

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.012

# N<sub>2</sub>O基单组元气体推进剂的爆炸事故分析\*

朱辛育<sup>①</sup>  李智鹏<sup>②</sup>  蒋榕培<sup>②</sup>  李玉艳<sup>①</sup>  徐  森<sup>①③</sup>  刘大斌<sup>①</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②北京航天试验研究所(北京,100074)

③国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

[摘  要]  针对新型N<sub>2</sub>O基单组元气体推进剂在发动机试车过程中发生的爆炸事故,通过推进剂的基础安全性实验与管道阀门的结构分析,开展了事故原因分析。气体推进剂点火能量的实验结果表明,临界点火能量在0.25~0.50 mJ之间。在实验管道中的火焰传播速度能达到410 m/s。临界着火温度的实验结果显示,样品的最低着火温度为135℃。阀门的工作原理与结构分析结果显示,在阀门通电开启过程中,会对活塞上方4.06 mL的气体产生压缩作用。根据绝热方程计算可知,气体在压缩过程中温度可升至193.7℃。对比实验与理论计算可以推知,阀门启动过程中的压缩作用,可能是发生爆炸事故的根本原因。

[关键词]  氧化亚氮;气体推进剂;实验事故分析;电磁阀;绝热压缩

[分类号]  X932

## Explosion Accident Analysis of N<sub>2</sub>O-base Gas Monopropellant

ZHU Xinyu<sup>①</sup>, LI Zhipeng<sup>②</sup>, JIANG Rongpei<sup>②</sup>, LI Yuyan<sup>①</sup>, XU Sen<sup>①③</sup>, LIU Dabin<sup>①</sup>

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

② Beijing Institute of Aerospace Testing Technology (Beijing, 100074)

③ National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT]  Root cause analysis through basic safety characteristic experiment of fuel and the structure analysis of piping valve was conducted on the explosion accident of the new N<sub>2</sub>O-base single gas component propellant during engine test. The experimental results show that the critical ignition energy of the gas propellant is in the range of 0.25 mJ to 0.50 mJ, and the propagation velocity of flame within the experimental pipe can reach to 410 m/s. Critical ignition temperature test results show that the minimum ignition temperature of the sample is 135℃. Valve structure and working principle analysis results show that the electrified opening of the valve will impose a compression over the 4.06 mL gas above the piston. The adiabatic equation calculation shows that gas temperature can be up to 193.7℃ during the compression. It can be inferred from the comparative test and theoretical calculation that the compression action in the valve start-up process may be the root cause of the explosion accident.

[KEYWORDS]  nitrous oxide; gas propellant; experimental accident analysis; electromagnetic valve; adiabatic compression

### 引言

近年来,氧化亚氮N<sub>2</sub>O凭借安全、稳定、价格低廉、高比冲等优良特性,作为双组元以及N<sub>2</sub>O基单组元复合推进剂的氧化剂具有很大优势,已成为国内

外学者的研究热点<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外众多研究机构在N<sub>2</sub>O基复合推进剂体系已展开深入研究<sup>[4-7]</sup>。Whitmore等<sup>[8]</sup>发展了一种通过使用熵及混合物中气相含量作为变量,对N<sub>2</sub>O储箱向外排气的过程进行模拟的N<sub>2</sub>O自增压工程模型。Zhang等<sup>[9-11]</sup>研究了N<sub>2</sub>O-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>混合物的

\* 收稿日期:2019-05-23  
基金项目:国防科技创新特区项目  
第一作者:朱辛育(1995-),男,硕士研究生,主要从事气体推进剂的安全应用。E-mail:969519991@qq.com  
通信作者:徐森(1981-),男,副教授,主要从事含能材料安全性研究。E-mail:xusen@njust.edu.cn

