

旋转射流冲击换热液晶显示实验研究

陈玉阳 苑中显 马重芳 俞 坚 胡云芝

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘 要 采用热色液晶测温技术对以二氧化碳为工质的稳态射流冲击换热和管内插入扭转带方式的旋转射流冲击换热进行了实验研究。与普通射流相比, 旋转射流导致驻点附近区域的换热趋于均匀化。其换热系数在大于某一半径之后高于普通射流, 但在驻点附近相对较低。旋转射流对换热的此种影响随雷诺数的增大而减弱。

关键词 旋转射流; 强化传热; 液晶显示

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2003)04-0646-03

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER OF SWIRLING JET IMPINGEMENT WITH LIQUID CRYSTAL TECHNIQUE

CHEN Yu-Yang YUAN Zhong-Xian MA Chong-Fang YU Jian HU Yun-Zhi

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

Abstract The heat transfer rate of jet impingement with and without swirling has been experimentally studied using thermal liquid crystal technique. The result revealed that the distribution of Nusselt number with swirling tends to be flat in the stagnation region in contrast to the bell shape distribution without swirling. Comparing with the usual case, swirling jet impingement possesses lower heat transfer rate near the center and higher in the wall flow region. This effect is less conspicuous as Reynolds number increases.

Key words swirling jet; heat transfer augmentation; liquid crystal

1 引 言

热色液晶测温技术是利用热色液晶随温度的变化迅速改变其反射光颜色的特性, 在现代光学、光电仪器及计算机图像技术的支持下, 提供温度场的定量面分布信息。它是一种集定量采集和图像显示双重功能于一体的高技术测温手段, 在传热实验技术领域已获得了成功应用^[1]。

射流冲击冷却是在受冲击表面上的强迫对流换热过程, 对于冷却表面的局部高温区域相当有效。文献 [2] 的研究表明驻点区的射流冲击冷却换热系数比通常的管内流动换热系数要高出几倍甚至 1 个数量级。随着科学技术的迅猛发展, 各种热设备的工作温度在不断提高。例如, 密集布置的大功率电

子元件的电子设备中的释能密度高达 10^5 W/m^2 。并且在电子元件的冷却技术中, 元件的冷却必须尽可能的均匀一致, 否则对设备性能和寿命会有不利的影响。单纯的射流冲击冷却有时不能满足需要, 必须寻求其他更有效的冷却手段。

近年来, 人们已经开始对复合强化传热技术进行研究。所谓复合强化传热技术, 即两种或两种以上的强化措施同时应用, 以期获得更好的传热效果。文献 [3] 介绍了马达油在含扭转带的内翅铝管中换热和阻力实验的结果, 表明内翅管中加扭转带可以获得比空心内翅管高得多的换热系数。

本研究的目的是在射流喷嘴内插入扭转带, 以产生旋转射流, 用以冷却被加热的平板, 然后采用液晶显示技术获得壁面温度的分布及其变化规律,

收稿日期: 2002-12-11; 修订日期: 2003-06-06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No.G2000026304); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介: 陈玉阳 (1977-), 女, 重庆市人, 硕士研究生, 主要从事射流冲击强化传热的研究。

进而可以得到对流换热系数的分布。同时测定无旋转的普通射流在稳态条件下的换热系数, 作为旋转射流强化换热程度的比较基准, 以探讨射流冲击和管内插入扭转带这两种强化方式的复合效果。

2 实验系统及方法

2.1 实验系统

实验系统如图 1 所示, 它由二氧化碳管路系统、电加热系统及图像采集系统三部分组成。二氧化碳管路系统由高压二氧化碳气瓶、减压阀、气体过滤器、截止阀、节流阀、流量计、喷嘴、管件等组成。电加热系统由加热件(冲击靶)、电流表、调压器、导线等组成, 其中喷嘴的内径 $D=3\text{ mm}$, 喷嘴与冲击靶的距离为 $Z=9\text{ mm}$, 冲击靶为厚度 $H=0.01\text{ mm}$ 、面积 $S=25\text{ cm}^2$ 的不锈钢膜, 其背部附以 8 mm 厚的有机玻璃板, 起支撑和保温作用。射流的径向位置及喷嘴与冲击靶的距离由一个精度为 0.01 mm 的三维坐标架来控制。图像采集系统由摄像机、光源、图像板、双频监视器和计算机组成。从气瓶出来的二氧化碳依次通过截止阀、气体过滤器、节流阀、流量计、喷嘴, 产生高速射流。从喷嘴出来的二氧化碳流束直接冲击到加热件(冲击靶)上, 喷涂有液晶的加热件表面由于射流的冷却作用而出现颜色的变化。图像采集系统负责对换热状态下冲击靶上的颜色分布进行记录和处理, 得到温度的分布, 进而可计算出换热系数与努谢尔特数。

