

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180023

硝酸铵的最小点火压力影响因素

王旭¹, 徐森^{1,2}, 田曜恺¹, 刘大斌¹

(1 南京理工大学化工学院, 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: 在硝酸铵类炸药相关的生产、管理过程中, 最小点火压力 (MBP) 已经成为重要的安全参数。工业炸药中硝酸铵常常与油相混合, 为了研究混油硝酸铵在生产、储存及运输中的安全性, 运用 MBP 值对其进行安全评估。使用热丝点火的方法探究温度及油含量对硝酸铵类炸药 MBP 值的影响。常温下对油含量为 0~10% 的 11 组样品进行 MBP 值测量, 样品的 MBP 值从大于 6 MPa, 不断降低至 1.59 MPa。并在 20、75、100℃ 下分别对不同油含量的样品进行 MBP 值测量, 油含量为 4%、6%、8%、10% 样品的 MBP 值分别从 2.25、2.01、1.75、1.59 MPa 降低至 1.51、1.05、0.41、0.21 MPa。实验结果表明, 常温下, 混油硝酸铵样品的 MBP 值随油含量的升高而降低; 控制样品的组分不变, 得到样品在不同初始温度下的 MBP 值, 则温度升高, 混油硝酸铵的 MBP 值有明显的降低趋势。

关键词: 硝酸铵; 油含量; 最小点火压力; 安全; 混合; 热解

中图分类号: X 932

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 08—3754—09

Factors affecting the minimum burning pressure of ammonium nitrate

WANG Xu¹, XU Sen^{1,2}, TIAN Yaokai¹, LIU Dabin¹

(1 School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

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

Abstract: Ammonium nitrate based explosives do not undergo self-sustained combustion when the pressure is lower than some threshold value, which is called the minimum burning pressure (MBP). The MBP has become a significant parameter in the production and management of ammonium nitrate based explosives. In order to study the effect of oil content on the safety of ammonium nitrate, the MBP values of samples were measured by pressurized vessel test. At room temperature, samples with 0 to 10% oil content were measured, and the MBP values of the samples were reduced from 6 MPa to 1.59 MPa. Samples with 4%, 6%, 8% and 10% oil content were measured at 20℃, 75℃ and 100℃, and the MBP values of the samples decreased from 2.25, 2.01, 1.75 and 1.59 MPa to 1.51, 1.05, 0.41 and 0.21 MPa, respectively. The results showed that the MBP values decreased with the increase of oil content at normal temperature. In addition, the MBP values of the ammonium nitrate mixed with oil decreased obviously when the initial temperature was increased.

Key words: ammonium nitrate; oil content; minimum burning pressure; safety; mixing; pyrolysis

引 言

硝酸铵在化肥工业以及爆炸品工业中被广泛

应用^[1-3]。硝酸铵可以与燃料油混合制作成铵油炸药 (ANFO)^[4-5], 并且是推进剂及其他工业炸药中重要的组成部分, 其安全特性必须受到广泛关注^[6-9]。

2018-01-09 收到初稿, 2018-05-07 收到修改稿。

联系人: 徐森。第一作者: 王旭 (1994—), 男, 硕士。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51174120); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

Received date: 2018-01-09.

Corresponding author: XU Sen, 1062811864@qq.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51174120) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

一般情况下纯硝酸铵十分钝感,因而十分稳定并相对安全,但还原剂或一些其他成分的添加往往会大幅度地提高硝酸铵体系的敏感度^[10-11],因而在硝酸铵有关的生产储存与运输中,尤其民用的铵油炸药及乳化炸药系列中,往往存在着潜在的危险性。

爆炸品往往具有热敏感性^[12-13],一些爆炸品在遇到高温时会起火燃烧。以硝酸铵为主要成分的炸药在燃烧的初期阶段是吸热的^[14-15]并且不能自行传播,即使后续阶段通常是放热的,它们也无法继续反应,除非处在足够高的压力氛围中。因此,对于这类爆炸品,当低于一个压力极限值时,它们的稳定燃烧将无法持续进行,这就是最小点火压力(MBP)。在硝铵类炸药相关的安全生产及管理过程中,MBP值已经成为了重要的安全参数^[16],MBP值较大时,其安全性能较高。

为制定硝铵类炸药的安全评估标准,国内外已对不同类型的硝铵类炸药的成品及半成品的MBP值的测试进行了探索。并且MBP值的多种测试方法已经得到发展^[16-20]。其中Turcotte等研制出了测试MBP值的压力容器^[16],并制定了电热丝加热的实验方法^[17]。通过实验研究,Turcotte等^[21-24]发现MBP值受样品的粒径、装药半径及添加剂等多种因素影响。徐志祥^[25]通过测试发现电热丝的尺寸对MBP值无显著影响,并通过电镜扫描图,对乳化炸药的MBP值存在的原理进行了适度推测。

工业炸药中,常常需要在硝酸铵中加入定量柴油来获得更好的能量和性能^[26]。同时铵油炸药作为较常用到的露天爆破用工业炸药,它的安全性能评价尤为重要^[27-28]。本研究在结合已有的实验结果的基础上,对硝酸铵直接与定量柴油混合所存在的MBP值,以及硝酸铵混合柴油的柴油含量及样品初始温度对MBP值的影响进行了探索。研究结果对铵油炸药系列以及乳化炸药系列等工业炸药的实际生产、储存、运输等过程中的安全操作具有一定的指导意义。

1 实验装置及实验方法

实验装置及测试方法参考了加拿大爆炸品研究所(CERL)^[15-18]。

1.1 实验仪器

实验的主要仪器包括:恒流加热电源(固纬-PSP2010),压力变送器(MIK-P300),无纸数据记

录仪(MIK-200D),数显式压力表(MIK-Y190),容积为4.2 L的压力容器。实验采用热丝点火作为点火源,加热点火热丝为:直径0.5 mm、长度8.0 cm的镍镉电热丝,加热恒定电流为10.0 A,加热功率为 (100 ± 5) W。

