

—120 °C 小型逆布雷顿空气制冷机 性能的试验研究

赵红利, 侯予, 陈汝刚, 陈纯正

(西安交通大学制冷与低温工程研究所, 710049, 西安)

摘要: 在改建的逆布雷顿空气制冷机多功能综合试验台上, 分别对一台空气制冷机关键部件(膨胀机和紧凑式换热器)在设计工况下的效率、降温、流阻、热负荷和制冷效果等热力性能进行了全面的试验分析, 并进行了各种超工况下的综合性能考核. 试验结果表明: 该空气制冷机的制冷范围为—73 °C(制冷量为 250 W)~—120 °C(制冷量为 50 W), 膨胀机效率最大达 60.5%, 回热器效率最高达 97.5%, 系统降温最大达 150 °C, 制冷机最低温度达—123 °C, 并能满足—120 °C下 50 W 热负荷需求. 通过试验分析得出了小型高速透平膨胀机和紧凑式换热器中各参数间的影响关系, 以及制冷机中各参数的匹配关系.

关键词: 空气制冷机; 透平膨胀机; 紧凑式换热器; 试验研究

中图分类号: TB651 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)08-0986-05

Experimental Study on the Performance of a Small Inverse Brayton Air Refrigerator at —120 °C

Zhao Hongli, Hou Yu, Chen Rugang, Chen Chunzheng

(Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A multipurpose test-bed for inverse Brayton air refrigerator was rebuilt, in which the experiments were executed on the two key parts of the system, the turbo expander and the compact heat exchanger. The thermodynamic performances of efficiency, temperature drop characteristics, flow resistance, and refrigeration effect, etc. were analyzed thoroughly under design conditions, and examinations were done under overworking conditions. The test results show that the refrigeration capacity of this refrigerator is —73 °C (with the cooling load of 250 W)~—120 °C (with the cooling load of 50 W), the maximum temperature difference between system inlet and expander outlet is 150 °C, and the expander efficiency can reach 60.5% while the heat exchanger efficiency reaches 97.5%. The minimum temperature of the system reaches —123 °C, which meets the requirement of heat load of 5 W at —120 °C. Through the test and analysis, the parameters influence relation and the parameters matching relation in high speed small turbo-expanders and compact heat exchangers are obtained.

Keywords: air refrigerator; turbo-expander; compact heat exchanger; experimental study

单级逆布雷顿空气制冷机的基本循环包括等熵压缩、等压冷却、等熵膨胀和等压吸热 4 个过程. 其制冷过程是利用气体状态在制冷机内循环变化, 把

热量从低温物体不断转移到高温物体. 由于逆布雷顿空气制冷机具有系统简单、运转可靠、制冷温度低、对环境无污染、资源丰富(空气作为制冷介质)又

易得等优点,在深冷和普冷领域得到了广泛的应用与发展.近 20 多年,随着低温透平膨胀机特别是高速气体轴承透平膨胀机技术和紧凑式换热器的长足进步,逆布雷顿循环空气制冷机技术得到了迅速发展.为了适应各种不同冷量、温度的需要,国内外在微型制冷技术方面,进行了大量的研究工作^[1].逆布雷顿循环制冷机的制冷温度和冷量范围很宽,而且由于其自身的特点,在制冷机的微型化、长寿命、低振动上有着不可替代的优势,是目前发展高效率、高可靠性和长寿命制冷机的理想方案之一.美国于 20 世纪 80 年代中期开始研制,在透平-逆布雷顿循环制冷机的基础理论和试验研究方面都取得了巨大进展,而且在工程应用方面也获得了一定的成功^[2-3].为进行长寿命微型透平-逆布雷顿循环低温制冷机关键技术的研究和探索,掌握空间透平-逆布雷顿循环制冷机系统的热力学分析和设计方法,填补我国在此项研究领域的空白,跟踪世界先进的制冷技术发展方向,从 1994 年起,西安交通大学气体轴承透平膨胀机课题组开展了对逆布雷顿循环低温制冷机的研究^[4-6],改建了系列试验台,已进行了一 40 ℃、—80 ℃、—100 ℃温区的各项相关的试验研究.在此基础上,课题组开展了全动压气体轴承稳定性以及制冷机性能的理论 and 试验研究,实现了全动压高速透平膨胀机的稳定运转,推进了制冷机向小型化、微型化的方向发展.

