

水平来流对扰动成长和对流周期性的影响*

胡彪¹, 宁利中¹, 宁碧波², 田伟利³, 吴昊¹, 宁景昊¹

- (1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;
2. 嘉兴学院 建筑工程学院, 浙江 嘉兴 314001;
3. 上海大学 建筑系, 上海 200444)

摘要: 对 $Pr = 0.0272$ 的纯流体在矩形腔体外加水平来流时, 进行二维流体力学基本方程组的数值模拟. 研究了该纯流体 Rayleigh-Benard 对流的一维行波斑图的成长及时空的演化. 发现对流成长过程可以划分为 3 个阶段, 即对流发展、对流指数成长和周期变化. 在对流指数成长阶段对不同相对 Rayleigh(瑞利)数 Ra_r 的最大垂直流速场随时间变化的情况进行分析, 获得了最大垂直流速场指数成长阶段的线性成长率 γ_m 和相对 Rayleigh 数 Ra_r 的关系公式. 研究了行波周期受水平来流 Reynolds(雷诺)数的影响, 揭示了行波对流周期性及其对水平来流 Reynolds 数的依赖性.

关键词: Rayleigh-Benard 对流; 成长率; 时空斑图; 周期性

中图分类号: O357

文献标志码: A

doi: 10.21656/1000-0887.370314

引言

科学工作者们已经在 Rayleigh-Benard 对流领域进行了广泛的研究, 目前人们主要在混合流体和纯流体两方面做了大量工作^[1-3]. 混合流体由于内部机制的原因, 在受到上下壁之间的温差作用会形成行波、局部行波、对传波、摆动行波和定常波等对流斑图; 纯流体在腔体外加水平来流的条件下, 通过改变水平来流 Reynolds 数也可获得行波、局部行波、水平流等对流斑图. 从以上可知, 混合流体和纯流体中都产生了行波、局部行波等对流斑图, 但它们之间的形成机制是不同的, 这是因为它们的形成受各种条件的影响. 随着研究的深入, 人们不仅对流体的对流斑图充满兴趣, 还开始在流体对流的成长过程和动力学特性方面进行了大量的研究. 在流体力学扰动方程数值模拟方面, Ning(宁利中)等^[4-5]对 Rayleigh-Benard 热对流进行数值研究, 获得了具有水平流动的混合流体 Rayleigh-Benard 对流分叉图. 在流体力学基本方程组的数值模拟中, Barten 等在水平方向周期边界条件下数值模拟了行波与局部行波的动力学特性^[6-8]. Jung 等^[9]采用数值计算探讨了强 Soret 效应情况下的振动对流. Batiste 等^[10]研究了大长高比腔体中振动对流的动力学特性. Taraut 等^[11], Knobloch 和 Mercader 等^[12-13]进一步利用数值模拟研究了局部对流特性. 人们还通过改变腔体的外部条件来对对流系统进行研究, 发现了不同的外部条件会使腔体内的流体发生运动从而形成丰富的斑图. 因此通过在腔体外加水平来流的情

* 收稿日期: 2016-10-17; 修订日期: 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(10872164); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(00X901)

作者简介: 胡彪(1989—), 男, 硕士生(E-mail: 848716986@qq.com);

宁利中(1961—), 男, 教授, 博士(通讯作者. E-mail: ninglz@xaut.edu.cn).

况下,获得了临界特性对 Reynolds 数的依赖性^[14],还有水平流改变系统的非线性特性形成对称破缺分叉斑图^[15].文献[16-21]还给出了具有不同水平来流 Reynolds 数条件下行波的一些时空演化现象.

学者们主要集中在对对流斑图的演变和非线性动力学特性方面进行研究,但是在水平来流作用下,对行波的成长和时空斑图演化受到水平来流 Reynolds 数的影响进行的研究还比较少.行波对流斑图的成长过程和水平来流对行波周期的影响对对流研究是十分有意义的.本文采用二维流体力学基本方程组对行波斑图的成长过程及时空斑图的演化进行了研究,对对流指数成长阶段的成长率和行波对流周期受水平来流 Reynolds 数的影响进行了研究,发现对流成长过程可以划分为3个阶段,即对流发展、对流指数成长和周期变化;并获得了最大垂直流速场指数成长阶段的线性成长率 γ_m 和相对 Rayleigh 数 Ra_r 的关系公式;揭示了行波对流周期性对水平来流 Reynolds 数的依赖性.

