

基于量子级联激光器的 ADN 基发动机燃烧室内 CO 浓度和温度测量系统的设计

(张伟^{1,2} 沈岩² 姚兆普² 余西龙¹ 李飞¹ 林鑫¹ 张少华¹ 张新宇¹)

(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)

(北京控制工程研究所, 中国空间技术研究院, 北京, 100190)

摘要 ADN (二硝酰胺铵) 作为一种绿色推进剂已在固体推进剂以及液体推进剂领域得到一定程度的应用, 是未来化学推进技术的一个新方向。目前我国正处于 ADN 推进剂研究的起始阶段, 燃烧过程的研究是当前研究的一个重要问题。由于 ADN 基推进剂催化分解及燃烧反应过程复杂, 相关的实验数据无法从国外公开文献获得, 因此有必要开展 ADN 发动机催化分解及燃烧反应的实验研究。本实验采用基于量子级联激光器吸收光谱诊断技术对 ADN 基发动机燃烧室内燃烧过程进行探究。CO 是 ADN 基燃烧反应特征产物之一, 通过测量 ADN 基发动机不同工况下 CO 的浓度和燃烧室内温度, 可以获得 ADN 基的催化效率及燃烧反应进行的程度。

关键词 量子级联激光器, ADN 基发动机, 燃烧室, 试验系统设计

引言

目前推进系统中使用的推进剂主要是基于高氯酸铵、四氧化二氮、以及肼类物质, 这些推进剂具有一个显著的缺点是它们具有毒性。这给推进剂的贮存、使用及维护过程带来诸多的不便。ADN 作为一种对环境友好的绿色推进剂, 被认为具有很好的发展潜力。在我国 ADN (二硝酰胺铵) 推进剂的研究还处于试验阶段, 其中 ADN 的燃烧分解过程是目前研究的一个重要问题。为解决这个问题, 本文设计一个适用于研究 ADN 基 (二硝酰胺铵、甲醇、水) 发动机的燃烧过程的实验系统。

气体温度与组分浓度的测量是研究发动机燃烧过程的主要手段。由于在 ADN 基发动机燃烧过程中, CO 是 ADN 基分解燃烧反应的特征产物之一, CO 的浓度是判断 ADN 基燃烧反应程度的重要指标。为此实验选定 CO 组分浓度作为现阶段实验研究的目标。

发动机燃烧过程中气体温度和组分浓度测量的手段接中接触式测量手段会影响当地的化学反应进程, 并且燃烧室内的高冲量及高温环境, 气流中任何突起物都会形成局部滞止区,

增加了准确测量的难度。而在非接触测量手段中, 吸收光谱诊断技术能够准确测量、诊断空间流场中组分浓度、温度、速度、密度等流场的主要参数, 同时又不会干扰流场。本实验选用吸收光谱技术测量燃烧室内 CO 的浓度及温度。针对 ADN 基发动机燃烧室尺寸小, CO 浓度低, 本实验系统选用具有选择性好、灵敏度高、特别是在低浓度气体检测方面具有显著优势的量子级联激光器来测量 ADN 基发动机燃烧室内 CO 浓度和燃烧室内的温度。

1 ADN 热分解及燃烧反应

ADN 的热分解及燃烧反应的机理及路径可归纳为两个分支: 第一条路径 ADN 的分解开始于解离成相应的碱性基团和酸, 如图 1 中的右边部分。第二条路径开始于 NH_4NO_3 以及 N_2O 的生成如图中的左边部分。图 1 表征了 ADN 分解及燃烧反应的主要途径^[1]。甲醇的加入强化了 ADN 的燃烧过程, 当反应彻底时最终生成 CO_2 、 H_2O 。

发动机实际工作时, 由于发动机燃烧室内的燃烧及流动过程是在几毫秒内完成的及其复杂的物理化学过程。因此 ADN 的分解及燃烧反应可能不完全。通过不同工况下燃烧室内 CO 浓

度的测量可判断燃烧反应进行程度，同时也可以衡量燃烧反应的效率。当 CO 的浓度较高时可断定甲醇没有完全反应，相应的说明 ADN 的催化分解不完全。本文将基于上述分析，搭建实验系统，完成对燃烧室内 CO 浓度进行测量，并依据实验结果判断反映的进行程度。

