

储热储冷多场景应用专刊



开式吸附蓄热多参数“反应波”特征研究

高士超¹, 王树刚¹, 胡沛裕², 王继红¹

(¹大连理工大学建设工程学院, 辽宁 大连 116024; ²中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

摘 要: 吸附蓄热是实现太阳能高效热利用最有前景的方式之一。然而, 现有的反应器层面传热传质理论关注于反应器内单一物理过程的演变, 无法揭示多物理参数间非线性耦合机理。本工作以沸石-水蒸气为吸附工质对, 建立吸附蓄热反应器的数值模型, 分析反应器内多物理场的演变过程, 提出多参数吸附“反应波”模型。研究结果表明: 吸附过程中, 反应器内存在多参数“反应波”现象。反应器内吸附剂的吸附速率、轴向温度梯度与轴向浓度梯度均呈现出波特性, 三种“反应波”分别对应于吸附反应过程、传热过程与传质过程。分析“反应波”在反应器内的移动过程, 阐明反应器热输出特性。当反应器内吸附剂的堆积高度大于反应波波长时, 反应器才具有稳定输出温度。基于无量纲波形分析明确多参数吸附“反应波”波形间的定量联系。

关键词: 吸附; 蓄热; 反应波; 多物理场

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1105

中图分类号: TK 02; TK 519

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-962-09

Characterization of multi-parameter reaction-wave in open-adsorption thermal-energy storage

GAO Shichao¹, WANG Shugang¹, HU Peiyu², WANG Jihong¹

(¹School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

²School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The adsorption thermal energy storage (ATES) is one of the most promising approaches to realize the efficient thermal utilization of solar energy. However, the existing reactor-level heat and mass transfer theories focused on the evolution of individual reactor physical processes fail to elucidate the mechanism behind nonlinear dependencies between multiple physical parameters. In this study, a numerical model of an ATES reactor using zeolite-water vapor as the adsorption working pair was established. The evolution of multi-physics fields within the reactor was analyzed. The multi-parameter adsorption reaction-wave model was proposed. The results indicate that a multi-parameter reaction-wave arose within the reactor during the adsorption process. The adsorption rate of adsorbent, axial temperature gradient and axial concentration gradient within the reactor all exhibited wave characteristics, corresponding respectively to the adsorption reaction, the heat transfer and the mass transfer.

收稿日期: 2025-12-10; 修改稿日期: 2025-12-24。

基金项目: 国家自然科学基金 (52378090, 51678102)。

第一作者: 高士超 (1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为多孔介质反应器内传热传质分析, E-mail: gaoshichao666@163.com; 通信作者: 王继红, 副教授, 研究方向为高载能储冷/热材料流动传热机理, E-mail: wangjihong@dlut.edu.cn。

引用本文: 高士超, 王树刚, 胡沛裕, 等. 开式吸附蓄热多参数“反应波”特征研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 962-970.

Citation: GAO Shichao, WANG Shugang, HU Peiyu, et al. Characterization of multi-parameter reaction-wave in open-adsorption thermal-energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 962-970.

The movement of reaction-wave across the reactor was analyzed to elucidate the reactor thermal output characteristics. When the packed height of adsorbent in the reactor exceeded the wavelength of the reaction wave, the reactor operated at a stable output temperature. Correlations between multi-parameter adsorption reaction waveforms were quantified using the dimensionless waveform analysis.

Keywords: adsorption; thermal energy storage; reaction wave; multiple-physical field

国际能源署数据显示, 2024年以热能形式消耗的能源约占全球能耗总量的50%^[1]。由于热能主要源于化石能源燃烧, 因此充分利用太阳能等清洁能源替代化石能源能够有效降低热能应用领域能耗。然而, 太阳能热利用过程中存在稳定性弱、供需关系失衡等弊端^[2-3], 导致太阳能热利用效率普遍较低。蓄热技术有望实现太阳能的高效热利用。

依据蓄热原理, 蓄热技术包含显热蓄热、潜热蓄热以及热化学蓄热^[4]。与显热蓄热、潜热蓄热相比, 热化学蓄热具有储能密度高、理论上无热损失等优势, 是一种理想的蓄热技术^[5]。热化学蓄热中的吸附蓄热具有再生温度低等优势^[6], 适合于低温热能储存, 因此吸附蓄热在建筑供暖、余热回收等领域备受关注。由于开式吸附蓄热系统具有结构简单和运行、维护成本低等优点, 本工作以开式吸附蓄热系统为研究对象。

吸附蓄热反应器为吸附蓄热系统的核心设备, 其内部传热传质过程直接决定反应器输出特性。现有研究采用蜂窝状流动通道^[7]、金属网填充^[8]等方式提高反应器内部孔隙率以增加反应器渗透性。尽管上述方案能够改善反应器输出性能, 但仅能实现反应器个别性能参数的局部最优解。产生该问题的根源在于缺少反应器层面的传热传质理论。

为了阐述反应器层面传热传质机理, Michel等^[9]建立了吸附反应峰模型, 即假设反应器内所有的吸附反应均发生在一个准二维平面(吸附反应峰)内。随着吸附过程的进行, 吸附反应峰逐渐向反应器出口移动。虽然吸附反应峰模型能够确定反应器内吸附反应的发生区域及其移动过程, 但该模型仅适用于吸附速率较快的纯热化学材料^[10-11]。在此基础上, Wyttenbach等^[12]对吸附反应峰模型进行拓展, 建立吸附反应区模型。该模型认为无论反应器内所填充的吸附剂是否为纯热化学材料, 吸附蓄热反应器内部的吸附反应均发生在具有一定长度的区域内。然而, 吸附反应区模型假设反应区内的温

