

文章编号:1006-9941(2024)03-0289-09

## 螺旋微反应器内传热过程模拟仿真与尺度放大

李玉光<sup>1</sup>,袁飞<sup>2</sup>,赵双飞<sup>1,2</sup>,聂莹莹<sup>2</sup>,赵跃<sup>1</sup>,何伟<sup>2</sup>,郭凯<sup>2</sup>

(1. 南京先进生物材料与过程装备研究院有限公司,江苏 南京 211299; 2. 南京工业大学生物与制药工程学院,江苏 南京 211816)

**摘要:** 为提升微反应器制备含能材料的热安全性,采用基于有限体积法的计算流体力学模拟仿真方法,对螺旋微反应器内结构参数对流动与传热的影响规律进行了研究。结果表明,在螺旋微通道中,连续流动的流体在离心力的影响下会产生连续的二次流扰动方向变化,有助于增强流体的传热性能。增大螺旋微反应器的曲率、减小无量纲螺距值和增大流体流速,能够有效提升努塞尔数和控制沿程阻力系数。螺旋微反应器的传热性能存在“放大效应”,当螺旋管管道半径放大到2.5 mm以上时,热阻系数增大,传热性能降低。将螺旋管的管道半径控制在2.5 mm,能够在维持较高传热性能的同时,使换热流体通量增大了25倍,且压降降低了98.9%。

**关键词:** 微反应器;强化传热;结构参数;尺度放大;数值模拟

**中图分类号:** TJ02;TJ05

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024004

### 0 引言

近年来,由于具有流动可控、传递高效的微尺度效应,微化工技术在含能材料领域得到快速发展<sup>[1-5]</sup>,被广泛应用于含能材料的合成<sup>[6-8]</sup>、结晶调控<sup>[9-10]</sup>和复合含能材料的制备<sup>[11-12]</sup>等过程中。其中,硝化、氟化、叠氮化等含能材料及其助剂的制备过程需要释放大量热量,热量传递不及时将会存在潜在的危险<sup>[13-15]</sup>。而微反应器作为微化工过程强化的核心装备,其内部的传质传热效率是实现含能材料安全可控制备的关键<sup>[16-17]</sup>。

计算流体力学(CFD)数值模拟研究方法能够克服实验研究中的局限性,从物理、计算的角度探究流场内部流动和流动特性,实时监测和准确测量实验参数,避免了实验研究过程中人力物力的浪费<sup>[18-19]</sup>。Wang等<sup>[20]</sup>采用CFD模拟仿真方法,研究了微通道几何参数和流体的体积分数对努塞尔数(衡量流体换热程度的重要参数)和热阻的影响,结果表明微通道能有效提高传热

性能。Kim等<sup>[21]</sup>在二维通道的两侧壁面上安装了周期性的肋,以便增强湍流传热,研究了肋条的宽高比、肋条高度和肋条节距比对传热的影响,利用加权因子对结构进行了优化,提升了微反应器的传热性能。Yuan等<sup>[22]</sup>利用正弦波和直通道对甲醇重整制氢反应进行模拟仿真研究,发现该类型流体通道在提高传热传质和氢气产量方面有较大优势。Gao等<sup>[23]</sup>基于CFD成功模拟了新型微反应器的热和流体动力学特性,发现其可作为一种初步且经济的方法,指导药物纳米晶体的连续生产,这是医药领域的一项重大进展。综上所述,采用CFD模拟仿真方法,可以快速获得微反应器中的流场、温度场、压力场等物理量的分布,考察微反应器内流动与传热规律,实现微反应器的设计与开发,为微化工工程化设计提供重要参考。

在实际研究与生产过程中,通常将微通道螺旋盘绕形成螺旋微反应器,以提升传质与换热效率、实现含能材料制备过程强化<sup>[24-25]</sup>。为此,国内外学者开展了螺旋管内的流动与传热规律的研究。Izadi等<sup>[26]</sup>采用人工神经网络和自适应神经模糊推理系统模型评估螺旋盘管中的微混合性能。Xie等<sup>[27]</sup>采用高速显微镜摄像系统,研究了膜分散螺旋微反应器中哌拉西林的合成反应动力学。Veluturla等<sup>[28]</sup>考察了螺旋管微反应器内的传热和混合能力,实现生物柴油的连续化高效合成。但目前仍缺乏对螺旋管传热性能的多尺度与尺度放大研究<sup>[29-30]</sup>。

收稿日期:2024-01-03;修回日期:2024-02-27

网络出版日期:2024-03-04

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2101900)

作者简介:李玉光(1983-),男,高级工程师,主要从事微流场反应技术和生物基材料相关研究。e-mail:liyuguang@njibp.com

通信联系人:赵双飞(1991-),男,副教授,主要从事微反应器的设计开发与应用研究。e-mail:sfzhao@njtech.edu.cn

引用本文:李玉光,袁飞,赵双飞,等.螺旋微反应器内传热过程模拟仿真与尺度放大[J].含能材料,2024,32(3):289-297.

LI Yu-guang, YUAN Fei, ZHAO Shuang-fei, et al. LI Yu-guang, YUAN Fei, ZHAO Shuang-fei, et al. Simulation and Scale-up Study of Heat Transfer Process in Spiral Microreactors[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(3):289-297.