本文主要对制冷机的关键部件气体轴承透平膨胀机和紧凑式回热器以及制冷机系统,分别进行了在设计工况下的效率、降温、流阻和各种热负荷下制冷效果等热力性能的试验分析,以及在各种超工况下的综合性能考核.

1 试验装置

小型逆布雷顿空气制冷机采用开式循环,以空气作为制冷剂.膨胀机冷端、回热器、电加热箱(模拟负荷)以及连接管路安装在 $\varnothing 500\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ 的圆柱冷箱内,膨胀机制动风机端安装在冷箱外,如图 1 所示.带有水冷却器、油水分离器、过滤干燥器的螺杆压缩系统提供 0.8 MPa 的干燥气源,系统进口压力 0.2~0.7 MPa,标准状态下的流量 40~100 m³/h.膨胀机转子由直径为 20 mm 的径-轴流叶轮驱动,制动风机采用直径为 22 mm 的航空直叶片叶轮吸收膨胀机的输出功.转子质量约 90 g,直径为 12 mm,长度为 90 mm,转速范围为 0~27×10⁴ r/min.轴承型式为新型弹性支承动压气体轴承.为了



图 1 逆布雷顿空气制冷机试验台

避免热损失,膨胀机采用隔热板绝热,并垂直安装在制冷机的上方.本制冷机的高效紧凑回热器采用铝质钎焊板翅式换热器,外形尺寸为 249 mm×311 mm×111 mm,质量为 24.6 kg.制冷机的加热箱(模拟负荷)为 $\varnothing 100\text{ mm}\times 180\text{ mm}$ 的圆筒,可通过电加热生成 0~1 KW 的热量.本文着重对原系统的膨胀机与换热器进行了改进,以期达到—120 ℃温区的制冷效果,系统主要部件参数见表 1.

表 1 逆布雷顿空气制冷机主要设计参数

透平膨胀机		回热器	
参数名称	参数值	参数名称	参数值
进口压力(绝压)	0.36 MPa	热边入口压力(绝压)	0.365 MPa
进口温度	230 K	热边入口温度	300 K
工作轮外径	20 mm	翅高	9.5 mm
转速	24×10 ⁴ r/min	翅厚	0.2 mm
出口压力(绝压)	0.12 MPa	冷边入口压力(绝压)	0.12 MPa
体积流量	50 m ³ /h	冷边入口温度	188 K
反动度	0.45	翅距	1.2 mm
等熵效率	>60%	热边换热面积	4.3 m ²
		冷边换热面积	3.44 m ²

在制冷机性能测试中:温度测量采用铜-康铜热电偶,测温范围—200 ℃~400 ℃,测量精度为 0.1 K;压力测量选用 GYG01 通用高精度固态压阻压力传感器,测量精度为 1 kPa;流量测量采用气体涡轮流量传感器,并经流量计算仪转为标准流量,测量精度为 1.5 级;转速与振幅测量是通过计算机软件对从转子位移(振幅)传感器采集到的位移(振幅)信号进行快速傅里叶变换频域分析,对各频域峰值进行自动搜索、排序、判别真伪,从而智能判断并自动获得转速信息.

2 试验结果与分析

2.1 空气制冷机热力性能的试验研究

2.1.1 降温工况的研究 为了考核制冷机在不同压力和流量下所能达到的最低降温效果,分别进行了 43 m³/h(进口绝压 0.29 MPa)、52 m³/h(进口绝压 0.38 MPa)、74 m³/h(进口绝压 0.51 MPa)、82 m³/h(进口绝压 0.6 MPa)、100 m³/h(进口绝压 0.7 MPa)5 组标准状态下流量的降温试验,降温曲线如图 2 所示.在设计工况流量 52 m³/h 下,当系统进口温度为 25 ℃时,膨胀机出口温度(T)在 95 min 内降到 -91 ℃,超过了一 80 ℃的降温设计要求.对其他几组非设计工况进行考核,在 43 m³/h、74 m³/h、82 m³/h、100 m³/h 的流量下,制冷机在 95 min 内所能达到的最低降温效果分别为 -68 ℃、-101 ℃、-111 ℃、-123 ℃.本制冷机由于冷箱部件采用珠光砂与外界绝热,且受冷箱尺寸的限制,制冷机各附件外围珠光砂的最小厚度只有 50 mm,在降温过程中,势必会有相当数量的冷量浪费,目前正在进行真空(2×10^{-4} Pa)多层绝热的改进,预计降温效果在此基础上会有更大的突破.

