

无反向流脉动条件下波纹管内流体传热及阻力特性研究

张亮,张安龙,曲平平,荆宇燕

(燕山大学 车辆与能源学院,河北 秦皇岛 066004)

摘要:利用数值模拟与实验相结合的方法,在无反向流脉动条件下,分析脉动参数雷诺数 Re 、斯特劳哈尔数 St 及振动分率 P 对波纹管内流体的传热和阻力特性的影响。入口速度为脉动速度,入口温度设为 300 K,出口设为自由出口,壁面采用恒温壁面,温度为 350 K。研究表明:波纹管内流体处于层流状态时,随着 Re 的增大,传热强化幅度不断增大;流体处于湍流状态时,传热强化幅度随 Re 的增大而降低;随着 St 的增加,传热强化幅度增大;振动分率 P 对传热强化幅度的影响不明显;平均摩擦系数随着 Re 的增大而减小,随着振动分率 P 的增加而小幅度增大,在一个脉动周期内摩擦系数呈正弦规律变化,且随着 St 的增大发生明显变化,但平均值几乎不变。

关键词:无反向流;脉动流场;波纹管;强化传热;摩擦系数

中图分类号:TK124

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.017

[引用本文格式]张亮,张安龙,曲平平,等.无反向流脉动条件下波纹管内流体传热及阻力特性研究[J].热能动力工程,2021,36(11):120-125. ZHANG Liang, ZHANG An-long, QU Ping-ping, et al. Study on heat transfer and resistance characteristics of fluid in bellows without reverse flow pulsation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 120-125.

Study on Heat Transfer and Resistance Characteristics of Fluid in Bellows without Reverse Flow Pulsation

ZHANG Liang, ZHANG An-long, QU Ping-ping, JING Yu-yan

(College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, China, Post Code: 066004)

Abstract: Using the combination method of numerical simulation and experiment, under the condition of no reverse flow pulsation, the effects of pulsation parameters including Reynolds number Re , Strauhal number St and vibration fraction P on the heat transfer and resistance characteristics of fluid in bellows were analyzed. The inlet speed was pulsating speed, the inlet temperature was set to 300 K, the outlet was set to free outlet, and the wall adopts constant temperature wall with a temperature of 350 K. The results show that when the fluid in the bellows is in the laminar flow state, the heat transfer enhancement amplitude increases with the increase of Re continuously. When the fluid is in turbulent state, the heat transfer enhancement amplitude decreases with the increase of Re . With the increase of St , the heat transfer enhancement amplitude increases. The influence of vibration fraction P on heat transfer enhancement amplitude is not obvious. The average friction coefficient decreases with the increase of Re and increases slightly with the increase of vibration fraction P . The friction coefficient changes sinusoidally in a pulsating cycle, and changes significantly with the increase of St , but the average value hardly changes.

Key words: no reverse flow, pulsating flow field, bellows, enhanced heat transfer, friction coefficient

引 言

波纹管作为一种新型换热管,具有结构简单、容易产生流动分离和能独立支撑等优势。文献[1-5]发现波纹管独特的管型结构能够增强管内流体的湍流度,从而降低管壁之间的传热热阻,达到强化换热的目的。脉动流场具有强化流动分离的特点,文献[6-7]指出,脉动流场下质量传递强化的根本原因是脉动流场使得波壁管内流体的漩涡强度得到加强,脉动参数 St 对质量传递特性也具有较强的影响,在质量传递过程中存在一个最佳 St 值,该 St 值随雷诺数的减小而缓慢增大。文献[8]指出,在脉动流场下波壁管内流体即将进入过渡流时,管内流体的质量传递特性最好,在一个振荡周期中存在稳定与不稳定两种状态。在脉动流场下的传热及流动特性方面,文献[9]发现轴对称障碍管比圆管的传热效果好,振幅与振动频率对传热效果影响显著。文献[10]利用数值模拟的方法探索了脉动流场下平直通道内流体的流动与换热特性,发现阻力系数呈正弦规律变化,且阻力系数的变化幅度与脉动振幅成正比。

