

EAST 装置 2 kW/4.5 K 氦制冷机透平膨胀机的测试

付 豹 白红宇 朱 平

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘 要: EAST 装置于 2006 年成功进行工程调试和物理实验, 全部超导磁体均已冷却到液氦温度, 并获得了第一次等离子体。低温系统共有 4 台氦制透平膨胀机, 通过气体绝热膨胀来获得低温。实验表明 4 台透平的设计满足 EAST 装置对冷量的需求, 透平效率略低于设计值, 流量比设计值大。介绍了 EAST 低温系统中 4 台透平膨胀机的设计参数、启动过程和运行, 并对透平膨胀机在运行过程中的性能参数进行测试和分析。

关键词: 透平膨胀机 氦制冷机 低温系统 EAST 超导托卡马克

中图分类号: TB653 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6516(2007)01-0032-06

Testing for turbines of EAST 2 kW/4.5 K helium refrigerator plant

Fu Bao Bai Hongyu Zhu Ping

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, He Fei 230031, China)

Abstract: EAST (Experimental Advanced Super-conducting Tokamak) is an experimental device for controlling nuclear fusion. In 2006, the engineering commissioning of EAST has already been done successfully. All of the superconducting magnets have been cooled down to LHe temperature. First plasma has been obtained in the campaign of plasma physics experiments. In the helium refrigerator, there are 4 turbines, which is used to get the low temperature by isentropic expanding of helium. The experiment results indicate that the 4 turbines meet the demands of EAST. The efficiency is little lower, but the flowrate is higher. The parameters of the turbines are described. The test results in the first cool down of EAST and the analyses of the performances of the 4 turbines are also presented.

Key words: turbine expander; helium refrigerator; cryogenic system; EAST; superconducting Tokamak

1 引 言

EAST 核聚变实验装置是一个具有能很好的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并获得第一次等

离子体。磁体中通有电流上万安培的电流, 如此高的电流只有运用超导技术才能避免消耗大量的电能和避免磁体因焦耳热而损坏, 因此 EAST 装置中的纵场和极向场均采用 NbTi 超导材料制造的超导磁体。为维持磁体的超导状态, 保证实验装置的正常运行, 建造了 1 个 2kW /4.5 K 的低温系统^[1~3]。低温系统共

收稿日期: 2006-12-18; 修订日期: 2006-12-29

基金项目: EAST 国家大科学工程项目。

作者简介: 付 豹, 男, 26 岁, 硕士研究生。

有 4 台氦透平膨胀机,其中 1 台透平膨胀机(透平 A)是冷却 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。

EAST 氦制冷机的设计制冷量 $1\ 050\ \text{W}/3.5\ \text{K} + 200\ \text{W}/4.5\ \text{K} + 13\ \text{g/s}\ \text{LHe} + (13 \sim 25)\ \text{kW}/80\ \text{K}$,当量制冷量约 $2\ \text{kW}/4\ \text{K}^{[1-3]}$ 。制冷循环采用为液氮预冷、多级膨胀的氦气制冷循环。氦制冷机提供制冷量和液氮,来冷却超导磁体、超导传输线、电流引线和冷屏。在 EAST 装置中,超导纵场(TF)和极向场(PF)线圈超导磁体均采用大流量迫流冷却的 CICC(Cable In Conduit Conductor)导体,迫流冷却的介质为 3.8 K 的超临界氦。纵场导体与极向场导体的结构及制造工艺过程基本相同。超导传输线也全部采用 CIC 导体制造,工作温度为 4.5 K,也采用超临界氦迫流冷却。常规 Cu 电流引线则采用液氮自蒸发冷却。

EAST 氦制冷系统主要由压缩机、水冷却器、油过滤系统、吸附器、换热器、透平膨胀机、各种传输连接管道、阀门以及各种测量控制系统等组成。氦制冷机的所有的低温部件均放入真空容器中集成在一起构成冷箱,采用多层真空绝热。冷箱中包含低温换热器、透平膨胀机、低温吸附器、过滤器及低温管道、阀门等。EAST 低温系统有 1 个冷箱、1 个制冷机阀箱和 1 个分配阀箱。