本研究采用CFD模拟仿真方法,以螺旋微反应器作为研究对象,在液体层流流动状态下,研究螺旋微反应器的曲率、无量纲螺距对不可压缩牛顿流体流动与传热的影响。同时,对比螺旋微反应器与直通道微反应器的传热性能,并分析螺旋微反应器应用到工业生产的放大效应,以达到高传热性能、低流动阻力、低压降、高通量的目的,为微反应器的设计与优化提供理论依据。

## 1 模型建立与验证

### 1.1 模拟计算控制方程与边界条件

为了简化微反应器内耦合传热模型的数值方程,本研究提出了如下假设:1)管内流动流体为不可压缩牛顿流体;2)管内流体的物理性质恒定;3)管内流体和管壁之间无滑移;4)忽略浮力、粘性加热、自然和辐射传热;5)管内流体流动为稳态;6)忽略外部流体与管壁的传热,只研究管壁与内部流体之间的热量传递。

基于以上假设,微反应器内的流体流动、温度分布、压力分布等情况可以由以下连续性方程、动量方程和能量方程控制<sup>[20-21]</sup>:

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p - \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho c_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\rho$ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $p$ 为流体压力, $\text{Pa}$ ;  $\mu$ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $c_p$ 为流体在恒定压力下的比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T$ 为温度, $\text{K}$ ;  $k$ 为流体的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

由于液体水与大部分反应溶液具有相似的流动特性,通常被用作微反应器模拟仿真的流体工质<sup>[31]</sup>。因此,本文选用液态水( $\rho=998.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\mu=1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $k=0.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $c_p=4182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )作为研究对象。微反应器的入口为速度入口,入口速度根据雷诺数( $Re$ )进行计算,流体进入微反应器的温度保持恒定,初始温度为293.15 K。微反应器的出口为压力出口,外界压力为0。微反应器的管壁采用恒温壁面边界条件,管壁的温度为373.15 K。

对于螺旋微反应器内的单相流动状态,Srinivasan等<sup>[32]</sup>采用了如下临界雷诺数计算公式:

$$Re_{cr} = 2100(1 + 12\sqrt{D/2R}) \quad (4)$$

式中, $Re$ 为雷诺数,当 $Re \leq Re_{cr}$ 时,螺旋管内流体为层流流动;当 $Re > Re_{cr}$ 时,螺旋管内流体为湍流流动。本研究 $Re$ 范围为0~200,均小于 $Re_{cr}$ ,处于层流状态,因此计算采用Laminar层流模型。

由于本研究只关注管壁与内部流体之间的传热效果,因此采用稳态计算。此外,在求解设置中,采用SIMPLEC压力基求解器,对流体流动变量中的速度、压力、温度等进行耦合迭代计算,在每次迭代中更新雅克比矩阵,收敛准则为迭代过程中各监测物理量残差小于 $10^{-4}$ 。

### 1.2 螺旋与直通道微反应器模型建立

微通道内的流体碰撞到壁面后会形成与壁面相反方向的二次流扰动,螺旋微反应器的通道壁面发生连续改变,易形成连续变化方向的二次流扰动<sup>[22]</sup>。因此,本研究选用螺旋微反应器作为研究对象,考察其内部的传热性能。螺旋微反应器的物理模型如图1a所示,其整体结构由一个入口、一个出口和螺旋形管壁构成。该物理模型包含螺旋管道半径 $r$ 、螺旋高度 $H$ 、螺旋半径 $R$ 和螺距 $b$ 四个结构参数。为了验证螺旋微反应器在传热性能上的优越性,选择相同长度的直通道微反应器作为对比研究的对象,如图1b所示。螺旋微反应器和直通道微反应器的结构模型在SolidWorks<sup>[31]</sup>中通过圆环分别扫描螺旋线和直线绘制而成。

### 1.3 模拟计算网格划分

采用ANSYS Workbench自带的前处理功能对螺旋微反应器内流体模型进行网格划分,在 $Re=1500$ 条件下,调整网格数分别为9万,23万,52万,104万,

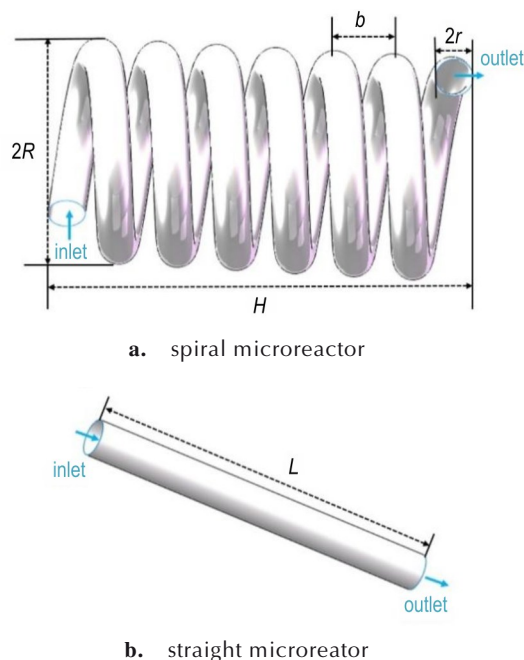


图1 微反应器物理模型

Fig.1 Physical model of spiral and straight microreactor

272万和567万,对螺旋微反应器的传热进行网格独立性研究,结果如图2所示。

图2是网格独立性检验折线图,可以看出当网格数量小于104万时,努塞尔数 $Nu$ 和流动阻力系数 $f$ 随网格数增大而增大;而当网格数大于104万时, $Nu$ 和 $f$ 基本趋于稳定。因此,通过对模拟计算精度和效率的综合考量,确定104万网格数为最优条件,后续将采用104万网格进行计算模拟,其网格尺寸为0.6 mm,网格划分如图3所示。

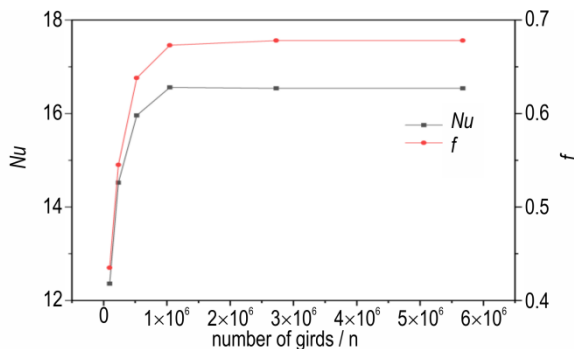


图2 不同网格努塞尔数( $Nu$ )和流动阻力系数( $f$ )的变化  
Fig.2 Variations of  $Nu$  and  $f$  under different grids

