

DOI 10.3969/j.issn.0254-0150.2010.07.024

油气混合氦透平膨胀机在 EAST 低温系统中应用现状研究*

王学敏 朱平 付豹

(中国科学院等离子体物理研究所 安徽合肥 230031)

摘要: 介绍用于 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 低温系统中特殊结构的氦透平膨胀机, 并且指出在当前降温过程中氦透平膨胀机不稳定性问题。分析 2 种降温模式 (使用透平 D 和不使用透平 D) 对制冷机性能的影响, 结果表明不使用透平 D 将会大大降低制冷机的性能。在现有条件下提出对静压气体轴承的改进设计, 试验结果表明此方法能有效改善氦透平膨胀机的稳定性。

关键词: EAST; 低温氦透平膨胀机; 静压气体轴承; 稳定性

中图分类号: TH 133.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150 (2010) 7-095-4

Research on Application Status of Helium Turbo-expander with Oil-gas Hybrid Bearing in EAST Cryogenic System

Wang Xuemin Zhu Ping Fu Bao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui 230031, China)

Abstract The turbine-expander with specific configuration in EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) cryogenic system was introduced, and the instability of the turbo-expanders in actual refrigerating process was pointed out. Two different refrigerating methods (using turbine D or not using turbine D) were analyzed. The results show that not using turbine D will degrade the performance of the refrigerator largely. An improved design of the externally pressurized gas bearing for helium turbo-expander was put forward in current condition. The experimental results indicate that the new design could improve the stability of helium turbo-expander effectively.

Keywords EAST; cryogenic helium turbo-expander; externally pressurized gas bearing; stability

能源危机随着全球经济的不断发展而日益凸现, 化石能源的使用使得地球环境日益恶化, 无污染、能量大的聚变能将有可能成为人类彻底解决能源问题的优选方式^[1-3]。当前, 有许多国家都在从事可控核聚变的研究, 世界上聚变领域最大的国际性合作项目 (ITER) 将在法国建成, 中国是其中的成员国之一^[4]。EAST 核聚变实验装置是一个具有能很好地改善等离子体约束状况、大拉长比、非圆截面的等离子体位形全超导托卡马克实验装置, 已于 2006 年在中国科学院等离子体物理研究所建成, 使我国成为世界上少数几个拥有这种类型超导托卡马克装置的国家之一^[5]。

氦低温系统是 EAST 装置中的关键子系统, 2 kW / 4.5 K 的氦制冷机由我国自行设计完成, 并于 2006 年 2—3 月工程调试成功, 其中包括 4 台俄罗斯进口的氦透平膨胀机, 一台透平膨胀机 (透平 A) 专门冷却 EAST 的外杜瓦冷屏, 另外 3 台透平膨胀机 (透

平 B、C、D) 用于生产液氦和制取 4.5 K 的制冷量。

1 EAST 氦透平膨胀机介绍

1.1 应用现状

至 2009 年 7 月以前, EAST 低温系统共进行过 5 轮降温实验, 各轮实验结果均能满足设计要求, 但现有 4 台俄罗斯进口油-气混合氦透平膨胀机运行不稳定, 每台氦透平膨胀机转子在前几轮的降温试验中都出现过不同程度的磨损, 如图 1 所示。