图 1 为 EAST 低温系统的流程简图^[3]。3 台高压压缩机其出口的高压氦气经过净化干燥处理后,进入冷箱。一部分来自冷箱的高压氦气经热交换器 EX1 换热、液氮预冷和热交换器 EX2 换热后分两路:一路进透平膨胀机 B 进行膨胀降温,膨胀后的气体进一步被换热器 EX4 冷却进一步降低透平 C 的进口温度,冷却后的气体进入透平 C 膨胀降温最后回到低压回路;回气用来冷却换热器 EX5、EX4、EX3、EX2 和 EX1,最后回到气柜。另一路高压 He 流经热交换器 EX3、EX4、EX5、EX6 冷却后进入透平 D 膨胀降温。透平 D 膨胀后的气体再经过节流生产液氦或直接去冷却极向场超导磁体。另一部分来自冷箱的高压氦气经换热器 EX8 冷却和液氮预冷再进入透平 A 膨胀降温,降温后的氦气去冷却 EAST 装置的热辐射屏。

2 透平膨胀机的流程图、结构及主要设计参数

2.1 透平膨胀机的流程图、结构及气体流动介绍

EAST 的 4 台氦透平膨胀机是带有半开式工作轮的单级向心径-轴流反动式透平膨胀机。由膨胀机的

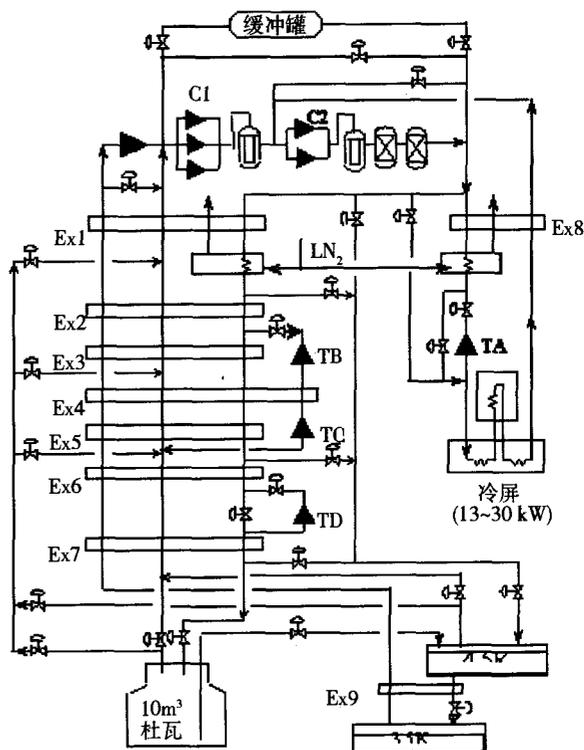


图 1 氦制冷机流程图

Fig. 1 Flow chart of helium refrigeration plant

通流部分、制动器部分和机体部分所组成。膨胀机通流部分是获得低温的主要部件,氦气从管道进入膨胀机的蜗壳,蜗壳把气流均匀地分配给喷嘴,气流在喷嘴中进行第一次膨胀增速、降温,膨胀降温过程中的比焓降转换成气流的动能,高速气流冲击工作轮,推动工作轮转动对外做功。高速气流在推动工作轮做功,同时气流也在工作轮中继续膨胀增速、降温最后都转换成外功输出。膨胀后的低温氦气经过扩压器排出到低温管道中^[4]。透平的制动轮采用油制动,制动过程的摩擦热被循环的油吸收带走,油被冷却再重新循环利用。透平膨胀机的冷端采用固有孔节流的静压气体轴承,热端采用喷嘴节流径向油轴承和止推油轴承。气体轴承为单排 8 个小孔径向进气。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。图 2 为透平膨胀机的结构图。