1 数学物理模型

1.1 流体力学基本方程组

对流的实验模型如图1所示,腔体上下壁相距为 d ,取腔体左壁面与底板的交汇点为原点,腔体以向右为 x 正向,向上为 z 正向.上下壁之间形成温度差 $\Delta T = T_{\text{top}} - T_{\text{bot}}$,当温度差达到使流体发生运动的临界值后,腔体内的流体将由热传导状态失稳而进行有序的对流运动.一般采用特征量 Rayleigh 数 ($Ra = (\alpha g d^3 / \kappa \nu) \Delta T$) 来表征温度差,式中 $\alpha = - (1/\rho_0) (\partial \rho(T, P) / \partial T)$ 为体积膨胀系数; $\mathbf{g} = -g \mathbf{e}_z$, 式中 g 为重力加速度, \mathbf{e}_z 为平行轴 z 方向的单位矢量; $\kappa = \lambda / (\rho_0 c_p)$ 为热扩散系数; ν 为运动黏性系数.热传导状态失稳的临界 Rayleigh 数是 $Ra_c = 1708$.通过简化后用相对 Rayleigh 数 $Ra_r = Ra / Ra_c$ 来作为控制参数.

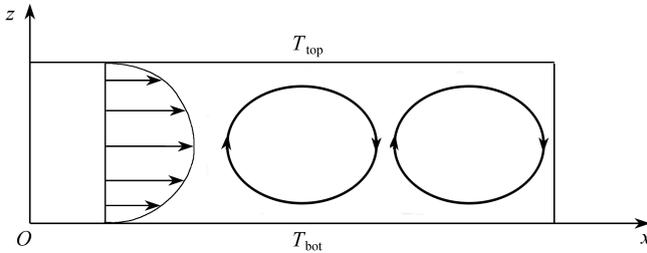


图1 对流模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the convection model

本文将研究的是在腔体外加水平来流的 Rayleigh-Benard 对流,用 $Re = u_{\text{max}} d / \nu$ 来表征水平来流的强度,其中 u_{max} 为水平来流最大值.系统的物性参数用 Prandtl 数 $Pr = \nu / \kappa$ 来表征.

由于在 Boussinesq 假定条件下建立该系统的模型,因此只考虑浮力项密度的变化,其他项中的密度取为常量,浮力项的密度与温度的关系式为 $\rho = \rho_0 [1 - \alpha(T - T_0)]$.下标为 0 表示热传导状态下相应物理量的平均值.描述该系统的流体力学方程组可表示如下:

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

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla \frac{P}{\rho_0} + \nu \nabla^2 \mathbf{U} - \alpha(T - T_0) \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) T = \frac{\lambda}{\rho_0 c_p} \nabla^2 T, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{U}(u, 0, w)$ 为速度矢量场, T 为温度场, ρ 为密度, P 为压力, ν 为运动黏性系数, c_p 为比定

压热容, t 为时间, λ 为热传导系数.

1.2 边界条件

用刚性和充分传热的平板作为上下壁, 这样上下壁的边界条件为无滑移、等温及水平流速 u 和垂直流速 w 等于 0, 下壁面温度为 $T_{\text{bot}} = T_0 - 0.5\Delta T$, 上壁面温度为 $T_{\text{top}} = T_0 + 0.5\Delta T$. 由于腔体具有水平来流, 因此在左部进口设置流速 $u = 4u_{\text{max}}(z/d)(1 - z/d)$, $w = 0$. 右部出口为自由出流. 流速初始条件为 $u = w = 0$, 初始温度取平均值(一般取 $T = 293.15\text{ }^\circ\text{C}$), 为了表达方便, 对腔体长度进行无量纲化 $X = x/d$, $Z = z/d$.

