

中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目： 氨燃烧研究进展
作者： 周上坤，杨文俊，谭厚章，王毅斌，王金华，王学斌，杨富鑫
网络首发日期： 2020-11-02
引用格式： 周上坤，杨文俊，谭厚章，王毅斌，王金华，王学斌，杨富鑫. 氨燃烧研究进展. 中国电机工程学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20201030.1805.005.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

氨燃烧研究进展

周上坤，杨文俊，谭厚章，王毅斌，王金华，王学斌，杨富鑫

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，陕西省 西安市 710049)

Research Progress of Ammonia Combustion

ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, TAN Houzhang, WANG Yibin, WANG Jinhua, WANG Xuebin,

YANG Fuxin

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Hydrogen energy is an important driving force for achieving a low-carbon economy, but it cannot be stored over long distances on a large scale. The liquefaction pressure of ammonia at room temperature is much lower than that of hydrogen, which can be used as an excellent carrier of hydrogen energy. At the same time, ammonia can be synthesized directly by the electrochemical method, realizing the global transportation of renewable energy. The direct combustion of ammonia can reduce the loss during the process of cracking into hydrogen, but the direct combustion of ammonia as fuel also has low flame speed and high NO_x emissions. To overcome these challenges, it is necessary to investigate the flame propagation characteristics and chemical reaction kinetics of ammonia combustion. Additionally, this paper also summarizes the development prospects of ammonia combustion at home and abroad and the applications of ammonia in internal combustion engines, gas turbines, boilers, and porous media combustors.

KEY WORDS: ammonia combustion; carbon-free fuel; flame propagation characteristics; chemical reaction kinetics; emission characteristics

摘要：氢能是实现低碳经济的重要推动力，但 H₂ 无法大规模储存和长距离运输。NH₃ 常温下的液化压力远低于 H₂，可以作为氢能的优良载体。同时，通过电化学生成氨的方法可以直接合成 NH₃，实现可再生能源的全球运输。将 NH₃ 直接燃烧可以减少裂解为 H₂ 过程中的损耗，但将

NH₃ 直接作为燃料使用还存在火焰速度低、NO_x 排放高的缺点。为了克服这些挑战，需要研究氨燃烧过程中火焰传播特性以及化学反应动力学。此外，本文还综述了氨燃烧在国内外的发展前景以及 NH₃ 在内燃机、燃气轮机、锅炉以及多孔介质燃烧器中的应用。

关键词：氨燃烧；无碳燃料；火焰传播特性；化学反应动力学；排放特性

0 引言

根据中国石油企业协会发布的《中国油气产业发展分析与展望报告蓝皮书(2019-2020)》^[1]可知，2019 年我国原油进口同比增长 9.5%，石油对外依存度达 70.8%；天然气进口同比增长 6.9%，对外依存度达 43%，我国石油、天然气对外依存度极高。每当中国北方进入供暖季，天然气的需求量就会大幅增长，出现供不应求的局面，天然气价格也会大幅上涨，经济成本提高，能源安全面临极大挑战。

国内学者从经济性、安全性、环保性以及气候保护性的角度对使用氨气替代天然气进行了可行性评估^[2]。研究发现，利用现有天然气管道运输

NH₃，液氨运输的能量能够达到天然气的 1.5 倍。此外，仅过剩的氨产能就能将天然气对外依存度降低 8%，充分利用这一部分能量能提高天然气的供应安全性。理想情况下，NH₃ 完全燃烧时仅产生 N₂ 和 H₂O，比起 CH₄ 燃烧不存在任何碳排放，尾气排放总量也相当，因此其环保性和气候保护性同样优于天然气^[3]。

中国的可再生能源较为丰富，且发展较为迅速。2017 年风力发电占总发电量的 4.7%，光伏发电占总发电量的 1.8%。当风电或光电等可再生能源大量接入电网时，风电和光电的不稳定性会对电网的安全性和供电可靠性产生威胁，造成电网大量的弃风、弃光。2017 年当年度全国弃水、弃风、弃光达 1007 亿 kW·h^[4]。如果风电站、光伏电站能配备储能系统，将克服发电间歇性的问题，可以有效地规避风电和光电间断性、不确定性等缺点，增强电网的调峰能力。机械，电，热和化学方法等均被提出用来存储电能。然而，锂电池等存储解决方案无法为电网这样规模的能量存储提供所需的容量^[5-7]，抽水蓄能和压缩空气储能方法又受到其部署的地质限制，只有化学储能方法能够允许在任何位置长时间地存储电网规模的能量^[8-10]。

氢储能技术正是在这一背景下发展起来的，然而，H₂ 存在无法大规模储存和长距离运输的缺点。NH₃、H₂ 和 CH₄ 等典型燃料的理化性质如表 1 所示。从表 1 可知，H₂ 在常温下（25 °C）液化需要 70MPa，NH₃ 在常温下（25 °C）液化仅需要 1.03MPa，这就使得 H₂ 压缩、储运的成本远高于 NH₃。以单位携带的 H₂ 质量计算，NH₃ 半年的储氢成本仅有 0.54\$/kg H₂，而 H₂ 半年的储氢成本高达 14.95\$/kg H₂^[11]。总的来说，氨燃料的优势可以归纳为以下几点^[12]：

(1) 属于无碳燃料，没有温室气体排放，并且可以通过可再生能源通过无碳的方法合成；

(2) 能量密度为 22.5MJ/kg，与化石燃料相当（低阶煤热值约为 20MJ/kg，天然气热值约为 55MJ/kg，H₂ 热值为 142MJ/kg）；

(3) 液化压力仅为 1.03MPa，很容易液化；

(4) 每年约有 1.8 亿吨 NH₃ 被生产和运输，因此有成熟可靠的基础设施用于 NH₃ 的储存和运输（包括管道运输、公路运输、铁路运输和船舶运输）。

可再生能源产生的这部分弃电或波谷电力可以通过制氨的方式存储或外运，在电力不足时将其用于发电或者供热。通过电化学方法替代煤气化和天然气重整的方法来合成 NH₃，还可以实现 NH₃ 在全生命周期内的零碳排放。研究表明，以 NH₃ 作为储能介质在全生命周期内总储能效率最高可达 40%^[13]。

表 1 典型燃料的理化性质^[12]

Tab. 1 Physical and chemical properties of typical fuels

理化性质	单位	NH ₃	H ₂	CH ₄
低位体积热值	MJ/m ³	14.3	10.8	35.9
低位质量热值	MJ/kg	18.8	121	50
常压液化温度	°C	-33.4	-253	-161
常温液化压力	MPa	1.03	70	25
最大层流火焰速度	m/s	0.07	2.91~3.51	0.37
最低着火温度	°C	650	520	630
火焰极限	N/A	0.63~1.40	0.1~7.1	0.5~1.7

日本由于缺乏能源，在过去几十年中一直在寻找可再生能源作为化石能源的替代品。他们也意识到了氨作为氢载体的潜力，并在“氢经济”的基础上提出了“氨经济”。为了实现日本政府设定的到 2050 年将温室气体排放降低 80% 的这一长期目标，他们已经针对氨燃料在燃气轮机、电站锅

炉、工业锅炉等方面的应用开始了全面的研究^[14-17]。

澳大利亚拥有丰富的风能与太阳能等可再生能源，他们计划投资 100 亿美元建立一个“亚洲可再生能源中心”的风能和太阳能联合发电厂，该项目共能产生约 9000MW 的电力，其中大部分电力将通过海底电缆流向印度尼西亚，剩余部分电力将用来合成 NH_3 ，经过液化之后通过船舶运输进行出口，这一项目与氨燃烧技术相结合有望实现可再生能源的全球流动^[18]。

美国则更多地研究用于消纳风能的小规模合成氨工艺，还较为缺少将 NH_3 直接作为燃料的相关研究及资助。在氨储能以及氨燃料直接燃烧方面，英国卡迪夫大学、牛津大学与德国西门子公司同样开展了广泛的研究，他们开发出了燃气轮机旋流燃烧器，并在此平台上对 NH_3 在空气中的纯燃、 NH_3 与 CH_4 混燃、 NH_3 与 H_2 混燃进行了广泛地实验研究^[19-22]。总的来说，氨燃烧技术发展较快的国家和地区主要是资源匮乏的国家（日本）、可再生能源丰富的国家（澳大利亚）以及可再生能源利用率高的地区（欧洲）。通过发展氨燃烧技术，日本能够降低对化石燃料的依赖以及实现能源进口的多样化，提高能源安全；对澳大利亚来说，电化学合成氨工艺的进步以及氨燃烧技术的发展则能帮助实现可再生能源的出口，使其成为新能源大国；欧洲则积极推进碳排放交易市场的建立，通过碳排放交易市场大力促进无碳燃料的应用。

国内针对氨燃料直接燃烧的研究还较少，已有的应用研究主要集中于内燃机领域^[23, 24]。中科院^[25]、上海交大^[26]以及浙江大学^[27, 28]均有少量关于 NH_3 火焰传播特性和化学反应动力学的基础研究，但均未涉及燃烧器等应用层面的开发。

1 氨燃烧的火焰传播特性

1.1 氨燃烧层流火焰传播特性

层流燃烧速度是反应燃料燃烧特性的重要参数，在验证燃烧化学反应动力学模型和确定湍流火焰传播速度等方面发挥着重要作用^[29, 30]。 NH_3 /空气预混火焰的未拉伸层流火焰速度 S_L 已经得到了广泛地研究，本文将 Hayakawa^[31]、Takizawa^[32]、Pfahl^[33]、Zakaznov^[34]、Ronney^[35]和 Li^[36]等人的研究结果汇总于图 1，并将这些结果经过光滑和三阶多项式拟合处理后得到了 NH_3 层流燃烧速度随当量比的变化规律。从图 1 可知， NH_3 与空气预混火焰的最大未拉伸层流火焰速度 S_L 接近 7cm/s，在当量比为 1.05 附近时达到峰值。与此同时， CH_4 的最大未拉伸层流火焰速度 S_L 约为 35cm/s， H_2 的这一数值则在 3m/s 左右^[37]，这也说明了 NH_3 的反应性要明显弱于 CH_4 和 H_2 。Mathieu 和 Petersen^[38]针对 NH_3 在空气中的未拉伸层流火焰开发了详细的反应机理，得到了容积热释放速率和火焰厚度等结果，并与 CH_4 运用 GRI Mech 3.0 机理的结果作对比，结果显示 NH_3 在空气中的容积热释放速率要低于 CH_4 ，火焰厚度为 2.85mm， CH_4 的火焰厚度为 0.44 mm，这也与 NH_3 层流火焰速度低的结果相一致。

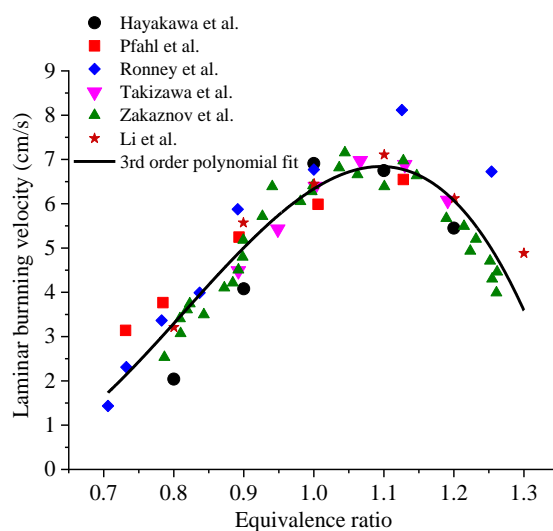


图 1 未拉伸层流火焰速度随 NH_3 当量比及压力变化图

Fig. 1 Unstretched laminar flame speed with changes of equivalence ratio and pressure

