

部分开口空腔内自然对流传热的数值研究

NUMERICAL STUDY OF NATURAL CONVECTION
HEAT TRANSFER IN A PARTIAL CAVITY

夏 吉 良 辛 明 道 张 洪 济

Xia Jiliang Xin Mingdao Zhang Hongji

(工程热物理研究所)

摘 要 本文描述具有部分开口的方形空腔内的非稳态及稳态的二维层流自然对流传热的数值分析结果。方形空腔由两个水平绝热壁、一个竖直加热壁而另一个竖直壁为冷壁但具有变化的开口度组成。数值结果覆盖了雷利数 $Ra=10^3\sim 10^6$ 及开口度 $Y_0=0.0\sim 1.0$ 。结果表明开口度对空腔内的自然对流流动与传热有显著的影响,且影响的程度随雷利数改变而变化。

关键词 自然对流传热, 部分开口空腔, 开口度

中国图书资料类法分类号TK124

ABSTRACT A numerical analysis is carried out for the unsteady and steady, two-dimensional, laminar natural convection heat transfer in a square partial cavity. The partial cavity consists of two horizontal adiabatic surfaces, a vertical hot surface and a cold surface with varied opening. The results are obtained for $Ra=10^3-10^6$ and $Y_0=0.0-1.0$. This study shows that the opening size has significant effect on the flow and heat transfer in partial cavity, and the extent of its effect changes with different Rayleigh numbers.

KEY WORDS natural convection heat transfer; partial cavity; opening

一、前 言

封闭空腔内的自然对流传热广泛地存在于工程领域,因而已引起了研究者的重视。封闭空间内的自然对流已进行了大量的研究,但开口空腔内的自然对流研究尚不多见。文献[1]对二维等温的方形开口空腔内的自然对流进行了数值计算。相同结构条件下热物性的影

本文于1988年12月19日收到。

• 本项目为国家教委基金资助课题。

响由文献〔2〕进行了分析。文献〔3、4〕对太阳能集热系统中的开口空腔内自然对流进行了试验研究。其它有关开口空腔内自然对流的数值分析与试验已在文献〔5-10〕中得以报导。但以往的研究很少涉及开口度变化对空腔内自然对流的影响。本文对具有上下表面绝热、部分开口的二维方形空腔内的自然对流进行了数值分析，研究了不同雷利数下开口度变化时空腔内非稳态及稳态的流动与传热特性。

二、控制方程与求解程序

问题的物理模型及坐标系统如图1所示。初始时刻，腔壁及腔内流体处于均匀温度且流体静止。两个水平表面绝热，两个竖表面处于均匀温度下（分别为 T_h 和 T_c ）且冷壁下部开口，认为Boussinesq近似是可信的。忽略辐射效应、粘性耗散及压缩功对传热的影响，腔内对流处于层流状态。

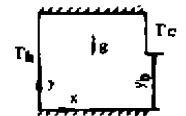


图1 物理模型

质量、动量及能量守恒方程的无量纲形式如下：

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (4)$$

边界条件和初始条件

$$U = 0, V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad Y = 0, 1, \tau > 0 \quad (5)$$

$$U = 0, V = 0, \theta = 1 \quad X = 0, \tau > 0 \quad (6)$$

$$U = 0, V = 0, \theta = 0 \quad X = 1, \tau > 0 \quad (7)$$

$$U = 0, V = 0, \theta = 0 \quad \tau = 0 \quad (8)$$

在开口处，速度分布和温度分布是未知的。假设如下：

$$\frac{\partial V}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial X} = -\frac{\partial V}{\partial Y}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{\text{out}} = 0, \quad \theta_{\text{in}} = 0 \quad (9)$$

本研究中，控制方程用有限差分法进行数值求解，采用 24×24 的非均匀网格，且网格边界与物理边界一致。向前差分用于时间的偏导数，中心差分用于扩散项，迎风差分用于对流项，ADI方法用来求解线性代数方程组。由于动量方程的非线性，速度与压力及流动与传热间的耦合，利用SIMPLE算法〔11〕，但这里不指定压力修正迭代的最大次数，而是当各节点的剩余质量之和小于某一小数时才使压力修正迭代终止。时间步长取为 $10^{-4} \sim 5 \cdot 10^{-4}$ ， $Pr = 0.7$ 。

