

文章编号:1674-2869(2017)01-0074-04

不同填料对丝网回热器性能的影响

伍 堃¹, 吴 锋^{2*}, 王仕仙¹, 赵振华¹, 舒安庆²

1. 武汉工程大学 邮电与信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430205

摘 要:用不同粒径的铜丝网和不锈钢丝网为填料,分别制作了6种不同的回热器(标号为R1-R6),通过实验对它们的性能进行了考察.研究结果表明:丝网的材料、粒径和组合方式不同,对回热器性能的影响不尽相同.通过比较不同回热器的回热损失及综合效率发现,单段式丝网回热器R1-R3的回热损失和综合效率各有优缺点,而采用适当组合后的多段式丝网回热器R6性能最优;当回热器热端选择粒径较小的丝网及在冷端采用导热率低的填料时,可大大提高回热器的换热效率.

关键词:热声发动机;热效率;填料;丝网回热器

中图分类号:O302;TK11 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.01.013

Influence of Different Fillers on Heat Transfer Efficiency of Wire Mesh Regenerator

WU Kun¹, WU Feng^{2*}, WANG Shixian¹, ZHAO Zhenhua¹, SHU Anqing²

1. College of Post and Telecommunications, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The six regenerators (Reference as R1 to R6) were respectively produced using copper or stainless steel mesh as the filler. Then the fluencies of different fillers on heat transfer efficiency of the regenerator were investigated. The results show that the materials, particle sizes and the combination of different wire mesh have different effects on the heat transfer efficiency of regenerator. It was found that the regenerators R1-R3 with single-stage wire mesh have advantages and disadvantages in heat loss and comprehensive efficiency, and the multi-stage wire mesh regenerator R6 has the best performance via a proper combination. The thermal efficiency of the regenerator is greatly improved when the regenerator adopts the wire mesh with smaller particle sizes at the hot end and the fillers with low thermal conductivity at the cold end.

Keywords: thermo-acoustic engine; thermal efficiency; filler; screen-packed regenerator

热声热机是一种全新的热机,它因具有结构简单、运行可靠、使用寿命长、无污染等优点而备受能源动力行业的关注.经历了近30年的发展,热声领域已从理论研究走向了应用研究,热声技术的实际应用给人类的能源带来了新的曙光和希

望,在低温电子以及航空航天事业方面做出了巨大贡献^[1-2].热声器件(热声叠或热声回热器)是热声热机中实现热声效应的核心部件,对热声器件的研究也随着这一趋势而变得炙手可热,特别是对热声器件结构及其填料的研究是关键,近年来有

收稿日期:2016-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51176143)

作者简介:伍 堃,硕士,助教. E-mail:171703869@qq.com

*通讯作者:吴 锋,博士,教授. E-mail: wufeng@wit.edu.cn

引文格式:伍堃,吴锋,王仕仙,等.不同填料对丝网回热器性能的影响[J].武汉工程大学学报,2017,39(1):74-77.

WU K, WU F, WANG S X, et al. Influence of different fillers on heat transfer efficiency of wire mesh regenerator [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(1): 74-77.

很多学者在这方面有了新的研究进展和突破,而回热器的性能优化是热声系统优化的关键^[3-4],目前回热器的结构以及填料对其性能影响已经成为热声研究的热点内容.对于丝网回热器,其填料的选择和填充的方式是多样化的,在优化热声系统过程中,还需考虑回热器性能与热声系统的匹配^[5-6],本文通过实验比较了不同材质及粒径的填料对回热器性能的影响,得到多段式丝网回热器填料的选择及其填充方式对其影响规律.

1 实验部分

1.1 实验过程

本实验装置为自制的外激励双级行波热声热机,包括主体设备及附带数据采集处理系统.数据采集系统主要针对热声热机上设定处的温度、压力进行信号调理和处理.采用热电偶测高温端的温度波动情况,以便对加热器的加热量进行调节.为了监测相应位置的温度压力变化情况,在装置相应位置处选取了温度和压力测量点进行在线检测,其温度(T)和压力(P)的测量点在装置上相对位置如图1所示.

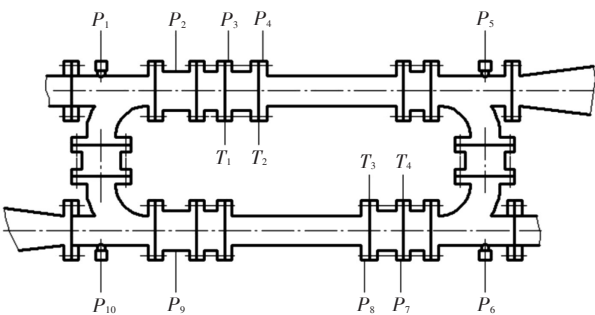


图1 热声热机装置上温度压力测定点分布图
Fig. 1 Test-points distribution diagram of pressure and temperature on the thermo-acoustic engine

在图1中,位于三通管上的 P_1 和 P_6 点主要用来测定外激励驱动压力;位于测压连接管上 P_2 和 P_9 测工质进入主冷却器的压力;位于热声器件上 P_3 和 P_4 测冷端的压力及压力相位;真空夹套波纹管上 P_4 和 P_8 测高温端压力;谐振腔相连的三通管上 P_5 和 P_{10} 测谐振腔中压力及其振荡.