度、浓度等物理参数均是相同的。为了进一步分析吸附反应区内部各参数状态的演变, Zhang等^[13]通过红外热成像实验测试发现反应区内反应器的体积放热功率(温度梯度或吸附速率)呈现出波现象, 首次提出了吸附“反应波”模型以阐明反应器稳定温度输出机制。

然而, 现有的吸附“反应波”研究关注于反应器内传热过程(温度梯度)或吸附反应过程(吸附速率)的独立分析, 缺少反应器内多物理参数间非线性耦合机理的解析。本工作采用沸石-水蒸气为吸附工质对, 建立吸附蓄热反应器数值模型, 分析反应器内多物理场的演变过程, 提出吸附蓄热多参数“反应波”模型, 构建多参数“反应波”间的关联。

1 吸附蓄热反应器内多参数“反应波”现象

1.1 “反应波”现象分析

图1展示了吸附过程中反应器内的吸附“反应波”现象。吸附过程中, 从反应器入口到反应器出口可划分为三个区域: 完全反应区、反应发生区以及未反应区^[13-14]。在完全反应区, 区域内的吸附剂均已达到吸附平衡状态, 无法继续吸附入口空气中的水蒸气。因此, 该区域内吸附剂的吸附速率为0 mol/(kg·s), 空气温度、水蒸气浓度均与入口空气状态参数相等。在反应发生区, 入口空气所携带的水蒸气被吸附剂迅速吸附, 并释放大量吸附热以加热入口空气, 且所有的吸附反应均发生在该区域。因此, 空气温度沿流动方向迅速升高, 并最终维持稳定。随着反应器内吸附过程的持续进行, 入口空气中的水蒸气逐渐被吸附, 该区域内水蒸气浓度逐渐降低到0 mol/m³。在未反应区, 由于该区域内空气中水蒸气浓度已接近0 mol/m³, 导致吸附剂无法继续吸附, 吸附剂仍处于完全干燥状态。此外, 由于该区域内的吸附剂已被前期来自反应发生区的热空气加热, 因此该区域内空气温度等于反应

发生区末端空气温度。

由于完全反应区以及未反应区内吸附剂的吸附状态、空气温度、水蒸气浓度等参数均保持不变,因此,在上述两个区域内反应器的吸附速率、轴向温度梯度、浓度梯度均为0。在反应发生区内,吸附速率、空气的温度、水蒸气浓度急剧变化。该区域内吸附剂的吸附速率、轴向温度梯度以及轴向浓度梯度均呈现出波的形状。本工作将吸附速率、轴向温度梯度以及轴向浓度梯度分别定义为吸附速率波、温度波与浓度波。图1(c)~(e)分别总结了吸附速率波、温度波与浓度波现象。

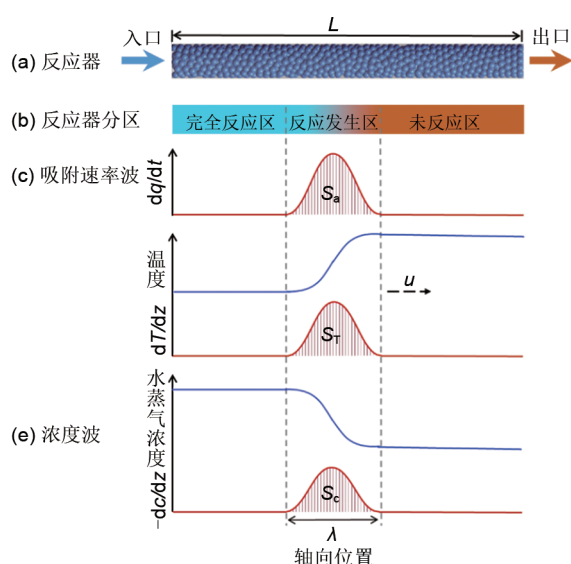


图1 吸附蓄热反应器内“反应波”现象
Fig. 1 The “reaction wave” phenomena in the ATEs reactor

依据线性驱动力方程,吸附剂的吸附速率由动力学系数、吸附剂平衡吸附量与瞬态吸附量间的差值共同决定。在波峰侧,空气中的水蒸气浓度较低且温度较高,导致吸附剂的平衡吸附量较低^[15]且动力学系数偏小。因此,波峰侧吸附剂的吸附速率较小。在波尾侧,吸附剂已经历长时间的吸附过程,其自身的吸附量已接近运行条件下吸附剂的平衡吸附量,导致波尾侧吸附剂的吸附速率也较小。因此,吸附剂的吸附速率呈现出波的形状。

吸附速率波代表了吸附反应过程,其为反应器内出现“反应波”现象的根源。同时,吸附过程与传热传质过程密不可分,导致分别代表传热过程和传质过程的温度梯度和浓度梯度必然也呈现出波的特性,即温度波、浓度波为吸附反应过程在传热、

传质过程中的表现。本工作将吸附速率波、温度波和浓度波统称为吸附“反应波”。吸附过程中,三种吸附“反应波”分别以相同的波形(包括波长 λ 、波峰A与波面积S)和恒定的波速(u)向反应器出口移动。

