

水蒸气掺混对氨裂解气旋流燃烧与排放特性的影响研究

刘嘉文, 许嘉阳, 张猛, 王金华, 黄佐华
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为明晰水蒸气掺混对于氨裂解气旋流燃烧的影响规律,探究适用于不同裂解率 C 的水蒸气掺混比例 H 。采用燃烧与回火极限测量、数码照相、羟基平面激光诱导荧光(OH-PLIF)、粒子图像测速(PIV)以及尾气分析等手段,对预混旋流燃烧器中氨裂解燃烧和污染物排放特性进行了研究,并结合化学反应网络阐明了水蒸气掺混对于氮氧化物(NO_x)降低的机理。结果表明:一方面,水蒸气掺混有明显弱化燃烧的作用;相比于 $H=0$ 的条件,当 $H=0.1, 0.2$ 时,在 $0.2 < C < 0.4$ 范围内,燃烧当量比范围缩减了 21.1%~50.9%,火焰自发光减弱,OH 信号降低 66%~75%,燃烧尾气中 NH_3 排放提升了 18%~368%;另一方面,水蒸气掺混明显增强了燃烧均匀性并降低了 NO_x 排放; $H=0.1, 0.2$ 时的火焰对称性分别提高了 11.8%和 56.3%, NO_x 排放降低了 60%~90%。 NO_x 排放降低是燃料型与热力型 NO_x 生成速率降低、De- NO_x 反应增强共同作用的结果。总体而言, $0.2 < C < 0.4$ 时采用 $H=0.1$ 的水蒸气掺混比例、 $C > 0.4$ 时采用 $H=0.2$ 的水蒸气掺混比例是较合理的策略。

关键词: 氨裂解燃烧;旋流燃烧;水蒸气掺混;氮氧化物;平面激光诱导荧光

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202607009 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0088-9

Effects of Steam Addition on the Swirl Combustion and Emission Characteristics of Cracked Ammonia

LIU Jiawen, XU Jiayang, ZHANG Meng, WANG Jinhua, HUANG Zuohua
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To clarify how steam addition affects the swirl combustion of cracked ammonia and to identify the optimal steam blending ratios (H) for various cracking rates (C), the combustion and pollutant emission characteristics of cracked ammonia in a premixed swirl combustor were investigated. Experimental methods including combustion and flashback limit measurements, digital imaging, OH plane laser-induced fluorescence (OH-PLIF), particle image velocimetry (PIV), and exhaust gas analysis were employed. Furthermore, the mechanism of nitrogen oxide (NO_x) reduction through steam addition was elucidated using a chemical reaction network (CRN). The results indicate that steam addition significantly weakens the combustion intensity. Compared to $H=0$, the combustion equivalence ratio is reduced by 21.1%—50.9% for $0.2 < C < 0.4$ when H is set to 0.1 and 0.2. Correspondingly, the flame chemiluminescence is weakened, the OH signal intensity

decreases by 66%—75%, and NH_3 emissions in the exhaust gas increase by 18%—368%. Conversely, steam addition significantly enhances combustion uniformity and suppresses NO_x emissions. Specifically, flame symmetry is improved by 11.8% and 56.3% at $H=0.1$ and 0.2 , respectively, with a 60%—90% reduction in NO_x emissions. This NO_x reduction is attributed to the combined effects of decreased formation rates of fuel-type and thermal-type NO_x , along with the enhancement of De- NO_x reactions. Overall, a steam blending ratio of $H=0.1$ is recommended for $0.2 < C < 0.4$, whereas $H=0.2$ is preferred for $C > 0.4$.

Keywords: cracked ammonia combustion; swirl combustion; steam addition; NO_x ; plane laser-induced fluorescence

氨(NH_3)作为一种零碳的氢基燃料,近些年来备受能源界的关注,因其不仅可作为大规模绿氢储运的载体,助力实现风、光等可再生能源的储能;也可以作为燃料直接燃烧提供动力或热能^[1]。近年来,氨作为燃料在燃气轮机中的应用备受关注,在面向燃气轮机的氨燃烧研究中,纯氨燃烧的火焰不稳定性以及较高的 NO_x 排放被认为是制约氨燃烧应用推广的两大难点^[2-3]。

氨燃烧的火焰不稳定性主要是由氨本身的低层流火焰速度、低绝热火焰温度引起的,这进一步导致氨火焰抗拉伸能力差、燃烧范围窄^[4]。针对这一问题,学者提出使用小分子活性燃料助燃的方式进行燃烧稳定性优化。以甲烷为代表的碳基燃料无法满足减碳需求,因此氢气成为更优质的掺混燃料^[5]。在氢氨融合领域,近年来的研究结果表明^[5-7],少量氢气的掺混就可以极大地提高氨燃烧的火焰稳定性。但在实际应用层面,直接掺混氢气需要额外的燃料供应线路,增大设备成本,因此需要寻找一种更加简洁的氢氨融合燃料供应方式。氨在高温下可脱氢分解为氢气和氮气,该过程也被称为氨裂解,由于采用氨裂解只需要以单一燃料氨进行供应,也能够避免氨储运过程的各种问题,近年来被认为是最具潜力的氢氨融合燃料燃烧利用方法^[8-10]。

在氨裂解燃烧领域,Mei 等^[11]对部分裂解氨的层流火焰传播与 NO 生成特性进行了研究,发现裂解氨能够显著拓宽氨可燃极限,体积分数为 40% 的裂解混合气,层流火焰速度与甲烷接近。Shohdy 等^[12]对氨裂解和等离子体助燃对火焰稳定性的增强进行了比较,发现在相同的功率添加条件下,氨裂解的功效优于等离子体助燃。Zhou 等^[13]同样针对氨裂解进行了大规模化学反应器网络(CRN)研究,发现氨裂解策略能够有效地提高氨燃烧效率。上述研究充分证明了氨裂解对提高氨火焰稳定性的优越性能。然而,氨裂解却面临 NO_x 排放升高的风险。

