DOI: 10.19666/j.rlfd.202512017

尿素直喷热解制氨技术在燃气蒸汽联合循环机组 SCR 脱硝系统中的应用

张正本[1]，朱建宏[2]，袁 壮[3]，赵子豪[1]，董 陈[3]，赵一畅[1]，
王振强[1]，马梦霞[4]，徐 晨[3]
（1. 华电石家庄热电有限公司，河北 石家庄 050002；
2. 贵州鸭溪发电有限公司，贵州 遵义 563000；
3. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
4. 石家庄铁道大学数理系，河北 石家庄 050043）

［摘 要］【目的】为解决燃气蒸汽联合循环机组选择性催化还原（SCR）脱硝技术领域中尿素热解系统诸多实际问题。【方法】以某燃气蒸汽联合循环机组 SCR 脱硝系统为例，使用数值模拟方法对燃气轮机出口烟气条件下尿素直喷热解技术进行研究，在理论研究基础上扩展至工程设计和实际应用。【结果】结果表明：燃气轮机出口烟气条件下，尿素热解的主要产物为氨气和异氰酸；随着烟温升高和停留时间增加，尿素热解效率迅速增大；当烟气温度为 300 ℃，停留时间 0.5 s 以上，烟气温度为 650 ℃，停留时间 0.1 s 以上，尿素热解效率均超过 95%；尿素热解效率随离喷射点距离的增加逐渐增大，当离喷射点 31 m 时，尿素热解效率达到 99%；尿素溶液喷射点按照等面积法布置 12 支喷枪和 29 支喷枪时，催化剂入口截面上的热解产物分布均方根偏差均小于 5%。在工程设计中，采用带有稀释水的计量稀释系统能够使各喷枪喷出的雾化颗粒参数在不同负荷下保持最佳工况，带隔热结构和冷却风的双流体喷枪能够避免布置喷枪内的小流量尿素溶液在低速流动过程中蒸干从而堵塞喷枪。【结论】项目建成投运后，尿素直喷热解系统能够稳定地为 SCR 脱硝系统提供还原剂，将 SCR 入口 NO_x 质量浓度由 35 mg/m^3 降至出口的 5 mg/m^3，氨逃逸量低于 3 μL/L，实现了燃气机组脱硝系统节能、低污染、稳定经济的运行。

［关 键 词］燃气蒸汽联合循环；尿素热解；热解效率；隔热结构

［引用本文格式］张正本，朱建宏，袁壮，等. 尿素直喷热解制氨技术在燃气蒸汽联合循环机组 SCR 脱硝系统中的应用[J]. 热力发电，2026，55(9)：150. Zhang Z B, Zhu J H, Yuan Z, et al. Application of urea direct-injection pyrolysis for ammonia production in gas turbine SCR denitrification[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(9): 150.

Application of urea direct-injection pyrolysis for ammonia production in gas turbine SCR denitrification

Zhang Zhengben[1], Zhu Jianhong[2], Yuan Zhuang[3], Zhao Zihao[1], Dong Chen[3],
Zhao Yichang[1], Wang Zhenqiang[1], Ma Mengxia[4], Xu Chen[3]
(1. Huadian Shijiazhuang Thermal Power Plant Co., Ltd., Shijiazhuang 050002, China;
2. Guizhou Yaxi Power Generation Co., Ltd., Zunyi 563000, China;
3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
4. Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to solve many practical problems of urea pyrolysis system in SCR flue gas denitrification technology of gas-steam combined cycle units. [Methods] The SCR flue gas denitration system of a 9F gas-steam combined cycle unit is taken as an example to study the application of urea direct injection pyrolysis

收 稿 日 期：2025-12-03 修 回 日 期：2026-01-20 接 受 日 期：2026-02-06
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2024YFB4104903）
Supported by: National Key Research and Development Program (2024YFB4104903)
第一作者简介：张正本（1983），男，工程师，主要研究方向为燃气蒸汽循环电厂技术升级，zzb841123@163.com。
通信作者简介：董陈（1981），男，博士，正高级工程师，主要研究方向为烟气脱硝技术，dongchen@tpri.com.cn。

technology under the flue gas condition of gas turbine outlet by numerical simulation method. Based on theoretical research, the technology is extended to engineering design and practical application. [Results] The results show that the main products of urea pyrolysis are ammonia and isocyanic acid under the flue gas condition of gas turbine outlet. The urea pyrolysis efficiency increases rapidly with the flue gas temperature and the extension of residence time: when the flue gas temperature is 300 ℃, the residence time is 0.5 s, the flue gas temperature is 650 ℃, and the residence time is 0.1 s, the urea pyrolysis efficiency exceeds 95%. The urea pyrolysis efficiency increases with the distance from the injection point: when the distance from the injection point is 31 m, the urea pyrolysis efficiency reaches 99%. When the injection points of urea solution are arranged with 12 and 29 injectors according to the equal area method, the root mean square deviation of pyrolysis product distribution on the catalyst inlet section is less than 5%. In practical engineering design and application, considering the uniformity of urea pyrolysis product distribution on the catalyst inlet cross-section and investment costs, 12 injectors are arranged inside the circular flue according to the principle of equal area. The atomized particle size of urea solution sprayed from each injector is selected to be $D_{V,0.5}$=52.0 μm. The metering dilution system with dilution water can keep the atomized particle parameters of each injector in the optimum working condition under different loads, and the injector with heat insulation structure and cooling air can avoid water evaporation of urea solution. [Conclusion] After the actual operation of the project, the technology can stably provide reducing agent for the SCR flue gas denitrification system. The NO_x mass concentration reduces from 35 mg/m^3 to 5 mg/m^3, the ammonia escape is less than 3 μL/L, and the root mean square deviation of pyrolysis product distribution on the catalyst inlet section is less than 5% under the high and low load conditions of the unit, indicating that the uniformity of the ammonia concentration distribution at the inlet of the catalyst is good, and the technology realizes the energy saving, low consumption, low pollution and economic operation of the denitration environmental protection system of the gas-steam combined cycle unit.