目前,对脉动流场下波纹管内流体的传热及阻力特性研究较少。由于有反向流脉动流场比无反向流脉动流场更加复杂与紊乱,而且在工程实际应用中,会导致整个输运系统的不稳定,不符合稳态下高效热质传递的要求^[11]。故本文重点研究了无反向流脉动流场下波纹管的换热及阻力特性。

1 几何模型

波纹管结构如图 1 所示。波纹管两端分别留有 14 mm 直管壁作为管子的入口段与出口段,中间共有 14 个波段。管子的波长 $\lambda = 14$ mm,波幅 $A = 3.5$ mm,管子总长 $L = 224$ mm,管子最大直径 $D_{\max} = 10$ mm,最小直径 $D_{\min} = 3$ mm。

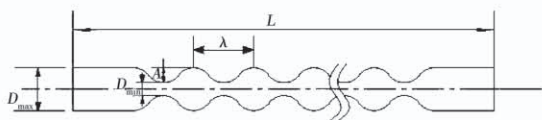


图 1 波纹管结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of bellows structure

2 无反向流脉动流场的形成

脉动流是定常流与振动流相叠加而形成的,其流量 Q_i 可以表示为:

$$Q_i = Q_s + Q_0 \sin(2\pi t/T) \quad (1)$$

式中: Q_s —一定常流场下的流量; Q_0 —振动流的最大流量。

实验系统如图 2 所示。脉动流场是在波壁管入口前端增加了一个活塞泵装置,定常流动由离心泵提供,并通过转子流量计来控制流速。强制振动流由可变速马达带动 Scotch-Yoke 装置驱动的活塞泵提供,其冲程和频率可以根据实验方案进行调节。

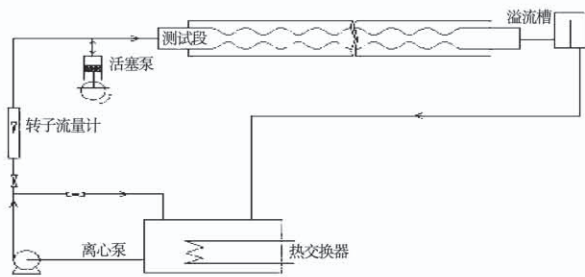


图 2 实验系统简图

Fig.2 Schematic diagram of experimental system

无反向流脉动流场振动分率 $P < 1$, 即定常流的流量比振动流的最大流量大, 所以流动过程不会出现反向流, 其形成过程如图 3 所示。

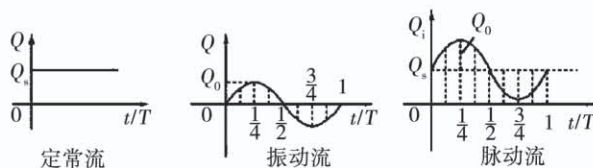


图 3 无反向流脉动流场的形成

Fig.3 Formation of flow field without reverse flow pulsation

3 网格无关性验证及边界条件设定

由于波纹管的外形曲率变化较大,使得管内流体的流场变化剧烈,因此网格类型采用适应性更强的四面体非结构性网格。为进行网格无关性验证,对该波纹管划分 7 种不同数量的网格,网格数量从 3.5 万逐渐上升到 24 万左右。进行模拟计算后,得到波纹管的对流传热系数随网格数量的变化规律如

