

研究论文

封闭腔内水自然对流换热数值模拟

苏燕兵, 陆 军, 白博峰

(西安交通大学动力多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为了揭示封闭腔内非 Boussinesq 流体在浮力驱动下所特有的流动换热现象和形成机理, 采用 CFD 软件 Fluent 对封闭腔内水的自然对流进行数值模拟, 得到矩形封闭腔高宽比、Rayleigh 数、倾斜角度、壁面温度差对流动和传热的影响规律。研究表明: 由于水的密度在 3.98℃ 达到最大, 两竖壁面温度跨越这一点时会引起流动图像反转; 具有流动反转的双涡结构降低了对流换热平均 Nusselt 数; 相同 Rayleigh 数下, 高宽比为 1 对应对流换热平均 Nusselt 数最大值; 倾斜角度对平均 Nusselt 数影响与 Rayleigh 数和温度边界条件有关。

**关键词:** 自然对流; 流动反转; 高宽比; 倾斜角

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 11-2715-06

Numerical simulation of natural convection and  
heat transfer of water in cavities

SU Yanbing, LU Jun, BAI Bofeng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an  
Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** To reveal the features of flow structure and heat transfer and the mechanism of the non-Boussinesq liquid flow driven by thermal buoyancy in cavities, the natural convection of water in square and rectangular enclosures was numerically simulated with CFD software of Fluent. The effects of aspect ratio of the cavity, Rayleigh number, inclination angle and temperature difference between the two walls of the cavity on the flow and heat transfer were investigated. The results show that the flow pattern inverts if the two walls temperature of the cavity was greater and less than 3.98℃, respectively, at which the water density is maximum. The flow pattern inversion has a double vortex structure and decreases the average Nusselt number of natural convective heat transfer. At a fixed Rayleigh number, the average Nusselt number reaches a maximum in the square cavity at the aspect ratio of 1. The inclination of the square cavity has more complex influence on the average Nusselt number which depends not only on the Rayleigh number but also on the thermal boundary conditions.

**Key words:** natural convection; flow pattern inversion; aspect ratio; inclination angle

引 言

自然对流换热因其在工程中的重要应用, 如电

子元件冷却、换热器、凝固融化、晶体生长等而被广泛研究<sup>[1]</sup>。通常, 在数值模拟浮力驱动流动时要引入 Boussinesq 假设来简化模型, 然而对于液态

2006-12-04 收到初稿, 2007-08-07 收到修改稿。

联系人: 白博峰。第一作者: 苏燕兵 (1980-) 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50536040); 新世纪优秀  
人才支持计划项目 (NCET-04-0923)。

Received date: 2006-12-04.

Corresponding author: Prof. BAI Bofeng. E-mail: bfbai@mail.xjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50536040) and Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-04-0923).

的水、镓、铋、液氮、 $Hg_{1-x}Cd_xTe$  等在特定温度时密度有最大值的流体，如果采用基于线性关系的 Boussinesq 假设，在计算包含此温度的自然对流时，则不能获得真实的流动图像<sup>[2]</sup>。

矩形腔自然对流换热方面已经有大量文献报道，但大多数是针对 Boussinesq 流体<sup>[3-4]</sup>。非 Boussinesq 流体一般以水为研究对象。Hideo 等<sup>[5]</sup>做了方腔水对流倾斜实验并进行简单数值模拟。Lin 等<sup>[6]</sup>建立了比较完整的数学模型研究方腔内水在跨越密度最大时的自然对流。Braga 等<sup>[7-8]</sup>对矩形腔内的水自然对流进行了模拟并且用实验验证了温度分布和流动图像。Wei 等<sup>[9-10]</sup>在数值模拟方面做了比较多的工作，重点考察了高宽比对流动的影响。Braga 等<sup>[8]</sup>和李恒等<sup>[11]</sup>分别用实验研究了矩形腔和圆柱腔内水凝固过程的自然对流。上述这些工作已经重点揭示了水的流动反转流场、温度场变化，但是对换热的分析较少，对物理机理解释也不够深入。

