

低活性氨燃料燃烧增强方法及研究进展

姜雪, 黄佐华*, 殷阁媛, 李倩倩, 张猛, 蔡骁, 武颖韬, 王金华, 胡二江, 张英佳, 汤成龙

西安交通大学, 绿色氢电全国重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: zhhuang@mail.xjtu.edu.cn

2025-08-23 收稿, 2025-11-25 修回, 2025-11-25 接受, 2025-11-26 网络版发表

国家自然科学基金(52488201, 52376124)资助

摘要 氨(NH_3)是有广泛应用前景的零碳燃料, 在实现“双碳”目标中将发挥重要作用. 但纯氨燃料燃烧时存在点火困难、火焰传播速度慢、燃烧极限窄和氮氧化物排放高等问题, 难以直接实现高效稳定燃烧. 掺混高活性组分是改善氨燃烧特性的有效新途径, 不仅能提升燃烧效率与稳定性, 也为氨燃料的规模化利用提供了方法和技术手段. 本文综述了氨掺混活性组分的燃烧增强方法在基础燃烧方面的研究进展, 包括着火延迟期、层流火焰传播特性及关键氧化物的生成规律. 研究表明, 引入活性组分可为反应体系提供丰富的H、O和OH等自由基, 加速链式反应进程, 从而显著提升层流燃烧速度. 即便少量活性组分添加, 也能大幅缩短氨的着火延迟期, 有效实现低活性燃料的燃烧增强. 此外, 氨掺混活性组分后, NO_x 的生成与演化过程和活性组分类型及反应条件密切相关, 呈现复杂非线性特征. 这些发现为优化掺混策略、开发高效燃烧技术及发展化学动力学模型提供了关键支撑. 掺混燃烧无需大幅改动现有设施, 是推进氨燃料工程化应用和低碳转型的有效路径. 实际工况复杂多变, 如何实现燃烧过程的动态调控和 NO_x 排放的精准控制, 是未来应用中亟待解决的问题. 氨燃料的大规模应用可助力构建绿色、可持续的能源体系.

关键词 氨, 活性组分, 燃烧调控, 基础燃烧, 化学反应动力学

1 氨燃料的应用与挑战

面对全球气候变化的挑战, 向低碳化和零碳化转型已成为能源发展的必然趋势. 在全球“碳中和”与我国“双碳”目标的驱动下, 中国、美国、欧盟、日本等纷纷颁布政策法规推动可再生能源与低碳燃料的应用, 其中氨、氢、电力合成燃料及生物质燃料因其具备零碳潜力、与基础设施兼容性及终端设备适配性, 成为能源转型的关键技术方向^[1,2]. 国际能源署(IEA)报告显示^[3], 预计2050年低碳燃料全球终端能源消费的占比将由现阶段的1%增至20%, 主要用于满足长距离交通运输和工业等场景的应用需求, 其中氢基能源(氢气和氨)在全球能源消费结构中的占比预计将达13%, 在能源转型中将发挥重要作用. 图1所示为氨燃料的制备、

燃料特性和应用.

氨是氢的低成本载体, 是全球产量最大的化工产品之一, 不仅可通过传统工艺规模化生产, 更能利用风能、太阳能等可再生能源实现绿色制备^[4], 近年来作为实现“氢经济”的纽带受到了广泛关注. 表1所示为氨燃料和其他典型燃料理化特性的对比. 氨本身无碳, 完全燃烧仅生成氮气和水. 氨的理论质量储氢密度高达17.6 wt%. 在20°C和8.6 bar条件下, 1立方米液氨可储存108公斤氢分子, 储氢能力不仅优于有机液体储氢材料, 更是达到一些先进储氢合金的4倍以上^[5]. 相较于氢气储运依赖高压气态(35~70 MPa)或超低温液态(-253°C)等高成本技术路线^[6], 氨的饱和蒸气压与丙烷相当, 大规模储存和运输方便, 大幅降低了氢能产业链的储运成本和技术门槛. 此外, 氨燃料的辛烷值远超常规汽油,

引用格式: 姜雪, 黄佐华, 殷阁媛, 等. 低活性氨燃料燃烧增强方法及研究进展. 科学通报, 2026, 71: 1688–1700

Jiang X, Huang Z, Yin G, et al. Methods on combustion enhancement for low active ammonia and its research progress (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1688–1700, doi: 10.1360/CSB-2025-5406

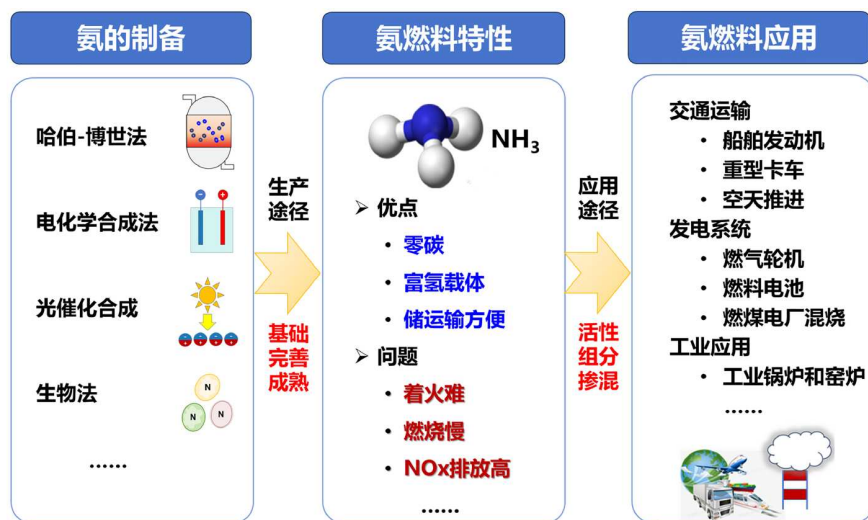


图 1 氨燃料的制备、特性和应用

Figure 1 Preparation, characteristics, and applications of ammonia fuel

表 1 氨、氢与典型碳氢燃料理化特性对比^{[8-14] a)}Table 1 Comparison of physical and chemical properties of ammonia, hydrogen, and typical hydrocarbon fuels^[8-14]

特性	氨	氢	乙醇	二甲醚	柴油	汽油
化学式	NH ₃	H ₂	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ OCH ₃	-	-
沸点(°C)	-33	-253	78	-25	>200	33~190
汽化潜热(kJ kg ⁻¹)	1370	445.6	840	467	270	305
体积能量密度(MJ m ⁻³)	11.2	8.4	21.3	18.5	36.3	33
最小点火能量(mJ)	8	0.02	0.65	0.2	-	0.2~0.3
层流燃烧速度(m s ⁻¹)	0.07	2.9	0.39	0.5	0.24	0.37~0.43
自燃温度(°C)	651	585	363	235	226~233	248~412
可燃极限(vol%)	15~28	4.1~74.8	3.3~19	3.4~18.6	0.6~6.5	1.3~7.1
燃料低热值(MJ kg ⁻¹)	18.5	120	26.9	27.6	42.5	44
燃料高热值(MJ kg ⁻¹)	22.5	141.9	29.7	31.7	44.8	47.3
辛烷值(ROD)	>111	≥120	107	-	-	92~98
十六烷值	-	-	-	>55	40~50	-

a) 表格中列出的特性参数, 均为各燃料在液态条件下的物性数据

具有很好的抗爆震性能, 使得氨燃料发动机可以在更高压缩比条件下稳定运行^[7], 为热效率提升提供了技术条件。

氨作为燃料应用可追溯至19世纪初期, 1822年氨首次被用作小型汽车的替代燃料^[15]。第二次世界大战时期, 由于能源极度短缺, 比利时政府将煤油与氨混合作为公共汽车的替代燃料^[16]。在20世纪60~80年代, 氨燃料还被用于空天动力, 美国X-15高超音速先采用氨作为推进剂^[17]。同期, 通用电气^[11]等多家企业相继开展氨燃料燃气轮机的研发工作, 推动了氨动力技术的发展。

氨作为单一燃料在动力装置中的应用面临三个关键性技术挑战: 一方面, 氨的化学反应活性低, 自发和强制点火都相对困难, 其最小点火能量是汽油的26~40倍。文献研究表明, 传统火花点火(SI)发动机在使用纯氨燃料时存在点火困难和循环变动大的问题, 而在压燃式(CI)发动机中, 由于氨的化学惰性导致难以实现可靠的压燃点火^[18-20]。另一方面, 氨的火焰传播速度慢, 室温常压下仅为6~7 cm s⁻¹, 约为常用碳氢燃料的1/5~1/7^[21], 火焰稳定性较差。文献研究指出^[22], 氨燃气轮机不仅点火困难, 稳定运行的当量比范围也狭窄, 为保证稳定燃烧, 需要降低流速以确保化学反应具备充