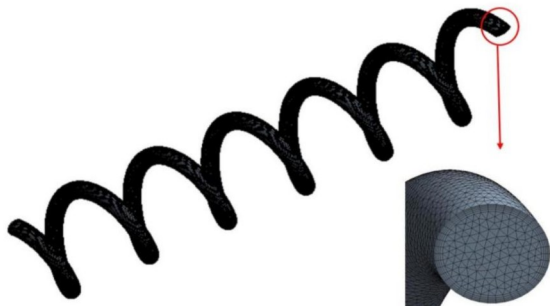


图3 流体模型网格划分  
Fig.3 Fluid model grid partitioning

#### 1.4 模拟计算验证

以直通道微反应器内层流流动与传热作为研究对象,将本研究建立的模拟仿真模型与文献<sup>[33]</sup>中经验公式(5)~(6)计算得到的传热性能( $Nu$ 和 $f$ )进行对比,以验证本研究建立的流动与传热模型的准确性。

其中,直通道微反应器均匀壁温下的平均 $Nu$ 可采用文献经验 Sieder-Tate 公式计算<sup>[33]</sup>:

$$Nu_{ref} = 1.86 \left( \frac{Re \times Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (5)$$

式中, $Nu_{ref}$ 为经验公式计算获得的努塞尔数; $Re$ 为无量纲数雷诺数( $Re = \frac{\rho D V}{\mu}$ ); $Pr$ 为无量纲数普朗特数( $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ ); $L$ 为管道长度,mm; $D$ 为管道直径,mm。

适用条件: $Pr=0.48 \sim 16700$ ,  $\frac{\mu_f}{\mu_w}=0.0044 \sim 9.75$ ,

$$\left( \frac{Re \times Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \geq 2。$$

流动阻力系数 $f$ 的计算公式如下:

$$f_{ref} = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

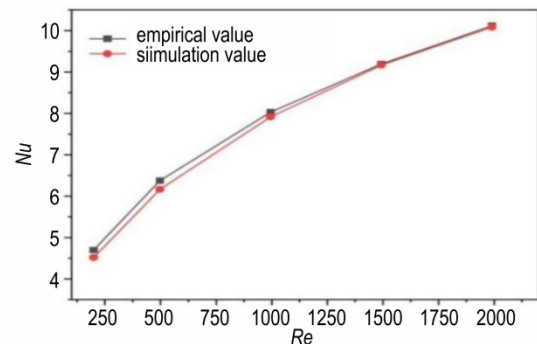
式中, $Re$ 为雷诺数( $Re = \frac{\rho D V}{\mu}$ ); $Pr$ 为普朗特数( $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ )。

将本研究的模拟仿真计算结果与采用文献经验公式(5)和(6)计算得到的结果进行了对比,结果如图4所示,发现模拟结果与公式的计算结果较吻合,其中努塞尔数 $Nu$ 的偏差为0.31%~3.85%,阻力系数 $f$ 的偏差为1.26%~2.82%,偏差均小于3.85%。由此可见,本研究的数值模拟方法是可靠的。

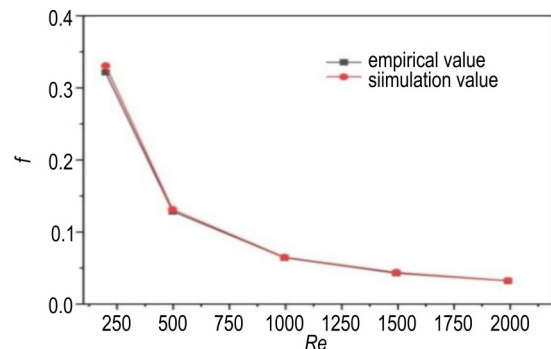
## 2 传热过程模拟

### 2.1 尺寸放大效应的模拟研究

增大管道内径尺寸能够有效提高换热的通量,有利于实现螺旋微反应器换热过程的放大。为了确保螺



a.  $Nu$  results



b.  $f$  results

图4  $Nu$ 和 $f$ 模拟结果与文献经验公式<sup>[33]</sup>的比较

Fig.4 Comparing the simulation-derived  $Nu$  and  $f$  results with those obtained from empirical formulas<sup>[33]</sup>



旋微反应器管道在放大的同时,维持较高的传热性能,通过调整螺旋微反应器通道半径的尺寸,来考察多尺度螺旋微反应器内的传热性能。在螺旋管的总长度  $H$  为 1000 mm,  $\delta=0.2$ ,  $\lambda=0.1$ ,  $Re=1000$  参数设置下,采用模拟仿真方法,考察管道半径  $r$  为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm 和 2.5 mm 时的流动与传热规律。

## 2.2 结构参数对螺旋微反应器传热的模拟研究

为了更有效地分析流体在螺旋微反应器内阻力系数和能量传递,研究不同结构参数对传热的影响,对不同结构参数螺旋微反应器物理模型进行数值模拟研究。定义的螺旋的曲率  $\delta=r/D$ , 无量纲螺距  $\lambda=b/2\pi R$ 。分析在常壁温度边界条件下,螺旋管的曲率  $\delta$  和无量纲螺距  $\lambda$  对微反应器内流动过程中的传热努塞尔数  $Nu$  和沿程阻力系数  $f$  产生的影响,确定最优螺旋微反应器结构参数。螺旋管的总长度  $H$  为 1000 mm,在保持螺旋半径,螺旋通道半径和无量纲螺距条件一致的情况,仅针对雷诺数  $Re$  在 0~2000 范围进行模拟计算,探索不同曲率  $\delta$  和雷诺数  $Re$  对努塞尔数  $Nu$  和阻力系数  $f$  作用的影响。此外,在保证其他条件一致的情况下,探索不同无量纲螺距  $\lambda$  和雷诺数  $Re$  对努塞尔数  $Nu$  和阻力系数  $f$  的影响规律。采用 Fluent 软件对不同结构参数的螺旋微反应器进行模拟,具体尺寸参数见表 1。

表 1 物理模型尺寸参数

Table 1 Size parameters for physical model

model	$r/mm$	$R/mm$	$\delta$	$\lambda$
1	2.5	12.5	0.4	0.314
2	2.5	25.0	0.2	0.314
3	2.5	50.0	0.1	0.314
4	2.5	25.0	0.2	0.100
5	2.5	25.0	0.2	0.204
6	2.5	25.0	0.2	0.314
7	2.5	25.0	0.2	0.436
8	0.5	12.5	0.2	0.100
9	1.0	50.0	0.2	0.100
10	1.5	62.5	0.2	0.100
11	2.0	75.0	0.2	0.100
12	2.5	25	0.2	0.100
13	2.5	25	0.2	0.100
14	2.5	25	0.2	0.100
15	2.5	25	0.2	0.100
16	2.5	25	0.2	0.100

Note:  $r$  is the radius of spiral channel,  $R$  is the radius of spiral,  $H$  is the height of pipeline,  $\delta$  is the curvature,  $\lambda$  is the dimensionless pitch.

