

极小尺寸圆形空气射流强化换热的实验研究

陈永昌 马重芳 雷道亨

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘要 采用极小尺寸喷嘴进行了圆形空气射流的实验研究,测定了在不同雷诺数 Re 和喷射间距对圆形空气射流冲击换热的影响.拟合得到了驻点换热的经验公式,并与已有文献结果进行了比较.实验测量了圆形空气射流换热系数径向分布,得到单调性变化的一般结果;实验还表明在一定的 Re 和喷射间距下圆形空气射流换热系数径向分布出现层流向湍流过渡.

关键词 射流冲击, 强化传热, 恢复系数

分类号 TK124

0 引言

射流冲击具有极高的换热系数^[1,2],按工质的种类可分为气体射流和液体射流,液体射流具有很高的换热率,而气体射流尤其是空气射流因工质简单易得,成本低廉,而且不会对换热表面产生任何化学影响,因此在一定的热通量范围内,将促进其在微电子控制、计算机自动化等具有高热负荷的科学技术,及航空航天高科技领域中的应用.

由于气体射流具有高压缩性,易于获得较高流速.对于空气射流,由于驻点区有很高压力,在高流速下由绝热压缩引起的驻点升温不可忽略.在射流速度极高,不能忽略粘性耗散的情况下,要使用换热面壁温 T_w 与射流的绝热壁温 T_{aw} 之差来定义对流换热系数

$$h = \frac{q}{T_w - T_{aw}} \quad (1)$$

式中绝热壁温定义为 $T_{aw} = T_j + \frac{ru^2}{2C_p}$ (2)

其中: r 为恢复系数; u 为射流出口速度; C_p 为定压比热; T_j 为射流静温.

首先采用以上定义,并被后人广为引用.对于射流冲击换热,Goldstein等^[3]系统研究了单束圆形空气射流的恢复系数及局部换热特性.国外对较大尺寸的射流冲击进行了较多研究^[1~5],但在小尺寸尤其极小尺寸射流方面的研究尚属少见.本文采用小于1mm的小喷嘴直径进行射流冲击换热实验,得到了在极小尺寸下圆形空气射流的换热特性,并与已有文献结论进行了比较.

1 实验设备和方法

图1为圆形空气射流实验系统图.空气作为系统循环和换热工质,在压缩、过滤、冷却和测量系统中运行.图2为主要实验容器及测量仪表,实验件主要部分为一个10 μ m厚,面积为5mm \times 10mm的康铜膜,作为模拟电子芯片的换热表面.

通过换热表面的热通量 $q = \frac{I^2 R_a}{A}$ (3)

收稿日期: 2000-01-19

式中, 电流 I 和电阻 R_a 分别使用万用电表测定, 换热表面面积 A 使用精密工具显微镜测量, 精度 0.01 mm . 射流内径 $d = 987 \mu\text{m}$, 喷嘴长度 $L = 35 \text{ mm}$, 采用较大的长度与直径比, 以保证得到充分发展的层流流动. 如图 2 所示, 实验中采用三维坐标架在 3 个方向上, 调节喷嘴与实验件的相对位置, 最小位移 $10 \mu\text{m}$. 空气流动管固定在三维坐标架上, 实现对喷嘴的位置调节. 空气由系统管道流过 125 m^3 的密封室稳定后, 进入喷嘴射出. 采用 3 个直径为 0.08 mm 的铁-康铜热电偶, 测量空气射流的喷嘴出口温度、换热面温度及环境温度, 测温误差为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$. 如图 3 所示, 在加热面背面布置一个铁-康铜热电偶, 测量换热壁面温度, 通过移动三维坐标架, 可以测得温度分布.

