

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.008

周期加热对倾斜槽道对流特性的影响

徐泊冰¹, 宁利中¹, 宁碧波², 田伟利³

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 嘉兴学院 建筑工程学院, 浙江 嘉兴 314001; 3. 上海大学 美术学院, 上海 200444)

摘要: 利用二维流体力学基本方程进行数值模拟, 讨论了 $Pr = 6.99$ 的流体的对流斑图及其相关特性。在长高比 $\Gamma = 40$ 的倾斜放置的矩形槽道中, 设定倾斜角度 20° , 左侧具有通过流动且底部周期加热。结果表明: 周期加热与通过流动作用下, 相对 Rayleigh 数一定时, Reynolds 数增大对流强度减弱, Nusselt 数减小, 对流稳定所用时间先增长后缩短, 槽道内最大垂直流速增大。Reynolds 数一定时, 相对 Rayleigh 数增大对流强度增强, Nusselt 数增大, 对流稳定所用时间增长, 槽道内最大垂直流速增大, 二分之一槽道高度处垂直流速增大。

关键词: 周期加热; 通过流动; 相对 Rayleigh 数; Reynolds 数; 对流斑图

中图分类号: O357

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)01-0059-06

Effect of periodic heating on convection characteristics of inclined channel

XU Bobing¹, NING Lizhong¹, NING Bibo², TIAN Weili³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Construction Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China;

3. Academy of Fine Arts, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The convection pattern of $Pr = 6.99$ fluid and its related characteristics are studied by numerical simulation of two-dimensional basic equations of fluid mechanics. The inclined angle is set at 20° in a rectangular channel with an aspect ratio of $\Gamma = 40$, the left side has a through flow and the bottom is heated periodically. The results show that under the action of periodic heating and through flow, the convection and the Nusselt number decrease with the increase of Reynolds number, that the time required for convection stabilization increases first and then decreases, and that the maximum vertical velocity increases with the increase of Reynolds number when reduced Rayleigh number is constant. When Reynolds number is fixed, the convection and the Nusselt number increase with the increase of reduced Rayleigh number, the time spent for convection stabilization increases, the maximum vertical velocity in the channel increases, and the vertical velocity increases at the half height of the channel.

Key words: periodic heating; through flow; relative Rayleigh number; Reynolds number; convection pattern

对流的运动方式有自然对流与强制对流^[1]。小到烧水产生对流, 大到大气环流、地幔内的热对流^[2-3]。为解释以上现象, 研究学者建立对流系统研究这些现象, Rayleigh-Bénard 对流系统(简称 RB 对流)就是之一^[4-7]。RB 对流实验简单、易于控制、对流运动方程精确等优点^[8-13]。1900 年 Bénard 在盛有薄流体层的水平金属板底部加热实

验中首次发现了热对流运动现象。1916 年 Rayleigh 等应用小扰动理论对底部加热的流体层进行了理论研究^[14], 发现流体层的稳定性是由无量纲参数, 即 Rayleigh 数 r 控制, 奠定了热对流研究基础, 并命名为 Rayleigh-Bénard 对流系统。

在原有 Rayleigh-Bénard 对流系统的基础上给左端部施加一个水平流动, 改变槽道的结构与实验

收稿日期: 2019-06-13; 网络出版日期: 2020-04-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200426.1524.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872164); 西北旱区生态水利国家重点实验室基金资助项目(2017ZZKT-2)

第一作者: 徐泊冰, 男, 硕士生, 研究方向为水力学与水利工程。E-mail: 1490741235@qq.com

通信作者: 宁利中, 男, 博士, 教授, 硕导, 研究方向为高速水力学与水利工程。E-mail: ninglz@xaut.edu.cn

条件,形成了一个的对流系统。利用这个新对流系统,研究者们探索了对流的线性斑图结构和非线性斑图结构的形成^[15-16],对流斑图的分区和结构^[17],进口条件对斑图选择的影响^[18-19],扰动的成长及时空结构的特性^[20],侧加热腔体的对流特性^[21]等。进一步,人们在前述的对流系统基础上,考虑倾斜槽道倾斜角的影响^[22]。为了探索更为复杂的对流特性,也为了适用实际应用中热源不均匀波动的特点,研究中把底板施加均匀加热改变为周期加热,把水平流动改变为具有倾斜角度的通过流动。目前对于底板周期加热且具有通过流动的研究成果较少,因此有必要对于这一问题进行探索。