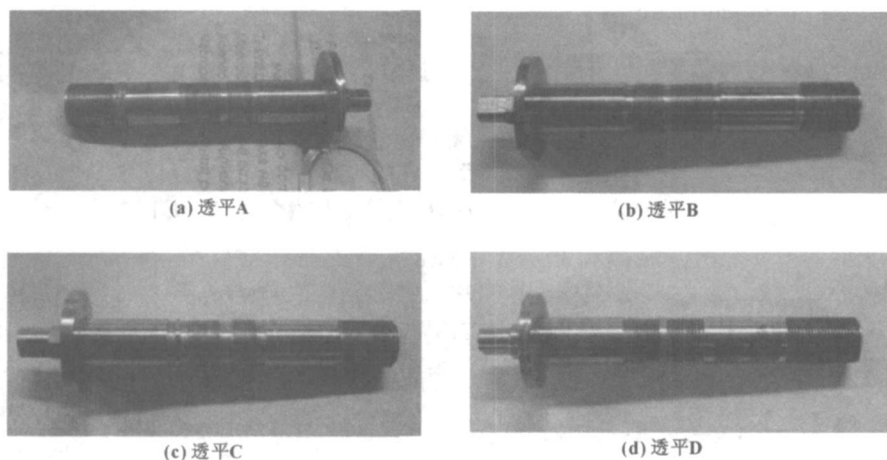
1.2 EAST 氦透平膨胀机结构

4 台 EAST 低温氦透平膨胀机结构形式相同, 仅仅尺寸大小不一样, 均采用半开式单级向心径-轴流反动式结构, 其中工作轮采用长短叶片形式, 喷嘴采用的是叶型叶片。转子由径向静压气体轴承和静压油轴承支撑, 垂直安装, 径向静压气体轴承安排在靠近上端的工作轮, 单排 8 个环面小孔径向进气, 下端采用小孔节流径向油轴承和止推油轴承, 径向油轴承为轴向 3 排小孔 (每排 8 个小孔) 径向进油, 止推轴承为单排 8 个小孔轴向供油, 中间一段迷宫密封能避免油气互串。氦透平膨胀机的制动轮采用油制动, 制动过程的摩擦热被循环的透平油吸收带走, 从而平衡工作轮端所做的功, 透平油通过油循环泵加压, 被冷却后再重新循环使用, 结构如图 2 所示。

* 基金项目: 国家“九五”大科学工程 EAST 项目 (计投资 (1998) 1303 号); 中国科学院重要方向性项目。

收稿日期: 2010-04-08

作者简介: 王学敏 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 氦透平膨胀机的设计研究。E-mail: wangxuemin2011@ipp.ac.cn



(a) 透平A

(b) 透平B

(c) 透平C

(d) 透平D

图 1 4台氦透平膨胀机主轴损坏情况

Fig 1 Damaged situation of shaft in four helium turboexpanders

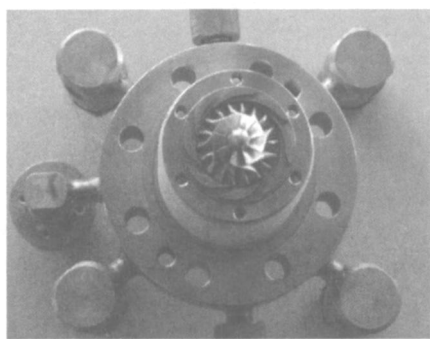


图 2 单级油-气混合氦透平膨胀机结构

Fig 2 Schematic view of single stage oil-gas hybrid helium turboexpander

1.3 结构比较

随着宇宙空间技术和核聚变能研究的需要，大型低温系统是其中不可或缺的关键部分，而氦透平膨胀机是低温系统中的关键部件。早期的氦低温系统都是应用活塞式膨胀机，相比透平式膨胀机，长期运行的场合损坏周期是透平膨胀机的 4~6 倍^[6]。其中常用的氦透平膨胀机结构形式有以下 3 种：油轴承透平，静压气体轴承透平和动压气体轴承透平，如图 3 所示。