本文用 Fluent 商业软件，数值模拟研究矩形腔内在水密度最大值附近的自然对流换热，重点分析流动反转及其物理机理。模拟得到热壁面温度、高宽比、倾斜角度等对流动和对流换热的影响规律。

## 1 物理模型和数值方法

### 1.1 控制方程和边界条件

选取的物理模型和坐标系如图 1 所示，左壁面为高温  $T_h$ 、右壁面为低温  $T_c$ ，其他壁面绝热。对较小的 Rayleigh 数 ( $Ra = 10^3 \sim 10^6$ ) 分别进行二维和三维的稳态层流模拟，计算结果表明，在此 Rayleigh 数范围，三维流动效果微弱。取三维结果中如图 1 所示的中截面上的温度、速度分布与二维结果进行比较，非常接近，因此在本文中为了节约计算时间均采用二维模型进行模拟。

水的密度在常压下  $3.98^\circ C$  达到最大，选用抛

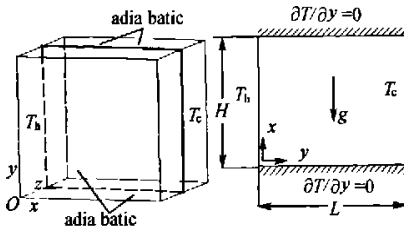


图 1 矩形腔物理模型

Fig. 1 Schematic diagram of physical model

物线形式表达式

$$\rho = \rho_0 [1 - \gamma(T - T_0)] \quad (1)$$

式中  $T_0$  是对应水密度最大值  $\rho_0$  时水的温度，热膨胀系数  $\gamma = 8.0 \times 10^{-6} K^{-2}$ 。

定义 Rayleigh 数和 Prandtl 数

$$Ra = g\gamma(T_h - T_c)L^2 / (\alpha\nu)$$

$$Pr = \nu/\alpha$$

用如下的量纲 1 参量

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{\alpha/H},$$

$$V = \frac{v}{\alpha/H}, P = \frac{p + \rho_0 g y}{\rho_0 (\alpha/H)^2}, \theta = \frac{T - T_0}{T_h - T_c}$$

对稳态的 Navier-Stokes 方程及能量方程进行量纲 1 化可得控制方程组

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = Pr \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial X} + Ra Pr \theta^2 \cos\phi \quad (3)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = Pr \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial Y} + Ra Pr \theta^2 \sin\phi \quad (4)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (5)$$

物理模型对应边界条件为

$$\theta(0, Y) = \theta_h, \theta(1, Y) = \theta_c$$

$$\frac{\partial \theta(X, 0)}{\partial Y} = \frac{\partial \theta(X, 1)}{\partial Y} = 0$$

$U = V = 0$ , 在 4 个边界壁上

### 1.2 局部和平均 Nusselt 数

Nusselt 数是对流换热研究中的一个重要参量<sup>[12]</sup>。对于本问题，冷、热壁面上的局部 Nusselt 数计算方法为

$$Nu = \left| \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{x=0 \text{ or } x=1} \quad (6)$$

平均 Nusselt 数用式 (7) 计算

$$Nu_w = \frac{q}{A\lambda\Delta T} \quad (7)$$

### 1.3 数值方法

用 Fluent 6.0 软件对上述模型进行模拟求解。计算中采用四边形均分网格、Fluent 中设定稳态隐式有限容积 SIMPLE 算法，计算精度选双精度格式。压力项用普通格式、对流项用 QUICK 格式、能量项用二阶迎风格式，并选用合适的亚松弛因子。因为模型通过改变几何尺寸来改变  $Ra$  大小，所以对不同模型都要进行网格无关计算验证。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 密度变化引起的流动反转

