

滑移流区纤维束蓄热体换热性能数值研究

刘燕英¹, 匡 尧², 张佳钰³

(1. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570228;
3. 中国科学院理化技术研究所 低温工程重点实验室, 北京 100190)

摘要:随着蓄热体基础部件的尺寸细小化,玄武岩蓄热体的纤维直径微小,顺排排列后,内部形成微细流道。为探究微尺度下产生的尺度效应对玄武岩纤维束内部流道流动和传热的数值模拟的影响,建立了蓄热体的二维层流模型。通过 Ansys 17.0 fluent 中的 UDF 函数添加了滑移边界条件,以添加滑移边界条件前后的壁面努塞尔数(Nu)减小百分比为评价指标,对比分析二维纤维束微流道的数值模拟中,滑移边界条件对不同工况下流固换热的影响程度。模拟结果表明:随着温度和间距的增大,添加滑移边界条件后的 Nu 下降程度会增大;随着纤维排数和入口速度的增加, Nu 下降程度会减小;纤维束直径 d 为 20 μm ,排数小于 5 排,中心间距超过 3 d 时,添加了滑移边界条件的 Nu 的降幅达到了 1% 以上,在数值模拟中不可忽略滑移流区的影响。

关键词:纤维束蓄热体;滑移流区;换热性能;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.06.017

[引用本文格式]刘燕英,匡 尧,张佳钰. 滑移流区纤维束蓄热体换热性能数值研究[J]. 热能动力工程,2022,37(6):122-128. LIU Yan-ying, KUANG Rao, ZHANG Jia-yu. Numerical study on heat transfer performance of fiber bundle regenerator in slip flow region [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 122-128.

Numerical Study on Heat Transfer Performance of Fiber Bundle Regenerator in Slip Flow Region

LIU Yan-ying¹, KUANG Rao², ZHANG Jia-yu³

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096; 2. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South Sea, Hainan University, Haikou, China, Post Code: 570228; 3. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry of CAS, Beijing, China, Post Code: 100190)

Abstract: As the size of the basic parts of the heat storage body becomes smaller, the diameter of basalt regenerator fiber is very small, so that micro channels are formed among fibers in line arrangement. In order to explore the influence of the scale effect generated at the microscale on the numerical simulation of the flow and heat transfer in the internal flow channel of the basalt fiber bundle, a two-dimensional laminar flow model of the heat storage body is established. The slip boundary condition is added to the simulation by the user-defined function (UDF) in Ansys fluent 17.0. Taking the percentage of wall Nusselt number (Nu) decrease as the evaluation index, the comparative analysis method is used to analyze the influence degree of the slip boundary condition on the fluid-solid heat transfer under different working conditions in the numerical simulation of the two-dimensional fiber bundle microchannel. The simulation results show that with the increase of temperature and spacing, Nu decreases more after the addition of slip boundary condition. With the increase of the number of fiber rows and the inlet velocity, Nu decreases less after the addition of slip boundary condition. When the fiber bundle diameter (d) is 20 μm , the number of rows is less than 5 rows, and the center distance exceeds 3 d , the decrease percentage of Nu with the slip boundary condition is more than 1%. The influence of slip flow area cannot be ignored in

numerical simulation.

Key words: fiber bundle regenerator, slip flow region, heat transfer performance, numerical simulation

引言

蓄热体是储能装置的重要部件,其性能将直接影响装置的热回收率和储热性能。为获得更满足工业应用需求,低成本、高效率的蓄热体,学者们通过搭建实验和数值模拟的方法,在材料选择、结构参数和操作参数的优化上进行了大量研究^[1-7],其基础器件的尺寸也在不断缩小。

而当物体特征尺度达到微米、纳米级,物体的特征尺度会缩小到与载体粒子的平均自由程同一量级时,基于连续介质假设建立的许多宏观概念和规律就不再完全适用,因此需要对其进行修正或使用分子动力论的方法分析其产生的稀薄效应^[7-9]。