1.2 “反应波”与反应器热输出特性间的联系

由于三种吸附“反应波”在反应器内的移动过程相似,且吸附速率波为反应器内出现吸附“反应波”现象的根源。因此,本工作以吸附速率波为例来论述吸附“反应波”在反应器内的移动过程,并与反应器的热输出特性相关联。

根据反应器内吸附剂的堆积高度是否大于吸附“反应波”的波长,可将反应器划分为两种类型:稳定输出反应器以及非稳定输出反应器^[13]。图2总结了吸附速率波在上述两种类型反应器内的移动过程,并从吸附“反应波”角度阐述反应器出口温度的演变。当反应器内吸附剂的堆积高度大于吸附速率波的波长时,反应器具有稳定输出,如图2(a)所示。对于稳定输出反应器,在0 s至 $(0.5\lambda/u)$ s吸附时间段内,吸附速率波逐渐进入反应器。在此阶段内,尽管反应器内反应发生区的长度小于吸附速率波的波长,但入口空气中所携带的水蒸气被反应器内的吸附剂完全吸附,导致吸附速率波的波面积等于完整吸附速率波波形的面积 $S^{[16]}$ 。由于该时间段内反应发生区的长度短(即吸附速率波的波长较短)且吸附速率波的波面积相等,导致吸附速率波的峰值明显高于完整吸附速率波波形的峰值。随着吸附过程的持续进行,反应器内逐渐出现完整的吸附速率波波形。由于反应器内吸附剂显热的影响,在该时间段内反应器出口温度逐渐升高,最终稳定在最大值,即稳定输出温度($T_{0,s}$)。在 $(0.5\lambda/u)$ s到 $(L-0.5\lambda)/u$ s吸附时间段内,吸附速率波以完整的波形逐渐向反应器出口移动。在该时间段内,反应器的放热功率维持恒定,即入口空气从反应器中获得恒定的吸附热,反应器的出口温度保持在 $T_{0,s}$ 。在 $(L-0.5\lambda/u)$ s到 $(L+0.5\lambda)/u$ s吸附时间段内,吸附速率波逐渐移出反应器,反应器的放热功率逐渐降低,导致反应器出口温度逐渐降低。当吸附速率波完全移出反应器时,吸附过程结束。

当反应器内吸附剂的堆积高度小于吸附速率波的波长时,反应器无稳定输出,如图2(b)所示。在非稳定输出反应器内,吸附速率波在反应器内的移

动过程与稳定输出反应器内的移动过程整体相似。在 0 s 至 $(L-0.5\lambda/u)\text{ s}$ 吸附时间段内, 吸附速率波逐渐进入反应器, 该时间段内吸附速率波的波面积等于完整波形的波面积 S 。在 $(L-0.5\lambda/u)\text{ s}$ 时刻, 吸附速率波的波峰移动到反应器出口, 反应器输出温度达到峰值, 但该温度仍低于 $T_{0,s}$ 。在 $(L-0.5\lambda/u)\text{ s}$ 至 $(0.5\lambda/u)\text{ s}$ 时间段内, 吸附速率波的波峰侧逐渐移

出反应器, 波尾侧逐渐移入反应器, 在该时间段内, 反应器内吸附速率波的波面积逐渐降低, 反应器放热功率降低, 导致反应器输出温度下降。在 $(0.5\lambda/u)\text{ s}$ 到 $(L+0.5\lambda)/u\text{ s}$ 吸附时间段内, 吸附速率波逐渐移出反应器, 反应器的放热功率进一步降低, 导致反应器的出口温度持续降低, 并接近入口空气温度。

