

分类号: TK4  
学号: 20222009009

密级: 公开  
单位代码: 10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 氨/柴油双燃料发动机缸内燃烧及排放特性的 试验与仿真研究

学位申请人	周雨寒
指导教师	倪向东 教授
申请学位类别	学术硕士
专业名称	机械工程
研究方向	车辆工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子  
2025年05月

分类号: TK4  
学号: 20222009009

密级: 公开  
单位代码: 10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 氨/柴油双燃料发动机缸内燃烧及排放特性的 试验与仿真研究

学位申请人	周雨寒
指导教师	倪向东 教授
申请学位类别	学术硕士
专业名称	机械工程
研究方向	车辆工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2025年05月

**Experimental and simulation study on the in-cylinder combustion and  
emission characteristics of ammonia/diesel dual-fuel engine**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

By

**Zhou Yuhan**

**(Mechanical Engineering)**

Dissertation Supervisor: Prof. Ni Xiangdong

May, 2025

# 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

## 学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：周雨寒

时间： 2025 年 5 月 20 日

## 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：周雨寒

时间： 2025 年 5 月 20 日

导师签名：周雨寒

时间： 2025 年 5 月 20 日

## 摘要

在“双碳”战略及能源结构调整背景下，绿色低碳可再生能源和动力系统零碳化成为国内外焦点。燃料低碳化和燃烧高效化是内燃机行业实现碳中和的必由之路。氨作为氢载体和无碳替代燃料，在内燃机行业脱碳进程中将扮演重要角色。然而，由于氨燃料的燃烧惰性，氨发动机在工作过程中存在燃烧效率低和燃烧稳定性差的问题。面向动力系统中氨燃料高效清洁燃烧的需求，本课题基于一台氨/柴油双燃料（ADDF）发动机，通过台架试验研究了不同负荷下氨能比和不同的喷射策略对缸内燃烧与排放特性的影响规律；同时，利用 CONVERGE 软件构建了 ADDF 发动机缸内燃烧数值模型，探究了发动机压缩比和 EGR 率对缸内燃烧过程与污染物生成特性的影响机制，旨在优化 ADDF 发动机缸内燃烧过程，拓宽使用场景，并提升发动机工作性能。主要研究结果总结如下：

首先，在四缸共轨柴油机上搭建了氨/柴油双燃料测试平台，实现了 ADDF 燃烧模式，通过试验系统研究了 ADDF 模式下低中高三种负荷下氨能比对双燃料发动机的缸内燃烧过程、燃烧稳定性、氮基和碳基排放特性的影响。结果表明：氨能比的增加显著抑制了燃烧过程的剧烈程度。随着氨能比的提升，发动机缸内压力和放热率的峰值均有所下降。而随着负荷的增大，缸内压力显著提高。在 25% 负荷时，纯柴油模式和 ADDF 模式的缸内燃烧压力曲线和 HRR 曲线均呈现单峰分布，而随着负荷的增加，HRR 曲线过渡到双峰分布。各负荷条件下，未燃  $\text{NH}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著增加，未燃  $\text{NH}_3$  的排放量随着负荷的增加而不断减少。当氨能比增至 60% 时，尽管  $\text{CO}_2$  排放量最多可减少 50.2%，但发动机的燃烧稳定性受到了严重影响，循环波动 ( $\text{COV}_{\text{IMEP}}$ ) 最高可达 3.16%。

其次，通过试验研究了喷射策略对 ADDF 发动机的显著影响。探索了在高负荷工况下，氨能比、柴油喷射压力和柴油喷油正时对 ADDF 发动机缸内燃烧、排放特性和燃油经济性的影响。试验结果表明：提高氨能比增强了预混燃烧，显著延长了点火延迟和燃烧持续时间。较高的氨能比降低了  $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}_2$  排放，但导致未燃氨和  $\text{N}_2\text{O}$  排放迅速增加，同时当量  $\text{CO}_2$  排放也有显著上升。当氨能比从 0% 提高到 60% 时，制动热效率（BTE）从 31.3% 提升至 37.3%，且  $\text{COV}_{\text{IMEP}}$  低于 3%。这表明，在相对稳定的运行条件下，较高的氨能比可使 ADDF 发动机达到更高的 BTE。此外，喷油压力和喷油正时在控制燃烧和排放方面起着关键作用。提高喷油压力增强了指示平均有效压力（IMEP）和燃烧效率，但对温室气体排放的优化效果并不显著。提前喷油正时增加了 IMEP 并减少了温室气体排放，但同时也导致了  $\text{NO}_x$  排放的增加。在最优温室气体排放点，ADDF 发动机的当量  $\text{CO}_2$  排放比基准条件下降低了 14.1%。

