

文章编号: 1006-9941(2011)04-0396-05

## HMX 热分解动力学与热安全性研究

汤焜, 杨利, 乔小晶, 张同来, 郁卫飞

(北京理工大学爆炸与科学国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 利用差示扫描量热法(DSC), 获得了单质炸药奥克托今(HMX)热分解的特征参数, 利用热重法(TG)得到 HMX 热分解的起始分解温度、各阶段的失重量、最大失重速率及对应的温度、最终残渣量、反应深度、反应速率等参数。将 DSC、TG 数据与 Malek 法相结合对 HMX 的热安全性进行了研究。结果表明, HMX 在加热过程中先出现晶型转变吸热峰和一个熔融吸热峰, 继续加热, 出现一个剧烈的分解放热峰, 且分解完全。HMX 的最可几机理函数, 热爆炸临界温度和自加速分解温度分别为  $f(\alpha) = (1 - \alpha)^2$ ,  $T_b = 279.9\text{ }^\circ\text{C}$  和  $T_{\text{SADT}} = 273.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

**关键词:** 物理化学; 热分析; 热分解机理; 安全性; 奥克托今(HMX)

**中图分类号:** TJ55; O642

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.010

### 1 引言

火炸药在国防科技及国民经济中发挥着重要作用。但是, 这类化学物质易引起火灾和爆炸事故, 给人们的生命财产带来巨大损失<sup>[1]</sup>。火炸药的热安全性评价分为估算评价法和试验评价法 2 种, 估算评价法是不通过试验, 直接根据火炸药的结构和组成经过计算来预测其危险性。而实验法则分为大药量试验法和小药量试验法, 常用的差示扫描量热法(DSC)和热重法(TG)属于小药量试验评价法。热爆炸临界温度(critical temperature of thermal explosion,  $T_b$ )、自加速分解温度(self-accelerating decomposition temperature,  $T_{\text{SADT}}$ )、热点火温度(thermal ignition temperature,  $T_{\text{TIT}}$ )和绝热至爆时间(adiabatic time-to-explosion,  $t_{\text{Tlad}}$ )作为热分析方法评价含能材料热安全性的重要指标, 胡荣祖、张同来、谢怡等<sup>[2-4]</sup>导出了  $T_b$ 、 $T_{\text{SADT}}$  和  $T_{\text{TIT}}$  值的估算式, 提出并完善了估算其数值的方法。Smith<sup>[5]</sup>提出了估算  $t_{\text{Tlad}}$  的近似解。2005 年, 孙金华等人<sup>[6]</sup>基于活化中心理论和反应热、燃烧热,

计算预测了反应性化学物质热危险性。2009 年, Jankovic 教授及国际热分析学会提出 Malek 法可以明显缩小动力学机理函数的范围, 且避免了其它方法对动力学机理函数形式的假设和近似带来的误差<sup>[7-10]</sup>。

奥克托今(HMX)作为一种爆炸性能优良的单质炸药, 它的爆速、爆压和热安定性均优于梯恩梯(TNT)、黑索今(RDX)等炸药, 广泛应用于高能混合炸药、固体推进剂和发射药<sup>[11-13]</sup>。其安全性直接影响其应用, 前人对 HMX 及其为基的混合物的热分解和安全性已进行较多相关的研究, 但仍然存在争论, 各研究者根据自己的试验方法得到了相关的热分解动力学及热力学等参数, 提出了不同的结果<sup>[14-18]</sup>。刘子如等<sup>[19-21]</sup>分别对 HMX 的热分解特征量、分解过程、动力学参数和分解机理进行了研究, 同时发现 HMX 的自催化作用会加速 HMX 的热分解, 导致放热的加快。本工作用 DSC 数据结合 Flynn-Wall-Ozawa 法、Zhang-Hu-Xie-Li 热爆炸临界温度计算式等得到了 HMX 热分解表观活化能和动力学参数。用 TG 数据结合 Malek 法确定了 HMX 动力学机理函数, 并对该方法测得的函数进行了检验, 发现利用此方法得到热分解参数安全可靠且简单易行, 并首次将 DSC、TG 数据与 Malek 法相结合对 HMX 的热安全性进行了研究。

