



电制氢反应器径向分层策略提升氨分解率的研究

王欣^{1,2}, 李永辉^{1,2}, 陈飒^{1,2}, 周娜³, 刘斌^{1,2}

(¹石家庄铁道大学, 机械工程学院, 河北省低温储能重点实验室, 河北省 石家庄市 050043;

²石家庄铁道大学, 河北省新型储能国际联合研究中心, 河北省 石家庄市 050043; ³石家庄铁道大学, 材料科学与工程学院, 河北省 石家庄市 050043)

摘要: 氨分解反应器结构优化对强化流动传热过程、提升氨氢转化效率至关重要。本文以圆柱状电制氢反应器为研究对象, 建立二维稳态多物理场耦合数值模型, 采用径向分层策略, 对氨分解率提升进行研究。对比分析了不同氨气入口流速下, 径向分层的层间距、层数及层位置对氨分解率的影响。结果表明径向分层策略可提升氨分解率, 在较大氨气入口流速下提升效果更加显著。层数越多, 层间距越大, 氨分解率越高。内嵌式结构对氨分解率提升明显优于外壁式结构。若协同加热层径向分层与加热功率轴向分段, 可进一步提升氨分解率。氨分解率的提升归因于结构优化使得热量传递更均匀, 氨分解用热匹配更精准。本文结论可为电加热氨分解反应器结构的设计与优化提供理论依据。

关键词: 反应器; 氨分解率; 径向分层; 热量传递

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0692

中图分类号: TQ 05

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-10

Study on Enhancing Ammonia Conversion through a Radial Layering Strategy in an Electrically Heated Hydrogen Production Reactor

WANG Xin^{1,2}, LI Yonghui^{1,2}, CHEN Sa^{1,2}, ZHOU Na³, LIU Bin^{1,2}

(¹School of Mechanical Engineering, Hebei Key Laboratory of Cryogenic Energy Storage, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; ²Hebei International Joint Research Center for Novel Energy Storage, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; ³School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Structural optimization of ammonia decomposition reactors is crucial for intensifying the coupled flow and heat-transfer processes and enhancing ammonia-to-hydrogen conversion. In this study, a cylindrical electrically heated ammonia decomposition reactor is investigated by developing a two-dimensional, steady-state multiphysics model. A radial layering strategy is introduced to enhance ammonia conversion. The effects of the spacing, number, and radial position of the layers on ammonia conversion are systematically evaluated at different ammonia inlet velocities. The results demonstrate that radial layering

收稿日期: 2026-08-07; 修改稿日期: 2026-09-02。

基金项目: 河北省重大科技支撑计划-国际科技合作专项 (24294503Z)

第一作者: 王欣 (1988—), 女, 博士, 讲师, 氨分解制氢技术, E-mail: wxin88@stdu.edu.cn 通信作者: 周娜 (1984—), 女, 博士, 副教授, 氨氢融合催化剂, E-mail: chmzhouna@stdu.edu.cn

引用本文: 王欣, 李永辉, 陈飒, 等. 电制氢反应器径向分层策略提升氨分解率的研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-10.

Citation: WANG Xin, LI Yonghui, CHEN Sa, et al. Study on Enhancing Ammonia Conversion through a Radial Layering Strategy in an Electrically Heated Hydrogen Production Reactor[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-10.

effectively enhances ammonia conversion, with the improvement becoming more pronounced at higher inlet velocities of ammonia. Ammonia conversion increases with both the number of layers and the spacing between layers. The embedded heater configuration exhibits a substantially greater enhancement in ammonia conversion than the wall-adjacent heater configuration. Furthermore, ammonia conversion can be further improved by coupling radial layering of the heating layers with axial segmentation of the heating power. The enhanced conversion is attributed to the more uniform heat distribution and the improved spatial matching between heat supply and the endothermic heat demand of ammonia decomposition achieved through structural optimization. These findings provide a theoretical basis for the structural design and optimization of electrically heated ammonia decomposition reactors.

Keywords: reactors; ammonia conversion; radial layering; heat transfer

1 引 言

人类生产活动对化石能源高度依赖,化石燃料的大量使用加剧了温室效应^[1],亟需寻找可再生的低碳能源甚至零碳能源代替化石燃料^[2]。氢作为当今最具潜力的零碳原料已被各国纳入了脱碳战略规划。然而,由于氢气在常温常压下体积能量密度低,其储存与运输仍面临高成本与安全性挑战^[4-6]。与之相比,氨因氢质量分数达 17.6%、体积氢密度达 $108\text{gH}_2\cdot\text{L}^{-1}$ ^[7]、易液化及成熟的储运体系,被认为是极具潜力的无碳储氢载体之一^[8-10]。氨作为氢载体,可有效规避高压储氢及长距离输氢在安全性与经济性方面的技术局限。通过终端现场氨分解制氢,还能够构建“绿电制氢—绿氨运氢—终端用氢”的绿色路径,在未来能源体系中具有广阔的应用前景^[10-11]。因此,发展高效的氨分解制氢技术势在必行。

氨分解反应 ($2\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2 + 3\text{H}_2$, $\Delta H = +46\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) 为强吸热催化反应,反应过程须依赖持续稳定的能量输入^[12-13]。因此,供给能量形式、催化剂种类与反应器结构为影响氨分解性能的关键因素。目前,供给能量形式主要有燃烧热、电加热、太阳能集热、等离子体、工业余热等多种形式^[10,14-16]。其中,传统燃烧加热虽技术成熟,但其能效低、碳排放高,难以长期使用;太阳能集热^[17]主要依赖直射辐照,受地域、季节等影响,温度较难调控,且占地规模庞大,投资高昂;等离子体加热^[18-19]依靠等离子体的热效应与高能粒子活化,适用于船舶、车载动力等小型场景;工业余热^[20]作为中低品位热源,多为分散、低能量密度热源,难以满足氨分解

