

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.007

N₂O-C₂H₄ 预混气体火焰的传播特性*

李玉艳^① 王红松^② 蒋榕培^③ 李智鹏^③ 朱辛育^① 徐 森^① 潘 峰^① 解立峰^①

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②南京海关危险货物与包装检测中心(江苏常州,213022)

③北京航天实验技术研究所(北京,100074)

[摘 要] 运用标准 $k-\varepsilon$ 模型,对 N₂O-C₂H₄ 预混气体在水平半封闭管道内火焰传播过程进行了数值模拟,得到了火焰锋面结构、传播速度、出口压力和燃烧区的气流速度随时间的变化规律。研究表明,管道内预混火焰传播过程分为3个阶段:点火初期的平面火焰传播阶段、Tulip 火焰传播阶段和指形火焰传播阶段;火焰传播速度呈指数增长,管道出口处压力和气流速度均呈现出先增大后减小的趋势。同时,采用高速摄影系统、压力传感器、有机玻璃管等装置对预混气体的火焰加速进程和压力演变过程进行了验证,实验结果与数值模拟结果一致。

[关键词] 预混气体;实验研究;数值模拟;N₂O-C₂H₄

[分类号] X932;O643.2

Flame Propagation Characteristics of Premixed N₂O and C₂H₄

LI Yuyan^①, WANG Hongsong^②, JIANG Rongpei^③, LI Zhipeng^③, ZHU Xinyu^①, XU Sen^①, PAN Feng^①, XIE Lifeng^①

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

② Nanjing Customs Testing Center for Dangerous Goods and Packaging (Jiangsu Changzhou, 213022)

③ Beijing Institute of Aerospace Testing Technology (Beijing, 100074)

[ABSTRACT] Flame propagation of premixed N₂O-C₂H₄ in a horizontal semi-closed tube was numerically simulated by using the standard $k-\varepsilon$ model. Time dependence of flame front structure, propagation velocity, outlet pressure, and flow speed in combustion zone was obtained. The results show that the process of premixed flame propagation in tube could be divided into three stages, which are plane flame propagation stage, tulip flame propagation stage and finger flame propagation stage. Flame acceleration presents the exponential trend, and pressure at the vent of the tube and flow speed of the premixed mixture first increase and then decline. At the same time, high speed photographic system, pressure sensor, and PMMA tube were used to study on the flame speed and pressure, which agree with the simulated results.

[KEYWORDS] premixed gas; experimental study; numerical simulation; N₂O-C₂H₄

引言

氧化亚氮(N₂O,笑气)化学性质稳定,无毒,成本低廉,能与多数储箱材料相容,是一种高密度氧化剂。同时,它的饱和蒸气压高,具有自增压特性,对有机物具有很强的溶解能力,可与烃类、氨类等燃料复合制备新型单组元推进剂^[1-2]。但受某些外界条件激发时,N₂O会被点燃分解,瞬间释放大热量和气体,引起爆炸;同时,该氧化剂燃烧时火焰会沿管

道回传,发生回火,引发事故^[3-4]。因此,有必要对N₂O与燃料火焰传播特性进行研究,为N₂O基复合推进剂的安全使用提供理论基础。

国内外学者已对N₂O与燃料的燃烧及爆炸特性进行了相关研究,包括N₂O-H₂、N₂O-CH₄、N₂O-C₂H₂、N₂O-C₂H₄和N₂O-C₃H₈等混合气体的层流火焰速度^[5-7],N₂O-NH₃-H₂、N₂O-H₂-CO-Ar、N₂O-NH₃、N₂O-CH₄、N₂O-C₂H₆、N₂O-C₂H₂及N₂O-NO-H₂等混合气体层流火焰结构^[8-13],N₂O-H₂-N₂O-Ar混合气体的点火特性^[14-15]等。Grubelich等^[16]在长径比为68

