

氢燃料微尺度燃烧器动态响应特性与稳定性控制

陈祥勇

肇庆华海能源投资有限公司 广东肇庆

【摘要】 氢燃料微尺度燃烧器在能源领域具重要潜力，其动态响应特性与稳定性控制备受关注。对不同结构与工况下氢燃料微尺度燃烧器的动态响应特性开展研究，分析多种因素对燃烧过程动态变化的影响规律。探讨稳定性控制方法，从燃烧器结构优化、运行参数调节及控制策略制定等方面着手，提升燃烧稳定性。结果表明，燃烧器结构参数对动态响应有显著影响，合理的稳定性控制措施可有效抑制燃烧不稳定现象。研究成果为氢燃料微尺度燃烧器的优化设计与实际应用提供理论支撑与技术指导。

【关键词】 氢燃料；微尺度燃烧器；动态响应特性；稳定性控制；燃烧过程

【收稿日期】 2025 年 5 月 18 日

【出刊日期】 2025 年 6 月 22 日

【DOI】 10.12208/j.jccr.20250039

Dynamic response characteristics and stability control of hydrogen fuel microscale burners

Xiangyong Chen

Zhaoqing Huahai Energy Investment Co., Ltd., Zhaoqing, Guangdong

【Abstract】 Hydrogen fuel microscale burners hold significant potential in energy applications, with their dynamic response characteristics and stability control being of particular interest. This study investigates the dynamic response characteristics of hydrogen fuel microscale burners under different structural configurations and operating conditions, analyzing the influence patterns of various factors on dynamic combustion process variations. Stability control methods are explored through burner structure optimization, operational parameter adjustments, and control strategy formulation to enhance combustion stability. Results demonstrate that burner structural parameters significantly impact dynamic responses, while appropriate stability control measures can effectively suppress combustion instability phenomena. The research findings provide theoretical support and technical guidance for the optimized design and practical application of hydrogen fuel microscale burners.

【Keywords】 Hydrogen fuel; Microscale burner; Dynamic response characteristics; Stability control; Combustion process

引言

在全球能源需求持续攀升与环保意识日益觉醒的时代背景下，氢燃料凭借其零碳排放、高热值的特性，成为能源转型的关键角色。微尺度燃烧器以其体积小、热流密度高、易于集成等独特优势，在便携式电源、微型动力系统及芯片冷却等前沿领域展现出巨大潜力。实际应用中，微尺度燃烧器面临动态响应迟缓、火焰易淬熄等问题，导致燃烧效率下降与污染物排放波动。深入剖析其动态响应特性与稳定性控制策略，不仅对优化燃烧性能、降低环境影响、确保设备安全稳定运行具有重要意义，更将为能源高效清洁利用提供核心技术支撑。

1 氢燃料微尺度燃烧器动态响应特性分析

氢燃料微尺度燃烧器的动态响应特性受多种因素影响。从燃烧器几何结构角度来看，通道尺寸、形状以及燃料与氧化剂入口布局，均对燃料与氧化剂的混合过程及燃烧传播速度产生显著作用。在微尺度环境下，较小的通道尺寸会显著增强壁面效应。这种效应改变了混合气体的流动状态，使边界层内的气体流速分布发生变化，从而影响混合气体与壁面之间的热量传递和质量传递过程，最终导致燃烧特性的改变。在矩形微通道中，通道的长宽比会影响气体的流动阻力和混合效率，进而对燃烧过程产生不同影响。

运行工况参数的变化，也是影响氢燃料微尺度燃

烧器动态响应特性的重要因素。燃料与氧化剂的流量、温度及压力等参数,会直接影响燃烧反应速率与热释放速率,进而导致燃烧器的动态响应出现波动。以燃料流量为例,当燃料流量突然增加时,更多的燃料进入燃烧区域,在氧化剂供应相对稳定的情况下,燃烧反应加剧,热释放速率瞬间增大^[1]。这不仅会引发燃烧器内压力与温度的快速上升,还可能导致燃烧波的传播速度发生变化。氧化剂的流量变化也会产生类似影响,若氧化剂供应不足,会使燃烧反应不充分,导致燃烧效率降低和燃烧不稳定。

外部干扰同样会对氢燃料微尺度燃烧器的动态响应产生影响。环境温度与压力的变化,会改变燃烧器与外界的热交换和质量交换过程。当环境温度降低时,燃烧器向外界的散热增加,可能导致燃烧温度下降,影响燃烧稳定性^[2]。环境压力的变化则会影响燃烧产物的排出和新鲜混合气体的吸入,进而影响燃烧过程。机械振动也是常见的外部干扰因素,它会使燃烧器内部的气体流动状态发生改变,破坏燃料与氧化剂的均匀混合,导致燃烧过程不稳定。这些外部干扰因素相互作用,进一步增加了燃烧器动态响应特性的复杂性。