对持续供热的需求。电加热^[14,16,21]因其温度调控精确、响应快速、易与可再生电力耦合等优势,具有极大的应用潜力。然而,现有电加热反应器仍存在热量分布不均、局部过热及尾端热损严重等问题^[21-22],有待进一步解决。

氨分解制氢性能高度依赖催化剂种类,催化剂主要分为金属、非金属两类,其中金属又分为贵金属,如 Ru^[23],非贵金属,如 Fe^[24-25], Ni^[25-26] 等。非金属化合物主要包括氮化物,如 MoN、CoMoN^[27] 等。其中 Ru 基催化剂具有较优的氮吸附能和活性位结构,在中低温区表现出高催化活性,是氨分解性能最优的催化剂之一^[10,28]。但其资源稀缺且成本高,与之相比, Ni 基催化剂因价格低廉、耐高温性能好、资源丰富等优势,成为工业广泛应用的催化剂种类^[30-31]。

反应器结构的合理设计,对于实现供给能量与催化剂活性的协同适配,提升氨分解效率至关重要。近年来,反应器研究逐渐从传统固定床反应器拓展至微通道反应器、膜反应器以及结构化反应器等多种形式^[10,15,32]。Miao 等^[15]针对 SOFC 余热利用,建立了多管固定床反应器的三维模型,研究了不同管径、管间距/管径比、操作条件等因素对氨分解性能的影响。Lu 等^[33]提出一种微通道氨分解反应器,并对其内部氨分解反应的多物理场耦合及操作条件进行了研究,结果表明增加微通道长度、降低流量可提高氨分解率;Magnone 等^[34]研究以多孔 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 中空纤维为支撑体,分别制备了氧化物基 ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)、金属基 ($\text{Pd}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Pd}-\text{Ag}-\text{Cu}$ 三元合金/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 四种不同分离层的膜结构,在相同工况下对比不同膜结构的

渗透通量、 H_2/N_2 、 H_2/NH_3 分离因子，为高温原位氨分解膜反应器提供选型依据；Cherif等^[22]针对电加热氨分解反应器进行研究，发现将加热元件嵌入催化床层内部，可有效缩短热传递路径，提高反应区温度均匀性，进而显著提升氨转化率。Liu等^[21]采用加热功率轴向分段策略，将更多热量匹配至入口段高氨浓度区域，实现了供热分布与反应热需求的匹配。

综上所述，氨分解反应器结构对能量均匀传输与催化剂性能的优化匹配至关重要，是影响氨分解性能的关键因素。其中，电加热式氨分解反应器的传热路径优化与温度场均匀性的提升仍待进一步解决。本文以圆柱状电制氢反应器为研究对象，采用Ni-Pt/ Al_2O_3 催化剂，采用加热层径向分层的策略，分析不同氨气入口流速下，径向分层的层数、层间距及层位置对氨分解率的影响。此外，还探究了结构径向分层与加热功率轴向分段两种策略协同作用对氨分解率的提升，为高效电加热氨分解反应器的设计奠定了理论基础。

2 物理及数学模型

2.1 物理模型

如图1所示，电制氢反应器为圆柱状，长300 mm，半径30 mm。反应器结构由两部分组成，红色部分为电加热层，材质选定为FeCrAl合金；蜂窝状部分为催化反应区，填充Ni-Pt/ Al_2O_3 催化剂。电加热层通过设置固定电加热功率向催化反应区传递热流量驱动氨分解反应。氨气由入口流入催化反应区，吸收热量，在催化剂的作用下分解为氢气和氮气。分解的氢气、氮气及未分解的氨气由出口流出反应器。

考虑到反应器模型的轴对称性，为节省资源计算氨分解制氢，本文采用二维轴对称模型进行数值计算，如图1(b)所示，催化剂反应区视为多孔介质区域。

2.2 数学模型

电加热氨分解制氢过程涉及流动、传热、传质及化学反应多物理场耦合。为简化计算，对物理模型作以下假设：(1) 反应器内流动传热过程为稳态；(2) 催化反应区气体流态为层流；(3) 反应器入口气体体积空速均匀分布；(4) 反应器外壁面为热量损失为零的绝热边界；(5) 忽略重力对气体流

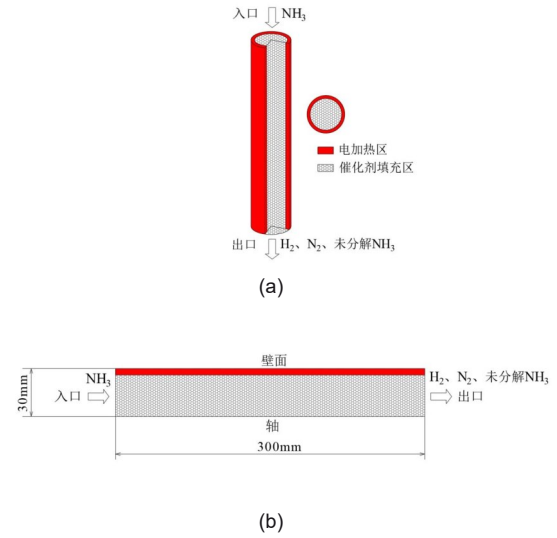


图1 氨分解反应器示意图：(a) 三维结构示意图 (b) 二维轴对称模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ammonia decomposition reactor: (a) Three dimensional structural diagram ; (b) Two dimensional axisymmetric model schematic diagram

动和反应的影响。

基于以上假设，电加热氨分解制氢的数学模型如下：

2.2.1 控制方程

连续性方程：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial(u_z)}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