本文主要研究一定倾斜角度的矩形槽道中,底部周期加热条件下,通过改变相对 Rayleigh 数 r 及 Reynolds 数 Re 的二维数值模拟,分析完整的矩形槽道内的对流特性以及其相关规律。

1 数学模型

1.1 模型的建立

本文建立的模型是倾斜放置的矩形槽道,见图 1,

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uw)}{\partial y} = -\frac{\partial p_{\text{eff}}}{\rho_0 \partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - g\alpha(T - T_0)\sin\theta \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(w^2)}{\partial y} = -\frac{\partial p_{\text{eff}}}{\rho_0 \partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + g\alpha(T - T_0)\cos\theta \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(wT)}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p_{\text{eff}} = p + \rho_0 g y \cos\theta - \rho_0 g x \sin\theta$; u, w 是平行和垂直于槽道长度方向的速度 (m/s); T 为温度场 (K); ρ 为密度 (kg/m^3); p 为压强 (Pa); g 为重力加速度 (m/s^2); ν 为运动黏性系数 (m^2/s); α 为体积膨胀系数 (K^{-1}); κ 为热扩散系数 (m^2/s); t 为时间 (s); θ 为倾斜角度 ($^\circ$); 下标 0 表示物理量的初始值。

1.3 边界和初始条件

槽道上下壁面是固定的,水平流速和垂直流速在壁面上为 0,故在 $y = 0, d$ 时, $u = w = 0$ 。

对槽道进行周期性加热,上壁面温度为定值,下壁面温度符合正弦周期的变化。在 $y = d$ 时, $T = T_{\text{top}}$ 。在 $y = 0$ 时, $T_{\text{bot}} = T_{\text{top}} + \frac{\Delta T_{\text{max}}}{2} \left(1 + \sin \frac{2\pi}{20} \frac{x}{d} \right)$, 其中 $\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{botmax}} - T_{\text{top}}$, T_{botmax} 是下壁面温度的最大值。

腔体具有通过流动。在 $x = 0$ 处,左端部进口流速为 $u = 4u_{\text{max}} \frac{y}{d} \left(1 - \frac{y}{d} \right)$, $w = 0$ 。在 $x = 0$ 处,

在长高比 $\Gamma = 40$ 并且 $\theta = 20^\circ$ 的窄长槽道中充满 Prandtl 数 $Pr = 6.99$ 的水。在左壁面有通过流动,下壁面周期加热的条件下,因上下壁面的温度差异而形成温差,当下壁面的温度达到某一值时,通过矩形槽道内的流体就会产生对流运动。

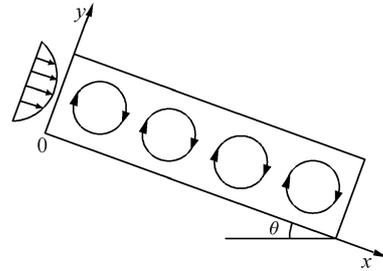


图 1 对流模型
Fig. 1 Convection model

1.2 基本方程

对矩形槽道的自然对流换热进行数值计算时,为了更加方便处理由于温差而引起的浮升力项,采用 Boussinesq 假设^[23]。流体力学方程组^[24]为:

左端部进口的温度为 $T = T_0 + \Delta T \left(0.5 - \frac{y}{d} \right)$ 。在 $x = L_x$ 处,右端部出口为自由出流, $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0$, 其中 L_x 为腔体长度。

初始条件为 $u = w = 0$, 初始温度取平均值 ($T_0 = 293.15\text{K}$)。

对流系统由以下无因次参数控制: $Re = \frac{u_{\text{max}} d}{\nu}$;

θ (本文 $\theta = 20^\circ$); $r = Ra/Ra_c$ 其中 $Ra = \frac{g\alpha\Delta T d^3}{k\nu}$, $Ra_c = 1708$; $Pr = \nu/\kappa$, κ 为热扩散系数, $\kappa = \lambda/(\rho_0 C_p)$, λ 为热传导系数, C_p 为定压比热容。为方便讨论,将槽道无因次化,取 $X = x/d$, $Y = y/d$, $\Gamma = L_x/d$ 。