最后，基于 CONVERGE 软件建立氨/柴油双燃料发动机数值模型，仿真研究了压缩比与 EGR 率对燃烧及污染物生成的影响机制。结果表明：提高压缩比通过增强缸内压缩终了温度与压力，改善柴油雾化质量，促进燃料与空气混合，使燃烧相位前移并扩大火焰前锋面积，从而提升燃烧完全性。然而，压缩比升高加剧扩散燃烧阶段的氧浓度梯度，促使碳烟前驱体转化为  $\text{CO}$ ，导致  $\text{CO}$  排放增加；

同时高温高压环境强化了热力型 NO<sub>x</sub> 的生成路径，NO<sub>x</sub> 排放显著上升。EGR 率增加通过稀释效应降低缸内峰值压力与温度，抑制燃烧强度，减少热力型 NO<sub>x</sub> 生成。但 EGR 引入的惰性气体缩短喷雾贯穿距离，增大液滴直径，形成局部富燃料区域，导致火焰传播路径破碎、燃烧稳定性下降，未燃 NH<sub>3</sub> 残留及 CO、HC 排放增加。此外，EGR 率升高显著加剧 Soot 生成，其峰值浓度随 EGR 率增长呈现快速上升趋势，表明 EGR 调控需平衡氧浓度抑制效应与混合均匀性恶化的矛盾。

**关键词：**双燃料发动机；氨燃料；燃烧过程；温室气体排放；喷射策略

## Abstract

Under the dual carbon strategy and energy restructuring, the decarbonization of green low-carbon renewable energy and power systems has become a global focus. Fuel decarbonization and combustion efficiency improvement represent the inevitable path for the internal combustion engine industry to achieve carbon neutrality. As a hydrogen carrier and carbon-free alternative fuel, ammonia will play a critical role in the decarbonization of internal combustion engines. However, the inherent combustion inertia of ammonia poses challenges in achieving high combustion efficiency and stability in ammonia engines. To meet the demand for efficient and clean ammonia fuel combustion in power systems, this study investigates the effects of ammonia energy ratio and injection strategies on in-cylinder combustion and emission characteristics under varying loads using a bench test on an ammonia/diesel dual-fuel (ADDF) engine. Simultaneously, a numerical model of the ammonia/diesel dual-fuel engine combustion chamber was established using CONVERGE software to explore the influence mechanisms of compression ratio and exhaust gas recirculation (EGR) rate on combustion processes and pollutant formation, aiming to optimize the in-cylinder combustion process, expand operational scenarios, and enhance engine performance. Key findings are summarized below:

Firstly, an ammonia/diesel dual-fuel engine test platform was established on a four-cylinder common-rail diesel engine, realizing ADDF combustion mode. The effects of ammonia energy ratio on the in-cylinder combustion process, combustion stability, and nitrogen-based and carbon-based emission characteristics of the dual-fuel engine under low, medium, and high loads in ADDF mode were systematically investigated through experiments. The results indicated that an increase in the ammonia energy ratio significantly suppressed the intensity of the combustion process. As the ammonia energy ratio increased, both the peak in-cylinder pressure and heat release rate of the engine decreased. However, with an increase in load, the in-cylinder pressure increased notably. At 25% load, both the in-cylinder combustion pressure curve and the Heat Release Rate (HRR) curve exhibited a single-peak distribution in both pure diesel and ADDF modes, whereas the HRR curve transitioned to a bi-modal distribution as the load increased. Under various load conditions, the emissions of unburned  $\text{NH}_3$  and  $\text{N}_2\text{O}$  increased significantly, with unburned  $\text{NH}_3$  emissions decreasing as the load increased. When the ammonia energy ratio rose to 60%, although  $\text{CO}_2$  emissions could be reduced by up to 50.2%, the combustion stability of the engine was severely affected, with the Coefficient of Variation of IMEP ( $\text{COV}_{\text{IMEP}}$ ) reaching up to 3.16%.