式中， u_r 和 u_z 分别表示流体径向与轴向速度， $m \cdot s^{-1}$ 。

动量守恒方程：

$$r \cdot \frac{\rho_e}{\varepsilon^2} \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) - \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \quad (2-2)$$

$$z \cdot \frac{\rho_e}{\varepsilon^2} \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \quad (2-3)$$

式中， ρ_e 表示流体的密度， $kg \cdot m^{-3}$ ； α 表示催化剂的渗透率， C_2 表示惯性系数； α 和 C_2 分别由Carman-Kozeny模型和Ergun方程计算得出，计算式如下：

$$\alpha = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (2-4)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3} \quad (2-5)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_e u_r T}{\partial r} + \frac{\partial \rho_e u_z T}{\partial z} = \frac{\lambda_e}{c_{p,e}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_h + Q_R \quad (2-6)$$

式中, Q_h 表示电加热器热源项, 由欧姆定律计算得出; Q_R 表示氨分解反应的热源项。两热源项计算式分别如下:

$$Q_R = -\Delta H \times R_j \quad (2-7)$$

$$Q_h = \frac{1}{\sigma} \vec{j} \cdot \vec{j} \quad (2-8)$$

式中, $\vec{j}$ 表示电流密度, $A \cdot m^{-2}$; 根据欧姆定律计算得出, 计算式如下:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2-9)$$

式中, $\vec{E}$ 表示电场强度, $V \cdot m^{-1}$; σ 表示 FeCrAl 合金的电导率, $S \cdot m^{-1}$, 计算式如下:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{ref} (1 + \alpha_1 (T - T_{ref}))} \quad (2-10)$$

式中, ρ_{ref} 表示 FeCrAl 合金的电导率参考值, $S \cdot m^{-1}$; T_{ref} 表示 FeCrAl 合金的温度参考值, K; α_1 表示电阻率的温度系数。

组分传输方程:

$$\frac{\partial \rho_e u_r n_i}{\partial r} + \frac{\partial \rho_e u_z n_i}{\partial z} = D_{i,e} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \rho_e n_i}{\partial r} + \frac{\partial \rho_e n_i}{\partial z} \right) + S_i \quad (2-11)$$

式中, n_i 表示每种物质的摩尔变化速率, $mol \cdot s^{-1}$; S_i 表示每种物质的源项, $g \cdot mol^{-1}$, 计算方法如下:

$$S_{NH_3} = -0.034 R_j \quad (2-12)$$

$$S_{H_2} = 0.028 R_j \quad (2-13)$$

$$S_{N_2} = 0.006 R_j \quad (2-14)$$

式中, 黏度 μ_i 、热容 $C_{p,i}$ 、热导率 λ 以及二元扩散系数 D_{ij} 的值根据 Chapman-Enskog 公式计算得出, 如下所示:

$$\mu_i = 2.67 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{M_i T}}{\sigma^2 \Omega_\mu} \quad (2-15)$$

$$C_{p,i} = \frac{1}{2} \frac{R}{M_i} (f_i + 2) \quad (2-16)$$

$$\lambda = \frac{15}{4} \frac{R}{M} \mu \left(\frac{4}{15} \frac{C_p M}{R} + \frac{1}{3} \right) \quad (2-17)$$

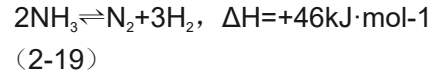
$$D_{ij} = 0.00188 \frac{\left[T^3 \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{P_{abs} \frac{1}{2} \sigma_{ij}^2 \Omega_D} \quad (2-18)$$

式中, P_{abs} 表示绝对压力, Pa; M 表示摩尔质

量, $g \cdot mol^{-1}$, 下角标 i, j 分别表示 i, j 两种组分; σ_{ij} 表示 i, j 两组分的 Lennard-Jones 平均碰撞直径, Å; Ω_μ 与 Ω_D 分别表示黏度碰撞积分和扩散碰撞积分。

2.2.2 反应动力学方程

氨分解反应是一个强吸热过程。标准状况下, 分解 1mol 氨需要 46kJ 能量。氨分解反应方程式如下所示,



在催化剂作用下, 氨分解反应过程依次为氨吸附、吸附氨解离及氮气与氢气的解吸。本文选用高活性、低成本的 Ni - Pt/Al₂O₃ 催化剂, 采用基于 Temkin-Pyzhev 动力学模型^[37]建立的氨分解总包反应速率方程进行计算, 速率方程如下,

$$R_j = k_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) P_{NH_3}^a P_{H_2}^b \quad (2-20)$$

其中, R_j 表示幂律反应速率, $mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$; E_a 表示活化能, $kJ \cdot mol^{-1}$; k_0 表示预指数因子, $mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$; T 表示反应物的温度, K; P_{NH_3} 表示氨的分压, Pa; P_{H_2} 表示氢的分压, Pa。氨分解反应动力学模型相关参数取值见表 1。

表 1 氨分解反应动力学相关参数取值

Table 1 Values of parameters related to the kinetics of ammonia decomposition reaction

参数	值
指数前因子, k_0	$3.639 \times 10^{11} mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$
活化能, E_a	196.02946 kJ·mol ⁻¹
催化剂颗粒直径, d_p	35 μm
催化剂孔隙率, ϵ	0.3
指数, a	1
指数, b	0

2.2.3 边界条件与求解方法

本文使用计算流体动力学软件 Fluent 计算氨分解制氢过程流动传热与化学反应的多物理场耦合过程。如图 1 (b) 所示, 反应器入口采用速度入口边界条件, 反应器出口采用压力出口边界条件, 反应器外壁面为绝热边界条件, 加热层内壁面为常热流无滑移边界条件, 轴线为对称轴。