由于燃料含氮,氨燃烧产生的 NO_x 中包含了大量的燃料型 NO_x 以及部分热力型 NO_x 。氨裂解后,氢气的掺混会导致火焰温度升高, O、H、OH 自由基含量提升,这将使得燃料型和热力型 NO_x 生成均得到促进^[14]。这一点在氢氨融合燃烧研究中有众多学者进行了验证。An 等^[15]在旋流燃烧室中进行了不同裂解率下氨燃烧的研究,发现在裂解率到达 60% 时, NO_x 排放随裂解率上升单调上升。Gubbi 等^[16]发现,只有在接近 100% 裂解时,氨裂解燃烧才可能达到较低的 NO_x 排放。实现 100% 氨裂解对催化剂和温度要求均较高,这会导致燃机系统的能量损失增加、成本上升,且极高的氢含量会造成回火、燃烧振荡、氢脆等一系列问题^[17]。因此需采取有效手段缓解氢气含量升高带来的 NO_x 排放问题。

水蒸气的掺混被认为是一种有效解决上述问题的手段。20 世纪起,水蒸气掺混就被认为是提高燃气轮机动力循环效率、提升输出功率的有效方法^[18-19],采用这种方法的燃气轮机也被称为“湿式燃气轮机”。这种方法被广泛地应用于固定式地面燃气轮机降低 NO_x 排放、提高燃烧均匀性方面^[20]。Kaiser 等^[21]在燃气轮机中掺混过热蒸汽,实现了油耗降低 13%、 NO_x 排放降低近 90%。Cong 等^[22]在射流搅拌反应器(JSR)中进行了甲烷和氢气掺水反应的实验,发现水蒸气的注入可显著减少 NO 排放,主要是由于稀释、 N_2 浓度的降低和热效应导致的。Ariemma 等^[23]则在温和低氧燃烧(MILD)条件下,对掺水条件下预混与非预混的氨燃烧 NO_x 排放进行了研究,发现掺水能够增强 De- NO_x 反应,甚至能够将 NO_x 排放降低到 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 级别。Subramanian 和 Wang 等^[24-25]在内燃机中同样进行了注水实验,发现掺水后,由于峰值温度的降低, NO_x 排放明显降低。上述研究充分证明了注水这一策略在减少 NO_x 排放方面的有效性和可行性。

水蒸气掺混也被证实会影响燃烧稳定性^[26-28]。因此在氨裂解气燃烧领域,低裂解率下过量掺水蒸气易导致火焰失稳,而在较高裂解率下少量掺水难以限制 NO_x 的生成,仍可能发生回火等火焰不稳定性问题。针对不同裂解率的氨裂解气,掺水量大小尤为重要。因此,本研究针对不同裂解率下的氨裂解气旋流火焰,进行不同掺水量的实验研究。首先通过羟基平面激光诱导荧光(OH-PLIF)、粒子图像测速(PIV)、燃烧极限测量等手段对其燃烧特性进行研究,随后进行污染物排放测量以及 CRN 分析,研究其排放特性。提出适用于不同裂解率的水蒸气掺混比例方案,为水蒸气掺混在氨裂解气燃烧领域的应用提供指导。

1 实验装置及方法

1.1 水蒸气供应装置与燃烧器

本研究所采用的水蒸气供应装置及燃烧器如图 1 所示。水蒸气发生装置主要由空气供应装置、水供应装置、加热装置组成。纯净水储存于密闭储水罐中,储水罐与高压氮气瓶相连通,利用氮气压力将纯净水压出,通过科里奥利液体质量流量计(Bronkhorst, mini CORI-FLOW)精确控制流量,与气体流量计控制的空气在破碎阀处混合,载气在破碎阀处将水滴击碎,随后依次流经加热器与复热器,形成温度超 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温水蒸气-空气混合物,确保无液态水残留。该混合物从预混旋流燃烧器进气段中部汇入,与另一路空气和燃料混合后进入燃烧室。本研究所采用的预混旋流燃烧器具体结构参数在团队先前的工作中有详细描述^[4-5]。空气与燃料分别从预混段两侧进入,与水蒸气混合后经过扩张段混合,并通过孔板整流。燃烧室四周由石英玻璃组成,以进行激光诊断。

1.2 实验方法

为了研究水蒸气对氨裂解气火焰特性的影响,本研究采用 OH-PLIF 与 PIV 技术对火焰结构与流场进行了拍摄。其中 OH-PLIF 采用 10 Hz 的掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器(Quanta-Ray Pro-190)。激光经倍频晶体处理后调谐至 OH 自由基的激发波长,再经片光镜组整形,形成高度约为 60 mm 、厚度约为 0.2 mm 的激光片光。OH 自由基荧光信号由配备紫外镜头(焦距为 105 mm ,最大光圈 $f/4.5$)、带通滤波片($(310\pm 10)\text{ nm}$)、 $1\,600\text{ 像素}\times 1\,200\text{ 像素}$ 的 ICCD 相机(LaVision ImagePro X)采集。PIV 系统采用 Nd:YAG 激光器(Litron)产生波长为 532 nm 的激光,由导光臂引出后经过片光镜组整形,形成高度约为 65 mm 、厚度约为 0.3 mm 的片光。激光片光照射在与主流空气伴流的 TiO_2 粒子上,使粒子产生 Mie 散射光, Mie 散射信号由配备微距镜头(100 mm , $f/2.8$)、带通滤波片($(532\pm 5)\text{ nm}$)、 $2\,432\text{ 像素}\times 2\,048\text{ 像素}$ 的 CCD 相机采集。本研究中速度测量的随机误差约为瞬时速度测量值的 5% ,系统误差通过重复测量的标准差评估,约为 5% 。综合随机误差与系统误差,速度测量结果的总不确定度为 10% 。污染物测量方面,本研究基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)测量 NH_3 ,测量范围为 $0\sim 0.01$,分辨率为 1×10^{-6} ,测量精度为 $\pm 1\%$;通过非分散红外技术(NDIR)测量 N_2O ,测量范围为 $0\sim 2\times 10^{-3}$,分辨率为 1×10^{-6} ,不确定度为 $\pm 1\%$;采用电化学原理测量 NO 、 NO_2 、 O_2 ,其中 NO 的测量范围为 $0\sim 3.7\times 10^{-3}$,分辨率为 1×10^{-6} ,不确定度为 $\pm 2\%$; NO_2 测量范围为 $0\sim 10^{-3}$,不确定度为 $\pm 2\%$; O_2 测量范围为 $0\sim 25\%$,分辨率为 10^{-4} ,不确定度为 $\pm 2\%$ 。