1.2 实验装样

图1为样品装样示意图。10~12 g样品填充于内置电热丝的钢管中,钢管内径16 mm,钢管长度7.6 cm。样品填充完毕,用陶瓷盖子封住钢管的两端,然后用铜导线连接到电热丝两端,并以铜导线作为支撑连接到电极上。

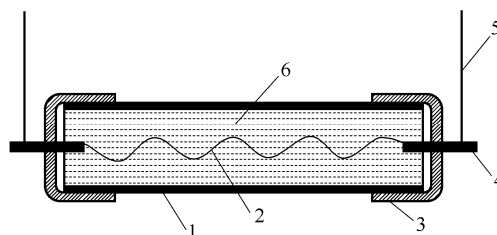


图1 样品装样示意图

Fig. 1 Sample loading schematic

1—hollow steel pipe; 2—Ni-Cd hot wire; 3—ceramic cover; 4—copper studs; 5—copper wire; 6—sample

1.3 实验系统及测试过程

图2为压力容器实验系统示意图。将连接至电极的装样钢管置于压力容器中,密封高压容器,并用高压气瓶往压力容器中充高压空气以施加一定压力,然后关闭压力容器的阀门保压。通过恒流加热电源给电热丝施加10 A的恒定电流使电热丝达到高温并作为钢管内样品的点火源对样品持续加热引燃1~4 min。停止加热后,卸除高压容器内的压力,取出装有样品的钢管观察实验现象,并结合压力传

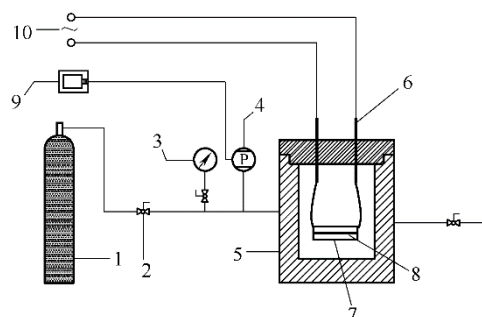


图2 压力容器实验系统

Fig. 2 System of pressurized vessel test

1—high-pressure tank; 2—high pressure valve; 3—pressure gauge; 4—pressure transmitter; 5—metal pressure container; 6—copper electrode; 7—hollow steel pipe; 8—Ni-Cd hot wire; 9—data-acquisition instrument; 10—power supply

感器测得的压力变化,判断出是否燃烧。通过改变压力,测出样品的 MBP 值。

1.4 实验结果的判定

实验后,观察实验后的样品,并测试计算出实验前后样品的质量变化,当质量变化大于等于 60% 时,并且测试过程中,压力传感器采集到的压力数值有较大幅度的升高(在本实验中当测得的压力变化在 0.10 MPa 以上时即可),即判定为燃烧。实验后样品是否燃烧的现象判定如图 3 所示。发生燃烧的样品钢管中有较少的残余,并有大量的液珠附着在钢管内壁,未发生燃烧的样品钢管有大量的样品剩余。

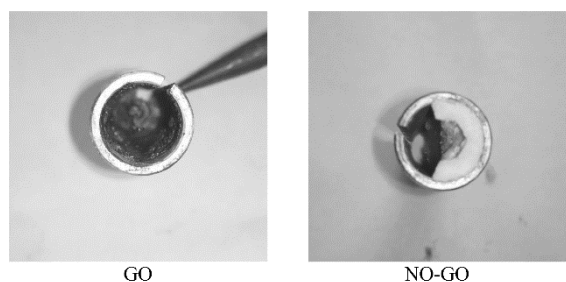


图 3 实验后样品燃烧判定示例

Fig. 3 Sample combustion judgment examples

2 实验结果与讨论

2.1 常温下硝铵混油的 MBP 值测定

选取含柴油量为 0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10% 的硝酸铵样品,在常温条件下((20±5)℃),分别对每组样品进行 MBP 值的测定,由压力传感器反馈的压力容器中的压力数值,并整理分析后,得出压力随时间变化的关系曲线,如图 4 所示。

将图 4 中所得压力数据曲线结合实验后的反应现象整理可判断出不同混油量下样品的 MBP 值,如表 1 所示。

根据图 4 及表 1 所得实验结果,可以得到常温下硝酸铵混柴油的 MBP 值随油含量的变化的关系曲线,如图 5 所示。

根据图 4、图 5 及表 1 所显示的测试结果,混合柴油的硝酸铵满足 MBP 值测量的基本条件,同时能够得出相对准确的 MBP 值。Turcotte 等^[16]与徐志祥^[25]在对普通乳胶基质、乳化炸药等的 MBP 值测定时,点燃时间一般在 1 min 内。而从图 3 中可以看出混油硝酸铵的 MBP 值测定与普通乳胶基质、乳化炸药等的 MBP 值的测量稍有不同。样品中固态颗粒状硝酸铵在混定量柴油后的 MBP 值测定时,

