Applied Physics 应用物理, 2026, 16(11), 878-888
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/app
https://doi.org/10.12677/app.2026.1611081

Hans汉斯

氨气在多孔介质中燃烧的研究进展：火焰稳定性、排放特性与调控策略

闫光添，涂明旭，梅志南

辽宁石油化工大学机械工程学院，辽宁 抚顺

收稿日期：2026年9月20日；录用日期：2026年10月30日；发布日期：2026年11月6日

摘　要

氨气作为零碳燃料潜力巨大，但其低火焰速度、高点火能量及NOx排放问题限制应用。多孔介质燃烧技术凭借优异的热回流与蓄热能力，可有效提升氨气燃烧稳定性并拓宽可燃极限。本文综述了氨气在多孔介质中燃烧的最新研究进展，涵盖氨气理化特性与基础火焰特性，重点分析多孔介质材料、孔径密度、孔隙率及结构对火焰稳定性和温度分布的影响，探讨NOx生成机理，并总结富燃－贫燃分级燃烧、空气分级、烟气再循环、预混/非预混模式及新型燃烧器设计等降NOx策略。最后指出当前挑战(氨气泄漏、N_2O排放、材料耐久性)并展望未来方向，为高效清洁的氨气多孔介质燃烧器设计与优化提供理论参考。

关键词

氨气燃烧，多孔介质，NOx排放，火焰稳定性

Research Progress on Ammonia Combustion in Porous Media: Flame Stability, Emission Characteristics, and Control Strategies

Guangtian Yan, Mingxu Tu, Zhinan Mei

School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: September 20, 2026; accepted: October 30, 2026; published: November 6, 2026

Abstract

Ammonia, as a zero-carbon fuel, holds great potential, but its application is limited by low flame speed, high ignition energy, and NOx emissions. Porous media combustion technology, with its

文章引用: 闫光添, 涂明旭, 梅志南. 氨气在多孔介质中燃烧的研究进展: 火焰稳定性、排放特性与调控策略[J]. 应用物理, 2026, 16(11): 878-888. DOI: 10.12677/app.2026.1611081

excellent heat recirculation and thermal storage capabilities, can effectively enhance ammonia combustion stability and broaden its flammability limits. This paper reviews the latest research progress on ammonia combustion in porous media, covering the physicochemical properties of ammonia and its fundamental flame characteristics, with a focus on the effects of porous media materials, pore density, porosity, and structure on flame stability and temperature distribution. The NOx formation mechanisms during ammonia combustion in porous media are discussed, and NOx reduction strategies such as rich-lean staged combustion, air staging, flue gas recirculation, premixed/non-premixed modes, and novel burner designs are systematically summarized. Finally, current challenges (ammonia leakage, N_2O emissions, and durability of porous media materials) are identified and future research directions are outlined, aiming to provide theoretical references for the design and optimization of efficient and clean ammonia porous media burners.

Keywords

Ammonia Combustion, Porous Media, NOx Emissions, Flame Stability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在全球气候变暖与碳中和目标的驱动下，开发零碳燃料已成为能源领域的研究热点[1] [2]。氨气(NH_3)作为一种高效的氢载体，具有高体积能量密度、易于液化储存和运输等优势，被认为是极具前景的零碳燃料。表 1 列出了氨气与甲烷、氢气的主要理化特性对比。

Table 1. Comparison of physicochemical properties between ammonia and typical fuels
表 1. 氨气与典型燃料理化特性对比

参数	NH_3	CH_4	H_2
分子量(g/mol)	17.03	16.04	2.02
质量能量密度(MJ/kg)	18.6	50.0	120.0
层流火焰速度(cm/s, φ=1.0)	~7	~36	~210
最小点火能(mJ)	~8	~0.28	~0.02
可燃极限(空气中，φ)	0.63~1.40	0.5~1.70	0.14~2.54
绝热火焰温度(K)	1800	2223	2380

由表 1 可见，氨气的层流火焰速度仅为甲烷的约 1/5、氢气的约 1/30，最小点火能约为甲烷的 30 倍，可燃范围也明显窄于甲烷和氢气。此外，氨气燃烧面临诸多挑战：层流火焰速度极低(约 7 cm/s)，点火能量高，可燃范围窄，且燃烧过程中会产生大量的燃料型 NOx。氨气的点火延迟时间也显著长于碳氢燃料，在典型燃烧条件下可达毫秒量级，这对燃烧器的点火与稳燃设计提出了更高要求。

多孔介质燃烧(Porous Media Combustion, PMC)技术通过在燃烧区内填充高热导率、高比表面积的惰性多孔材料，利用固体骨架的导热与辐射作用将燃烧产物热量回流至上游未燃混合物，从而实现超绝热燃烧(Superadiabatic Combustion) [3] [4]。这一特性能够显著提高低热值燃料的燃烧效率和稳定性。近年来，将 PMC 技术应用于氨气燃烧的研究逐渐增多，旨在克服氨气燃烧的固有缺陷。

