

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220993-06

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220993

氨燃料燃气轮机化学回热循环性能分析

杨 仁¹, 杨晓红², 邵晓峰¹, 郑洪涛¹, 赵宁波¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

摘 要: 氨燃料化学回热循环利用轮机排气余热来裂解氨生成 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合气体, 不仅能提高循环热效率, 还能够改善燃烧稳定性。以某型船用分轴燃气轮机为基础, 采用总体性能仿真分析方法, 对比研究在化学平衡状态和不同 Ru 基催化剂作用下化学回热循环变工况性能。结果表明: 在输出功率 12~26 MW 范围内, 简单循环热效率为 30.5%~39%, 在化学平衡反应状态下, 化学回热燃气轮机 (CRGT) 循环热效率为 40.4%~50.5%, 在 Ru 基催化剂作用下, CRGT 循环热效率为 37.8%~46.6%; 当给定催化剂和空速比时, 在变工况范围内氨转化率的变化不大; 在化学平衡状态和 Ru 基催化剂作用下, 氨转化率分别为 95% 和 40%, 化学反应吸热量占比为 56.5% 和 32%, 燃料低热值 (LHV) 增加约为 13.3% 和 5.4%; 采用 Ru 基催化剂时, 能够在变工况范围内显著地改善燃烧稳定性。

关 键 词: 氨燃料燃气轮机; 化学回热燃气轮机 (CRGT); 先进循环; 总体性能分析; Ru 催化剂

中图分类号: V231.1⁺1

文献标志码: A

Thermodynamic performance simulation of NH_3 based chemically recuperated cycle gas turbine

YANG Ren¹, YANG Xiaohong², SHAO Xiaofeng¹, ZHENG Hongtao¹, ZHAO Ningbo¹

(1. College of Power and Energy Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Shenyang Liming Aero Engine Company Limited,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110043, China)

Abstract: The chemically recuperated cycle gas turbine is a promising NH_3 -fueled gas turbine, as it could improve the thermal efficiency and premixed burning stability effectively by partially decomposing NH_3 into $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ blended mixture with exhaust heat. The effects of catalyst activities (e.g. chemical equilibrium state and various Ru-based catalysts) on overall thermodynamic performance of a chemically recuperated gas turbine (CRGT) at off-design cases were investigated. Results indicated that: while thermal efficiency of a simple cycle gas turbine was about 30.5%—39% within net power ranges of 12—26 MW, it was about 40.4%—50.5% of a CRGT cycle at the equilibrium state and about 37.8%—46.6% over the Ru-based catalysts. For a certain catalyst and a constant gas hourly space velocity, the NH_3 conversation rates varied slightly at off-design cases of a CRGT cycle, which was about 95% at the equilibrium state and about 40% over a Ru-based catalyst. Correspondingly, the chemical reaction heat per overall recuperated waste heat were about 56.5% and 32%, respectively. Furthermore, the low heating

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(3072022TS0308); 国家科技重大专项(2017-III-0006-0031)

作者简介: 杨仁(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事燃气轮机先进循环总体性能分析研究。E-mail: yangren@hrbeu.edu.cn

通信作者: 赵宁波(1987—), 男, 副教授、博士生导师, 博士, 主要从事燃气轮机燃烧理论与技术研究。E-mail: zhaoningboheu@126.com

引用格式: 杨仁, 杨晓红, 邵晓峰, 等. 氨燃料燃气轮机化学回热循环性能分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220993. YANG Ren, YANG Xiaohong, SHAO Xiaofeng, et al. Thermodynamic performance simulation of NH_3 based chemically recuperated cycle gas turbine[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220993.

value (LHV) could be relatively improved about 13.3% and 5.4% by NH_3 cracking in chemical recuperation system at the equilibrium state and Ru-based catalyst. Generally, the premixed flame could be stabilized significantly in a NH_3 -CRGT over a certain Ru-based catalyst.

