

乙烯-氧化亚氮层流预混燃烧过程研究

李智鹏, 孙海云, 蒋榕培, 王亚军, 刘江强, 刘朝阳

(北京航天试验技术研究所 航天绿色推进剂研究与应用北京市重点实验室, 北京 100074)

摘要:采用PREMIX模块模拟乙烯-氧化亚氮($C_2H_4-N_2O$)预混体系在0.1~1.5 MPa下层流火焰传播速度,得到不同压力和氧/燃比下乙烯-氧化亚氮体系的火焰传播速度、火焰温度和燃烧质量流率变化。同时,采用层流火焰传播测试仪器对乙烯-氧化亚氮预混体系的层流火焰传播速度进行实际测定,通过对比火焰传播速度的测量值与计算值,验证选用模型的准确性和计算方法的可靠性。试验结果表明:所选用的USC机理模型可适应于研究预混气体层流火焰燃烧计算,当量比等于1.18,压力0.1 MPa时层流火焰传播速度达到最大值;当量比等于1.18,压力1.5 MPa时层流质量燃烧流量达到最大值;当量比为1.35,压力1.5 MPa时层流火焰达温度到最大值。

关键词:氧化亚氮;乙烯;预混燃烧;层流火焰传播

中图分类号:V312-34 文献标识码:A 文章编号:1672-9374(2018)05-0037-06

Study on premixed laminar combustion process of ethylene/nitrous oxide mixture

LI Zhipeng, SUN Haiyun, JIANG Rongpei, WANG Yajun, LIU Jiangqiang, LIU Zhaoyang
(Beijing Key Laboratory of Research and Application for Aerospace Green Propellants, Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The laminar flame propagating velocity of $C_2H_4-N_2O$ (ethylene nitrous oxide) premixed mixture was simulated by PREMIX module at the pressure of 0.1~1.5 MPa. The variation of flame propagation velocity, flame temperature and mass flow rate of $C_2H_4-N_2O$ mixture under different pressure and oxygen/fuel ratio was obtained. A laminar flame propagation test instrument was used to measure the laminar flame propagating velocity of $C_2H_4-N_2O$ premixed mixture. The measured and calculated value of the flame propagating velocity are compared to verify the accuracy of the chosen model and reliability of the calculating method. The results show that the model with USC mechanism can be adapted to calculate the laminar flame combustion characteristics of the premixed gas. The flame propagating velocity reaches its maximum value as the equivalence ratio is 1.18 and pressure is 0.1 MPa. The laminar burning mass flow rate reaches its peak as the equivalence ratio is 1.18 and pressure is 1.5 MPa. The laminar flame temperature reaches its peak as the equivalence ratio is 1.35 and pressure is 1.5 MPa.

Keywords: nitrous oxide; ethylene; premixed combustion; laminar flame propagation

0 引言

层流火焰传播速度作为燃烧学中一个重要参数,它不但包含了燃烧混合物放热特性和燃烧反应扩散等诸多信息,同时也影响着其他重要的燃烧特性,例如湍流火焰结构,火焰空间分布和湍流火焰速度等。

在发动机燃烧室中,燃烧室的静态稳定性和动态稳定性都与层流火焰传播速度相关,因此准确得到层流火焰传播速度,对于燃烧室设计非常关键^[1~6]。

$C_2H_4 - N_2O$ 预混体系推进剂是一种以氧化亚氮(N_2O)和小分子碳氢燃料混配而成的具有双组元推进剂高比冲特征的新型推进剂。相比于 N_2O 单组元推进剂, $C_2H_4 - N_2O$ 预混体系中碳氢燃料的加入不仅使原有比冲提高 100 s,还扩大了推进剂的液态范围。而相比于以氧化亚氮为氧化剂的双组元推进剂, $C_2H_4 - N_2O$ 预混体系的动力系统设计上相对简单,符合当今空间发动机小型化的发展需求。通过国外对 $C_2H_4 - N_2O$ 研究可知, $C_2H_4 - N_2O$ 是一种兼具了高比冲、绿色无毒、低冰点、易贮存、安全和推力系统简单等优良性能的新型推进剂,它的优良性能对于减轻运载器质量、提高有效载荷、降低使用维护成本等方面具有显著效应。这种新型推进剂能很好的适用于目前航天飞行器高性能、绿色环保、结构简单、低成本的要求,国外计划将 $C_2H_4 - N_2O$ 预混推进剂用于深空探测飞行器、火星探测、月球着陆器、卫星轨道转移发动机、飞船返回舱、小型载人航天飞行器、商业飞船和国际商业发射等领域。同时对近几年国外对 $C_2H_4 - N_2O$ 预混体系研究可以看出, $C_2H_4 - N_2O$ 预混体系的发动机试验和航天器的设计步伐正逐步加快,相信在可预计的将来, $C_2H_4 - N_2O$ 预混体系推进剂以优异的性能必然成为航天发展过程中极为重要的推进剂而得到大力的发展和推广^[7]。

