DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0347-06

油气爆炸的氮气非预混抑制实验*

张培理,杜 扬
(中国人民解放军后勤工程学院军事供油工程系,重庆 401311)

摘要: 依靠激波管可视化实验台架,完成了油气爆炸的氮气非预混抑制实验,获得了火焰前锋在氮气非预混段内衰减、熄灭过程的高速摄影照片。通过对实验数据和高速摄影照片的分析,讨论了油气爆炸氮气非预混抑制过程的超压特性和火焰行为。结果表明,采用氮气非预混手段能显著降低油气爆炸过程的超压与超压上升速率。油气爆炸的氮气非预混抑爆过程经历了惯性相持期、抑制衰减期和扩散熄灭期 3 个阶段。氮气分子作为第三体参与化学反应并携带走高能自由基的能量,促使链式反应向中止链大量发展,这是油气爆炸氮气非预混抑制过程的主要机理。抑制衰减期的火焰由衰减抑制区和核心区火焰构成,火焰与氮气的相互作用主要发生在衰减抑制区内。在抑制衰减期内,火焰速度的衰减可用线性公式描述。

关键词: 爆炸力学;氮气非预混抑制;超压;油气爆炸;火焰行为;火焰速度;可视化
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

在众多的油气资源中,气态的油气资源,例如天然气、瓦斯和原油、成品油挥发气体等,属于典型的易燃易爆气体,稍有不慎就可能引发火灾爆炸安全事故,从而造成重大人员伤亡和巨额经济损失。近年来,油气火灾爆炸事故仍时有发生,造成大量人员伤亡和难以估量的经济损失。为了避免受限空间内油气爆炸事故的发生,减少人员伤亡与财产损失,尚需加强对油气爆炸抑制过程的研究,从而提出有效的油气爆炸抑制技术和措施。

可燃气体爆炸抑制过程是一个非常复杂的过程,从抑制手段上看可以分为主动抑制和被动抑制 2 类[1]。然而,无论采用何种抑制手段,其目的均是控制可燃气体爆炸过程中火焰的发展,从而使火焰在传播过程中逐渐减速衰减并熄灭。然而,从掌握的文献来看,涉及可燃气体爆炸抑制剂[2-3]和抑制技术[4-5]的文献较多,而涉及抑爆机理的文献较少,特别是涉及油气爆炸抑制过程火焰行为的文献十分少见。

氮气是一种非常稳定的惰性阻燃气体,广泛应用于石油化工、冶金等领域中有防火防爆要求的各种场合。因此,许多文献中对氮气的惰化特性[6]、稀释特性[7]以及防火防爆性能[8]开展了较为深入的探究。然而在这些文献中,氮气常常被用作预混抑制剂以惰化、稀释可燃气体,而将氮气作为非预混抑制剂来抑制受限空间内可燃气体爆炸还鲜有报道。

本文中拟在激波管上通过可视化实验手段,对油气爆炸氮气非预混抑制过程进行可视化实验研究,从而获得油气爆炸氮气非预混抑制过程的火焰行为,以期为油料洞库或坑道等涉油气受限空间内油气爆炸的氮气非预混抑制技术和装备的研究提供参考。

1 实验装置与实验方法

实验的主要装置包括可组装式激波管(200 mm×200 mm×5 500 mm)、油气循环系统、数据采集系统、点火系统、高速摄影仪、计算机等。数据采集系统主要包括压力采集系统和浓度测试系统等。图 1 是氮气非预混抑制油气爆炸时的主要实验装置布置示意图。

为了直观地分析氮气非预混抑爆过程的火焰行为和抑爆机理,在激波管上安装了可视化段(280 mm×200 mm),并利用高速摄影仪捕捉火焰遭遇氮气后的火焰行为,以揭示火焰在氮气中的行为

* **收稿日期**: 2014-10-27; **修回日期**: 2015-03-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(51276195);重庆市自然科学基金项目(cstc2016jcyjA1617)
第一作者: 张培理(1985—),男,博士,讲师;**通信作者**: 杜 扬,zpl6123@163.com。