## 2.3 直通道与螺旋微反应器对比

对比直通道与螺旋微反应器的传热性能,考察螺旋微反应器对流体流动与传热的强化作用。直通道和螺旋管的总长度  $H$  均为 1000 mm,管道半径为 2.5 mm,螺旋微反应器的曲率  $\delta$  为 0.2,无量纲螺距  $\lambda$  为 0.1,雷诺数  $Re$  为 1000,采用模拟计算,对比研究直通道微反应器与螺旋微反应器的努塞尔数  $Nu$  和阻力系数  $f$ 。为了进一步分析螺旋管内流体流动与传热的强化作用,采用模拟仿真获得螺旋微反应器和直管通道在  $\delta=0.2$ ,  $\lambda=0.1$ ,  $Re=1000$  时的速度场和温度场分布。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 尺度效应

本研究对不同管径螺旋微反应器内的传热进行了模拟,获得管道半径  $r$  对努塞尔数  $Nu$ ,阻力系数  $f$ ,流体通量  $Q$  和压降  $\Delta p$  的影响规律,模拟计算结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,当管道半径  $r$  从 0.5 mm 增大到 2.5 mm 时,  $Nu$  从 3.15 不断增大到 11.3,变化幅度较大。流动阻力系数  $f$  不断增大,在  $r$  达到 1.5 mm 时流

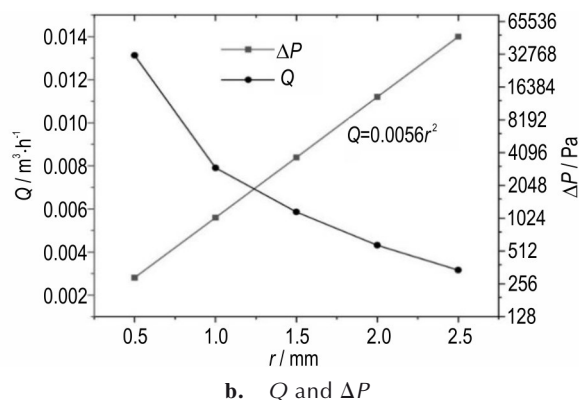
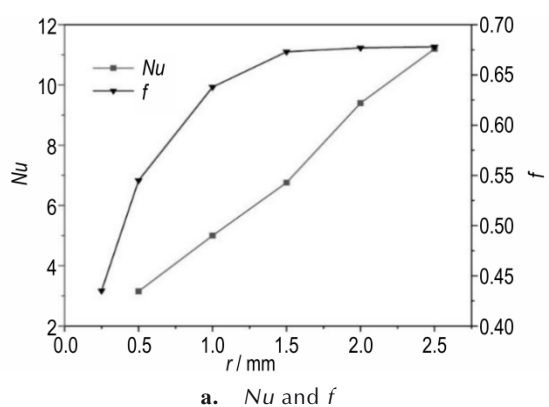


图 5 尺寸放大时管径对  $Nu$ 、 $f$ 、 $\Delta P$  和  $Q$  的影响

Fig. 5 Impact of pipe diameter on  $Nu$ ,  $f$ ,  $\Delta P$  and  $Q$  during size expansion

动阻力系数  $f$  增大幅度变小,变化的幅度较小。因此,螺旋微反应器的传热性能存在“放大效应”,从努塞尔数  $Nu$  的角度来看,螺旋微反应器管道半径  $r$  可放大到 2.5 mm。此外,随着通道半径的增大,流体的压降  $\Delta p$  逐渐减小,且通量逐渐增大。当管道半径  $r$  从 0.5 mm 增大到 2.5 mm 时,在维持高传热性能的同时,流体的压降减小了 98.9%,而换热流体通量增大了 25 倍,且流体通量和通道半径符合公式  $Q=0.0056r^2$ 。但当管道半径继续增大时,螺旋微反应器对流体流动二次流所产生的影响不断减弱,过大的管径对流体传热效率的提升反而不明显。因此,在管径 0.5~2.5 mm 范围对螺旋微反应器进行尺度放大,可在维持较大传热性能的同时,实现压降的降低和通量的放大。

### 3.2 结构参数对螺旋微反应器传热的影响

#### 3.2.1 曲率对螺旋微反应器传热的影响

本研究对不同曲率  $\delta$  和雷诺数  $Re$  时的传热性能进行了模拟,获得曲率  $\delta$  和雷诺数  $Re$  对努塞尔数  $Nu$  和阻力系数  $f$  的影响规律,模拟计算结果如图 6 所示。层流流动状态下,当雷诺数  $Re$  较小时,曲率  $\delta$  对努塞尔数  $Nu$  的影响不大;但随着雷诺数  $Re$  的增大,曲率  $\delta$

对努塞尔数  $Nu$  的影响也逐渐增大。在雷诺数一定时,努塞尔数随着曲率  $\delta$  的变化呈现先增大后减小的趋势。主要因为随着螺旋曲率  $\delta$  的增大,螺旋半径逐渐减小,螺旋管弯曲程度相对越大,会造成二次流强度逐渐增强,但继续增大曲率  $\delta$  会促进流体形成层流流动的趋势,致使螺旋管传热效率先增大后减小。曲率  $\delta$  的变化对阻力系数  $f$  的影响较为明显,曲率  $\delta$  越大,阻力系数  $f$  也越大。此外,在相同曲率下,阻力系数随着雷诺数的增高而降低。当曲率增加时,管道的弯曲程度也会随之增加,这会进一步影响微反应器内流体的速度方向和尺寸,从而导致微反应器内流体的阻力系数上升。尽管增大螺旋微反应器的曲率可以强化传热性能,但考虑到曲率为 0.4 时,管内的流动阻力较大,因此选择  $\delta=0.2$  作为最佳曲率。