分的驻留时间,但伴随而来的是燃料混合不佳和燃烧效率降低。此外,由于化学结构含氮,即使在纯氧中燃烧也很难避免 NO_x 排放。文献研究指出^[23],氨母体燃料含氮会导致高 NO_x 排放,成为氨燃料商业应用需要解决的关键问题。由于上述氨燃料固有特性的制约,纯氨燃料在动力装置中的应用未能取得突破性进展。

近年来,燃烧调控技术的发展为氨燃料的高效利用提供了新的路径^[24],通过改变流场和浓度场的物理调控以及通过改变化学反应的化学调控都得到尝试。针对氨活性低的问题,化学调控更具潜力,可通过氨燃烧中引入活性组分(如氢气、碳氢燃料等)或改变化学反应氛围(温度、压力、当量比等),来调控反应体系的点火和燃烧性能。这些调控手段保障了氨燃料在动力装置中应用的可行性。一些文献研究基于单缸压燃式光学发动机,揭示了正庚烷、正十二烷等燃料对氨燃烧特性的调控机制^[25~27]。还有文献研究发现,添加15~20 wt%二乙醚(DEE)可使氨燃料自着火压缩比从35:1显著降至16:1^[28]。

表2所示为氨掺混不同活性组分的优势与局限性对比。直观上看,燃料掺混改变了可燃混合物组成,但是从基础燃烧角度上,活性组分添加对氨的协同作用体现出化学、热力学以及质热扩散的耦合作用。因此,燃烧调控中包含着一系列科学问题:如活性燃料添加后的燃烧特性将如何演变?燃料间是否存在交叉反应?不同燃料对自由基池累积、反应路径和污染物生成的影响?高活性组分添加对低活性燃料的燃烧促进作用研究不仅具有学术价值,也为低活性燃料的燃烧应用提供了可行的技术路径。相关研究促进了氨燃料燃烧学的发展,也为燃烧室优化设计、运行参数匹配及排放控制策略制定提供燃烧理论支撑。西安交通大学在活性组分掺混氨燃料的燃烧基础特性方面开展了系统性研究工作,本文基于西安交通大学在该领域的研究结合国内外代表性成果,论述了活性组分添加的氨混

合燃料的着火延迟期、层流燃烧速度及关键中间物种浓度的研究进展。

2 活性改进的氨掺混燃料的基础燃烧研究

2.1 着火延迟特性

着火延迟期是指燃料达到自着火条件到发生着火时刻的时间,本质上反映出燃烧过程的化学时间尺度特征。着火延迟期作为表征燃料燃烧特性的重要宏观参数,对燃烧室的设计优化和化学反应动力学模型的发展都十分关键。

20世纪60~80年代已有氨着火延迟期的实验研究^[29~31],但数据存在显著不确定性与重复性差的问题。这主要因为早期研究未充分考虑氨在不锈钢实验装置表面的吸附效应。由于着火延迟期实验通常在近似零维均质预混条件下进行,自着火过程由化学动力学主导,对初始浓度极为敏感,而氨在混气罐与反应器壁面的吸附会改变混合气的实际当量比,且吸附程度受配气组分、温度、湿度及壁面抛光度等多种因素影响^[32],从而导致实验偏差。通过壁面钝化处理,即在正式实验前使用氨气对燃烧器和混气罐进行多次冲洗,使壁面提前吸附饱和,可有效将浓度偏移控制在可接受范围内,显著提升实验数据的可靠性^[33,34]。

近年来,学者开展了氨燃料掺混氢气^[35~38]、烷烃^[39~41]、烯烃^[42]、醚类^[43,44]、醇类^[45,46]等多类型燃料的着火延迟特性研究。这些文献中研究使用快速压缩机和激波管实验装置,所覆盖的工况涵盖了中低温以及高温条件。氢气具有燃烧速度快、扩散性强和着火延迟期短等特性,与氨燃料形成了理想的燃烧特性互补。氨也是氢气的储存载体,通过催化可在线裂解制氢^[8],氨氢融合技术为实现零碳排放目标提供了可行方案。一些文献研究报道了氢气掺混对氨燃料着火延迟期的影响,揭示出掺氢的显著着火促进作用。在高温

表2 氨掺混不同活性组分的优势与局限性对比

Table 2 Comparison of advantages and limitations of ammonia blended with different reactive components

掺混组分	优势	局限性
氢气	燃烧改善显著,提高反应活性,拓宽可燃极限;改善燃烧效率,增强火焰稳定性;使用过程可实现零碳排放;氨可在线裂解制氢,即产即用解决氢气储运难题	体积能量密度低;可能加剧 NO_x 排放;氢安全问题;氢气储运成本高,氨在线裂解制氢需要额外能量,系统复杂
甲烷/天然气	掺混使用无需大幅改造设备,较低成本实现技术过渡,改善燃料的着火与燃烧性能	燃烧仍会产生碳排放,无法实现完全零碳;掺混比例较低时对氨燃烧的提升效果有限
其他碳氢燃料	掺混大分子碳氢燃料能量密度高;采用双燃料模式可确保燃烧稳定性	仍存在碳排放问题,复杂碳氢燃料与氨间C-N反应路径交互,可能生成更复杂的污染物

高压条件下(1.2~10 atm, 1600 K)^[37], 如图2所示, 研究发现仅添加5%氢气即可使氨-氢体系的着火延迟期显著缩短60%; 当氢气比例提升至30%时, 着火延迟期可进一步缩短到90%; 随着掺氢比例继续增加, 着火延迟促进效果趋于平缓, 即使氢气比例增至70%, 着火延迟期仅额外降低约5%。快速压缩机高压中低温条件下的试验也呈现出相同的影响规律^[38], 研究发现在当量比为0.5时, 5%氢气的添加使氨的着火延迟时间缩短达12倍, 但当氢气比例从5%增至10%时, 改善幅度明显减弱, 仅额外缩短2倍。在化学计量比条件下, 5%氢气掺混可使着火延迟时间缩短达28倍, 表明氢气添加的点火增强效果在较高的当量比下更为明显。即使在更低的掺混比例下氢气的促进作用仍然显著, 文献研究表明, 在40 bar压力条件下仅添加1%氢气即可将氨-氢体系的着火延迟期缩短至纯氨的1/3^[36]。这些研究结果揭示了氢气掺混比例与着火延迟改善效果之间呈现出的非线性特征, 是氨氢混合燃料工程应用时需要考虑的燃烧基础现象。

氨着火反应路径具有显著的温度依赖性特征^[47]。文献研究表明, 少量掺氢可显著缩短氨燃料着火延迟期, 但在高温和中低温条件下, 研究发现5%~10%的氢气掺混对氨燃料的主要着火反应路径没有明显影响; 当氢气掺混比例进一步提高时, 由于H、O等关键自由基浓度显著增加, 导致相关分支反应路径的占比发生变化^[37,38]。在高温条件下, 氨燃料的消耗以热解离和与H、O、OH等活性自由基主导的链式反应为主, 而在中低温区间, HO_2 、 H_2O_2 等过氧中间体的作用增强。具

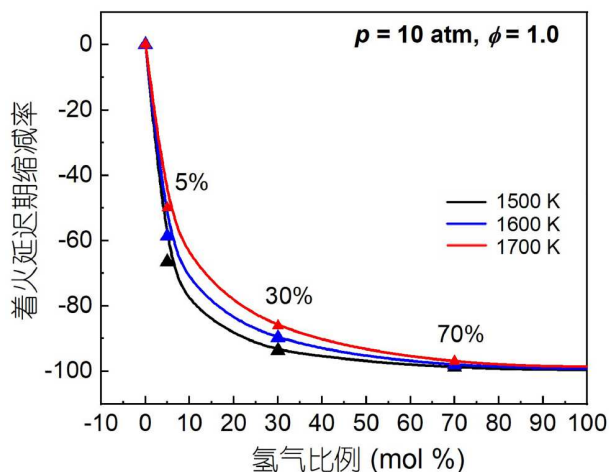


图2 氢气掺混对氨气着火延迟期的影响^[37]

Figure 2 Effect of hydrogen blending on the ignition delay times of ammonia^[37]

