

超临界氦循环泵在 EAST 中的应用研究

张小伟, 吴克平, 白红宇

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: EAST 超导托卡马克装置的极向场和纵场线圈的超导磁体均采用迫流冷却的 CICC (Cable in Conduit Conductor) 导体, 极向场线圈的冷却介质直接由制冷机节流路来提供, 而纵场线圈和线圈盒由氦循环泵来提供。文中概述了氦循环泵在超导装置中的使用情况, 分析了超导磁体的迫流冷却特性以及 EAST 超导磁体的迫流冷却回路, 揭示了氦循环泵的应用优点。比较两种冷却方式, 得出热效率比较图, 证明了氦循环泵的有效性, 为氦循环泵的使用范围及选型提供了理论依据。

关键词: 超临界氦; 氦循环泵; 迫流冷却; 热效率; 低温系统

Study on the using of supercritical helium circulating pump

Zhang Xiaowei, Wu Keping, Bai Hongyu

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

Abstract: The toroidal field (TF) magnets and poloidal field (PF) magnets of EAST are all made of forced-flow cooled cable in conduit conductor (CICC) with a large of mass flow rate of supercritical helium (SHe). The SHe of PF magnets is directly provided by helium refrigerator through the Joule Thomson valve while that of TF and case magnets is provided by helium circulating pump. This paper summarizes the using of helium circulating pumps in superconducting devices all over the world. The forced flow cooling loops of PF and TF magnets are presented. A thermodynamic study shows some merits for the method of using helium circulating pump compared with that of using J-T stream. It is proved that the pump is reasonable and effective to achieve a large of mass flow rate of SHe for superconducting magnets of EAST.

Keywords: Supercritical helium, Helium circulating pump, Forced-flow cooling, Thermal efficiency, Cryogenic system

1 引言

EAST 是一个具有改善等离子体约束状况的大拉长比非圆截面的等离子体位形的全超导托卡马克实验装置, 其纵场和极向场超导磁体均采用了大流量迫流冷却的 CICC 导体。迫流冷却介质为超临界氦, 常规情况下由制冷机直接提供, 如图 1 所示, 但当迫流冷却的流量要求非常大时, 需采用氦循环泵, 如图 2 所示^[1]。本文主要针对 EAST 超导磁体的实际冷却循环进行理论分析, 以证明氦循环泵的合理性和有效性。

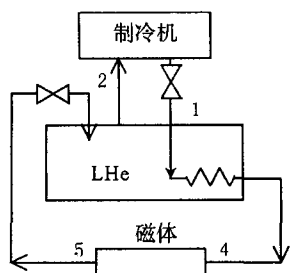


图 1 常规氦冷却方式

Fig. 1 Conventional circulation method

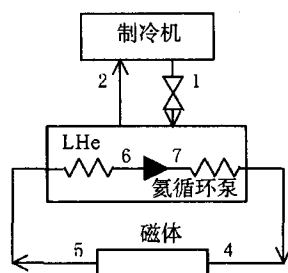


图 2 氦循环泵冷却方式

Fig. 2 Helium pump circulation method

2 氦循环泵的使用概述

泵是把机械能转换成流体的能量用来增压输送流体的通用机械。目前世界上已建成的主要核聚变装置之中, EAST 首次使用了氦循环泵, 共 4 台。其中 2 台用于纵场线圈的迫流冷却, 型号为 BNHeP-27-000, 流量为 240g/s。另外 2 台用于

纵场线圈盒的迫流冷却, 型号为 BNHeP-26-000, 流量为 320g/s^[2]。

法国和日本正在运行的 Tore Supra 和 Triam-1M, 因为超导磁体采用浸泡方式冷却, 所以未使用氦循环

收稿日期: 2006-05-10

作者简介: 张小伟(1980-), 男, 中科院等离子体物理研究所在读硕士生, 主要从事大型氦低温系统的研究

泵。而中国和俄罗斯正在运行的 HT-7 和 T-15, 虽然磁体采用了迫流冷却的方式, 但由于超导磁体所要求的冷却流量并不大, 因此也没有必要使用氦循环泵。目前德国正在建造的 W-7X, 韩国正在建造的 KSTAR, 印度正在建造的 SST-1, 以及由美日欧俄中韩共同建造的 ITER (International Thermal-nuclear Experiment Reactor), 均提出了使用氦循环泵来提供磁体冷却所需的大流量的设计概念。

在非核聚变实验装置的低温供冷系统中, 氦循环泵有一些应用的实例。世界上主要的超导高能加速器装置, 基本上都使用了氦循环泵。如德国汉堡电子同步加速器实验室 (DESY) 的电子-质子对撞机 HERA, 使用了一台 45g/s 的氦循环泵^[3]。瑞士日内瓦的欧洲联合核子研究中心 (CERN) 的质子-质子对撞机 ATLAS-LHC, 使用了 2 台 600g/s 的 HeI 循环泵^[4], 2 台 1.2kg/s 的氦循环泵^[5]。

