

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.04.002

# AKTS 模拟分析硝酸铵的热稳定性\*

张巍青<sup>①</sup> 徐二永<sup>①</sup> 李翠清<sup>①</sup> 李建刚<sup>①</sup> 陈思凝<sup>②</sup> 王如君<sup>②</sup>

①北京石油化工学院化学工程学院(北京,102617)

②中国安全生产科学研究院(北京,100012)

[摘 要] 为了研究硝酸铵(AN)的热危险性,采用差示扫描量热仪(DSC)对AN进行扫描测试,获得了AN在不同升温速率下的热分解规律。运用热力学分析软件AKTS计算得到AN的热力学和动力学参数,采用风险矩阵法评估了AN热分解的危险性。结果表明:AN起始分解温度为228~250℃,放热量为2 340~2 650 J/g,分解反应活化能为100~175 kJ/mol,模拟并计算了AN在绝热条件下反应体系达到最大反应速率所需要的时间为24 h的温度 $T_{D24}=137.2\text{℃}$ 。利用风险矩阵法评估了AN的危险等级为Ⅱ级。针对此危险等级,提出了降低AN储存风险的措施。

[关键词] 硝酸铵(AN);热分解;活化能;危险性评估

[分类号] TQ560.72

## Simulation Analysis of Thermal Stability of Ammonium Nitrate Based on AKTS

ZHANG Weiqing<sup>①</sup>, XU Eryong<sup>①</sup>, LI Cuiqing<sup>①</sup>, LI Jian'gang<sup>①</sup>, CHEN Sining<sup>②</sup>, WANG Rujun<sup>②</sup>

①School of Chemical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology (Beijing, 102617)

②China Academy of Safety Science and Technology (Beijing, 100012)

[ABSTRACT] In order to study the thermal stability of Ammonium Nitrate (AN), thermal decomposition characteristics of AN at different heating rates were studied by differential scanning calorimetry (DSC). Thermodynamic and kinetic parameters were calculated using thermal analysis software AKTS. Risk of thermal decomposition of AN was also evaluated by risk matrix method. Results show that the initial exothermic temperature of AN increases from 228℃ to 250℃ with the increase of heating rate, and the heat release is reduced from 2 340 J/g to 2 650 J/g. Activation energy of AN is calculated to be 100~175 kJ/mol.  $T_{D24}$ , temperature with the time of 24 h to reach maximum action rate of AN under adiabatic conditions, is 137.2℃. Risk matrix method was used to evaluate the classification risk of AN, and the results show that the risk is Grade Two. For this risk level, measures were put forward to reduce the risk.

[KEYWORDS] ammonium nitrate (AN); thermal decomposition; activation energy; risk assessment

## 引言

硝酸铵(AN)是一种在工农业生产中被广泛使用的化肥和化工原料。同时,AN也由于含氧量高、安定性好等优点而作为现代工业炸药的一种重要组成成分<sup>[1-3]</sup>。AN在受猛烈撞击或受热后具有爆炸性分解的特性,因此,导致了多起爆炸事故。1947年,在美国德克萨斯城港湾,装载AN的货船发生火灾,引发货船爆炸,导致570多人遇难,造成5 000多

万美元的损失<sup>[4]</sup>。2015年8月12日,天津市滨海新区天津港瑞海公司发生危险品仓库特别重大火灾爆炸事故,硝化棉等物质燃烧导致AN等危化品发生爆炸,造成165人遇难、8人失踪、798人受伤<sup>[5]</sup>。因此,对于AN热稳定性和安全性的研究很有必要,分析所得到的热力学和动力学等数据,将有助于在AN的生产、储存、运输过程中做好安全防护工作。

近些年,国内学者针对AN的热分解过程已经做了大量的探究。杨丽等<sup>[6]</sup>分析了AN的分解机理及影响因素,并研究了测定AN热稳定性的方法;王

\* 收稿日期:2017-03-15

基金项目:国家重点研发计划课题(多灾种耦合下化工园区危险化学品仓储及运输网络安全保障技术研究 2016YFC0801502)

作者简介:张巍青(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为化工安全。E-mail:zhangweiqinghngy@126.com