体而言^[43], 中低温下 NH_2 可与 HO_2 反应生成 H_2NO 与 OH ($\text{NH}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{NO} + \text{OH}$), H_2NO 进一步与 HO_2 反应生成 HNO 与 H_2O_2 ($\text{H}_2\text{NO} + \text{HO}_2 = \text{HNO} + \text{H}_2\text{O}_2$). H_2O_2 随后分解为两个 OH 自由基 ($\text{H}_2\text{O}_2 (+\text{M}) = 2\text{OH} (+\text{M})$), 显著提升 OH 浓度, 进而通过氢提取反应 ($\text{NH}_3 + \text{OH} = \text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$) 持续消耗 NH_3 , 并推动后续链式反应进程。

活性组分掺混对氨燃料着火延迟期的非线性动力学影响本质上反映出氨与活性组分在链激发、链传递、链分支和链终止等关键反应步骤的相互作用机制。研究发现, 高温条件下, $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ 是氨燃料着火的最敏感促进反应, 而 $\text{NH}_3 + \text{H} = \text{NH}_2 + \text{H}_2$ 则是竞争 H 自由基的最敏感着火抑制反应^[37]。掺入5%氢气后, 一方面, 链分支反应 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ 的促进作用增强, 另一方面, 氢气的引入改变了反应体系的化学平衡, 促使着火抑制反应在初始阶段(约1%燃料消耗)沿逆向进行, 生成的活性 H 自由基变为促进着火反应^[37]。在高压中低温下^[38], 对于纯氨点火促进最重要的反应是 $\text{H}_2\text{NO} + \text{O}_2 = \text{HNO} + \text{HO}_2$, $\text{NH}_2 + \text{NO} = \text{NNH} + \text{OH}$ 等, 最敏感的抑制反应是终止步 $\text{NH}_2 + \text{NO} = \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ 和 $\text{NH}_2 + \text{NO}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2\text{O}$ 。氢气添加后, $\text{H} + \text{O}_2(+\text{M}) = \text{HO}_2(+\text{M})$ 表现出很高的着火促进敏感性, 当10%氢气添加后, 着火前 H_2O_2 和 HO_2 的积累量约为纯氨着火时的10倍, 这使得自由基池(特别是 OH)更快地积累, 显著缩短了着火延迟期。

研究表明, 氨与碳氢燃料, 如二甲醚^[43]、甲醇^[45]、乙醇^[48]、乙烷^[49]等掺混后, 着火延迟期也呈现出非线性变化趋势。以二甲醚为例, 研究发现在1250 K、10 atm、化学计量比 $\phi = 1.0$ 时, 添加5%的二甲醚后着火延迟期可以缩短83%。此时, OH 自由基生成路径 $\text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}$ 得到促进, 同时反应 $\text{CH}_3 + \text{NH}_3 = \text{CH}_4 + \text{NH}_2$ 加速氨消耗。但当二甲醚比例增至25%~50%时, 甲基浓度升高导致链终止反应 $2\text{CH}_3(+\text{M}) = \text{C}_2\text{H}_6(+\text{M})$ 作用增强, 削弱了着火促进效果。由于C-H键的键解离能低于N-H键, 二甲醚迅速被消耗, 在中低温NTC区域, 加速了自由基池的发展^[43]。相关研究为活性组分助燃反应机理的认识和技术应用提供了支撑。

2.2 层流燃烧特性

层流燃烧速度(S_L)也是表征燃料基础燃烧特性的关键宏观参数, 体现出燃料化学动力学特性与输运特性的耦合作用。该参数不仅与燃烧室内的火焰稳定性和燃烧效率相关, 同时也是评估化学动力学模型的基础。

准指标. 通过实验手段测定层流燃烧速度, 并结合化学动力学理论进行深入剖析, 能够明晰燃料的燃烧机理, 为发动机燃烧系统的优化设计提供支撑.

图3总结了文献中氨燃料层流燃烧速度的实验数据. 如图3(a)和(b)所示, 无论是在空气还是富氧环境中, S_L 随当量比均呈非单调变化, 并在当量比1.1附近达到峰值. 在当量比略高于1的条件下, 体系绝热火焰温度更高, 加速了链分支反应^[54]. 此外, 由图3还可以看出, 氨燃料的层流燃烧速度表现出显著的温度和压力依赖性: 随着初始温度的升高或压力的降低, 燃烧速度呈现单调递增趋势, 温度升高对化学反应速率和物质输运过程都起到促进作用. 根据反应级数理论, 层流燃烧速度与压力之间存在 $S_L \propto P^{\frac{n-2}{2}}$ 的关系, 由于总反应级数通常小于2, 因此层流燃烧速度一般随压力升高而降低, 即与压力成反比关系^[54].

图4给出了化学动力学模型预测的氨燃料在氨/空

气火焰中的氧化路径^[51,55,56]. 尽管不同模型在反应速率的选取上存在差异, 但对于氨燃料反应的主要路径预测呈现出良好的一致性. 总的来说, 氨首先通过与H、O和OH等活性自由基的提取反应生成关键中间体 NH_2 , 随后进一步氧化为NH组分. NH的消耗呈现出四条竞争性反应通道, 分别生成 N_2H_2 、HNO、N和 N_2O 中间产物. 可以看出, 作为关键氮氧化物排放指标的NO和 N_2O 均出现在氨氧化的主要反应路径上. 这些中间产物可通过后续反应进行转化, 部分可参与其他反应路径被消耗, 部分转化为 N_2 . 然而, 若NO和 N_2O 未能通过上述途径被充分转化, 则将以有害污染物的形式存留在排放中. 这体现出优化燃烧条件对控制氨燃料氮氧化物排放的重要性.

为改善纯氨燃料燃烧速度慢的问题, 文献^[51,55,57,58]报道了氨燃料与多种类型燃料掺混后的燃烧特性变化规律, 这些研究通过测定不同掺混比例

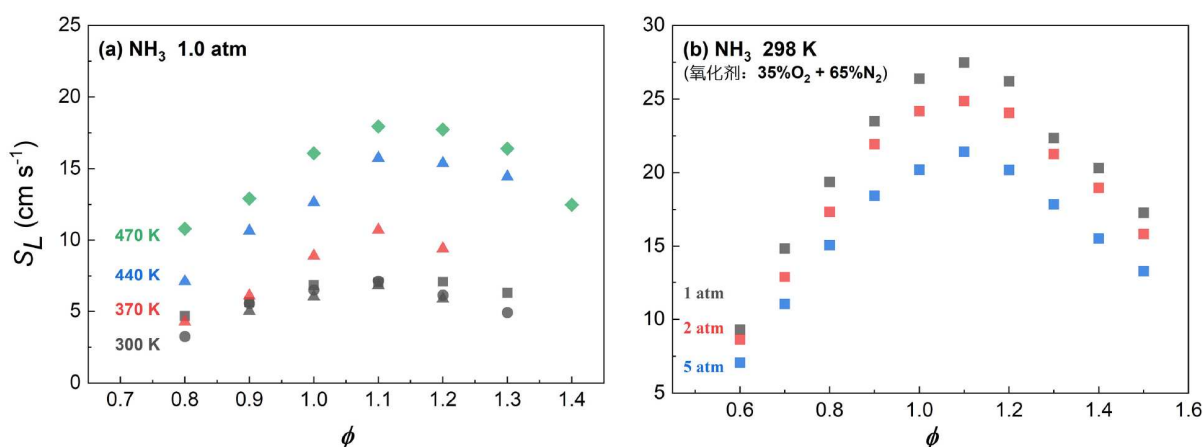


图3 不同温度、压力下纯氨的层流燃烧速度(S_L)实验数据^[21,50-53]. (a) 1.0 atm压力下氨在空气环境中的燃烧速度; (b) 298 K温度下氨在富氧环境中的燃烧速度

Figure 3 Laminar burning velocity (S_L) of pure ammonia at different temperatures and pressures^[21,50-53]. (a) S_L of NH_3 in air environment at pressure of 1.0 atm; (b) S_L of NH_3 in oxygen-rich environment at temperature of 298 K

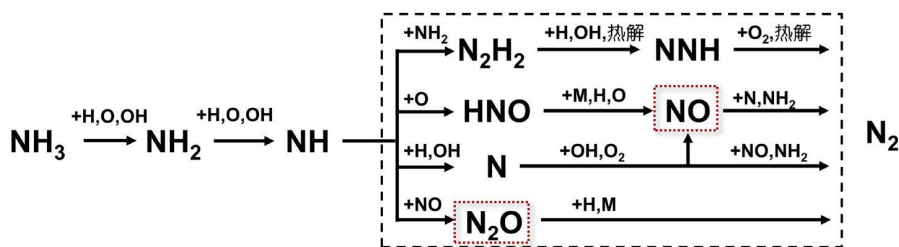


图4 氨/空气火焰中的氨燃料主要反应路径(初始温度300 K, 初始压力1.0 atm, 当量比1.0)

Figure 4 Main reaction pathway of ammonia fuel in ammonia/air flame (initial temperature of 300 K, initial pressure of 1.0 atm, equivalence ratio of 1.0)

下的层流燃烧速度,揭示了掺混燃料类型、比例与燃烧特性之间的关系,为氨掺混燃料的工程应用提供了重要的实验依据和理论指导.文献研究表明,乙烯作为活性燃料可有效提升氨燃料的燃烧速度^[51].此外,氨/空气火焰易受浮力效应影响,表现为球形火核变形和火焰中心上移现象,而提高初始温度或增加乙烯掺混比例可有效抑制这种浮力不稳定性.但过高的掺混比会减小火焰厚度并增大密度比,从而加剧流体动力学不稳定性,因此在设计氨混合燃料掺混策略时需要权衡考虑火焰燃烧稳定性的影响.