### 2 实验

试剂: 工业品 HMX, 白色粉末, 利用丙酮多次溶解重结晶的方法提纯。

收稿日期: 2011-03-23; 修回日期: 2011-05-27

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室自主探索基金(YBKT10-05)和重点资助基金(ZDKT10-01b)资助

作者简介: 汤焜(1984-), 男, 主要从事含能材料研究。

e-mail: jamestang999@163.com

通讯联系人: 杨利(1972-), 女, 教授, 主要从事含能材料研究。

e-mail: yanglibit@163.com

仪器及使用条件: 采用美国 Perkin-Elmer 公司的 Pyris 1 型差示扫描量热仪, 样品重 0.5 mg 左右, 静止空气气氛, 置于敞口铝坩埚内进行测试, 升温速率 5、10、15 和 20 °C · min<sup>-1</sup>, 为了避免火炸药样品对仪器造成损坏, 保证实验数据有可比性, 在 DSC 法测试中所有试样量均为 0.5 mg; 采用美国 Perkin-Elmer 公司的 Pyris 1 型热重分析仪, 流动氮气气氛, 流速为 20 mL · min<sup>-1</sup>, 置于敞口铂坩埚内进行测试, 升温速率 5、10、15 和 20 °C · min<sup>-1</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 DSC 法研究 HMX 热分解特征参数

图 1 给出了 HMX 在各个升温速率下得到的 DSC 曲线。从图 1 可以看出, 在 193.2 ~ 195.1 °C 有一个  $\beta$ -HMX 转变成  $\delta$ -HMX 的晶型转变吸热峰, 在约为 280.9 °C 时出现一个 HMX 熔融吸热峰, 但这个峰并不完全。这是因为 HMX 熔融吸热过程的大部分被紧跟着的快速放热分解过程掩盖。HMX 分解放热速度很快, DSC 曲线呈陡峭的尖峰。分解反应一旦开始, 强烈的自加热和自催化反应使凝聚相温度骤升。表 1 给出了在不同升温速率下 HMX 的外延起始温度  $T_{eo}$ 、拐点温度  $T_i$ 、峰顶温度  $T_p$ 、分解终止温度  $T_f$  和分解焓变  $\Delta H$ 。

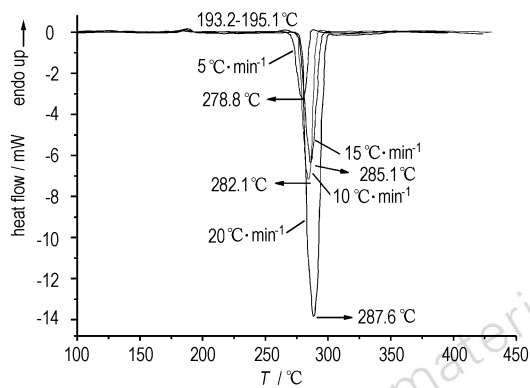


图 1 升温速率为 5、10、15 和 20 °C · min<sup>-1</sup> 时 HMX 的 DSC 曲线  
Fig. 1 DSC curves of HMX at different heating rates under N<sub>2</sub> atmosphere

表 1 不同升温速率下 HMX 的 DSC 特征参数

Table 1 DSC data of HMX at different heating rates

$\beta / \text{K} \cdot \text{min}^{-1}$	$T_{ei} / ^\circ\text{C}$	$T_i / ^\circ\text{C}$	$T_p / ^\circ\text{C}$	$T_f / ^\circ\text{C}$	$\Delta H / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
5	276.4	277.4	278.8	280.5	1132.05
10	278.9	280.3	282.1	291.5	1281.12
15	280.2	281.5	285.1	296.1	1411.71
20	280.0	281.8	287.6	298.6	1543.31

