

竖直矩形窄通道空气自然对流换热特性的实验研究

卢庆^{1,2}, 叶忠昊^{1,2}, 秋穗正^{1,2}, 苏光辉^{1,2}

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学科学与核技术系, 710049, 西安)

摘要: 实验研究了竖直矩形窄通道内空气自然对流换热特性. 实验段间隙为 1.0、1.8 和 2.5 mm, 实验段宽为 60 mm, 高为 800 mm, 高与间隙之比为 320~800, 宽与间隙之比为 24~60. 实验在环境温度和压力下进行, 在实验段宽边两侧对称均匀布置电加热棒间接加热, 平均壁面热流密度为 100~1 500 W/m². 实验结果表明: 由于实验段进出口端部效应的影响, 壁面最高温度出现在流道出口上游, 而不是出口处; 壁面热流密度呈现端部偏高、中部趋于平坦的趋势. 换热特性分析表明, 本实验结果要比文献中公式预测的结果偏高, 并且在 0.141~16.8 的 Rayleigh 数范围内, 3 个实验段的换热可以很好地用关系式 $Nu=0.263Ra^{0.308}$ 拟合.

关键词: 矩形窄通道; 自然对流; 空气; 换热

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0010-04

Experiment on Heat Transfer of Natural Convection in Vertical Narrow Rectangular Channels

LU Qing^{1,2}, YE Zhonghao^{1,2}, QIU Suizheng^{1,2}, SU Guanghui^{1,2}

(State Key Laboratory of Multi-Phase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Experiments on heat transfer characteristics of air natural convection in vertical narrow rectangular channels were conducted. The dimensions of the three channels investigated here were 800 mm in length, 60 mm in width, and 1.0 mm, 1.8 mm and 2.5 mm in the gap depth, respectively. The vertical rectangular channels were electrically heated with stainless heating rods on the two 60 mm sides and the average wall heat flux was 100-1 500 W/m². Moreover, correlations between Nu and Ra were explored. Our results indicate that all the experimental data of these three channels can be well correlated by $Nu=0.263Ra^{0.308}$ in the range of $0.141 \leq Ra \leq 16.8$.

Keywords: rectangular channel; natural convection; air; heat transfer

自然对流换热由于没有噪声, 不需要外力驱动的内在特点, 所以广泛应用于航空航天、太阳能换热器等工业生产和日常生活中. 已经有不少的学者对这一普遍存在的现象进行了研究. Elenbaas^[1-2]最早开展了竖直平板及竖直等截面流道内自然对流的实验研究和理论分析, 其结论成为了许多后续研究者

参考的依据. Sparrow 等人^[3]针对 Elenbaas^[1]数据的不足, 应用质量传递测量技术实现了质量传递与热传递的类比, 详细研究了竖直平行平板窄边是否封闭对自然对流的影响, 实验结果在低 Ra^* 下与 Elenbaas 的结论不符合, 但在高 Ra^* 下符合较好, 同时与 Levy^[4]的数据相符合. Hung 和 Peng^[5]实验

研究了一侧定热流、一侧绝热的竖直平板流道中热流密度及间隙变化对自然对流换热的影响. Sparrow 等人^[6]实验和数值研究了竖直矩形流道中以水作工质($Pr=5$)的自然对流流动换热. Ramakrishna 等人^[7]用焓量-流函数法数值分析了竖直方管自然对流换热. Morini-Spiga^[8]理论分析了定壁温边界条件下瞬态层流对流换热. 目前,针对大宽高比竖直矩形窄缝通道内空气自然对流换热特性的实验研究未见报道,而这种换热现象已出现在某些板状燃料元件反应堆的事故工况中,比如堆芯完全失流,或者在燃料组件更换过程中由于机械故障导致换料机卡死,燃料组件悬空等. 在这些事故工况下,自然对流能否有效地带走堆芯余热,对于维持燃料元件的完整性、确保放射性物质不外泄具有重要的意义. 基于这样的应用背景,本文对间隙 b 分别为 1.0、1.8 和 2.5 mm,宽度为 60 mm,高为 800 mm 的大比例(长和间隙之比达到 800~320)竖直矩形窄缝通道内空气自然对流换热特性进行了实验研究.