通过用户自定义函数 (UDF) 将氨分解总包反应速率方程嵌入数值计算对氨分解制氢速率进行控制。采用 SIMPLE 算法来处理速度-压力耦合问题, 选用二阶迎风格式与基于 Green-Gauss 单元的方

法进行空间离散。

2.2.4 网格无关性验证

本文采用结构化网格进行空间离散，为保证数值结果的可靠性，分别选取 100000、225000 和 352500 不同网格数进行无关性验证。结果表明，网格数增加到 225000 后，网格密度对计算结果影响可忽略，表明 225000 网格密度满足计算精度的要求，后续计算均采用该网格数。

表2 网格无关性验证结果

Table 2 Verification results of grid independence

网格密度	稀疏	中等	加密
网格数量	100000	225000	352500
氨分解率	65.37%	62.25%	62.53%

2.2.5 模型验证

为保证数值计算结果的合理性与准确性，本文选用 Chellappa 等^[35]实验数据进行对比验证。实验基本条件：温度设定为 873.15 K，压力值为 1bar，催化剂直径选用 40 μm ，装载量为 0.32g。实验分析了氨分解器在不同催化剂质量/入口摩尔流量下的氨分解率，如图 2 中离散点所示。数值计算氨分解率如图 2 中点划线所示。对比结果显示平均相对误差小于 5%，表明数值计算与实验测量具有良好一致性。因此，本文数值模型可靠，可开展后续数值计算的研究。

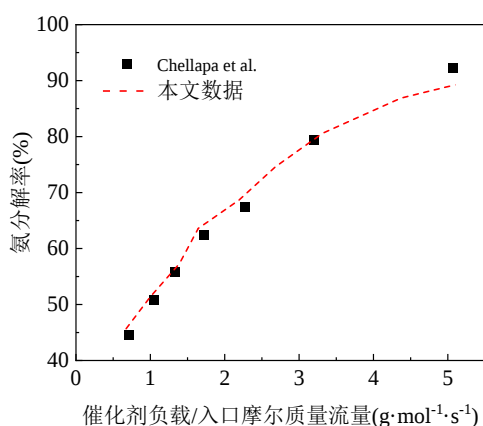


图2 模型验证

Fig.2 Model validation

3 结果与讨论

本文采用径向分层策略优化反应器结构，在保持电加热层总体积和总功率不变条件下，将圆柱状

反应器电加热层由单层结构优化为多层结构，多层结构分别为两层、三层和四层，如图 2 (a-d) 所示。根据加热层在反应器中的位置，反应器结构可分为外壁式结构与内嵌式结构，如图 2 (b-e) 所示。因此，反应器加热层的层间距，层数与层位置是影响热量传输和温度场分布的关键因素，本文均作为主要因素探究其对氨分解率的影响。

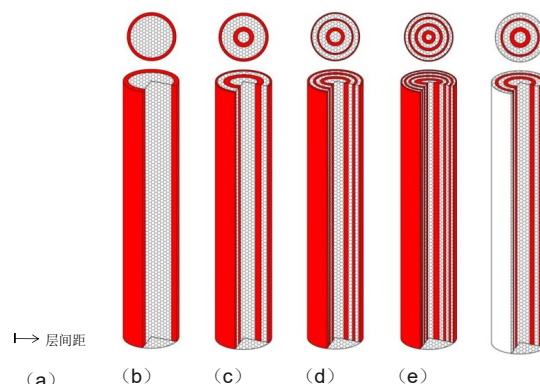


图3 不同结构反应器模型示意图: (a) 单层; (b) 双层外壁式; (c) 三层; (d) 四层; (e) 双层内嵌式

Fig.3 Schematic diagram of different structural reactor models: (a) Single-layer; (b) External wall type double-layer; (c) Three-layer; (d) Four-layer; (e) Embedded type double-layer

3.1 层间距对氨分解率的影响

图 4 为不同氨气入口流速下，反应器径向分层层间距对氨分解率的影响。图中层间距等于 0 为单层结构反应器，层间距大于 0 为多层结构反应器。结果表明，氨气入口流速越大，氨分解率越低。反应器径向分层策略可解决氨气入口流速升高导致分解率下降问题。增大层间距，可显著提升大流速下氨分解率，且氨气入口流速越大提升效果越显著。随着层间距增大，氨分解率整体呈增长趋势。径向分层层数越多，层间距对分解率促进作用越大。见图 4 (c)，四层结构反应器，层间距由 1 mm 增大到 5mm 时，氨分解率由 73% 增大至 95%，相比单层结构，最大增幅高达 81%。当氨气入口流速为 1 m/s 时，氨分解率由单层结构的 14% 大幅提升至 70% 以上。这是由于层间距增大，加热层分布更均匀，进而使得催化反应区温度场更均匀。然而，当层间距最大时，即加热分层处于轴心位置时，轴心层传热弱化，导致氨分解率显著降低。当为双层结构时，层间距对氨分解率的影响较小，且影响规律