冷壁面温度恒设定为  $273 K$ ，图 2 给出了不同

热壁面温度时的温度场和流场计算结果。从图上可以看出：在热壁面温度为 277 K 时，热壁面上部和冷壁面下部的温度梯度较大，流场只有一个逆时针方向涡结构。在热壁面温度为 281 K 时，水密度最大对应的等温线在垂直中线附近，其两侧的温度变化趋势不一样，形成一对流动方向相反的涡，密度反转面就像是互不相溶的液液界面。在热壁面温度为 285 K 时，密度反转面开始向右下角倾斜，逆时针涡被顺时针大涡挤压到右下角区域。上述物理模型在 Bossinesq 假设下，流场只会有一个涡；对出现这种流动反转的双涡结构，此时 Bossinesq 假设不再适用。

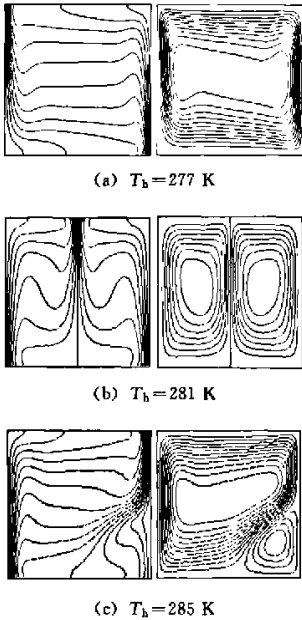


图 2  $Ra=10^6$  热壁面不同温度时的温度场和流场  
Fig. 2 Temperature field and streamline at different hot wall temperature with  $Ra=10^6$

图 3 是  $Ra=10^6$  时水平中截面上量纲 1 速度  $V$ 、温度  $\theta$  在量纲 1 横坐标  $X$  方向的分布曲线。 $V-X$  曲线表明：在  $T_h=277$  K 时冷热壁面附近水的流动方向与  $T_h=281$  K、285 K 时相反，并且  $T_h=277$  K、281 K 时两壁面附近  $V$  绝对值相等， $T_h=285$  K 时的  $V$  绝对值在热壁面附近大于冷壁面附近的。 $T_h=277$  K 与  $T_h=285$  K 时有两个  $V$  极值点；而  $T_h=281$  K 速度有 3 个极值点，且在竖直中截面达到绝对值最大， $V$  曲线对于  $X=0.5$  轴对称。因为  $Y=0.5$  不穿过  $T_h=285$  K 时右下角逆时针涡，所以  $V-X$  曲线右侧只能看到小涡存在，导致

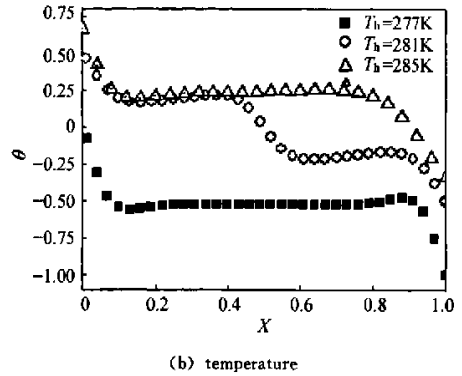
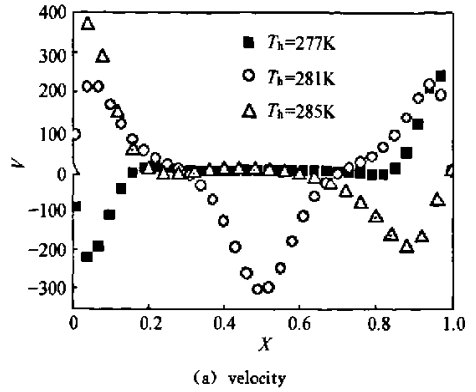


图 3  $Y=0.5$  截面上量纲 1 速度  $V$  和温度  $\theta$  分布  
Fig. 3 Distributions of non-dimensional velocity  $V$  and temperature  $\theta$  at section  $Y=0.5$