本文旨在系统综述氨气在多孔介质中燃烧的研究进展，重点关注多孔介质特性对燃烧性能的影响、NOx 生成机理及控制策略，并探讨未来的研究方向。

2. 氨气多孔介质中燃烧特性

火焰稳定是多孔介质燃烧器设计的核心问题。与自由火焰依靠旋流、钝体等方式驻定不同，多孔介质内火焰的稳定依赖于固相骨架的热再循环效应和不同孔隙率区段之间的结构界面。

2.1. 层流火焰速度

层流火焰速度是表征燃料燃烧特性的核心参数。氨/空气在标准条件下的层流火焰速度仅为约 7 cm/s，远低于甲烷(~36 cm/s)和氢气(~210 cm/s)。Han 等[5]系统测量了 NH_3/air、NH_3/H_2/air、NH_3/CO/air 和 NH_3/CH_4/air 预混火焰的层流火焰速度，发现掺入 H_2、CO 或 CH_4 均可显著提高氨火焰的层流火焰速度，其中 H_2 的促进效果最为显著。Hayakawa 等[6]研究了压力对氨/空气层流火焰速度的影响，发现层流火焰速度随初始压力升高而减小，符合典型的压力依赖关系。

在多孔介质中，由于固相骨架的热再循环效应，未燃混合物在进入燃烧区前即被预热，从而显著提高反应速率和火焰传播速度。Vignat 等[7]通过一维多孔介质模型分析了 NH_3/H_2/air 火焰在多孔介质中的超绝热燃烧特性，发现预热温度每升高 100 K，消耗速度可提高约 2~3 倍，且贫燃条件下温度依赖性指数 n_T 高达 7.2~8.2，远高于甲烷火焰($n_T \approx 6.1$)，表明氨气火焰对预热强化更为敏感。这为利用多孔介质热再循环效应强化氨气燃烧提供了理论依据。

2.2. 点火延迟时间

点火延迟时间是燃烧器设计和 CFD 模拟的关键输入参数。氨气的点火延迟时间显著长于碳氢燃料，且在高温条件下对温度极为敏感。Glarborg 等[8]指出，氨气点火过程中 $NH_3 \rightarrow NH_2 \rightarrow NH \rightarrow N$ 的逐步脱氢路径是控制点火延迟的关键反应序列，其中 $NH_3 + H \rightleftharpoons NH_2 + H_2$ 反应在高温下起主导作用。

在多孔介质燃烧条件下，预热效应可显著缩短氨气的点火延迟时间。Chen 等[9]对非预混纯氨燃烧的实验表明，预热温度 >593 K 时可生成稳定的非预混纯氨火焰，且随预热温度升高，NOx 浓度明显下降，未燃 NH_3 浓度极低。然而，目前针对多孔介质内氨气点火延迟时间的系统实验数据仍然匮乏，现有动力学模型在高压、富燃、低温条件下的适用性有待进一步验证。

2.3. 火焰形态与位置

多孔介质内的火焰根据其相对于多孔介质表面的位置，可分为三种基本形态[10]：表面火焰驻定于多孔介质上游表面附近，对应较低入口流速和较高热负荷，此时多孔介质表面温度最高，辐射换热最强；内部火焰完全浸没于多孔介质内部，位于上游小孔径段与下游大孔径段的界面处附近，温度均匀且辐射损失较小。

李[11]系统研究了 10、20、30 PPI 三种孔密度 SiC 泡沫陶瓷上氨/空气火焰的表面稳定燃烧特性，发现孔密度增大使火焰更贴附于表面。Rocha 等的实验也证实燃烧器稳定在 40 PPI 与 10 PPI 界面处[12]。随入口流速增大，火焰位置从内部向表面方向移动；当流速超过临界值时，火焰被吹离多孔介质表面，发生吹熄。Chen 等发现多孔介质导热系数增大时火焰位置向上游移动，即从内部火焰趋向表面火焰方向[13]。

此外，Zhang 等提出的 3D 打印有序多孔介质(简单立方单胞)和 Voronoi 晶格连续梯度拓扑结构，为精确控制火焰位置提供了新的结构设计思路[14]。径向内流构型的 SiC 泡沫多孔燃烧器更实现了动态火

焰稳定，纯 NH_3 可燃极限显著拓宽。

3. 多孔介质中氨气火焰的稳定机理与稳燃极限

火焰稳定是多孔介质燃烧器设计的核心问题。与自由火焰依靠旋流、钝体等方式驻定不同，多孔介质内火焰的稳定依赖于固相骨架的热再循环效应和不同孔隙率区段之间的结构界面。

3.1. 火焰稳定机理

多孔介质燃烧器通过固体骨架的热再循环效应实现火焰稳定。其核心机制包括：(1) 燃烧区热量通过固体导热和辐射向前传播至预热区，提高未燃混合物温度；(2) 预热后的混合物反应速率加快，火焰传播速度提高；(3) 多孔介质的大比表面积增强了气固换热，使温度分布更加均匀[5]-[14]。

常规自由火焰中，氨/空气的贫燃可燃极限约为 $\varphi = 0.6$。而在多孔介质中，贫燃极限可被大幅扩展。Wang 等在 SiC 双层泡沫多孔燃烧器中实现了贫稳燃烧下限 $\varphi = 0.5$ [15]。Lv 等通过一维全动力学数值模拟系统研究了反应物预热对两段多孔燃烧器贫燃灭火极限的扩展效果，发现随预热温度从 400 K 升至 1000 K，贫燃极限当量比从 $\varphi = 0.54$ 扩展至 $\varphi = 0.08$，扩展了一个数量级[16]。该研究还识别出三种运行机制区域：I 区(必须预热才能稳定)、II 区(预热低于临界值即熄火)、III 区(接近 $\varphi = 1$ 无需预热自维持)。