#### 3.2.2 无量纲螺距对螺旋微反应器传热的影响

本研究对不同无量纲螺距  $\lambda$  和雷诺数  $Re$  时的传热性能进行了模拟,获得无量纲螺距  $\lambda$  和雷诺数  $Re$  对努塞尔数  $Nu$  和阻力系数  $f$  的影响规律,模拟计算结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,层流状态下,无量纲螺距  $\lambda$  对螺旋微反应器的努塞尔数  $Nu$  影响很小,但对阻

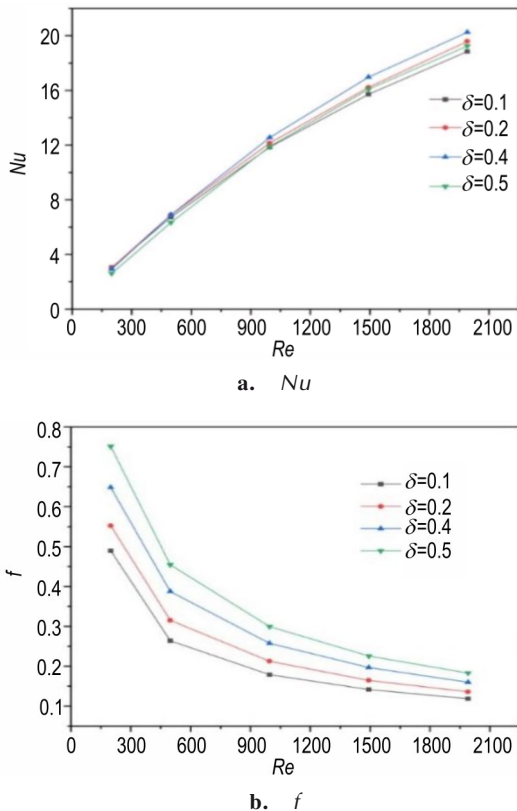


图 6 曲率  $\delta$  对  $Nu$  和  $f$  的影响

Fig.6 Influence of curvature on  $Nu$  and  $f$

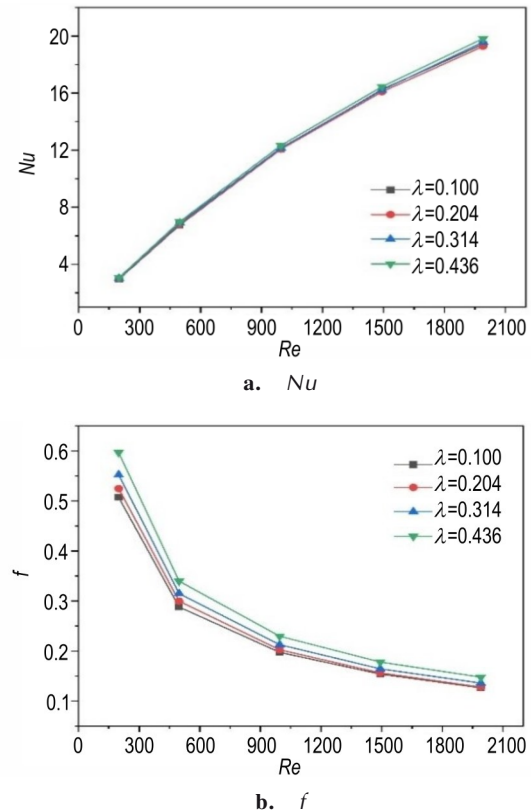


图 7 无量纲螺距对  $Nu$  和  $f$  的影响

Fig.7 Influence of dimensionless pitch on  $Nu$  and  $f$

力系数  $f$  的影响较大。随着无量纲螺距  $\lambda$  的增大,螺旋微反应器内的努塞尔数  $Nu$  基本保持不变,而阻力系数逐渐增大。此外,增大雷诺数  $Re$  时,不同无量纲螺距  $\lambda$  时努塞尔数  $Nu$  的变化量逐渐增大,而阻力系数  $f$  逐渐减小。在雷诺数  $Re$  相同时, $\lambda=0.100$  与  $\lambda=0.204$  的阻力系数  $f$  基本一样,但当无量纲螺距  $\lambda$  继续增大时,其对螺旋微反应器内的阻力系数  $f$  的影响也变大,不利于螺旋管的传热。因此,选择  $\lambda=0.1$  为最佳无量纲螺距。

### 3.3 直通道与螺旋微反应器对比

#### 3.3.1 传热性能

本研究对直通道和螺旋微反应器的传热性能进行了模拟,获得两种微反应器在不同雷诺数  $Re$  时的努塞尔数  $Nu$  和阻力系数  $f$ ,对比直通道与螺旋微反应器的传热性能,考察螺旋微反应器对流体流动与传热的强化作用,模拟计算结果如图8所示。由图8可以看出,由于螺旋微反应器比直通道弯曲,增大了流体流动的阻力,导致螺旋管内的阻力系数高于直通道微反应器。同时在较低雷诺数下,螺旋微反应器内的努塞尔数低于直通道的努塞尔数。原因是由于雷诺数较低时,入口处的速度较低,流体在螺旋微反应器内不容易产生二次流,从而没有强化传热性能<sup>[34]</sup>。当雷诺数大于450时,螺旋微反应器内的努塞尔数明显高于直通道内的努塞尔数。这是由于螺旋微反应器的弯曲提高了管壁处的流体和管中心的流体的热交换强度,说明在较高层流雷诺数下螺旋微反应器有强化传热性能的能力。但是由于螺旋微反应器比直通道弯曲,增大了流体流动的阻力,导致螺旋管内的阻力系数总是比直管的大。由此可见,螺旋微反应器可以强化传热性能的。

直通道与螺旋微反应器的努塞尔数分布云图如图9所示。由图9可以看出,直通道与螺旋微反应器

均在入口处具有较高的努塞尔数,且随着流体的流动努塞尔数逐渐减小。不同的是,在直通道中的努塞尔数急剧减小,而直通道与螺旋微反应器内的努塞尔数减小的速率较小。原因是由于通道的弯曲强化了螺旋直通道与螺旋微反应器内流体的流动与传热,致使努塞尔数减小缓慢。因此,螺旋微反应器管道的平均努塞尔数比直管大,即螺旋微反应器的传热性能比直通道优。

