

文章编号: 1003-1480 (2022) 06-0065-05

# 2,4,6-三硝基-3-溴苯甲醚的热分解特性及机理研究

于志宏<sup>1</sup>, 饶文军<sup>2</sup>, 宋小兰<sup>1</sup>, 寇勇<sup>3</sup>, 王毅<sup>4</sup>, 安崇伟<sup>1</sup>

(1. 中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 江西新余国科科技股份有限公司, 江西 新余, 338034; 3. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094; 4. 中北大学 材料科学与工程学院, 山西 太原, 030051)

**摘要:** 为研究钝感熔铸炸药 2,4,6-三硝基-3-溴苯甲醚 (TNBA) 的热分解特性及其机理, 采用一步硝化法制备了 TNBA, 并采用 TG-MS、DSC 及 TG 等方法对其热分解过程、热分解的热力学和动力学参数以及热分解机理进行了研究。结果表明: TNBA 的热分解产物为 CO(N<sub>2</sub>)、H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 以及少量的 C、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>; 热分解反应速率常数 ( $k$ ) 为 0.31 s<sup>-1</sup>、活化焓 ( $\Delta H^\ddagger$ ) 为 61.83 kJ·mol<sup>-1</sup>、活化能 ( $E_k$ ) 为 66.31 kJ·mol<sup>-1</sup>、活化吉布斯自由能 ( $\Delta G^\ddagger$ ) 为 139.72 kJ·mol<sup>-1</sup>、活化熵 ( $\Delta S^\ddagger$ ) 为 -144.70 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; 热分解动力学模型函数为 Ginstling-Brounshtein(G-B)方程, 热分解机理为圆柱形对称的三维扩散, 动力学方程为  $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{0.842}{\beta} \frac{4 \times 10^6}{\beta} e^{-\frac{66.31}{T}} \left\{ \frac{3}{2} [(1-\alpha)^{-1/3} - 1] \right\}$ 。

**关键词:** 炸药; TNBA; 热分解动力学; 模型拟合法; 热分解机理

中图分类号: TJ55; TQ564.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.06.014

## Study on Thermolysis Characteristics and Mechanism of 2,4,6-Trinitro-3-bromoanisole

YU Zhi-hong<sup>1</sup>, RAO Wen-jun<sup>2</sup>, SONG Xiao-lan<sup>1</sup>, KOU Yong<sup>3</sup>, WANG Yi<sup>4</sup>, AN Chong-wei<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2. Jiangxi Xinyu Guoke Technology Co. Ltd., Xinyu, 338034; 3. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 4. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051)

**Abstract:** In order to study the thermal decomposition characteristics and mechanism of insensitive melt cast explosives 2,4,6-trinitro-3-bromoanisole (TNBA), TNBA was prepared by one-step nitration method. And the thermal decomposition process, thermodynamic and kinetic parameters and thermal decomposition mechanism of TNBA were studied by TG-MS, DSC and TG. The results show the decomposition products of TNBA are CO(N<sub>2</sub>), H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and a small amount of C, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>; The thermal decomposition reaction rate constant ( $k$ ) is 0.31 s<sup>-1</sup>, the activation enthalpy ( $\Delta H^\ddagger$ ) is 61.83 kJ·mol<sup>-1</sup>, the activation energy ( $E_k$ ) is 66.31 kJ·mol<sup>-1</sup>, the activated Gibbs free energy ( $\Delta G^\ddagger$ ) is 139.72 kJ·mol<sup>-1</sup>, the activation entropy ( $\Delta S^\ddagger$ ) is -144.70 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. The thermal decomposition kinetic model function is G-B equation, the thermal decomposition mechanism is 3-dimensional diffusion with cylindrical symmetry, and the kinetic equation is  $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{0.842}{\beta} \frac{4 \times 10^6}{\beta} e^{-\frac{66.31}{T}} \left\{ \frac{3}{2} [(1-\alpha)^{-1/3} - 1] \right\}$ .