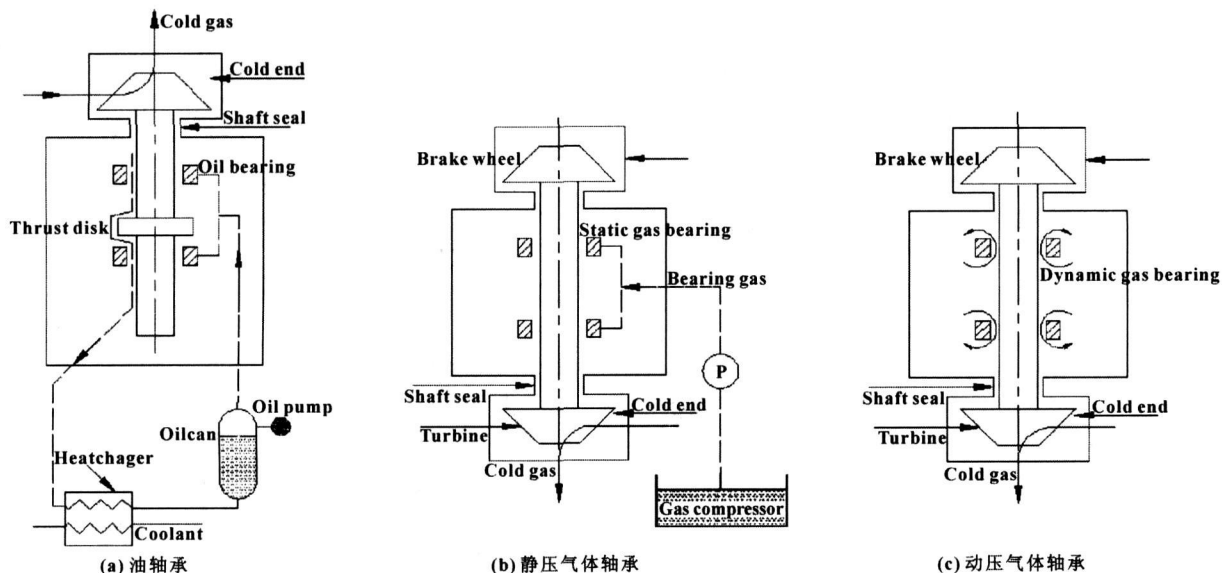


图 3 3种不同轴承结构氦透平膨胀机

Fig 3 Three different bearing structure types for helium turboexpander

油轴承透平膨胀机支撑刚度大, 稳定性高, 但在低温下靠近工作轮的油轴承容易被冻住, 并且高速下油温急剧升高会导致油黏度下降, 从而影响其制动效果。因此, 两端油轴承氦透平膨胀机比较少见, 一般采用油-气混合轴承结构形式, 中间采用迷宫密封防止氦气被油污染。油轴承透平膨胀机需要一套油循环系统和油冷却系统, 这增加了操作的复杂性; 油-气轴承匹配不当还会使系统很不稳定。目前国内外只有俄罗斯氦透平膨胀机还保留有这种结构形式^[7]。

静压气体轴承透平膨胀机能够避免氦气被污染, 不存在刚度不匹配问题, 支撑刚度虽然比油轴承小一个数量级, 但相比动压气体轴承要高, 由于减少了系统的复杂性, 静压气体轴承的稳定性高于其他 2 种结构形式。但静压气体轴承透平膨胀机需要单独一套外部供气系统, 对于制冷量小的低温系统, 气体轴承的耗气量也是设计过程中需要重点考虑的对象。氦透平膨胀机中采用此结构形式的有法国 Air Liquide 公司^[8]和美国 BOC 公司。

动压气体轴承透平膨胀机不需要外部气源, 气体在轴承气室内形成一个闭路循环, 虽然理论上动压气体轴承适用于非常高的转速, 但支撑刚度是 3 种结构形式中最小的, 设计不当容易抱轴卡死, 国内还没有动压气体轴承相关应用的例子。德国的 Linde 公司、瑞士的 Sulzer 公司和捷克 PBS 公司氦透平膨胀机均采用此种结构形式^[9-11]。

2 EAST 氦透平膨胀机运行参数

由于实际降温的需要, EAST 低温氦透平膨胀机并不是完全按照设计参数来运行的, 实际的运行参数见表 1。

表 1 EAST 氦透平运行参数 (实际值/设计值)

Table 1 Operational parameter of EAST helium turbo-expander (working value/design value)

参 数	透平 A	透平 B	透平 C	透平 D
工作转速 $v / (\times 10^3 \text{ r} \cdot \text{m} \cdot \text{in}^{-1})$	150/184	110/181	100/105	100/112
进口压力 p / MPa	1.85/1.90	1.95/1.9	0.7/0.69	1.85/1.88
进口温度 T / K	78.6/53.0	44.5/45.9	24.8/20.6	10.0/8.7
出口温度 T / K	58.6/56.5	34.0/34.4	16.0/12.4	6.3/6.4
质量流量 $q_m / (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	130/110	110/100	110/100	110/110