Vignat 等的贫 NH_3/H_2/空气实验给出了 $\varphi_{ext} \propto X_{H_2}^{-0.3}$ 的标度律，定量描述了 H_2 掺混对贫极限的扩展作用[7]。Hayakawa 等在旋流燃烧器中发现纯氨火焰即使不添加任何反应增强剂也可在多种当量比和入口流速下稳定燃烧，但贫吹熄和富吹熄极限接近氨火焰的可燃极限[6]，说明旋流稳定的扩展能力有限，多孔介质的热回流扩展能力更强。

在富燃侧，Nozari 等的 SiC 多孔燃烧器可在 $\varphi = 0.9$~1.5 范围内稳定 NH_3/H_2/air 火焰[17]。Srinivasarao 等的新型两级自回热燃烧器在纯氨条件下实现了 $\varphi = 0.3$~1.3 的超宽稳定范围[18]。

3.2. 富氧燃烧与预热对火焰稳定性的强化作用

除多孔介质自身的热再循环效应外，富氧和反应物预热是进一步强化火焰稳定性的两种重要手段。

An 等的大涡模拟(LES)研究表明，氧含量从 21%提升至 35%时，火焰形态从 V 型转变为 M 型，热释放速率和吹熄拉伸率显著提升[19]。其机制在于：富氧提高了绝热火焰温度，增加了关键自由基浓度，从而加快化学反应速率。Mei 等的定容弹实验证实，富氧加速球形扩展火焰，显著降低浮力效应，且层流燃烧速度随氧含量增加而增大、随初始压力升高而减小[20]。但需注意，氧含量 ＞30%后继续增加氧主要促进燃料型 NO 生成，进一步富氧的收益递减而排放代价递增。

Chen 等对非预混纯氨燃烧的实验表明，预热温度 ＞593 K 时可生成稳定的非预混纯氨火焰，且随预热温度升高，NOx 浓度明显下降，未燃 NH_3 浓度极低[9]。Lv 等的数值模拟定量给出了预热温度对贫燃极限的扩展幅度[16]。Rong 等提出的双进双出(DIDO)逆流结构氨氧微燃烧器，利用挡板在出口形成涡旋，使 NOx 排放降低 29.23%，同时外壁温标准差降低 51%，显著提高壁温均匀性[21]。

4. 多孔介质参数对氨气燃烧的影响

多孔介质的材料属性(热导率、比热容、发射率)和结构参数(孔径、孔隙率、层数)对氨气燃烧特性具有显著影响。

4.1. 孔隙率与孔密度(PPI)的影响

孔密度(Pores Per Inch, PPI)与孔隙率是决定多孔介质内流动阻力、比表面积、辐射透过性及固相－气相换热强度的两个最核心几何参数。在氨/甲烷－空气多孔燃烧实验中，Wang 等[15]采用 SiC 泡沫双层结

构(下层 40 PPI 防回火、上层 15 PPI，孔隙率均为 80%)，将贫稳燃烧下限扩展至 $\varphi = 0.5$，并指出高 PPI 层对防止回火、低 PPI 层对促进火焰稳定起协同作用。Rocha 等[12]在 Al_2O_3-ZrO_2 四层陶瓷泡沫(底部两层 40 PPI、顶部两层 10 PPI，孔隙率 80%)中观察到火焰稳定于 40 PPI 与 10 PPI 的界面处，印证了“高 PPI 上游–低 PPI 下游”界面稳定机制对低反应性燃料的关键作用。

数值研究进一步给出了孔隙率对排放与热性能的定量影响。Tolouei 与 Gharehghani [22]通过响应面法在 50%~90%孔隙率范围内寻优，得出最佳孔隙率约为 63%，此时平均壁温 1543 K、NO 排放降至 2270 ppm。Ni 与 Zhao [23]的富燃 NH_3/空气 CFD 研究则揭示了孔隙率的非线性双刃剑效应：孔隙率从 0.5 增至 0.9 时，NO 排放激增 41 倍(353 ppm→1.49 × 10^4 ppm)，而 N_2O 排放反而降低 71.5% (3.29 × 10^3→9.38 × 10^2 ppm)。Cai 等[24]在环形部分填充结构中确定最优孔隙率为 0.8。Liu 等[25]在 NH_3/O_2 微燃烧器中系统比较了孔密度，发现 10 PPI 为综合最优值，此时入口速度 6 m/s 下烟效率达 70%。

4.2. 多孔介质材料选择

多孔介质材料需同时满足耐高温(长期工作温度通常>1500 K)、高抗热震性、高温化学惰性、适宜的辐射发射率与导热系数等多重要求。现有研究主要涉及三类材料。

SiC (碳化硅)是目前应用最广的多孔介质材料。其导热系数高达约 400 W/(m·K)，兼具良好的高温辐射性能与机械强度。Nozari 等[17]、Chen 等[9]、Wang 等[15]均采用 SiC 泡沫开展 NH_3/H_2/air 与 NH_3/CH_4/air 实验。Ni 与 Zhao [23]系统比较了 5 种热导率在 2.25~387.6 W/(m·K)之间的多孔材料，发现随材料热导率增加 NO 排放可降低 99.98% (从 2.70 × 10^4 ppm 降至 5.17 ppm)，但 N_2O 排放增加约两个数量级，提示高导热 SiC 在富燃 NO 控制与 N_2O 生成之间存在权衡。