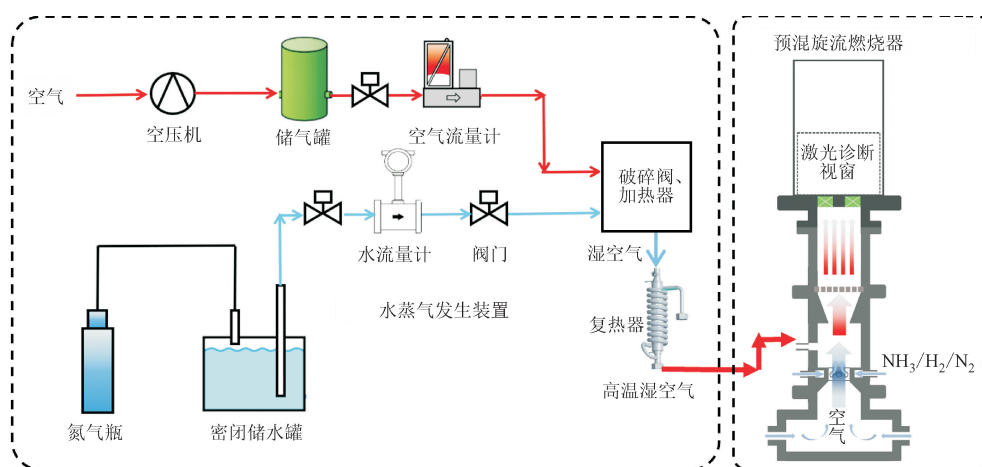


图 1 水蒸气环境下裂解气燃烧装置

Fig. 1 Cracking ammonia gas combustion device in steam environment

1.3 实验工况

本研究采用氨气、氢气与氮气按一定配比配制的混合气体模拟氨裂解气。定义裂解率 C 为氨气的裂解比例,表达式为

$$C = \frac{V_1(\text{NH}_3)}{V_0(\text{NH}_3)} = \frac{2x(\text{H}_2)}{3x(\text{NH}_3) + 2x(\text{H}_2)} \quad (1)$$

式中: $V_1(\text{NH}_3)$ 为裂解后的氨气体积; $V_0(\text{NH}_3)$ 为裂解前氨气的体积; $x(\text{NH}_3)$ 、 $x(\text{H}_2)$ 分别为裂解气中氨气和氢气的体积分数。本研究将水蒸气归为氧化剂组分,定义水蒸气掺混比例 H 为水蒸气在氧化剂中的体积分数,计算公式为

$$H = \frac{x(\text{H}_2\text{O})}{x(\text{H}_2\text{O}) + x(\text{Air})} \quad (2)$$

式中: $x(\text{H}_2\text{O})$ 为氧化剂中水蒸气的体积分数; $x(\text{Air})$ 为氧化剂中空气的体积分数。需说明的是,此处的空气来源为水蒸气发生装置中的载气空气与主流空气的总和。实际应用中,水蒸气由燃烧尾气余热加热制备,600℃ 的尾气余热最大可实现 $H = 0.216$ 的水蒸气掺混比例,因此本研究设置 $H = 0, 0.1, 0.2$ 共3种掺混比例,在3种掺水量下分别以0.1的间隔对 C 为0~0.6的火焰进行了研究。为便于表示,本文采用“ C (C 的数值) H (H 的数值)”的形式表示不同工况。例如, $C0H0$ 表示裂解率为0、水蒸气掺混比例为0的工况。

工况设计方面,水蒸气掺混引入的额外流速是其影响燃烧特性的重要因素,因此控制除水蒸气外混合气体的总流速恒定为3 m/s。探究水蒸气对燃烧特性的影响时,为最大程度保证燃烧效率,实验采用的当量比为0.9。开展污染物排放测量时,为完整覆盖氨裂解气的低 NO_x 排放区间,对部分工况下当量比在0.7~1.1范围内的火焰进行测试。详细的工况参数如表1所示。

表1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

工况	C	H	当量比	功率 P/kW
$C0H0$	0	0	0.7~1.1	2.98
$C0.1H0$	0.1	0	0.9	2.96
$C0.2H0$	0.2	0	0.7~1.1	2.95
$C0.3H0$	0.3	0	0.9	2.93
$C0.4H0$	0.4	0	0.7~1.1	2.92
$C0H0.1$	0	0.1	0.7~1.1	2.98
$C0.1H0.1$	0.1	0.1	0.9	2.96
$C0.2H0.1$	0.2	0.1	0.7~1.1	2.95
$C0.3H0.1$	0.3	0.1	0.9	2.93
$C0.4H0.1$	0.4	0.1	0.7~1.1	2.92

续表

工况	C	H	当量比	功率 P/kW
$C0.5H0.1$	0.5	0.1	0.7~1.1	2.91
$C0.1H0.2$	0.1	0.2	0.9	2.96
$C0.2H0.2$	0.2	0.2	0.7~1.1	2.95
$C0.3H0.2$	0.3	0.2	0.9	2.93
$C0.4H0.2$	0.4	0.2	0.7~1.1	2.92
$C0.5H0.2$	0.5	0.2	0.7~1.1	2.91
$C0.6H0.2$	0.6	0.2	0.7~1.1	2.90

2 结果与讨论

2.1 燃烧特性

本节对水蒸气掺混对氨裂解气的燃烧特性进行分析。图2为不同 C 与 H 下氨裂解气火焰的浓、稀燃极限及回火边界。高当量比极限为浓燃极限,低当量比极限为稀燃极限。浓、稀燃极限的测量方法参照 Mashruk 等^[29]的研究方法。当量比为0.9时,逐步提高 C ,当火焰下沉进入旋流器内部时,判定为达到回火边界。结果表明: H 增大或 C 减小均会使燃烧极限显著变窄,但高 C 下水蒸气掺混对浓燃极限的影响更显著,对稀燃极限的影响则较小;当 $C < 0.056$ 时,因氨含量较高, $H = 0.2$ 时火焰无法稳定燃烧。此外,水蒸气掺混可拓宽燃烧室的耐受裂解率范围,提升火焰的抗回火能力。这可能是火焰传播速度降低与整体流速提高共同作用的结果。从火焰稳定性角度分析, H 的选取与 C 高度相关,低 C 下选取过高的 H 会导致火焰燃烧稳定性下降,而高 C 下选取过低的 H 则易引发回火等火焰不稳定问题。