**Key words:** Explosive; TNBA; Thermal decomposition kinetics; Model fitting method; Thermal decomposition mechanism

熔铸炸药是将高能炸药固相颗粒加入熔态载体炸药中, 形成流动态后进行铸装的炸药。传统的 TNT 基熔铸炸药存在铸件渗油、缩孔及发脆等问题<sup>[1-3]</sup>, 无法满足现代武器对装药性能的要求。寻求新的熔铸炸

药载体或者对 TNT 载体进行改性是提升熔铸炸药综合性能的首要方法。目前对载体炸药的研究主要集中在 2,4-二硝基苯甲醚 (DNAN)、3,4-二硝基呋咱基氧化呋咱 (DNTF)、三硝基氮杂环丁烷 (TNAZ)、3,4-

收稿日期: 2022-04-14

作者简介: 于志宏 (1997-), 男, 硕士研究生, 从事含能材料制备研究。

通讯作者: 宋小兰 (1977-), 女, 副教授, 从事火炸药微纳米化研究。

基金项目: 武器装备预研基金 (No.6140656020201)。

二硝基吡唑 (DNP)、2,4,6-三硝基-3-溴苯甲醚 (TNBA) 等<sup>[3-8]</sup>。其中, TNBA 的密度、熔点、爆速与 TNT 相近<sup>[9]</sup>, 其蒸汽压远低于 TNT<sup>[10]</sup>, 且在生产应用过程中其毒性远小于 TNT。美国霍尔斯顿陆军弹药厂 (HSAAP) 报道了 TNBA 基熔铸炸药的评估结果, 表明 TNBA 基熔铸炸药比现有的 DNAN 基 IM 炸药 (IMX-104、PAX-48) 性能更好, 且生产成本相对较低、绿色环保<sup>[8]</sup>。刘巧娥<sup>[11]</sup>等采用一步硝化法合成了 TNBA, 其纯度和产率均达 95% 以上。Christian M. Childs<sup>[12]</sup>等研究了高压条件下的 TNBA 结构, 发现在 9.2 GPa 下 TNBA 仍是层状结构, 空间群也未改变。

热分解特性对于研究炸药的热稳定性和储存期限等性质非常重要, 但目前对于 TNBA 的热分解性能和机理未见详细报道。本文采用一步硝化法<sup>[11]</sup>制备了 TNBA, 采用热重-质谱联用 (TG-MS)、差示扫描量热法 (DSC) 及热重 (TG) 等方法对 TNBA 的热分解过程及分解产物、热分解的热力学和动力学参数以及热分解机理进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂

3-溴苯甲醚,  $\geq 99\%$ , 上海麦克林生化科技有限公司; 硝酸, 65%~68%, 国药集团化学试剂有限公司; 发烟硝酸,  $\geq 95\%$ , 发烟硫酸, (以  $\text{SO}_3$  计)  $\geq 20\%$ , 成都市科隆化学品有限公司。

### 1.2 TNBA 的制备

TNBA 合成路线如图 1 所示。

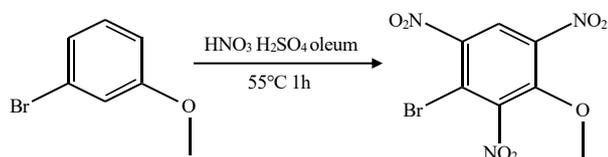


图 1 TNBA 的合成路线图

Fig.1 Synthesis road-map of TNBA

在 0 °C 条件下, 在烧杯中加入 3 mL 95% 发烟硝酸与 3 mL 65% 硝酸混合, 再加入 5.9 mL 95% 浓硫酸及 7.9 mL 20% 发烟硫酸, 边加边搅拌, 配制成硝磺混酸溶液, 转移至三口烧瓶中。用注射器抽取 0.7 mL 3-溴苯甲醚, 缓慢滴入硝磺混酸中, 然后缓慢升温至