3 讨论

3.1 透平膨胀机对 EAST 降温的影响

在第 4 轮和第 5 轮试验中由于节流级透平 (透平 D) 无法投入使用, 采用了用 J-T 阀 (焦耳汤姆生阀) 来替代透平 D 的降温模式, 虽然此降温模式也能满足当前热负荷的需要, 为了分析比较其中的不同点, 从热力完善度的角度进行了分析。

热力学完善度能综合描述一台制冷机的性能特性, 热力学完善度越高, 表示制冷机运行越接近理想循环, 热力完善度都小于或等于 1, 当热力完善度越接近于 1, 说明制冷循环越接近于理论循环, 因而循环越“好”, 反之越“差”。由于实际氦循环的热力学完善度远小于 1, 因而每制取 $1 \text{ W} / 4.5 \text{ K}$ 的制冷量, 所消耗的功将远大于理想情况下的 $65.67 \text{ W}^{[12]}$ 。

热力完善度计算公式如下:

$$FOM = \frac{COP}{COP_i} = \frac{w_i}{w} \quad (1)$$

EAST 氦制冷机的热力学完善度的分析结果如图 4 所示, 在第 3 轮实验期间, FOM 在 15% 左右; 由于未使用透平 D, 在第 4 轮实验期间, FOM 在 10% 左右; 而在第 5 轮实验中, FOM 在 8% 左右, 较第 4 轮实验还要低的主要原因是压缩机性能急剧下降导致^[13]。由此可见, 冷端透平 D 对 EAST 氦制冷机的性能起到了很重要的影响。

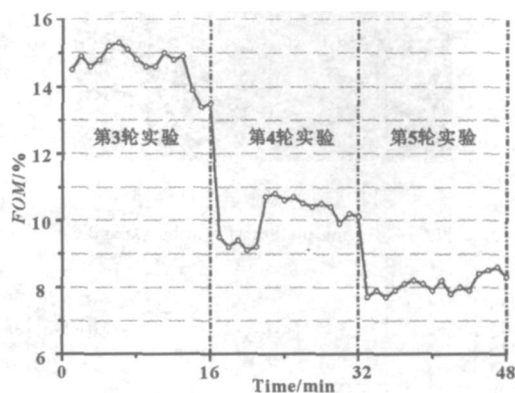


图 4 EAST 氦制冷系统热力学完善度变化曲线 (第 3~5 轮实验)

Fig 4 Variation curve of Figure of Merit in EAST helium refrigerator (from three to five turn experiments)

3.2 改进设计

4 台氦透平膨胀机稳定运行是 EAST 顺利进行物理试验的保证。国内目前还不能生产能保证长期运行的氦透平膨胀机, 建造大中型低温系统都必须依靠进口氦透平膨胀机, 氦透平膨胀一旦出现问题维修费用

相当昂贵, 并且周期很长。为了解决 EAST 现有 4 台氦透平膨胀机运行不稳定性问题, 实现氦透平膨胀机国产化, 与此相关的中国科学院重要方向性项目(透平膨胀机性能研究)在中科院等离子体物理研究所进行, 目前已经试验加工了多台油-气混合结构的氦透平膨胀机, 并且自行设计建造了专门的透平测试试验台, 如图 5 所示。图 6 为一台改进后的透平 C 的调试曲线, 具体改进措施有: 静压气体轴承由单排改成双排供气, 供气小孔直径由 0.5 mm 改为 0.4 mm, 止推盘加大 1 mm, 另外还改进了加工工艺, 调整了气膜间隙。通过以上改进措施以后, 气体轴承供气流量增加 73.9%, 刚度系数提高 32.9%, 承载能力增加 30.9%, 摩擦功率损耗增加 11.2%。通过计算可知, 改进后的气体轴承供气流量为 0.645 g/s 相对 400 g/s 的压缩机总流量而言很小, 产生的摩擦功率损耗在透平 C 的工作温区范围内也可以忽略不计。调试结果表明, 启动过程中转速波动较小, 启动平稳, 并且顺利升至工作转速(实际运行转速比额定转速低)。