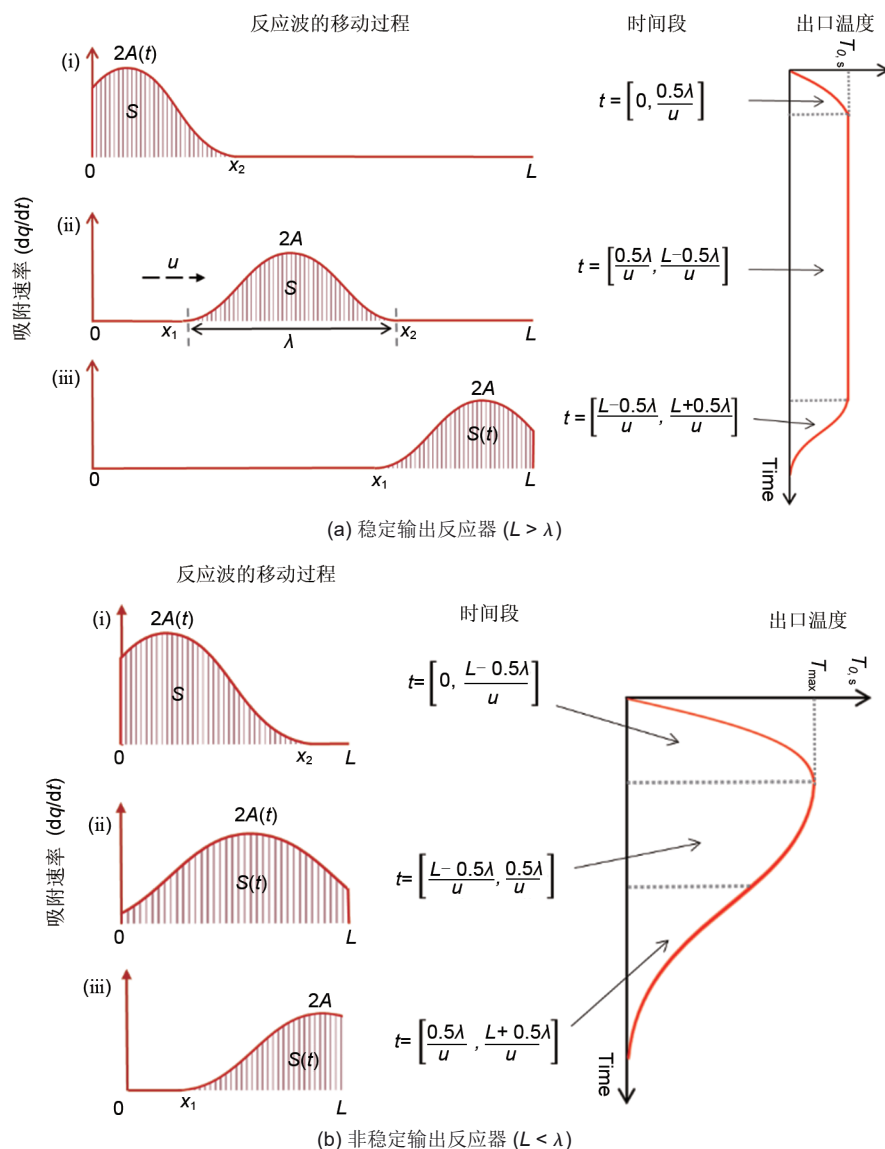


图2 不同类型吸附蓄热反应器内“反应波”移动过程

Fig. 2 “Reaction wave” movement process in different types of ATEs reactors

2 数值模型

2.1 控制方程

为了验证反应器内多参数“反应波”现象, 本工作建立了包含流体流动过程、传热过程、传质过

程以及吸附过程的数值模型。该吸附蓄热数值模型的建立进行了以下假设: ①由于反应器内所堆积的吸附剂种类相同, 因此反应器内吸附剂的密度、比热容等物性参数相等且保持不变; ②反应器的孔隙率与径向位置无关; ③反应器壁面的热损失被忽

略; ④吸附空气被看作理想气体; ⑤吸附剂与吸附质间的温差被忽略, 即反应器内部处于局部热平衡状态^[17]。基于上述假设, 吸附蓄热反应器数值模型可被简化为一维数值模型。

(1) 质量守恒方程

基于空气密度的质量守恒方程可通过公式(1)表示:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + v \frac{\partial \rho_a}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ_a 为空气密度, 单位为 kg/m^3 ; v 为表观流速, 单位为 m/s 。

基于空气中水蒸气浓度的质量守恒方程可通过公式(2)表示:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial z} - D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \rho_p \frac{dq}{dt} = 0 \quad (2)$$

式中, c 为空气中的水蒸气浓度, 单位为 mol/m^3 ; D_z 为水蒸气的轴向扩散系数, 单位为 m^2/s ; ρ_p 为吸附剂的颗粒密度, 单位为 kg/m^3 ; q 为吸附剂的吸附量, 单位为 mol/kg ; ε_b 为反应器的孔隙率。

(2) 动量守恒方程

反应器内空气的动量守恒方程可通过 Ergun 公式计算^[18], 如公式(3)所示:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -150 \frac{(1 - \varepsilon_b)^2}{(\varepsilon_b)^3} \frac{\eta_a}{d_p^2} v - 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_b)}{(\varepsilon_b)^3} \frac{\rho_a}{d_p} v^2 \quad (3)$$

式中, P 为压力, 单位为 Pa ; η_a 为空气的动力黏度, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(3) 能量守恒方程

反应器内的热量平衡方程可通过公式(4)表示:

$$\overline{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon_b \rho_a C_{p,a} v \frac{\partial T}{\partial z} - \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - (1 - \varepsilon_b) \rho_p \frac{dq}{dt} \Delta H = 0 \quad (4)$$

式中, T 为温度, 单位为 K ; $C_{p,a}$ 为空气的比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; λ_z 为吸附剂的轴向导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ΔH 为吸附剂的吸附焓值, 单位为 J/mol ; $\overline{\rho C_p}$ 为综合体积比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

(4) 吸附动力学模型

采用线性驱动力模型计算吸附剂吸附速率的表达式如公式(5)所示^[19]:

$$\frac{dq}{dt} = k_{\text{LDF}} (q_{\text{eq}} - q) \quad (5)$$

式中, q_{eq} 为吸附剂的平衡吸附量, 单位为 mol/kg , 吸附剂平衡吸附量的详细计算过程被展示在吸附平衡模型中; k_{LDF} 为动力学系数, 单位为 s^{-1} , 其可通过公式(6)计算^[20]:

$$k_{\text{LDF}} = 15 \frac{\delta_{\text{eff}}}{(0.5d_p)^2} \quad (6)$$

式中, δ_{eff} 为有效扩散系数, 单位为 m^2/s 。

(5) 吸附平衡模型

Langmuir-Freundlich 模型是最常用的吸附平衡模型之一, 其表达式如公式(7)所示^[21]:

$$q_{\text{eq}} = \frac{q_{\text{max}} (bP_v)^{1/n}}{1 + (bP_v)^{1/n}} \quad (7)$$

