

# 超燃冲压发动机燃烧状态诊断-吸收光谱法

金熠 1\*, 晁建宇 1, 翟超 1, 纪锋 2, 卢洪波 2

(1.中国科学技术大学, 合肥 230027;2.中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

**摘要:** 本文使用可调谐二极管激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS), 对超燃冲压发动机燃烧流场参数进行测量, 并进行参数重建, 以此判断超燃冲压发动机燃烧状态。通过这一方案, 可以实现对流场参数非接触式的精准定量测量, 解决了传统方法中接触式设备影响流场, 不易精准定量测量的问题。通过该方法, 在 FD-21 风洞中开展超燃冲压发动机的点火和燃烧试验, 以发动机尾喷管出口为测量截面, 构建了以燃烧产物水蒸气为吸收组分的 TDLAS 测量系统, 对流场参数进行了测量。吸收光谱信号的峰值吸收率表征了发动机燃烧室内的点火和燃烧过程, 同时实现了尾喷气流静温和水蒸气分压的定量测量。

**关键词:** 可调谐二极管激光吸收光谱; 超燃冲压发动机; 燃烧诊断

## 1 引言

自由活塞高焓脉冲风洞可用于模拟高超声速流动, 是高超声速空气动力学和高温气体动力学研究中的主要地面试验设备之一。经过近几十年的发展, 其在不同的场景中获得了广泛的应用, 例如高超声速飞行器面临的复杂气动热力学和气动光学问题的研究<sup>[1]</sup>、超燃冲压发动机试验<sup>[2,3]</sup>和自由飞试验等。超燃冲压发动机是一种随着飞行器以高超声速飞行, 燃料在超声速气流中组织燃烧的冲压发动机, 其在高超声速导弹、空天飞机和以火箭基组合循环 (Rocket Based Combined Cycle, RBCC) 推进系统为动力的天地往返运输器等高超声速飞行器中均有着广泛的应用。如何增强燃料的混合、实现可靠点火并维持燃烧室内稳定的燃烧是超燃冲压发动机研究中的关键问题之一<sup>[4,5]</sup>, 而有效地获得发动机内外流的参数是上述研究的前提。

随着超燃冲压发动机研究的不断深入, 多种流动显示和测量技术已成功应用于相关实验中。取样探针对超声速流动进行冻结<sup>[6]</sup> (探针头部结构如图 1.1 所示), 通过取样管道将气流样本输送到取样管中, 然后利用色谱等方法对气流的组分进行分析。该方法简单易用, 但无法对气流进行原位测量, 同时测量的参数局限于气体组分。压力传感器<sup>[7]</sup>可对发动机壁面的压力进行定量测量 (如图 1.2 (a) 所示, 在超燃冲压发动机内流道壁面上布置一系列压力传

感器以监测沿程压力)，总温探针可对流场的总温进行测量。此类接触式测量设备会对流场造成干扰，无法工作于极端高温环境中，且局限于对流场参数的点测量，无法获得流场参数详细的空间分布信息。高速摄影、纹影<sup>[8]</sup>（如图 1.3 所示，纹影显示了超燃冲压发动机燃烧室内的流场结构）等技术可用于观测激波等流动结构，但难以实现对流场参数的定量测量。

TDLAS 技术具有非接触的优点，可工作于超燃冲压发动机的高温环境中，对流场参数进行原位测量。在发动机试验中，TDLAS 技术可以实现燃烧产物的直接测量<sup>[9,10]</sup>，判断发动机是否点火及燃烧状态<sup>[11,12]</sup>。这种直接测量方法，能够在第一时间对流场情况进行响应。此外，TDLAS 测量技术能实现 10 kHz 以上的测量频率，在超燃冲压发动机试验研究中具有显著的优势。

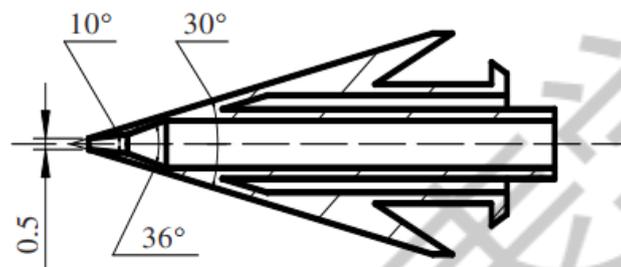


图 1.1 取样探针头部结构<sup>[6]</sup>

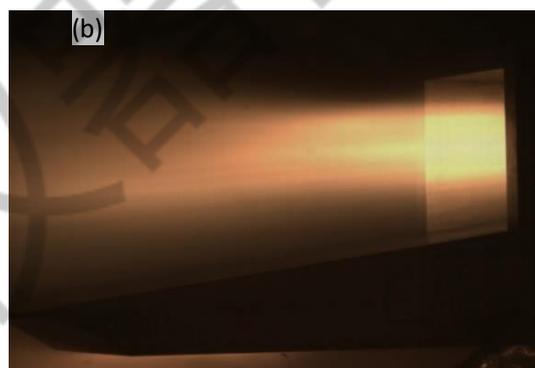
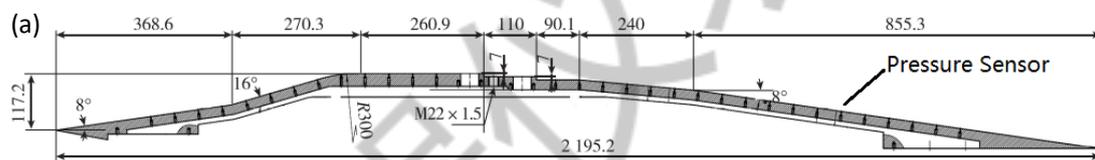


图 1.1 (a) 发动机壁面压力测点分布；(b)  $Ma = 10$  来流下发动机实验照片<sup>[7]</sup>