1.4 数值计算

在本文数值计算中,首先利用 Gambit 对 $\Gamma = 40$ 的矩形槽道进行 20×800 的均匀交叉网格划分,对

计算区离散采用有限容积法,二阶迎风格式离散对流项,中心差分离散扩散项,一阶差分离散时间项。将二维 u 、 w 及其他变量分别储存于三组交错网格系统。然后用 SIMPLE 法,对基本方程(1)进行数值求解,计算步长 $\Delta t=0.01$ s。

2 周期加热倾斜腔体的对流特性

2.1 对流斑图的演化

2.1.1 Reynolds 数对对流斑图的影响

为了研究 Reynolds 数 Re 对对流斑图的影响,采用在 $\theta = 20^\circ$ 时,控制相对 Rayleigh 数不变,即上下壁面温差恒定,改变 Reynolds 数的大小,分析不同流动强度下的对流斑图。

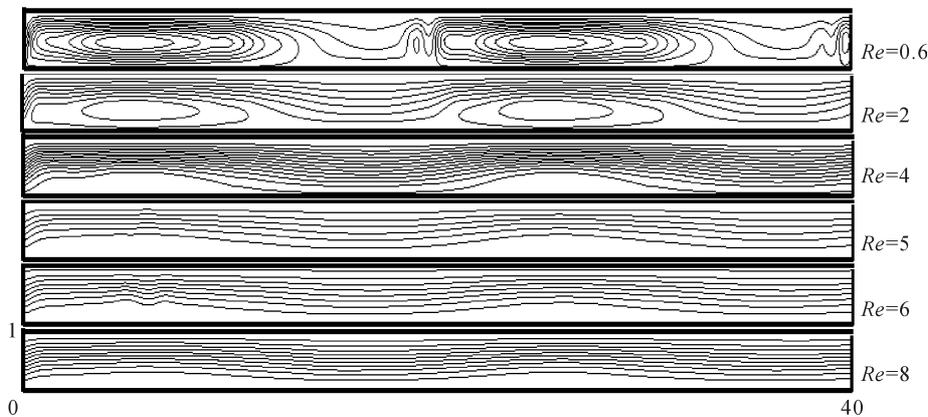


图2 $r=5$ 时不同 Re 下的对流斑图

Fig. 2 Convective pattern under different Re 's at $r=5$

2.1.2 相对 Rayleigh 数对对流斑图的影响

为研究相对 Rayleigh 数 r 对对流斑图的影响,取 $\theta = 20^\circ$,控制 Reynolds 数 Re 不变,即流动强度恒定,改变相对 Rayleigh 数的大小,得到上下壁面温差逐渐增大的对流斑图,图 3 为取 $Re=0.6$, $r=2, 3, 5, 8, 10$ 的对流斑图。

由图 3 可知,当 $r \leq 5$ 时,槽道内对流斑图有明显分区,靠近槽道上壁面为通过流动区,下壁面为对

图 2 为在相对 Rayleigh 数 $r=5$, Reynolds 数 $Re=0.6, 2, 5, 6, 8$ 时的对流斑图。由图 2 可知,当 Reynolds 数 $Re \leq 2$ 时热作用与流动共同影响对流斑图,槽道内存在呈周期性变化的对流和通过流动, $0 \sim 20$ 为一个周期的对流与流动耦合。当 $Re=2$ 时,槽道内出现明显分区现象,靠近槽道上壁面对流消失,流动作用强于热作用为通过流动区,靠近下壁面热作用强于流动作用为对流区,分区现象说明对流斑图的影响因素由热作用向通过流动作用过渡。 $2 < Re < 4$ 时为过渡段,当 $Re \geq 5$ 时,对流消失,对流斑图为周期变化的流线,此时影响对流斑图的主要是通过流动作用。

流区有单个对流圈,此时热作用影响小,流动作用影响大。但随着上下壁面温差的增大,分区现象逐渐减弱,流动区范围缩小,对流区范围增大,热作用增强对流强度也随之加强。

当 $r \geq 8$ 时分区现象消失,槽道内对流斑图为周期性的对流现象, $0 \sim 20$ 为一个周期的对流斑图,由单个对流圈变为多个对流圈。此时热作用是影响对流斑图的主要因素。