2 影响氢燃料微尺度燃烧稳定性的因素探究

在氢燃料微尺度燃烧中,燃烧稳定性至关重要。燃料与氧化剂的混合均匀性是决定燃烧稳定性的关键因素之一。若混合不均匀,会出现局部燃料过浓或过稀的情况。在燃料过浓区域,由于氧气供应不足,燃烧反应无法充分进行,会产生大量未燃燃料和不完全燃烧产物,降低燃烧效率并可能引发积碳等问题。而在燃料过稀区域,燃烧反应速率减慢,火焰传播不稳定,甚至可能出现熄火现象。混合过程受多种因素制约,混合方式决定了燃料与氧化剂的初始混合程度,如预混式、扩散式等不同混合方式对燃烧稳定性有显著影响。

燃烧器的散热特性也对燃烧稳定性有着显著影响。由于微尺度燃烧器的表面积与体积比较大,其散热损失相对较大^[3]。过多的散热会使燃烧温度降低,当燃烧温度低于某一临界值时,化学反应速率会急剧减慢,导致燃烧反应无法持续进行。散热损失还会影响火焰的形状和位置,使火焰发生偏移或扭曲,破坏燃烧的稳定性和完整性。散热损失的不均匀性也会导致燃烧器内部温度分布不均,进一步加剧燃烧不稳定现象。如何有效控制微尺度燃烧器的散热,是保证燃烧稳定性的重要课题。

化学反应动力学因素同样对氢燃料微尺度燃烧的稳定性产生重要影响。反应速率常数和活化能等参数,决定了燃烧反应的速率和进程。不同的反应动力学参

数会导致燃烧过程中热释放速率的差异,进而影响燃烧稳定性。若反应速率常数较大,燃烧反应会迅速进行,热释放速率高,但也容易导致燃烧过程过于剧烈,引发不稳定现象^[4]。而活化能的高低则影响反应的难易程度,活化能过高会使反应难以启动,降低燃烧效率;活化能过低则可能使反应过于迅速,难以控制。化学反应动力学还与燃烧产物的生成和分解过程密切相关,这些过程的平衡状态也会影响燃烧的稳定性。

3 氢燃料微尺度燃烧器稳定性控制策略制定

为提升氢燃料微尺度燃烧器的稳定性,可从多方面制定控制策略。在燃烧器结构优化方面,设计合理的混合结构是关键。采用特殊的混合通道,如带有扰流结构的微通道,能够增强燃料与氧化剂的湍流程度,促进两者的快速混合,提高混合均匀性。还可以通过设置导流板、混合腔等结构,优化气体的流动路径,使燃料与氧化剂在进入燃烧区域前实现更充分的预混。优化燃烧器的散热结构也至关重要。通过添加隔热材料,减少燃烧器向外界的散热损失,维持燃烧温度的稳定。改进散热方式,如采用高效的散热翅片或冷却通道,能够使燃烧器的热量更均匀地散发,避免局部过热或过冷现象的发生,从而提高燃烧稳定性。

运行参数调节也是提升燃烧器稳定性的重要手段。精确控制燃料与氧化剂的流量比,使其保持在合适的范围内,是确保燃烧反应稳定进行的基础。不同的燃料和氧化剂组合,以及不同的燃烧工况,都对应着最佳的流量比。通过实时监测燃烧过程中的关键参数,如温度、压力、燃烧产物成分等,根据这些参数的变化及时调整燃料与氧化剂的流量比,能够保证燃烧反应始终处于稳定状态^[5]。根据燃烧器的运行状态,实时调整燃料与氧化剂的温度和压力,也能够适应不同工况的需求。在启动阶段适当提高燃料和氧化剂的温度,能够加快反应速率,使燃烧器更快达到稳定运行状态;在负荷变化时,及时调整压力参数,能够保证气体的稳定供应和燃烧的稳定性和完整性。

在控制策略制定上,采用先进的控制算法是实现燃烧器稳定运行的有效途径。基于模型预测控制的方法,通过建立精确的燃烧过程数学模型,对燃烧过程进行实时监测与预测。根据预测结果,提前调整运行参数,抑制燃烧不稳定现象的发生。这种控制方法能够充分考虑燃烧过程的动态特性和多种影响因素,实现对燃烧过程的精确控制。还可以结合自适应控制、智能控制等算法,进一步提高控制策略的适应性和准确性^[6]。利用神经网络算法对燃烧过程进行学习和建模,能够更