Secondly, the significant influence of injection strategies on the ADDF engine was investigated through experiments. The effects of ammonia energy ratio, diesel injection pressure, and diesel injection timing on the in-cylinder combustion, emission characteristics, and fuel economy of the ADDF engine under high-load conditions were explored. The results showed that increasing the ammonia energy ratio enhanced premixed combustion, significantly prolonging ignition delay and combustion duration. A higher ammonia energy ratio reduced  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}_2$  emissions but led to a rapid increase in unburned ammonia and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, along with a significant rise in equivalent  $\text{CO}_2$  emissions. When the ammonia energy ratio increased from 0% to 60%, Brake Thermal Efficiency (BTE) improved from 31.3% to 37.3%, with  $\text{COV}_{\text{IMEP}}$  remaining below 3%. This suggests that, under relatively stable operating conditions, a higher ammonia energy ratio can enable the ADDF engine to achieve higher BTE. Additionally, injection pressure and timing played crucial roles in controlling combustion and emissions. Increasing injection pressure enhanced Indicated Mean Effective Pressure (IMEP) and combustion efficiency but had limited optimization effects on greenhouse gas emissions.

Advancing injection timing increased IMEP and reduced greenhouse gas emissions but also led to an increase in NO<sub>x</sub> emissions. At the optimal point for greenhouse gas emissions, the equivalent CO<sub>2</sub> emissions of the ADDF engine were reduced by 14.1% compared to the baseline condition.

Finally, a numerical model of an ammonia/diesel dual-fuel engine was established using CONVERGE software. Through simulation studies, the influence mechanisms of compression ratio and EGR rate on combustion and pollutant formation were investigated. The results indicate that increasing the compression ratio enhances the in-cylinder temperature and pressure at the end of the compression stroke, improves the atomization quality of diesel, promotes the mixing of fuel and air, advances the combustion phase, and expands the flame front area, thereby enhancing combustion completeness. However, a higher compression ratio exacerbates the oxygen concentration gradient during the diffusion combustion phase, accelerating the conversion of soot precursors into CO and leading to an increase in CO emissions. Meanwhile, the high-temperature and high-pressure environment intensifies the thermal NO<sub>x</sub> formation pathway, resulting in a significant rise in NO<sub>x</sub> emissions. An increase in the EGR rate reduces the in-cylinder peak pressure and temperature through the dilution effect, suppresses combustion intensity, and decreases thermal NO<sub>x</sub> formation. Nevertheless, the inert gases introduced by EGR shorten the spray penetration distance, increase the droplet diameter, and create locally fuel-rich regions. This leads to fragmented flame propagation paths, reduced combustion stability, increased residual unburned NH<sub>3</sub>, and higher CO and HC emissions. Additionally, a higher EGR rate significantly exacerbates soot generation, with its peak concentration showing a rapid upward trend as the EGR rate increases. This suggests that EGR regulation needs to balance the contradiction between the oxygen concentration suppression effect and the deterioration of mixture homogeneity.

**Key words:** Dual-fuel engine; Ammonia fuel; Combustion process; Greenhouse gas emissions; Injection strategy

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 柴油机排放法规.....	2
1.2.1 国内外排放法规标准及趋势.....	2
1.2.2 柴油机排放污染物控制技术.....	3
1.3 氨燃料燃烧技术研究动态.....	3
1.3.1 零碳氨替代燃料的优势和缺点.....	3
1.3.2 氨在发动机上的应用.....	4
1.3.3 氨燃料化学反应机理研究.....	6
1.4 本文的主要研究内容.....	6
第 2 章 氨/柴油双燃料发动机台架试验系统与燃烧仿真模型建立.....	9
2.1 氨/柴油双燃料发动机台架试验系统.....	9
2.2 氨/柴油双燃料发动机燃料性质和性能参数.....	11
2.2.1 燃料性质.....	11
2.2.2 发动机性能参数.....	11
2.3 氨/柴油双燃料发动机燃烧仿真模型建立与验证.....	13
2.3.1 CONVERGE 仿真平台介绍.....	13
2.3.2 模型搭建与网格划分.....	13
2.3.3 基本控制方程.....	14
2.3.4 喷雾模型.....	15
2.3.5 湍流模型.....	17
2.3.6 燃烧和排放模型.....	18
2.3.7 模型有效性验证.....	19
2.4 研究方案设计.....	20
2.5 本章小结.....	21
第 3 章 氨能比对氨/柴油双燃料发动机燃烧和排放特性影响的试验研究.....	22
3.1 不同负荷下氨能比对双燃料发动机燃烧特性的影响.....	22
3.1.1 氨能比对双燃料发动机缸压和放热率的影响.....	22
3.1.2 氨能比对双燃料发动机缸内温度的影响.....	24

3.1.3	氨能比对双燃料发动机燃烧阶段的影响 .....	25
3.1.4	氨能比对双燃料发动机 IMEP 和 $COV_{IMEP}$ 的影响 .....	26
3.2	不同负荷下氨能比对双燃料发动机排放特性的影响 .....	28
3.2.1	氨能比对双燃料发动机氮基排放物排放特性的影响 .....	28
3.2.2	氨能比对双燃料发动机碳基排放物排放特性的影响 .....	29
3.3	本章小结 .....	31
第 4 章	喷射策略对氨/柴油双燃料发动机燃烧和排放性能影响的试验研究 .....	33
4.1	高负荷下氨能比对氨/柴油双燃料发动机缸内燃烧和排放特性的影响 .....	33
4.1.1	氨能比对缸内燃烧特性的影响 .....	33
4.1.2	氨能比对常规排放的影响 .....	35
4.1.3	氨能比对未燃 $NH_3$ 与温室气体排放的影响 .....	37
4.1.4	氨能比对燃油经济性的影响 .....	38
4.2	高负荷下喷油压力对氨/柴油双燃料发动机缸内燃烧和排放特性的影响 .....	38
4.2.1	喷油压力对缸内燃烧特性的影响 .....	38
4.2.2	喷油压力对常规排放的影响 .....	40
4.2.3	喷油压力对未燃 $NH_3$ 与温室气体排放的影响 .....	41
4.2.4	喷油压力对燃油经济性的影响 .....	42
4.3	高负荷下喷油正时对氨/柴油双燃料发动机缸内燃烧和排放特性的影响 .....	43
4.3.1	喷油正时对缸内燃烧特性的影响 .....	43
4.3.2	喷油正时对常规排放的影响 .....	45
4.3.3	喷油正时对未燃 $NH_3$ 与温室气体排放的影响 .....	46
4.3.4	喷油正时对燃油经济性的影响 .....	46
4.4	本章小结 .....	47
第 5 章	氨/柴油双燃料发动机缸内燃烧和污染物生成特性仿真研究 .....	48
5.1	压缩比对氨/柴油双燃料发动机性能的影响 .....	48
5.1.1	压缩比对缸内燃烧过程的影响 .....	48
5.1.2	压缩比对不完全燃烧产物生成过程的影响 .....	51
5.1.3	压缩比对 $NO_x$ 和 Soot 生成过程的影响 .....	54
5.2	EGR 率对氨/柴油双燃料发动机性能的影响 .....	56
5.2.1	EGR 率对缸内燃烧过程的影响 .....	56
5.2.2	EGR 率对不完全燃烧产物生成过程的影响 .....	59
5.2.3	EGR 率对 $NO_x$ 和 Soot 生成过程的影响 .....	62
5.3	本章小结 .....	64
第 6 章	总结与展望 .....	66

6.1 全文总结.....	66
6.2 工作展望.....	67
参考文献.....	68
致 谢.....	74
作者简介.....	75

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

历经百余年的技术演进，内燃机已在工业制造、农业机械化、综合交通体系及国防装备等领域形成了完整的应用生态，其技术成熟度与系统可靠性达到历史性高度<sup>[1]</sup>。作为全球能源转换体系的核心组件，传统热机在驱动社会经济增长的同时，亦面临严峻的能源-环境双重挑战：我国内燃机年消耗石化燃料及润滑介质总量已突破石油消费总量的60%，且伴随动力需求增长，其排放的NO<sub>x</sub>、PM等污染物对大气环境形成持续性负荷，二氧化碳排放强度更直接加剧全球气候变暖进程<sup>[2]</sup>。尽管纯电驱动与氢燃料电池技术在轻型交通工具领域展现出替代潜力，但内燃机在混合动力总成、重载物流装备、远洋船舶推进、航空动力系统及分布式发电装置等场景仍具有不可替代的技术优势与市场惯性<sup>[3]</sup>。值得注意的是，我国能源结构呈现显著的“高碳锁定”特征——煤炭消费占比达56.8%，原油与天然气对外依存度分别攀升至72%与45%，单位GDP能耗较发达国家平均水平高出30%-50%，而风电、光伏等可再生能源占比不足15%<sup>[4]</sup>。这种结构性矛盾不仅制约能源安全战略实施，更导致内燃机技术升级面临碳排放约束与能源转型压力的双重夹击<sup>[5]</sup>。

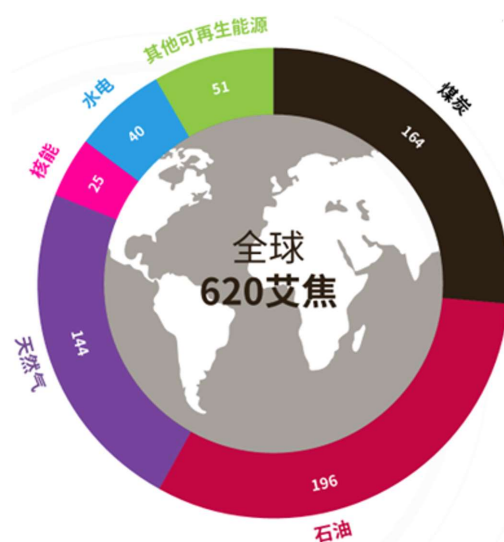


图 1-1 2024 年全球一次能源类别及消费量

Fig. 1-1 Global primary energy types and consumption in 2024

压燃式柴油机凭借其高热效率及优异的承载性能，已成为重型车辆和船用设备的动力标准<sup>[6]</sup>。然而，柴油燃料的使用不可避免地导致大规模温室气体排放，对生态环境构

成严峻挑战<sup>[7]</sup>。自 2016 年《巴黎协定》生效以来，全球范围内对减少温室气体排放展开了广泛讨论，欧盟已对重型车辆的排放实施严格限制<sup>[8]</sup>。鉴于 2020 年国际船舶仍有约 99% 依赖柴油动力<sup>[9]</sup>，采用零碳燃料替代柴油显然成为实现环保目标的有效策略<sup>[10]</sup>。

## 1.2 柴油机排放法规

### 1.2.1 国内外排放法规标准及趋势

我国柴油机排放控制技术正在经历从“跟随创新”到“自主突破”的战略转型。现行国六标准对 NO<sub>x</sub> 和颗粒物的限值已严于欧盟同期法规 30%，其中重型柴油机的 NO<sub>x</sub> 排放上限设定为 0.4 g/kWh，这相当于要求每消耗 1 度电当量的柴油，排放的有害气体不能超过半颗芝麻的重量<sup>[11]</sup>。为达到如此严苛的标准，发动机企业普遍采用“EGR+SCR+DPF”三重技术路线，通过废气再循环降低燃烧温度，配合催化还原和颗粒捕捉实现清洁排放。技术升级的背后是排放检测体系的革新<sup>[12]</sup>。

