

ADN基发动机燃烧室CO组分实验测量*

张伟^{1,2}, 沈岩¹, 余西龙², 姚兆普¹, 王梦¹, 曾徽², 李飞², 张少华²

(1. 中国空间技术研究院北京控制工程研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要:为研究ADN基发动机燃烧室内的燃烧过程,搭建了一套基于可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)实验测量系统。实验采用直接吸收光谱法对ADN基发动机燃烧室内CO组分摩尔分数进行测量,获得了喷注压力分别为1.1MPa,0.9MPa,0.7MPa,0.5MPa时,发动机燃烧室内CO组分摩尔分数随时间的变化。实验结果表明当发动机喷注压力由1.1MPa下降到0.5MPa时,燃烧室内CO平均摩尔分数由2%上升到4.7%,这表明发动机喷注压力的变化影响燃烧室内ADN基推进剂化学反应进程,当喷注压力下降时燃烧室内CO摩尔分数升高,ADN基推进剂燃烧不充分。

关键词:量子级联激光器;ADN基发动机;绿色推进剂;吸收光谱;喷注压力

中图分类号: V434+.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2015) 05-0650-06

DOI:10.13675/j. cnki. tjjs. 2015. 05. 002

Concentration Measurement of Carbon Monoxide in Combustion Chamber of an ADN-Based Propellant Thruster

ZHANG Wei^{1,2}, SHEN Yan¹, YU Xi-long², YAO Zhao-pu¹, WANG Meng¹, ZENG Hui², LI Fei², ZHANG Shao-hua²

(1. Beijing Institute of Control Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, Beijing 100190, China)

Abstract: A tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system was set up to investigate the combustion process of ADN-based propellant thruster. In the experiment, the mole fraction of CO was measured by using direct absorption scheme. The temporal variation of mole fraction of CO was experimentally obtained with respect to various injection pressure such as 1.1MPa, 0.9MPa, 0.7MPa, and 0.5MPa. Experimental results indicate that when the injection pressure was reduced from 1.1MPa to 0.5MPa, the average mole fraction of CO increased from 2% to 4.7%. It is shown that the injection pressure could have a crucial influence on the chemical reaction procedure of ADN-based propellant and the mole fraction of CO will arise as injection pressure decreases. Therefore, energy release of ADN-based propellant is insufficient in the case of low injection pressure.

Key words: Quantum cascade laser (QCL); ADN-based thruster; Green propellant; Absorption spectrometry; Injection pressure

1 引言

ADN基液体推进剂是一种对环境友好的绿色推进剂^[1],它通常由ADN、一种醇类燃料、以及溶剂水组

成,具有能量密度高、低冰点、无毒、相容性好、对环境友好等优点,被公认为是肼类推进剂的良好替代品^[2]。

国外瑞典ECAPS公司对ADN基推进技术做了

* 收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-05-09。

基金项目: 国家安全重大基础研究资助项目(613209)。

作者简介: 张伟(1987—),男,硕士生,研究领域为航天器推进。E-mail: jianchi866@126.com

作者简介: 余西龙(1971—),男,研究员,研究领域为激光光谱诊断、超声速燃烧。E-mail: xlyu@imech.ac.cn

大量的实验研究,总结来说ECAPS工作分四个阶段,第一阶段研究不同组分ADN基液体推进剂的可靠点火及持续燃烧,研究结果表明ADN基液体推进剂燃烧稳定性跟本身组分有关^[3];第二阶段对ADN基发动机燃烧室内温度、压力及发动机推力进行测量,实验得出当预热温度低于200℃发动机性能降低;当预热温度达到300℃时,发动机性能较优^[4];第三阶段研究发动机脉冲工作下的响应时间以及长时间工作下发动机燃烧的热稳定性^[5];第四阶段发动机星上搭载试验,实验对1N ADN基发动机的推力、比冲、燃烧稳定性进行测试,搭载试验证明ADN基发动机具有高性能^[6,7]。ECAPS公司的研究主要是对ADN基发动机推力、燃烧室内温度、压强等宏观参数的测量,对ADN基推进剂燃烧过程的研究涉及很少^[8]。在我国ADN基液体推进剂的研究正处于试验阶段,当前研究的一个重要问题是推进剂的催化分解及燃烧反应过程^[9]。对ADN基发动机燃烧过程研究将有利于提高ADN发动机的性能。

