

不同热分析方法研究 B 炸药的热分解

梁彦会¹, 张建国¹, 冯晓军², 张同来¹, 王世英², 汤 焱¹, 刘 芮¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:用差示扫描量热仪(DSC)、热重-微熵热重分析仪(TG-DTG)、动态真空安定性技术(DVST)和温度跃升傅里叶变换红外(T-Jump/FTIR)光谱测定法对 B 炸药在不同试验条件下的热分解行为进行了研究。结果表明,在 50~400℃有一个吸热峰和放热峰,吸热峰与主体炸药 TNT 的熔化峰相一致,放热峰与主体炸药 RDX 的分解峰一致。在 50~400℃有两个失重阶段,第一个失重阶段的失重量与主体炸药 TNT 的失重量一致,第二个失重阶段的失重量与主体炸药 RDX 一致,与 DSC 分析结果相符。B 炸药在 100℃/48 h 下的产气量为 0.43 mL/g,表明 B 炸药有好的热安定性。B 炸药快速热裂解过程的含氮气相产物主要有 NO、NH₃、HCN 和 HONO。含碳气体产物主要有 CO、CO₂、HOCO 和 HCN。得到了这些产物相对摩尔浓度随时间变化的曲线。

关键词:物理化学; B 炸药; 热分解; 差示扫描量热法; 热重-微熵热重法; 动态真空安定性技术; 温度跃升傅里叶变换红外原位分析技术

中图分类号: TJ55; O642

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2012)01-0009-06

Studies on Thermal Decomposition of Composition B Using Different Thermal Analysis Methods

LIANG Yan-hui¹, ZHANG Jian-guo¹, FENG Xiao-jun², ZHANG Tong-lai¹,
WANG Shi-ying², TANG Zhan¹, LIU Rui¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The thermal decomposition behavior of composition B was investigated by using differential scanning calorimeter (DSC), thermogravimetric-differential thermal gravimetry analyzer (TG-DTG), dynamic vacuum stability test (DVST) and temperature-jump/fourier transform infrared (T-Jump/FTIR) spectroscopy, respectively. The results showed that there was an endothermic and an exothermic peak between 50–400 °C. The endothermic peak was in agreement with the peak of melting of TNT and the exothermic peak was in accordance with the decomposition peak of RDX. There were two mass loss stages over the temperature range from 50 °C to 400 °C. The mass loss of the first and second stages approached the content of TNT and RDX, respectively, which was consistent with the results of DSC analysis. The amount of decomposition gases of composition B at 100 °C for 48 h was 0.43 mL/g which showed composition B had a good thermal stability. The nitrogen-containing IR-active gas products were NO, NH₃, HCN and HONO. The carbon-containing gas products were CO, CO₂, HOCO and HCN. The curves of mole concentration fraction of the main gaseous products vs time were obtained.

Key words: physical chemistry; composition B; thermal decomposition; differential scanning calorimeter; thermogravimetric-differential thermal gravimetry; dynamic vacuum stability test; temperature-jump/ fourier transform infrared spectroscopy

引 言

B 炸药是一种以 RDX 和 TNT 为主要组分的

熔铸炸药,具有比 TNT 更高的爆速及威力,广泛用于弹药装药中。对其结构和性质的研究大大促进了 B 炸药的应用^[1-5]。B 炸药在使用过程中出现了

收稿日期:2011-07-18; 修回日期:2011-10-17

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(项目编号:NCET-09-0051)资助

作者简介:梁彦会(1986-),女,硕士研究生,从事含能材料研究。

通讯作者:张建国(1974-),男,教授,博导,从事含能材料的理论与实验研究。

不少安全问题,其中早炸就是最严重的问题之一。利用热分析技术研究含能材料的分解特性和热安定性是简便且非常有效的方法。何得昌^[6]等利用 DSC 法研究了不同热处理温度对 B 炸药热分解动力学参数的影响,发现随着热处理温度的升高,炸药热分解的表观活化能和指前因子逐渐减小,同时研究了反应度对 B 炸药热分解动力学的影响^[7],解释了表观活化能随着反应度增加而逐渐减小的规律。Lee 和 Martina 等^[8-10]利用 DSC 和 TG-DTG 等方法对 B 炸药的主体炸药 RDX 的热分解过程进行了较为详细的研究。王晓红等^[11]利用 T-Jump/FTIR 联用技术对 RDX 的热分解行为进行了研究,得到 RDX 快速热分解时的主要气体产物。但这些工作都以 DSC 热分析为主要方法研究其分解反应的规律,或是利用其他方法只研究其主体炸药 RDX 的热分解特性。

