

## Multi-scale simulation of flow characteristics in selective catalytic reduction honeycomb catalyst

Laiyong WANG<sup>1</sup>, Fuping QIAN<sup>1\*</sup>, Jingjing ZHU<sup>1</sup>, Naijin HUANG<sup>2</sup>, Bing XU<sup>2</sup>, Hao WU<sup>2</sup>

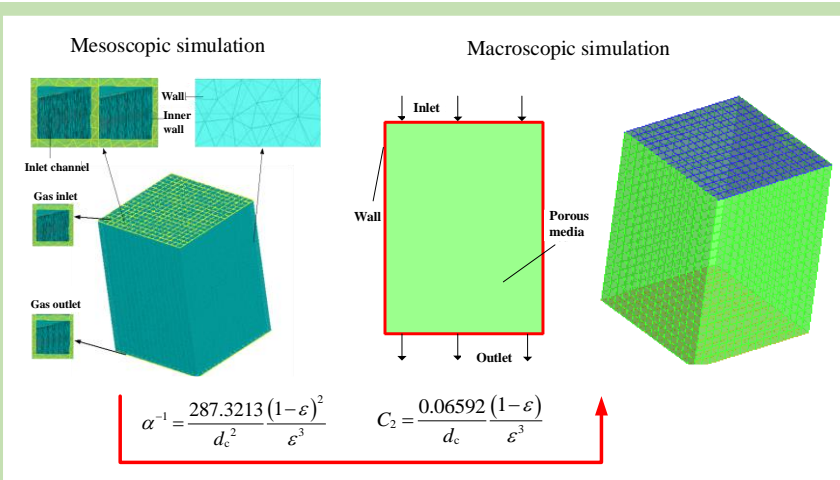
1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

2. Anhui Weida Environment Protection Science & Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 230041, China

**Abstract:** With the development of computational fluid dynamics (CFD) technology, a lot of scholars have applied CFD method and its related software to study the flow characteristics in the selective catalytic reduction (SCR) denitration reactor. However, when using CFD software for numerical calculation, the relevant parameters of the catalyst such as porosity, viscous drag coefficient and the like are usually empirically

obtained. Whereas there is no doubt that this method will increase the calculation error. Therefore, in order to improve the denitration efficiency and service life of the catalyst in the SCR denitration reactor, multi-scale numerical study on the flow characteristics of SCR denitration reactor was conducted in this work from both mesoscopic and macroscopic perspectives. At the mesoscopic level, the relationship between the resistance with different catalyst layer thickness and the inlet velocity was studied, and the formula of the resistance was calculated. At the macroscopic level, based on the above relationship, the viscous drag coefficient and the inertia drag coefficient which are required for the macrostructure numerical simulation of the catalyst were calculated. The flow characteristics in the reactor were numerically studied, the numerical results were compared with the experimental data, and the maximum error was 8.6%, which indicated that the multi-scale numerical simulation method proposed was reliable. In addition, the above relationship was also used to the denitration reactor with different structures of catalysts (such as honeycomb and oblique plate), and the calculation results were compared with the data in the literature. The results showed that the trends were consistent and the maximum error was 12.9%, which further demonstrated that the formula obtained in this work had popularization and application value. The research results of this work had certain theoretical and practical value for the structural optimization of SCR denitration reactor.

**Key words:** selective catalytic reduction catalyst; flow characteristic; multi-scale simulation



收稿: 2019-04-02, 修回: 2019-05-24, 网络发表: 2019-06-27, Received: 2019-04-02, Revised: 2019-05-24, Published online: 2019-06-27

作者简介: 王来勇(1994-), 男, 安徽省六安市人, 硕士研究生, 工业通风与空气净化专业, E-mail: 1594255177@qq.com; 钱付平, 通讯联系人, E-mail: fpingqian@163.com.

**引用格式:** 王来勇, 钱付平, 朱景晶, 等. 选择性催化还原蜂窝状催化剂内流动特性的多尺度模拟. 过程工程学报, 2020, 20(2): 133-140.

Wang L Y, Qian F P, Zhu J J, et al. Multi-scale simulation of flow characteristics in selective catalytic reduction honeycomb catalyst (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(2): 133-140, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219172.

# 选择性催化还原蜂窝状催化剂内流动特性的多尺度模拟

王来勇<sup>1</sup>, 钱付平<sup>1\*</sup>, 朱景晶<sup>1</sup>, 黄乃金<sup>2</sup>, 徐兵<sup>2</sup>, 吴昊<sup>2</sup>

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002

2. 安徽威达环保科技股份有限公司, 安徽 合肥 230041

**摘要:** 为提高选择性催化还原(SCR)脱硝反应器内催化剂的脱硝效率和使用寿命, 从细观和宏观两个角度对 SCR 脱硝反应器的流动特性多尺度数值进行研究。在细观层面研究了不同高度的催化剂层产生的阻力随进口速度的变化, 并计算得到阻力关系式。宏观层面, 基于阻力关系式, 计算出催化剂宏观结构数值模拟所需的粘性阻力系数和惯性阻力系数, 对反应器内的流动特性进行数值模拟, 并将其结果与实验数据对比, 最大误差为 8.6%。将关系式应用于具有不同结构(蜂窝状和斜板状)催化剂的脱硝反应器中, 计算结果与文献值趋势基本一致, 最大误差为 12.9%。