式中, q_{max} 为吸附剂的最大吸附量, 单位为 mol/kg ; b 和 n 均为温度相关的参数。

2.2 模型验证

为了验证所建立的数值模型准确性, 将数值模拟结果与文献[22]内圆柱形沸石反应器的实验测试数据进行对比。验证实验所采用的反应器具体尺寸以及测点分布等如图3所示。在反应器的进出口位置布置 Pt100 铂热电阻、湿度传感器以监测吸附过程中反应器进出口空气的温度、水蒸气浓度变化。为了降低反应器壁面的热损失, 在反应器外壁面粘贴厚度为 10 mm 的保温棉进行绝热处理。数值模型计算过程中所需的沸石以及湿空气的物性参数被总结在表1中。

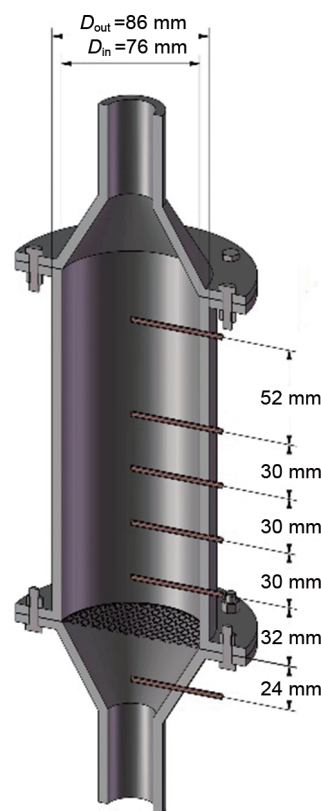


图3 验证实验反应器示意图

Fig. 3 The schematic diagram of reactor in validation experiment

表 1 沸石 13X 与湿空气的物性参数

Table 1 Physical parameters of zeolite 13X and moist air

参数	取值	单位	参考文献
L	170	mm	—
r	38	mm	—
d_p	2.05	mm	—
$C_{p,p}$	880	J/(kg·K)	[20]
ρ_p	1152	kg/m ³	[23]
ϵ_b	0.375	—	—
λ_z	0.4	W/(m·K)	[23]
d_z	300	nm	[20]
$q_{\max}$	19	mol/kg	[23]

图 4 展示了数值模拟的验证结果。结果显示，数值模拟的趋势与实验测试的趋势完全一致，且数值模拟的最大误差为 9.1%。因此，所建立的吸附蓄热反应器数值模型可支撑后续研究与分析。数值模拟结果与实验测试结果间的差异主要由以下三方面因素共同引起：①实验测试过程中不可避免地会存在壁面热损失，但数值模拟忽略了反应器的壁面热损。②数值模型中未考虑反应器壁材料热惰性的影响。③数值模型中假设反应器内的径向孔隙率相等，但实际吸附过程中存在壁面效应。

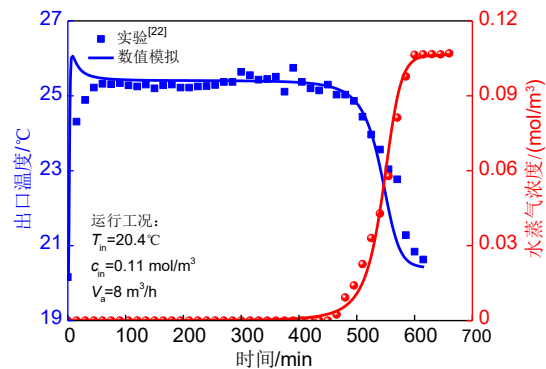


图 4 数值模型验证

Fig. 4 Validation of numerical model

3 结果与分析

为了分析吸附蓄热反应器内多参数“反应波”现象，本工作设定了 4 组数值模拟工况，每组工况的具体运行参数见表 2。

3.1 反应器内多物理场与“反应波”分布

由于不同工况下反应器内传热-传质-吸附过程相似，因此本节以 Case 4 工况下的运行结果为例

表 2 数值模拟运行工况

Table 2 The operation condition of numerical model

序号	空气温度/℃	水蒸气浓度/(mol/m ³)	空气流量/(m ³ /h)
Case 1	19.8	0.52	5.1
Case 2	37.8	0.55	5.0
Case 3	20.4	0.11	5.0
Case 4	19.1	0.56	2.9

分析吸附过程中反应器内吸附剂的吸附速率、温度场以及浓度场的演变。

图 5 展示了不同时刻下反应器内吸附剂的吸附速率。吸附过程中，沸石的吸附速率从 0 mol/(kg·s) 逐渐增加到 6.56×10^{-3} mol/(kg·s)，之后开始逐渐降低。此外，不同时刻下吸附速率曲线的形状几乎相同，反应器内吸附剂的吸附速率以恒定的波形向反应器出口移动(吸附速率波)。吸附速率波的波长和波速分别为 57.7 mm 和 7.84×10^{-3} mm/s。