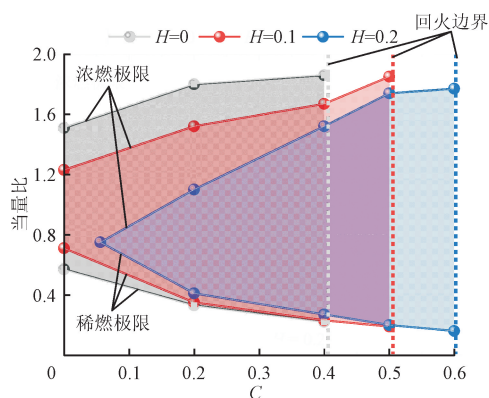


图2 不同 C 和 H 下火焰燃烧与回火边界

Fig. 2 Combustion and flashback limit of different C and H

根据图2的结果选取实验工况,并对部分工况下的火焰进行数码照片拍摄、OH平面激光诱导荧光成像及粒子图像测速测试。火焰的宏观形态数码照片如图3所示。其中红色虚线框为OH-PLIF的

测量视窗范围,蓝色虚线框为 PIV 的测量视窗范围。从火焰形态可看出,随 C 的上升,火焰高度降低、外回流区减小,火焰颜色由黄色向白色转变。

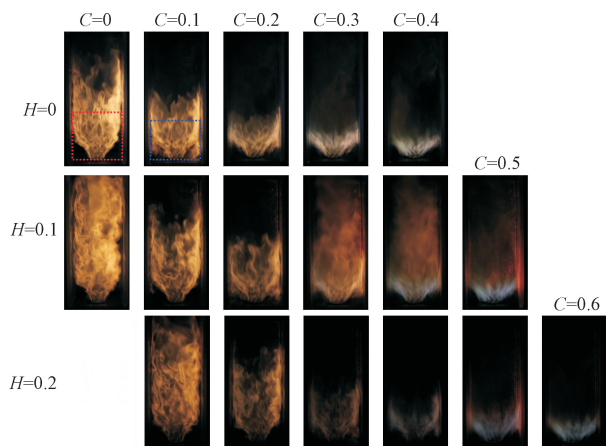


图 3 不同 C 和 H 条件下的 OH-PLIF 平均图像

Fig. 3 Average OH-PLIF images of different C and H

从火焰形态可以发现,随着 C 的上升,火焰高度下降、外回流区减小,火焰颜色由黄色向白色转变。随 H 增大,火焰高度增加,火焰亮度降低。火焰形态的上述变化主要由于燃料组分特性改变引起, C 增大会使 NH_2 自由基生成量减少,进而导致黄色化学发光强度降低^[30]。 H 增大会降低火焰传播速度与火焰温度,进而造成火焰化学发光强度减弱。图 4 为不同 C 和 H 下的 OH-PLIF 平均成像图。每张图像均由 300 张瞬时图像经平均、背景扣除及滤波处理后得到,为便于展示,仅截取图像的对称半区。OH 信号强度是 ICCD 相机拍摄的无量纲数值。随 C 增大,全场 OH 信号呈增强趋势,尤其贴近燃烧室壁面及外回流区的 OH 信号显著增强。火焰外轮廓由平滑弧线变为较尖锐的曲线。随 H 增大,OH-PLIF 成像图在保持基本形态不变的情况下,OH 信号明显衰减,这进一步表明燃烧反应强度减弱。

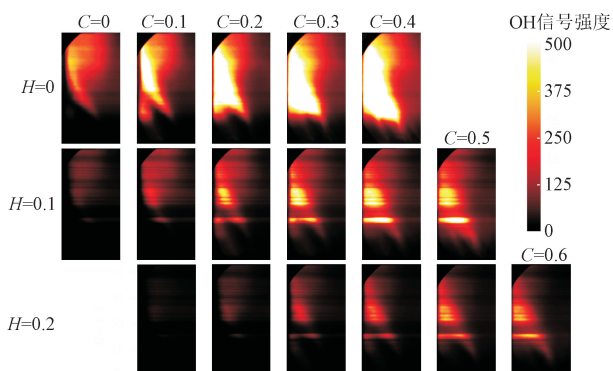


图 4 不同 C 和 H 条件下的 OH-PLIF 平均场

Fig. 4 Average OH-PLIF of different C and H

为定量地分析火焰 OH-PLIF 成像的信号特征,图 5 给出了 OH-PLIF 平均场中信号的概率密度函数(PDF)分布。可看出,未掺混水蒸气时,OH 信号的 PDF 分布具有较明显的双峰特征,且存在大量高信号强度点。掺混水蒸气后,PDF 分布向低信号强度聚集,双峰特征逐渐消失,转变为低信号强度附近的平台分布。这种 OH 信号的衰减效应有助于抑制 NO_x 的生成。另外,水蒸气掺混也能提升火焰的对称性。将 OH-PLIF 平均场中每一对对称像素点的信号值做差、平方并开方再除以该两个像素点的信号平均值,即可得到局部信号对称性的表征值。全场局部表征值的平均值可反映火焰的整体对称性;经计算, $H=0.1, 0.2$ 时火焰的对称性较 $H=0$ 时分别提升了 11.8%、56.3%,这表明火焰燃烧更均匀,有助于延长燃烧室的使用寿命。

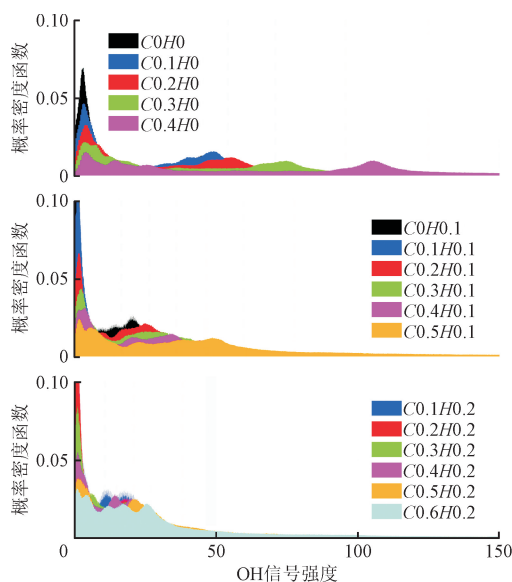


图 5 不同 C 和 H 下的 OH-PLIF 的概率密度函数分布

Fig. 5 PDF distribution of the average OH-PLIF of different C and H

2.2 流场特性

水蒸气掺混会提高混合气体的整体流速,因此需要阐明不同 H 下氨裂解气火焰的流场特性。图 6 为不同工况下火焰流场的轴向速度分布云图。 x, y 分别为 PIV 测量平面内的空间坐标,其中黑色实线为轴向速度为 0 的等值线,代表内回流区(IRZ)的边界。为对比 H 的影响,选取 $C=0.2, 0.3, 0.4$ 的工况开展流场特性对比分析。结果表明,不同工况的流场结构相似,整体可分为中心 IRZ 区与边缘高速流区。随 H 增大,因混合气流速提高,高速区流速增大,IRZ 的回流强度也随之增强,这易

