DOI: 10.11883/bzycj-2017-0185
文章编号: 1001-1455(2018)06-1303-07

模拟高原环境条件下 C_5-C_6 燃料的爆轰特性研究*

尤祖明[1],祝逢春[2],王永旭[1],李 斌[1],解立峰[1]
(1.南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094;
2.中国人民解放军 95856 部队,江苏 南京 210028)

摘要: 针对军事上使用的碳氢燃料 C_5-C_6,借助自行设计的立式爆轰管装置,通过改变管体内初始环境温度和压力,研究当温度低于常温,压力小于一个大气压时此种碳氢燃料的爆轰性能,得到爆轰参数分别随初始温度和初始压力变化的规律,并将实验数据与常温常压条件下的数据相对比。结果表明:在常温条件下,环境初始温度对燃料爆轰参数的影响远小于初始压力的影响,当环境初始压力下降至常压的一半时,燃料的爆轰状态接近临界爆轰状态。研究成果可为云爆武器在高原条件下使用的性能预计提供实验数据补充和支持。

关键词: 碳氢燃料;爆轰;爆轰参数;环境温度;环境压力
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

气液两相云雾爆轰过程涉及复杂的爆炸力学、流体力学和多相流等领域的相关知识,其应用范围涵盖工业生产中的气云爆炸防治和军事应用领域的云爆武器制备相关领域,具有重要的研究价值和实际意义。无论在工业生产过程还是云爆武器的配方研究中,碳氢燃料都作为主要成分或参与对象广泛存在。目前,对于碳氢燃料燃爆特性的研究多集中于碳氢燃料的燃烧或燃烧转爆轰过程,白春华等[1],蒋丽等[2]首先将云雾爆轰与云爆武器运用结合,奠定了云雾爆轰的军事应用价值基础,陈嘉琛等[3]、史远通等[4]、L. J. Liu 等[5]和刘庆明等[6],针对特定的碳氢燃料,开展了爆炸罐内或外场的燃料爆炸特性实验研究和仿真工作;郑权等[7]针对爆轰发动机背景开展了液态燃料的相关研究,研究工作多集中在雾化效果以及爆轰威力的衔接方面;徐晓峰[8]、姚干兵[9]等使用与本文一样的爆轰管装置开展了一些碳氢燃料的爆轰威力实验,但是没有针对环境条件进行深入研究;M. Pilch 等[10]、G. M. Faeth 等[11]、L. P. Hsiang 等[12]、D. M. Johnson 等[13]、S. I. Jackson[14]等更多地在燃料分散领域开展了大量的研究工作,对燃料爆轰及影响因素的研究不多。在工业应用背景下,一些专家学者将研究重心放在可能影响碳氢燃料燃烧效果或爆炸威力的外界因素条件中,例如在工业生产过程中的环境压力、环境温度、容器尺寸结构等,获得了大量的研究成果,但环境压力温度的影响研究多集中于高温(高于 200℃)或高压(几个大气压)条件,配合工业生产背景,涉及碳氢燃料在低温或低压条件下爆轰的研究几乎没有。

环境适应性是云爆燃料配方设计必须考虑的一个重要问题。云爆武器以其面杀伤而闻名,且在平原地带具有较好的应用效果,但在高原地区,由于海拔较高、气压低,其燃料的使用及威力的局限性必须考虑。本文中基于此背景,通过实验手段探究在低温低压环境下碳氢燃料的爆轰特性,借助已有的实验和测试手段,通过改变初始环境温度和初始环境压力,获得燃料在不同条件下的爆轰状态,为特定环境下的云爆燃料配方设计提供参考。

1 实验方法和条件

1.1 实验条件确定

自然环境中,大气压会受到温度、湿度、风速和海拔等因素的影响,这些因素的改变都将导致大气压发生相应的变化,其中以海拔高度的影响最为显著,它与大气压是呈反比关系。一般来说,海拔每升高

* 收稿日期: 2017-05-27; 修回日期: 2017-10-17
第一作者: 尤祖明(1985—),男,博士研究生; 通信作者: 李 斌,libin@njust.edu.cn。