$V$  变化率减慢。

$V-X$  曲线可以用  $\theta-X$  曲线解释：水在  $3.98^\circ\text{C}$  时密度最大，在重力作用下必然向下流动，大的  $\theta-X$  曲线变化率对应大的速度值。从  $\theta-X$  曲线可以看出： $T_h=277$  K 时，热壁面附近水密度大向下流动； $T_h=281$  K 时，水密度最大值在  $X=0.5$  附近； $T_h=285$  K 时，在冷壁面下半部分附近出现密度反转。 $T_h=277$  K 时的  $\theta-X$  曲线在冷热壁面附近变化率大小相等； $T_h=285$  K 时的  $\theta-X$  曲线在热壁面变化率大于冷壁面； $T_h=281$  K 时  $\theta-X$  曲线有 3 个梯度区，并且  $X=0.5$  附近变化率大于冷、热壁附近变化率。

图 4 给出的是冷热壁面上局部 Nusselt 数对量纲 1 纵坐标的  $Nu-Y$  曲线。 $T_h=277$  K 时  $Nu$  最大值在冷壁面  $Y=0.02$ 、热壁面  $Y=0.97$  处，即对流最强烈的腔体左上角和右下角； $T_h=281$  K 时的冷、热壁面  $Nu$  最大值都在  $Y=0.04$ ，即腔体左、右两个下角； $T_h=285$  K 时热壁面  $Nu$  最大值在

$Y=0.03$ , 冷壁面附近由于小涡存在  $Nu$  不再是单调变化, 最大值在  $Y=0.96$ , 最小值在  $Y=0.4$  (两个涡的分离点)。在方腔角点区域, 因为壁面黏滞作用使得水流动极其缓慢, 所以  $Nu$  减小很快。

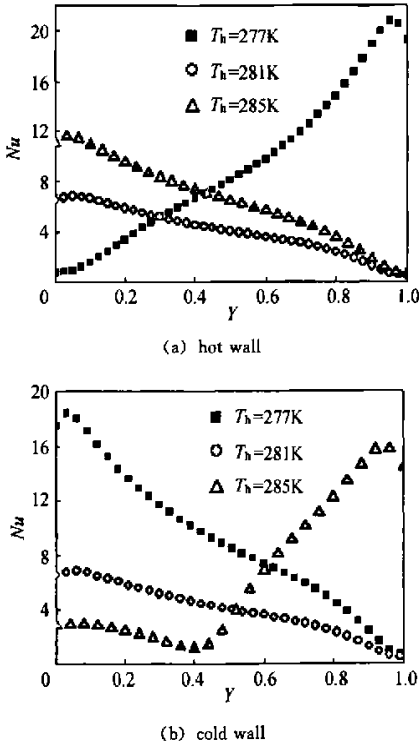


图 4 方腔热壁面和冷壁面局部 Nusselt 数分布  
Fig. 4 Distribution of local Nusselt number on hot wall and cold wall for  $Ra = 10^6$

### 2.2 高宽比影响

引入高宽比  $A = H/L$ , 保持  $L$  不变, 通过改变  $H$  来改变  $A$ 。图 5 是热壁面温度为  $12^\circ\text{C}$ 、 $Ra$  为  $10^6$  情况下不同高宽比 ( $A=0.25、0.5、1、2、5、10$ ) 时模拟计算的流线图。从图中可以看出: 当  $A \geq 1$  时, 随着  $A$  的增大, 腔体右下部逆时针方向的涡的影响区域也逐渐增大, 顺时针方向的大涡被此逆时针涡挤得越来越贴近热壁面。当  $A < 1$  时, 逆时针方向涡经历先减弱后增强的过程;  $A = 0.5$  时逆时针涡只占右下角很小部分, 流动也微弱;  $A = 0.25$  时逆时针涡则占据整个腔体高度, 涡流强度也增大。

图 6 给出不同热壁面温度时的平均 Nusselt 数 ( $Nu_{av}$ )-高宽比 ( $A$ ) 曲线 ( $A = 0.25、0.5、1、2、5、10$ ), 从图中可以看到:  $T_h$  相同时,  $Ra$  越大  $Nu_{av}$  越大, 即对流越强换热越快。  $Ra$  相同时