随着升温速率的增加, 除了峰顶温度  $T_p$  有较大的提高, 其它温度和分解焓变变化不大。当  $\beta$  较小时, 在 DSC 上观测不到熔融吸热峰。随着  $\beta$  的增加, 熔融吸热峰越来越明显。  $\beta$  越小, 试样在低温下的热历程长, 放热曲线偏离基线越明显, 说明 HMX 已开始固态的部分分解, 可认为 HMX 是一种典型的“熔融分解”型物质, 即固-液反应同时进行的非均相过程。这种在分解过程中同时发生相态变化引起反应的加速是 HMX 分解较剧烈的主要原因, HMX 的自加热和自催化也因此变得更显著。

用 Flynn-Wall-Ozawa<sup>[22-23]</sup> 法计算得到 HMX 的活化能  $E = 383.6 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 再结合 Malek 法得到的机理函数可得到  $\lg A = 35.45$ , 利用多项式回归的方法:  $T_{ei} = T_{eo} + a\beta_i + b\beta_i^2 + c\beta_i^3$ , 当  $\beta = 0$  时, 得到更准确的外延起始温度  $T_{eo}$ , 代入方程得到热爆炸临界温度  $T_b = [E - (E^2 - 4ERT_{eo})^{1/2}] / 2R$ , 自加速分解温度  $T_{SADT} = T_b - (RT_b^2 / E)$ , 见表 2。

表 2 HMX 的热安全性参数

Table 2 Thermal safety parameters of HMX

$T_{eo} / ^\circ\text{C}$	$T_b / ^\circ\text{C}$	$T_{SADT} / ^\circ\text{C}$
273.3	279.9	273.3

#### 3.2 TG 法对 HMX 的分析测试

为了用少量样品得到完整的热分解质量损失曲线并保证仪器的安全, 在 TG 法测试中所有试样量均小于 0.5 mg。在升温速率为 5, 10, 15, 20 °C · min<sup>-1</sup>, 保护气体为氮气的条件下进行 HMX 的 TG 实验。图 2 和图 3 给出了不同升温速率时 HMX 的 TG-DTG 曲线。表 3 给出了不同升温速率下 HMX 热分解的起始分解温度  $T_0$ 、各温度下的质量损失  $\Delta m$ 、最大质量损失速率  $v$  及对应的温度  $T_v$  和最终残渣量  $s$ 。可以看出, TG 曲线上只有一个台阶, 质量损失接近 100%, 说明 HMX 的分解是一个剧烈、完全、连续的过程。随着升温速率的增加, HMX 的起始分解温度和最大质量损失速率明显增大, 分解加剧, 验证了 DSC 曲线得到的结论: HMX 的分解和熔融过程是同时进行的, 相态变化引起了反应的加速。不同升温速率下的 DTG 的峰顶温度值(表 3) 286.3, 286.1, 287.5, 291.7 °C 与 DSC 的峰顶温度(表 1) 278.8, 282.1, 285.1, 287.6 °C 比较接近, 且各升温速率下的 TG 曲线相似。

