

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.06.011

# 热分解动力学在含能材料中的应用\*

张 涛 陈明华 贾昊楠 贾晓彪 常文平 陈永康  
军械工程学院军械技术研究所(河北石家庄,050000)

[摘 要] 文章主要介绍了热分解动力学在含能材料中的重要性,列举了热分解动力学的主要分析方法及几种常用的反应机理,并对其进行简要分析。热分析技术具有快捷简便、准确度高以及适用范围广的特点,在含能材料的热分解动力学中发挥重要作用。热分解动力学广泛应用于含能材料的动力学参数的求解、反应机理的推断以及动力学补偿效应的确定,为其有效使用寿命的预测以及安全性能的评定等提供科学依据。同时,热分析技术的自身完善以及与其他技术的联机使用将促进热分解动力学的不断发展。

[关键词] 含能材料 热分解动力学 反应机理 动力学补偿效应 寿命预测

[分类号] TQ560.7

## 引言

最早将热分析方法用于研究物质的反应动力学是在 20 世纪 20 年代,但它真正建立和发展还是在 50 年代<sup>[1-2]</sup>。由于当时科学技术的高速发展以及热分析技术的日益完善,计算机技术的广泛应用可以处理复杂的数据计算,满足了当时应用方面的需要。研究者在线性控温条件下研究固体物质的反应动力学,形成了“非等温动力学”的分支,逐渐成为热分析动力学(TAK)的核心,并广泛应用于科学技术研究的各个领域,如无机物的脱水及分解、金属的相变和玻璃晶化、煤和石油的裂解、高聚物的聚合、降解等过程的机理研究和变化速率等;此外,热分析动力学所得的结果还可用于评定工业生产的最佳工艺条件<sup>[3-6]</sup>。含能材料的热分解在其基础理论和性能评估方面都具有重要的地位。热分解的研究是含能材料生产、运输和储存等方面安全技术及危险性、安定性、相容性和使用寿命预测评估的基础<sup>[7]</sup>。热分析技术几乎非常完善地表征含能材料热分解的主要特点,热分析仪器与计算机联用可以有效地求解出含能材料在热分解过程中动力学三要素,即活化能  $E$ 、指前因子  $A$  和最概然机理函数,为含能材料的稳定性评定、有效使用寿命的预测、反应过程速率的定量描述和机理的推断以及危险性评定等提供科学依据<sup>[8]</sup>。

## 1 动力学参数

在热分析技术的发展中,有许多利用热分析技

术求解动力学参数的方法。在含能材料的动力学参数求解中,经常采用的非等温动力学方程为 Ozawa 方程<sup>[9]</sup>和 Kissinger<sup>[10]</sup>方程:

$$\lg \beta = \lg \left[ \frac{AE}{RG(\alpha)} \right] - 2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT}; \quad (1)$$

$$\ln(\beta/T_p^2) = \ln(AR/E) - E/RT_p. \quad (2)$$

此外,有时也采用 Coats-Redfern<sup>[11]</sup>方程:

$$\ln[G(\alpha)/T^2] = (1 - 2RT/E) \ln(AR/\beta E) - E/RT. \quad (3)$$

当  $E/RT \gg 1$  时,式(3)可简化为:

$$\ln[G(\alpha)/T^2] = \ln(AR/\beta E) - E/RT. \quad (4)$$

式(1)、式(2)、式(3)、式(4)中: $\beta$  为升温速率,  $K/min$ ;  $T_p$  为峰温,  $K$ ;  $E$  为表观活化能,  $J/mol$ ;  $A$  为指前因子,  $min^{-1}$  或  $s^{-1}$ ;  $\alpha$  为反应深度;  $T$  为温度,  $K$ ;  $R$  为摩尔气体常数,  $J/(mol \cdot K)$ ;  $G(\alpha)$  为机理函数积分的形式。

用 Ozawa 方程和 Kissinger 方程求解动力学参数时,至少需要 4 个不同升温速率下的热分解数据。前者利用等转化率对应的温度,按式(1)进行  $\lg \beta$  对  $1/T$  呈线性关系,求得活化能  $E$ ;后者利用 DSC 或 DTG 的峰温  $T_p$ ,按式(2)进行,  $\ln(\beta/T_p^2)$  对  $1/T_p$  呈线性关系,求得活化能  $E$  和指前因子  $A$ 。