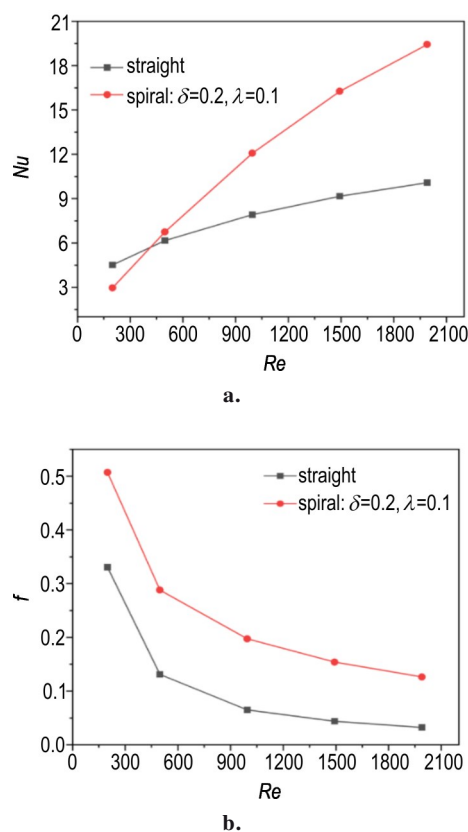


图8 直通道与螺旋微反应器  $Nu$  和  $f$  对比

Fig.8 Comparison of  $Nu$  and  $f$  between straight microreactor and spiral microreactor

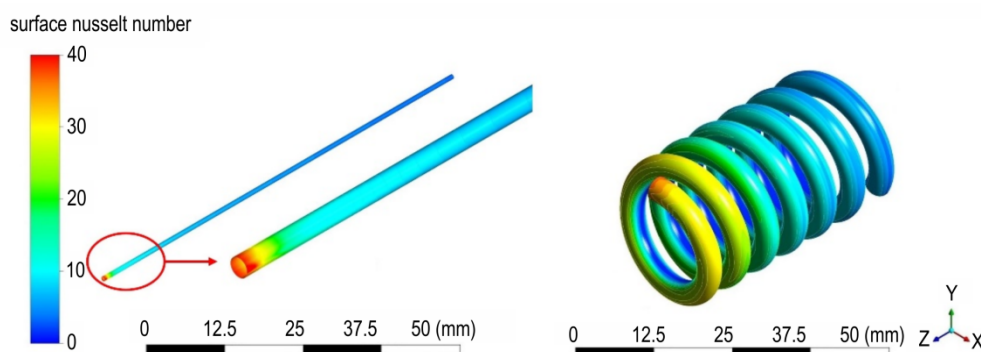


图9 直通道与螺旋微反应器努塞尔数分布云图

Fig.9 Nussel number distribution cloud map of straight microreactor and spiral microreactor



### 3.3.2 速度场和温度场分布

为了进一步分析螺旋管内流体流动与传热的强化作用,采用模拟仿真获得了螺旋微反应器和直管通道在 $\delta=0.2, \lambda=0.1, Re=1000$ 时的速度场和温度场分布云图,如图10和图11所示。螺旋微反应器是在距离入口处旋转1~6圈处取得的截面,而直通道是根据螺旋管长度取得截面对应长度处取得的截面。由图10可以看出,直管的温度分布较为均匀,但管中心流体的温度最低,只有管壁处的流体进行了传热。随着管长的增加,逐渐向管中心进行传热,但对于长度为1 m的直管,其传热还未能达到管中心流体。而螺旋微反应器内的温度不是均匀分布的,一开始管壁周围的温度还较低,但随着螺旋微反应器不断延伸,热量会受到二

次流和热边界层的影响,会从螺旋微反应器管壁附近逐渐传递到管中心部位。

由图11可以看出,直通道的速度分布较为均匀,管中心的速度比管壁周围的速度高,流体在直通道里面流动的速度变化较小。而螺旋微反应器中,速度分布不再均匀,在旋转一圈时的速度分布就呈现内凹的圆形状且不再有明显的变化,说明流体已经达到了充分发展的阶段。随着流体在螺旋微反应器中不断流动,离心力对流动流体各点的效果会逐渐加强,二次流产生的效果也会不断加强,使得外侧壁面处的速度大于内侧壁面处的速度。因此,螺旋微反应器具有较高的传质性能,对强化大尺度传热过程提供了巨大潜力。

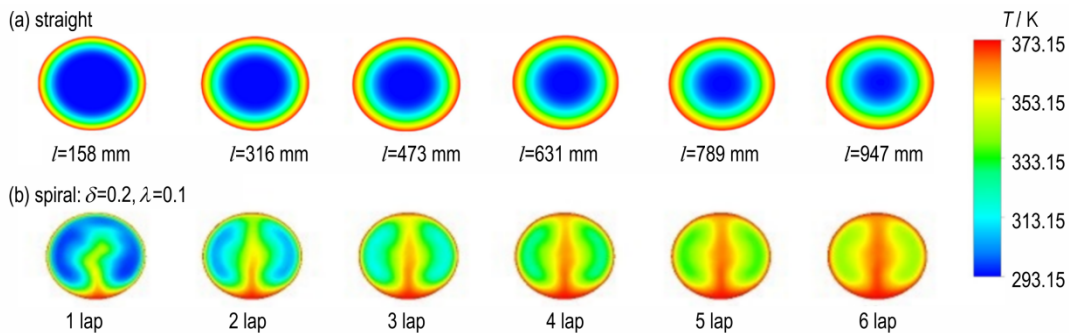


图10 直通道与螺旋微反应器不同截面温度场分布

Fig.10 Temperature field distribution in various sections of straight channel and spiral microreactor

