

小型斯特林制冷机动力学设计及试验

霍英杰, 闫春杰, 许国太, 王田刚, 陈正刚

(兰州物理研究所, 真空低温技术与物理国家级重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 介绍了小型斯特林制冷机动力学设计及试验情况。通过试验, 验证了斯特林制冷机动力学设计的准确性, 达到了制冷机的谐振, 降低了功耗, 工作稳定性和可靠性得到相应的提高。

关键词: 斯特林制冷机; 动力学; 设计; 试验

中图分类号: TB651; TB61

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2007)01-0032-03

THE DYNAMICS DESIGN AND TEST OF THE DIMINUTIVE STIRLING CRYOCOOLER

HUO Ying-jie, YAN Chun-jie, XU Guo-tai, WANG Tian-gang, CHEN Zheng-gang
(Lanzhou Institute of Physics, National Key Lab of Vacuum & Cryogenic Technology
and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The dynamics design and test of the Stirling cryocooler is discussed. The veracity of the design is validated through a series of tests. The cryocooler can work at the resonance. The power consumed by the cryocooler is decline. The stability and reliability of the cryocooler is improved.

Key words: Stirling cryocooler; dynamics; design; test

1 引 言

采用双活塞对置、板弹簧支撑、间隙密封、直线电机驱动技术, 对于提高斯特林制冷机工作寿命和可靠性有非常大的作用。这种结构通过减小或避免斯特林制冷机活塞与气缸之间的磨损, 从而有效地提高了制冷机的寿命和可靠性^[1]。在研制小型斯特林制冷机的过程中, 突出了小型斯特林制冷机质量轻、低功耗的特点; 在设计中为了提高电机效率, 对直线电机的定子磁极结构和动子的参数进行了优化设计, 以保证斯特林制冷机动力学优化设计的实施。在动力学设计中, 注意抓住压缩机运动的特点, 克服板弹簧和气体弹簧的非线性对压缩机谐振的影响, 使研制的小型斯特林制冷机达到谐振。其固有频率接近最佳热力学频率, 制冷机在此频率下工作, 兼顾了热力学和动力学效率, 从而达到功耗低、制冷效率高的目的, 运行稳定, 工作可靠。

2 动力学设计

双驱动斯特林制冷机中, 绝大部分功率被压缩机消耗, 如果在设计中使压缩机达到谐振, 同时使压缩机固有频率接近制冷机热力学频率, 则能降低制冷机的功耗, 提高制冷效率。在动力学设计中, 主要进行了压缩机动子谐振设计和直线电机的优化设计。

压缩机活塞受力状态如图 1 所示, 其力平衡方程为

$$f_1 = f_2 - (f_3 + f_4) \quad (1)$$

收稿日期: 2006-07-26.

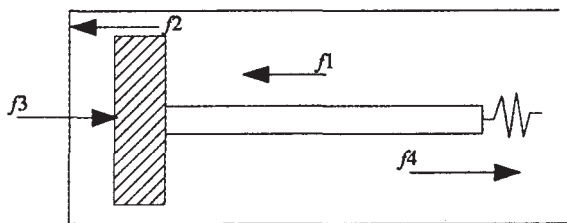
基金项目: 真空低温技术与物理国家级重点实验室基金(51475050103HT6002)资助。

作者简介: 霍英杰(1972-), 男, 陕西省绥德县人, 高级工程师, 从事空间机械制冷技术研究。

式中 $f_2=ma$; $f_3=(p_c-p_b)A$; $f_4=kx$; m 为动子质量; k 为机械弹簧刚度; A 为活塞截面积; p_c 为压缩腔压力; p_b 为背压腔压力; a 为动子加速度; x 为动子位移。

如图 1 和式 (1) 所示, 惯性力总是和气体弹簧力及机械弹簧力方向相反, 电机则提供由此产生的不平衡力。在谐振状态下, 弹簧力 (气体和机械弹簧) 被惯性力抵消, 这样使得这种不平衡力最小, 电机推力也相应最小, 在这种情况下可以得出谐振频率仅与弹簧力有关。压缩腔压力的变化过程是通过热力学计算求出, 机械弹簧力由弹簧测试试验确定, 如图 2 所示^[2,3]。由此可以计算出小型斯特林制冷机的最佳频率约为 51 Hz, 用同样的方法可以计算出冷头的固有频率为 62 Hz。试验证明, 这样的频率匹配能够在效率较高的情况下, 保证压力波和回热器振幅之间的相位差在 80° 左右, 有利于提高制冷机的制冷性能。

对直线电机进行了优化设计。定子的设计要保证在有限的空间内, 气隙磁密高而且均匀, 在设计中使用电磁场有限元计算软件分析, 通过比较不同的磁路结构, 优化采用复合励磁的定子结构; 在气隙高度为 4 mm 时, 气隙磁密平均为 0.55 T, 磁场分布均匀, 气隙中大部分磁力线垂直于线圈体。磁场分布如图 3 所示。动子采用长音圈型式, 增大了线圈的有效长度, 提高了电机的推力; 考虑了强度和涡流损耗的影响, 在线圈骨架设计中采用了金属和非金属结合的结构, 既能达到动圈具有良好的刚度, 防止径向变形, 又能完全避免线圈骨架在磁场中运动产生的电磁阻尼, 从而有利于达到压缩机动子的谐振。



f_1 电机推力; f_2 惯性力; f_3 气体弹簧力; f_4 机械弹簧力。

图 1 斯特林制冷机压缩机运动模型

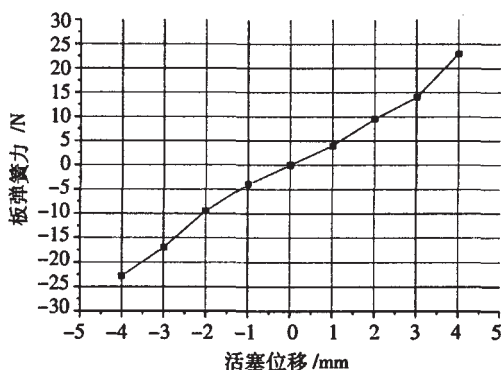


图 2 板弹簧测试

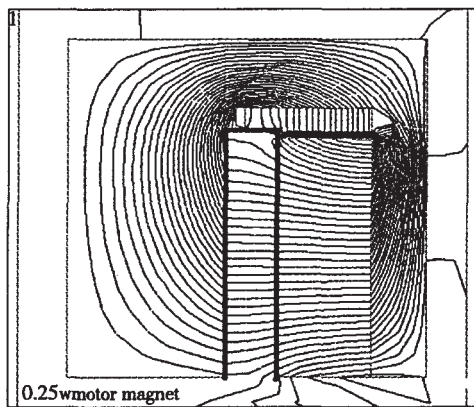


图 3 直线电机气隙磁场分布

3 试验结果

3.1 制冷机谐振频率测试

对制冷机在专用试验台上进行工作频率和活塞振幅关系的试验, 以便测试制冷机在充气工作时的谐振频率。试验设定制冷机控制器输出功率 (2.7 W) 不变, 通过改变充气压力, 测试在不同充气压力时的谐振频率。因为在相同的输入功率下, 谐振时振幅最大, 根据振幅的变化情况确定谐振频率。试验曲线如图 4 和图 5 所示。

试验表明, 随着充气压力的增大, 压缩机的谐振频率增大, 但增大到 1.5 MPa 时, 压缩机谐振频率接近 50 Hz, 不再随着充气压力的增大而明显增大。冷头的谐振频率亦有这样的趋势和规律。在试验中可以发现, 随着充气压力的提高, 压缩机的振幅将减小, 如图 6 所示; 冷头振幅也随着增加, 在其固有频率 60 Hz 左右时, 振幅最

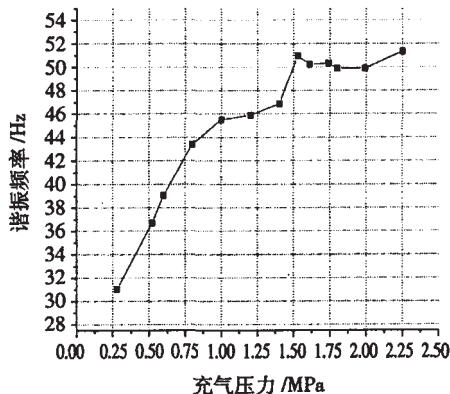


图 4 压缩机谐振频率测试曲线

大,如图7所示。

提高制冷机充气压力,气体弹簧的刚度增大,谐振频率增加,但增加到1.7~1.8 MPa时,继续提高充气压力则对于谐振频率的增加已经不明显,只是增加了制冷量。由于试验中设定制冷机控制器输出功率不变,电机推力也不变,所以当气体弹簧刚度增大时,造成不平衡力增大,在此情况下压缩机振幅持续减小。然而冷头在充气压力为1.7~1.8 MPa时,由于此时的工作频率接近其固有频率,所以振幅最大。