本实验利用 DSC 法、TG-DTG 法、DVST 法和 T-Jump/FTIR 法研究了不同试验条件下 B 炸药的热分解行为,并对其安定性进行了讨论分析。

1 实 验

1.1 仪器与样品

Pyris-1 型差示扫描量热仪,美国 PE 公司; Pyris-1 型热重分析仪,美国 PE 公司; EQUINOX 55 型傅里叶变换红外光谱仪,德国 Bruker 公司; Pyroprobe 2000 热裂解分析仪,美国 CDS 公司;具有 Brill 原位分解池的 Pyroprobe 2000 热裂解分析仪,美国 CDS 公司。

在真空安定性方法的基础上,自主研制了动态真空安定性测定仪。与真空安定性法相比,该方法主要优点是可以实时、在线、连续、直接地跟踪测试含能化合物的整个热分解过程^[12]。

B 炸药(质量分数):RDX59.5%、TNT39.5%、WAX 1.0%,由西安近代化学研究所提供。

1.2 测试条件

差示扫描量热法:流动氮气气氛,流速 20 mL/min,升温速率为 10、15 和 20°C/min,样品量为 0.5 mg,样品池为铝坩埚,参比物为 α -Al₂O₃。

热重-微熵热重法:流动氮气气氛,流速 20 mL/min,升温速率为 10、15 和 20°C/min,样品量为 0.5 mg,样品池为铂坩埚。

动态真空安定性:试样量为 1 g,温度为 100°C,抽真空至压力小于 0.1 kPa,试验时间 48 h。

温度跃升傅里叶变换红外原位分析技术:快速

扫描热分解过程数据时间间隔为 0.25 s,升温速率为 1000°C/s,高纯氩气气氛,压力为 0.1 MPa,设定分解温度 350°C。

2 结果与讨论

2.1 差示扫描量热法

线性升温速率为 10°C/min 时 B 炸药的 DSC 曲线如图 1 所示。

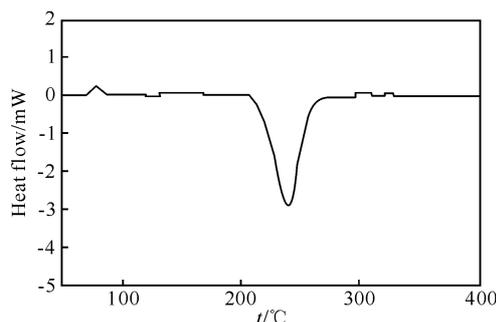


图 1 升温速率 10°C/min 时 B 炸药的 DSC 曲线
Fig. 1 DSC curve of Comp. B at a heating rate of 10°C/min

从图 1 可知,B 炸药有一个吸热峰和一个放热峰。吸热峰发生在 68~88°C,峰顶温度 78.2°C,与单质 TNT 的吸热峰相一致,说明这个吸热峰为 B 炸药中主体炸药 TNT 的熔化峰。在 200~290°C 发生一个剧烈的放热分解峰,峰顶温度为 239.8°C,与单质 RDX 的放热分解峰相一致,说明这个放热峰为 B 炸药中主体炸药 RDX 的放热分解峰,但与单质 RDX 炸药相比,B 炸药在放热分解之前没有大的熔化吸热峰,这可能是由于 TNT 的熔化,溶解了少量 RDX,随着温度的升高,RDX 的溶解量增大,而溶解状态下的 RDX 直接分解,从而没有出现 RDX 分解前的吸热峰。

表 1 为在不同升温速率下 B 炸药热分解的参数。从表 1 可以看出,B 炸药放热峰的峰顶温度、反应热焓随着升温速率的增加而逐渐增大。造成这种现象的原因可能是^[13]:(1)仪器结构的因素,当升温速率较低时,炉子与试样之间的温度梯度较小,接近于热平衡状态;升温速率较高时,不但会导致试样与炉内温度的严重热不平衡,而且会使试样内部的温度不均匀;(2)仪器测量热敏元件的热积累速率要比低升温速率下高一些,于是使得峰值温度和相应的热焓要比在低升温速率下测得的结果高一些。而在何得昌的试验中^[6-7],由于热处理温度越高,炸药分子分解得越多,最终导致峰顶温度随着热处理温度的升高而降低,反应活化能也随着反应