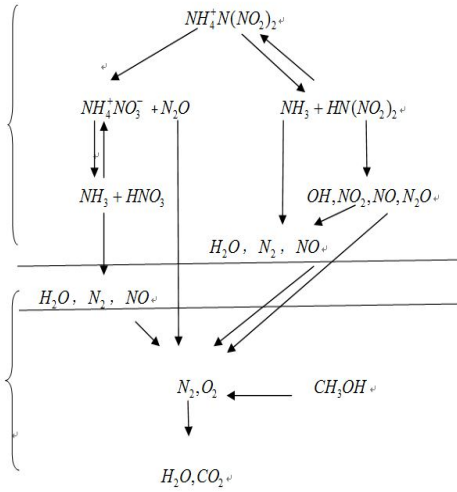


图 1 ADN 分解燃烧机理与途径^[3]

2 吸收光谱诊断技术

2.1 基本原理

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 (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 ν (cm^{-1}) 下的吸收系数，吸收系数 k_ν 是静压 P (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 $\varphi(\nu)$ (cm) 的乘积：

$$k_\nu = P \cdot X \cdot S(T) \cdot \varphi(\nu) \quad (2)$$

在均匀流场中，静压与组分浓度可认为沿光程不变，当采用波长扫描—直接吸收法，通过积分整个吸收线型得到的积分吸收率就只是温度与组分浓度的函数。使用双线波长扫描测温方法，两条吸收线的积分吸收比 R 仅仅是温度的函数：

$$\begin{aligned} R &= \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} P \cdot X_{H_2O} \cdot L \cdot S_1(T) \cdot \varphi_1(\nu - \nu_{01}) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} P \cdot X_{H_2O} \cdot L \cdot S_2(T) \cdot \varphi_2(\nu - \nu_{02}) d\nu} \\ &= \frac{S_1(T)}{S_2(T)} \\ &= \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp \left[- \left(\frac{hc}{k} \right) (E - E') \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

由积分吸收比 R 定出气体温度之后，可将温度代入式(4)，即可得到气体的组分分压。

$$PX_{H_2O} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} k_\nu d\nu}{S(T)} \quad (4)$$

2.2 吸收线的选择

吸收线的选择至关重要：选择孤立、吸收率合适的吸收线可以简化计算提高测量精度^[4]。图 2 为 NO、CO、CO₂、H₂O 四种组分在温度 1500K 时，1000nm-6000nm 光谱范围的谱线分布和线强度比较。由图 2 可知，CO 在中红外波段 4500nm-5000nm 范围内，吸收强度高，吸收线相对孤立。为选用中红外波段的吸收线，实验室选用可输出中红外激光的量子级联激光器。

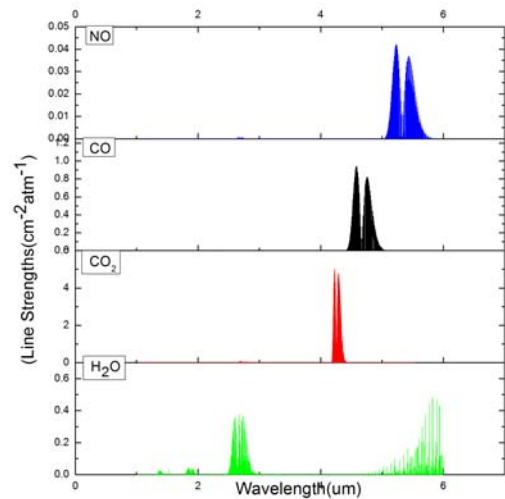


图 2 1000-1500nm 范围的 CO、NO、CO₂、H₂O 谱线比较

本文实验室采用中心波长 4557nm 量子级联激光器。基于光谱数据库 Hitran2004^[2] 计算，在实验中调谐量子级联激光器输出频率分别

为 2191.4959cm^{-1} 和 2196.6637cm^{-1} 的两条吸收线。图 3 是两条谱线在 1000–2000K 范围内线强度随温度的变化。在 1500K–2500K 范围内二者吸收强度相差不大，说明能够保证测量的准确性。图 4 是此线对在 1000–3000K 范围的测温灵敏度随温度的变化，由图示可知在 1500K–2500K 范围内线对具有较高的测温灵敏度。本实验利用此线对搭建同光路测温系统测量 ADN 基发动机燃烧室内的温度及 CO 组分浓度。