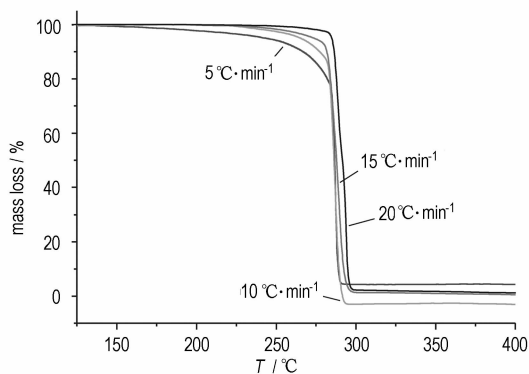


图2 不同升温速率下 HMX 的 TG 曲线

Fig. 2 TG curves of HMX at different heating rates under  $N_2$  atmosphere

表3 不同升温速率下 HMX 的 TG 特征参数

Table 3 TG data of HMX at different heating rates

$\beta / K \cdot \min^{-1}$	$T_0 / ^\circ C$	$\Delta m / \%$	$v / \% \cdot \min^{-1}$	$T_v / ^\circ C$	$s / \%$
5	198.0	95.47	-145.83	286.3	4.53
10	215.5	99.90	-200.51	286.1	0.10
15	250.5	99.47	-272.56	287.5	0.53
20	271.9	98.27	-685.54	291.7	1.73

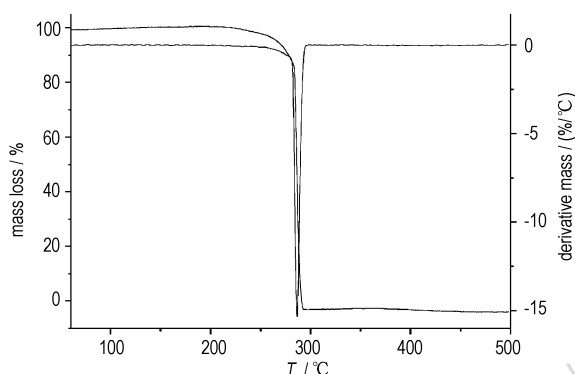


图3 升温速率为  $10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  时 HMX 的 TG-DTG 曲线

Fig. 3 TG-DTG curves of HMX at a heating rate of  $10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  under  $N_2$  atmosphere

### 3.3 Malek 法计算 HMX 热分解的最可几机理函数

Malek 法<sup>[7]</sup>是由定义  $y(\alpha)$  和  $Z(\alpha)$  确定  $f(\alpha)$  或  $G(\alpha)$  的一种较好方法。

由反应速率方程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-E/RT}f(\alpha) \quad (1)$$

和 Coats-Redfern 方程<sup>[24]</sup>:

$$\int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = G(\alpha) = \frac{ART^2}{E\beta} e^{-E/RT} \quad (2)$$

可知:

$$G(\alpha) = \frac{RT^2 d\alpha}{E\beta} \frac{1}{f(\alpha)} \quad (3)$$

$\alpha = 0.5$  时,有:

$$G(0.5) = \frac{RT_{0.5}^2}{E\beta} \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5} \frac{1}{f(0.5)} \quad (4)$$

式中,  $T_{0.5}$  和  $\left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5}$  分别为  $\alpha = 0.5$  时的温度和反应速率。

式(3)除以式(4),得  $y(\alpha)$  表达式:

$$y(\alpha) = \left( \frac{T}{T_{0.5}} \right)^2 \frac{\left( \frac{d\alpha}{dt} \right)}{\left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{0.5}} = \frac{f(\alpha) \cdot G(\alpha)}{f(0.5) \cdot G(0.5)} \quad (5)$$

式中,  $y(\alpha)$  为定义函数。

根据 TG 曲线数据,当升温速率为  $5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  时,得到各个分解深度  $\alpha$  下的反应速率  $d\alpha/dt$  及对应的温度  $T$ ,通过式(5)计算得到  $y(\alpha)$ ,见表4。作  $y(\alpha)$ - $\alpha$  实验曲线,如图4所示,与标准曲线图<sup>[25]</sup>对比,表明 HMX 热分解的机理函数为 Ginstling-Brounstein 方程  $f(\alpha) = (1 - \alpha)^2$ 。

表4  $y(\alpha)$ - $\alpha$  数据

Table 4 The data of  $y(\alpha)$  and  $\alpha$

$\alpha$	$T/K$	$\frac{d\alpha}{dt} / (1/\text{min})$	$y(\alpha)$
0.2	555.3	0.0483	0.0317
0.3	558.9	1.0577	0.7025
0.4	559.4	1.4313	0.9523
0.5	559.8	1.5007	1.0000
0.6	560.3	1.3089	0.8736
0.7	560.6	1.0071	0.6730