100 m,大气压下降 0.67 kPa。海拔与大气压的关系如下式所示:

$$p = 101.325\exp(-H/7\,924) \quad (1)$$

式中:p 为大气压,kPa;H 为对应的海拔高度,m。

模拟实验条件时,季节条件选择为夏季,此时假设 0 m 海拔高度下的环境温度为 303 K,通过计算,根据公式(1)和温度的经验公式计算出高原环境下不同海拔高度对应的环境压力及温度(以海拔高度为 0 m 时大气压力为 101.3 kPa,温度为 303 K 进行计算),如图 1 所示。

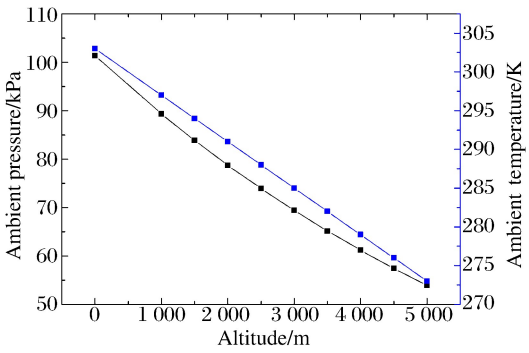


图 1 不同海拔高度对应的环境压力和环境温度

Fig. 1 Ambient pressure and temperature at different altitudes

1.2 实验装置及仪器

1.2.1 实验装置

本次实验采用云爆燃料性能测试平台中的立式爆轰管装置进行,其结构图和实物图如图 2 所示。

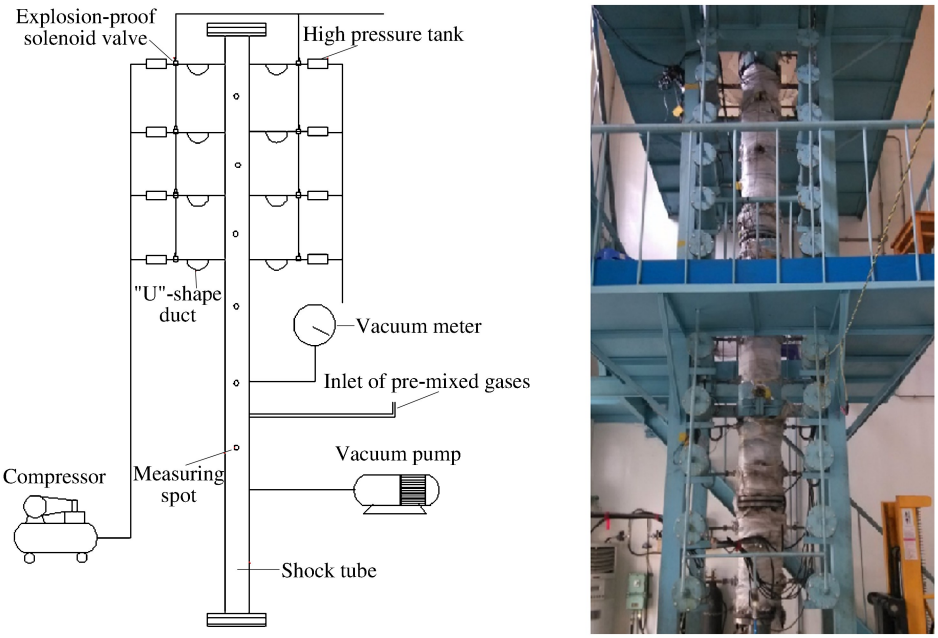


图 2 立式爆轰管结构图及实物图

Fig. 2 Schematic diagram and picture of vertical detonation tube

整套立式爆轰管装置由爆轰管主体、燃料雾化系统、点火系统及抽真空系统等组成。爆轰管内径 200 mm、壁厚 20 mm、高 5.4 m。燃料雾化系统由空气压缩机、储气罐、U 形管储液装置、喷头等组成。点火系统由延时点火器、起爆线、雷管基座等组成。抽真空系统由防爆真空泵及真空表等配件组成。

实验开始前,先检查爆轰管装置的气密性。当爆轰管装置的气密性符合要求后,向燃料雾化装置中的 U 型管内注入燃料,开启空气压缩机,向储气罐内注入一定量压缩空气。然后打开真空泵,将管体抽到指定的压力值。最后开启压力采集系统,设置点火延时器。一切准备就绪后,开启电磁阀,压缩空气夹带燃料液体由喷头雾化后进入爆轰管,通过点火延迟器控制点火时间,待燃料完全雾化且浓度合适后点火,通过压力测试系统和数据采集系统记录压力曲线并保存。

