

# 硝基甲烷和氧的气态混合物爆燃 及爆轰特性研究

胡 栋

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理实验室)

王永国 卢洪斌

(成都科技大学高温、高压物理所)

孙珠妹

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理实验室)

**摘要** 本文利用传感器技术和光电探测技术在爆炸激波管中研究了气态的硝基甲烷的爆燃和爆轰特性。由测量结果发现, 随着硝基甲烷和氧的气态混合物中硝基甲烷含量的增加其爆燃(或爆轰)压力和速度呈起伏性的增加, 它明显不同于一般可爆炸性混合物的倒“U”形曲线。实验还发现, 硝基甲烷和氧的气态混合物点火后形成的弱爆燃波在爆炸激波管端盖反射后可以引起很强的爆轰, 在端盖处的压力可达 45MPa, 这时形成的 CHO、OH 等中间产物的激励辐射比入射波形成的中间产物激励辐射强十多倍。

**关键词** 爆燃 爆轰 中间产物 硝基甲烷

## 1 引言

对一般可燃性物质国内外的研究人员已进行了较多的研究, 并且取得了较系统较全面的数据。但是, 对硝基甲烷爆炸特性的研究与报道较少, 而对其热分解的研究则较多。硝基甲烷是具有爆炸性的最简单有机硝基化合物, 可用作液体炸药, 在一定的引爆条件下, 硝基甲烷能象固体炸药那样形成强爆轰, 爆轰压力可达 14.4GPa, 爆速为 6.35km/s。硝基甲烷作为凝聚相均质炸药研究了它的热爆炸机理, 掺杂气泡、惰性物等物质即可造成密度不连续性。

目前所用火箭推进剂都有不同程度的不足之处。烷类是较好的待选燃料, 而硝基甲烷有很多优点<sup>[1]</sup>。早期, 火箭推进剂中只是利用燃料的燃烧现象; 现在国外已经采用了脉动式火箭发动机, 这种发动机是利用燃料与氧的气态混合物的爆轰现象。

本文主要研究了气态硝基甲烷的爆燃和爆轰的生成条件以及它们的转变过程(DDT)。

## 2 实验装置与测试技术

利用图 1 所示装置研究了硝基甲烷和氧的气态混合物快速反应的光谱和爆炸特性。

硝基甲烷的每次实验用量为 15mL, 在 300K 的情况下它能全部挥发成气态。在长 4m, 内径  $\varnothing 100\text{mm}$  的爆炸激波管内, 硝基甲烷的蒸汽压可达到 0.006MPa, 充入一定量的氧气 (0.004~0.014MPa), 火花点火后即能形成传播的爆燃波, 在一定的条件下爆燃波也能转变成爆轰波。把光纤插入光纤接口 7, 为了使光纤保持平行, 必须控制光纤插入激波管的深度, 使光纤端部恰好和激波管内壁相切; 光纤接口离点火源的距离为 2.5m。为了确保实验结果的重复性, 每次实验前需将光纤的端部重新处理。

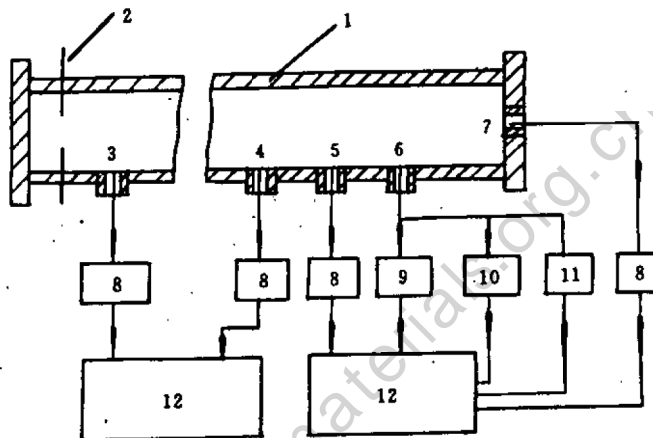


图1 实验装置示意图

1——爆炸激波管; 2——火花隙; 3,4,5,7——压力传感器; 6——光纤接口;  
8——电荷放大器; 9,10,11——单色仪或 OMA 谱仪; 12——高速数据采集系统。

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement.