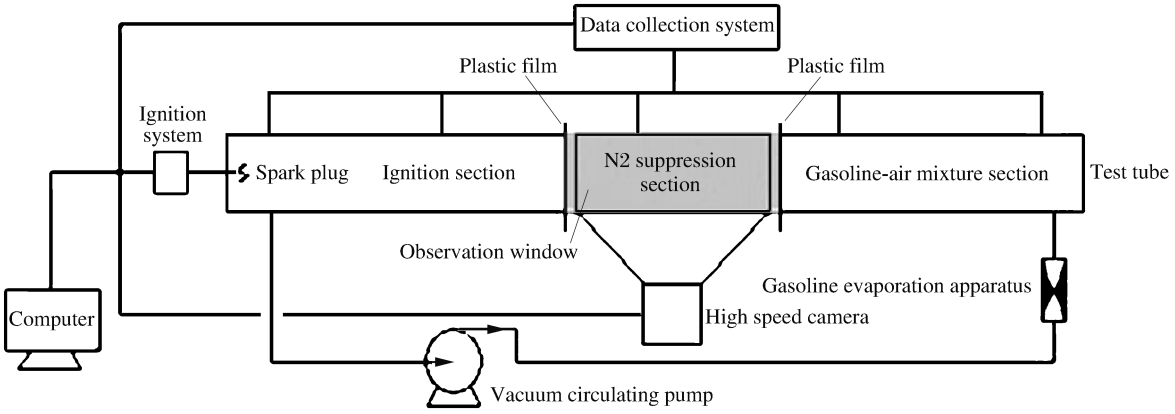

图 1 主要实验装置布置图

Fig. 1 Schematic illustration of the main experimental setup

规律和氮气非预混抑爆过程的机理。

实验中,用 FASTCAM-Ultima 512 型高速摄影仪捕捉火焰在氮气非预混段内的行为,根据高速摄影仪的快门速度与采样频率就可以获得火焰前锋速度[9-10]。具体来说就是根据相邻照片中火焰前锋的位置差和相邻照片的时间差来计算火焰速度。

油气循环系统包括真空循环泵、油气蒸发装置(具体结构及工作原理见文献[11-12]。压力采集系统主要由压力传感器、采集卡和计算机组成。沿激波管共布置了 3 个压力传感器,实验中以这 3 个压力传感器采集到数据的平均值作为激波管内的压力值。浓度采集系统主要由 GXH-1050 型红外分析仪和 NHA-502 型汽车尾气分析仪组成。实验中油气浓度由 GXH-1050 型红外分析仪测试,而其他气体组分,如 O_2、CO、CO_2 等,均由 NHA-502 型汽车尾气分析仪测量。

实验用的氮气由氮气制备系统提供,氮气纯度约为 95%(其余气体组分为主要为氧气)。非预混氮气段用厚度为 0.2 mm 的塑料薄膜隔离形成,由于激波管可组装,因此非预混氮气段长度可调。实验时,先由氮气发生装置制备好所需氮气,之后设置好氮气抑爆段长度、位置并充入氮气,然后向激波管内充入一定浓度的油气,最后点火并采集实验数据。

为了使实验结果具有代表性,实验中油气当量比(按异辛烷计算)设置为 1,经计算,此时的初始油气体积分数约为 1.61%。本文实验的初始条件设置为:氮气段长度为 226 cm,氮气段近端与点火源的距离为 55 cm,氮气段氮气和氧气的体积分数分别为 95%和 5%,油气初始体积分数为 1.61%,氧气的初始体积分数为 20.6%,点火能为 5 J,初始温度为 300 K,初始相对压力为 0 Pa。

2 实验结果分析

2.1 氮气非预混抑制过程超压与主要组分体积分数变化

图 2 是激波管内油气爆炸有无氮气非预混抑制的超压(p)曲线。由图 2 可以看出,无氮气非预混抑制时油气爆炸最大超压为 0.430 MPa,达到最大超压时的耗时为 0.342 s,超压上升速率为 1.26 MPa/s。而当有氮气非预混抑制时油气爆炸最大超压仅为 0.126 MPa,达到最大超压时的耗时为0.210 s,超压上升速率约为 0.60 MPa/s。有氮气非预混抑制时的最大超压比无氮气非预混抑制时下降了约 70.7%,平均超压上升速率比无氮气非预混