1.2.2 测试仪器

压力测试系统由传感器、电荷放大器、数据采集卡、微机等组成。采用 PCB 压电式石英传感器,如

图 2 所示。传感器间距 0.5 m，传感器 1 距离起爆端 1.4 m，具体传感器布置位置及量程参数见表 1。图 3 为液体燃料爆轰过程的典型压力时间曲线，通过对压力时间曲线的数据处理，可以得到燃料的最大爆轰压力和两个传感器响应的时间间隔，加上传感器距离的确定，可计算得出爆轰波的传播速度。

表 1 传感器布置位置及量程参数

Table 1 Positions of pressure sensors and its parameter ranges

传感器	1	2	3	4	5	6
高度/m	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9
最大量程/MPa	6.864	6.875	6.884	6.857	6.901	6.921

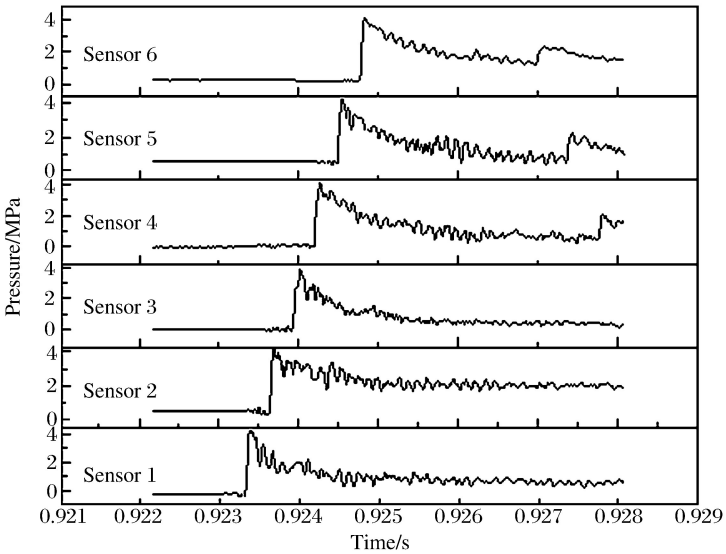


图 3 典型爆轰管内燃料爆轰压力-时间曲线

Fig. 3 Typical pressure-time curves of fuels measured in the detonation tube

1.2.3 实验样品和条件

在本次实验中，燃料为碳氢燃料 C_5-C_6，从南京某化工厂购置，该燃料曾经为某型液体云爆药剂的主要配方成分。根据燃料雾化效果，点火延时时间设置为 160 mm。为使碳氢燃料在雾化形成云团后能直接爆轰，点火具选取 1 发雷管加 3 g 塑性炸药的形式，通过成分能量计算，起爆能量约为 23.5 kJ。

2 实验结果及讨论

高原环境是环境温度和环境压力共同变化的环境状态，为进行更为系统和针对性的研究，首先分别针对初始环境温度和初始环境压力两个单因素进行研究，通过实验数据分析，确定影响燃料爆轰威力的主要环境因素后，针对高原环境的实际温度和压力条件进行系统分析。实验中将压力传感器固定在不同位置，如图 2 中管体结构图所示，不同位置处的压力传感器能测得当前位置碳氢燃料的爆炸峰值超压，即最大爆轰压力。

2.1 不同初始环境温度下燃料的爆轰威力

根据模拟的高原环境条件，实验时将爆轰管的初始温度控制在 273～303 K，以 3 K 为步长进行测试，实验结果如图 4～5 所示。

由图 4 可以看出，对每个初始温度测试条件下的实验结果来说，爆轰波压力和速度随传播距离基本保持稳定，可以认为燃料达到了稳定爆轰状态；随着初始环境温度的升高，在相同测试位置处燃料爆轰压力和爆轰速度都有所增加，且最大增幅（Δp_{max} 和 Δv_{max}）和最小增幅（Δp_{min} 和 Δv_{min}）分别为 0.24 MPa、60 m/s 和 0.18 MPa、31 m/s。经过 3 组平行试验的数据处理分析后，选取实验数据中 6 个位置的爆轰