好地处理复杂的非线性关系，实现对燃烧器运行状态的智能调控，确保氢燃料微尺度燃烧器在各种工况下都能稳定、高效运行。

4 稳定性控制策略有效性验证与评估

对制定的稳定性控制策略进行有效性验证与评估十分必要。通过实验测试，在不同工况下运行安装有稳定性控制装置的氢燃料微尺度燃烧器，监测燃烧过程中的关键参数，如温度、压力、燃烧产物成分等。在实验过程中，设置多种工况条件，包括不同的燃料流量、氧化剂流量、温度和压力组合，以及模拟各种外部干扰情况，全面考察燃烧器在不同条件下的运行表现。对比实施控制策略前后燃烧器的运行情况，从燃烧稳定性、燃烧效率、污染物排放等多个方面评估稳定性的提升效果。观察燃烧火焰的形状和稳定性，分析燃烧产物中有害成分的含量变化，以此判断控制策略对燃烧过程的改善程度。

利用数值模拟方法，对燃烧过程进行详细模拟分析，能够深入研究控制策略对燃烧过程的影响机制。通过建立准确的物理模型和数学方程，模拟燃烧器内部的流动、传热、传质和化学反应过程，精确计算燃烧过程中的各种参数分布。在模拟过程中，将控制策略的实施过程纳入模型，分析控制参数的调整对燃烧过程的影响^[7]。研究燃料与氧化剂流量比的改变如何影响混合气体的分布和燃烧反应速率，以及散热结构的优化如何影响燃烧温度的分布和稳定性。通过数值模拟，可以预测不同工况下控制策略的有效性，为实验设计和控制策略的优化提供理论指导。

通过实验与数值模拟相结合的方式，能够全面、准确地验证稳定性控制策略的有效性。实验测试能够提供真实的运行数据和直观的现象观察，而数值模拟则能够深入揭示燃烧过程的内在机制和控制策略的作用原理。两者相互补充、相互验证，为进一步优化控制策略提供可靠依据^[8]。在验证过程中，不断分析实验结果与模拟结果之间的差异，找出控制策略存在的不足之处，进行针对性的改进和优化。通过反复的验证和优化过程，确保氢燃料微尺度燃烧器在实际应用中能够稳定、高效运行，为氢能的开发和利用提供可靠的技术支持。

5 结语

对氢燃料微尺度燃烧器动态响应特性与稳定性控制的研究取得一定成果。明确多种因素对动态响应特性与稳定性的影响，提出系列稳定性控制策略并验证其有效性。未来，需深入探究复杂工况下的燃烧特性，优化控制策略以适应更多变工况。加强多学科交叉融合，开发更高效稳定的燃烧器。关注与实际应用场景的结合，推动氢燃料微尺度燃烧器在能源领域的广泛应用，助力能源转型与可持续发展。

参考文献

- [1] 沈雪松,李海鸥,钟洋,等.氢燃料电池阳极抗 CO 催化剂研究进展: 机制、材料与展望[J/OL].化工进展,1-18[2025-07-21].
- [2] 张立传,王建臣,韩猛,等.氢燃料微喷射角度对掺混与燃烧特性的影响研究[J/OL].推进技术,1-16[2025-07-21]
- [3] 刘通,黄溯,朱诗悦,等.一锅法合成高温氢燃料电池用高效无钴复合阴极[J/OL].无机材料学报,1-7[2025-07-21].
- [4] 薛子轩,殷超凡,姚跃超,等.泛氢燃料质子导体固体氧化物燃料电池研究进展[J/OL].无机材料学报,1-15[2025-07-21].h
- [5] 辛宇亮.基于氢燃料电池技术的船舶动力系统优化与性能研究[J].船舶标准化工程师,2025,58(04):57-61.
- [6] 覃思博,么强,吕海陆,等.水蒸气稀释下富氢燃料/纯氧预混射流火焰回火特性[J].工程热物理学报,2025,46(07):2415-2426.
- [7] 姜建国,姚德华,毕洪波.风光氢储耦合系统容量配置优化研究[J].电力需求侧管理,2025,27(04):98-104.
- [8] 赵钦新,王宗一,邓世丰,等.氢气燃烧技术及其进展[J].科学技术与工程,2022,22(36):15870-15880.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS