

自激振荡脉冲射流强化换热实验研究

高 虹, 曾丹苓

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 对自激振荡射流强化换热的机理进行了初步探讨, 并对有无共振腔时的换热情况进行了对比实验。实验中发现, 由 Helmholtz 共振腔产生的自激振荡脉冲射流增强了管内流体的掺混, 破坏了边界层, 从而达到了强化换热的目的。实验中还发现, 当共振腔两端的压差增大时, 将产生更为强烈的脉动流, 明显地提高流体的紊流程度, 从而强化了管内流动换热。

关 键 词: 自激振荡; 脉冲; 射流; 强化传热

中图分类号: O35 文献标识码: A

1 引 言

强化传热是 20 世纪 60 年代蓬勃发展起来的一种改善传热性能的先进技术。通常, 可供选择的强化换热的手段主要有以下几种: (1) 提高流体流速, 以减薄层流底层; (2) 增加流体的扰动或使流体旋转以破坏层流底层; (3) 采用机械振动、声波或超声波产生气流脉动及施加电磁场等。前两种属于无功强化传热技术, 后一种属于有功强化传热技术。无功强化传热技术无需应用外部能量, 有功强化传热技术则需要应用外部能量来达到强化传热的目的。无功强化(亦称被动式强化)传热技术包括: 表面特殊处理法、粗糙表面法、扩展表面法和扰动流体法等。有功强化(亦称主动式强化)传热技术包括: 机械强化法、振动、电场、磁场、光照射、喷射冲击等。

根据流体力学和传热学理论^[1], 当具有粘性且能润湿壁面的流体流过壁面时, 由于粘滞力的作用, 在靠近壁面处产生流动边界层。层流流动具有层流边界层, 紊流流动具有紊流边界层, 只是在贴附于壁面的一极薄层内仍保持层流的性质, 这部分称为层流底层。管式换热器内部温度梯度主要集中在边界层内。在层流或紊流条件下, 如果能够有效的破

坏边界层, 减小层流边界层或层流底层的热阻, 可以有效地提高局部换热系数, 是强化对流换热过程的有效措施。

在这种思路的启发下, 将自激振荡脉冲射流用于强化换热的想法应运而生。虽然自激振荡脉冲射流已经广泛用于采矿、清理金属表面、金属切割等领域^[2], 但是, 将自激振荡脉冲射流用于强化换热还是一个课题。因此, 研究自激振荡脉冲射流强化换热的机理及规律非常重要, 具有较高的学术价值和工程应用价值。

2 自激振荡射流强化换热的机理

由于工业换热器中常用的介质是粘性和可压缩性都非常小的水, 当水进入换热器后, 流体边界层逐渐发展, 使得管内中心流体与边界处有较大的温度梯度, 将严重影响管内外流体热量交换。

本实验设计了 Helmholtz 共振腔³⁻⁴。当一定参数的流体流过 Helmholtz 共振腔, 流束中不稳定扰动波在穿过腔室剪切层时, 由于剪切层是不稳定的, 剪切层对扰动波有选择放大作用, 形成涡环结构。剪切流动中涡环与下游碰撞壁发生碰撞, 于是在碰撞区产生压力扰动波并向上游反射, 在上游剪切层分离处诱发新的扰动产生, 当新扰动与原扰动频率匹配且具有合适的相位关系时射流上游就不断地周期性激励, 其固有波形受到调制, Helmholtz 共振腔内就产生流体自激振动并在下喷嘴出口形成脉冲射流⁴⁻⁶。

