

---

# 力学所发动机非平衡效应机理研究取得进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/22013.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

力学所发动机非平衡效应机理研究取得进展。

在高马赫数飞行条件下，气流密度的降低和滞止温度的升高会激发分子振动模态、离解和电离等热/化学非平衡现象，气体中热物理和化学过程复杂度急剧增加。吸气式高超声速飞行器多采用机身与发动机一体化设计，因此来流的非平衡效应直接影响燃烧性能，进而决定发动机的推力性能。对于飞行马赫数大于8的吸气式高超声速飞行器，在发动机设计和性能分析中需要考虑热/化学非平衡等真实气体效应。然而，由于湍流、燃烧、热/化学非平衡效应等多物理耦合的复杂性以及实验/模拟研究手段的缺乏，关于热/化学非平衡效应对湍流燃烧和发动机性能的影响规律和作用机制存在较多争议，不同的学者甚至得出看起来截然相反的结论。部分研究观察到非平衡效应降低了火焰温度，从而抑制了燃烧，导致点火延迟甚至吹熄；然而，另有部分学者观察到非平衡效应的存在促进点火，从而导致火焰驻定在更上游位置。

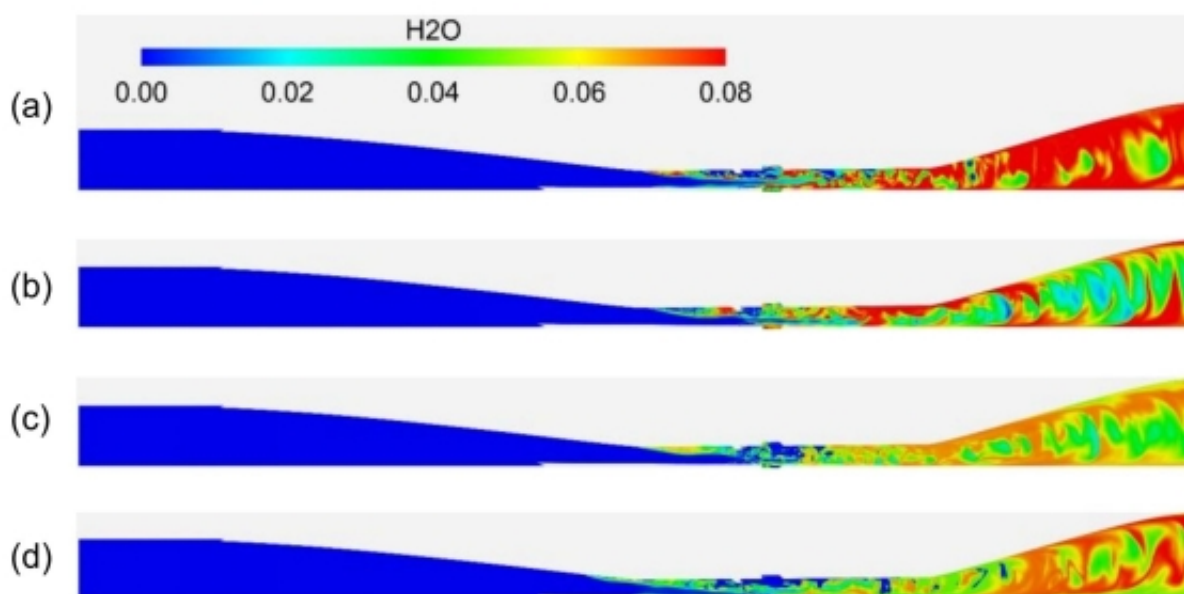
中国科学院力学研究所高马赫研究团队通过模拟方法创新实现了3.7亿网格全尺寸高马赫发动机内外流耦合一体化大涡模拟，在宽工况条件下全面剖析了非平衡效应对高马赫发动机的影响规律

Journal of Propulsion and Power审稿人的高度评价。

该工作取得如下突破性进展。第一、该研究揭示了在同一发动机流道不同阶段热力学非平衡截然相反的两种作用机制。在进气道等收缩管和近壁面边界层中，流动压缩和粘性加热使得动能转化为内能并被添加至平动-转动能量模态，热力学弛豫延迟的存在使得平动-转动温度 ( $T_t$ ) 暂时高于热力学平衡温度 ( $T$ )，表现为有助于促进点火的非平衡加热效应 ( $T_t > T$ )。与之相反，在尾喷管等扩展段内，流动膨胀将从平动-转动能量模态中提取内能并转换为动能，热力学弛豫延迟的存在意味着振动-电子能量模式不会立即补偿热力学非平衡状态，从而使得平动-转动温度暂时降低到其平衡值  $T$  以下，表现出抑制燃烧的非平衡冷却效应 ( $T_t < T$ )。既往研究得出的看似相反的结论其实源自于对发动机不同流动阶段的观察，结论本身相对观察对象而言均是正确的。本研究表明了开展全尺寸发动机内外流耦合一体化模拟的必要性，避免“盲人摸象”式结论的产生。第二、该研究基于动态分区概念建立了热力学非平衡与湍流燃烧耦合计算模型-分区非平衡流模型 (ZNM)。在传统的热/化学非平衡计算中，逐点计算混合物的V-T热弛豫时间非常耗时，其计算代价甚至超过燃烧模拟中的复杂化学反应体系的求解。为此，本研究提出了分区非平衡模型 (ZNM) 以在保证非平衡准确表征的前提下提高计算效率。模型基于多维参数空间建立归一化的非平衡热力学和非平衡化学分区法则，通过采用瞬态流场变量为分区指标实现非平衡效应的自适应分区建模。相比于传统的热力学非平衡计算，该分区非平衡流模型通过概率密度函数加权的方式耦合了湍流脉动对非平衡能量迁移的影响，从而可以更加准确预测超声速燃烧中高标量脉动

条件下的非平衡效应。模型通过保证分区内非平衡特征弛豫时间的均一化，实现非平衡效应和其他物理过程的局部解耦，在兼顾模拟保真度的前提下将热力学非平衡效应的计算效率提升了5倍以上，从而突破长期以来制约非平衡流高效高保真模拟的湍流/热力学特性/化学反应多尺度作用耦合建模这一瓶颈。进一步，科研人员基于ZNM模型开展了当前最高解析度（3.7亿网格）的耦合热/化学非平衡效应的高马赫超燃冲压发动机全尺寸内外流耦合一体化大涡模拟研究，表明基于动态分区概念的分区解耦模拟方法在超声速燃烧室优化设计方面颇具应用潜力，可为飞/发一体化设计提供高效、高保真的数值工具。

相关研究成果发表在Journal of Propulsion and Power（2022, vol.38）、Journal of Propulsion and Power（2023）、《力学学报》（2022, vol.54）上。研究工作得到国家重点研发计划和国家自然科学基金等的支持。



热力学平衡与非平衡条件下产物浓度分布，（a）平衡  $\rho=0.6$ ，（b）非平衡  $\rho=0.6$ ，（c）非平衡  $\rho=1.0$ ，（d）非平衡  $\rho=1.4$ 。

研究团队单位：力学研究所

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发