Key words: gas-steam combined cycle; urea pyrolysis; pyrolysis efficiency; heat insulation structure

随着国家环保要求的日益提高，燃气蒸汽联合循环机组的 NO_x 排放限值也由 50 mg/m^3 下降到 30 mg/m^3，甚至是 15 mg/m^3[1-2]。在 NO_x 超低排放情况下，脱硝效率较高、应用最为广泛的技术为选择性催化还原（SCR）脱硝技术[3-4]，燃气蒸汽联合循环机组可采用该技术达到 NO_x 排放限值[5]。SCR 脱硝技术所需要的还原剂 NH_3 可以使用液氨和尿素制备。液氨制氨技术虽然系统简单，但大量的液氨储存属于重大危险源，所以近年来尿素制氨技术（尿素热解和尿素水解）得到了广泛的应用[6-7]。在燃气蒸汽联合循环机组 SCR 脱硝技术领域，尿素热解炉的尿素热解技术应用较多。该技术是高温风机将燃气轮机排气扩散段引出一定量的高温烟气到尿素热解炉中，在尿素热解炉中喷入雾状尿素溶液热解生成氨气，再通过喷氨格栅送入到余热锅炉中，在催化剂作用下发生脱硝反应[8-9]。但尿素热解炉热解技术系统复杂，初投资高，所使用的高温风机存在高能耗、高故障率等问题，因此亟需一种简单可靠、启动迅速的尿素制氨技术。为此，国内外众多学者对尿素热解分解产物及特性进行了大量研究。Sung 等人[10]研究结果表明：随温度的升高以及停留时间的增加，尿素溶液的热分解率快速增大；当温度达到 350 ℃，尿素溶液停留时间 0.113 s 以内，其热分解率可达 100%，反应生成 NH_3 和 HNCO，两产物质量浓度相同；当温度继续升高至 450 ℃，尿素溶液停留时间 0.055 s 以内，其热分解率达到 100%，反应生成 NH_3 和 HNCO 质量浓度相同；HNCO 的水解和 NH_3 的氧化主要是由催化反应引起的。Felix 等人[11]尿素溶液高温热分解特性研究结果表明，在初始温度为 27 ℃、烟气温度为 400 ℃、雾滴初始直径为 70 μm 时，尿素雾滴从进入烟气到完全热解的时间为 0.8 s。Wang 等人[12]试验研究了温度 132.5~190.0 ℃内尿素热解产物，研究结果表明：132.5~170.0 ℃内尿素热解反应生成 NH_3 质量浓度呈现波动规律，170.0~190.0 ℃ NH_3 质量浓度剧增；132.5~160.0 ℃尿素热解反应生成 HNCO 质量浓度减少，160.0~190.0 ℃ HNCO 质量浓度增大。Honorien 等人[13]对尿素气相热分解产物进行了理论研究，提出了一种尿素热解气相动力学模型来解释尿素热解副产物的生长，特别是异氰尿酸的形成途径。Kurm 等人[14]开发了一种尿素分解产物及副产物的动力学模型，在 500 ℃/min 的加热速率下，对尿素及尿素副产物（缩二脲和三聚氰酸）进行热工分析。另外，对船舶及汽车尾气处理系统中尿素溶液的热解特性也进行了大量研究[15-17]。

燃气轮机排气烟温通常在 350~650 ℃，处于尿素溶液快速热解的温度范围内，西安热工研究院有限公司提出了一种将尿素溶液雾化后直接喷入燃气

轮机出口烟道，利用燃气排气温度热解尿素溶液的尿素直喷热解技术[18]。这种技术具有系统简单、初投资低、启动响应快等优点。由于燃气轮机出口烟温较高，流速快可达 60 m/s 且带有一定的旋转角度[19-20]，同时燃气轮机出口烟道的截面尺寸较大，在实际工程应用中，仍然有一定的难度。本文以石家庄某热电厂 9F 级燃气蒸汽联合循环机组 SCR 脱硝系统为例，进行了尿素直喷热解脱硝系统的数值模拟设计及工程应用研究。

1 研究对象及方法

河北华电石家庄热电有限公司燃气蒸汽联合循环机组烟气脱硝装置原使用尿素热解工艺制备 SCR 脱硝反应所需要的还原剂。该技术存在系统复杂、能耗高、检修维护工作量大以及启机时脱硝系统长时间不能投运的问题；同时因环保要求石家庄热电厂 NO_x 排放值低于 5 mg/m^3，现有脱硝系统已无法满足要求。基于安全环保以及机组节能、降耗、减排需求，石家庄热电厂将现在的 SCR 脱硝系统进行升级改造，新增一套尿素直喷热解系统。该燃气轮机出口排气系统烟道内烟气温度为 400~650 ℃，处于尿素溶液高效热解温度范围内，烟道长度约 11 m，满足热解的距离，同时烟道内无其他装置，可以布置多支喷枪。

1.1 研究对象

研究对象为一套“一拖一”级燃气蒸汽联合循环热电联产机组，其 SCR 烟气脱硝装置使用还原剂为尿素，采用尿素直喷热解制氨技术。具体过程为 50%质量分数尿素溶液经除盐水稀释后和压缩空气一起进入双流体雾化喷枪，双流体雾化喷枪布置在燃气轮机出口排气过渡烟道内部，尿素溶液经喷枪雾化后喷入高温烟气中，在高温烟气的作用下尿素雾滴的水份开始蒸发（物理反应式(1)），温度达到 160 ℃时，固态或气态尿素发生热解反应生成氨气和异氰酸（反应式(2)），温度达到 300 ℃时，异氰酸在金属氧化物表面上与水迅速发生水解反应（反应式(3)）[21-23]。

$$CO(NH_2)_2 \cdot xH_2O\ (l) \rightarrow CO(NH_2)_2(l/g) + xH_2O(g) \quad (1)$$

$$CO(NH_2)_2\ (s/g) \rightarrow HNCO(g) + NH_3(g) \quad (2)$$

$$HNCO(g) + H_2O(g) \rightarrow NH_3(g) + CO_2(g) \quad (3)$$

余热锅炉入口烟道及其内部换热面布置示意如图 1 所示。高温烟气经过燃气排气系统和扩口烟道后进入余热锅炉，余热锅炉内部由 6 个换热模块组成，各模块在满负荷的阻力及进出口烟温数据[24]见表 1。考虑烟温的因素，催化剂布置在模块 3 和模块 4 之间。燃气轮机排气烟道尺寸为 φ6 500 mm×11 000 mm，余热锅炉入口扩口烟道水平距离为 8 085 mm，余热锅炉截面尺寸约为 15 280 mm×20 420 mm，喷枪布置截面至催化剂入口截面的水平距离为 31 000 mm。