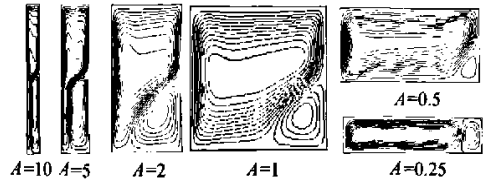


图 5  $T_h = 285\text{K}$ 、 $Ra = 10^6$  时不同高宽比对应的流场  
Fig. 5 Streamline at different aspect ratio with  $T_h = 285\text{K}$ 、 $Ra = 10^6$

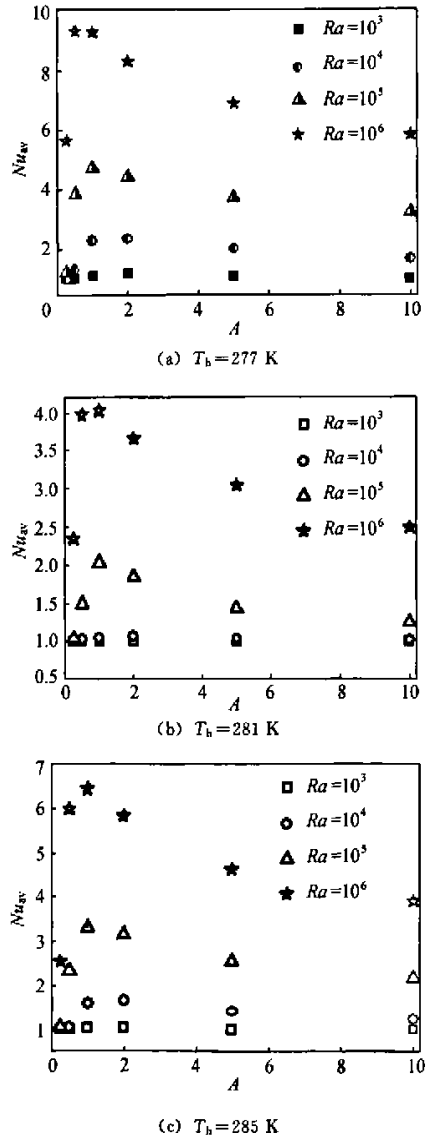


图 6 不同热壁面温度条件下时高宽比对平均 Nusselt 数的影响  
Fig. 6 Effect of aspect ratio on average Nusselt number with different hot wall temperature

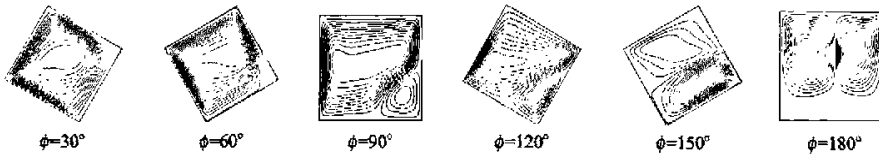


图 7 方腔在  $Ra=10^6$ 、 $T_h=285$  K 时不同倾角下流场分布

Fig. 7 Streamline at different lean angle with  $Ra=10^6$ ,  $T_h=285$  K in square cavity

$A=1$ 附近  $Nu_{av}$ 最大； $A>1$ 时  $Nu_{av}$ 随着  $A$  增大而减小，并且减小速度逐渐缓慢； $A<1$ 时  $Nu_{av}$ 随着  $A$  的减小而减小，并且  $A<0.5$  时迅速减小。相同  $Ra$ 、相同高宽比， $T_h=281$  K 对应的  $Nu_{av}$ 最小。