发动机内部燃气参数测量是研究ADN基发动机内部燃烧真实情况的有效手段。CO是ADN基液体推进剂催化分解及燃烧反应的特征产物之一,CO浓度的测量对监控燃烧发生的位置、时间和反应进行程度具有重要意义。因此本实验选定ADN基发动机燃烧室内CO组分的浓度为测量目标。

ADN基发动机燃烧室内高总温的恶劣环境对测量手段要求很高,传统的接触式测量手段不能长时间正常工作。实验选用可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)作为测量手段,TDLAS具有非接触、选择性好、重复频率高等优点,已成熟应用在各类燃烧场参数测量。例如国外Hanson研究小组在TDLAS技术的开发与应用方面做了许多开创性的工作^[10,11],国内中国科学院力学研究所等科研单位使用该技术在超燃冲压发动机流场诊断^[12,13]、气体监测^[14,15]等方面取得了一系列重要成果。

本文立足于研究ADN基发动机燃烧过程,采用直接吸收对发动机燃烧特征组分CO进行实时在线测量。这对于研究ADN基推进剂燃烧机理以及优化ADN基发动机性能具有重要意义。

2 实验系统介绍

2.1 实验原理

吸收光谱测量技术是建立在Beer-Lambert定律的基础之上。当一束频率为 ν ,光强为 $I_{\nu,0}$ 的单频光束通过长度为 $L(\text{cm})$ 的均匀待测气流,透射光强 I_{ν}

与入射光强 $I_{\nu,0}$ 满足Beer-Lambert关系式

$$I_{\nu} = I_{\nu,0} \exp(-k_{\nu}L) \quad (1)$$

k_{ν} 为频率 $\nu(\text{cm}^{-1})$ 下的吸收系数,吸收系数 k_{ν} 是静压 $p(\text{atm})$,吸收组分摩尔浓度 X ,吸收线的线强度 $S(T)(\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1})$ 和线型函数 $\varphi(\nu)(\text{cm})$ 的乘积

$$k_{\nu} = p \cdot X \cdot S(T) \cdot \varphi(\nu) \quad (2)$$

公式(2)中 p 通过测压管测量不同工况下所对应的燃烧室室压来确定。而吸收线强度为吸收线固有参数,它是温度的函数,任意温度下的线强度可以由已知温度下的线强度由式(3)计算得到^[16]

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0) \left(\frac{T_0}{T}\right)}{Q(T) \left(\frac{T}{T_0}\right)} \cdot \exp\left[-\frac{hcE^{\nu}}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \cdot \frac{\left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_0}{kT}\right)\right]}{\left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_0}{kT_0}\right)\right]} \quad (3)$$

由于实验所选择的CO吸收线强度 $S(T)$,在以往ADN基发动机点火时所对应的燃烧室温度范围内变化不大,因此采用单条吸收线进行实验。当获得燃烧室内温度后,即可得到气体的组分分压。

$$pX_{\text{CO}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} k_{\nu} d\nu}{S(T)} \quad (4)$$

在实验系统的建立过程中,吸收线的选择较为重要。中红外波段的CO吸收线的吸收强度高。如图1是4.6 μm 附近ADN基发动机燃烧室内主要特征组分NO, H₂O, CO₂, CO的吸收线强度统计,在4.5~4.65 μm 范围内CO组分吸收强度远高于其他组分,因此选用此波段吸收线可排除其他组分吸收的干扰。为确保实验室量子级联激光器工作在稳定的工作状态下,实验用中心频率2193.36 cm^{-1} 的CO吸收线。

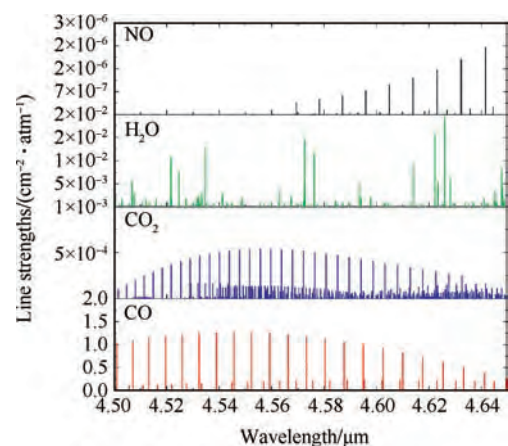


Fig. 1 Calculated line strengths of NO, H₂O, CO₂ and CO in the wavelength of 4.5 ~ 4.65 μm at 1300K (from HITRAN 2004database)