**关键词:** 选择性催化还原催化剂; 流动特性; 多尺度模拟

中图分类号: TK09

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)02-0133-08

## 1 前言

在越来越严峻的环保形势下, 焦炉烟气的排放面临着更多的刚性约束。选择性催化还原(SCR)烟气脱硝系统因脱硝效率高、氨逃逸量小、操作简便、安全, 成为我国主要的烟气脱硝工艺技术。目前, SCR 烟气脱硝系统已广泛应用于焦化行业, 对焦炉烟气脱硝反应催化剂内流动特性的影响不容忽视。许多学者研究了催化剂及类似催化剂结构的多孔材料、多孔介质内的流动特性。在催化剂模拟方面, 刘涛<sup>[1]</sup>建立了 4 种不同结构的催化剂物理模型, 通过比较几种催化剂的阻力, 得到较优催化剂结构; Lei 等<sup>[2]</sup>建立了 5 种不同开口形状的催化剂三维模型, 通过对比阻力得出蜂窝状催化剂为较优结构。在多孔材料模拟方面, Ergun<sup>[3]</sup>得出了流体流经颗粒填充床(催化剂)的阻力计算公式; 张新铭等<sup>[4]</sup>基于 Ergun 方程推导出泡沫材料孔径与填充颗粒直径的关系, 提出了适用于泡沫型多孔材料的流动阻力方程; 吴国忠等<sup>[5]</sup>基于阻力系数测量装置测量了玻璃填充通道内的流动阻力特性, 并拟合了速度-压降关系式。在多孔介质模拟方面, Albusairi 等<sup>[6]</sup>通过 Darcy 关系式推导出多孔介质中单向流速与阻力的关系; Ergun 等<sup>[7]</sup>提出雷诺数较高时多孔介质中单向流的阻力可表示为速度的一次项和二次项之和; 逯彦红等<sup>[8]</sup>建立了多孔介质模型, 得出动量方程及多孔介质通道的速度分布; 陈凯等<sup>[9]</sup>基于金属泡沫内部结构建立了多孔介质模型, 对比计算与实验结果验证了渗透率表达式的有效性; 刘学强等<sup>[10]</sup>研究了雷诺数较高时, 水在多孔介质内的流动特性, 对其进行

数值模拟, 给出了相关半经验公式; 陈军强等<sup>[11]</sup>模拟了多孔介质的渗流模型, 得到多孔介质中孔隙率对流场分布的影响; 邢志祥等<sup>[12]</sup>分析了不同孔隙率多孔材料的流动特性, 得出适当增大孔隙率可减小多孔介质的阻力; Dukhan 等<sup>[13]</sup>整理了大量多孔介质阻力的实验数据, 得出相同多孔介质在不同流动状态下具有不同的渗透率; Wang 等<sup>[14]</sup>研究了界面张力(IFT)对多孔介质流动特性的影响, 得出随 IFT 增加, 流体流经多孔介质的阻力减小; Kundu 等<sup>[15]</sup>研究了不可压缩单相流体在不同类型多孔介质中的渗流, 得到了流体流经多孔介质的阻力与速度的函数关系; 李琪等<sup>[16]</sup>研究了流体流经多孔介质层的稳定性, 得出渗透率小时临界雷诺数变化较明显, 通道内流体稳定性更好。Mariola 等<sup>[17]</sup>建立了流体通过多孔介质的阻力输送模型, 用于预测流体流经多孔介质时的流动阻力; 李振鹏<sup>[18]</sup>在多孔介质通道内对流体示踪观察, 得出在湍流区流体存在滞留、回流和弥散等现象。周德文等<sup>[19]</sup>对阻力数据拟合, 得出多孔介质流动阻力的半经验公式。Fand 等<sup>[20]</sup>通过多孔介质流动实验, 提出了一种表征多孔介质层流和湍流间过渡区特征的简单方法。

目前国内外学者大多数只单独分析细观催化剂及类似催化剂结构的多孔材料或多孔介质内的流动特性, 并未给出细观实物与宏观结构间的关系。一般情况下, 催化剂细观数值模拟时, 由于网格数多而导致计算精度低, 且计算时间长。宏观状态时利用计算流体力学(CFD)软件对脱硝催化剂仿真模拟过程中, 催化剂简化成多孔介质的相关参数通常从文献中获得, 计算误差较大。本工作基于 CFD 方法对 SCR 催化剂的细观模型进行数值

模拟, 通过催化剂的相关参数将所得阻力(用压降表示)进行数据拟合, 得出催化剂的阻力关系式, 并通过该关系式的性质参数对宏观多孔介质催化剂模型的阻力数值进行模拟, 建立各尺度间的关系。研究结果对焦炉烟气 SCR 催化剂的结构优化具有重要的理论和实际意义。