导致中心剪切层的剪切应力增大。此外,从 IRZ 的形状可以看出,随 H 增大,IRZ 在绝大部分高度均呈扩张趋势,这会将高速流区向燃烧室壁面方向挤压,使混合气体在更小的空间内快速向下游流动,进而可能导致燃料在燃烧室中的滞留时间缩短。

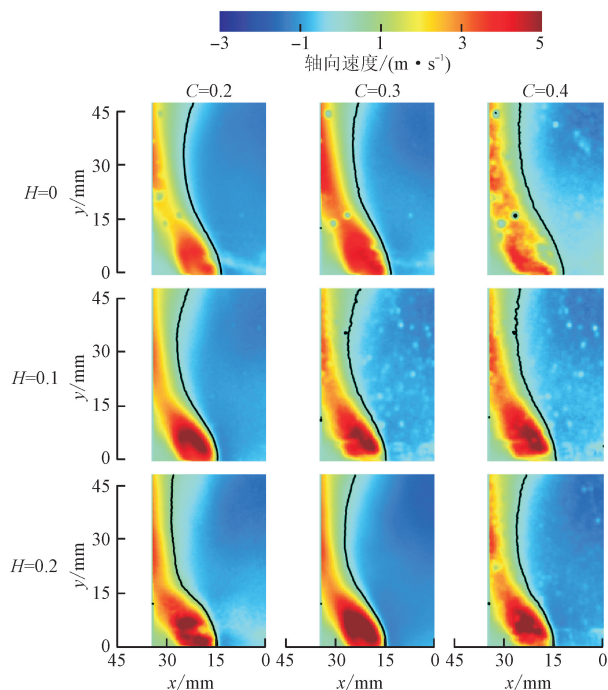


图 6 不同 C 和 H 下的轴向速度场

Fig. 6 Axial velocity field of different C and H

为量化 IRZ 的尺寸特征,本研究定义了归一化回流区面积,以 IRZ 面积最大的 $C0.2H0.2$ 工况为基准,对其余工况的 IRZ 面积进行归一化处理,结果如图 7 所示。结果表明,随 H 增大或 C 减小,IRZ 的面积增大。Kim 等^[31]的研究结果表明,旋流燃烧中燃料的反应活性对反应区尺寸影响显著;因此 C 增大会通过增大反应区面积,导致 IRZ 面积减小,而 H 增大不仅会降低燃料的反应活性,还会提高混合气体的整体流速,因此 IRZ 呈现扩张趋势。

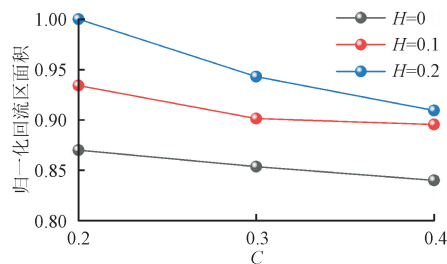
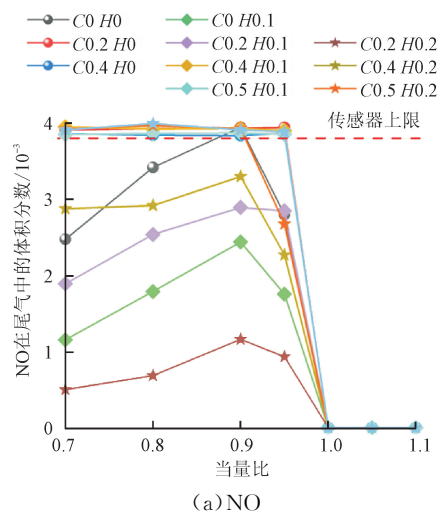


图 7 不同 C 和 H 下的归一化 IRZ 面积分布

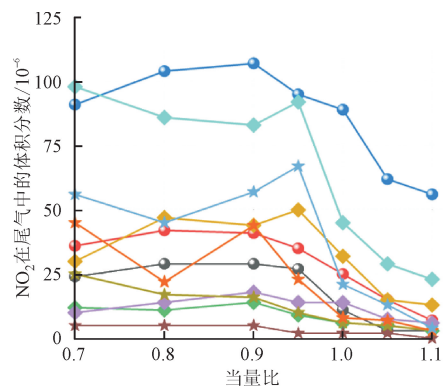
Fig. 7 Normalized area of IRZ of different C and H

2.3 排放特性

本节分析水蒸气掺混对氨裂解气火焰污染物排放特性的影响。需说明的是,本研究实验中采用预热温度超 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的空气,使燃烧场整体温度较高, N_2O 排放浓度接近 0,因此本文未对 N_2O 排放进行分析。仅对表征 NO_x 排放的 NO 、 NO_2 及表征燃烧效率的 NH_3 排放特性进行分析,结果如图 8 所示。从 NO 排放浓度分布可知,多数稀燃工况下 NO 排放浓度超出传感器测量上限,仅有 $C0H0.1$ 、 $C0.2H0.1$ 、 $C0.2H0.2$ 、 $C0.4H0.2$ 这 4 个工况的 NO 排放浓度完全处于传感器测量上限范围内,浓燃时所有工况的 NO 排放测量结果都接近于 0。从上述 4 组数据可以发现,随着 C 的上升, NO 排放呈上升趋势,这是由于含氢量提高后火焰温度以及 OH 自由基浓度上升,加剧热力型与燃料型 NO 生成^[15]。随着 H 的上升, NO 呈明显的下降趋势。 C 和 H 对 NO_2 的影响规律与 NO 相同,随着 H 的上升, NO_2 排放降低。这是由于 NO_2 是由 NO 被 HO_2 氧化生成的,因此可以从 NO_2 的测量结果推测掺水对于 NO 排放的降低的定量效果^[14]。另外,随着 H 的上升, NH_3 排放出现上升趋势,说明燃烧效率下降了,与火焰稳定性降低一致。



