

通道形面对 PSR 性能影响的分析

张志军¹, 程惠尔¹, 闻雪友², 肖东明²

(1. 上海交通大学 机械与动力学院, 上海 200030; 2. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 针对一种新型的紧凑型换热器——一次表面换热器 (PSR), 分析了分别由椭圆、正弦曲线和抛物线构成板片波纹对芯体性能的影响。结合一台用于燃气轮机回热器的一次表面换热器样机的设计, 给出了三种板片波纹形式的 PSR 芯体的主要性能, 并通过与相应的板翅式芯体的对比, 表明这种换热器的优越性。

关 键 词: 一次表面回热器; 板片波纹曲线

中图分类号: TK479⁺.11 文献标识码: A

1 前 言

生产实践的需要不断对换热器提出更多更新更高的要求^[1~3], 其中紧凑化、高效性是换热器主要发展方向。一次表面换热器就是在这样的背景下提出并发展的。这种换热器不同于传统的板翅式等紧凑

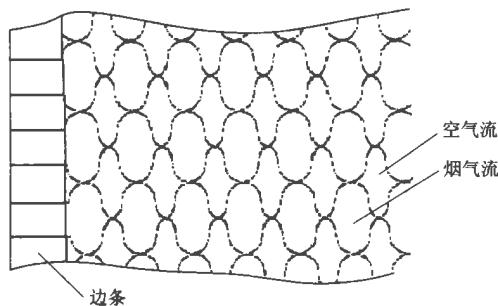


图 1 一次表面换热器芯体截面示意图

型换热器^[4~5], 它的所有传热表面都是由两侧分别与冷、热流体直接接触的一次传热表面构成, 能够以高效的方式实现冷、热流体的纯逆流流动, 而且流动通道的当量直径在 1.0 mm 左右, 传热面的紧凑度 $Comp$ ($Comp = F/V$, 即单位体积内的传热面积) 可达 $1500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 以上 (见图 1)。美国履带拖拉机公司 (Caterpillar Co.) 和斯坦福大学合作, 历经 16 年的时间, 开发出了一种可以用于燃气轮机装置的一次表

面回热器, 体积只有相应常规管壳式回热器的 1/5, 重量只有相应的常规管壳式回热器的 1/7 ~ 1/8, 其紧凑性高达 $1640 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

本文作者所进行的用于燃气轮机回热器的一次表面换热器样机的研发工作, 主要探讨一次表面换热器不同类型通道形面对换热器性能的影响及通道形面的优化分析。

2 板片波纹曲线的选取

板片波纹及参数定义如图 2 所示, 一个板片波纹周期由曲线段 ABC 和 CDE 两段构成。显然 ABC 和 CDE 可以采用不同的曲线构成波纹, 但构成每一个波纹周期的两个半周期宽度 $2a_1$ 和 $2a_2$ 应是独立可选的, 以在波纹高度 $2b$ 一定的情况下, 通过分别选取 $2a_1$ 和 $2a_2$ 的值得到不同的烟气和空气流道当量直径, 以使两侧的传热系数及压降的匹配达到最优。另外, 所构成的整条曲线应是光滑的, 换言之, 在图 2 中所示的两段曲线衔接点 A、C、E 处两段曲线的斜率应相等, 这一要求限制了曲线形式的选取。

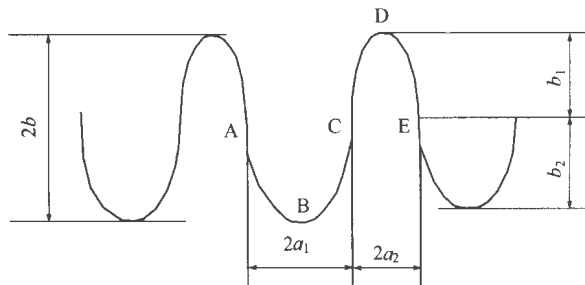


图 2 板片波纹曲线及参数示意图

在同样的 $2b$ 、 $2a_1$ 和 $2a_2$ 参数下, 不同曲线构成板片波纹的流道当量直径、芯体表面积密度等几何指标不同, 从而其流动与换热性能也有所差异。因