在内燃机领域，非道路移动机械的监管难度相较于机动车更为显著，且深受各国具体国情因素的制约。鉴于此，我国在非道路排放法规的制定及实施进程上，相较于发达国家展现出了一定的滞后性。通过借鉴欧盟的先进标准，并充分考虑我国的实际情况，我国逐步形成了具有中国特色的非道路移动机械排放法规体系，先后推出了第一阶段和第二阶段法规，其中对部分排放物的限制要求进行了合理调整与优化。随后，于 2014 年，我国迈入了该法规实施的第三阶段。历经八年的持续发展与技术进步，至 2022 年，《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法（中国第四阶段）》正式颁布并实施，标志着我国在非道路移动机械排放控制方面迈出了新的重要一步<sup>[13]</sup>。

面对排放法规的要求，我国独创的远程排放监控平台已接入超过 600 万台柴油车辆，通过 5G 网络实时监测排气管数据。当系统检测到某辆车 NO<sub>x</sub> 排放超标时，会自动限制发动机扭矩输出，这一技术使超标车辆处置响应时间从 7 天缩短至 8 小时。对于新型双燃料发动机，监管系统特别增设了氨逃逸监测模块，可精准捕捉百万分之一浓度的未燃氨气。尽管取得进展，清洁化转型仍面临现实挑战<sup>[14]</sup>。氨燃料的储运需要 -33℃ 低温环境，车载储罐成本比柴油油箱高 4-6 倍；双燃料发动机在低温启动时易出现“爆震”现象，潍柴动力的解决方案是通过分层喷射技术，将燃烧室内温度梯度控制在 200 °C/cm 以内<sup>[15]</sup>。值得关注的是，2024 年实施的《车用氨燃料技术规范》首次明确了氨/柴油混燃比例的安全阈值，为技术推广扫清了标准障碍<sup>[16]</sup>。未来排放法规或将引入“碳-氮协同管控”指标，这对双燃料技术既是机遇也是挑战。中科院热物理所的模拟计算表明，当氨能占比达到 30% 时，发动机全生命周期碳排放可降低 45%，但 NO<sub>x</sub> 排放会上升 12%。如何通过燃烧室结构优化破解这种矛盾，将成为下一代清洁柴油机的技术攻关重点。

值得注意的是，欧盟 Stage V 法规将颗粒物数量限值收紧，较前代标准降低两个数量级，并首次将 23 nm 以上超细颗粒纳入监管范畴。美国 EPA Tier 4 Final 法规通过动态负载系数修正，强化了瞬态工况下的 NO<sub>x</sub> 控制精度，其 0.026 g/kWh 的氮氧化物限值已成为行业基准<sup>[17]</sup>。因此，面对日益严格的国内外排放标准，必须积极应用柴油机排放污染物控制技术和现代化科技手段，满足清洁发动机发展和环境保护的要求。

## 1.2.2 柴油机排放污染物控制技术

为应对日益严格的排放法规，柴油机污染物控制技术经历了从机内净化到后处理系统的多维度发展，逐步形成“源头控制-过程优化-末端治理”的全链条技术体系。目前柴油机排放污染物控制技术的研究进展迅速，但仍然面临部分挑战。

### (1) 废气再循环 (EGR) 技术

EGR 通过将部分废气重新引入气缸，稀释氧气浓度并降低燃烧温度，从而抑制热力型 NO<sub>x</sub> 的生成。低温燃烧 (LTC) 模式结合高 EGR 率，可将缸内温度控制在 1600 K 以下，使 NO<sub>x</sub> 排放大幅降低。然而，EGR 的引入可能加剧颗粒物与未燃 HC 的生成，需通过燃油喷射策略优化（如多段喷射）平衡污染物间的竞争关系<sup>[18]</sup>。

### (2) 选择性催化还原 (SCR) 系统

SCR 技术利用尿素作为还原剂，在催化剂作用下将 NO<sub>x</sub> 转化为 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。钒基 (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>) 与铜基催化剂分别在高温与低温区间表现优异，NO<sub>x</sub> 转化效率可达 90% 以上。但 SCR 系统存在尿素结晶、低温活性不足及氨逃逸等问题。