(a) NO



(b) NO_2

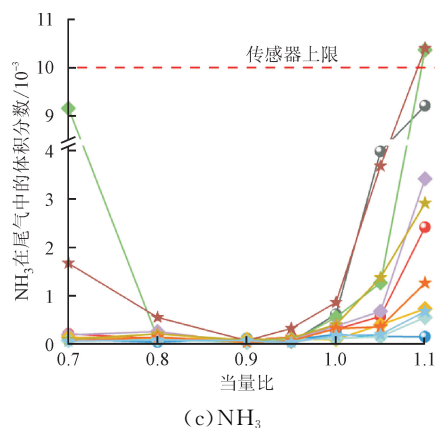


图 8 不同 C 和 H 下 NO 、 NO_2 、 NH_3 的排放特性
Fig. 8 NO , NO_2 and NH_3 emissions characteristics of different C and H

为了综合衡量水蒸气的掺混对于 NO_x 和 NH_3 排放的影响,选取了燃烧情况较为良好的当量比 (0.8~1.0 范围)下的数据,对 $C=0.2, 0.4$ 时掺水工况相对于不掺水工况的 NO_2 和 NH_3 排放数值变化比例 Δ_e 进行了统计对比。结果如图 9 所示,可以发现, $H=0.1$ 时, NO_2 排放普遍下降了 60% 左右, NH_3 排放上升了 18%~39%; $H=0.2$ 时, NO_2 排放下降了 90% 左右,而 NH_3 排放则上升了 290%~368%。这说明掺水虽然对 NO_x 有明显降低作用,但也会造成氨逃逸的上升。

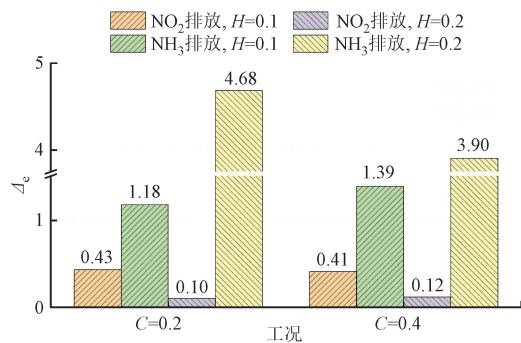


图 9 C 为 0.2 和 0.4 时不同 H 下 NO_2 和 NH_3 的排放变化比例
Fig. 9 Emission change ratio of NO_2 and NH_3 under different H at C of 0.2 and 0.4

具体来说,图 8 中当量比为 0.7 时 $C0.1H0.1$ 和 $C0.2H0.2$ 两个工况存在较高的 NH_3 排放,这说明其燃烧效率较低,燃烧稳定性较差。这两个工况的共同点是在较低 C 下进行了水蒸气的掺混。由于掺混水蒸气,其火焰温度将大大降低,这将导致自燃温度较高的 NH_3 燃烧不完全。另外, NH_3 在高温下会自然热解为 H_2 [32],这种效应也会随着水蒸气的掺混减弱。最后,由于水蒸气的掺混导致整体流速上升,

这会降低氨的驻留时间,进一步造成可能的氨逃逸现象。这说明更高的 H 可能更适配于高 C 工况。因此,为了在不牺牲燃烧效率的情况下实现降低 NO_x 的效果,在 $0.2 < C < 0.4$ 时进行 $H=0.1$ 的掺水,在 $C > 0.4$ 时采用 $H=0.2$ 的掺水是较为合理的策略。

2.4 CRN 分析

本节使用 Chemkin Pro 软件对掺水影响下的燃烧过程进行一维化学反应网络计算,并对 NO 生成路径进行敏感性分析,阐明水蒸气影响 NO 排放的机理。CRN 设置参考了 Zhang 等 [33] 的设置方法,旋流燃烧室被分为主燃区、回流区以及后火焰区 3 个 PSR 反应器,通过前述火焰特性的测量结果给定各区块的面积以及流速。该方法被认为能够精确描述目前燃烧器内氨燃烧的化学反应路径。化学反应采用 Stagni 等 31 组分 203 步反应的机理 [34]。为了分析水蒸气掺混量的影响,分别对 $C0.2H0$ 、 $C0.2H0.1$ 、 $C0.2H0.2$ 这 3 个工况进行了计算。

图 10 展示了 $C=0.2$ 时不同 H 下 10 种与 NO 生成与消耗最相关的反应的归一化敏感性分析结果。可以发现,在不同的 H 下,对 NO 生成最为敏感的反应为燃料型 NO 生成的关键反应: $\text{NH} + \text{OH} \rightleftharpoons$

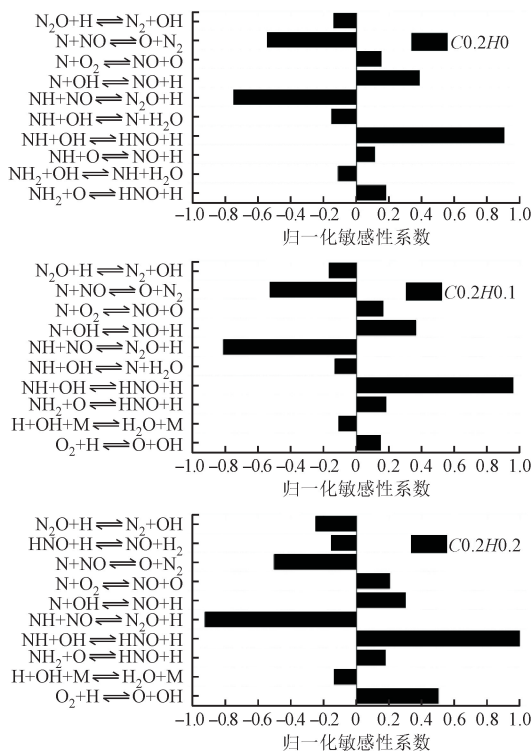


图 10 $C=0.2$ 时不同 H 下 10 种与 NO 最相关反应的归一化敏感性分析

Fig. 10 Normalized sensitivity coefficients on the 10 most sensitive reactions with respect to NO under different H at $C=0.2$

$\text{HNO} + \text{H}$, 该反应的敏感性系数几乎不随 H 的改变而改变。然而, 随着 H 的上升, 热力型 NO 生成的关键反应 $\text{N} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{NO} + \text{H}$ 的敏感性系数逐渐下降, 同时 De- NO_x 关键反应 $\text{NH} + \text{OH} \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O} + \text{H}$ 的敏感性系数则呈现出增大的趋势。