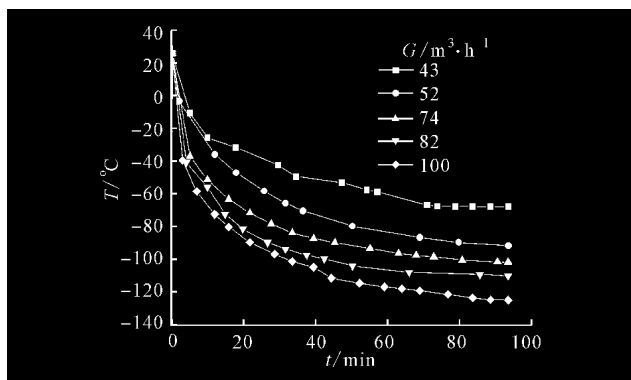


图2 降温曲线

2.1.2 气体轴承透平膨胀机的研究 气体轴承透平膨胀机作为逆布雷顿循环制冷机的核心机械,为整个系统提供冷量,是制冷系统中技术含量高、研制难度大的部件,也是小型制冷机研制过程中技术研究的重点.本试验进行了各种工况下的试验研究,分别得到了膨胀机膨胀比转速曲线、膨胀机特性曲线、膨胀机流量特性曲线等.透平膨胀机的膨胀比(π_t)对其转速(n)有直接影响,因此膨胀比与转速的变化一致,从图 3 可以验证这一点,随膨胀机入口流量(G)由 43 m³/h 递增到 100 m³/h,转速相应由 19×10^4 r/min 升到 27×10^4 r/min,膨胀比由 2.94 增大到 5.2.膨胀机的特性曲线反映了特性比(u_1/c_s)与

等熵效率(η_s)的关系,在曲线中对应最大等熵效率存在一个最佳的特性比.特性比中的圆周速度 u_1 只与转速有关,等熵速度 c_s 则与膨胀机的进出口热力参数有关,因而特性比曲线反映了转速对膨胀机等熵效率的影响,说明了在膨胀机中维持所要求的设计转速的重要性.从图 4 可以看出,膨胀机在其设计转速 24×10^4 r/min 下,等熵效率达到最大 (60.5%),而在非设计工况下,虽转速很高,但其等熵效率基本在 54% 左右.通过试验得出膨胀机的最大流量为 100 m³/h,这是由于膨胀机受喷嘴滞止工况的限制所致.在膨胀机降温过程中,膨胀机与周围的跑冷损失以及轴向跑冷损失,势必会造成其效率的下降,因此效率的提高有待于冷箱的绝热方式和膨胀机结构的改进.

