

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.01.007

高温过饱和硝酸铵溶液的爆炸危险性分析*

韩慧雯^① 刘静平^{①②} 王 旭^① 徐 森^{①②}

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检测中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了研究过饱和硝酸铵(AN)溶液的爆炸特性,采用联合国隔板试验研究了不同状态过饱和 AN 溶液的爆轰特性。结果显示:对于常温过饱和 AN 溶液,当 $w(\text{水}) \leq 4\%$ 时,在联合国隔板试验 1(a)中,试验后钢管完全破裂或验证板发生穿孔,即样品能传播爆轰;在联合国隔板试验 2(a)中,试验后钢管部分撕裂或保持完好,验证板轻微变形,有大量样品残余,显示样品对爆炸冲击波刺激不敏感。对于 140 °C 过饱和 AN 溶液,在联合国隔板试验 2(a)中,当 $w(\text{水}) \leq 3.0\%$ 时,试验后样品钢管完全破碎,验证板穿孔,即样品在该试验条件下对爆炸冲击波作用敏感,表明过饱和 AN 溶液具有爆炸性,且温度升高会显著提高其爆炸危险性。

[关键词] 硝酸铵;水溶液;温度;冲击波敏感度;隔板试验;安全;爆炸

[分类号] X932

Explosion Risk Analysis of Supersaturated at High Temperature Ammonium Nitrate Solution

HAN Huiwen^①, LIU Jingping^{①②}, WANG Xu^①, XU Sen^{①②}

① School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

② China National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] To investigate the explosion characteristics of supersaturated ammonium nitrate solution, detonation characteristics of supersaturated ammonium nitrate solutions in different states were studied by using the United Nations (UN) gap test. For the supersaturated ammonium nitrate solution at room temperature, in the UN gap test 1(a), when mass fraction of water is less than 4%, the steel tubes are completely broken or the verification plates are perforated after the tests, that is, the samples can transmit detonation. In the UN gap test 2(a), the steel tubes are partially torn or keep intact after the tests, the verification plates is slightly deformed, and a large number of samples remained, indicating that the samples are not sensitive to the stimulation of explosion shock wave. For the supersaturated ammonium nitrate solution at 140 °C, in the UN gap test 2(a), when mass fraction of water is less than 3%, the steel tubes are completely broken and the verification plates are perforated after the tests, that is, the samples are sensitive to the action of explosion shock wave under such test conditions. It indicates that the ammonium nitrate supersaturated solution is explosive, and the increase of temperature will significantly increase its explosion risk.

[KEYWORDS] ammonium nitrate; aqueous solution; temperature; shock wave sensitivity; the UN gap test; safety; explosion

引言

作为一种常见的工业化学品,硝酸铵(ammonium nitrate, AN)主要用做肥料以及军用含能材料和

民用爆炸物品的基本原料^[1-3]。在正常条件下,固体 AN 相对稳定。然而,AN 具有在遇火、高温、猛烈撞击条件下发生爆炸的危险特性。近年来,发生了多起有关 AN 爆炸的特别重大事故^[4-5]。有关 AN 的研究表明,AN 的爆炸危险性与温度、孔隙率、物理

* 收稿日期:2022-04-28

基金项目:JCJQ 领域基金(0419)

第一作者:韩慧雯(1998 -),女,硕士,主要从事含水硝酸铵的爆炸危险性的研究。E-mail:1359692857@qq.com

通信作者:徐森(1981 -),男,教授,博导,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:xusen@njust.edu.cn

状态(固体或液体)、堆积密度以及添加剂或杂质的存在等有关^[6-7]。

我国是 AN 生产和使用大国。目前,越来越多的企业在工业生产中使用高温过饱和 AN 溶液来代替固体 AN 作为生产原料。相对于 AN 固体,高温过饱和 AN 溶液的使用具有较大的优势^[8]。目前,市场上 AN 溶液的储运温度一般为 125 ~ 140 ℃,质量分数为 92% ~ 94%。HG/T 4523—2013《硝酸铵溶液》要求的质量分数范围为 65% ~ 95%^[9]。