1.2 氨燃烧湍流火焰传播特性

湍流燃烧速度反映了燃料燃烧的快慢程度,这一参数对燃烧器和发动机的设计和优化具有重要意义^[39, 40]。Ichikawa 等^[41]人研究了高压下(0.5MPa)NH₃/CH₄的湍流火焰传播特性,NH₃掺混比例(热值)最高为20%,研究发现:湍流燃烧速度与未拉伸层流燃烧速度之比(S_T/S_L)随NH₃掺混比例提高而增加,NH₃/CH₄火焰表面密度的分布是对称的,但最大火焰表面密度随掺氨比例的提高而降低,火焰表面密度的降低可能会引起 S_T/S_L 的降低。NH₃/CH₄湍流火焰中,火焰面积对 S_T/S_L 变化的影响占主导地位,火焰面积减小的影响大于热扩散不稳定性的影响。Xia 等^[42]人研究了富氧条件下NH₃的预混湍流火焰速度,O₂浓度设置为40%,研究发现湍流燃烧速度会随着湍流强度的提高而增加,这是因为湍流强度的增加带来了火焰表面积的增加,他们认为在相同的湍流度下,热扩散不稳定性的差异导致了NH₃贫燃火焰的 S_T/S_L 比NH₃富燃火焰的更大。目前,氨燃烧湍流火焰传播特性的机理还较为匮乏,需要更为全面的研究指导燃烧器和发动机设计。

1.3 氨燃烧火焰增强措施

NH₃的层流火焰速度较低,但是H₂、CH₄、柴油等碳氢燃料的层流火焰较高,所以研究者们想到了将NH₃与碳氢燃料进行掺混以提高NH₃燃烧速率的方法。

Lee 等^[43]人研究了氨氢混合气的火焰传播特性,结果显示无论贫燃和富燃,H₂的添加均有利于提高NH₃火焰的层流火焰速度。Ichikawa 等^[37]人研究了氨氢混合气的层流火焰传播特性,他们发现当H₂掺混的体积分数达到40%时,混合气的层流火焰速度达到了35cm/s,这与CH₄在空气中燃烧时的层流火焰速度大致相当。混合气的Markstein长度在H₂掺混比例低于40%以及压力

低于0.3MPa时一直呈下降趋势,这说明低H₂掺混比例和高进气压力均不利于火焰稳定,Li 等人也发现了相似的层流火焰速度变化趋势^[44]。Lhuillier 等^[45]人则研究了初始温度对氨氢混合气层流火焰传播特性的影响,结果表明层流火焰速度随着混合气中H₂含量以及温度的升高而增加,并且始终在当量比为1.1附近达到最大值。

Henshaw 等^[46]人则研究了在NH₃中掺混CH₄的火焰传播特性,当NH₃的掺混量达到4%(体积分数)时,混合气的层流火焰速度下降了10~20%,但在他们的研究中NH₃的最大掺混量只有5%,适用范围较窄。Okafor 等^[47]人将高压(0.5MPa)下将NH₃的最大掺混量提高到了30%(热值),研究结果显示随着NH₃掺混比例和压力的提高,混合气的层流火焰速度均呈现下降趋势;在贫燃工况下,混合气的Markstein长度随着NH₃掺混比例的提高而降低,在富燃工况下,混合气的Markstein长度则随着NH₃掺混比例的提高而增加。Xiao 等^[48]人继续将NH₃掺混比例逐步提高至100%,并研究了400~800K高温以及1~20atm高压下的层流火焰速度,结果表明温度的升高能明显提高层流火焰速度,压力的提高则会降低层流火焰速度,NH₃火焰中OH+H+O+NH₂自由基的总浓度与层流火焰速度几乎呈线性增加的关系。

Han 等^[27]人在热流量炉中测量了NH₃、NH₃+H₂、NH₃+CH₄和NH₃+CO在不同掺混比例和不同当量比下的层流火焰速度,NH₃、NH₃+H₂、NH₃+CH₄在不同工况下的层流火焰速度与前面的研究基本相似,研究发现随着NH₃的添加量逐渐增加,NH₃与CO混合气的层流火焰速度先增加后减小,当NH₃的体积分数为85%时,混合气的层流火焰速度最大,约为40cm/s,这速度远远大于纯NH₃和纯CO的层流火焰速度,这预示着在CO中添加NH₃可以同时改善二者的层流火焰速度。随后,他们又研究了NH₃与合成气掺混的层

流火焰速度变化，合成气分别为 5vol% H₂+95vol%CO 以及 50vol%H₂+50vol%CO，研究发现前者的层流火焰速度变化规律与 NH₃+CO 的层流火焰速度变化规律相似，后者则与 NH₃+H₂ 的层流火焰速度变化规律相似，在研究机理模型时他们发现 C-N 组分的相互作用几乎不影响 NH₃/合成气的层流火焰速度^[28]。

另一种提高 NH₃ 层流火焰速度的方法是富氧燃烧技术。Liu 等^[49]人甚至研究了纯氧中 NH₃ 的火焰传播特性，实验中最大层流火焰速度出现在理想当量比处，可以达到 1.09m/s，火焰厚度则仅有 0.2mm。Li 等^[50]人通过 Chemkin 模拟了 21%~30% O₂ 范围内 NH₃ 的层流火焰速度，当 O₂ 浓度达到 30%时，层流火焰速度可以达到 38.6cm/s，是 NH₃ 火焰的 2.6 倍，主要是因为 O₂ 浓度的增加提高了反应区 OH, H, O 和 NH₂ 自由基的反应速率。Mei 等^[26]人则在更宽的 O₂ 浓度范围内 (21%~45%) 研究了不同压力下 NH₃ 富氧层流火焰传播特性，他们发现富氧火焰能够有效去除浮力效应。此外，富氧 NH₃ 火焰的层流火焰速度同样会随着压力的升高而降低，但与碳氢燃料相比，其受压力的影响相对较小。Wang 等^[51]人的研究范围则涉及 60%~100% 的 O₂ 浓度范围，温度范围为 303~393K，他们发现 O₂ 浓度和温度的提高均能显著提高层流火焰速度。Liu 等^[52]人通过实验和数值模拟的方法研究了 NH₃/CH₄ 在富氧条件下的层流火焰速度变化，其中 NH₃ 比例最高达到 CH₄ 的 20%，O₂ 浓度范围为 35%~45%，他们发现贫燃时含氮反应中 NO 的氧化与还原反应对层流火焰速度的影响最大，理想当量比时 NO 的还原反应能提高层流火焰速度，而富燃时则是 N 自由基与 NO/OH 的反应最为重要。

总之，H₂ 作为 NH₃ 的掺混燃料能够最大程度地提高层流火焰速度，但 H₂ 的使用成本比天然气高很多。与此同时，生物质气、煤气化气等气体燃

料的层流火焰速度几乎不低于天然气，燃料成本也低于天然气，并且来源比天然气更加稳定，受市场价格浮动影响较小，与 NH₃ 进行掺混有望能取得更好的效果。目前仅有 NH₃ 与合成气进行掺混的少量研究，包含稀释气 (CO₂ 以及 N₂) 成分的生物质气或煤气化气与 NH₃ 混燃的研究亟待补充。

2 氨燃烧化学反应动力学研究

2.1 机理模型

为了更好地开发氨燃烧的相关技术，必须对 NH₃ 燃烧过程中详细的化学反应动力学有更深入的研究。早在 1960 年代，学者们就对含氨火焰的化学反应进行了研究，以便能更深入地了解 NH₃ 火焰的动力学^[53,54]。总体来说，早期关于 NH₃ 氧化化学反应动力学的研究主要集中在燃料型 NO_x 的形成以及 NH₃ 作为选择性非催化还原 (SNCR) 反应的还原剂^[55-57]。

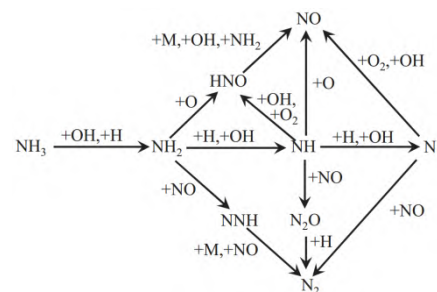


图 2 Miller 模型的 NH₃ 氧化路径^[58]

Fig. 2 NH₃ oxidation pathway by Miller et al.

最早的详细的 NH₃ 燃烧化学反应动力学机理由 Miller 和 Bowman^[58-60]在 NH₃/O₂ 和 NH₃/H₂/O₂ 火焰的实验基础上提出，包括了 22 组分和 98 基元反应，其中 NH₃ 氧化路径如图 2 所示。他们的研究中详细给出了 NO_x 的形成和消耗机理，并证明了 NO/N₂ 的生成主要取决于 NH_i (i=0, 1, 2) 自由基，NH_i 自由基通过 HNO 会被氧化为 NO。Miller 和 Bowman 的机理在贫燃和微富燃的工况下能很好地预测 Maclean^[54], Green^[61], Fenimore^[53]等人测量的组分分布以及 Murray 等^[62]人测量的层流

火焰速度，但由于 NH_3 热解机理的不完善，他们的机理在富燃时与实验值相差较大。

基于 Miller 等^[59]人的模型，Lindstedt 等人在 NH_3 平面层流预混火焰实验的基础上也提出了 NH_3 燃烧的化学动力学模型，模型的重点关注在 NO 的形成与还原机理，他们发现不同 NO 生成通道的相对重要性完全取决于火焰条件：(1) 对于所有火焰， $\text{NH}_2+\text{O}=\text{NH}+\text{OH}$ 的反应重要性都是显著的，在纯氨火焰中， $\text{NH}+\text{OH}=\text{N}+\text{H}_2\text{O}$ 的反应重要性提高；(2) 在纯氨火焰和掺氢贫燃火焰中， NO 主要由 NH_2 和 NH 通过 HNO 中间体生成；(3) NO 向 N_2 的还原主要由 NH_2 和 N 参与的反应控制， NH 通道的重要性处于次级，掺氢富燃火焰中 $\text{N}+\text{NO}=\text{N}_2+\text{O}$ 的反应最为重要；(4) 碳氢自由基通过 O 、 H 和 OH 自由基池间接影响 NH_i ($i=0, 1, 2$) 自由基对 NO 还原的相对重要性变化^[63-65]。

Konnov 的动力学模型在预测 NO_x 排放方面有良好的表现^[66-68]。他们认为 Miller^[69]机理缺少了 NH_i 自由基通过聚合反应形成 N_2H_3 和 N_2H_4 的子反应机理，在加入了这部分子反应机理之后，将模拟结果与 Davidson 等^[70]人在激波管中 NH_3 热解的测量结果相比对，结果发现模拟对 NH 和 NH_2 自由基的上升时间和峰值浓度的预测更准确，但预测值与 2800K 以上的实验值有很大的偏差。只有显著降低 $\text{NH}_3+\text{NH}_2=\text{N}_2\text{H}_3+\text{H}_2$ 反应的速率常数才能提高模型与实验数据的一致性。他们的模型也在不断的更新，在最新版本中将 $\text{H}/\text{N}/\text{O}$ 子机理进行了升级，并且改进了 NCN 的生成路径，实现了对 NO 浓度的准确预测^[71]。

Skreiberg 等^[72]人在前人对火焰中 NH_3 氧化和 NH_3 通过 SNCR 机理还原 NO 的研究基础上，建立了 H_2 、 CO 和 CH_4 存在时 NH_3 氧化的详细化学反应动力学机理，其中 $\text{H}/\text{N}/\text{O}$ 子反应机理来自于 Miller^[59]机理。由于低温以及 NO 的存在，从 NH_3 到 N_2 最重要的反应路径是 $\text{NH}_3\rightarrow\text{NH}_2\rightarrow\text{N}_2$ (直接

或间接通过 NNH 中间体实现)，而不是高温下更重要的 $\text{NH}_3\rightarrow\text{NH}_2\rightarrow\text{NH}\rightarrow\text{N}$ 的反应路径，即燃料 N 向 N_2 的转化主要是通过 NH_2+NO 的反应进行的。此外，在 CH_4 存在时 NO 与 CH_3 反应会部分转化为 HCN 。然而，这一机理缺少了烃与胺 (NH_i , $i=0, 1, 2$) 相互作用的子反应机理。

Duynslaegher 等^[73]人为了准确预测燃用氨氢混合气的火花点火发动机的 NO_x 排放特性，将 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ 平面层流预混火焰的实验结果与模型结果相对比，发现 Konnov 模型与实验结果很接近。但 Konnov^[74]模型高估了 NH_2 自由基的浓度，低估了 N_2O 的浓度。他们在 Konnov 模型的基础上，对 $\text{NH}+\text{NO}=\text{N}_2\text{O}+\text{H}$ ， $\text{N}_2\text{O}+\text{H}=\text{N}_2+\text{OH}$ ， $\text{NH}_2+\text{H}=\text{NH}+\text{H}_2$ ， $\text{NH}_2+\text{NH}_2=\text{N}_2\text{H}_2+\text{H}_2$ 四个基元反应的速率常数进行了修正，然后进行了简化得到了 19 组分，80 基元反应的模型，模型提高了对 NO 、 N_2O 和 NH_2 预测的准确性。

