

④ 16-19

折流栅抗振型换热器流体动力学及传热特性研究*

Researches on the Hydrodynamics and Heat Transfer Performance of the Antivibration Heat Exchanger with Grid - baffle

云南工业大学

胡明辅 杨波涛 金涛 韩本勇 吴新民

The theoretical analysis and the experimental investigation was conducted for the hydrodynamics and heat transfer performance of the antivibration heat exchanger with grid - baffle. It was obtained the pressure loss and heat transfer predictive methods for such exchangers. It was pointed out that such exchangers can remedy the defects in antivibration of the rod-baffle heat exchanger, in the meanwhile it retains excellent thermodynamics performance of rod-baffle heat exchanger on the whole.

关键词: 换热器 折流栅 折流杆 扁钢支承条 流体动力学 传热 压力降

符号说明:

- TK172
- TK124
- A——按管子外表面计算的有效传热面积, m^2
 - B——扁钢支承条宽度, mm
 - C_p ——介质的定压热容, $kJ/kg^\circ C$
 - d——换热管外径, mm
 - d_i ——换热管内径, mm
 - h_i ——管程给热系数, $kW/m^2^\circ C$
 - h_o ——折流栅抗振型换热器壳程给热系数, $kW/m^2^\circ C$
 - h_{o0} ——折流杆换热器壳程给热系数, $kW/m^2^\circ C$
 - K——以管子外表面为基准的换热器传热系数, $kW/m^2^\circ C$
 - L_b ——折流栅支承间距, mm
 - Δp ——折流栅抗振型换热器壳程压力降, mmH_2O
 - Δp_0 ——折流杆换热器壳程压力降, mmH_2O
 - Q——传热量, kW
 - Re_a ——计算传热的雷诺数 (定义同折流杆换热器)
 - Re_b ——折流栅处的雷诺数 (定义同折流杆换热器)
 - r_i ——管内污垢热阻, $m^2^\circ C/kW$
 - r_o ——管外污垢热阻, $m^2^\circ C/kW$
 - r_w ——管壁金属热阻, $m^2^\circ C/kW$

- T——饱和蒸汽温度, $^\circ C$
- t_1 ——壳程流体进口温度, $^\circ C$
- t_2 ——壳程流体出口温度, $^\circ C$
- Δt_m ——平均有效传热温差, $^\circ C$
- V——流体流量, m^3/h
- γ ——介质密度, kg/m^3
- Ψ_1 ——折流栅抗振型换热器壳程压力降修正系数
- Ψ_2 ——折流栅抗振型换热器壳程给热修正系数

1 前言

折流栅抗振型换热器是为了解决折流杆换热器的抗振缺陷而提出的一种新型换热器^[1], 其特征是用“扁钢支承条”取代折流杆换热器的“折流杆(圆杆)”, 支承条与支持圈一起构成抗振栅。支承条厚度相当于管间间隙, 管子即被扁钢条紧紧夹住, 支承条与管子的接触方式为“线接触”, 对管子振动的抑制作用较强。经理论研究^[1]和工程实践^[2]证明, 这种换热器确实具有折流板式、折流杆式等传统换热器无可比拟的抗振性能。为便于此类

* 云南省应用基础研究基金项目 (95B061M)。

换热器的推广应用,对其流体动力学及传热特性进行研究、奠定其设计应用及结构优化的理论基础是必要的。

2 理论分析

对于折流栅抗振型换热器,流体平行于管子流动,并横流过支接管子的扁钢条。这种流动方式与美国菲利普石油公司首创的折流杆换热器^[3]非常相似,区别仅在于前者为流体横流过矩形柱体(扁钢),后者为流体横流过圆柱体(圆杆),而且,流体横流过此类“钝头钝尾”物体的阻力曲线是很相似的^[4]。此外,由于两种换热器的流体流动方式及流动状态相似,必然导致传热性能也相似。由此为我们提供了一种研究的途径:即以折流杆换热器为基础研究折流栅抗振型换热器。折流杆换热器的研究已比较成熟,因此,只要能找出两者间的联系,便可利用折流杆换热器的研究成果研究分析折流栅抗振型换热器。换言之,即把这种新型换热器的研究转换成研究两种换热器之间的差别,工程计算则可在折流杆换热器的基础上加以适当修正即可。这样不但事半功倍,而且充分利用了前人的研究成果,可以最大限度地消除实验中的系统误差,提高研究结果的可信度,同时也便于工程应用。