1 实验装置

本实验系统由 2 台交流电变压器提供电加热同时调节电压,由电加热棒进行加热,实验段竖直放置,通过外径为 1.0 mm 的镍铬-镍硅铠装热电偶以及 IMP35951C 数据采集板和一台工控机进行温度测量.

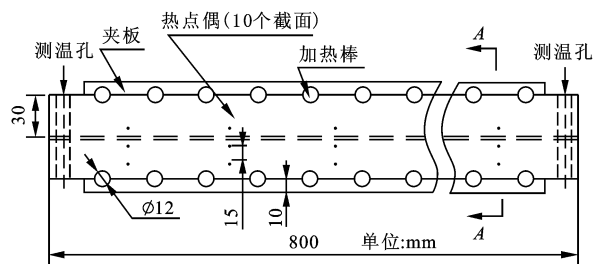
实验段由如图 1a 所示的 2 块厚 30 mm 的槽型不锈钢板焊接而成,不同深度的槽型不锈钢组成 800 mm,宽 60 mm,间隙分别为 1.0、1.8、2.5 mm 的矩形窄通道实验段. 在焊接好的实验段表面及夹板之间,沿轴向均匀地钻出直径为 12 mm、深 100 mm 的加热棒孔,上下各 20 个.

如图 1b 所示,在实验段的侧面对称布置孔径为 1.2 mm 的 4 个热电偶插孔,沿实验段长度方向以间距为 76 mm 均匀布置 10 组热电偶,实验段两侧对称布置 2 个热电偶来测量壁温,以计算壁面热流密度 q . 实验工作段的进出口空气温度用直径 1.0 mm 的镍铬-镍硅铠装热电偶直接测量.

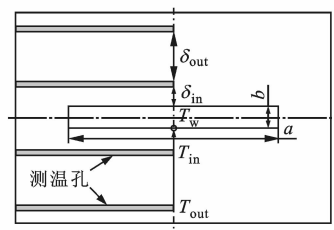
2 实验方法及数据处理

2.1 实验方法

实验中通过调节变压器来调整投加到电加热棒上的电压,维持该电压直到测得的测点温度每 0.5 h 变化小于 0.5 °C,即认为该工况达到稳定,记录数据,然后重复下一组实验. 本实验中由于实验本体的



(a) 实验段整体



(b) A-A 测温截面

图 1 实验段示意图

厚度很大,所以每一变工况后达到稳定所需时间很长,一般在 20 h 左右.

2.2 数据处理

2.2.1 壁面热流密度计算 如图 1b 所示,根据通道两侧截面热电偶所测得的温差,由傅里叶定律可求得各自的壁面热流密度

$$q_{wj} = \frac{\lambda(t)}{\delta_{out}} (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

式中: q_w 为壁面热流密度, W/m^2 ; $\lambda(t)$ 为不锈钢的导热系数, $W/m \cdot ^\circ C$; T_{out} 为外侧热电偶测得的温度, $^\circ C$; T_{in} 为内侧热电偶测得的温度, $^\circ C$; δ_{out} 为两热电偶插孔之间的距离, m; δ_{in} 为靠近通道内侧热电偶插孔到通道壁面之间的距离, m; 下标 j 等于 1 或 2 分别表示流道的左侧或者右侧壁面.

取该截面壁面热流密度为两侧壁面热流密度的平均值

$$q_w = \frac{q_{w1} + q_{w2}}{2} \quad (2)$$

2.2.2 流道内壁面温度的确定 由图 1b 中 4 个热电偶测得的温度及式(2)求得的热流密度,可以通过下式计算出通道内壁面温度

$$T_{wj} = T_{in} - q_{wj} \delta_{in} / \lambda(t) \quad (3)$$

式中: T_{wj} 为通道上壁面温度, $^\circ C$.