Al_2O_3 (氧化铝)与 ZrO_2/ZYA (钇稳定氧化锆)常用于上游低温段。YZA 泡沫因耐高温蠕变与较好的耐热冲击性能，被 Vignat 团队[7] [26]用作上游 40 PPI 预热带；Rocha 等[12]采用 Al_2O_3-ZrO_2 四层泡沫。ZrO_2 系列材料的导热系数远低于 SiC，适合作未燃侧低热导率环形基体以降低固相热损失。

金属泡沫(如 Ni、Ni 合金)则在微尺度燃烧中显示出优势。Huang 等[27]在微平面燃烧器中对比发现纯泡沫金属较金属合金复合材料传热更优，Ni 为最佳多孔介质材料，最大平均外壁温度达 1181.8 K。总体而言，材料选择需与区段功能匹配：上游宜采用低热导、高耐热的 YZA/Al_2O_3 以预热反应物并抑制回火，下游宜采用高热导、高辐射的 SiC 以强化传热与温度均匀性。

多孔介质表面催化效应对氨燃烧及 NOx 转化的影响

多孔介质并非完全的惰性骨架，在高温、大比表面积条件下，固相表面会发生表面催化反应，改变 NH_3 氧化、NO 生成与还原路径，该效应在金属泡沫、掺杂活性组分陶瓷中尤为突出[8]。Ni 基金属泡沫表面可催化 NH_3 直接分解：$2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$，生成 H_2 提升气相火焰反应活性，同时减少燃料型 NO 前驱体；但 Ni 表面同样会催化 NH_3 氧化生成 NO，存在“分解–氧化”竞争关系[27]。Al_2O_3、ZrO_2 本身催化活性较弱，以物理传热、蓄热为主；但高温下杂质析出或长期碱金属沉积会诱导非预期表面反应，改变排放结果。SiC 在高温氧化后表面生成 SiO_2 钝化层，催化活性较低，更接近理想惰性多孔基体[23]。

催化效应的强弱受温度、材料组分、比表面积影响：低温区间(<1000 K)表面反应占比提升，容易促进 N_2O 生成；高温区间气相自由基反应占主导，表面催化贡献被削弱。在多孔介质燃烧器设计中，可采取功能分区思路：上游预热段选用高活性催化多孔材料促进氨裂解，燃烧区选用低活性 SiC 避免额外 NO 生成；但需要权衡高温下催化剂烧结、活性衰减的工程风险。当前绝大多数氨气多孔介质燃烧的数值模拟忽略表面化学反应，仅考虑固相导热辐射，会造成低–中温工况下 NO、N_2O 预测偏差，后续动力学建模需要耦合气–固表面反应机理[8]。

4.3. 有序多孔介质与随机多孔介质的对比研究

传统泡沫陶瓷与堆积球床均属于随机多孔介质，其孔径、连通性与比表面积呈统计分布，难以实现精确的流场–温度场定制调控。近年来，3D 打印技术推动了有序多孔介质的发展。Zhang 等[14]采用 3D 打印简单立方单胞 SiC 结构，下层两层 60 PPI 与上层 3.5 PPI 形成精确界面，结合空气分级实现了优异排放性能。与之相对，Li 等[28]的双层球形堆积床三维孔尺度模拟仍属随机堆积范畴，其结果显示 $\varphi = 1.0$ 最有利于完全燃烧、NO 随氨浓度先升后降(约 10%氨浓度时达峰)。总体而言，有序结构在几何可重复性、流动均匀性与功能梯度设计方面具有显著优势，但其制造工艺成熟度、成本与长期热稳定性仍待验证；随机结构则凭借成本低廉、制备成熟而在实验室研究中占主导地位。

有序多孔介质的结构–功能耦合调控机制

有序多孔介质依托增材制造的几何可设计性，可以构建梯度孔隙、复合材料分区、多尺度晶格拓扑，实现热再循环、混合、反应区位置的精准调控。梯度孔隙结构：上游高 PPI 小孔径强化固相导热预热，下游低 PPI 大孔径降低流动阻力、扩展反应区，把火焰锚定在梯度界面，抑制回火与吹熄；多材料复合构型：上游采用 YZA 低热导晶格降低向入口端的固相热损失，下游采用 SiC 高热导晶格强化辐射散热，分区匹配热物性；Voronoi 连续渐变晶格：消除突变界面带来的局部涡流与热点，使温度场、组分场平滑过渡，抑制局部高温产生热力型 NO。

随机多孔介质成本低廉、制备成熟，但孔径分布离散会造成火焰局部偏移、热点、流动偏流；有序结构几何重复性好，便于机理研究，但存在制备成本高、高温蠕变、3D 打印孔隙内壁缺陷等现实瓶颈，距离大规模工程应用仍有距离[14]。