用 Coats-Redfern 方程[式(4)]处理动力学数据时,由于  $\ln[G(\alpha)/T^2]$  对  $1/T$  呈线性关系,可以从斜率得到  $E$  值,从截距得到  $A$  值。

\* 收稿日期:2013-05-30

作者简介:张涛(1988~),男,硕士研究生,研究方向:发射药热分析。E-mail:245718703@qq.com

通信作者:陈明华(1965~),男,高级工程师,研究方向:含能材料性能检测与评估。E-mail:ztmeiyuan@163.com

仪建华等<sup>[12]</sup>利用热重分析(TG)技术研究了双基发射药 TG0604 的非等温热分解反应动力学, TG0604 的热分解反应过程分为两个阶段,利用积分法和微分法求得两个分解阶段的动力学参数和动力学方程。

罗宁等<sup>[13]</sup>采用 DSC-TG 联用热分析技术在不同的升温速率下对 5 种乳化炸药热分解特性进行了研究,用 Ozawa 法、Coats-Redfern 法和 Šatava-Sesták 法计算了动力学参数,这 3 种动力学分析方法所得的 5 种乳化炸药的活化能比较一致,其热分解动力学参数结果可靠,推断出 5 种乳化炸药热分解反应的最概然机理函数。

高大元等<sup>[14]</sup>利用 DSC-TG 技术,采用 Ozawa 法和非线性等转化率法求得 PETN 和 GI-920 炸药的热分解动力学参数和机理函数。PETN 和 GI-920 炸药的热分解机理都是随机成核和随后生长,GI-920 炸药的动力学参数为  $E = 156.02 \text{ kJ/mol}$ ,  $A = 1.934 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$ 。

在长期的发展进程中,研究者对上述方法进行了改进,如 FWO 法<sup>[9,15]</sup>,KSA 法<sup>[10,16]</sup>等,使得其应用范围进一步扩大。李艳春<sup>[17]</sup>通过讨论 Kissinger 方程中的误差,考虑到热传导因素的影响,将动力学关系以及热平衡引入到 DTA 曲线中,得到热传导动力学方程,使得所得的结果更加准确。

此外,常用的动力学方法还有 Zivkovic 法<sup>[18]</sup>、Doyle 法、Šatava-Šesták 法、Agrawal 法<sup>[19]</sup>、Freeman-Carroll 法<sup>[20]</sup>、Friedman 法<sup>[21]</sup>、Starink 法<sup>[22]</sup>、Anderson-Freeman 法<sup>[23]</sup>、Popescu 法<sup>[24]</sup>、Criado 标准曲线法<sup>[25]</sup>以及改良的 Coats-Redfern 法<sup>[11,26]</sup>等。下面对这几种方法进行简要介绍,其动力学方程如表 1 所示。对表 1 中的各种动力学分析方法,分别通过拟合直线求得各自拟合直线的斜率,计算出活化能  $E$  以及其他物理量。

在含能材料的热分解反应中,分解热量和质量数据损失往往是分解的总包过程,仅靠热分析所得数据很难获得反应机理。为准确研究其热分解过程,必须对产物进行分析。常用的方法有采用热分析与快速扫描傅里叶红外光谱(TG-DSC-FTIR)和四极杆质谱(TG-DSC-MS)联用技术,为含能材料的分子分解步骤和机理研究提供大量的数据<sup>[7]</sup>。表 2 列举了几种常用的反应机理<sup>[27]</sup>。

在热分解动力学计算中,选择不同的机理函数,得到的动力学参数也不相同,因此要先推断出最概然机理函数。表 2 中的机理函数能描述物质反应的基本过程,但由于非均相反应本身的复杂性、样品形