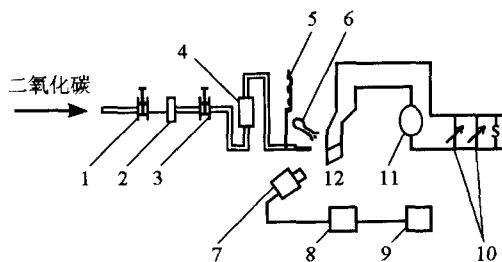


图 1 实验系统图

- 1 截止阀 2 过滤器 3 节流阀 4 流量计
5 热电偶 6 光源 7 摄像机 8 显示器
9 监视器 10 调压器 11 电流表 12 冲击靶

2.2 实验原理

根据牛顿冷却定律, 加热壁面的换热系数 h 由下式求得:

$$h = q / (t_w - t_f) \quad (1)$$

$$q = I^2 R / A \quad (2)$$

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

其中 Re 为雷诺数, u 为流体的速度, D 为喷嘴内径, ν 为运动粘度, h 为换热系数, t_w 为加热件表面温度, 它由液晶测温系统测得。 t_f 为喷嘴出口处的射流流体温度, 由铜-康铜热电偶测定。 I 为电流强度, R 为加热件的电阻, A 为加热面积。加热件是厚度为 0.01 mm 的不锈钢膜, 它的电阻不随温度和压力发生变化。 R 与 A 实验前预先测好, 电流表测量通过加热件(冲击靶)的电流, 结合加热件的电阻计算加热量。上述各量测定后, 即可按式(2)计算冲击靶面上自驻点起沿径向各点的对流换热系数 h 。

努谢尔特数 Nu 的定义为:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad (4)$$

式中 λ 为常压下的二氧化碳气体的导热系数。

2.3 旋转射流发生装置

将宽度与管子内径相等, 长度为 100 mm , 厚度为 0.1 mm 的不锈钢带沿长度方向扭曲, 而形成扭转带。扭转带的节距为 15 mm 。然后把扭转带插入管道出口处。当流体流过由于扭转带而产生的扭曲通道时, 流体产生螺旋式前进运动, 这样会引起流体的径向混合, 使得流体的紊流度增加, 并且这种旋转运动在流体从扭转带流道中出来后由于惯性作用会继续保持, 到达冷却表面的就是旋转射流。旋转射流具有紊流度高的特性, 从而可实现复合强化传热。

3 实验结果及分析

作为实验系统校核, 首先对 $D=3\text{ mm}$, $Z/D=3$ 的无扭转带的工况进行了实验。图 2 是依据实测的温度分布计算得到的不同雷诺数 Re 下的努谢尔特数 Nu 分布。由图 2 可见, 随着雷诺数的增加, 努谢尔特数随之升高, 最大努谢尔特数出现在 $r/D=0.16$ 附近。本文用实验值拟合得出 $Z/D=3$ 时的驻点换热公式为:

$$Nu = 1.34 Re^{0.47} \quad (5)$$

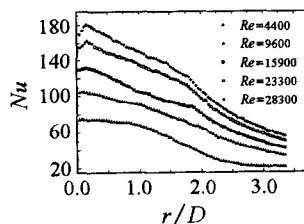


图 2 不同 Re 数下的 Nu 数分布 (普通射流)

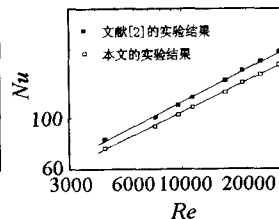


图 3 驻点处换热测量结果的比较 (普通射流)

图 3 所示是本实验结果与文献 [2] 的比较。由图 3 可知, 利用液晶测温技术得到的驻点处的努谢尔特数与文献 [2] 用热电偶测温方法得到的驻点处的努谢尔特数相差 10.8%, 由此可得到温度的平均误差为 9.2%。这与国外文献报道液晶定量测温精度为 10% 左右基本相符。并且, 液晶定量测温技术还能做到温度场的瞬态测量。可见液晶定量测温技术在某些场合是适用且方便的。