联合国《关于危险货物运输的建议书试验和标准手册》^[10-11](简称橘黄书)中将危险化学品分为 9 大类,其中,爆炸品为第 1 类。具有爆炸性的物质不一定是爆炸品,如果感度足够低,可考虑作为非爆炸品运输。物质是否为爆炸品需依据规定的危险性分级标准进行判定。AN 同时具有爆炸性和氧化性,对于高温过饱和 AN 溶液,主要危险性属于哪一类一直是安全管理人员关注的焦点。因此,本文中,采用联合国隔板试验,对不同浓度、温度的过饱和 AN 溶液的爆炸危险性开展系统研究。

1 试验

1.1 试验样品

工业纯颗粒 AN,内无可燃剂,由湖北凯龙楚兴化工集团有限公司生产。固体 AN 具有较强的吸潮性,配置样品前需作研磨和烘干处理。将颗粒状 AN 在 70 ℃ 下烘干 2 h,研磨过筛。用去离子水配制成 AN 质量分数为 90.0%、92.0%、94.0%、94.5%、95.0%、95.5%、96.0%、97.0%、97.5%、98.0% 的过饱和 AN 溶液。

1.2 爆炸性判定程序和试验方法

根据橘黄书的分类标准及试验方法,采用联合国隔板试验^[12-13]对不同浓度、温度的过饱和 AN 溶液进行爆炸性筛选,确定样品传播爆轰的能力。隔板试验分为试验系列 1 和试验系列 2,在橘黄书中,分别用隔板试验 1(a) 和隔板试验 2(a) 表示。

隔板试验 1(a) 用于判定样品是否具有爆炸性。如图 1 (a) 所示,装满样品的试验钢管垂直放置于验证板上,起爆药柱被胶带固定在钢管顶部和中心。通过雷管引爆药柱,根据钢管和验证板的破坏情况来判断样品是否发生爆炸。若钢管完全破裂或验证板发生穿孔,则判定试验结果为“+”,说明样品具有爆炸性;除此之外的任何情况,试验结果都判定为“-”,即样品没有爆炸性。

隔板试验 2(a) [图 1 (b)] 用于判定样品是否

太敏感,是否应划入爆炸品一类。联合国隔板试验 2(a) 的试验装置与 1(a) 基本相同,只不过在起爆药与钢管间增加了 50 mm 的隔板。起爆药柱被雷管引爆后,产生的冲击波经过隔板的削弱到达样品。试验后,同样根据钢管和验证板的破坏情况来判定试验结果。若试验结果为“+”,则说明样品应归为爆炸品;若试验结果为“-”,则说明样品足够钝感而不被归为爆炸品。

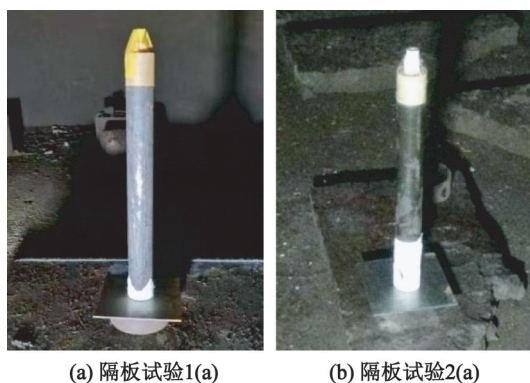


图 1 联合国隔板试验 1(a) 和 2(a) 装置示意图

Fig. 1 Installation diagram of the UN gap test

2 结果与讨论

2.1 联合国隔板试验结果

表 1 ~ 表 4 为过饱和 AN 溶液联合国隔板试验的试验结果。其中, m 为装药量, ρ 为装药密度, l_r 为钢管剩余长度。根据表 1 ~ 表 4 所得试验结果,可以得到不同试验条件下钢管的剩余长度 l_r 与 AN 中水分质量分数 w (水) 的关系,如图 2 所示。