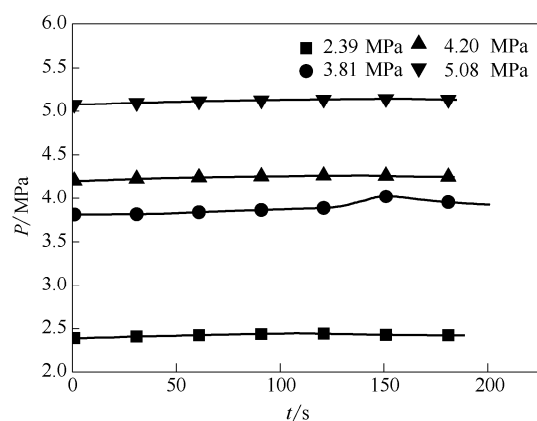
电热丝引燃样品的时间要显著长于乳化状态的硝酸铵样品,一般点燃时间要达到 1~4 min。这主要是因为混油硝酸铵的主要形态仍为颗粒状,且颗粒间存在较大的间隙,很难形成稳定的燃烧表面。实验测定时,在电热丝引燃的过程中,电热丝周围的颗粒会受热与柴油及热分解生成的部分水形成一种混合的状态,在较高温度下达到一种较为均匀的乳化状态,并当处在足够高的压力氛围中时,可以形成较为稳定的燃烧表面,进一步释放热量并推动整体样品的持续燃烧。

表 1 常温((20±5)℃)下不同油含量的混油硝酸铵的 MBP 值测定结果

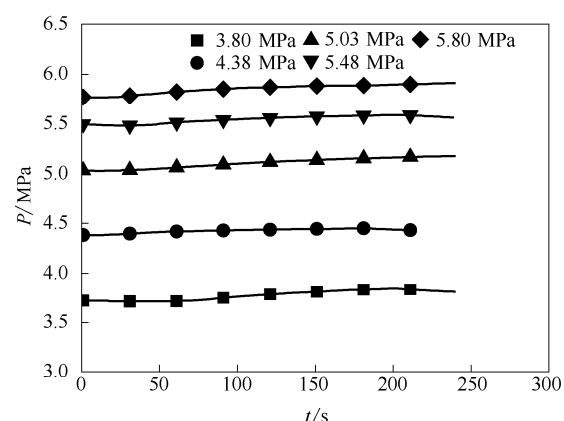
Table 1 MBP of oil-containing ammonium nitrate with different oil content under room temperature ((20±5)℃)

Code	Oil content/ %	Ammonium nitrate content/%	Starting temperature/℃	MBP value/MPa
1	0	100	20	>6
2	1	99	20	>6
3	2	98	20	>6
4	3	97	20	3.15±0.1
5	4	96	20	2.25±0.1
6	5	95	20	2.10±0.1
7	6	94	20	2.01±0.1
8	7	93	20	1.89±0.1
9	8	92	20	1.75±0.1
10	9	91	20	1.63±0.1
11	10	90	20	1.59±0.1

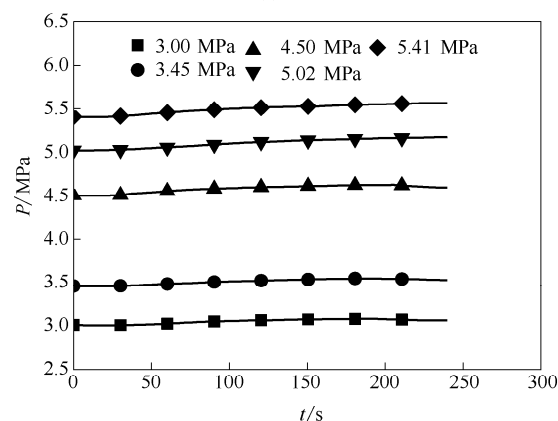
常温下,当油含量≤3%时,样品有较高的 MBP 值,均在 6 MPa 以上,因而具有较高的安全性。当油含量≥4%时,MBP 值开始低于 6 MPa,并且油含量在 4%~10%之间,样品的 MBP 值逐渐降低。因而可以看出,在油含量≤10%的情况下,柴油的加入对硝酸铵具有明显的敏化作用,并且随着油含量的增加,体系可以在相对较低的压力条件下达到稳定燃烧。胡洋勇等^[29]通过量热仪的测试,得出硝酸铵混柴油体系的表现活化能随着柴油含量的增加而下降,发生热分解的难度下降,柴油对硝酸铵体系的分解有促进作用的结果,与本实验的结果基本一致。同时在样品的 MBP 值测量中,柴油的加入,一方面可作为燃烧剂使得样品在反应中具有了更高的热值,弥补了硝酸铵进一步反应时所需要吸收的热量,推动样品的反应从热解向燃烧的转变;另一方面,少量柴油的加入使得样品有更好的氧平衡,反应更加完全。



