

文章编号: 1001-1455(2008)05-0467-04

# 添加剂对 ANFO 雷管起爆感度及作功能力的影响\*

曾贵玉<sup>1,2</sup>, 黄 辉<sup>1,2</sup>, 高大元<sup>2</sup>, 吕春绪<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为提高铵油炸药(ANFO)雷管起爆感度和作功能力, 向 ANFO 中加入不同的添加剂。借鉴板痕试验原理, 设计了用于比较 ANFO 雷管起爆感度和作功能力的试验装置和方法, 采用该方法测试了含添加剂的改性 ANFO 的起爆感度和作功能力。实验结果表明, 所选择的几种添加剂对 ANFO 雷管起爆均有敏化作用, 同时也都能提高 ANFO 的作功能力, 其中 Al、高氯酸铵(AP)提高 ANFO 作功能力的效果比 NaNO<sub>2</sub>、玻璃微球和 AC 发泡剂更显著。分析了添加剂对 ANFO 雷管起爆感度和作用能力影响的机理。

**关键词:** 爆炸力学; 雷管起爆感度; 板痕试验; ANFO; 作功能力; 添加剂

**中图分类号:** O381; TQ560; TJ55

**国标学科代码:** 130 · 3510

**文献标志码:** A

## 1 引 言

20 世纪 50 年代以来, 铵梯炸药一直是工业炸药的主体。但铵梯炸药中含有 5%~20% 的 TNT, 因此这类炸药具有有毒、污染环境、危害健康、原材料成本较高和使用不安全等缺点, 研究不含 TNT、性能优良、可替代铵梯炸药的新品种已成为粉状工业炸药的发展方向。目前, 开发出的新型粉状工业炸药大多是由硝酸铵和燃料油所组成的铵油炸药(ANFO), 但这类炸药普遍存在雷管起爆困难、作功能力较低等缺点, 很大程度上限制了 ANFO 的发展, 如何提高 ANFO 的雷管起爆感度、增大爆炸威力就成为新型粉状工业炸药研究的关键<sup>[1-2]</sup>。吕春绪等<sup>[3-4]</sup>经过大量理论和实验研究, 设计和开发出了自敏化的膨化硝酸铵, 进而制得膨化铵油炸药, 解决了铵油炸药雷管难于起爆的问题, 在实际中获得广泛应用。但使用中发现, 膨化铵油炸药含有的大量微孔使得炸药装药密度偏低, 影响了其爆炸威力。因此, 本研究主要针对 ANFO 雷管起爆感度低、作功能力小的缺点, 通过在 ANFO 中加入一定的添加剂来提高其雷管起爆感度和作功能力, 并探讨添加剂对 ANFO 雷管起爆感度和作功能力的影响。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

将硝酸铵含量为 1% 的添加剂与水充分混合, 再加入硝酸铵, 加热使组分尽可能完全溶解, 并使组分混合均匀, 冷却结晶后充分干燥、过筛, 得到改性硝酸铵。为获得最大作功能力, 改性 ANFO 的配方设计采用最大放热原则, 即计算零氧平衡 ANFO 的配方组成, 得到改性 ANFO 中改性硝酸铵含量为 94.5%, 燃料油含量为 5.5%。按此比例将改性硝酸铵与热燃料油充分混合均匀, 得到改性 ANFO。

### 2.2 雷管起爆感度及作功能力测试

由于还未建立测试工业炸药雷管起爆感度的标准方法, 本研究借鉴板痕试验原理, 建立了图 1 所示的试验装置来测试 ANFO 的雷管起爆感度和作功能力, 起爆元件采用 8 号电雷管。该装置装配简单、可现场实施, 且测试过程操作简便、可同时测试炸药的雷管起爆感度和作功能力。

为保证试验结果的可靠性和可比性, 首先测出 ANFO 的临界直径为 12.5 mm, 然后在严格控制装药密度、装药量及装药直径的情况下, 测试 ANFO 的起爆雷管感度和作功能力。根据验证板上的印痕情

\* 收稿日期: 2007-03-16; 修回日期: 2007-05-28

作者简介: 曾贵玉(1969—), 男, 副研究员, 博士研究生。

况来判断试样发生爆轰的程度:如果被测炸药发生爆轰,则验证板上会留下明显的印痕;如被测炸药发生爆燃,则验证板上会有明显的燃烧痕迹;如被测炸药未发生爆轰或爆燃,则验证板上不会留下痕迹。通过测量炸药起爆后验证板上留下的凹痕深度  $h$ ,可对炸药的作功能力进行比较。