55 °C, 反应 1 h。反应完毕后, 待其降至室温后倒入水中, 经过滤、水洗、干燥, 得到浅黄色固体 TNBA。采用 X 射线粉末衍射 (XRD) 与傅里叶红外光谱 (IR) 对其进行了表征, 判断制备的样品为 TNBA。

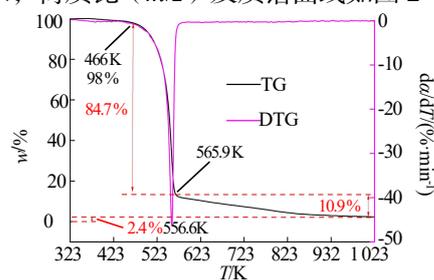
### 1.3 性能测试

采用 TG-MS (STA 499 F3-QMS 403 C, 德国耐驰仪器公司) 测试 TNBA 的热分解特性, 升温速率为 10 K/min, 氩气气氛, 2~3 mg; 采用 DSC (DSC-60, 日本岛津公司) 及 TG (PerkinElmer STA-8000, 珀金埃尔默仪器 (上海) 有限公司) 测试 TNBA 的热分解特性, 升温速率分别为 5 K/min、10 K/min、15 K/min、20 K/min。

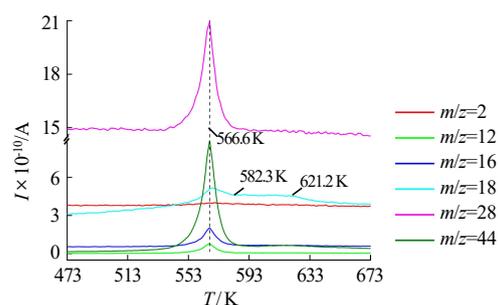
## 2 结果与讨论

### 2.1 TNBA 的热分解特性

TG-MS 测试的 TNBA 的 TG-DTG 曲线如图 2 (a) 所示, 荷质比 ( $m/z$ ) 及质谱曲线如图 2 (b) 所示。



(a) TG-DTG 曲线



(b) 荷质比及离子流强度曲线

图 2 TNBA 的 TG-MS 测试曲线

Fig.2 Measured TG-MS curves of TNBA

由图 2 (a) 可知, TNBA 的热分解可分为 3 个阶段: 第 1 阶段为室温至 466 K, 此时 TNBA 分解了 2%; 第 2 阶段为 466 K 至 565.9 K, TNBA 快速分解, 至 565.9 K 时基本分解完毕, 质量损失约为 84.7%; 第 3 阶段为 565.9 K 至 1023 K, TNBA 剩余物质继续缓慢

分解直至剩下 2.4% 的炭黑。DTG 曲线在 556.6 K 时出现唯一的尖锐吸收峰,表明此温度下 TNBA 有最大的分解速率且分解十分剧烈。

由图 2 (b) 可知,质谱曲线在 566.6 K 时出现峰值,表明此温度下检测到大量的分解产物,此时 TNBA 分解最剧烈。 $m/z=2$ 、12、16、18、28、44 分别对应分解产物  $H_2$ 、C、 $CH_4$ 、 $H_2O$ 、 $CO(N_2)$ 、 $CO_2$ 。 $m/z=18$  的曲线在 582.3 ~ 621.2 K 存在一段平台,表明此温度范围内有  $H_2O$  持续逸出。通过对 473~673 K 温度范围内质谱曲线的积分,可以得到该范围内每种分解产物的逸出总量<sup>[13]</sup>,如表 1 所示。由表 1 可知,TNBA 在剧烈分解阶段的主要产物为  $CO(N_2)$ 、 $H_2$ 、 $H_2O$  以及少量的 C、 $CH_4$ 、 $CO_2$ 。这是因为 TNBA 是负氧平衡炸药 ( $OB_{CO_2} = -47.20\%$ ),分子内氧元素不足以将 C、CO、 $CH_4$  全部氧化为  $CO_2$ 。

表 1 热分解产物的累计量

Tab.1 Cumulant of thermal decomposition products						
$m/z$	2	12	16	18	28	44
累计量 $\times 10^{-3}/(A\cdot K\cdot mg^{-1})$	7.62	0.18	1.38	8.02	30.30	1.85