2.2 氦透平膨胀机的设计参数

透平膨胀机的设计参数和结构参数如表 1、2 所示。

2.3 氦透平膨胀机供油、供气及油泵的流程图

图 3 示出 1 台透平的气路和油路图。

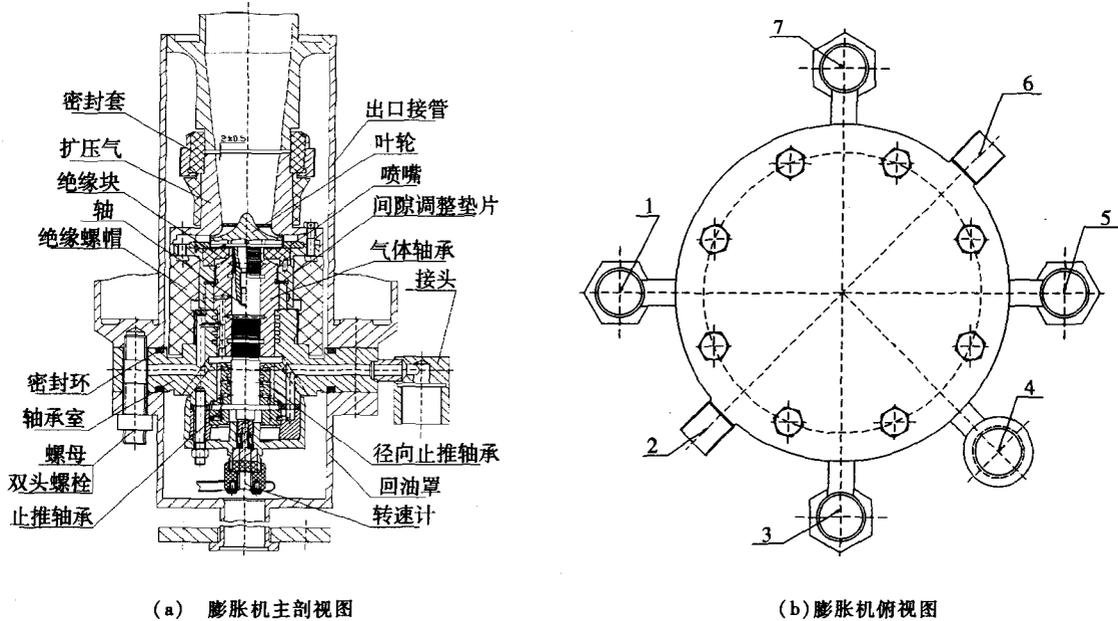


图2 膨胀机结构示意图

- 1. 热密封供气; 2, 6. 热密封、气体轴承气等回气; 3. 止推轴承供油;
- 4. 转速测量引线; 5. 径向轴承供油; 7. 气体轴承气供气。

Fig.2 Structural schematics of turbine expander

表1 透平A、B、C、D的一些设计参数

Table 1 Some design parameters of turbines A, B, C, D

参数	A	B	C	D
p_0 ——喷嘴进口压力/($\times 10^5$ Pa)	19/19.4	19/19.4	6.85/7.0	18.5/18.9
p_2 ——叶轮出口压力/($\times 10^5$ Pa)	5.3/5.4	7.0/7.1	1.18/1.2	4.2/4.2
T_0 ——喷嘴进口温度/K	80	49.2	22.2	8.9
p_1 ——叶轮进口压力/($\times 10^5$ Pa)	9.92/10.1	1.128/11.5	2.92/3.0	9.68/9.9
T_1 ——叶轮进口温度/K	66.9	42.39	17.45	7.86
T_2 ——叶轮出口温度/K	56.49	36.92	13.38	6.34
η_s ——效率	0.74	0.76	0.77	0.65
θ ——反动度	0.425	0.425	0.425	0.425
$X_s = \mu l / Cs$ -特性比	0.58	0.64	0.65	0.67
n ——转速/($\times 10^3$ r/m)	184	181.3	104.7	142
G ——流量/(kg/s)	0.11	0.1	0.1	0.11
φ ——喷嘴中的速度系数	0.85	0.86	0.85	0.78
ψ ——叶轮中的速度系数	0.7	0.7	0.7	0.58
N ——耗功率/kW	13.8	6.58	4.4	0.99