图 4 所示。综合考虑计算周期、精度以及设备等因素,将网格数量控制到 20 万左右。

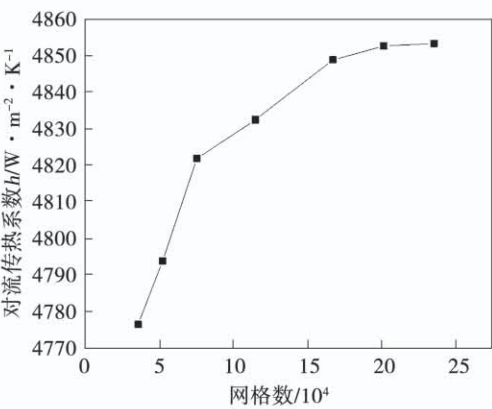


图 4 对流传热系数随网格数量的变化
Fig. 4 Variation of convective heat transfer coefficient with the number of grids

边界条件设置:管内流体为水,入口速度采用 UDF 脉动速度,入口温度为 300 K,出口设为自由出口,壁面固定,温度设为 350 K。湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型,压力耦合求解采用 SIMPLE 算法^[12]。入口脉动速度可定义为:

$$u_i = \frac{\mu Re}{\rho D_{\max}} + \frac{P \mu Re}{\rho D_{\max}} \sin\left(\frac{\mu St \cdot Re}{\rho D_{\max}^2} \cdot t\right) \quad (2)$$

式中: Re —雷诺数; St —斯特劳哈尔数; P —振动分率; $D_{\max}$ —波纹管最大直径,mm; μ —流体的动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ —流体密度, kg/m^3 。

对于所选模型需要进行验证,图 5 为不同湍流模型下 $t=3/4T$ 时,实验结果与数值模拟结果的对比图。选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型使得模拟结果与实验结果吻合度更高,所以采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行模拟计算。

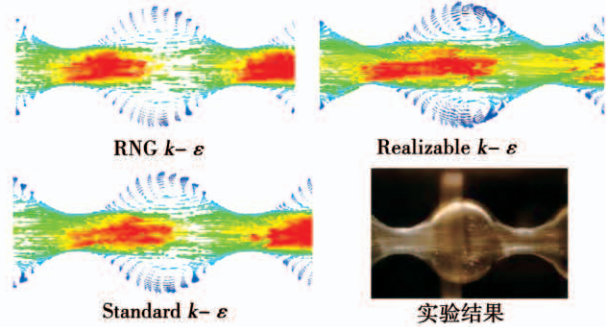


图 5 模拟结果与实验结果的流场对比
Fig. 5 Comparison of flow fields by simulated and experimental results

4 计算结果分析

4.1 流场

图 6 与图 7 分别代表 $Re=400$ 定常流场下与 $Re=400, P=0.6, St=0.5$ 时脉动流场下的波纹管内速度矢量图。在 $t=1/8T \sim 2/8T$ 时,波纹管内平均流速增大,处于加速区间;在 $t=2/8T \sim 6/8T$ 时,波纹管内流体平均速度减小,处于减速区间;而在 $t=6/8T \sim 1T$ 时,管内流体平均速度增加,处于加速区间。在加速期间,波纹管内漩涡处在波峰内部,没有与主流发生掺混,处于稳定结构状态;而在减速区间里,波纹管内漩涡与主流区发生了交换,此时处于不稳定状态。由于脉动流场下在减速区间波纹管内流体处于不稳定状态,导致波纹管内流体的混合度增强,从而降低了管壁间的热阻,强化了流体传热。