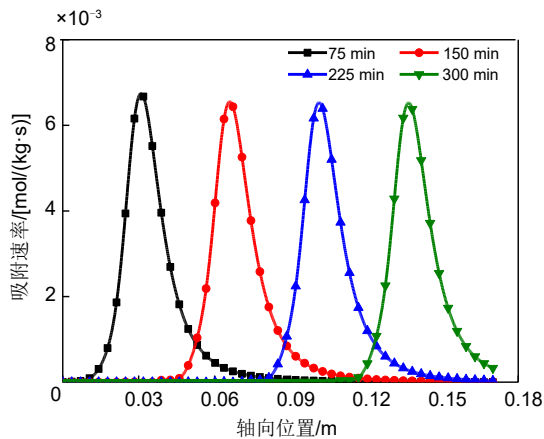


图 5 反应器内吸附剂的吸附速率

Fig. 5 Adsorption rate of adsorbent in the reactor

图 6(a) 展示了不同时刻下反应器内的温度分布。以吸附时长为 150 min 时反应器内的温度分布为例，分析反应器内空气温度的演变。由于距反应器入口 47.6 mm 以内的沸石均已完成吸附过程，达到了吸附平衡状态。因此，该区域内的空气温度等于入口空气温度，维持在 19.1℃。距反应器入口 47.6~111.5 mm 之间的沸石处于吸附平衡与完全再生的中间状态，即其可持续吸附入口空气中所携带的水蒸气，释放大 量 热 能，导 致 空 气 温 度 迅 速 升 高。由于该区域内将入口空气中的水蒸气几乎完全吸附，导致距反应器入口 111.5 mm 以上区域内的沸石无法继续吸附，因此该区域内的沸石仍处于完

全再生状态。该区域内的沸石被上游的热空气加热至 43.4°C ，并维持稳定。

为了分析反应器内的传热过程，本工作计算反应器内轴向温度梯度(即 dT/dz)，如图6(b)所示。吸附过程中，轴向温度梯度以波的形式向反应器出口移动，且不同时刻的波形近似一致，即其移动过程呈现出明显的波特性(温度波)。温度波的波长和波速分别为 63.9 mm 和 $7.85\times 10^{-3}\text{ mm/s}$ 。

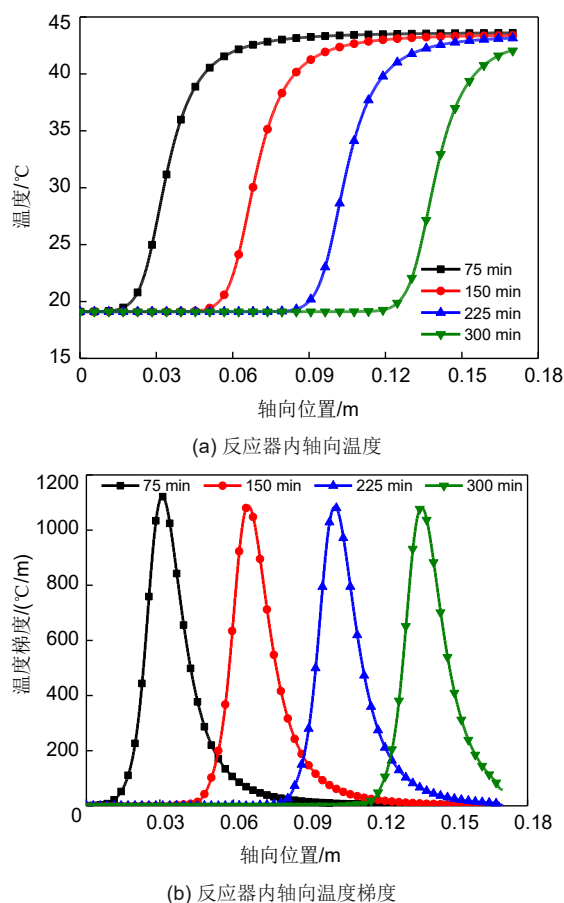


图6 反应器内传热过程分析

Fig. 6 Heat transfer process analysis in the reactor

图7(a)展示了不同时刻下反应器内的水蒸气浓度分布。结果显示，反应器内的水蒸气浓度沿轴向逐渐从入口浓度降低到 0 mol/m^3 。当吸附时长为 150 min 时，距反应器入口 47.8 mm 以内区域的沸石均已达到吸附平衡状态，无法继续吸附入口空气中的水蒸气，因此该区域内水蒸气浓度等于入口空气中的水蒸气浓度。在距反应器入口 $47.8\sim 105.5\text{ mm}$ 区域内，沸石逐渐吸附入口空气中的所有水蒸气，使得反应器出口空气中的水蒸气浓度接近 0 mol/m^3 。

在距反应器入口 105.8 mm 以上区域的沸石由于所处位置空气中的水蒸气浓度过低，无法触发吸附过程。因此，该区域内的沸石仍处于完全再生状态。

为了研究反应器内的传质过程，本工作获取反应器内轴向水蒸气浓度梯度。由于吸附过程中水蒸气的浓度逐渐降低，导致反应器内的轴向浓度梯度为负数。为了将浓度梯度与温度梯度在图形上保持一致，图7(b)内绘制了反应器内负的浓度梯度，即 $-dc/dz$ 。与轴向温度梯度相似，反应器内负的浓度梯度在反应器内的移动过程也呈现出明显的波特性(浓度波)。浓度波的波长和波速分别为 57.7 mm 和 $7.85\times 10^{-3}\text{ mm/s}$ 。