状以及反应物理化学性质的多变性,会出现与理想机理不相符的情况<sup>[8]</sup>。

表 1 动力学分析方法  
Tab. 1 Kinetic analysis method

方法	动力学方程
Zivkovic 法	$\ln \{ \ln [ 1 / ( 1 - \alpha ) ] / t \} = \ln A - E / RT$
Dolye 法	$\ln \beta = \ln [ AE / RG ( \alpha ) ] - 2 \ln ( E / RT ) - E / RT$
Šatava-Šesták 法	$\lg [ G ( \alpha ) ] = \lg ( AR / \beta E ) - 2.315 - 0.4567 E / RT$
Agrawal 法	$\ln [ G ( \alpha ) / T^2 ] = \ln \{ [ AR ( 1 - 2 RT / E ) / \beta E ] / [ 1 - 5 ( RT / E )^2 ] \} - E / RT$
Freeman-Carroll 法	$\Delta \lg ( \text{d}\alpha / \text{d}t ) / \Delta \lg ( 1 - \alpha ) = - E [ \Delta ( 1 / T ) / \Delta \lg ( 1 - \alpha ) ] / 4.575 + n$
Friedman 法	$\ln [ \beta \text{d}\alpha / \text{d}T ] = \ln [ A f ( \alpha ) ] - E / RT$
Starink 法	$\ln [ \beta / T^{1.8} ] = C_s - 10037 E / RT$
Anderson-Freeman 法	$\Delta \lg ( \text{d}\alpha / \text{d}T ) = - E [ \Delta ( 1 / T ) ] / 2.303 R + n [ \Delta \lg ( 1 - \alpha ) ]$

注:  $t$  为时间,  $s$ ;  $C_s$  为常数;  $f(\alpha)$  为机理函数的微分形式;  $n$  为反应级数。

表 2 常用的反应机理  
Tab. 2 Frequently-used reaction mechanism

符号	微分形式	机理函数名称
$F_1$	$1 - \alpha$	一阶反应
$F_2$	$(1 - \alpha)^2$	二阶反应
$F_n$	$(1 - \alpha)^n$	$n$ 阶反应
$D_1$	$1/2\alpha$	一维扩散
$D_2$	$- [ 1 / \ln ( 1 - \alpha ) ]$	二维扩散
$D_3$	$3(1 - \alpha)^{2/3} / 2[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	Jander 型三维扩散
$D_4$	$3/2[ (1 - \alpha)^{-1/3} - 1 ]$	Ginstling-Brounstein 型三维扩散
$R_2$	$2(1 - \alpha)^{1/2}$	二维相界面反应
$R_3$	$3(1 - \alpha)^{2/3}$	三维相界面反应
$B_1$	$\alpha(1 - \alpha)$	Prout-Tompkins 方程
$B_{n\alpha}$	$\alpha^\alpha - (1 - \alpha)^n$	$n$ 级反应的 $\alpha$ 级自催化反应
$P_1$	$n(\alpha)^{(n-1)/n}$	幂函数法则
$A_1$	$1 - \alpha$	Mamplé 单行法则
$A_2$	$2(1 - \alpha) / [ - \ln ( 1 - \alpha ) ]^{1/2}$	二维成核反应
$A_3$	$3(1 - \alpha) / [ - \ln ( 1 - \alpha ) ]^{2/3}$	三维成核反应
$A_n$	$n(1 - \alpha) / [ - \ln ( 1 - \alpha ) ]^{1-1/n}$	$n$ 维成核反应

张弛等<sup>[28]</sup>采用无模型法对聚 3,3-双叠氮甲基环氧丁烷(PBAMO)的热分解反应动力学进行计算,并与热重—红外—质谱(TG-FTIR-MS)联机研究其热分解产物。PBAMO 表现出了独特的热分解过程,在 210℃~270℃ 之间,TG 曲线上的叠氮基团的分解失重之后没有第二个明显的失重台阶,当分解率大于 0.4 时,活化能降为负值。TG-IR-MS 结果表明,在叠氮基团分解时释放的热量加速了剩余氮原子的氧化还原过程,主要产物形式为 NO,主链中的氧原子被消耗掉,从而导致了碳链骨架的大量残留。

2 动力学补偿效应

动力学补偿效应是热分解动力学研究中的一个重要组成部分。动力学补偿效应就是 lnA 与 E 呈线性关系的现象,其数学表达式为:

lnA = aE + b.