众多学者采用数值模拟、理论计算和风洞实验等方法对处于滑移流区的微槽道、微管和圆柱绕流的流动和换热特点进行了研究。谢翀等人^[10]基于分子模型的统计模拟方法对微槽道内的气体流动进行了模拟,这种方法与蒙特卡洛模拟方法相比大大减少了采样数,且和实验数据符合良好。Du等人^[11]在流体流动模拟中引入了滑移边界条件,模拟结果表明,在弱稀薄效应影响下流体在整个通道宽度范围内沿流动方向有较高的速度。Bahrami等人^[12]用数值模拟的方法研究了微管内气体的对流换热特点,分析了滑移流区稀薄效应的影响,并给出了无粘性耗散的充分发展流 Nu 关联式。Seyed等人^[13]对纳米流体在微管中的强迫对流换热进行了数值模拟的研究,分析了纳米颗粒体积浓度和雷诺数对滑移边界条件的影响,结果表明, Nu 会随着体积浓度的增大而增大,在 Re 数较大时这种规律更明显。Fushou Xie 等人^[14]使用 CFD 数值模拟的方法,基于一阶速度滑移和温度跳跃的边界条件,同时考虑了热蠕变和壁面曲率的影响,在 $Re = 0.001 \sim 20$ 的范围内对滑移流区圆柱绕流的传热行为进行了数值模拟。

结合前面的研究,本文提出一种基于分形理论、以玄武岩纤维为基础器件构造的具有多级流道的蓄

热体,其尺寸在 $10 \mu\text{m}$ 量级,具有较好的传热性能^[15-18]。同时,通过 Ansys 17.0 fluent 软件中的 UDF 用户自定义函数添加了滑移边界条件,以添加滑移边界条件前后的努塞尔数(Nu)减小百分比为评价指标,分析了不同壁面温度、入口流速下,采用不同纤维排数和间距的纤维束流道中滑移边界条件对换热的影响。

1 数值模型

1.1 物理模型

蓄热体结构以空气横掠玄武岩纤维束蓄热体中直径为 $20 \mu\text{m}$ 的纤维为基本单元,以一定排数和间距顺排排列成方形的纤维束。其轴向尺度远大于径向尺度,且玄武岩纤维为各向同性的玻璃态结构。因此,可以将空气横掠纤维束换热的三维模型简化为如图 1 所示的二维模型。

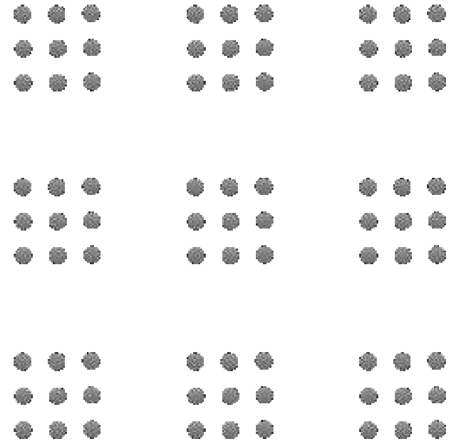


图 1 纤维束排列二维模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional model of fiber bundle arrangement

同时,作出假设:(1)密度为恒定值,不随温度变化;(2)空气在工作温度范围内可以认为是热辐射的透明体,故忽略辐射换热的影响,只考虑对流换热;(3)玄武岩纤维表面较为光滑,其表面粗糙度在纳米级尺度,因此可以忽略表面粗糙度对流动和传热的影响^[19-21]。

该过程可简化为二维层流且流体不可压缩的数

值模型,其无量纲控制方程如下:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial u^* u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^* u^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial u^* v^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^* v^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) \tag{3}$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (u^* T^*)}{\partial x^*} + \frac{\partial (v^* T^*)}{\partial y^*} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \tag{4}$$

式中: u^* — x 方向无量纲速度分量; v^* — y 方向无量纲速度分量; p^* —无量纲压力; T^* —无量纲温度; Re —雷诺数; Pr —普朗特数。

1.2 边界条件设置

采用双精度求解器,使用基于压力-速度耦合的 SIMPLE 算法以及较高精度的基于最小二乘单元的梯度插值算法进行数值仿真。同时,采用二阶迎风格式的动量方程,具有更小的截断误差。