压力的平均值作为爆轰压力值，爆轰速度的平均值为爆轰速度值，如图 5 所示，随着环境初始温度的升高，燃料的爆轰压力和爆轰速度都缓慢增加，从 273 K 到 303 K，爆轰压力和爆轰速度分别增加了 9.4% 和 2.0%；相比来看，在环境温度超过 283 K 后，爆轰速度测量误差较小，而爆轰压力的测量具有较高的不稳定性，且在环境温度为 293 K 以下时尤为明显。

从环境温度对燃料爆轰威力的影响来看，在环境初始压力不变的条件下，由于环境温度的升高，燃料的挥发分浓度增加，相比与低温状态时，燃料云雾具有更多的气相成分，有利于燃料的爆轰发展和持续，同时，经雾化系统进入爆轰管的燃料分子运动速度加快，在温度升高后，其与空气反应更为剧烈，有利于燃料爆轰威力的提高。

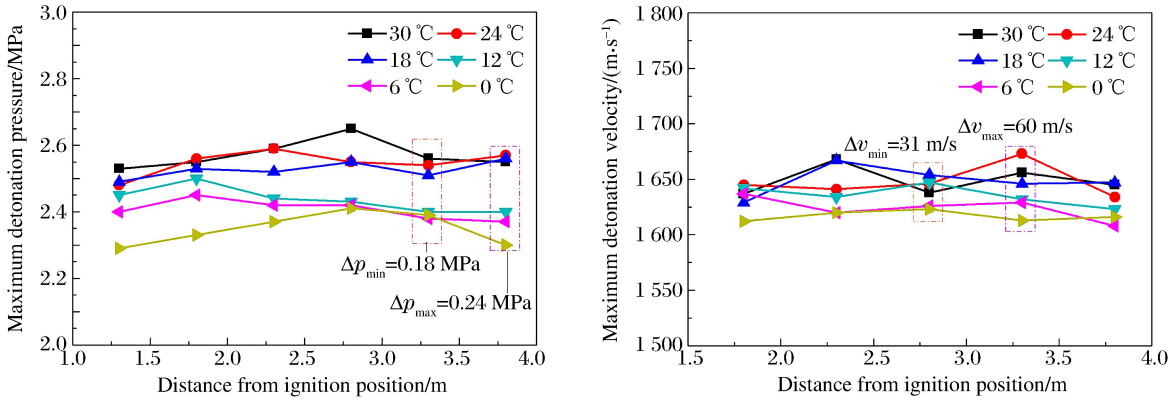


图 4 不同初始温度条件下燃料爆轰参数随测试点距离变化情况

Fig. 4 Relationships between detonation characteristics of fuels and measuring points at different initial temperatures

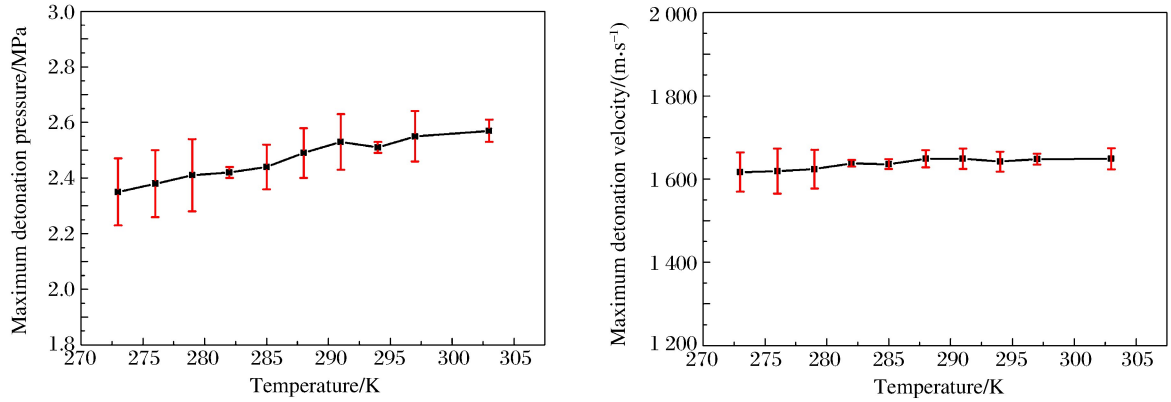


图 5 不同初始温度条件下燃料爆轰参数变化趋势

Fig. 5 Trends of detonation characteristics of fuels at different initial temperatures