Keywords: NH_3 -fueled gas turbine; chemically recuperated gas turbine (CRGT); advanced cycle; thermodynamic performance simulation; Ru-based catalysts

在双碳背景下,绿色燃料是降低动力系统污染物排放量的有效方法之一^[1]。氨燃料是典型的零碳排放燃料和氢气的良载体,具有载氢量和体积能量密度高、便于储存和运输等优点,成为最有应用潜力和前景的船舶燃料^[2-3]。2021年,国际能源署(IEA)预测船舶运输业的 CO_2 总排放量到2050年仍将达到120 Mt,并且预测在净零排放情景(NZE)下氨将占据全球船舶能源消耗量的46%^[4]。与其他船舶动力相比,燃气轮机具有体积小、质量轻、单机功率大和燃料适应性高等显著优点,然而氨燃料简单循环燃气轮机的工程应用仍面临着燃烧稳定性差、燃烧效率低和 NO_x 排放量大、循环热效率低等严峻挑战^[3,5]。因此,采取有效的措施提高热效率和改善燃烧稳定性是氨燃料燃气轮机领域的重要研究方向。

为了改善氨燃料燃烧的稳定性,科研人员主要采用强湍流预混燃烧^[6]、分级燃烧^[7]、氨/氢气和氨/甲烷^[8]等方法。2017年,日本产业技术综合研究所(AJST)开展了50 kW级氨燃料燃机发电应用研究,采用强旋流非预混燃烧回热循环方案来改善燃烧稳定性,采用SCR(选择性还原催化)装置来降低 NO_x 和 NH_3 排放量^[9]。其中,氨燃料掺氢是改善燃烧性能的有效方法。相关研究表明:当氨、氢混合燃料体积分数分别为50%、50%时,LBV(层流火焰速度)与甲烷相同^[10];当体积分数分别为70%、30%时,其预混燃烧稳定性和 NO_x 排放性能均适用于燃气轮机中^[11]。

为了提高燃气轮机的热效率,通常采用先进循环或联合循环方式,通过回收利用排气余热来提高能量利用率。化学回热燃气轮机(CRGT)通过燃料(甲烷^[12]、甲醇^[13]和柴油^[14])催化重整或热裂解化学反应来回收燃机排气余热,从而在提高循环热效率的同时,降低污染物排放水平^[15]。氨作为氢气的良载体,主要通过热裂解催化反应来制氢。因此,通过利用燃机排气余热来部分热裂解氨制氢/氨气混合物,不仅可以提高热效率,还能够改善燃烧稳定性和降低 NO_x 排放量。CRGT循环是最有前景的氨燃料燃气轮机工程应用方式。

在CRGT中,氨热裂解深度是重要的性能影响指标,直接决定了余热回收量和燃烧稳定性。研究表明:氨转化率不仅与反应温度和压力有关,还与催化剂结构、类型和空速比相关^[16]。本文针对分轴燃气轮机为对象,对比研究在不同类型Ru基催化剂作用下氨燃料化学回热循环系统的变工况性能变化规律。

1 氨燃料化学回热循环原理

1.1 氨燃料化学回热循环工作过程

图1为氨燃料化学回热循环分轴燃气轮机的示意图,主要包括两部分:分轴燃气轮机和化学回热系统。对于分轴燃气轮机,1和2分别为压气机进口和出口位置;压气机出口空气分为4股,分别进入燃烧室中参与燃烧(2a)、流入高压涡轮(2b)和动力涡轮(2c)用于冷却以及漏放气(2d);3和3a分别为燃烧室出口和高压涡轮进口位置;4和4a为高压涡轮进口和动力涡轮出口位置,5为动力涡轮出口位置。对于化学回热系统通过利用燃气轮机的排气余热(T_5),首先将液态氨燃料(a)经过预热器和饱和器加热后生成饱和氨气(c),然后在化学回热器中经过过热器和催化剂作用下,