试验时,将硬质牛皮纸在一根特制圆柱上卷绕成内径为 15 mm 的硬纸管,再将炸药试样填充到硬纸管中,ANFO 质量为 8.48 g,装药高度为 60 mm,装药密度为 0.80 g/cm<sup>3</sup>。将装药放在验证板上,在装药的上部垂直插入一只 8 号电雷管,然后起爆电雷管。试样起爆后,根据验证板上的印痕情况及试验现场有无残留药粉来判断试样的起爆情况;通过测量验证板上的凹坑深度来比较各试样的作功能力。每个试样平行测试两次,如试验结果重复性好,则取其平均值,如重复性不好,需重新进行测试。

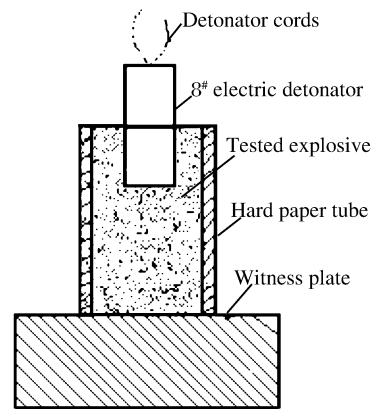


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental device

### 3 结果与讨论

#### 3.1 添加剂对 ANFO 雷管起爆感度的影响

研究了 5 种添加剂( $\text{NaNO}_2$ 、铝粉、玻璃微球、AC 发泡剂和 AP)对 ANFO 雷管起爆感度的影响。8 号雷管起爆实验结果见图 2。

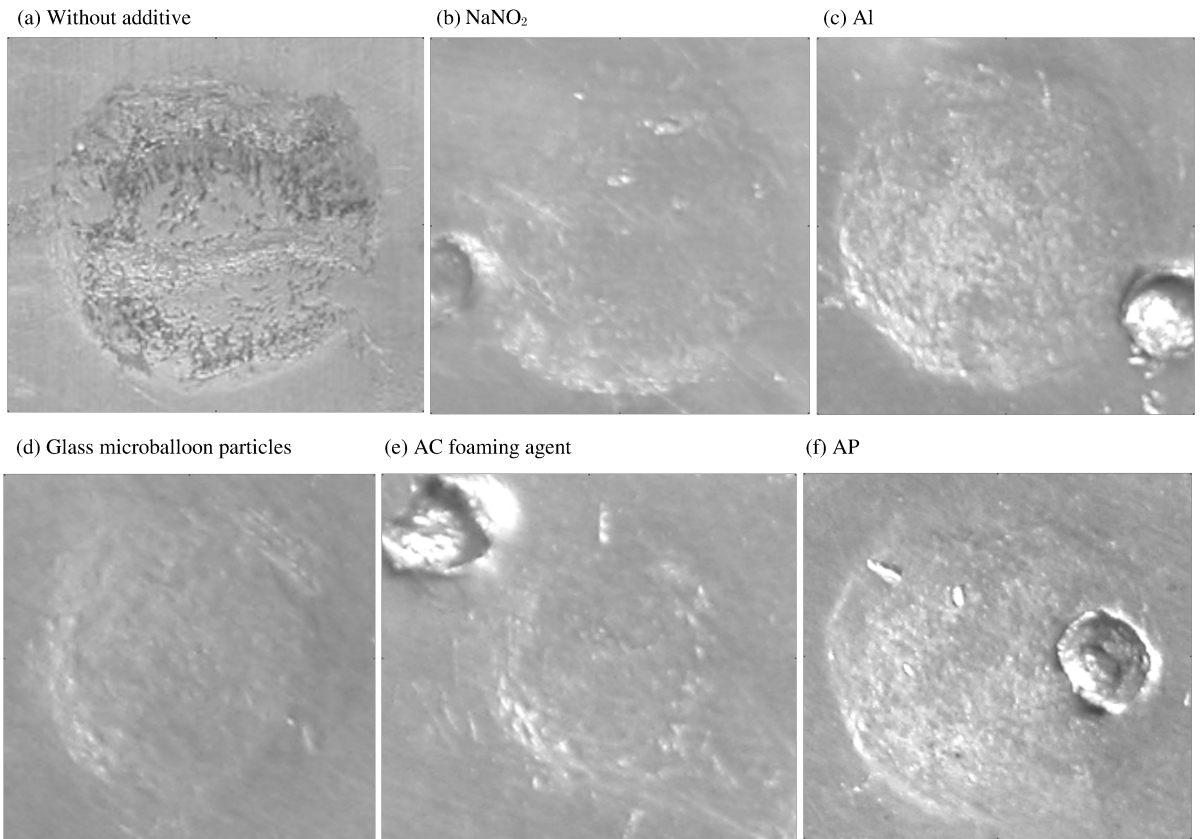


图 2 添加剂对 ANFO 雷管起爆感度的影响

Fig. 2 Effects of additives on detonator initiation sensitivity of ANFO

从图 2 可知,未加添加剂的 ANFO 经 8 号电雷管作用后在验证板上留下了明显的燃烧痕迹,印痕很浅,说明普通状态 ANFO 对 8 号电雷管作用较钝感,雷管起爆后装药爆轰不完全,仅发生了爆燃;当 ANFO 中加入添加剂后,雷管起爆感度发生了明显变化,试验所选择的几种添加剂对 ANFO 雷管起爆