当下述条件满足时，认为稳定状态已经到达

$$\left| \frac{Nu^{n+1} - Nu^n}{Nu^{n-1}} \right| \leq 5 * 10^{-5} \quad (10)$$

三、结果与讨论

由总能量平衡方程要求:

$$R = - \int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0} dY + \int_{Y_0}^1 \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0} dY - \int_0^{Y_0} U \theta dY = 0 \quad (11)$$

这里 Y_0 为开口度。计算结果表明, 在所有考虑的情况下, 方程(11)不一致地等于零但只是在小数点后第四位上不同。

文献〔7〕对由一个竖直加热壁和两个水平绝热壁组成的方形开口空腔内的自然对流进行了数值分析。作为比较, 我们先对 $Y_0=1.0$ 时的全开口空腔内的自然对流进行了分析, 图2示出本文的结果(近场解, $Pr=0.7$)与文献〔7〕的结果(远场解, $Pr=1.0$)的比较。由图可见, 二者的结果吻合很好。

从方程(1-4)及(11)可以看出, 对于具有冷壁下部开口的方形空腔内的自然对流, 主要控制参数是 Pr 、 Ra 、 Y_0 , 即

$$Nu = - \int \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_w dY = f(Pr, Ra, Y_0) \quad (12)$$

在开口处进出的流体质量相等。进入的质量流量 M 定义如下:

$$M = \int_{Y_0, X=1} U dY \quad (13)$$

这里当 $U_{X=1} < 0$ 时, $U = -U_{X=1}$, 当 $U_{X=1} \geq 0$ 时, $U = 0$ 。

图3示出几个典型工况的速度分布及温度分布。由图可见, 在 $Ra=10^3$ 时, 导热是传热的主要机理。随着 Ra 的增加, 开口空腔内的自然对流增强, 这时开口度对空腔内流动与传热的影响增强。在 Ra 一定时, 空腔内的速度分布与温度分布随 Y_0 的不同而变化。较大的 Y_0 更有利于流体从开口处进出, 高温区域缩小, 竖壁附近的温度梯度增大, 因而空腔内的传热增强, 而且冷热表面的平均努谢尔特数差异减小。由于冷壁温度与环境温度相同, 且冷壁与进入的流体分离, 导致在其附近也出现一个温度由低到高的变化区域, 但腔内流体的流动使其变化的空间区域范围比流体从开口进入后温度变化的区域范围窄, 因而前一区域中的温度梯度比后一区域的大, 且出现分区现象。

图4给出 $Y_0=0.5$ 时冷热表面的 Nu 随 Ra 的变化。图中同时示出了竖直加热平板的解及 $Y_0=1$ (全开口空腔)、 $Y_0=0$ (封闭空腔)的数值结果。由图可知, 空腔的 Nu 低于竖直平板的努谢尔特数, 但随着 Ra 的增大, 相对差别逐渐减小。而且在一定的 Ra 条件下, 随着冷壁侧的开口度增加, 热壁的 Nu 增大, 当 $Y_0=1$ 时达到最大值, 这可以从图5中看得更为清楚。对于冷表面, Nu_c 一般亦随 Y_0 的增大而增加。当 Y_0 小于某值时(例如 $Ra=10^5$ 时 $Y_0 \approx 0.27$), 开口度对热壁传热的影响很小。而当 Y_0 大于某值时(例如 $Ra=10^5$ 时 $Y_0 \approx 0.78$)后, 开口度对冷热表面传热的影响亦比较小。在相同的 Ra 和 Y_0 条件下, Nu_h 小于 Nu_c , 这是

因为开口处于冷表面的下部, 有利于冷表面的对流。

图6示出不同开口度下冷热表面的局部努谢尔特数分布。加热壁的最大局部 Nu_x 出现在加热壁下部附近, 随 Y_0 的增加, 局部 Nu_x 增大, 且局部 Nu_x 沿加热壁的变化情况亦随 Y_0 的不同而略有差异。冷壁局部传热特性受流体冲刷的影响随开口度的不同有很大的变化, 因而呈现出比较复杂的情况。