注:其中A,B,C,D中的“/”前的压力是第1次的设计参数,“/”后的压力是第2次的设计参数。

在轴承气、轴承油、热密封气等都供好以后,高压氦气经过自动控制阀门V0,再经过过滤器F0进入透平膨胀机进行膨胀降温。 20×10^5 Pa 常温高压氦气经过阀门V3给气体轴承、经过阀门V4给热密封供气,两者的回气经过阀门V5回到低压。油储罐中的油被油泵加压(最高为 30×10^5 Pa),经水冷却器冷却之后,再经过过滤器F5、F6后,在由阀门V1、V2分别给给止推油轴承和径向油轴承供油。稳压阀门Voil-1用来调节油泵出口的压力,一般为 25×10^5 Pa。止推油轴承和径向油轴承的回油经过阀门V11回到

储油罐中再循环利用。回到储油罐中的氦气经过冷却由阀门V6回到低压。

3 透平膨胀机的调试

3.1 氦透平膨胀机的运行条件

透平膨胀机是高精度、比较容易损坏的设备。为保障透平膨胀机的安全稳定运行,透平膨胀机的启动和运行时的轴承气、轴承油和热密封压力等必须满足一定的条件。表3给出了透平在运行前的一些限制条件。表4给出了透平正常运行时的一些主要参数值。

表 2 透平膨胀机的结构参数

Table 2 Structure parameters of turbines A, B, C, D

参数	A	B	C	D
α ——喷嘴进气角度/ $^\circ$	8	8	8	8
D_1 ——工作轮外直径/mm	35	28	40.14	15
D_{21} ——工作轮出口外径/mm	20.6	17.53	26.89	10.95
叶片个数(全叶片+小叶片)	7+7	9+9	7+7	7+7
N_0 ——喷嘴个数	6	8	8	6
$L_{H,a}$ ——喷嘴高度/mm	2.74	2.39	3.22	1.79
$a_{H,a}$ ——喉部尺寸/mm	2.5	1.54	2.18	
$S_{H,a}$ ——喷嘴进气面积/ mm^2	41.8	29.5	56.2	11.96
D_{shaft} ——轴的直径/mm	14	12	14	8
D_{brake} ——制动轮直径/mm	31	27	31	16
工作轮-壳体径向的间隙/mm	0.08~0.12	0.08~0.12	0.08~0.12	0.05~0.08
工作轮叶片-壳体轴向的间隙/mm	0.12~0.18	0.12~0.18	0.12~0.18	0.09~0.12
轴迷宫密封处-轴套之间的径向的间隙/mm	0.055~0.06	0.055~0.06	0.055~0.06	0.032~0.036
轴-轴承径向间隙/mm	0.042~0.045	0.045~0.048	0.042~0.045	0.032~0.036
轴-止推轴承轴向间隙/mm	0.08~0.11	0.08~0.11	0.08~0.11	0.06~0.08
轴-转速计之间的轴向间隙/mm	0.8~1.5	0.8~1.5	0.8~1.5	0.8~1.5