通信作者:李翠清(1964-),女,博士,教授,主要研究方向为油品清洁利用与工业尾气减排。E-mail:licuiqing@bipt.edu.cn

光龙等<sup>[7]</sup>研究了 AN 热分解的机理和影响因素,并定量分析了使系统活化的物质和稳定剂的作用;陈网桦等<sup>[8]</sup>的研究表明,质量分数为 90% 的 AN 溶液具有类似于纯 AN 的热爆炸危险性,单独存在的硝酸以及氯离子对 AN 的分解均有一定程度的抑制作用,但在二者同时存在时将促进 AN 的分解;魏亚杰等<sup>[9]</sup>发现  $\text{MgH}_2$  有助于工业 AN 的受热分解, $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$  对 AN 的热分解无较大影响;陆明等<sup>[10]</sup>的研究表明了普通工业 AN 的活化能为 82.57 kJ/mol,膨化 AN 的热分解活化能为 88.87 kJ/mol,并探究了两者的热分解机理和动力学方程;沈立晋等<sup>[11]</sup>采用加速量热仪研究表明,化学纯 AN 活化能为 98.228 kJ/mol,农用 AN 的活化能为 445.9 kJ/mol,农用 AN 具有更好的安定性。

综上所述,对 AN 热分解机理的分析较多,然而对其热危险特性的定量研究和风险评估还不够充分。通常情况下,对物质热危险性评估多采用分解热估算法<sup>[12]</sup>,但仅仅通过反应热来描述化学物质危险性是不完善的。

本文中,采用 DSC 对硝酸铵不同升温速率下的热分解过程进行了研究,通过 AKTS 软件计算获得了活化能随着反应进程的变化规律,并对其在完全绝热条件和等温条件下的热危险性进行了模拟预测。在此基础上,采用风险矩阵法对物质危险性进行分级,实现了对失控反应发生的可能性和后果严重度的综合考虑,最终根据物质危险性等级提出降低风险的措施。

## 1 试验条件及分析方法

### 1.1 试剂及仪器

试剂:AN,北京化工厂生产,分析纯。

仪器:德国 SETARAM 公司制造的差示扫描量热仪(DSC),型号为 SENSYS evo;该仪器是在卡尔维(Calvet)量热原理的基础上开发出来的,通过三维传感器(3D-sensor)技术,能够将样品的热性质更准确地测量出来。容积 140  $\mu\text{L}$  的高压密闭不锈钢坩埚。测试温度范围为 25 ~ 500  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 试验方法

称取  $(10.00 \pm 0.02)$  mg AN 置于反应釜中,将其置于 DSC 中,并选择扫描速率分别为 0.5、1.0、2.0  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  和 5.0  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,设定仪器升温程序,实时监测至反应程序结束。

### 1.3 AKTS 软件分析

高级动力学及技术解决方法(advanced kinetics

and technology solutions,简称 AKTS)由瑞典 AKTS 公司开发,是专门研究材料的动力学、热稳定性及过程安全的分析软件,通过对 DSC、差热分析法(DTA)、热重分析(TGA)、C80 等测试出来的数据进行分析,获得准确的热力学和动力学参数。

### 1.4 风险矩阵法

风险矩阵法指在进行风险评价时,将风险事件的后果严重程度和发生的可能性相对定性地分为若干级,通过加权构成新的矩阵,矩阵中的每个指数分别代表了一个风险等级,通过对应的风险等级对化工过程进行评估。风险图一般分为 3 个区域:可接受风险区、有条件可接受风险区、不可接受风险区。根据风险矩阵的评估结果提出降低风险的措施<sup>[13-14]</sup>。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 热稳定性分析

利用 DSC 对 AN 受热分解过程进行分析。图 1 为不同升温速率下的热流曲线。由图 1 可以看出,反应在 25 ~ 200  $^{\circ}\text{C}$  过程中出现了不同的吸热峰,在 200 ~ 300  $^{\circ}\text{C}$  之间出现了较强的放热峰。

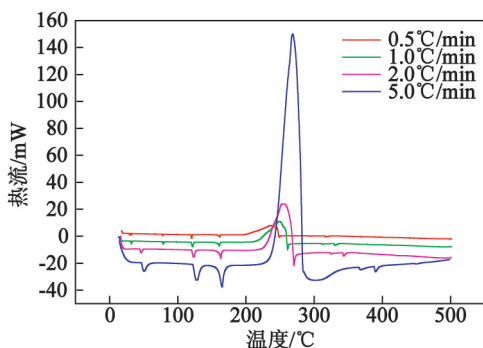


图 1 不同升温速率下 AN 的 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curves of AN at different heating rates

