

DOI: 10.19666/j.rlfed.202206136

## 尿素水解催化剂性能比较研究

向小凤, 张向宇, 王志超, 张喜来, 张波, 姚伟

(西安热工研究院有限公司电站锅炉煤清洁燃烧国家工程研究中心, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为筛选出高活性的尿素水解催化剂, 利用间歇反应釜和连续操作中试装置, 对尿素催化水解反应的动力学和热力学特性进行了研究, 并比较了不同催化剂对水解反应温度、能耗和变负荷响应时间的影响。结果表明: 添加催化剂能够降低水解反应的活化能(液态磷酸氢二铵活化能为 65.3 kJ/mol、固体氧化铝活化能为 52.9 kJ/mol), 并提高尿素转化率; 添加催化剂能够提高水解反应速率, 降低水解反应温度; 在连续操作反应器中, 固体氧化铝催化剂存在分布不均、接触不充分的问题, 导致催化活性下降; 催化水解的产氨能耗仅比普通水解降低约 1%~3%, 添加磷酸氢二铵和氧化铝催化剂未减小水解器的变负荷响应时间。

[关键词] 尿素水解; 氨气; 催化; 动力学; 活化能

[引用本文格式] 向小凤, 张向宇, 王志超, 等. 尿素水解催化剂性能比较研究[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 105-110. XIANG Xiaofeng, ZHANG Xiangyu, WANG Zhichao, et al. Comparative study on performance of catalysts for urea hydrolysis[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 105-110.

### Comparative study on performance of catalysts for urea hydrolysis

XIANG Xiaofeng, ZHANG Xiangyu, WANG Zhichao, ZHANG Xilai, ZHANG Bo, YAO Wei  
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. & National Engineering Research Center of Clean Coal Combustion, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to select high activity catalysts for urea hydrolysis, the kinetic and thermodynamic characteristics of urea catalytic hydrolysis reaction were studied by using batch reactor and continuous operation pilot plant, and the effects of different catalysts on hydrolysis reaction temperature, energy consumption and variable load response time were compared. The results show that, the activation energy of the hydrolysis reaction can be reduced by adding catalyst (the activation energy of the liquid diammonium hydrogen phosphate is 65.3 kJ/mol, and that of the solid alumina is 52.9 kJ/mol), and the urea conversion can be improved. The addition of catalyst increases the hydrolysis reaction rate and decreases the hydrolysis reaction temperature. Due to uneven distribution and insufficient contact, the catalytic activity of solid alumina catalyst decreases in the continuous operation reactor. The energy consumption of ammonia production by catalytic hydrolysis is about 1%~3% lower than that of ordinary hydrolysis, and the response time of hydrolyzer changing load is not shortened by adding diammonium phosphate and alumina catalyst.

**Key words:** urea hydrolysis; ammonia; catalytic; dynamics; activation energy

2022 年初, 国家能源局印发《电力行业危险化学品安全风险集中治理实施方案》, 要求全国公用燃煤电厂的液氨一级、二级重大危险源尿素替代改造工程要于 2022 年 12 月底前完成, 液氨三级、四级重大危险源尿素替代改造工程要于 2024 年底前完成。我国燃煤电厂液氨改尿素工程已迫在眉睫。

尿素制氨技术主要分为尿素热解制氨和尿素水解制氨 2 种途径, 其中尿素水解制氨技术经济性更佳, 已成为国内液氨改尿素工程的主要技术选择<sup>[1]</sup>。火电厂尿素水解制氨是在一定温度和压力下, 尿素与水反应生成氨气作为选择性催化还原法 (SCR) 脱硝用还原剂<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2022-06-12 网络首发日期: 2022-09-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFC1910000); 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-H15)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFC1910000); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H15)

第一作者简介: 向小凤 (1980), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空气污染物排放控制及清洁能源技术研究, xiangxiaofeng@tpri.com.cn.