此, 从 PSR 优化的角度出发, 应探讨采用不同曲线形式构成板片波纹对 PSR 结构及性能的影响。本文仅就分别由椭圆曲线、正弦曲线及抛物线构成板片波纹的影响进行分析, 分别计算波纹的通道截面积 s_1 和 s_2 、通道湿周 χ , 而芯体的紧凑度 $Comp$ (单位体积内的换热面积) 可由式(1) 计算, 并在此基础上通过算例探讨通道形面对 PSP 性能的影响:

$$Comp = \frac{\chi}{8(a_1 + a_2)b} \quad (1)$$

(1) 若板面波纹由许许多多椭圆曲线构成, 则所有板片曲线的椭圆长轴 $2b$ 相同, 而且有 $b_1 = b_2$, 但相邻椭圆曲线的短轴 $2a_1$ 和 $2a_2$ 通常是不同的。对此种曲线构成波纹的板片及芯体, 经过推导可以得到如下计算式:

$$\chi = \pi \left[\frac{3}{2}(a_1 + a_2) + 3b - \sqrt{a_1 b} - \sqrt{a_2 b} \right] \quad (2)$$

$$s_1 = 4 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) a_2 b + 4 \left(1 + \frac{\pi}{4} \right) a_1 b \quad (3)$$

$$s_2 = 4 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) a_1 b + 4 \left(1 + \frac{\pi}{4} \right) a_2 b$$

(2) 若板片波纹由正弦曲线构成, 则两种正弦曲线的幅值 b_1 和 b_2 相等且都为 b , 半周期分别为 $2a_1$ 和 $2a_2$, 即构成 ABC 和 CDE 的曲线方程分别为:

$$ABC \quad y = b \cos \left(\frac{\pi}{2a_1} x \right) \quad (4)$$

$$CDE \quad y = b \cos \left(\frac{\pi}{2a_2} x \right)$$

对此种情况构成波纹的板片及芯体, 经过推导可以得到如下的计算式:

$$\begin{aligned} \chi &= 2 \int_{-a_1}^{a_1} \sqrt{\left(\frac{b\pi}{2a_1} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi x}{2a_1} \right)^2 + 1} dx + \\ &2 \int_{-a_2}^{a_2} \sqrt{\left(\frac{b\pi}{2a_2} \right)^2 \left(\sin \frac{\pi x}{2a_2} \right)^2 + 1} dx \\ &= 4 \times \frac{Elliptic E \left[\frac{\pi}{2}, - \left(\frac{b\pi}{2a_1} \right)^2 \right]}{\left(\frac{b\pi}{2a_1} \right)^2} + \\ &4 \times \frac{Elliptic E \left[\frac{\pi}{2}, - \left(\frac{b\pi}{2a_2} \right)^2 \right]}{\left(\frac{b\pi}{2a_2} \right)^2} \quad (5) \end{aligned}$$

$$s_1 = 2 \times \left[\left(2 + \frac{4}{\pi} \right) a_1 b + \left(2 - \frac{4}{\pi} \right) a_2 b \right] \quad (6)$$

$$s_2 = 2 \times \left[\left(2 - \frac{4}{\pi} \right) a_1 b + \left(2 + \frac{4}{\pi} \right) a_2 b \right]$$

式(5) 中积分结果为特殊函数, 可以通过查表

得到, 也可以采用数值积分法求值。

(3) 若板片波纹由抛物线构成, 与上述两种情况有所不同的是, 为了满足在曲线衔接点 A、C、E 光滑过渡的要求, 若 $2a_1$ 和 $2a_2$ 不相等, 则将导致 $b_1 \neq b_2$ 。对此经过数学分析, 得到曲线段 ABC 和 CDE 所在抛物线的方程应分别为:

$$ABD \quad y = \frac{2b}{a_1^2 + a_1 a_2} x^2 = \frac{c}{a_1} x^2;$$

$$CDE \quad y = \frac{2b}{a_2^2 + a_1 a_2} x^2 = \frac{c}{a_2} x^2 \quad (7)$$

上式中, 为简化, 令 $c = \frac{2b}{a_1 + a_2}$ 。对此种情况构成波纹的板片及芯体, 经过推导可以得到如下计算式:

$$\begin{aligned} \chi &= 2(a_1 + a_2) \sqrt{1 + 4c^2} + \\ &\frac{a_1 + a_2}{c} \ln(2c + \sqrt{1 + 4c^2}) \quad (8) \end{aligned}$$

$$s_1 = \frac{20}{3} a_1 b + \frac{4}{3} a_2 b$$

$$s_2 = \frac{4}{3} a_1 b + \frac{20}{3} a_2 b \quad (9)$$

3 计算示例

分别采用以上几种板片波纹构成形式, 对一台用于 3.7 MW 开式循环燃气轮机装置回热器的 PSR 进行设计, 并编制了计算机程序进行求解, 得到了芯体的体积 V 、传热面积 F 、重量 G 及压降 ΔP_1 、 ΔP_2 等指标, 同时给出了采用板翅式结构的芯体指标以作比较^[1], 板翅式芯体的板间距为 6.35 mm, 翅片厚为 0.15 mm, 隔板厚为 3.0 mm。在 PSR 的板片及芯体设计中, 取板片厚为 0.1 mm, 边条宽为 5.0 mm, 芯体两侧端板厚为 1.5 mm, 材料均为不锈钢, 导流区的面积占总传热面积的份额为 10%。