针对 N_2O 预混体系,以往的工作大部分侧重于 $H_2 - N_2O$ 混合气体的研究,涉及着火延迟时间、层流火焰速度、爆轰波速度、爆轰波胞格尺寸等参数的测量和计算,除了氢气之外,也有少量关于 $C_2H_2 - N_2O$ 和 $C_3H_8 - N_2O$ 的燃烧基础研究^[8~12]。关于

$C_2H_4 - N_2O$ 体系的燃烧基础研究很少,目前未见文献系统研究 $C_2H_4 - N_2O$ 体系的火焰传播速度。因此有必要开展 $C_2H_4 - N_2O$ 体系的火焰传播速度的基础研究。通过研究 $C_2H_4 - N_2O$ 预混体系的燃烧特性,掌握燃烧规律及特性,对于发动机的研制具有重要意义。

1 $C_2H_4 - N_2O$ 层流火焰传播速度计算方法

目前关于 $C_2H_4 - N_2O$ 燃烧的化学反应机理主要有两个:一个是南加州大学 USC 机理;另一个是 Konnov 教授的 Version 5.0 机理。由于 Konnov Version 5.0 机理的刚性很大、数值模拟收敛性差,所以在计算中采用 USC 机理^[4,9]。同时采用 CHEMKIN 中的 PREMIX 模块来模拟 $C_2H_4 - N_2O$ 体系层流火焰传播过程。PREMIX 模块主要用来研究等压条件下自由传播的一维、平面、稳定的预混火焰,能够得到详细的组分场、温度场以及速度场等,广泛应用于预混气体火焰速度计算。该模块的控制方程如下^[6,9,13]:

连续性方程

$$M = \rho \mu A \quad (1)$$

能量方程

$$M dT dx^{-1} C_p ddx \lambda A dT dx + A C_{pk} = 1 K \rho Y_k V_k C_{pk} + A C_{pk} = 1 k \omega_k h_k W_k - \dot{q} = 0 \quad (2)$$

组分方程

$$M dY_k dx + ddx \rho Y_k V_k + A \omega_k W_k = 0 \quad (3)$$

状态方程

$$\rho = p W R T \quad (4)$$

式中: x 为空间坐标; M 为质量流率; T 为温度; p 为压力; μ 为预混气体速度; ρ 为预混气体密度; Y_k 为组分的质量分数; W_k 为组分的摩尔质量; W 为预混气体的平均摩尔质量; R 为理想气体常数; λ 为预混气体的导热系数; C_p 为预混气体的定压比热; C_{pk} 为组分的定压比热; h_k 为组分的焓; V_k 为组分的扩散速度; ω_k 为单位体积内种组分的化学反应生成摩尔速率; A 为预混气体流动的横截面积(默认值为 1); \dot{q} 为辐射热损失。

模型以反应器的 $C_2H_4 - N_2O$ 混合气的进气速率、气体成分、混合气浓度、压力和温度等边界条件为输入参数,计算层流预混火焰中火焰传播速度、

组分和温度分布等。在模拟计算中,梯度 $\text{GRAD} = 0.15$, 曲率 $\text{CURV} = 0.15$, 空间步长为 0.01 cm , 计算步长 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$, 网格总数为 200。引用阻尼牛顿法求解预混火焰控制方程组, 采用中心差分格式求解扩散项, 采用迎风差分格式求解对流项。前一步和后一步求解结果的相对误差值小于 $0.0001^{[14]}$ 。

在计算模型中, 采用生成速率和敏感性分析两种方法分析化学动力学参数变化规律。生成速率分析(rate of production analysis, ROP) 可以用于确定每个基元反应对一种物质生成或消耗的贡献率, 辨别反应体系中的速控基元反应。敏感性分析(Sensitivity Analysis) 是指反应模型的各项参数对求解结果的影响, 能够直观地分析基元反应、反应组分、反应条件等因素对系统反应参数变化的敏感程度, 根据结果可以简化反应机理^[15-16]。