1.3 数值计算方法

用 Simple 算法对流体学基本方程组(1)~(3)进行数值求解, 对流项采用二阶迎风格式差分, 对流收敛值小于 10^{-6} . 腔体的长高比 $\Gamma = 12$, 为了检验网格划分对数值计算的影响, 选取 $Pr = 0.0272$ 的纯流体在相对 Rayleigh 数 $Ra_r = 3$ 情况下, 对网格采用 240×20 和 360×30 两种网格划分法, 通过对两种网格划分的数值模拟所获得最大垂直流速进行比较, 发现两者的最大垂直流速值相差为 0.000001 , 差值很小, 可以忽略不计. 于是对腔体的网格划分采用 240×20 进行均匀划分. 时间步长采用 $\Delta t = 0.01$. 本文采用直接数值模拟方法, 基于 FLUENT 软件进行模拟, 软件程序的正确性已得到许多算例的验证. 另外对数值网格的独立性也进行了考察, 所以能保证数值计算的准确. 计算中物性参数 $Pr = 0.0272$.

2 行波的成长及动力学特性

2.1 行波斑图随时间成长的过程

取腔体外加水平来流 Reynolds 数 $Re = 150$, 在对流发生临界点以上取相对 Rayleigh 数 $Ra_r = 7$. 腔体内的流体发生运动. 在对流运动过程中, 水平来流和热作用之间相互竞争, 对流的振幅随时间发生变化. 观察对流最大振幅 w_{max} 随时间成长的过程, 如图 2 所示, 整个对流成长过程可以划分为 3 个阶段, 即对流发展、对流指数成长和周期变化.

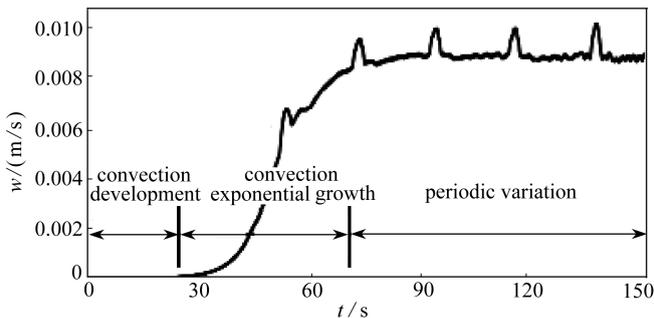


图 2 行波成长过程中最大振幅随时间变化

Fig. 2 Variation of the maximum amplitude with time in the growth of the traveling wave

在对流开始发生前的一段时间内, 腔体内流体只在水平来流的作用下进行水平流动, 因而对流的振幅接近为 0, 这一阶段为对流发展阶段. 水平来流和热作用经过一段时间的竞争, 腔体内的流体开始发生对流运动, 对流的振幅以指数成长. 此阶段内对流时空斑图如图 3 所示, 取不同时刻流函数场, 时间间隔 $\Delta t = 10\text{ s}$, 时间向上增大. 在腔体上游区域内水平来流抑制了热作用, 所以上游区域由水平来流控制; 而下游区域则为水平来流和热作用相耦合形成的行波斑图, 行波的传播方向是单一的, 行波在水平来流作用下只向下游传播, 其中行波的对流圈在到达右端壁处后会由于壁面限制作用而破灭, 但在上游区水平流区和下游区行波区分界处有对流圈不断产生接着向下游移动. 这样就形成了整个腔体内的局部行波对流斑图. 这个阶

段称之为对流指数成长阶段,在这个阶段内对流振幅由小迅速变大.从图 2 可以看出,在对流指数成长阶段对流最大振幅随时间快速变化跨越了几个数量级达到 10^{-3} 量级.经过对流指数成长阶段后,热作用和水平来流竞争越加剧烈,对流的振幅随时间作周期性变化,对流成长从此进入了周期变化阶段.在周期变化阶段内,对流的振幅随时间呈周期性震荡变化.