1.2 实验步骤

- 1) 系统的检漏: 试验前检测整个系统进行密封性及耐压性检验,尤其是法兰及管口连接处、压力传感器和热电偶安装处等部位.
- 2) 抽真空: 对波纹管真空夹层进行抽真处理并检漏,以保持波纹管内的真空度.
- 3) 充压: 重复步骤2)2~3次后,充入工质气体

- 到实验所需的压力.
- 4) 开启信号采集系统: 打开信号采集及测量系统、数据采集软件等,准备实时记录.
- 5) 开启加热器: 检查设备状态良好后,打开冷却水接通加热电源,调控设备温度.
- 6) 开关激振器: 待温度上升至预设温度后打开激振器,待设备起振后关闭激振器并进行相应数据采集.
- 7) 关闭实验设备: 数据采集完毕后缓慢降低加热量直至关闭加热器的电源,关闭测量和采集仪器电源,待加热器温度降至室温以后关闭冷却水,结束实验.

1.3 实验所用不同材料和粒径的丝网的物性参数

不同材料及粒径的丝网对热声器件的阻力特性及综合性能影响不同,实验中选择两种不同粒径及两种不同材料的丝网进行组合,形成3个不同的多段重叠式回热器,表1为两种不同粒径的丝网的规格参数,表2列出了不同材料的主要物性参数,表3为6种不同的回热器(R1-R6)参数.

表1 不同金属丝网几何尺寸结构
Tab. 1 Geometrical structure of the different wire mesh

丝网粒径 particle size/mm	丝径 wire diameter/mm	当量孔径 pore size/ mm	孔隙率 porosity/ %	比表面积 specific surface area/m ⁻²
0.075	0.04	0.12	75	24 736.93
0.058	0.04	0.09	69	30 921.16

表2 丝网回热器填料的物性参数
Tab. 2 Physical properties of the fillers

材料 material	密度 density /(kg·m ⁻³)	比热容 specific heat capacity/[J·(kg·K) ⁻¹]	导热率 thermal conductivity /[W·(m·K) ⁻¹]
铜	8 930	386	398.0
不锈钢	7 820	460	15.2

表3 六种回热器参数
Tab.3 Parameters of the six kinds of regenerators

回热器标号 regenerator label	粒径 particle size/mm	材料 material	长度 length/mm
R1	0.075	铜	40
R2	0.075	不锈钢	40
R3	0.058	不锈钢	40
R4	0.075	不锈钢	20
	0.058	不锈钢	20
R5	0.075	不锈钢	20
	0.058	铜	20
R6	0.075	铜	30
	0.058	不锈钢	10

1.4 热声热机回热效率及综合性能评价

1) 回热效率:热声器件的回热效率常用 η 表示,其回热损失率 λ 与 η 的关系为: $\eta=1-\lambda$,在交变流动下的回热损失率为^[7]:

$$\lambda = \frac{(\int_0^{\tau} m h d t)_c}{(\int_0^{\tau} m h d t)_h + (\int_0^{\tau} m h d t)_c} = \frac{H_1}{H_2 - H_3}$$

式中的下标c、h分别表示热声器件的冷端和热端, H_1 是一个周期内热声器件冷端的净焓; H_2 和 H_3 分别从热声器件热端和冷端流入的焓。

2) 综合性能:热声器件的换热性能与多方面的参数有关,稳态流动下与流阻有关的热声器件性能参数为^[8]:

$$R = A_{sf} h_{sf} / (\partial p / \partial x)$$

式中 h_{sf} 与气体的物性以及流动状态有关,与固体的结构也有关系,并且正比于 $\varepsilon^{1.79}$ 而反比于 $d_p^{[9]}$,由此得到简化的综合性能参数: $R' = A_{sf} L \varphi^{1.79} / d_p X_p$,其中 X_p 为进出回热器的压差振幅, A_{sf} 为丝网回热器填料的比表面积; L 为回热器长度, φ 为回热器丝网的孔隙率。