2 结果与讨论

2.1 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 层流火焰传播速度的计算

采用此方法计算了 25°C 下, 压力分别为 0.1 MPa , 0.5 MPa , 1 MPa 和 1.5 MPa , $\text{N}_2\text{O}/\text{C}_2\text{H}_4$ 质量比分别为 $6:1$, $7:1$, $8:1$, $9:1$, $10:1$, $11:1$ 和 $12:1$ 时 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 预混气层流火焰传播速度。

层流火焰传播速度是预混气燃烧最重要的参数, 主要与混合气浓度、温度、压力和燃料成分有关。图 1 给出了在不同压力时预混层流火焰传播速度随当量比的变化关系。由图 1 可知, 层流火焰速度与混合气初始压力存在反比关系。这主要是因为, 在低压下, 火焰产生火球的表面比较光滑, 着火面较薄; 随着压力升高, 火球表面会出现较多的纹路, 着火面也变厚, 从而导致火焰传播阻力较大, 使得 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 层流火焰传播速度随压力增加而减小。另外, 在所研究的压力范围内, 在氧燃混合比 8 时, 层流火焰传播速度达到最大值。偏离该当量比时, 不管混合气富氧燃烧还是富燃燃烧, 层流燃烧速率均减小^[3,17]。

最大火焰温度是指层流火焰传播过程在某一个轴向位置达到的最大火焰温度。它表示了反应混合物的放热性能, 对火焰传播速度有重要的影响。混合气当量比和初始边界条件对最大火焰温度的影响较大。图 2 给出了 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 混合气最大火焰温度随当量比的变化关系。由图 2 可知, 在

氧燃混合比为 7 时, 最大火焰温度达到峰值。在混合气初始温度一定时, 绝热火焰温度随混合气体压力增高而上升, 这是由于压力增加时, 离解的作用减弱所导致^[3,18]。

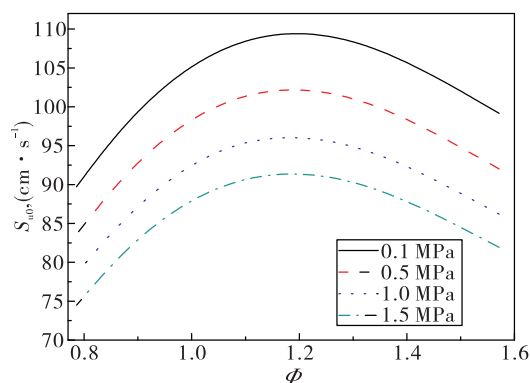


图 1 不同当量比与压力下的 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 层流火焰传播速度
Fig. 1 Laminar flame propagation speed of $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ at different equivalence ratios and pressures

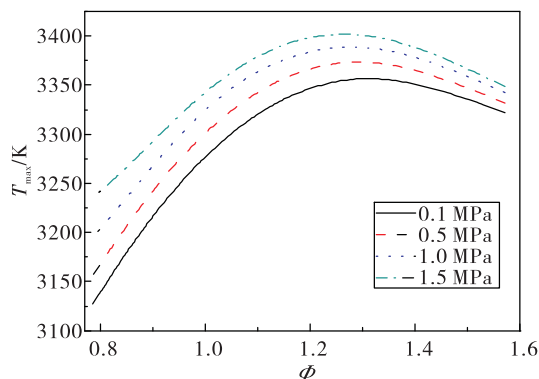


图 2 不同当量比与压力下的 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 预混火焰的最大火焰温度

Fig. 2 Maximum temperature of $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ premixed flame at different equivalence ratios and pressures

燃烧质量流率是另一个重要的参数, 它是密度与速度的乘积, 包含了可燃混合气反应能力和放热容量的基本信息, 如图 3 所示。从图 3 看出, 初始压力增大, 燃烧质量流率增加。尽管压力增大, 火焰传播速度减小, 但由于压力增加引起末端混合气的密度增加幅度更大, 因此燃烧质量流率也随之增加。从图 3 中还能够看到, 随着当量比的增加, 燃烧质量流率先是增加后又减少, 在氧燃混合比 8 时达到最大值。偏离该当量比, 不管混合气是浓稀, 燃烧质量流率均降低。这与已经得到的火焰传播速