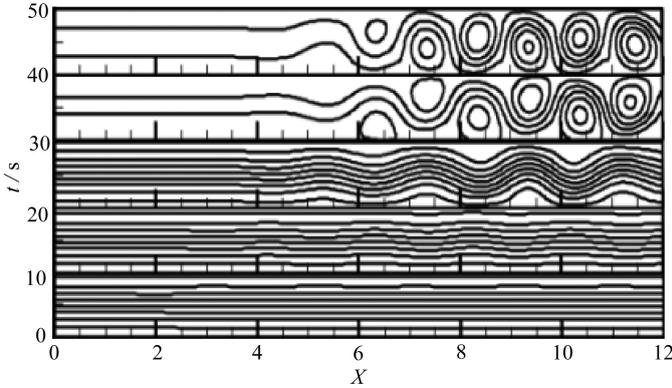


图 3 对流指数成长阶段的行波的时空演化斑图

Fig. 3 The temporal and spatial evolution pattern of the traveling wave in the convection exponential growth stage

2.2 行波垂直流速场指数成长阶段的成长率

采用 $Pr = 0.0272$ 的纯流体,在腔体外加水平来流 $Re = 5$, 取对流发生临界点以上的几个相对 Rayleigh 数,观察不同相对 Rayleigh 数的垂直流速场指数成长阶段的成长情况.图 4 中横坐标为时间,纵坐标为腔体二分之一高度处垂直流速场的最大振幅 w_{\max} .从图 4 中可以看出,在 $t < 100$ s 的范围,水平来流抑制了热作用驱使的对流运动,流体处于热传导状态;在 $t > 100$ s 后,垂直流速场的最大振幅 w_{\max} 随时间 t 呈现指数变化,流体开始进行对流运动.从图 4 中可以看出,不同相对 Rayleigh 数的垂直流速场的最大振幅 w_{\max} 随时间变化的情况是不同的,相对 Rayleigh 数 Ra_r 越大,垂直流速场的最大振幅随时间增长得越快,因此在对流指数成长阶段,不同相对 Rayleigh 数的垂直流速场最大振幅随时间增长的斜率是不同的,且斜率随相对 Rayleigh 数增大而变大.当最大振幅增长到一定值后,垂直流速场的最大振幅达到饱和,不再随时间发生指数变化,垂直流速场过渡到了周期变化阶段.

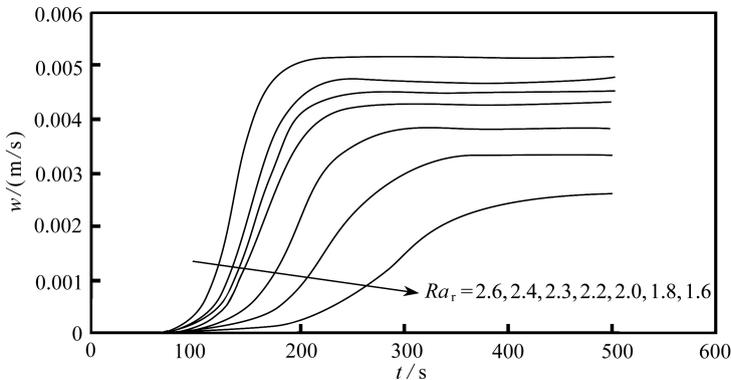


图 4 $Re = 5$ 时不同相对 Rayleigh 数 Ra_r 下最大振幅随时间的变化

Fig. 4 Variation of the maximum amplitude with time for different relative Rayleigh numbers Ra_r for $Re = 5$

由于垂直流速场的最大振幅在对流指数成长阶段上可表示为 $w_{\max} \propto \exp(\gamma_m t)$, γ_m 为垂直流速场的对流指数成长阶段的成长率.求解对流指数成长阶段的表达式可得成长率 $\gamma_m =$