由 DSC 曲线可知,AN 受热的分解过程较为复杂。王光龙等<sup>[7]</sup>研究认为,AN 在 110  $^{\circ}\text{C}$  会发生分解反应生成氨气和硝酸,这个过程在 150 ~ 200  $^{\circ}\text{C}$  更加明显;王小红等<sup>[4]</sup>认为,在低于 150  $^{\circ}\text{C}$  时,AN 便会发生分解反应;两位学者均表明此反应是吸热过程。这与图 1 中反应在 200  $^{\circ}\text{C}$  之前出现的不同吸热峰是相吻合的。DSC 曲线在 200 ~ 300  $^{\circ}\text{C}$  间出现了一个较强的放热峰,分析不同升温速率下 AN 放热峰的情况,得到相关数据,见表 1。

由表 1 可知,AN 的起始分解温度  $T_0$  对应的温度范围在 228 ~ 250  $^{\circ}\text{C}$  之间,放热量持续在 2 340 ~

表 1 AN 的热稳定性参数

升温速率/ (℃·min <sup>-1</sup> )	起始分解 温度 <i>T</i> <sub>0</sub> /℃	峰值对应的 温度 <i>T</i> <sub>max</sub> /℃	放热量 <i>H</i> / (J·g <sup>-1</sup> )
0.5	228.453	240.462	2 642.563
1.0	233.364	253.241	2 533.538
2.0	238.400	256.420	2 452.141
5.0	249.010	271.010	2 340.821

2 650 J/g 之间。因为扫描升温速率越小,仪器灵敏度越高,且对微小热流的感应越敏感<sup>[15]</sup>。AN 在升温速率增加的过程中显示为初始分解温度 *T*<sub>0</sub> 和峰值对应的温度 *T*<sub>max</sub> 都升高、但单位质量放热量 *H* 减小的现象。

2.2 热危险性分析

2.2.1 动力学分析

利用 AKTS 软件对 DSC 数据进行分析,得到温度与反应进程的关系曲线,如图 2 所示。

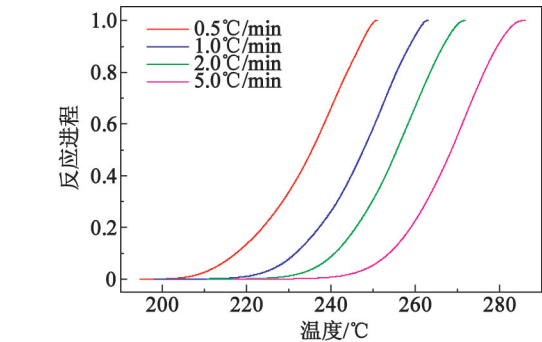


图 2 反应进程与温度的关系

Fig. 2 Relationship between reaction process and temperature

从图 2 可知,4 组数据具有良好的平行性,相关系数为 -0.996 07,能够较为真实地模拟反应进程。曲线的变化趋势具有一致性,表明 AN 受热的分解机理具有较好的规律性,不受升温速率的影响。

热分析过程中的动力学分析方法很多,Friedman 法应用较为广泛。因为在转化率一致的情况下,反应速率只与温度有关,所以利用 Friedman 法可以得到不同反应阶段的活化能,而不受反应机理的影响,也被叫做无模式函数法。

Friedman 法中反应动力学方程可表示为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha).$$

(1)

式中: $\alpha$  为转化率; $t$  为时间,s; $A$  为指前因子,(mol/L)<sup>1-n</sup>/s; $E_a$  是表观活化能,J/mol; $T$  为反应温度,K; $R$  是普适气体常数,J/(K·mol); $f(\alpha)$  为反应机理函数。

两边取对数,可得其微分形式:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_\alpha = \ln[Af(\alpha)] - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T}.$$

(2)

此时, $E_a$  不再是常数,而是转化率  $\alpha$  的函数。

采用 Friedman 等转化率方法对 AN 的分解动力学进行研究,对不同升温速率的 DSC 曲线进行变换,得到 4 组升温速率下分解过程中  $\ln(d\alpha/dt)$  与  $1\,000/T$  的变化曲线,如图 3 所示。