此燃气蒸汽联合循环尿素直喷热解系统设计参数见表 2 所示。

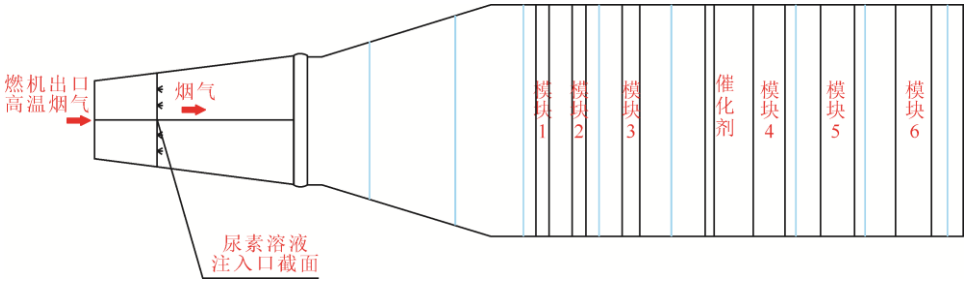


图 1 余热锅炉入口烟道及内部换热面布置

Fig.1 Schematic diagram of layout of inlet flue and internal heat exchange surface of the waste heat boiler

表 1 满负荷工况下各模块烟气阻力和进出口烟温

Tab.1 Flue gas resistance and inlet and outlet flue gas temperature of each module under full load operating conditions

项目	模块 1	模块 2	模块 3	催化剂模块	模块 4	模块 5	模块 6
烟气阻力/Pa	375	372	436	300	509	435	474
进口烟温/℃	569.1	541.4	449.2	336.8	336.8	246.9	161.5
出口烟温/℃	541.4	449.2	336.8	336.8	246.9	161.5	81.5

表 2 尿素直喷热解系统设计参数
Tab.2 Design parameters of the urea direct injection pyrolysis system

内容	数值
烟气量（干基、标态、15%）/(m^3 h^{-1})	2 467 002
O_2 体积分数/%	12.391
CO_2 体积分数/%	3.897
H_2O 体积分数/%	8.358
N_2 体积分数/%	74.462
Ar 体积分数/%	0.892
烟气温度/℃	584
脱硝前 NO_x（干基，标态、15%O_2）质量浓度/(mg m^{-3})	35
脱硝后 NO_x（干基，标态、15%O_2）质量浓度/(mg m^{-3})	5
NH_3 逃逸体积分数/(μL L^{-1})	＜3
脱硝效率/%	86.7
尿素耗量/(kg h^{-1})	58.2

1.2 研究方法

在燃气轮机出口排气系统烟气条件下，首先模拟尿素热解的化学反应过程，之后进行流动和化学反应的模拟。

定义尿素热解效率η:

$$\eta=\frac{0.5(M_{\mathrm{NH_3}}+M_{\mathrm{HNCO}})}{0.5\times(M_{\mathrm{NH_3}}+M_{\mathrm{HNCO}})+M_{\mathrm{urea,out}}}\times 100 \qquad (1)$$

式中：$M_{\mathrm{NH_3}}$ 为尿素热解反应生成氨气的浓度；M_{HNCO} 为尿素热解反应生成异氰酸的浓度；$M_{\mathrm{urea,out}}$ 为残留尿素的浓度。

对燃气轮机出口烟气条件下尿素热解化学反应进行数值模拟：采用理想混合器（PSR）模型；机理使用 Urea2000 机理模型[25]，其中反应式(2)和反应式(3)的化学反应常数采用 Yim 机理[11]；模拟温度从 300~650 ℃，停留时间从 0.1~1.7 s。

尿素直喷热解系统就是将雾化后的尿素溶液颗粒喷入至扩散烟道内，在高温烟气的作用下，尿素雾滴瞬时伴随着水份的蒸发、热解反应，并与高速旋转流动烟气中 NO_x 混合。通常燃气轮机排气系统扩散烟道长度较短、烟温较高、烟气流速较快，与排气系统扩散烟道相连的余热锅炉入口烟道存在变径，使得尿素溶液在脱硝反应器前热解反应时间短，与 NO_x 的混合均匀性差。故尿素溶液雾化粒径的选择、喷射点的数量和布置方式以及喷枪下游流场设计是燃气蒸汽联合循环机组尿素直喷热解技术能否成功的关键。以图 1 所示的余热锅炉入口烟道及余热锅炉为原型进行尿素直喷热解工艺的数值模拟研究。按照余热锅炉及 SCR 脱硝系统实际尺寸建模，换热模块和催化剂模块建模时采用多孔介质模型，按照表 1 所示的各模块的温降和阻力计算设置多孔介质模型参数。

为保证结果的准确性，需进行网格无关性验证，结果如图 2 所示。燃气轮机排气系统烟道及余热锅炉大部分区域为规则的圆柱形及矩形，采用多面体和六面体相结合的网格，并对余热锅炉扩口烟道区域进行了加密。无喷枪布置方案催化剂入口截面烟气流速值随网格数量的增大逐渐下降，当网格数达到 100 万以上时基本趋于稳定，故选择网格数为 143 万模型。