$d(\ln w_{\max})/dt$. 根据成长率公式计算所得数据绘制成长率随相对 Rayleigh 数变化如图 5 所示, 从图中可知线性成长率随相对 Rayleigh 数增大而增大, 对相对 Rayleigh 数与线性成长率的关系进行拟合可得

$$\gamma_m = 0.0027 Ra_r^{2.985}$$

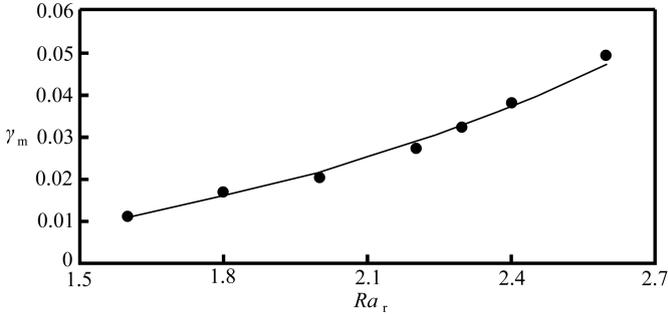
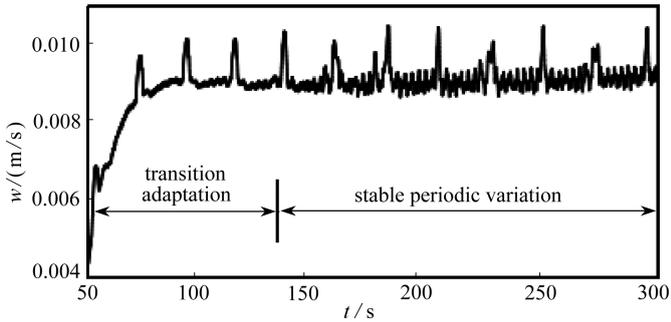


图 5 $Re = 5$ 时成长率 γ_m 随相对 Rayleigh 数 Ra_r 的变化

Fig. 5 Variation of the growth rate with Ra_r for $Re = 5$

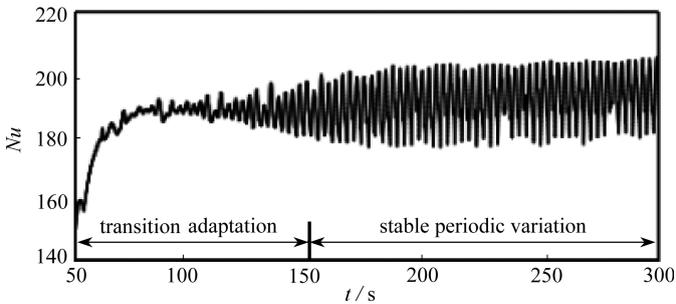
2.3 行波的周期性变化阶段

在对流振幅随时间经历指数成长型变化后, 对流振幅随时间进行周期性变化, 此时进入了周期变化阶段. 图 6 展示了该阶段内最大振幅及腔体下壁面的热通量随时间的变化规律, 从中可以看出, 在对流周期变化阶段内最大振幅及热通量随时间都呈现周期性变化的动力学状态.



(a) 对流最大振幅

(a) The convective maximum amplitude



(b) 下壁面 Nusselt 数

(b) The Nusselt number of the bottom wall

图 6 对流周期变化阶段的特征参数

Fig. 6 Characteristic parameter of the period variation stage of the convection

在对流动力学特性随时间周期变化的成长过程中,发生了过渡调整和稳定周期变化两个阶段.在过渡调整阶段,相应行波的时空演化如图 7 所示,取不同时刻流函数场,时间间隔 $\Delta t = 10$ s,时间向上增大.由于在该阶段对流区域和热传导区域分界面处的状态随时间是变化的,所以在腔体 $4 < X < 6$ 的区间会看到对流滚动圈在热作用下快速发展,此阶段内对流斑图是变化、不稳定的.因此,在过渡调整阶段内,从图 6(a)中可看出,最大振幅是以小幅地震荡着随时间逐渐增大,大约到 $t = 150$ s 时,振幅随时间发生稳定调整,从此最大振幅达到了饱和,进而围绕一定值随时间小幅震荡变化着.随后对流进入稳定周期变化阶段,在稳定周期变化阶段的两个周期之间,对流振幅及热通量发生了 9 次小幅振荡,这对应于时空演化图 7 中的 9 次对流滚动圈的推移事件.9 个对流圈占据了整个下游区,使下游区形成行波对流区.如图 8 所示,取不同时刻流函数场,时间间隔 $\Delta t = 10$ s,时间向上增大.在这阶段腔体上游区被水平流占据处于热传导状态,下游区则被行波占据处于行波对流状态,行波的波长和波数在 $1.5 < X < 12$ 的区域内不断调整后达到稳定,最终在长度 10.5 的腔体中存在 9 个滚动,因此平均波数 $k = 9\pi/10.5 = 2.69$,整个腔体内形成了稳定的局部行波对流斑图.而腔体内对流滚动圈是运动的,在 $1.5 < X < 3$ 区域内对流滚动圈形成后被水平流推向下流,到达右端壁处消灭,这样就完成了对流滚动圈由形成到消灭的过程.对流滚动圈在右端壁消灭后,又会重新在 $1.5 < X < 3$ 区域内有对流滚动圈形成,使系统进入下一个周期变化,这样对流就形成了重复性的循环.行波运行方向沿箭头所示方向进行.对流圈重复变化的周期约是 50 s.根据图 6(b)可以看出,在循环周期内,对流传热有如下特点,在稳定周期变化阶段,对流振幅突然增大,该时刻对应的热通量也随之增大.热通量随振幅一起震荡,在一个周期完成后接着又进入下一个周期,就这样形成周期重复变化.