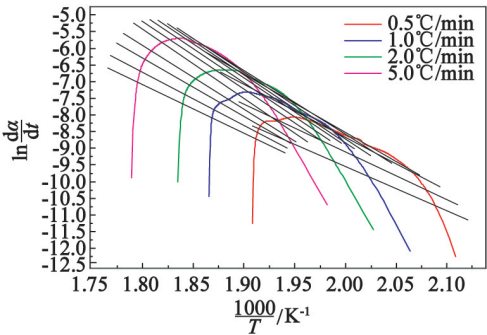


图 3 不同升温速率下  $\ln(d\alpha/dt)$  与  $1\,000/T$  的关系

Fig. 3 Relationship between  $\ln(d\alpha/dt)$  and  $1\,000/T$  at different heating rates

图 3 中,将 4 组升温速率时相同转化率下的点连接到一起,便得到了一系列的直线,直线所对应的斜率即是在这一转化率处的  $-E_a/R$ 。根据斜率值可以计算出已知转化率下的反应活化能,由此便可以得到  $E_a$  与转化率的关系,绘制出二者的关系曲线,如图 4 所示。

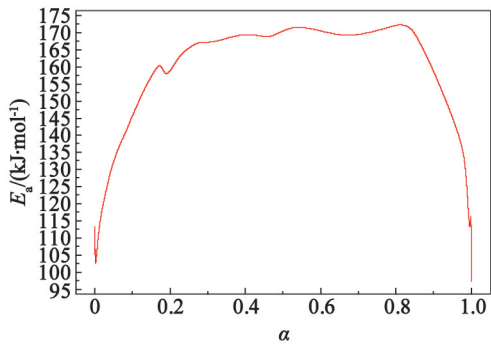


图 4 活化能随转化率的变化曲线

Fig. 4 Curves of activation energy changing with conversion rate

从图 4 可知,在 AN 受热分解的过程中,反应所需的活化能在 100 ~ 175 kJ/mol 之间呈现一定规律的变化。当  $0 < \alpha < 0.2$  时,活化能随分解反应的进行不断增加,反应发生的困难度逐渐增加;当  $0.2 < \alpha < 0.8$  时,反应所需的活化能变化较为缓慢,维持在 155 ~ 175 kJ/mol 之间浮动;当  $\alpha > 0.8$  时,反应所需的活化能又逐渐降低至反应结束,表明在反应进

入后期,反应发生的困难度逐渐减小。

2.2.2 热危险性预测

通常用绝热条件下反应体系达到最大反应速率所需要的时间( $TMR_{ad}$ ) $t_{ad}$ 来评估样品在不同温度下发生反应失控的可能性,它表示在绝热条件下达到最大反应速率所经历的时间。在 AN 的生产储存过程中,发生冷却失效时,整个反应釜将处在一个近似绝热的状态。为了研究 AN 在完全绝热条件下的热分解情况,用 AKTS 软件分别模拟并计算了  $t_{ad}$  为 1、8、24 h 和 50 h 所对应的温度,见表 2。

表 2 AN 的起始温度与  $t_{ad}$  的关系

Tab.2 Relationship between the initiation temperature of AN and  $t_{ad}$

$t_{ad}/h$	1	8	24	50
$T/^\circ\text{C}$	188.3	152.3	137.2	127.5

以 AN 的  $t_{ad}=24\text{ h}$  为例,对 AN 初始温度为  $120\text{ }^\circ\text{C}$  完全绝热条件进行预测,体系达到热失控时的温度-时间曲线如图 5 所示。

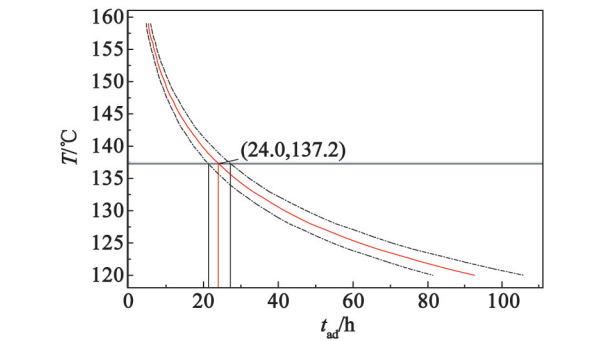


图 5 完全绝热的条件下失控时间与温度的关系

Fig.5 Relationship between time of thermal runaway and temperature in the condition of completely adiabatic