图2为 2193.36cm^{-1} CO吸收线在900K~1500K温度范围内吸收线强度随温度的变化曲线。ADN基发动机在稳态点火时,燃烧室温度在1100K~1200K,此范围内CO吸收线强度变化不大,温度每升高1K对应吸收强度降低 $0.002\text{cm}^{-2}\text{atm}^{-1}$ 。

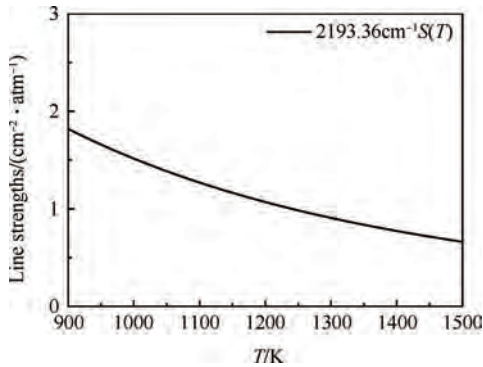


Fig. 2 Calculated line strengths of CO 2193.36cm^{-1} in the range of 1000 to 1500 K (from HITRAN 2004 database)

2.2 实验系统

实验系统主要分为3部分:ADN基发动机、推进剂供给系统以及吸收光谱测量系统。实验系统图如图3所示。

2.2.1 ADN基发动机

ADN基发动机由电磁阀、喷注器、催化床及燃烧室、喷管组成。当电磁阀开启时,ADN基推进剂进入发动机,经喷注器雾化后进入催化床的前端进行预蒸发。ADN基推进剂在已预热的催化床内开始分解反应,生成小分子量的中间产物,经分解反应后的产物总体具有氧化性。在燃烧室内,中间产物与ADN基推进剂中的燃料甲醇进一步燃烧,放出大量的热。这些高温高压气体最终经喷管排出,产生推力。

由于1N推力的ADN基发动机整个燃烧室段长度只有10mm,为实现燃烧室内CO组分的测量,在燃烧室段开设直径为4mm光学窗口以保证激光光束穿过ADN基发动机反应区部分。光学窗口采用中红外透过性好的蓝宝石玻璃。宝石玻璃通过顶杆与发动机固定。为保证密封性,宝石玻璃与顶杆之间有耐高温石墨密封垫。图4是实验所采用的ADN基发动机实物图,推力室部分为实验加工段。为方便开设窗口加工中加厚了燃烧室壁厚,但其内部尺寸与真实发动机尺寸一致,保证实验的真实性。

本实验在发动机电磁阀、喷注器、燃烧室、催化床四个位置上各装有一个热敏电阻,用来监测发动机的工作状况。发动机催化床段装加热丝给催化床预热。

2.2.2 推进剂供给系统

推进剂供给系统主要用于推进剂加注、推进剂供给及吹除。如图3所示高压气源经稳压阀给ADN基贮箱供气,推进剂在气体挤压作用下经单向阀、过滤器、流量计到达发动机入口;推进剂供气系统上有电磁阀、系统放空阀及贮箱放空阀用于调节贮箱内压强;在发动机电磁阀前端装有压力传感器,用来测量发动机喷注压力。在吹除气路上设置吹除截止阀、及单向阀。吹除气路用来吹除实验后发动机内部残余ADN基推进剂,以避免残留推进剂对催化床造成损害。

2.2.3 吸收光谱测量系统

测量系统如图3中所示,主要元器件包括中心波长为 $4.6\mu\text{m}$ 的量子级联激光器、激光器控制器、信号发生器、中红外探测器及多通道的示波器。激光器