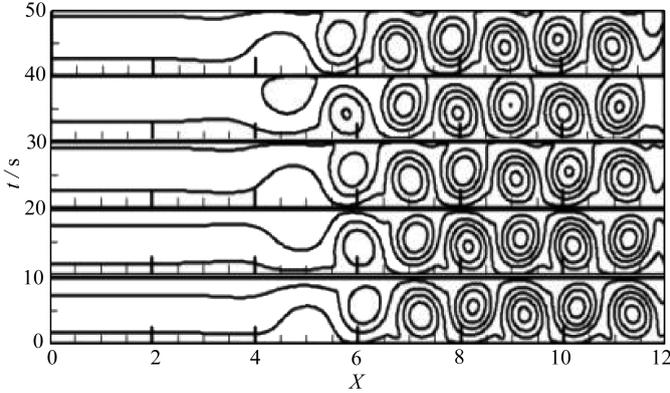


图 7 过渡调整阶段的行波对流演化斑图

Fig. 7 The temporal and spatial evolution pattern of traveling waves in the transitional stage

表 1 行波周期对水平来流 Reynolds 数的依赖性

Table 1 The dependence of the traveling wave period on the Reynolds number of the horizontal flow

Reynolds number Re	traveling wave period T_t
75	250
100	375
150	625
200	1 250
225	1 625

下面对行波稳定周期变化阶段的周期对水平来流 Reynolds 数的依赖性进行研究,对稳定

周期进行无量纲化可得 $T_1 = T/(d^2/\kappa)$, T 为有量纲的时间周期. 从图 9 可以看出, 随水平来流 Reynolds 数的增加, 行波周期也随之增大. 在水平来流 Reynolds 数较大时, 行波周期的变化非常敏感. 根据表 1 中给出的各水平来流 Reynolds 数的行波周期, 对两者进行拟合得出了行波周期与水平来流 Reynolds 数的函数关系式:

$$T_1 = 0.1619 Re^{1.6843}.$$

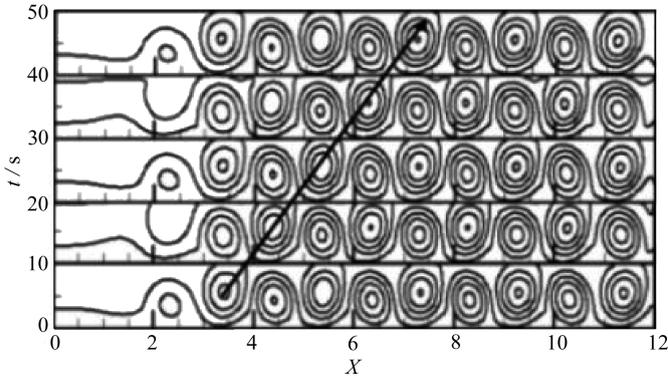


图 8 稳定周期变化阶段的行波时空演化斑图

Fig. 8 The temporal and spatial evolution pattern of traveling waves in the stable period variation stage