文献研究比较了不同分子量燃料掺混(氢气、合成气、甲烷、乙烷、丙烷、二甲醚、乙烯)对氨层流火焰速度的促进作用^[55,57,58].当氢气、合成气等较小分子量的燃料与氨掺混后,层流燃烧速度随掺混比的增加呈现出初期增长缓慢,后期快速加速的非线性趋势.这一变化趋势可划分为三个特征区域:掺混比 $\leq 40\%$ 时为氨主导区,此时由于掺混燃料比例较低,燃烧主要受氨的化学反应影响,因此层流燃烧速度对活性燃料掺混比例的变化敏感度较低.当掺混比介于 $40\% \sim 80\%$ 之间时为过渡区,此时燃烧过程由氨主导向活性燃料主导逐步转变.在此区域内,层流燃烧速度随活性燃料比例的增加呈加速上升趋势.掺混比 $\geq 80\%$ 时为活性燃料主导区,燃烧由氢或合成气等活性燃料的化学反应主导,火焰速度随掺混比例增加急剧上升.

当乙烷、丙烷、二甲醚等较大分子量的燃料与氨掺混时,其层流燃烧速度的变化规律与掺混小分子量燃料有所不同.如图5所示,在掺混比 $\leq 40\% \sim 50\%$ 时,层流燃烧速度随活性组分加入而迅速提高;但继续增加掺混比例,层流燃烧速度的增长趋于平缓.总的来说,较小分子量的燃料(如氢气、合成气)和较大分子量的燃料(如乙烷、丙烷、二甲醚、乙醚)与氨掺混后层流燃烧速度随掺混比的变化趋势有所不同.

上述差异主要源于不同掺混燃料对绝热火焰温度与自由基生成的影响有所不同.研究表明,较大分子量的碳氢燃料与氨掺混后,绝热火焰温度在少量掺混后迅速上升,随后随掺混比进一步增加增长趋势变缓;而氢气和合成气掺混后绝热火焰温度则随掺混比呈近似线性的增长^[55,57].掺混后层流燃烧速度的变化趋势与绝热火焰温度非常一致.作为影响层流燃烧速度的关键因素,绝热火焰温度的升高不仅能够激活部分高能垒反应,也显著加速了基元反应速率,从而促进火焰传播.因此绝热火焰温度越高,层流燃烧速度通常越

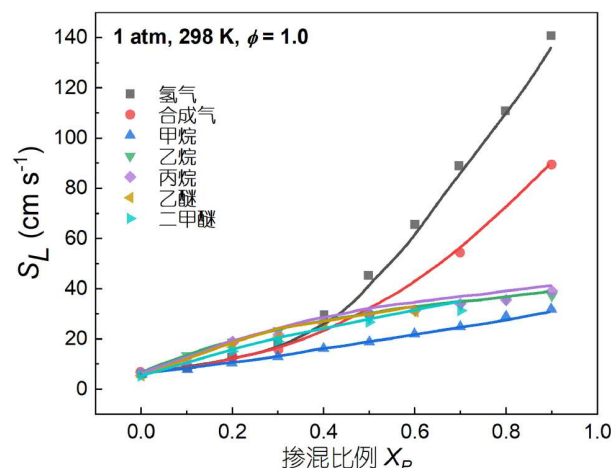


图5 氨层流燃烧速度随掺混活性燃料比例(掺混合成气、二甲醚、乙醚、氢气、合成气、甲烷、乙烷、丙烷)的变化规律^[55,57,58]

Figure 5 Effect of fuel blending (blending with syngas, dimethyl ether, diethyl ether, hydrogen, syngas, methane, ethane, and propane) on the laminar burning velocity of pure ammonia^[55,57,58]

快^[54].在自由基生成方面, $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ 火焰中H自由基的峰值摩尔分数显著高于 NH_3/H_2 火焰^[57].这两个反应体系在H生成路径上均以 $\text{O} + \text{H}_2 = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ 为主要贡献反应.不同的是, $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ 火焰中H生成路径更为多样,其中含C物种(如 CH_3 、 HCO 、 CO 和 C_3H_6)的相关反应对H生成具有重要贡献,典型路径包括 $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$ 和 $\text{HCO} + \text{M} = \text{CO} + \text{H}$.此外,由于大分子碳氢燃料的C-H键能较低且分子中C-H键数量较多,在较低掺混比下更易裂解生成H自由基,因而能够在少量掺混时就显著提升层流燃烧速度^[55].氨掺混甲烷后的层流燃烧速度变化规律与其他长链碳氢燃料不同,氨/甲烷的层流燃烧速度随甲烷掺混比例的增加呈现近似线性的增长趋势,并且明显低于掺混其他烷烃.这主要是因为甲烷C-H键键能较高,需要较高的活化能,因此火焰传播促进效果较弱.另外甲烷分子结构的高度对称性使其自由基生成路径相对单一,提供的促进燃烧的活性自由基浓度相对较低^[57].

文献研究表明,氨掺混燃料的层流燃烧速度与预混火焰反应区中H和OH自由基的峰值浓度呈现出正相关性^[55,57,58].图6所示为氨掺混氢气、合成气以及 $\text{C}_1 \sim \text{C}_3$ 烷烃在不同掺混比和当量比下的层流燃烧速度变化规律,可以看到掺混不同燃料组分后的层流燃烧速度均与(H+OH)峰值摩尔分数间存在线性关系.在层流燃烧的高温反应中,H与OH自由基主要通过 H_2/O_2 链分支循环($\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$, $\text{O} + \text{H}_2 = \text{H} + \text{OH}$, $\text{OH} + \text{H}_2$

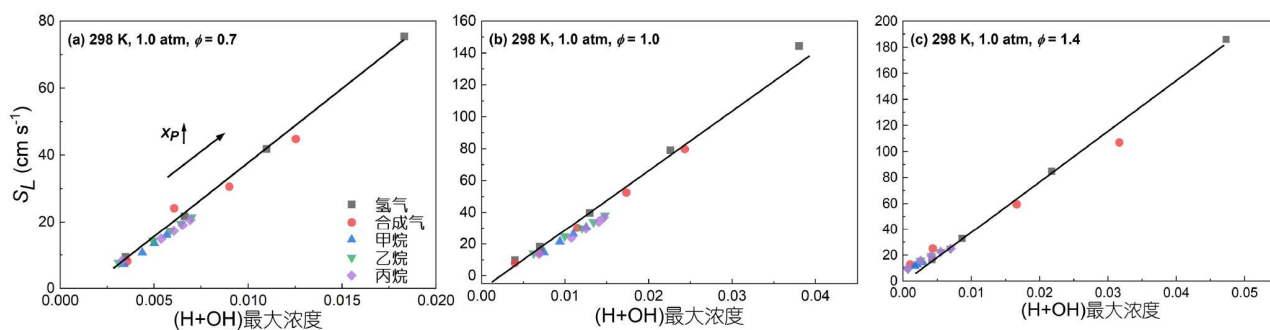


图6 层流燃烧速度随H+OH自由基最大浓度的变化规律^[55,57,58]. (a) 当量比0.7; (b) 当量比1.0; (c) 当量比1.4
Figure 6 Relationship between laminar burning velocity and maximum concentration of H+OH radicals^[55,57,58]. (a) Equivalence ratio of 0.7; (b) equivalence ratio of 1.0; (c) equivalence ratio of 1.4

= H + H₂O)快速转化提升自由基池浓度,是影响层流燃烧速率的重要化学动力学因素^[54]. H和OH自由基的浓度变化是调控各类活性燃料添加剂(包括氢气、合成气及C₁-C₃烷烃)对层流速度影响的关键共性机制,这种线性关联关系表明了H和OH自由基作为关键活性中间体在促进燃烧反应中的主导作用,其浓度变化直接影响链式反应速率,进而影响燃烧速度.