度的增大而减小。

用 Kissinger 法和 Ozawa-Doyle 法分别计算 B 炸药的动力学参数, 结果如表 2 所示。

表 1 不同升温速率下 B 炸药热分解反应的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of thermal decomposition reaction of Comp. B at different heating rates

$\beta/(\text{°C} \cdot \text{min}^{-1})$	$T_{\text{ei}}/\text{°C}$	$T_{\text{p}}/\text{°C}$	$T_{\text{f}}/\text{°C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
10	214.3	239.1	274.5	1498.4
15	217.8	245.9	282.8	1738.6
20	221.7	248.3	283.7	1800.0

注: β 为升温速率; T_{ei} 为起始分解温度; T_{p} 为峰顶温度; T_{f} 为分解终止温度; ΔH 为分解焓变。

表 2 B 炸药热分解反应的动力学参数

Table 2 The kinetic parameters of thermal decomposition reaction of Comp. B

方法	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\lg(A/\text{s}^{-1})$	R
Kissinger 法	150.8	13.43	-0.9829
Ozawa-Doyle 法	151.6		-0.9847

因此, 计算得到 B 炸药在该分解过程中的阿累尼乌斯方程为: $\ln k = 30.92 - \frac{151.2 \times 10^3}{RT}$ 。

用 zhang-hu-xie-li 方法^[14] 可计算出炸药的外延起始分解温度 T_{e} 和热爆炸临界温度 T_{b} 分别为 208.5°C 和 222.0°C。

2.2 热重-微焓热重法

图 2 为 10°C/min 线性升温速率下 B 炸药的 TG-DTG 曲线。从图 2 可知, B 炸药有两个失重阶段。第一个失重阶段发生在 98~186°C, 失重量为 32.8%, 与 B 炸药中 TNT 的含量接近, 剩余量为 63.9%, 且失重速率为 11.5%, 比较缓慢, 说明这个失重过程明显为 TNT 炸药的缓慢挥发过程。第二个失重过程发生在 186~248°C, 失重量为 64.5%, 与 RDX 炸药的含量相一致, 说明这个失重过程为 RDX 炸药的放热分解过程。当温度上升到 400°C 时, B 炸药完全分解, 没有固体杂质产生, 说明 B 炸药热分解过程产生的均为气体产物。从图 2 曲线中可以看出, B 炸药的失重过程主要是由 TNT 炸药的熔化挥发和 RDX 炸药的放热分解失重所组成的, 与 DSC 曲线所得的结果相一致, 且 TG 中第二个失重阶段分解的外延起始分解温度与 DSC 也相一致。

不同升温速率下 B 炸药的 TG 曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, B 炸药中 RDX 的分解过程随着升温速率的增加而越来越不明显。

表 3 给出不同升温速率下 B 炸药热分解的起始分解温度 T_0 、各阶段的质量损失 Δm 、最大质量

损失速率 v 和最终残渣量 s 。

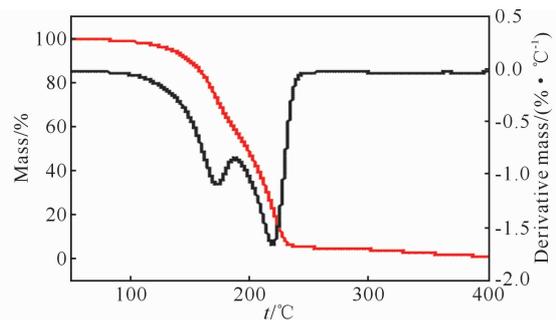


图 2 升温速率 10°C/min 时 B 炸药的 TG-DTG 曲线

Fig. 2 TG-DTG curves of Comp. B at a heating rate of 10°C/min

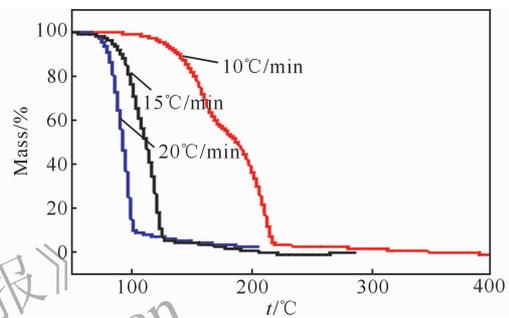


图 3 不同升温速率下 B 炸药的 TG 曲线

Fig. 3 TG curves of Comp. B at different heating rates

表 3 不同升温速率下 B 炸药的热失重数据

Table 3 Mass loss data of Comp. B at different heating rates

$\beta/(\text{°C} \cdot \text{min}^{-1})$	$T_0/\text{°C}$	$\Delta m/\%$	$v/(\% \cdot \text{min}^{-1})$	$s/\%$
10	207.1	64.50	-18.2	-0.4%
15	188.3	97.87	-48.3	2.13
20	211.2	61.70	-37.0	1.1