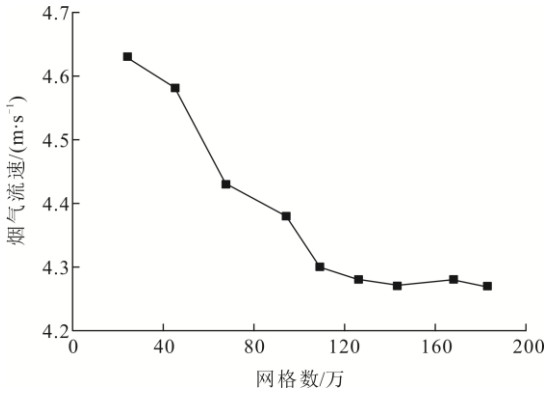


图 2 网格数与烟气流速关系
Fig.2 Relationship between the grid number and flue gas velocity

采用标准 k-ε 模型数值模拟湍流流动过程，采用拉格朗日−欧拉方法求解尿素雾滴的运动轨迹和传热传质过程，采用多组分物质输运模型模拟烟气中不同气体组分的混合[26]，采用 RM（rapid mixing）模型模拟尿素液滴在气相中的蒸发。

按照表 2 所示烟气参数设置数值模拟边界条件，以脱硝反应器入口截面前 500 mm 处的尿素热解产物参数反映尿素热解效率和及其分布情况，按照等面积法取 200（10×20）个取样点进行数据分析。

数值模拟主要模拟 2 种雾化粒径（$D_{V0.5}$、$D_{V0.1}$、$D_{V0.99}$ 为体积基准粒径）：1）$D_{V0.5}$=52.0 μm、$D_{V0.1}$=23.4 μm、$D_{V0.99}$=106 μm；2）$D_{V0.5}$=34.6 μm、$D_{V0.1}$=21 μm、$D_{V0.99}$=57.8 μm。这 2 种颗粒粒径分布符合正态分布规律。喷枪的布置方式按照以下 5 种模拟：1）从入口烟道的圆周面均匀布置 8 支喷枪，按照垂直烟气流向喷入尿素溶液；2）将 8 支喷枪布置在圆形烟道内部的小圆形截面上，8 支喷枪均匀布置在小圆形截面上，尿素溶液的喷入方向与烟气流动方向一致；3）将 8 支喷枪按照等面积原则布置在圆形烟道内部，尿素溶液的喷入方向与烟气流动方向一致；4）将 12 支喷枪按照等面积原则布置在

圆形烟道内部，尿素溶液的喷入方向与烟气流动方向一致；5）将 29 支喷枪按照等面积原则布置在圆形烟道内部，尿素溶液的喷入方向与烟气流动方向一致。5 种喷枪的布置方式如图 3 所示。数值模拟工况设计如表 3 所示。

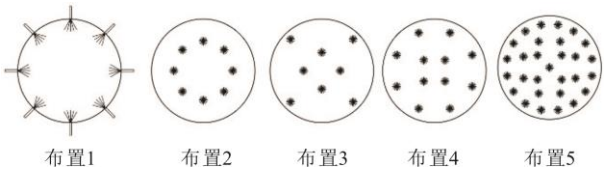


图 3 5 种喷枪布置方式示意
Fig.3 Schematic diagram of the layout of injectors

表 3 数值模拟工况
Tab.3 Numerical simulation conditions

颗粒粒径	喷枪布置方式
$D_{V0.5}$=52.0 μm	布置 1
	布置 2
	布置 3
	布置 4
	布置 5
$D_{V0.5}$=34.6 μm	布置 1
	布置 2
	布置 3
	布置 4
	布置 5

2 数值模拟结果

2.1 化学反应模拟结果

图 4 给出了在烟气温度 300 ℃下的尿素热解产物随时间的变化曲线。

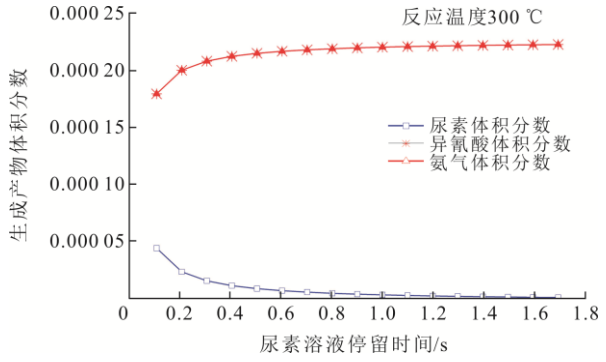


图 4 300 ℃下尿素热解产物随时间的变化曲线
Fig.4 Variation curves of urea pyrolysis products' volume fraction with time at 300 ℃

由图 4 可见，在烟气温度 300 ℃条件下，尿素的体积分数随着停留时间的增加快速减少，异氰酸和氨气的体积分数迅速增加。停留时间在 0.1~0.4 s 内，尿素雾滴迅速蒸发、反应，体积分数快速减少，热解反应生成的异氰酸和氨气体积分数快速增大。停留 0.4 s 之后，气态尿素大部分热解反应完全，体积分数缓慢降低，同时热解反应生成异氰酸和氨气体积分数增加缓慢。从图 4 还可看出，异氰酸和氨气的体积分数相等，这说明尿素在热解生成异氰酸和氨气后，异氰酸在 1.7 s 的反应时间内没有发生水解反应生成氨气。

图 5 给出了在烟气温度为 650 ℃时尿素热解产物随时间的变化曲线。由图 5 可见，在烟气温度为 650 ℃时，尿素体积分数随停留时间的增加快速降低，异氰酸和氨气的体积分数迅速增加。停留时间在 0.1~0.2 s 内，尿素雾滴迅速蒸发、反应，体积分数迅速减少，热解反应生成的异氰酸和氨气体积分数快速增大。停留 0.2 s 以后，大部分气态尿素热解反应完全，体积分数趋于稳定，热解反应生成异氰酸和氨气体积分数增加缓慢。从图 5 还看出，异氰酸和氨气的体积分数相等，说明尿素热解生成异氰酸和氨气后，异氰酸在 1.7 s 的反应时间内没有发生水解反应生成氨气。

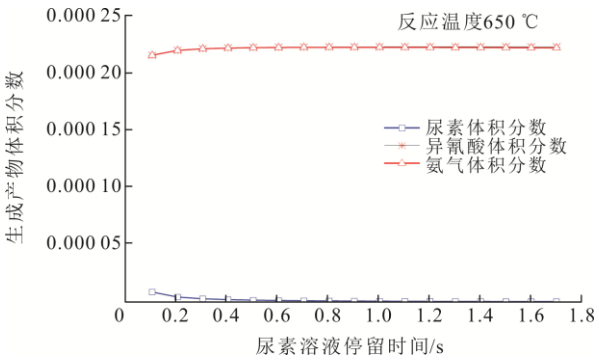


图 5 650 ℃下尿素热解产物随时间的变化曲线
Fig.5 Variation curves of urea pyrolysis products' volume fraction with time at 650 ℃