3.1 设计参数

表 1 PSR 设计参数和要求

| 参数和要求 | 热侧 | 冷侧 |
|--|-------|------|
| 工作介质 | 烟气 | 空气 |
| 介质流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ | 24.7 | 24.3 |
| 进口温度 / $^{\circ}\text{C}$ | 430 | 175 |
| 进口压力 / MPa | 0.103 | 0.91 |
| 压降限制 ϕ / % | 3.0 | 0.5 |
| 芯体性能 / % | | 75 |

芯体性能定义为:

$$\mu = \frac{t''_1 - t'_1}{t''_2 - t'_1} \quad (10)$$

式中: t'_1 — 空气进口温度;
 t''_2 — 空气出口温度;
 t'_2 — 烟气进口温度。

表 2 板片波纹参数

| | | |
|----------------|------------------|------------------|
| $2b/\text{mm}$ | $2a_1/\text{mm}$ | $2a_2/\text{mm}$ |
| 1.3 | 0.8 | 1.0 |

流体流过 PSR 的阻力由入口阻力、逆流段流动阻力及出口阻力三部分组成。

入口阻力和出口阻力可分别由下式表示:

$$\frac{\Delta p_{\text{入口}}}{\rho} = \frac{V^2}{2}(1 - \sigma^2) + K_c \frac{V^2}{2} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta p_{\text{出口}}}{\rho} = \frac{V^2}{2}(1 - \sigma^2) - K_e \frac{V^2}{2} \quad (12)$$

式中: V 是热交换器芯体内流动速度, σ 是芯体自由通流面积与迎风面积之比, K_c 是由于突缩段不可逆过程引起的压力降低系数, K_e 是突扩压力损失系数。 K_c 和 K_e 是几何结构的函数, 由实验确定, 见表 3。

表 3 一次表面回热器流体入口和出口损失系数

| | | |
|-----|-------|-------|
| 位置 | K_c | K_e |
| 空气侧 | 0.48 | 0.24 |
| 烟气侧 | 0.54 | 0.28 |

3.2 主要计算结果

表 4 计算结果 ($Q = 4\ 833\text{kJ/s}$)

| 性能指标 | PSR | | | 板翅式 |
|---|-------|-------|--------|--------------------------|
| | 椭圆型波纹 | 正弦型波纹 | 抛物线型波纹 | |
| 空气通道当量直径/mm | 1.23 | 1.18 | 1.3 | 1.11 |
| 烟气通道当量直径/mm | 1.46 | 1.36 | 1.52 | 7.71 |
| 芯体紧凑度/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ | 1.489 | 1.570 | 1.413 | 空气侧: 840 烟气侧: 1 204 |
| 传热面积/ m^2 | 379 | 375 | 418 | 空气侧: 1 531 烟气侧: 2 193 |
| 芯体重量/kg | 329 | 324 | 363 | 约 4 350 |
| 芯体体积/ m^3 | 0.279 | 0.262 | 0.324 | 3.82 |
| 空气侧雷诺数 | 982 | 949 | 945 | 4090 |
| 烟气侧雷诺数 | 946 | 914 | 911 | 1370 |
| 空气侧压降/% | 0.08 | 0.08 | 0.02 | 0.42 |
| 烟气侧压降/% | 1.4 | 1.5 | 1.2 | 2.9 |
| 空气侧换热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{℃}^{-1}$ | 390.8 | 388.4 | 349.5 | 262 |
| 烟气侧换热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{℃}^{-1}$ | 317.4 | 326.1 | 291.2 | 85 |
| 总传热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{℃}^{-1}$ | 175.2 | 177.3 | 158.8 | 70.9 |

3.3 简单分析

从上述计算结果可以看出, 在同样的参数 $2b$ 、 $2a_1$ 和 $2a_2$ 下, 对于分别由椭圆、正弦曲线和抛物线构成板片波纹的芯体, 正弦型波纹的芯体紧凑度最大, 抛物线型波纹的芯体紧凑度最小, 但相差不超过 10%, 因此在实际应用中主要应从结构强度和加工的角度进行选取。显而易见, 由于 PSR 的高紧凑性和一次表面的高传热效率, 相对同样的换热要求, 其体积和重量远小于板翅式的芯体, 充分表明了 PSR 的先进性和优越性。