## 2 SCR 蜂窝状催化剂细观尺度模拟

### 2.1 SCR 蜂窝状催化剂细观模型

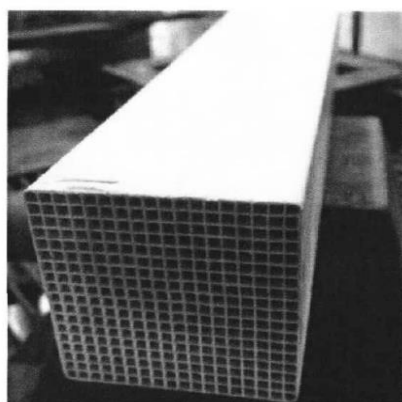
SCR 催化剂的参数见表 1。基于 SCR 蜂窝状催化剂的实际结构[图 1(a)], 重建 SCR 蜂窝状催化剂的三维细观模型, 如图 1(b)所示。

SCR 蜂窝状催化剂包括进气口、出气口、孔道及内壁面, 含氮氧化物和氨气的气体从催化剂进口进入, 在

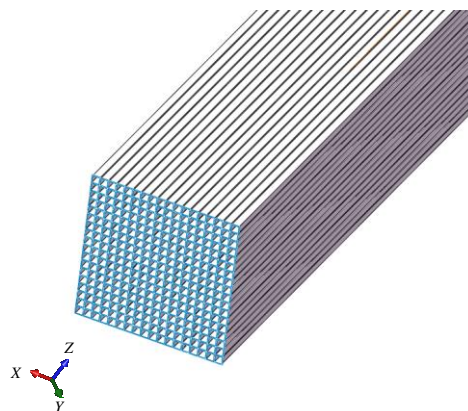
表 1 催化剂相关参数

Table 1 Related parameters of catalyst	
Parameter	Value
Number of hole	18×18
Section size/mm	150×150
Wall thickness/mm	1
Hole size/mm	7.2
Specific surface area/(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	445
Catalyst height, H/mm	200~800

其中经过催化还原反应后生成无污染气体, 从出口流出。使用 ICEM (The Integrated Computer Engineering and Manufacturing Code) 前处理软件划分模型网格, 采用非结构化四面体网格。经网格无关性检验, 采用网格数约为 433 万, 所用网格模型如图 2 所示。



(a) Actual structure of the catalyst



(b) Mesoscopic geometric model

图 1 SCR 蜂窝状催化剂的实际结构及细观几何模型

Fig.1 Actual structure and mesoscopic geometric model of SCR honeycomb catalyst

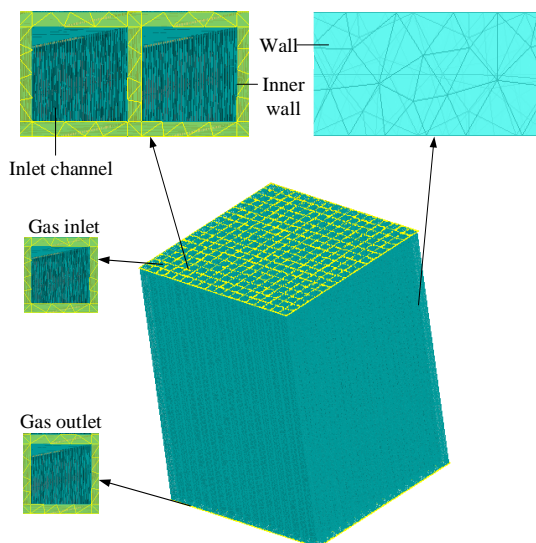


图 2 SCR 蜂窝状催化剂网格划分及边界条件

Fig.2 Grid division and boundary conditions of SCR honeycomb catalyst

细观尺度模拟时, 在催化剂孔隙率相同时, 以进口流速和催化剂层高度为自变量设置 20 种工况, 如表 2 所示。

### 2.2 数值计算模型及边界条件

假定流体为不可压缩流体, 流动过程中恒温、无热量交换。采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[20]</sup>计算催化剂内部的气相流场, 需满足质量守恒和动量守恒条件:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

式中,  $u_i, u_j$  为速度(m/s),  $x_i, x_j$  为位移(m),  $\rho$  是流体的密度(kg/m<sup>3</sup>),  $p$  为流体压强(Pa),  $\nu$  为运动粘度(m<sup>2</sup>/s),  $i$  和  $j$  为张量指标, 其取值范围为(1, 2, 3),  $t$  为时间(s),  $\overline{u_i u_j}$  为湍流应力(Pa)。

表2 数值计算工况

Table 2 Numerical calculation conditions		
Working condition	Imported wind/(m/s)	Catalyst height, $H$ /mm
1	1	200
2	1	400
3	1	600
4	1	800
5	2	200
6	2	400
7	2	600
8	2	800
9	3	200
10	3	400
11	3	600
12	3	800
13	4	200
14	4	400
15	4	600
16	4	800
17	5	200
18	5	400
19	5	600
20	5	800

图3为模拟的边界条件,即气流进入计算域的进口边界设为速度入口,气流离开计算域的出口边界设为压力出口,出口相对压强 $p=0$ 。壁面按标准壁面函数处理,壁面条件为无滑移边界。