尿素催化水解技术是在传统尿素水解的基础上,添加特定的催化剂来提高水解反应速率,从而解决传统尿素水解反应器体积大和变负荷响应时间长的问题<sup>[3-4]</sup>。催化剂的选择是尿素催化水解工艺的核心。Yang W 等<sup>[5]</sup>发现沸石将尿素分解转移到较低的温度,  $\text{NH}_3$  的收率得以提高,低温催化效果更明显,水解反应的表观活化能很低。Eichelbaum M 等<sup>[6]</sup>研究了尿素在不同沸石(H-Y、Cu-Y、H-Beta、Na-Beta 和 Fe-Beta)上的水解,沸石显著加快了HNCO的水解。Guo C 等<sup>[7]</sup>用乙醇优化镁铝催化剂在  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$  表面的生长过程,对尿素废水的降解率提高,尿素的去除率与碱度有良好的线性关系。Fan X 等<sup>[8]</sup>采用  $\text{ZrO}_2$  等离子体催化尿素水解,可常温下水解尿素,符合准一级动力学模型,增加放电功率可加速尿素的水解,有利于提高氨产率和降低能耗。Pengpanich S 等<sup>[9]</sup>发现 SCR 催化水解的尿素分解速度远慢于 HNCO,  $\text{ZrO}_2$  催化剂的高尿素水解活性表明水直接攻击吸附的尿素,而不是吸附的 HNCO。

目前,工程上常用的尿素水解催化剂包括磷酸二氢铵( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )和磷酸氢二铵( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ),会将含磷化合物带入废水中,直接排放会造成二次污染<sup>[10-11]</sup>,因此需要开发一种无污染、高效低成本的水解催化剂。本文筛选了一种固体氧化铝催化剂,并利用间歇反应釜和连续操作中试装置比较了氧化铝和传统磷酸盐催化剂对尿素水解反应温度、反应速率和产氨能耗的影响。

## 1 催化剂筛选及小试验证

在反应釜上开展尿素水解的小试验,并对催化水解的动力学特性进行研究,试验装置如图1所示。

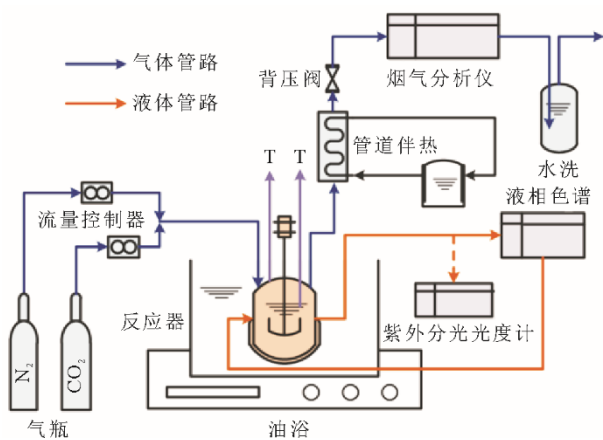


图1 间歇式反应釜系统

Fig.1 Schematic diagram of the batch reactor system

尿素溶液和催化剂按比例混合后加入反应釜

中,采用油浴加热控制釜内温度为  $120\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ ,利用气瓶内的气体与背压阀控制反应釜压力在  $100\sim 500\text{ kPa}$ 。反应釜采用间歇式操作,传热传质对反应过程没有影响<sup>[12-13]</sup>。反应一定时间后采用氮气吹扫产物气,送入烟气分析仪中测量产物气组分浓度,同时采用紫外分光光度计测量溶液中残余尿素浓度。

磷酸二氢铵和磷酸氢二铵易溶于水,为液态催化剂;而氧化铝不溶于水,为固态催化剂<sup>[14-15]</sup>。在反应釜中对这3种催化剂的催化活性进行检测,结果如图2所示。试验条件为  $140\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $150\text{ kPa}$ ,初始尿素溶液质量分数为40%,催化剂添加量均为  $1\text{ g}$ ,搅拌速度  $100\text{ r/min}$ ,在反应时间为  $60\text{ min}$  时检测残余尿素溶液浓度并计算尿素分解率。由图2可以看到,3种催化剂均能够提高尿素的分解速率,添加氧化铝作为催化剂时,尿素的分解率最大,这表明固体氧化铝的催化活性大于液态磷酸二氢铵和磷酸氢二铵。