根据图 2 及表 1 ~ 表 4 可知,随着水分质量分数的增加,样品的装药密度相应增加。在同一温度和同一试验系列下,当水分质量分数小于样品整体爆轰的临界值时,钢管完全破碎或验证板发生穿孔,即样品能传播爆轰。一旦水分质量分数超过临界值时,验证板将不发生穿孔,钢管部分撕裂,且有大量样品残余,这表明样品对爆炸冲击波刺激不敏感。同时从图 2 中可以看出,过饱和 AN 溶液样品水分质量分数越高,最终钢管剩余长度越长。这表明水分的加入对 AN 具有钝化作用,水分质量分数的提高使样品的冲击波感度降低。一方面,水分质量分数的提高,使得过饱和 AN 溶液中 AN 的浓度下降,爆炸反应物减少。另一方面,根据炸药理论^[14],炸药的热容影响炸药感度,不活泼惰性液体水的热容较大;因此,过饱和 AN 溶液中水分质量分数越高,热容越大,在受到冲击作用时从热点温度升高到

表 1 常温下不同水分质量分数的 AN 溶液联合国隔板试验 1(a) 的结果

Tab. 1 Results of the UN gap test 1(a) of AN solution with different water contents at room temperature

序号	$w(\text{水})/\%$	隔板厚度/ mm	m/g	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	验证板 是否穿孔	l_r/cm	试验 结果
1 [#]	2.0	0	395.7	0.79	是	0	+
2 [#]	4.0	0	420.4	0.84	是	0	+
3 [#]	4.5	0	475.9	0.95	否	13.5	-
4 [#]	4.5	0	473.1	0.94	否	13.8	-
5 [#]	5.0	0	480.4	0.96	否	14.0	-
6 [#]	5.0	0	481.3	0.96	否	14.5	-
7 [#]	5.5	0	494.6	0.98	否	15.5	-
8 [#]	5.5	0	500.0	1.00	否	18.1	-
9 [#]	6.0	0	513.5	1.02	否	19.5	-
10 [#]	8.0	0	521.2	1.04	否	20.1	-

表 2 常温下不同水分质量分数的 AN 溶液联合国隔板试验 2(a) 的结果

Tab. 2 Results of the UN gap test 2(a) of AN solution with different water contents at room temperature

序号	$w(\text{水})/\%$	隔板厚度/ mm	m/g	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	验证板 是否穿孔	l_r/cm	试验 结果
1 [#]	0	50	395.7	0.79	否	40.0	-
2 [#]	2	50	400.2	0.80	否	40.0	-
3 [#]	5	50	480.2	0.96	否	40.0	-

表 3 140 ℃ 下不同水分质量分数的 AN 溶液联合国隔板试验 1(a) 的结果

Tab. 3 Results of the UN gap test 1(a) of AN solution with different water contents at 140 ℃

序号	$w(\text{水})/\%$	隔板厚度/ mm	m/g	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	验证板 是否穿孔	l_r/cm	试验 结果
1 [#]	2.5	0	441.3	0.88	是	0	+
2 [#]	3.0	0	459.1	0.91	是	0	+
3 [#]	4.0	0	599.0	1.19	否	7.7	-
4 [#]	4.5	0	623.0	1.24	否	16.5	-
5 [#]	5.0	0	637.0	1.27	否	17.8	-
6 [#]	5.5	0	648.0	1.29	否	22.6	-
7 [#]	6.0	0	654.0	1.30	否	23.5	-
8 [#]	8.0	0	669.3	1.33	否	25.6	-

表 4 140 ℃ 下不同水分质量分数的 AN 溶液联合国隔板试验 2(a) 的结果

Tab. 4 Results of the UN gap test 2(a) of AN solution with different water contents at 140 ℃

序号	$w(\text{水})/\%$	隔板厚度/ mm	m/g	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	验证板 是否穿孔	l_r/cm	试验 结果
1 [#]	0	50	388.6	0.77	是	0	+
2 [#]	2.0	50	408.9	0.81	是	0	+
3 [#]	2.5	50	443.5	0.88	否	13.3	-
4 [#]	2.5	50	516.0	1.03	是	3.2	+
5 [#]	2.5	50	532.0	1.06	否	9.1	-
6 [#]	2.5	50	548.0	1.09	否	9.2	-
7 [#]	2.5	50	559.0	1.11	否	8.3	-
8 [#]	3.0	50	565.2	1.12	否	14.2	-
9 [#]	3.0	50	575.3	1.14	否	13.3	-
10 [#]	4.0	50	579.8	1.15	否	23.2	-