Tian 等^[25]人测量了 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ 低压预混火焰的燃烧中间体和燃烧产物，建立了 NH_3/CH_4 火焰的详细动力学机理，包含了 84 组分，703 基元反应。机理中 NH_3 氧化的子机理来自于 Skreiberg^[75]和 Dagaut^[76]， CH_4 氧化以及这些组分之间相互作用的子反应机理来自于 Glarborg^[77]和 Rasmussen^[78, 79]。敏感性分析显示 $\text{H}+\text{O}_2=\text{O}+\text{OH}$ 、 $\text{NH}_2+\text{O}=\text{HNO}+\text{H}$ 、 $\text{NH}_2+\text{NO}=\text{N}_2+\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}+\text{NO}=\text{N}_2\text{O}+\text{H}$ 对 NO 和 N_2O 的转化起着重要作用， CH_3 、 $^1\text{CH}_2$ 、 $^3\text{CH}_2$ 、 CH_2O 、 NH_2 、 NH 和 HNO 是 CH_4 和 NH_3 氧化的关键组分。

Mendiara 等^[80]人在 Tian^[25]模型的基础上，进一步完善了含氮自由基与 CO_2 之间以及烃-胺之间相互作用的子反应机理，得到了 97 组分，779 基元反应的化学反应机理模型。机理显示 NO 主要通过中间产物 HNO 形成， HNO 的形成主要通过 NH_2+O 反应，其次通过 NH_2+H 反应。 N_2 的形成则主要是 NH_2/NH 与 NO 的反应。 CO_2 的存在

会通过反应 $\text{CO}_2+\text{H}=\text{CO}+\text{OH}$ 消耗 H 自由基,生成 OH 自由基,OH/H 比提高有助于形成 NO。此外,高浓度的 CO 通过 NH_2+CO 反应促进 HNC 的生成,但由于 O 和 H 自由基浓度的降低, NH_2+O 生成 HNO 和 NH_2+H 生成 NH 的反应受到抑制。与此同时, NH_2 与碳氢化合物/甲胺池中物种的反应产生了还原态的氮,这些反应最终降低了 NH_2 通过其他途径(如 HNO 或 NH)形成 NO 的可能性,增加了形成 N_2O 的可能性。

Mathieu 等^[38]人则通过激波管实验研究了高温(1560~2455K)高压(1.4、11 和 30atm)下 NH_3 的着火延迟时间,并建立了 NH_3 氧化的反应机理,他们选取了 Dagaut^[81]模型中 NH_3 的子反应机理,并更新了 $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{CO}$ ^[82], N_2O ^[83], NO_2 和 NNH 的子反应机理^[84-86],该机理模型在预测高温条件下 NH_3 氧化的着火延迟时间取得了很好的效果。

Nakamura 等^[87]人在温度可控的微流反应器中使用弱火焰来研究低温下 NH_3 火焰的着火特性,实验最大壁温为 1400K,当量比为 0.8、1.0 和 1.2。他们以 Miller 和 Bowman^[59]的机理模型为基础,针对 N_2H_x 子反应机理进行了广泛的更新,并确定了低温下弱火焰反应区中 N_2H_x 子反应机理的重要性。该模型能很好地预测弱火焰中的 NH_3 , O_2 和 H_2O 组分分布,弱火焰反应区后面的 NO 和 N_2O 摩尔分数的最终值能够很好地预测,但是弱火焰反应区中这些组分的摩尔分数都被高估了。因此,仍然需要进一步改善与 NH_3 着火相关的化学反应动力学。

Okafor 等^[88]人发现 Tian 机理很大程度上低估了未拉伸层流火焰速度,主要是因为 HCO 转化为 CO 的机理中,Tian 等^[25]人认为 $\text{HCO} (+\text{H}, \text{OH}, \text{O}_2) = \text{CO} (+\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{HO}_2)$ 的重要性明显高于 $\text{HCO} = \text{CO} + \text{H}$ 。他们在 GRI Mech 3.0 和 Tian 机理的基础上开发了详细的 NH_3/CH_4 火焰,燃料中 NH_3 的热值在 0~30%之间,当量比范围为 0.8~1.3。他们

认为 NH_3/CH_4 火焰燃烧速度的变化主要是通过影响 H 和 OH 自由基浓度来实现的。 NH_3 氧化途径的主要限速反应为: $\text{NO}+\text{NH}_2=\text{NNH}+\text{OH}$, $\text{NH}_2+\text{O}=\text{HNO}+\text{H}$ 和 $\text{HNO}+\text{H}=\text{NO}+\text{H}_2$, 这三个反应对 NH_3/CH_4 火焰中 H 和 OH 自由基的浓度具有最重要的影响。在之后的简化机理中,Okafor^[47]等人进一步拓宽了当量比的范围(0.7~1.3)和压力范围(0.1~0.5MPa),很好地预测了层流火焰速度、组分分布以及 NO 和 CO 等燃烧产物。

Shrestha 等^[89]人则首先开发了专门用于 NH_3/H_2 预混火焰的机理模型,他们的反应机理考虑了 NO_x 的形成以及还原过程,并通过层流火焰速度和着火延迟时间验证了模型。当 NO_2 掺杂进燃料中时,通过 $\text{NO}_2+\text{HO}_2=\text{HONO}+\text{O}_2$ 反应可以加速 H_2 自燃,然后通过 HONO 热分解,或通过 $\text{NO}_2+\text{OH}=\text{NO}+\text{HO}_2$ 减少 H_2 氧化,因此 HO_2 的浓度对于反应路径至关重要。

Mei 等^[26]人通过实验测量了 NH_3 在富氧和高压工况下的层流火焰速度,利用更新的重要反应的速率常数,建立了 38 组分和 265 基元反应的氨燃烧动力学模型。模型中的 NH_3 子反应机理选自 Shrestha 模型^[89]。模型通过层流火焰速度的实验数据,以及其他文献中的着火延迟时间得到验证。模拟和实验结果显示, O_2 浓度升高导致绝热火焰温度升高,H、OH 和 NH_2 等关键自由基的浓度更高,带来火焰传播速度的增加。对于 NH_3 及其主要分解产物(如 NH_2 和 NH),在贫燃火焰中其与含氧物质(如 OH、O、 O_2 和 NO)的反应更为重要,而与 H, NH 和 NH_2 的反应则在富燃火焰中更为重要。 $\text{NH}_3/\text{O}_2/\text{N}_2$ 火焰表现出明显的压力相关性,而该压力相关性比碳氢燃料和生物质燃料火焰的压力相关性弱。

Han 等^[27, 28]人则通过热通量法先后测量了 $\text{NH}_3+\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{CO}+$ 空气以及 NH_3+ 两种合成气(5vol% H_2 +95vol% CO , 50vol% H_2 + 50vol% CO)

的层流火焰速度，建立了 NH_3 +合成气火焰的动力学模型，模型中的 H/C/O 子反应机理来自 Varga 等^[90]人的 ELTE-syngas 机理。他们的实验与模拟结果对照显示含 C 的组分和含 N 组分之间的相互作用对于 NH_3 火焰并不重要，因此删除了 C-N 相互作用的子反应机理。

其他的还有 San Diego 等^[91]模型，该模型旨在关注碳氢燃料和含氮燃料的火焰，高温着火，他们最近更新了模型中的氮化学子反应机理，在预测 NH_3 火焰时取得了较好的结果。

总体来说，Konnov^[66]模型和 Peter Glarborg^[69]模型在预测 NO 排放时取得了较好的结果，但在预测层流火焰速度时存在很明显的高估。Okafor^[88]模型、Shrestha^[89]模型和 San Diego^[91]模型在预测不同掺混比、不同温度、压力下 NH_3 + CH_4/H_2 的层流火焰速度的准确度相对最高，但所有这些模型在富燃工况下均与实验值偏差较大，氨燃烧的化学反应动力学还需继续深入研究，关键基元反应的速率常数还需后续更多的实验来确定。此外，现有的模型几乎都无法同时准确预测 NO_x 浓度、层流火焰速度以及着火延迟时间，每个模型都有最优的适用对象，未来这些机理模型还需要有更强的适应性。

2.2 贫燃反应动力学和富燃反应动力学

NH_3 氧化的氮化学反应动力学受当量比影响变化较大，通常又可以分为贫燃反应动力学和富燃反应动力学。图 3 是 Mei 等^[26]人在富氧工况下得到的 NH_3 贫燃和富燃的反应速率分析，当量比分别为 0.7 和 1.5，常温常压，图中箭头上的百分比和粗细代表了单个反应路径相对于 $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_2$ 总反应速率的比值。本节在上文机理模型的基础上详细总结了 NH_3 贫燃反应动力学和富燃反应动力学，结合图 3 将其分为以下 3 个主要部分：(1) NH_3 的脱氢反应；(2) NH_i ($i=0, 1, 2$) 的氧化反应；

(3) NH_i+NH_j ($i, j=0, 1, 2$) 的聚合反应。

$\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_2 \rightarrow \text{NH} \rightarrow \text{N}$ 被称为 NH_3 的脱氢反应，这一系列的脱氢过程主要依靠与 OH 自由基反应实现，其次是与 O 和 H 自由基反应，这一反应在贫燃火焰中尤为明显，富燃火焰中由于 O/H 自由基池中 H 自由基的比例升高（源于 NH_3 的脱氢反应）， $\text{NH}_i+\text{H}=\text{H}_2+(\text{N}, \text{NH})$ 反应的重要性得到提高^[92]。

NH_i 的氧化过程受到 O/H 自由基浓度的影响会产生截然相反的两种结果。贫燃火焰中 O 自由基浓度较高， NH_i 可以通过 HNO 中间体形成 NO。无论是贫燃火焰还是富燃火焰，HNO 的中间通道都是 NH_3 火焰中 NO 生成的主要路径^[64]。HNO 的产生途径主要有三种：(1) $\text{NH}_2+\text{O}=\text{HNO}+\text{H}$ ；(2) $\text{NH}+\text{OH}=\text{HNO}+\text{H}$ ；(3) $\text{NH}+\text{O}_2=\text{HNO}+\text{O}$ 。其中路径 1 是最主要的，路径 2 和 3 则是次级路径。HNO 产生后在高温下会发生热分解，通过以下反应生成 NO： $\text{HNO}+(\text{H}, \text{OH}, \text{O}_2)=\text{NO}+(\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{HO}_2, \text{H})$ 。研究发现，当量比为 0.9 时 O/H 自由基的浓度比最大，因此这一工况下燃烧产物中 NO 的浓度最高。富燃火焰中 H 自由基浓度较高， NH_i 会与通过 HNO 渠道产生的 NO 直接反应，从而还原 NO，反应主要有三种路径：(1) $\text{N}+\text{NO}=\text{N}_2+\text{O}$ ；(2) $\text{NH}+\text{NO}=\text{N}_2\text{O}+\text{H}$ ；(3) $\text{NH}_2+\text{NO}=\text{N}_2+\text{H}_2\text{O}$ (R1) 或 $\text{NNH}+\text{OH}$ (R2)。这三种 NO 还原路径中第三种路径的两个反应是最主要的反应路径，并且在贫燃时会更加明显，高温和富燃火焰则能提高第一种路径的反应速率。

在富燃火焰中， NH_i+NH_j 聚合反应的地位十分突出，这一反应能大大降低 NH_i 通过氧化反应生成 NO 的几率^[93]。 NH_i+NH_j 生成 N_2 的反应路径主要如下： $\text{NH}_2+(\text{NH}_2, \text{NH}) \rightarrow \text{N}_2\text{H}_2+(\text{M}, \text{H}) \rightarrow \text{NNH}+(\text{M}, \text{O}, \text{O}_2) \rightarrow \text{N}_2$ 。 NH_i+NH_j 的聚合反应会生成中间体 NNH，NNH 与 O 结合也可能导致 NO 产生，NNH 与 O 的反应路径主要有以下三种：