1——Explosion shock tube, 2——Spark-gap, 3,4,5,7——Quartz gauges,  
6——Connector for optical fibres, 8——Charge amplifiers,  
9,10,11——Monochromators or OMA spectrograph, 12——Data acquisition and analysis system

### 3 测量结果及分析

利用上述测试技术, 我们测量了硝基甲烷和氧的气态混合物中硝基甲烷不同浓度情况下的爆炸特性。

#### 3.1 硝基甲烷与氧的气态混合物的爆燃

为了研究硝基甲烷和氧的气态混合物的爆燃现象, 我们采取了降低混合物中氧气浓度的方法, 即能观察到爆燃现象, 图 2 及图 3 列出了爆燃现象的典型结果。由图 2 及图 3 可以看出, 对于硝基甲烷为 0.006MPa、氧气为 0.014MPa 的混合物, 它的爆燃压力可达 0.2MPa, 速度为 500m/s, 这时反应中间产物 CHO 和 OH 的辐射比较弱。如果混合物中氧气的含量为 0.018MPa 时爆燃很弱, 实验时可以听到爆炸声, 并能通过光学窗口观察到爆燃的光, 但压力传感器测得的讯号很弱, 以致无法测出它的压力值; 同样, 中间产物的辐射也很弱。

混合物中的氧含量从 0.01MPa 至 0.016MPa 时都能观察到较明显的爆燃现象。但是, 硝基甲烷和氧混合物中的氧含量为  $0.004\text{MPa} \leq p_{\text{O}_2} < 0.009\text{MPa}$  时只能形成爆轰, 当

氧含量为 0.003MPa 时混合物就点不着。在可爆轰下限附近不存在爆燃, 明显不同于其它燃料。因此, 硝基甲烷作为燃料使用时必须十分重视这种新现象。

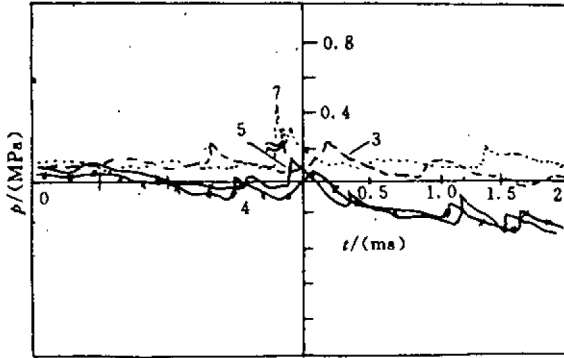


图2 硝基甲烷和氧的气态混合物点火后爆燃波发展过程, 图中数字(3,4,5,7)对应于图1中所示传感器

Fig.2 Pressure field in the deflagration wave of ignited gaseous mixture of nitromethane and oxygen, 3,4,5,7 are the corresponding number of windows in Fig.1.

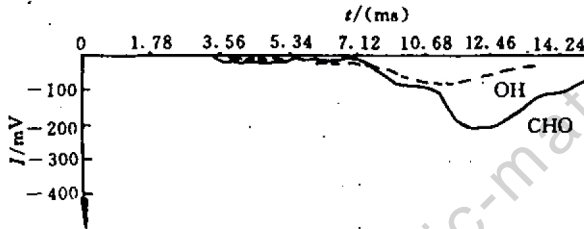


图3 硝基甲烷和氧的气态混合物点火后形成爆燃时的 CHO 和 OH 中间产物辐射特性

Fig.3 Emission behaviours of CHO and OH intermediate product in the deflagrating gaseous mixture of nitromethane and oxygen.