这种具有一定频率脉动流导致壁面处旋涡的大量产生, 从而增加了流体的掺混, 破坏换热器的流动边界层的发展, 保证壁面处始终处于较好的传热温差状态, 从而强化换热。

3 实验装置

实验在 2 m 长的换热器上进行, 采用电加热方式, 如图 1 所示。换热器的规格: $\phi 12 \times 1.5$; 电加热功率: 10 kW。

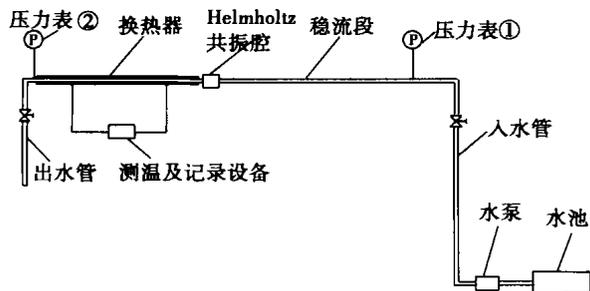


图 1 实验装置简图

本实验采用铜—康铜热电偶。在换热器管壁上布置 8 对热电偶, 以测量管壁温度; 在稳流段以前及换热器后布置热电偶各 1 对, 分别测量流体进出口温度; 保温层外布置 2 对热电偶测量保温层外表面温度。

本实验用称重法测流量。所有测量设备都经过标定。

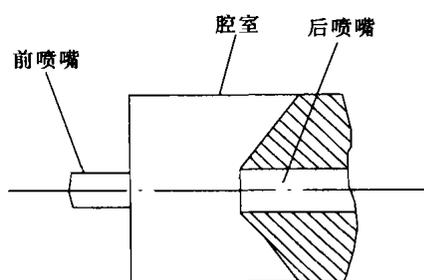


图 2 Helmholtz 共振腔简图

通过测量流体进出口温差、流量求得换热量, 并得到换热系数 h 。计算公式为:

$$Q = GC\Delta t \quad (1)$$

其中: Q — 换热量, W; G — 流量, kg/s; C — 比热, J/(kg · °C); Δt — 流体进出口温差, °C。

$$h = Q / (F \cdot \Delta t) \quad (2)$$

其中: h — 换热系数, W/(m² · °C); F — 换热面积, m²; Δt — 流体与管壁之间的温差, °C。

$$E = h / h_0 \quad (3)$$

其中: E — 换热系数强化比; h — 有共振腔时的换热系数; h_0 — 没有共振腔时的换热系数。

4 实验结果及分析

实验在保证流体流速基本稳定的情况下进行, 实验中的流速范围是: 5 ~ 7.5 m/s; 换热器的加热功率为: 3 028 W、4 378 W、5 288 W; 共振腔前后的压差为: 0.425 MPa、0.35 MPa、0.29 MPa; 流量为: 0.466 kg/s、0.41 kg/s、0.36 kg/s。实验在不同工况下交叉重复进行, 求出不同加热功率和流量条件下的传热系数 h 。

由实验结果得到: 不加共振腔时的管内换热系数范围是 4 626 ~ 6 350 W/(m² · °C), 加装共振腔后的管内换热系数范围是 5 122 ~ 8 083 W/(m² · °C)。在流量、加热条件相同的条件下, 强化比的变化范围是 1.01 ~ 1.74。