* 收稿日期:2019-05-14

基金项目:国防科技创新特区项目

第一作者:李玉艳(1985-),女,博士研究生,主要从事推进剂安全性能相关研究。E-mail: ly. piao@163. com

通信作者:潘峰(1971-),男,副教授,主要从事含能材料相关研究。E-mail: pflycc@163. com

的封闭管道中研究了 $C_2H_4-N_2O$ 的燃烧特性,探索了初始压力对混合气体爆压、爆速的影响规律。Zhang 等^[17]对 $C_2H_4-N_2O$ 在窄管中的爆轰行为进行了实验研究,得到了平均爆轰速度与初始压力、管径及 CJ 爆轰速度等参数的关系。Koshiba 等^[18-19]对 $C_2H_2-N_2O$ 的爆炸极限、爆炸压力和爆燃指数进行了表征,结果表明,在富氧条件下, $C_2H_2-N_2O$ 比 $C_2H_2-O_2$ 具有更高的爆炸压力;对于爆炸下限,混合气体 $C_2H_2-O_2$ 与 C_2H_2-Ar 相当,大于 $C_2H_2-N_2O$ 。Movileanu 等^[20-22]分别研究了氮气稀释及惰性气体稀释条件下 $C_2H_4-N_2O$ 的反应动力学机理。

以预混气体 $N_2O-C_2H_4$ 为研究对象,对其在水平圆管中的传播过程进行了数值模拟和实验研究,模拟了 $N_2O-C_2H_4$ 预混气体燃烧中的火焰传播过程,分析了火焰锋面的变化及气流随时间的变化关系,并将预混气体火焰传播速度和压力变化与实验结果进行了比较。

1 数学模型

1.1 基本控制方程

基于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD), 采用 Fluent 软件对预混气体爆燃过程进行模拟。以化学反应动力学和流体力学为基础, 依据质量守恒、能量守恒、动量守恒和化学反应平衡建立控制方程组^[23]。

能量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = S_m. \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; \vec{v} 为速度矢量; S_m 为连续相质量。

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F}. \quad (2)$$

式中: p 为静态压力; $\bar{\tau}$ 为应力张量; $\rho \vec{g}$ 为重力引起的体积力; \vec{F} 为外部引力。

应力张量 $\bar{\tau}$ 定义为

$$\bar{\tau} = \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I. \quad (3)$$

式中: μ 为分子的动力黏性系数; I 为单位张量。

化学反应平衡方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \\ \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v}) + S_h. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: k_{eff} 为有效导热率; h_j 为某种组分的显焓; \vec{J}_j 为某种物质的扩散流量; S_h 为化学反应热和其他任何体积热源; 等号右侧前 3 项分别代表传导、扩散和黏滞耗散能量。

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}. \quad (5)$$

式中: μ_i 为湍流黏度系数; Sc_i 为湍流施密特数值; Y_i 为某种组分的质量分数; $D_{i,m}$ 为某种组分的质量扩散通量; T 为绝对温度。

1.2 网格划分

结合实验装置图, 对计算网格图进行划分, 如图 1 所示。黑色区域代表长 300 mm、宽 15 mm 的有机玻璃燃烧管; 蓝色区域代表燃烧管道出口周围的开放空间, 长和宽均为 300 mm。在计算过程中, 为了保证计算结果的网格无关性, 先后选择了 4 种不同网格进行了测试, 最终确定的网格总数为 105 000。管壁为无滑移壁面边界条件, 由于整个燃烧时间较短, 假定该过程与外界无热交换、热对流等, 整个燃烧过程固定在边界网格之内, 燃烧管右端与外界大气连通。设定点火方式为局部高温引燃气体, 对 $N_2O-C_2H_4$ 燃烧过程进行二维数值模拟。