爆轰特性,还研究了 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>O-Ar 混合物起爆的临界管径和临界能量,以及 H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>O-Ar 混合物在球形容器中引起爆轰的临界能量。Venkatesh 等<sup>[12]</sup>对 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>O 混合物的 DDT(燃烧转爆轰)过程进行了详细的研究,并将压力传感器测得的压力与 CJ 理论值进行了对比。Merrill 等<sup>[13]</sup>对美国发生的 N<sub>2</sub>O 推进剂的爆炸事故进行了分析发现,N<sub>2</sub>O 可以像增塑剂一样溶解在有机材料中,通过管道返回到储罐中,意外的冲击或摩擦造成 N<sub>2</sub>O 与燃料的混合物发生局部绝热压缩,形成热点,使混合物发生快速化学反应而发生燃烧,进而形成爆轰,并对点火源与储罐阈值调整提出了建议。Movileanu 等<sup>[14]</sup>进行了 60% N<sub>2</sub> 稀释当量比 N<sub>2</sub>O-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的爆炸实验,研究了气体推进剂的最大爆炸压力和压力上升速率。Mével 等<sup>[15]</sup>测量了空气稀释条件下在球形弹体中 H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>O 的火焰速度,并进行了化学动力学模拟。曾祥敏等<sup>[16]</sup>研究了 N<sub>2</sub>O-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 预混气体在内含螺旋加速环的有机玻璃管道中的火焰传播及爆炸特性。李智鹏等<sup>[17-18]</sup>对 N<sub>2</sub>O-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 体系层流的火焰传播速度、最大火焰温度和燃烧质量流率进行了理论计算,并对设计的球形火焰燃烧器进行了数值测量。

N<sub>2</sub>O 虽然具有优良的稳定性,但是作为高能氧化剂在进行发动机点火实验时极易发生回火事故,从而引发储罐中高密度的压缩单组元燃料着火,甚至引发严重的爆炸事故。针对项目组前期研究过程中 N<sub>2</sub>O 基气体推进剂在管道阀门开启时发生的爆炸事故,分别从气体推进剂的基础安全特性以及管道阀门的工作原理方面,开展相关的实验与数据分析研究,探索爆炸事故的原因。

## 1 N<sub>2</sub>O 基气体推进剂点火实验爆炸事故

为进行 N<sub>2</sub>O 基单元气体推进剂发动机试车,设计搭建了 N<sub>2</sub>O 基预混气体(N<sub>2</sub>O-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)的点火试验系统。试验系统见图 1,主要由以下几个部分构成:配气系统、燃料储罐和燃料管道、电磁阀。实验开始前,将各组分燃料充到燃料罐体中,配置成单元气体推进剂样品。达到设定的压力后,开启电磁阀,准备试车。在开启电磁阀的瞬间发生了爆炸,且殉爆了整个储罐,但是此时,发动机喷口处的点火装置尚未动作。因此,初步判断这起爆炸事故原因与阀门的开启动作相关。

- 针对该爆炸事故,按照以下方案开展事故分析:
- 1) 单组元燃料的安全特性(点火能量、初始反应温度、火焰传播特性)研究;
  - 2) 防爆电磁阀的工作原理分析。

## 2 单组元气体推进剂的安全特性实验

- ### 2.1 推进剂的火焰传播特性及最小点火能量测定
- 采用自主搭建的点火能量测试系统,测量样品的最小点火能,利用高速录像观测样品在 1.4 m 长有机玻璃管(∅50 mm)中的反应特性,计算得到样品的火焰传播速度,具体的实验装置见图 2。
- ### 2.2 气体推进剂初始反应温度的测定
- 采用高性能绝热量热仪(Phi-TEC II)追踪物料热分解过程,仪器设备如图 3 所示。