度变化的趋势类似。

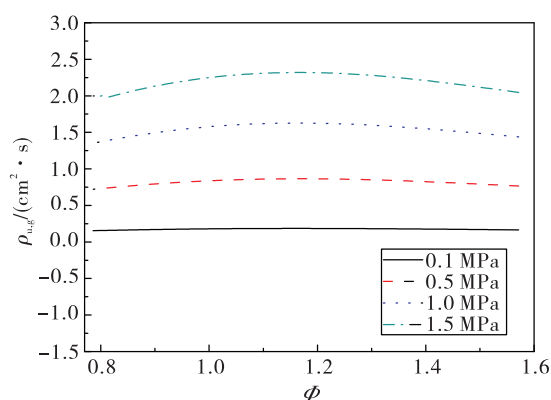


图3 不同当量比与压力下的 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 预混火焰的燃烧质量流率

Fig.3 Combustion mass flow rate of $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ premixed flame at different equivalence ratios and pressures

2.2 $\text{C}_2\text{H}_4 - \text{N}_2\text{O}$ 层流火焰传播速度测量

图4为层流火焰传播速度测量实验系统。该实验系统包括4个部分:带预热的双腔泄压式球形火焰燃烧器、光学纹影系统、配气系统和排气系统,其中带预热的双腔泄压式球形火焰燃烧器是最核心的部分。球形燃烧器由2个同心圆柱腔体组成,分为内腔和外腔,内外腔内径分别为10 cm和28 cm,内外腔的长度分别为15.3 cm和30.5 cm。本实验

台使用弹簧压杆密封装置来实现内外腔之间的密封与排气。内外腔之间沿周向均匀布置4排排气孔,每排有3个,弹簧压杆密封装置通过螺纹紧固于排气孔上。通过弹簧和盖板固定住内部的压杆,使得压杆只能在内腔压力大于外腔压力和弹簧压力之和后才能向上推动弹簧排气。密封压杆能够在配气时有效密封内外腔,同时能够迅速地降低内腔由于燃烧而导致的压力膨胀。由于外腔体积远大于内腔体积,所以即使在高压工况下内腔气体排出至外腔也不会导致外腔气体压力明显上升,由此使得高压试验的安全性和稳定性得到了显著提高。并且由于内腔压力能够及时排出,内腔压力升高不明显,在内腔燃烧的前期可以认为火焰是在定压条件下传播的。经出厂测定,本燃烧器能够承受4.0 MPa的气压和5.0 MPa的水压,同时能够承受200 °C的预热温度。

实验中快速传播的球形火焰纹影图像被高速照相机记录。通过使用 Matlab 图像处理程序,处理得到球形火焰发展过程中每过0.125 ms时刻的半径,随后二次或三次曲线拟合球形火焰半径随时间的变化关系,去除腔内扰动的影响。通过测量一把已知宽度的尺子在纹影图像中的宽度,然后相互转换来标定纹影图像的球形火焰的真实尺寸,重复多次测量保证精度。

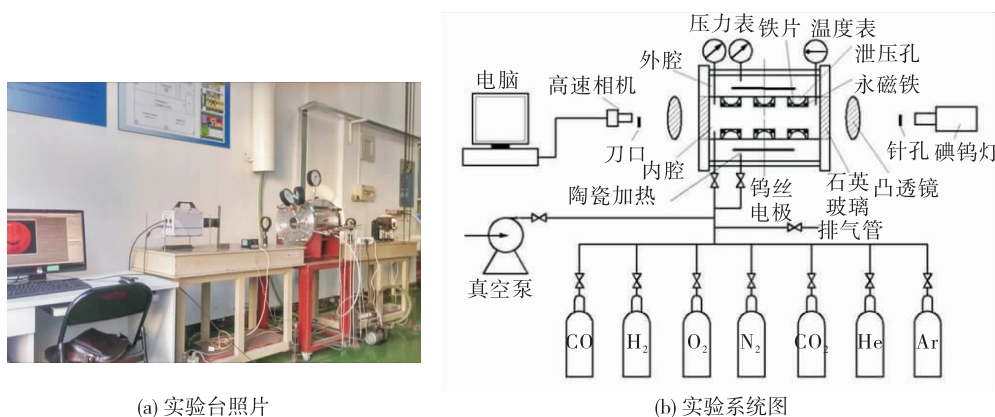


图4 高温高压层流火焰传播特性研究实验系统

Fig.4 Experimental system for propagation characteristics of high-temperature and high-pressure laminar flame

测量了25 °C和0.1 MPa下, $\text{N}_2\text{O}/\text{C}_2\text{H}_4$ 质量比为9:1的层流火焰传播速度,图5是高速摄像机拍摄的球形火焰传播纹影图像。根据火焰纹影图像