感度均有敏化作用,改性 ANFO 经 8 号电雷管作用后均发生了爆轰,验证板上留下了明显印痕,无爆燃痕迹,说明所选择的几种添加剂均可显著提高 ANFO 的雷管起爆感度。

添加剂对 ANFO 雷管起爆感度的影响可用炸药起爆理论进行解释。目前比较公认的关于非均质炸药冲击起爆的理论是热点学说<sup>[5]</sup>,即当炸药受外界冲击作用时,并不是平均加热炸药,冲击波只在炸药空穴、杂质和气泡等非均匀处来回反射和绝热压缩,将机械能集中在这些局部区域,使其温度远高于平均温度,从而在这些区域形成热点,爆炸反应由此引发并扩张,并逐渐导致整体爆轰,热点数量越多,起爆越容易。当 ANFO 中加入添加剂后,无疑是在 ANFO 中引入了杂质,增大了装药的不均匀性,因此增加了热点数量,提高了起爆感度;其次,由于添加剂与硝酸铵的物理化学性质存在明显差异,两者的混合物在冷却结晶过程中,会在硝酸铵颗粒中增加新的位错、空穴等缺陷,也增加了装药的不均匀性,因此在雷管冲击波作用下也会形成更多的热点,更易起爆;另外,AC 发泡剂、玻璃微球及  $\text{NaNO}_2$  几种添加剂还会在炸药中引入小气泡,从而增加热点数量。因此所选添加剂均可提高 ANFO 的雷管起爆感度。

### 3.2 添加剂对 ANFO 作功能力的影响

添加剂对 ANFO 作功能力的影响见表 1。ANFO 配方中 AN、燃料油的质量百分含量分别为 94.5%、5.5%;改性 ANFO 配方中 AN、添加剂、燃料油的质量百分含量分别为 93.555%、0.945%、5.5%。ANFO 及改性 ANFO 配方的爆热、气态爆炸产物体积根据文献<sup>[3]</sup>计算。

表 1 添加剂对 ANFO 作功能力的影响

Table 1 Effects of additives on the work capacity of ANFO

ANFO 样品(添加剂)	$h/\text{mm}$	$Q_V/(\text{kJ/g})$	$v_g/(\text{cm}^3/\text{g})$	$Q_V v_g/(\text{J} \cdot \text{m}^3/\text{g}^2)$
无添加剂	0.041	3.835 2	970.1	3.720 5
AC 发泡剂	0.224	3.799 0	960.9	3.650 5
玻璃微球	0.270	3.799 0	960.9	3.650 5
$\text{NaNO}_2$	0.284	3.827 9	963.7	3.688 9
AP	0.309	3.833 7	965.8	3.702 6
Al	0.401	4.111 9	962.2	3.956 4

从表 1 可知,添加剂对 ANFO 作功能力影响较大。未加添加剂时,ANFO 起爆后留下的板痕深度很小。当加入添加剂后,ANFO 起爆后留下的板痕深度明显增加,说明所选择的几种添加剂均可提高 ANFO 的作功能力。从表 1 也可看出,不同添加剂对 ANFO 作功能力的影响程度不同,在所选择的几种添加剂中,Al 改性的 ANFO 作功能力最强,板痕深度最大;AC 发泡剂改性的 ANFO 作功能力最弱,板痕深度最小;AP、 $\text{NaNO}_2$  和玻璃微球改性的 ANFO 作功能力介于两者之间。