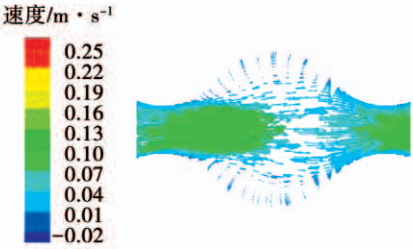


图 6 波纹管内的定常流场
Fig. 6 Steady flow field in bellows

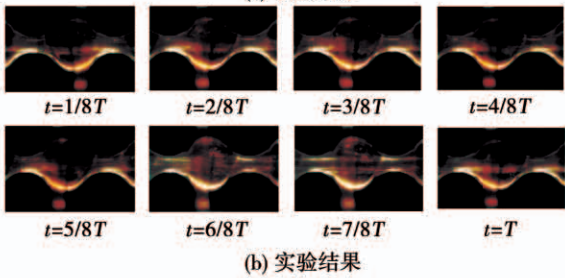
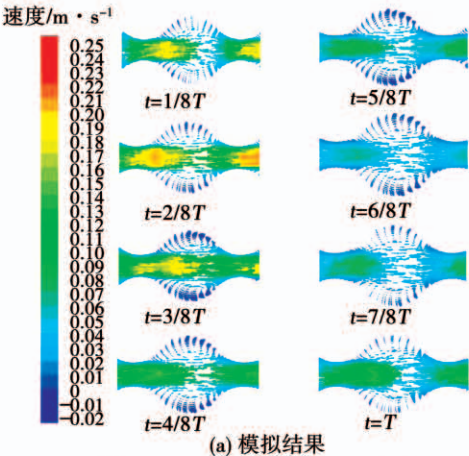


图 7 波纹管内的脉动流场
Fig. 7 Pulsating flow field in bellows

4.2 温度场

图 8 与图 9 分别为 $Re = 400$ 时的定常流场与 $Re = 400, P = 0.6, St = 0.5$ 时脉动流场下波纹管内流体的温度云图。定常流场下波纹管内流体的平均温度比脉动流场下要高,说明脉动流场下的换热效果更好。脉动流场下, $t = T$ 时刻波纹管内流体的平均温度与定常流场下管内流体平均温度相近。



图 8 定常流场下温度场
Fig. 8 Temperature field in steady flow field

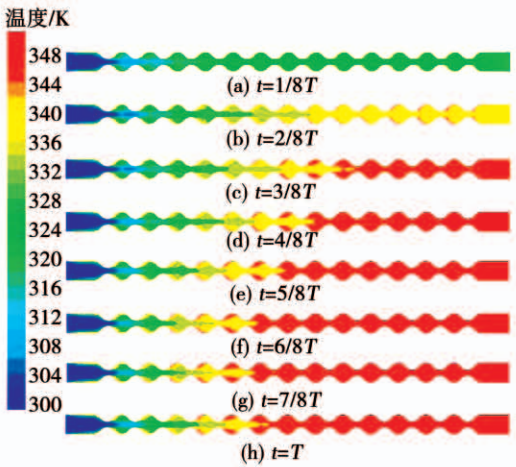


图 9 脉动流场下的温度云图
Fig. 9 Temperature nephogram in pulsating flow field

4.3 传热强化系数

定义无量纲传热强化系数 E_h :

$$E_h = \frac{Nu_m}{Nu_s}$$

(3)

式中: Nu_m —脉动周期下的平均 Nu ; Nu_s —相对应稳态时的 $Nu^{[13]}$ 。

图 10 为 $Re = 400$ 时,无反向流脉动流场下 P 与 St 对 E_h 的影响。 E_h 均大于 1,表明无反向流脉动流场强化了波纹管内流体的换热。同时, $P < 1$ 时,当 P 发生变化, E_h 变化不大。这是因为管内流体不存在反向流,此时定常流的质量流率影响传热强化效

果,所以强化传热效果不明显;随着 St 的增加, E_h 不断增大,即传热效果逐渐增强。这是因为增大 St 会导致脉动流的频率增加,致使波纹管内流体速度梯度的变化速率增大,从而产生更多的漩涡,增强管内流体的湍流度,增强了传热效果。