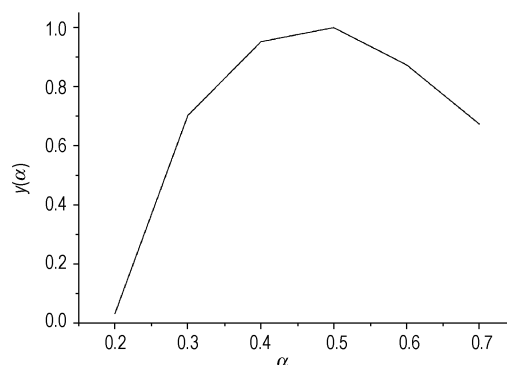


图4  $y(\alpha)$ - $\alpha$  实验曲线

Fig. 4 The experimental curve of  $y(\alpha)$  vs  $\alpha$

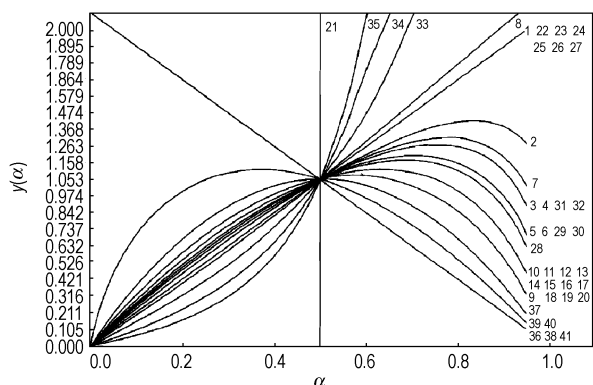


图5  $y(\alpha)$ - $\alpha$  标准曲线<sup>[25]</sup>  
Fig.5 The standard curve of  $y(\alpha)$  vs  $\alpha$

### 4 结论

(1) 将 DSC、TG 数据与 Malek 法相结合, 通过  $y(\alpha)$  计算判断出 HMX 热分解的最可几机理函数模型为二级反应模型, Ginstling-Brounstein 方程为  $f(\alpha) = (1 - \alpha)^2$ 。

(2) 得到 HMX 的外延起始温度  $T_{e0}$ 、拐点温度  $T_i$ 、峰顶温度  $T_p$ 、分解终止温度  $T_f$ 、分解焓变  $\Delta H$ 、表观活化能  $E$ 、指前因子  $A$ 、反应级数  $n$ 、热爆炸临界温度  $T_b$ 、自加速分解温度  $T_{SADT}$ 、各阶段的质量损失量  $\Delta m\%$ 、最大失重速率及对应的温度、最终残渣量、反应深度和反应速率  $d\alpha/dt$  等特征参数。通过这种方法得到热分解机理函数准确可靠, 特别适合于小药量样品的分析。

(3) 得到的外延起始温度和热爆炸临界温度数值均较高且焓变较大, 说明 HMX 热安定性较好, 特别是常温下不易发生分解; 由于量热仪器感应的影响和传、散热量与热历程(或升温速率)有关, 因此分解热随升温速率的升高而增大。

#### 参考文献:

[1] 刘荣海, 孙业斌. 反应性化学物质与爆炸物品的安全[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993: 40-68.  
LIU Rong-hai, SUN Ye-bin. Safety of Reactive Chemical Substances and Explosives[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1993: 40-68.

[2] 胡荣祖, 杨正权, 梁燕军, 等. 线性升温条件下炸药热爆炸临界温度的数值解[J]. 爆炸与冲击, 1987, 7(4): 348-351.  
HU Rong-zu, YANG Zheng-quan, LIANG Yan-jun, et al. Numerical solution of the critical temperature of thermal explosion explosive under linearly increase temperature conditions[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1987, 7(4): 348-351.