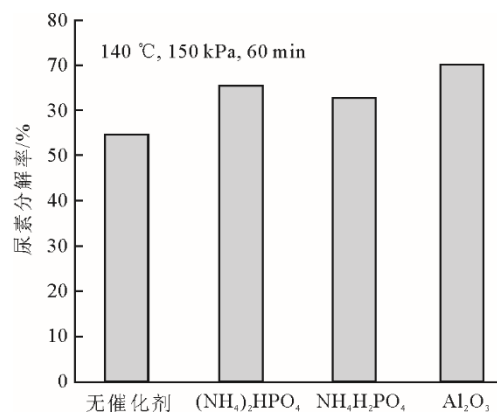


图2 水解催化剂催化活性对比

Fig.2 Comparison of catalytic properties of hydrolysis catalysts

在不同催化剂和温度条件下分别测定反应釜中尿素溶液质量分数随时间的变化曲线,结果如图3所示。由图3可以看出:随着反应温度升高,残余尿素溶液质量分数减小,尿素的分解率增大;在相同温度和反应时间下,氧化铝作为催化剂时尿素的分解率最大。

根据尿素溶液质量分数随时间的变化曲线计算水解反应速率常数,然后将不同温度下的反应速率常数代入阿伦尼乌斯公式中,拟合得到指前因子和活化能参数<sup>[16]</sup>,结果如图4所示。

使用不同催化剂时尿素水解反应的指前因子和活化能参数见表1。由表1可见,加入催化剂能够促进分子间碰撞,降低水解反应活化能<sup>[17-18]</sup>。

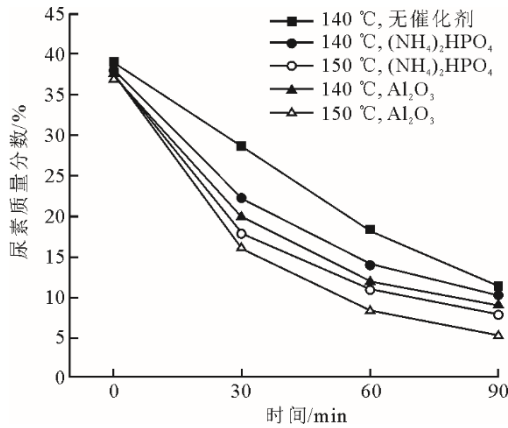


图 3 尿素溶液质量分数随时间变化曲线

Fig.3 The variation curves of urea solution mass concentration with time

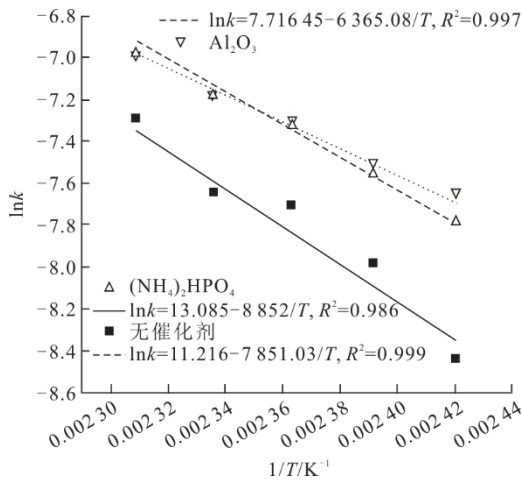


图 4 尿素（催化）水解反应的活化能和指前因子

Fig.4 The activation energy and pre-exponential factors of urea catalytic hydrolysis

表 1 不同催化剂尿素水解反应的指前因子与活化能

Tab.1 The pre-exponential factor and activation energy of urea hydrolysis reaction with different catalysts

催化剂	指前因子/s <sup>-1</sup>	活化能/(kJ·mol <sup>-1</sup> )
无催化剂	481 666.7	73.6
磷酸氢二铵	74 329.3	65.3
氧化铝	2 244.9	52.9