文献研究表明,碳氢燃料掺混后会影响到氨的氧化路径,存在C-N交叉反应^[55,57,58].图7所示为常温常压下添加二甲醚对氨氧化路径的影响^[58],在纯氨燃烧体系中,NH₃主要通过氢提取反应路径生成的NH₂,再继续进行氢提取反应转化为NH.在此过程中,NH中间体更倾向于通过氢提取反应生成N原子,而非与氧原子直接反应.在氨/二甲醚混合燃烧体系中,二甲醚分解使活性自由基浓度显著提高,加速了氨的氧化过程.与此同时,二甲醚的引入重构了NH₂的消耗路径,主要通过以下机制影响反应动力学.首先,出现C-N交叉反应主导新路径NH₂ + CH₂O = NH₃(占比39.2%),形成氮循环路径;也出现了NH₂ + CH₃ = CH₃NH₂的新反应通道.此外,NO生成机制发生转变,其中NH₂→HNO→NO路径占比较纯氨体系由6.01%提升至20.4%;NH直接氧化路径(NH + O = NO+H)占比从0%增加到20%,增加了燃料型NO的生成量.总的来说,碳氢燃料的引入通过多重机制改变了氨燃烧特性:一方面通过C-N交叉反应增加新的氨转化路径;另一方面通过增强自由基池,影响氨的氧化动力学过程.不仅可提高氨燃料氧化反应的速率,还可能改变关键基元反应分支比,调控NO_x的生成特性.在氨燃烧调控应用中,深入理解燃料间交互反应机制对实现燃烧效率与排放特性协同优化非常重要.

文献开展了氨三元掺混燃料层流燃烧特性的研究,通过调控三元混合燃料的组分比例,可在保持与传统燃料相当的燃烧特性的同时,显著降低碳排放^[59].研究表明^[60],随着氢气或甲烷掺混比例的增加,H₂/CH₄/NH₃三元混合燃料层流燃烧速度呈现非线性增长趋势.在富燃条件下,发现当氧浓度从21%提升至45%时,燃烧速度显著增加约4倍,同时绝热火焰温度上升550 K.富氧条件通过以下途径增强燃烧反应性:(1)显著提高绝热火焰温度;(2)增加关键自由基(OH、NH₂和CH₃等)浓度.研究还量化了燃料组分替代规律,为维持

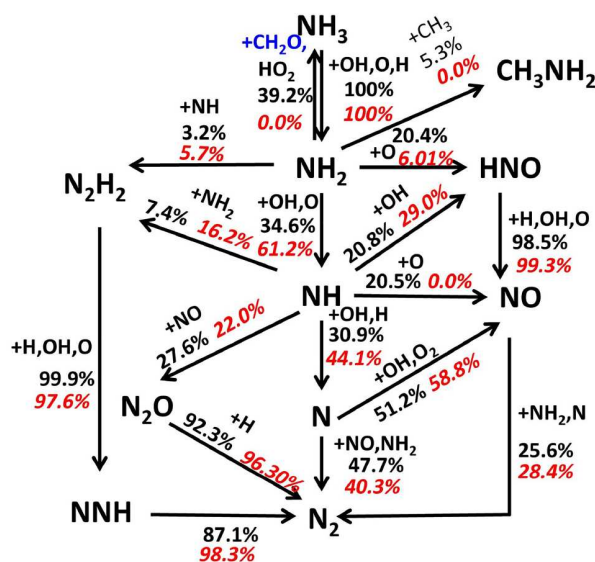


图7 氨/二甲醚/空气(黑色)和氨/空气(红色)的反应路径(初始温度298 K,初始压力1.0 atm,当量比1.0)^[58]
Figure 7 Reaction pathways of ammonia of ammonia/dimethyl ether/air (black) and ammonia/air (red) mixtures (initial temperature of 298 K, initial pressure of 1.0 atm, equivalence ratio of 1.0)^[58]

28 cm s^{-1} 的恒定燃烧速度,当甲烷占比从79%降至0时,需将氢气比例从0提升至40%,同时氨气占比从21%增至56%,这一非线性替代关系为实际应用中优化燃料配比提供了依据.文献研究发现^[61],氢/氨/甲烷三元燃料的其最大层流燃烧速度出现在富燃条件(当量比1.2附近),这一特性与纯甲烷、纯氨燃料最大层流燃烧速度出现在当量比1.1附近有所不同.这是由于氢气的最大层流燃烧速度出现在当量比1.8附近的富燃料区^[62],氢气分子小、扩散系数大,即使在高当量比下仍能维持良好的混合与火焰传播.在氢气掺入后,氢/氨/甲烷混合体系的燃烧速度最大值也相应偏移至更高当量比区域.在富燃工况下,氢/氨/甲烷混合燃料不仅能达到较高的燃烧速度,同时可使 NO_x 排放量较贫燃和化学计量工况降低,为工程应用中平衡燃烧速度和 NO_x 排放提供了优化途径.

2.3 物种氧化特性

氧化物浓度分布是表征燃烧过程中关键中间产物的生成演化特性的微观基础数据,揭示燃烧过程中间产物、污染物的演变机制,也是学反应动力学模验证的重要基准数据.相关研究可以为清洁燃烧技术的开发提供重要的理论基础.

图8所示为1 atm、800~1280 K及当量比0.25~1.0条件下,氨/氢气掺混燃料的氧化特性文献研究^[63],研究结果表明,提高氢气掺混比例能显著增强氨的氧化反应活性,具体表现为反应起始温度降低及 NO_x 产物摩尔分数升高.如图8(a)和(b)所示, H_2 的摩尔分数随其掺混比例的提高而增加.在低温阶段,由于反应尚未启动, H_2 浓度基本保持稳定;随着温度升高, H_2 作为反应物被持续消耗,浓度逐渐下降. N_2 作为 NH_3 氧化的最终产物,其生成量随温度升高而增加,并在 NH_3 消耗完全后趋于稳定.提高掺氢比例可有效增强体系的整体反应活性,使 N_2 的生成起始温度向低温区移动.

研究还发现,掺氢会影响 N_2O 与NO生成路径和消耗路径.在纯氨氧化过程中, N_2O 的生成主要源于反应 $\text{NH}_2 + \text{NO}_2 = \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$;掺氢后,反应 $\text{NH} + \text{NO} = \text{N}_2\text{O} + \text{H}$ 的贡献显著提升,导致 N_2O 浓度峰值增大^[63].此外, H_2 的加入降低了 NH_3 氧化的起始温度,并丰富了自由基池的浓度,促使 N_2O 更早开始生成,表现为其浓度峰值向低温区移动,如图8(c)和(d)所示.对于NO,研究发现NO的生成量随着掺氢比增加而增加,这主要是由于掺氢引入的活性自由基(H、O、OH、 HO_2)改变了氨

生成与消耗(DeNO_x)路径间的竞争关系^[64].掺氢后消耗NO的关键 DeNO_x 反应(如 $\text{NH}_2 + \text{NO} = \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}_2 + \text{NO} = \text{NNH} + \text{OH}$)受到抑制,而生成NO的氧化路径被促进.

文献实验研究还揭示了压力对氨氧化特性影响^[65].研究结果表明,压力的升高会显著降低氨氧化反应的起始温度,当压力从0.1 MPa增加到5.0 MPa,起始氧化温度降低150 K,同时使NO和 N_2O 的生成温度区间向低温方向移动,峰值浓度显著增加.化学动力学分析发现^[65], HO_2 自由基浓度是导致低压与高压条件下反应性差异的关键因素.低压条件下,反应 $\text{H} + \text{O}_2(+\text{M}) = \text{HO}_2(+\text{M})$ 抑制了 NH_3 消耗;在高压条件下, HO_2 通过反应 $\text{NH}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{NO} + \text{OH}$ 促进氧化,该反应消耗 NH_2 生成OH自由基提高了反应活性.