从试验中测得在充气压力为1.7~1.8 MPa时,制冷机的谐振频率为50 Hz左右,此时压缩机的工作达到谐振,与设计值接近,与冷头的谐振频率偏移较大。理论和试验证明,这种偏移对于保持压力波和冷头排除器之间的适当相位很关键,同时这一频率和热力学最佳频率接近。所以确定以此种参数为制冷机运行参数。

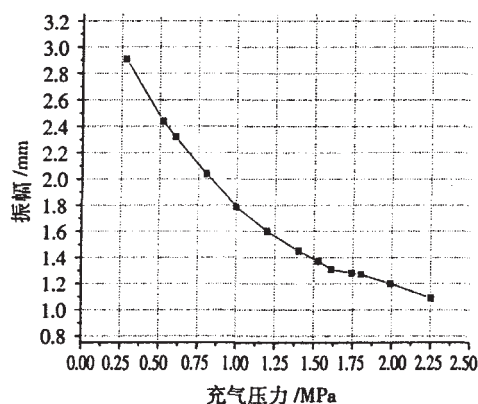


图6 压缩机充气压力-振幅曲线

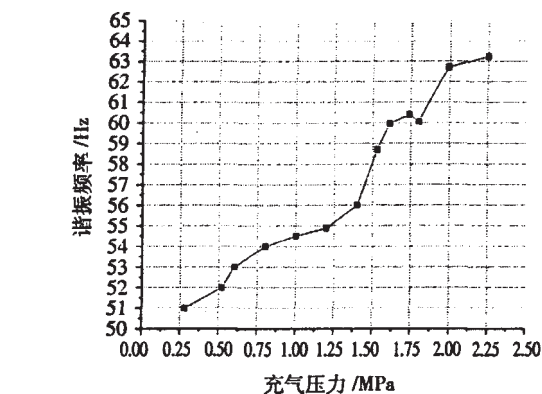


图5 冷头谐振频率测试曲线

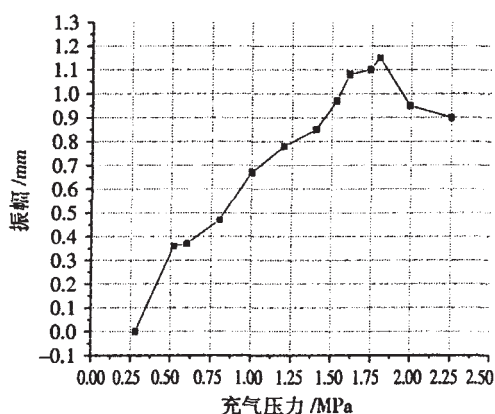


图7 冷头充气压力-振幅曲线

3.2 制冷机降温试验

按照测试中确定的参数将制冷机充气到1.8 MPa,设定控制器频率为50 Hz。在制冷机冷头装镍铬-康铜热电偶测温,装5 g电阻加热器测量制冷机冷量。进行降温试验,降温曲线如图8所示。

从试验结果看,制冷机在6 min的时间内降温到80 K,20 min内最低温度降到60 K,测得制冷量80 K/0.28 W,功耗24 W。可以看出功耗由于压缩机的谐振而大幅减小,制冷量和制冷温度满足设计要求。该制冷机在实验室已连续运行了2年多。

4 结 论

由于斯特林制冷机中板弹簧和气体弹簧的非线性,以及某些阻尼的不确定性,所以斯特林制冷机的动力学设计较为复杂。在设计中抓住主要的因素,对制冷机的动力学系统进行估算和设计,在设计参数的指导下,注意板弹簧、活塞配副等零件的选配,以达到压缩机的谐振状态。