总体而言，有序结构在几何可重复性、流动均匀性与功能梯度设计方面具有显著优势，但其制造工艺成熟度、成本与长期热稳定性仍待验证；随机结构则凭借成本低廉、制备成熟而在实验室研究中占主导地位。

5. 氨气在多孔介质中燃烧的 NOx 生成与排放控制

氨燃烧的污染物排放问题是其能否实现工程化应用的决定性瓶颈。与传统碳氢燃料不同，氨燃烧的排放谱系不仅包括 NOx (NO, NO_2, N_2O)，还包括未燃氨逃逸(NH_3 slip)。

5.1. NOx 生成机理

氨燃烧中 NOx 的生成机理与化石燃料燃烧存在本质区别。由于燃料本身含氮，燃料型 NOx (fuel NO)是主导路径，而热力型 NOx (Zeldovich 机理)的贡献相对次要[1]-[4]。

氨分子中的氮原子通过一系列脱氢反应($NH_3 \rightarrow NH_2 \rightarrow NH$)逐步释放，中间产物 NH 与 O_2、O、OH 等氧化性自由基反应生成 NO。

NO 生成路径：$NH + O \rightleftharpoons NO + H$；$NH_2 + O \rightleftharpoons HNO + H$；$HNO + OH \rightleftharpoons NO + H_2O$

NO 还原路径：$NH_2 + NO \rightleftharpoons NNH + OH$；$NH_2 + NO \rightleftharpoons N_2 + H_2O$；$NNH + NO \rightleftharpoons N_2 + HNO$

N_2O 生成路径：$NH + NO \rightleftharpoons N_2O + H$；$NH_2 + NO_2 \rightleftharpoons N_2O + H_2O$

N_2O 消耗路径：$N_2O + H \rightleftharpoons N_2 + OH$；$N_2O + OH \rightleftharpoons N_2 + HO_2$

在多孔介质中，超绝热燃烧效应使燃烧区温度高于绝热火焰温度，这在一定程度上促进了热力型 NO 的生成，但多孔介质的热再循环效应同时延长了高温区停留时间，有利于 NO 的还原反应。因此，多孔介质中 NOx 生成是预热强化与停留时间延长两种效应竞争的结果，需结合具体工况进行详细分析。

5.2. N_2O 生成与排放

N_2O 是氨燃烧中一个容易被忽视但环境影响严重的污染物。N_2O 是强温室气体，其百年尺度 GWP 约

为 CO_2 的 273 倍，同时对平流层臭氧具有破坏作用。

Ni 和 Zhao 的数值模拟揭示了 NO 与 N_2O 之间强烈的此消彼长关系：随多孔材料热导率从 2.25 W/m·K 增加至 387.6 W/m·K，NO 排放降低 99.98% (从 2.70×10^4 ppm 降至 5.17 ppm)，但 N_2O 排放增加约 10000% (从 24.8 ppm 升至 2.52×10^3 ppm) [23]。

An 等的富氧旋流燃烧 LES 也发现，富氧增加 NO 和 NO_2 但减少 N_2O；吹熄过程中 N_2O 和 NO_2 排放暂时升高[19]。幸运的是，在最优设计条件下 N_2O 可以被有效控制。Zhang 等在有序多孔介质燃烧器中结合空气分级燃烧，实现了 N_2O 未检测到(消除) [14]。Vignat 等的两级 Rich-quench-lean 燃烧器也通过二级稀燃区的高温氧化将 N_2O 进一步消耗[7]。

5.3. 未燃氨逃逸

未燃氨逃逸(NH_3 slip)是氨燃烧特有的另一个关键排放问题。NH_3 具有刺激性气味和毒性，即使在低浓度下也会对人体健康和生态环境产生不利影响。

未燃氨逃逸与当量比呈直接正相关：富燃条件下过量的氨无法完全氧化，导致逃逸量增加。Hayakawa 等发现富燃条件下 NO 降低但 NH_3 升高[6]。Vignat 等的实验表明极贫燃($\varphi \lesssim 0.6$)虽然 NO 较低，未燃 NH_3 排放也较低(约 1400 ppm)，优于常规富燃运行[26]。Srinivasarao 等的两级燃烧器在高热功率下完全消除了 NH_3 逃逸[18]。

各研究最优排放对比：Vignat 等两级 PMB 最优工况下未燃 NH_3 排放为 149 ppmv [29]，Zhang 等有序 PMB + 空气分级方案将未燃 NH_3 控制在 20 ppm 以下[14]。Rocha 等在 $\varphi = 0.8$ 固定当量比下发现烟气中存在未燃 NH_3，表明即使在化学当量比附近氨的氧化也不完全。常用检测方法包括 FTIR [6]、多组分气体分析仪 MCA14m [9]和 Horiba PG350 [15]。控制策略包括提高燃烧温度和停留时间、两级燃烧和催化辅助。Chen 等的燃料预热实验表明，预热温度升高使未燃 NH_3 浓度极低[15]。

5.4. 排放控制策略及不同技术方案对比

针对氨燃烧的 NOx-NH_3-N_2O 三重排放难题，学术界和工程界发展了多种控制策略，各类控制策略对比见表 2。

Table 2. Comprehensive comparison of major NOx control strategies for ammonia porous-media combustion
表 2. 氨气多孔介质燃烧主要 NOx 控制策略综合对比