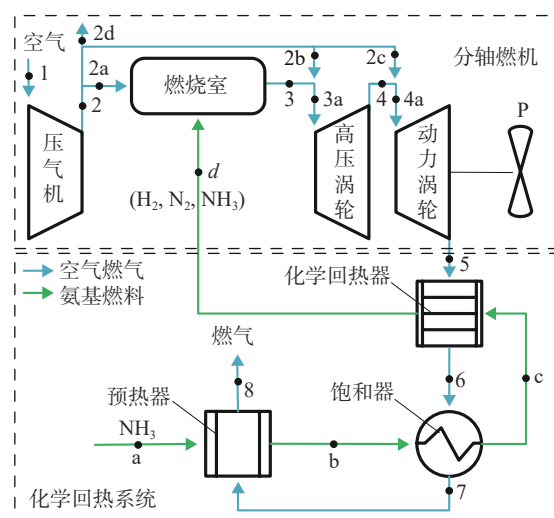


图1 氨燃料化学回热循环分轴燃机示意图

Fig. 1 Basic schematic diagram of a NH_3 -fueled chemically recuperated cycle two-shaft gas turbine

裂解生成包含 NH_3 、 H_2 和 N_2 的气体混合物(d), 最后注入燃烧室中参与燃烧, 将吸收的排气余热返回到燃机动力系统中。

化学回热器是 CRGT 循环系统中的核心部件, 直接决定了排气余热的回收量和注入燃烧室的气体组分。其中, 氨气在化学回热器的热裂解反应深度与燃烧室工作压力和燃机排气温度相关。在本文中, 氨热裂解过程的反应温度 T_d 和压力 p_d 与燃烧室压力 p_3 和排气温度 T_5 之间的关系见公式(1)。其中, 压差假定为 0.2 倍燃烧室工作压力, 温差假定为 20 K。

$$p_d = p_3 + \Delta p \quad T_d = T_5 + \Delta T \quad (1)$$

燃气轮机循环效率公式如式(2):

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{Q_f} \times 100\% \quad (2)$$

式中 η 为燃气轮机循环效率, P_{out} 为燃气轮机输出功率(W), Q_f 为燃料放热(W)。

化学反应占比计算应用如式(3):

$$\alpha = \frac{Q_1}{Q_2} \times 100\% \quad (3)$$

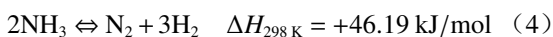
式中 Q_1 为化学吸热为氨燃料热裂解化学反应吸热量, Q_2 为燃气轮机出口排气预热回收量。

1.2 分轴燃气轮机

本文采用模块化建模方法, 以某型船用分轴燃机为基础开展 CRGT 循环变工况性能分析。其中, 分轴燃气轮机仿真模型包括: 工质物性计算模型、压气机和涡轮部件特性、热力计算和动态特性计算模型等。化学回热系统模型包括: 换热器计算模型和氨热裂解化学反应模型。详细的计算模型见文献[14,17]。

1.3 氨热裂解反应

本文主要考察化学平衡反应状态和不同 Ru 基催化剂作用下 CRGT 循环性能。氨燃料热裂解过程化学反应方程式为:



式中 $\Delta H_{298\text{ K}}$ 为反应焓。化学平衡反应模型采用最小吉布斯自由能法(后文简称为吉布斯法)进行计算[18], Ru 基催化剂作用下热裂解过程以公开文献中试验数据为依据[19-23]。

氨转化率 x_{NH_3} 的计算公式为:

$$x_{\text{NH}_3} = \frac{q_{m,\text{in}} - q_{m,\text{out}}}{q_{m,\text{in}}} \times 100\% \quad (5)$$