进一步地, 图 11 展示了 NO 的中间组分产率 (ROP) 分析结果。该分析结果统计了所有热力型和燃料型 NO 生成以及 De- NO_x 反应的结果。结果显示, 随着 H 的上升, 热力型与燃料型 NO 生成速率都呈现相似斜率的下降, 这导致这两者的比值近乎不变, 在 2.3 附近波动。De- NO_x 反应的速率在 H 由 0 升至 0.1 时大幅提高, 在 H 进一步升至 0.2 时则保持不变。这可能与 NH_i 自由基以及 NO 本身的浓度下降有关。这说明水蒸气的掺混同时降低了热力型与燃料型 NO 的生成, 并且增强了 De- NO_x 反应对 NO 的消耗。

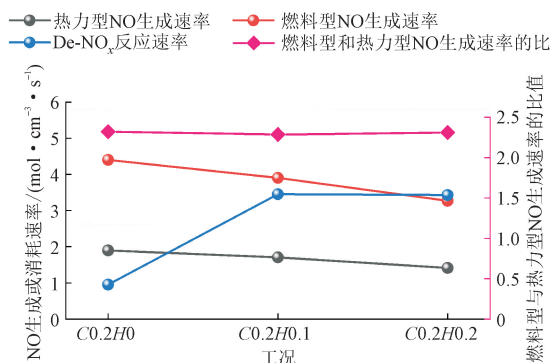


图 11 $C=0.2$ 时不同 H 下 NO 的 ROP 分析结果

Fig. 11 ROP analysis results on NO under different H at $C=0.2$

3 结 论

本文采用 OH-PLIF、PIV 等手段给出了水蒸气对于氨裂解气火焰形态、火焰稳定性及流场特性的影响。对水蒸气掺混条件下的氨裂解气污染物进行了测量, 并通过一维 CRN 分析阐明了水蒸气对于氨裂解气 NO 排放降低的机理, 具体的结论如下。

(1) 水蒸气掺混会降低火焰燃烧强度, 使得燃烧当量比极限明显变窄, 但同时也会拓宽氨裂解气的回火边界, 使得目前的燃烧器能够支持更高裂解率下的火焰稳定燃烧。

(2) 水蒸气掺混并不会显著改变火焰形态, 但会使火焰亮度降低, OH-PLIF 信号大幅下降, OH 信号的 PDF 分布从双峰形态变换为在较低信号附近聚集。从速度场分析, 水蒸气的掺混使得整体流速上升, 高速区变窄, 回流区扩张。

(3) 水蒸气掺混会使得燃料型与热力型 NO 生成速率降低, De- NO_x 反应加强, 因此会使 NO_x 排放大幅下降, 但同时也会导致 NH_3 排放上升。在本文的燃烧器中, 在 $0.2 < C < 0.4$ 时进行 $H=0.1$ 的掺水、在 $C > 0.4$ 时采用 $H=0.2$ 的掺水是较为合理的策略。另外, 在保证进气大于 150°C 的条件下, 几乎不会产生 N_2O 排放。

参考文献:

- [1] Elbaz A M, Wang Shixing, Guiberti T F, et al. Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications [J]. Fuel Communications, 2022, 10: 100053.
- [2] Kobayashi H, Hayakawa A, Somaratne K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109-133.
- [3] Zhang Meng, Wei Xutao, An Zhenhua, et al. Flame stabilization and emission characteristics of ammonia combustion in lab-scale gas turbine combustors: recent progress and prospects [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2025, 106: 101193.
- [4] Zhang Meng, Wei Xutao, Wang Jinhua, et al. The blow-off and transient characteristics of co-firing ammonia/methane fuels in a swirl combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5181-5190.
- [5] Wei Xutao, Zhong Meng, Wang Jinhua, et al. Investigation on lean blow-off characteristics and stabilization mechanism of premixed hydrogen enhanced ammonia/air swirl flames in a gas turbine combustor [J]. Combustion and Flame, 2023, 249: 112600.
- [6] Xing Jiangkuan, Pillai A L, Kurose R. Heat release rate surrogate for ammonia-hydrogen premixed flames under various conditions [J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2023, 15: 100193.
- [7] Zhu Xuren, Khateeb A A, Guiberti T F, et al. NO and OH* emission characteristics of very-lean to stoichiometric ammonia-hydrogen-air swirl flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5155-5162.
- [8] 高一博, 胡二江, 殷阁媛, 等. 等离子体催化铁系金属催化剂氨分解制氢研究进展 [J]. 力学学报, 2023, 55(12): 2750-2767.
- Gao Yibo, Hu Erjiang, Yin Geyuan, et al. Research progress in ammonia decomposition of iron series metal catalysts assisted by plasma [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(12):