流道计算域的入口边界条件为速度入口,流道计算域的出口边界条件为压力出口。计算域边界除入口端和出口端外均设置为对称边界条件,流体与固体的交界面设置为耦合边界条件。设置了两种壁面边界条件:不考虑稀薄效应时,壁面为速度无滑移,温度无跳跃的边界条件,即壁面处流体速度为零,壁面处流体温度等于玄武岩纤维的温度;在滑移边界条件的情况下,编写 Fluent UDF 程序,根据分子动力学推导出的速度滑移和温度跳跃公式计算得到壁面处流体的速度和温度并添加到壁面边界条件。

以 Nu 减小的百分比作为滑移流区稀薄效应对纤维束间流道对流换热影响的评价指标。模拟分为加入了速度滑移和温度跳跃的边界条件和不考虑稀薄效应的无滑移边界条件两种情况,对比 Nu 的模拟结果,计算两种边界条件下 Nu 差值占无滑移边界 Nu 的百分比,来评估滑移边界条件对空气与纤维束换热的影响。

Nu 计算公式为:

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \tag{5}$$

式中: h —流固表面对流换热系数; λ —流体的导热系数; d —纤维束直径。

流体的最大流速为 5 m/s,纤维束的最大直径为 100 μm ,动力粘度最低值为 $1.857 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。计算得到最大雷诺数为 $Re = 5.38$,因此选择层流模型。

1.3 网格无关性验证

使用 Ansys workbench 软件自带的 meshing 模块进行网格划分,采用四面体网格,通过设置不同的网格尺寸,对物理模型进行了网格无关性验证,验证结果如图 2 和表 1 所示。

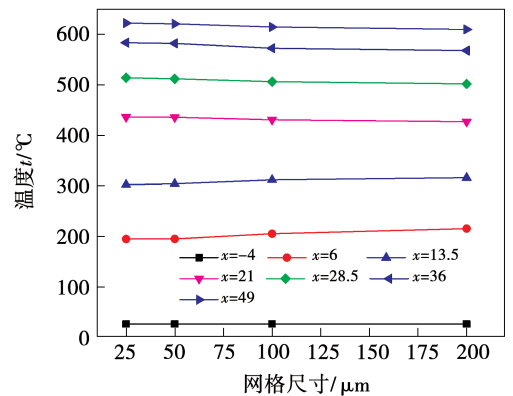


图 2 不同网格尺寸的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution under different grid sizes

表 1 以最小网格尺寸壁面温度为基准的各网格尺寸壁面温度的相对误差

Tab. 1 Relative error of wall temperature under each grid size based on the wall temperature at the minimum grid size

网格尺寸/ μm	相对误差/%						
	$x = -4$	$x = 6$	$x = 13.5$	$x = 21$	$x = 28.5$	$x = 36$	$x = 49$
50	0.012	0.111	0.574	-0.108	-0.411	-0.230	-0.252
100	-0.004	5.355	3.145	-1.241	-1.495	-1.899	-1.248
200	0.211	10.543	4.545	-2.125	-2.356	-2.700	-2.032

由表 1 可以看出,在网格尺寸为 200 和 100 μm 时,误差较大,最大误差分别为 10.5% 和 5.3%,在网格尺寸为 50 μm 时,误差大幅减小,最大误差为 0.57%,小于 1%。

1.4 模型验证

在固体纤维束的工作温度范围内选取 27, 200, 400, 600 和 800 $^{\circ}\text{C}$ 5 种工况,流体速度取 2 m/s,对流体横掠直径 20 μm 的单根纤维的换热进行了无滑移边界条件和滑移边界条件下的数值模拟。

圆柱绕流强制对流层流条件下 Nu 经验关联式为^[22]:

$$Nu = 0.989 Re^{0.33} \cdot Pr^{0.34} \quad (6)$$

由经验关联式(6)计算得到 Nu ,与无滑移边界条件下模拟结果对比如表 2 所示。

表 2 无滑移边界条件与经验关联式计算的壁面平均 Nu 对比

Tab. 2 Comparison of the non-slip boundary condition Nu and the average Nu of the wall calculated by the empirical correlation formula