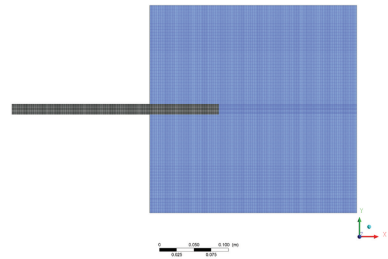


图 1 计算网格图

Fig. 1 Computational grid

1.3 湍流模型

选取标准的 $k-\varepsilon$ 模型^[24] 作为计算模型, 如式 (6) 和式 (7)。

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M; \quad (6)$$

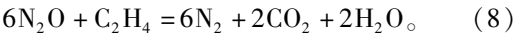
$$\begin{aligned} \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \\ C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (7)$$

式中: k 为气流脉动动能; ε 为气流脉动动能耗散率; G_k 是由平均速度梯度引起的动能; G_b 是由浮力影响引起的动能; Y_M 为可压缩气流脉动膨胀对总耗散率的影响; μ_i 为湍流黏度系数; ρ 为密度; t 为时间; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数; σ_k 、 σ_ε 分别为动能 k 与耗散率 ε

的普朗特数, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

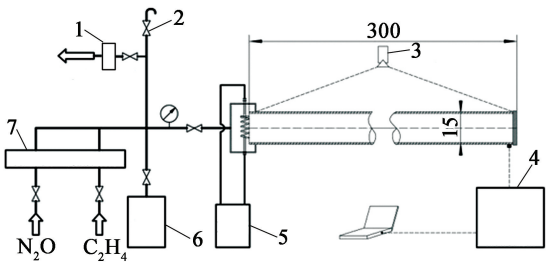
1.4 燃烧模型

化学反应为 N₂O 和 C₂H₄ 的反应。关于 N₂O-C₂H₄ 燃烧的化学反应机理主要有南加州大学提出的 USC 机理和 Konnov 提出的 Version 5.0 机理^[25-26]。为合理简化,假设燃烧过程为一步不可逆反应:



2 实验装置与过程

实验装置如图 2 所示,由有机玻璃燃烧管、配气系统、点火系统、高速摄影、压力测试系统与数据处理系统等组成。有机玻璃燃烧管内径 15 mm、长 300 mm、壁厚 5 mm。距离点火位置 300 mm 处装有压力传感器,采用 PCB 高频压力传感器,型号为 11B24。传感器测压截面与燃烧管内壁面齐平,数据采集仪为瑞士奇石乐公司开发的 TraNET 404 采集器,共有 8 个并行通道,每通道频响为 1 MHz。高速摄影采用日本 Photron 公司生产的 Fastcam 系列摄影仪,拍摄速度设定为 10 000 帧/s。配气时,各气体的量通过高精度质量流量计来控制,流量计量程为 0~500 mL/min。配气前先将气袋(10 L)抽至真空,关闭气袋阀门,进气前须将配气管路吹扫一遍,然后再打开气袋阀门依次充入 C₂H₄ 和 N₂O;气体充入完毕后,关闭气袋阀门,静置 24 h 以便气体充分混合均匀。采用电阻丝点火。电阻丝直径 0.6 mm、长 100 mm,通电电压为 20 V,电流 10 A。



1 - 真空泵;2 - 排出口;3 - 高速摄影仪;4 - 数据采集仪;5 - 点火系统;6 - 预混袋;7 - 质量流量计。

图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

管道中气体初始压力为 0.1 MPa, 环境温度为 298 K。N₂O、C₂H₄ 纯度均为 99.99%, N₂O 与 C₂H₄ 的质量比为 9:1。实验前,先将有机玻璃管抽至真空,然后充入预混气体至常压,点火前将燃烧管出口端密封盖打开。点火后,高速摄影拍摄火焰数据;燃

烧波传播到传感器时触发数据采集仪,记录超压及压力波到达传感器的时间。

3 结果与讨论

3.1 火焰结构

模拟结果(图 3)表明,预混火焰的结构变化分为 3 个阶段:

1)平面火焰传播阶段,即点火初期。

2)Tulip 火焰传播阶段。Tulip 火焰的形成过程与燃料混合物的基本属性、初始条件、边界条件、燃烧管道的长径比、点火源形状以及管道两端的密封情况等相关^[19-20];其形成机制是火焰阵面局部速度变化的结果,即火焰传播速度从火焰轴向向两侧逐渐增大,当流场与火焰阵面曲率半径不同时,导致火焰面结构的变化。随着 Tulip 火焰的形成,湍流强度增大,反应速率和热释放速率加快,从而促进火焰传播速度进一步增大^[27-28]。随着反应的进行,火焰锋面逐渐由 Tulip 结构转变为规则的平滑弧面。

3)指形火焰传播阶段。该阶段火焰锋面出现逆转,由 Tulip 火焰转变为指形火焰。

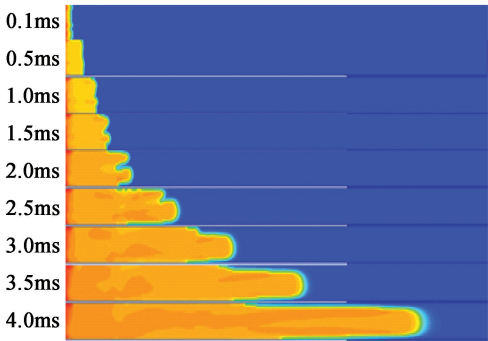


图 3 火焰结构在管道中变化的数值模拟
Fig. 3 Numerical simulation of the flame structure in the channel

3.2 火焰传播进程

图 4 为预混气体火焰锋面传播位移随时间的变化过程。由图 4 可知,模拟过程中的火焰传播位移整体上同实验过程中的传播位移一致。点火初期,模拟过程中的火焰前端位移略高于实验过程中的火焰传播位移。0~3.5 ms 时间段内,模拟值高于实验值,主要是由于实验中采用电阻丝点火,电阻丝加热周围的气体需要一定的时间;而在数值模拟中,点火方式为高温气体直接引燃周围的预混气体;点火方式的不同导致实验与模拟结果在点火初期略有偏差。而后期 3.5~4.2 ms 时间段内,随着火焰面积

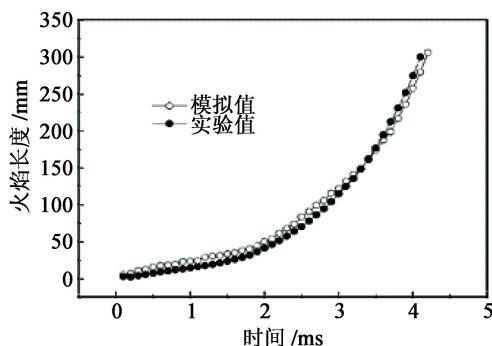


图 4 预混气体火焰前端位移随时间的变化

Fig. 4 Location of flame leading tip as a function of time

的增大,能量释放率随之增大,边界效应的影响降低,模拟火焰传播位移低于实验值。

图 5 是预混气体在燃烧管中火焰的传播速度与时间的关系。图 5 中,对实验数据进行拟合,可得预混气体火焰传播速度整体上呈指数增长趋势;数值模拟得出的火焰传播规律与实验结果和文献报告的火焰初期加速进程一致^[29]。实验中,火焰传播至出口处的时间和速度分别为 4.1 ms 和 252 m/s,模拟结果分别为 4.2 ms 和 264 m/s。