比较氧化铝和磷酸氢二铵作为水解催化剂时活性的稳定性。在 140 °C、150 kPa 试验条件下，蒸干尿素溶液后收集催化剂颗粒结晶物，再溶解到新配制的尿素溶液里，如此循环 5 次，在 60 min 时检测残留尿素溶液质量分数，结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，循环 5 次后残余尿素溶液质量分数基本不变，这表明在尿素水解反应条件下，2 种催化剂均未发生分解或其他副反应，活性较为稳定。

## 2 中试结果及分析

为模拟工业反应器的传热传质过程，搭建了尿

素水解中试装置，并新增了 1 套催化剂给料回路，包括催化剂储罐、给料泵、开关阀以及止回阀。尿素催化水解中试系统如图 6 所示。

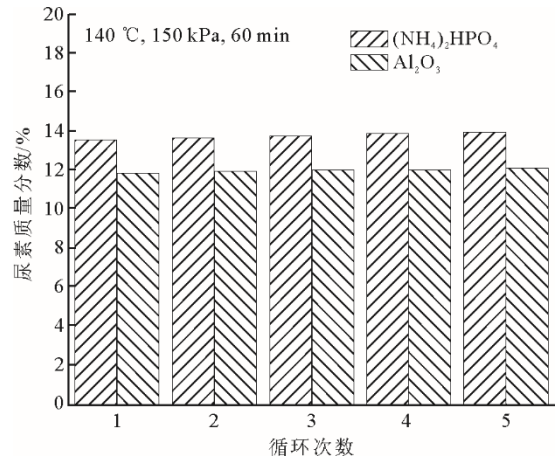


图 5 不同循环次数下催化剂的稳定性

Fig.5 Stability of the catalysts with different cycle times

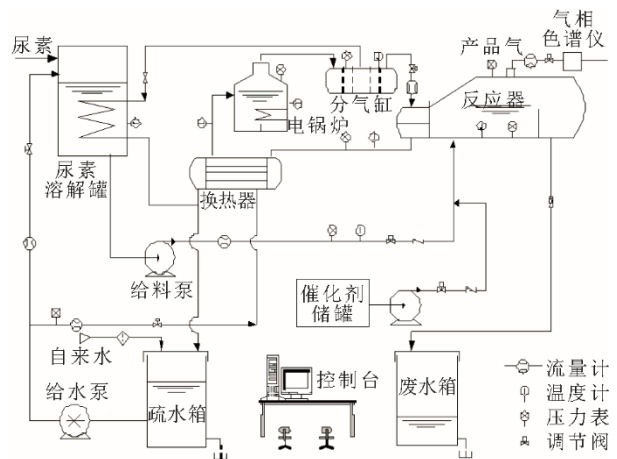


图 6 尿素催化水解中试系统

Fig.6 Schematic diagram of the urea catalytic hydrolysis pilot system

水解釜式反应器采用连续操作，尿素溶液由反应器底部连续通入，产品气由反应器顶部排出。加热蒸汽通过盘管与尿素溶液换热，不与尿素溶液接触，冷却为疏水后排出盘管<sup>[19-20]</sup>。水解反应器容积为 220 L，给料尿素溶液质量分数为 50%，设计最大产氨速率 12 kg/h，操作压力 0.4~0.6 MPa。

在中试试验台上开展了尿素催化水解试验，催化剂分别为磷酸氢二铵和氧化铝。配制质量分数 50% 的磷酸氢二铵溶液，然后加入催化剂储罐中，与给料尿素溶液混合后一起送入水解反应器中。称取 5 kg 的固体氧化铝颗粒与除盐水配制成悬浊液，然后通过催化剂储罐加入给料尿素溶液中。试验工况见表 2。由表 2 可见，有催化剂和无催化剂工况

下,维持反应器出口调阀开度不变,调节反应温度使产品气流量基本相等。可以看到,添加催化剂后,较低的反应温度下就能够达到相同的产品气流量,并且采用磷酸氢二铵作为催化剂时的反应温度最低。