2.2 不同初始环境压力下燃料的爆轰威力

在初始环境温度为 303 K 时，开展初始环境压力变化条件下燃料的爆轰威力研究，此时，为使燃料达到较好的爆轰效果，选择当量比为 1.0 左右时候的燃料量进行实验，其结果如图 6～7 所示。

从图 6 可以看出，在真空条件下下，环境压力值对碳氢燃料的爆轰压力和爆轰速度随距离发展影响变化不大，这是由于所有实验都是在当量比为 1 左右的条件下开展，燃料和空气中的氧气基本能够完全反应，燃料云雾最初的爆轰状态基本能够得到延续。从图 7 可以明显看出，在真空条件下，初始环境压力对燃料的爆轰特性影响很大，随着初始环境压力的降低，燃料的爆轰压力和速度都呈下降趋势，且下降幅度越来越大。当初始真空度下降近 50%时，燃料的爆轰压力下降至正常大气压力条件下燃料爆轰压力的 16.1%，爆轰速度下降为正常大气压力条件下燃料爆轰速度的 37.5%。

当初始环境温度一定时，环境压力的改变，尤其是向真空状态发展时，由于爆轰管内容积一定，单位体积内燃料和氧气的量减少，在相同能量作用下，燃料与氧气反应的自持性减弱；同时，因为氧气分子间

隙增大，燃料在雾化入爆轰管后由于环境压力减弱，其悬浮能力降低，沉降更快，在相同的二次起爆延时条件下，容易在管体内自上而下形成浓度梯度，这些因素都可能造成起爆后燃料云雾的爆轰压力降低甚至不能实现爆轰。

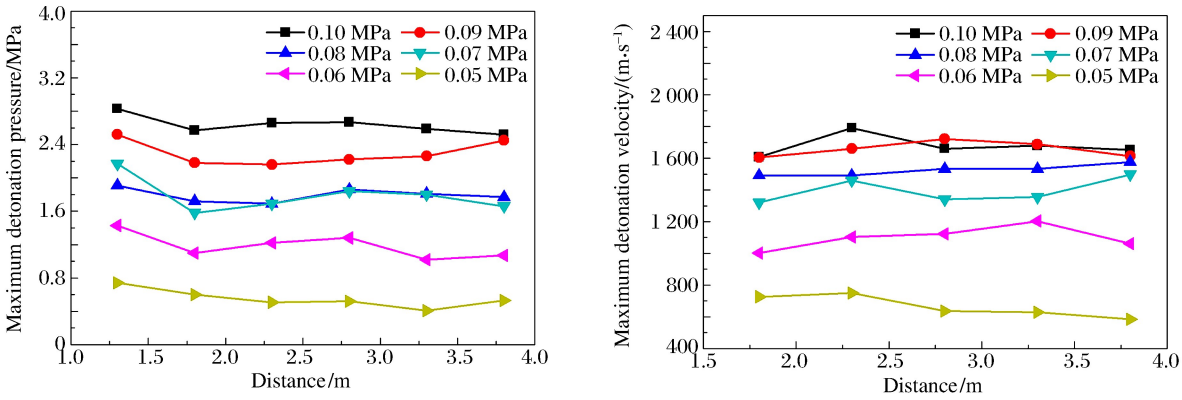


图 6　不同初始压力条件下燃料爆轰参数随测试点距离的变化

Fig. 6　Relationships between detonation characteristics of fuels and measuring points at different initial pressures