- 2750-2767.
- [9] Asif M, Sidra Bibi S, Ahmed S, et al. Recent advances in green hydrogen production, storage and commercial-scale use via catalytic ammonia cracking [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 473: 145381.
- [10] Yousefi Rizi H A, Shin D. Green hydrogen production technologies from ammonia cracking [J]. Energies, 2022, 15(21): 8246.
- [11] Mei Bowen, Zhang Jianguo, Shi Aoaoxiang, et al. Enhancement of ammonia combustion with partial fuel cracking strategy: laminar flame propagation and kinetic modeling investigation of $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ /air mixtures up to 10 atm [J]. Combustion and Flame, 2021, 231: 111472.
- [12] Shohdy N N, Alicherif M, Guiberti T F, et al. Quantitative comparison of the benefits of cracking and nanosecond repetitive pulsed discharges on the lean blow-off, emissions, and topology of ammonia premixed swirl flames [J]. Combustion and Flame, 2024, 269: 113678.
- [13] Zhou Jing, Duan Fei. Kinetic modeling and emission characteristics of multi-staged partially cracked ammonia/ammonia-fueled gas turbine combustors [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 122: 44-56.
- [14] Zhu Xuren, Du Jianguo, Yu Zhou, et al. NO_x emission and control in ammonia combustion: state-of-the-art review and future perspectives [J]. Energy & Fuels, 2023, 38(1): 43-60.
- [15] An Zhenhua, Zhang Weijie, Zhang Meng, et al. Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of cracked ammonia flames [J]. Energy & Fuels, 2024, 38(8): 7412-7430.
- [16] Gubbi S, Cole R, Jimenez C D A, et al. Investigation of minimum NO_x emissions for cracked ammonia combustion [J]. Combustion and Flame, 2025, 274: 114005.
- [17] Ebi D, Clemens N T. Experimental investigation of upstream flame propagation during boundary layer flashback of swirl flames [J]. Combustion and Flame, 2016, 168: 39-52.
- [18] Jonsson M, Yan Jinyue. Humidified gas turbines: a review of proposed and implemented cycles [J]. Energy, 2005, 30(7): 1013-1078.
- [19] Izadi S, Kislal O, Zanger J, et al. Investigating the impact of steam enhancement on combustion in a swirl-assisted jet-stabilized gas turbine combustor [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2025, 147(1): 011001.
- [20] Pavri R, Moore G D. Gas turbine emissions and control: GER-4211 [R]. Atlanta, GA, USA, 2001.
- [21] Kaiser S, Schmitz O, Ziegler P, et al. The water-enhanced turbofan as enabler for climate-neutral aviation [J]. Applied Sciences, 2022, 12(23): 12431.
- [22] Le Cong T, Dagaut P. Experimental and detailed modeling study of the effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NO_x [J]. Energy & Fuels, 2009, 23(2): 725-734.
- [23] Ariemma G B, Sabia P, Sorrentino G, et al. Influence of water addition on MILD ammonia combustion performances and emissions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5147-5154.
- [24] Subramanian V, Mallikarjuna J M, Ramesh A. Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(9): 1159-1173.
- [25] Wang Jinfei, Duan Xiongbo, Liu Yiqun, et al. Numerical investigation of water injection quantity and water injection timing on the thermodynamics, combustion and emissions in a hydrogen enriched lean-burn natural gas SI engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(35): 17935-17952.
- [26] Lyu Yajin, Xing Chang, Liu Li, et al. Study of turbulent flame characteristics of water vapor diluted hydrogen-air micro-mixing combustion [J]. Renewable Energy, 2022, 189: 1194-1205.
- [27] Concetti R, Hasslberger J, Chakraborty N, et al. Effects of liquid water addition on turbulent premixed hydrogen/air combustion [J]. Fuel, 2024, 373: 132314.
- [28] Zhong Weijie, Wang Ziqi, Huang Hai, et al. Stabilization and structure characteristics of swirling $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{O}_2$ flames diluted with steam [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 65: 563-571.
- [29] Mashruk S, Viguera-Zuniga M O, Tejeda-Del-Cueto M E, et al. Combustion features of $\text{CH}_4/\text{NH}_3/\text{H}_2$ ternary blends [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(70): 30315-30327.
- [30] Hayakawa A, Goto T, Mimoto R, 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.
- [31] Kim H S, Arghode V K, Gupta A K. Flame characteristics of hydrogen-enriched methane-air premixed swirling flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(2): 1063-1073.

(下转第 218 页)

- formance Computing, Networking, Storage and Analysis. New York, USA: ACM, 2013: 68.
- [13] Tipu A J S, Conbhuí P Ó, Howley E. Artificial neural networks based predictions towards the auto-tuning and optimization of parallel IO bandwidth in HPC system [J]. Cluster Computing, 2024, 27(1): 71-90.
- [14] Nicolas L M, Mimouni S, Couvée P, et al. I/O patterns modeling of HPC applications with call stacks for predictive prefetch [J]. Future Generation Computer Systems, 2026, 175: 108034.
- [15] Behzad B, Byna S, Prabhat, et al. Optimizing I/O performance of HPC applications with autotuning [J]. ACM Transactions on Parallel Computing, 2019, 5(4): 15.
- [16] Bagbaba A, Wang Xuan. Improving the mpi-io performance of applications with genetic algorithm based auto-tuning [C]//2021 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 798-805.
- [17] Nemirovsky D, Arkose T, Markovic N, et al. A machine learning approach for performance prediction and scheduling on heterogeneous CPUs [C]//201729th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 121-128.
- [18] Kim S, Sim A, WU Kesheng, et al. Design and implementation of I/O performance prediction scheme on HPC systems through large-scale log analysis [J]. Journal of Big Data, 2023, 10(1): 65.
- [19] Liu Zhangyu, Zhang Cheng, Wu Huijun, et al. Optimizing HPC I/O performance with regression analysis and ensemble learning [C]//2023 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 234-246.
- [20] Meswani M R, Laurenzano M A, Carrington L, et al. Modeling and predicting disk I/O time of HPC applications [C]//2010 DoD High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 478-486.
- [21] Wang Wanxin, Wu Huijun, Yang Lihua, et al. AIO: automating I/O optimization pipeline for data-intensive applications in HPC [C]//2024 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications (ISPA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 1541-1548.
- [22] Shan Hongzhang, Shalf J. Using IOR to analyze the I/O performance for HPC platforms [EB/OL]. [2015-10-22]. <https://escholarship.org/uc/item/9111c60j>.
- [23] Mendez S, Rexachs D, Luque E. Analyzing the parallel I/O severity of MPI applications [C]//2017 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 953-962.
- [24] Agarwal M, Singhvi D, Malakar P, et al. Active learning-based automatic tuning and prediction of parallel I/O performance [C]//2019 IEEE/ACM Fourth International Parallel Data Systems Workshop (PD-SW). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 20-29.
- [25] Rajesh N, Bateman K, Bez J L, et al. TunIO: an AI-powered framework for optimizing HPC I/O [C]//2024 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 494-505.
- [26] Chen Si, De Gonzalo S G, Wildani A. Few-shot HPC application runtime prediction [C]//2023 IEEE International Conference on Cluster Computing Workshops (CLUSTER Workshops). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 46-47.

(编辑 刘杨 杜秀杰)

(上接第96页)

- [32] Liu Zundi, Zhang Yi, Li Wei, et al. Self-promoted fuel pyrolysis under oxygen enrichment enables clean and efficient ammonia combustion [J]. The Innovation Energy, 2024, 1(1): 100006.
- [33] Zhang Meng, An Zhenhua, Wei Xutao, et al. Emission analysis of the CH₄/NH₃/air co-firing fuels in a model combustor [J]. Fuel, 2021, 291: 120135.
- [34] Stagni A, Cavallotti C, Arunthanayothin S, et al. An experimental, theoretical and kinetic-modeling study of the gas-phase oxidation of ammonia [J]. Reaction Chemistry & Engineering, 2020, 5(4): 696-711.

(编辑 武红江)