斯特林制冷机的谐振频率的设计要和热力学最佳频率相合或接近,以获得最佳的制冷机性能。充气压力

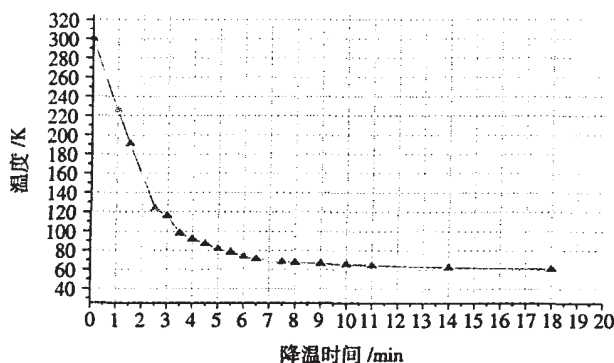


图8 制冷机降温曲线

3.3 温度对间隔材料有效低温热导率的影响

图 2、图 3 分别是玻璃纤维布、隔热纸有效低温热导率与温度的关系曲线。从图中可以看出温度对两者的有效低温热导率影响较小,从室温到液氮温度仅变化了约 20%~30%,特别是在低温下,热导率的变化非常小。两者随温度变化趋势相近。

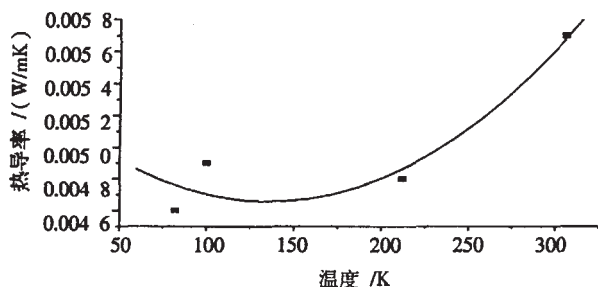


图 2 玻璃纤维布真空下有效低温热导率与温度曲线

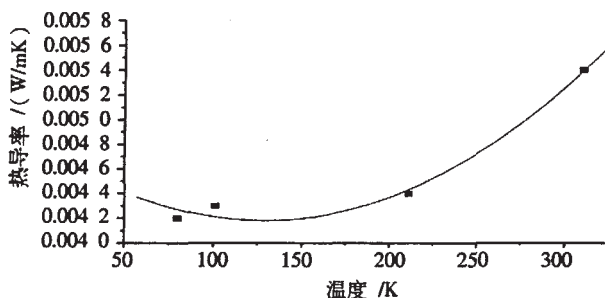


图 3 隔热纸真空下有效低温热导率与温度曲线

4 结 论

- (1) 薄层材料试样可采用叠厚的方法用平板热导率测定仪进行测试,但要有一定的试样厚度压缩量,以减小试样的接触热阻。这个压缩量,需要进一步研究和探索。
- (2) 采用此方法进行测试的结果,相互间进行比较时,应有试样叠厚密度、层密度的数据,最好有单层厚度和叠厚的数据,以进行分析和比对。
- (3) 通过隔热纸和玻璃纤维布有效热导率测试数据的比较和分析,隔热纸的有效热导率要小于玻璃纤维布的有效热导率。

参考文献:

- [1] 张建可,冀勇夫.低温贮箱聚氨酯泡沫塑料分层绝热模型与机理分析[J],低温工程,1995,(2):25~29.
- [2] GB/T 3399-82 塑料导热系数试验方法——护热平板法[S].
- [3] 张建可,冀勇夫.碳纤维面板蜂窝夹层结构低温热导率测试研究[J],真空与低温,2003,9(1):35~38.
- [4] 徐烈.低温绝热与贮运技术[M],北京:机械工业出版社,1999.

(上接第 34 页)

对于制冷机的谐振频率有一定的影响。对于小型斯特林制冷机,充气压力在 1.8 MPa 左右时,制冷机谐振频率为 50 Hz,在此频率下工作,制冷机性能最佳。保持压缩机和冷头固有频率之间有一定程度的差值,有利于制冷机保证适当的工作相位。

参考文献:

- [1] 朱建炳,潘雁频.星载斯特林制冷技术研究进展[J].真空与低温,2005,11(3):131~137.
- [2] YUAN S W K, NAES L G, NAST T C. Prediction of nature frequency of the NASA 80 K cooler by the stirling refrigerator performance model[J]. Cryogenics, 1994, 34(5):383~388.
- [3] YUAN S W K, SPRADLEY, I E A A. third order computer model for Stirling refrigerators[J]. Adv Cryog Eng. 1992, 37B: 1 055~1 062.