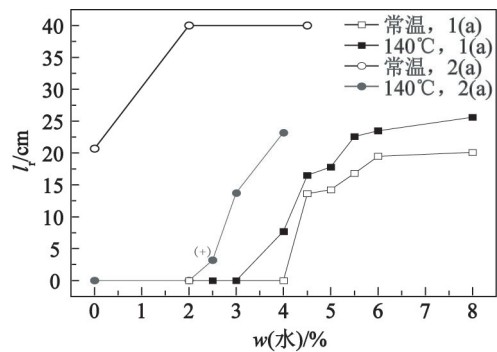
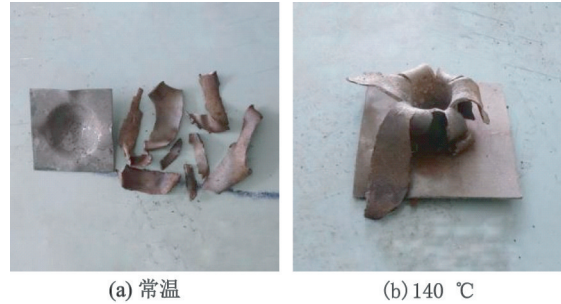


图 2 钢管的剩余长度与样品水分质量分数的关系

Fig. 2 Relationship between the residual length of steel tube and the water content of samples

爆发点所需能量越多,从而导致感度降低,出现半爆、拒爆现象。

在隔板试验 1(a) 中,AN 质量分数 98.0% 和 96.0% 的样品试验结果为“+”,样品具有爆炸性。AN 质量分数 95.5%、95.0%、94.5%、94.0% 和 92.0% 的样品在常温条件下对药柱的爆炸冲击波作用不敏感,试验结果为“-”。由此可见,在隔板试验 1(a) 中,常温过饱和 AN 溶液不发生爆炸的临界水分质量分数为 4.0%。当样品温度上升到 140℃,AN 质量分数 97.5% 和 97.0% 的 AN 试验结果为“+”;AN 质量分数 96.0%、95.5%、95.0%、94.5%、94.0% 和 92.0% 的 AN 试验结果为“-”。因此,在隔板试验 1(a) 中,140℃ 的样品不发生爆炸的临界水分质量分数为 3%。对比发现,对于 AN 质量分数 96.0% 的样品,温度升高到 140℃,传播爆轰的能力却下降。如图 3 所示,对于 AN 质量分数 96.0% 的样品,常温下钢管试验后完全破碎,而 140℃ 下钢管试验后仍有 7.7 cm 的剩余。这是因为随着水分质量分数的升高,样品在 140℃ 下形态发生改变,试验中发现,当 $w(\text{水}) \geq 4\%$ 时,样品已趋近于熔融态、状似浓稠冰沙,如图 4(a) 所示。这使得样品密度大大增加,引起装药量增大。根据热点



(a) 常温

(b) 140℃

图 3 不同温度下 AN 质量分数 96.0% 的样品隔板试验 1(a) 结果

Fig. 3 Results of the UN gap test 1(a) of the sample with AN mass fraction of 96.0% at different temperatures

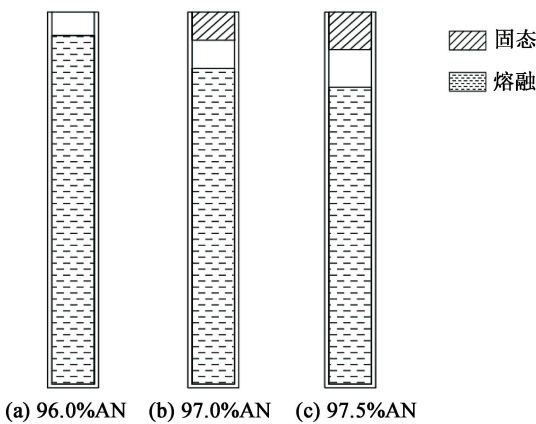
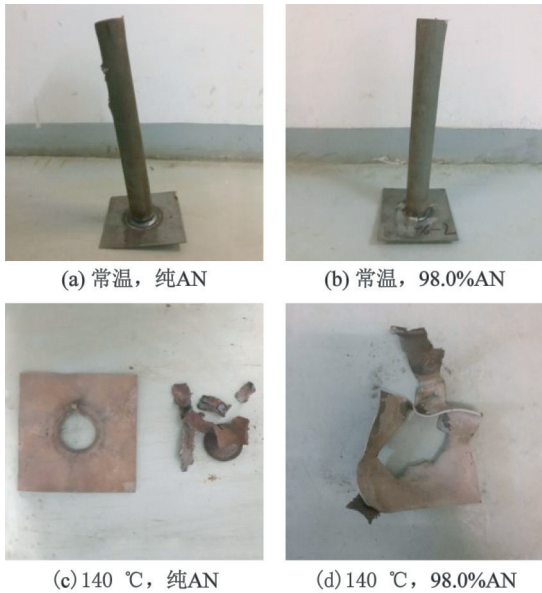