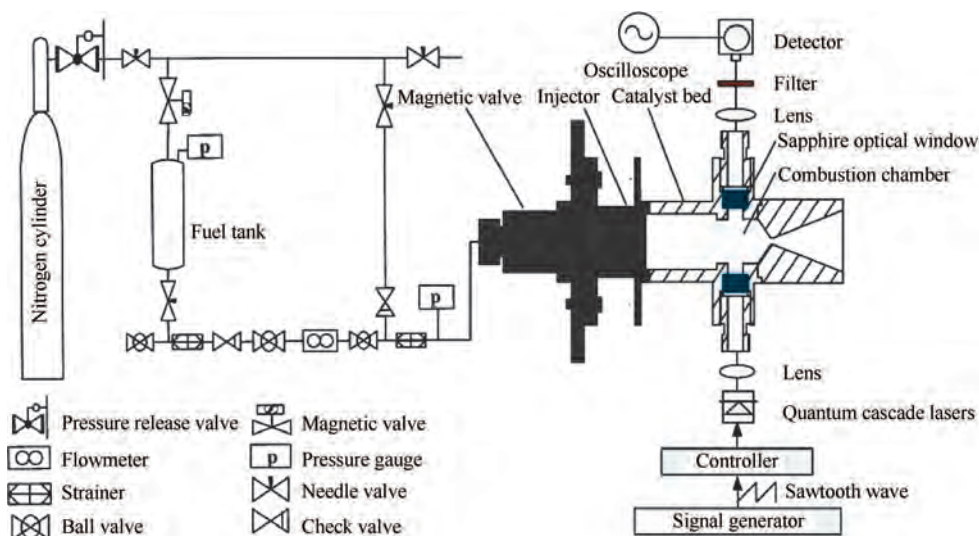


Fig. 3 Schematic diagram of ADN-based propulsion system and TDLAS system

在电流控制器、温度控制器及信号发生器的共同作用下输出在一定范围波长内进行扫描的激光。本实验所选用的CO吸收线的中心波长为 2193.36cm^{-1} 。激光通过透镜平行穿过燃烧室,透射光经滤波片进入探测器。探测器将接收到的光信号转变为电信号,由示波器记录并储存。实验利用电磁阀的开关信号作为时间基准,实现数据的同步采集。

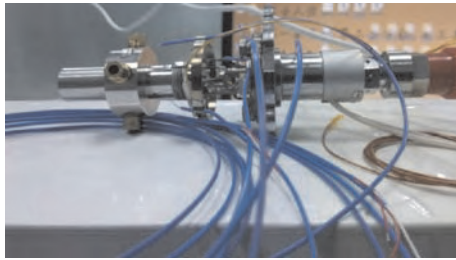


Fig. 4 1N ADN thruster used in experiments

3 实验结果分析

本实验在大气下点火,所采用的ADN基液体推进剂由ADN、甲醇、以及溶剂水按一定比例组成。实验通过控制喷注压力来改变发动机入口的推进剂流量。实验共分四组完成,每一组对应喷注压力依次是1.1MPa, 0.9MPa, 0.7MPa, 0.5MPa, 每组实验重复3次。图5是喷注压力为1.1MPa时,整个发动机点火过程探测器接收到的电压信号。根据信号强度的变化,可将信号分为四段:(1)0~0.2s,点火前的电压信号,该段没有CO吸收,激光器随电流调制输出锯齿波变化的光强,如图中0~0.2s放大部分;(2)0.2~1.1s,电压信号强度迅速减弱。在该时间段发动机喷管持续喷出的烟状产物遮挡了激光光信号,从而使探测器接受的电信号强度下降;(3)1.1s~4s,由于发动机烟状产物逐渐减少,光信号开始增强;(4)4s~10s,ADN基推进剂燃烧稳定,烟状产物消失,电压信号趋于稳定。如图5中9.3s附近的局部放大图,图中的下凹区域对应CO吸收线的位置。由于烟状产物对接收信号的干扰本实验只对4s后的稳态点火数据进行处理。

图6对应图5在9.3s的吸收信号Lorentz拟合,在实验中量子级联激光器输出波长受激光器工作时间及控制器输出最大电流的影响,当调制电流接近峰值时,激光器输出波长跟电流不再是近线性的关系,因此吸收信号基线会变形,如图5中9.3s附近的局部放大图所示,吸收信号接近峰值时基线发生形变,因此本实验选取发动机点火刚结束时的信号作为基线信号。同时数据处理时,吸收信号采用10个周期的