控制策略	核心原理	优势	缺点/潜在负面影响	适用工况
富燃－贫燃两级燃烧	一级富燃还原 NO；二级补风氧化残余 NH_3	NOx 降幅大，可协同处理 NO	富燃段易 NH_3 逃逸，结构复杂，窗口窄	中高热功率、常压
空气分级燃烧	多点注入二次空气，分区当量比	N_2O 可被抑制；未燃氨可降至较低水平	对二次风位置、比例高度敏感	有序多孔介质燃烧器
多孔介质物性－结构优化	调整孔隙率、PPI、热导率，调控温时间	与燃烧本体一体化，不需要额外管路系统	NO 与 N_2O 此消彼长，需折中寻优	全工况辅助手段
烟气再循环 FGR	低温烟气稀释，降火温度抑制热力 NO	抑制热力 NO 效果好，拓宽稳燃区间	过量 FGR 加剧 NH_3、N_2O 排放，增大阻力	燃气轮机、锅炉类大系统

(1) 富燃－贫燃两级燃烧。这是目前被公认为最有前景的氨燃烧排放控制策略。第一级在富燃条件($\varphi \approx 1.2$~1.4)下运行，利用过量氨将 NO 还原为 N_2，同时将部分 NH_3 热裂解为 H_2 和 N_2；第二级在稀燃条件($\varphi \approx 0.6$~0.8)下补充空气，将残余的 CO 和未燃氨完全氧化。Vignat 等的两级 PMB 实验验证了这一策略的有效性：最优条件下 15% O_2 归一化 NOx 仅 28 ppmv，未燃 NH_3 为 149 ppmv；与单级燃烧器相比，二

级区梯度泡沫比传统横流二次风注入进一步降低 NOx 40%、NH_3 65% [7]。

(2) 空气分级配风。Zhang 等在有序多孔介质燃烧器中实现了空气分级(20%~25%二次风在距界面 60 mm 处注入)，使 NOx 排放降低 82.5%，未燃 $NH_3 < 20$ ppm，N_2O 消除[7]。这种通过多孔介质内部空间分辨实现的分级配风，比传统燃烧器的横流二次风注入更为均匀有效。

(3) 多孔介质结构与物性优化。Ni 和 Zhao 的系统参数研究表明，多孔材料热导率和孔隙率对 NO 和 N_2O 排放有相反方向的影响[23]，需选择适当的热导率(不宜过高)和较高的孔隙率以平衡 NO 与 N_2O。Liu 等发现最优孔密度为 10 PPI [25]。

(4) 烟气再循环(FGR)。将部分低温烟气回流至反应物入口，稀释反应物、降低火焰峰值温度，抑制热力型 NO 生成；但 FGR 比例过高会造成整体燃烧温度下降，造成未燃 NH_3 与 N_2O 上升，需要严格控制循环比例，在多孔介质燃烧系统中相关专项实验仍然偏少[1]。

6. 存在问题与展望

尽管氨气多孔介质燃烧研究取得了显著进展，但仍存在以下关键问题亟待解决：

6.1. 基础机理与实验数据短板

(1) 实验数据匮乏：目前大多数实验研究集中在常压、常温条件下，高压、高温条件下的氨气多孔介质燃烧实验数据极为有限。实际燃气轮机和内燃机运行工况通常为高压(10~30 bar)、高温(600~800 K)，亟需开展相关实验研究。

(2) NOx 排放控制：虽然富燃－贫燃分级燃烧策略可有效降低 NOx，但未燃 NH_3 和 N_2O 排放仍需进一步控制。N_2O 的温室效应是 CO_2 的 273 倍，其在贫燃低温条件下的生成规律尚不明确。

(3) 多孔介质材料与结构优化：目前多孔介质材料选择主要依赖经验，缺乏针对氨气燃烧特性的系统性优化设计准则。先进陶瓷增材制造技术为定制化多孔结构设计提供了可能，但相关研究尚处于起步阶段。

(4) 动力学模型精度：现有氨气动力学模型在多孔介质燃烧条件下的适用性有待验证，特别是在高压、富燃、低温条件下的反应路径和速率常数需要进一步修正。

6.2. 工程放大与长期运行挑战

实验室小尺度多孔介质燃烧器结论向工程尺度转化仍面临多重现实障碍

(1) 热－机械稳定性：燃烧器启停、负荷动态变化带来剧烈热冲击；高温长期服役下多孔陶瓷发生蠕变，泡沫骨架断裂、孔隙结构坍塌；SiC、ZrO_2 陶瓷抗热震性能虽较好，但大尺寸构件的抗热冲击能力随尺寸增加显著下降[17]。

(2) 化学稳定性与催化活性演变：高温烟气中杂质、碱金属沉积附着多孔骨架表面，改变材料表面组分，引入非预期催化效应，造成 NO/N_2O 排放随运行时间漂移；金属多孔材料面临高温氧化、高温蠕变失效。

(3) 大尺度流动均匀性：小尺寸样品流动分布相对均匀；放大后入口气流偏流、径向流速分布不均，会造成火焰局部偏移、局部回火/吹熄，部分区域出现严重氨逃逸。

(4) 动态负荷响应与控制系统：氨气火焰燃烧区间窄，变功率、变燃料掺混比例工况下，火焰位置易发生剧烈移动；需要匹配快速响应的配风、燃料调节策略；分级燃烧系统的多参数耦合控制算法尚不成熟。