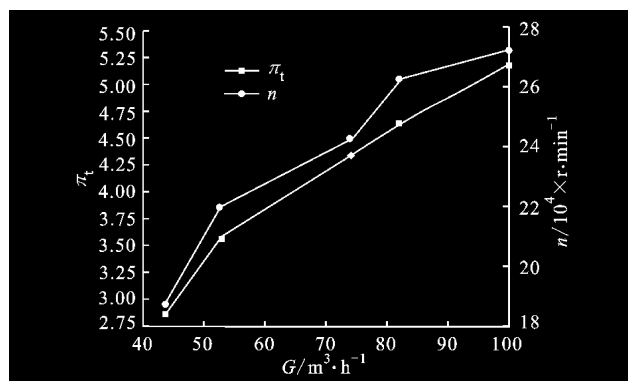


图3 膨胀机在标准状态下膨胀比、转速与流量的关系曲线

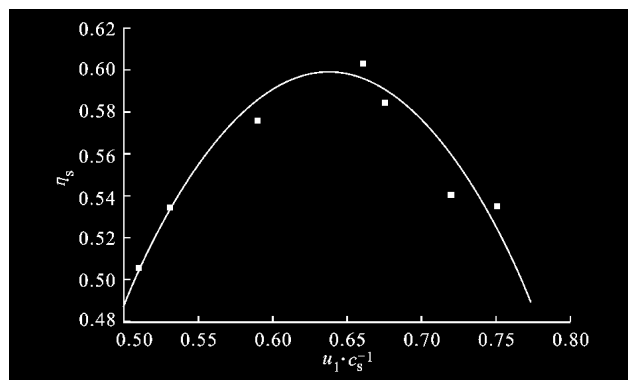


图4 膨胀机特性曲线

2.1.3 高效紧凑回热器的研究 高效紧凑板翅式回热器是逆布雷顿循环空气制冷机的另一主要影响部件,其作用是进行冷量的回收,把用冷装置排出的低温气流引至回热器,用来冷却高压常温气流,以降低膨胀机入口气流温度,使膨胀机出口获得更低的温度,并减小制冷机内的不可逆损失,其性能的优劣对制冷机的性能影响很大.对回热器的效率和流阻

特性分别进行了试验研究,发现回热器效率主要受运行工况和所处环境的影响.在试验中回热器与环境采用珠光砂绝热,受冷箱整体尺寸的限制,系统在降温过程中回热器有不同程度的跑冷损失,随着流量的递增(43 m³/h、52 m³/h、74 m³/h、82 m³/h、100 m³/h),在不同的降温过程中,回热器的跑冷损失递增(13%、15%、16.8%、21.6%、22.5%).回热器效率与运行工况的关系为:效率(η_4)随流量的增加而提高,但随其冷边温度(T_4)的降低而降低.从图5可以看出:在冷边温度为-40℃、流量为100 m³/h时,效率均超过90%,甚至达到97.58%;随温度下降,效率降到最低点83%.回热器的流阻(ΔP ,其中 ΔP_r 为热边流阻, ΔP_c 为冷边流阻)特性也对制冷机系统性能有着直接的影响关系,即随流阻增大,制冷机的耗功增加,因此回热器的流阻特性是回热器设计的另一个关键问题.由图6可以看出:随流量的增大,流速增大,其相应的流阻也增大.为获得更大的换热效率,并考虑体积和流阻及流动工况的限制,可通过增加比面积(单位体积的换热面积)来实现.因此,研制低温换热工况下的大比面积的微小通道高效紧凑型全金属板换热器,是逆布雷顿空气制冷机的关键问题.

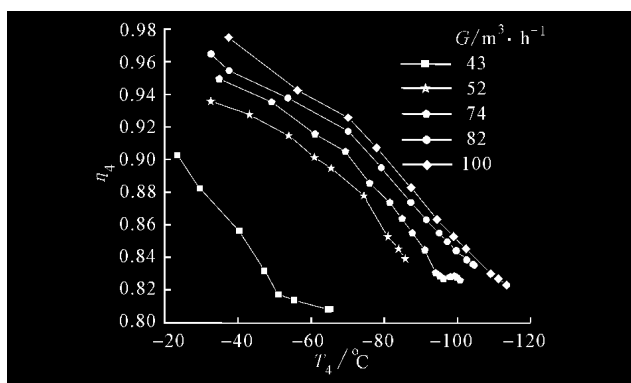


图5 回热器效率曲线

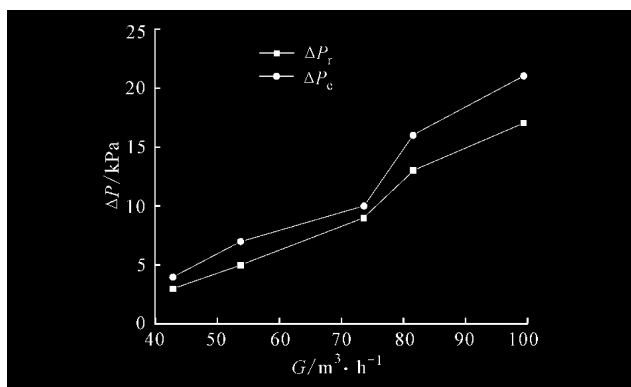


图6 回热器标准状态下的流量与流阻曲线

2.1.4 热负荷的研究 在各种热负荷条件下,分别对4种工况进行了热负荷试验考核.图7为设计工况及非设计工况下的热负荷曲线,在降温达到最低温度并稳定后,分别利用电加热器加热,产生50 W、100 W的热量.在设计工况100 W热负荷下,温度快速稳定在-82℃,超出原设计指标(100 W/-75℃).在非设计工况(制冷量Q为50 W,不同流量)下,温度快速稳定在-89℃、-100℃、-107℃、-123℃.由此可见,该制冷机具备-120℃(制冷量为50 W)的最低降温效果,并可在40 min内稳定在该点以上任一温度点.

