

文章编号: 1007-6735(2004)05-0447-04

75 kW 微型燃气轮机回热器传热性能试验

王金锋, 徐之平, 杨 茉, 卢 玫, 王志利, 王永红

(上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 研究等流量法在高温回热器试验台上的应用. 用等流量法(修正的等雷诺数方法)对 75 kW 回热器进行传热性能试验, 并进行传热数据分析. 从总传热系数 K 中分离两侧的表面传热系数 h , 获得了有工程应用价值的 $Nu-Re$ 准则关系式.

关键词: 对流换热; 传热特性; 换热器

中图分类号: TK 124; TK 414.212

文献标识码: A

Heat transfer performance test of 75 kW recuperator

WANG Jin-feng, XU Zhi-ping, YANG Mo, LU Mei, WANG Zhi-li, WANG Yong-hong

(College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The application of equal mass flow method in high temperature recuperator test system is discussed. The heat transfer performance of recuperator is investigated, and the heat transfer data are analyzed. The convective heat transfer coefficient h is calculated from total heat transfer coefficient by use of equal mass flow method (modified equal Reynolds number method), and the $Nu-Re$ dimensionless equation which is of engineering application value is obtained.

Key words: convective heat transfer coefficient; heat transfer characteristic; heat exchanger

回热器作为燃气轮机回热循环中的热交换器起着提高循环效率、节约燃料及减少环境污染的重要作用. 为了提高回热效果及适应燃气轮机起停特点, 要求回热器具有较高的换热性能、良好的工作可靠性和抵抗热循环疲劳的能力, 同时应具有尺寸小、重量轻的特点. 本文对已有的 75 kW 回热器进行了初步试验和分析, 并提出了采用等流量法来分离换热表面两侧的表面传热系数 h .

形状如图 1 所示, 其几何尺寸如表 1 所示(见下页).

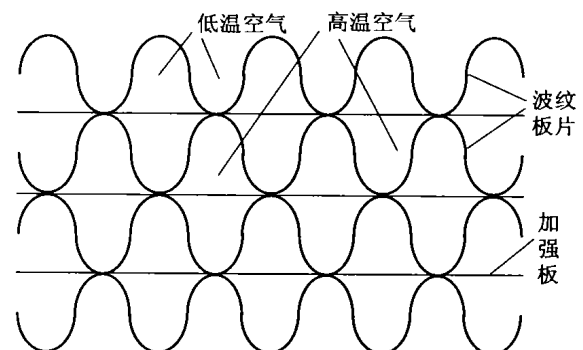


图 1 75 kW 回热器芯体通道截面示意图

Fig. 1 Sketch of 75 kW recuperator channel section

1 试验系统及方法

回热器^[1]主要由芯体、进排气管和结构支撑系统组成. 芯体是回热器的关键部分, 它由许多依次整齐排列的波纹板片与中间隔板焊接而成. 通道截面

收稿日期: 2004-06-25

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(能源岛关键技术及基地建设)

作者简介: 王金锋(1976-), 女, 硕士研究生.

表1 回热器几何结构尺寸表

Tab.1 Geometry configuration dimensions of recuperator

芯子宽度	800 mm
芯子高度	240 mm
芯子长度	330 mm
波纹板材料	1Gr18Ni9Ti
波纹板厚	0.05 mm
波型高	2.3 mm
波型宽	4 mm
每片波纹板波数	88 波
低温侧片数	170 片
高温侧片数	171 片
隔板厚度	0.05 mm
两侧流道几何尺寸	相同

回热器的传热性能试验系统为一正压、稳态及开式系统^[2],如图2所示.系统由进出口消声器、高压风机、流量测量装置、低温电加热箱、被测回热器试件、高温电加热炉、低温气流补充段、高温气流排气段以及联接管道等组成.

试验采用稳态测量方法,即在设定的范围内,使待测工况点达到稳定后进行数据的采集和计算,得到试验结果,从一组总传热系数 $K_i (i=1,2,\dots,n)$ 中,用等流量法分离出表面传热系数 h_i .

试验时,先关闭阀1、2和3,气流经1~8后排

出.两侧气流由一台高压风机提供,常温气体在流经低温电加热炉后,被加热至200℃左右,进入被测回热器低温侧(压气机侧),并分流至各通道内,经吸热温度提高,汇总后排出.由回热器低温侧经吸热后排出的气体,进入高温电加热炉,在炉内气体温度被提升至600℃左右,再进入被测回热器的高温侧(微型燃气轮机进口),与低温侧流体进行换热,放出热量,再经排气管道排放于大气中.1-2-3-4-5-6-7-8的顺序表明了气流的方向.