### (3) 替代燃料应用

替代燃料应用需结合不同燃料特性与减排效果。生物柴油及费托柴油等含氧燃料通过优化燃烧过程，可降低颗粒物排放 30%-60%；天然气/液化石油气双燃料技术通过降低碳氢比抑制碳烟生成，但可能因高温燃烧导致 NO<sub>x</sub> 排放上升。NH<sub>3</sub> 作为零碳燃料，在船用发动机中可替代传统燃油，其燃烧产物仅为 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O，但需解决储运效率及低能量密度问题<sup>[19]</sup>。

## 1.3 氨燃料燃烧技术研究动态

### 1.3.1 零碳氨替代燃料的优势和缺点

氨分子呈现典型的三角锥几何构型，由中心氮原子与三个氢原子通过极性共价键结

合，并携带一对孤电子对<sup>[20]</sup>。该化合物在标准条件下表现为具有强烈刺激性气味的碱性气体。作为重要的化工原料，约 80%的工业合成氨被用于氮肥生产，其余 20%则广泛参与现代工业体系中的关键化学过程<sup>[21]</sup>。在工业应用领域，氨不仅是硝酸和纯碱生产的核心前驱体，更在聚合物合成中发挥不可替代的作用。纺织工业依赖氨作为尼龙、人造丝等合成纤维的必需原料，而橡胶工业则利用其抑制乳胶预凝的独特功能<sup>[22]</sup>。催化领域的研究证实，特定合成树脂的工业化生产需要氨作为高效催化剂。值得注意的是，氨基溶液在商业与民用场景呈现显著浓度差异——工业级溶液通常含 25%氨并具有强腐蚀性，而家用清洁剂仅含 5%-10%的稀释水溶液<sup>[23]</sup>。其挥发性特征使其泄漏时能快速向高空扩散。尽管其刺激性气味在 0.6-53 ppm 浓度范围即可被人体感知，职业安全规范仍强调需避免长期吸入暴露。这种自我警示特性与可控的环境行为特征，使其在工业应用中维持着相对可控的风险水平。

氨燃料在环保性能与储运特性方面展现出显著优势<sup>[24]</sup>。首先，其燃烧方式可完全避免二氧化碳、硫氧化物等有害气体生成，大幅净化空气质量<sup>[25]</sup>。其次，高达 130 以上的辛烷值使其能显著抑制汽油机爆震现象，提升燃烧组织效率，特别适用于高压缩比发动机<sup>[26]</sup>。再者，相较于氢燃料，氨在-33.34℃即可液化，储存条件更为便利，且具有更强的抗爆震性能<sup>[27]</sup>。然而，尽管具备这些优异特性，氨作为发动机燃料仍面临多重技术瓶颈：其低燃烧速率与火焰传播速度导致滞燃期延长，显著降低燃烧效率；较低的火焰速度与较长的淬熄距离会在燃烧间隙残留大量未燃燃料；此外，液氨蒸发过程吸收大量热量的特性，虽可有效调控燃烧室温度，但也增加了燃烧组织难度<sup>[28]</sup>。氨燃料固有的低化学反应活性与缓慢火焰传播速度，严重制约了其在压燃式发动机中的应用<sup>[29]</sup>。后续研究进一步揭示，氨燃料需在压缩比超过 35 时方可实现压燃<sup>[30]</sup>，为此 Gray 等提出引入柴油作为引燃燃料的方案，可将压缩比降至常规水平。Pearsall 等系统研究了不同十六烷值燃料对滞燃期及发动机性能的影响，其结果表明氨燃料具有最长的点火启动时间与最低的燃油经济性<sup>[31]</sup>。

### 1.3.2 氨在发动机上的应用

氨燃料在压燃式动力装置中的应用潜力源于其独特的自燃特性。研究证实，当作为二次燃料与柴油构成双燃料系统时，氨可通过降低混合气的自燃温度实现可靠点火。在典型压燃发动机平台的对比实验中，进气歧管氨喷射与缸内直喷柴油的耦合策略展现出显著替代效益：在 0.3 MPa 和 0.5 MPa 指示平均有效压力工况下，分别实现 10%和 15%的柴油替代率及对应碳减排效应。燃烧路径优化研究揭示了不同气态燃料的动力学差异。对比实验表明，在相同替代比例下，纯氢燃料系统展现出最优燃烧相位控制能力，其缸压曲线峰值较基准工况偏移角小于 2°CA。然而，未解离氨的引入会导致 0.5%的指示热