采用 Malek 法获得 B 炸药热分解过程的机理函数, 这种方法是定义函数 $y(\alpha)$ 和 $Z(\alpha)$ 确定 $f(\alpha)$ 或 $G(\alpha)$ 的一种较好的方法。 $y(\alpha)$ 和 $Z(\alpha)$ 的表达式如下:

$$y(\alpha) = \left(\frac{T}{T_{0.5}} \right)^2 \frac{\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)}{\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5}} = \frac{f(\alpha) \cdot G(\alpha)}{f(0.5) \cdot G(0.5)} \quad (1)$$

$$Z(\alpha) = \frac{\pi(u) \left(\frac{d\alpha}{dt} \right) T}{\beta} = f(\alpha) G(\alpha) \quad (2)$$

式中: $T_{0.5}$ 为 $\alpha=0.5$ 时的温度; $(d\alpha/dt)_{0.5}$ 为该温度下的反应速率, $f(\alpha)$ 、 $G(\alpha)$ 分别为微分形式和积分形式; $\pi(u)$ 为温度积分式, 其表达式为 $\pi(u) = 1/(u+2)$ 。

将试验数据分别带入到式(1)~(2)中, 分别做 $y(\alpha)-\alpha$ 、 $Z(\alpha)-\alpha$ 曲线, 然后与标准曲线相比较, 即可得到相对应的机理函数。当单独的 $y(\alpha)-\alpha$ 曲线可

以确定出机理函数时,则不需要再做 $Z(\alpha)-\alpha$ 曲线。

利用升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 下的 TG 数据,计算得到各个分解深度 α 下的反应速率 $d\alpha/dt$ 及对应的温度 T ,然后带入公式(1),计算得到各反应深度下的 $y(\alpha)$,如表 4 所示。

表 4 B 炸药的 $y(\alpha)-\alpha$ 数据
Table 4 The $y(\alpha)-\alpha$ data of Comp. B

α	T/K	$d\alpha/dt/(1 \cdot \text{min}^{-1})$	$y(\alpha)$
0	321.867	0.00701	0.08179
0.1	414.443	0.03337	0.64579
0.2	427.699	0.04712	0.97117
0.3	435.619	0.07138	1.52619
0.4	444.983	0.04370	0.97505
0.5	462.847	0.04143	0.99993
0.6	472.885	0.06674	1.68147
0.7	479.471	0.07716	1.99866
0.8	484.790	0.10361	2.74366
0.9	489.113	0.11272	3.03833
1.0	637.052	0.00342	0.15618

作 $y(\alpha)-\alpha$ 实验曲线,如图 4 所示,与标准曲线对比可知 B 炸药热分解的机理函数为 2 号函数,函数名称为 Valensi 方程,机理为二维扩散,圆柱形对称,积分形式 $G(\alpha) = \alpha + (1-\alpha)\ln(1-\alpha)$ 。由于通过 $y(\alpha)$ 已经判断出最可几机理函数,因此不需要 $Z(\alpha)$ 值的计算。

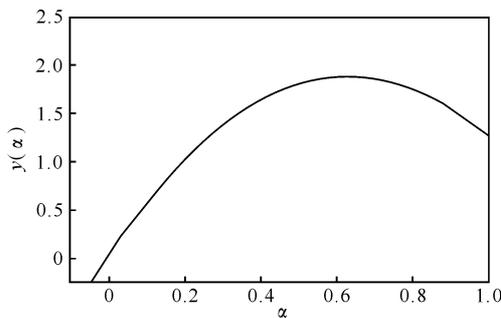


图 4 B 炸药的 $y(\alpha)-\alpha$ 实验曲线

Fig. 4 Tested curve of $y(\alpha)-\alpha$ for Comp. B

2.3 动态真空安定性法

2.3.1 B 炸药分解压力与时间的关系

将获得的 B 炸药热分解过程的原始曲线,通过对大气压力、反应器容积、传感器线性校正等标准化处理减去初始值后,求得温度、压力及其随时间的变化率曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,随着温度的升高,压力开始明显上升。当达到 100°C 时,压力达到 0.06895 kPa ,为压力最终值(0.34918 kPa)的 19.7% ,此时的压力变化率为 $1.65 \times 10^{-4}\text{ kPa}/\text{min}$ 。压力变化率较大

的过程出现在等温过程的初始阶段,当温度升至 101.5°C 时,压力变化率达到最大值 $2.21 \times 10^{-4}\text{ kPa}/\text{min}$ 。而后虽然压力仍然持续增加,但压力变化率开始降低。以上表明,B 炸药的等温阶段在整个动态真空安定性监测过程中具有重要意义。

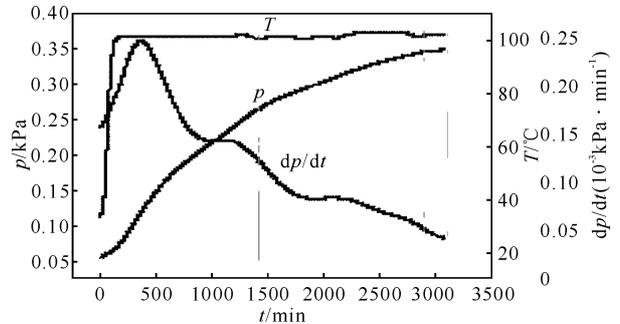


图 5 B 炸药的 温度、压力及其变化率
与随时间的关系曲线

Fig. 5 Curves of T, p and dp/dt vs. t of Comp. B

2.3.2 B 炸药的 DVST 等温阶段

将 B 炸药在等温阶段的热分解气体压力按照 $p/p_0 = \alpha$ 换算为转化率,将转化率和恒温时间的数据根据非均相反应动力学方程: $G(\alpha) = k \times t$ 进行线性拟合。对 1~41 号不同类型的机理函数采用最小二乘法作 $G(\alpha)-t$ 关系的线性回归 $y = A \times x + B$,以具有最大线性相关系数 r 和最小截距 B 作为综合判据选出合适的机理函数 $G(\alpha)$ 。将选出的最佳函数作为反应机理函数,再次用最小二乘法做线性回归 $y = C \times x$,拟合后的直线斜率 C 即为该温度下的反应速率常数 k 。用此方法处理 B 炸药在 100°C 下等温阶段的数据,得到此反应条件下 B 炸药的最可几机理函数为 2 号函数,将该机理函数进行拟合,得到 $G(\alpha) = 3.21 \times 10^{-4} t - 0.061, r = 0.99895$ 。因此,该条件下 B 炸药的反应速率常数 $k = 3.21 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 。结果表明,在 100°C 等温阶段的 DVST 试验中,B 炸药热分解过程的机理函数与 TG 实验结果一致。

2.3.3 B 炸药的安定性判断

B 炸药在实验温度下的产气量可以借助 GJB 772-97A 方法 501.1 中“真空安定性试验(VST)方法”的计算方法得到^[15]。由试验前后室温条件下终点压力变化值,换算为标准状态下的产气量为 $V_m = 0.43\text{ mL}/\text{g}$ 。从安定性推荐“每克试样的放气量小于 2.0 mL ”的合格等级判定,B 炸药具有很好的热安定性能。