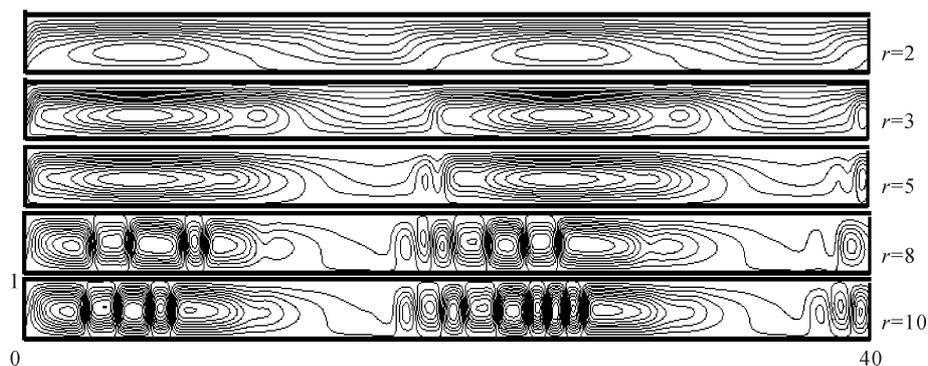


图3 $Re=0.6$ 时不同 r 下的对流斑图

Fig. 3 Convective pattern under different r 's at $Re=0.6$

2.2 Nusselt 数的影响因素

2.2.1 Reynolds 数对 Nusselt 数的影响

选取 $r=8$, $Re=2, 5, 6, 8$ 时的 Nusselt 数 Nu 进行对比, 见表 1。可发现不同 Reynolds 数下的 Nusselt 的稳定值随 Re 的增大减小, 当 $Re < 5$ 时减小速率缓慢, 当 $5 \leq Re \leq 6$ 时迅速减小。由图 4 可知, Nusselt 数稳定所需时间的变化趋势为先增长后缩短, 在 $Re=5$ 时最小。因此 Reynolds 数对 Nusselt 数的稳定值及稳定所需时间有较大影响。

表 1 $r=8$ 时不同 Re 下的 Nu

Tab. 1 Nu under different Re 's when $r=8$

Re	稳定值
2	76.065 6
5	76.023 2
6	23.109 8
8	23.027 2

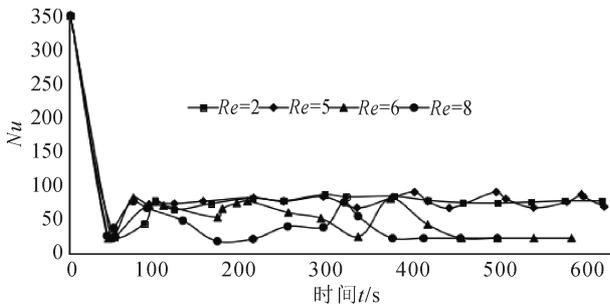


图 4 $r=8$ 时不同 Re 下 Nu 随时间的变化
Fig. 4 Variation of Nu with time under different Re 's at $r=8$

2.2.2 相对 Rayleigh 数对 Nusselt 数的影响

在对比不同相对 Rayleigh 数对 Nusselt 数 Nu 的影响时, 取 $Re=2, r=3, 5, 8, 10$ 进行对比分析, 见表 2, 可知当 Reynolds 数一定时 Nu 的稳定值随相对 Rayleigh 数的增大而增大。当 $r < 5$ 时, Nu 变化平缓, 当 $5 \leq r \leq 8$ 时, Nu 呈不规则振荡变化且稳定值显著增大。由图 5 可知随着相对 Rayleigh 数的增大, Nusselt 数达到稳定状态所需的时间增长, 且当 $r > 5$ 时, 达到稳定状态所需时间显著增加。说明相对 Rayleigh 数越大, 上下壁面的温差越大热作用越强, 对流强度增强, Nu 的稳定值及达到稳定所需的时间均增长。

表 2 $Re=2$ 时不同 r 下的 Nu

Tab. 2 Nu under different r when $Re=2$

r	稳定值
3	10.741 2
5	16.109 4
8	68.467 4
10	99.513 0

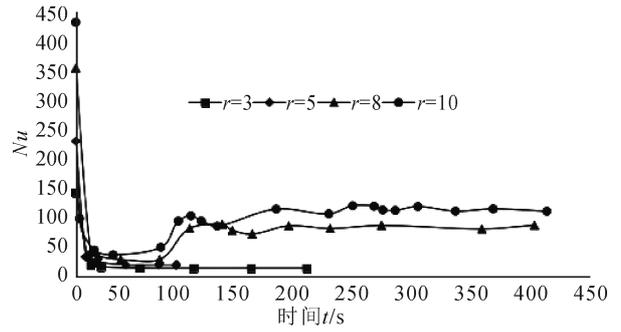


图 5 $Re=2$ 时不同 r 下 Nu 随时间的变化
Fig. 5 Variation of Nu with time under different r 's at $Re=2$