图7表明不同开口度时热壁的平均 Nu_x 随无量纲时间的变化。随着 Y_0 的增加, 到达稳态所需的时间减小, 而且对不同的 Y_0 , 平均 Nu_x 随时间的变化率不同。开口度 Y_0 越小, Nu_x 随时间的变化率越大, 例如在 $Ra=10^3$ 的条件下, 当 $Y_0=0.7273$ 时, 在 $\tau=0.1$ 后 Nu_x 已几乎达到稳态值, 而当 $Y_0=0.2727$ 时要在 $\tau=0.2$ 以后才没有明显的变化。在 $\tau<0.025$ 时, 对不同的 Y_0 , Nu_x 随 τ 的变化几乎是相同的。

图8示出同一 Ra 条件下不同 Y_0 时开口处的水平速度和温度分布。速度值按最大水平速度 U_m 归一化。当 Y_0 较小时, 开口处的最大水平速度出现在开口的下部附近; 当 Y_0 较大时, U_m 出现在开口的上部附近。对于出口温度分布来说, 随着 Y_0 增加, 开口处的最大无量纲温度变大。图9表明 $Y_0=0.5$ 时各种 Ra 下开口处的归一速度分布和温度分布。随着 Ra 增加, 出流所占开口度的份额逐渐减小, 且最大入流水平速度过渡到最大出流速度的变化率增大, 同时最大出流速度出现的位置亦随 Ra 的增大而逐渐地向上移动, 这是因为增加的浮力影响所致。

图10给出一定 Ra 时开口处的入流质量 M 及最大水平速度 U_m 随 Y_0 的变化。在一定的 Ra 条件下, M 和 U_m 随 Y_0 的增大而增加。当 Y_0 较小时, M 和 U_m 随 Y_0 增加的速度较快; 当 Y_0 大到一定程度以后, M 和 U_m 随 Y_0 增加的速度较小。 M 和 U_m 在 $Y_0=1$ 时达到最大。图11示出一定 Y_0 时 M 和 U_m 随 Ra 的变化。可以看出 M 和 U_m 随 Ra 的增大而增加。这是很显然的, 因为 Ra 增加时, 空腔内的自然对流增强, 导致 M 和 U_m 增大。

四、结 论

1. 本文研究了具有变化开口度时方形空腔内非稳态及稳态的二维层流自然对流。数值结果表明: 开口度变化显著地影响空腔内的流动与传热, 当开口度很小时, 开口对腔内的主流场影响很小, 但随开口度的增大, 其对主流场的影响变大。且随 Ra 的增大, 其影响程度增加。
2. 当空腔冷壁侧具有下开口时, 由于冷壁与进入的流体分离, 使腔内流体温度出现分区现象。在一定 Ra 的条件下, 随着开口度的增加, 加热壁附近的流体温度梯度增加。
3. 开口处的流动是复杂的, 且随开口度的改变而不同; 开口处的质量流量和最大水平流速随 Ra 或 Y_0 的增加而增大。
4. 具有下开口冷壁的平均和局部传热性随 Y_0 的改变呈现比较复杂的情况。
5. 随 Y_0 的增加, 到达稳态所需的无量纲时间减少。在不同的 Y_0 条件下, 冷热壁的平均和局部努谢尔特数随时间的变化规律显著不同。

主要符号说明

H 高度

X 无量纲水平坐标, x/H

k	导热系数	Y	无量纲竖直坐标, y/H
M	开口处的入流质量流量	Y_0	开口度, y_0/H
Nu	努谢尔特数	θ	无量纲温度 $(T - T_c)/(T_h - T_c)$
p	压力	β	热膨胀系数
P	无量纲压力 $(p + g\rho y)H^2/\rho a^2$	μ	流体的动力粘度
Pr	普朗特数	ν	流体的运动粘度
q	热通量	τ	无量纲时间, at/H^2
Ra	雷利数, $g\beta(T_h - T_c)H^3/\nu a$		上 标
T	温度	n	迭代次数
U	水平方向的无量 纲速度, uH/a		下 标
u	水平方向的流体速度	c	冷壁
V	竖直方向的无量 纲速度, vH/a	f	流体
v	竖直方向的流体速度	h	热壁
V_{max}	空腔内的最大速度	max	最大值
x, y	坐标		