(5)

式中:a、b 均为补偿参数,a 的单位为 K/min。

在式(5)中,已知 A 对 E 变化的效应可以得到部分补偿,可从已知 E 预测 A 的实验值,或从已知 A 预测 E 的实验值。

胡荣祖等<sup>[29]</sup>为考察性质相近的同类型含能材料的热分解反应是否存在动力学补偿效应,利用 CDR-1 型差热分析仪进行 16 个硝基芳香系炸药、14 个多硝基芳香系炸药、11 个硝胺系炸药、8 个呋咱系炸药、22 种混合炸药和 12 种推进剂在同一实验条件下得到表 3 所示的动力学补偿效应关系式。在表 3 中,性质相近的同类型含能材料的热分解反应存在动力学参数间的补偿效应,由已知 E 可以估算 A 的实验值,也可由已知 A 估算 E 的实验值。

表 3 同类型含能材料的热分解反应的动力学补偿效应

Tab. 3 Kinetic compensation effect of thermal decomposition reaction for the same type of energetic materials

含能材料	动力学补偿效应关系式	相关系数 r
硝基芳香系炸药	lg A = 0.1030E - 0.7941	0.9933
多硝基芳香系炸药	lg A = 0.1051E - 4.6780	0.9797
硝胺系炸药	lg A = 0.0906E + 0.7532	0.9901
呋咱系炸药	lg A = 0.1210E - 3.0739	0.9702
混合炸药	lg A = 0.0923E - 6.8178	0.9978
推进剂	lg A = 0.1116E - 2.2964	0.9992

刘子如等<sup>[30]</sup>用 DSC、DTA 和 TG-DTG 技术研究 RDX 和 HMX 热分解的动力学参数。RDX 和 HMX

在不同的分解阶段有不同的动力学参数和机理函数,其分解过程和动力学参数受试验条件、样品状态和试验方法的影响很大,但这些参数之间存在“动力学补偿效应”和“等动力学点”。

3 寿命预测

含能材料尤其是发射药易受到外界条件的影响,安定性最差,其安定性能直接影响使用和贮存安全性,要在安全贮存方面不能出事故,要做到万无一失。因此,研究含能材料安定性,预测安全贮存寿命,具有十分重要的军事意义和经济意义。

含能材料的寿命问题的实质就是其反应的速度问题,反应速度越慢,寿命越长,反应速度的问题就是研究反应动力学的问题,可以用动力学参数表达。Dakin<sup>[31]</sup>用实验证明材料寿命的对数与使用温度的倒数呈线性关系,即

lgτ = c/T + d.

(6)

式中:τ 为寿命,min;T 为使用温度,K;c、d 为常数。

张林军等<sup>[32]</sup>利用 NBK 型“拉瓦”材料热稳定性测试系统研究 DTHL 熔铸含铝炸药的全分解过程,对其初始热分解动力学和贮存寿命预测进行分析,以放气量 2 L/kg 为临界点,用 Berthlot 方程外推得到 DTHL 熔铸炸药在 25℃ 和 20℃ 条件下的贮存寿命。

此外,热分解动力学还可以应用于评定含能材料的热安全性,通过测定热爆炸临界温度、热点火温度以及绝热至爆炸时间评定含能材料的热安定性。汤焱等<sup>[33]</sup>利用 DSC 测得单质炸药 HMX 热分解参数,得到的热分解数据安全可靠且简单易行,为 HMX 的安全应用提供依据。