对于喷嘴内插入扭转带的情形, 采用相同直径的喷嘴和冲击距, 在 $Re = 7500 \sim 28300$ 范围内进行了实验, 然后将实验结果与普通射流进行比较。由图 4 可知: 与普通射流相比, 旋转射流的 Nu 数在 $r/D = 0 \sim 1.0$ 范围内, 沿径向变化平缓, 不出现明显峰值; 当 $r/D > 1.0$ 时, 才出现比较明显的下降。在驻点处, 旋转射流的 Nu 数低于普通射流的 Nu 数。这是因为扭转带使流体产生旋转运动, 使得流体获得向四周扩散的离心力, 和一般射流相比, 其扩散角大得多, 相应地紊流度增大, 所以对驻点附近换热的均匀性有积极作用。图 5 为 $Re=7500$ 时平均努谢尔特数沿径向的变化, 平均努谢尔特数定义式为 $\bar{Nu}(r) = \frac{1}{r} \int_0^r Nu(r) dr$ 。由图 5 可知, 与普通射流相比, 旋转射流的平均努谢尔特数变化平缓。在 $r/D \leq 1.5$ 时, 旋转射流的平均努谢尔特数低于普通射流的平均努谢尔特数, 在 $r/D > 1.5$ 后, 旋转射流的平均努谢尔特数高于普通射流的平均努谢尔特数。图 6 为两个 Re 数下平均努谢尔特数变化情况比较。 $Re = 7500$ 时, 平均努谢尔特数变化缓慢, 随着 Re 数的增加, 在 $Re=28300$ 时, 平均努谢尔特数下降趋势明显, 但换热强度明显增大。这是因为随着雷诺数的增加, 流速的作用比流体旋转的作用更强的缘故。由图 7 可知, 在驻点处, 旋转射流的 Nu 数略低于普通射流的 Nu 数; 在 $r/D = 2$

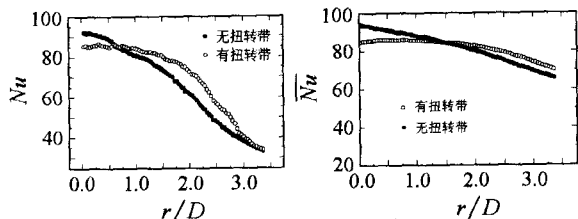


图 4 $Re = 7500$ 时 Nu 数的分布 图 5 平均 Nu 数的比较

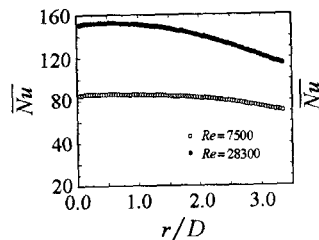


图 6 不同半径范围内的平均 Nu 数 (旋转射流)

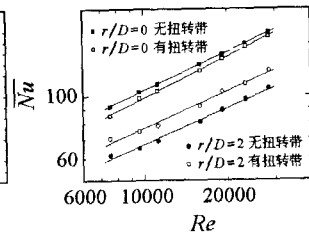


图 7 驻点换热情况比较

处, 旋转射流的 Nu 数明显高于普通射流的 Nu 数。可见在 $Re = 7500 \sim 28300$ 范围内, 当 $r/D \leq 2$ 时, 能得到比较均匀的换热。

4 结 论

通过对二氧化碳为工质的稳态射流和管内插入扭转带产生的旋转射流进行实验研究, 得出如下结论:

- (1) 液晶测温技术能比较准确地测定稳态射流的换热情况。在 $Re = 4400 \sim 28300$ 范围内, 得到的无旋转射流冲击换热的努谢尔特数沿径向的分布与前人实验结果基本相符。
- (2) 与普通射流冲击换热相比, 旋转射流换热的努谢尔特数在驻点附近低于普通射流, 但在壁面射流区高于普通射流。普通射流的努谢尔特数沿径向衰减较快, 并在驻点附近出现明显的峰值, 而旋转射流的努谢尔特数在 $r/D = 0 \sim 1.0$ 范围内沿径向变化较小, 在 $r/D > 1.0$ 后才出现明显下降。
- (3) 在低雷诺数时旋转射流导致驻点附近换热均匀化的作用明显。随着雷诺数的增加, 旋转射流的此种作用降低, 努谢尔特数的分布曲线变陡。

参 考 文 献

- [1] Jones T V. The Use of Liquid Crystals in Aerodynamics and Heat Transfer Testing. In: Proc. of the 4th Int. Symposium on Transport Phenomena in Heat and Mass Transfer. Sydney, Australia, 1991
- [2] Ma C F. Jet Impingement Heat Transfer with or without Boiling. J. Thermal Science, 1996, 5(2): 128-131
- [3] Manafzadeh S, Simon H A, Chow J C F. Heat Transfer Enhancement in Coiled Tubes. Letters in Heat and Mass Transfer, 1982, 9: 479-481