## 2.2 热力学和动力学参数计算

TNBA 在不同升温速率下的 DSC 曲线如图 3(a) 所示,  $\ln(\beta/T_p^2)$  与  $1/T_p$  线性相关图如图 3 (b) 所示。由图 3 (a) 可知, TNBA 的 DSC 曲线有 2 个吸热峰,第 1 个峰为熔融吸热,第 2 个峰为分解吸热。TNBA 吸热熔化后相当一段温度范围的 DSC 曲线较为平缓,说明在温度高于其熔点数十摄氏度下, TNBA 仍具有较高的化学稳定性,有利于熔铸炸药铸装成型操作。通过拟合曲线及公式 (1) 计算指前因子 ( $A$ ,  $s^{-1}$ ) 和活化能 ( $E_K$ ,  $kJ\cdot mol^{-1}$ ),通过公式 (2) ~ (5) 计算速率常数 ( $k$ )、活化吉布斯自由能 ( $\Delta G^\ddagger$ )、活化焓 ( $\Delta H^\ddagger$ ) 和活化熵 ( $\Delta S^\ddagger$ )。计算结果见表 2。

$$\ln \frac{\beta}{T_p^2} = \ln \frac{A_K \cdot R}{E_K} - \frac{E_K}{R \cdot T_p} \quad (1)$$

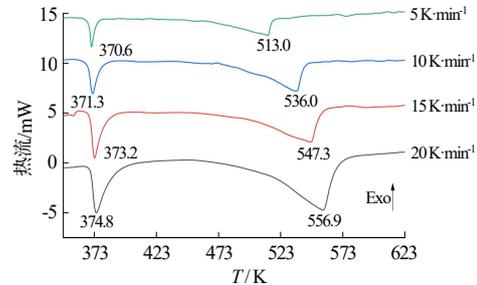
$$k = A_K \cdot e^{-\left(\frac{E_K}{R \cdot T_p}\right)} \quad (2)$$

$$A_K \cdot e^{-\left(\frac{E_K}{R \cdot T_p}\right)} = \frac{k_B \cdot T_p}{h} \cdot e^{-\left(\frac{\Delta G^\ddagger}{R \cdot T_p}\right)} \quad (3)$$

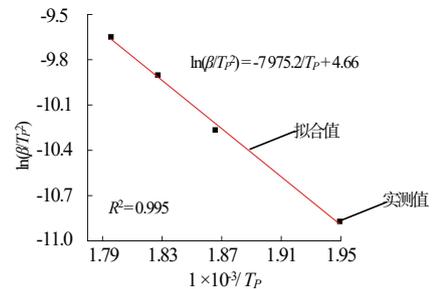
$$\Delta H^\ddagger = E_K - R \cdot T_p \quad (4)$$

$$\Delta G^\ddagger = \Delta H^\ddagger - T_p \cdot \Delta S^\ddagger \quad (5)$$

式 (1) ~ (5) 中:  $\beta$  为升温速率,  $K \cdot min^{-1}$ ;  $T_p$  为升温速率  $\beta$  时的热分解峰温, K;  $k_B$  为玻尔兹曼常量,  $1.380 65 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ ;  $h$  为普朗克常量,  $6.626 18 \times 10^{-34} J \cdot s^{-1}$ ;  $R$  为气体摩尔常数。



(a) DSC 曲线



(b) 拟合曲线

图 3 TNBA 的 DSC 图谱

Fig.3 DSC curves of TNBA

表 2 TNBA 的热力学和动力学参数

Tab.2 Thermodynamic and kinetic parameters of TNBA							
样品	$E_K$ ( $kJ\cdot mol^{-1}$ )	$k$ / $s^{-1}$	$A/s^{-1}$	$\Delta G^\ddagger$ ( $kJ\cdot mol^{-1}$ )	$\Delta H^\ddagger$ ( $kJ\cdot mol^{-1}$ )	$\Delta S^\ddagger/(J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1})$	$T_p$ /K
TNBA	66.31	0.31	$0.842 4 \times 10^6$	139.72	61.83	-144.70	538.30