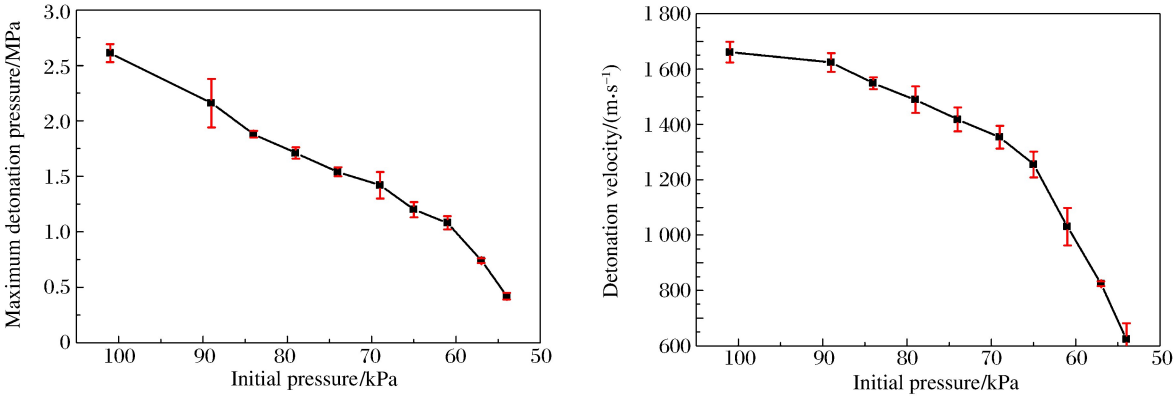


图 7　不同初始压力条件下燃料爆轰参数变化趋势

Fig. 7　Trends of detonation characteristics of fuels at different initial pressures

2.3　模拟高原环境条件下 C_5-C_6 燃料爆轰参数变化趋势的综合分析

为更贴合高原状态下的实际环境条件，针对不同海拔高度实际环境条件下的碳氢燃料爆轰特性进行了深入研究，得到海拔高度与燃料爆轰特性的关系，如图 8 所示。从图 8 可以看出，随着海拔高度的

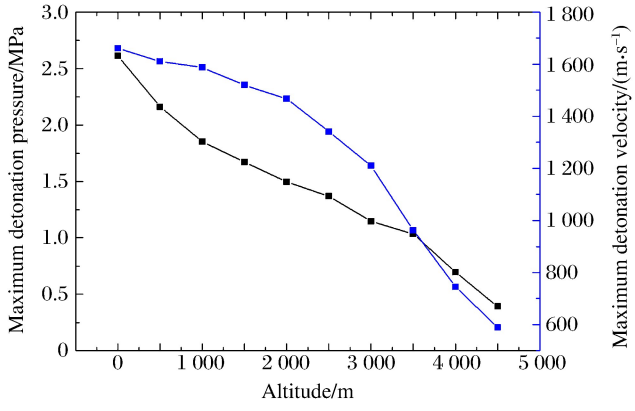


图 8　模拟高原环境条件下 C_5-C_6 燃料爆轰特性变化趋势

Fig. 8　Trends of detonation characteristics for C_5-C_6 fuels in simulated altitude environment conditions

增加,碳氢燃料的爆轰压力和速度都呈快速递减趋势,结合之前分别针对环境温度和环境压力的研究发现,当两个因素结合起来时,碳氢燃料的爆轰参数变化与环境压力的变化趋势更为接近。

由上述实验结果可以看出,在通常气候条件下的环境低温(273～303 K)对碳氢燃料爆轰参数影响不明显,相比爆轰速度,爆轰压力随环境温度尚有一定的变化趋势;而环境压力对碳氢燃料的爆轰参数影响显著,为更好地对比研究,基于上述实验数据,分别针对燃料的爆轰压力进行环境温度和环境压力的分析,得到燃料爆轰压力与环境温度和压力的拟合方程为:

$$p_{\mathrm{d}} = 0.348 + 0.007\ 35T_0 \tag{2}$$

$$p_d = 0.045\ 2p_0 - 1.87 \tag{3}$$

式中:p_{d}为燃料的爆轰压力,MPa;T_0为环境温度,K;p_0为环境压力,MPa。

式(2)的相关系数为 0.987,式(3)的相关系数为 0.990。

由式(2)～(3)可以看出,燃料爆轰压力受环境初始压力的影响变化幅度约为受环境初始温度影响变化幅度的 6 倍,说明在通常气候条件下使用云爆武器时或在云爆燃料配方的筛选方面,针对某种燃料,要优先考虑环境压力对爆轰性能的影响,其次再考虑环境温度的影响。在高原环境下使用云爆武器时,云爆燃料的爆轰特性更多由环境压力的大小决定。

3 结 论

(1) 模拟高原环境温度条件时,环境温度的变化对燃料爆轰压力和速度有影响但影响不大,从 0 ℃到 30 ℃的环境温度变化过程中,燃料的爆轰压力和速度分别增加了 9.4%和 2.0%,当温度较低时,燃料云雾的爆轰仍处于稳定强爆轰状态。

(2) 模拟高原环境压力条件时,环境压力的变化对燃料爆轰压力和速度影响很大;当环境压力下降至常压的 50%时,燃料的燃爆压力下降至常温常压状态下的 16.1%,燃爆速度下降至常温常压状态下的 37.5%,但燃料云雾仍然能够发生自持反应,处于稳定弱爆燃状态。

(3) 模拟高原环境条件时,云爆燃料的爆轰特性更多由环境压力的大小决定。

参考文献:

[1] 白春华,梁慧敏,李建平,等. 云雾爆轰[M]. 北京:科学出版社,2012.