(1) $\text{NNH} + \text{O} = \text{NH} + \text{NO}$; (2) $\text{NNH} + \text{O} = \text{N}_2\text{O} + \text{H}$; (3) $\text{NNH} + \text{O} = \text{N}_2 + \text{OH}$ 。Dean^[94]认为前两个路径更为重要,反应速率比第三个路径大一个数量级,Konnov和Klippenstein则认为路径1被严重高估了,路径2较有竞争力,路径3则是最重要的^[68, 95]。总的来说,NNH与O的反应对NO生成的影响相对较小,因为聚合反应在NH₃富燃火焰中更为明显,但富燃火焰中O自由基的浓度较低,不具备大量生成NO的条件。

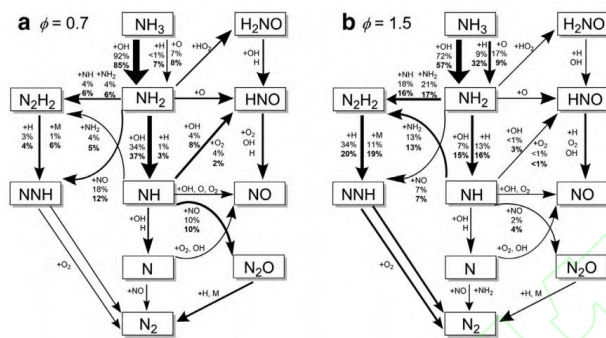


图3 NH₃ 贫燃和富燃时的反应速率分析

Fig. 3 Rate of production analysis in the lean and rich NH₃ flames

2.3 NO_x 控制措施

Lyon^[55]发现在一定的温度和 O₂ 浓度范围内,火焰中生成的 NO_x 可以重新实现脱除,这一反应被称为热脱硝反应,即选择性非催化还原反应(SNCR, selective non-catalytic reduction),其原理就是上文提及的 NO 还原的第三种路径: $\text{NH}_2 + \text{NO} = \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (R1) 或 $\text{NNH} + \text{OH}$ (R2)。SNCR 反应的维持与 $\alpha = k_1 / (k_1 + k_2)$ 有关,其中 k_1 和 k_2 分别为 R1 和 R2 的速率常数。R1 反应可以直接或间接的产生 OH 和 O 自由基,当 α 越小时,链终止反应 $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}$ 与 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{OH}$ 反应的竞争越剧烈,阻止 O/H 自由基产生的趋势越增加,这种趋势的增加会抑制 NH₃ 向 NH₂ 的转化,最终抑制 NO 的还原;由于 NNH 的生命周期较短, α 较大时会促进 O/H 自由基的显著增加,有可能会使 NH₂ 自由基氧化为 NO,而不是还原 NO。因此, α 需要一个合适的区间。Miller 和 Klippenstein 提

出适合 SNCR 的温度区间为 1100~1400K,对应的 α 为 0.3~0.4^[96]。

除了温度对 NO 的生成有明显影响以外,压力也是重要的影响因素。 $\text{H} + \text{OH} + \text{M} = \text{H}_2\text{O} + \text{M}$ 和 $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{H}_2\text{O} + \text{M}$ 这两个三体反应受压力影响较为明显,前者为链终止反应,后者则与 $\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$ 反应存在竞争,压力的升高会促进这两个三体反应消耗 O/H 自由基池,从而减少 NO 的产生^[97]。此外,压力的升高还会提高 NH_i+NH_j 聚合反应的反应速率,导致更少的 NH_i 发生氧化反应,使得 NO 的生成减少^[67]。

总之,将反应的温度尽量控制在 SNCR 的温度区间内,并尽可能地提高压力是控制氨燃烧 NO_x 生成的两种常规技术手段。控制温度在锅炉中能更好地实现,尤其是无焰燃烧的温度区间与 SNCR 的温度区间存在一定的重合,提高压力则在燃气轮机和内燃机中具有更好的实现条件。

2.4 数值模拟

2.1 节中的模型均为详细的氨燃烧机理模型,在实际运用时由于计算能力的局限以及应用场景的改变,需要对其进行简化或改进。

Xiao 等^[21]人为了模拟燃气轮机工况下 NH₃/CH₄ 高压火焰,氨氢混合气体积比为 61:39,在 Konnov 模型的基础上通过相互作用系数指数来量化每个物种的重要性,完整的 Konnov 模型包括 129 组分,1231 个基元反应,通过规定阈值指数(分别为 0.6、0.3、0.215、0.15 和 0.05)获得分别为 31、48、61、77 和 84 组分的五个简化模型。他们分别验证了着火延迟时间、温度分布、OH 自由基分布、CO 和 NO 排放以及湍流火焰速度,对比模型复杂程度以及预测的准确性,提出 48 组分,500 基元反应的模型最适合用于今后的模拟研究。此外,他们还在 Mathieu 模型的基础上基于贡献率计算和敏感性分析更新了 5 个基元反应的速率

常数, 得到了 55 组分和 276 基元反应的 NH_3/H_2 火焰的模型, 通过层流火焰速度, NO_x 排放和着火延迟时间对模型进行了验证。通过 DRG 方法得出了三种简化的燃烧机理, 并建议在 NH_3/H_2 燃烧系统的三维 CFD 模拟中使用简化的机理^[22]。

Li 等^[36]人使用 Dagaut-Kéromnès 模型^[81, 82], Miller^[59]模型和 Duynslaegher^[98]模型模拟了不同 H_2 掺混比例下 NH_3 火焰的层流火焰速度和点火延迟时间, 模拟发现 NH_3 燃烧速度的提高主要因为 H_2 的高迁移率带来化学活化能的降低以及迁移效应; 压力和 H_2 掺混比例的增加可以显著减少 NH_3 火焰的着火延迟时间, 并促进 NH_3 的着火; 添加 H_2 对促进 NH_3 着火和层流燃烧速度的提高主要归因于以下三个反应: $\text{O}+\text{H}_2=\text{OH}+\text{H}$, $\text{H}+\text{O}_2=\text{OH}+\text{O}$, $\text{H}_2+\text{OH}=\text{H}_2\text{O}+\text{H}$, 这三个反应可以显著增加自由基的浓度并提高 H, O 和 OH 自由基的峰值。他们还使用这三个模型研究了添加 H_2 对 NH_3 火焰热释放特性的影响, 结果显示: 当量比和 H_2 掺混比例变化时, OH 和 N 自由基对净放热率有积极影响, NH_3 火焰的放热率可以认为与 OH 和 N 自由基的浓度成正比; H_2 添加到 NH_3 火焰中时, 其传热效果和化学作用可以提高放热率^[99]。

Honzawa^[100]通过大涡模拟 (LES), 将非绝热小火焰生成歧管方法 (NA-FGM) 应用于 NH_3/CH_4 火焰, 详细研究了旋流燃烧器产生的燃烧场, 以及 NO 和 CO 的形成机理。他们发现 NH_3/CH_4 火焰中与 NO 和 CO 生成相关的反应对 H 和 OH 自由基的浓度以及气体温度非常敏感, 这表明在预测 NH_3/CH_4 火焰燃烧的 NO 和 CO 排放时, 必须考虑到由辐射和冷壁引起的各种热损失的影响。

3 氨燃烧的应用

上文介绍的都是氨燃烧的基础研究, 本节将介绍氨燃烧在内燃机、燃气轮机、锅炉、多孔介质燃烧器等设备中的应用以及相关技术的发展方向。

3.1 内燃机

与甲醇、乙醇、 H_2 、柴油和汽油等碳氢燃料相似, NH_3 的辛烷值 (130) 较高, 能够显著改善燃烧特性以及降低某些碳氢燃料爆震的负面影响。由于 NH_3 的低火焰速度和高抗自燃性, 要使 NH_3 运用于内燃机, 需要将 NH_3 与其他燃料混合, 其他燃料需作为助燃剂使用, 比如碳氢燃料。因此, 在以往的研究中, 通常选择双燃料发动机来实现氨燃烧^[101, 102]。目前针对氨燃料发动机的研究主要可以分为三类: (1) 碳基双燃料火花点火 (SI) 发动机; (2) 碳基双燃料压缩点火 (CI) 发动机; (3) 氨掺氢发动机。

Reiter 等^[103]人在一个四缸涡轮增压的柴油机上研究了氨与柴油混燃的燃烧与排放特性, NH_3 提供的能量约为 40%~60%。研究发现, 在输出相同功率下, 双燃料的 CO 和 HC 的排放要高于纯柴油时的排放。当 NH_3 提供的能量低于 40% 时, 燃烧温度的降低带来 NO_x 排放的降低。由于 NH_3 的高抗自燃性, 点火延迟会随着氨含量的增加而增加。与预期结果相同的是, NH_3 比例提高时, 由于燃料中含碳物质比例降低, 可以显著减少烟尘排放。此外, 尽管 NH_3 的转化率接近 100%, 但尾气中依然有 1000~3000ppm 的氨逃逸, 效率也需进一步提高。Ryu 等^[104]人则在 SI 发动机中研究了 NH_3 与汽油混燃时的表现, 他们发现在汽油提供 0.6kW 的基准功率, 发动机输出 1.5~2.7kW 的功率时, NH_3 喷射时间范围为 320~370BTDC, 喷射时间持续 22ms。 NH_3 /汽油掺混时 NO_x 排放和氨逃逸会显著增加, 发动机的峰值压力会下降, 这一结果与 Reiter 等^[103]人的研究一致。 NH_3 与液体燃料混燃时需要增加 NH_3 的进气管路, 为了减少发动机结构的复杂性, 学者们想到将 NH_3 溶解于汽油之中, 但纯液相的汽油在 345kPa 和 286.65K 时只能溶解 4.5vol% 的 NH_3 , 而使用 10vol% 的乙醇或甲醇会使 NH_3 的溶解度提高到 11vol%。进一步

的研究表明,含 30%乙醇或甲醇的汽油中可以吸收高达 17.35vol%的 NH_3 ^[105]。Ryu 等^[106]人还在 CI 发动机上研究了 NH_3 -二甲醚 (DME) 的燃烧与排放特性, NH_3 的掺混比例为 40%~60%(质量占比),实验发现发动机的性能随着 NH_3 浓度的提高而降低,相对于 100%二甲醚的情况,掺氨后发动机转速和发动机功率均显示出局限性。最近, Yapicioglu 等^[107]人在一个汽油发电机中掺混 NH_3 之后发现了类似的结论,当 NH_3 掺混比例提高到 80%时,发电机功率从 3689.2W 下降到 3572.8W,总效率从 35.7%下降到 28.74%,烟效率从 44.85%下降至 36.4%,但 CO_2 排放下降的幅度却仅有 1.71%,这说明 NH_3 并不适合用于发电机。

NH_3 作为 H_2 的载体,可以通过裂解反应重新产生 H_2 。从前文可知,将 H_2 与 NH_3 掺混燃烧, H_2 能够有效提高 NH_3 的火焰速度, NH_3 则能有效提高 H_2 火焰的稳定性。Gill 等^[108]人在一个双燃料 CI 发动机中分别将 NH_3 /裂解后的 NH_3 (H_2+N_2 +少量 NH_3 的混合气)/ H_2 分别与柴油混燃,对比发现, NH_3 和裂解后的 NH_3 在低负荷条件下发动机的性能相似,但在较高的负荷下燃料的单位质量能量降低,裂解的 NH_3 工况会存在较低的制动热效率。裂解后的 NH_3 工况与纯 NH_3 的工况相比乏气中的氨逃逸以及 N_2O (单位质量的 N_2O 产生的温室效应是 CO_2 的 310 倍)的排放更低。Westlye 等^[109]人研究了氨氢混合燃料在 SI 发动机中的 NO_x 排放,氨氢混合气的体积比为 80:20,压缩比为 7~15。实验发现 NO 的排放峰值约在 35%的过量空气处,而不是碳氢燃料 SI 发动机中典型的 10%过量空气处。由于发动机的余隙容积,氨逃逸的量受压缩比的影响很大。

总的来说,常规的内燃机燃用氨燃料仅需进行很小的改动,例如改变压缩比和更换避免腐蚀的燃料管线材料即可。当 NH_3 在具有较低自燃温度的燃料(例如柴油,生物柴油或 DME)的双燃