由表 2 可知,  $\Delta G^\ddagger$  为正值表明炸药的活化过程不是自发进行的,需从外界吸收能量;  $\Delta H^\ddagger$  为正值表示 TNBA 分子需要从外部吸收能量以使分解反应发生;  $\Delta S^\ddagger$  为负值表明热分解完成后混乱度降低。与 TNT 的活化能 ( $144.4 kJ\cdot mol^{-1}$ )<sup>[14]</sup> 相比, TNBA 的活化能较低,说明 TNBA 在 538 K 温度下比 TNT 更容易发生热分解,这是由于 TNBA 含有  $-OCH_3$  及溴原子,分子对称性不如 TNT<sup>[15]</sup>。

## 2.3 热动力学机理分析

固相物质非等温条件下分解的动力学方程可用微分方程式 (6) 表示:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E_K}{RT}} f(\alpha) \quad (6)$$

对式 (6) 两边同时取对数可得:

$$\ln \frac{d\alpha / dt}{f(\alpha)} = \ln \frac{A}{\beta} - \frac{E_K}{RT} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: $\alpha$ 为物质在 $t$ 时刻已分解的百分数; $\beta$ 为恒定的升温速率,  $\text{K}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $f(\alpha)$ 为微分形式的动力学机理函数。

TNBA 在不同升温速率下的 TG 曲线如图 4 (a) 所示。由图 4 (a) 可知, TNBA 在 436.2~462.4 K 温度下开始失重, 与 TG-MS 测试结果一致。在每种升温速率的 TG 曲线上选取 5 个温度值, 并计算其对应的  $\alpha$  和  $da/dt$  值, 绘制  $\alpha$ — $T$  和  $da/dt$ — $T$  图, 如图 4 (b) 所示。

选取 18 种常见的固相热分解反应机理的动力学模型函数, 见表 3。将图 4 (b) 中的  $da/dt$  及表 3 中

的函数  $f(\alpha)$  代入式 (7) 中, 并以  $\ln[(da/dt)/f(\alpha)] \sim 1000/T$  作线性回归, 得到不同反应机理动力学函数模型对应曲线的拟合相关系数, 如图 5 所示。

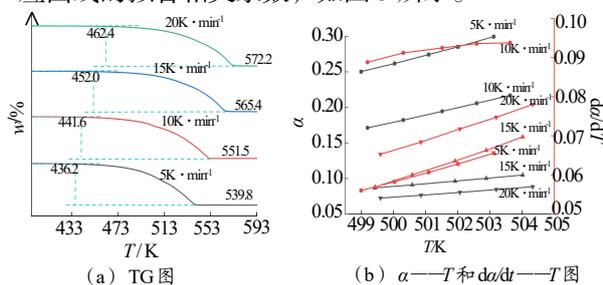


图 4 不同升温速率下 TNBA 热分解图谱

Fig.4 Thermal decomposition curves of TNBA at different heating rate

表 3 常见固相热分解反应机理及其动力学模型函数<sup>[16-18]</sup>

Tab.3 Thermal decomposition mechanism and kinetic model function of common solids