管壳式换热器壳程流体流动是非常复杂的,至今没有解析或半解析的理论计算方法,工程计算一般采用建立在实验基础之上的经验或半经验公式。本项目的研究也主要建立在实验基础之上。

3 实验研究

3.1 实验方法、实验模型及实验装置

实验的目的是测试换热器壳程压力降和给热系数,并探索对其不同结构参数的影响。此外,扁钢支承条在支接管子的同时,对流体起到扰动作用,增加了流体流动的紊流程度,减小了流体的边界层厚度,从而强化了传热,那么,支承条对流体流动的扰动程度也是我们所关心的问题。鉴于此,我们制作了两种模型,一种用于观察换热器内的流体流动状态,对流动和压力降作定性分析,称作模型一;另一种用于实际测量与探索换热器壳程压力降、给热系数及其与结构参数的关系,称作模型二。

模型一的外壳用有机玻璃制成,横截面呈封闭的矩形,内置管束,管束的管间设置不同形状(圆

钢杆、扁钢条)、不同结构参数的支承条。其实验装置由实验模型、涡轮流量计、U型管测压板、循环水泵、循环水池等组成。

为了获得可靠的测试结果,模型二完全按我国钢制管壳式换热器规范^[5]设计、制造及检验。在壳体不变的情况下,组合不同结构及不同结构参数的内件,便得到了各种不同形式及不同结构参数的换热器模型。模型二的主要结构参数如下:

| | |
|------|---|
| 壳体内径 | 150mm; |
| 换热管 | 21根, $\phi 19 \times 2 \times 1500$, 正方形排列, 管心距为 25mm, 管束直径为 $\phi 130.8\text{mm}$; |
| 支持圈 | 内径 $\phi 131.0\text{mm}$, 外径 $\phi 144.0\text{mm}$, 用 $\phi 6.5\text{mm}$ 的圆钢制成, 间距为 100mm、150mm、200mm; |
| 支承条 | 圆钢杆 $\phi 6.0\text{mm}$, 扁钢条 $B10 \times 6$ 、 $B16 \times 6$ 、 $B20 \times 6$ 、 $B35 \times 6$ 。 |

3.2 流体流态实验

利用模型一及其与之配套的实验装置,观察流体流态,并测量不同结构参数所对应的压力降。

用水作实验介质。观察流态时,在实验介质中混入微小颗粒的气泡,气泡的运行轨迹便将流态直观地显示出来。通过实验,我们观察到如下现象:

(1) 当流体跨过管子的支承条(圆钢杆、扁钢条)时,在支承条杆的后缘产生旋涡,并沿下游形成涡流尾迹。即使在雷诺数很小时也是如此。

(2) 在同一雷诺数下,流体跨过圆钢杆和不同宽度的扁钢条时所产生的旋涡及涡流尾迹的强度没有明显的差别。

(3) 对不同支承条(杆)($\phi 6$ 、 $B10$ 、 $B16$ 、 $B20$ 、 $B35$)作压力降对比实验,随着扁钢条宽度的增加,压力降相应地增加;圆钢杆 $\phi 6$ 的压力降介于扁钢条 $B10$ 与 $B16$ 之间。

通过实验我们可以得出结论,不同宽度的扁钢条与圆钢杆一样,在支接管子的同时所产生的旋涡及涡流尾迹起到了强化传热的作用。因此,折流栅抗振型换热器也具有与折流杆换热器相似的流体动力学特性和传热特性。

3.3 压力降及传热性能测试

模型一只是一种理想化的实验模型,它与工业用的换热器相比存在较大差距,因此其压力降的测试数据只能用于定性分析,不能用于定量研究。

作为定量研究,我们利用模型二进行压力降及

传热性能测试。本实验对 13 种不同结构参数的管束进行了不同流量状况下的测试分析。壳程实验介质为抽取地下水，水进口温度恒为 19℃，流量范围为 1.3~13m³/h；管程为饱和水蒸汽冷凝给热，温度控制恒为 98℃（略高于当地常压下水的沸点）。水蒸汽由一台卧式燃煤蒸汽锅炉供给。

模型二的结构特征也工业用的换热器完全一致，其规格尺寸达到了工业级的小型模型，因此实验数据可以反映工业换热器的实际情况。实验中，最高传热量达 255kW，这在一般实验室的实验研究中是不可多得的。