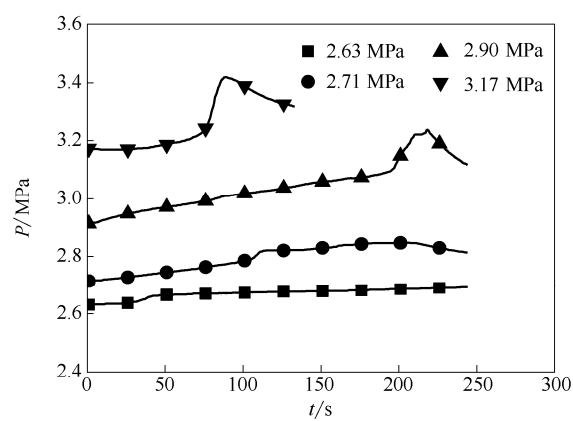
(a) 0% oil



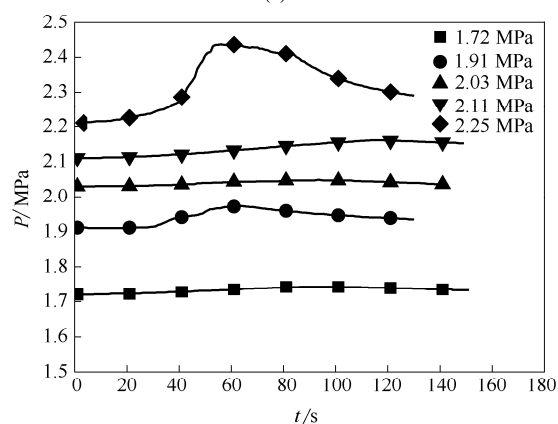
(b) 1% oil



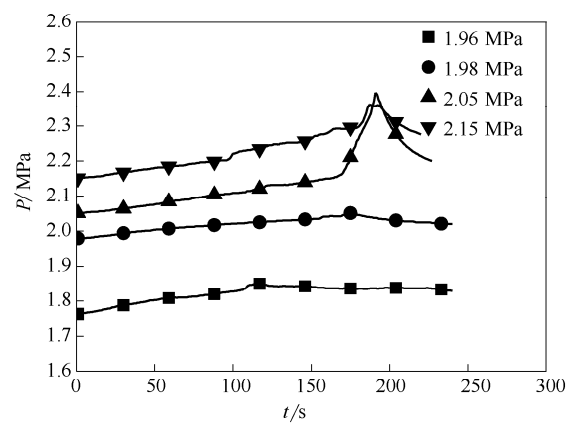
(c) 2% oil



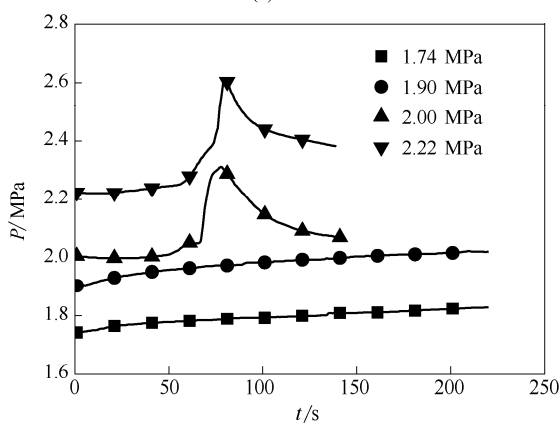
(d) 3% oil



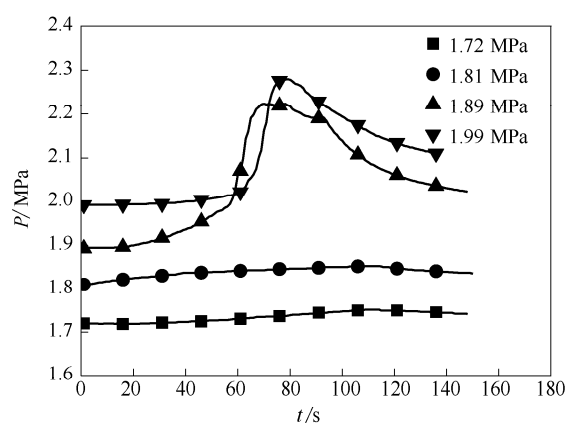
(e) 4% oil



(f) 5% oil



(g) 6% oil



(h) 7% oil

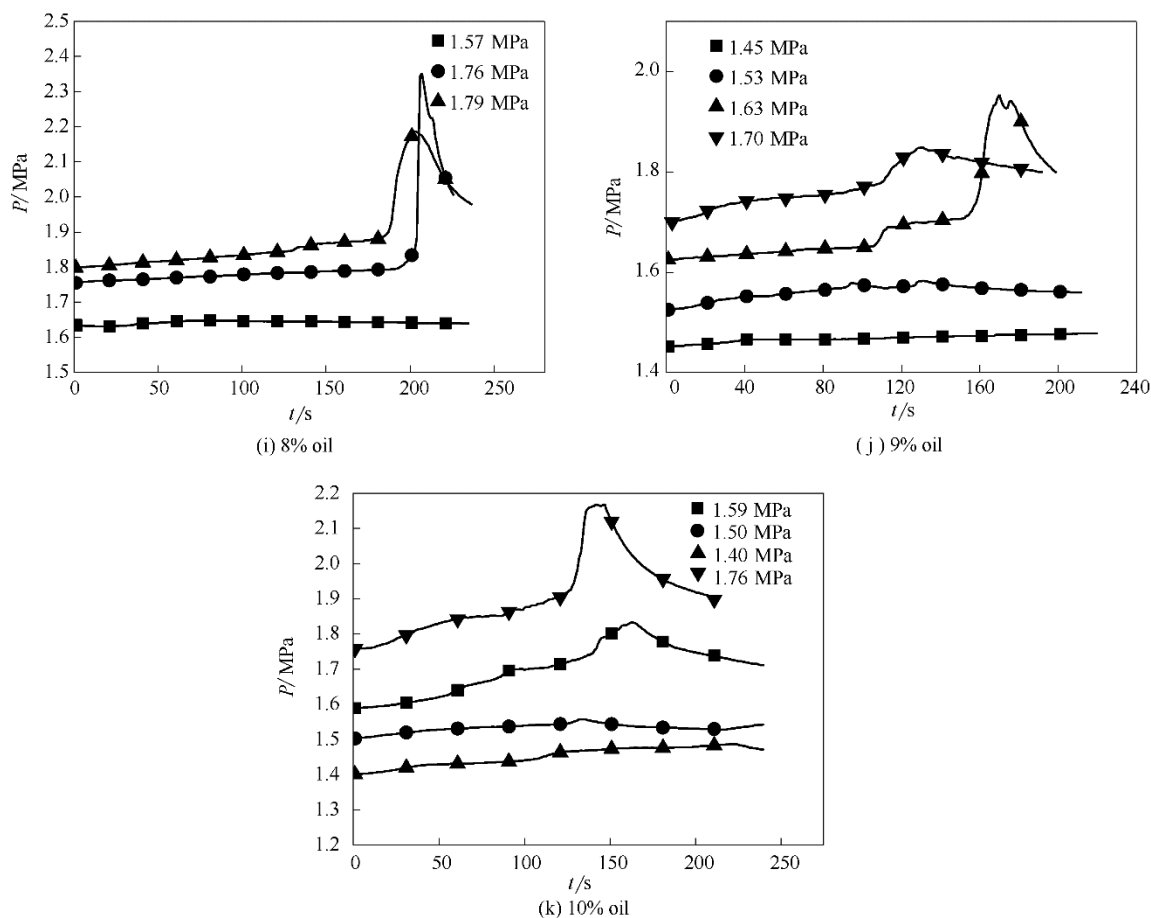


图 4 常温 ((20±5)°C) 下不同油含量的混油硝酸铵的实验过程压力变化

Fig. 4 Pressure changes of experimental process of oil-containing ammonium nitrate with different oil content under room temperature ((20±5)°C)