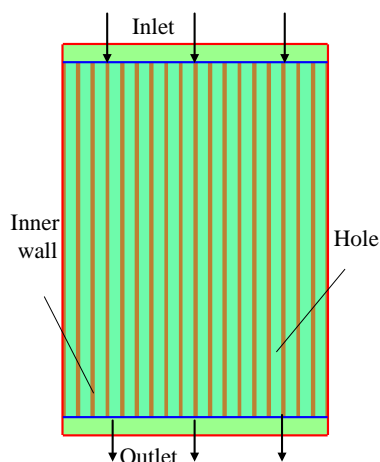


图3 SCR蜂窝状催化剂边界条件

Fig.3 Boundary conditions of SCR honeycomb catalyst

### 2.3 模型的验证

为验证模型的可靠性,建立与文献[2]尺寸相同的模型进行数值模拟。实验采用直径为10 mm的圆形石英管,内部放置催化剂,催化剂具有方形孔道。将模拟结果与实验结果对比,结果如图4所示。图中流量对应的流速范围为3.8~7.6 m/s,模拟值与实验值趋势相同,最大误差为9.8%,表明所用模型可靠。

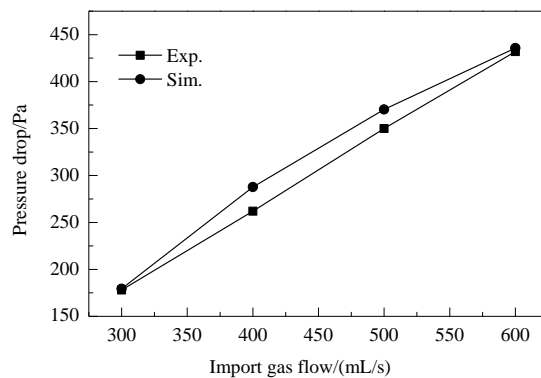


图4 阻力实验结果与模拟结果对比

Fig.4 Comparison of experimental resistance and simulation results

### 2.4 细观尺度模拟结果分析

#### 2.4.1 流速对阻力的影响

图5为不同高度催化剂在不同流速下细观尺度模拟阻力值。由图可见,随进口流速和催化剂高度增大,催化剂阻力增大。且按等距改变催化剂高度时,相同流速对应的阻力变化基本相同。当催化剂高度不同时,阻力随进口流速的变化趋势一致。

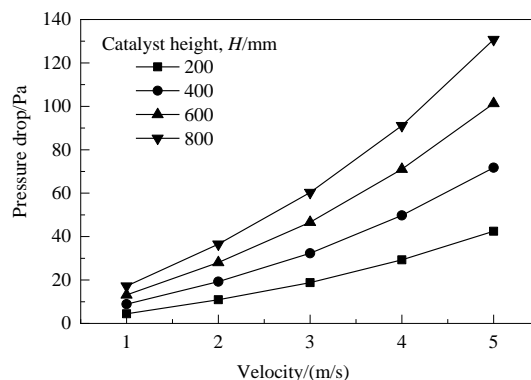


图5 不同高度催化剂的流速-阻力曲线

Fig.5 Velocity-resistance curves of catalysts with different heights

#### 2.4.2 催化剂阻力计算关系式

Ergun 方程<sup>[7]</sup>考虑了黏性和孔隙形状的影响,认为多孔材料中单向流的阻力为速度的一次与二次项之和:

$$\frac{\Delta p}{H} = A \frac{(1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^2} \mu u + B \frac{(1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3} \rho u^2 \quad (3)$$

式中, $\varepsilon$ 为多孔材料的孔隙率( $\varepsilon=1-V_s/V$ ), $V$ 为多孔材料的总体积( $\text{m}^3$ ), $V_s$ 为材料固体总体积( $\text{m}^3$ ), $d$ 为多孔材料的颗粒直径( $\text{m}$ ), $\mu$ 为干燥空气的动力粘度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), $u$ 为多孔材料进口气体流速( $\text{m/s}$ ), $H$ 为多孔材料的高度( $\text{m}$ ),系数 $A$ , $B$ 由实验确定(Ergun 等<sup>[7]</sup>给出  $A=150$ ,

$B=1.75$ )。

将催化剂阻力模拟结果(催化剂结构开口数  $18 \times 18$ , 高度 800 mm)与 Ergun 方程<sup>[7]</sup>计算结果对比, 结果如图 6 所示。由图可知, 二者进口流速相同时, 催化剂细观模拟结果与 Ergun 方程<sup>[7]</sup>计算结果趋势一致, 随进口流速增大, 二者变化趋势一致, 但差值越来越大。原因是 Ergun 方程只考虑黏性和孔隙形状的影响, 没有考虑流

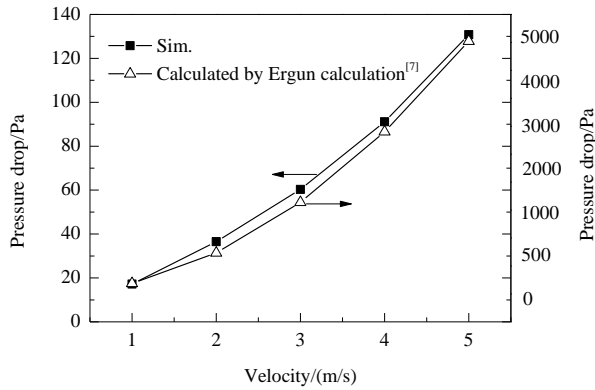


图 6 阻力模拟值与 Ergun 计算值<sup>[7]</sup>对比  
Fig.6 Comparison of simulation value and Ergun calculation value<sup>[7]</sup> of resistance