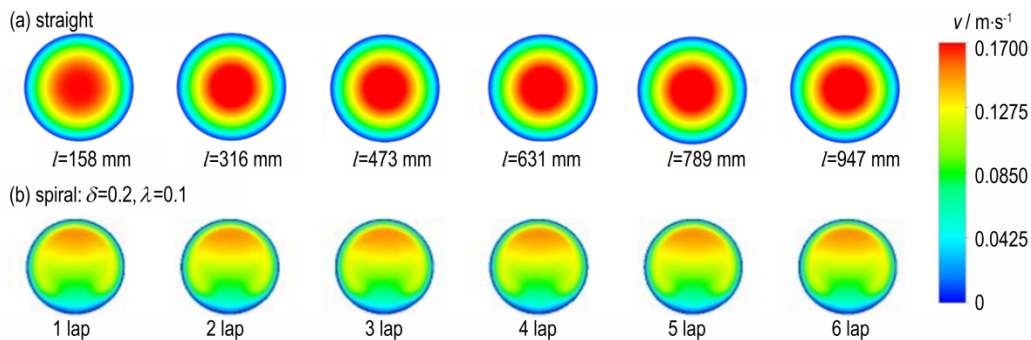


图11 直通道与螺旋微反应器不同截面速度场分布

Fig.11 Velocity field distribution in various sections of straight channel and spiral microreactor

## 4 结论

本研究通过计算模拟来探讨流体在螺旋微反应器中的流动和传热特性,获得了螺旋微反应器结构参数对流动和传热的影响规律,进一步探讨了螺旋微反应器和直通道微反应器的流动与传热性能,得到结论如下:

(1) 建立了螺旋微反应器传热模拟仿真模型,模

型验证结果良好,可以用于微反应器传热性能评价。

(2) 螺旋微反应器的传热性能存在“放大效应”,螺旋微反应器管道半径增大时热阻系数增大,传热性降低,且能够在维持较高传热性能同时放大至2.5 mm,将换热流体通量增大25倍、压降降低98.9%。

(3) 当螺旋微反应器通道的曲率值在0.1~0.4范围内逐渐增大,以及无量纲螺距值在0.100~0.436范围内逐渐减小时,能够有效提升努塞尔数和控制沿程阻力系数。

(4) 当流体处于层流状态时,逐渐增大流体的流速可以提高努塞尔数。因此在实际应用中,可以通过增加流速来提高传热性能。

(5) 与直通道微反应器对比,螺旋微反应器对流体流动与传热的强化作用体现在:螺旋通道内流体在离心力的作用下产生了连续变化方向的二次流扰动,具有较高的传质性能,为强化传热过程提供了巨大潜力。

#### 参考文献:

- [1] 沈瑞琪,朱朋,叶迎华,等.危险化学物质的微流控合成与制备技术[J].科技导报,2018,36(16):46-52.  
SHEN Rui-qi, ZHU Peng, YE Ying-hua, et al. Microfluidic synthesis and preparation of hazardous chemicals[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(16): 46-52.
- [2] 石锦宇,朱朋,沈瑞琪.微流控技术调控炸药结构形态的研究进展[J].含能材料,2022,30(5):511-526.  
SHI Jing-yu, ZHU Peng, SHEN Rui-qi. Research progress of microfluidic control of explosive structure morphology[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(5): 511-526.
- [3] 周星屹,石锦宇,朱朋.微流控合成与制备含能材料新进展[J].火炸药学报,2023,46(2):83-84.  
ZHOU Xing-yi, SHI Jin-yu, ZHU Peng. New progress in microfluidic synthesis and preparation of energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(2): 83-84.
- [4] 于瑾,徐司雨,姜菡雨,等.微流控技术在含能材料制备中的应用及其发展趋势[J].火炸药学报,2022,45(4):439-451.  
YU Jin, XU Si-yu, JIANG Han-yu, et al. Application and development trend of microfluidic technology in the preparation of energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(4): 439-451.
- [5] 唐杰,魏应东,齐秀芳.微化工技术在炸药制备中的应用研究进展[J].爆破器材,2020,49(3):1-9+15.  
TANG Jie, WEI Ying-dong, QI Xiu-fang, Research progress of application of microchemical technology in explosive preparation[J]. *Explosive Materials*, 2020, 49(3): 1-9+15.
- [6] ZABORENKO N, MURPHY E, KRAL J, et al. Synthesis and kinetics of highly energetic intermediates by micromixers: direct multistep synthesis of sodium nitrotetrazolate[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(9): 4132-4139.
- [7] ROBERG D, NOT C, IRL E, et al. Control of hazardous processes in flow: synthesis of 2-nitroethanol[J]. *Journal of Flow Chemistry*, 2015, 4(1): 26-34.
- [8] ZUCKERMAN N, SHUSTEF M, PAGORIA P, et al. Microreactor flow synthesis of the secondary high explosive 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105)[J]. *Journal of Flow Chemistry*, 2015, 5(3): 178-182.
- [9] ZHAO S, CHEN C, ZHU P, et al. Passive micromixer platform for size- and shape-controllable preparation of ultrafine HNS[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(36): 16709-16718.
- [10] ZHAO S, WU J, ZHU P, et al. Microfluidic platform for preparation and screening of narrow size-distributed nanoscale Explosives and supermixed composite explosives[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(36): 13191-13204.
- [11] SHI J, ZHU P, LIU J. Coupling oscillating-swirling-coflowing: a microfluidic strategy for superior safety and output performance of core-shell energetic microspheres[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(48): 17593-17606.
- [12] ZHOU X, ZHU P, SHI J. Self-assembly assisted by microdroplet templates confinement for the preparation of ultramixed composite energetic particulates[J]. *Chemical engineering journal*, 2023, 454(2): 140204.
- [13] 刘阳艺红,李斌栋.微反应器中合成1-甲基-4,5-二硝基咪唑的连续流工艺[J].现代化工,2018,38(6):140-143.  
LIU Yang-yi-hong, LI Bing-dong. Continuous flow process for synthesis of 1-methyl-4,5-dinitroimidazole in a microreactor[J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(6): 140-143.
- [14] 陈光文.微反应技术硝化合成硝酸异辛酯[J].当代化工,2019,48(6):1173.  
CHEN Guang-wen. Synthesis of isooctyl nitrate by micro-reaction technique[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2019, 48(6): 1173.
- [15] 刘熠.微通道反应器连续法合成硝酸异辛[J].精细化工中间体,2017,47(4):55-58.  
LIU Yi. Synthesis of isooctyl nitrate by microchannel reactor[J]. *Fine Chemical Intermediates*, 2017, 47(4): 55-58.
- [16] WANG H, CHEN X. Numerical simulation of heat transfer and flow of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid in microchannel heat sink with cantor fractal structure based on genetic algorithm[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2022, 1221: 339927.
- [17] KIM H, KIM K. Design optimization of rib-roughened channel to enhance turbulent heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(23): 5159-5168.
- [18] YUAN Z, CHEN X. Simulation study on the tubular microreactor for hydrogen production by steam reforming of methanol[J]. *Surface Review and Letters*, 2022(5):29-33.
- [19] GAO X, WANG B, LIU Q, et al. Fluid dynamic and heat transfer simulations of solid hollow fiber cooling crystallizer for continuous synthesis of drug nanoparticles[J]. *Crystal Growth & Design*, 2020, 20(6):4020-4029.
- [20] WEI Y, ZHAO S, YU P, et al. Comparative studies of fluid mixing and heat transfer behaviors in a millimeter scale T-type mixer with triangular baffles[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 47: 103076.
- [21] NIE Y, ZHAO S, YU P, et al. Improvement of mass and heat transfer efficiency in a scale-up microfluidic mixer designed by CFD simulation[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2023, 101: 6017-6031.
- [22] ZHAO S, NIE Y, ZHANG W, et al. Microfluidic field strategy for enhancement and scale up of liquid-liquid homogeneous chemical processes by optimization of 3D spiral baffle structure[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2023, 56: 255-265.
- [23] ZHAO S, WEI Y, YU P, et al. High throughput millifluidics mixer with double triangle baffle for improvement of mixing performance and reduction of flow resistance designed by grey relational analysis[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 181: 109166.
- [24] ZHAO S, ZHOU N, ZHU P, et al. Optimization synthesis of