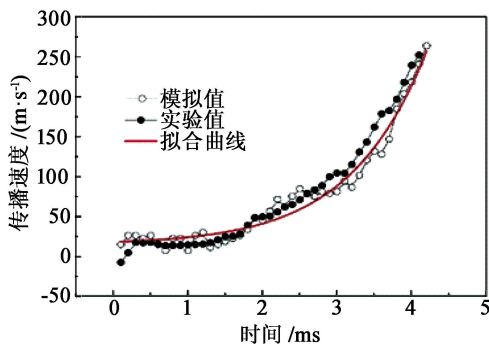


图 5 预混气体火焰传播速度随时间的变化

Fig. 5 Propagation speed of flame leading tip as a function of time

3.3 压力变化

火焰在管道中传播产生的压力波会反过来影响火焰的传播。图 6 为管道出口处预混火焰传播过程中压力随时间的变化曲线。由图 6 可知,模拟和实验的结果较为吻合。压力均随时间的增加先增加后降低,在 4.1 ms 左右,压力峰值达到最大,分别为 26.3 kPa 和 24.5 kPa,模拟结果相对于实验结果的误差为 7.3%。模拟时,由于采用标准的 $k-\varepsilon$ 模型,湍流脉动的影响加速了动量、能量和质量的输运,使得压力增加的速度较快,达到的压力峰值更大^[30]。在管道出口处,前驱压力波将大量未燃气体冲出管外;同时,已燃气体因高温过度膨胀,使得管道内

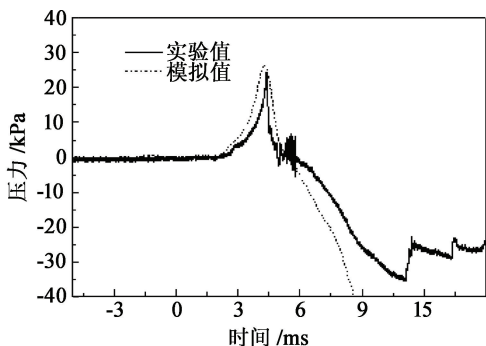


图 6 出口处压力随时间的变化

Fig. 6 Pressure histories at vent as a function of time

残留气体量较少,燃烧过后温度迅速下降,导致管道出口处压力急剧下降^[30]。

3.4 预混气体燃烧区域气流分析

根据雷诺分解理论可知,在湍流氛围中,气流流动的瞬时速度 u_i 由该位置处的平均速度 \bar{u} 和该时刻气流流动的脉动速度 u' 之和来表征^[31],即

$$u_i = \bar{u} + u' \quad (9)$$

图 7 是预混气体 $N_2O-C_2H_4$ 燃烧过程中不同时刻(1、2、4 ms 和 6 ms)计算域气流速度分布情况。预混气体被点燃后由点火处开始向前传播。点火初期(1 ms 时)管道内气流速度较低,最大速度出现在管道出口边界处,约为 50 m/s,但此时点火端已出现杂乱的气流,预混气体火焰已由层流转变为湍流,湍流可使火焰弯曲褶皱;由图 3 可知,此时火焰表面已呈现褶皱,导致反应面积增大,单位时间内释放的热量更多,从而增大了火焰传播速度;同时,湍流可以促进已燃气体和未燃气体快速混合,缩短混合时间,提高燃烧速度。点火后 2 ms,由于 Tulip 火焰的形成,反应速率增大,导致管道内压力增大,火焰前端气流主要沿燃烧管出口方向向前传播,最大气流