取该截面壁面温度为上下壁面温度的平均值

$$T_w = \frac{T_{w1} + T_{w2}}{2} \quad (4)$$

2.2.3 平均换热特性分析 定义平均 Nusselt 数

$$Nu = \frac{h_{av} D_c}{k} \quad (5)$$

当量直径

$$D_c = \frac{4A}{P} \quad (6)$$

平均对流换热系数

$$h_{av} = \frac{q_{wav}}{T_{wav} - T_{air}} \quad (7)$$

平均壁面热流密度

$$q_{wav} = \sum_{i=1}^{10} q_{wi} / 10 \quad (8)$$

平均内壁面温度

$$T_{wav} = \sum_{i=1}^{10} T_{wi} / 10 \quad (9)$$

平均空气温度

$$T_{fav} = 0.5(T_{inlet} + T_{outlet}) \quad (10)$$

定义 Rayleigh 数

$$Ra = GrPr = \frac{g \alpha b^4 q_{av} Pr}{\nu^2 k} \quad (11)$$

式中: A 为面积, m^2 ; P 为润湿周长, m ; T_{air} 为环境空气温度, $^{\circ}C$; T_{inlet} 、 T_{outlet} 分别表示空气在实验段进、出口的温度, $^{\circ}C$; g 为重力加速度, $kg/m \cdot s^2$; b 为间隙厚度, m ; k 为空气的导热系数, $W/m \cdot ^{\circ}C$; ν 为空气的运动黏性系数, m^2/s ; α 为空气体积膨胀系数, $\alpha = 1/T_{fav}$, $1/^{\circ}C$.

空气物性参数的确定以空气的平均温度 T_{fav} 为定性温度。

2.2.4 不确定度分析 实验中直接测量的物理量主要有实验段的几何尺寸和温度分布,其各自最大相对误差分别为 0.1% 和 0.75%,同时考虑到数据采集系统的误差为 0.02%,所以根据 Kline & McClintock 及 Moffat 的方法^[9-10],最后反映在 Nu 中的不确定度为 6.75%。

3 实验结果及讨论

3.1 壁面温度分布

壁面温度分布在定性上具有基本相同的变化规律,即壁面温度随着主流方向的沿程变化并不是单调的,而是在靠近实验段的出口段存在一个温度的极大值点。这种在出口处壁面温度降低的现象是由于出口导热和辐射等因素的影响,使得散热增强,壁面温度下降,同时这种不均匀性随着热流密度以及间隙的增加而增大(见图 2)。

3.2 壁面热流密度分布

图 3 给出了壁面热流密度的分布。沿流动方向热流密度在进口呈减小的趋势,在出口又呈增大的趋势,而在实验段中部壁面热流密度较为平稳。这种端部热流密度偏高的原因是受端部导热和辐射换热