无滑移边界条件	经验关联式	相对误差/%
1.137	1.141	0.43
1.023	1.018	-0.51
0.948	0.944	-0.46
0.897	0.896	-0.06
0.859	0.862	0.29

在无滑移边界条件下的模拟结果和经验关联式得到的计算值较为接近,最大相对误差为 -0.51%,证明了无滑移边界条件模拟结果的准确性,从而验证了数值模型的建立和模拟过程的准确性。

2 结果及分析

2.1 不同流体温度下的滑移速度和跳跃温度

由于滑移流区速度滑移和温度跳跃效应的影响,纤维壁面的流体速度不再为 0 m/s,流体温度 t 不再等于壁面温度 t_w 。不同温度下滑移流区流体横掠单根纤维换热产生的壁面滑移速度 v_w 如图 3 所示。随着温度和克努森数 Kn 的升高,壁面滑移速度增大。

不同温度下,滑移流区流体横掠单根纤维换热产生的壁面跳跃温度 t_j 如图 4 所示,随着温度和克

努森数 Kn 的升高,壁面处流体温度与壁面温度的温差增大。

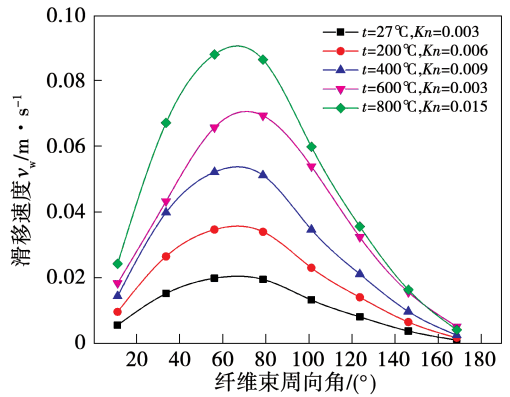


图 3 不同温度下纤维壁面滑移速度

Fig. 3 Slip velocity of fiber wall surface at different temperatures

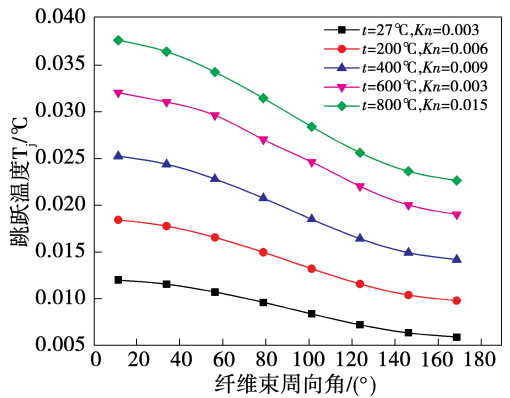


图 4 不同温度下纤维壁面跳跃温度

Fig. 4 Jumping temperature of fiber wall surface at different temperatures

2.2 滑移边界条件对换热的影响

2.2.1 不同壁面温度

不同温度下纤维壁面平均 Nu 如图 5 所示。添加了滑移边界条件的壁面 Nu 要小于无滑移边界条件的壁面 Nu ,且随着壁面温度的升高壁面 Nu 的差值不断增大。壁面的速度滑移使流动阻力降低、增强了换热,而温度跳跃现象引起了附加热阻、削弱了换热,温度跳跃较速度滑移的影响更大。因此,总体上添加滑移边界条件后,壁面 Nu 下降。

在最高工作温度 800 $^{\circ}\text{C}$ 下,滑移流区稀薄效应影响最大,使壁面 Nu 下降了 2.8%。温度的升高导致了壁面滑移速度和跳跃温度增大,从而使滑移边