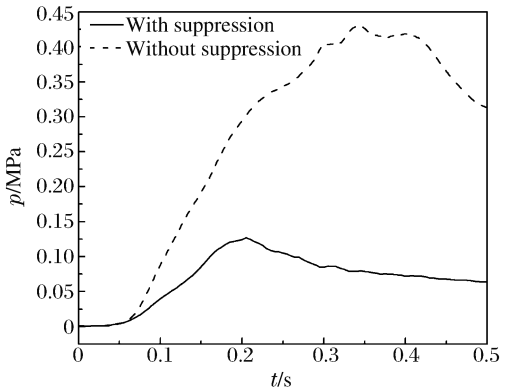

图 2 有无氮气非预混抑制时的超压曲线

Fig. 2 Curves of overpressure of the explosion with and without suppression by non-premixed nitrogen

抑制时下降了约 52.4%。

实验中，当氮气段上游的油气被点燃后，火焰面后的已燃高温高压气体会推动火焰面前的未燃气体向下游运动，此时氮气段上游的薄膜会先在压力作用下破裂，这会导致火焰前方的未燃气体和氮气段内的氮气混合。因此，火焰必然会进入氮气段传播。此时，如果火焰能持续穿过氮气段，则抑制实验失败，如果火焰未穿过氮气段，则抑制实验成功。抑制实验能否成功，与氮气非预混段长度、氮气段上游的油气段长度、氮气段内氮气的纯度、初始油气浓度等因素有关[13]。但是仅以油气爆炸最大超压和平均超压上升速率来说明油气爆炸氮气非预混抑制成功与否还不够充分，还必须提供其他证据。表 1 是油气爆炸氮气非预混抑制实验前后激波管内主要气体组分的体积分数(φ)。实验后激波管内油气、O_2、CO_2 和 CO 的体积分数分别为 1.19%、15.24%、2.86% 和 0.89%。这表明，实验后激波管内仍有大量的油气和 O_2 剩余，并且均处于油气爆炸所需的极限[14]内。这说明，本次实验中氮气非预混段后的油气混合物并未发生燃烧，即火焰并未穿过氮气非预混段，本次抑制实验是成功的。

表 1 实验前后激波管内主要气体组分的体积分数

Table 1 Volume fraction of main gas components before and after the experiment

测量条件	φ/%			
	油气	O_2	CO_2	CO
实验前	1.61	20.42	0.01	0
实验后	1.19	15.24	2.86	0.89

2.2　氮气非预混抑制过程火焰行为与火焰速度

图 3 是高速摄影仪捕捉到的火焰前锋在氮气非预混段中熄灭的过程。其中高速摄影仪采样频率为 1 000 s^{-1}，快门时间周期为 0.001 s。

由图 3 可以看出：

(1) 油气爆炸火焰前锋进入氮气段后，在初期仍保持上游的发展趋势向前发展，此时火焰前锋仍由较为清晰的轮廓，火焰前锋的形状略呈向下游凸出的抛物线(228～232 ms)。这主要是由于火焰受上游膨胀压力波作用，从上游进入氮气段时，流场速度大于火焰的燃烧速度，因此火焰仍具有一定的“惯性”，持续发生燃烧反应并放出热量，这也导致火焰前锋边界有能量支撑，呈现较为清晰的轮廓。这一阶段火焰最主要的特征是惯性相持。

(2) 油气爆炸火焰前锋从 234 ms 开始由抛物线状逐渐演化为布满激波管横断面的矩形，火焰的颜色也从外围逐渐由亮黄色变成暗红色，火焰前锋的轮廓也变得模糊(234～244 ms)。这主要是由于从 234 ms 开始，氮气对油气爆炸火焰的抑制效果开始显现，氮气分子在火焰放热产生的对流机制作用下，开始由火焰外围向火焰内部扩散。由于氮气分子是惰性的，它在火焰高温下作为第 3 体[15]参与油气爆炸的化学反应，其主要反应过程可用以下方程式表示：