其中 $q_{m,\text{in}}$ 和 $q_{m,\text{out}}$ 分别为化学回热器进出口处的氨气流量(kg/s)。

图 2 给出了在化学平衡反应状态和空速比为 30 L/(g·h) 时不同 Ru 基催化剂(包括 Ru/LaAlO₃、Ru/K-Y、Ru/Rb-Y、Ru/Ba-ZrO₂、Ru@LSZ-NaBH₄、Ru@LSZ-DP 和 4.7wt.%Ru, 具体的催化剂组分和生产工艺见文献[19-22])作用下氨转化率与反应温度关系曲线图。其中, 黑色实线为采用最小吉布斯自由能法的计算结果。该图表明: 最小吉布斯自由能法能够很好地预测化学平衡状态下氨转化率; 在相同条件下, 氨转化率与 Ru 基催化剂的类型相关; 对于给定的催化剂, 在相同转化率和反应条件下, 化学反应温度与平衡反应温度之间存在一一对应关系。下面分别研究在 3 种典型 Ru 基催化剂(Ru1、Ru2 和 Ru3)作用下氨燃料 CRGT 循环性能。

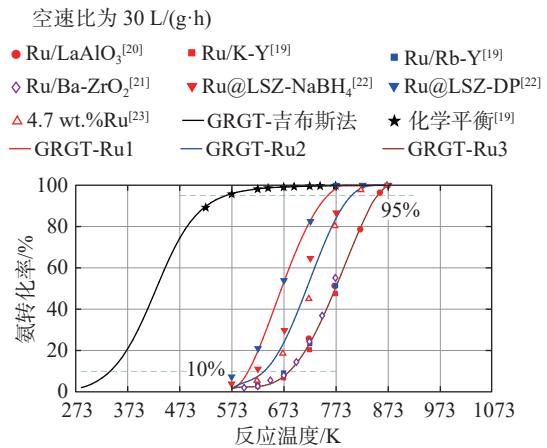


图 2 不同 Ru 基催化剂作用下氨转化率与反应温度的关系
Fig. 2 Comparison of NH_3 conversion vs. temperature of various Ru-based catalysts

2 结果分析与讨论

本文参考机型为柴油燃料分轴燃气轮机。在保持部件特性不变的前提条件下, 主要考察在化学平衡反应状态和 Ru 基催化剂作用下化学回热循环的变工况总体性能。表 1 为设计工况下氨燃料简单循环燃气轮机的主要性能参数值。

2.1 燃机循环总体性能

图 3 为在不同工况下空气流量(kg/s)、压气机压比、压气机转子转速(r/min)和燃气初温(K)与输出功率(MW)之间的关系。其中 CRGT-Ru1、CRGT-Ru2 和 CRGT-Ru3 分别表示采用图 2 所示的 Ru1、Ru2 和 Ru3 催化剂时化学回热循环方式。

表 1 设计工况下简单循环燃气机参数表		
Table 1 Main parameters of simple cycle gas turbine		
主要参数	柴油	氨气
空气流量/(kg/s)	70.2	69.3
总压比	19.7	19.6
转子转速/(r/min)	9 770	9 697
燃料流量/(kg/s)	1.43	3.41
燃料热值/(MJ/kg)	44.9	18.6
燃气初温/K	1 543.8	1 467.8
热效率/%	38.7	39.1
输出功率/MW	24.8	24.8
排气温度/K	803.7	782.9

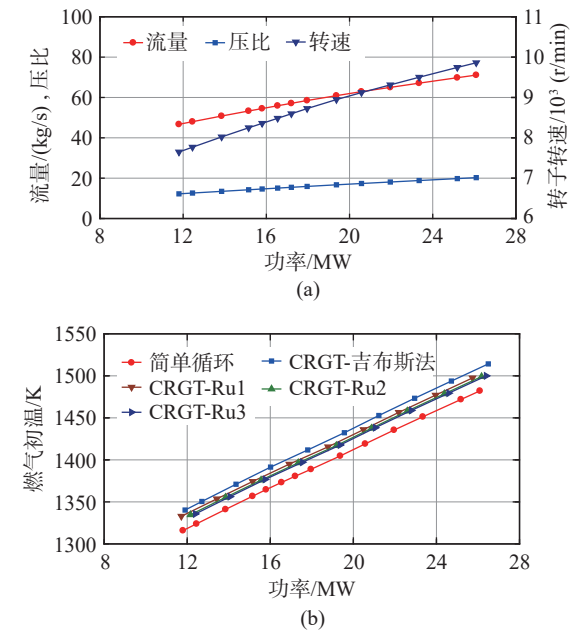


图 3 不同工况下 NH₃-CRGT 循环热力参数与功率的关系
Fig. 3 Relations of thermodynamic parameters and power at various off-design cases of NH₃-CRGT cycle gas turbine