参 考 文 献

- [1] Penot F.: Numerical Calculation of Two-Dimensional Natural Convection in Isothermal Open Cavities, Numer. Heat Transfer, 1982, 5, 421
- [2] Lequere O., Humphery J. A. C. and Sherman F. S.: Numerical Calculation of Thermally Driven Two-Dimensional Unsteady Laminar Flow in Cavities of Rectangular Cross Section, Numer. Heat Transfer, 1981, 4, 249
- [3] Humphery J. A. C., Miller L. and Chen K. C.: Experimental Investigation of Thermally Driven Flow in Open Cavities of Rectangular Cross-Section, Mech. Eng. Rept. FM-81-2, Univ. of California, Berkeley, 1981
- [4] Sernas V. and Kyriakides I.: Natural Convection in an Open Cavity, Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., 1982, 2, 275
- [5] Jacobs H. R., Mason W. E. and Hikida W. T.: Natural Convection in Open Rectangular Cavities, Heat Transfer, 1974 3, 90
- [6] Chan Y. L. and Tien C. L.: Laminar Natural Convection in Shallow Open Cavities, 21st ASME-AIChE National Heat Transfer Conf.,

Natural Convection in Enclosures-1983, HTD, 26, 77

- [7] Chan Y. L. and Tien C. L.: A Numerical Study of Two-Dimensional Convection in Square Open Cavities, Numer. Heat Transfer, 1985, 8, 65
- [8] Hess C. and Henze R.: Experimental Investigation of Natural Convection from a Side-facing Cubic cavity, ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf. Proc., 1983, 299
- [9] Clausing A. M., Waldvogel J. W. and Lister L. D.: Natural Convection from Isothermal Cubical Cavities with a Variety of Side-Facing Apertures, J. Heat Transfer, 1987, 109, 407
- [10] Ren Zepei, Meng Guirong and Tao Leren, Natural Convection in a Very Larger Aspect Ratio Open Cavities, 2nd Int. Symp. Heat Transfer, Peking, 1988.
- [11] Patankar S. U.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw Hill, New York, 1980.