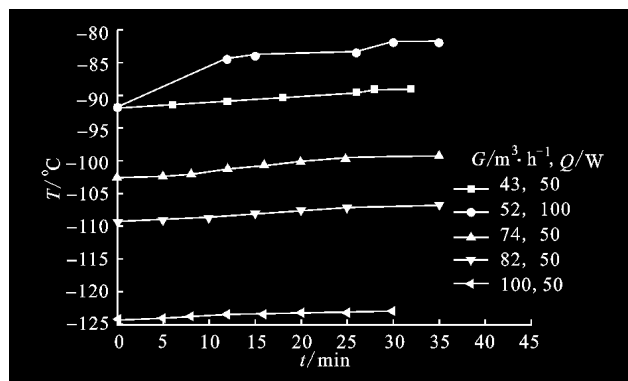


图7 制冷机热负荷曲线

3 结 论

本文在逆布雷顿空气制冷机多功能综合试验台上,对气体轴承透平膨胀机、紧凑型回热器和制冷机,分别进行了在设计工况下的效率、降温、流阻和热负荷下制冷效果等热力性能的试验分析,以及在各种非设计工况下的综合性能考核.试验结果表明:该空气制冷机的制冷范围为-73℃(制冷量为250 W)~-120℃(制冷量为50 W),制冷温度与系统进口温差最大达150℃,膨胀机效率最高达60.5%,回热器效率最高达97.5%,制冷机最低温度达-123℃,并能满足50 W/-120℃热负荷需求.通过对系统深入的性能试验,分析了透平机械和紧凑型换热器在各种工况下的性能特性,得出了小型透平机械和紧凑型换热器中各参数的影响关系、制冷机中各参数的匹配关系以及目前存在的问题和解决的途径,为进行长寿命微型透平-逆布雷顿循环低温制冷机关键技术的研究和探索,掌握空间透平-逆布雷顿循环制冷机系统的热力学分析和设计方法,填补我国在此项研究领域的空白,推进制冷机向小型化、微型化的方向发展等方面奠定了坚实的试验基础.

参考文献:

- [1] 计光华. 透平膨胀机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [2] Swift W L, Zagrola M V, Nellis G F, et al. Developments in turbo Brayton technology for low temperature applications [J]. *Cryogenics*, 1999, 39(12): 989-995.
- [3] Ratts E B, Brown J S. An experimental analysis of cycling in an automotive air condition system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2000, 20 (11): 1039 - 1058.
- [4] 侯予, 陈纯正, 熊联友, 等. 低温氦透平膨胀机的热力设计及性能分析[J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(7): 666-669.
- Hou Yu, Chen Chunzheng, Xiong Lianyou, et al. The design and analysis of thermal performance for cryogenic helium expansion turbine[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, 37(7): 666-669.
- [5] 刘立强, 熊联友, 侯予, 等. 透平膨胀机热力性能的理论预测 [J]. *低温工程*, 1998, 104(4): 5-10.
- Liu Liqiang, Xiong Lianyou, Hou Yu, et al. The theoretical prediction of thermal performance of turbo-expanders [J]. *Cryogenics*, 1998, 104(4): 5-10.
- [6] 王可, 侯予, 杨金焕, 等. 透平逆布雷顿循环空气制冷机性能分析(一)——数学模型[J]. *流体机械*, 2003, 31 (12): 39-42.
- Wang Ke, Hou Yu, Yang Jinhuan, et al. The performance analysis of reverse-Brayton cryocooler(1) — mathematical model [J]. *Fluid Machinery*, 2003, 31 (12): 39-42.

(编辑 刘杨 王焕雪)