表2 尿素(催化)水解试验工况

Tab.2 Experimental conditions of the urea catalytic hydrolysis

工况	无催化剂		磷酸氢二铵		氧化铝	
	产品气流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	温度/℃	产品气流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	温度/℃	产品气流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	温度/℃
1	32.2	150.0	31.8	139.0	32.5	142.0
2	36.0	152.0	35.7	141.0	35.2	145.0
3	44.5	155.5	44.2	145.0	44.1	150.0
4	50.2	157.5	49.5	147.0	49.2	154.0
5	52.7	158.5	51.9	148.0	51.4	155.5

将产品气通入气相色谱仪中检测气相各组分体积分数,结果如图7所示。图7中3条色谱曲线均在相似停留时间处出现3个波峰,分别对应二氧化碳、氨气和水蒸气,每个波峰所围面积代表各组分的体积分数。由图7可见,添加液体和固体2种催化剂后,气相各组分体积分数未发生明显变化。这主要是由于催化剂在反应过程中未消耗和发生副反应,根据物料平衡,产物气中各组分体积分数仅由给料尿素溶液浓度确定。

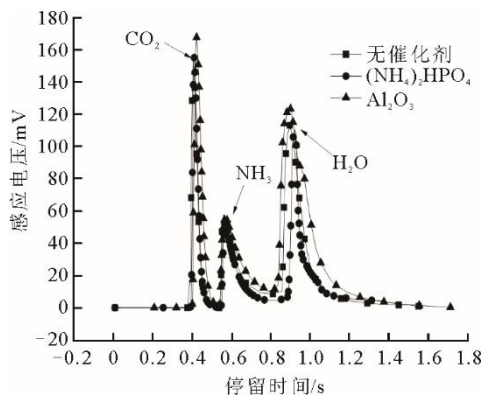


图7 尿素(催化)水解气相产物色谱曲线

Fig.7 Chromatographic curves of gaseous products of urea catalytic hydrolysis

水解反应器内气液两相在相界面处达到溶解平衡,溶剂H<sub>2</sub>O的气液平衡关系符合修正的Lewis-Randall方程,溶质氨气、二氧化碳的气液平衡关系符合修正的Herry方程。根据气相产物检测体积分数和气液平衡方程可计算得到液相各组分浓度,结果如图8所示。由图8可见,液相中氨气和二氧化碳浓度主要由溶解度决定,添加催化剂后液相中氨

气浓度升高,二氧化碳浓度降低。添加催化剂后尿素及甲铵浓度降低,表明催化剂能够促进尿素和甲铵分解,从而提高尿素转化率。

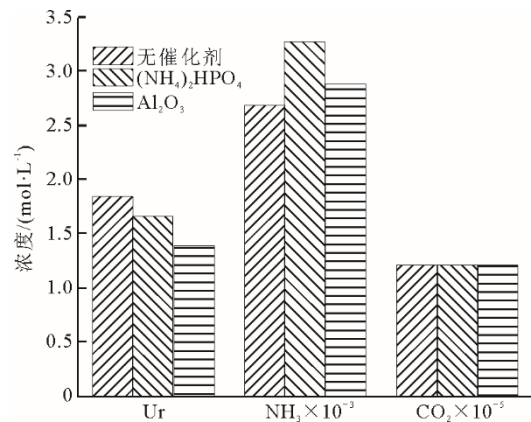


图8 尿素(催化)水解液相组分浓度

Fig.8 Concentration of liquid-phase components of urea catalytic hydrolysis

根据产品气流量和气相产物组分浓度检测数据计算得到各温度下产氨速率,结果如图9所示。由图9可见,氧化铝具有更好的催化活性,但固体催化剂在反应器中存在分布不均匀、与反应液接触不充分的问题,因此表现反应速率小于本征动力学数据,相同产氨量下的反应液温度高于液态催化剂磷酸氢二铵。