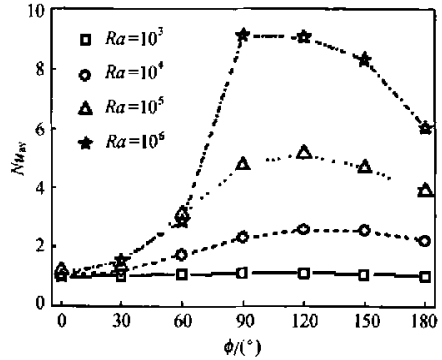
分析流场图和  $Nu_{av}$ - $A$  曲线，可以得到结论：双涡结构越明显，换热性能越差。这是因为涡的交界面上流体流动方向一致、互不掺混，相当于多了一层热阻隔断了冷热壁面之间的直接联系，这样大大减小了热传递速率，而且两个涡强度相差越小换热效果越差。从结果上看，高宽比对换热影响的规律比较一致。

### 2.3 倾斜角度影响

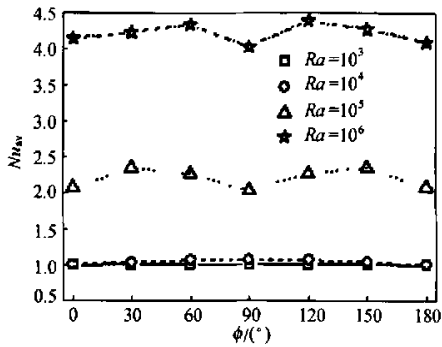
如果方腔倾斜，重力在两直角坐标轴上都有分量，必然会对流动产生很大的影响，图 7 给出了在  $T_h=285$  K、 $Ra=10^6$  时，倾斜角度  $\phi$  分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ （热壁面在下为  $0^\circ$ ，热壁面在上为  $180^\circ$ ）时的流场。从图中可以看出： $\phi<60^\circ$ ，以单涡结构为主，随倾斜角度的增大过渡到越来越明显的双涡结构。

方腔倾斜影响流场，也必然会影响到换热效果，图 8 给出不同热壁面温度下的  $Nu_{av}$ - $\phi$  曲线，可以看出  $Ra$  仍然是影响换热的最主要因素。 $Ra=10^3$  时  $Nu_{av}$  基本不随倾角变化； $Ra>10^3$  时， $T_h=277$  K， $Nu_{av}$  随倾斜角度增加先增后减， $\phi=120^\circ$  附近最大、 $\phi=0^\circ$  时最小，即热壁面在上比热壁面在下换热效果好； $T_h=281$  K， $Nu_{av}$  对于  $\phi=90^\circ$  基本呈轴对称分布，且在  $\phi=90^\circ$  达到最小； $T_h=285$  K 时， $Nu_{av}$  先增后减，约在  $\phi=60^\circ$  附近达最大值， $\phi=180^\circ$  时最小。在相同 Rayleigh 数下， $T_h=281$  K 时  $Nu_{av}$  受  $\phi$  的影响比  $T_h=277$  K、 $285$  K 小。

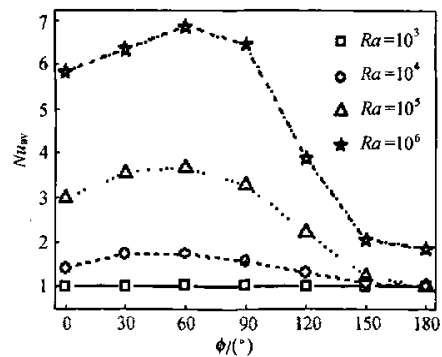
形成上述情况的原因主要有两点：一是形成了流动微弱的“死水区”，换热以热传导为主，热传导换热效率远小于热对流；另一方面是形成强度近似的双涡，阻断了冷、热壁面的直接联系，增加了热阻。因此，为了达到良好的换热效果，选择合适的倾斜角度非常必要。



(a)  $T_h=277$  K



(b)  $T_h=281$  K



(c)  $T_h=285$  K

图 8 方腔不同热壁面温度下平均 Nusselt 数随倾斜角度的变化

Fig. 8 Average Nusselt number under different lean angle of square cavity with different hot wall temperature