图 3 表明,无论采用何种类型的 Ru 基催化剂,燃气机系统的空气流量、压气机压比和转速与输出功率之间的关系均相同;在输出功率相同的条件下,燃气初温 T_3 随着催化剂活性的增加而增加(催化剂活性由大到小分别为 Gibbs、Ru3、Ru2、Ru1),其中,采用吉布斯法所得到的燃气初温比简单循环的燃气初温高约 35 K。

图 4 为在不同工况下循环热效率与输出功率之间的关系。由图可知:在相同输出功率下,热效率随着催化剂活性的增加而增加;其中,在热平衡状态下热效率达到 50%,当采用 Ru1 催化剂并且空速比为 30 L/(g·h)时,热效率可达到 46%。由图 3 和图 4 可知,在给定功率下,催化剂的活性

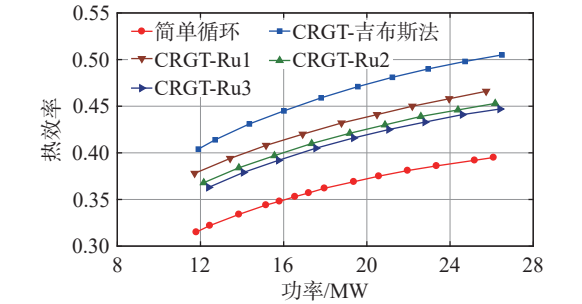


图 4 不同工况下 NH₃-CRGT 循环的热效率与功率的关系
Fig. 4 Relations of total thermal efficiency and power at various off-design cases of NH₃-CRGT cycle gas turbine

越高时热效率越高,对应氨气流量也少;此时,为确保高压涡轮能够输出足够的功率以驱动压气机,需要适当地增加燃气初温 T_3 。

2.2 化学回热系统性能

下面分析在燃机运行条件下,氨燃料化学回热系统的总体性能,包括氨转化率和化学吸热量占比。图 5 为燃机排气温度 T_5 和最终排温 T_8 随输出功率的变化关系。在给定功率下,采用化学回热方式可使燃气排温由 788 K 降低至最低 620 K。

图 6 为化学回热器中氨转化率随不同催化剂和输出功率之间的关系。由图 5 和图 6 可知:催

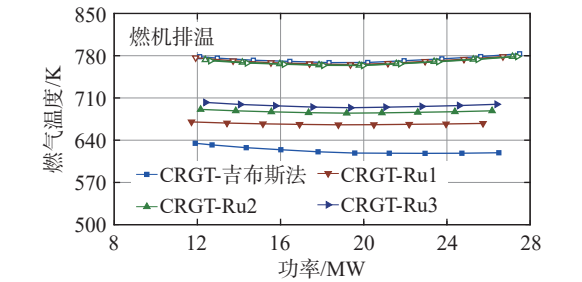


图 5 不同工况下 NH₃-CRGT 循环燃气温度与功率的关系
Fig. 5 Relations of outlet gas temperatures and power at various off-design cases of NH₃-CRGT cycle gas turbine

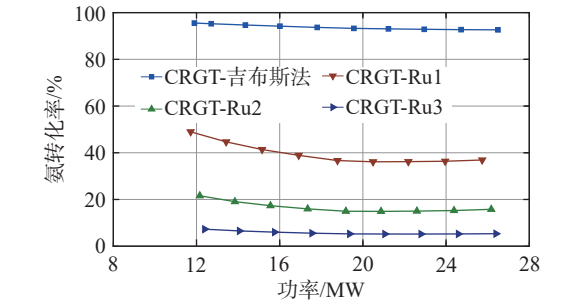


图 6 不同工况下 NH₃-CRGT 循环氨转换率与功率的关系
Fig. 6 Relations of NH₃ conversion rate and power at various off-design cases of NH₃-CRGT cycle gas turbine