### 3.2 硝基甲烷与氧的气态混合物的爆轰

硝基甲烷类似于单晶固体炸药属于均质炸药, 因此需要很高的引爆压力(约 10GPa)才能引起爆轰。当硝基甲烷与氧的气态混合物(硝基甲烷为 0.006 MPa, 氧气为 0.004~0.009MPa)被点火, 经过 2.8m 后的爆燃波压力  $p_i$  仍然很弱( $p_i=0.1\text{MPa}$ ), 但是在爆炸激波管端盖处反射后可以形成很强的爆轰, 在端盖处的压力最高可达 45MPa, 爆速亦达 6.2km/s(见图 4), 它接近硝基甲烷作为凝聚相炸药时的爆速, 这种现象在一般可燃性物质(如氢、乙炔、正庚烷、异辛烷、汽油等)的爆轰过程中是观察不到的<sup>[2]</sup>, 这些可燃性物质形成爆轰后, 在爆炸激波管端盖上反射后的压力仅增加 1.5~2.5 倍。造成硝基甲烷和氧的气态混合物爆轰反应压力急剧增加的原因是硝基甲烷的分子结构与上述可燃性物质(如氢、正庚烷等)的结构有明显的差别, 它含有一个硝基, 故和一般含硝基的固体炸药一样, 其断键释放的能量是很大的。实验结果已表明, 硝基甲烷和氧的气态混合物爆轰的引发阶段是先断 C-N 键并形成  $\text{CH}_3\text{O}$ , 然后和氧原子进行快速链式反应释放大量的能量。由图 5 也可以看出, 形成爆轰后的 CHO 辐射比爆燃时的辐射强十余倍。因此, 选择适当的硝基甲烷与氧混合物的配比, 并让其爆燃波有一次或多次的反射机会即能形成爆轰现象。它不需要文献[1]中所述的添加催化剂的方法, 便能获得大的比冲量。由入射波在端盖反射后的初始压力, 我们可以得出引爆硝基甲烷和氧的气态混合物爆轰的临界起爆压力为  $p_c=12\text{MPa}$ 。可见硝基甲烷作为火箭推进剂爆轰时速度快、压力高(45MPa), 故具有比冲量大的优点。

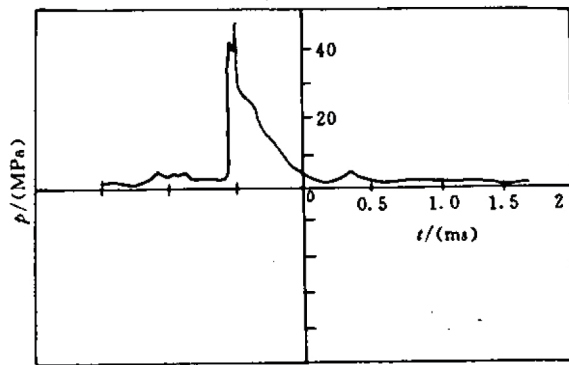


图 4 硝基甲烷和氧的气态混合物产生强爆轰的典型结果

Fig. 4 Typical results of strong detonation of gaseous nitromethane and oxygen mixture.

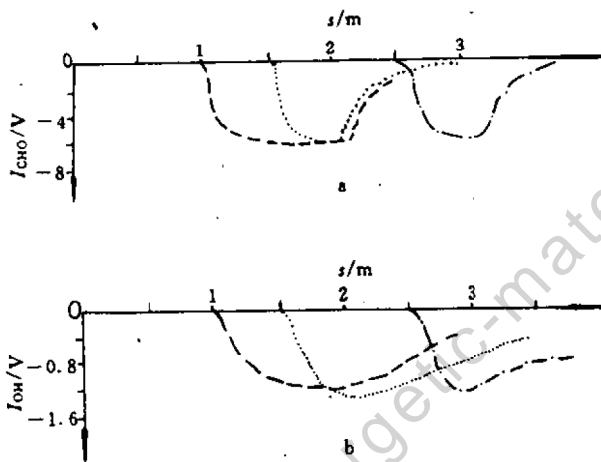


图 5 硝基甲烷和氧的气态混合物点火后形成强爆轰时 CHO 和 OH 中间产物辐射特性和爆轰波传播距离  $s$  关系

a—CHO 中间产物; b—OH 中间产物。

Fig. 5 CHO and OH intermediate product emission behaviours versus detonation wave propagation distance  $s$  for strong detonation in gaseous nitromethane and oxygen mixture. a—CHO radical, b—OH radical.