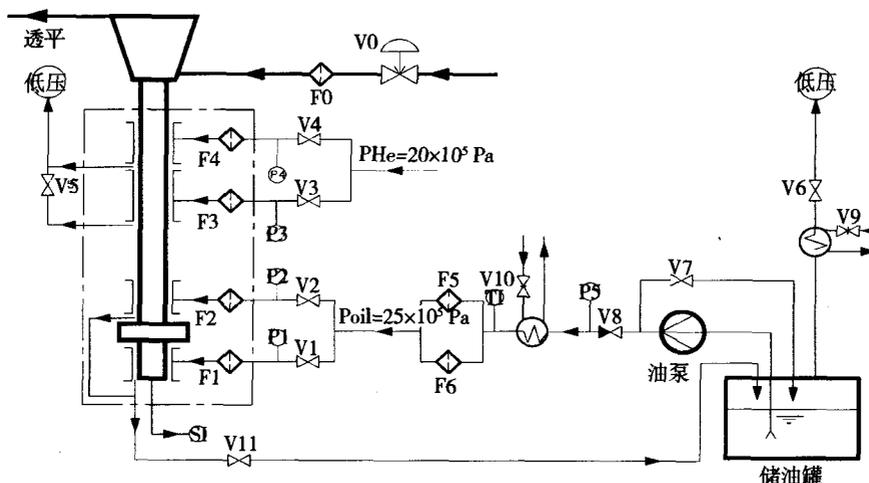


图 3 透平膨胀机自身的供油供气流程图

Fig. 3 Oil and gas flow chart of turbine

表 3 透平膨胀机运行的限制条件

Table 3 Running restrict conditions of turbines

名称	A	B	C	D
气体轴承气压/MPa	>1.6	>1.6	>1.6	>1.6
热密封气压/MPa	>0.8	>0.8	>0.2	<0.4
止推轴承油压/MPa	>1.2	>1.2	>1.0	>0.8
径向轴承油压/MPa	>1.5	>1.5	>1.5	>1.5
转速/($\times 10^3 \text{ r/m}$)	<195	<200	<195	<210
透平膨胀机前氮气压力/MPa	<2.2	<2.2	<0.9	<2.2
透平膨胀机油温/K	$283 < T < 323$			

透平运行的自动主要保护包括:

(1) 当轴承气压和油压过低都会引起轴承的支

撑能力下降,严重的会导致轴与轴承抱死,所以轴承气压和油压都有保护,当轴承气压和油压低于某个值

表4 透平膨胀机的运行参数

Tab.4 Running parameters of turbines

名称	A	B	C	D
进气压力/ $\times 10^5$ Pa	18.7	19.53	7.01	18.57
进气温度/K	78.6	44.95	24.88	10.18
排气温度/K	58.6	34.06	16.03	6.29
转速/krpm	160	161.5	110	14.2
气体轴承气压/ $\times 10^5$ Pa	18.8	19.1	18.5	18.7
径向轴承油压/ $\times 10^5$ Pa	23.1	21.1	23.0	23.0
止推轴承油压/ $\times 10^5$ Pa	23.0	19.5	23.0	22.8
热密封气压/ $\times 10^5$ Pa	10.2	10.4	8.0	8.3
透平膨胀机油温/ $^{\circ}\text{C}$	82	61	61	/

之后就会被保护,即进气阀关闭;

(2) 转速过高会引起飞车,所以转速也有保护,每个透平都有一个转速上限值。当超过上限时,开始报警,超过上上限时,进气阀关闭。

3.2 氦透平膨胀机的启动运行

透平膨胀机启动时,要求透平真空保温腔抽空到压力低于 1×10^{-2} Pa。把回油、回气阀打开后,起动车压缩机;一定先给气体轴承供气,然后才可以起动车油泵给止推轴承和径向油轴承供油。另外将热密封气压力提高,保证轴承气回气管不结霜。打开透平的排气阀和透平前的气动截止阀,缓慢开启氦进气调节阀来启动透平膨胀机。维持轴承进口油的温度在: $15^{\circ}\text{C} \sim 37^{\circ}\text{C}$,回油温度不高于 90°C 。轴承及热密封回气管接霜时,需要增加热密封氦气压力。热密封氦气压力一般比进、出口压力的平均值高一些。可以调节止推轴承前的油压来调节转速,获得最佳的效率。透平膨胀机的制冷量是可以调节的,调节方式主要是:调节进气阀门来调整进口压力,从而改变流量和膨胀比;调整制动油压来调节转速,改变透平的效率,从而调节制冷量的大小。值得注意的是当透平膨胀机的进口压力偏离设计压力时,转速、效率都明显偏低,出口温度偏高。所以透平膨胀机应尽可能的在设计的进口参数下运行。

透平膨胀机在设计转速下运行状况良好,保障了EAST托卡马克装置的实验运行。但在启动过程中发生过几次轴与轴承抱死现象。

3.3 启动过程的实验曲线

透平A、B、C、D启动过程如图4、图5、图6、图7所示。图中曲线分别是:进气阀前的压力、透平进气压力、透平排气压力、透平进气温度、透平排气温度、流量、转速和进气阀门的开度。

