

封闭腔内层流自然对流换热过渡层数值研究

黄建春 李光正

江立新

(华中科技大学土木工程学院) (湖北汉川电厂检修公司)

摘要: 对正方形空腔内的层流自然对流换热进行了数值模拟, 用 SIMPLE 算法和乘方格式对该问题 ($Ra = 1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$) 进行了详细的数值计算. 根据计算结果, 在前人工作的基础上总结出封闭腔内层流自然对流换热的变化规律, 提出了导热占主导地位的层流流动和导热与对流共时作用的层流流动的分界点, 同时得出了两个区域的平均努塞尔数的计算公式, 通过比较, 表明其精度较以前的计算公式要高.

关键词: 腔内自然对流换热; 层流过渡层; 数值模拟

中图分类号: TK11⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8616(2001)05-0051-03

封闭腔内的自然对流换热在工程及地球物理学中有着广泛的应用, 例如太阳能吸热器、建筑物隔热、动力电站封闭母线及旋转电机的散热、微电子设备的冷却等, 因而日益得到广泛的注意. 已有大量的学者对各种形状的封闭空腔进行了相当多的实验和数值分析^[1~5], 其中文献 [1] 的研究较为详细, 但其计算结果只是在非常有限的工况中进行的, 并没有对封闭腔内层流自然对流换热的过程进行深入分析和研究, 因此, 本文在以前实验的基础上^[6]进行了详细的数值计算.

1 数学模型

采用图 1 所示模型 (其中, 上下底绝热, 左壁为高温段 T_h , 右壁为低温段 T_c), 流动区域是二维正方形内部的空腔, 并且, 假定上下底绝热、两

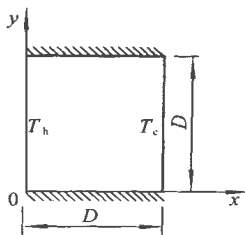


图 1 二维空腔模型

侧壁保持在 20 K 以下的温差以保证 Boussinesq 假设成立. 描述该物理模型的无量纲数学方程如下:

$$\partial(\rho U)/\partial X + \partial(\rho V)/\partial Y = 0;$$

$$\begin{aligned} U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}; \\ U(\partial V/\partial X) + V(\partial V/\partial Y) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + Gr \cdot \Phi; \\ U \frac{\partial \Phi}{\partial X} + V \frac{\partial \Phi}{\partial Y} &= \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} \right), \end{aligned}$$

式中, $X = x/D$; $Y = y/D$; $U = u/(v/D)$; $V = v/(v/D)$; $P = p^*/[\rho(v/D)^2]$; $\Phi = (T - T_0)/(T_h - T_c)$; $p^* = p + \rho g_0 y$; $T_0 = (T_h + T_c)/2$; 葛拉晓夫数 $Gr = g\beta(T_h - T_c)D^3/v^2$; 普朗特数 $Pr = v\rho C_p/k$.

边界条件为: 当 $X=0$ 时, $U=V=0$, $\Phi=0.5$; 当 $X=1$ 时, $U=V=0$, $\Phi=-0.5$; 当 $Y=0$ 或 $Y=1$ 时, $U=V=0$, $\partial\Phi/\partial Y=0$.

计算程序采用 SIMPLE 算法计算该流动和传热的耦合问题取得了良好的收敛解. 在计算过程中差分格式采用乘方方案, 两个方向的速度的松弛因子都取为 0.5, 而温度的松弛因子取为 0.8. 平均努塞尔特特征数表征了热壁传向冷壁的总热量, 它是局部努塞尔特特征数沿热壁高度的积分平均, 即

$$Nu_{ave} = \frac{1}{D} \int_0^D Nu_D dy.$$

2 计算结果与讨论

网格的划分对于计算结果的精度是比较重要的, 理论上讲网格越密越接近真值, 但在实际计算

收稿日期: 2000-09-19.

(作者简介) 黄建春(1970)男, 博士研究生, 武汉, 华中科技大学土木工程学院(430074). <http://www.cnki.net>

中并非如此,由于计算机内存和计算机本身的精度的限制,使得当网格增加到一定的时候反而会引入误差增加,同时也会增加计算时间.经比较,采用了 80×80 的网格得到很好的计算结果.