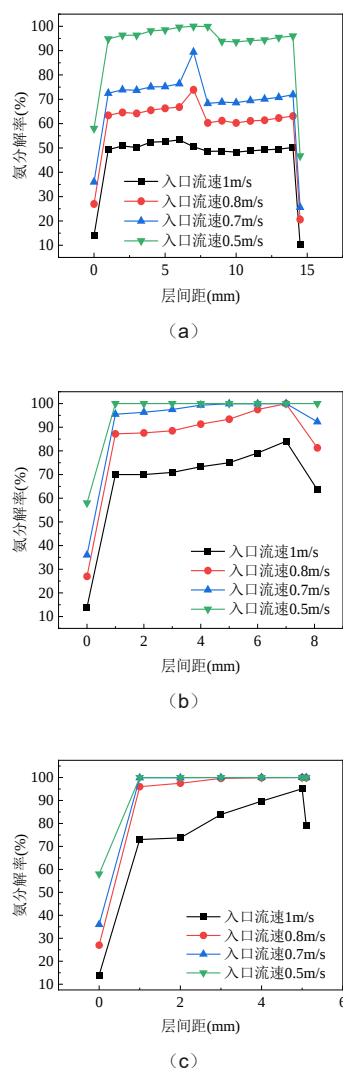


图4 不同氨气入口流速下,层间距对氨分解率的影响:
(a) 双层; (b) 三层; (c) 四层

Fig. 4 The influence of interlayer spacing on ammonia conversion under different ammonia inlet velocities:(a) Double-layer ;(b) Three-layer ;(c) Four-layer

呈对称性。最大氨分解率对应最优层间距为最大层间距的一半,即7mm,见图4(a)。

3.2 层数对氨分解率的影响

图5为不同氨气入口流速下,反应器径向分层层数对氨分解率的影响。径向分层层数越多,层间距可变范围越小。因此,图5中不同层数反应器的层间距变化范围不同。结果表明,分层结构对氨分解率的提升作用显著,氨气入口流速不变,径向分层层数越多,反应器氨分解率越高,且在较大层间距下,分层结构的提升作用更凸显。当氨气入口流

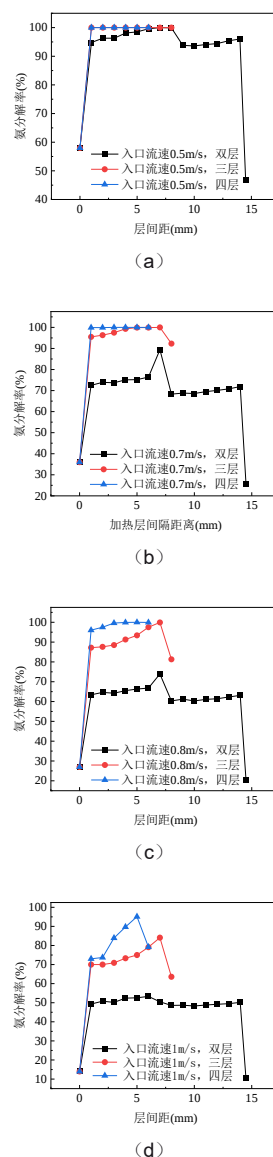


图5 不同氨气入口流速下,层数对氨分解率的影响:
(a-d) 氨气入口流速分别为0.5 m/s, 0.7 m/s, 0.8 m/s, 1 m/s

Fig.5 The influence of layer number on ammonia conversion under different ammonia inlet velocities: (a-d) the Inlet velocities of ammonia gas are 0.5m/s, 0.7m/s, 0.8m/s and 1m/s respectively

速为1m/s时,与单层结构的14%氨分解率相比,双层、三层与四层结构的最大氨分解率可分别提升至53%、84%与95%,见图5(d)。这是因为层数越多,热源分布越均匀,热量传输距离越短,使得热量可快速传递到催化反应区驱动氨分解。同时,层间距变大可提升热源均匀性,使得催化反应区温度场更均匀,进一步提高氨分解率。如前文所述,

当层间距最大时，加热分层存在处于轴心位置的情况，不利于热量传递，会降低氨分解率。

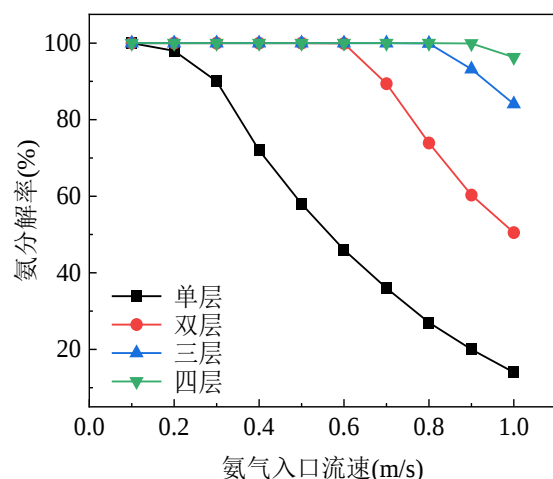


图6 最优层间距时，不同氨气入口流速下氨分解率随反应器层数的变化规律

Fig. 6 The variation of ammonia conversion with the number of reactor layers at the optimal layer spacing under different ammonia inlet velocities

由图5可以看出，在较小的氨气入口流速下，采用反应器径向分层策略极易实现氨气完全分解。随着氨气入口流速增大，不同层数下，径向分层策略提升程度依赖于层间距，氨分解率最高的层间距称为最优层间距。图6为最优层间距时，不同氨气入口流速下氨分解率随反应器层数的变化规律。可以看出，氨气入口流速较小时，即小于0.6 m/s时，分层结构反应器可实现氨气完全分解。随着氨气入口流速增大，开始发生氨不完全分解的情况，临界流速值随着反应器层数的增大而增大。再次证明，分层结构层数越多，热量传递效果越好，氨分解率越高。

3.3 层位置对氨分解率的影响

径向分层层数越少，层位置可变范围就越大。因此，为便于分析，本文选用两层结构反应器，固定层间距为最优值7 mm，改变加热层与反应器外壁间距，探究层位置对氨分解率的影响。根据加热层位置，外壁式反应器最外侧加热层位于外壁面，内嵌式反应器加热层均内嵌于反应器内部。图7为不同氨气入口流速下，反应器加热层的层位置对氨分解率的影响。可以得出，内嵌式反应器分解氨气能力明显高于外壁式反应器，加热层与反应器外壁