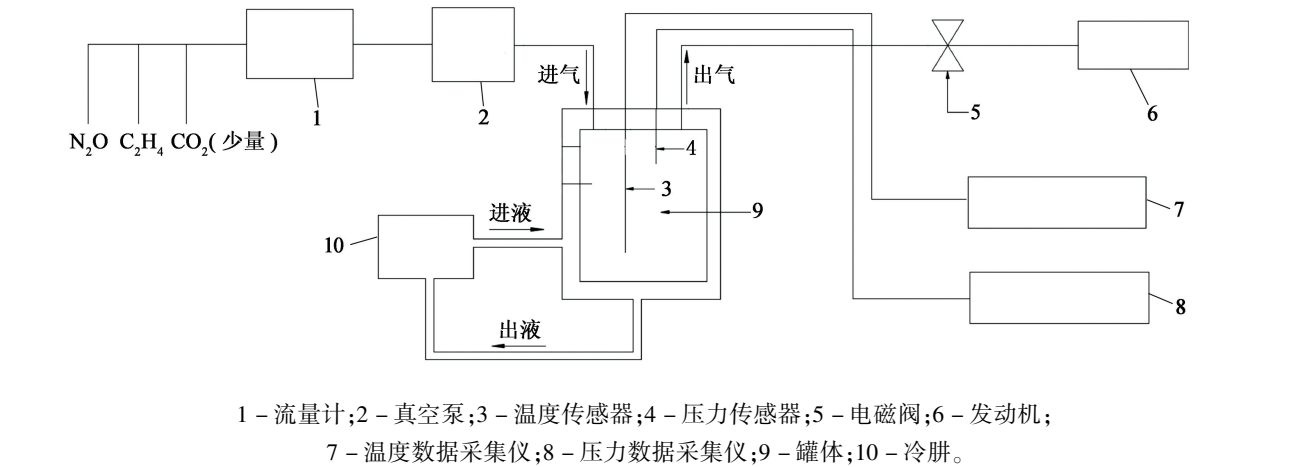


图 1 发动机防回火实验系统图  
Fig. 1 Flow chart of engine anti backfire test

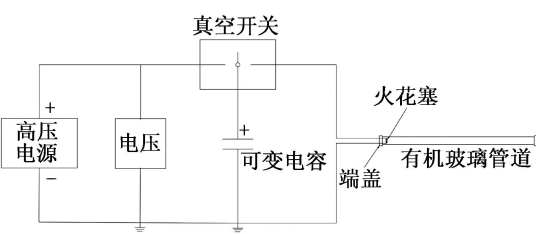


图2 气体推进剂最小点火能量及火焰传播测定原理图

Fig.2 Schematic diagram of minimum ignition energy and flame propagation measurement of the gas propellant



图3 高能绝热量热仪

Fig.3 High performance adiabatic calorimeter

2.3 实验结果与分析

2.3.1 气体推进剂临界点火能量的测定结果

从表1中可以看出,点火能量为0.25 mJ时,对预混气体进行10次点火均未点燃;在点火能量为0.50 mJ时,气体推进剂被一次点燃成功。可以得出,气体推进剂的点火能量在0.25~0.50 mJ之间。

表1 临界点火能量实验结果

Tab.1 Test results of critical ignition energy of the gas propellant		
点火能量/ mJ	点火次数	成功试验次数
0.25	10	0
0.50	1	1

2.3.2 气体推进剂火焰传播特性分析

图4为高速摄像机拍摄的气体推进剂火焰传播过程。根据拍摄得到的火焰传播的图片,量出图4

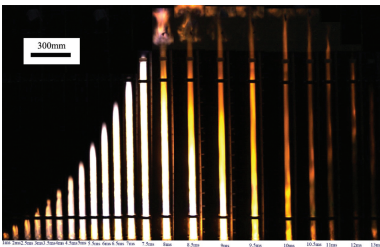


图4 气体推进剂火焰传播图

Fig.4 Diagram of flame propagation of the gas propellant

中标尺的像素长度与标尺的实际长度进行换算,进而推算出火焰的实际长度。

图4中,样品点火后的开始阶段,火焰前端形状不规则,可能是气体受热不均匀导致的。待火焰燃烧稳定以后,前端呈指尖状向前传播至整个管道,火焰前端和主体火焰颜色差异不明显,泄放口处火焰开始呈紫色,后由紫色逐渐变为红棕色。泄放口出现明显的晶格状火焰,泄放口上端火焰呈蘑菇云状,后逐渐减小至消失;随后管道中火焰也逐渐减小至消失。根据高速录像的测试结果,计算得到气体推进剂的火焰传播长度见图5,进而推知的火焰传播速度见图6。