若需进行两侧流量不等的性能试验,则可打开相应的阀门.如需进行高温侧流量大于低温侧流量时,被提升至600℃左右,再进入被测回热器的高温侧(微型燃气轮机进口),与低温侧流体进行换热,放出热量,再经排气管道排放于大气中.1-2-3-4-5-6-7-8的顺序表明了气流的方向.

若需进行两侧流量不等的性能试验,则可打开相应的阀门.如需进行高温侧流量大于低温侧流量时,打开阀2,关闭阀1和阀3,调节阀2的开启度,即可调节进入高温侧的流量大于低温侧.如需进行高温侧流量小于低温侧流量时,打开阀1,关闭阀2和阀3,调节阀1的开启度,即可调节进入高温侧的流量小于低温侧.阀3是考虑小流量时,防止由于风机转速偏低导致系统流量不稳定而设置的旁通阀.

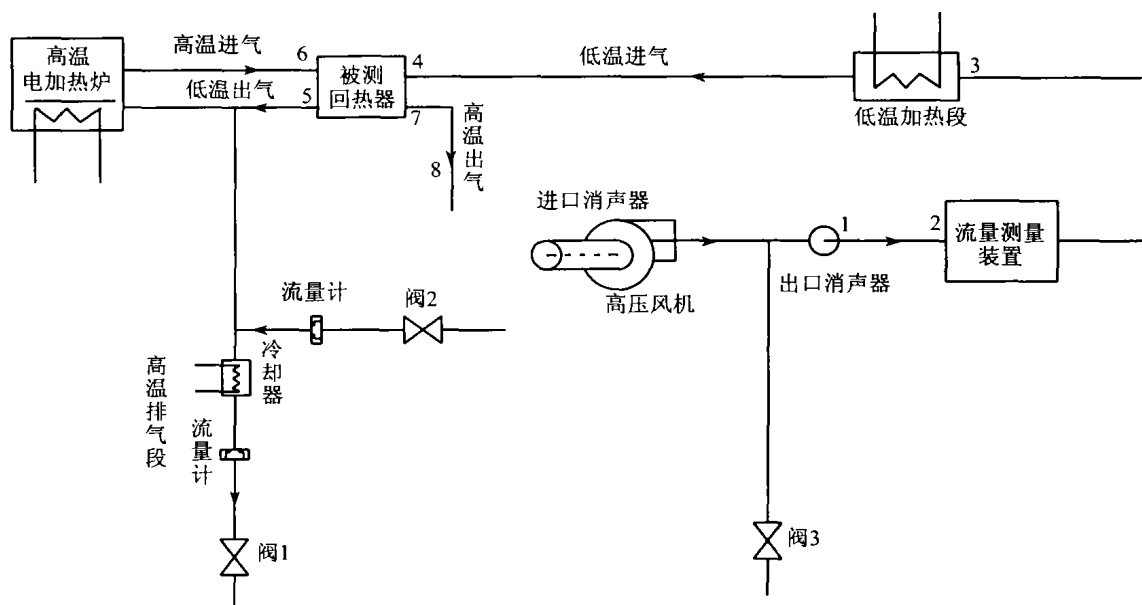


图2 计算机控制检测回热器传热性能试验系统

Fig.2 Recuperator heat transfer performance test system controlled and detected by computer

2 数据处理方法(等流量法)

对两侧换热面以及进出口通道的几何结构相同

的换热器而言^[3],通常可采用等雷诺数法从一组实测值 $K_i (i=1,2,3,\dots,n)$ 中,分离出相应的表面传热系数 h_i .但由于本试验对象为微型燃气轮机中的

回热器,冷热两侧的温度相差较大,因而,要在试验中保证两侧雷诺数相等,其流量调节十分麻烦、费时.为此,本文采用等流量法(修正等雷诺数法),从 K_i 中分离出相应的 h_i . 本文的试验装置在运行时,只要关闭阀 1、2 和 3,即可保证两侧流量在任何工况下均相等.等流量法的原理是第 i 次试验所得的传热总热阻可表示成

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{h_{1i}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{2i}} \quad (1)$$

式中 i ——试验次数

h_{1i}, h_{2i} ——冷侧、热侧流体的表面传热系数

δ/λ ——导热热阻

K_i ——总传热系数

对板翅式换热器而言,隔板的导热热阻相当小,

经计算其值仅占传热总热阻 $\frac{1}{K_i}$ 的千分之一左右,因此可忽略不计.这样式(1)可写为

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{h_{1i}} + \frac{1}{h_{2i}} \quad (2)$$