我们在图 6、图 7 中分别列出硝基甲烷和氧的气态混合物爆燃(或爆轰)压力  $p$ 、速度  $u$  与混合物中硝基甲烷浓度的关系。由图中可以看出,随着混合物中硝基甲烷浓度的增加,爆燃(或爆轰)的压力  $p$  及速度  $u$  都呈起伏状的增加,出现多个极值(极大值)点。这种现象明显不同于一般的可燃性物质(如氢、正庚烷等)的实验结果。对于一般的可燃性物质,随着混合物中可燃性物质浓度的增加,其爆燃(或爆轰)压力或速度呈倒“U”型曲线<sup>[2,3]</sup>。我们认为,造成驼峰现象的原因可能是使硝基和主体断键的能量比较大,只有达到一定的能量后,才能激励稳定的爆轰快速反应。

为此,我们在同一发实验中还测量了中间产物 OH 基的辐射强度与混合物中硝基甲烷浓度的关系(参见图 8)。实验结果也呈现与爆燃(或爆轰)压力、速度同样形状的曲线。它说明我们测定的宏观参量(压力、速度)是微观反应机理的直接体现。

根据硝基甲烷气态初始压力与硝基甲烷、氧气态混合物之比算的硝基甲烷浓度(体积百分比)。根据不同浓度下的观察结果可得出硝基甲烷和氧的气态混合物能够形成爆燃的硝基甲烷浓度  $\varphi$  是:  $67\% > \varphi > 38\%$ ; 能够形成爆轰的硝基甲烷浓度  $\varphi$  是:  $58\% \geq \varphi \geq 38\%$ 。

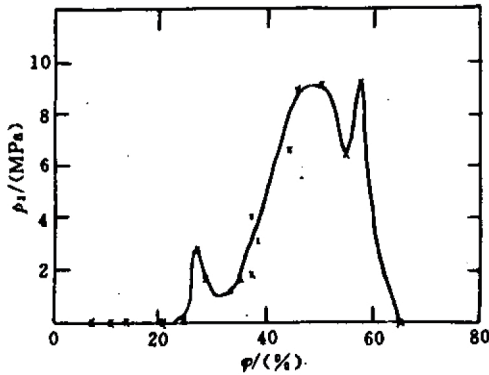


图6 硝基甲烷和氧的气态混合物爆轰(或爆燃)压力  $p_d$  和硝基甲烷含量  $\varphi$  的关系  
Fig. 6 Detonation (or deflagration) pressure  $p_d$  versus nitromethane content in the gaseous mixture of nitromethane and oxygen.

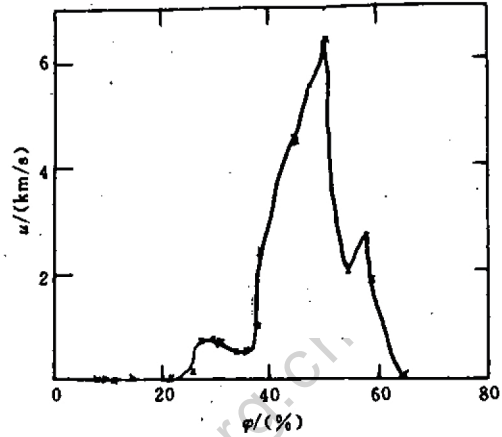


图7 硝基甲烷和氧的气态混合物爆轰(或爆燃)速度  $u$  和硝基甲烷含量  $\varphi$  的关系  
Fig. 7 Detonation (or deflagration) velocity  $u$  versus nitromethane content in the gaseous mixture of nitromethane and oxygen.