2.3 最大垂直流速的影响因素

2.3.1 Reynolds 数对最大垂直流速的影响

为了分析 Reynolds 数对最大垂直流速的影响, 控制相对 Rayleigh 数 $r=8$ 不变, 取 $Re=2, 5, 6, 8$ 得到最大垂直流速随时间的变化图, 见图 6。由图 6 可知随着 Reynolds 数的增大, 最大垂直流速的峰值及稳定值均增大。随着 Reynolds 数的增大过渡阶段所需时间先增长再缩短, 表明最大垂直流速达到稳定所需时间先增长后缩短。Reynolds 数对最大垂直流速的峰值、稳定值及对流达到稳定所用时间均有影响。

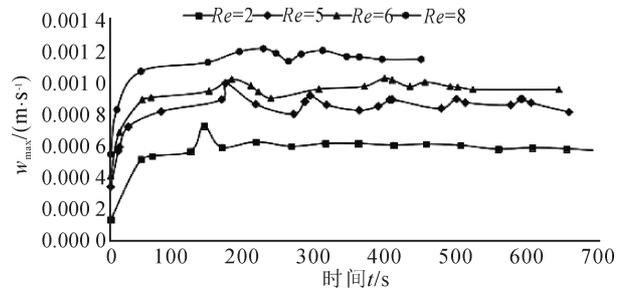


图 6 $r=8$ 时不同 Re 下最大垂直流速 W_{max} 随时间的变化
Fig. 6 Variation of W_{max} with time under different Re 's at $r=8$

2.3.2 相对 Rayleigh 数对最大垂直流速的影响

控制 Reynolds 数 $Re=2$ 不变, 取 $r=3, 5, 8, 10$, 对比相对 Rayleigh 数对最大垂直流速发展的影响, 得到图 7。由图 7 可知, 随着相对 Rayleigh 数的增大, 最大垂直流速的峰值及稳定值均随相对 Rayleigh 数的增大而增大。当 $r \leq 5$ 时, 最大垂直流速变化平缓, 达到稳定所需时间较短, 此时上下壁面温差较小, 热作用弱于流动作用, 对流强度小。当 $r \geq 8$ 时, 最大垂直流速在 100~300 s 过渡阶段呈不规则振荡变化, 表明此时热作用逐渐加强并占据主导作

用,对流发展迅速,最大垂直流速达到稳定所需时间明显增长。

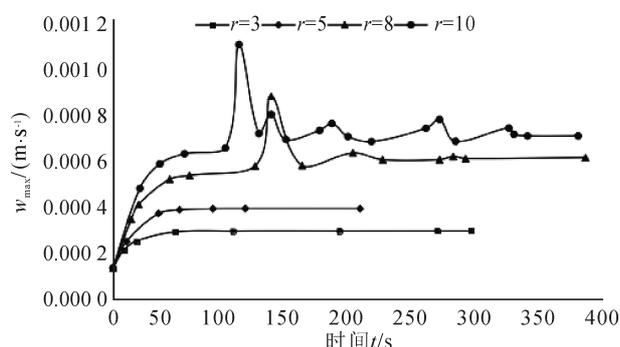


图7 $Re=2$ 时不同 r 下最大垂直流速 W_{\max} 随时间的变化
Fig. 7 Variation of W_{\max} with time under different r 's at $Re=2$

2.3.3 不同相对 Rayleigh 数下槽道二分之一高度处垂直流速

为了得到不同相对 Rayleigh 数下槽道二分之一高度处的垂直流速,取 $Re=2$, $r=3, 5, 8, 10$ 的垂直流速进行比较,见图 8。当 $r \leq 5$ 时,垂直流速变化平缓,且呈现一定周期变化,变化周期与加热周期一致,此时槽道内对流斑图为单个对流圈。当 $r > 5$ 时,垂直流速变化逐渐剧烈,在槽道长度 20~30 范围内出现剧烈振荡,表明对流强度逐渐增强。当 $r > 8$ 时,在槽道长度 5~15 范围内开始出现振荡,表明槽道内一个周期内的对流斑图出现多个对流圈,且两个周期内对流强度发展不同,反应了这一过程为非线性的特征。随着 r 的增大,垂直流速的峰值呈增大趋势,随着温差的增大,对流强度增强。