$$CH + 2O + N_2 \rightarrow OH + CO + N_2 \tag{1}$$

$$OH + OH + N_2 \rightarrow H_2O + O + N_2 \tag{2}$$

$$O + O + N_2 \rightarrow O_2 + N_2 \tag{3}$$

式(1)～(3)中左边的氮气分子自身能量较低，右边氮气分子能量较高，它们参与反应主要是携带走 CH、O、OH、CO 等高能自由基的能量，在碰撞反应过程中高能自由基将内能传递给氮气分子，成为氮气分子的动能，氮气分子促使链式反应向中止链大量发展。正是由于这一机制的存在，使得链式反应的方向发生了变化，链式反应逐渐中止。相应的，火焰温度随着化学反应历程的改变逐渐降低，这导致碳烟颗粒激发态的辐射强度下降，相应的辐射光颜色也由亮黄色逐渐向暗红色过渡。火焰在这一阶段最主要的特征是抑制衰减。图 4 显示了处于抑制衰减阶段的火焰结构。从图 4 可以看出，此时的火焰由衰减抑制区和核心区火焰构成，火焰与氮气的相互作用主要发生在衰减抑制区内。

(3) 火焰前锋在 246～276 ms 之间持续衰减，颜色由黄红色逐渐变为暗红色，火焰区形状不能自持

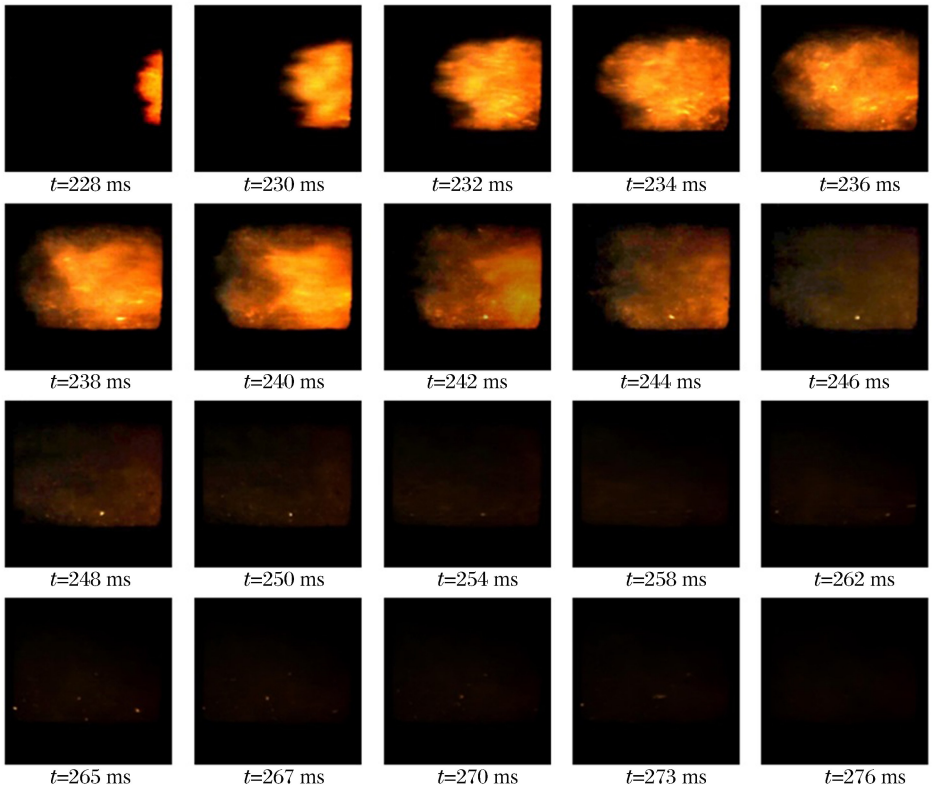

图 3 高速摄影仪捕捉到的火焰前锋在氮气中熄灭的过程

Fig. 3 Photos of flame front in extinction, captured by high speed camera

并逐渐扩散消失。这是由于此时火焰前锋在氮气的抑制作用下,化学反应速度持续衰减,化学反应放热已不能为火焰的继续传播提供能量,火焰区在流场作用下已不能维持自身形状,逐渐向四周扩散,这又导致热量损失进一步的加剧,火焰区温度迅速下降,火焰厚度迅速变薄,最终火焰完全在氮气中熄灭。火焰在这一阶段最主要的特征是扩散熄灭。