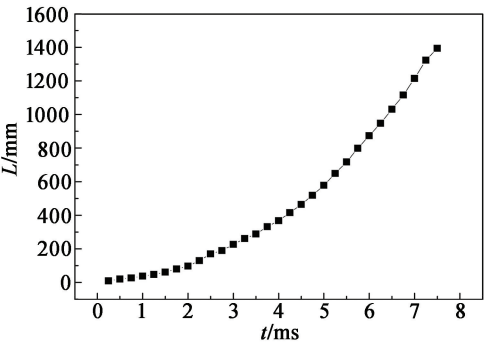


图5 气体推进剂火焰传播长度曲线

Fig.5 Flame propagation length curve of the gas propellant

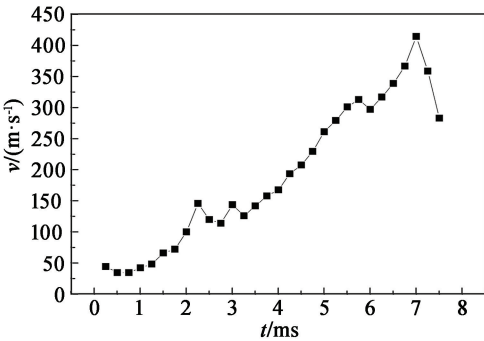


图6 气体推进剂火焰传播速度曲线

Fig.6 Flame propagation velocity curve of the gas propellant

从图6可以看出,推进剂配方从点火到传播至管顶的时间为7.25 ms,火焰传播过程中加速状态稍有波动,1、2、3、4、5、6、7 ms末火焰速度分别为40、100、125、170、260、300、370 m/s,7.25 ms末火焰加速至410 m/s。

2.3.3 气体推进剂的初始反应温度的测定结果

N<sub>2</sub>O-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>混合气体的初始反应温度测试结果如图7所示。

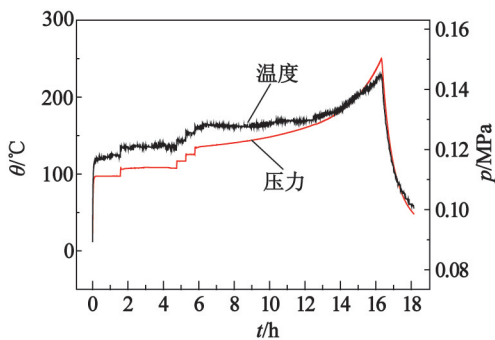


图7 气体推进剂初始反应温度与压力

Fig. 7 Initial reaction temperature and pressure test curves of the gas propellant

从图7中可以看出,环境温度达到135℃后,样品出现明显的放热,表明单组元燃料在该环境温度下会发生放热反应。

### 3 电磁阀的工作原理与分析计算

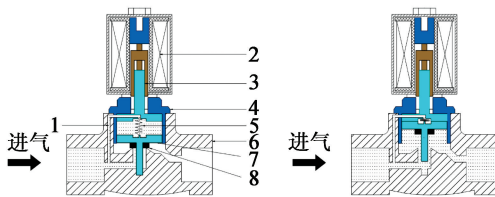
#### 3.1 工作原理

爆炸事故采用的电磁阀型号为ZCF51-10B-10防爆电磁阀。采用的防爆电磁阀原理图见图8。电磁阀内部尺寸见图9。

通过对电磁阀的工作原理、结构图和阀门解剖,可以发现:1)为了保证阀门在关闭时的密封性,在阀门进门口与活塞上方配置有一根压力平衡管。这也会导致阀门闭合时,会有高压气体推进剂进入活塞上方,经过测量,活塞上面的空间约为4.06 mL;2)由于阀门通电开启的动作时间极短,在阀塞快速上提的过程中,会对活塞与阀芯之间的气体推进剂产生快速的绝热压缩作用。