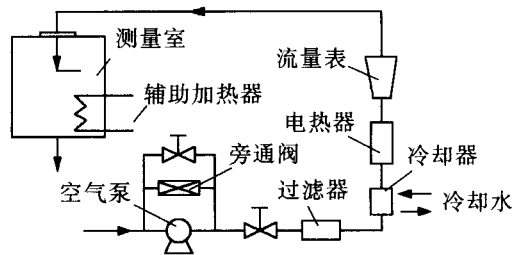


图1 实验循环系统图

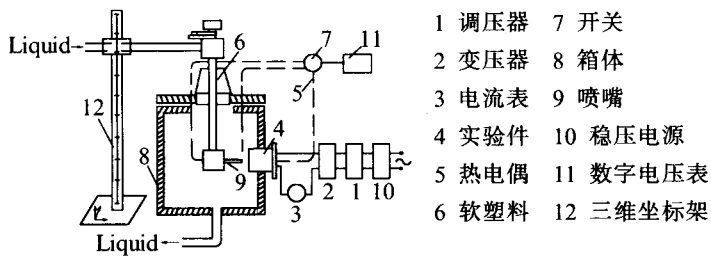


图2 测量室结构及仪表

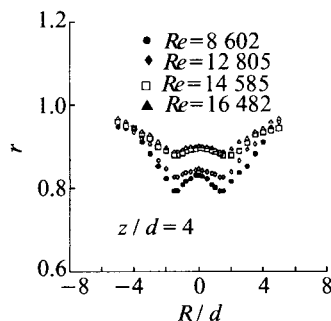


图3 $z/d=4$ 时恢复系数的径向分布

2 实验结果与分析

2.1 恢复系数

图 4 为 $z/d = 4$ 时不同雷诺数 Re 圆形空气射流的恢复系数 r 的径向分布曲线. 由图所见, 对于圆形空气射流, 不同的 Re 的恢复系数径向分布表现出形状的一致性, 且恢复系数值都小于 1. 在驻点处有最大值, 在 $R/d \approx 1.8$ 时出现局部最小值, 随着径向距离的增加, 恢复系数单调增加, 趋近最大值 1. 不同的 Re 对恢复系数的径向分布只有轻微的影响, 在高速射流冲击下, Re 对恢复系数影响不大. 这与 Goldstein 等人^[3] 的实验结果一致. 由于气体射流冲击的恢复系数因绝热压缩升温引起, 所以其驻点处的换热系数最高 (接近 1).

2.2 驻点换热

通过实验测量了 Re 与喷射间距 z/d 对驻点区换热的影响, 如图 5 所示. 在 z/d 小于 8 的范围内, 喷射间距 z/d 对驻点换热特性影响很小, 驻点区换热系数可被下式关联

$$Nu \text{ (努塞尔数)} = 1.07 Re^{0.515} Pr^{0.4} \quad (4)$$

式中系数 1.07 和 Re 的指数根据最小二乘法确定, 普朗特数 Pr 的指数则根据文献 [8] 确定. 将实验结果与文献 [8] 对空气的驻点换热公式 (5) 比较, 较为吻合, 相对误差在 10% 以内.

$$Nu = 1.29 Re^{0.5} Pr^{0.4} \quad (5)$$

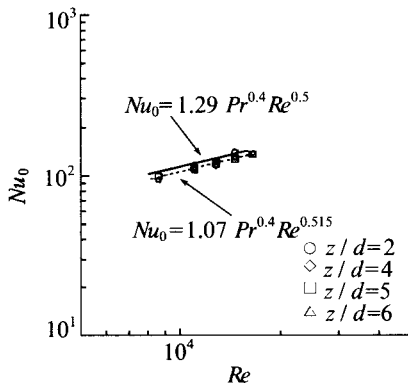


图4 驻点 Nu 随 Re 和喷射间距 z/d 的变化

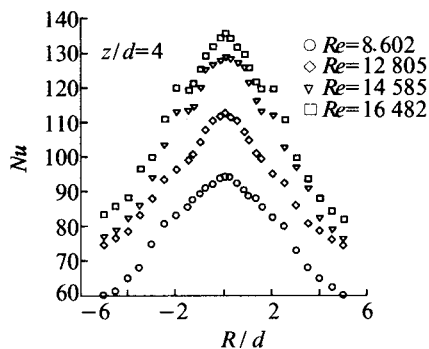


图5 $z/d=4$ 时局部换热系数的径向分布

式中 Re 的指数为 0.5 充分显示了空气射流驻点区的层流特性。

2.3 换热系数的径向分布

图 6 表示了喷嘴距离为 $z/d=2, z/d=4, z/d=7$ 时不同 Re 下的换热系数的径向分布曲线。根据式 (1)、(2) 得到局部换热系数的分布。所有曲线表现出相同的变化趋势。由于驻点射流冲击最强,因此在驻点处显示出最大换热系数。随着径向距离 R/d 的增加,空气流速迅速减小,引起换热系数不断下降。图 6 中较高 Re 的曲线还显示出了不同一般的变化。在 $R/d \approx 2$ 时,出现局部换热强化,即换热系数出现局部最大值。在 $z/d \leq 4$ 时,较高 Re 情况会出现这种局部换热强化现象。研究理论认为,这是由于流动从层流向湍流过渡引起的结果,这种现象与文献 [1, 5, 6, 8] 中研究的结果一致。

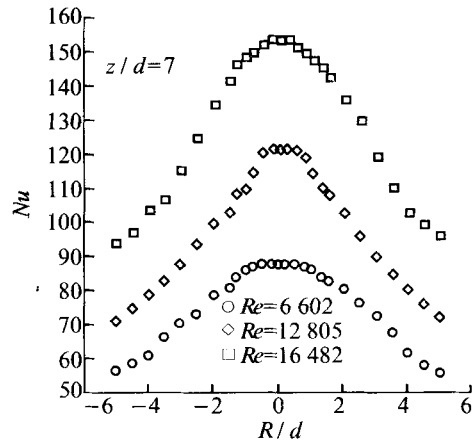


图6 $z/d=7$ 时局部换热系数的径向分布

2.4 平均换热

本文对局部换热系数分布进行积分并归一化,得到局部平均换热分布曲线。根据文献 [3] 研究,对局部换热系数按下式进行积分得到平均换热系数

$$\overline{Nu} = \frac{R^2}{2 \int_0^R \frac{\xi d\xi}{Nu}} \tag{6}$$

积分结果由驻点值 Nu_0 相除,进行归一化处理,如图 7,图8 所示。由图中可见,所有局部平均换热分布曲线,都在驻点有最大值,然后随着径向距离 R/d 的增加,平均换热效果逐渐减弱。其分布曲线可表示为径向距离 R/d 的函数关系,由下式关联

$$\frac{\overline{Nu}}{Nu_0} = \frac{1}{1 + B(R/d)^p} \tag{7}$$

式中 $B = 0.038, p = 1.51$ 根据实验数据用最小二乘法确定。如图 7 和图 8 所示,85% 以内的数据相对误差在 $\pm 15\%$ 以内,数值曲线能够与实验结果很好吻合。