平均值,图6是基线归一化整个吸收线型的吸收率后用Lorentz线型拟合得到的整个吸收线型轮廓。图6下图是拟合偏差,反应拟合优度。

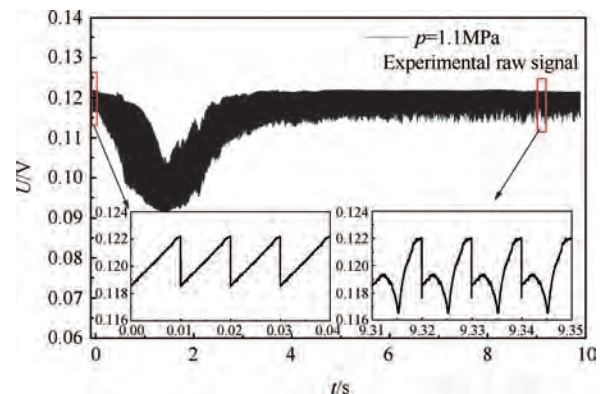


Fig. 5 Transmission signals versus time for the injection pressure $p=1.1\text{MPa}$

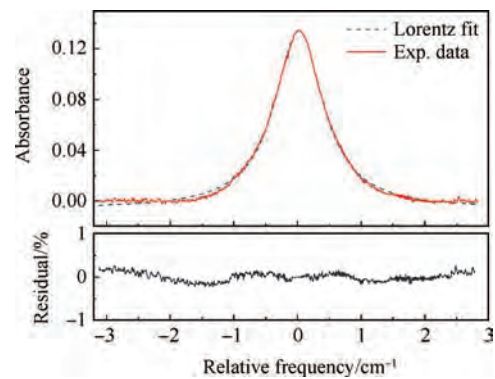


Fig. 6 Illustration of fitting of the absorption features

实验中每一喷注压力下重复点火3次。图7(a)到(d)分别对应喷注压力为1.1MPa, 0.9MPa, 0.7MPa, 0.5MPa时发动机燃烧室内CO组分摩尔分数及每一喷注压力下三次实验结果的相对偏差。

通过四次实验CO组分摩尔分数比较,喷注压力为1.1MPa和喷注压力0.9MPa时的三次实验重复性较好,对应的燃烧室内的CO组分摩尔分数相对稳定;喷注压力为0.5MPa对应CO摩尔分数相对偏差比前三个工况的相对偏差波动最大。图7中四种喷注压力下CO组分摩尔分数随时间波动,这是由于ADN基发动机燃烧室内周向燃烧不均匀以及燃烧室内压力的变化引起的。图8是ADN基发动机稳态燃烧时,不同喷注压力下CO摩尔分数分布,图8表明稳态燃烧时,随着喷注压力的减小CO组分的摩尔分数增大。原因是喷注压力的下降使喷注器雾化压差变小,导致雾化效果变差,从而ADN基推进剂燃烧反应不充分,导致CO浓度变高,同时雾化效果变差导致ADN基分解燃烧不稳定,所以CO组分摩尔分数随时间的波动较大。

图9是热电偶测得四种喷注压力下催化床壁面温度随时间的变化曲线。点火前发动机在外部加热装置的作用下预热至480K,电磁阀开启时关闭外部加热装置。根据温度变化趋势,温度曲线可分为两段:(1)0~2.5s相对平稳段,这一段发动机催化床温度维持在480K左右;(2)2.5~10s温度爬升段,2.5s后催化床温度从480K附近开始爬升直到点火结束时催化床外表面温度达到最高值,图10是每一喷注压力对应的最高温度分布图。从催化床温度的变化以及结合图5实验整体信号可以看出,催化床温度维持在

480K所对应的时间正好是探测光强信号变弱的时间,这段时间内发动机喷出大量的烟状混合物。这说明在第一段时间0~2.5s,ADN基推进剂分解燃烧反应不充分。原因是这段时间对应催化床温度低,限制了ADN基推进剂液滴蒸发速度,从而进一步影响了ADN基推进剂的催化分解反应,因此喷管出口现大量的烟状混合物。在第二段时间2.5~10s,随着ADN基催化分解反应放出热量,催化床的温度逐渐上升,加速了ADN基液滴蒸发速率,使得ADN基燃烧反应充分,从而烟状混合物消失。