随着烟气温度升高和停留时间增加，尿素热解效率的变化曲线如图 6 所示。

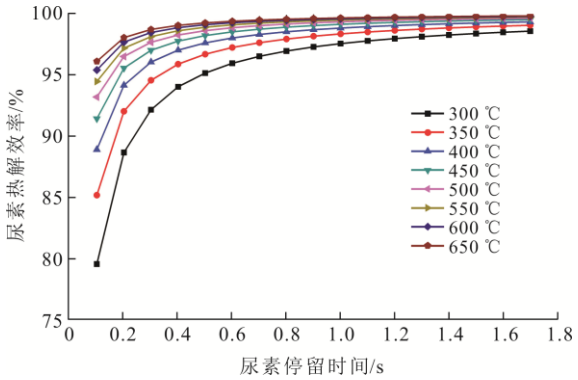


图 6 烟气温度、停留时间与尿素热解效率的关系曲线
Fig.6 Relationship curves of urea pyrolysis efficiency with flue gas temperature and residence time

从图 6 可知：尿素热解效率随着烟气温度的升高（从 300 ℃到 650 ℃）和停留时间的增加逐渐增加；在烟气温度为 300 ℃、停留 0.5 s 以上，烟气温度为 650 ℃、停留 0.1 s 以上，尿素热解效率均超过 95%。

从详细化学反应机理模拟结果可知，在 300～650 ℃内，当停留 0.5 s 以上，尿素的热解效率已超过 95%；在停留 1.7 s 内，异氰酸并未与烟气中的水发生水解反应。

2.2 流动和化学反应模拟结果

图 7 给出了工况 1—工况 10 尿素溶液喷入过渡段烟道的颗粒运行轨迹示意。由图 7 可以看出，工况 1 和工况 6 由于尿素溶液是从圆形烟道边界面垂直喷入，喷入的尿素溶液很快就被高速烟气带走，尿素溶液无法进入到圆形烟道的中心。工况 2—工况 5 和工况 7—工况 10 是将喷射点布置在烟道内部，沿烟气流动方向喷入，能够有效解决工况 1 和工况 6 存在的问题。同时从图 7 还可以看出，当雾化颗粒粒径 $D_{V,0.5}$ 从 52.0 μm 减小到 34.6 μm 时，可以有效缩短液滴蒸发距离。

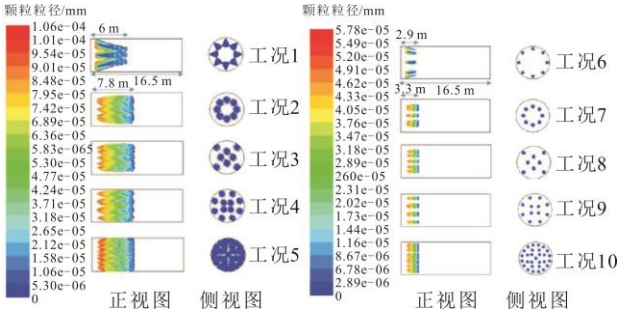


图 7 尿素溶液喷入过渡烟道的颗粒运行轨迹示意
Fig.7 Schematic diagram of particle trajectories after the urea solution is sprayed into the transition flue

模拟工况 1—工况 10 脱硝催化剂入口截面 NH_3 和 HNCO 的分布如图 8 所示。从图 8 可以看到，随着喷枪喷射点数量的增加，催化剂入口截面上尿素热解产物浓度的相对标准偏差（δ_{RMS}）减小，其中工况 4、工况 5、工况 9 和工况 10 尿素热解产物浓度的 δ_{RMS} 均小于 5%，满足一般催化剂对入口截面上还原剂分布均匀性的要求。当雾化颗粒粒径 $D_{V,0.5}$ 从 52.0 μm 减小到 34.6 μm 时，除了工况 1 和工况 6，其他工况下催化剂入口截面上尿素热解产物浓度的 δ_{RMS} 减小，这说明液滴更早蒸发成气体，能提高热解产物的混合均匀性。由于工况 1 和工况 6 均为尿素溶液从圆形烟道的边界面上喷入过渡段烟道，雾化粒径较大的颗粒穿透深度大，所以其热解产物的均匀性更好。

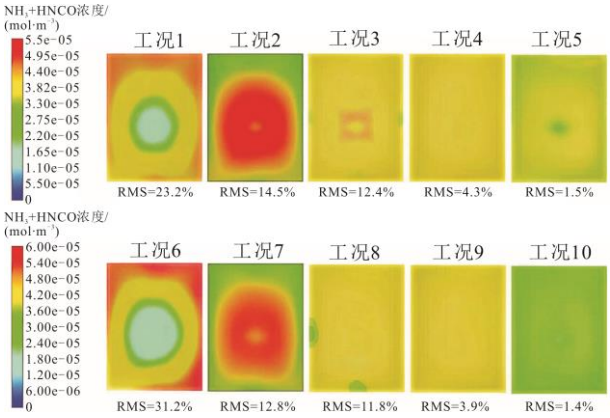


图 8 催化剂入口截面上 NH_3+HNCO 浓度分布
Fig.8 Distribution of NH_3+HNCO concentration on inlet cross-section of the catalyst

图 9 给出了尿素热解效率与离喷射点距离关系曲线。从图 9 可以看到，尿素热解效率随着离喷射点距离的增加而增加，在离喷射点距离 23 m 之前（即模块 2 入口），尿素热解效率迅速增加，到离喷射点 31 m（即催化剂入口）时，尿素热解效率达到 99%。工况 1 和工况 6 的尿素热解效率比其他工况的尿素热解效率高，这主要是因为：工况 1 和工况 6 尿素溶液是沿着圆形烟道边界面上喷入过渡段烟道内，液滴的运动轨迹是先径向后轴向，增加了烟气中的停留时间；而工况 6 的雾化颗粒粒径 $D_{V0.5}$ 小于工况 1 的雾化颗粒粒径，因此工况 6 的尿素热解效率较高。工况 2—工况 5 和工况 6—工况 10 在离喷口相同距离下的尿素热解效率相差较小，总体来说，工况 6—工况 10 的尿素热解效率高于工况 2—工况 5 的尿素热解效率。