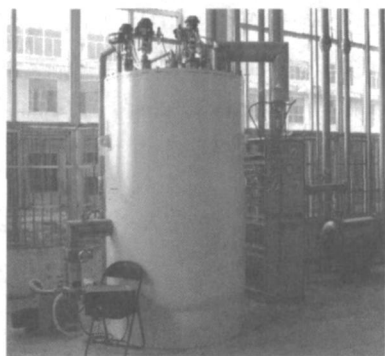


图 5 透平膨胀机测试阀箱

Fig 5 Testing platform for turbo-expander

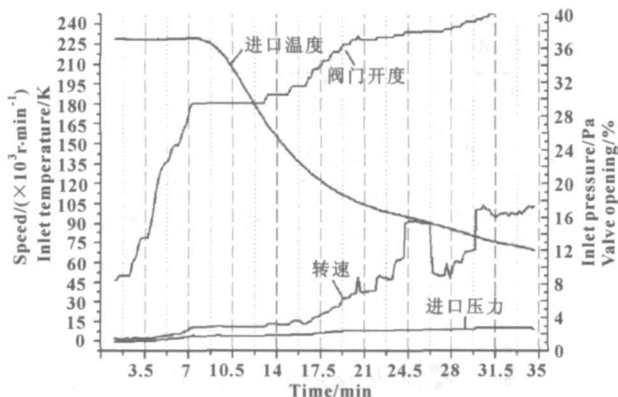


图 6 改进的透平调试曲线

Fig 6 Debugging curve of improved turbine

4 结论

油-气混合氦透平膨胀机的稳定性是 EAST 低温系统有待解决的主要问题, 其本身的复杂结构更增加了其不稳定性因素。氦透平膨胀机运行不稳定不仅会影响到 EAST 低温系统正常的降温操作, 甚至会影响到整个 EAST 物理试验的进行。相关方面的研究正在进行中, 目前已有多台氦透平膨胀机调试成功, 但其稳定性好坏还有待长期运行来检验。

参考文献

- Didier Gambier Fusion for Energy: A new European organization for the development of fusion energy[J]. Fusion Engineering and Design 2009, 84: 138-142
- D'haeseleer W D The importance of fusion development towards a future energy source[J]. Fusion Engineering and Design 2003, 66/67/68: 3-15
- Lechon Yolanda Cabal H, Varela M, et al A global energy model with fusion[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 75/76/77/78/79: 1141-1144
- 赵君煜. 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划 [J]. 物理, 2004, 33(4): 257-260
Zhao Junyu The international thermonuclear experimental reactor program [J]. Physics 2004, 33(4): 257-260
- Bai Hongyu, Bi Yanfang Wang Jinrong et al Cryogenic System for the superconducting tokamak HT-7U [J]. Fusion Science & Technology, 2002, 42(1): 162-166
- Davydov A B, Katejev G M, Kalinin N V. The use of turboexpanders in helium cryogenic systems [C]. Ser KIM-6 Moscow, TsNTIkhimneftemash 1977.
- Agapov N N, Batin V I, Davydov A B et al More effective wet turboexpander for the Nuclotron helium refrigerators [C]. AIP Conference Proceedings NO. 613A, 2002: 280-287
- Mant G, County J C, Delcayre F, et al Development of a new Air-Liquid cryogenic expander [J]. Advances in Cryogenic Engineering 2006 51A and B: 1845-1851
- N Eber H, Quack C, Schmid Gas bearing turbines with dynamic gas bearings and their application in helium refrigerators [J]. Cryogenics 1978, 18(11): 585-588
- Eber N. World wide cryogenics Switzerland Cryogenics at Suhr Cryogenics [J]. Cryogenics 1980 20(4): 183-189
- Kundera R, Pejchal J Some innovation results concerning the low temperature expansion turbines manufactured in PBS Větka Bites [C]. Proceedings of the 1th international conference Cryogenic 90 Kosič Czechoslovakia 1990
- McClinbeck P V E. Cryogenics [M] // Meyers R A. Encyclopedia of Physical Science and Technology 2004: 37-59
- 徐光福, 庄明, 张启勇, 等. EAST 氦制冷系统中喷油螺杆压缩机性能分析研究 [C]. 第九届全国低温工程大会论文集, 2009: 280-285