[3] ZHANG Tong-lai, HU Rong-zu, XIE Yi, et al. The estimation of

critical temperature of thermal explosion for energetic materials using non-isothermal DSC [J]. *Thermochim Acta*, 1994, 244: 171-176.

[4] XIE Yi, HU Rong-zu, YANG Chao-qing, et al. Studies on the critical temperature of thermal explosion for 3-nitro-1, 2, 4-triazol-5-one (NTO) and its salts [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992, 17: 298-302.

[5] Smith L C. An approximate solution of the adiabatic explosion problem [J]. *Thermochim Acta*, 1975, 13: 1-6.

[6] SUN Jin-hua, DING Hui. Thermal risk evaluation of chemical substances [M]. Beijing: Science Press, 2007: 93-112.

[7] Jankovic B, Mentus S, Jelic D. A kinetic study of non-isothermal decomposition process of anhydrous nickel nitrate under air atmosphere [J]. *Physica B*, 2009, 44: 2263-2269.

[8] Vázquez J, González-Palma R, López-Alemaný P L, et al. Theoretical study on the mechanism and transformation kinetics under non-isothermal conditions. Application to the crystallization of  $Sb_{0.12}As_{0.36}Se_{0.52}$  glassy alloy [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2007, 68: 855-860.

[9] Luciana S Guinesi, Clóvis A Ribeiro, Marisa S Ctespi, et al. Veronezi. Tin(II)-EDTA complex: Kinetic of thermal decomposition by non-isothermal procedures [J]. *Thermochim Acta*, 2004, 414: 35-42.

[10] Budrugaec P. Some methodological problems concerning the kinetic analysis of non-isothermal data for thermal and thermo-oxidative degradation of polymers and polymeric materials [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2005, 89: 265-273.

[11] 吴艳光, 吴晓青, 陈洪伟, 等. 不同晶型奥克托今用于硝酸发射药的性能 [J]. 含能材料, 2009, 17(2): 206-209.  
WU Yan-guang, WU Xiao-qing, CHEN Hong-wei, et al. Performance of nitramine propellants with different phases of HMX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(2): 206-209.

[12] 刘宏英, 李春俊, 李凤生. 易燃易爆材料超细粉碎技术及设备研究新进展 [J]. 爆破器材, 1999, 28(2): 27-31.  
LIU Hong-ying, LI Chun-jun, LI Feng-sheng. Superfine grinding techniques of combustibles and explosives and progress of equipment studies [J]. *Explosive Materials*, 1999, 28(2): 27-31.

[13] 孙国祥, 王晓峰, 孙富根, 等. 油气井射孔器用炸药及其安全性 [J]. 爆破器材, 2002, 31(2): 4-9.  
SUN Guo-xiang, WANG Xiao-feng, SUN Fu-gen, et al. Explosives for the perforators of oil and gas wells and their safety [J]. *Explosive Materials*, 2002, 31(2): 4-9.

[14] 金韶华, 松全才. 黑索今、奥克托今和有机阻燃剂混合物的热分解研究 [J]. 火炸药学报, 1999(1): 27-30.  
JIN Shao-hua, SONG Quan-cai. Thermal decomposition of the mixtures of RDX, HMX and organic flame retardants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1999(1): 27-30.

[15] 左玉芬, 徐容, 常昆, 等. HMX 与 RDX 对 TEX 热安定性能的影响 [J]. 含能材料, 2005, 13(2): 110-112.  
ZUO Yu-fen, XU Rong, CHANG Kun, et al. Influence of RDX and HMX on the thermal stability of TEX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2005, 13(2): 110-112.

[16] 宋小兰, 安崇伟, 郭效德, 等. 制备工艺对 HMX 机械感度和热分解特性的影响 [J]. 含能材料, 2008, 16(6): 698-702.  
SONG Xiao-lan, AN Chong-wei, GUO Xiao-de, et al. Effect of preparation methods on mechanical sensitivity and thermal decomposition of HMX [J]. *Explosive Materials*, 2008, 16(6): 698-702.

