

方管核心流区域添加内插物强化传热的 实验研究

郑兆清 杨 臣 杨 昆 赖凤麟 吴国强 刘 伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 对方管核心流区域添加内插物强化对流传热进行了实验研究, 对传热与阻力特性和 PEC 值进行了实验分析, 实验结果表明: 方管内的换热平均强化了 2.2 倍, PEC 值为 1.06~1.8 之间。此外, 实验表明, 在层流和湍流情况下 PEC 均大于 1, 但层流状态下效果更加显著。

关键词 方管; 核心流; 强化传热; 流动阻力; PEC

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)09-1534-03

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT BY ADDING INSERTERS IN THE CORE FLOW ZONE OF SQUARE DUCT

ZHENG Zhao-Qing YANG Chen YANG Kun LAI Feng-Lin WU Guo-Qiang LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Heat transfer enhancement by adding inserts in the core flow zone of square duct was studied experimentally. The character of heat transfer and flow resistant as well as the PEC value were analyzed experimentally. The results show that the average heat transfer coefficient by adding inserts in the core flow zone of square duct is 2.2 times more than the average heat transfer coefficient of smooth square duct, and the PEC value is between 1.06 and 1.8. Furthermore, the results also showed that the PEC value in laminar and turbulent flow are both more than 1, but the enhancement efficiency is more remarkable in laminar flow.

Key words square duct; core flow; heat transfer enhancement; flow resistant; PEC

0 引 言

研究表明, 对流体流过平板的层流或湍流进行强化传热的一个简单方式就是提高流体速度, 从而使流动边界层和热边界层变薄, 壁面附近的流体温度梯度增大。然而, 当层流流体流过圆管和方形通道时, 在充分发展区, 整个流动空间内并不存在边界层, 温度梯度和速度梯度在整个通道截面均显著变化, 这一点不同于受限空间的入口段, 也不同于外掠无限大平板的流动。在受限空间内的充分发展区, 现有的在边界上添加扩展表面、扰流等方式^[1~4]都能使壁面附近的流体温度梯度增大, 但阻力也相应大大增大。若在受限空间的核心区添加扰流物, 促使核心区的流体

温度趋于均匀, 同时扰流物所占空间比较小, 不足以产生较大的阻力, 则可以实现传热强化的同时阻力增加不大, 从而提高换热设备的性能。

Mohamad 等^[5]研究了在圆管内核心区填充孔隙率较高的多孔介质, 并对其充分发展段的传热特性和阻力特性进行了数值模拟研究, 研究结果表明: 换热得到了明显的强化而流动阻力增大并不显著。之后, Pavel 等^[6]对圆管内部分填充和完全填充多孔介质的换热器的换热特性和流动阻力进行了实验研究, 结果表明: 部分填充多孔介质的换热器的性能较完全填充了多孔介质的换热器的要好。Wang 等^[7]等研究了在矩形通道内层流充分发展段的流体核心

收稿日期: 2008-01-18; 修订日期: 2008-06-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No.2007CB206900)

作者简介: 郑兆清 (1982-), 男, 湖北黄陂人, 博士生, 主要从事强化传热研究。

区添加插入物的传热特性和流动阻力数值模拟和实验研究。本文考虑在受限空间充分发展段核心区添加插入物, 对其传热和阻力特性进行实验研究。

1 实验系统

实验系统的构成如图 1 所示。主要有水箱、水量调节阀、泵、涡轮流量计以下几部分组成。(1) 进口稳定段: 为了使流体流速在进入试验段之前更加均匀稳定, 使流动得到充分发展, 在试验段之前设置 1.5 m 长的进口稳定段。(2) 实验段长为 500 mm 的不锈钢管, 方管为 20 mm×20 mm, 壁厚为 2 mm, 圆管外径为 $\phi 20$ mm, 壁厚为 2 mm。实验段通过法兰与入口稳定段、出口稳定段相连, 并用橡胶垫圈密封。实验段是系统的加热段, 在其壁面等距布置 7~9 对热电偶, 测量钢管壁温。在钢管外壁依次布置加热层和绝缘保温层。(3) 出口段: 为了测量方便, 在实验段尾部设计一段长为 300 mm 的出口段。流体通过出口稳定段流出系统, 排入地下水道中。(4) 插入物: 为单根长径比较大的圆形细杆, 相互交叉成“十”字形, 布置在管内流动的核心流中心截面。细杆间距为 5 mm, 长径比 $l/d = 18$ 。细杆端部并不与管壁接触, 但由于安装中的误差, 可能会有几根与壁面接触的情况。