化剂活性对氨转化率的影响最大; 在给定催化剂作用下, 氨转化率主要受到反应温度的影响; 在宽功率范围内, 当催化剂类型确定时, 氨转化率的变化幅度不大, 即喷入燃烧室 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合物的组分变化不大, 这有利于燃烧室方案设计。

由图 1 可知, 在化学回热系统中, 燃机排气余热主要用来预热、蒸发和过热氨燃料以及提供氨热裂解化学反应热。图 7 为化学回热系统中化学反应热占比与不同催化剂类型之间的关系。

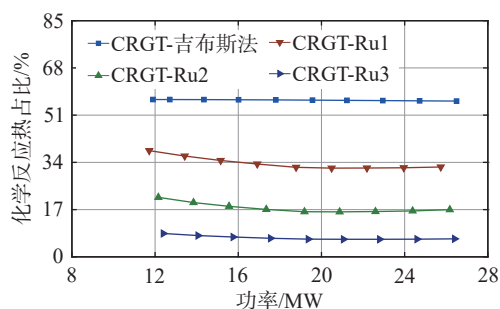


图 7 不同工况下 NH_3 -CRGT 循环的化学反应热占比
Fig. 7 Relations of chemical reaction heat ratio at various off-design cases of NH_3 -CRGT cycle gas turbine

由图 7 可知, 在变工况运行过程中, 化学回热系统中氨热裂解化学反应吸热占比约为 56.5% (Gibbs)、32.0% (Ru1)、16.5% (Ru2) 和 6.4% (Ru3)。与此相对应, 燃料低热值相对增量分别为 13.3% (Gibbs)、5.4% (Ru1)、2.2% (Ru2) 和 0.8% (Ru3)。

2.3 预混燃烧稳定性

大量研究表明: 氨燃料部分热裂解过程可以用来改善预混燃烧稳定性和降低燃料型 NO_x 生成量^[24-27]。图 8 为在变工况过程中燃料当量比与不同 Ru 催化剂之间的关系。横轴为喷入燃烧室的热裂解气体混合物中氨气体积比(y)。当 $y=$

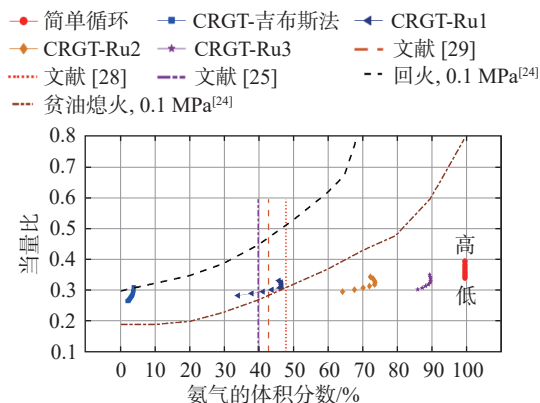


图 8 不同工况下 NH_3 -CRGT 循环的当量比关系图
Fig. 8 Relations of equivalent ratio at various off-design cases of NH_3 -CRGT cycle gas turbine

100% 时即为纯氨燃料(简单循环), y 值越小则意味着氨燃料热裂解反应的深度越高^[28-29]。其中回火和贫油熄火曲线是在常压(0.1 MPa)下得到的。

Ji 等^[30] 试验研究表明: 当氨气完全裂解生成 H_2/N_2 混合气时, 最大层流火焰传播速度(LBV)能够增加至 2.28 m/s; 当 60% 氨发生裂解时, 预混气 LBV 值等于甲烷/空气恰当比预混燃烧 LBV 值。Verkamp 等^[31] 试验研究发现当 28% 氨气发生裂解时, 预混气最小点火能量和燃烧稳定性与甲烷相似, 能够用于燃气轮机中。Goldmann 等^[32] 发现在未燃预混气温度为 300~1 100 K、压力为 0.1~25 MPa 和当量比为 0.5~1.7 范围内, 当 H_2/NH_3 之比约 0.8 时, $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ 预混气的 LBV 值和甲烷相似。Mei 等^[25] 试验发现当 60% 氨发生裂解时, 预混气 LBV 为 0.38 m/s, 近似于甲烷预混气。