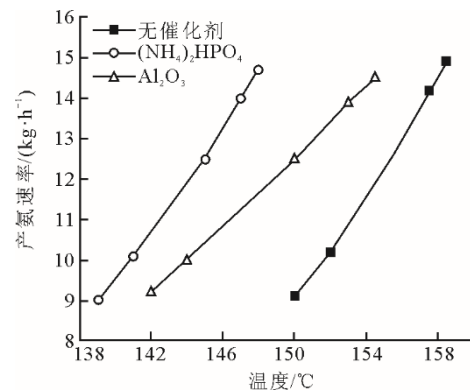


图9 产氨速率随温度变化曲线

Fig.9 Change curves of ammonia production rate with temperature

尿素水解为强吸热反应,所需热量由盘管内的蒸汽提供,蒸汽参数为1.0 MPa/180℃。根据不同工况下的蒸汽耗量计算尿素催化水解反应的产氨能耗,结果如图10所示。尿素水解反应所需热量包括3部分:化学反应吸热;给料尿素溶液加热到反应温度所需的热量;过量的水的气化潜热。添加催化剂后,水解反应温度降低,第2部分热量将显著减小,因此催化水解的产氨能耗要低于普通水解。

另一方面, 3 部分热量中化学反应吸热和水的汽化潜热占主要份额, 因此催化水解的产氨能耗仅降低约 1%~3%, 并且与催化剂的活性有关。

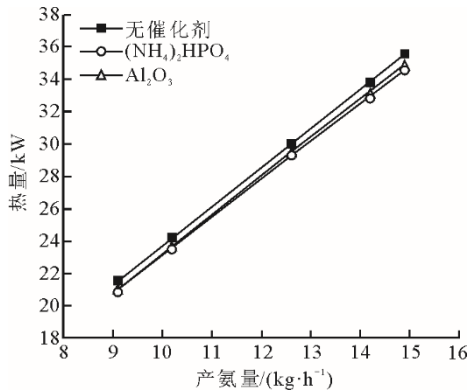


图 10 尿素(催化)水解反应的产氨能耗

Fig.10 The energy consumption for ammonia production of urea catalytic hydrolysis

目前的水解反应器同时具备反应区和氨缓冲区的功能, 当负荷变化时, 出口调门增大, 反应器内压力降低, 存储的氨气能够在短时间内快速响应氨气需求的变化, 响应时间一般 1~3 s。但是氨缓冲区的容量有限, 无法长时间支撑新的负荷需求, 必须通过调节给料尿素溶液阀门和加热蒸汽阀门来实现对变负荷的稳定响应。因此, 定义尿素水解反应器的变负荷响应时间为: 从反应器接收到 SCR 区氨气需求变更指令开始, 到反应器内温度和压力稳定为止所经历的时间。

釜式水解反应器具有很大的热惯性, 变负荷响应时间主要由反应液的升降温时间决定(式(1)), 这里假定加热蒸汽阀门不产生过调, 且忽略阀门和执行机构的动作时间。

$$m_{ur}(C_{ur,T_2}T_2 - C_{ur,T_1}T_1) = \int_{T_1}^{T_2} [k_{T+\Delta T}c_{ur,T+\Delta T}(q_1 + q_2 + q_3) - k_Tc_{ur}(q_1 + q_2 + q_3)] \cdot t \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中:  $m_{ur}$  为反应液质量, kg;  $C_{ur}$  为尿素溶液的比热容, kJ/(kg·°C);  $k$  为反应速率常数, s<sup>-1</sup>,  $c_{ur}$  为反应液浓度, mol/L;  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  分别为化学反应吸热、尿素溶液加热、水的气化潜热, kJ/mol;  $t$  为变负荷响应时间, s。

根据上式计算有催化剂和无催化剂时氨产量变化的响应时间, 结果如图 11 所示。由图 11 可以发现, 以磷酸氢二铵为催化剂时, 变负荷响应时间与无催化剂时基本接近, 而以氧化铝作为催化剂时, 变负荷响应时间明显增大。根据式(1)分析可以

发现, 当指前因子  $A$  增大和活化能  $E$  减小时, 变负荷响应时间减小。而催化剂的加入在减小活化能的同时也减小了指前因子, 因此加入催化剂能否减小变负荷响应时间, 还需要进一步筛选水解催化剂以获得更优的表观动力学参数。