4 结束语

热分解动力学在求解含能材料的动力学参数、推断反应机理以及预测有效使用寿命等方面发挥了重要的作用。在解决实际问题时,往往是沿用等温均相体系的动力学理论和方程,其实用性和可靠性一直存在着争议<sup>[34-35]</sup>,同时由于反应体系的复杂性,处理数据方法不当以及实验条件的限制引起误差。在热分析动力学新技术方面,控制转化热分析(CRTA)<sup>[36]</sup>应用最广泛。此外,热分析技术与其他各种技术的互补,如与 FTIR、MS、GC 的联用,自身技术的完善与更新、以及实验与计算技术的日趋完善,在研究固相反应动力学领域取得重大突破和进展<sup>[37-38]</sup>。这就要求广大热分析工作者积极完善 TAK 理论,同时规范 TAK 实验方法,不断促进 TAK 的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Flynn J H. Thermal analysis kinetics-past, present and future[J]. *Thermochimica Acta*, 1992, 203(1): 519-526.
- [2] Vyazovkin S, Wight C A. Isothermal and non-isothermal kinetics of thermally stimulated reactions of solids[J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 1998, 17(3): 407-433.
- [3] 范芸珠, 曹发海. 硫酸铵热分解反应动力学研究[J]. *高校化学工程学报*, 2011, 25(2): 341-346.  
Fan Yunzhu, Cao Fahai. Thermal decomposition kinetics of ammonium sulfate [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2011, 25(2): 341-346.
- [4] 周华, 王强, 陈志雄, 等. 神华煤热解特性和非等温动力学研究[J]. *煤化工*, 2010, 38(2): 27-31.  
Zhou Hua, Wang Qiang, Chen Zhixiong, et al. Pyrolysis characters and the non-isothermal kinetics of shenhua coal [J]. *Coal Chemical Industry*, 2010, 38(2): 27-31.
- [5] Ptáček P, Šoukal F, Opravil T, et al. The kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite by DTG technique [J]. *Powder Technology*, 2011, 208(1): 20-25.
- [6] Brown M E, Brown R E. Kinetic aspects of the thermal stability of ionic solids[J]. *Thermochimica Acta*, 2000, 357-358: 133-140.
- [7] 刘子如. 含能材料热分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [8] 胡荣祖, 高胜利, 赵凤起, 等. 热分析动力学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] Ozawa T. A new method of analyzing thermogravimetric data[J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1965, 38(1): 1881-1886.
- [10] Kissinger H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 1957, 29(11): 1702-1706.
- [11] Coats A W, Redfern J P. Kinetic parameters from thermogravimetric data[J]. *Nature*, 1964(201): 68-69.
- [12] 仪建华, 徐司雨, 马晓东, 等. 太根发射药的非等温热分解反应动力学[J]. *火炸药学报*, 2007, 30(4): 76-80.  
Yi Jianhua, Xu Siyu, Ma Xiaodong, et al. Non-isothermal thermal decomposition reaction kinetics of TEGDN gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(4): 76-80.
- [13] 罗宁, 李晓杰, 王小红, 等. 几种乳化炸药的热分解动力学行为[J]. *含能材料*, 2009, 17(4): 463-466.  
Luo Ning, Li Xiaojie, Wang Xiaohong, et al. Thermal decomposition kinetics behavior of emulsion explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(4): 463-466.
- [14] 高大元, 何松伟, 沈永兴, 等. GI-920 炸药的热分解动力学研究[J]. *含能材料*, 2008, 16(1): 1-4.  
Gao Dayuan, He Songwei, Shen Yongxing, et al. Thermal decomposition kinetics of GI-920 explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2008, 16(1): 1-4.
- [15] Ozawa T. Estimation of activation energy by isoconversion methods [J]. *Thermochimica Acta*, 1992, 203(1): 159-165.
- [16] Akahira T, Sunose T. Method of determining activation deterioration constant of electrical insulating materials [J]. *Res. Rep. Chiba Inst. Technol.*, 1971(16): 22-23.
- [17] 李艳春. 热分解动力学在含能材料中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.  
Li Yanchun. The application of thermal analysis kinetics on energetic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
- [18] Zivkovic Z D, Dobovisek B. Determination of reaction kinetics based on a part of a differential thermal analysis or thermogravimetric curves[J]. *Thermochimica Acta*, 1979, 32(1-2): 205-211.
- [19] Agrawal R K. A new equation for modeling nonisothermal reactions[J]. *Chemistry Analysis*, 1987, 32(1): 149-156.
- [20] Freeman E S, Carroll B. The application of thermoanalytical techniques to reaction kinetics; the thermogravimetric evaluation of the kinetics of the decomposition of calcium oxalate monohydrate[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1958, 62(4): 394-397.
- [21] Friedman H L. Kinetics of thermal degradation of charforming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic. *Journal of Polymer Science, Part C*, 1964, 6(1): 183-195.
- [22] Starink M J. A new method for the derivation of activation analysis from experiments performed at constant heating rate[J]. *Thermochimica Acta*, 1996, 288(1-2): 97-104.
- [23] David A, Anderson, Freeman E S. The kinetics of the thermal degradation of polystyrene and polyethylene [J]. *Journal of Polymer Science*, 1961, 54(159): 253-260.
- [24] Popescu C. Integral method to analyze the kinetics of heterogeneous reactions under non-isothermal conditions a variant on the Ozawa-Flynn-Wall method [J]. *Thermochimica Acta*, 1996, 285(2): 309-323.