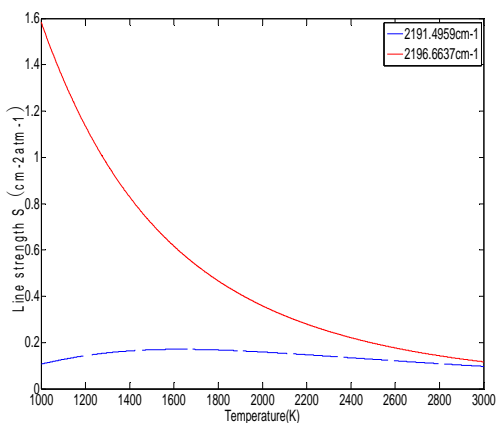


图 3 两线线强度随温度变化

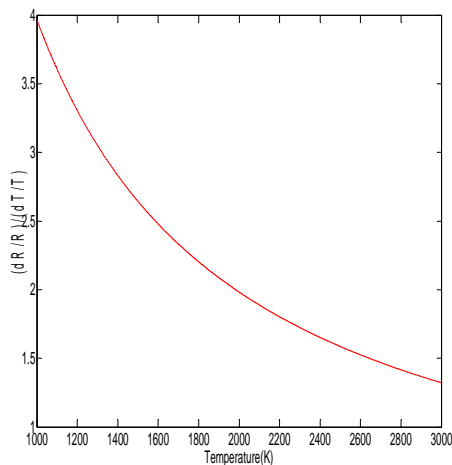


图 4 测温灵敏度随温度变化

3 试验系统设计

本文试验系统主要分为 3 部分：推进剂供给系统；ADN 基发动机；测量系统。

3.1 推进剂供给系统

图 5 是推进剂供给系统，主要用于推进剂

加注、供给 ADN 发动机、回吹，高压气源经稳压阀、截止阀分别给吹除气路和推进剂贮箱供气，在吹除气路上设置吹除截止阀、吹除电磁阀及单向阀。推进剂供气系统上有截止阀、系统放空阀及贮箱放空阀用于调节贮箱内压强；推进剂的转注采用高压气瓶经截止阀、稳压阀、过滤器加注至推进剂贮箱；推进剂贮箱中的推进剂经出口阀、过滤器、单向阀供给发动机系统。

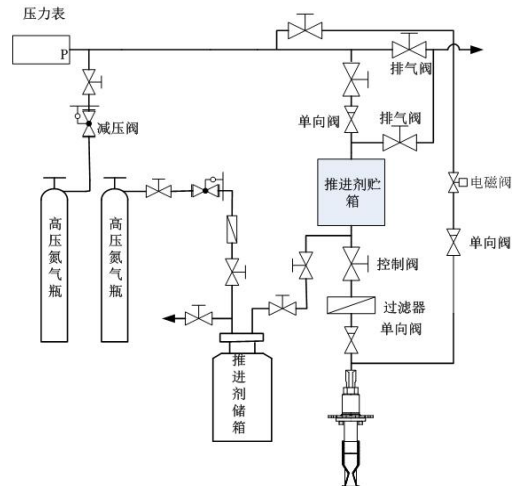


图 5 ADN 基发动机推进剂供给系统

3.2 带有光学窗口的 ADN 发动机燃烧室

图 6 是具有光学窗口的燃烧室及喷管，燃烧室除了满足实际 ADN 基发动机尺寸外，还可以耐高压（10MPa）及耐高温（2500K）。由于石英玻璃对中红外波长激光透过率差，这将降低信噪比。本实验选择高光学透射率的蓝宝石玻璃作为透视窗口。