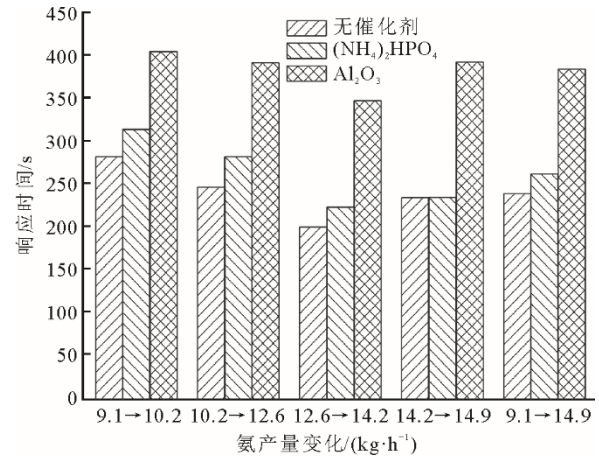


图 11 尿素(催化)水解反应器变负荷响应时间

Fig.11 The variable load response time of of urea catalytic hydrolysis reactor

### 3 结 论

1) 液态磷酸氢二铵和固体氧化铝均能够降低水解反应的活化能, 提高尿素转化率。磷酸氢二铵和氧化铝作为催化剂时尿素水解反应的活化能参数分别为 65.3 kJ/mol 和 52.9 kJ/mol, 氧化铝的催化活性高于磷酸氢二铵。

2) 添加磷酸氢二铵和氧化铝作为催化剂时, 尿素水解反应气相产物的组分浓度基本不变, 液相产物中尿素和甲铵浓度降低, 而氨浓度升高。

3) 磷酸氢二铵和氧化铝均能够提高水解反应速率, 降低水解反应温度。在连续操作反应器中, 固体氧化铝催化剂存在分布不均、接触不充分的问题, 导致催化活性下降。

4) 催化水解的产氨能耗仅比普通水解降低约 1%~3%。水解反应器的变负荷响应时间主要受指前因子和活化能影响, 添加磷酸氢二铵和氧化铝催化剂未减小变负荷响应时间。

#### [参 考 文 献]

- [1] 罗峻, 刘国军. 烟气脱硝尿素制氨工艺技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4): 8-13.  
LUO Jun, LIU Guojun. Research progress of preparing ammonia technologies by urea in gas denitrification[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 8-13.
- [2] 冯前伟, 张彭, 李存文, 等. 典型燃煤机组 SCR 脱硝还原剂尿素制氨技术经济比较分析[J]. 锅炉技术. 2022, 53(1): 76-80.