### 3 结 论

本文用数值模拟方法研究了封闭腔内水的自然对流, 得到非 Boussinesq 流体流动、换热特性, 并且得到了不同物理、几何条件对流动、换热影响。主要结论如下: (1) 当封闭腔体内存在水温比较缓慢跨越  $T_0$  区域时, 则描述水自然对流的 Boussinesq 假设不再适用; (2) 流动反转的双涡结构阻断了冷、热壁面的直接联系, 减弱了对流换热效果; (3) Rayleigh 数对流动、传热具有决定性的影响, 高宽比  $A$ 、倾斜角度  $\phi$  对流动和换热有重要影响; (4) 在一定  $Ra$  和温差  $\Delta T$  下, 一定的高宽比或者倾斜角度对应着最佳的传热特性。

#### 符 号 说 明

- A——矩形腔高宽比
  - $H, L$ ——分别为腔体高度、宽度, m
  - $h$ ——对流传热系数,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
  - $q$ ——热流量,  $W \cdot m^{-2}$
  - $\Delta T$ ——冷热壁面温差, K
  - $U, V$ ——量纲 1 速度
  - $X, Y$ ——量纲 1 坐标
  - $\alpha$ ——热扩散系数,  $m^2 \cdot s^{-1}$
  - $\phi$ ——倾斜角度, ( $^\circ$ )
  - $\lambda$ ——水的热导率,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
  - $\gamma$ ——热膨胀率,  $^\circ C^{-1}$
  - $\nu$ ——运动黏度,  $Pa \cdot s$
  - $\theta$ ——量纲 1 温度
- 下角标
- av——平均值
  - c——冷壁面
  - h——热壁面

#### References

[1] Jürgen Zierep, Herbet Oertel Jr. Convective Transport and

Instability Phenomena. Karlsruhe: Braun, 1982

- [2] Gray D D, Giorgin A. The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1976, **19**: 545-551
- [3] G de Vahl Davis. Natural convection of air in square cavity; a benchmark numerical solution. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 1983, **3**: 249-264
- [4] Deng Bin (邓斌), Tao Wenquan (陶文铨). Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow and heat transfer characteristics side of shell-and-tube heat exchangers. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2004, **55** (7): 1053-1059
- [5] Hideo Inaba, Takeyuki Fukuda. Natural convection in an inclined square cavity in regions of density inversion of water. *J. Fluid Mech.*, 1984, **142**: 363-381
- [6] Lin D S, Nansteel M W. Natural convection heat transfer in a square enclosure containing water near its density maximum. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1987, **30**: 2319-2329
- [7] Braga S L, Viskanta R. Transient natural convection of water near its density extremum in a rectangular cavity. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1992, **35**: 861-875
- [8] Braga S L, Viskanta R. Effect of density extremum on the solidification of water on a vertical wall of a rectangular cavity. *Experiment. Therm. Fluid Sci.*, 1992, **5**: 703-713
- [9] Wei Tong, Jean N Koster. Natural convection of water in a rectangular cavity including density inversion. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1993, **14**: 366-375
- [10] Wei Tong. Aspect ratio effect on natural convection in water near its density maximum temperature. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1999, **20**: 624-633
- [11] Li Heng (李恒), Bai Bofeng (白博峰), Lu Jun (陆军), Guo Liejin (郭烈锦). Experimental study of thermal convection during the water solidification process in cylinder cavity. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2006, **27** (6): 977-980
- [12] Tao Wenquan (陶文铨). Numerical Heat Transfer (传热学). 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001

# 封闭腔内水自然对流换热数值模拟

作者: [苏燕兵](#), [陆军](#), [白博峰](#), [SU Yanbing](#), [LU Jun](#), [BAI Bofeng](#)  
作者单位: [西安交通大学动力多相流国家重点实验室](#), 陕西, 西安, 710049  
刊名: [化工学报](#) **ISTIC EI PKU**  
英文刊名: [JOURNAL OF CHEMICAL INDUSTRY AND ENGINEERING \(CHINA\)](#)  
年, 卷(期): 2007, 58 (11)  
被引用次数: 2次