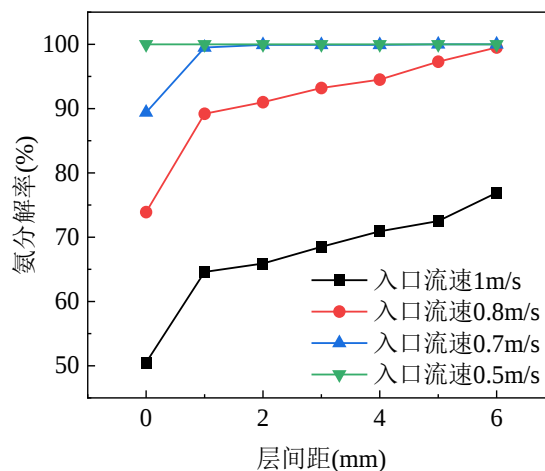


图7 不同氨气入口流速下，加热层位置对氨分解率的影响

Fig. 7 The influence of the position of the heating layer on the ammonia conversion under different ammonia inlet velocities

面距离越大，氨分解率越高。甚至在较小氨气入口流速下，内嵌式反应器可实现氨气完全分解。在较高的氨气入口流速下，内嵌式反应器对氨分解率提升幅度基本相同，最大提升幅度约为52%。内嵌式结构利于氨分解的原因为热量从加热层同步向外壁面与轴心侧传递，优化了热量传输路径，使得催化反应区温度分布更加均匀。加热层离轴心侧越近，热量向轴心侧传递越多，弥补了轴心区域传热面积较小的劣势，进一步提升温度场均匀性，进而提升氨分解率。

3.4 径向分层与轴向分段协同提升氨分解率

因氨气分解主要发生在反应器入口前端，加热功率沿轴向分段匹配可满足前端高热量需求，进而提升氨分解率。Liu 等人研究已证实该结论，并得出功率分段最优匹配比例为90:9:1^[21]。将结构径向分层策略与加热功率轴向分段优化手段协同，对氨分解率提升效果可见图8。结果表明，相比于径向分层策略，协同作用仅在较大氨气入口流速下有明显促进作用，反之，在较小氨气入口流速下，协同作用不具备强化优势，甚至降低氨分解率。随着反应器层数增多，协同作用促进分解的氨气入口流速临界值越大。

除氨气完全分解外，协同作用仅在较大氨气入口流速下有促进作用，其原因以双层结构为例进行阐释，见图9所示。图9为双层结构，氨气入口流

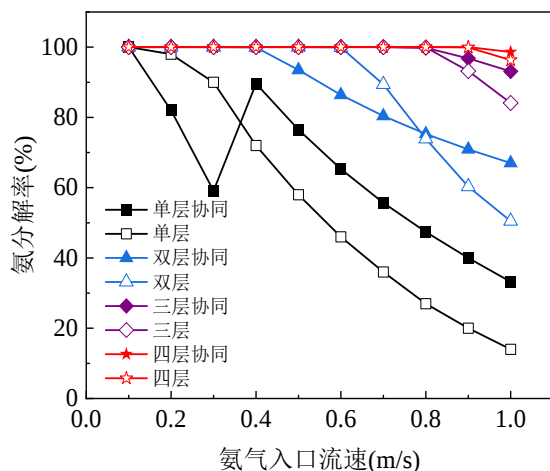


图8 多层反应器加热功率沿轴向变化对氨分解率的影响
Fig.8 The influence of the axial segmentation of the heating power in the multi-layer reactor on the ammonia conversion

速分别为0.5m/s与0.9m/s时,温度场分布图。传递到催化反应区的热量主要分两条路径,一部分热量供给氨分解,一部分热量使得反应区温度升高。如图9(c-d)所示,当氨气入口流速较大0.9m/s时,协同作用的大部分热量供给反应器入口前端,在满足大部分氨分解所需热量的同时,额外较多热量也使得前端温度迅速升高。反之,仅径向分层的热量供给沿轴向均匀分布,反应器入口前端热量主要用于氨分解,导致反应区较高温区延缓至出口段。因此,氨气入口流速较大时,协同作用下反应器前端较高的热量匹配使得氨分解率升高。当氨气入口流速较小0.5 m/s时,温度场分布与较高入口流速时相同,如图9(a-b)所示。然而,氨气入口流速较小时,催化反应区径向温度差大,甚至低温区域不满足氨分解条件,导致反应器入口段氨分解率低。协同作用时,入口段之外的热量匹配大大减小,导致出口段分解率也较低,见氨浓度分布图10所示。因此,协同作用下,较小氨气入口流速时,分解率较低。

4 结 论

针对圆柱状电加热制氢反应器,本文提出了一种径向分层优化策略,对氨分解率进行了研究。通过建立二维数值模型,分析了不同氨气入口流速下,径向分层的间距、层数及位置对氨分解率的影