通过 AKTS 软件预测,由图 5 可知, $t_{ad}=24\text{ h}$  所对应的温度为  $137.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,即  $T_{D24}=137.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。此时,硝酸铵分解反应达到最大值,在此情况下,AN 的绝热升温  $\Delta T_{ad}$  为  $1\,423.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

通常,AN 是在常温下储存和使用。假定最恶劣的储存环境为  $55\text{ }^\circ\text{C}$ ,模拟并预测了 AN 恒温条件下一年内的分解情况,分别研究了  $30\sim55\text{ }^\circ\text{C}$  时 AN 的分解进程(图 6)。

由图 6 可知,AN 在恒温条件下,随着温度的升高,反应进程逐渐加快。在恒温条件  $55\text{ }^\circ\text{C}$  下,12 个月反应进程为  $2.2\times10^{-4}$ 。在  $30\text{ }^\circ\text{C}$  恒温情况下,12 个月反应进程为  $1.8\times10^{-5}$ 。反应进行程度

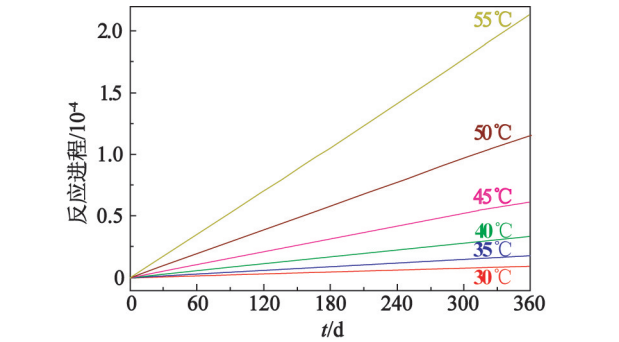


图 6 恒温条件下反应进程与时间的关系  
Fig.6 Relationship between reaction process and time in constant temperature conditions

都比较小,表明 AN 在室温条件下储存,由于分解放热发生失控反应的可能性较小。

假设最恶劣的储存环境温度为  $55\text{ }^\circ\text{C}$ ,在完全绝热条件下对 AN 进行预测。由图 7 可知,在  $6.2\text{ a}$  后 AN 的反应速率达到最大值。通常情况下,AN 的储存时间较短,均不超过  $1\text{ a}$ ,因此,AN 在室温条件下储存时,稳定性较好,分解放热导致失控反应的可能性也较小。

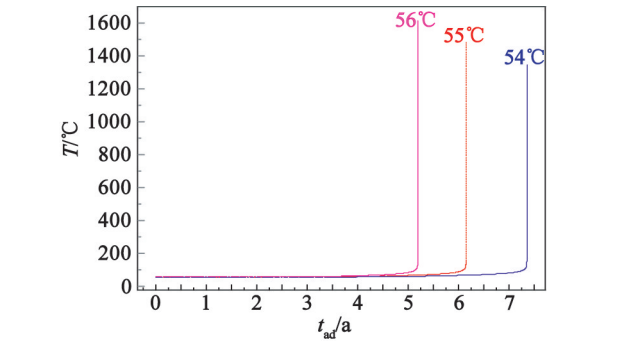


图 7 不同起始温度下对应的失控时间  
Fig.7  $t_{ad}$  at different initial temperatures

依据 Zurich 危险性分析法<sup>[16]</sup>,反应失控的可能性分级标准见表 3。

反应失控的严重度见表 4。  
通常情况 AN 在低于  $55\text{ }^\circ\text{C}$  的常温环境中储存使用。而  $55\text{ }^\circ\text{C}$  储存时  $t_{ad}=6.2\text{ a}>24\text{ h}$ 。根据表 3 表 3 失控反应发生可能性大小评估