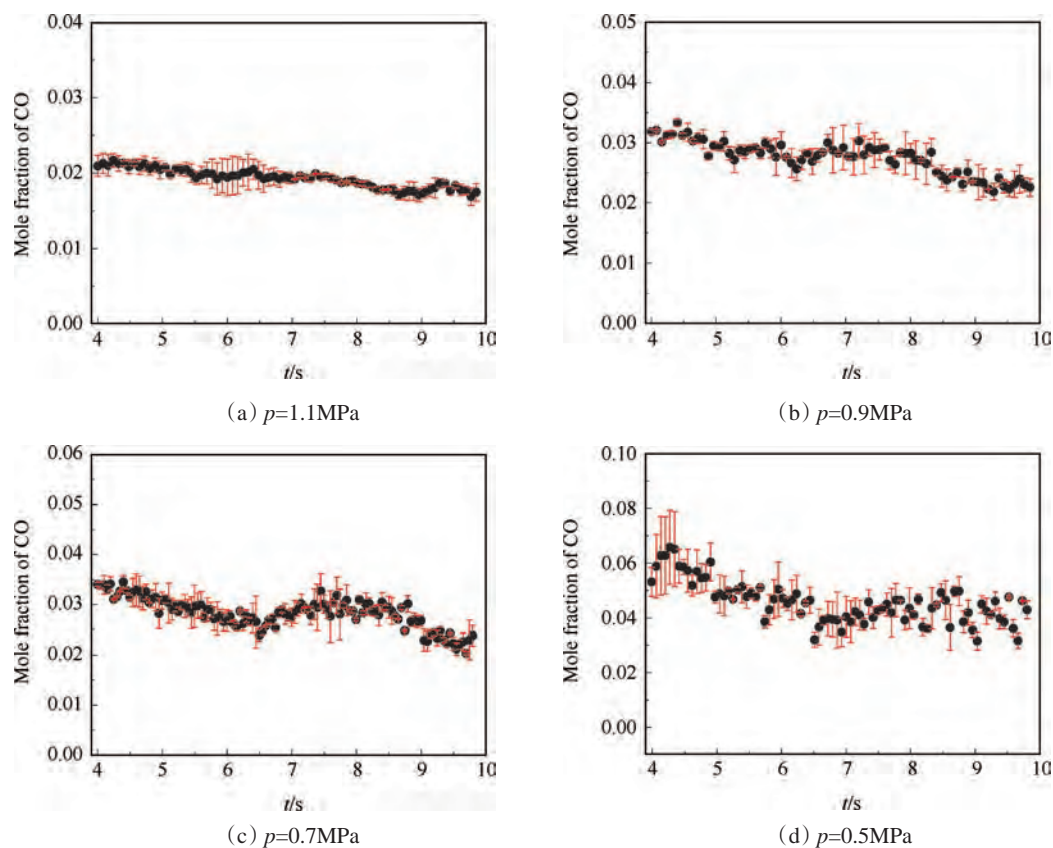


Fig. 7 Mole fraction of CO versus time for different injection pressure

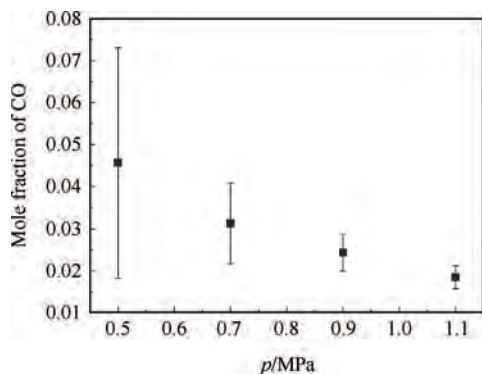


Fig. 8 Mole fraction of CO for different injection pressure

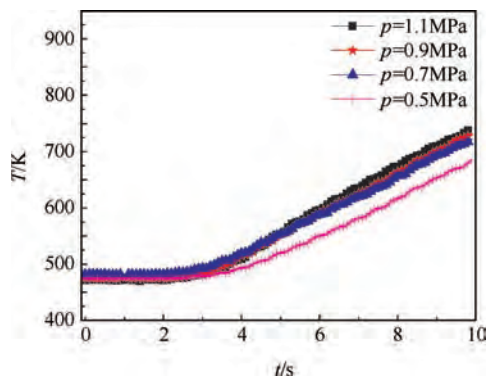


Fig. 9 Measured temperature of catalytic bed versus time for different injection pressure