#### 3.2 分析计算

根据热力学第一定律和理想气体状态方程导出的理想气体绝热方程来推算电磁阀闭合时被压

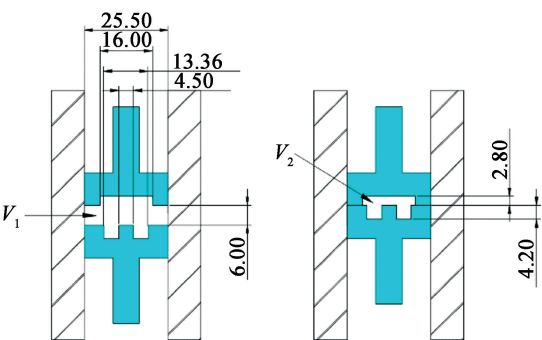


(a)电磁阀闭合 (b)电磁阀打开

1 - 压力平衡管;2 - 线圈;3 - 磁性阀芯;4 - 阀盖;  
5 - 弹簧;6 - 阀体;7 - 阀塞;8 - 密封圈。

图8 电磁阀工作原理图

Fig. 8 Principle diagram of the solenoid valve



(a)电磁阀闭合 (b)电磁阀打开

图9 电磁阀内部尺寸(单位:mm)

Fig. 9 Inner size parameters of the solenoid valve(unit:mm)

缩的部分气体推进剂的大致升温:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad (1)$$

式中: $T_1$ 为阀内的初始温度; $T_2$ 是阀内气体经绝热压缩后上升到的最终温度; $V_1$ 是电磁阀闭合之前阀塞与阀芯之间空腔的气体体积; $V_2$ 为电磁阀闭合之后空腔的气体体积; $k$ 是混合气体的绝热指数。

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (2)$$

式中: $C_p$ 为混合气体在1.5 MPa、298 K状态下的定压热容; $C_v$ 为混合气体的定容热容。混合气体的定压、定容比热容可通过各气体组分的质量比 $g_i$ 和每种气体的比热容 $C_{i0}$ 计算得到:

$$C = \sum_{i=1}^n g_i C_{i0} \quad (3)$$

电磁阀开启或关闭过程中压缩空间的尺寸变化如表2所示。

表2 临界点火能量实验结果

Tab.2 Test results of critical ignition energy			
$V_1/$ mm <sup>3</sup>	$V_2/$ mm <sup>3</sup>	$C_p/$ (J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	$C_v/$ (J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )
4 064.2	1 000.2	1.735	1.315

计算可知,在阀门开启过程中,活塞上方受到压缩的气体,绝热升温可达到193.7℃,远高于单组元气体推进剂的临界着火温度。

### 4 结论

1) N<sub>2</sub>O基单组元气体推进剂的最小点火能量为0.25~0.50 mJ;初始反应温度在135℃左右。在1.4 m长、管径为50 mm的管道中,最大火焰传播速度为410 m/s。



2) 通过对电磁阀的分析与计算可以得出: 阀门开启过程, 会对活塞上方的气体推进剂产生快速的压缩作用, 绝热升温可达到  $193.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 比气体推进剂的最低着火温度高  $58.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 这可能是气体推进剂爆炸事故的根本原因。