2 结果与讨论

2.1 外激励对热声设备温度和压力的影响

图2为以粒径为0.058 mm的不锈钢丝网(具体参数物性见表3中R3)为填料的回热器中高温端的温度 T_1 随时间变化结果,从图2中可知,当回热器两端温度差到达一定值时,系统即形成可持续的周期性振荡(即起振)。实验中,当加热器的温度 T_2 增加到573 K时,打开外激励声波激励器,继续加热;当加热器的温度 T_2 增加到756 K时,系统起振,此时温度发生跳跃:在几秒时间内温度增至793 K;达到最高温度后开始急剧下降,随着回热器高温端(热端)温度的降低,回热器冷热端之间的温度梯度不断降低,直至通道内气体工质压力振荡产生的换热和高温端输入的热量达到平衡,振荡趋于稳定,此时系统温度为733 K。

图3为数据采集系统记录的回热器高温端 P_4 点处的波动压力幅值随时间变化结果,从图2中可知系统在起振时压力幅值突然跃迁至0.09 MPa,随后压力幅值开始下降并最终趋于稳定,稳定后的压力幅值为0.07 MPa左右。

2.2 不同材料和粒径的丝网对回热器综合性能的影响

不同材料和粒径的丝网回热器回热损失率及综合性能参数比较如图4所示。

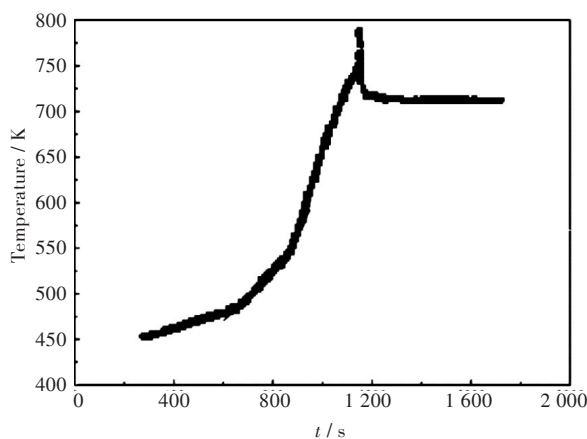


图2 回热器高温端温度 T_1 随时间变化曲线

Fig. 2 Variation curve of temperature T_1 at the high temperature end with time

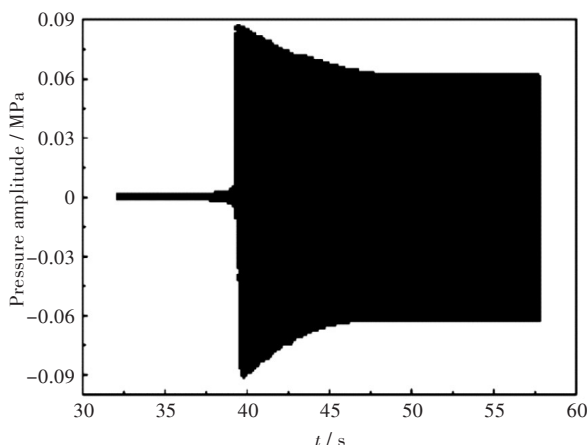


图3 回热器高温端 P_4 处压力幅值随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curve of pressure amplitude P_4 at high pressure end with time

从图4中可知单段式回热器R1-R3,R1的回热损失最大,R3最小;R2的综合性能参数最大,R1其次,R3最小;R2和R3均为不锈钢材质,由表3知R3的比表面积较R2更大,故R3与流体之间的换热更充分^[10-12],从而回热损失较小,但是R3的孔隙率较小,回热器的压降大幅度提高^[13],而综合效率不是最高,可见单段式回热器各有优缺点,可考虑将这3种回热器适当组合,以减小回热损失和提高综合效率。

由于高温(600 K)下气体介质的运动黏度要比低温(300 K)下高^[14-15],因此对于单段式回热器易造成热端黏性耗散,在制作多段式回热器时宜将孔隙率大的丝网置于热端,孔隙率小的丝网则应置于冷端,如多段式回热器R4-R6.由图4可知R4和R6的综合性能指标高于R3,且其回热损失约为R3的一半以下.但R5的回热损失相对R4和R6要高很多,这主要是因为R5的冷端采用热导率

较高的铜丝网,导致冷端的热漏损失较大.因此综合回热损失率及效率考虑,多端式回热器R6相比R4和R5性能更优.因此通过控制不同粒径丝网的填充比例(热端75%粒径为0.075 mm和冷端25%粒径为0.058 mm)以及冷端采用导热率低的不锈钢丝网,可大大提高回热器换热效率.