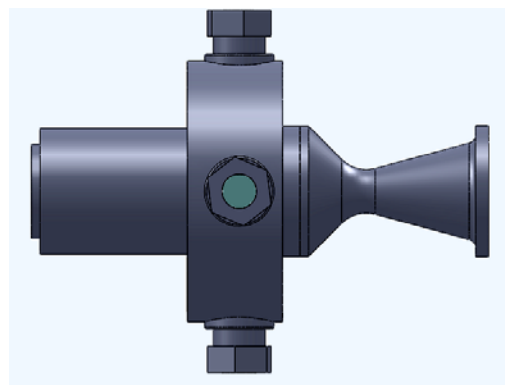


图 6 带有光学窗口的燃烧室及喷管部分

3.3 测量系统

本实验系统由一台可调谐量子级联激光器和激光器控制器（TCU-SCN151；LDX-3232）、信

号发生器、InGaAs 的红外探测器和示波器组成。图 7 是实验系统示意图。激光器控制器通过改变温度和电流来调节激光器的输出波长和功率。试验中先经过标定确定所选谱线对应的控制器的控制温度，然后通过锯齿波信号发生器输出电压信号调制控制激光器的输出电流以改变激光器的输出光频率。放置于 ADN 基发动机另一侧的探测器用于收集全部透射光信号，并将光信号转换为电信号。通过示波器记录探测器的输出信号。

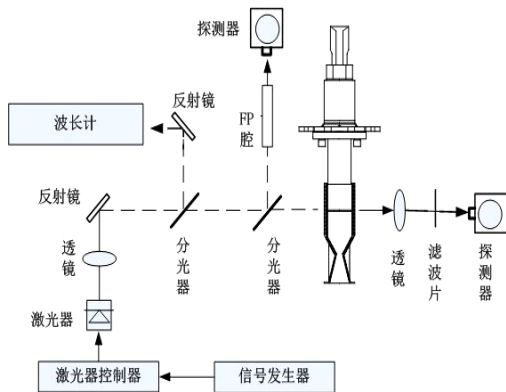


图 7 基于量子级联激光器测量 CO 浓度测量系统示意图

4 结论

本文设计建立一套基于量子级联激光器测 ADN 基发动机燃烧室内 CO 浓度的测量系统。实验采用的非接触式测量方法—吸收光谱法，能准确测量、诊断空间流场中组分浓度、温度等流场的主要参数，同时又不会干扰流场。本文设计的基于量子级联激光器的测量系统适合测量 ADN 基发动机燃烧室 CO 的浓度及温度。

参考文献

- 1 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]. 2012
- 2 Rothman LS, Jacquemart D, Barbe A, Benner DC, Birk M, Brown LR, et al. The HITRAN2004 molecular spectroscopic database, JQSRT, 2005, 96(2):139-204
- 3 余西龙, 李飞, 陈立红, 张新宇 TDLAS 测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H₂O 浓度[J] 高超声速会议, 丽江, .2008-12
- 4 Valery P. Sinditskii, Viacheslav Y. Egorshv, Anton I. Levshenkov, and Valery V. Serushkin, Combustion of Ammonium Dinitramide, Part 2: Combustion Mechanism, Journal of propulsion and power, 22, 777-785, 2006

TEMPERATURE AND CARBON DIOXIDE CONCENTRATION MEASUREMENT SYSTEM DESIGN OF ADN-BASED THRUST CHAMBER BASED ON QCL

ZHANG Wei^{1,2}, SHEN Yan², YAO Zhaopu², YU Xilong², LI Fei¹, LIN Xin¹,
ZHANG Shaohua¹, ZHANG Xinyu¹

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

(2 Beijing Institute of Control Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100190, China)

Abstract ADN (ammonium dinitramide) a green propellant, it be used as solid propellant and liquid propellant ADN is considered as a new direction of the Chemical propulsion technology in the future. At present, we just start the research of the ADN propellants. Combustion process is an important issue in the current research, but the decomposition and combustion process of the ADN propellant is complex, And we can't obtain the relevant experimental data from Papers published abroad. So it's necessary to Carry out experimental research in the Combustion process of ADN propellants. This paper designs a measurement system based on QCL to research the ADN combustion process. Carbon dioxide is one of the ADN-based combustion reaction product. By measuring the Carbon dioxide concentration and the temperature of the ADN-Based thrust chamber under different experimental conditions, We can get the efficiency of the ADN-based catalytic reaction and the limit of combustion.

Key words quantum cascade laser (QCL) ,ADN-based thrust ,chamber experimental ,system design