从上述分析可以看出,氮气非预混抑爆过程大致经历了 3 个阶段,即惯性相持期、抑制衰减期、扩散熄灭期。这 3 个阶段分别耗时约 6、12 和 32 ms。

图 5 是根据火焰行为的高速摄影照片得到的氮气非预混抑爆过程中火焰前锋速度(v)随时间的变化曲线。由图 5 可以看出:(1) 氮气非预混抑爆过程中火焰前锋的速度随时间波动,这主要是由于火焰在传播过程中,放热与热损失、混合气体的速度场、边界条件(如开口或闭口)以及油气爆炸压力波相互作用的共同作用导致了受限空间火焰速度的波动。这一现象与机理在文献中[11]已进行了详细的讨论。(2) 油气爆炸火焰进入氮气抑制段时速度约为 20 m/s,在上游惯性作用下火焰速度上升至 43 m/s,之后氮气的抑制作用开始显现,火焰开始减速。在约 238 ms 时火焰速度降低至零,此时的火焰为驻留火焰,之后,火焰的减速并没有停止,火焰开始向后方运动,火焰速度出现了负值,在约 240 ms 时火焰速度出现最小值,约为 -12.92 m/s。之后为扩散熄灭期,火焰在振荡流场影响下,速度又开始增加,在 244 ms 时火焰速度又上升至 10.77 m/s。然而之后,油气爆炸火焰随流场开始扩散,火焰放热、火焰温度、火焰面积等迅速减小,直至火焰完全熄灭。(3) 在抑制衰减期内,火焰速度的衰减可用以下线性拟合公式描述:

$$v = -0.5756t + 1368 \tag{4}$$

式中:火焰速度 v 的单位为 m/s,时间 t 的单位为 ms。拟合因子 R^2 为 0.983。可以看出火焰速度的衰减强度约为 576 m/s,因此氮气对火焰的抑制效果非常显著。

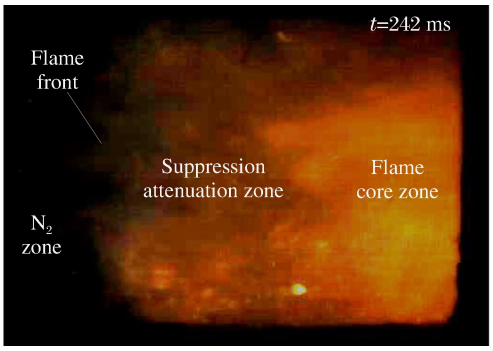

图 4　抑制衰减阶段的火焰结构

Fig. 4　Flame structure in the phase of suppression/attenuation

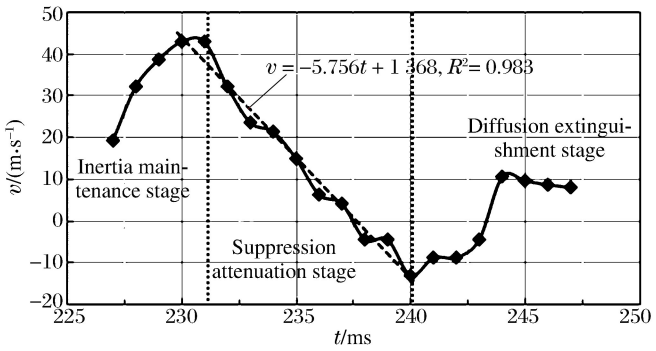

图 5　氮气非预混抑爆过程中火焰速度随时间的变化

Fig. 5　Variation of the flame speed with time in suppression process

3　结　论

本文中在激波管内完成了油气爆炸的氮气非预混抑制实验。通过可视化手段，得到了油气爆炸火焰在氮气段内衰减熄灭的照片。实验数据分析表明，氮气非预混抑制手段能显著降低油气爆炸过程的超压和平均超压上升速率；油气爆炸的氮气非预混抑爆过程经历了惯性相持阶段、抑制衰减阶段和扩散熄灭阶段 3 个阶段；惰性氮气分子在火焰高温下作为第 3 体参与化学反应并携带走高能自由基的能量，促使链式反应向中止链大量发展，这是油气爆炸氮气非预混抑制过程的主要机理；处于抑制衰减阶段的火焰结构由衰减抑制区和核心区火焰构成，火焰与氮气的相互作用主要发生在衰减抑制区内；在抑制衰减期内，火焰速度的衰减可用线性拟合公式描述。

参考文献：

[1]　Moore P E. Suppressants for the control of industrial explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996,9(1):119-123.