- [25] Criado J M. Kinetic analysis of DTA data from master curves[J]. *Thermochimica Acta*, 1978, 24(1): 186-198.
- [26] 宁斌科, 杨正权, 刘蓉, 等. 高氮量硝化棉的脱硝反应动力学研究[J]. *火炸药学报*, 2000, 23(1): 65-67. Ning Binke, Yang Zhengquan, Liu Rong, et al. A study on the denitration kinetics of highly nitrated nitrocellulose[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellant*, 2000, 23(1): 65-67.
- [27] 亓延军, 崔崧, 张和平, 等. 膨胀聚苯乙烯热分解动力学分析和寿命预测[J]. *火灾科学*, 2012, 21(3): 159-166. Qi Yanjun, Cui Yu, Zhang Heping, et al. Thermal decomposition kinetics and lifetime prediction of expanded polystyrene foam[J]. *Fire Safety Science*, 2012, 21(3): 159-166.
- [28] 张弛, 李杰, 罗运军, 等. PBAMO 的热分解反应机理[J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(10): 22-25. Zhang Chi, Li Jie, Luo Yunjun, et al. Thermal decomposition mechanism of PBAMO[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2012, 28(10): 22-25.
- [29] 胡荣祖, 宁斌科. 中国化学会第十届化学热力学和热分析学术论文报告会文集[C]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
- [30] 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, 79. Liu Zirui, Yin Cuimei, 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, 79.
- [31] Dakin, T W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomena[J]. *American Institute of Electrical Engineers Transactions*, 1948, 67(1): 113-122.
- [32] 张林军, 何少蓉, 衡淑云, 等. DTHL 炸药热分解动力学研究及贮存寿命预估[J]. *火炸药学报*, 2010, 33(3): 47-50. Zhang Linjun, He Shaorong, Heng Shuyun, et al. Thermal decomposition kinetics and estimation of storage life of DTHL explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(3): 47-50.
- [33] 汤崧, 杨利, 乔小晶, 等. HMX 热分解动力学与热安全性研究[J]. *含能材料*, 2011, 19(4): 396-400. Tang Zhan, Yang Li, Qiao Xiaojing, et al. On thermal decomposition kinetics and thermal safety of HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011, 19(4): 396-400.
- [34] Prasad T P, Kanungo S B, Ray H S. Non-isothermal kinetics: some merits and limitations[J]. *Thermochimica Acta*, 1992, 203: 503-514.
- [35] Brown M, Flynn R M, Flynn J H. Report on the ICTAC kinetics committee (August 1992 to September 1994)[J]. *Thermochimica Acta*, 1995, 256(2): 477-483.
- [36] Laureiro Y, Jerez A, Rouquerol J, et al. Dehydration kinetics of wyoming montmorillonit studied by controlled transformation rate thermal analysis[J]. *Thermochimica Acta*, 1996, 278(1-2): 165-173.
- [37] 任宁, 张建军. 热分析动力学数据处理方法的研究进展[J]. *化学进展*, 2006, 18(4): 410-416. Ren Ning, Zhang Jianjun. Progress in datum treatment methods of thermal analysis kinetics[J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(4): 410-416.
- [38] 马平, 李国仲. 粉状乳化炸药热分解动力学研究[J]. *爆破器材*, 2009, 38(3): 1-3, 7. Ma Ping, Li Guozhong. Research on the thermal decomposition kinetics of powdery emulsion explosive[J]. *Explosive Materials*, 2009, 38(3): 1-3, 7.

## Application of Thermal Decomposition Kinetics in Energetic Materials

ZHANG Tao, CHEN Minghua, JIA Haonan, JIA Xiaobiao, CHANG Wenping, CHEN Yongkang  
 Ordnance Institute of Technology, Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050000)

[ABSTRACT] The importance of thermal decomposition kinetics in energetic materials was introduced. The main analysis methods of thermal decomposition kinetics and several kinds of reaction mechanism were enumerated and analyzed. Because thermal analysis technology has many advantages including simple and quick operation, high accuracy and extensive application, it plays an important role in the thermal decomposition kinetics of energetic materials. Thermal decomposition kinetic is widely applied in the obtaining of kinetic parameters, the inference of reaction mechanism and kinetic compensation effect for energetic materials. It provides scientific basis for the prediction of service life and evaluation of safety performance of energetic material. Meanwhile, self-improvement of thermal analysis techniques and combination with other laboratory instruments will promote the development of thermal analysis kinetics.

[KEY WORDS] energetic materials, thermal decomposition kinetics, reaction mechanism, kinetic compensation effect, prediction of service life