图 4 140℃ 下样品在钢管中的状态示意图

Fig. 4 The state of samples in steel tube at 140℃

理论,当密度过大时,单位质量样品中的气泡体积及个数大大减少,因此起爆热点减少。此外,密度过大将使得样品中 AN 颗粒之间的孔隙减少,炸药化学反应的氧化剂和可燃剂之间的扩散速率变缓,波阵面后化学反应区间的化学反应减缓,导致起爆感度下降^[13]。

在隔板试验 2(a) 中,纯 AN 和 AN 质量分数 98.0%、95.0% 的样品的试验结果为“-”。依据爆炸性筛选试验判定标准可以认定:当 $w(\text{水}) \leq 4\%$ 时,样品在常温下具有爆炸性,但足够钝感而不被归类为爆炸品。当样品温度为 140℃ 时,纯 AN 和 AN 质量分数 98.0% 的样品的试验结果为“+”,钢管完全破碎,且验证板穿孔。温度升高显著提高了样品的冲击波感度(如图 5)^[15]。



(a) 常温, 纯AN

(b) 常温, 98.0%AN

(c) 140℃, 纯AN

(d) 140℃, 98.0%AN

图 5 不同温度下纯 AN 和 AN 质量分数 98.0% 的样品的隔板试验 2(a) 结果

Fig. 5 Results of the UN gap test 2(a) of AN and the sample with AN mass fraction of 98.0% at different temperatures

AN 质量分数 97.5% 的样品,5 次试验中有一次试验结果为“+”(如图 6),其余为“-”;AN 质量分数 97.0% 和 96.0% 的样品,试验结果为“-”。试验中发现,AN 质量分数 97.0% 和 97.5% 的样品加热过程中,管口顶部都会产生 3~4 cm 的盐桥,分别如图 4(b)、图 4(c) 所示;使用玻璃棒插入后,可以看到盐桥下方产生中空,钢管底部为熔融态的样品。这可能导致试验结果出现偏差。在后续试验中,将 AN 质量分数 98.0%、97.5%、97.0%、96.0% 的样品温度降低到 110 ℃ 进行验证,结果见表 5。

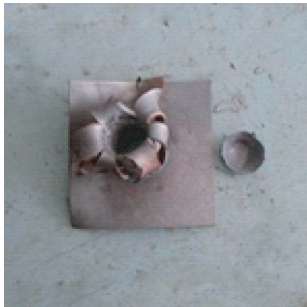


图 6 140 ℃ 下 AN 质量分数 97.5% 的样品隔板试验 2(a) 结果(“+”结果)

Fig. 6 Results (“+”result) of the UN gap test 2(a) of 97.5% AN sample at 140 ℃

由表 5 可知,AN 质量分数 97.5% 的样品两组试验结果均为“+”,AN 质量分数 97.0% 的样品与 AN 质量分数 97.5% 的样品试验结果一致,都在 110 ℃ 时发生爆轰、在 140 ℃ 产生未爆炸的虚假结果。由此可见,在 50 mm 隔板条件下 140 ℃ 时 AN 质量分数 97.0% 和 97.5% 的样品对药柱的爆炸冲击波作用敏感。在隔板试验 2(a) 中,140 ℃ 时样品不发生爆炸的临界水分质量分数为 3.0%。依据爆炸性筛选试验判定标准可以认定:当 $w(\text{水}) \leq 3.0\%$ 时,样品在 140 ℃ 下能发生整体爆轰。