Tab.3 Evaluation of the possibility of uncontrolled response

等级	$t_{ad}/h$	失控后果
1	$>24$	很少发生
2	$8\sim24$	偶尔发生
3	$1\sim8$	很可能发生
4	$<1$	频繁发生



表 4 失控反应严重度评估

Tab. 4 Evaluation of the severity of uncontrolled response

等级	$\Delta T_{ad}/^{\circ}\text{C}$	失控后果
1	$\leq 50$ 且无压力影响	单批次的物料损失
2	$50 < \Delta T_{ad} < 200$	工厂短期破坏
3	$200 \leq \Delta T_{ad} < 400$	工厂严重损失
4	$\geq 400$	工厂毁灭性的损失

对失控反应发生的可能性进行分级,该物质的危险等级为 1 级,是很少发生的事件。尽管发生的可能性小,但由于分解反应的  $\Delta T_{ad} = 1\,423.3\,^{\circ}\text{C} > 400\,^{\circ}\text{C}$ ,根据表 4 对失控反应发生严重度进行分级,该物质危险等级为 4 级。失控反应是灾难性的,如果发生将导致严重的后果,造成的损失较大。

2.2.3 热危险性评估

通过 AKTS 软件计算可得  $\Delta T_{ad} = 1\,423.3\,^{\circ}\text{C}$ ,而  $t_{ad} = 6.2\,\text{a} > 24\,\text{h}$ 。利用风险矩阵法对 AN 危险性进行评级。表 5 中,Ⅲ级风险为不可接受风险,Ⅱ级为有条件可接受风险,Ⅰ级为可接受风险。根据表 5 可知,AN 的物质危险性为Ⅱ级,属于有条件可接受风险,可以通过工艺优化或加强管理控制来降低风险等级。

表 5 物质危险性风险等级

Tab. 5 Risk assessment of AN

$t_{ad}/\text{h}$	$\Delta T_{ad} < 50\,^{\circ}\text{C}$	$50\,^{\circ}\text{C} < \Delta T_{ad} < 200\,^{\circ}\text{C}$	$200\,^{\circ}\text{C} < \Delta T_{ad} < 400\,^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{ad} > 400\,^{\circ}\text{C}$
$< 1$	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
$1 \sim 8$	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ
$8 \sim 24$	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
$> 24$	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ

因此,在生产 AN 的过程中,工艺参数需要实时进行监测,并配置相关自动控制系统,以便能够及时对主要参数进行监控并自动调节,保证工艺流程的正常运行。在储存过程中,避免混入其他的物质,如氧化物、无机盐等,这些物质的混入可能会导致加速物质的分解。

3 结论

1) DSC 结果表明,AN 的放热峰出现在  $200 \sim 300\,^{\circ}\text{C}$  间,单位质量放热量持续在  $2\,340 \sim 2\,650\,\text{J/g}$  之间,分解放热量大,具有较高的潜在燃爆危险性。

2) AN 的分解过程中活化能在  $100 \sim 175\,\text{kJ/mol}$

之间变化。当  $0 < \alpha < 0.2$  时,活化能逐渐增加;当  $0.2 < \alpha < 0.8$  时,活化能较为稳定;当  $\alpha > 0.8$  时,活化能逐渐减小。

3) AKTS 软件分析得到,AN 的  $T_{D24} = 137.2\,^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T_{ad} = 1\,423.3\,^{\circ}\text{C}$ 。由于 AN 分解反应的  $\Delta T_{ad} > 400\,^{\circ}\text{C}$ ,危险性非常高,失控反应一旦发生将导致严重后果,在生产、储存、运输的过程中要严格控制条件。

4) 选取  $55\,^{\circ}\text{C}$  作为常温最恶劣的环境,对其进行恒温 and 完全绝热两种情况预测。在恒温条件下,AN 在 12 个月后反应进程为  $2.2 \times 10^{-4}$ ,反应进行的程度较小;在绝热条件下, $t_{ad} = 6.2\,\text{a}$ ,远远大于  $24\,\text{h}$ ;两种情况都表明 AN 在常温储存过程中有较好的稳定性。

5) 利用风险矩阵法对 AN 的物质危险性进行评估,风险等级为Ⅱ级,属于有条件可接受风险。

参 考 文 献

[1] OXLEY J C, SMITH J L, ROGERS E, et al. Ammonium nitrate: thermal stability and explosivity modifiers [J]. Thermochemica Acta, 2002, 384 (1/2): 23-45.