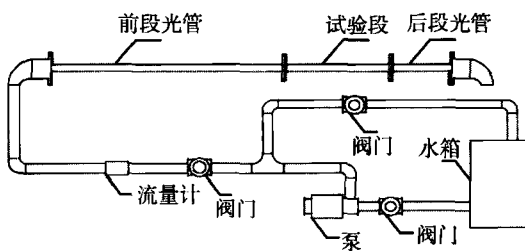


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

2 实验结果及分析

2.1 管内对流换热特性

2.1.1 壁面温度分析 图 2, 图 3 分别为层流 ($Re=1200$) 和紊流 ($Re=5000$) 情况下光管与有细杆插入的方管 (称为强化管) 实验段沿流向 (x 方向) 壁面温度分布图。由图可见, 强化管壁面温度明显要比光管时低。这表明在管内插入细杆后, 增强了管内对流换热。这是由于流体流过细杆后, 流体的核心区域湍流强度加大, 使得核心区的温度分布比光管更加均匀, 增强了流体与壁面的换热, 这就造成了边界层区域的温度梯度增大, 从而使温度下降。

分析这两个图, 可以看出壁面温差在层流状况下要高于湍流情况。

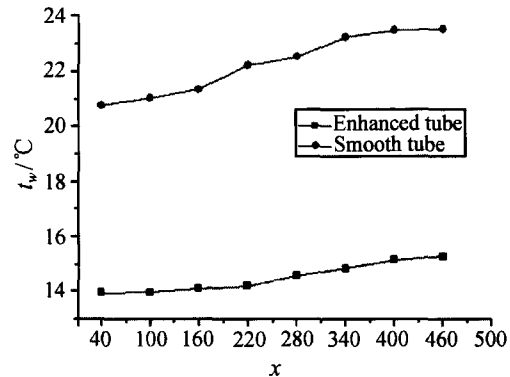


图 2 Re 为 1200 时的壁面温度分布

Fig.2 Wall temperature distribution at $Re=1200$

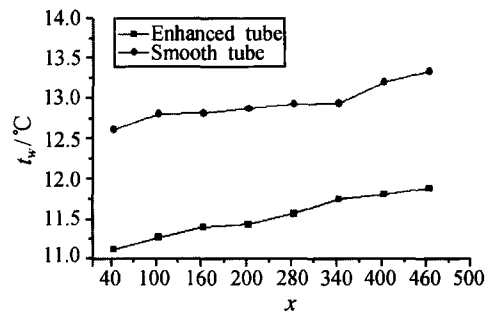


图 3 Re 为 5000 时的壁面温度分布

Fig.3 Wall temperature distribution at $Re=5000$

2.1.2 管内雷诺数与努塞尔数 Nu 关系 图 4 示出了光管和强化管的管内努塞尔数 Nu 与雷诺数 Re 的关系。由图可见, 在相同的操作条件下, 强化管的 Nu 数与光管的变化趋势一致, 但在管内布置圆形细杆可以大大提高换热能力, 随着雷诺数的增大, 强化管的 Nu 数增大的程度要比光管时来得大。由以上数据可见, 不管是在层流还是湍流, 换热均得到了显著的增强, 但在层流时, 换热效果比湍流情况更加明显。

这是由于在光管内布置细杆后, 使得管内核心区域, 流体速度变化明显, 一方面使流体的速度梯度在壁面边界上明显增大, 高于光管内壁面附近的速度梯度, 另一方面使核心区域的温度更加均匀^[7], 变化平缓, 而在壁面边界上流体的温度梯度显著增大, 从而使换热得到显著的强化。

同时, 在雷诺数比较小的时候, 光滑管管内的湍动程度小, 管内对流换热系数就低。而在强化管管内由于管内圆形细杆的作用可加剧管内流体的湍动, 使管内流动的核心区域温度更加均匀, 管内对流换

热系数得到增加。到了高雷诺数区域, 由于光滑管的湍流程度已经比较剧烈, 核心流温度分布较为均匀, 管内圆形细杆的扰流作用有所减弱, 所以湍流情况下换热增强幅度较层流时低一些。