2.2 UN 隔板试验结果的偏差原因分析

在隔板试验 2(a) 中,140 ℃ 时 AN 质量分数 97.5% 的样品出现了“+”和“-”两种结果。试验

中发现,该温度下 AN 质量分数 97.5% 和 97.0% 的样品钢管顶部发生结块,产生盐桥现象。后续试验中,降低样品温度到 110 ℃,结果显示:AN 质量分数 97.5% 和 97.0% 的样品都出现在 110 ℃ 发生爆轰、在 140 ℃ 产生未爆炸的虚假结果。这表明盐桥的产生对试验结果造成偏差。因此,为了研究盐桥造成试验结果出现偏差的原因,对 110 ℃ 和 140 ℃ 条件下 AN 质量分数 97.0%、97.5% 和 98.0% 的样品,取试验钢管的上层盐桥进行密度测试。

采用 UltraPyc 1200e 型自动密度仪对不同状态下盐桥样品进行了密度分析,结果见图 7。

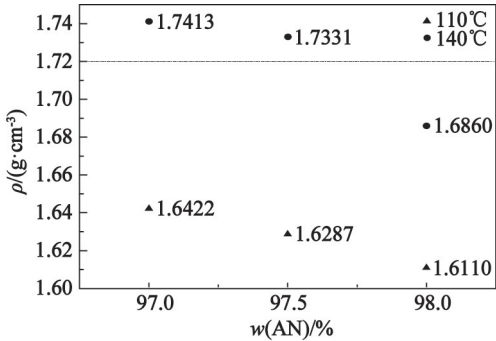


图 7 盐桥密度测试结果

Fig. 7 Results of salt bridge density test

从图 7 可以看出,盐桥的密度与样品中水分质量分数和样品温度有关。相同温度条件下产生的盐桥,密度随水分质量分数的增大而增大。而对于相同水分质量分数的样品,在 140 ℃ 下产生的盐桥密度明显高于 110 ℃ 下的盐桥密度。在 140 ℃ 下,AN 质量分数 97.0% 和 97.5% 的样品的盐桥密度甚至超过了 AN 的晶体密度($\rho_{\text{AN}} = 1.72 \text{ g/cm}^3$)。装药密度越大,AN 颗粒之间相互挤压越密实,颗粒的自由表面积越小,从而不利于热点的形成。装药密度过大时,气体产物也不易扩散,起爆所需要的冲击波强度大大减小,不利于爆轰波传爆,从而发生熄爆^[16]。

根据盐桥理论^[17],当 AN 吸湿以后,会在表面

表 5 110 ℃ 下不同水分质量分数的 AN 溶液联合国隔板试验 2(a) 结果							
Tab. 5 Results of the UN gap test 2(a) of AN solution with different water contents at 110 ℃							
序号	w(水)/%	隔板厚度/mm	m/g	ρ/(g·cm ⁻³)	验证板是否穿孔	l _r /cm	试验结果
1 [#]	2.0	50	398.9	0.79	是	0	+
2 [#]	2.5	50	415.6	0.83	是	0	+
3 [#]	2.5	50	411.5	0.82	是	0	+
4 [#]	3.0	50	420.1	0.84	是	0	+
5 [#]	4.0	50	443.6	0.88	否	12.6	-

形成一层饱和水溶液的膜,相邻颗粒间通过表面张力的作用形成液桥。一旦环境湿度、温度降低,水溶液膜中 AN 的溶解度降低,将逐渐变成饱和液膜,并从液膜中析出 AN。析出的 AN 颗粒间紧密地连接在一起,结块硬化,形成盐桥。