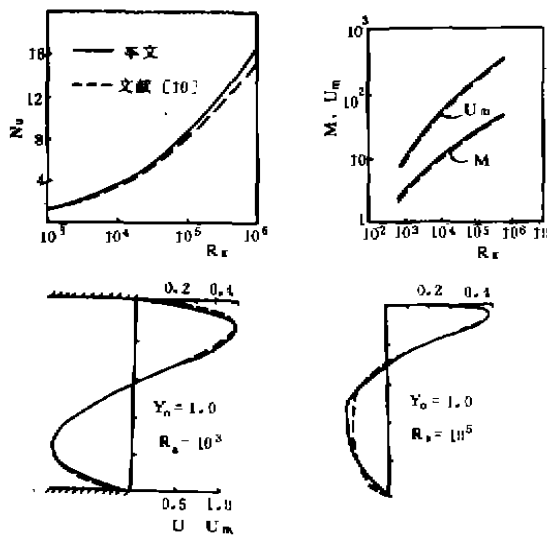


图2 $Y_0 = 1$ 时的数值结果及其与文献[7]的比较

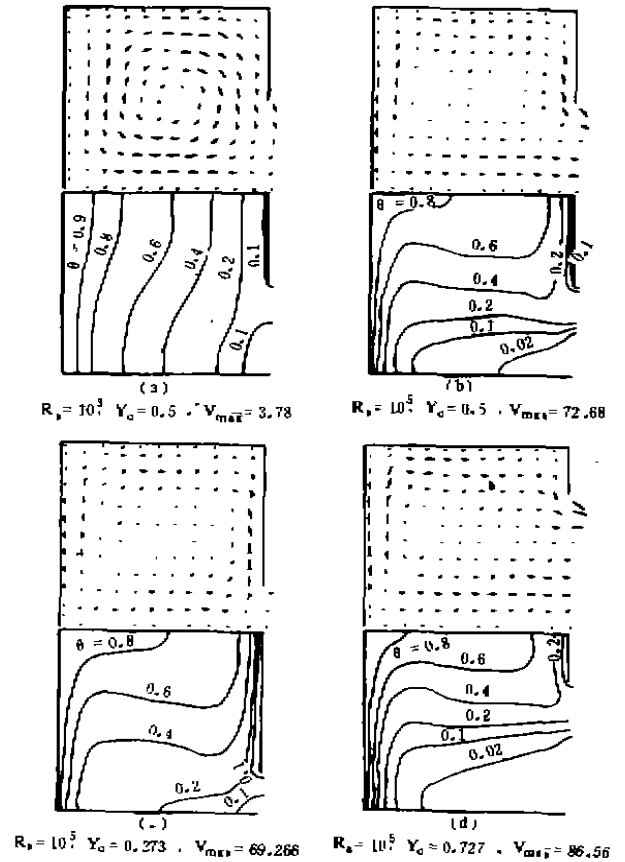


图3 部分开口空腔内的速度分布和温度分布

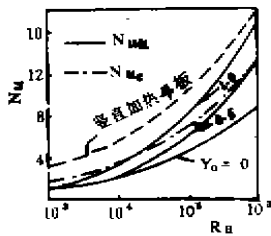


图4 不同 Y_0 时 Nu 随 Ra 的变化

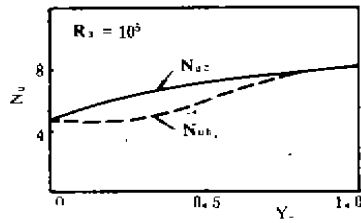


图5 Y_0 对 Nu 的影响

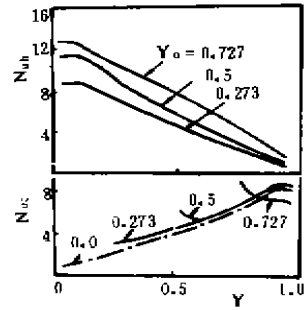


图6 冷热壁局部 Nu 的分布

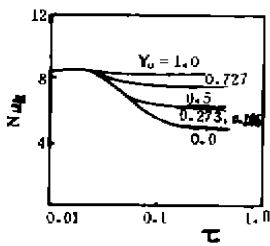


图7 Nu_w 随 x 的变化

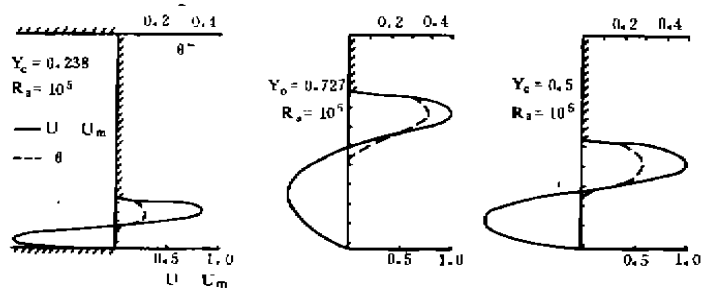


图8 不同 Y_0 时开口处的水平速度及温度分布

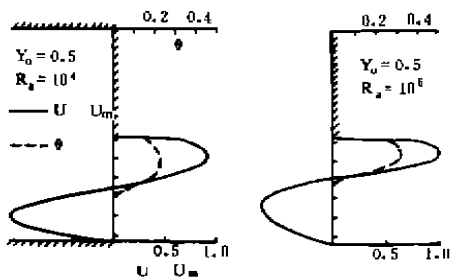


图9 不同 Ra 时开口处的水平速度及温度分布

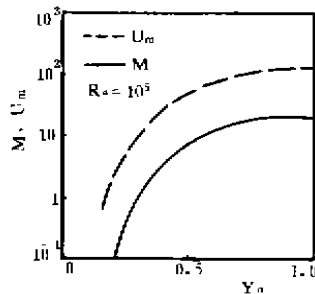


图10 Y_0 对 M 和 U_m 的影响

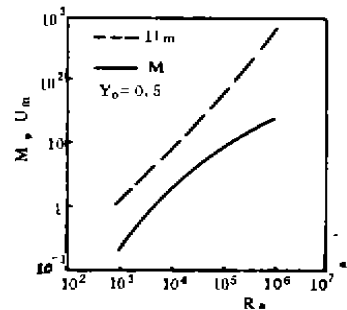


图11 M 和 U_m 随 Ra 的变化