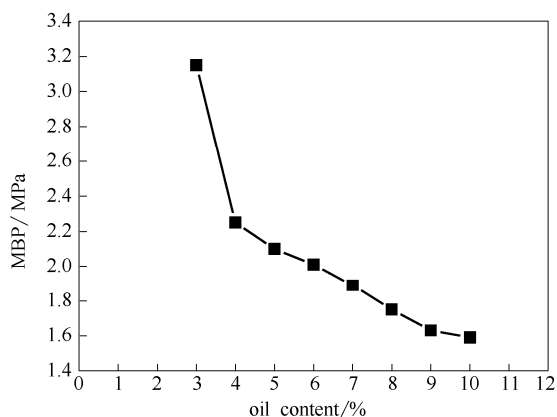


图 5 常温下混油硝酸铵的 MBP 值随油含量的变化曲线

Fig. 5 MBP value as a function of oil content of oil-containing ammonium nitrate under room temperature

硝酸铵与柴油的氧平衡计算: 硝酸铵, NH_4NO_3 , 通式为 $\text{C}_0\text{H}_4\text{O}_3\text{N}_2$, $M=80$; 柴油: $(\text{CH}_2)_n$, 通式为 $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_0\text{N}_0$, $M=14n$ 。

$$\text{O.B.}(\text{硝酸铵}) = \frac{[3 - (2 \times 0 + 0.5 \times 4)] \times 16}{80} = 20\% \quad (1)$$

$$\text{O.B.}(\text{柴油}) = \frac{[0 - (2 \times n + 0.5 \times 2n)] \times 16}{14n} = -343\% \quad (2)$$

当硝酸铵与柴油零氧平衡时

$$\omega(\text{柴油}) = \frac{20\% - 0}{20\% - (-342\%)} = 5.5\% \quad (3)$$

因而当硝酸铵与柴油的质量比为 94.5%:5.5% 时, 混油硝酸铵具有零氧平衡。因而, 逐渐提高硝酸铵中柴油的含量至氧平衡, 其 MBP 值显著降低。又由于硝酸铵为固态颗粒, 柴油为流动相, 稍过量柴油的加入使得硝酸铵与柴油更好地接触进而反应, 因而柴油含量在 5.5%~10% 之间, 样品的 MBP 值依旧程缓慢降低的趋势。

2.2 混油硝酸铵在不同温度下的 MBP 值的测量

选取含柴油量为 4%、6%、8%、10% 的混油硝酸铵, 在 $(75 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的条件下对样品进行 MBP 值的测定, 得出压力随时间变化的关系曲线, 如图 6