在本数值模拟中, Pr 设为 0.71(空气),瑞利数 Ra 取一组不同的值,即 $Ra=1 \times 10^3, 1 \times 10^4, 4 \times 10^4, 5 \times 10^4, 1 \times 10^5$ 和 1×10^6 . 其计算结果的流线图如下图 2 所示.

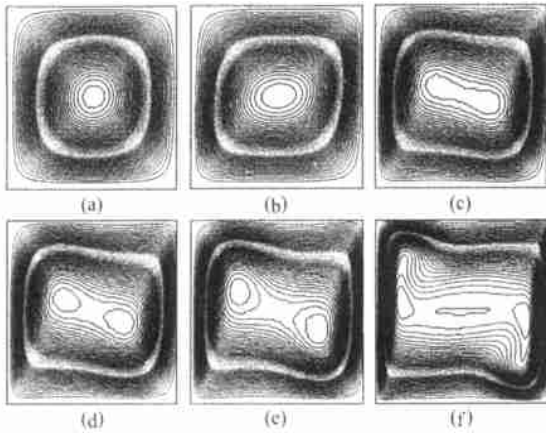


图 2 不同瑞利数 Ra 的流线图

(a) $Ra=1 \times 10^3$; (b) $Ra=1 \times 10^4$; (c) $Ra=4 \times 10^4$;
(d) $Ra=5 \times 10^4$; (e) $Ra=1 \times 10^5$; (f) $Ra=1 \times 10^6$

由图 2 可以看出,当 Ra 数较小时,流动的典型特性是在方腔中间出现了一个大涡,随着 Ra 数的增大,涡逐渐变成了椭圆,并且当 Ra 达到了 5×10^4 时分裂成两个涡,当 Ra 达到 1×10^6 时,这两个涡分别向左壁和右壁移动,并在方腔中间出现了第三个涡.

图 3 给出了 $Ra=1 \times 10^3, 1 \times 10^4, 1 \times 10^5, 1 \times 10^6$ 时的等温图,可以看出传热随着 Ra 的增加而发生变化的规律.当 Ra 较小时,传热主要是由热壁和冷壁之间的热传导引起的,在这种情况下等温线几乎是垂直的.随着 Ra 的增大,传热机制逐渐由热传导占统治地位变为对流占统治地位,因此等温线在方腔中央逐渐变得水平,并且只在热壁和冷壁附近的薄边界层内保持垂直.

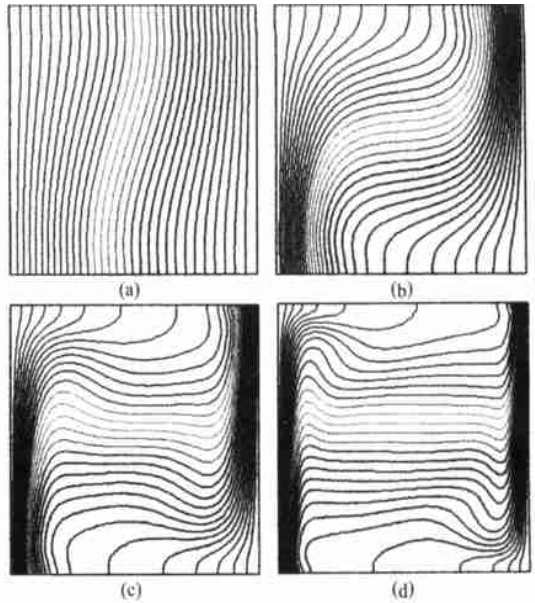


图 3 不同瑞利数 Ra 的等温图

(a) $Ra=1 \times 10^3$; (b) $Ra=1 \times 10^4$;
(c) $Ra=1 \times 10^5$; (d) $Ra=1 \times 10^6$

以上观察的现象与文献 [1, 2] 中的报道的现象是一致的.在此为了更深入分析现象,经过大量的工况计算,发现腔内的流动特性在 Ra 为 5×10^4 左右时就已发生了质的变化,因此可以认为,此时流体的流动状态已经进入了层流过渡层的状态,即此时进入了热传导和对流传热的相持阶段.以此为分界点分别对这两个阶段的平均努谢尔特特征数进行了数据分析,其平均努谢尔特特征数和 Ra 的关系为

$$Nu_{ave} = a(Ra)^b \quad (1)$$

当 $0 < Ra < 5 \times 10^4$ 时, $a=0.12244, b=0.32343$; 当 $5 \times 10^4 \leq Ra \leq 1 \times 10^6$ 时, $a=0.185467, b=0.2839$.