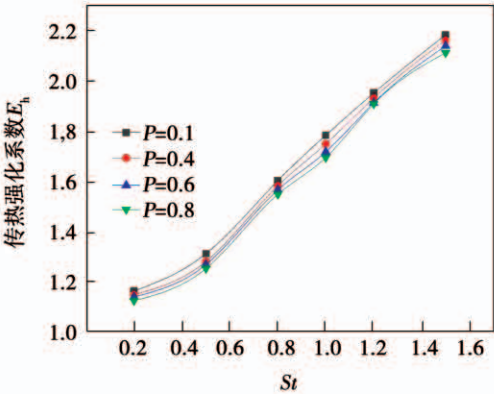


图 10 P 与 St 对 E_h 的影响
Fig. 10 Effects of P and St on E_h

图 11 为无反向流脉动流场下振动分率 $P = 0.4, St = 0.5$ 时, Re 对 E_h 的影响。当波纹管内流体 $Re < 200$ 时,随着 Re 的增加, E_h 逐渐增大,即强化传热的效果逐步增强;而当 $Re > 400$ 时,随着 Re 的增加, E_h 逐渐降低,强化传热效果逐步减弱。这是因为定常流场 $Re > 400$ 时,波纹管内流体流动处于湍流状态,此时波纹管内流体本身具有很高的湍流度,传热效果较好,压缩了脉动流场的强化空间。因此,随着 Re 的增大,波纹管内流体的传热效果不仅没有得到加强,反而有所减弱。

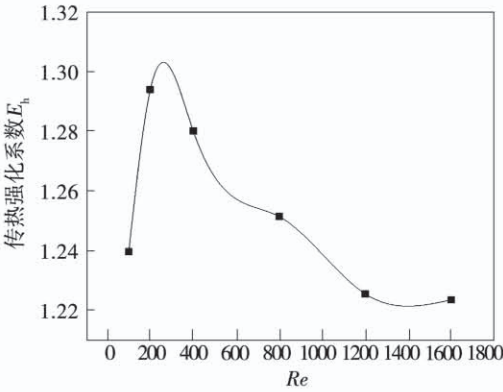


图 11 Re 对传热强化系数 E_h 的影响
Fig. 11 Effect of Re on heat transfer enhancement coefficient E_h

4.4 摩擦阻力系数

摩擦阻力系数的表达式为:

$$f = \frac{D_{\max}}{2L} \frac{\Delta p}{\rho u^2} \quad (4)$$

式中: L —波纹管管长, m; Δp —进出口压降, Pa; u —流体平均速度, m/s。

对摩擦阻力系数进行误差分析^[14], $Re = 100$ 时, 采集了 5 组压降数据, 其相对误差公式为:

$$\begin{aligned} \frac{U_f}{f} = & \left[\left(\frac{\partial \ln f}{\partial D_{\max}} \right)^2 \cdot U_{D_{\max}}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial \Delta p} \right)^2 \cdot U_{\Delta p}^2 + \right. \\ & \left(\frac{\partial \ln f}{\partial \rho} \right)^2 \cdot U_{\rho}^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial u} \right)^2 \cdot U_u^2 + \\ & \left. \left(\frac{\partial \ln f}{\partial L} \right)^2 \cdot U_L^2 \right]^{0.5} = 2.05\% \end{aligned} \quad (5)$$

式中: U —不确定度。

因此在 $Re = 100$ 时, f 的相对误差为 2.05%, 满足一般工程领域的精度要求。

图 12 为定常流场下 $Re = 100$ 与脉动流场下 $Re = 100, P = 0.4$ 时, 一个周期内 St 对 f 的影响。从图中可以看出, 在 $St < 2$ 时, 几条摩擦系数曲线基本重合, 表明随着 St 的增加, 一个脉动周期内的摩擦系数几乎没有变化, 一个脉动周期内摩擦系数整体呈正弦规律变化; 而在 $St > 5$ 时, 随着 St 发生变化, 一个脉动周期内摩擦系数明显发生变化。在无反向流脉动流场下, 一个脉动周期内的瞬时摩擦系数虽然与定常流场的摩擦系数差异较大, 但与定常流场相比, 一个脉动周期内的平均摩擦系数差别不大。这是由于当 St 较小时, 改变 St 对一个脉动周期下波纹管内波峰内部的漩涡影响较小, 故导致流体的壁面剪切力的变化不大; 而当 St 较大时, 增大 St 会导致波纹管内的流体的涡强度增大, 从而导致壁面剪切力增大, 最终一个周期内的摩擦系数会明显发生变化, 但由于其呈现的是正弦规律分布, 所以平均摩擦系数变化不大。