添加剂对 ANFO 作功能力的影响主要表现在:(1)ANFO 是一种典型的非理想炸药,其爆轰完全程度较低( $<75\%$ )<sup>[6]</sup>,添加剂对 ANFO 作功能力的影响首先在于它可改变装药的爆轰完全程度。如上所述,当 ANFO 中加入所选添加剂后,装药的热点数量大量增加,装药爆轰完全程度得到大幅度提高,因此改性 ANFO 的作功能力较未改性的 ANFO 的大。(2)添加剂可改变反应物爆热  $Q_V$  与气态爆炸产物体积  $v_g$  的乘积  $Q_V v_g$ 。C. H. Johansson 等<sup>[7]</sup>的研究表明,炸药作功能力  $A$  与  $Q_V$  和  $v_g$  的特性乘积  $Q_V v_g$  存在线性函数关系,即  $A \propto Q_V v_g$ 。当其他条件(如炸药颗粒粒度、形貌、装药密度、孔隙及爆轰完全程度等)相同时,炸药作功能力取决于  $Q_V v_g$ ,为提高作功能力,应设法增大炸药爆热与气态爆炸产物体积的乘积。Al 粉是能够提高装药爆热的物质,含 Al 粉的 ANFO 的  $Q_V v_g$  值比纯 ANFO 的高,另外 Al 粉还可与爆炸产物中的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  发生二次反应,放出大量的热,进一步提高  $Q_V v_g$  值,从而使 ANFO 的作功能力得到很大提高,在几种改性 ANFO 中作功能力最大;以 AP 为添加剂得到的 ANFO 的  $Q_V v_g$  值虽然与纯 ANFO 的  $Q_V v_g$  值相当,但 AP 作为一种外加高能氧化剂,它可增加装药的热点数量,提高爆轰完全程度,且与  $\text{NaNO}_2$ 、玻璃微球和 AC 发泡剂相比还能提高装药的  $Q_V v_g$  值,因此 AP 也能明显提高 ANFO 的作功能力,且作功能力较  $\text{NaNO}_2$ 、玻璃微球和 AC 发泡剂改性的 ANFO 的大; $\text{NaNO}_2$ 、玻璃微球和 AC 发泡剂为添加剂时,虽然改性 ANFO 的  $Q_V v_g$  值比纯 ANFO 的低,但三者均为典型的炸药敏化剂,均可在 ANFO 中增添小气泡,可明显提高装药爆轰完全程度,从而提高 ANFO 的作功能力。可见,不同添加剂对提高爆轰完全程度和特性乘积的贡献不同,因而对 ANFO 作功能力的影响也不同。

## 4 结 论

(1)建立了一种可同时测试工业炸药雷管起爆感度和作功能力的试验方法,根据起爆后验证板的印痕和凹坑深度,可对炸药的雷管起爆感度和作功能力进行比较。(2)所选择的5种添加剂对ANFO雷管起爆感度均具有敏化作用,在试验条件下均发生了爆轰。这是由于在炸药中引入了杂质并使炸药结晶的不均匀性增加,提高了装药的不均匀程度,使之在冲击作用下形成更多的热点,因而提高了ANFO的雷管起爆感度。(3)所选择的添加剂也能提高ANFO的作功能力,其中Al、AP的效果最明显,NaNO<sub>2</sub>和玻璃微球次之,AC发泡剂最小。添加剂提高ANFO作功能力是由于添加剂提高了非理想炸药ANFO的爆轰完全程度,有的还增大了装药爆热与气态爆炸产物体积的乘积。

## 参考文献:

- [1] 惠君明,苏洪文,解立峰,等.粉状工业炸药的敏化方法[J].火炸药,1997,20(1):10-12.
- [2] 刘祖亮.硝酸铵自敏化的基本原理和技术途径[J].爆破器材,2003,32(6):4-7.  
LIU Zu-liang. Basic principle and technical approaches of self-sensitization of ammonium nitrate[J]. Explosive Material, 2003,32(6):4-7.
- [3] 吕春绪.膨化硝酸铵炸药[M].北京:兵器工业出版社,2001.
- [4] 吕春绪,刘祖亮,惠君明.膨化硝酸铵自敏化理论形成与发展[J].火炸药学报,2000,23(4):1-4.  
LÜ Chun-xu, LIU Zu-liang, HUI Jun-ming. The advancement and development of self-sensitization theory for expanded ammonium nitrate[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2000,23(4):1-4.
- [5] 孙锦山,朱建土.理论爆轰物理[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [6] Atsumi M, Keiya T, Terushige O, et al. Influence of physical properties of ammonium nitrate on the detonation behaviour of ANFO[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14:533-538.
- [7] Johansson C H, Persson P A. Detonics of High Explosives[M]. London: Academic Press, 1970.

## Effects of additives on detonator initiation sensitivity and work capacity of ANFO

ZENG Gui-yu<sup>1,2</sup>, HUANG Hui<sup>1,2</sup>, GAO Da-yuan<sup>2</sup>, LÜ Chun-xu<sup>1\*</sup>

(1. College of Chemistry Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** Different additives were added to ANFO to enhance its detonator initiation sensitivity and work capacity. Based on the principle of the plate trace test, the test device and method were proposed to compare detonator initiation sensitivity and work capacity of ANFO containing additives. The results show that all the selected additives can improve detonator initiation sensitivity and work capacity of ANFO. Among these additives, Al and AP have stronger effects on the work capacity of ANFO than glass microballoon particles, AC foaming agent and NaNO<sub>2</sub>. The effect mechanisms of these additives were analyzed respectively.

**Key words:** mechanics of explosion; detonator initiation sensitivity; plate trace test; ANFO; work capacity; additives

\* Corresponding author: LÜ Chun-xu  
E-mail address: lucx@mail.njust.edu.cn  
Telephone: 86-25-84315601