- morphologically homogeneous and rod-like structure barium trinitroresorcinate produced by segmented flow [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2018, 51: 524-529.
- [25] ZHAO S, YAN F, ZHU P, et al. Micro-Segmented flow technology applied for synthesis and shape control of lead styphnate micro-particles [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2018, 43, 286-293.
- [26] IZADI M, RAHIMI M, BEIGZADEH R. Evaluation of micromixing in helically coiled microreactors using artificial intelligence approaches [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 356: 570-579.
- [27] XIE Y, FENG M, ZHANG M, et al. Kinetics model of piperacillin synthesis in a microreactor [J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 259: 117821.
- [28] VELUTURLA S, RAMBHIA S A, PRANAVI S. Process intensification studies in synthesis of biodiesel with a helical coil continuous microreactor [J]. *Biofuels*, 2023, 14(4): 387-392.
- [29] ZHAI X, QI C, PAN Y, et al. Effects of screw pitches and rotation angles on flow and heat transfer characteristics of nanofluids in spiral tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 989-1003.
- [30] SUN Y, WEN G, XIAO X, et al. Numerical study on heat transfer and flow characteristics for laminar flow in a circular tube with swirl generators [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2018, 24(3): 244-255.
- [31] 刘兆轩, 张程宾, 韩群, 等. 锯齿型微通道流动与传热特性数值模拟 [J]. *化工进展*, 2023, 42(11): 5622-5636.
- LIU Zhao-xuan, ZHANG Cheng-bin, HAN Qun, et al. Numerical simulation of fluid flow and heat transfer characteristics in a saw-like microchannel [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(11): 5622-5636.
- [32] SRINIVASAN P, NANDAPURKAR S, HOLLAND F. Pressure drop and heat transfer in coils [J]. *Chemical Engineering*, 1968, 218(218): 113-119.
- [33] 武永和, 林志敏, 刘树山, 等. 内插不同形状涡产生器管内层流流动与传热特性的对比分析 [J]. *化工学报*, 2020, 71(S2): 176-186.
- WU Yong-he, LIN Zhi-min, LIU Shu-shan, et al. Comparative analysis of laminar flow and heat transfer characteristics in a circular tube with different shape vortex generators [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(S2): 176-186.
- [34] RAGHU A K, KAIISARE N S. Kaisare. A compact heat recirculating spiral geometry for thermal integration for Sabatier reaction in microreactor [J]. *AIChE Journal*, 2022, 68(8): e17726.

## Simulation and Scale-up Study of Heat Transfer Process in Spiral Microreactors

LI Yu-guang<sup>1</sup>, YUAN Fei<sup>2</sup>, ZHAO Shuang-fei<sup>1,2</sup>, NIE Ying-ying<sup>2</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, HE Wei<sup>2</sup>, GUO Kai<sup>2</sup>

(1. Institute of Nanjing Advanced Biomaterials & Processing Equipment, Nanjing 211299, China; 2. College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** To enhance the thermal safety of microreactors utilized for preparing energetic materials, a computational fluid dynamics simulation based on the finite volume method was employed to investigate the impact of structural parameters on flow and heat transfer in a spiral microreactor. The findings reveal that centrifugal force induces continuous directional secondary flow disturbance within the spiral channel, thereby augmenting fluid heat transfer performance. Increasing the curvature of the spiral microreactor, reducing the dimensionless pitch value, and elevating fluid velocity effectively enhance Nusselt number while controlling drag coefficient along the reactor path. Notably, scaling up beyond a radius of 2.5 mm leads to a significant decline in heat transfer performance of a spiral microreactor exhibits a scale-up effect, with a significant decrease in heat transfer performance for spiral microreactors. By maintaining a controlled radius at 2.5 mm, high heat transfer performance can be sustained even with a 25 times increase in heat transfer fluid flux and an impressive 98.9% reduction in pressure drop.

**Key words:** microreactors; enhanced heat transfer; structural parameters; scaling up; numerical simulation

**CLC number:** TJ02; TJ05

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024004

**Grant support:** National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC2101900)

(责编: 高毅)