透平A、B、D调节阀前的压力,即压缩机排气压

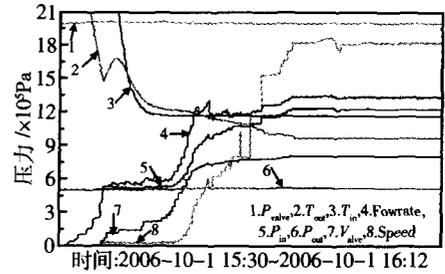


图4 透平膨胀机A的启动过程的实验曲线
Fig.4 Start-up of turbine A

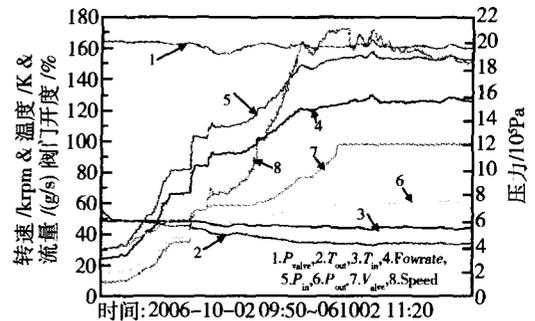


图5 透平膨胀机B的启动过程的实验曲线
Fig.5 Start-up of turbine B

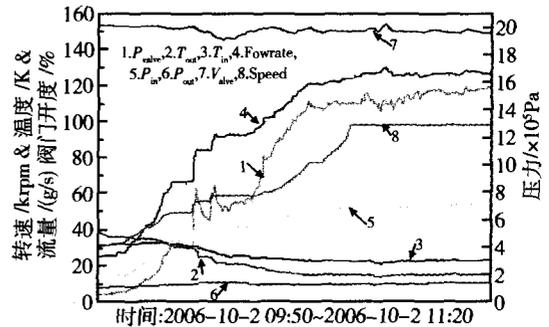


图6 透平膨胀机C的启动过程的实验曲线
Fig.6 Start-up of turbine C

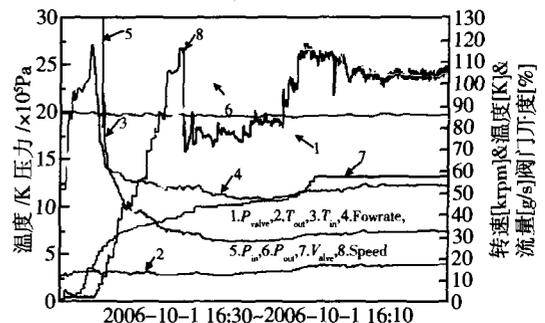


图7 透平膨胀机D的启动过程的实验曲线
Fig.7 Start-up of turbine D

力维持在 20×10^5 Pa。透平 C 串联在透平 B 之后,因此透平 B、C 是同时起动的,而且透平 C 的进气压力理论上就是透平 B 的排气压力。但由于阻力损失,透平 C 的进气压力比透平 B 的排气压力要低。透平 D 的排气压力一般控制在高于氮的临界压力,这样透平 D 不会出现带液膨胀。在启动透平 B、C 之前,制冷机已降温到接近 80 K。在透平 B 和透平 C 运转正常后,再开始启动透平 D。透平 A 的启动顺序与其它透平没有关系。

3.4 透平运行的故障分析、维修以及对使用后的透平进行清洗、修复和重新组装工作

3.4.1 运行故障的分析、透平膨胀机的修理以及问题的解决

每次故障(这里的故障是指由于半速涡动等某些原因导致透平膨胀机瞬间停机,轴与轴承烧蚀卡死或者抱死的毁灭性的现象)都是发生在透平启动过程的前半段即转速在 50×10^3 r/m \sim 100×10^3 r/m 之间;在启动过程中透平膨胀机的卡死或者抱死都是发生在轴和气体轴承出气孔对应处,大部分都是轴的烧蚀划痕相对严重,有时也会导致气体轴承的严重烧蚀而把节流气孔完全堵塞,油轴承和轴的接触部分也有轻微摩擦,其他零部件没有损伤。因为每次轴的烧蚀划痕都很严重,影响了转子的动平衡性能,所以不可能仅仅在车床上用金相砂纸打磨光滑就可以继续使用;由于目前没有检测动平衡的仪器,所以每次遇到这样的问题都是返回莫斯科修理,然后再返回来,这个周期非常长。在有了动平衡仪之后在叶轮没有损坏的情况下,这个问题自己完全可以解决,整个维修周期将大大缩短。

故障引起的原因可能是:

(1) 转子和叶轮都存在一阶、二阶临界转速,一般透平膨胀机的额定转速都低于其本身的二阶临界转速,当额定转速高于一阶临界转速时,在启动过程中实际转速接近一阶临界转速时就会产生共振可能导致轴与轴承抱死现象。当转速接近一阶临界转速时应该迅速加大进口压力使转速快速跳过一个阶临界转速。

(2) 透平在启动过程中还存在半速涡动问题,这也是可能导致轴与轴承抱死的原因之一,所以在设计时,应该选取合适的结构参数使转子的一阶临界转速的 2 倍大于转子的工作转速以防止转子的半速涡动。

2.4.2 俄罗斯专家对使用后的透平进行清洗、修复和重新组装

由于透平膨胀机采用了油制动和径向-止推油轴

承,为了避免拆下的透平由于放置不当使得油轴承中残留的油倒流入气体轴承部分,或者透平膨胀机长时间不用,油被氧化而污染腐蚀透平膨胀机等一些不利因素,所以有必要在每次实验之后把拆下来的透平膨胀机清洗干净,重新新装配好充入氮气密封保存以备下次使用。透平膨胀机首先从装置上拆下,与装配相反的顺序把透平膨胀机拆开,全部零部件都放入干净的汽油中浸泡一段时间,逐个清洗干净拿出来晾干准备重新装配。清洗时主要清洗轴、轴承和轴承的进出气孔、进出油孔、热密封出气孔和两个回气孔,并保证所有气孔全畅通并且轴承的进出气孔、进出油孔所喷汽油油柱一样。若轴有轻微的划痕不影响轴的动平衡性能则只需在车床上用金相砂纸打磨光滑即可;若划痕过大,影响轴的动平衡性能,打磨之后需做动平衡实验,严重的需换轴。装配工序很简单,主要是通过调整几个垫片厚度来严格保证好表 3 中所给出的每个间隙,这个间隙必须严格保证,间隙大小都将影响效率等性能。各个间隙保证之后,还需做氮气悬浮实验,保证转子和叶轮整体可以自由旋转。装配好之后,每个进气、进油孔用螺钉封上,叶轮往上放入保护套内,然后放入专门的盒子中充入氮气放置起来以备下次用。

4 透平膨胀机 A、B、C、D 的实际效率与制冷量计算

根据透平的运行参数,利用 Hepak 查询氮的物性,可以计算出透平的效率和制冷量。计算结果如表 5 所示。这些参数都是根据运行的记录选取的典型数据。结果表明除了透平 A 的效率偏低外,其它透平效率均接近设计值。但因流量比原设计值偏大,因此总的制冷量偏大。

表 5 透平膨胀机 A、B、C、D 的效率与制冷量计算结果

透平名称	A	B	C	D
进口温度 T_{in}/K	78.6	44.95	24.88	10.18
进口压力 $p_{in}/\times 10^5$ Pa	18.7	19.53	7.01	18.57
出口压力 $p_{out}/\times 10^5$ Pa	5.1	7.46	1.34	3.36
出口温度 T_{out}/K	58.6	34.06	16.03	6.29
转速 $n/(\times 10^3$ r/m)	120	171	110	107
进口焓值 $h_1/(kJ/kg)$	423.4	250.3	142.4	46.22
流量/(g/s)	130	123.6	123.6	136.7
出口焓值 $h_2/(kJ/kg)$	319.6	191.6	97.42	33.77
进口焓值/(kJ/kg/K)	42.49	15.51	14.53	6.574
等焓焓值 $h_3/(kJ/kg)$	258.1	173.1	80.12	27.95
效率 $= (h_1 - h_2)/(h_1 - h_3)/\%$	62.8	76.03	72.22	68.14
制冷量 $W = q_m \times (h_1 - h_2)/kW$	13.494	7.255	5.56	1.61

(下转第 49 页)

实验数据还没有文献报道。根据 Clapeyron 方程,可得汽化潜热的计算公式:

$$\Delta h_v h'' - h' = \left(\frac{dp_s}{dT}\right) T(v'' - v') \quad (5)$$

式中: p_s 为饱和蒸气压; Δh_v 为饱和蒸发焓即汽化潜热; h'' 和 h' 分别为饱和和气液状态的焓; v'' 和 v' 分别是饱和和气液状态的比体积。