料发动机中运行时,以压缩点火的方式是更理想的方法。由于 NH_3 中燃料氮含量过高,掺氨双燃料发动机的乏气中普遍存在相对较高的未燃尽 NH_3 和 NO_x 。因此,SCR 后处理系统十分必要。目前来说, NH_3 作为压缩点火燃料仅在不存在明显空间限制的船舶,发电等领域才较为可行,在这些技术领域,进一步减少 NO_x 和未燃烧 NH_3 的挑战仍然是研究的核心^[110]。

3.2 燃气轮机

内燃机设备的功率相对较小,通常在 0.1~1MW 范围内,这样的功率无法满足电网规模的需求,因此学者们将主要目光投向了功率更大的燃气轮机。燃气轮机的功率范围覆盖很广,小至几百千瓦的微型燃气轮机,大至几百兆瓦的重型燃气轮机,并且由于其启停方便、体积小等优点,燃气轮机在分布式能源中有着广泛的应用,因此有必要研究 NH_3 在燃气轮机中的应用。本节总结了单独燃烧 NH_3 以及 NH_3 与其他燃料掺混燃烧的燃烧特性、排放特性以及排放控制技术,有助于设计和开发新型氨燃料燃气轮机。

3.2.1 NH_3

NH_3 作为燃料直接燃烧除了火焰传播特性需要研究以外,其火焰稳定性与排放特性也是需要重点关注的点。Kurata 等^[111]人在微型燃气轮机中燃烧纯 NH_3 实现了在 18.4~44.4kW 的功率和 70000~80000r/min 的转速范围内运行,燃烧效率最高可达 96%,排气中检测到的 NO 浓度约为 500~1300ppm。 NO 和未燃烧的 NH_3 的排放主要取决于燃烧室入口温度,这一点与 Keller 等人的研究类似^[112]。他们还发现分级燃烧降低 NO_x 的原理主要是未燃烧的 NH_3 通过选择性非催化还原 (SNCR) 与 NO 发生了反应。随后他们开发出了新的浓淡(分级)低 NO_x 燃烧器,并进一步拓宽了燃气轮机的功率和转速,分别可以达到

10~40kW 和 75000~80000r/min, 并且 NO 排放最低可以达到 337ppm, 约为上一代燃烧器的 1/3, 这一研究展现了燃气轮机中使用纯 NH₃ 作为燃料的潜力^[113]。

Hayakawa 等^[114]人在一个旋流燃烧器中研究了 NH₃ 预混火焰的排放特性, 结果如图 4 所示。实验发现: 采用旋流的方式能成功稳定 NH₃/空气预混火焰, 无需碳氢燃料来增强 NH₃ 火焰; 在贫燃时 NH₃ 和 H₂ 逃逸几乎为 0, 但 NO 排放很高, 当量比为 0.9 时可接近 2000ppm; 在富燃时能看到 NO 迅速降低, 在当量比为 1.1 时接近 0, NH₃ 和 H₂ 逃逸则在当量比超过 1.05 时急剧升高。因此, 当量比为 1.05 时, NO、NH₃ 和 H₂ 的总排放可以达到最低值。Okafor 等^[115]人的研究则显示分级燃烧时主燃区当量比为 1.1 时 NO 具有最小值, 并且预混火焰比非预混火焰的排放表现要好。在这种当量比和 0.3MPa 的环境压力下, NO_x 排放最低可达 42ppm, 燃烧效率为 99.5%。

与预混火焰相比, 非预混火焰能充分利用烟气的余热来实现氧化剂或者燃料的预热, 其燃烧极限更宽, 不会产生回火等问题, 因此在实际的燃烧设备中常采用非预混燃烧。Somaratne 等^[116]人在一个类燃气轮机燃烧室的燃烧器中进行了非预混火焰和预混火焰的大涡模拟, 结果发现两种火焰模式下 NO 的排放均随着当量比和压力的增加而降低。区别的是, 非预混富燃火焰的 NO 排放量略高于预混火焰, 这是因为旋流器中的燃料全部从内层通入燃烧室会造成燃烧室内燃料与空气分布不均匀。从图 5 可知, 具有高 NO 浓度的区域几乎均位于壁面边界附近, 中心区域的 NO 浓度几乎为零。当外层旋流器与内层旋流器中 NH₃ 比值为 60:40 时, NO 分布更加均匀, 出口的 NO 浓度也达到最低值 608ppm, 基本与预混火焰的 NO 排放值相当。为了降低 NO 的排放, 他们随后将分级燃烧技术运用于氨燃烧中, LES 结果如图

6 可知, 主燃区当量比为 1.2 时, 出口的 NO 浓度达到最低值 162ppm, 主燃区当量比升高时会导致二级燃烧区未燃尽的 NH₃ 增多, 低当量比的二次风空气促进了这部分未燃尽 NH₃ 发生氧化, 生成了 NO^[117]。

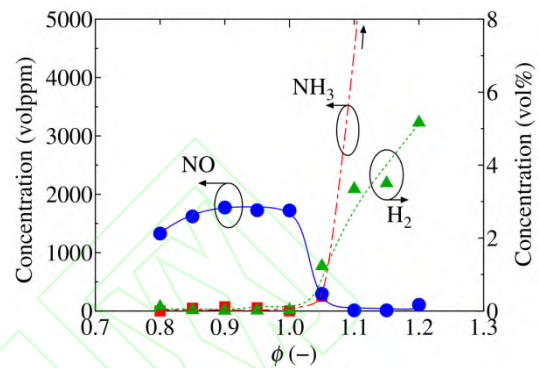


图 4 NO, NH₃ 和 H₂ 排放随当量比的变化 (旋流数 S=0.736) ^[114]

Fig. 4 NO, NH₃ and H₂ emissions with changes of equivalence ratio (Swirl number S=0.736)

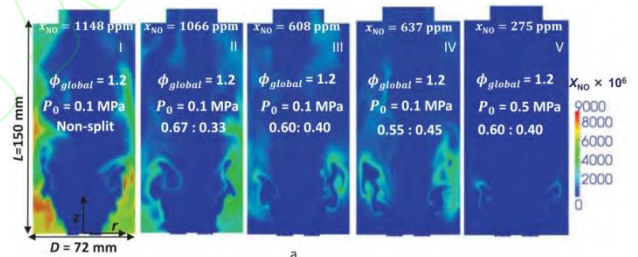


图 5 不同压力和不同 NH₃ 流量下 NO 分布及出口浓度^[116]

Fig. 5 Distribution and outlet concentration of NO under different pressures and different NH₃ flow

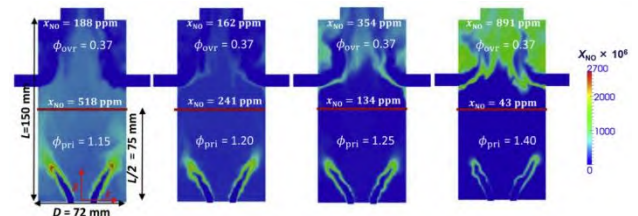


图 6 分级燃烧时 NO 分布及出口浓度 (P₀=0.5MPa)^[117]

Fig. 6 Distribution and outlet concentration of NO during staged combustion (P₀=0.5MPa)

3.2.2 NH₃+H₂

H₂ 具有高反应活性和高燃烧速度的特性, 这使得其更易在储存和使用中造成爆炸。此外, H₂

火焰是不发光的，这使得很难在视觉上进行监测和光学监控^[118]。为了降低 H_2 火焰这种高反应性的特性，早期有学者研究了 NH_3/H_2 的预混和非预混火焰，他们发现随着 NH_3 添加量的提高，两种火焰模式下保持燃烧稳定时所需的速度限值（上限和下限）均处于下降趋势，这表明 NH_3 的添加可以提高 H_2 火焰的安全性^[119, 120]。此外，压力和温度的升高也能降低火焰极限^[121]。

出于降低纯氨火焰 NO_x 的考虑，Hussein 等^[122]人将 NH_3 裂解装置和旋流燃烧器结合设计了一套 NH_3/H_2 混燃的燃烧装置，通过 Chemkin 来模拟，原料仅使用 NH_3 ，旋流燃烧器产生的热量部分用于裂解 NH_3 ，裂解产生的氨氢混合气（总燃料的 0~4vol%）作为二次风燃料在火焰区下游燃烧。当没有二次风， NH_3 掺混量变化从 50%~100% 时，他们发现 $NH_3:H_2$ 为 60:40 时未燃尽的 NH_3 最少，燃烧温度更高，但 NO 排放较高。在二次风中添加 4% 的氨氢混合气后， NO 排放值可以降低 85% 左右，达到 50ppm 以下。Pugh 等^[123]人则在分级预混旋流燃烧器实验平台上研究了水蒸汽以及压力对 NO_x 减排的影响，实验台如图 7 所示。压力的升高增加了 NH_2 的形成， NH_2 可以在火焰区下游消耗 NO ，所以燃烧室压力的增加会降低 NO_x 的排放。水蒸汽的加入能有效降低火焰温度，通过扩展的捷尔多维奇机理实现火焰区的 NO_x 浓度的下降。水蒸汽的加入还会产生 OH 自由基， OH 自由基的增多会促进 NH_2 的生成， NH_2 通过反应 $NH_2+NO=N_2+H_2O$ 实现燃烧下游区域（后火焰区） NO 浓度的降低，但会导致较高浓度的未燃尽 NH_3 。实验在当量比为 0.98，压力为 0.184MPa，水蒸汽添加量为 3.43vol% 时取得最好的结果， NO_x 和 NH_3 排放分别为 32ppm 和 50ppm。他们认为将水蒸汽分级喷入燃烧室能使燃烧室内组分分布更均匀，有望进一步改善排放表现，因此他们下一代的分级预混旋流燃烧器设计也是朝着水蒸汽分级以及更高压力的方向进行。

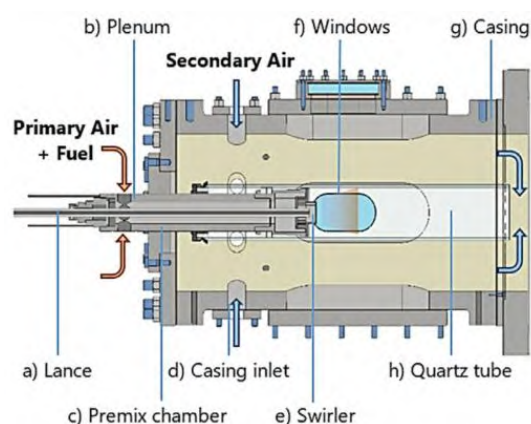


图 7 分级预混旋流燃烧室^[123]

Fig. 7 Staged pre-mixed swirl combustor

3.2.3 NH_3+CH_4

CH_4 同样是性能优异的碳氢燃料，层流火焰速度约为 NH_3 的 5 倍。Valera-Medina 等^[19]人在大气压下研究了旋流燃烧器中 NH_3/CH_4 火焰的稳定性与排放特性，结果表明完全预混的燃烧模式不适用于 NH_3/CH_4 火焰，并且在中等旋流数下会产生较高的火焰不稳定性，因此较低的旋流数和非预混的燃烧模式更适合 NH_3/CH_4 火焰。最大 NO_x 生成量出现在当量比为 0.9， NH_3 比例达到 66% 处。在 Kurata 等^[111]人的研究中最大 NO_x 生成量则出现在 NH_3 比例约 60%（热值比）的时候。 CH_4 火焰中不仅需要关注 NO_x 和 NH_3 排放， CO 和 HCN 的排放同样也很重要。Okafor 等^[124]人在非预混分级燃烧器中燃用 NH_3/CH_4 时发现，主燃区富燃可确保低 NO 生成，但在主燃区会产生较高的 H_2 ， CO ， HCN 和未燃尽 NH_3 ，通过 OH -PLIF 观察到，燃尽区中 CO 和 H_2 的燃烧会产生高浓度的 O/H 自由基，这会促进 HCN 和 NH_3 向 NO 转化。尽管 NH_3/CH_4 单级燃烧产生的 NO_x 排放量约是 NH_3 纯燃时的两倍，但 NH_3/CH_4 分级燃烧比 NH_3 纯燃时排放的 NO_x 要少。使用分级燃烧技术，他们在 0.25MPa 的压力下实现了 49ppm 的 NO_x ，2ppm 的 CO 和近零的 N_2O 、 HCN 和 NH_3 排放，燃烧效率达到了 99.8%，这也是目前最好的排放表现。 NH_3 与 CH_4 混燃的研究已有很多，但绝大