样品温度会对生成的盐桥密度大小造成影响,主要是因为温度会对 AN 的吸湿性和晶变性产生影响^[18],而这两种特性是导致 AN 结块硬化的主要原因。AN 的吸湿性是盐桥产生的根本原因,温度越高时,AN 的吸湿点越低^[19],因此 140 ℃ 的样品较 110 ℃ 的样品吸湿性更强;由盐桥理论可知,生成的盐桥密度也将更大。另一方面,温度变化会使 AN 各晶型间相互转变,并伴随有晶变效应(如体积、晶体结构、热容等参数发生变化)^[20-21]。表 6 为 AN 在晶型转变过程中的晶变效应,可以发现,III→IV 的晶型转变体积变化最大,并且体积随温度的变化是不可逆的^[20]。研究还发现,AN 的吸湿可加速 AN 晶型转变,降低晶型转变点^[22-23]。在含水量和温度的共同作用下,AN 颗粒在钢管顶部结块硬化,形成盐桥,并由于晶变效应在钢管顶部的有限空间内体积发生膨胀,造成 AN 颗粒间产生塑性变形,最终导致盐桥密度显著增大。

表 6 硝酸铵晶变效应

Tab.6 Crystallization effect of AN^[31]

晶型转变	转变温度 $t_{\text{转}}/^\circ\text{C}$	体积变化率/ %	热值 $q/$ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
熔融态→I	169.6	—	—
I→II	125.2	2.14	-52.7
II→III	84.2	-1.31	-16.7
III→IV	32.3	3.79	-19.2
IV→V	-16.9	-2.72	-6.7

3 结 论

- 1) AN 是一种具有弱爆炸性的物质,水分对 AN 具有钝化作用,水分质量分数增加,AN 的爆炸性降低。对于常温过饱和 AN 溶液,在联合国隔板试验 1(a)中,当 $w(\text{水}) \leq 4.0\%$ 时,试验结果为“+”,样品具有爆炸性。
- 2) 对于 140 ℃ 的过饱和 AN 溶液,在隔板试验 2(a)中,当 $w(\text{水}) \leq 3.0\%$ 时,试验结果为“+”,即样品在该试验条件下对爆炸冲击波作用敏感,表明过饱和 AN 溶液具有爆炸性,且温度升高会显著提高其爆炸危险性。
- 3) 按照联合国橘黄书的分类标准:过饱和 AN

溶液[$w(\text{水}) \leq 3\%$]属于第 1 类危险化学品,即爆炸品,UN0222,1.1D;过饱和 AN 溶液[$4\% < w(\text{水}) < 10\%$]属于 5.1 项,氧化剂,UN2426。

参 考 文 献

[1] 吕春绪,刘祖亮,倪欧琪. 工业炸药[M]. 北京:兵器工业出版社,1987: 4-6.

[2] 王尹军,汪旭光. 乳胶基质抗冲击波性能研究[J]. 兵工学报,2005, 26(5): 697-701.
WANG Y J, WANG X G. A study on the anti-shockwave performance of emulsion matrix [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 697-701.

[3] 何劲松,何欣扬. 对乳化基质快速敏化的几点认识[J]. 爆破器材,2008, 37(1): 12-14.
HE J S, HE X Y. Some cognition on fast sensitization of emulsified bases [J]. Explosive Materials, 2008, 37(1): 12-14.

[4] 刘佩锋. 天津“8·12”火灾爆炸事故的警示[J]. 江苏警官学院学报,2015, 30(5): 129.

[5] 柯杉. 贝鲁特港大爆炸敲响警钟[J]. 上海安全生产,2020(9): 52.

[6] DERIBAS A A, SIMONOV V A. Detonation properties of ammonium nitrate [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1999, 35(2): 203-205.

[7] PRESLES H N, VIDAL P, KHASAINOV B. Experimental study of the detonation of technical grade ammonium nitrate [J]. Comptes Rendus Mecanique,2009, 337(11/12): 755-760.

[8] 王亚,田丰,殷继刚. 硝酸铵水溶液在国内工业炸药中应用效益分析[C]//第十六届中国科协年会论文集. 昆明:中国科学技术协会,2014: 1-5.

[9] 中国石油和化学工业联合会. 硝酸铵溶液: HG/T 4523—2013[S]. 北京:化学工业出版社,2014.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Ammonium nitrate solution: HG/T 4523—2013[S]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[10] Recommendations on the transport of dangerous goods: model regulations[M]. 22nd rev. ed. New York and Geneva: United Nations, 2022.

[11] 吕春绪. 工业炸药理论[M]. 北京:兵器工业出版社,2003: 174-226.

[12] 谭柳. 添加剂对硝酸铵安全性能的影响及其规律研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.
TAN L. The effect of additives on the safety performances of ammonium nitrate and its regularity [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019.