此外, 当今世界上主要的超导磁体测试装置也都使用了氦循环泵, 如日本原子能研究所 (Japanese Atomic Research Institute, JAERI) 的 ITER Test Facility^[6], 德国卡尔斯鲁厄研究中心 (the Research Center Karlsruhe) 技术物理研究所 (ITP) 的 TOSKA (Toroidale Spulentestanlage Karlsruhe)^[7-9]。

3 超导磁体的迫流冷却特性

超导磁体的进出口的温度即状态 4 和 5 的温度, 由下面两个因素决定: (1) 超导体性能与温度的关系; (2) 超导体运行所需要的温度裕度。虽然它们与热负荷 Q_m 有关, 但并不由 Q_m 决定。

超导磁体的进出口的压力由下列两个因素决定: (1) 超导磁体的出口必须是超临界的; (2) 超导磁体进口的压力由导体的阻力损失和出口状态决定。

冷却介质超临界氦的流量 \dot{m}_m 则根据超导磁体的稳定性要求来决定, 具体的说是: (1) 氦流过冷却通道的持续时间; (2) 所要求的迫流换热系数。氦的流量并不是根据热负荷来设计, 即不是由式 (1) 决定, 虽然它们之间存在这种关系:

$$\dot{m}_m = Q_m / (h_5 - h_4) \quad (1)$$

当所要求的冷却磁体的流量 \dot{m}_m 小于等于节流路的流量 \dot{m}_{JT} 时, 制冷机可直接给磁体供冷而不需要循环泵。而事实上, 根据热负荷正常设计的制冷机的节流路流量往往小于磁体迫流冷却所要求的流量。此时, 一种方法是提高节流路的流量至磁体冷却所需的流量, 若按优化设计的制冷机参数比例放大, 则制冷机的制冷量将大于磁体的热负荷, 制冷机的冷量将过剩, 而过剩的制冷量还需要增加热负荷来平衡。另一种方法是综合考虑磁体和制冷机的设计条件, 采用氦循环泵, 然而引入氦循环泵会增加低温系统的热负荷。

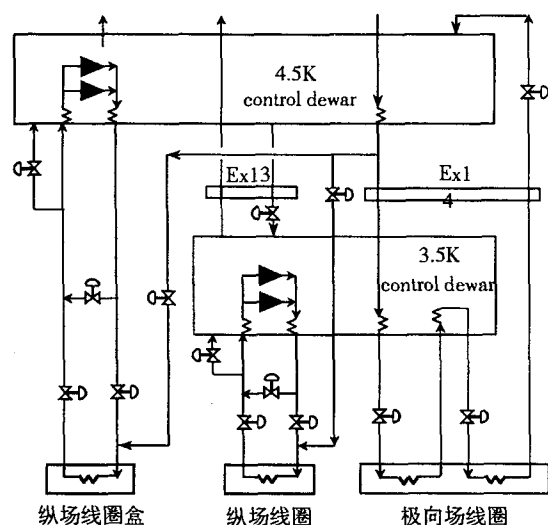


图 3 EAST 供冷系统流程简图

Fig. 3 Cryogenic supply system of the EAST

4 超导磁体的迫流冷却回路

EAST 超导磁体冷却所需的大流量一部分由制冷机节流路来提供, 另一部分则由氦循环泵来提供, 如图 3 所示。极向场线圈采用常规方式冷却, 直接由制冷机节流路的超临界氦迫流冷却, 而纵场线圈和线圈盒分别采用了氦循环泵的闭式循环回路来冷却, 超临界氦分别由 4.5K 液氦槽和 3.5K 过冷槽提供。

从图 3 可以看出, EAST 低温系统引入超临界氦循环泵以后, 纵场线圈和线圈盒的迫流冷却循环与制冷机的制冷循环分离了。与极向场线圈的迫流冷却循环相比, 使用氦循环泵有 3 个方面的优点: (1) 可以促进磁体的冷却循环, 加大冷却介质流量以提高超导磁体的冷却效果, 从而提高超导磁体的稳定性。(2) 可以方便地改变磁体冷却循环的冷却介质流量而不需要改变制冷机的节流路流量, 此调节过程中产生的热扰动会首先被液氦槽或过冷槽吸收, 再慢慢地传送到制冷机。(3) 可以提高超导磁体的入口压力, 保证出口冷

热扰动会首先被液氦槽或过冷槽吸收, 再慢慢地传送到制冷机。(3) 可以提高超导磁体的入口压力, 保证出口冷

却介质氮仍为超临界氮,从而避免超导磁体内冷通道发生两相流。

5 氮循环泵的有效性分析

冷却介质超临界氮直接由制冷机提供的方式称之为常规氮冷却方式,如图 1 所示。使用氮循环泵的方式称之为氮循环泵冷却方式,如图 2 所示。

$$\text{低温系统氮压缩机做的功为: } W_c = (1/\eta) \dot{m}_c RT \ln(p_0/p_i) = (1/\eta) \alpha \dot{m}_{JT} RT \ln(p_0/p_i) \quad (2)$$