图 13 是定常流场下与无反向流脉动流场下 $St = 0.5$ 时, Re 与 P 对一个脉动周期内的平均摩擦系数 f_m 的影响。随着 Re 的增加, 平均摩擦系数在不断地下降, 而且其下降的幅度在减小。这是因为在 Re 较小时, 流体流动过程中, 粘性力占主导地位, 故摩擦系数受 Re 的影响较大, 而随着 Re 增大, 惯性力占

的比重越来越大, 波纹管内流体能够维持之前流动状态的能力更强, 故摩擦系数随 Re 的增加, 下降的幅度在减小。与定常流场下的摩擦系数相比, 无反向流脉动流场下的平均摩擦系数均比前者更大, 且随着 P 的增加小幅增大。

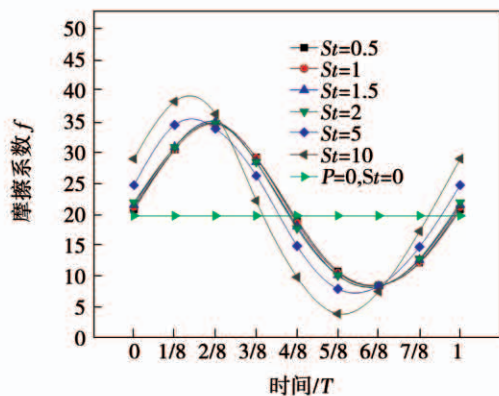


图 12 $Re = 100$ 时 St 对摩擦系数 f 的影响

Fig. 12 Effect of St on friction coefficient f when $Re = 100$

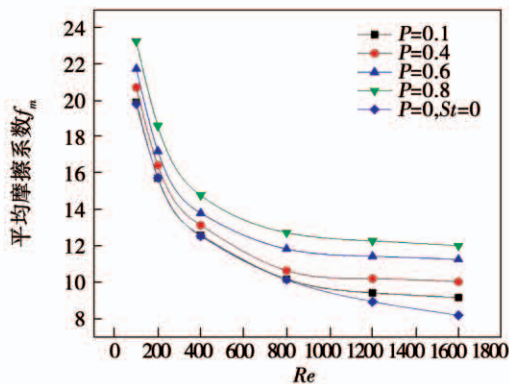


图 13 Re 与 P 对平均摩擦系数的影响

Fig. 13 Effects of Re and P on average friction coefficient

5 结 论

(1) 无反向流脉动流场下波纹管内流体的速度矢量图和温度云图与定常流场相比, 具有明显差异; 无反向流脉动流场下的波纹管内流体存在两种不同结构状态, 在减速区间主要是不稳定状态, 在加速区间主要是处于稳定结构状态。

(2) 无反向流脉动流场条件下, 在波纹管内流体处于层流状态时, 传热效果的强化幅度随着 Re 的增加而增加; 当流体处于湍流状态时, 传热强化幅度随 Re 的增大而降低, 且传热效果的强化幅度与 St

成正比;当 $P < 1$ 时,振动分率 P 对传热强化系数几乎没有影响。

(3) 无反向流脉动流场下,脉动参数 Re 、 P 、 St 对波纹管内流体的摩擦系数 f 均有影响。平均摩擦系数随着 Re 的增大而下降;随着振动分率 P 的增加,平均摩擦系数小幅增大;在较小 St 时,一个周期内的 f 呈正弦规律变化,随着 St 的增大 f 没有明显变化;而在较大 St 时, f 随着 St 的增加发生了明显的变化。与定常流场相比,在无反向流脉动流场下,随着 St 的增大,平均摩擦系数几乎不发生变化。