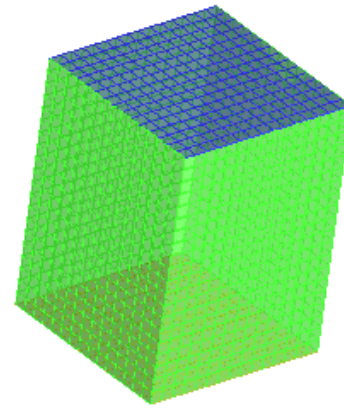
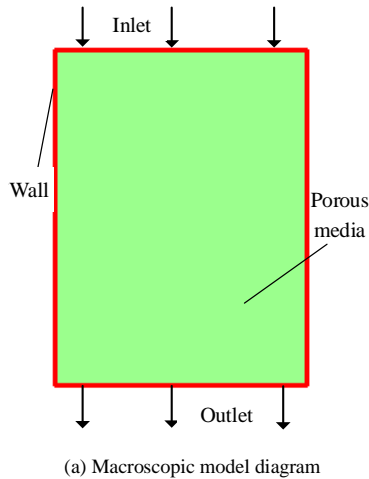


图 7 催化剂宏观模型示意图及网格划分  
Fig.7 Macroscopic model diagram and grid division of catalyst

### 3.2 数值计算模型及边界条件

模拟宏观状态下脱硝反应器时, 催化剂内部一般采用多孔介质模型。在动量守恒方程中添加动量源项, 从而引入流动中的阻力:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i\right) \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为多孔介质的渗透率( $\text{m}^2$ ),  $C_2$  为惯性阻力系数( $\text{m}^{-1}$ )。

速对惯性阻力修正系数的影响<sup>[19]</sup>, 所以流速增大时, 该方程计算值与本模拟结果差值逐渐增大。

表 3 为催化剂细观尺度阻力模拟值, 对其进行多项式拟合, 得  $u < 6 \text{ m/s}$  时 SCR 蜂窝状催化剂阻力计算式:

$$\frac{\Delta p}{L} = 287.32130 \frac{(1-\varepsilon)^2}{d_c^2 \varepsilon^2} \mu u + 0.03296 \frac{(1-\varepsilon)}{d_c \varepsilon^3} \rho u^2 \quad (4)$$

表 3 催化剂细观尺度阻力模拟值  
Table 3 Mesoscopic simulation values of resistance for the catalyst

Catalyst height, H/mm	Gas inlet velocity/(m/s)				
	1	2	3	4	5
200	4.412	10.905	18.785	29.266	42.482
400	8.874	19.269	32.334	49.783	71.771
600	13.109	28.053	46.580	71.031	101.308
800	17.232	36.537	60.299	91.098	130.811

## 3 SCR 蜂窝状催化剂宏观尺度模拟

### 3.1 SCR 蜂窝状催化剂宏观模型

SCR 蜂窝状催化剂的宏观模型包括进气口、出气口、壁面和多孔介质区域, 如图 7(a)所示。采用结构化六面体划分网格, 如图 7(b)所示。

分析式(4)和(5)可得出多孔介质各方向粘性阻力系数  $\alpha^{-1}(\text{m}^{-2})$  和惯性阻力系数  $C_2$  的表达式:

$$\alpha^{-1} = \frac{287.3213 (1-\varepsilon)^2}{d_c^2 \varepsilon^2} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{0.06592 (1-\varepsilon)}{d_c \varepsilon^3} \quad (7)$$

式中,  $d_c$  为催化剂小孔当量直径(m)。

边界条件: 气流进入计算域的进口边界设为速度入



口, 气流离开计算域的出口边界设为压力出口(出口相对压强  $p=0$ ), 壁面按标准壁面函数处理, 为无滑移边界条件。

### 3.3 数值模拟结果分析对比

为验证模拟的准确性, 实验测得进口流速  $u$  分别为 3.6, 4.0, 4.4 和 4.8 m/s 四种工况下催化剂的阻力值。将相同进口流速下催化剂细观模型的模拟结果及宏观多孔介质模型的模拟结果分别与实验结果对比, 见图 8。由图可知, 基于催化剂细观模拟建立的宏观多孔介质模型的计算结果与实验结果一致, 即随进口流速增大, 阻力值增大。且宏观和细观条件下催化剂阻力的模拟值与实验值的最大误差为 8.6% ( $u=3.6$  m/s 时), 证明了本研究的可靠性。