[2] 朱兆华, 郭振龙. 关于硝酸铵爆炸事前评价的探讨 [J]. 中国安全科学学报, 2000, 10 (2): 70-74.

[3] ZHU Z H, GUO Z L. Discussion on the prior evaluation of the explosion of ammonium nitrate [J]. China Safety Science Journal, 2000, 10 (2): 70-74.

[4] 贾凯, 刘祖亮. 粒状硝酸铵改性及其性能测试 [J]. 爆破器材, 2014, 43 (1): 24-28.

[5] JIA K, LIU Z L. Modification of granular ammonium nitrate and its performance test [J]. Explosive Materials, 2014, 43 (1): 24-28.

[6] 王小红, 郭子如. 硝酸铵的热分解和热稳定性研究现状 [J]. 煤矿爆破, 2004 (1): 27-30.

[7] WANG X H, GUO Z R. Researching cases of the thermal decomposition and thermal stabilization of AN [J]. Coal Mine Blasting, 2004 (1): 27-30.

[8] 周方越, 马云. 天津爆炸事故的分析、处理及启示 [J]. 经贸实践, 2016 (1): 329.

[9] 杨丽, 袁治雷, 吕智星, 等. 硝酸铵的热稳定性研究 [J]. 山西化工, 2011, 31 (2): 59-61.

[10] YANG L, YUAN Z L, LÜ Z X, et al. Study on thermal stability of ammonium nitrate [J]. Shanxi Chemical Industry, 2011, 31 (2): 59-61.

[11] 王光龙, 许秀成. 硝酸铵热稳定性的研究 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2003, 24 (1): 47-50.

[12] WANG G L, XU X C. Study on thermal stability of ammonium nitrate [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2003, 24 (1): 47-50.

[ 8 ] 陈网桦,陈利平,吴燕,等. 硝酸及氯离子对高温硝酸铵水溶液热危险性的影响研究[ J ]. 中国安全科学学报,2007,17( 5 ):101-105.  
CHEN W H,CHEN L P,WU Y, et al. Influence of nitrate acid and chlorine ion on the decomposition of ammonium nitrate in aqueous solution with high temperature [ J ]. China Safety Science Journal, 2007, 17 ( 5 ): 101-105.

[ 9 ] 魏亚杰,陈利平,姚森,等.  $MgH_2$  和  $Mg(BH_4)_2$  对硝酸铵热分解过程的影响[ J ]. 火炸药学报,2015,38( 1 ): 59-63.  
WEI Y J,CHEN L P,YAO M, et al. Effect of  $MgH_2$  and  $Mg(BH_4)_2$  on thermal decomposition process of ammonium nitrate[ J ]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015,38( 1 ): 59-63.

[ 10 ] 陆明,刘惠英. 膨化硝酸铵的热分解动力学研究[ J ]. 火炸药学报,2000( 1 ):62-64.  
LU M,LIU H Y. Study on the thermal decomposition kinetics of expanded ammonium nitrate [ J ]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000( 1 ):62-64.

[ 11 ] 沈立晋,汪旭光. 采用加速量热法评价防爆硝酸铵的热稳定性[ J ]. 火炸药学报,2004,27( 2 ):73-76.  
SHEN L J,WANG X G. The thermal stability evaluation of anti-explosive ammonium nitrate by accelerating rate calorimeter[ J ]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2004,27( 2 ):73-76.

[ 12 ] STOESEL F. Thermal safety of chemical processes;risk assessment and process design[ M ]. Wiley,2008.

[ 13 ] 罗云,樊运晓,马晓春. 风险分析与安全评价[ M ]. 北京:化学工业出版社,2004.

[ 14 ] Guidelines for chemical reactivity evaluation and application to process design [ M ]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1995.

[ 15 ] 王犇,马翔,张淑娟,等. 过氧化氢危险性分析[ J ]. 无机盐工业,2013,45( 3 ):15-18.  
WANG B, MA X, ZHANG S J, et al. Analysis on thermal risk of hydrogen peroxide[ J ]. Inorganic Chemicals Industry,2013,45( 3 ):15-18.

[ 16 ] “Zurich” hazard analysis, a brief introduction to the “zurich” method of hazard analysis[ M ]. Zurich Insurance,1987.

声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部