界条件对换热的削弱作用更显著。

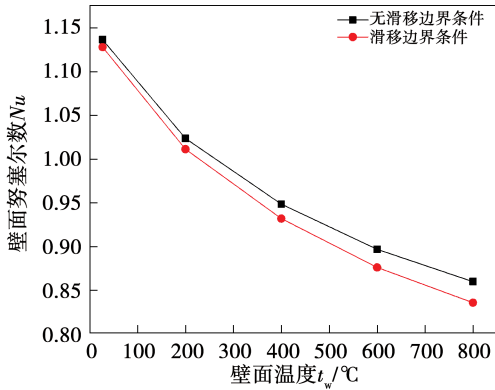


图5 不同温度下纤维壁面平均 Nu

Fig.5 Average Nu of fiber wall surface at different temperatures

2.2.2 不同排数

在温度为 800 °C、纤维中心间距为 2 倍纤维直径且流速为 2 m/s 的工况下,不同纤维排数的纤维束的壁面平均 Nu 的模拟结果如图 6 所示。随着纤维束中纤维排数的增加,壁面平均 Nu 下降。添加了滑移边界条件后,相较于无滑移边界条件下的壁面 Nu,前者的壁面 Nu 有所下降,但下降程度小于单根纤维模拟的情况,且下降的程度随着排数的增加而减小。

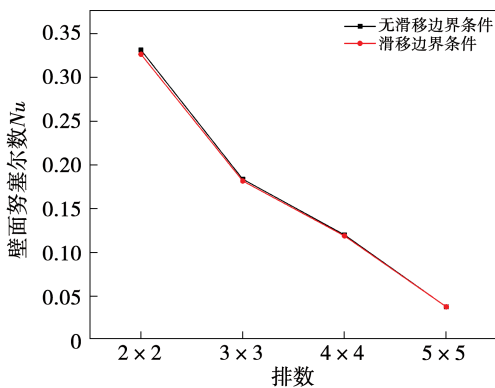


图6 不同排数纤维束壁面平均 Nu

Fig.6 Average Nu of wall surface of fiber bundles with different rows

观察 3 × 3 排的纤维束中不同纤维的壁面滑移速度和跳跃温度,相比于外围的纤维,处于中间位置纤维的壁面滑移速度和跳跃温度非常小。分析原因:由于阻力的影响,纤维束内部流道的空气流速很

小,内部纤维壁面流体的温度梯度和速度梯度很小,因此相比于外围纤维,内部纤维的壁面滑移速度和跳跃温度很小,添加了滑移边界条件后对 Nu 的影响也很小;随着排数的增加,处于内部的纤维数量占比增加,因此滑移条件对计算结果的影响随着排数增加而减小。纤维束在 5 × 5 排时,添加滑移条件和不添加滑移条件的壁面 Nu 几乎相同,相对偏差为 -0.08%。因此,在 2 m/s 的速度的工况下,由 20 μm 的纤维组成的纤维束排数在大于等于 5 排后,其稀薄效应对壁面 Nu 的影响可以忽略。

2.2.3 不同间距

在温度为 800 °C、纤维排数为 3 × 3 排及流速为 2 m/s 的工况下,纤维中心间距分别为纤维直径 d 的 2,3,4 和 5 倍时采用无滑移边界条件和滑移边界条件的壁面 Nu 对比如图 7 所示。

随着间距的增加,纤维束的 Nu 增大,添加滑移边界条件后,Nu 的减小程度也随之增加。在间距为 5d 时,Nu 下降程度最大,达到了 -1.74%。这是因为随着间距的增加,纤维束内部流道的阻力减小,速度梯度和温度梯度增大,滑移速度和跳跃温度随之增大,滑移边界条件的影响增大。

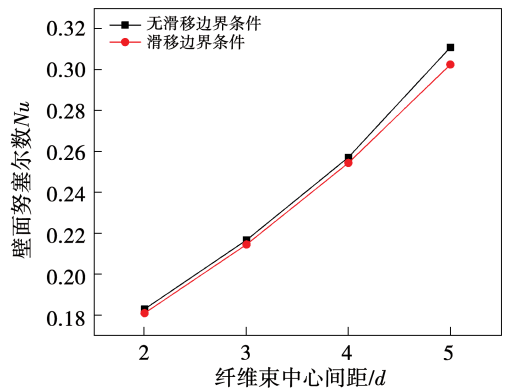


图7 不同纤维束中心间距纤维束壁面平均 Nu

Fig.7 Average Nu of wall surface of fiber bundles with different fiber center spacings