4 结论

以上分析计算表明, PSR 的性能远远大于目前常用的回热器, 在很小的体积内能够完成很大的热量交换, 具有传热系数高、传热温差小的优点, 实现了体积小、重量轻的目标, 必将在航空飞行器、国防动力装置等高科技领域的热量传递和控制中发挥重要作用, 值得进一步展开研究和开发工作。

参考文献:

[1] 凯斯 W M, 伦敦 A L. 紧凑式热交换器[M]. 张后雷, 宣益民, 译. 北京: 科学出版社, 1997.
[2] 郭 航. 微流道换热器内阻力特性的实验研究[J]. 制冷, 1998, 65(4): 8—12.
[3] 姜明健. 水在微尺度槽道中单相流动与换热研究[J]. 北京联合大学学报, 1998, 12(1): 71—75.
[4] WARD M E, HOLMAN L. Primary surface recuperator for high performance prime movers[R], SAE Technical Paper Series 1992.
[5] KADAMBI V, ETEMAD S, RUSSO L. Primary surface heat exchanger for a ground vehicle gas turbine[R], SAE Technical Paper Series 1992, 2: 34—38.
[6] MANGLIK R M, BERGLES A E. Numerical modeling and analysis of laminar flow heat transfer in non-circular compact channels[J]. Developments in Heat Transfer, 1997, 1(11—47): 1369—7331.

(何静芳 编辑)

high-moisture fuels are burned, the heat quantity needed for water evaporation-related heat absorption is relatively great. In view of this, the latter should be taken into account in the thermal energy balance for the flue gases of a fluidized bed.

Key words: high moisture fuel, thermal energy balance equation, fluidized bed boiler

通道形面对PSR性能影响的分析= **An Analysis of the Effect of Plate Corrugation on the Performance of a Primary Surface Recuperator (PSR)** [刊, 汉] / ZHANG Zhi-jun, CHENG Hui-er (Power Engineering Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), WEN Xue-you, XIAO Dong-ming (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 638 ~ 640

With respect to an innovative type of compact heat exchanger, the so-called primary surface recuperator (PSR), newly emerging in the international arena, analyzed is the effect of plate corrugation formed respectively by elliptic, sinusoid and parabola curves on exchanger core performance. In connection with the design of a PSR sample unit used as the recuperator of a gas turbine the authors have given the main performance of three types of PSR core, based on three plate corrugation configurations. The superior performance of the PSR core can be demonstrated through its comparison with the core performance of plate-fin heat exchangers. **Key words:** primary surface recuperator, plate corrugation, core performance

国产UP直流炉水冷壁改造方案分析= **An Analysis of the Water Wall Modification Scheme for a Chinese-made Once-through Boiler** [刊, 汉] / TANG Ren-hu, HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan, et al (National Key Laboratory of Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 641 ~ 643

A hydrodynamic analysis was conducted in connection with the modification scheme of a 300MW once-through boiler at Yaomeng Power Plant. On the basis of a comparison of the boiler water-wall negative and positive flow-rate response characteristics existing prior to and after the modification the authors noted the poor hydrodynamic characteristics of the furnace water-wall composed of vertical tube coils. An excessively high water-wall temperature and the big difference in metal and inter-tube fluid temperatures leading to tube explosion can mainly be attributed to the high mass flow speed and the resulting negative flow rate response characteristics. The above discovery may provide a helpful guide during the modification of analogous boilers. **Key words:** boiler water wall, negative-flow response characteristics, hydrodynamic calculation, mass flow rate, once-through boiler

40 t/h 燃气锅炉过热器爆管原因分析= **An Analysis of the Cause of a Superheater Tube Explosion Occurring in a 40 t/h Gas-fired Boiler** [刊, 汉] / FAN Wei-dong, ZHANG Ming-chuan (School of Mechanical & 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. — 2002, 17(6). — 644 ~ 647

The tube explosion occurring in a low-temperature stage superheater of a gas-fired industrial boiler was analyzed from various aspects, such as boiler design, superheater structure and layout, etc. With the cause of explosion being identified some effective measures were proposed to solve the problem. **Key words:** industrial boiler, superheater, tube explosion

锅炉多管除尘器改进= **The Improvement of a Multi-tube Dust Separator for a Boiler** [刊, 汉] / LIU Bao-jun, WANG Tie-yan (Harbin Hongqi Boiler Works, Harbin, China, Post Code: 150080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 647 ~ 649

A high-efficiency multi-tube dust separator is described. After a modification its use on 1 - 75 t/h boilers for space heating during the winter has played a significant role in the protection of environment. **Key words:** multi-tube dust separator, cyclone, flow resistance, role of negative pressure