, 21(5): 1–5.
- SONG Hua-jie, DONG Hai-shan, HAO Ying. Theoretic fundcation of Young-Good-Girifalco-Fowkes equation use for solid surface energy calculation[J]. *Technology on Adhesion & Sealing*, 2000, 21(5): 1–5.
- [13] 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): 98–103.
- TIAN Hong-yuan, ZHOU Wen-jing, MA Ya-nan, et al. Surface energy of HNS and NQ[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(1): 98–103.
- [14] 张开. 高分子界面科学[M]. 北京: 中国石化出版社, 1997.
- [15] 杜磊, 邓剑如, 李洪旭. 表界面化学原理在复合固体推进剂中的应用[J]. 推进技术, 2000, 21(1): 64–68.
- DU Lei, DENG Jian-ru, LI Hong-xu. Application of surface and interface chemistry principles to solid propellant[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(1): 64–68.
- [16] 吴人洁. 高聚物的表面与界面[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] 王泽山, 韩盘铭, 张续柱. 火药实验[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 87–91.
- [18] 刘佳, 张丽华, 马忠亮, 等. 含 RDX 多相发射药力学性能研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2013, 11(4): 87–89.
- LIU Jia, ZHANG Li-hua, MA Zhong-liang, et al. Study on the mechanical properties of mutiphase gun-propellant with RDX[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2013, 11(4): 87–89.

Influence of RDX Content on Mechanical Properties of Heterogeneous Single-base Gun-propellant Characterized by Microphysical Parameter

LIU Jia¹, MA Zhong-liang¹, ZHANG Li-hua¹, XIAO Zhong-liang¹, CHENG Shan²

(1. School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Jianghe Chemical Technology Co., Ltd., Yichang 444200, China)

Abstract: In order to characterize macroscopic mechanical properties of heterogeneous propellant by microphysical parameters, the compressive property and shock resistance of single-base gun-propellant containing different amount of RDX (0% (binder), 10%, 20%, 30%, 35%) were tested at -40, 20, 50 °C, and the surface contact angle of binder was measured at 20, 30, 40 °C and 50 °C. Then, the surface energy of binder and the interface energy between binder and RDX were calculated and the microscopic parameter-adhesive energy per mass of RDX and binder (E^d) was defined. The relationships between E^d and mechanical property parameters (yield stress σ , volume deformation impact energy D) were obtained. Results show that σ and D decline in an exponential function with E^d , which is consistent with the macroscopic test; with the increasing of RDX, the E^d decreases, σ and D both increase. It turns out that macroscopic mechanical properties of single-base gun-propellant can be characterized by microphysical parameter.

Key words: gun-propellants; compressive property; shock resistance; microphysical parameter; RDX; adhesive energy (E^d)

CLC number: TJ55; TQ562

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.07.013