2.2.4 不同速度

温度为 800 °C,纤维排数为 3 × 3 排,纤维中心间距为 2d,分别对流速 v 为 2,3,4 和 5 m/s 工况下纤维束流道的稀薄效应加以探究,模拟结果如图 8 所示。

随着速度的提高,滑移边界条件下的壁面 Nu 的下降程度并未有明显改变。这是因为,速度的增加对外围纤维的壁面速度滑移影响较大,速度滑移增加,壁面 Nu 下降程度减小。但由于纤维间距较小,阻力影响较大,纤维内部的流固换热并没有明显改善,因此温度跳跃现象的影响没有随着气体流速增加而显著增加。因此,速度滑移的增加使得壁面 Nu 下降的百分比减小,但是由于速度滑移的影响没有温度跳跃的大,总体上壁面 Nu 并没有明显升高。

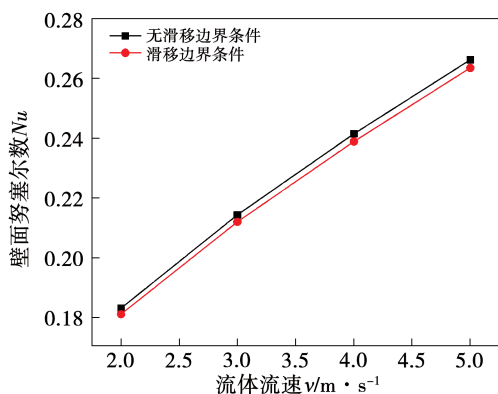


图8 不同流速下纤维束壁面平均 Nu

Fig. 8 Average Nu of wall surface of fiber bundles at different flow rates

3 结论

采用 Ansys Fluent 17.0 软件,以壁面 Nu 下降的百分比为评价指标,分析了温度、纤维排数、纤维中心间距、流速条件及滑移边界条件对空气横掠纤维束换热的影响,主要结论为:

(1) 滑移边界条件会降低 Nu ,壁面温度跳跃造成的附加热阻对传热的削弱作用大于速度滑移减小流动阻力对传热的增强作用。

(2) 温度的增加导致壁面的滑移速度和跳跃温度增大,纤维中心间距的增加减小了流阻,改善内部流场。故随着温度和纤维中心间距的增加, Nu 下降程度增加。

(3) 随着排数的增加,流阻增大,纤维束内部流速降低,速度梯度和温度梯度减小,导致位于纤维束内部的纤维壁面滑移速度和跳跃温度很小,平均 Nu

下降程度减小。

(4) 随着流速的增加,速度滑移的影响增大,增强了传热,因此 Nu 下降程度有轻微减小。

(5) 由滑移流区稀薄效应对玄武岩纤维束微流道换热的影响规律可以分析得出,在实际工况下的所有玄武岩纤维束蓄热体的构造中,直径为 $20 \mu m$,排数小于 5 排的纤维束,添加了滑移边界条件的 Nu 下降百分比大于 1%,需要在数值模拟中考虑滑移边界条件的影响;直径大于 $20 \mu m$,排数大于等于 5 排的纤维束,添加了滑移边界条件的 Nu 下降百分比小于 1%,可以忽略滑移边界条件的影响。

参考文献:

- [1] TANG S, DENG J, WANG S, et al. Comparison of thermal and ablation behaviors of C/SiC composites and C/ZrB(2)-SiC composites[J]. Corrosion Science, 2009, 51(1): 54-61.
- [2] 李茂德,程惠尔. 高温空气燃烧系统中陶瓷蓄热体传热特性分析研究[J]. 热科学与技术, 2004(3): 255-260.
LI Mao-de, CHENG Hui-er. Theoretical analysis of heat transfer of ceramic regenerator in high temperature air combustion system[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004(3): 255-260.
- [3] FEI Yuan, WANG Hong-bing, ZHOU Pei-ling, et al. Heat transfer performances of honeycomb regenerators with square or hexagon cell opening [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 790-798.
- [4] 封红燕. 蓄热式换热器蓄热体强化传热的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
FENG Hong-yan. Study on heat transfer enhancement about the regenerator of regenerative heat exchanger [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [5] 郑志伟,仇性启,祁风雷,等. 蜂窝陶瓷蓄热体传热和阻力特性实验研究[J]. 石油化工设备, 2013, 42(1): 9-13.
ZHENG Zhi-wei, QIU Xing-qi, QI Feng-lei, et al. Experimental research on heat transfer and resistance characteristics of honeycomb ceramic regenerator[J]. Petro-chemical Equipment, 2013, 42(1): 9-13.
- [6] 王艳,白凤武,王志峰. 高温空气在蜂窝陶瓷体内蓄热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9): 1541-1544.
WANG Yan, BAI Feng-wu, WANG Zhi-feng. Investigated of heat transfer of high temperature air in honeycomb regenerator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1541-1544.
- [7] GUO Zeng-yuan, LI Zhi-xin. Size effect on microscale single-phase flow and heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass

- Transfer, 2003, 46(1): 149 - 159.
- [8] 陈 熙. 动力论及其在传热与流动研究中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
CHEN Xi. Dynamic Theory and its application in the research of heat transfer and flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [9] COLIN S, KANDLIKAR S G, GARIMELLA S, et al. Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels [M]. Oxford: Butterworth Heinemann, 2014.
- [10] 谢 翀, 樊 菁, 沈 青. 微槽道气体流动的统计模拟[J]. 计算物理, 2002(5): 377 - 382.
XIE Chong, FAN Jing, SHEN Qing. Rarefied gas flows in microchannels [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2002(5): 377 - 382.
- [11] DONG Xing-du, SUZUKI K. Direct numerical simulation of turbulent flows in the slip flow regime [J]. Taylor & Francis, 2004, 5(1): 21.
- [12] SHIRINY A, BAYAREH M, NADOOSHAN A A, et al. Forced convection heat transfer of water/FMWCNT nanofluid in a microchannel with triangular ribs [J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(12): 1 - 11.
- [13] SAJADIFAR S A, KARIMIPOUR A, TOGHRAIE D. Fluid flow and heat transfer of non-Newtonian nanofluid in a microtube considering slip velocity and temperature jump boundary conditions [J]. European Journal of Mechanics/B Fluids, 2017, 61: 25 - 32.
- [14] XIE Fu-shou, LI Yan-zhong, WANG Xing-bao, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of low pressure gas in slip flow regime [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 124: 131 - 145.
- [15] DHANG V, MITTAL G, RHEE K Y, et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites [J]. Composites Part B-engineering, 2015, 73: 166 - 180.
- [16] 董 涛, 陈运生, 杨朝初, 等. 仿蜂巢分形微管道网络中的流动与换热[J]. 化工学报, 2005(9): 1618 - 1625.
DONG Tao, CHEN Yun-sheng, YANG Chao-chu, et al. Flow and heat transfer in comby fractal microchannel network [J]. Journal of Chemical Industry, 2005(9): 1618 - 1625.
- [17] MILITKY J, KOVARIR V. Ultimate mechanical properties of thermally exposed basalt filament yarns [J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology, Section A: Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2000, 354(1): 55 - 62.
- [18] HOFFMANN J G. Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system [J]. Combustion and Flame, 1997, 111(1): 32 - 46.
- [19] TANG G H, ZHUO L, HE Y L, et al. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(11 - 12): 2282 - 2295.
- [20] 张晓颖, 荣新山, 徐吉成, 等. 玄武岩纤维表面改性对生物膜附着性能的影响 [J]. 材料工程, 2019, 47(5): 129 - 13.
ZHANG Xiao-ying, RONG Xin-shan, XU Ji-cheng, et al. Effect of surface modification of basalt fiber on biofilm attachment [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(5): 129 - 13.
- [21] LIU Jian-xun, CHANG Zhong-chen, WANG Lian-bo, et al. Exploration of basalt glasses as high-temperature sensible heat storage materials [J]. ACS Omega, 2020, 5(30): 19236 - 19246.
- [22] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer (fourth edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

(丛 敏 编 辑)