- FENG Qianwei, ZHANG Peng, LI Cunwen, et al. Comparison on techno-economic analysis of ammonia production using urea from SCR denitration reducing agent in typical coal-fired unit[J]. Boiler Technology, 2022, 53(1): 76-80.
- [3] 惠润堂, 韦飞, 闫世平, 等. 国产首套尿素水解装置在大型火电厂的工业应用及技术优化[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 150-155.  
HUI Runtang, WEI Fei, YAN Shiping, et al. The industrial application and technical optimization of first domestically made urea hydrolysis unit in large power plants[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 150-155.
- [4] 王福伟, 王倩, 刘晓明, 等. 脱硝供氨系统中尿素制氨技术探讨[J]. 现代化工, 2011, 31(3): 63-65.  
WANG Fuwei, WANG Qian, LIU Xiaoming, et al. Technical research on ammonia preparation from urea for denitrification[J]. Modern Chemical Industry, 2011, 31(3): 63-65.
- [5] YANG W, CHEN Z, ZHOU J, et al. Catalytic performance of zeolites on urea thermolysis and isocyanic acid hydrolysis[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(13): 7990-7997.
- [6] EICHELBAUM M, FARRAUTO R J, CASTALDI M J. The impact of urea on the performance of metal exchanged zeolites for the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub>: Part I. pyrolysis and hydrolysis of urea over zeolite catalysts[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2010, 97(1/2): 90-97.
- [7] GUO C, SHEN S, LI M, et al. Rapid in situ synthesis of MgAl-LDH on  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for efficient hydrolysis of urea in wastewater[J]. Journal of Catalysis, 2021, 395: 54-62.
- [8] FAN X, LI Z Y, DU M W, et al. Plasma-catalytic hydrolysis of urea for ammonia production: optimization and kinetic study[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(48): 17480-17488.
- [9] PENGPANICH S, MEEYOO V, RIRKSOMBOON T, et al. Catalytic oxidation of methane over CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> mixed oxide solid solution catalysts prepared via urea hydrolysis[J]. Applied Catalysis A: General, 2002, 234(1/2): 221-233.
- [10] KUNTZ C, WEICKENMEIER H, BÖRNHORST M, et al. Deposition and decomposition of urea and its by-products on TiO<sub>2</sub> and VWT-SCR catalysts[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2022, 95: 108969.
- [11] GUILLERMINA E, KENNETH M. Enzymatic catalysis of urea decomposition: elimination or hydrolysis[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126: 11832-11842.
- [12] 李春雨, 丁艳军, 孟磊, 等. 燃煤电厂烟气 SCR 脱硝低能耗尿素催化水解技术开发与应用研究[J]. 中国科技成果, 2017(17): 68-69.  
LI Chunyu, DING Yanjun, MENG Lei, et al. Development and applied research for ammonia production from urea catalytic hydrolysis of low energy consumption by flue gas SCR denitration in coal-fired power plant[J]. China Science and Technology Achievements, 2017(17): 68-69.
- [13] 张向宇, 张波, 陆续, 等. 火电厂尿素水解工艺设计及试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2452-2457.  
ZHANG Xiangyu, ZHANG Bo, LU Xu, et al. Crafts design and experimental study of urea hydrolysis to ammonia in thermal power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2452-2457.
- [14] MONTAÑEZ M K, MOLINA R, MORENO S. Nickel catalysts obtained from hydrotalcites by coprecipitation and urea hydrolysis for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(16): 8225-8237.
- [15] MEGUERDICHIAN A G, JAFARI T, SHAKIL M R, et al. Synthesis and electrocatalytic activity of ammonium nickel phosphate, [NH<sub>4</sub>] NiPO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O, and  $\beta$ -nickel pyrophosphate,  $\beta$ -Ni<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>: catalysts for electrocatalytic decomposition of urea[J]. Inorganic Chemistry, 2018, 57(4): 1815-1823.
- [16] 宋熙熙, 邵爽, 雷群芳, 等. 等温滴定量热法测定脲酶催化尿素水解反应动力学[J]. 浙江大学学报(理学版). 2009, 36(2): 175-179.  
SONG Xixi, SHAO Shuang, LEI Qunfang, et al. Kinetics of urease-catalyzed hydrolysis reaction of urea determined by isothermal titration calorimetry[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2009, 36(2): 175-179.
- [17] 孙立群, 吴冲. 烟气脱硝用尿素水解制氨技术理论与实践[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 229-236.  
SUN Liqu, WU Chong. Theory and practice of ammonia production by hydrolysis of urea for flue gas denitration[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 229-236.
- [18] BERNHARD A M, PEITZ D, ELSENER M, et al. Catalytic urea hydrolysis in the selective catalytic reduction of NO<sub>x</sub>: catalyst screening and kinetics on anatase TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>[J]. Catalysis Science & Technology, 2013, 3(4): 942-951.
- [19] ADRIÀ M A, LUSINE H, ANA B C, et al. NQS-doped PDMS solid sensor: from water matrix to urine enzymatic application[J]. Biosensors, 2021, 11(6): 186.
- [20] WU Z, ZHANG B, ZHOU X, et al. Influence of single/collective use of curing agents on the curing behavior and bond strength of soy protein-melamine-urea-formaldehyde (SMUF) resin for plywood assembly[J]. Polymers, 2019, 11(12): 1995.

(责任编辑 杨嘉蕾)