部分的研究是关于模型开发、机理简化以及数值模拟方面的,针对双燃料燃气燃烧器、燃气轮机旋流燃烧器的开发还不够。

目前,开发新型氨燃料低氮燃气轮机主要有以下4个技术运用方向:(1)分级燃烧或浓淡燃烧;(2)空气预热;(3)更高的压力;(4)烟气再循环以及分级烟气再循环。将这四种技术应用在燃气轮机中,有望在不安装SCR装置的情况下实现燃烧室出口排放达标。

3.3 锅炉

燃煤发电提供的能源约占世界一次能源的29%,与其他任何发电方式相比,燃煤锅炉产生的CO₂排放量都更多。因此,减少火力发电厂燃煤锅炉的CO₂排放有相当大的潜力^[125]。考虑到可再生能源生产NH₃的能力有限,短期内不可能用NH₃完全替代煤炭。因此,NH₃与煤在锅炉中的混燃同样需要深入研究。

Yamamoto等^[15]人在一个带有单个燃烧器的760kW卧式试验炉中将煤粉与NH₃混燃,NH₃占燃料总热值比例为20%,其结构示意图如图8所示。NH₃分别从燃烧器和侧壁进入炉膛。图9为出口处NO_x排放随侧墙NH₃注入位置的变化图,从图中能发现侧墙注入的NH₃越靠近燃烧器以及侧墙注入的NH₃越多,总NO_x的排放越低。当全部NH₃均从侧墙1m处注入炉膛时,出口NO_x排放与单独燃用煤粉时的排放相当,这也验证了在燃煤锅炉中直接燃用NH₃的可行性。

Ishihara等^[126, 127]人通过数值模拟的方法在一个1000MW的电站锅炉中详细研究了NH₃不同掺混位置对NO排放的影响,他们在燃烧器内、火焰区域和火上风(OFA)区域喷入NH₃。他们发现从火焰区域喷入炉膛时NO的排放最低,甚至低于煤粉单独燃烧时的排放,这与Yamamoto等^[15]人的研究是一致的。他们认为与燃煤相比,主要是

以下三个因素的综合作用促成NO排放的降低:

(1)火焰区处于NH₃富燃的情况,导致NO排放量相对较低;(2)煤粉与NH₃混烧时火焰区域的温度会降低,这可能导致热力型NO的产生减少;

(3)由于火焰区的原始温度较高(大于2000K),喷入的NH₃在焦炭氧化之前会先分解并转化为NO。由于存在大量还未氧化的焦炭,这部分NO可能被焦炭重新还原。

Zhang等^[128]人则在一个配有旋流燃烧器的8.5MW燃煤锅炉中通过实验和模拟方法研究了NH₃掺混比例的影响,其NH₃掺混比例同样为0~80%。当掺氨比例超过40%时,高速NH₃射流完全穿透了火焰的回流区,火焰形状从正常的旋流火焰变为细长的火焰。火焰形状的这种变化会对壁面热量分布产生明显影响。随着掺氨比例逐步增加至60%,颗粒辐射的减少会使壁上吸收的热量减少。掺氨比继续增加至80%,对流热量的增加使壁上吸收的总热量增加。在掺氨比例为10%时,燃烧最为剧烈,飞灰含碳率达到最小值,约为3.7%,但炉膛出口的NO浓度达到最大值,约为200ppm。当掺氨比例提高到10%以上时,炉膛出口的NO由于未反应NH₃在下游的脱氮作用而急剧降低,并在80%时达到25ppm。与此同时,飞灰含碳率则一直上升至7%左右,这说明掺氨比例提高尽管能降低NO的排放,但是以降低锅炉效率为代价的。因此,如何在掺氨工况下控制NO_x排放的同时尽可能的提高锅炉效率还需要进行取舍。

无焰燃烧由于没有火焰锋面,温度分布均匀,NO_x生成量小,是一种能充分燃烧的新型低污染燃烧方式,在低热值燃料,如生物质气、高炉煤气、垃圾、污泥、贫煤的燃烧中有着广泛的应用。NH₃的热值约为生物质气的3倍,但仅有CH₄的40%,属于中等热值气体燃料。将无焰燃烧技术与氨燃烧相结合,有望实现NH₃的低氮燃烧。Sorrentino

等人设计了一个旋风无焰燃烧炉，他们在燃烧 CH_4 、 C_3H_8 以及生物质气等方面均取得了令人满意的结果^[129, 130]。近期他们又尝试在同样的实验台中实现 NH_3 的无焰燃烧，结果表明炉内温度超过 1250K 才能实现稳定的 NH_3 无焰燃烧。理想当量比下， NO_x 和 NH_3 排放均为 100ppm 左右，这一排放表现远远好于燃气轮机^[131]。

在现有的技术条件下，如果能在锅炉烟气后处理系统中加装低温 SCR 装置，实现 NO_x 和 NH_3 排放的同步降低，则有望满足现有的排放法规。

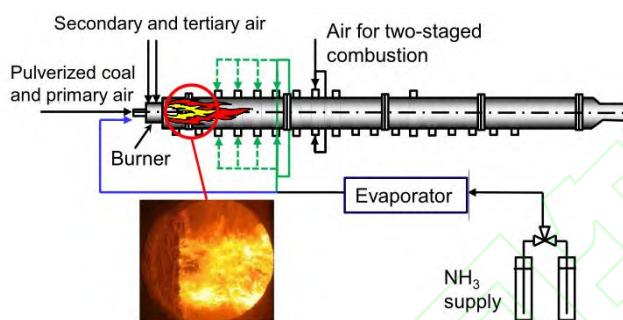


图 8 卧式煤粉炉示意图^[15]

Fig. 8 Schematic diagram of horizontal pulverized coal furnace

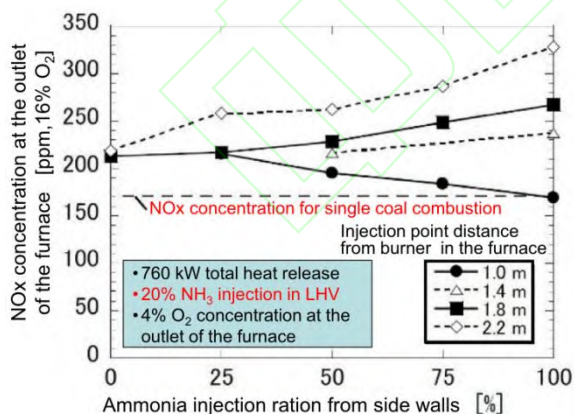


图 9 出口 NO_x 排放随 NH_3 注入位置的变化^[15]

Fig. 9 Outlet NO_x emissions with changes of NH_3 injection position

3.4 多孔介质燃烧器

内燃机、燃气轮机、锅炉均属于中大规模的燃烧/动力设备，中小规模的多孔介质燃烧器燃用氨

燃料目前正在收获越来越多的关注。多孔介质作为有效的火焰稳定介质不仅能促进气体与燃料的混合，还能帮助实现预混火焰的稳定^[132]。

最近 Nozari 等^[133]人基于惰性多孔介质 (SiC) 的燃烧器研究了 NH_3/H_2 空气预混火焰的稳定性，燃烧效率以及 NO_x 排放情况。当量比范围为 0.9~1.3， NH_3 掺混比例为 60~90vol%。实验发现 NH_3 掺混量的提高会导致火焰稳定性下限和上限同时降低，这与燃气轮机旋流燃烧器中的研究结果是一致的^[119, 120]。与相同直径的普通多孔介质燃烧器相比，SiC 多孔介质燃烧器的火焰保持能力提高了 40%。所有工况下燃烧效率均高于 95%，但与此同时， NO_x 排放的表现并不能令人满意。

Hinokuma 等^[134]人在多孔介质中负载了催化剂，将催化燃烧应用在 NH_3 燃烧中。他们重点研究了负载在 $\text{Al}_6\text{O}_{13}\text{Si}_2$ 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $3\text{A}2\text{S}$ 和 SiO_2 上的 CuO_x 催化剂，发现 NH_3 催化燃烧的活性、 NO 和 N_2O 的选择性与 CuO_x 的还原性、 Cu 周围的局部结构、 Cu^{2+} 含量以及 NH_3 吸附的成分密切相关。

Ramos 等^[135]人则在一个 300W 的多孔介质燃烧器中研究了 NH_3/CH_4 的排放特性， NH_3 的掺混比例最高达到 70%。当当量比为 1.0， NH_3 掺混比例达到 50% 时， NO_x 排放达到最大值 4300ppm，而 CO 的排放均在 30~50ppm 之间变化，受当量比影响较小，因此其排放表现同样不是非常理想。

总的来说，多孔介质燃烧器在燃用 NH_3 时火焰稳定性普遍优于燃气轮机中的旋流燃烧器，但其排放特性则远远不及旋流燃烧器，现有的研究中几乎从未使用任何低氮燃烧技术来降低 NO_x 排放。因此，多孔介质燃烧器的发展还需要重点解决其排放较高的问题。

4 结论

NH₃ 作为无碳燃料,同时也是优良的氢载体。通过电化学方法合成 NH₃ 可以实现可再生能源的大规模储存, NH₃ 经过液化可以通过天然气管道或远洋船舶实现可再生能源的全球运输。将 NH₃ 直接燃烧可以减少裂解为 H₂ 过程中的能量损耗,但 NH₃ 直接燃烧还存在火焰燃烧速度低、NO_x 排放高的挑战。将 NH₃ 与碳氢燃料掺混以及富氧燃烧可以明显提高火焰的燃烧速度。特定的温度区间(1100~1400K)和高压环境均有利于实现 NO_x 排放的降低。目前 NH₃ 在内燃机中的排放表现还不够理想,在微型燃气轮机中通过加压、分级燃烧技术实现了 49ppm 的 NO_x, 2ppm 的 CO 和近零的 N₂O、HCN 和 NH₃ 排放,燃烧效率达到了 99.8%,结合烟气再循环技术有望将燃气轮机的排放进一步降低。在电站锅炉和工业锅炉中,将 NH₃ 从煤粉燃烧器下游火焰喷入炉膛其排放表现几乎不会变化,表明 NH₃ 具有替代煤粉减少 CO₂ 排放的潜力。将无焰燃烧应用在氨燃烧中也取得了最低 100ppm NO_x 和 100ppm NH₃ 的排放表现。在燃气轮机和锅炉的应用中还需研究分级燃烧、烟气再循环等低氮燃烧技术对氨燃烧排放的影响,并且建议在氨燃烧的设备中加装 SCR 装置同时降低 NO_x 排放和解决氨逃逸问题。NH₃ 在多孔介质燃烧器中的研究还处于起步阶段,其排放问题还需要更深入的研究。

参考文献

- [1] 王志刚, 蒋庆哲, 董秀成等. 中国油气产业发展分析与展望报告蓝皮书 (2019-2020) [M]. 北京: 中国石化出版社, 2019.
Wang Zhigang, Jiang Qingzhe, Dong Xiucheng, et al. China oil and gas industry development analysis and outlook report blue book (2019-2020) [M]. 2019.
- [2] 王月姑, 吴崇君, 郑淞生, 等. 氨燃料缓解能源安全及替代天然气的可行性分析 [J]. 可再生能源, 2019, 37: 949-954.
Wang Yuegu, Wu Chongjun, Zheng Songsheng, et al. Feasibility analysis of ammonia fuel alleviating energy security and substituting natural gas [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37: 949-954.
- [3] Jeffrey Ralph Bartels. A feasibility study of implementing an ammonia economy[D]. Ames Iowa State University, 2014.
- [4] 王庆一. 2018 能源数据 [M]. 北京: 绿色创新发展中心, 2018.
Wang Qingyi. 2018 energy data [M]. Beijing: Green innovation development center, 2018.
- [5] Gil Posada Jorge Omar, Abdalla Abdallah H., Oseghale Charles I., et al. Multiple regression analysis in the development of NiFe cells as energy storage solutions for intermittent power sources such as wind or solar [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(37): 16330-16337.
- [6] Ordoñez J., Gago E. J., Girard A. Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 195-205.
- [7] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.
- [8] Lefebvre Dominique, Tezel F. Handan. A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 116-125.
- [9] Jradi M., Veje C., Jørgensen B. N. Performance analysis