最近,关于氨与碳氢燃料掺混燃烧的研究取得了系列进展.一些文献开展了氨/甲醇混合燃料高压氧化特性研究^[66,67].研究发现,当量比对 NH_3 和 CH_3OH 的初始反应温度影响很小,甲醇的掺入使得起始氧化温度从纯氨的1000 K显著降低至约750 K^[67].甲醇通过 $\text{CH}_3\text{OH} + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{CH}_2\text{OH}$ 反应路径提高了OH自由基的生成速率,在高压条件下 HO_2 自由基的浓度是调控整体反应活性的关键因素.该研究还发现,NO和 N_2O 的浓度随温度变化呈现非单调性特征,在中温区段表现出明显的此消彼长关系.分析表明, H_2NO 是在NO生成过程中重要的反应中间体,可作为链载体促进 NH_2 向NO的转化.文献研究还报道了二甲醚对氨氧化特性的影响,发现二甲醚掺混可促进基元反应 $\text{CH}_3 + \text{NO}_2 = \text{CH}_3\text{O} + \text{NO}$ 和 $\text{HNO} + \text{O}_2 = \text{NO} + \text{HO}_2$ 等,加速 HO_2 、NO和OH生成从而促进氨的消耗^[68].对于氨/乙醇掺混燃料,文献^[69]研究表明,乙醇与氨掺混可显著降低反应体系的活化能,其中 HO_2 、HNO、NO和OH等活性物种在氧化过程中起着关键作用.文献研究发现,氨/甲醇和氨/合成气体系呈现出不同的影响效应,甲醇在低温区对氨氧化的促进作用更为显著,而合成气则在高温区表现出更强的促进效果^[70].该研究还发现,甲醇掺混使NO生成温度降低约50 K,且在较高掺混比例下,氨/甲醇体系的NO浓度随温度呈现非单调变化,而氨/合成气体系则NO浓度保持单调递增趋势.此外,由于合成气中的 H_2 会通过 $\text{N}_2\text{O} + \text{H}_2 = \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 反应消耗 N_2O ,导致氨/甲醇体系的 N_2O 峰值浓度显著高于氨/合成气体系.这些发现为理解氨基混合燃料的复杂反应机制提供了重要依据.

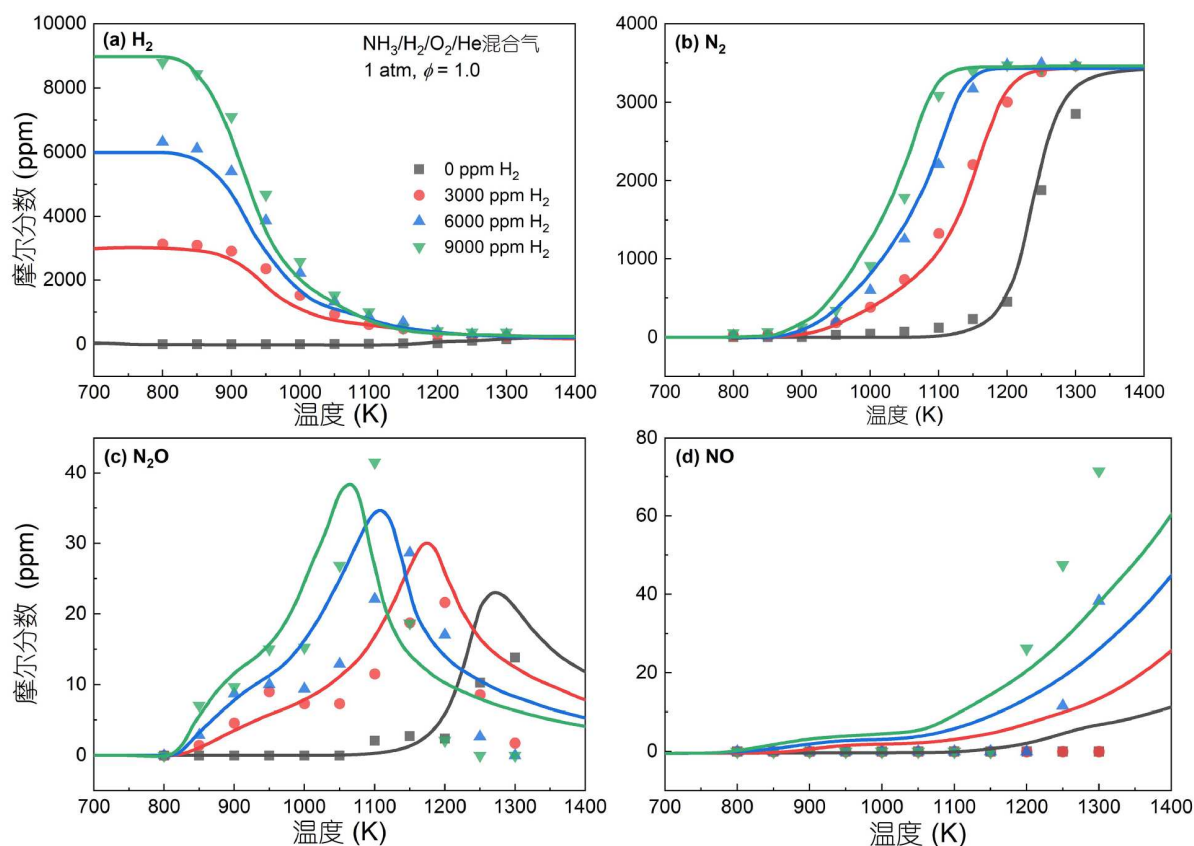


图8 氨/氢混合物氧化关键组分摩尔分数(压力1.0 atm, 当量比1.0)^[63]. (a) H_2 ; (b) N_2 ; (c) N_2O ; (d) NO

Figure 8 Mole fraction of main products during oxidation of ammonia/hydrogen mixture (pressure of 1.0 atm, equivalence ratio of 1.0)^[63]. (a) H_2 ; (b) N_2 ; (c) N_2O ; (d) NO

3 总结与展望

在“双碳”目标指导下, 零碳燃料氨得到越来越多的关注和研究. 针对氨燃料在实际应用中仍面临化学活性低和 NO_x 排放高的双重挑战, 通过掺混高活性组分, 可显著改善氨的燃烧性能, 是氨燃料高效利用可行技术途径. 本文系统总结了相关研究进展, 主要结论如下:

(1) 氢气和高活性碳氢燃料的掺混对氨燃料着火延迟期均呈现出非线性促进作用效果, 添加少量活性组分即可显著缩短着火延迟期. 虽然不同温度和活性组分通过不同反应路径发挥作用, 但其共同机制在于促进了活性自由基池(如 H 、 O 、 OH)的积累, 从而加速了链式反应的进行.

(2) 不同分子量燃料与氨掺混后呈现不同的层流燃烧速度, 小分子燃料(如氢气、合成气)掺混时, 层流燃烧速度随掺混比增加呈现初期缓慢增加、后期快速

增加的非线性规律; 大分子碳氢燃料则表现出相反的规律; 氨/甲烷掺混燃料的层流燃烧速度随甲烷掺混比例呈线性增加规律. 掺混燃料的层流燃烧速度均与 $(\text{H}+\text{OH})$ 峰值摩尔分数呈显著线性相关, 活性组分掺混后自由基浓度提升加速了层流燃烧速度增加的内在机制.

(3) 活性组分掺混和压力升高会显著降低氨氧化起始温度, 促使 NO 和 N_2O 的生成温度区间向低温方向偏移, 同时显著提高其峰值浓度. 在 NO_x 生成机制方面, 活性组分掺混同时存在稀释效应和化学效应: 稀释效应可减少燃料 NO_x 生成; 化学效应则通过增加自由基浓度影响 NO 和 N_2O 生成. 最终 NO_x 产率取决于这两种效应的竞争结果, 这解释了不同掺混条件下 NO_x 变化趋势的复杂性.

(4) 研究表明, 提高氨等反应活性低的燃料燃烧性能, 活性组分介入是一种非常有效的燃烧调控方法, 少量活性组分介入就可实现对燃烧性能的调控.