[2] 蒋丽,白春华,刘庆明. 气/固/液三相混合物燃烧转爆轰过程实验研究[J]. 爆炸与冲击,2010,30(6):588-592.
JIANG Li, BAI Chunhua, LIU Qingming. Experimental study on DDT process in 3-phase suspensions of gas/solid particle/liquid mist mixture[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(6):588-592.

[3] 陈嘉琛,张奇,马秋菊,等. 固体与液体混合燃料抛撒过程数值模拟[J]. 兵工学报,2014,35(7):972-976.
CHEN Jiachen, ZHANG Qi, MA Qiuju, et al. Numerical simulation of dispersal process of solid-liquid mixed fuel [J]. Acta Armamentarii, 2014,35(7):972-976.

[4] 史远通,张奇. 爆炸驱动燃料抛散的非理想化特征[J]. 含能材料,2015,23(4):330-335.
SHI Yuantong, ZHANG Qi. Non-ideal characteristics of fuel dispersal driven by explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015,23(4):330-335.

[5] LIU Lijuan, ZHANG Qi, SHEN Shilei, et al. Evaluation of detonation characteristics of aluminum/JP-10/air mixtures at stoichiometric concentrations[J]. Fuel, 2016,169:41-49.

[6] 刘庆明,白春华,李建平. 多相燃料空气炸药爆炸压力场研究[J]. 实验力学,2008,23(4):360-370.
LIU Qingming, BAI Chunhua, LI Jianping. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008,23(4):360-370.

[7] 郑权,翁春生,白桥栋. 当量比对液体燃料旋转爆轰发动机爆轰影响实验研究[J]. 推进技术,2015,36(6):947-952.
ZHENG Quan, WENG Chunsheng, BAI Qiaodong. Experimental study on effects of equivalence ratio on detonation characteristics of liquid-fueled rotating detonation engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015,36(6):947-952.

[8] 徐晓峰. 碳氢燃料爆轰特性的研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.

[9] 姚干兵. 液态碳氢燃料云雾爆轰及其抑制与泄放研究[D]. 南京：南京理工大学，2006.

[10] PILCH M, ERDMAN C A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987,13(6):741-757.

[11] FAETH G M, HSIANG L P, WU P K. Structure and breakup properties of sprays[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995,21:99-127.

[12] HSIANG L P, FAETH G M. Drop properties after secondary breakup[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1993,19(5):721-735.

[13] JOHNSON D M, TOMLIN G B, WALKER D G. Detonations and vapor cloud explosions: why it matters[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36:358-364.

[14] JACKSON S I. The dependence of ammonium-nitrate fuel-oil (ANFO) detonation on confinement[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017,36(2):2791-2798.

Detonation characteristics of C_5-C_6 fuels under simulated plateau-condition

YOU Zuming[1], ZHU Fengchun[2], WANG Yongxu[1], LI Bin[1], XIE Lifeng[1]

(1. *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Unit* 95856, *Nanjing* 210028, *Jiangsu, China*)

Abstract: Via self-designed detonation tube, the detonation characteristics of hydrocarbon fuels were studied, and the conditions of low temperature and vacuum were considered. After systematic experiments, the relationship between detonation characteristics and ambient conditions were obtained and compared with that of normal condition. The results showed that the influence of the initial pressure played a more important role than the initial temperature, and when the initial pressure decreased to half of the barometric pressure, the detonation of hydrocarbon fuel was in critical condition. The achievements will be a complement and support the prediction of weapon performance for fuel-air explosives.

Keywords: hydrocarbon fuels; detonation; detonation characteristics; ambient temperature; ambient pressure

（责任编辑　曾月蓉）