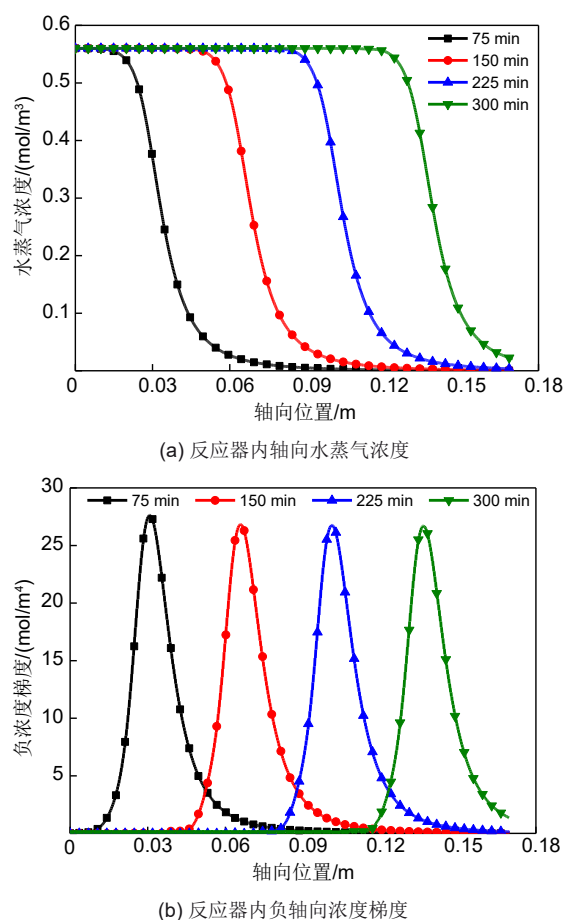


图7 反应器内传质过程分析

Fig. 7 Mass transfer process analysis in the reactor

3.2 多参数“反应波”间的关联规律

图8对比了Case 3运行条件下某一时刻三种量纲为1吸附“反应波”波形。结果显示，吸附速率波、温度波和浓度波的波形完全相同。其中，吸附速率波与浓度波完全同步。尽管传热、传质过程

同时发生,但由于反应器内沸石间轴向热传导的影响,导致温度波的波形领先于吸附速率波和浓度波。此外,吸附剂的吸附速率与反应器内的传热、传质过程密切相关。吸附剂的吸附速率以波的特性向反应器出口传递,必将导致传热、传质过程以相似的表征在反应器内传递。因此,温度波和浓度波是传热、传质过程的必然结果。

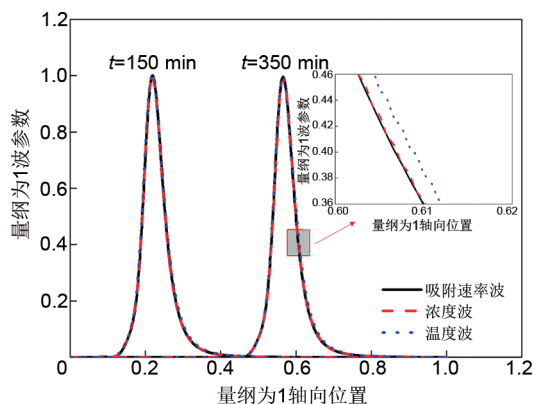


图8 三种类型量纲为1吸附“反应波”的对比

Fig. 8 Comparison of three types of dimensionless adsorption “reaction waves”

表3中总结了不同运行工况下三种吸附“反应波”的波参数。结果显示,浓度波的波长与吸附速率波的波长相等,然而由于轴向导热的影响,温度波的波长稍微大于浓度波(或吸附速率波)的波长。所有运行工况下,三种吸附“反应波”波速间的最大偏差仅为0.2%,因此,可认为温度波、浓度波和吸附速率波的波速相等。当吸附空气温度、水蒸气浓度与空气流量分别为19.8℃、0.52 mol/m³与5.1 m³/h时,三种吸附“反应波”的波速均为1.32×10⁻² mm/s,温度波和吸附速率波的波长分别为83.7 mm和77.8 mm。

表3 不同运行工况下吸附“反应波”波参数

Table 3 Wave parameters of the adsorption “reaction waves” under different operation conditions

工况	波长/mm			波速/(mm/s)		
	吸附速率波	温度波	浓度波	吸附速率波	温度波	浓度波
Case 1	77.8	83.7	77.8	1.32×10 ⁻²	1.32×10 ⁻²	1.32×10 ⁻²
Case 2	107.1	115.1	107.2	1.56×10 ⁻³	1.56×10 ⁻³	1.56×10 ⁻³
Case 3	35	36.1	35	3.27×10 ⁻³	3.27×10 ⁻³	3.27×10 ⁻³
Case 4	57.9	63.9	57.7	7.85×10 ⁻³	7.85×10 ⁻³	7.84×10 ⁻³

4 结论

本工作采用沸石-水蒸气为吸附工质对,建立吸附蓄热反应器数值模型,分析反应器内多物理场的演变过程,得到的主要结论如下:

(1) 吸附蓄热反应器内存在多参数吸附“反应波”现象。吸附速率、轴向温度梯度以及浓度梯度均呈现出波的特性,即吸附速率波、温度波和浓度波。吸附速率波、温度波和浓度波分别揭示了反应器内吸附反应过程、传热过程和传质过程。