上面的拟合公式与计算结果的相对误差 e 都小于 1.0% ,这一拟合公式比其他的拟合公式的精度要更为精确,表 1 给出与文献 [1] ($a=0.142, b=0.299$) 和文献 [2] ($a=0.143, b=0.299$) 的计算对比结果.

表 1 按式 (1) 计算的 Nu_{ave} 及相对误差 e

Ra	本算法		文献 [1]		文献 [2]	
	Nu_{ave}	$e/\%$	Nu_{ave}	$e/\%$	Nu_{ave}	$e/\%$
1×10^3	1.147 587	0.36	1.114	0.55	1.108	1.8
1×10^4	2.418 151	0.42	2.245	0.67	2.201	2.02
1×10^5	4.877 302	0.09	4.51	1.57	4.43	0.9
1×10^6	9.369 645	0.01	8.806	0.35	8.754	1.6

参 考 文 献

Square Cavity. Int. J. Numerical Methods in Fluids, 1994, 18, 695~719

[1] Barkos G, Mitsoulis E. Natural Convection Flow in a [2] Markatos N C, Pericleous K A. Laminar and Turbulent

Natural Convection in an Enclosed Cavity. Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, 27, 775~792

- [3] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [4] 王启杰. 对流传热传质分析. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [5] 李光正. 非定常流函数涡量方程的一种数值解法的研究. 力学学报, 1999, 31(1): 10~20
- [6] 罗 军, 李光正, 黄素逸等. 有内置物的二维封闭方腔自然对流实验研究. 华中理工大学学报, 1999, 27(4): 90~91

Numerical Study on the Flow Transition in Laminar Natural Convection Flow in a Square Cavity

Huang Jianchun Li Guangzheng Jiang Lixin

Abstract: The numerical simulations have been undertaken for the benchmark problem of laminar natural convection flow and heat transfer in an enclosed square cavity. The SIMPLE arithmetic and power format are used to solve the conservation equations for laminar flow for a series of Rayleigh numbers reaching values up to 1×10^6 . Some comparisons between the computational data and previous data and the correlations and further analyses are made. Based on the computational results, a new law of laminar natural convection flow and heat transfer is summarized on the basis of previous scholar's works. The flow transition is accurately proposed between the laminar flow predominated by the heat conduct and the laminar flow cooperated by the convection and the heat conduct. The average Nu correlations are made for representing the computational data and they are more precise than the previous correlations.

Key words: natural convection and heat transfer in an enclosure; laminar flow transition; numerical simulation

Huang Jianchun Doctoral Candidate; College of Covil Eng., HUST, Wuhan 430074, China.

华中数控公司成功开发国产机床 配套数控系统

由我校华中数控股份有限公司承担的“863”计划重大项目——开放式体系结构智能化数控系统的工程化及产业化, 通过了国家科技部高技术研究发展中心、“863”计划联办、自动化领域办共同组织的现场验收。

该项目采用了一条创新的技术路线, 其基于工业 PC 的开放式数控系统已逐步得到用户和专家的认同, 并取得了较好的成果。在华中 I 型开放式数控系统平台上, 开发、派生了 20 多种不同的数控产品, 开发出了五轴联动高性能数控机床; 在项目执行过程中建立了较完善的设计、生产和质量管理保证体系, 通过了 ISO9001 质量体系认证, 建立了较完备的质量检测中心, 产品质量不断提高。华中数控公司用高技术改造传统产业, 为提高传统产业产品的高科技含量作出了贡献。利用华中 I 型开放式数控系统为国内制造行业改造了一批高中档数控机床, 建立了三个应用示范点, 开始为国内机床厂配套国产数控系统, 增强了国产数控系统与国外同类产品的竞争能力。