[2]　Thomas G O, Edwards M J, Edwards D H. Studies of detonation quenching by water sprays[J]. Combustion Science and Technology, 1990,71:233-245.

[3]　Liu Q, Hu Y, Bai C, et al. Methane/coal dust/air explosions and their suppression by solid particle suppressing agents in a large-scale experimental tube[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(2):310-316.

[4]　Catlin C. Passive explosion suppression by blast-induced atomisation from water containers[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002,94(2):103-132.

[5]　Nie B, He X, Zhang R, et al. The roles of foam ceramics in suppression of gas explosion overpressure and quenching of flame propagation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,192(2):741-747

[6]　Razus D, Brinzea V, Mitu M, et al. Inerting effect of the combustion products on the confined deflagration of liquefied petroleum gas-air mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009,22(4):463-468.

[7]　李兴虎. 氮气稀释丙烷空气混合气的层流火焰速度测量[J]. 燃烧科学与技术，2001,7(4):288-289.
Li Xinghu. Measurement of laminar burning velocity on diluted air-propane mixture[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001,7(4):288-289.

[8]　Molnarne M, Mizsey P, Schröder V. Flammability of gas mixtures: Part 2: Influence of inert gases[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005,21(1/2/3):45-49.

[9]　Ko B C, Cheong K-H, Nam J-Y. Fire detection based on vision sensor and support vector machines[J]. Fire safety Journal, 2009,44(3):322-329.

[10]　Liu C B, Ahuja N. Vision based fire detection[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, UK, 2004,4:134-137.

[11] Zhang P, Du Y, Zhou Y, et al. Explosions of gasoline-air mixture in the tunnels containing branch configuration [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1279-1284.

[12] Yang D, Li Z P, Hong O Y. Effects of humidity, temperature and slow oxidation reactions on the occurrence of gasoline-air explosions[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2013,23(3):226-238.

[13] Du Y, Zhang P, Zhou Y, et al. Suppressions of gasoline-air mixture explosion by non-premixed nitrogen in a closed tunnel[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014,31:113-120.

[14] 赵衡阳.气体和粉尘爆炸原理[M].北京:北京理工大学出版社,1996:31.

[15] Stephen R T. An introduction to combustion:concepts and application[M]. New York: The McGraw-Hill Companies, 2000:201.

Experiments of nitrogen non-premixed suppression of gasoline-air mixture explosion

Zhang Peili, Du Yang

(*Department of Military Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing* 401311, *China*)

Abstract: We carried out experiments of suppressing the gasoline-air explosion by non-premixed nitrogen using the visualization experimental bench and a high-speed camera to take photos of the flame front extinction to capture the suppression process. Based on the analysis of the experimental data and high-speed taken photos, we examined the overpressure characteristics and the flame behavior of the suppression process. Results from our study show that the suppression by non-premixed nitrogen can significantly reduce the overpressure in the gasoline-air mixture explosion and its rise rate, and in the suppression process three phases are identified: sustained inertia, suppression/attenuation, and diffusion/extinction. The mechanism governing the suppression process is that nitrogen molecules participate in the chemical reaction as a third part and can then absorb energy from the high-energy free radicals so that the main reaction chains are changed to termination chains. The flame in the phase of the suppression/attenuation can be divided into the suppression/attenuation zone (where suppression and attenuation occur) and the core zone. In the phase of suppression and attenuation, the relationship between the flame speed and time can be described by a linear formula.

Key words: mechanics of explosion; nitrogen non-premixed suppression; overpressure; gasoline-air mixture explosion; flame behavior; flame speed; visualization

(责任编辑 王小飞)