参考文献:

- [1] 吴金星,杨禹坤,倪 硕,等. 正弦波形管综合性能模拟及实验[J]. 化工进展,2017,36(8):2847-2853.
WU Jin-xing, YANG Yu-kun, NI Shuo, et al. Simulation and experiment on comprehensive performance of sine wave tube[J]. Progress in Chemical Industry, 2017, 36(8): 2847-2853.
- [2] 曾 敏,石 磊,陶文铨. 波纹管管内层流流动和换热规律的实验研究及数值模拟[J]. 工程热物理学报,2006,27(1):142-144.
ZENG Min, SHI Lei, TAO Wen-quan. Experimental study and numerical simulation of laminar flow and heat transfer in bellows[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 142-144.
- [3] 吴 峰,曾 敏. 波纹管管内流动与传热规律的数值计算[J]. 动力工程,2009,29(2):169-173.
WU Feng, ZENG Min. Numerical calculation of flow and heat transfer in bellows [J]. Power Engineering, 2009, 29(2): 169-173.
- [4] NISHIMURA T, OHORI Y, KAJIMOTO Y, et al. Mass transfer characteristics in a channel with symmetric wavy wall[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1985, 18(6): 550-555.
- [5] NISHIMURA T, KAJIMOTO Y, KAWAMURA Y. Mass transfer enhancement in channels with a wavy wall[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1986, 19(2): 142-144.
- [6] 贾宝菊,孙发明,卞永宁,等. 波壁管内的脉动流动及传质强化的数值模拟[J]. 化工学报,2009,60(1):6-14.

JIA Bao-ju, SUN Fa-ming, BIAN Yong-ning, et al. Numerical simulation of pulsating flow and mass transfer enhancement in a wave wall tube [J]. Journal of Chemical Engineering, 2009, 60(1): 6-14.

- [7] LEE B S, KANG I S, LIM H C. Chaotic mixing and mass transfer enhancement by pulsatile laminar flow in an axisymmetric wavy channel[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1999, 42: 2571-2581.
- [8] BIAN Y N, NISHIMURA T, KUNITSUGU K. Mass transfer enhancement in a wavy-wall tube by imposed fluid oscillation[J]. Fluid Mechanics and Transport Phenomena, 2003, 50: 762-770.
- [9] MACKLEY M R, STONESTREET P. Heat transfer and associated energy dissipation for flow in baffled tubes[J]. Chem. Eng. Sci., 1995, 50: 2211-2224.
- [10] 杨卫卫,何雅玲,徐 超,等. 平直通道中层流脉动流动的数值模拟[J]. 西安交通大学学报,2004,38(9):925-928.
YANG Wei-wei, HE Ya-ling, XU Chao, et al. Numerical simulation of pulsating flow in a flat channel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(9): 925-928.
- [11] BELLHOUSE B J, BELLHOUSE F H, CURL C M, et al. A high efficiency membrane oxygenator and pulsatile pumping system and its application to animal trials[J]. International Journal of Organs., 1973, 19: 72-79.
- [12] 龚 波. 波纹管传热与流动阻力的数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
GONG Bo. Numerical simulation of heat transfer and flow resistance in bellows[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [13] 何雅玲,杨卫卫,赵春风,等. 脉动流动强化换热的数值研究[J]. 工程热物理学报,2005,26(3):495-497.
HE Ya-ling, YANG Wei-wei, ZHAO Chun-feng, et al. Numerical study on heat transfer enhancement by pulsating flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 495-497.
- [14] 贾宝菊. 波壁管内的脉动流动及其传质特性的实验和数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2009.
JIA Bao-ju. Experimental and numerical simulation of pulsating flow and mass transfer characteristics in wavy wall tube[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.

(丛 敏 编辑)