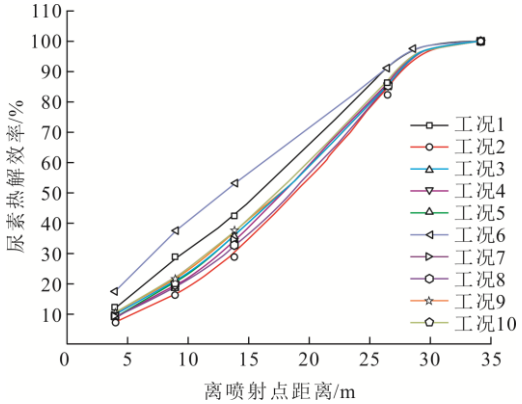


图 9 尿素热解效率与离喷射点距离关系曲线
Fig.9 Relationship curves between urea pyrolysis efficiency and distance from injection point

3 工程应用研究

3.1 流动和化学反应模拟结果

根据前述的数值模拟结果可知，工况 1—工况 10 的尿素热解效率在催化剂入口截面处都能达到 99%以上，但是从尿素热解产物在催化剂入口截面上分布均匀性和投资成本考虑，工况 4 和工况 9 适合应用在工程中。本项目选用工况 4 的雾化颗粒粒径对应的喷嘴和相应的喷枪数量及布置方式进行工程实施，即尿素溶液雾化喷枪的喷射点按照图 3 所示布置 4 的方案布置 12 支喷枪，每支喷枪喷出的尿素溶液雾化颗粒粒径 $D_{V,0.5}$=52.0 μm。喷枪布置如图 10 所示。

根据燃气出口排气系统烟道、余热锅炉段烟道以及设备、烟气资料，采用尿素热解动力学三步总包反应模型，尿素水溶液在高速空气流中雾化，高温烟气中热解反应生成 NH_3 和 CO_2，建立相关模型模拟尿素溶液在排气系统烟道中喷入的化学反应过程及流动。经统计烟道内各截面尿素溶液转化率、热解产物氨浓度及 NH_3/NO_x 摩尔比 N 相对标准偏差数值如表 4 所示，催化剂入口截面尿素热解产物 NH_3 的分布如图 11 所示，NH_3/NO_x 摩尔比的分布如图 12 所示。从表 4 及图 11、图 12 中可以看到，机组高低负荷工况下催化剂入口截面尿素热解产物 NH_3 相对标准偏差分别为 4.85%、4.04%，均小于 5%，氨浓度分布均匀性较好；NH_3/NO_x 摩尔比平均值分别为 0.988、0.985，相对标准偏差分别为 4.78%、4.58%，NH_3/NO_x 摩尔比分布均匀性较好。这 2 种数值均满足一般催化剂对入口截面上脱硝关键性能指标的要求。

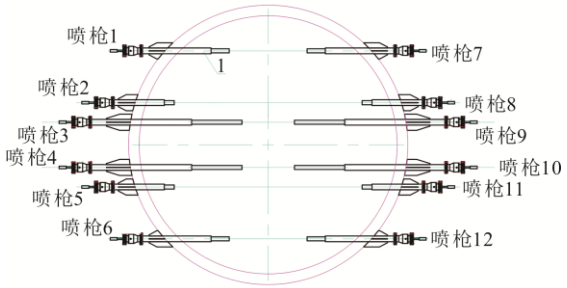
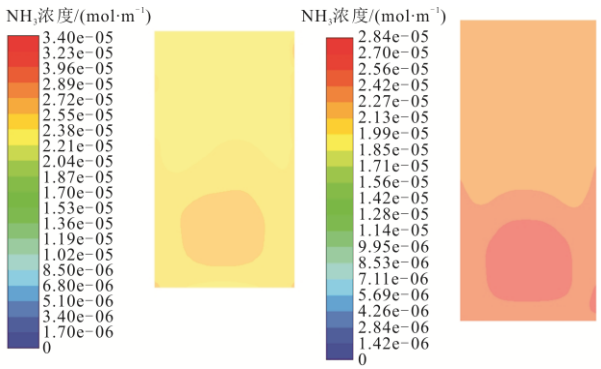


图 10 喷枪布置
Fig.10 Layout of injectors

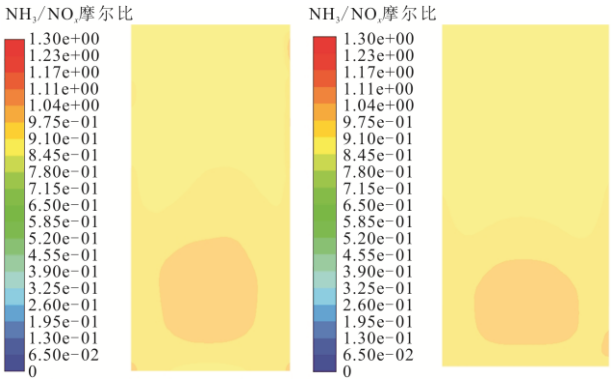
表 4 烟道内各参数
Tab.4 Parameters inside the flue duct