(5) 密封与氨气泄漏风险：氨气有毒、腐蚀性强，高温燃烧器法兰、接缝密封设计难度大，系统要兼顾耐热变形与防氨泄漏。

6.3. 未来研究方向

(1) 开展宽工况(高压、高温、宽当量比)下氨气多孔介质燃烧实验，获取系统可靠的实验数据；

(2) 发展针对氨气燃烧的多孔介质材料与结构优化设计方法；

(3) 改进氨气动力学模型，特别是富燃条件下 NOx 生成与消耗路径的精确描述；

(4) 探索多孔介质燃烧与 SCR 等尾气后处理技术的耦合优化策略。

7. 结论

多孔介质燃烧技术凭借其独特的热再循环效应和超绝热燃烧特性，为氨气高效清洁燃烧提供了有效途径。本文系统综述了氨气在多孔介质燃烧器中燃烧的基础特性、排放规律、影响因素及动力学机制，主要结论如下：

(1) 多孔介质可显著提高氨气火焰稳定性，拓宽可燃极限。纯 NH_3/air 火焰可在当量比 0.75~1.4 范围内稳定燃烧，功率密度可达 62 MW/m^3。但纯氨与掺氢/掺甲烷体系的稳定范围存在差异，实际设计需根据燃料组成针对性优化。

(2) 氨气多孔介质燃烧的 NOx 排放以燃料型 NOx 为主，富燃条件可有效抑制 NOx 生成，但需平衡未燃 NH_3 排放。富燃－贫燃分级燃烧和空气分级策略可将 NOx 排放降至 100 ppm 以下。

(3) 多孔介质材料热导率和结构参数对氨气燃烧特性具有显著影响，高热导率材料有利于降低 NO 排放，但会促进 N_2O 生成，需在 NO 与 N_2O 之间综合权衡；孔隙率、孔密度及有序/随机结构亦需与区段功能匹配设计。

(4) 现有氨气动力学模型在预测多孔介质燃烧特性时仍存在较大不确定性，亟需发展适用于高压、富燃条件下的高精度动力学模型。未来研究应重点关注高压高温实验数据获取、材料与结构优化设计、动力学模型改进及多尺度数值模拟方法开发，以推动氨气多孔介质燃烧技术的工业化应用。

基金项目

项目级别：校级。项目名称：2025 年大学生创新创业训练计划项目——氨气多孔介质燃烧器中火焰稳定性与 NOx 排放研究。项目编号：X202510148122。

参考文献

[1] Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W.I.F. and Bowen, P.J. (2018) Ammonia for Power. *Progress in Energy and Combustion Science*, **69**, 63-102. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001

[2] Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somarathne, K.D. and Okafor, E. (2019) Science and Technology of Ammonia Combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, **37**, 109-133. https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029

[3] MacFarlane, D.R., Cherepanov, P.V., Choi, J., Suryanto, B.H.R., Hodgetts, R.Y., Bakker, J.M., *et al*. (2020) A Roadmap to the Ammonia Economy. *Joule*, **4**, 1186-1205. https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004

[4] Elbaz, A.M., Wang, S., Guiberti, T.F. and Roberts, W.L. (2022) Review on the Recent Advances on Ammonia Combustion from the Fundamentals to the Applications. *Fuel Communications*, **10**, Article 100053. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100053

[5] Han, X., Wang, Z., Costa, M., Sun, Z., He, Y. and Cen, K. (2019) Experimental and Kinetic Modeling Study of Laminar Burning Velocities of NH_3/Air, NH_3/H_2/Air, NH_3/CO/Air and NH_3/CH_4/Air Premixed Flames. *Combustion and Flame*, **206**, 214-226. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.05.003

[6] Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Arakawa, Y., Kudo, T. and Kobayashi, H. (2015) Laminar Burning Velocity and Markstein Length of Ammonia/Air Premixed Flames at Various Pressures. *Fuel*, **159**, 98-106. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.070

[7] Vignat, G., Zirwes, T., Toro, E.R., Younes, K., Boigné, E., Muhunthan, P., *et al*. (2023) Experimental and Numerical Investigation of Flame Stabilization and Pollutant Formation in Matrix Stabilized Ammonia-Hydrogen Combustion.

Combustion and Flame, **250**, Article 112642. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112642

[8] Glarborg, P., Miller, J.A., Ruscic, B. and Klippenstein, S.J. (2018) Modeling Nitrogen Chemistry in Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, **67**, 31-68. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.01.002

[9] Chen, Y., Zhang, B., Su, Y., Sui, C. and Zhang, J. (2022) Effect and Mechanism of Combustion Enhancement and Emission Reduction for Non-Premixed Pure Ammonia Combustion Based on Fuel Preheating. *Fuel*, **308**, Article 122017. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122017

[10] Okafor, E.C., Somarathne, K.D.A., Ratthanan, R., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., *et al*. (2020) Control of NO_x and Other Emissions in Micro Gas Turbine Combustors Fuelled with Mixtures of Methane and Ammonia. *Combustion and Flame*, **211**, 406-416. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.012

[11] 李可可. 预混氨气在多孔介质表面燃烧特性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽理工大学, 2025.