4.1 强化比 E 与流量及压差的关系

本实验中通过调节压力表②后的阀门来调节共振腔前后的流量及压差。

强化比 E 与流量的关系以及流量与压差的关系

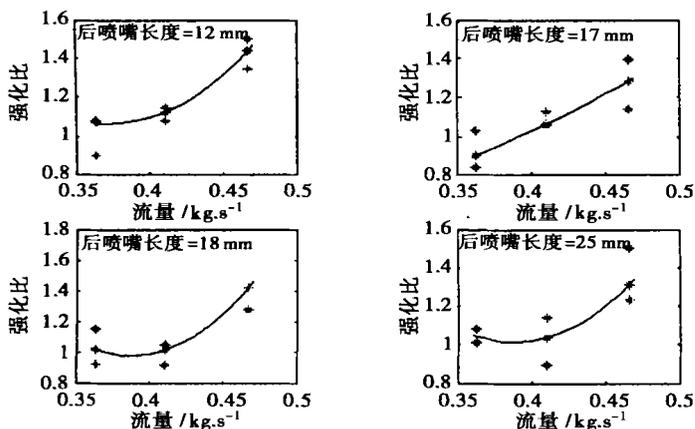


图 3a-1 不同流量对强化比的影响

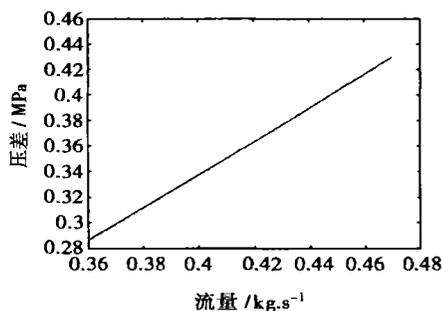


图 3a-2 压差随流量的变化

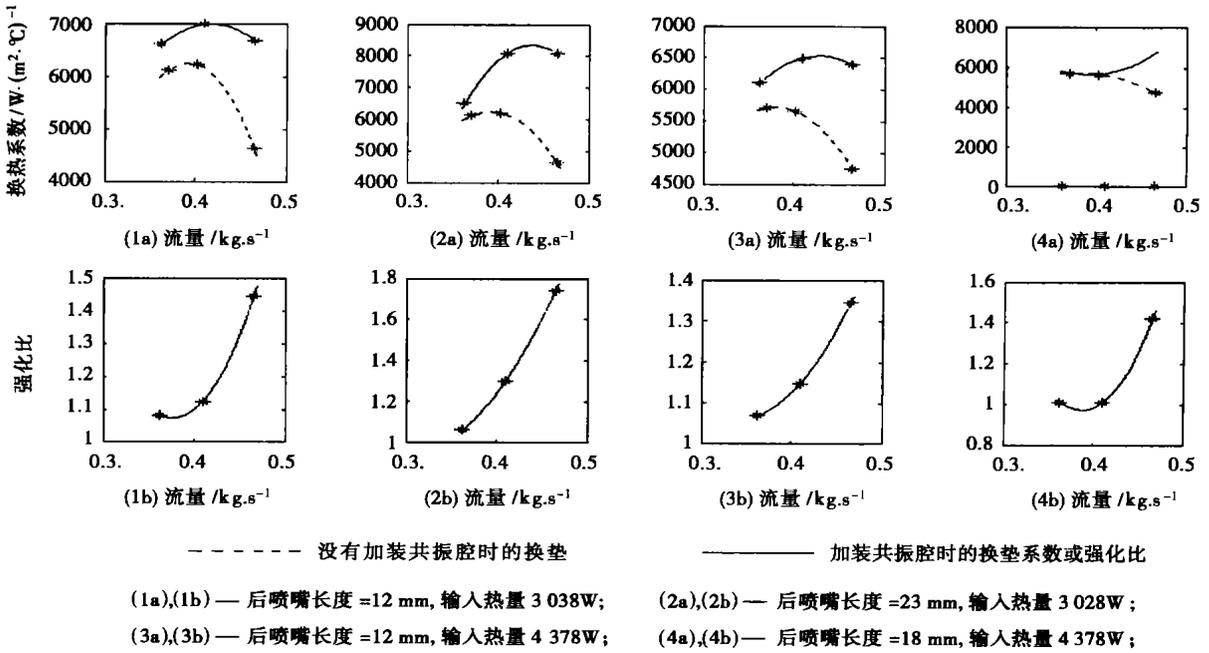


图 3b 不同条件下换热系数和强化比随流量的变化

关系如图 3 所示。

从图 3 中可以看出:

- (1) 在合适的水力参数和结构参数的配合下, Helmholtz 共振腔产生的脉动流将明显地强化换热。
- (2) 本实验中的强化比范围是 1.01 ~ 1.74, 比较稳定的强化比是 1.1 ~ 1.4, 也就是说, 只要选定合适的水力参数和结构参数, 使用 Helmholtz 共振腔可以将管内流动换热系数普遍提高 10% ~ 40%。
- (3) 从图 3a-2 可以看出, 压差与流量呈正相关关系, 当流量大时, 压差也大。
当压差增大时, 将产生更为强烈的脉动流, 从而明显地提高流体的紊流程度, 强化管内流动换热, 较高压差时的强化比大于较低压差的强化比。
- (4) 在流量及压差较小时, 使用共振腔时不一定能起到强化换热的作用。原因是: 在较小的流量及压差下, 流体的脉动幅度太小, 不可能引起强烈的扰动, 故在这种条件下, 共振腔不仅不能大幅度地提高换热系数, 反而还可能弱化换热。

如: 当流量降至 0.36 kg/s, 压差降至 0.29 MPa 时, 使用共振腔将削弱换热 12% 左右, 如图 3a-1 所示。

4.2 强化比 E 与后喷嘴长度的关系

实验中通过使用不同长度的芯子来调节后喷嘴长度, 调节范围是 12 ~ 25 mm。

换热系数及强化比 E 和后喷嘴长度的关系如图 4 所示。

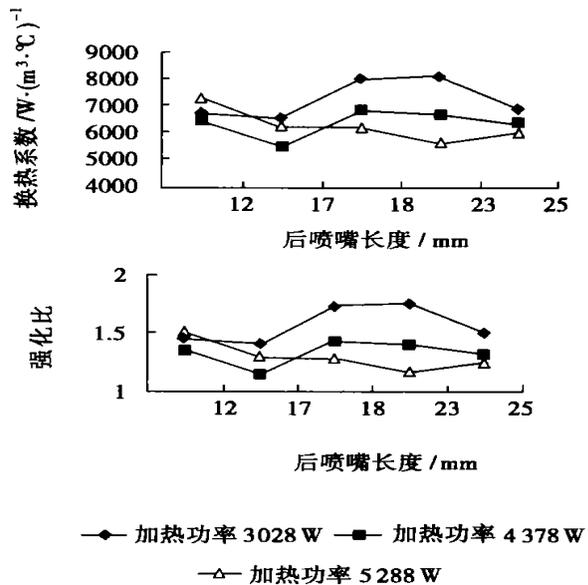


图 4 后喷嘴长度对换热系数及强化比的影响

从图 4 中可以看出, 随着共振腔后喷嘴长度的增加, 强化比 E 的变化并不明显, 也就是说 Helmholtz 共振腔的后喷嘴长度对强化换热的影响并不显著。但是对于一定的共振腔, 还是存在最优的后喷嘴长度。 (下转第 360 页)

偏差系数 η_{\max} 随着 S_W 升高而升高; 标准偏差 σ 与 S_W 间的关系不如工况 01 ~ 04 时明显, 工况 06 的 S_W 小于工况 01 的 S_W , 但标准偏差 σ 却稍大一些。

采用最小二乘法对工况 01 ~ 06 的 $S_W \sim \eta_{\max}$ 间的关系进行了一元线性回归分析。回归直线的相关系数为 $R = 0.8186$ 。这表明除了 S_W 与 η_{\max} 有明显的相关关系外, 还有其它因素对 η_{\max} 有作用。在试验中, 这个因素应为锅炉负荷。从 S_W 的计算方法可知, 锅炉负荷下降 S_W 将升高, 该因素将促使再热器热偏差系数增大; 但另一方面, 锅炉负荷下降时要关停部分燃烧器, 这意味实际燃烧器高宽比降低, 有助于改善射流的补气条件, 降低气流旋转速度, 该因素将促使再热器热偏差系数减小。