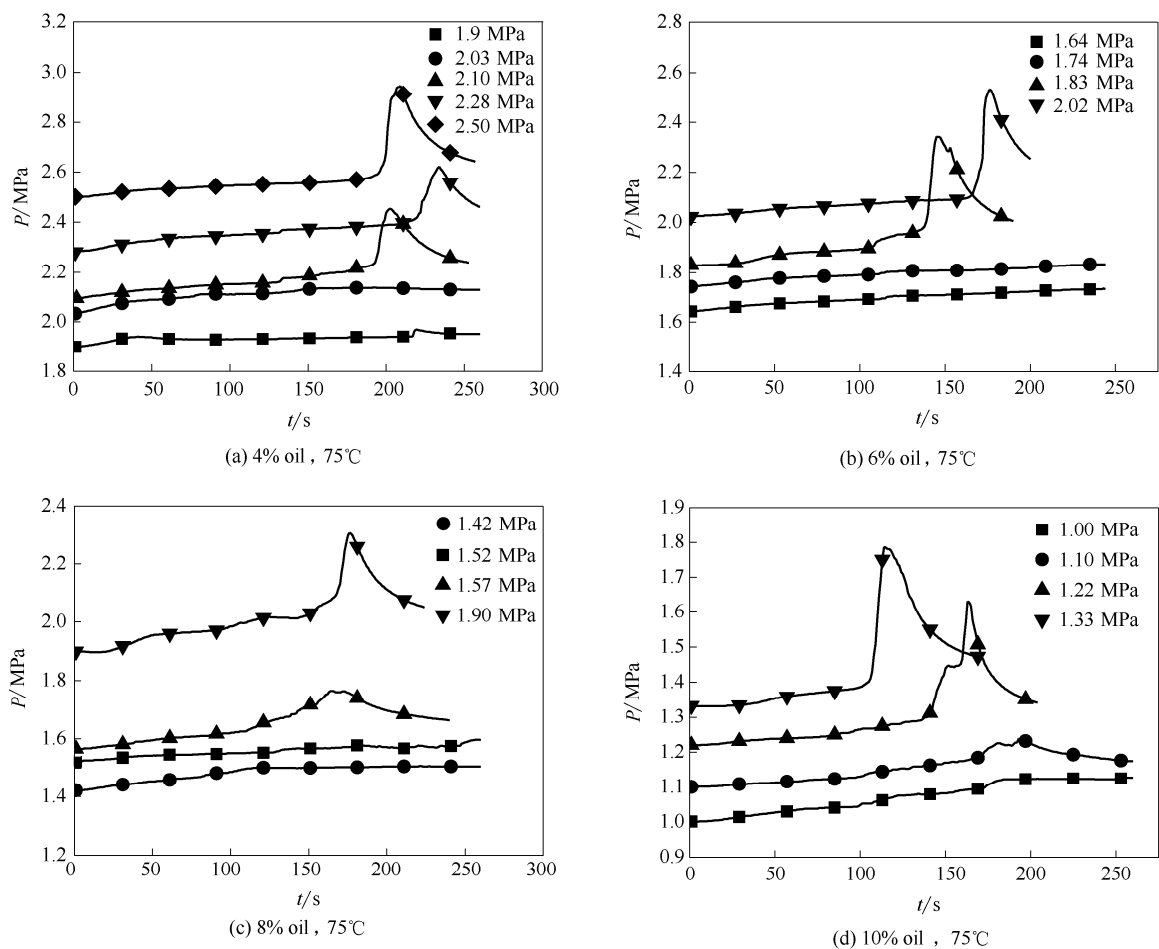


图 6 $(75\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下不同油含量混油硝酸铵的实验过程压力变化

Fig. 6 Pressure changes of experimental process of oil-containing ammonium nitrate with different oil content under $(75\pm 5)^{\circ}\text{C}$

所示。

选取含柴油量为 4%、6%、8%、10% 的混油硝酸铵，在 $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的条件下对样品进行 MBP 值的测定，得出压力随时间变化的关系曲线，如图 7 所示。

综合图 4、图 6、图 7 及表 1~表 3 的实验数据，可以得到混有 4%、6%、8%、10% 柴油的混油硝酸铵分别在 $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、 $(75\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、 $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下的 MBP 值如图 8 所示。

表 2 $(75\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下不同油含量混油硝酸铵的 MBP 值测定结果

Table 2 MBP of oil-containing ammonium nitrate with different oil content under $(75\pm 5)^{\circ}\text{C}$				
Code	Oil content/ %	Ammonium nitrate content/%	Starting temperature/ $^{\circ}\text{C}$	MBP value/MPa
1	4	96	75	2.10 ± 0.1
2	6	94	75	1.83 ± 0.1
3	8	92	75	1.57 ± 0.1
4	10	90	75	1.20 ± 0.1

表 3 $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下不同油含量混油硝酸铵的 MBP 值测定结果

Table 3 MBP of oil-containing ammonium nitrate with different oil content under $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$

Code	Oil content/ %	Ammonium nitrate content/%	Starting temperature/ $^{\circ}\text{C}$	MBP value/MPa
1	4	96	100	1.51 ± 0.1
2	6	94	100	1.05 ± 0.1
3	8	92	100	0.41 ± 0.1
4	10	90	100	0.21 ± 0.1

根据图 8 所显示的实验结果可以看出，混油硝酸铵的初始温度对其 MBP 值有显著影响。相同柴油含量的混油硝酸铵，样品在 $(75\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下的 MBP 值要低于常温 $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下的 MBP 值， $(100\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下的 MBP 值又显著低于 $(75\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下的 MBP 值。因此，在常温至 100°C 的温度范围内，混油硝酸铵的初始温度升高，它的 MBP 值呈现降低趋势。