(5) 对于低活性燃料燃烧, 化学调控效果比物理调

控效果更为显著,在化学调控基础上结合物理调控对伴随流动的燃烧动力装置燃用低活性燃料燃烧调控可实现更好的调控效果。

目前,氨燃料的大范围工程化应用仍面临若干技术问题亟待突破。通过掺混改善燃料活性虽有效,但实际应用中动态调控混合比例与燃烧控制仍具有挑战。另外,实际复杂工况下氮氧化物的生成控制难度较高。“绿氨”是实现氢能全生命周期零碳应用的重要路径,但仍存在规模化生产成本高的问题。氨燃料的应用呈现出多技术路径发展的特点。一方面,将氨与传统化石燃料或低碳燃料进行混燃,是实现其规模化应用的可

行路径之一,也是在现有基础设施上实现低碳转型的有效手段。例如,在燃煤、燃气电站中掺烧氨燃料,能够充分利用现有设备,以较低成本实现碳减排。另一方面,推动氨燃料高效清洁应用还需要燃烧技术与燃烧装置的协同创新。例如,采用分级燃烧技术通过分阶段供给燃料与氧化剂,实现对反应区域的精准调控,可在稳定火焰的同时降低氮氧化物排放;采用催化燃烧、富氧燃烧、MILD燃烧等先进技术,也能够有效提升燃烧效率并抑制污染物生成。氨不仅是零碳替代燃料,更是绿色能源载体,在未来可持续能源系统中将发挥关键作用。

参考文献

- 1 Kurata O, Iki N, Matsunuma T, et al. Performances and emission characteristics of NH_3 -air and NH_3CH_4 -air combustion gas-turbine power generations. *Proc Combust Institute*, 2017, 36: 3351–3359
- 2 Ryu K, Zacharakis-Jutz G E, Kong S C. Effects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-ignition engine. *Appl Energy*, 2014, 116: 206–215
- 3 Bouckaert S, Pales A F, McGlade C, et al. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector. Technical Report, International Energy Agency, 2021
- 4 Feng X F. Methanol, Ammonia and New Energy Economy (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2010 [冯向法. 甲醇-氨和新能源经济: 甲醇-氨和新能源经济. 北京: 化学工业出版社, 2010]
- 5 Nozari H, Karabeyoğlu A. Numerical study of combustion characteristics of ammonia as a renewable fuel and establishment of reduced reaction mechanisms. *Fuel*, 2015, 159: 223–233
- 6 Ahmed A, Al-Amin A Q, Ambrose A F, et al. Hydrogen fuel and transport system: a sustainable and environmental future. *Int J Hydrogen Energy*, 2016, 41: 1369–1380
- 7 Ding Y, Han D, Huang Z. Research progress on combustion technology of ammonia-fueled automotive engines (in Chinese). *Chin J Automot Eng*, 2023, 13: 437–443 [丁颖, 韩东, 黄震. 氨燃料汽车发动机燃烧技术研究进展. 汽车工程学报, 2023, 13: 437–443]
- 8 Lesmana H, Zhang Z, Li X, et al. NH_3 as a transport fuel in internal combustion engines: a technical review. *J Energy Resour Tech*, 2019, 141: 070703
- 9 Zamfirescu C, Dincer I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications. *Fuel Processing Tech*, 2009, 90: 729–737
- 10 Cornelius W, Huellmantel L W, Mitchell H R. Ammonia as an engine fuel. In: SAE Technical Papers Collection. Warrendale: SAE International, 1966. 300–326
- 11 Verkamp F J, Hardin M C, Williams J R. Ammonia combustion properties and performance in gas-turbine burners. *Symposium (Int) Combust*, 1967, 11: 985–992
- 12 Hayakawa A, Goto T, Mimoto R, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures. *Fuel*, 2015, 159: 98–106
- 13 Lee J H, Kim J H, Park J H, et al. Studies on properties of laminar premixed hydrogen-added ammonia/air flames for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35: 1054–1064
- 14 Bae C, Kim J. Alternative fuels for internal combustion engines. *Proc Combust Institute*, 2017, 36: 3389–3413
- 15 Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions. *Fuel*, 2020, 269: 117448
- 16 Pochet M, Truedsson I, Foucher F, et al. Ammonia-hydrogen blends in homogeneous-charge compression-ignition engine. In: SAE Technical Papers Collection. Warrendale: SAE International, 2017, 0148-7191
- 17 Stillwell W H. X-15 research results. In: Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Administration, 1965. 60
- 18 Pearsall T J, Garabedian C G. Combustion of anhydrous ammonia in diesel engines. In: SAE Technical Papers Collection. Warrendale: SAE International, 1968. 3213–3221
- 19 Starkman E S, James G, Newhall H. Ammonia as a diesel engine fuel: theory and application. In: SAE Technical Papers Collection. Warrendale:

- SAE International, 1968. 3193–3212
- 20 Bro K, Pedersen P S. Alternative diesel engine fuels: an experimental investigation of methanol, ethanol, methane and ammonia in a DI diesel engine with pilot injection. In: SAE Technical Papers Collection. Warrendale: SAE International, 1977. 0148-7191
- 21 Takizawa K, Takahashi A, Tokuhashi K, et al. Burning velocity measurements of nitrogen-containing compounds. *J Hazard Mater*, 2008, 155: 144–152
- 22 Newhall H, Starkman E S. Theoretical performance of ammonia as a gas turbine fuel. In: SAE Technical Papers Collection. Warrendale: SAE International, 1967. 772–784
- 23 Balestri M, Cecchini D, Cinti V. Unconventional fuels experimental campaigns in gas turbine combustor at ENEL Sesta Facility. In: Proceedings of the Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2004
- 24 Huang Z. Fuel blend combustion for decarbonization. *Proc Combust Institute*, 2024, 40: 105776
- 25 Wen M, Liu H, Zhang S, et al. A study of ammonia combustion induced by high reactivity fuel based on optical diagnostics and chemical kinetic analyses. *Combust Flame*, 2025, 272: 113896
- 26 Wen M, Liu H, Cui Y, et al. A study on optical diagnostics and numerical simulation of dual fuel combustion using ammonia and n-heptane. *Energy*, 2024, 313: 133977
- 27 Wen M, Cui Y, Liu H, et al. Optical study of combustion stability in dual fuel approach using ammonia and high reactivity fuel. *Energy Convers Manage*, 2024, 319: 118910
- 28 Gray Jr J T, Dimitroff E, Meckel N T, et al. Ammonia fuel-engine compatibility and combustion. In: SAE Technical Papers Collection. Warrendale: SAE International, 1967. 785–807
- 29 Fujii N, Miyama H, Koshi M, et al. Kinetics of ammonia oxidation in shock waves. *Symposium (Int) Combust*, 1981, 18: 873–883
- 30 Drummond L J. High temperature oxidation of ammonia. *Combust Sci Tech*, 1972, 5: 175–182
- 31 Takeyama T, Miyama H. A shock-tube study of the ammonia-oxygen reaction. *Symposium (Int) Combust*, 1967, 11: 845–852
- 32 Shu B, Vallabhuni S K, He X, et al. A shock tube and modeling study on the autoignition properties of ammonia at intermediate temperatures. *Proc Combust Institute*, 2019, 37: 205–211
- 33 Mathieu O, Petersen E L. Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of ammonia and related NO_x chemistry. *Combust Flame*, 2015, 162: 554–570
- 34 Davidson D F, Kohse-Höinghaus K, Chang A Y, et al. A pyrolysis mechanism for ammonia. *Int J Chem Kinetics*, 1990, 22: 513–535
- 35 Pochet M, Dias V, Moreau B, et al. Experimental and numerical study, under LTC conditions, of ammonia ignition delay with and without hydrogen addition. *Proc Combust Institute*, 2019, 37: 621–629
- 36 He X, Shu B, Nascimento D, et al. Auto-ignition kinetics of ammonia and ammonia/hydrogen mixtures at intermediate temperatures and high pressures. *Combust Flame*, 2019, 206: 189–200
- 37 Chen J, Jiang X, Qin X, et al. Effect of hydrogen blending on the high temperature auto-ignition of ammonia at elevated pressure. *Fuel*, 2021, 287: 119563
- 38 Dai L, Gersen S, Glarborg P, et al. Experimental and numerical analysis of the autoignition behavior of NH₃ and NH₃/H₂ mixtures at high pressure. *Combust Flame*, 2020, 215: 134–144
- 39 Feng Y, Zhu J, Mao Y, et al. Low-temperature auto-ignition characteristics of NH₃/diesel binary fuel: ignition delay time measurement and kinetic analysis. *Fuel*, 2020, 281: 118761
- 40 Xiao H, Lai S, Valera-Medina A, et al. Experimental and modeling study on ignition delay of ammonia/methane fuels. *Int J Energy Res*, 2020, 44: 6939–6949
- 41 Yu L, Zhou W, Feng Y, et al. The effect of ammonia addition on the low-temperature autoignition of n-heptane: an experimental and modeling study. *Combust Flame*, 2020, 217: 4–11
- 42 Peng C, Zou C, Liu J, et al. Shock tube and modeling study on the ignition delay times of ammonia/ethylene mixtures at high temperatures. *Proc Combust Institute*, 2024, 40: 105610
- 43 Jiang X, Zhang Q, Liu X, et al. A shock tube study of the ignition delay time of DME/ammonia mixtures: effect of fuel blending from high temperatures to the NTC regime. *Fuel*, 2024, 367: 131426
- 44 Dai L, Hashemi H, Glarborg P, et al. Ignition delay times of NH₃/DME blends at high pressure and low DME fraction: RCM experiments and simulations. *Combust Flame*, 2021, 227: 120–134
- 45 Li M, He X, Hashemi H, et al. An experimental and modeling study on auto-ignition kinetics of ammonia/methanol mixtures at intermediate temperature and high pressure. *Combust Flame*, 2022, 242: 112160
- 46 Zhang Q, Zhang R, Qi Y, et al. Ignition characteristics of ammonia-methanol blended fuel in a rapid compression machine. *Fuel*, 2024, 368: 131636
- 47 Zhu Y, Curran H J, Girhe S, et al. The combustion chemistry of ammonia and ammonia/hydrogen mixtures: a comprehensive chemical kinetic