6 结 论

(1) 理论分析表明: 炉内旋流数 S_W 表征的是炉内实际旋转速度与平均上升速度比值的大小, 其大小将影响水平烟道中高温受热面热偏差的情况。

(2) 在仅考虑二次风配风方式对 S_W 的影响的情况下, 各二次风喷口风速相等时将使得 S_W 达到最小值; 配风方式偏离均等配风程度越深, S_W 越大; 在仅考虑一、二次风风速对 S_W 的影响的情况下, 当一、

二次风风速相等时将使得 S_W 达到最小值, 如从二次风与一次风动量比 P 角度考虑, 存在有一 P 值可使 G_{ϕ} 最小; 随着锅炉负荷下降, 炉内的旋流数 S_W 增加。

(3) 一台 300 MW 锅炉的再热器热偏差试验结果显示: 在相同负荷下, 二次风配风方式的改变对 S_W 的影响较明显, 最大热偏差系数 η_{\max} 和标准偏差 σ 随 S_W 增大而增大, 均等配风时 S_W 、 η_{\max} 和 σ 也最小, 这与二次风配风方式对 S_W 影响的理论分析结果是一致的和相互对应的。

(4) 一台 300 MW 锅炉的再热器热偏差试验结果显示: 随着锅炉负荷降低, 炉内旋流数 S_W 升高, 最大热偏差系数 η_{\max} 随着 S_W 升高而升高, 这与锅炉负荷对 S_W 影响的理论分析结果是一致的和相互对应的。

参考文献:

- [1] 姜义道, 李永兴, 刘明仁. 四角切圆燃烧大容量电站锅炉烟气参数场偏置问题的研究[J]. 动力工程, 1994, 14(5): 16-21.
- [2] 李彦鹏, 刁永发. 切向燃烧炉内旋流数分布的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(增刊): 213-216.
- [3] 郭宏生, 徐通模, 惠世恩, 等. 四角布置切向燃烧锅炉水平烟道烟温、汽温偏差原因分析及防治对策[J]. 动力工程, 1996, 16(2): 9-13.

(何静芳 编辑)

(上接第 351 页)

如: 当流量等于 0.466 kg/s, 共振腔后喷嘴在 15 ~ 23 mm 时有利于强化换热。

(1) 对于研究设计的共振腔, 只要配合以适当的水力参数, 就可以产生自激振荡脉冲射流。对于同一结构的共振腔, 水力参数不同, 所产生的自激振荡脉冲射流的强弱也不相同, 随着共振腔前后的压差和流量的增大, 所产生的自激振荡脉冲射流的强度也在增大。

(2) 将共振腔产生的自激振荡脉冲射流引入换热器后, 当自激振荡的强度达到一定程度后, 可以强化换热。不同的振荡强度, 强化换热的效果也不同。

(3) 本实验中的强化比范围是 1.01 ~ 1.74, 比较稳定的强化比是 1.1 ~ 1.4, 也就是说, 只要选定合适的水力参数和结构参数, 共振腔可以将管内流动换热系数普遍提高 10% ~ 40%。

(4) 对于同一共振腔, 不同的出口结构尺寸对于换热效果的强化的影响不大。

(5) 共振腔不是在所有的工况下都可以强化换热的。当压差及流量小至一定程度时, 使用共振腔还可能弱化换热。

参考文献:

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [2] GEORGES L, CHAHINE ANDREW F, CONN VIRGIL E, et al. Cleaning and cutting with self-resonating pulsed water jets[A]. Proceedings of the 2nd U. S. Water Jet Conference[C]. USA: Missouri, 1983. 195-207.
- [3] 廖振方, 唐川林. 自激振荡脉冲射流喷嘴的理论分析[J]. 重庆大学学报, 2002, (2): 24-27.
- [4] 唐川林, 廖振方. 自激振荡脉冲射流装置的理论分析和实验研究[J]. 煤炭学报, 1989(1): 90-100.
- [5] 蒋海军, 廖荣庆. 自激振荡脉冲射流机理探讨[J]. 西南石油学院学报, 1998(3): 55-58.
- [6] 杨林, 李晓红, 王建生, 等. 结构参数对自激振荡脉冲射流固有频率特性的影响[J]. 流体机械, 2001(2): 26-28.
- [7] 李淑英, 李兴泉, 王乃华. 管内流动脉动强化换热的影响[J]. 山东建筑工程学院学报, 1998(4): 46-49.