## 参考文献(12条)

1. Jürgen Zierep;Herbet Oertel Jr [Convective Transport and Instability Phenomena](#) 1982
2. Gray D D;Giorgin A [The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases](#)[外文期刊] 1976
3. G de Vahl Davis [Natural convection of air in square cavity:a benchmark numerical solution](#) 1983
4. 邓斌;陶文铨 [Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow and heat transfer characteristics side of shell-and-tube heat exchangers](#)[期刊论文]-[化工学报](#) 2004(07)
5. Hideo Inaba;Takeyuki Fukuda [Natural convection in an inclined square cavity in regions of density inversion of water](#) 1984
6. Lin D S;Nansteel M W [Natural convection heat transfer in a square enclosure containing water near its density maximum](#)[外文期刊] 1987
7. Braga S L;Viskanta R [Transient natural convection of water near its density extremum in a rectangular cavity](#) 1992
8. Braga S L;Viskanta R [Effect of density extremum on the solidification of water on a vertical wall of a rectangular cavity](#) 1992
9. Wei Tong;Jean N Koster [Natural convection of water in a rectangular cavity including density inversion](#) 1993
10. Wei Tong [Aspect ratio effect on natural convection in water near its density maximum temperature](#) 1999
11. 李恒;白博峰;陆军;郭烈锦 [Experimental study of thermal convection during the water solidification process in cylinder cavity](#)[期刊论文]-[工程热物理学报](#) 2006(06)
12. 陶文铨 [传热学](#) 2001

## 本文读者也读过(10条)

1. 彭岚. 李友荣. 刘渝. 唐经文 [水平环缝内冷水自然对流换热过程的数值模拟](#)[会议论文]-2008
2. 陈宝明. 宋桂梅. Chen Baoming. Song Guimei [室内有凸出热源和加热器的封闭空腔内自然对流换热](#)[期刊论文]-[山东商业职业技术学院学报](#)2002, 2(3)
3. 童长青. 何雅玲. 王勇. 刘迎文. Tong Changqing. He Yaling. Wang Yong. Liu Yingwen [封闭方腔自然对流的格子-Boltzmann方法动态模拟](#)[期刊论文]-[西安交通大学学报](#)2007, 41(1)
4. 王刚. 曾敏. 黄自鹏. 王秋旺. 罗来勤 [部分充满内热源多孔介质的封闭方腔内自然对流的数值模拟](#)[会议论文]-
5. 李光正. 李贵. 张宁 [封闭腔内自然对流数值方法研究](#)[期刊论文]-[华中科技大学学报\(城市科学版\)](#)2002, 19(4)
6. 华泽嘉. 徐焕. HUA Ze-jia. XU Huan [离散热源的自然对流换热数值模拟](#)[期刊论文]-[吉林电力](#)2009, 37(6)
7. 杨小川. 李德富. 夏新林 [椭球形浮空器内部的自然对流](#)[会议论文]-2008
8. 罗军. 李光正. 张帅师. 黄素逸. Luo Jun. Li Guangzheng. Zhang Shisuai. Huang Suyi [有内置物的二维封闭方腔自](#)

然对流实验研究[期刊论文]-华中理工大学学报1999, 27(4)

9. 朱红钧, 陈小榆, 王雪, 麻洪波, ZHU Hong-jun, CHEN Xiao-yu, WANG Xue, MA Hong-bo 水下热油管道停输温降过程的数值模拟[期刊论文]-特种油气藏2009, 16(2)

10. 杜艳平, 屈治国, 徐会金, 赵长颖, 陶文铨 金属泡沫部分填充的圆柱封闭腔中自然对流数值模拟[会议论文]-2009

#### 引证文献(2条)

1. 胡程耀, 黄培 基于改进GA求解边界移动的非稳态自然对流反问题[期刊论文]-南京理工大学学报(自然科学版) 2011(1)

2. 张辉, 高才, 刘向农, 王铁军 方腔内不同位置块状食品层流冷却数值研究[期刊论文]-合肥工业大学学报(自然科学版) 2010(4)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hgxb200711005.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hgxb200711005.aspx)