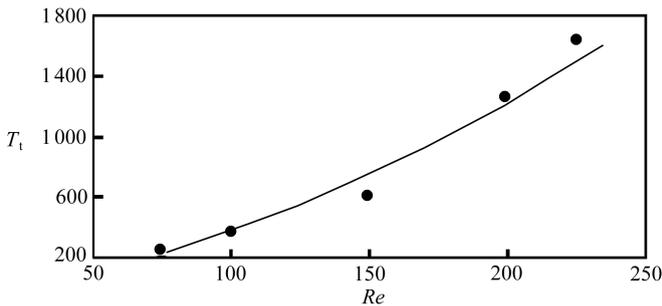


图 9 行波周期与水平来流 Reynolds 数的关系图

Fig. 9 The relationship between the traveling wave period and the Reynolds number

3 结 论

本文数值模拟研究了 $Pr = 0.0272$ 的纯流体在矩形腔体外加水平来流下的行波对流情形, 讨论了不同相对 Rayleigh 数 Ra_r 的垂直流场指数成长阶段的成长率以及该纯流体 Rayleigh-Benard 对流的一维行波斑图的成长及时空斑图的演化和对流周期对水平来流的依赖. 研究可得如下结论:

1) 选取 $Pr = 0.0272$ 的纯流体在相对 Rayleigh 数 $Ra_r = 7$ 和水平来流 Reynolds 数 $Re = 150$ 的情况下, 进行数值模拟研究了对流最大振幅随时间的变化过程, 发现了对流行波成长过程经历了对流发展、对流指数成长和周期变化 3 个阶段. 最后腔体内形成了稳定的局部行波对流.

2) 在水平来流 Reynolds 数 $Re = 5$ 时, 对对流成长过程中的不同相对 Rayleigh 数 Ra_r 的垂直流场指数成长阶段的成长过程进行分析, 得到垂直流场指数成长阶段的线性成长率与相对 Rayleigh 数的函数关系式: $\gamma_m = 0.0027 Ra_r^{2.985}$.

3) 对流进入对流周期变化阶段后, 对流振幅进行周期性变化. 通过对最大振幅及热通量随时间的变化进行分析, 在对流稳定过程中经历了过渡调整、稳定的周期变化 2 个阶段. 发现

了对流的周期与水平来流 Reynolds 数有关,将各水平来流 Reynolds 数与其相对应的周期进行拟合得出: $T_1 = 0.161 9Re^{1.684 3}$.

致谢 本文作者衷心感谢西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地基金项目(2017ZZKT-2)对本文的资助.

参考文献(References):

- [1] Chandrasekhar S. *Hydromagnetic Stability*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1961: 1-100.
- [2] Cross M C, Hohenberg P C. Pattern formation outside of equilibrium[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1993, **65**(3): 998-1011.
- [3] Assenheimer M, Steinberg V. Transition between spiral and target states in Rayleigh-Bénard convection[J]. *Nature*, 1994, **367**: 345-347.
- [4] NING Li-zhong, Harada Y, Yahata H, et al. Fully-developed traveling wave convection in binary fluid mixtures with lateral flow[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 2001, **106**(3): 503-512.
- [5] NING Li-zhong, Harada Y, Yahata H, et al. The spatio-temporal structure of binary fluid convection with horizontal flow[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, **16**(2): 151-157.
- [6] Barten W, Lucke M, Kamps M. Localized traveling-wave convection in binary fluid mixtures [J]. *Physical Review Letters*, 1991, **66**(20): 2621-2624.
- [7] Barten W, Lücke M, Kamps M, et al. Convection in binary fluid mixtures I: extended traveling wave and stationary states[J]. *Physical Review E*, 1995, **51**(6): 5636-5661.
- [8] Barten W, Lücke M, Kamps M, et al. Convection in binary fluid mixtures II: localized traveling waves[J]. *Physical Review E*, 1995, **51**(6): 5662-5682.
- [9] Jung D, Lücke M. Localized waves without the existence of extended waves: oscillatory convection of binary mixtures with strong soret effect[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(5): 054502-1-054502-4.
- [10] Batiste O, Knobloch E, Mercader I, et al. Simulations of oscillatory binary fluid convection in large aspect ratio containers[J]. *Physical Review E*, 2001, **65**(1): 016303.
- [11] Taraut A V, Smorodin B L, Lücke M. Collisions of localized convection structures in binary fluid mixtures[J]. *New Journal of Physics*, 2012, **14**(9): 093055.
- [12] Knobloch E, Mercader I, Batiste O, et al. Convectons in periodic and bounded domains[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2010, **42**: 025505-1-025505-10.
- [13] Mercader I, Batiste O, Alonso A, et al. Convectons, anticonvectons and multiconvectons in binary fluid convection[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, **667**: 586-606.
- [14] 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.
- [15] Buchel P, Lucke M. Influence of through flow on binary fluid convection[J]. *Physical Review E*, 2000, **61**(4): 3793-3810.
- [16] LI Guo-dong. Traveling-wave patterns in binary mixture convection with through flow[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 2001, **106**(2): 293-313.
- [17] LI Guo-dong, Ogawa A, Harada Y. Nonlinear convective states in a fluid mixture with through flow[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 2001, **106**(6): 1115-1128.
- [18] 李国栋, 黄永念. 有水平流时双流体混合物对流的时空演变[J]. 力学进展, 2004, **34**(2): 263-269. (LI Guo-dong, HUANG Yong-nian. Spatiotemporal evolution in binary fluid mixture con-