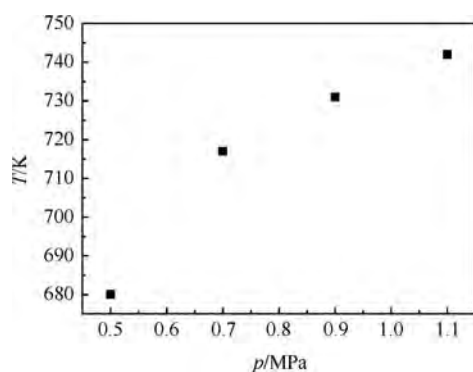


Fig. 10 Maximum temperature of catalytic bed for different injection pressure

4 结 论

本文采用直接吸收光谱法对不同喷注压力下 ADN 基发动机燃烧室内 CO 组分摩尔分数进行实时测量,得到以下结论:

(1) 实验中四种喷注压力下,燃烧室内均存在 CO,说明 ADN 基推进剂中甲醇并未完全燃烧生成 CO₂。

(2) 随着发动机喷注压力由 1.1MPa 下降到 0.5MPa,燃烧室内 CO 平均摩尔分数逐渐升高,同时 CO 组分摩尔分数波动变大。这表明喷注压力是影响 ADN 基推进剂化学反应进程的一个重要因素,随着喷注压力的降低,燃烧室内 ADN 基推进剂燃烧反应不稳定、不充分。

在之后的研究工作中,会逐步扩展待研究的 ADN 基液体推进剂催化分解及燃烧反应中特征产物的种类,从而获得反映 ADN 基液体推进剂催化分解及燃烧反应物理机理的更多详细信息。

参考文献:

[1] 陈兴强,张志勇,滕奕刚,等. 可用于替代肼的 2 种绿色单组元液体推进剂 HAN、ADN[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(4):63-66.

[2] Anflo K, Crowe B. In-Space Demonstration of an ADN-Based Propulsion System[R]. *AIAA* 2011-5832

[3] Anflo K, Grönland T A, Bergman G, et al. Towards Green Propulsion for Spacecraft with ADN-Based Monopropellants[R]. *AIAA* 2002-3847.

[4] Grönland T A, Bergman G, Nedar R. ADN-Based Propulsion for Spacecraft- Key Requirements and Experimental Verification[R]. *AIAA* 2004-4145.

[5] Anflo K, Persson S, Thormahlen P, et al. Flight Demonstration of an ADN-Based Propulsion System on the PRISMA Satellite[R]. *AIAA* 2006-5212.

[6] Pokrupa N, Anflo K, Svensson O. Spacecraft System Level Design with Regards to Incorporation of a New Green Propulsion System[R]. *AIAA* 2011-6129.

[7] Persson M, Anflo K, Dinardi A. A Family of Thrusters for ADN-Based Monopropellant LMP- 103S[R]. *AIAA* 2012-3815.

[8] Korobeinichev O P, Paletsky A A, Tereschenko A G, et al. Study of Combustion Characteristics of Ammonium Dinitramide/Polycaprolactone Propellants [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(2): 203-212.

[9] 姚兆普,王 梦,陈 君. 基于二硝酰胺铵(ADN)的无毒推进剂热分解及燃烧反应路径研究[J]. 空间控制技术与应用, 2013, 5: 53-57

[10] Philippe L C , Hanson R K. Laser Diode Wavelength Modulation Spectroscopy for Simultaneous Measurement of Temperature, Pressure, and Velocity in Shock-Heated Oxygen Flows[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30), 6090-6103.

[11] Arroyo M P, Hanson R K. Absorption Measurements of Water-Vapor Concentration, Temperature, and Line-Shape Parameters Using a Tunable In GaAsP Diode-Laser [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30), 6104-6116.

[12] 李 飞. 近红外吸收光谱诊断技术在超燃中的应用 [D]. 北京: 中国科学院力学研究所. 2009

[13] 李 飞,余西龙,顾洪斌,等. 超燃燃烧室气流参数诊断[J]. 力学学报, 2011, 43(6):1061-1067.

[14] 李 飞,余西龙,陈立红,等. TDLAS 测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H₂O 浓度[J]. 实验流体力学, 2009, 23(2).

[15] Lin X, Yu XL, Li F, et al. CO Concentration and Temperature Measurements in a Shock Tube for Martian Mixtures by Coupling OES and TDLAS [J]. *Applied Physics B-lasers and Optics*, 2013, 110(3):401-409.

[16] Xin zhou. Diode-Laser Absorption Sensor Combustion Control [D]. *Stanford: Stanford University*, 2005.

(编辑:史亚红)