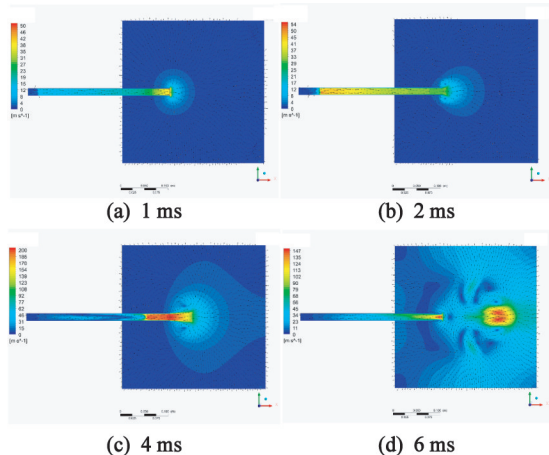


图 7 不同时刻的气流速度矢量云图

Fig. 7 Airflow velocity vector nephogram at various times

速度为 54 m/s。点火后 4 ms,由于点火端为封闭状态,火焰面发展受限,预混火焰向下游方向传播速度明显加快,最大气流速度出现在管道出口处,约为 200 m/s,此时管道中间气流处于湍流状态,两端分别向上游和下游方向传播。整个燃烧过程中,气流的 最大速度出现在管道出口处,最大值为 361 m/s,时间为 4.2 ms。点火后 6 ms,火焰已基本冲出燃烧管内的狭小空间,完全充满整个燃烧管并冲出管口,气流速度相比 4 ms 时有所衰减,最大气流速度出现在距离管口 130 mm 处,约为 147 m/s,并形成大的涡流,向周围膨胀,压缩气流向点火端传播。

4 结 论

利用湍流模型,对半封闭管道内 N₂O-C₂H₄ 预混气体火焰传播过程中的火焰结构、传播速度以及压力特性进行了数值模拟;并采用有机玻璃管装置对预混气体的火焰传播速度及压力演变进程进行了实验研究,得到如下结论:

- 1) 模拟得到燃烧管道中火焰结构转变分为 3 个阶段,即点火初期平面火焰传播阶段、Tulip 火焰传播阶段和指形火焰传播阶段。
- 2) 预混火焰传播速度在管道内呈指数增长趋势,实验得到最大传播速度为 252 m/s,出口处压力最大值为 24.5 kPa,模拟结果与实验结果吻合。
- 3) 获得了预混气体燃烧区域气流演变过程,气流速度先增大后减小,最大速度为 361 m/s。

参 考 文 献

[1] 宋长青,徐万武,张家奇,等. 氧化亚氮推进技术研究进展[J]. 火箭推进, 2014, 40(2):7-15.
SONG C Q, XU W W, ZHANG J Q, et al. Research progress of nitrous oxide propulsion technology [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014,40(2):7-15.

[2] 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.

[3] MERRILL C. Nitrous oxide explosive hazards: AFRL-RZ-ED-TP-2008-184 [R]. Edwards AFB, CA, USA: Air Force Research Laboratory,2008.

[4] MUNGAS G, VOZOFF M, RISHIKOF B, et al. NOFBX[®] monopropulsion overview [C]//14th Annual FAA Com-

mercial Space Transportation Conference. USA,2011.

[5] POWELL O A, PAPAS P, DREYER C. Laminar burning velocities for hydrogen-, methane-, acetylene-, and propane-nitrous oxide flames[J]. Combustion Science and Technology, 2009, 181(7): 917-936.

[6] POWELL O, DREYER C, PAPAS P. Laminar flame speeds of propane-nitrous oxide mixtures [C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, FL, USA, 2009.

[7] 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.

[8] GRAMS M P, SAUSA R C. Flame structure studies of neat and NH₃-doped H₂/N₂O/Ar flames by laser-induced fluorescence, mass spectrometry, and modeling [J]. Combustion Science and Technology, 2011, 183(11): 1184-1202.

[9] POWELL O A, PAPAS P, DREYER C B. Hydrogen-and C₁-C₃ hydrocarbon-nitrous oxide kinetics in freely propagating and burner-stabilized flames, shock tubes, and flow reactors[J]. Combustion Science and Technology, 2010, 182(3): 252-283.

[10] BANE S P M, MÉVEL R, CORONEL S A, et al. Flame burning speeds and combustion characteristics of undiluted and nitrogen-diluted hydrogen-nitrous oxide mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(16):10107-10116.

[11] POWELL O A, PAPAS P, DREYER C B. Flame structure measurements of NO in premixed hydrogen-nitrous oxide flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1):1053-1062.