4 实验数据处理

通过数据处理，定量分析研究折流栅抗振型换热器与传统折流杆换热器之间的区别与联系，研究其与结构参数之间的关系，找出适于工程应用的设计计算方法。

4.1 折流栅抗振型换热器壳程压力降计算

折流栅抗振型换热器与折流杆换热器的压力降随雷诺数的变化情况如图 1 所示。

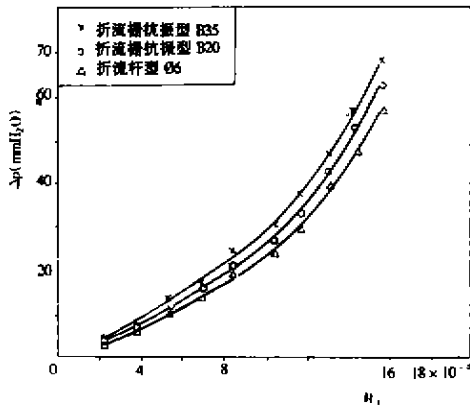


图 1 折流栅抗振型与折流杆型换热器压力降

从图 1 中可以看出，两种换热器压力降的变化趋势是一致的，说明它们确实具有相似的流体力学性质。设折流栅抗振型换热器与折流杆换热器的压力降之间有如下关系：

$$\Delta p = \Psi_1 \Delta p_0 \tag{1}$$

式中 Δp ——折流栅抗振型换热器壳程压力降

Δp_0 ——折流杆换热器壳程压力降

Ψ_1 ——压力降修正系数

如此，只要找到 Ψ_1 ，即可建立起两种换热器之间的联系。将实验数据代入 (1) 式可得 Ψ_1 的一组数据，利用最小二乘法可确定 Ψ_1 为：

$$\Psi_1 = 1.0673 B^{0.135} - 0.5024 \tag{2}$$

式中，参数 B 的实验范围为 10~35mm。从实验结果来看，修正系数与支承间距、雷诺数之间没有明显的关系。在实验范围内，按上式计算的误差一般不超过 10%，平均误差约 5%。

4.2 折流栅抗振型换热器壳程给热系数计算

通过实验测出流体流量、进口和出口温度。根据传热学理论，可计算出传热量、平均传热温差，进而计算出总传热系数：

$$Q = V\gamma C_p (t_2 - t_1) \tag{3}$$

$$\Delta t_m = [(T - t_1) - (T - t_2)] / \ln [(T - t_1) / (T - t_2)] \tag{4}$$

$$K = Q / (A\Delta t) \tag{5}$$

式中符号意义见符号表。

为了确切反映壳程传热性能，应计算出壳程给热系数 h_o ：

$$1/h_o = 1/K - d / (h_i d_i) - r_o - r_1 - r_w \tag{6}$$

式中符号意义见符号表。

显然，欲计算 h_o ，须确定管程给热系数 h_i 。管内为饱和水蒸汽冷凝给热，其给热系数与管子的几何尺寸、冷凝介质的物性、蒸汽与壁面的温差等有关。在实验中，管子的几何尺寸是不变的。另外，管内冷凝给热系数远大于管外的对流给热系数，管子壁温应接近蒸汽温度，而且实验中还控制蒸汽温度为定值，如此蒸汽与壁面的温差可视为不变，物性参数也可视为不变。因此，管内的给热系数可视为常数（即使有一定变化，由于它远大于管外的给热系数，对传热系数的影响也不大，不会明显影响研究结果）。此外，据经典的传热理论分析，管外的对流给热系数与流速的 0.8 次方成正比。在此条件下，我们可以应用威尔逊 (E. E. Wilson) 图解法估算出管内的给热系数。

确定 h_i 后，即可利用式 (6) 求出管外对流给热系数 h_o 。 h_o 随雷诺数的变化如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，折流栅抗振型换热器与折流杆换热器传热性能的变化趋势基本是一致的，说明它们确实具有相似的传热特性。设两种换热器的壳程对流给热系数之间有如下关系：

$$h_o = \Psi_2 h_{o0} \tag{7}$$

式中 h_o ——折流栅抗振型换热器壳程给热系数

h_{o0} ——折流杆换热器壳程给热系数

Ψ_2 ——壳程给热修正系数

如此，只要找到 Ψ_2 ，即可建立起两种换热器

之间的联系。将实验数据代入 (7) 式可得 Ψ_2 的一组数据, 利用最小二乘法可确定 Ψ_2 为:

$$\Psi_2 = 0.7182 (B/L_b)^{0.1028} \quad (8)$$

式中, 参数 B/L_b 的实验范围为 0.05 ~ 0.35。从实验结果来看, 修正系数与雷诺数间没有明显的关系。在实验范围内, 按上述计算的误差一般不超过 7%, 平均误差均约 3%。