效率损失,这归因于  $\text{NH}_3$  裂解吸热反应对燃烧室热力学边界条件的扰动<sup>[32]</sup>。数值模拟进一步证实,集成余热回收装置的裂解氨系统可提升燃烧等容度 12%。

工程化适配方案已通过多缸涡轮增压发动机验证。该系统采用模块化设计理念,仅需在进气总管增设双级稳压腔即可实现氨燃料稳定供给,改造成本控制在原机价值的 4.2% 以内。液氨储罐与高压计量阀的协同控制策略,使氨喷射脉宽精度达到  $\pm 0.1$  ms 量级,成功匹配发动机瞬态工况需求。值得注意的是,在生物柴油-氨双燃料模式下,燃烧持续期缩短 18%,这为高替代率工况的爆震控制提供了新思路。

面对氨燃料的应用挑战,氨/柴油双燃料 (ADDF) 模式成为研究热点。该模式通过燃料协同作用突破单一燃料应用瓶颈,显著改善燃烧效率与能量利用<sup>[33,34]</sup>。现有研究表明,ADDF 燃烧模式在保持与传统燃料相当功率输出的同时,可降低  $\text{CO}_2$  排放,但会导致未燃碳氢化合物与  $\text{CO}$  排放增加。当氨能比低于 40% 时,虽能降低  $\text{NO}_x$  排放,却面临尾气氨残留升高的困境<sup>[35,36]</sup>。Niki 等<sup>[37]</sup>通过实验系统分析了不同负荷条件下氨能比变化对排放的影响规律,发现当氨能比从 0% 增至 30% 时,未燃氨与  $\text{N}_2\text{O}$  排放呈上升趋势,且发动机负荷增加时这两类排放物呈现意外下降现象,但受限于供氨装置流量限制,氨能比仅能达 30%<sup>[38]</sup>。Yousefi 等<sup>[39]</sup>在压缩比 16.25 的四冲程发动机上重点研究了氨能比与柴油喷射时序的耦合效应,发现提前柴油喷射可使温室气体与  $\text{N}_2\text{O}$  排放降低约 12%,但较低压缩比导致热效率仅 37.85%,最大氨能比为 40%。

氨燃料在内燃机中的高效利用面临燃烧控制的核心挑战,其高自燃温度和缓慢燃烧速度导致传统点火系统难以实现稳定燃烧<sup>[40]</sup>。针对该问题,学界已形成三条技术路径:高能点火技术通过等离子体活化将点火能量提升至 300 MJ 以上,使燃烧初始核心温度突破 2000 K;涡轮增压策略将进气压力提升至 0.35 MPa,配合冷却 EGR 系统实现压缩终温调控。燃料协同燃烧模式则通过引入高活性燃料构建双燃料系统,其中 Reitz 等<sup>[41]</sup>提出的反应控制压缩点火 (RCCI) 与 Zhang 等<sup>[42]</sup>提出的柴油喷射控制压缩点火 (JCCI) 技术展现出显著优势。RCCI 技术采用燃料活性梯度分层策略,在缸内建立柴油与氨气的浓度梯度分布。预混氨气通过进气歧管导入形成均质混合气,高反应活性柴油在压缩冲程后期经多孔喷嘴直喷形成局部富燃料区。JCCI 技术则通过时序控制优化实现燃烧相位精确调控:氨气在压缩冲程初期以 3 MPa 压力喷射形成预混基础,柴油引燃油束精准触发多点自燃。清华大学团队研究表明,喷射时序偏差超过  $\pm 1^\circ\text{CA}$  将导致燃烧不稳定性指数骤增至 5.8%,而优化后的时序控制可使  $\text{NO}_x$  排放降低。当前技术瓶颈集中在燃料供给系统适应性改造,液氨储存需维持 1.6 MPa 压力或  $-33^\circ\text{C}$  低温环境,导致储罐质量能量密度仅为柴油系统的 23%<sup>[43]</sup>。