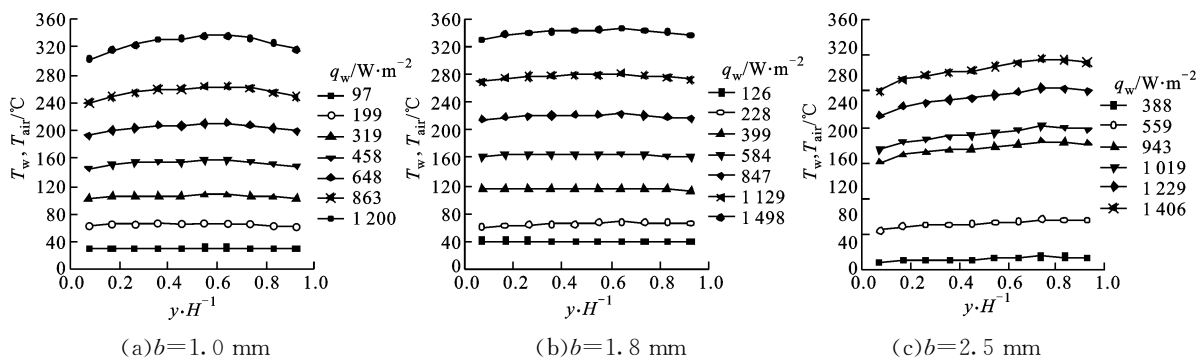


图2 壁面温度分布

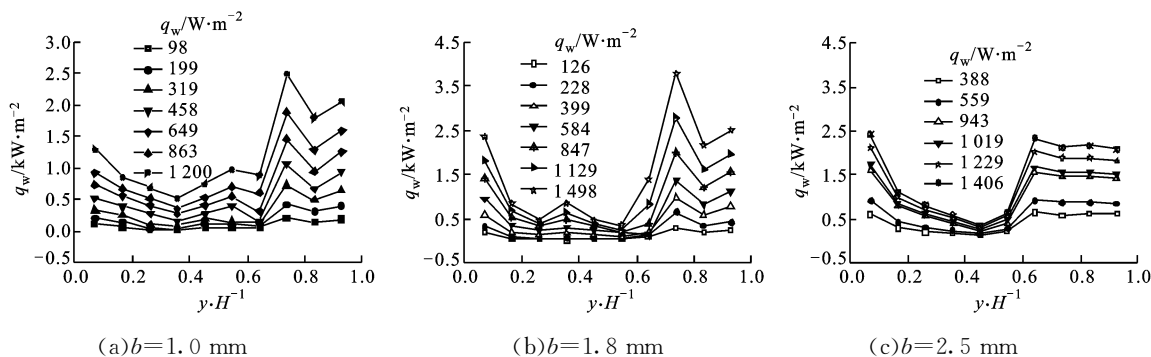


图3 壁面热流密度分布

的影响,同时在进口存在入口效应,而在出口可能存在着回流,这些都将增强换热(见图 3c). 出口附近的热流趋势与图 3a、图 3b 中的相差较大,原因可能是实验中在出口倒数第 3 根热电偶附近有一个电加热棒烧坏,所以影响了局部热流分布,但实验段良好的导热性能,使得对于整体传热特性分析影响并不显著.

3.3 换热特性分析

图 4 示出了 Nu 随 Ra 的变化趋势. 各个点表示在其对应的稳定实验工况的数据点,中心实线为用最小二乘法获得的拟合曲线. 分析表明,在 3 个不同窄缝宽度的实验段中,空气自然对流的换热实验结果都可以很好地用 $Nu=CRa^n$ 进行数据的拟合,3 个实验段的数据可以很好地统一拟合为

$$Nu = 0.263Ra^{0.308} \tag{12}$$

Ra 的范围为 0.141~16.8. 拟合值与实验值的误差控制在 $\pm 10\%$ 之内.

为了与文献结果相对照,将实验结果与修正的 Ra 拟合,可得

$$Nu = 1.299(Rab/H)^{0.253} \tag{13}$$

实验数据与拟合公式的误差在 $\pm 10\%$ 以内. 图 5 给出了本文实验结果与文献结果的对比. Ramakrishna 等人^[7]采用涡量-流函数法,通过三维数值方法分析

了竖直方形流道内定热流边界条件下的自然对流换热. Rohsenow 等人^[11]在传热手册中给出了定热流对称加热的两竖直平板间自然对流换热关系式. 可以看到,不同的研究者所得到的结果之间存在较大的差异. 这主要是由于不同研究者所研究的具体对象不完全一致,而且对本文所研究的低 Ra 情况下的空气自然对流的关注不够. 本实验中的实验段介于无限大平板与方形流道之间,获得的换热值比 Ramakrishna 等人^[7]和 Rohsenow 等人^[11]的换热值大. 主要原因在于,低 Ra 情况下进口空气导热对入口空气起到了预热的作用,从而增强了换热.