2.4 温度跃升傅里叶变换红外原位分析技术

2.4.1 B 炸药快速热分解气体产物的定性研究

在 0.1 MPa 和 350°C 的条件下 B 炸药裂解气相

产物在 4 s 时的红外光谱图如图 6 所示。

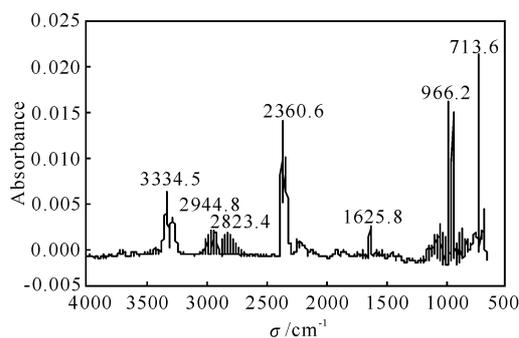


图 6 0.1 MPa, 350°C 条件下 B 炸药热分解产物的 IR 谱图

Fig. 6 IR spectrum of gas products of Comp. B at 350°C and 0.1 MPa

对图中各吸收峰的归属如下: 3334.5 cm^{-1} 处为 NH_3 的吸收峰; 2823.4 cm^{-1} 处为 CH_2O 的吸收峰; 2360.6 cm^{-1} 处为 CO_2 的吸收峰; 2171.6 cm^{-1} 处为 CO 的吸收峰; 1909.3 cm^{-1} 处为 NO 的吸收峰; 1625.8 cm^{-1} 处为 NO_2 的吸收峰; 713.6 cm^{-1} 处为 HCN 的吸收峰。由于 N_2 、 H_2 、 O_2 、 Cl_2 等同核双原子分子在红外区不敏感, 热分解产物中未检测到这些气体的存在。

2.4.2 B 炸药快速热分解气体产物的定量研究

B 炸药快速热分解过程主要气相产物摩尔分数 (x) 与时间之间的关系曲线如图 7 所示。气体产物中 N_2O 、 NO_2 、 HNCO 和 H_2CO 的浓度很小(未在图中标出)。从图 7 可以看出, B 炸药快速热分解过程逸出的含碳气体产物以 CO 、 CO_2 、 HOCO 和 HCN 为主, 含氮气体以 NO 、 NH_3 、 HCN 和 HONO 为主。在相同的试验条件下, 其主体炸药 RDX 的快速热分解过程中逸出的主要气体产物为 HCN 、 CO_2 、 N_2O 和 NO_2 ^[11]。RDX 逸出的主要含碳气体产物与 B 炸药逸出的气体产物相似。但是 RDX 逸出的主要含氮气体产物在 B 炸药热分解过程中逸出的却很少, 且由于 B 炸药中含有 TNT 以及少量的石蜡, 因此, 其热分解逸出的气体产物也比单质 RDX 的复杂。

从图 7 可以看出, CO 、 CO_2 、 NH_3 和 HCN 为 B 炸药热分解过程最先逸出的气体产物。在 B 炸药快速热分解瞬间, 各气体产物的浓度大幅度上升, 瞬间生成的大量气体产物混合在一起, 同时, 由于气体产物间剧烈氧化还原反应的发生及气体产物在 Pt 金属丝附近的迅速扩散、渗透以及气相、凝聚相间的剧烈扩散, 致使各气体产物浓度出现一定的化学振荡趋势。

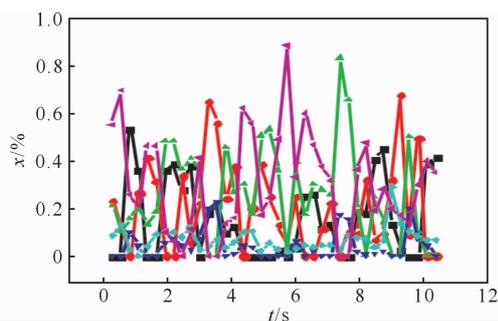


图 7 0.1 MPa, 350°C 条件下 B 炸药热分解气相产物的摩尔分数与时间的关系曲线

Fig. 7 Curves of mole fraction of the gas products of Comp. B vs. t at 350°C and 0.1 MPa

3 结 论

(1) DSC 研究结果表明, 在 50~400°C 范围内 B 炸药有一个吸热峰和放热分解峰, 吸热峰与主体炸药 TNT 的熔化峰相一致, 放热峰与主体炸药 RDX 的放热分解峰一致。通过计算得到了 B 炸药的动力学参数。

(2) TG-DTG 研究结果表明, 在 50~400°C 范围内 B 炸药有两个失重阶段, 第一个失重阶段的失重量与主体炸药 TNT 的含量一致, 第二个失重阶段的失重量与主体炸药 RDX 的含量一致, 与 DSC 的结果相符。利用 Malek 法, 结合 TG 数据, 计算得到了 B 炸药在缓慢升温速率下热分解过程的机理函数为 2 号函数。

(3) DVST 研究结果表明, B 炸药在该试验条件下等温阶段的热分解机理函数为 2 号函数, 与 B 炸药在 TG 试验中的热分解机理函数相同。B 炸药在 100°C 条件下动态真空安定性试验的等温阶段与在热重试验中的热分解过程中经历了相同的分解机理, 均是二维扩散。此外, 依据 B 炸药在标准状态下的产气量为 0.43 mL/g, 表明 B 炸药具有很好的热安定性能。