[12] Rocha, R.C., Ramos, C.F., Costa, M. and Bai, X. (2019) Combustion of NH_3/CH_4/Air and NH_3/H_2/Air Mixtures in a Porous Burner: Experiments and Kinetic Modeling. *Energy & Fuels*, **33**, 12767-12780. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02948

[13] Chen, D., Li, J., Li, X., Deng, L., He, Z., Huang, H., *et al*. (2023) Study on Combustion Characteristics of Hydrogen Addition on Ammonia Flame at a Porous Burner. *Energy*, **263**, Article 125613. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125613

[14] Zhang, H., Zhou, J., Du, J., Yu, Z., Liang, X., Cheng, Y., *et al*. (2025) Ammonia-Methane Flames Stabilized in an Ordered Porous Media Burner. *Energy & Fuels*, **39**, 6654-6670. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c00767

[15] Wang, G., Huang, L., Tu, H., Zhou, H., Chen, X. and Xu, J. (2024) Stable Lean Co-Combustion of Ammonia/Methane with Air in a Porous Burner. *Applied Thermal Engineering*, **248**, Article 123092. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123092

[16] Lv, J.S., Shi, J.R., Li, J., *et al*. (2024) Effect of Preheating on Extending Lean Extinction Limit of Ammonia/Air Combustion in a Two-Section Porous Burner. *Journal of the Energy Institute*, **116**, Article 101708. https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101708

[17] Nozari, H., Karaca, G., Tuncer, O. and Karabeyoglu, A. (2017) Porous Medium Based Burner for Efficient and Clean Combustion of Ammonia-Hydrogen-Air Systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 14775-14785. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.234

[18] Srinivasarao, M., Sorrentino, G., de Joannon, M. and Reddy, V.M. (2025) Investigation of the Pure Ammonia Flames in a Novel Two-Stage Burner. *Combustion and Flame*, **276**, Article 114131. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2025.114131

[19] An, Z., Wang, R., Mao, R., Xing, J., Zhang, M., Chen, Z.X., *et al*. (2025) Flame Stability and Emission Characteristics of Oxygen-Enriched Ammonia Combustion in a Swirl Combustor. *Energy*, **324**, Article 135829. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135829

[20] Mei, B., Zhang, X., Ma, S., Cui, M., Guo, H., Cao, Z., *et al*. (2019) Experimental and Kinetic Modeling Investigation on the Laminar Flame Propagation of Ammonia under Oxygen Enrichment and Elevated Pressure Conditions. *Combustion and Flame*, **210**, 236-246. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.08.033

[21] Rong, H., Zhao, H. and Cai, T. (2024) Thermodynamic and Emission Analysis of an Ammonia Fueled Micro-Combustor with Double-Channel Reverse Flow Structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, **49**, 1303-1314. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.083

[22] Tolouei, A. and Gharehghani, A. (2024) Numerical Investigation of Premixed Methane-Ammonia Combustion in a Mesoscale Porous Combustor. *Fuel*, **366**, Article 131427. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131427

[23] Ni, S. and Zhao, D. (2022) NO_x Emission Reduction in Ammonia-Powered Micro-Combustors by Partially Inserting Porous Medium under Fuel-Rich Condition. *Chemical Engineering Journal*, **434**, Article 134680. https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134680

[24] Cai, L., Jia, E., Zhao, D., *et al*. (2026) Effect Analysis on Thermal Performance Enhancement and NO_x Emissions Reduction in Hydrogen/Ammonia-Powered Micro-Combustors with Porous Media Based on Multi-Field Synergy Theory. *Renewable Energy*, **256**, Article 124294. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124294

[25] Liu, B., Wang, K., Kang, Z., Xu, L., Wang, X., Chen, W., *et al*. (2025) Combustion Performance Optimization and NO_x Control in an NH_3/O_2 Micro-Combustor with Porous Medium. *International Journal of Hydrogen Energy*, **101**, 1136-1148. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.334

[26] Vignat, G., Akoush, B., Toro, E.R., Boigné, E. and Ihme, M. (2023) Combustion of Lean Ammonia-Hydrogen Fuel Blends in a Porous Media Burner. *Proceedings of the Combustion Institute*, **39**, 4195-4204. https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.054

[27] Huang, Z., Yin, R., Zhang, F., Peng, Q., Yang, H., Wang, H., *et al*. (2025) Experimental and Numerical Investigation on

Optimizing Energy Efficiency and Emissions Reduction of Ammonia Fueled Combustion with Addition of Hydrogen and Porous Media. *Renewable Energy*, **242**, Article 122422. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122422

[28] Li, W., Zeng, J., Bian, G. and Cai, T. (2025) Effect Analysis of Combustor Geometry Aspect Ratio on Energy Conversion, NO_x Emission and Flame Stability in Ammonia/Hydrogen Premixed Combustion. *Applied Thermal Engineering*, **280**, Article 128102. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128102

[29] Vignat, G., Zirwes, T., Boigné, É. and Ihme, M. (2024) Experimental Demonstration of a Two-Stage Porous Media Burner for Low-Emission Ammonia Combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, **40**, Article 105491. https://doi.org/10.1016/j.proci.2024.105491