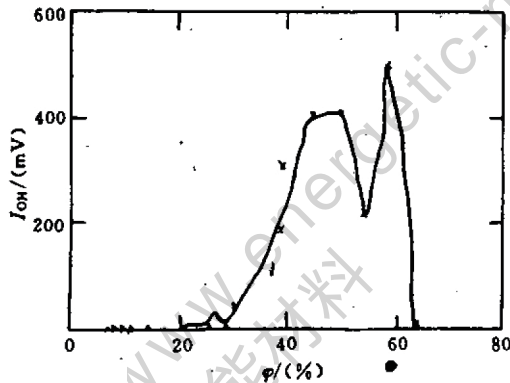


图8 硝基甲烷和氧的气态混合物爆轰(或爆燃)中间产物 OH 基辐射和硝基甲烷含量  $\varphi$  的关系  
Fig. 8 OH radical emission versus nitromethane content  $\varphi$  in the gaseous mixture of nitromethane and oxygen.

#### 4 结论

通过上述大量实验,可以得出如下的看法:

(1) 硝基甲烷和氧的气态混合物点火形成的爆燃现象比较弱,但是在壁上反射后可形成很强的爆轰现象;实验确定的临界引爆压力为  $p_c = 12\text{MPa}$ ;实验发现当反射波超过临界引爆压力时,就可引发硝基甲烷与氧的气态混合物爆轰而使压力增高十多倍,爆速接近凝聚相的硝基甲烷爆轰速度。

(2) 实验发现,硝基甲烷和氧的气态混合物的爆燃(或爆轰)压力、速度与混合物中硝基甲烷浓度的关系呈驼峰状,它明显不同于一般可燃性物质的实验结果。

(3) 反应中间产物的测量结果表明;上述的实验现象均与反应微观机理密切相关。

(4) 选择硝基甲烷和氧的气态混合物的不同配比即可获得不同的比冲量。因此适当

地利用硝基甲烷的爆轰现象,可得到具有比一般烷烃燃料大得多的比冲量。

(5) 实验还发现,在硝基甲烷和氧的气态混合物在爆轰下限以下不存在爆燃现象。

### 参 考 文 献

- 1 徐柏庆等. 分子催化, 1992, 6(2), 94
- 2 胡 栋等. 爆炸与冲击, 1989, 9(3): 266
- 3 Hu Dong, et al. 2nd Symp. (Inter. ) on Combustion and Energy Utilization, 1993.

## STUDY ON DEFLAGRATION AND DETONATION FOR GASEOUS MIXTURE OF NITROMETHANE AND OXYGEN

Hu Dong

(*Laboratory for Shock Wave Physics and Detonation Physics Reserch,  
Southwest Institute of Fluid Physics*)

Wang Yongguo Lu Hongbin

(*Institute of High pressure and High Temperature Physics,  
Chengdu University of Science and Technology*)

Sun Zhumei

(*Laboratory for Shock Wave Physics and Detonation Physics Reserch  
Southwest Institute of Fluid Physics*)

**ABSTRACT** The behaviour of deflagration and detonation was studied, for the gaseous mixture of nitromethane and oxygen by means of pressure gauge and photodetection techniques in an explosion shock tube. It was found that the deflagration (or detonation) pressure and velocity increased fluctuantly with the increase of nitromethane content in the gaseous mixture. The humps formed here from are obviously different from the upside down "U" curve of general explosion mixtures. Furthermore, a strong detonation could occur on the end plate of the explosion tube after reflection of the weak deflagration wave in the ignited gaseous mixture. The detonation pressure on the end plate is about 45MPa. CHO, OH radical emission excited by detonation are 10 times greater than that excited by deflagration.

**KEY WORDS** deflagration, detonation, intermediate product, nitromethane.