- modeling study. *Combust Flame*, 2024, 260: 113239
- 48 Li M, Zhu D, He X, et al. Experimental and kinetic modeling study on auto-ignition properties of ammonia/ethanol blends at intermediate temperatures and high pressures. *Proc Combust Institute*, 2023, 39: 511–519
 - 49 Li M, He X, Zhu D, et al. Experimental and kinetic modeling study of the autoignition and oxidation of ammonia/ethane mixtures in a rapid compression machine and a jet-stirred reactor. *Combust Flame*, 2023, 256: 112931
 - 50 Li Y, Bi M, Li B, et al. Explosion behaviors of ammonia–air mixtures. *Combust Sci Tech*, 2018, 190: 1804–1816
 - 51 Liu B, Hu E, Yin G, et al. Experimental and kinetic study on laminar burning velocities of ammonia/ethylene/air premixed flames under high temperature and elevated pressure. *Combust Flame*, 2023, 251: 112707
 - 52 Lhuillier C, Brequigny P, Lamoureux N, et al. Experimental investigation on laminar burning velocities of ammonia/hydrogen/air mixtures at elevated temperatures. *Fuel*, 2020, 263: 116653
 - 53 Mei B, Zhang X, Ma S, et al. Experimental and kinetic modeling investigation on the laminar flame propagation of ammonia under oxygen enrichment and elevated pressure conditions. *Combust Flame*, 2019, 210: 236–246
 - 54 Law C K. *Combustion Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010
 - 55 Yin G, Xiao B, You J, et al. Experimental and kinetic modeling study on propane enhancing the laminar flame speeds of ammonia. *Fuel Processing Tech*, 2023, 247: 107779
 - 56 Wang S, Wang Z, Elbaz A M, et al. Experimental study and kinetic analysis of the laminar burning velocity of NH_3 /syngas/air, NH_3 /CO/air and NH_3 /H₂/air premixed flames at elevated pressures. *Combust Flame*, 2020, 221: 270–287
 - 57 Jin W, You J, Shen S, et al. Promoting effect of hydrogen compared with hydrocarbons on laminar flame speeds of ammonia. *Int J Hydrogen Energy*, 2025, 120: 282–303
 - 58 Yin G, Li J, Zhou M, et al. Experimental and kinetic study on laminar flame speeds of ammonia/dimethyl ether/air under high temperature and elevated pressure. *Combust Flame*, 2022, 238: 111915
 - 59 Yasiry A, Wang J, Zhang L, et al. Experimental study on the effect of hydrogen addition on the laminar burning velocity of methane/ammonia–air flames. *Appl Sci*, 2023, 13: 5853
 - 60 Yasiry A, Wang J, Zhang L, et al. An experimental study on H₂/NH₃/CH₄-air laminar propagating spherical flames at elevated pressure and oxygen enrichment. *Int J Hydrogen Energy*, 2024, 58: 28–39
 - 61 Nasim M N, Nawaz B, Das S K, et al. Investigation of the laminar burning velocity and exhaust characteristics of methane-ammonia-hydrogen ternary blends. In: *Proceedings of the Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2023
 - 62 Hu E J, He J J, Huang Z H, et al. Measurement of laminar burning velocities and flame stability analysis for hydrogen-air-diluent mixtures (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 2514–2525 [胡二江, 何佳佳, 黄佐华, 等. 氢气-空气-稀释气混合气层流燃烧速度的测定和火焰稳定性分析. *科学通报*, 2008, 53: 2514–2525]
 - 63 He J, Fu H, Liu G. Combustion dynamics of NH_3 /H₂ in a jet-stirred reactor. *Energy Fuels*, 2025, 39: 12173–12183
 - 64 Zhang X, Moosakutty S P, Rajan R P, et al. Combustion chemistry of ammonia/hydrogen mixtures: jet-stirred reactor measurements and comprehensive kinetic modeling. *Combust Flame*, 2021, 234: 111653
 - 65 Zhan H, Li S, Yin G, et al. Experimental and kinetic study of ammonia oxidation and NO_x emissions at elevated pressures. *Combust Flame*, 2024, 263: 113129
 - 66 Zhan H, Shen S, Yin G, et al. High-pressure oxidation of an ammonia–methanol mixture: an experimental and modeling study. *Energy Fuels*, 2024, 38: 23091–23100
 - 67 Yin G, Shen S, Zhan H, et al. Experimental and modeling study for the effect of methanol blending on ammonia oxidation and NO_x formation at high pressure. *Combust Flame*, 2024, 268: 113654
 - 68 Yin G, Xiao B, Zhao H, et al. Jet-stirred reactor measurements and chemical kinetic study of ammonia with dimethyl ether. *Fuel*, 2023, 341: 127542
 - 69 Yu X, Gao Z, He Y, et al. Atomistic insights into the combustion mechanism and kinetic analysis of ethanol-ammonia blended: high-temperature pyrolysis and oxidation. *Int J Hydrogen Energy*, 2025, 148: 149952
 - 70 Yin G, Shen S, Zhan H, et al. Effects of methanol and its cracked gas on ammonia consumption and NO_x emission under high pressure. *Int J Hydrogen Energy*, 2025, 136: 491–500

Summary for “低活性氨燃料燃烧增强方法及研究进展”

Methods on combustion enhancement for low active ammonia and its research progress

Xue Jiang, Zuohua Huang^{*}, Geyuan Yin, Qianqian Li, Meng Zhang, Xiao Cai, Yingtao Wu, Jinhua Wang, Erjiang Hu, Yingjia Zhang & Chenglong Tang

State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

^{*} Corresponding author, E-mail: zhhuang@mail.xjtu.edu.cn

Ammonia (NH_3) is a zero-carbon fuel with broad application prospects and is expected to play a crucial role in achieving the “dual carbon” strategic goals. However, burning pure ammonia presents challenges such as ignition difficulty, narrow combustion limits, slow flame propagation speed, and high nitrogen oxide (NO_x) emissions. These issues result in less efficient and less stable combustion of ammonia, limiting its application in power devices. To overcome these challenges, blending highly reactive components can enhance the combustion characteristics of ammonia, offering a promising approach for its utilization. This strategy has become an effective technical method for improving ammonia fuel combustion. This article reviews the research progress on combustion enhancement of ammonia with low activity by blending the active components, focusing on ignition delay, laminar flame propagation, and species profiles. The blending of hydrogen and highly reactive hydrocarbon fuels with ammonia both exhibits a nonlinear promoting effect on the ignition delay times of ammonia. The addition of a small amount of active components can significantly shorten the ignition delay time. At different temperatures, the common mechanism for ignition enhancement involves promoting the accumulation of active radical pools (such as H, O, and OH), thereby accelerating chain reactions. Fuels with different molecular weights exhibit varying effects on enhancing laminar flame speeds when blended with ammonia. When blended with small-molecule fuels (such as hydrogen and syngas), the laminar flame speed shows a nonlinear trend characterized by a slow initial increase followed by a rapid rise as the blending ratio increases. In contrast, large-molecule hydrocarbon fuels exhibit the opposite trend. The laminar flame speed of ammonia/methane blended fuel increases linearly with the methane blending ratio. The laminar flame speeds of all blended fuels show a significant linear correlation with the peak mole fraction of (H + OH). The increase in radical concentration after blending with active components is the intrinsic mechanism accelerating the increase in laminar flame speed. Furthermore, blending active components and increasing pressure can reduce the initial oxidation temperature of ammonia and shift the temperature range for NO and N_2O formation to lower temperatures. NO_x formation is strongly influenced by the type of active component and reaction conditions, exhibiting complex generation and evolution patterns following their addition. Studies indicate that introducing active components is an effective combustion control method for improving the performance of low-reactivity fuels like ammonia. For such fuels, chemical control strategies prove highly effective. These findings provide valuable insights for optimizing blending strategies, developing efficient ammonia combustion technologies, and advancing chemical kinetics models. Blending high active fuels with ammonia enables a low-carbon transition using existing infrastructure; however, it faces challenges in real-time combustion control and NO_x reduction under varying conditions. The large-scale application of ammonia will contribute to a sustainable energy system.

ammonia, active components, combustion regulation, combustion fundamental, chemical kinetics

doi: [10.1360/CSB-2025-5406](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5406)