工况	距喷嘴距离/m	x=9 截面	x=15 截面	模块 1 入口	模块 2 入口	模块 3 入口	催化剂入口
纯凝工况 100%负荷	尿素转化率/%	20.6	50.9	64.6	98.4	99.8	99.9
	NH_3 浓度分布相对标准偏差/%	74.81	55.80	27.54	5.41	5.09	4.85
	N 平均值	0.074	0.550	0.691	0.975	0.986	0.988
	N 相对标准偏差/%	72.73	60.42	24.71	4.18	4.71	4.78
纯凝工况 30%负荷	尿素转化率%	38.3	80.8	92.9	99.8	99.9	100.0
	NH_3 浓度分布相对标准偏差/%	48.80	23.90	10.50	4.10	4.05	4.04
	N 平均值	0.324	0.672	0.876	0.981	0.984	0.985
	N 相对标准偏差/%	36.01	21.39	5.63	4.29	4.57	4.58



a) 100%负荷　　b) 30%负荷

图 11 催化剂入口截面 NH_3 浓度分布
Fig.11 Distribution of NH_3 concentration on inlet cross-section of the catalyst



a) 100%负荷　　b) 0%负荷

图 12 催化剂入口截面上 NH_3/NO_x 摩尔比分布
Fig.12 Distribution of molar ratio of NH_3/NO_x on inlet cross-section of the catalyst

3.2 尿素直喷热解系统

实际工程应用中，由于机组在负荷变化时所需要的尿素溶液流量时刻变化，如果进入喷枪中的尿素溶液浓度固定，那么喷枪入口的尿素溶液压力会发生相应变化，这样很难保证喷枪喷出的雾化颗粒参数处于最佳值。因此，设计出一种适用于尿素直喷热解工艺的尿素溶液计量稀释系统，如图 13 所示。在计量稀释系统中，每支双流体雾化喷枪入口分别对应 2 路管道：一路为雾化空气，雾化空气的压力使用调节阀调好后固定；另一路为尿素溶液管路，在计量稀释系统中引入一路除盐水管路，体积分数 50%尿素溶液先与除盐水混合后再进入喷枪。计量稀释系统除盐水总管道上设置有自力式减压阀，使自力式减压阀后压力保持不变。当系统中 1 支或多支喷枪所需要的尿素溶液量增加或减少时，静态混合器前的除盐水压力会随之减少或增加，从而保证进入喷枪的稀尿素溶液压力为固定值。因此，在机组负荷变化时，可使从 12 支喷枪喷出的雾化颗粒参数处于最佳值，从而提高尿素直喷热解工艺系统适应性和可靠性。

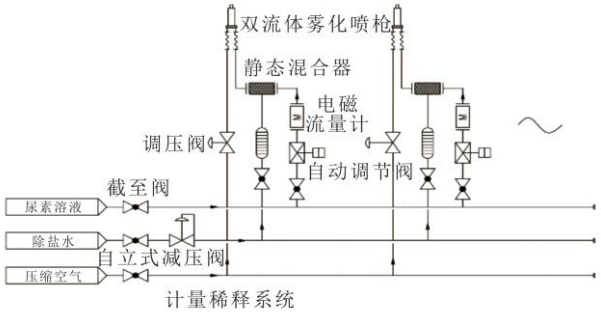


图 13 计量稀释系统示意
Fig.13 Schematic diagram of the metering dilution system

由于燃气轮机出口烟道尺寸较大（圆形截面直径为 6.5 m），喷枪的插入深度比较深；尿素直喷热解工艺中喷入烟道的尿素溶液浓度较高（一般在 30%~50%），单支喷枪所需的尿素溶液流量较小，导致喷枪内尿素溶液的流速较低（低于 0.5 m/s），较低流速的尿素溶液在烟道中流动很容易被高温的烟气蒸干，导致尿素颗粒析出，堵塞枪杆和喷嘴。在此情况下，提出了一种适用于烟道尿素直喷热解工艺的双流体喷枪，如图 14 所示。这种双流体喷枪在使用时，利用保温层的保温作用延缓高温烟气向尿素溶液管道传热，同时通过通入少量的冷却风带走部分传递到尿素溶液管道的热量，通过保温层及冷却风的共同作用有效阻碍了高温烟气热量向喷枪内的尿素溶液传递，从而使枪杆中的尿素溶液保持液态，能够有效提高喷枪的可靠性。



图 14 带隔热结构和冷却风的双流体喷枪结构示意图
Fig.14 Structural diagram of the two-fluid spray gun with thermal insulation structure and cooling air

本项目建成投运后，尿素直喷热解系统能够稳定地为 SCR 脱硝系统提供还原剂，脱硝系统能够将 NO_x 排放量从 35 mg/m^3 降至 5 mg/m^3，氨逃逸量低于 3 μL/L，标志着燃气蒸汽联合循环 SCR 脱硝尿素直喷热解技术获得了成功应用。

4 结　论

针对燃气蒸汽联合循环机组燃气轮机出口烟气参数的特点，提出了燃气轮机出口烟道尿素直喷热解工艺。使用数值模拟方法对尿素直喷热解工艺在 F 级燃气蒸汽联合循环机组的应用进行了研究，并根据研究结果进行了工程设计及应用，主要结论如下。

1）在 300～650 ℃内，随着烟气温度升高、停留时间增加，尿素热解效率快速增加；在此温度范围内，停留时间超过 0.5 s，尿素热解效率达到 95%以上；停留时间在 1.7 s 内，尿素热解产物为氨气和异氰酸。

2）尿素热解效率随着离喷射点距离的增加而增加，在离喷射点距离 23 m 之前（即模块 2 入口），尿素热解效率迅速增加，到离喷射点 31 m（即催化剂入口）时，尿素热解效率达到 99%以上。

3）在实际工程设计中，喷枪的喷射点数量、尿素溶液颗粒的雾化粒径需通过数值模拟方法来确定。采用带有稀释水的计量稀释系统能够使各喷枪喷出的雾化颗粒参数在不同负荷下保持最佳工况，带隔热结构和冷却风的双流体喷枪能够避免布置喷枪内的小流量尿素溶液在低速流动过程中气化从而堵塞喷枪。项目建成投运后，尿素直喷热解系统能够稳定的为 SCR 脱硝系统提供还原剂，将 NO_x 排放量从 35 mg/m^3 降至 5 mg/m^3，氨逃逸量低于 3 μL/L。

4）尿素直喷热解工艺系统是一种新型脱硝还原剂制备技术，能够显著降低能耗及运行费用，通过对该关键设备及技术的研究，为燃气蒸汽联合循

环机组 SCR 脱硝技术的应用提供技术支持，对推动燃气轮机组节能减排，绿色发展具有重要意义。

[参 考 文 献]

[1] DB 11/847—2011 固定式燃气轮机大气污染物排放标准[S].
DB 11/847—2011 Emission standard of air pollutants for stationary gas turbine[S].