(何静芳 编辑)

顶棚过热器受热面管流量偏差问题的数值模拟研究= **Numerical Simulation Study of Flow Distribution Deviation in Heating-surface Tubes of a Roof Superheater** [刊, 汉] / FAN Wei-dong, HAN Xiao-gang, HAO Wei-dong (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), HONG Mei (Shanghai Boiler Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 343 ~ 348

A detailed numerical simulation study was conducted of the flow distribution in the heating-surface tubes of a boiler roof superheater featuring a distribution header with a bent inlet. The inlet elbow has a relatively great impact on the flow distribution in the distribution header with different flow deviations occurring in tubes at different zones of the elbow. The flow rate in the tubes located at the outer side of the elbow is excessively great while that at the inner side of the elbow is excessively small. Moreover, the flow rate in the tubes of a straight-tube header adjacent to the elbow outlet will also be affected by the elbow. After a tube explosion caused by the excessively small flow rate in heating-surface tubes located in the above zone the flow rate in the nearby tubes with excessively great flow rates will be drastically reduced, thus triggering chain explosions of tubes. Finally, on the basis of calculations and analyses the causes and specific features of the flow deviations were identified and verified, and relevant measures adopted for eliminating flow deviations and solving the problem of tube explosions. **Key words:** boiler, superheater, tube explosion, numerical simulation

自激振荡脉冲射流强化换热实验研究= **Experimental Investigation of Intensified Heat Exchange Based on Self-excited Oscillating Pulse Jets** [刊, 汉] / GAO Hong, ZENG Dan-ling (Power Engineering Institute under the Zhongqing University, Zhongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 349 ~ 351

A preliminary exploratory study was conducted of the mechanism of self-excited oscillating pulse jets-based intensified heat exchange. Furthermore, a contrast test was performed of the heat exchange conditions with or without a resonant cavity. Through tests it is found that the self-excited oscillating pulse jets produced by a Helmholtz resonant cavity have intensified the dilution mixing of fluids in a tube, thus destroying boundary layers and resulting in an intensified heat exchange. During the tests it has also been discovered that the increase in pressure difference at the two ends of the resonant cavity will generate more intensified pulse flows, significantly enhancing the turbulence degree of fluids and, as a result, intensifying the in-tube flow heat exchange. **Key words:** self-excited oscillation, pulsation, jet flow, intensified heat transfer

微细通道内可燃气体预混燃烧实验与微型发动机燃烧方案= **Pre-mixed Combustion Tests of Combustible Gases in Tubules and the Combustion Scheme of a Micro Turbo-engine** [刊, 汉] / HU Guo-xin, WANG Ming-lei (Department of Aerospace & Aeronautical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 352 ~ 355

In the light of the current development state of micro turbo-engines discussed are the intractable problems related to the maintenance of stable combustion in tubules. An experimental research has been conducted with respect to the flame stability of premixed combustion of fuel gas and air in the tubules. The ignition concentration limit of hydrogen and acetylene combustion was identified through tests. The test results show that it is feasible to conduct premixed burning of combustible gas and air in the tubules, but there is a significant reduction in the range of combustible product concentrations. The use of supercharged combustion can lead to an increase in the range of combustible concentrations and may enhance combustion stability. In comparison with large channels the tubules will not easily be subject to a back-fire, but is liable to suffer from flame extinction. However, a mixed gas flow with a relatively high fuel gas concentration will not be blown out easily and also enjoys fairly good combustion stability. **Key words:** micro turbo-engine, combustion stability, micro-fine channel, fuel-air ratio