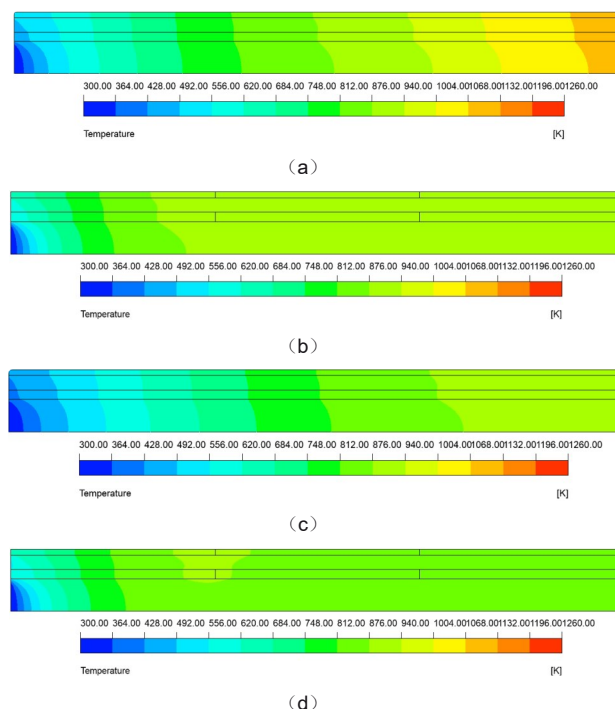


图9 双层结构反应器,不同氨气入口流速下的温度场分布: (a) 入口流速为0.5 m/s, 双层; (b) 入口流速为0.5 m/s, 双层协同; (c) 入口流速为0.9m/s, 双层; (d) 入口流速为0.9m/s, 双层协同

Fig.9 Temperature distribution under different ammonia inlet velocities of two-layer structure reactor : (a) Inlet velocity 0.5 m/s, only double-layer ; (b) Inlet velocity 0.5 m/s, double-layer synergy ; (c) Inlet velocity 0.9 m/s, only double-layer ; (d) Inlet velocity 0.9 m/s, double-layer synergy

响,还进一步探究了径向分层与加热功率轴向分段匹配的协同作用对氨分解率的影响。本文主要结论如下:

(1) 径向分层策略可显著提升氨分解率。径向分层层数越多,层间距越大,氨分解率越高。内嵌式反应器氨分解率明显高于外壁式,加热层位置距轴心侧越近,氨分解率越高。氨气入口流速越大,径向分层对氨分解率提升作用越显著。

(2) 径向分层与轴向分段协同对氨分解率提升具有一定强化作用。协同作用对氨分解率提升适用于较大的氨气入口流速。因氨气入口流速较小时,催化反应区径向温差大,协同作用甚至降低氨分解率。

(3) 氨分解率提升的根本原因为径向分层改善热量传递路径,使得催化反应区温度分布更均匀,氨分解用热匹配更精准。

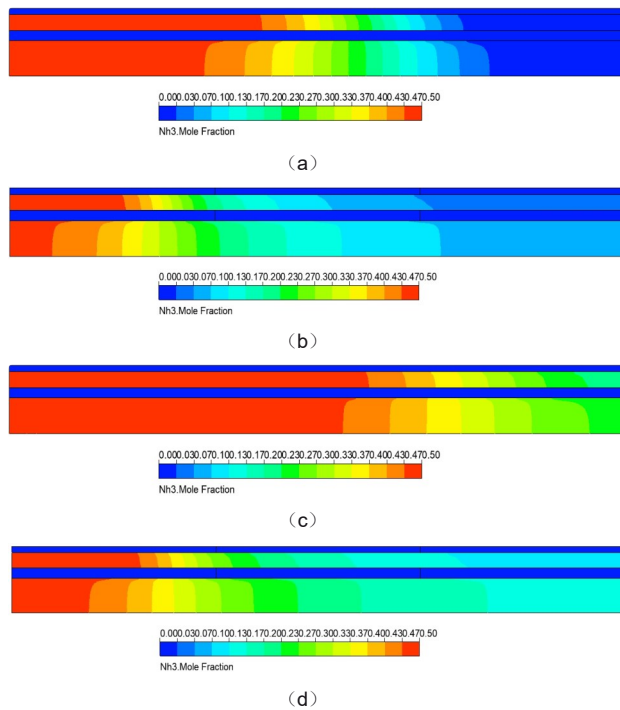


图 10 双层结构反应器, 不同氨气入口流速下的氨浓度分布: (a) 入口流速为 0.5 m/s, 双层; (b) 入口流速为 0.5 m/s, 双层协同; (c) 入口流速为 0.9 m/s, 双层; (d) 入口流速为 0.9 m/s, 双层协同

Fig.10 Ammonia concentration distribution under different ammonia inlet velocities of two-layer structure reactor : (a) Inlet velocity 0.5 m/s, only double-layer ; (b) Inlet velocity 0.5 m/s, double-layer synergy ; (c) Inlet velocity 0.9 m/s, only double-layer ; (d) Inlet velocity 0.9 m/s, double-layer synergy