[2] 深圳市人民政府.深圳市大气环境质量提升计划(2017—2020 年): 深府〔2017〕1 号[A].
Shenzhen Municipal People's Government. Shenzhen atmospheric environment quality improvement plan (2017—2020): Shenfu〔2017〕No.1[A].

[3] 惠世恩, 庄正宁, 周屈兰, 等. 煤的清洁利用与污染防治[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 25.
Hui S E, Zhuang Z N, Zhou Q L, et al. Pollution prevention and clean use of coal[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 25.

[4] 杨卫娟, 周俊虎, 刘建忠, 等. 选择催化还原 SCR 脱硝技术在电站锅炉的应用[J]. 热力发电, 2005, 34(9): 10.
Yang W J, Zhou J H, Liu J Z, et al. Application of selective catalytic reduction (SCR) denitrification technology for utility boilers[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(9): 10.

[5] 董陈, 曾洋波, 姜建, 等. 燃气蒸汽联合循环机组 SCR 脱硝技术研究[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 40.
Dong C, Zeng Y B, Jiang J, et al. SCR deNO$_x$ retrofitting technology for gas-steam combined cycle unit[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 40.

[6] 陆续, 张向宇, 刘彤, 等. 尿素水解制氨机理的模拟与实验[J]. 热力发电, 2015, 44(10): 46.
Lu X, Zhang X Y, Liu T, et al. Mechanism of urea hydrolysis for ammonia production: numerical simulation and experimental study[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(10): 46.

[7] 张磊, 陶谦, 邱勇军, 等. SCR 烟气脱硝还原剂制备工艺比较[J]. 电力科技与环保, 2019, 35(5): 20.
Zhang L, Tao Q, Qiu Y J, et al. Comparison of preparation technology of SCR flue gas denitrification on reducing agents[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019, 35(5): 20.

[8] 周金华, 靳江波, 马德海. SCR 脱硝技术在燃气蒸汽联合循环发电机组中的应用[J]. 应用能源技术, 2017(4): 22.
Zhou J H, Jin J B, Ma D H. Design and applications of SCR denitrification technology in CCPP[J]. Applied Energy Technology, 2017(4): 22.

[9] Jeong S J, Lee S J, Kim W S. Numerical study on the optimum injection of urea water solution for SCR deNO$_x$ system of a heavy-duty diesel engine to improve deNO$_x$ performance and reduce NH_3 slip[J]. Environmental Engineering Science, 2008, 25(7): 1017.

[10] Sung D Y, Soo J K, Joon H B, et al. Decomposition of urea into NH_3 for the SCR Process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43: 4856.

[11] Birkhold F, Meingast U, Wassermann P, et al. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR deNO$_x$-systems[J]. Applied Catalysis B Environmental, 2007, 70(1/2/3/4): 119.

[12] Wang D W, Dong N, Hui S E, et al. Analysis of urea pyrolysis products in 132.5-190 ℃[J]. Fuel, 2019, 242: 62.

[13] Honorien J, Foumet R, Glaude P A, et al. Theoretical study of the gas-phase thermal decomposition of urea[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2020, 38(1): 355.

[14] Krum K, Patil R, Christensen H. Kinetic modeling of urea decomposition and byproduct formation[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 230: 37.

[15] Koebel M, Elsener M, Kleemann M. Urea-SCR: a promising technique to reduce NO$_x$ emissions from automotive diesel engines[J]. Catalysis Today, 2000, 59(3/4): 335.

[16] 唐滔, 赵彦光, 华伦, 等. 柴油机 SCR 系统尿素水溶液喷雾分解的试验研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(1): 1.
Tang T, Zhao Y G, Hua L, et al. Experimental study of urea solution spray and decomposition of SCR system for diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(1): 1.

[17] Grossale A, Nova I, Tronconi E. Study of a Fe- zeolite-based system as NH_3-SCR catalyst for diesel exhaust aftertreatment[J]. Catalysis Today, 2008, 136(1/2): 18.

[18] 董陈, 杨世极, 袁壮, 等. 一种布置在燃机出口烟道内部的尿素直喷热解脱硝装置: ZL202020330041.8[P]. 2020-03-16.
Dong C, Yang S J, Yuan Z, et al. A direct urea solution injection pyrolysis device in outlet flue of a gas turbine: ZL202020330041.8[P]. 2020-03-16.

[19] 张志伟, 王高升. 燃气轮机旋流燃烧室冷态流场数值模拟研究[J]. 内燃机与配件, 2020(23): 191.
Zhang Z W, Wang G S. Numerical simulation research on cold flow field in swirl combustor of gas turbine[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(23): 191.

[20] Shahariar G, Lim O. Investigation of urea aqueous solution injection, droplet breakup and urea decomposition of selective catalytic reduction systems[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7): 3473.

[21] 吕洪坤, 杨卫娟, 周俊虎, 等. 尿素溶液高温热分解特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 35.
Lü H K, Yang W J, Zhou J H, et al. Investigation on thermal decomposition characteristics of urea solution under high temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(17): 35.

[22] Fang H L, DaCosta H F M. Urea thermolysis and NO$_x$ reduction with and without SCR catalysts[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 46(1): 17.

[23] Chen Z, Yang W, Zhou J, et al. HNCO hydrolysis performance in urea-water solution thermohydrolysis process with and without catalysts[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2010, 11: 849.

[24] 袁壮, 张正本, 董陈. 基于尿素直喷热解技术的西门子 9F 级重型燃气轮机 NO$_x$近零排放研究应用报告[R]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2024: 17.
Yuan Z, Zhang Z B, Dong C. Feasibility research report of NO$_x$ near-zero emission for Siemens 9F-class heavy-duty gas turbine based on urea direct injection pyrolysis technology[R]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2024: 17.

[25] Rota R, Antos D, Zanoelo E F, et al. Experimental and modeling analysis of the NO$_x$OUT process[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(1): 27.

[26] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 136.
Tao W Q. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 136.

（责任编辑 杨嘉蕾）