可以得到拉伸率与可燃物质的火焰传播速度的关系曲线,如图6绿线所示。取其中的线性段外推到拉伸率为零处,即可得到。再乘以密度比,就可以

得到未燃物的层流火焰传播速度。未燃物的层流火焰传播速度的计算值与测量值汇总在表 1。从表 1 中可以看出,25 ℃ 和 0.1 MPa 下 N₂O/C₂H₄ 质量比为 9:1 的层流火焰传播速度测量值为 117.85 cm/s,计算值为 107.55 cm/s,相对误差为 8.74%。

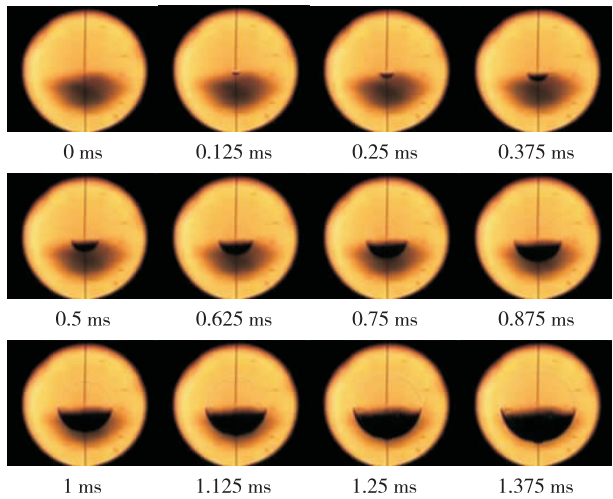


图 5 球形火焰传播图像
Fig. 5 Propagation pictures of spherical flame

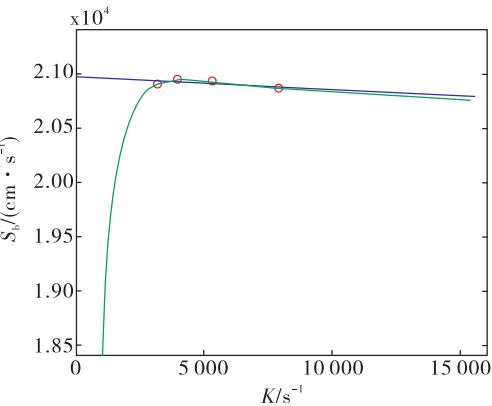


图 6 拉伸率与已燃物质火焰传播速度
Fig. 6 Tensile rate and flame propagation velocity on the side of combusted object

表 1 计算值与测量值的对比		
Tab. 1 Comparison between calculated value and measured value		
组分	C ₂ H ₄ :N ₂ O	
计算值/(cm·s ⁻¹)	107.55	
测量值/(cm·s ⁻¹)	第 1 次	第 2 次
	119.61	116.09
均值/(cm·s ⁻¹)	117.85	
相对误差	8.74%	

图 7 给出了不同燃料与 N₂O 的火焰传播速度比较。其中实线是基于 USC 机理的计算值,散点是测量值。C₂H₂-N₂O 的测量值来自于文献[19], C₂H₄-N₂O 的测量值出自本实验。从图 7 中可以看出,在相同的质量比下,乙烷的火焰传播速度最小,乙炔的火焰传播速度最大。在不同当量比下 C₂H₂-N₂O 的层流火焰传播速度测量值都大于计算值,在当量比等于 1 时,相对误差为 7.88%,与本实验的 8.74% 非常接近。USC 机理是基于碳氢燃料在空气中燃烧发展起来的,它的 NO_x 子模型主要用于预测碳氢燃料-空气燃烧产物中 NO_x 的生成,会低估 C_xH_y-N₂O 体系的层流火焰传播速度。

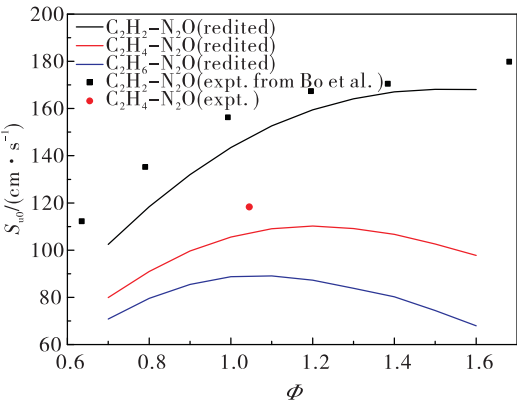


图 7 C₂H₂-N₂O, C₂H₄-N₂O, C₂H₆-N₂O
火焰传播速度对比

Fig. 7 Comparison of flame propagation speed of C₂H₂-N₂O, C₂H₄-N₂O and C₂H₆-N₂O

3 结论

本文采用数值模拟研究了乙烯与氧化亚氮预混气体的火焰传播特性,并计算了常压和高压下 C₂H₄-N₂O 预混体系的火焰传播速度,得到以下主要结论:

- 1) C₂H₄-N₂O 层流火焰传播速度随压力增加而减小,在 0.1 MPa 当量比为 1.18 时,层流火焰传播速度达到最大值为 110.14 cm/s;
- 2) C₂H₄-N₂O 的火焰温度随压力的增加而升高,在同等压力下, C₂H₄-N₂O 火焰温度随当量比的增加先升高后减小,在 1.5 MPa 当量比为 1.35 时,最大火焰温度达到峰值为 3 401 K。
- 3) C₂H₄-N₂O 体系随着当量比的增加,燃烧质

量流率先增加后减少,在 1.5 MPa 当量比为 1.18 时达到最大值为 $2.3 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

参考文献:

- [1] WILLIAMS F A. Combustion theory [M]. 2nd ed. California: Benjamin/Cummings Publishing Company, 1994.
- [2] 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 Changqing, XU Wanwu, ZHANG Jiaqi, et al. Research progress of nitrous oxide propulsion technology[J]. Journal of rocket propulsion, 2014, 40(2): 7-15.
- [3] 陶志强,艾育华,孔文俊. 高压下 CO_2 稀释的 $\text{CO}/\text{H}_2/\text{Air}$ 火焰贫可燃极限处的辐射重吸收效应的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(7): 1243-1246.
- [4] 王栋,梁国柱. 氧化亚氮双组元发动机热力性能计算分析[J]. 火箭推进, 2012, 38(1): 44-50.
WANG Dong, LIANG Guozhu. Calculation and analysis of thermodynamic performance for nitrous oxide bipropellant engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(1): 44-50.
- [5] BAULCH D L, COBOS C J, COX R A, et al. Evaluated kinetic data for combustion modeling [J]. Journal of phys chem ref data, 1992, 21(3): 488-491.
- [6] WU C K, LAW C K. On the determination of laminar flame speeds from stretched flames [J]. Proceedings of Combustion Institute, 1984, 20: 1941-1949.
- [7] 刘肖,姜小存,唐涛,等. 国外氧化亚氮推进剂的应用研究[J]. 飞航导弹. 2013 (6): 74-78.
- [8] ZHOU Z, TAO Z Q, LIN B Y, et al. Numerical investigation on effects of high initial temperatures and pressures on flame behavior of $\text{CO}/\text{H}_2/\text{air}$ mixtures near the dilution limit [J]. International journal of hydrogen energy, 2013, 38(1): 274-281.
- [9] CLAVIN P. Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows [J]. Progress in energy and combustion science, 1951, 11(1): 1-59.
- [10] NATARAJAN J, KOCHAR Y, LIEUWEN T, et al. Pressure and preheat dependence of laminar flame speeds of $\text{H}_2/\text{CO}/\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{he}$ mixtures [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2009, 32(1): 1261-1268.
- [11] NATARAJAN J, LIEUWEN T, SEITZMAN J. Laminar flame speeds of H_2/CO mixtures: effect of CO_2 dilution, preheat temperature, and pressure [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2007, 31(2): 104-119.
- [12] MARKSTEIN G H. Nonsteady flame propagation [M]. New York: Pergamon Press, 1964.
- [13] KEE R J, GRCAR J F, SMOOKE M D, et al. A fortran program for modelling steady laminar one-dimensional premixed flames [R]. Sandia: Sandia National Laboratories, 1985.
- [14] LAW C K. Combustion physics [M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [15] 林伯泉. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律及加速机理的研究[J]. 煤炭学报, 1999(2): 56-59.
- [16] KERSTEN C, FÖRSTER H. Investigation of deflagrations and detonations in pipes and flame arresters by high-speed framing [J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2004, 17(1): 43-50.
- [17] MENEVEAU C, POINSOT T. Stretching and quenching of flamelets in premixed turbulent combustion [J]. Combustion and flame, 1991, 86(4): 311-332.
- [18] 张磊磊,谭迎新,王星河. 等. 甲烷-空气混合气燃烧过程的高速摄影测量[J]. 测试技术学报, 2011, 25(3): 274-277.
- [19] ZHANG Bo, NG Hoi Dick, 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 and flame, 2012, 159: 2944-2953.

(编辑:马 杰)