- of a soil-based thermal energy storage system using solar-driven air-source heat pump for Danish buildings sector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 360-373.
- [10] Guruprasad Alva, Lingkun Liu, Xiang Huang, et al. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 693-706.
- [11] Kojima A. A green ammonia economy [M]. 10th Annual NH3 Fuel Conference. 2013.
- [12] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, et al. Ammonia for power [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69: 63-102.
- [13] 王月姑, 周梅, 王兆林, 等. 以氨燃料为介质的全生命周期储能效率估算 [J]. *储能科学与技术*, 2018, 7: 301-308.
- Wang Yuegu, Zhou Mei, Wang Zhaolin, et al. Life-cycle energy efficiency estimation of large-scale ammonia fuel energy storage system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7: 301-308.
- [14] Kurata Osamu, Iki Norihiko, Matsunuma Takayuki, et al. Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃-CH₄-air combustion gas-turbine power generations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3351-3359.
- [15] Yamamoto A. Basic co-firing characteristics of ammonia with pulverized coal in a single burner test furnace [M]. 2018 NH3 Fuel Conference. 2018.
- [16] Ryuichi Muraia, Ryohei Omoria, Ryuki Kanoa, et al. The radiative characteristics of NH₃-N₂-O₂ non-premixed flame on a 10 kW test furnace [J]. *Energy Procedia*, 2017, 120: 325-332.
- [17] Ryuichi Murai, Ryohei Omori, Yuya Yoshizuru, et al. Experimental and computational study for reduction of NO_x emissions in the ammonia/methane co-combustion in a 10 kw furnace [M]. 2018 AIChE Annual Meeting. 2018.
- [18] Robert F. Service. Ammonia made from sun, air, and water could turn Australia into a renewable energy [J]. *Science*, 2018, 361(6398): 120-123.
- [19] Valera-Medina Agustin, Marsh Richard, Runyon Jon, et al. Ammonia-methane combustion in tangential swirl burners for gas turbine power generation [J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1362-1371.
- [20] Valera-Medina A., Morris S., Runyon J., et al. Ammonia, methane and hydrogen for gas turbines [J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 118-123.
- [21] Xiao Hua, Howard Micheal, Valera-Medina Agustin, et al. Study on reduced chemical mechanisms of ammonia/methane combustion under gas turbine conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(10): 8701-8710.
- [22] Xiao Hua, Valera-Medina Agustin, Bowen Philip J. Modeling combustion of ammonia/hydrogen fuel blends under gas turbine conditions [J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(8): 8631-8642.
- [23] 楚育纯, 周梅, 王兆林, 等. 掺氨燃料在四冲程内燃机中的排放特性 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020: 1-10.
- Chu Yuchun, Zhou Mei, Wang Zhaolin, et al. Emission characteristics of four-stroke internal combustion engine using ammonia blended fuel [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2020: 1-10.
- [24] 阿俊利. 氨燃料燃烧过程数值模拟研究[D]. 华北水利水电大学, 2018.

- A Junli. Numerical simulation of ammonia fuel combustion process [D]. North China University of Water Resources and Electric Power, 2018.
- [25] Zhenyu Tian, Yuyang Li, Lidong Zhang, et al. An experimental and kinetic modeling study of premixed NH₃/CH₄/O₂/Ar flames at low pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(7): 1413-1426.
- [26] Bowen Mei, Xiaoyuan Zhang, Siyuan Ma, et al. Experimental and kinetic modeling investigation on the laminar flame propagation of ammonia under oxygen enrichment and elevated pressure conditions [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 210: 236-246.
- [27] Xinlu Han, Zhihua Wang, Mário Costa, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH₃/air, NH₃/H₂/air, NH₃/CO/air and NH₃/CH₄/air premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 206: 214-226.
- [28] Xinlu Han, Zhihua Wang, Yong He, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH₃/syngas/air premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 213: 1-13.
- [29] James F. Driscoll. Turbulent premixed combustion: flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34(1): 91-134.
- [30] E. Ranzi, A. Frassoldati, R. Grana, et al. Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(4): 468-501.
- [31] Akihiro Hayakawa, Takashi Goto, Rentaro Mimoto, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures [J]. *Fuel*, 2015, 159: 98-106.
- [32] Kenji Takizawa, Takahashi Akifumi, Tokuhashi Kazuaki, et al. Burning velocity measurements of nitrogen-containing compounds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 155(1-2): 144-152.
- [33] U. J. Pfahl, M. C. Ross, J. E. Shepherd. Flammability limits, ignition energy, and flame speeds in H₂-CH₄-NH₃-N₂O-O₂-N₂ mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2000, 123(1): 140-158.
- [34] V. F. Zakaznov, L. A. Kursheva, Z. I. Fedina. Determination of normal flame velocity and critical diameter of flame extinction in ammonia-air mixture [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1978, 14(6): 710-713.
- [35] Paul D. Ronney. Effect of chemistry and transport properties on near-limit flames at microgravity [J]. *Combustion Science and Technology*, 1988, 59(1-3): 123-141.
- [36] Jun Li, Hongyu Huang, Noriyuki Kobayashi, et al. Numerical study on laminar burning velocity and ignition delay time of ammonia flame with hydrogen addition [J]. *Energy*, 2017, 126: 796-809.
- [37] Ichikawa Akinori, Hayakawa Akihiro, Kitagawa Yuichi, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/hydrogen/air premixed flames at elevated pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(30): 9570-9578.
- [38] Olivier Mathieu, Eric L. Petersen. Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of Ammonia and related NO_x chemistry [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 554-570.
- [39] Wang Jinhua, Yu Qianqian, Zhang Weijie, et al. Development of a turbulence scale controllable burner and turbulent flame structure analysis [J]. *Experimental*

- Thermal and Fluid Science, 2019, 109: 109898.
- [40] Zhang Meng, Patyal Advitya, Wang Jinhua, et al. Darrieus-Landau instability effect on the flame topology and brush thickness for premixed turbulent flames [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 158: 113603.
- [41] Akinori Ichikawa, Yuji Naito, Akihiro Hayakawa, et al. Burning velocity and flame structure of CH₄/NH₃/air turbulent premixed flames at high pressure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(13): 6991-6999.
- [42] Xia Yu, Hashimoto Genya, Hadi Khalid, et al. Turbulent burning velocity of ammonia/oxygen/nitrogen premixed flame in O₂-enriched air condition [J]. Fuel, 2020, 268: 117383.
- [43] J. H. Lee, J. H. Kim, J. H. Park, et al. Studies on properties of laminar premixed hydrogen-added ammonia/air flames for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(3): 1054-1064.
- [44] Jun Li, Hongyu Huang, Noriyuki Kobayashi, et al. Study on using hydrogen and ammonia as fuels: Combustion characteristics and NO_x formation [J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(9): 1214-1223.
- [45] Lhuillier Charles, Brequigny Pierre, Lamoureux Nathalie, et al. Experimental investigation on laminar burning velocities of ammonia/hydrogen/air mixtures at elevated temperatures [J]. Fuel, 2020, 263: 116653.
- [46] Paul F. Henshaw, Tina D'andrea, Kenneth R. C. Mann, et al. Premixed ammonia-methane-air combustion [J]. Combustion Science and Technology, 2005, 177(11): 2151-2170.
- [47] Ekenechukwu Chijioko Okafor, Yuji Naito, Sophie Colson, et al. Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism [J]. Combustion and Flame, 2019, 204: 162-175.
- [48] Hua Xiao, Agustin Valera-Medina, Philip J. Bowen. Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels [J]. Energy, 2017, 140: 125-135.
- [49] Qingming Liu, Chen Xu, Jinxiang Huang, et al. The characteristics of flame propagation in ammonia/oxygen mixtures [J]. J Hazard Mater, 2019, 363: 187-196.
- [50] Jun Li, Hongyu Huang, Noriyuki Kobayashi, et al. Numerical study on effect of oxygen content in combustion air on ammonia combustion [J]. Energy, 2015, 93: 2053-2068.
- [51] Wang Du, Ji Changwei, Wang Zhe, et al. Measurement of oxy-ammonia laminar burning velocity at normal and elevated temperatures [J]. Fuel, 2020, 279: 118425.
- [52] Shibo Liu, Chun Zou, Yu Song, et al. Experimental and numerical study of laminar flame speeds of CH₄/NH₃ mixtures under oxy-fuel combustion [J]. Energy, 2019, 175: 250-258.
- [53] C. P. Fenimore, G. W. Jones. Oxidation of ammonia in flame [J]. Journal of Physical Chemistry, 1961, 65: 298-303.
- [54] D.I. Maclean. The structure of the reaction zones of ammonia-oxygen and hydrazine-decomposition flames [J]. Symposium (International) on Combustion, 1967, 11: 871-878.
- [55] R.K. Lyon. The NH₃-NO-O₂ reaction [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 1976, 8: 315-318.
- [56] B.S. Haynes. Reactions of ammonia and nitric oxide in

- the burnt gases of fuel-rich hydrocarbon-air flames [J]. *Combustion and Flame*, 1977, 28: 81-91.
- [57] M. A. Cremer, C. J. Montgomery, D. H. Wang, et al. Development and implementation of reduced chemistry for computational fluid dynamics modeling of selective non-catalytic reduction [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28: 2427-2434.
- [58] Miller James A., Smooke Mitchell D., Green Robert M., et al. Kinetic Modeling of the Oxidation of Ammonia in Flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 2007, 34(1-6): 149-176.
- [59] James A. Miller, Craig T. Bowman. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1989, 15: 287-338.
- [60] J. A. Miller, P. Glarborg. Modeling the thermal De-NO_x process - Closing in on a final solution [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 1999, 31: 757-765.
- [61] Robert M. Green, James A. Miller. The measurement of relative concentration profiles of NH₂ using laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1981, 26: 313-327.
- [62] R. C. Murray, A. R. Hall. Flame speeds in hydrazine vapour and in mixtures of hydrazine and ammonia with oxygen [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1951, 47: 743-751.
- [63] Lindstedt R. P., Lockwood F. C., Selim M. A. A detailed kinetic study of ammonia oxidation [J]. *Combustion Science and Technology*, 1995, 108(4-6): 231-254.
- [64] Lindstedt R. P., Lockwood F. C., Selim M. A. Detailed kinetic modelling of chemistry and temperature effects on ammonia oxidation [J]. *Combustion Science and Technology*, 1994, 99(4-6): 253-276.
- [65] Lindstedt R. P., Selim M. A. Reduced reaction mechanisms for ammonia oxidation in premixed laminar flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1994, 99(4-6): 277-298.
- [66] A. A. Konnov, J. De Ruyck. Kinetic modeling of the thermal decomposition of ammonia [J]. *Combustion Science and Technology*, 2000, 152(1): 23-37.
- [67] Konnov Alexander A., Ruyck Jacques De. A possible new route for NO formation via N₂H₃ [J]. *Combustion Science and Technology*, 2001, 168(1): 1-46.
- [68] Konnov A. A., De Ruyck. J. Temperature-dependent rate constant for the reaction NNH+O → NH+NO [J]. *Combustion and Flame*, 2001, 125: 1258-1264.
- [69] Peter Glarborg, James A. Miller, Branko Ruscic, et al. Modeling nitrogen chemistry in combustion [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67: 31-68.
- [70] D. F. Davidson, R. K. Hanson. High temperature reaction rate coefficients derived from N - atom ARAS measurements and excimer photolysis of NO [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 1990, 22(8): 843-861.
- [71] A. A. Konnov. Implementation of the NCN pathway of prompt-NO formation in the detailed reaction mechanism [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(11): 2093-2105.
- [72] Skreiberg Øyvind, Kilpinen Pia, Glarborg Peter. Ammonia chemistry below 1400 K under fuel-rich conditions in a flow reactor [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 136(4): 501-518.
- [73] Duynslaegher Catherine, Contino Francesco, Vandooren Jacques, et al. Modeling of ammonia combustion at low

- pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(9): 2799-2805.
- [74] Duynslaegher C., Jeanmart H., Vandooren J. Kinetics in ammonia-containing premixed flames and a preliminary investigation of their use as fuel in spark ignition engines [J]. *Combustion Science and Technology*, 2009, 181(8): 1092-1106.
- [75] Øyvind Skreiberg, Pia Kilpinen, Peter Glarborg. Ammonia chemistry below 1400 K under fuel-rich conditions in a flow reactor [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 136: 501-518.
- [76] Dagaut P., Glarborg P., Alzueta M. The oxidation of hydrogen cyanide and related chemistry [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34(1): 1-46.
- [77] Peter Glarborg, Maria U. Alzueta, Kim Dam-Johansen, et al. Kinetic modeling of hydrocarbon/nitric oxide interactions in a flow reactor [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 115: 1-27.
- [78] Christian Lund Rasmussen, Jon Geest Jakobsen, Peter Glarborg. Experimental measurements and kinetic modeling of CH₄/O₂ and CH₄/C₂H₆/O₂ conversion at high pressure [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2008, 40: 778-807.
- [79] Christian Lund Rasmussen, Anja Egede Rasmussen, Peter Glarborg. Sensitizing effects of NO_x on CH₄ oxidation at high pressure [J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154: 529-545.
- [80] Mendiara Teresa, Glarborg Peter. Ammonia chemistry in oxy-fuel combustion of methane [J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(10): 1937-1949.
- [81] Philippe Dagaut, André Nicolle. Experimental and kinetic modeling study of the effect of SO₂ on the reduction of NO by ammonia [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 1211-1218.
- [82] Alan Kéromnès, Wayne K. Metcalfe, Karl A. Heufer, et al. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160: 995-1011.
- [83] O. Mathieu, A. Levacque, E. L. Petersen. Effects of N₂O addition on the ignition of H₂-O₂ mixtures: Experimental and detailed kinetic modeling study [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37: 15393-15405.
- [84] O. Mathieu, A. Levacque, E. L. Petersen. Effects of NO₂ addition on hydrogen ignition behind reflected shock waves [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34: 633-640.
- [85] Guillaume Dayma, Philippe Dagaut. Effects of air contamination on the combustion of hydrogen-effect of NO and NO₂ addition on hydrogen ignition and oxidation kinetics [J]. *Combustion and Science and Technology*, 2006, 178: 10-11.
- [86] Raghu Sivaramakrishnan, Kenneth Brezinsky, Guillaume Dayma, et al. High pressure effects on the mutual sensitization of the oxidation of NO and CH₄-C₂H₆ blends [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, 9: Physical Chemistry Chemical Physics.
- [87] Nakamura Hisashi, Hasegawa Susumu, Tezuka Takuya. Kinetic modeling of ammonia/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 185: 16-27.
- [88] Ekenechukwu C. Okafor, Yuji Naito, Sophie Colson, et al. Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH₄-NH₃-air premixed flames [J].

- Combustion and Flame, 2018, 187: 185-198.
- [89] Krishna P. Shrestha, Lars Seidel, Thomas Zeuch, et al. Detailed kinetic mechanism for the oxidation of ammonia including the formation and reduction of nitrogen oxides [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(10): 10202-10217.
- [90] Tamás Varga, Carsten Olm, Tibor Nagy, et al. Development of a joint hydrogen and syngas combustion mechanism based on an optimization approach [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2016, 48(8): 407-422.
- [91] U. Mechanism. Chemical-kinetic mechanisms for combustion applications, mechanical and aerospace engineering (combustion research) [EB/OL].
- [92] Hideaki Kobayashi, Akihiro Hayakawa, K. D. Kunkuma a. Somarathne, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109-133.
- [93] Anthony M. Dean, Mau - Song Chou, David Stern. Kinetics of rich ammonia flames [J]. International Journal of Chemical Kinetics, 1984, 16: 633-653.
- [94] Anthony M. Dean, Joseph W. Bozzelli. Combustion chemistry of nitrogen [J]. Gas-Phase Combustion Chemistry, 2000: 125-341.
- [95] Alexander A. Konnov, Igor V. Dyakov, Jacques De Ruyck. Nitric oxide formation in premixed flames of H₂+CO+CO₂ and air [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 2171-2177.
- [96] James A. Miller, Stephen J. Klippenstein. Theoretical considerations in the NH₂ + NO reaction [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2000, 104: 2061-2069.
- [97] Akihiro Hayakawa, Takashi Goto, Rentaro Mimoto, et al. NO formation/reduction mechanisms of ammonia/air premixed flames at various equivalence ratios and pressures [J]. Mechanical Engineering Journal, 2015, 2(1): 14-00402-00414-00402.
- [98] C. Duynslaegher, H. Jeanmart, J. Vandooren. Flame structure studies of premixed ammonia/hydrogen/oxygen/argon flames: Experimental and numerical investigation [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 1277-1284.
- [99] Jun Li, Hongyu Huang, Lisheng Deng, et al. Effect of hydrogen addition on combustion and heat release characteristics of ammonia flame [J]. Energy, 2019, 175: 604-617.
- [100] Honzawa Takafumi, Kai Reo, Okada Akiko, et al. Predictions of NO and CO emissions in ammonia/methane/air combustion by LES using a non-adiabatic flamelet generated manifold [J]. Energy, 2019, 186: 115771.
- [101] Aaron J. Reiter, Song-Charng Kong. Demonstration of compression-ignition engine combustion using ammonia in reducing greenhouse gas emissions [J]. Energy & Fuels, 2008, 22: 2963-2971.
- [102] Stefano Frigo, Roberto Gentili. Analysis of the behaviour of a 4-stroke Si engine fuelled with ammonia and hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3): 1607-1615.
- [103] Aaron J. Reiter, Song-Charng Kong. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel [J]. Fuel, 2011, 90(1): 87-97.
- [104] Kyunghyun Ryu, George E. Zacharakis-Jutz, Song-Charng Kong. Effects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-

- ignition engine [J]. *Applied Energy*, 2014, 116: 206-215.
- [105] Shehan Omantha Haputhanthri, Timothy Taylor Maxwell, John Fleming, et al. Ammonia and gasoline fuel blends for spark ignited internal combustion engines [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2015, 137(6): 062201.
- [106] Ryu Kyunghyun, Zacharakis-Jutz George E., Kong Song-Chamng. Performance characteristics of compression-ignition engine using high concentration of ammonia mixed with dimethyl ether [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 488-499.
- [107] Yapicioglu Arda, Dincer Ibrahim. Experimental investigation and evaluation of using ammonia and gasoline fuel blends for power generators [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 154: 1-8.
- [108] S. S. Gill, G. S. Chatha, A. Tsolakis, et al. Assessing the effects of partially decarbonising a diesel engine by co-fuelling with dissociated ammonia [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(7): 6074-6083.
- [109] Westlye Fredrik R., Ivarsson Anders, Schramm Jesper. Experimental investigation of nitrogen based emissions from an ammonia fueled SI-engine [J]. *Fuel*, 2013, 111: 239-247.
- [110] Pavlos Dimitriou, Rahat Javaid. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11): 7098-7118.
- [111] Osamu Kurata, Norihiko Iki, Takayuki Matsunuma, et al. Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃-CH₄-air combustion gas-turbine power generations [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3351-3359.
- [112] Martin Keller, Mitsuo Koshi, Junichiro Otomo, et al. Thermodynamic evaluation of an ammonia-fueled combined-cycle gas turbine process operated under fuel-rich conditions [J]. *Energy*, 2020, 194: 116894.
- [113] Osamu Kurata, Norihiko Iki, Takahiro Inoue, et al. Development of a wide range-operable, rich-lean low-NO_x combustor for NH₃ fuel gas-turbine power generation [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4587-4595.
- [114] Akihiro Hayakawa, Yoshiyuki Arakawa, Rentaro Mimoto, et al. Experimental investigation of stabilization and emission characteristics of ammonia/air premixed flames in a swirl combustor [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 14010-14018.
- [115] Ekenechukwu C. Okafor, K. D. Kunkuma A. Somarathne, Akihiro Hayakawa, et al. Towards the development of an efficient low-NO_x ammonia combustor for a micro gas turbine [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4597-4606.
- [116] Kapuruge Don Kunkuma Amila Somarathne, Sophie Colson, Akihiro Hayakawa, et al. Modelling of ammonia/air non-premixed turbulent swirling flames in a gas turbine-like combustor at various pressures [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2018, 22(5): 973-997.
- [117] Kapuruge Don Kunkuma Amila Somarathne, Sotaro Hatakeyama, Akihiro Hayakawa, et al. Numerical study of a low emission gas turbine like combustor for turbulent ammonia/air premixed swirl flames with a secondary air injection at high pressure [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42: 27388-27399.
- [118] Ahmed E. E. Khalil, Ashwani K. Gupta. Hydrogen addition effects on high intensity distributed combustion [J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 71-78.

- [119]J. M. Joo, S. Lee, O. C. Kwon. Effects of ammonia substitution on combustion stability limits and NO_x emissions of premixed hydrogen–air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37: 6933-6941.
- [120]D. H. Um, J. M. Joo, S. Lee, et al. Combustion stability limits and NO_x emissions of nonpremixed ammonia-substituted hydrogen–air flames [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(34): 14854-14865.
- [121]Yu. N. Shebeko, A. V. Trunev, S. G. Tsarichenko, et al. Investigation of concentration limits of flame propagation in ammonia-based gas mixtures [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1996, 32: 477-480.
- [122]Najlaa Ali Hussein, August Valera-Medina, Ali Safa Alsaegh. Ammonia-hydrogen combustion in a swirl burner with reduction of NO_x emissions [J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 2305–2310.
- [123]Pugh Daniel, Bowen Philip, Valera-Medina Agustin, et al. Influence of steam addition and elevated ambient conditions on NO_x reduction in a staged premixed swirling NH₃/H₂ flame [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5401-5409.
- [124]Okafor Ekenechukwu C., Somarathne K. D. Kunkuma A., Ratthanan Rattanasupapornsak, et al. Control of NO_x and other emissions in micro gas turbine combustors fuelled with mixtures of methane and ammonia [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 211: 406-416.
- [125]London. BP Statistical Review [M]. 2018.
- [126]Sakiko Ishihara, Juwei Zhang, Takamasa Ito. Numerical calculation with detailed chemistry on ammonia co-firing in a coal-fired boiler: Effect of ammonia co-firing ratio on NO emissions [J]. *Fuel*, 2020, 274: 117742.
- [127]Ishihara Sakiko, Zhang Juwei, Ito Takamasa. Numerical calculation with detailed chemistry of effect of ammonia co-firing on NO emissions in a coal-fired boiler [J]. *Fuel*, 2020, 266: 116924.
- [128]Zhang Juwei, Ito Takamasa, Ishii Hiroki, et al. Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: Effect of ammonia co-firing ratio [J]. *Fuel*, 2020, 267: 117166.
- [129]Sorrentino Giancarlo, Sabia Pino, De Joannon Mara, et al. The effect of diluent on the sustainability of MILD combustion in a cyclonic burner [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2015, 96(2): 449-468.
- [130]Sabia P., Sorrentino G., Bozza P., et al. Fuel and thermal load flexibility of a MILD burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4547-4554.
- [131]Sorrentino Giancarlo, Sabia Pino, Bozza Pio, et al. Low-NO_x conversion of pure ammonia in a cyclonic burner under locally diluted and preheated conditions [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113676.
- [132]Siou-Sheng Su, Sheng-Jye Hwang, Wei-Hsiang Lai. On a porous medium combustor for hydrogen flame stabilization and operation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(36): 21307-21316.
- [133]Nozari Hadi, Karaca Gizem, Tuncer Onur, et al. Porous medium based burner for efficient and clean combustion of ammonia–hydrogen–air systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(21): 14775-14785.
- [134]Hinokuma Satoshi, Kiritoshi Saaya, Kawabata Yusuke, et al. Catalytic ammonia combustion properties and operando characterization of copper oxides supported on aluminum silicates and silicon oxides [J]. *Journal of Catalysis*, 2018, 361: 267-277.

[135]Filipe Ramos C., Rocha Rodolfo C., Oliveira Pedro M.
R., et al. Experimental and kinetic modelling
investigation on NO, CO and NH₃ emissions from

NH₃/CH₄/air premixed flames [J]. Fuel, 2019, 254:
115693.



周上坤 (1995), 男, 博士研究生, 主要从事
氨燃烧火焰传播特性和污染物生成特性等方面研
究, 1750049861@qq.com.

中国知网