综上可知, 在 NH_3 -CRGT 循环分轴燃气轮机变工况过程中, 当采用 Ru1 基催化剂(空速比为 30 L/(g·h))时, $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ 预混气的 LBV 值近似于甲烷预混气, 此时预混燃烧的稳定性能够满足燃机要求, 循环热效率约为 46.6%。

3 结 论

采用总体性能仿真方法, 针对船用分轴燃气轮机, 开展氨燃料 CRGT 总体性能分析, 研究在氨燃料裂解化学平衡状态和不同 Ru 基催化剂(空速比为 30 L/(g·h))作用下 CRGT 循环的变工况性能变化规律。研究表明:

1) 氨燃料 CRGT 循环能够显著地提高热效率。在 12~26 MW 输出功率范围内, 在化学平衡反应状态下, 热效率能够达到 40.4%~50.5%; 在 Ru1 基催化剂作用下, 热效率为 37.8%~46.6%。

2) 给定催化剂作用下, 在变工况范围内氨转化率(即 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ 组分比)变化不大, 这有利于氨燃料预混燃烧流场组织和结构设计。

3) 在化学平衡状态和 Ru1 基催化剂作用下, 氨转化率分别为 95% 和 40%, 化学反应吸热量占比约为 56.5% 和 32%, 燃料低热值分别增加约 13.3% 和 5.4%; 采用 Ru1 基催化剂时, 能够在变工况范围内显著改善燃烧稳定性。

参考文献:

- [1] SORRENTI I, RASMUSSEN T H, YOU S, et al. The role of power-to-X in hybrid renewable energy systems: a comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 165: 112380.