式(2)可表示为

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{h_{1i}} + \frac{1}{h_{2i}} = \frac{1}{h_{1i}} \left(1 + \frac{h_{1i}}{h_{2i}} \right) = \frac{1}{h_{1i}} (1 + \epsilon) \quad (3)$$

式中 ϵ ——温度修正因子

对于冷热通道几何结构相同的换热器而言,如果冷热流体的雷诺数范围相同,则冷热流体的努塞数可用同一准则方程表示^[4,5]

$$Nu = C Re^m Pr^{1/3} \quad (4)$$

$$\text{即} \quad h_{1i} = C Re_{1i}^m \left(\frac{\lambda_1}{D} \right) Pr_1^{1/3} \quad (5)$$

$$h_{2i} = C Re_{2i}^m \left(\frac{\lambda_2}{D} \right) Pr_2^{1/3} \quad (6)$$

则温度修正因子 ϵ 可表示为

$$\epsilon = \frac{h_{1i}}{h_{2i}} = \frac{\lambda_1 \left(\frac{Pr_1}{Pr_2} \right)^{1/3} \left(\frac{Re_{1i}}{Re_{2i}} \right)^m}{\lambda_2 \left(\frac{Pr_1}{Pr_2} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{2i}}{\mu_{1i}} \right)^m} = \quad (7)$$

据式(3)可从一组测得的 K_i 中分离出一组相应的表面传热系数 h_{1i} 或 h_{2i} ,然后根据各相应工况的定性温度 Nu_{1i} 和 Re_{1i} 流速,计算其相应的和,并应用最小二乘法,求得其准则关系式 $Nu = C Re^m Pr^{1/3}$ 中的常数 C 和指数 m .

需要指出,在按式(3)分离出 h_{1i} 时,由于需先按式(7)求得温度修正因子 ϵ ,而此时指数 m 尚是未知、待定的,故在数据处理过程中,需用迭代法来确定指数 m .即可先令 $\epsilon = 1$,得 h_{1i} 的第一次近似值,并通过上述的处理方法,求得 m 第一次近似值,然后按式(7)计算 ϵ 的第二次近似值,重复上述计算,直到前后两次所得的 m 值相差小于 10^{-3} 为止.一般只需迭代 2~3 次即可得到满意的结果.

3 试验数据计算结果

本文在高温进气温度为 357 °C,低温进气温度为 50~150 °C,流量为 0.15~0.75 kg/s 的范围内,共进行了 41 组试验^[6-8],热平衡误差均在 $\pm 5\%$ 内.表 2 列出了部分试验数据.

表 2 传热性能试验数据

Tab. 2 Test data of heat transfer

冷流体 进口温度 $t_{c1}/\text{°C}$	冷流体 出口温度 $t_{c2}/\text{°C}$	热流体 进口温度 $t_{h1}/\text{°C}$	热流体 出口温度 $t_{h2}/\text{°C}$	流体流量 $G/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	总传热系数 $K/(\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1})$	表面传热系数 $h/(\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1})$	Re	Nu
151.37	302.91	364.54	213.00	0.15	16.21	32.42	92.314 4	1.649 873
148.82	299.62	365.89	215.09	0.20	23.23	46.46	123.085 9	2.364 377
148.94	296.07	366.55	219.42	0.25	26.07	52.14	153.857 4	2.653 435
149.62	304.23	363.58	214.69	0.30	28.36	56.72	184.628 9	2.886 514
149.36	306.91	363.98	217.70	0.35	32.95	65.90	215.400 4	3.353 690
150.18	306.78	363.73	213.67	0.40	39.49	78.98	246.171 8	4.019 338
149.66	301.46	364.94	210.55	0.44	41.95	83.90	270.789 0	4.269 720
150.11	306.35	365.43	217.87	0.50	46.48	92.96	307.714 8	4.730 789
151.76	300.68	365.18	221.25	0.55	46.59	93.18	338.486 3	4.741 985
151.00	296.48	364.69	219.21	0.65	51.06	102.12	400.029 2	5.196 947
153.39	298.52	364.98	219.85	0.70	52.72	105.44	430.800 7	5.365 903
151.52	292.86	363.61	222.27	0.75	56.38	112.76	461.572 2	5.738 422

图3是低温侧进气温度为150℃,高温侧进气温度为365℃时,流量在0.15~0.75 kg/s范围内,总传热系数 K 随流量的变化关系图.图4是流量为0.65 kg/s,高温进气温度357℃时,低温进气在50~150℃范围内变化,总传热系数 K 随低温侧进气温度的变化关系图.由图3可以看出,高低温侧温度一定时,随着流量的增加,传热系数 K 也增加.而由图4可知,在流量、高温进气温度一定时,随着低温侧进气温度的增大,总传热系数 K 也增加,但增加比较缓慢.