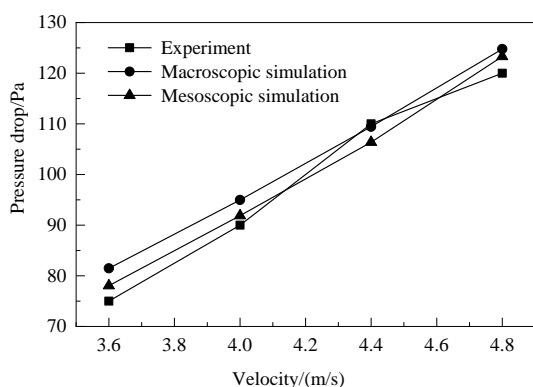


图8 不同流速下催化剂阻力模拟值与实验值的对比  
Fig.8 Comparison of simulated and experimental values of catalyst resistance at different velocities

### 3.4 宏观尺度流动特性分析

为更好地了解多孔介质的流动特性, 建立如图 9 所

示的多孔介质模型, 其中包括烟气进口段、多孔介质区域和烟气出口段<sup>[18]</sup>。给定多孔介质高度  $H=200$  mm, 通过改变入口的烟气流速分析多孔介质的流动特性。

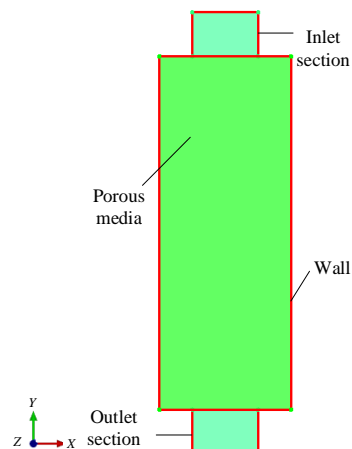


图9 多孔介质模型示意图  
Fig.9 Schematic diagram of porous media model

#### 3.4.1 速度特性分析

图 10 为多孔介质高度  $H=200$  mm、多孔介质进口段流速  $u$  分别为 1, 2 和 3 m/s 时多孔介质纵截面处的速度分布云图。由图可知, 宏观条件下, 多孔介质区域的轴向和径向速度分布均匀, 而入口和出口处速度分布不均匀, 有一定的速度梯度。

#### 3.4.2 阻力特性分析

图 11 为多孔介质高度  $H=200$  mm、多孔介质进口段流速  $u$  分别为 1, 2 和 3 m/s 时多孔介质纵截面处的压力分布云图。由图可知, 进口流速增大, 多孔介质区域中的压力在径向上均匀分布, 即不存在压力梯度; 而在轴向上有明显的压力梯度, 呈逐步递减趋势。

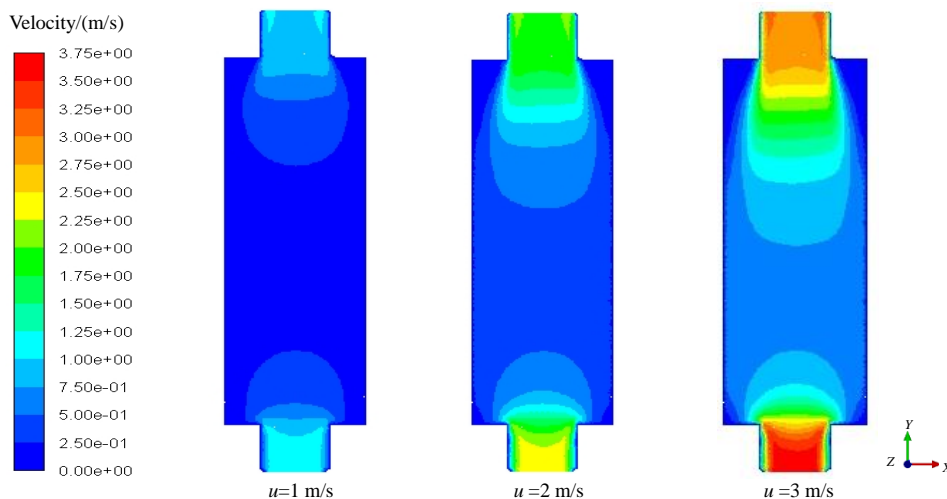


图10 多孔介质纵截面处速度分布云图  
Fig.10 Velocity distribution cloud maps at longitudinal section of porous media