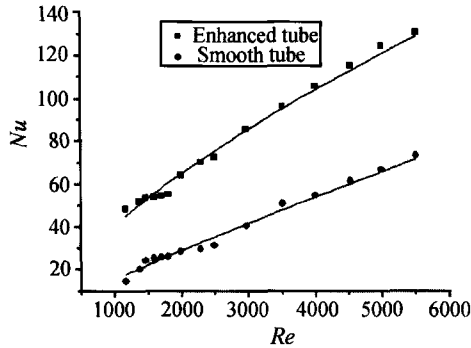


图4 雷诺数 Re 对努塞尔数 Nu 的影响
Fig.4 Effect of Re on Nusselt number

2.2 方管内传热与阻力性能综合评价

以上研究了在方管插入交叉排列圆形细杆的传热性能, 并与光滑管进行了比较。对实验的传热与阻力性能的评价准则采用如下形式:

$$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (1)$$

如图5所示, 为方管在加热功率 $Q = 250 \text{ W}$ 时的 PEC 值分布图。可以看出, 随着雷诺数 Re 的增加, 性能评价准则 PEC 值得变化趋于平稳, 但在整个实验雷诺数范围内, PEC 值均大于1, 表明换热得到

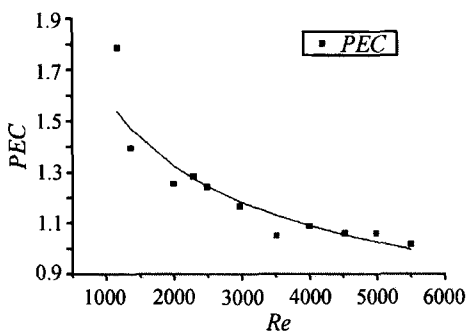


图5 传热与性能评价指标 PEC 数随雷诺数 Re 变化关系
Fig.5 Variation of PEC with Re

极大的增强, 同时带来的阻力增加并不大, 综合性能好。在层流及部分过渡区范围内, 实验 PEC 值超过1.2。与此同时, 核心流区域传热强化在层流范围内, 效果非常明显, 而在部分过渡流及湍流情况下, 效果稍微减弱, 但 PEC 值仍然大于1。

3 结 论

通过在受限空间的流体充分发展段中心截面区域布置若干尺寸较小的长细杆, 可以影响流体的流场和温度场, 造成一个温度比较均匀、速度变化较为明显的核心区域, 同时在换热壁面附近造成一个温度和速度变化均比较显著的边界层区域。实验表明, 在层流和湍流情况下 PEC 均大于1, 但层流状态下效果更加显著。本文提出的提高换热管性能的方法为强化传热方法的实际应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] Bergles A E. ExHFT for Fourth Generation Heat Transfer Technology. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26: 335-344
- [2] 孟继安, 陈泽敬, 李志信, 等. 交叉缩放椭圆管换热与流阻实验研究及分析. *工程热物 理 学 报*, 2004, 25(5): 813-815
MENG Ji-An, CHEN Ze-Jing, LI ZHI-Xin, et al. Experimental and Numerical Study on Heat Transfer and Flow Resistance in Alternating Elliptical Axis Tubes. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(5): 813-815
- [3] Ventisilav Z. Enhancement of Heat Transfer by a Combination of a Single-Start Apirally Corrugated Tubes with a Twisted Tape. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 25: 535-546
- [4] Rajendra K, Maheshwarib B K, Nitin K. Experimental Study of Heat Transfer Enhancement in an Asymmetrically Heated Rectangular Duct with Perforated Baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, 32: 275-284
- [5] Mohamad A A. Heat Transfer Enhancements in Heat Exchangers Fitted with Porous Media Part I: Constant wall Temperature. *Int. J. of Thermal Science*, 2003, 42: 385-395
- [6] Pavel B I, Mohamad A A, An Experimental and Numerical Study on Heat Transfer Enhancement for Gas Heat Exchangers Fitted with Porous Media. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 4939-4952
- [7] Wang S, Guo Z Y, Li Z X. Heat Transfer Enhancements by Using Metallic Filament Insert in Channel Flow. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44: 1373-1378