[12] MÉVEL R, LAFOSSE F, CHAUMEIX N, et al. Spherical expanding flames in H₂-N₂O-Ar mixtures: flame speed measurements and kinetic modeling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(21): 9007-9018.

[13] POWELL O, PAPAS P. Flame structure measurements of nitric oxide in hydrocarbon-nitrous-oxide flames[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(5):1052-1059.

[14] STARIKOVSKAIA S M, ANIKIN N B, KOSAREV I N, et al. Analysis of ignition by nonequilibrium sources. Ignition of homological series of hydrocarbons by volume nanosecond discharge [C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NEV, USA,2006.

- [15] HOCHHEIMER B, PERAKIS N, WERLING L, et al. Test facilities to assess properties of a nitrous oxide/ethene premixed bipropellant for satellite propulsion system[C]//Meet the Space Conference 2014. Krakow, Poland, 2014.
- [16] GRUBELICH M C, VENKATESH P B, GRAZIANO T J, et al. Deflagration-to-detonation transition in nitrous oxide-ethylene mixtures and its application to pulsed propulsion systems [C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Grapevine, TX, USA, 2017.
- [17] 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.
- [18] KOSHIBA Y, NISHIDA T, MORITA N, et al. Explosion behavior of n-alkane/nitrous oxide mixtures[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 98: 11-15.
- [19] KOSHIBA Y, HASEGAWA T, KIM B, et al. Flammability limits, explosion pressures, and applicability of Le Chatelier's rule to binary alkane-nitrous oxide mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 45: 1-8.
- [20] MOVILEANU C, RAZUS D, MITU M, et al. Explosion of $C_2H_4-N_2O-N_2$ in elongated closed vessels[C]//Proceedings of the 7th European Combustion Meeting. Budapest, Hungary, 2015.
- [21] WERLING L K, HOCHHEIMER B, BARAL A L, et al. Experimental and numerical analysis of the heat flux occurring in a nitrous oxide/ethene green propellant combustion demonstrator[C]//51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Orlando, FL, USA, 2015.
- [22] WERLING L, HAßLER M, BÄTZ P, et al. Experimental performance analysis (c^* & c^* efficiency) of a premixed green propellant consisting of N_2O and C_2H_4 [C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Atlanta, GA, USA, 2017.
- [23] 郑凯. 管道中氢气/甲烷混合燃料爆燃预混火焰传播特征研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- ZHENG K. Study on the propagation characteristics of premixed flame of hydrogen/methane deflagration in ducts[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [24] SALZANO E, MARRA F S, RUSSO G, et al. Numerical simulation of turbulent gas flames in tubes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 95(3): 233-247.
- [25] BAULCH D L, BOWMAN C T, COBOS C J, et al. Evaluated kinetic data for combustion modeling: supplement II[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2005, 34(3): 757-1397.
- [26] WU C K, LAW C K. On the determination of laminar flame speeds from stretched flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1985, 20(1): 1941-1949.
- [27] PONIZY B, CLAVERIE A, VEYSSIÈRE B. Tulip flame-the mechanism of flame front inversion[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(12): 3051-3062.
- [28] 陈先锋, 孙金华, 姚礼殷, 等. Tulip 火焰形成过程中的细微结构特性[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(4): 350-354.
- CHEN X F, SUN J H, YAO L Y, et al. Characteristics of fine structure during tulip flame forming [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(4): 350-354.
- [29] SOW A, CHINNAYYA A, HADJADJ A. Mean structure of one-dimensional unstable detonations with friction [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 743: 503-533.
- [30] 喻健良, 周崇, 刘润杰. 管道内预混气体爆燃过程的实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2004, 33(6): 453-455, 466.
- YU J L, ZHOU C, LIU R J. Experimental investigation into deflagration of premixed gases in tubes[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2004, 33(6): 453-455, 466.
- [31] 左焕阳. 开放空间预混燃气火焰传播过程的数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.
- ZUO H Y. Numerical simulation of premixed gas flame propagation in open space [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.