[13] SCHWARTZ A C. Flyer plate performance and the ini-

tiation of insensitive explosives by flyer plate impact [TATB]: SAND-75-0461 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia Labs., 1975.

[14] 夏良洪, 谭柳, 徐森, 等. 粒径对硝酸铵爆炸特性的影响[J]. 爆破器材, 2015, 44(2): 32-35.
XIA H L, TAN L, XU S, et al. Effects of particle size on the explosibility of ammonium nitrate [J]. Explosive Materials, 2015, 44(2): 32-35.

[15] 黄云川. 乳化炸药爆轰感度性能影响因素研究[J]. 中国新技术新产品, 2021(17): 146-148.

[16] 黄文尧, 颜事龙. 炸药化学与制造[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 120-157.
HUANG W Y, YAN S L. Explosives chemistry and production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 120-157.

[17] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984.

[18] 刘哲峰, 李旭祥, 邹忠良. 硝酸铵的结块与防止[J]. 应用化工, 2006, 35(6): 464-466, 473.
LIU Z F, LI X X, ZOU Z L. Agglomeration and anti-

agglomeration of ammonium nitrate[J]. Applied Chemical Industry, 2006, 35(6): 464-466, 473.

[19] 霍尚义. 硝酸镁对硝酸铵结块性的影响[J]. 甘肃师范大学学报(自然科学版), 1964(2): 34-47.

[20] 宋元达, 汪旭光. 添加剂对粉状硝酸铵的抗结块性研究[J]. 有色金属, 1993, 45(2): 20-25.
SONG Y D, WANG X G. Anticaking effect of additives on powdered ammonium nitrate [J]. Nonferrous Metals, 1993, 45(2): 20-25.

[21] 刘东胜. 相稳定硝酸铵相转变影响因素研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[22] 曾贵玉. 炸药微观结构对性能的影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[23] 蔡敏敏, 陈天云, 黄建祯, 等. 无机盐添加剂对硝酸铵晶变及结块性的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2000, 24(1): 76-79.
CAI M M, CHEN T Y, HUANG J Z, et al. Effect of inorganic additives on AN polymorphism and caking[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(1): 76-79.



(上接第 36 页)

1)长径比对输出峰值压力和达到峰值压力的时间有一定影响。具体表现为,随着长径比的减小,测得的平均峰值压力和达到峰值压力的平均时间均变小。

2)对于长径比 2.0 : 1.0、1.5 : 1.0 和 1.0 : 1.0 的密闭爆发器,测得的输出峰值压力和达到峰值压力时间无显著性变化。对于长径比 1.0 : 1.0 的密闭爆发器,测得的标准差最小,适合作为产品质量一致性检验用密闭爆发器的长径比。

3)推荐密闭爆发器的测点设置在长度方向的中点处。

参 考 文 献

[1] 夏建才. 火工品制造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.

[2] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[3] 汪靖程, 李燕华, 温玉全, 等. 典型点火器不同装药量下输出冲击试验与分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(2): 16-21.
WANG J C, LI Y H, WEN Y Q, et al. Test and analysis

of the output shock under different loading doses of a typical igniter [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2): 16-21.

[4] 梁晓爱, 聂建新, 王帅, 等. 密闭爆发器中 Al/KClO₄ 点火器的输出性能研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1513-1519.
LIANG X A, NIE J X, WANG S, et al. Research on output performance of Al/KClO₄ igniter in closed bomb [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(8): 1513-1519.

[5] 湛赞, 梁晓爱, 严楠, 等. B/KNO₃ 激光点火内弹道仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1): 141-144, 149.
ZHAN Z, LIANG X A, YAN N, et al. The interior ballistic simulation of B/KNO₃ by laser ignition [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 141-144, 149.

[6] 周奎军, 陈红俊, 叶淑琴, 等. 热通量测量在 B/KNO₃ 点火药装药结构设计中的应用[J]. 兵工学报, 2009, 30(8): 1030-1034.
ZHOU K J, CHEN H J, YE S Q, et al. The application of thermal flux measurement to design of B/KNO₃ igniting charges [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(8): 1030-1034.