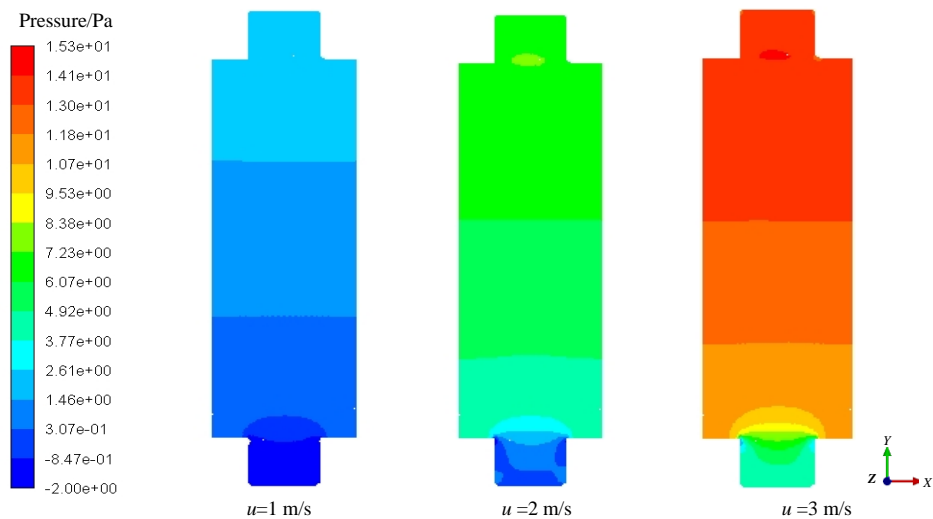


图 11 多孔介质纵截面处压力分布云图

Fig.11 Pressure distribution cloud maps at longitudinal section of porous media

4 催化剂阻力计算公式的应用

为验证本研究的催化剂阻力计算公式应用于不同结构催化剂的可行性，基于蜂窝状(FW)和斜板状(XB)

两种类型催化剂的细观三维模型<sup>[1]</sup>，建立了对应的宏观多孔介质模型。两种类型催化剂端面几何形状和示意图如图 12 所示，所用催化剂规格见表 4。

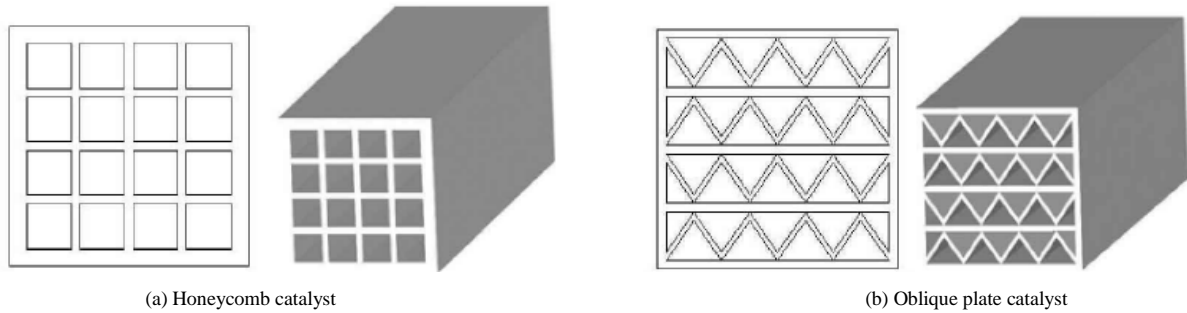


图 12 两种类型催化剂端面几何形状和示意图

Fig.12 End face geometries and schematic diagrams of two types of catalysts

表 4 催化剂规格		
Table 4 Catalyst specification		
Catalyst geometry section shape	Catalyst specification	Number of holes in the end face
Square hole honeycomb	60 mm×60 mm×200 mm	16
Oblique plate	60 mm×60 mm×200 mm	32

宏观多孔介质模型的粘性阻力系数和惯性阻力系数通过式(6)和(7)计算，模拟结果见图 13。由图可知，基于文献[1]中催化剂细观模型建立的宏观多孔介质模型的计算结果与文献值(细观数值模拟结果)基本一致，两种催化剂细观和宏观条件下模拟结果的最大误差为 12.9% ( $u=15\text{ m/s}$  时)，表明通过宏观和细观相结合的多尺度数值模拟方法得到的 SCR 催化剂阻力计算关系式是正确的，该公式应用于不同种类催化剂具有可行性。

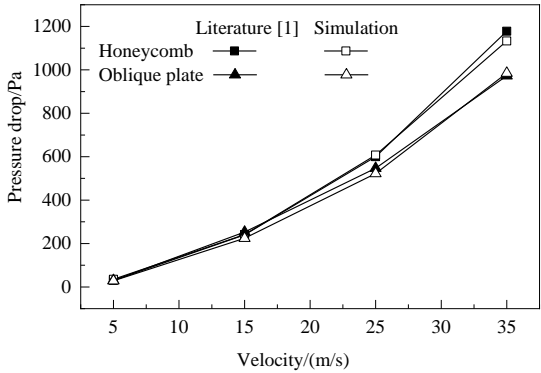


图 13 不同流速下两类催化剂阻力宏观模拟值和文献[1]细观模拟值对比

Fig.13 Comparison of macroscopic simulation and mesoscopic simulation values in the literature [1] of two catalysts resistance at different velocities

## 5 结论

利用 CFD 软件, 基于细观和宏观相结合的多尺度模拟方法, 研究了 SCR 蜂窝状催化剂阻力随进口流速的变化, 建立了催化剂各尺度模型间的关系, 得到以下结论:

(1) 细观尺度下, 随进口流速增加, 催化剂阻力变化趋势与 Ergun 方程一致。

(2) 宏观尺度下, 阻力的模拟与实验值均随进口流速增大而增大。宏观和细观尺度下催化剂阻力的模拟值与实验值的趋势一致, 最大误差为 8.6%。

(3) 将 SCR 蜂窝状催化剂阻力计算公式用于不同种类宏观多孔介质催化剂, 催化剂细观尺度和宏观尺度的模拟结果趋势一致, 最大误差为 12.9%, 表明该公式可用于模拟不同种类催化剂的阻力变化。