[17] 任晓宁, 邵颖惠, 王晓红. 奥克托今 (HMX) 的 T-Jump/FTIR 快速

- 热裂解研究[J]. 化学学报, 2010, 68(12): 1193–1198.  
REN Xiao-ning, SHAO Yin-hui, WANG Xiao-hong. An investigation on the flash pyrolysis process of octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX) by T-Jump/FTIR spectroscopy [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2010, 68(12): 1193–1198.
- [18] 常昆, 左玉芬, 周建华. 含能材料 HMX-RDX 的热行为研究[J]. 合成化学, 2006, 14(1): 94–96.  
CHANG Kun, ZUO Yu-fen, ZHOU Jian-hua. Study on thermal behaviour of energetic material HMX-RDX [J]. *Chinese Journal of Synthetic Chemistry*, 2006, 14(1): 94–96.
- [19] 刘子如, 刘艳, 范夕萍, 等. RDX 和 HMX 的热分解 I 热分析特征量[J]. 火炸药学报, 2004, 27(2): 63–66.  
LIU Zi-ru, LIU Yan, FAN Xi-ping, et al. Thermal decomposition of RDX and HMX part I: Characteristic values of thermal analysis [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(2): 63–66.
- [20] 刘子如, 阴翠梅, 刘艳, 等. RDX 和 HMX 的热分解 II 动力学参数和动力学补偿效应[J]. 火炸药学报, 2004, 27(4): 72–75.  
LIU Zi-ru, YIN Cui-mei, LIU Yan, et al. Thermal decomposition of RDX and HMX part II: Kinetic parameters and kinetic compensation effects [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(4): 72–75.
- [21] 刘子如, 刘艳, 范夕萍, 等. RDX 和 HMX 的热分解 III 分解机理 [J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 14–18.  
LIU Zi-ru, YIN Cui-mei, LIU Yan, et al. Thermal decomposition of RDX and HMX explosives part III: Mechanism of thermal decomposition [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(4): 14–18.
- [22] Ozawa T. A new method of analyzing thermogravimetric data [J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1965, 38(1): 1881–1886.
- [23] Flynn J H, Wall L. A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data [J]. *Polymer Lett*, 1966(4): 323–328.
- [24] Coats A W, Redfern J P. Kinetic parameters from thermogravimetric data [J]. *Nature*, 1964, 201: 68–69.
- [25] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 136.  
HU Rong-zu, SHI Qi-zhen. *Thermal Analysis Kinetics* [M]. Beijing: Science Press, 2001: 136.

## On Thermal Decomposition Kinetics and Thermal Safety of HMX

TANG Zhan, YANG Li, QIAO Xiao-jing, ZHANG Tong-lai, YU Wei-fei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The thermal decomposition characteristic parameters of octogen (HMX) were obtained by differential scanning calorimetry (DSC). Onset decomposition temperature ( $T_0$ ), mass loss in stages ( $\Delta m\%$ ), the maximum mass loss speed and corresponding temperature, final residual quantity, reaction depth, reaction rate and so on were obtained by thermogravimetry (TG). Thermal analysis data and Malek method were applied for the thermal decomposition research of HMX. The results show that HMX presents an endothermic peak at which  $\beta$ -HMX becomes to  $\delta$ -HMX and an endothermic peak for melting in the first thermal process. Further, HMX presents a fierce exothermic peak and it's a complete thermal decomposition process. The most probable mechanism function, critical temperature of thermal explosion and self-accelerating decomposition temperature were  $f(\alpha) = (1 - \alpha)^2$ ,  $T_b = 279.9\text{ }^\circ\text{C}$  and  $T_{\text{SADT}} = 273.3\text{ }^\circ\text{C}$ , respectively.

**Key words:** physical chemistry; thermal analysis; thermal decomposition mechanism; safety; octogen (HMX)

**CLC number:** Tj55; O642

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.010