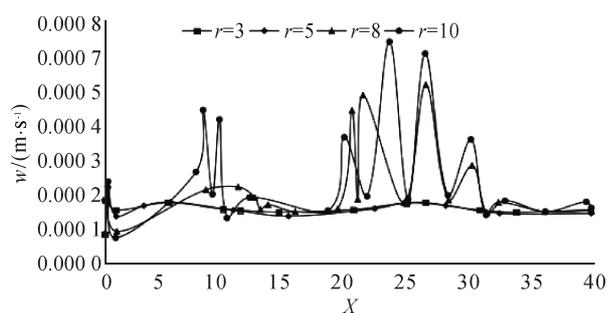


图8 不同 r 下槽道二分之一高度处垂直流速
Fig. 8 Vertical velocity at half height of channel under different r 's

3 结论

本文采用周期加热和通过流动混合作用,控制 Reynolds 数 Re 和相对 Rayleigh 数 r ,对 $Pr=6.99$ 的流体在倾斜角度 $\theta=20^\circ$,长高比 $\Gamma=40$ 的矩形槽道中进行二维数值模拟,得到以下结论。

1) 相对 Rayleigh 数 r 一定时,随着 Reynolds 数的增大,槽道内分区现象减弱,槽道内流动由热作用和通过流动作用的耦合逐步向通过流动作用过渡,槽道内流动一直存在周期性变化;Nusselt 数的稳定值随 Re 的增大而减小,达到稳定所需时间先增长后缩短;最大垂直流速峰值、稳定值随 Re 的增大而增大,达到稳定所需时间先增长后缩短。说明随着 Re 的增大,对流达到稳定的时间先增长后缩短,对流强度减弱。

2) Reynolds 数 Re 一定时,随着相对 Rayleigh 数的增大,槽道内分区现象减弱,槽道内流动由热作用与通过流动作用的耦合逐步向热作用过渡,一个周期内的对流斑图由单个对流圈变为多个对流圈;Nusselt 数的稳定值随 r 的增大而增大,Nusselt 数的变化由平缓到不规则振荡且达到稳定的时间增长;最大垂直流速的峰值及稳定值随 r 的增大而增大,当 r 较小时,最大垂直流速变化平缓,当 r 增加到一定程度时,最大垂直流速出现不规则振荡变化,达到稳定所需时间增长;槽道二分之一高度处的垂直流速沿槽道长度方向呈与加热周期一致的周期性变化且当相对 Rayleigh 数增大到一定程度时出现剧烈振荡,此时对流圈个数由单个变为多个;说明随着 r 的增大,上下壁面温差增大,对流强度增强。

参考文献:

- [1] 陶文铨. 传热学基础[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [2] RIEHL H, YEH T C, MALKUS J S, et al. The northeast trade of the Pacific Ocean[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1951, 77 (334): 598-626.
- [3] PARSONS B, MCKENZIE D. Mantle convection and thermal structure of the plates[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1978, 83(B9): 4485-4496.
- [4] 包芸,高振源,叶孟翔. 湍流热对流 Prandtl 数效应的数值研究[J]. 物理学报,2018,67(1):175-182.
BAO Yun, GAO Zhenyuan, YE Mengxiang. Numerical study of Prandtl number effects in turbulent thermal convection[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67 (1): 175-182.
- [5] 李培生,孙金丛,张莹,等. 内置高温体倾斜多孔腔体中自然对流的 LBM 模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018,39(6):1073-1080.
LI Peisheng, SUN Jincong, ZHANG Ying, et al. Lattice Boltzmann simulation of natural convection in an inclined porous cavity with a hot square obstacle[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39 (6):