参考文献

- [1] MATTHEWS H D, WYNES S. Current global efforts are insufficient to limit warming to 1.5 ° C[J]. *Science*, 2022, 376 (6600): 1404-1409.
- [2] 龙潇, 张晋宾, 陈令特. 未来能源技术展望[J]. *发电技术*, 2025, 46 (4): 651-693.
LONG X, ZHANG J B, CHEN L T. Prospects for future energy technologies[J]. *Power Generation Technology*, 2025, 46(4): 651-693.
- [3] ZHEN Z, LI B, OU X, et al. How hydrogen can decarbonize the chemical industry in China: A review based on the EIC-TER industrial assessment framework[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 60: 1345-1358.
- [4] DINCER I, ACAR C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(34): 11094-11111.
- [5] BERSTAD D, GARDARSDOTTIR S, ROUSSANALY S, et al. Liquid hydrogen as prospective energy carrier: A brief review and discussion of underlying assumptions applied in value chain analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111772.
- [6] TENG T, ZHANG X, DONG H, et al. Energy management strategies for fuel cell vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(39): 20293-20303.
- [7] PEI Q, CHEN P. A lightbulb moment for ammonia decomposition [J]. *Nature Chemical Engineering*, 2025, 2(10): 623-624.
- [8] LAMB K E, DOLAN M D, KENNEDY D F. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(7): 3580-3593.
- [9] MAKEPEACE J W, HE T, WEIDENTHALER C, et al. Ammonia-based hydrogen carriers for high-density hydrogen storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(15): 7746-7767.
- [10] ISHAQ H, CRAWFORD C. Review of ammonia production and utilization: Enabling clean energy transition and net-zero climate targets[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 300: 117869.
- [11] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. *发电技术*, 2023, 44(4): 484-491.
XU H H, SHAO G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(4): 484-491.
- [12] YIN S F, ZHANG Q H, XU B Q, et al. Investigation on catalysis of CO_x-free hydrogen from ammonia[J]. *Journal of Catalysis*, 2004, 224(2): 384-396.
- [13] TEMKIN M I, PYZHEV V. Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts[J]. *Acta Physicochimica URSS*, 1940, 12: 217-222.
- [14] JUANGSA F B, IRHAMNA A R, AZIZ M. Ammonia as hydrogen carrier: Thermochemical and electrochemical processes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(27): 14455-14477.
- [15] MIAO B, DENG Z H, HAN P J, et al. The modelling of a multi-tubular packed-bed reactor for ammonia cracking and SOFC waste heat utilization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 504: 159062.
- [16] MOSZCZYNSKA J, LIU X, WISNIEWSKI M. Green hydrogen production through ammonia decomposition using non-thermal plasma[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24 (18): 14397.
- [17] GHANDEHARIUN S, NATERER G F, DINCER I, et al. Solar thermochemical plant analysis for hydrogen production with the copper-chlorine cycle[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35: 8511-8520.
- [18] LIN Q F, JIANG Y M, LIU C Z, et al. Instantaneous hydrogen production from ammonia by non-thermal arc plasma combining with catalyst[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 4064-4070.
- [19] ZHANG X H, CHA M S. Optimizing ammonia cracking in microwave argon plasma[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 154289.

- [20] 闫全英, 穆白, 潘利生, 等. 回收工业余热用于供暖的相变换热装置储能材料的研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(1): 148-151, 157.
- YAN Q Y, MU B, PAN L S, et al. Study on energy storage materials for a phase-change heat exchange device recovering industrial waste heat for heating[J]. New Chemical Materials, 2025, 53(1): 148-151, 157.
- [21] LIU B, XU L, XU Y, et al. Optimizing ammonia decomposition for hydrogen production via segmented electric heating[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 103: 480-490.
- [22] CHERIF A, ZAREI M, LEE J S, et al. Modeling and multi-objective optimization of electrified ammonia decomposition: Improvement of performance and thermal behavior[J]. Fuel, 2024, 358: 130243.
- [23] CHEN C Q, WU K, REN H J, et al. Ru-based catalysts for ammonia decomposition: A mini-review[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(15): 11693-11706.
- [24] HUA Z P, CHEN L, CHEN C, et al. Fe/ZSM-5 catalysts for ammonia decomposition to CO_x-free hydrogen: Effect of SiO₂/Al₂O₃ ratio[J]. Molecular Catalysis, 2018, 455: 14-22.
- [25] 胡利华, 陈境烨, 童金明, 等. Fe/Co/Ni基催化剂制备及氨分解制氢性能[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(8): 1-10.
- HU L H, CHEN J Y, TONG J M, et al. Preparation of Fe/Co/Ni-based catalysts and their performance for hydrogen production by ammonia decomposition[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(8): 1-10.
- [26] WU Z W, LI X, QIN Y H, et al. Ammonia decomposition over SiO₂-supported Ni-Co bimetallic catalyst for CO_x-free hydrogen generation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(30): 15263-15269.
- [27] DONGIL A B. Recent progress on transition metal nitrides nanoparticles as heterogeneous catalysts[J]. Nanomaterials, 2019, 9(8): 1111.
- [28] KIM H B, PARK E D. Ammonia decomposition over Ru catalysts supported on alumina with different crystalline phases[J]. Catalysis Today, 2023, 411-412: 113608.
- [29] GU Y, MA Y, LONG Z, et al. One-pot synthesis of supported Ni@Al₂O₃ catalysts with uniform small-sized Ni for hydrogen generation via ammonia decomposition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(5): 4045-4054.
- [30] OKURA K, OKANISHI T, MUROYAMA H, et al. Rare-earth promoted Ni/Al₂O₃ catalysts for ammonia decomposition[J]. Applied Catalysis A: General, 2015, 505: 77-85.
- [31] LENDZION-BIELUN Z, NARKIEWICZ U, ARABCZYK W. Cobalt-based catalysts for ammonia decomposition[J]. Materials, 2013, 6(6): 2400-2419.
- [32] LI N, ZHANG C, LI D, et al. Review of reactor systems for hydrogen production via ammonia decomposition[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495: 153125.
- [33] 卢星辰, 陈蕊, 詹志刚, 等. 微通道型氨裂解制氢反应器的模拟分析[J]. 电池, 2024, 54(5): 622-627.
- LU X C, CHEN R, ZHAN Z G, et al. Simulation analysis of a microchannel ammonia cracking reactor for hydrogen production [J]. Battery Bimonthly, 2024, 54(5): 622-627.
- [34] MAGNONE E, HAN S W, ZHUANG X L, et al. Hydrogen recovery using hollow fiber membranes in the ammonia cracking process [J]. Journal of Membrane Science, 2025, 729: 124158.
- [35] CHELLAPPA A S, FISCHER C M, THOMSON W J. Ammonia decomposition kinetics over Ni-Pt/Al₂O₃ for PEM fuel cell applications[J]. Applied Catalysis A: General, 2002, 227(1/2): 231-240.