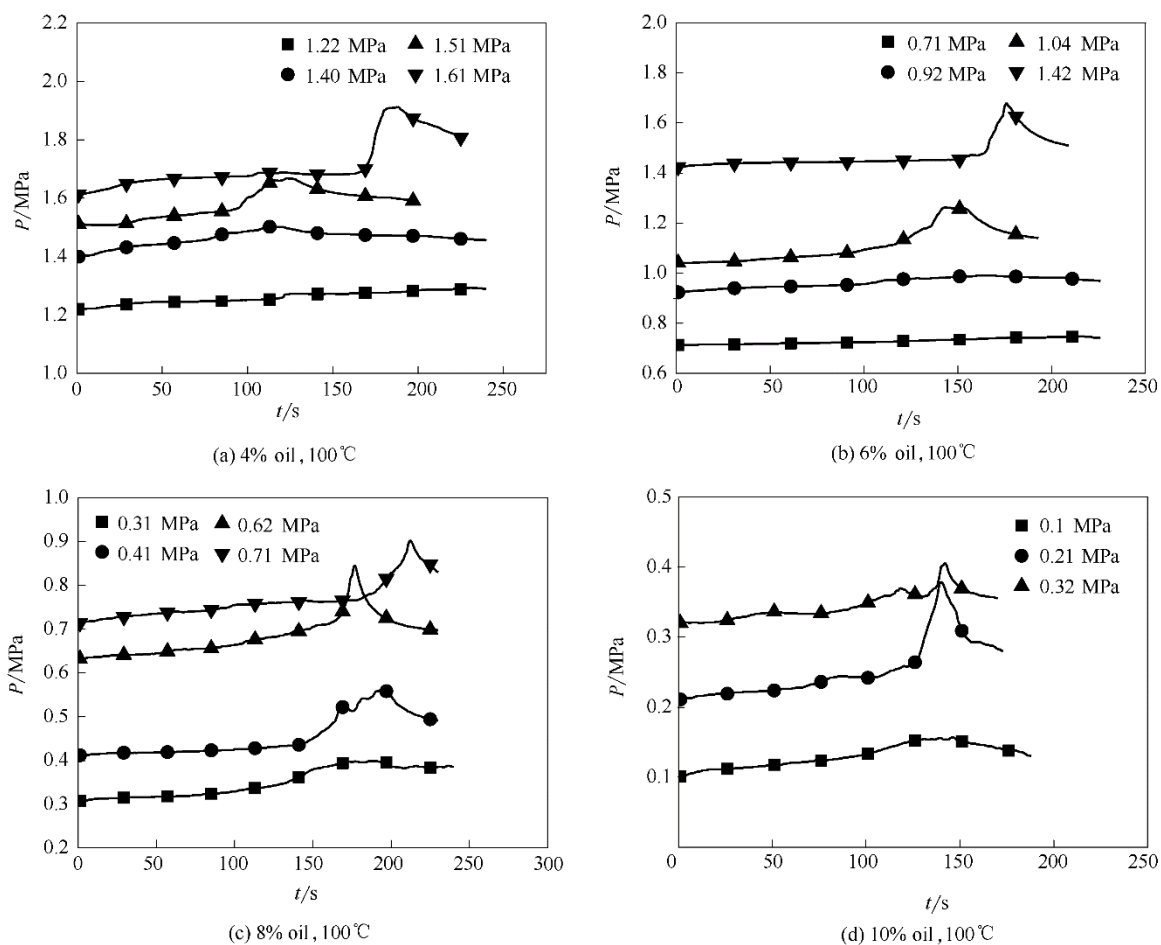


图 7 (100 ± 5) °C 下不同油含量的混油硝酸铵的实验过程压力变化曲线

Fig. 7 Pressure changes of experimental process of oil-containing ammonium nitrate with different oil content under (100 ± 5) °C

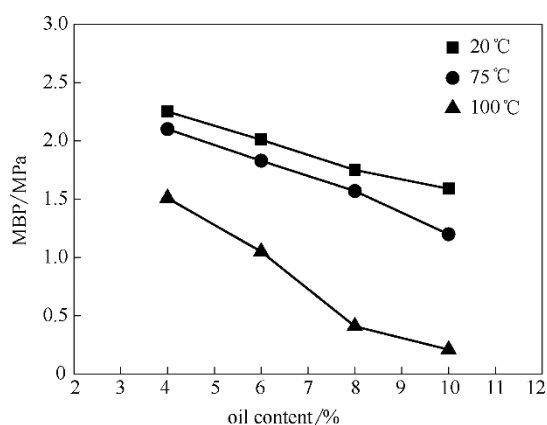


图 8 不同温度下混油硝酸铵 MBP 值随油含量的变化曲线

Fig. 8 MBP values of oil-containing ammonium nitrate at different temperatures

样品的初始温度对混油硝酸铵的 MBP 值的影响主要是因为硝酸铵在分解前会先吸收热量^[30], 并且在较高温度下存在热稳定性较低的晶型。李艺

等^[31]认为, 混油硝酸铵在常温、75 °C 及 100 °C 下分别存在着不同的晶型, 又因为其升温晶变中是不断吸热的, 所以温度越高存在的晶型越不稳定。因而当混油硝酸铵在较高的初始温度下, 其晶体结构存在较弱的热稳定性, 即样品的热敏感度变高, 所以此时在相对较低的压力体系中, 样品也可以达到稳定燃烧。从而样品的初始温度升高, 混油硝酸铵的 MBP 值降低。并且从测试结果可以看出, 对于 4%、6%、8% 及 10% 的混油量的硝酸铵样品, 初始温度在 (100 ± 5) °C 相对于 (75 ± 5) °C 所测得的样品 MBP 的降低值, 显著大于初始温度在 (75 ± 5) °C 相对于常温所测得的 MBP 的降低值。这也说明样品在 100 °C 下所存在的晶型具有较高的热敏感度。

同时, 在相同初始温度下, 样品测得的结果, 依然遵循样品混油量增加则其 MBP 值降低的结论, 并且在较高初始温度下, 混油量对样品的 MBP 值的影响有增强的趋势。

3 结 论

(1) 混油硝酸铵存在最小点火压力即 MBP 值, 但热丝点火时间一般较长, 通常时间在 1~4 min。当所处压力氛围足够高时, 混油硝酸铵能够形成稳定燃烧, 并且在燃烧前会有吸热分解的过程。

(2) 混油硝酸铵的 MBP 值受油含量的影响, 当油含量不高于 10% 时, 其 MBP 值随油含量的升高而降低, 表明柴油对硝酸铵体系的分解燃烧具有显著的敏化作用。

(3) 混油硝酸铵在不同温度下具有不同的晶体形态, 因而其 MBP 值受初始温度的影响。油含量不变时, 初始温度较高, 样品的 MBP 值较低。本实验中对: 初始温度为常温下 (20℃) 的测量值 < 75℃ 下的测量值 < 100℃ 下的测量值。

符 号 说 明

- M —— 分子量
 MBP —— 最小点火压力值, MPa
 O.B. —— 氧平衡, %
 P —— 压力测量值, MPa
 t —— 点火时间, s
 ω —— 质量分数, %