- 1073-1080.
- [6] 于广滨,毛汉成,陈巨辉,等. 纳米流体在水平直管内的对流换热实验[J]. 哈尔滨理工大学学报,2018,23(2): 108-113.
YU Guangbin, MAO Hancheng, CHEN Juhui, et al. Convective heat transfer in a horizontal straight tube of CuO-ethylene glycol nanofluid[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(2): 108-113.
- [7] 张宇,曹玉会. Rayleigh-Bénard 热对流中 non-Boussinesq 效应的数值研究[J]. 气体物理,2017,2(5): 11-17.
ZHANG Yu, CAO Yuhui. Numerical study of the non-Boussinesq effects in Rayleigh-Bénard convection[J]. Physics of Gases, 2017, 2(5): 11-17.
- [8] NING Lizhong. Rayleigh-Benard convection in a binary fluid mixture with and without lateral flow[M]. Xi'an: Northwest A&F University Press, 2006.
- [9] 宁利中,齐昕,原田义文,等. 二维矩形腔体中混合流体行波对流[J]. 力学季刊,2006,27(2):323-328.
NING Lizhong, QI Xin, HARADA Y, et al. Traveling wave convection for binary fluid mixtures in two dimensional rectangular cell[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(2): 323-328.
- [10] 宁利中,齐昕,周洋,等. 混合流体 Rayleigh-Benard 行波对流中的缺陷结构[J]. 物理学报,2009,58(4): 2528-2534.
NING Lizhong, QI Xin, ZHOU Yang, et al. Defect structures of Rayleigh-Benard travelling wave convection in binary fluid mixtures[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(4): 2528-2534.
- [11] 宁利中,余荔,袁喆,等. 沿混合流体对流分叉曲线上部分支行波斑图的演化[J]. 中国科学 G 辑,2009,39(5):746-751.
- [12] GETLING A V. Rayleigh-Benard convection[M]. Singapore: WorldScientific, 1998.
- [13] CROSSM C, HOHENBERG P C. Pattern formation outside of equilibrium[J]. Reviews of Modern physics, 1993, 65(3): 998-1011.
- [14] RAYLEIGH L. On convection currents in a horizontal layer of fluid when higher temperature is on the under side[J]. Philosophical Magazine, 1916, 32: 529-546.
- [15] JUNG C, LÜCKE M, BÜCHEL P. Influence of through-flow on linear pattern formation properties in binary mixture convection[J]. Physical Review E, 1996, 54(2): 1510-1529.
- [16] BÜCHEL P, LÜCKE M. Influence of through flow on binary fluid convection[J]. Physical Review E, 2000, 61(4): 3793-3810.
- [17] 宁利中,胡彪,宁碧波,等. Poiseuille-Rayleigh-Bénard 流动中对流斑图的分区和成长[J]. 物理学报,2016, 65(21):214401.
NING Lizhong, HU Biao, NING Bibo, et al. Partition and growth of convective pattern in Poiseuille Rayleigh-Bénard flow[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(21): 214401.
- [18] JUNG D, LÜCKE M, SZPRYNGER A. Influence of inlet and bulk noise on Rayleigh-Bénard convection with lateral flow[J]. Physical Review E, 2001, 63(5): 056301.
- [19] ROTH D, BÜCHEL P, LÜCKE M, et al. Influence of boundaries on pattern selection in through-flow[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1996, 97(1/2/3): 253-263.
- [20] 李国栋,黄永念. 水平流作用下行波对流的成长及周期性重复[J]. 物理学报,2004,53(11):3800-3805.
LI Guodong, HUANG Yongnian. Growth and periodic repetition of traveling wave convection with through-flow[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(11): 3800-3805.
- [21] 李开继,宁利中,宁碧波,等. 侧加热腔体内对流特性的研究[J]. 西安理工大学学报,2016,32(1):52-57.
LI Kaiji, NING Lizhong, NING Bibo, et al. Study of the convective in a differentially heated cavity[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1):52-57.
- [22] 刘爽,宁利中,宁碧波,等. 具有通过流动的倾斜腔体的对流特性[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6): 140-144
LIU Shuang, NING Lizhong, NING Bibo, et al. Convective characteristics of an inclined cavity with through flow[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(6): 140-144.
- [23] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [24] 吴昊,宁利中,宁碧波,等. 底部均匀加热的倾斜腔体中的对流特性[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):182-186.
WU Hao, NING Lizhong, NING Bibo, et al. Convection characteristics in the inclination cavity of uniform heating from below[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 182-186.

(责任编辑 王绪迪)