4 结 论

本文实验研究了竖直矩形窄通道内空气自然对流换热特性. 通过对长为 800 mm,宽为 60 mm,间隙厚度分别为 1.0、1.8 和 2.5 mm 的实验段(长和间隙之比达到 800~320,宽和间隙之比达到 60~24)在 100~1 500 W/m² 的壁面热流密度范围内空气自然对流换热研究发现,壁面温度并非单调增加,而是在靠近出口的上游出现壁面温度最高值,并且随间隙和热流密度的增大,这种不均匀性增强. 壁面热流密度在进出口偏高,而在实验段的中部趋于稳定. Nu 可以用一个统一的关系式 $Nu=0.263Ra^{0.308}$ 将 3 个实验段的数据进行有效地拟合,这一公式可以用于低 Ra 情况下空气自然对流换热计算,填补了文献中对低 Ra 情况下自然对流研究的不足. 本文实验结果对于板状燃料元件反应堆堆芯的设计及某些事故工况的分析具有重要的意义.

参考文献:

[1] ELENBAAS W. Heat dissipation of parallel plates by free convection [J]. Physica, 1942, 9(1):1-28.
[2] ELENBAAS W. The dissipation of heat by free convection; the inner surface of vertical tubes of different shapes of cross-sections [J]. Physics(Utrecht), 1942, 9(8):865-873.
[3] SPARROW E M, BAHRAMI P A. Experiments on natural convection from vertical parallel plates with either open or closed edges [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1980, 102(1):221-227.
[4] LEVY E K, EICHEN P A, CINTANI W R, et al. Optimum plate spacings for laminar natural convection heat transfer from parallel vertical isothermal flat plates; experimental verification [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1975, 97(2):474-476.

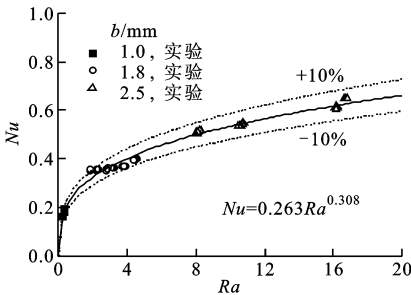


图 4 努塞尔数随瑞利数的变化

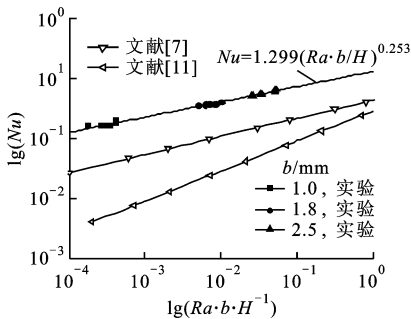


图 5 实验与文献换热特性对比

- [5] HUNG Y H, PERNG S W. An experimental study of local steady state natural convection in a vertical channel heated on one side wall [C]//Jacobs H R. ASME Proceedings of the 1988 National Heat Transfer Conference. New York, USA: ASME, 1988: 165-171.
- [6] SPARROW E M, CHRYSLER G M, AZEVEDO L F. Observed flow reversals and measured-predicted Nusselt numbers for natural convection in a one-sided heated vertical channel [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1984, 106(1):325-332.
- [7] RAMAKRISHNA K, RUBIN S G, KHOSLA P K. Laminar natural convection along vertical square ducts [J]. Numerical Heat Transfer, 1982, 5(1): 59-79.
- [8] MORINI G L, SPIGA M. Transient laminar natural convection along rectangular ducts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(24), 4703-4710.
- [9] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3-17.
- [10] KLINE S, MCCLINTOCK F A. Description of uncertainties in single sample experiments [J]. Mechanical Engineering, 1953, 75(1):3-9.
- [11] ROHSENOW W M, HARTNETT J P, CHO Y I, et al. Handbook of heat transfer [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1998.

(编辑 王焕雪)