(2) 吸附“反应波”波参数能够反映反应器的输出性能。依据反应器内吸附剂堆积高度(L)与吸附“反应波”波长(λ)之间的关系,可将反应器划分为两种类型。当 $L > \lambda$ 时,反应器具有稳定输出;否则,反应器无稳定输出。

(3) 吸附速率波、温度波和浓度波的波形、波参数间均存在定量联系。三种吸附“反应波”的波速相等,但温度波的波长稍微大于吸附速率波(或浓度波)的波长。在Case 1运行条件下(即吸附空气温度、水蒸气浓度与空气流量分别为19.8℃、0.52 mol/m³与5.1 m³/h时),三种吸附“反应波”的波速均为1.32×10⁻² mm/s,温度波和吸附速率波的波长分别为83.7 mm和77.8 mm。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Renewables 2025[R]. Paris: IEA, 2025.
- [2] ALI H M, REHMAN T U, ARICI M, et al. Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 100: 101109. DOI: 10.1016/j.peccs.2023.101109.
- [3] AGHEMO L, LAVAGNA L, CHIAVAZZO E, et al. Comparison of key performance indicators of sorbent materials for thermal energy storage with an economic focus[J]. Energy Storage Materials, 2023, 55: 130-153. DOI:10.1016/j.ensm.2022.11.042.
- [4] WANG L M, JI M X, LUO Y M, et al. Research progress on solid adsorption materials for low-temperature thermal storage in buildings[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 138: 118571. DOI: 10.1016/j.est.2025.118571.
- [5] GUR I, SAWYER K, PRASHER R. Searching for a better thermal battery[J]. Science, 2012, 335(6075): 1454-1455. DOI: 10.1126/science.1218761.
- [6] LIU X, YANG F M, LIU X, et al. A systematic evaluation of sorption-based thermochemical energy storage for building applications: Material development, reactor design, and system integration[J]. Renewable Energy, 2025, 245: 122831. DOI:

- 10.1016/j.renene.2025.122831.
- [7] HAN X J, ZENG C, LIU S L, et al. Numerical study on the heat and mass transfer in charging and discharging processes of a triangular honeycomb thermochemical energy storage reactor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119499. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119499.
- [8] JI W J, ZHANG H, LIU S L, et al. A metal mesh net-packed method for improving thermochemical energy storage reactor performance by increasing the void fraction[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120248. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120248.
- [9] MICHEL B, MAZET N, MAURAN S, et al. Thermochemical process for seasonal storage of solar energy: Characterization and modeling of a high density reactive bed[J]. *Energy*, 2012, 47 (1): 553-563. DOI: 10.1016/j.energy.2012.09.029.
- [10] MICHEL B, MAZET N, NEVEU P. Experimental investigation of an open thermochemical process operating with a hydrate salt for thermal storage of solar energy: Local reactive bed evolution[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 234-244. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.108.
- [11] MICHEL B, NEVEU P, MAZET N. Comparison of closed and open thermochemical processes, for long-term thermal energy storage applications[J]. *Energy*, 2014, 72: 702-716. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.097.
- [12] WYTTEBACH J, BOUGARD J, DESCY G, et al. Performances and modelling of a circular moving bed thermochemical reactor for seasonal storage[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 803-815. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.008.
- [13] ZHANG Y N, DONG H H, WANG R Z, et al. Air humidity assisted sorption thermal battery governed by reaction wave model[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 27: 9-16. DOI: 10.1016/j.ensm.2020.01.012.
- [14] 胡沛裕. 沸石蓄热反应器内多尺度吸附特性及其过程放大研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- HU P Y. Multi-scale sorption characteristics in zeolite bed reactor for thermal energy storage and corresponding scale-up study[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [15] ZHANG Y N, WANG R Z, LI T X. Experimental investigation on an open sorption thermal storage system for space heating[J]. *Energy*, 2017, 141: 2421-2433. DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.003.
- [16] LIN Y C, FAN Y B, CHEN S, et al. Wave analysis method for air humidity assisted sorption thermal battery: A new perspective[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116638. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116638.
- [17] GAEINI M, WIND R, DONKERS P A J, et al. Development of a validated 2D model for flow, moisture and heat transport in a packed bed reactor using MRI experiment and a lab-scale reactor setup[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 1116-1129. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.034.
- [18] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. *Chemical Engineering Progress*, 1952, 48(2): 89-94.
- [19] GLUECKAUF E, COATES J I. 241. Theory of chromatography. Part IV. The influence of incomplete equilibrium on the front boundary of chromatograms and on the effectiveness of separation[J]. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 1947: 1315-1321. DOI: 10.1039/jr9470001315.
- [20] METTE B, KERSKES H, DRÜCK H, et al. Experimental and numerical investigations on the water vapor adsorption isotherms and kinetics of binderless zeolite 13X[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 71: 555-561. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.061.
- [21] SIPS R. On the structure of a catalyst surface[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1948, 16(5): 490-495. DOI: 10.1063/1.1746922.
- [22] GAO S C, WANG S G, HU P Y, et al. The reaction wave analysis in an open adsorption thermal energy storage reactor[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 139: 118886. DOI: 10.1016/j.est.2025.118886.
- [23] GAEINI M, ZONDAG H A, RINDT C C M. Effect of kinetics on the thermal performance of a sorption heat storage reactor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 520-531. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.055.