(4) B 炸药快速热裂解过程的含氮气相产物主要有 NO 、 NH_3 、 HCN 和 HONO , 含碳气体产物主要有 CO 、 CO_2 、 HOCO 和 HCN 。由于其是混合炸药, 其热分解过程比较复杂。

(5) 从 DSC、TG 和 DVST 热分析的方法综合分析结果表明, B 炸药的热安定性较好, 在常温下不会发生明显的放热、失重或者产生气体的现象。但是达到其反应温度时, 一旦开始发生热分解, 会放出大量的热并产生一定量的气体。同时, 从 TG 和 T-Jump/FTIR 的反应残渣及气体产物来看, B 炸药在

发生热反应后,几乎没有固体残渣的剩余,绝大部分为气体产物,且为环境友好型气体。

参考文献:

- [1] Lanzerotti Y D, Sharma J, Armstrong R W. Atomic force microscopy studies of fracture surfaces of composition B energetic materials[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35: 2675-2679.
- [2] Huang F L, Hu Y X. Experimental investigation of two-dimensional shock initiation process of cast composition B[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 13: 305-207.
- [3] Taylor S, Campbell E, Perovich L, et al. Characteristics of composition B particles from blow-in-place detonations[J]. Chemosphere, 2006, 65: 1405-1413.
- [4] 文尚刚,王胜强,黄文斌,等. 高密度 B 炸药的燃烧转爆轰实验研究[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 5-8.
WEN Shang-gang, WANG Sheng-qiang, HUANG Wen-bin, et al. An experimental study on deflagration-to-detonation transition in high-density composition B [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29(5): 5-8.
- [5] 何洋扬,龙源. B 炸药爆轰波拐角传播的三维数值模拟[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 63-66.
HE Yang-yang, LONG Yuan. Three dimensional numerical simulation of detonation wave propagation on corner-turning of composition B[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007, 30(2): 63-66.
- [6] 何得昌,徐军培,刘德润. 反应度对 B 炸药热分解动力学参数的影响[J]. 含能材料, 2000(2): 95-96.
HE De-chang, XU Jun-pei, LIU De-run. The effect of reacting fraction on the thermal decomposition kinetic parameters of comp-B[J]. Chinese Journal Energetic Materials, 2000(2): 95-96.
- [7] 何得昌,徐军培. 热处理对 B 炸药热分解的影响[J]. 火炸药学报, 2001 (3): 47-48.
HE De-chang, XU Jun-pei. Effect of thermal treatment on the thermal decomposition of Comp. B[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2001 (3): 47-48.
- [8] Lee J S, Hsu C K, Chang C L. A study on the thermal decomposition behaviors of PETN, RDX, HNS and HMX[J]. Thermochimica Acta, 2002, 392: 173-176.
- [9] Chovancova M, Zeman S. Study of initiation reactivity of some plastic explosives by vacuum stability test and non - isothermal differential thermal analysis [J]. Thermochimica Acta, 2007, 460: 67-76.
- [10] Walsh M E, Taylor S, Hewitt A D, et al. Field observations of the persistence of Comp B explosives residues in a salt marsh impact area[J]. Chemosphere, 2010, 78: 467-473.
- [11] 王晓红,张皋,刘子如,等. T-JUMP/FTIR 联用技术研究 RDX 的热裂解过程[J]. 火炸药学报, 2010, 33(2): 13-18.
WANG Xiao-hong, ZHANG Gao, LIU Zi-ru, et al. Investigation on thermal pyrolysis of RDX by T-Jump/FTIR[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010, 33(2): 13-18.
- [12] 张同来,胡晓春,杨利,等. 动态真空安定性试验(DVST)方法研究(I)[J]. 含能材料, 2009, 17(5): 549-553.
ZHANG Tong-lai, HU Xiao-chun, YANG Li, et al. Researches on dynamic vacuum stability test (DVST) method (I) [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(5): 549-553.
- [13] 楚士晋. 炸药热分析[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [14] Zhang T L, Hu R Z, Xie Y, Li F P. The estimation of critical temperatures of thermal explosion for energetic materials using non-isothermal DSC[J]. Thermochim Acta, 1994, 244: 171-176.
- [15] GJB 772A-97, 真空安定性试验 汞压力计法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1997.