函数号	代号	函数名称	$f(\alpha)$	机理
1	A <sub>4</sub>	Avrami-Erofeev 方程	$4(1-\alpha)\cdot[-\ln(1-\alpha)]^{3/4}$	随机成核和随后生长, $m=4, n=1/4$
2	A <sub>3</sub>	Avrami-Erofeev 方程	$3(1-\alpha)\cdot[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$	随机成核和随后生长, $m=3, n=1/3$
3	A <sub>2</sub>	Avrami-Erofeev 方程	$2(1-\alpha)\cdot[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	随机成核和随后生长, $m=2, n=1/2$
4	A <sub>1.5</sub>	Avrami-Erofeev 方程	$3/2(1-\alpha)\cdot[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	随机成核和随后生长, $m=3/2, n=2/3$
5	R <sub>1</sub>	相边界反应	1	相边界反应, 一维, $n=1$
6	R <sub>2</sub>	相边界反应	$2(1-\alpha)^{1/2}$	相边界反应, 圆柱形对称, $n=2$
7	R <sub>3</sub>	相边界反应	$3(1-\alpha)^{2/3}$	相边界反应, 球形对称, $n=3$
8	D <sub>1</sub>	抛物线法则	$2(\alpha)^{-1}$	一维扩散
9	D <sub>2</sub>	Valensi 方程	$[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$	二维扩散, 圆柱形对称
10	D <sub>4</sub>	Ginstling-Brounshtein 方程	$3/2[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$	三维扩散, 圆柱形对称
11	D <sub>3</sub>	Jander 方程	$3/2(1-\alpha)^{2/3}[1-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$	Jander 类型扩散, 三维扩散, 球形对称
12		Mampel power 法则(幂函数法则)	$4(\alpha)^{3/4}$	$n=1/4$
13		Mampel power 法则(幂函数法则)	$3(\alpha)^{2/3}$	$n=1/3$
14		Mampel power 法则(幂函数法则)	$2(\alpha)^{1/2}$	$n=1/2$
15		Mampel power 法则(幂函数法则)	$2/3(\alpha)^{1/2}$	$n=3/2$
16	A <sub>1</sub> , F <sub>1</sub>	Mampel 单行法则, 一级	$1-\alpha$	随机成核和随后生长, 假设每个颗粒上只有一个核心
17	F <sub>2</sub>	二级	$(1-\alpha)^2$	化学反应
18	F <sub>3</sub>	三级	$1/2(1-\alpha)^3$	化学反应

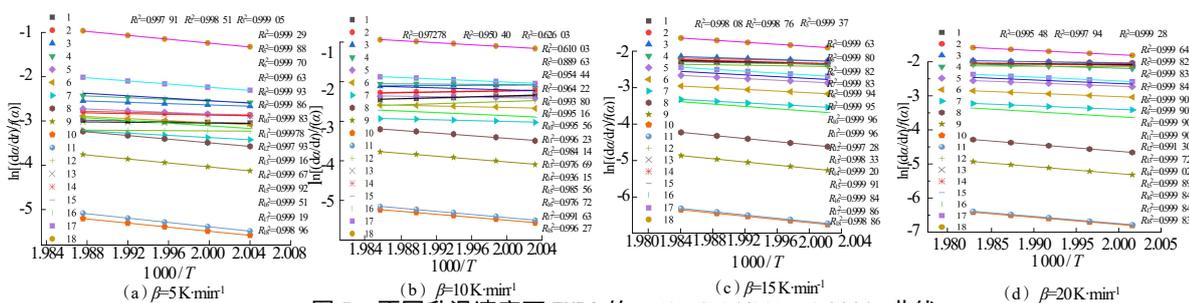


图 5 不同升温速率下 TNBA 的  $\ln[(da/dt)/f(\alpha)] \sim 1000/T$  曲线

Fig.5  $\ln[(da/dt)/f(\alpha)] \sim 1000/T$  curves of TNBA at different heating rates

由图 5 可知, 4 种升温速率下, 10<sup>#</sup>函数对应曲线的拟合相关系数最接近 1, 拟合效果最好。因此可以预测 TNBA 的热分解动力学模型函数为 Ginstling-Brounshtein (G-B) 方程, 其热分解机理为圆柱形对称的三维扩散机理。将计算得到的  $E_k$ 、 $A$  及  $f(\alpha)$  代入式 (6) 中, 得到 TNBA 的热分解反应动力学方程为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{0.842 \cdot 4 \times 10^6}{\beta} e^{-\frac{66.31}{RT}} \left\{ \frac{3}{2} \left[ (1-\alpha)^{-1/3} - 1 \right]^{-1} \right\}$$