- vection with through-flow[J]. *Advances in Mechanics*, 2004, **34**(2): 263-269.(in Chinese))
- [19] 赵秉新. 水平流作用下的混合流体行进波对流[J]. 水动力学研究与进展, 2012, **27**(3): 264-274.(ZHAO Bing-xin. Traveling wave convection in binary fluid mixtures with lateral flow[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2012, **27**(3): 264-274.(in Chinese))
- [20] 宁利中, 周洋, 王思怡, 等. Poiseuille-Rayleigh-Benard 流动中的局部行波对流[J]. 水动力学研究与进展, 2010, **25**(3): 299-306.(NING Li-zhong, ZHOU Yang, WANG Si-yi, et al. Localized traveling wave convection in Poiseuille-Rayleigh-Benard flows[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2010, **25**(3): 299-306.(in Chinese))
- [21] NING Li-zhong, QI Xin, Harada Y, et al. A periodically localized traveling wave state of binary fluid convection with horizontal flows[J]. *Journal of Hydrodynamics (Ser B)*, 2006, **18**(2): 199-205.

Effects of Horizontal Flow on Perturbation Growth and Convection Periodicity

HU Biao¹, NING Li-zhong¹, NING Bi-bo²,
TIAN Wei-li³, WU Hao¹, NING Jing-hao¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R.China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Jiaxing University,
Jiaxing, Zhejiang 314001, P.R.China;

3. Department of Architecture, Shanghai University, Shanghai 200444, P.R.China)

Abstract: Numerical simulation of the 2D fully hydrodynamic equations for the pure fluid in a rectangular channel with horizontal flow for Prandtl number $Pr = 0.0272$ was conducted. Growth and spatiotemporal evolution of the 1D traveling wave patterns in the Rayleigh-Benard convection of the pure fluid were investigated. It is found that the convective growth process can be divided into 3 stages: the development stage, the exponential growth stage and the periodic variation stage. Through analysis on the variation of the maximum vertical velocity field with time for different relative Rayleigh numbers Ra_r in the exponential growth stage, a formula of variation of linear growth rate γ_m was obtained with respect to Ra_r . Furthermore, the traveling wave convection periodicity and its dependence on the horizontal flow Reynolds number were revealed.

Key words: Rayleigh-Benard convection; growth rate; spatiotemporal pattern; periodicity

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(10872164)

引用本文/Cite this paper:

胡彪, 宁利中, 宁碧波, 田伟利, 吴昊, 宁景昊. 水平来流对扰动成长和对流周期性的影响[J]. 应用数学和力学, 2017, **38**(10): 1103-1111.

HU Biao, NING Li-zhong, NING Bi-bo, TIAN Wei-li, WU Hao, NING Jing-hao. Effects of horizontal flow on perturbation growth and convection periodicity[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, **38**(10): 1103-1111.