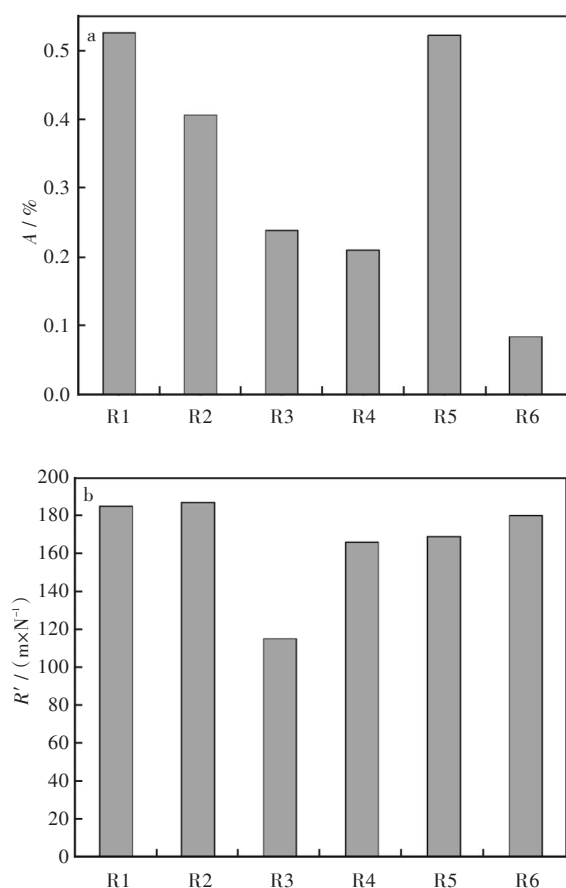


图4 不同材料和粒径的丝网回热器综合性能
(a)回热损失;(b)综合效率

Fig.4 Comprehensive performance of wire mesh regenerators with different fillers and particle sizes

(a) Heat loss; (b) Comprehensive performance

3 结 语

以上采用实验的方法比较了不同填料的热声器件对热声热机性能的换热效率影响,结果表明:由于填料的比表面积和热导率对回热器热损失和综合效率影响不同,多段式丝网回热器的性能相比单段式回热器具有更高的综合效率,同时当热声器件热端选择粒径较低的丝网及在冷端采用导热率低的填料可大大提高回热器换热效率.

参考文献:

[1] 张晓青,郭方中. 热声热机的网络模型与仿真研究[J]. 低温工程, 2000(5): 25-30.

ZHANG X Q, GUO F Z. Network model and simulation study of thermoacoustic engine[J]. Cryogenic, 2000(5): 25-30.

[2] 吴锋,李青,郭方中,等. 热声理论的研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(1):1-6.

WU F, LI Q, GUO F Z, et al. Development of thermoacoustic theory[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012, 34(1):1-6.

[3] 刘明方,吴锋,杨志春,等. 热声系统振荡流换热器的特性[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(10): 77-80.

LIU M F, WU F, YANG Z C, et al. Characteristics of oscillation heat exchanger in thermoacoustic system[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(10):77-80.

[4] SWIFT G W. Thermoacoustic engines[J]. Journal of the acoustical society of America, 1988, 84(5):1145-1180.

[5] ORGAN A J. The wire mesh regenerator of the Stirling cycle machine [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1994, 37(16):2525-2534.

[6] 涂虬. 热声器件的寻优及其与热声热机系统的匹配[D]. 武汉:华中科技大学, 2003.

[7] 余国瑶,罗二仓,戴巍,等. 热声发动机的CFD数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(1):6-10.

YU G Y, LUO E C, DAI W, et al. Numerical simulation of thermoacoustic heat engines [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(1):6-10.

[8] BIN N U, DAN M. Low cost and high performance screen laminate regenerator matrix [J]. Cryogenics, 2004, 44(6):439-444.

[9] 高凡,何雅玲,刘迎文. 交变流动下丝网回热器中压降特性的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(4): 668-670.

GAO F, HE Y L, LIU Y W. Numerical analysis of pressure drop characteristic in mesh regenerator under oscillating flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(4):668-670.

[10] 李晓静. 网格填料中气体交变流动特性研究[D]. 武汉:华中理工大学, 1983.

[11] SO J H, SWIFT G W, BACKHAUS S. An internal streaming instability in regenerators[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 120(4): 1898-1909.

[12] RAYLEIGH L. The theory of sound[M]. New York: Dover Publications, 1896: 322.

[13] 刘益才,鄂青,郭方中. 微型热声斯特林制冷机填料多孔频率研究[J]. 低温工程, 2004, 141(5): 22-25.

LIU Y C, ER Q, GUO F Z. Investigation on the characteristic frequency of the micro-miniature thermoacoustic-stirling refrigerator[J]. Cryogenics, 2004, 141(5): 22-25.

[14] 郭方中. 热动力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2007.

[15] HU Z J, LI Q. A High frequency cascade thermoacoustic engine[J]. Cryogenics, 2006, 46(11): 771-777.

本文编辑:陈小平