## 参考文献

- [1] 刘涛. SCR 多元催化剂脱硝性能实验研究及数值模拟 [D]. 南京: 东南大学, 2006: 34-41.  
Liu T. Experimental study and numerical simulation of denitration performance of SCR multi-catalyst [D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 34-41.
- [2] Lei Z G, Wen C P, Zhang J, et al. Selective catalytic reduction for NO removal: comparison of transfer and reaction performances among monolith catalysts [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(10): 5942-5951.
- [3] Ergun S. Fluid flow through packed columns [J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
- [4] 张新铭, 凌娅, 谷沁洋, 等. 多孔石墨泡沫材料内流动阻力的扩展 Ergun 方程 [J]. 材料导报 B, 2012, 26(2): 118-121.  
Zhang X M, Ling Y, Gu Q Y, et al. Extended Ergun equation in a flow group in a porous graphite foam [J]. Journal of Material and Guide B, 2012, 26(2): 118-121.
- [5] 吴国忠, 邢永强, 吕研, 等. 多孔介质内油水流动阻力系数实验分析 [J]. 实验技术与管理, 2016, 33(10): 34-37.  
Wu G Z, Xing Y Q, Lü Y, et al. Experimental analysis of oil-water flow resistance coefficient in porous media [J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(10): 34-37.
- [6] Albusairi B, Hsu J T. Application of shape factor to determine the permeability particles [J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 89(11): 173-183.
- [7] Ergun S, Orning A A. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1949, 41(6): 1179-1184.
- [8] 逯彦红, 段国林. 多孔介质平板通道与空通道的速度分布和温度分布的解析解 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(3): 634-639.  
Lu Y H, Duan G L. Analytical solution of velocity distribution and temperature distribution of plate channels and empty channels in porous media [J]. Journal of Engineering and Thermophysics, 2018, 39(3): 634-639.
- [9] 陈凯, 潘阳, 钱维扬, 等. 多孔介质金属泡沫的渗透率研究 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(1): 90-95.  
Chen K, Pan Y, Qian W Y, et al. Study on permeability of porous metal foam [J]. Journal of Thermal Power and Engineering, 2018, 33(1): 90-95.
- [10] 刘学强, 闫晓, 肖泽军, 等. 多孔介质内单向流流动特性 [J]. 核动力工程, 2009, 30(5): 40-43.  
Liu X Q, Yan X, Xiao Z J, et al. Unidirectional flow characteristics in porous media [J]. Journal of Nuclear Power and Engineering, 2009, 30(5): 40-43.
- [11] 陈军强, 孙三祥, 张占东, 等. 多孔介质孔隙率对气液两相流场的影响 [J]. 工业用水与废水, 2018, 49(1): 49-54.  
Chen J Q, Sun S X, Zhang Z D, et al. Effect of porosity of porous media on gas-liquid two-phase flow field [J]. Journal of Industrial Water and Wastewater, 2018, 49(1): 49-54.
- [12] 邢志祥, 张淑淑, 钱辉, 等. 多孔材料填充方式和孔隙率对储罐内 LNG 流动的影响 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 946-951.  
Xing Z X, Zhang S S, Qian H, et al. Effect of porous material filling method and porosity on LNG flow in storage tank [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(3): 946-951.
- [13] Dukhan N, Bagci O, Ozdemir M, et al. Experimental flow in various porous media and reconciliation of Forchheimer and Ergun relation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 57(1): 425-433.
- [14] Wang J Q, Zhang L X, Zhao J F, et al. Variations in permeability along with interfacial tension in hydrate bearing porous media [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 51(5): 141-146.
- [15] Kundu P, Kumar V, Misshra I M, et al. Experimental and numerical investigation of fluid flow hydrodynamics in porous media: characterization of pre-Darcy, Darcy and non-Darcy flow regimes [J]. Powder Technology, 2016, 303(10): 278-291.
- [16] 李琪, 李勇, 曹丽华, 等. 流体横掠多孔介质流动稳定特性研究 [J]. 化工机械, 2015, 42(5): 653-657.  
Li Q, Li Y, Cao L H, et al. Study on flow stability characteristics of fluid crossing porous media [J]. Journal of Chemicals and Machinery, 2015, 42(5): 653-657.
- [17] Mariola M B, Jerzy P S, Lukasz P, et al. Modeling of flow resistance and concentration change during the pressure transport of emulsion through porous media [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 27(1): 13-21.
- [18] 李振鹏. 球床多孔介质通道单向流体流动特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 55-79.  
Li Z P. Study on one-way fluid flow characteristics of spherical bed porous media channel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011: 55-79.
- [19] 周德文, 杜杨, 王培文, 等. 多孔介质中气体流速对流动阻力影响的实验研究 [J]. 后勤工程学报, 2011, 27(4): 50-53.  
Zhou D W, Du Y, Wang P W, et al. Experimental study on the effect of gas flow rate on flow resistance in porous media [J]. Journal of Logistic Engineering, 2011, 27(4): 50-53.
- [20] Fand R M, Kim B Y K, Lam A C C, et al. Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres [J]. Fluids Engineering, 1987, 109: 268-274.