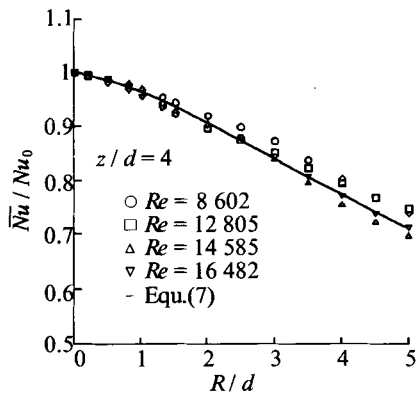


图7 $z/d=4$ 时局部平均换热系数的径向分布

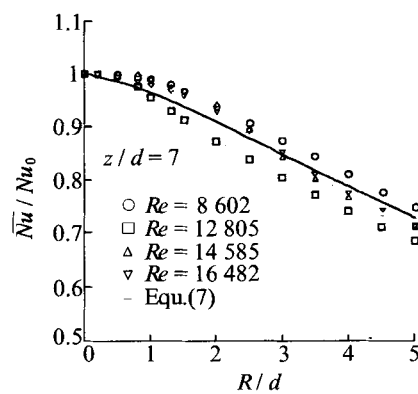


图8 $z/d=7$ 时局部平均换热系数的径向分析

3 结论

本文采用极小直径的喷嘴,对圆形空气射流的恢复系数和换热特性进行了实验研究,并与文献 [3] 相比较,取得一致。对驻点换热数据得到很好关联,表明驻点区流动符合层流特性,与文献 [7] 结果非常吻

合. 实验测定了小尺寸圆形空气射流局部换热系数径向分布规律, 得到了与文献 [3] 大尺寸射流相一致的实验结果, 并发现在一定 Re 和喷射间距 z/d 范围内, 流动由层流向湍流过渡的现象, 导致局部换热强化.

参 考 文 献

- 1 Jambunathan K, Lai E, Moss M A, et al. A deview of heat transfer data for single circular jet impingement. *Int J Heat and Fluid flow*, 1992, 13(2): 1105~1108
- 2 Baughn J W, Shimizu S. Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging Jet. *Journal of Heat Transfer*, 1989. 1110~1113
- 3 Goldstein R J, Behbahani A I, Kieger Heppelmann K. Streamwise distribution of the recovery factor and the local heat transfer coefficient to an impinging Circular Air Jet. *Int J Heat Mass Transfer*, 1986, 29(8): 1227~1235
- 4 Baughn J W, Hechanova A E, Yan Xiaojun. An experimental study of entrainment effects on the heat transfer from a flat surface to a heated circular impinging Jet. *Journal of Heat Transfer*, 1991. 113
- 5 Robert. Gardon, Cahit Akfirat J. The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets. *Int J Heat Mass Transfer*, 1965, 8: 1261~1272
- 6 Webb B W, Ma C F. Single-phase liquid jet impingement heat transfer. *Advances in Heat Transfer*, 1995, 26: 105~217
- 7 Ma C F, Zheng Q, Lee S C, et al. Impingement heat transfer and recovery effect with submerged jets of large prandtl number liquid-part 1, unconfined circular jets. *Int J Heat Mass Transfer*, (No.HMT 1156)
- 8 Ma C F, Sun H, Tian Y Q. Local convective heat transfer from small heaters to impinging submerged axisymmetric jets of seven coolants with prandtl number ranging from 0.7 to 348. *Journal of Thermal Science*, 1997, 6(4): 286~297
- 9 Ma C F, Zhuang Y, Lee S C, et al. Impingement heat transfer and recovery effect with submerged jets of large prandtl number liquid-part 2, initially laminar confined slot jets. *Int J Heat Mass Transfer* (No. HMT 1157)
- 10 甘永平, 李庆祥. 空气射流冲击模拟电子芯片的传热实验研究. 见: 中国工程热物理学会, 传热传质学术会议, No.963150

Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of Air Jet Impingement with Extremely Small Size Round Nozzle

Chen Yongchang Ma Chongfang Lei Daoheng

(College of Environment and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract An extremely small sized round nozzle is used in air jet impingement experiment, from which the effects of Reynolds number and nozzle-to-plate spacing are investigated in detail. The data of stagnation are well correlated with an empirical formula. Also, the local heat transfer coefficients obtained from the experiment show monotonously decreasing with increasing of radial distance from stagnation point. An interesting phenomenon is observed from experimental results that flow boundary layer transition from laminar to turbulence will appear with definite Reynolds number and nozzle-to-plate spacing.

Keywords jet impingement, heat transfer enhancement, recovery factor