根据式(5),用 HFC-161 的饱和蒸气压方程和饱和和气液密度的关联式可计算出 HFC-161 的饱和蒸发焓。作者将计算数据拟合成如下的饱和蒸发焓关联

式:

$$\Delta h_v / RT_c = b_0 \tau^\beta + b_1 \tau^{\beta+\Delta_1} + b_2 \tau^{1-\alpha+\beta} + \sum_{i=1}^3 a_i \tau^i \quad (6)$$

式中: $\tau = 1 - T/T_c$, $\alpha = 0.1085$, $\beta = 0.325$ 为临界指数, $\Delta_1 = 0.50$ 为 Wagner 展开式的一阶渐进标准修正指数, b_0, b_1, b_2, a_1, a_2 和 a_3 为由拟合确定的常数,各系数的值列于表 4 中。关联式(6)的适用范围为 240.15 K ~ T_c 。

表 4 饱和蒸发焓关联式的各系数

Table 4 Coefficients of enthalpy vaporization correlation

b_0	b_1	b_2	a_1	a_2	a_3
9.569 651e-3	-0.202 977	-0.585 359	0.620 324	0.362 1	-0.342 983

6 结论和展望

HFC-161 的热力性质研究是近几年国际上热物性研究关注的热点之一,目前已有多个实验数据发表,继续完善 HFC-161 的高精度状态方程是下一步的重要任务。由于 HFC-161 主要是作为混合制冷剂中的组元,含 HFC-161 的混合工质的热物性研究必将成为未来几年国际上的研究热点之一。

参 考 文 献

- 1 宣永梅. 新型替代制冷剂的理论与实验研究:[博士学位论文]. 杭州:浙江大学, 2004

- 2 Booth H S, Swinehart C F. Critical constants and vapor pressure of some gaseous fluorides of group IV. J. Am. Chem. Soc., 1935, 57: 1337 ~ 1342
- 3 Yaws Carl L. Chemical Properties Handbook. McGraw Hill, 1999
- 4 Chen Q, Hong R H, Chen G M. Gaseous PVT properties of ethyl fluoride. Fluid Phase Equilibria, 2005, 237 (1-2): 111 ~ 116
- 5 Chen Q, Hong R H, Chen G M. Vapor pressure measurements of ethyl fluoride. Journal of Chemical and Engineering Data, 2005, 50 (5): 1586 ~ 1588
- 6 Grosse A V, Wackher R C, Linn C B. Physical properties of the alkyl fluorides and a comparison of the alkyl fluorides with the other alkyl halides and with the alkyls of the elements of period II. Phys. Chem, 1940, 44: 275 ~ 296

(上接第 37 页)

5 结 论

在透平调试和运行过程中,透平膨胀机的性能表现良好,EAST 的降温过程达到预期的降温目标。4 台透平膨胀机正常运行后的实际流量都大于原来设计的流量(最大的超过 20%)。制冷机运行过程中其制冷量可以通过调节透平膨胀机的制冷量和透平的进口温度来调节。俄罗斯透平的备件与原透平相比,其运行参数也有些差异,因此对系统运行则提出了更高的要求。透平膨胀机在使用过程中发生过气体轴承抱死的现象,说明气体轴承性能并不稳定。今后将

开展透平膨胀机的相关研究,争取在中国解决氦气透平膨胀机的相关技术问题。

参 考 文 献

- 1 白红宇. HT-7U 超导托卡马克氦制冷系统热力学分析及设计研究:[博士学位论文]. 北京:中国科学院研究生院, 2002 年 6 月
- 2 Bai Hongyu, Bi Yanfang, Wang Jinrong, et al. Cryogenic system for the superconducting Tokamak HT-7U, Fusion Science & Technology, 2002, 42(1): 162 ~ 166
- 3 Bai Hongyu et al. Design of 2 kW/4 K helium refrigerator for HT-7U, Conference Proceedings of ICEC19, 2002
- 4 计光华. 透平膨胀机,北京:机械工业出版社, 1989