3) 对于单组元气体或液体推进剂, 应慎重选择管道输送设备, 避免对输送介质产生快速压缩作用。

### 参 考 文 献

- [1] 朱成财, 韩伟, 于忻立, 等. 氧化亚氮基单元复合推进剂技术研究述评[J]. 火箭推进, 2016, 42(2): 79-85.  
ZHU C C, HAN W, YU X L, et al. Review of nitrous-oxide-based composite monopropellants technology [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(2): 79-85.
- [2] 邓德涛, 沈赤兵, 李清廉. 氧化亚氮火箭发动机试验研究进展[C]//航空宇航与控制科学分论坛论文集. 湖南省研究生创新论坛. 长沙, 2009: 307-312.  
DENG D T, SHEN C B, LI Q L, et al. Progress of experimental investigation on nitrous oxide rocket engine [C]//Proceedings of Aerospace and Control Science BBS. Postgraduate Innovation BBS in Hu'nan Province. Changsha, 2009: 307-312.
- [3] 张春燕, 陶刚, 涂善东, 等. 低压氢气-空气混合物爆炸试验研究及数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 87-92.  
ZHANG C Y, TAO G, TU S D, et al. Experimental study and numerical simulation of low-pressure hydrogen-air mixture explosion[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 87-92.
- [4] WERLING L, PERAKIS N, HOCHHEIMER B, et al. Experimental investigations based on a demonstrator unit to analyze the combustion process of a nitrous oxide/ethene premixed green bipropellant[C]//5th CEAS Air & Space Conference. Delft, Netherlands, 2015.
- [5] WERLING L, GERNOTH A, SCHLECHTRIEM S. Investigation of the combustion and ignition process of a nitrous oxide/ethene fuel blend [C]//Space Propulsion Conference. Cologne, Germany, 2014.
- [6] TAYLOR R. Safety and performance advantages of nitrous oxide fuel blends (NOFBX) propellants for manned and unmanned spaceflight applications[C]//Proceedings of the Conference 'A Safer Space for Safer World'. Versailles, France, 2012.
- [7] 刘肖, 姜小存, 唐涛, 等. 国外一氧化二氮推进剂的应用研究[J]. 飞航导弹, 2013(6): 74-78.
- [8] WHITMORE A, CHANDLER S N. Engineering model for self-pressurizing saturated- $\text{N}_2\text{O}$ -propellant feed systems[J]. Journal of Propulsion & Power, 2010, 26(4): 706-714.
- [9] ZHANG B, NG H D, MÉVEL R, et al. Critical energy for direct initiation of spherical detonations in  $\text{H}_2/\text{N}_2\text{O}/\text{Ar}$  mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(9): 5707-5716.
- [10] ZHANG B, NG H D, LEE J H S. The critical tube diameter and critical energy for direct initiation of detonation in  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{N}_2\text{O}/\text{Ar}$  mixtures[J]. Combustion & Flame, 2012, 159(9): 2944-2953.
- [11] ZHANG B, LIU H, WANG C. Detonation velocity behavior and scaling analysis for ethylene-nitrous oxide mixture[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 671-678.
- [12] VENKATESH P B, DENTREMONT J, MEYER S E, et al. High-pressure combustion and deflagration-to-detonation transition in ethylene/nitrous oxide mixtures [C]//8th U. S. National Combustion Meeting. Park City, Utah, USA, 2013.
- [13] MERRILL C. Nitrous oxide explosive hazards AFRL-RZ-ED-TP-2008-184[R]. Edwards AFB, CA, USA: Air Force Research Laboratory, 2008.
- [14] MOVILEANU C, RAZUS D, MITU M, et al. Explosion of  $\text{C}_2\text{H}_4\text{-N}_2\text{O-N}_2$  in elongated closed vessels [C]//Proceedings of the European Combustion Meeting 2015. Budapest, Hungary: ELTE, 2015.
- [15] MÉVEL R, DAVIAENKO D, LAFOSSE F, et al. Detonation in hydrogen-nitrous oxide-diluent mixtures: an experimental and numerical study[J]. Combustion & Flame, 2015, 162(5): 1638-1649.
- [16] 曾祥敏, 张玉刚, 蒋榕培, 等.  $\text{N}_2\text{O}/\text{C}_2\text{H}_4/\text{CO}_2$  预混气体火焰传播及爆炸特性的试验研究[J]. 火炸药学报, 2018, 41(5): 501-505.  
ZENG X M, ZHANG Y G, JIANG R P, et al. Experimental investigation of flame propagation and explosion properties of premixed gases  $\text{N}_2\text{O}/\text{C}_2\text{H}_4/\text{CO}_2$  [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(5): 501-505.
- [17] 李智鹏, 蒋榕培, 王亚军, 等. 氧化亚氮基绿色单组元推进剂火焰传播速度研究[C]//中国航天第三专业信息网第三十七届技术交流会暨第一届空天动力联合会议. 西安, 2016.
- [18] 李智鹏, 孙海云, 蒋榕培, 等. 乙烯-氧化亚氮层流预混燃烧过程研究[J]. 火箭推进, 2018, 44(5): 37-42.  
LI Z P, SUN H Y, JIANG R P, et al. Study on premixed laminar combustion process of ethylene/nitrous oxide mixture[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(5): 37-42.