- [2] HASAN M H, MAHLIA T M I, MOFIJUR M, et al. A comprehensive review on the recent development of ammonia as a renewable energy carrier[J]. *Energies*, 2021, 14: 3732.
- [3] AYVAL T, TSANG S C E, VRIJALDENHOVEN T V. The position of ammonia in decarbonizing maritime industry: an overview and perspectives: Part I[J]. *Johnson Matthey Technology Review*, 2021, 65(2): 275-290.
- [4] STÉPHANIE B, ARACELI F P, CHRISTOPHE M, et al. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector[EB/OL]. (2021-05-18) [2022-12-18]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [5] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 109-133.
- [6] HAYAKAWA A, ARAKAWA Y, MIMOTO R, 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.
- [7] KURATA O, IKI N, INOUE T, 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.
- [8] CHAI W S, BAO Y, JIN P, et al. A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147: 111254.
- [9] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of NH₃-air and NH₃CH₄-air combustion gas-turbine power generations[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3351-3359.
- [10] VALERA-MEDINA A, MORRIS S, RUNYON J, et al. Ammonia, methane and hydrogen for gas turbines[J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 118-123.
- [11] VALERA-MEDINA A, GUTESA M, XIAO H, et al. Premixed ammonia/hydrogen swirl combustion under rich fuel conditions for gas turbines operation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(16): 8615-8626.
- [12] PASHCHENKO D, MUSTAFIN R, KARPILOV I. Efficiency of chemically recuperated gas turbine fired with methane: effect of operating parameters[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 212: 118578.
- [13] VITTORIO T, FRANCESCO L. Low CO₂ emissions chemically recuperated gas turbines fed by renewable methanol[J]. *Applied Energy*, 2021, 298: 117146.
- [14] 郑洪涛, 张玉龙, 杨仁. CRGT 循环燃气轮机性能仿真[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 118-123.
ZHENG Hongtao, ZHANG Yulong, YANG Ren. Simulation research of the CRGT cycle gas turbine performance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(1): 118-123. (in Chinese)
- [15] POPOV S K, SVISTUNOV I N, GARYAEV A B, et al. The use of thermochemical recuperation in an industrial plant[J]. *Energy*, 2017, 127: 44-51.
- [16] MUKHERJEE S, DEVAGUPTAPU S V, SVIRIPA A, et al. Low-temperature ammonia decomposition catalysts for hydrogen generation[J]. *Applied Catalysis: B Environmental*, 2018, 226: 162-181.
- [17] 杨晓红. 化学回热循环燃气轮机参数匹配和性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
YANG Xiaohong. Parameter matching and performance analysis of chemically recuperated gas turbine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [18] PASHCHENKO D, MUSTAFIN R. Ammonia decomposition in the thermochemical waste-heat recuperation systems: a view from low and high heating value[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 251: 114959.
- [19] CHA J, LEE T, LEE Y J, et al. Highly monodisperse sub-nanometer and nanometer Ru particles confined in alkali-exchanged zeolite Y for ammonia decomposition[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 283: 119627.
- [20] CAO Chenfeng, WU Kai, ZHOU Chen, et al. Electronic metal-support interaction enhanced ammonia decomposition efficiency of perovskite oxide supported ruthenium[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 257: 117719.
- [21] WANG Ziqing, QU Yingmin, SHEN Xiaolong, et al. Ruthenium catalyst supported on Ba modified ZrO₂ for ammonia decomposition to CO_x-free hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(14): 7300-7307.
- [22] LORENZUT B, MONTINI T, PAVEL C C, et al. Embedded Ru@ZrO₂ catalysts for H₂ production by ammonia decomposition[J]. *ChemCatChem*, 2010, 2(9): 1096-1106.
- [23] SU Q, GU L, YAO Y, et al. Layered double hydroxides derived Ni₂(Mg, Al₂O₃) catalysts: enhanced ammonia decomposition by hydrogen spillover effect[J]. *Applied Catalysis: B Environmental*, 2017, 201: 451-460.
- [24] LESMANA H, ZHU M, ZHANG Z, et al. Experimental and kinetic modelling studies of laminar flame speed in mixtures of partially dissociated NH₃ in air[J]. *Fuel*, 2020, 278: 118428.
- [25] MEI B, ZHANG J, SHI X, et al. Enhancement of ammonia combustion with partial fuel cracking strategy: laminar flame propagation and kinetic modeling investigation of NH₃/H₂/N₂/air mixtures up to 10 atm[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 231: 111472.
- [26] LESMANA H, ZHU M, ZHANG Z, et al. Experimental and kinetic modelling studies of flammability limits of partially dissociated NH₃ and air mixtures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(2): 2023-2030.
- [27] 范卫东, 陈钧. 氨气燃烧强化措施及 NO_x 控制策略研究进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 14-23.
FAN Weidong, CHEN Jun. Research progress of combustion enhancement and NO_x control strategies for ammonia combustion[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(7): 14-23. (in Chinese)
- [28] KHATEEB A A, GUIBERTI T F, ZHU X, et al. Stability limits and NO emissions of technically-premixed ammonia-hydrogen-nitrogen-air swirl flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(41): 22008-22018.
- [29] WISEMAN S, RIETH M, GRUBER A, et al. A comparison of the blow-out behavior of turbulent premixed ammonia/hydrogen/nitrogen-air and methane-air flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(2): 2869-2876.
- [30] JI C, WANG Z, WANG D, et al. Experimental and numerical study on premixed partially dissociated ammonia mixtures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 47: 4171-4184.
- [31] VERKAMP F, HARDIN M, WILLIAMS J. Ammonia combustion properties and performance in gas-turbine burners[J]. *Symposium on Combustion*, 1967, 11(1): 985-992.
- [32] GOLDMANN A, DINKELACKER F. Approximation of laminar flame characteristics on premixed ammonia/hydrogen/nitrogen/air mixtures at elevated temperatures and pressures[J]. *Fuel*, 2018, 224: 366-378.

(编辑: 王碧珺)