References

- [1] OOMMEN C, JAIN S R. Ammonium nitrate: a promising rocket propellant oxidizer[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, **67**(3): 253-281.
- [2] TAN L, LIU D, XU S, *et al.* Effect of mixing methods on the thermal stability and detonation characteristics of ammonium nitrate and sodium chloride mixtures[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, **42**(11): 1315-1324.
- [3] SINDITSKII V P, EGORSHEV V Y, LEVSHENKOV A I, *et al.* Ammonium nitrate: combustion mechanism and the role of additives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2005, **30**(4): 269-280.
- [4] MARLAIR G, KORDEK M A. Safety and security issues relating to low capacity storage of AN-based fertilizers[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, **123**(1/2/3): 13-28.
- [5] 邓安健. 铵油炸药性能影响因素研究及生产工艺的改进[J]. 爆破器材, 2006, **35**(2): 10-13.
 DENG A J. Research influencing factors on performance and technology improvement of AN-oil explosive[J]. Explosive Materials, 2006, **35**(2): 10-13.
- [6] 吕春绪, 刘祖亮. 工业炸药理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003: 38-41.
 LÜ C X, LIU Z L. Theory of Industrial Explosive[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003: 38-41.
- [7] 徐森, 陈相, 段瑞坤, 等. 硝酸铵乳胶在持续受热条件下的热失控特性[J]. 化工学报, 2014, **65**(3): 1135-1141.
 XU S, CHEN X, DUAN R S, *et al.* Developing process of thermal runaway for ammonium nitrate emulsion under continuous heating[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(3): 1135-1141.
- [8] LANG A J, VYAZOVLIN S. Ammonium nitrate- polymer glasses: a new concept for phase and thermal stabilization of ammonium nitrate[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2008, **112**(36): 11236-11243.
- [9] SORESCU D C, THOMPSON D L. Classical and quantum mechanical studies of crystalline ammonium nitrate[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2001, **105**(4): 720-733.
- [10] HAN Z, SACHDEVA S, PAPADAKI M I, *et al.* Effects of inhibitor and promoter mixtures on ammonium nitrate fertilizer explosion hazards[J]. Thermochimica Acta, 2016, **624**: 69-75.
- [11] 陈天云. 自敏化硝酸铵的制造工艺[J]. 化工学报, 2002, **53**(8): 862-864.
 CHEN T Y. Manufacturing technology of self-sensitized ammonium nitrate[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2002, **53**(8): 862-864.
- [12] 徐森. 爆炸品危险性分级程序改进及典型试验方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
 XU S. Explosive hazard classification program improvement and typical test methods[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [13] 胡庆贤. 炸药感度评价方法的探讨[J]. 含能材料, 2000, **8**(3): 127-129.
 HU Q X. An investigation of evaluation method on explosives sensitivity[J]. Energetic Materials, 2000, **8**(3): 127-129.
- [14] 李建军, 汪旭光. 乳化炸药热分解动力学研究[J]. 北京理工大学学报, 1996, **16**(6): 636-642.
 LI J J, WANG X G. A study on the thermal decomposition kinetics of emulsion explosives[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Natural Science Edition, 1996, **16**(6): 636-642.
- [15] ANDERSEN W H, BILLS K W, MISHUCK E, *et al.* A model describing combustion of solid composite propellants containing ammonium nitrate[J]. Combustion and Flame, 1959, **3**: 301-317.
- [16] TURCOTTE R, LIGHTFOOT P D, BADEEN C M, *et al.* A pressurized vessel test to measure the minimum burning pressure of water-based explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2005, **30**(2): 118-126.
- [17] TURCOTTE R, GOLDTHORP S, BADEEN C M, *et al.* Hot-wire ignition of AN-based emulsions[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008, **33**(6): 472-481.
- [18] GOLDTHORP S, TURCOTTE R, BADEEN C M, *et al.* Minimum pressure for sustained combustion in AN-based emulsions[C]//35th International Pyrotechnics Seminar. Colorado, USA, 2008: 157-64.
- [19] CHAN S K, TURCOTTE R. Empirical correlation of minimum burning pressures of ammonium nitrate emulsions[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, **41**(2): 207-211.
- [20] TURCOTTE R, GOLDTHORP S, BADEEN C M, *et al.* Influence of physical characteristics and ingredients on the minimum burning pressure of ammonium nitrate emulsions[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2010, **35**(3): 233-239.
- [21] TURCOTTE R, GOLDTHORP S, BADEEN C M, *et al.* Behaviour of AN-based emulsions in hot-wire ignition experiments[C]//34th International Pyrotechnics Seminar. Beaune, France: Europyro, 2007.
- [22] TURCOTTE R, FENG H, BADEEN C M, *et al.* A test to measure the

- minimum burning pressure of water-based commercial explosives and their precursors[C]//Proceedings of the 2009 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Kunming, China, 2009: 575-82.
- [23] BADEEN C M, GOLDTHORP S, TURCOTTE R, *et al.* Effect of formulation changes on the minimum burning pressure of ammonium nitrate emulsions[C]// 37th International Pyrotechnics Seminar. Reims, France: EuroPyro, 2011.
- [24] BADEEN C, GOLDTHORP S, TURCOTTE R, *et al.* Effect of Ingredients on the Minimum Burning Pressure of Ammonium Nitrate Emulsions[C]// Conference on Explosives and Blasting Techniques. 2014.
- [25] 徐志祥. 乳化炸药泵送过程热安全性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- XU Z X. Research on thermal safety of emulsion explosive pumping process[D]. Nanjing : Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [26] KHOLODENKO T, USTIMENKO Y, PIDKAMENNA L, *et al.* Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises[M]//Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. Boca Raton : CRC Press, 2014: 255-260.
- [27] WANG S, XU Z X, WANG Q. Thermal decomposition mechanism of emulsion explosives with phosphatide[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, **124**(2): 1053-1062.
- [28] XU S, TANG S L, LIU D B, *et al.* Experimental study on continuous detonation velocity of modified ANFO[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, **3**: 7.
- [29] 胡洋勇, 颜事龙, 刘锋, 等. 油类物质与硝酸铵溶液混合危险性分析[J]. 火工品, 2014, **5**: 21-24.
- HU Y Y, YAN S L, LIU F, *et al.* The risk analysis of ammonium nitrate solution mixed with oil substances[J]. Initiators and Pyrotechnics, 2014, **5**: 21-24.
- [30] 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.
- [31] 李艺, 惠君明. 几种添加剂对硝酸铵热稳定性的影响[J]. 火炸药学报, 2005, **28**(1): 76-80.
- LI Y, HUI J M. Effect of several additives on thermal characteristics of ammonium nitrate[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, **28**(1): 76-80.