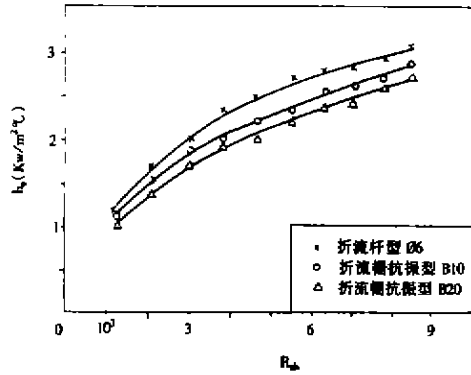


图 2 折流栅抗振型与折流杆型换热器壳程给热系数 ($L_b = 100\text{mm}$)

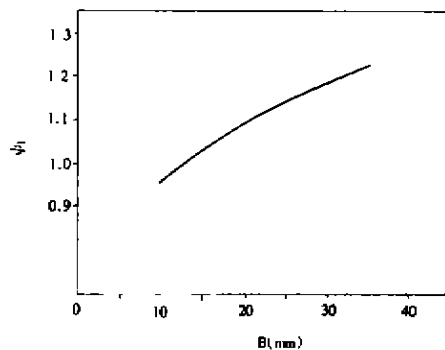


图 3 折流栅抗振型与折流杆型换热器压力降修正系数

5 研究结果分析

经过研究分析, 折流栅抗振型换热器与折流杆换热器具有相似的流体动力学性能。压力降修正系数如图 3 所示, Ψ_1 随支承条宽度 B 的增加而增加, 但增加的幅度不大。在实验范围 ($B = 10 \sim 35$) 内, $\Psi_1 = 0.952 \sim 1.220$ 。如当 $B = 20$ 时, $\Psi_1 = 1.095$, 可见两种换热器的压力降相差并不大。

可以说折流栅抗振型换热器与折流杆换热器一样具有压力降较小的优点。

如前所述, 折流栅抗振型换热器与折流杆换热器有着相似的传热特性。壳程给热修正系数如图 4 所示, Ψ_2 随支承条的相对宽度 B/L_b 的增加而减少, 但减小的幅度不大, 且曲线随 B/L_b 的增大趋于平缓。这是因为相对于的折流杆换热器来说, 折流栅抗振型换热器支承条与换热管的接触范围较大, 接触区域内支承条对流体的流动有抑制作用, 减小了该区域内流体的湍流程度, 对传热构成一定影响。总体上说, 折流栅抗振型换热器基本上继承了折流杆换热器传热效率较高的优点。

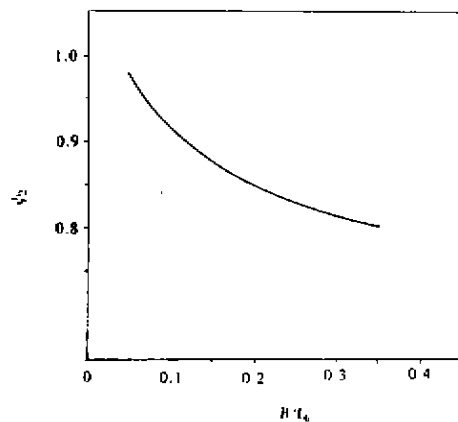


图 4 折流栅抗振型与折流杆型换热器壳程给热修正系数

通过本项目的研究, 可以得出结论: 折流栅抗振型换热器不但克服了折流杆换热器在抗振方面的缺陷^[1], 而且基本上保持了折流杆换热器优良的热力学性能。

参考文献

1. 胡明辅等. 折流栅抗振型换热器结构及其抗振特性研究. 压力容器, 1999; 16 (2)
2. 胡明辅、丁平. 中氮厂活塞式压缩机新型水冷器研制. 中氮肥, 1995; (20)
3. Small, WM, Young RN. Oil and Gas J, 1977, Sept. 5: 77
4. 陈克诚. 流体力学实验技术. 机械工业出版社, 1983
5. GB151—89, 钢制管壳式换热器. 学苑出版社, 1989

作者简介: 胡明辅, 男, 副教授, 昆明理工大学生物与化学工程学院院长, 太阳能工程研究所所长。地址: 昆明市白龙寺, 邮编: 650224。

欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!