### 3 结论

(1) 采用 TG-MS 及 DSC 测试了 TNBA 的热分

解特性, 结果表明: TNBA 的热分解产物为  $\text{CO}(\text{N}_2)$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  以及少量的  $\text{C}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ ; 热分解反应速率常数( $k$ )为  $0.31 \text{ s}^{-1}$ , 活化焓( $\Delta H^\ddagger$ )为  $61.83 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 活化能( $E_k$ )为  $66.31 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 活化吉布斯自由能( $\Delta G^\ddagger$ )为  $139.72 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 活化熵( $\Delta S^\ddagger$ )为  $-144.70 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

(2) 采用模型拟合法计算得出 TNBA 的热分解动力学模型函数为 G-B 方程, 热分解机理为圆柱形对称的三维扩散, 动力学方程为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{0.842}{\beta} \frac{4 \times 10^6}{\beta} e^{-\frac{66.31}{RT}} \left\{ \frac{3}{2} \left[ (1-\alpha)^{-1/3} - 1 \right]^{-1} \right\}$$

### 参考文献:

- [1] 王红星, 王晓峰, 罗一鸣. 不敏感熔铸炸药的研究现状及发展趋势[J]. 爆破器材, 2021, 50(1): 1-9.
- [2] 刘瑞鹏, 罗一鸣, 王红星, 等. TNT、DNAN 和 DNTF 单质凝固过程中温度和缩松的数值模拟及实验研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 43-47, 52.
- [3] 寇勇, 宋小兰, 刘丽霞, 等. DNAN/TNAZ 最低共熔物的制备及性能[J]. 火炸药学报, 2020, 43(5): 531-536.
- [4] 邹政平, 赵凤起, 张明, 等. DNTF 应用技术研究进展[J]. 爆破器材, 2019, 48(4): 11-16, 22.
- [5] 马会强, 冯晓晶, 朱天兵, 等. 高能量密度材料 1,3,3-三硝基氮杂环丁烷研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2012, 10(4): 20-24.
- [6] 雷伟, 罗一鸣, 张蒙蒙, 等. 3,4-二硝基吡唑(DNP)的研究进展[J]. 爆破器材, 2020, 49(5): 1-6.
- [7] DR David Price. GrIMEx: Development of a novel, green IM Comp B replacement[C]//2016 IM & EM Technology Symposium, 2016.
- [8] Virgil F, Brian A, Jacob M, et al. Melt-pour explosive formulations development featuring TNBA[C]//2018 IM & EM Technology Symposium, 2018.
- [9] Thomas M. Klap. tke. Energetic materials encyclopedia[M]. CPI books GmbH, Leck, 2018.
- [10] Pesce-Rodriguez R A, Blaudeau L B. Experimental determination of physical properties of DNGU, TNBA, LLM-105, HK-56, and DNP: ARL-TN-0788[R]. US Army Research Laboratory, 2016.
- [11] 刘巧娥, 毕福强, 李志华, 等. 2,4,6-三硝基-3-溴苯甲醚的合成、晶体结构与性能研究[J]. 火炸药学报, 2021, 44(4): 441-446.
- [12] Childs C M, Steele B A, Grivickas P, et al. High-pressure investigation of 2, 4, 6-trinitro-3-bromoanisole(TNBA): structural determination and piezochromism[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2022(126): 1 176-1 187.
- [13] Zou C, Ma C, Zhao J, et al. Characterization and non-isothermal kinetics of Shenmu bituminous coal devolatilization by TG-MS[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017(127): 309-320.
- [14] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [15] 周霖. 爆炸化学基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- [16] 胡荣祖, 高胜利, 赵凤起. 热分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [17] Wanjun T, Yuwen L, Xi Y, et al. Kinetic studies of the calcination of ammonium metavanadate by thermal methods[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(9): 2 054-2 059.
- [18] Mamleev V, Bourbigot S, Le Bras M, et al. Modelling of nonisothermal kinetics in thermogravimetry[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2000, 2(20): 4 708-4 716.