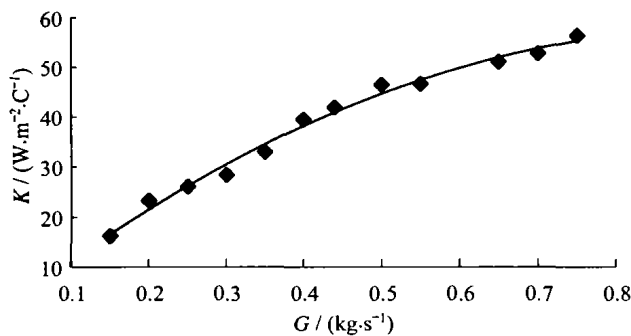


图3 流量变化时的传热测量结果

Fig. 3 Heat transfer measurement of mass flow rate variation

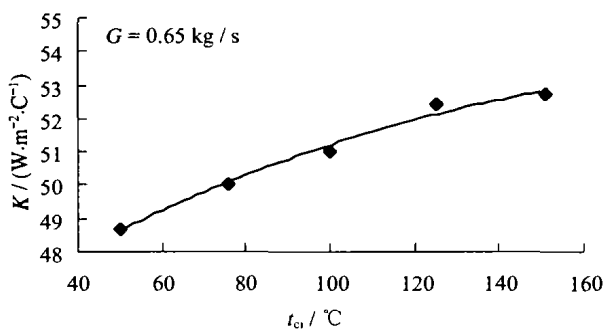


图4 低温进气温度变化时的传热测量结果

Fig. 4 Heat transfer measurement of t_{c1} variation

根据本文实测的一组 K_i 值,用等流量法分离出相应的 h_{i1} 值,并用最小二乘法求得以气体进出口温度平均值为定性温度的 Nu 准则关系式为

$$Nu = 0.09177 Re^{0.69} Pr^{1/3} \quad (8)$$

图5是低温侧进气温度为150℃,高温侧进气温度为365℃时,流量在0.15~0.75 kg/s范围内, Nu 随 Re 变化的曲线图.

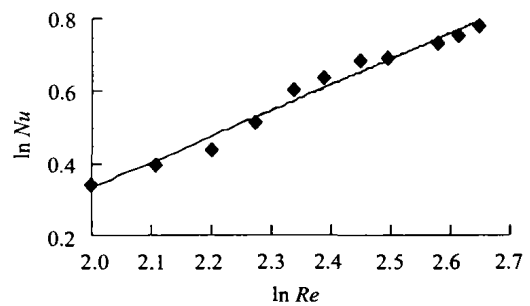


图5 $Nu-Re$ 关系曲线图

Fig. 5 Diagram of $Nu-Re$ relation curve

4 结论

a. 模拟了实际回热器的试验工况,得到气体流量与总传热系数的关系和低温侧温度与总传热系数的关系.

b. 流量法应用范围是两侧换热面和流体进出口通道的几何形状完全相同,流体为气体,且试验时保证两侧的流量相等.与等雷诺数法相比,其优点是试验步骤可大大简化.

c. 用等流量法拟合得出了具有工程应用价值的准则关系式, $Nu = 0.09177 Re^{0.69} Pr^{1/3}$,应用范围为 $Re = 90 \sim 462$.

参考文献:

- [1] 杨静,程惠尔.一次表面回热器的流动和传热研究[J].动力工程,2003,23(6):2 823~2 826.
- [2] 涂颌,章熙民.热工实验基础[M].北京:高等教育出版社,1986.
- [3] 蔡祖恢.关于紧凑式换热面放热性能测定方法的讨论[J].上海机械学院学报,1980,2(1):95~99.
- [4] 徐之平,周文铸,赵屿.桑塔纳轿车散热水箱管内外传热特性的分析研究[J].华东工业大学学报,1995,17(4):67~72.
- [5] 杨世铭,陶文铨.传热学.第3版[M].北京:高等教育出版社,1998.
- [6] 朱聘冠.换热器原理及计算[M].北京:清华大学出版社,1987.
- [7] 史美中,王中铮.热交换器原理与设计.第2版[M].南京:东南大学出版社,1995.
- [8] 叶大均.热力机械测试技术[M].北京:机械工业出版社,1984年.