式中,假定压缩机的质量流量为 $\dot{m}_c = \alpha \dot{m}_{JT}$, α 为一常数, η 为等温压缩效率, R 为气体常数, T 为压缩机的入口温度, p_0 和 p_i 分别为压缩机的出口和入口压力。

定义优化指数热效率 $FOM = W_c/Q_m^{[10]}$, 即制取 Q_m 的冷量消耗的氮压缩机功, FOM 值越小,热效率越高。

$$FOM = (1/\eta) \alpha RT \ln(p_0/p_i) (\dot{m}_{JT}/Q_m) = K (\dot{m}_{JT}/Q_m) \quad (3)$$

其中, $K = (1/\eta) \alpha RT \ln(p_0/p_i)$

5.1 常规氮冷却方式的热效率

$$\text{制冷量: } Q_R = \dot{m}_{JT} (h_2 - h_5) \quad (4) \quad \text{热负荷: } Q_T = \dot{m}_{JT} (h_1 - h_4) + Q_m \quad (5)$$

根据热平衡 $Q_R = Q_T$, 即 $\dot{m}_{JT} (h_2 - h_5) = \dot{m}_{JT} (h_1 - h_4) + Q_m$ 有 $\dot{m}_{JT} = \frac{\dot{m}_{JT} (h_1 - h_4) + Q_m}{(h_2 - h_5)} = \frac{\dot{m}_{JT} (h_1 - h_4) + Q_m}{(h_2 - h_4) - (h_5 - h_4)}$

$$\text{因为 } Q_m = \dot{m}_{JT} (h_5 - h_4), \text{ 所以推得: } \frac{\dot{m}_{JT}}{Q_m} = \frac{(\dot{m}_{JT}/Q_m)(h_1 - h_4) + 1}{(h_2 - h_4) - (\dot{m}_{JT}/Q_m)^{-1}} \quad (6)$$

$$\text{代入式(2.3)得: } FOM = K \frac{(\dot{m}_{JT}/Q_m)(h_1 - h_4) + 1}{(h_2 - h_4) - (\dot{m}_{JT}/Q_m)^{-1}} = \frac{Ax + K}{B - (1/x)} \quad (7)$$

式中, $A = K(h_1 - h_4)$, $B = (h_2 - h_4)$, $x = \dot{m}_{JT}/Q_m$

5.2 氮循环泵冷却方式的热效率

$$\text{制冷量: } Q_R = \dot{m}_{JT} (h_2 - h_1) \quad (8) \quad \text{热负荷: } Q_T = W_{\text{pump}} + Q_m \quad (9)$$

引入氮循环泵会增加热负荷,假定泵的绝热效率不变,则增加的热负荷的大小与体积流量和压头成正比,即

$$W_{\text{pump}} = \dot{V} \cdot \Delta P / \eta_p = \dot{m}_m \cdot \Delta P / \eta_p \rho \quad (10)$$

其中, ΔP 为泵压头, η_p 为泵的绝热效率, ρ 为泵送介质氮的入口密度。

$$\text{因此, } Q_T = W_{\text{pump}} + Q_m = \frac{1}{\eta_p} \frac{\dot{m}_m \Delta P}{\rho} + Q_m \quad (11)$$

$$\text{同理,根据热平衡保持 } Q_R = Q_T \text{ 有 } \dot{m}_{JT} (h_2 - h_1) = \frac{1}{\eta_p} \frac{\dot{m}_m \Delta P}{\rho} + Q_m, \quad \dot{m}_{JT} = \frac{1}{h_2 - h_1} \left(\frac{1}{\eta_p} \frac{\dot{m}_m \Delta P}{\rho} + Q_m \right) \quad (12)$$

$$\text{代入式(2.3)得 } FOM = \frac{K}{h_2 - h_1} \left(\frac{1}{\eta_p} \frac{\Delta P}{\rho} \left(\frac{\dot{m}_m}{Q_m} \right) + 1 \right) = Cx + D \quad (13)$$

$$\text{式中, } C = \frac{K}{h_2 - h_1} \frac{1}{\eta_p} \frac{\Delta P}{\rho}, \quad D = \frac{K}{h_2 - h_1}, \quad x = \left(\frac{\dot{m}_m}{Q_m} \right)$$

从上述的计算可以看出,在两种方式中, FOM 为 x 的函数,常规氮冷却方式的函数曲线为抛物型,而氮循环泵冷却方式的函数曲线为线性型。因此,两种方式的热效率都可以用 FOM 函数来估算。

5.3 热效率比较图

EAST 低温系统使用螺杆压缩机的效率 $\eta = 0.5$, $T = 300\text{K}$, $p_i = 0.12\text{MPa}$, $p_o = 2.0\text{MPa}$, 根据实际氮制冷机数据取 $\alpha = 1.91$, 液氮槽饱和压力为 0.125MPa , 取 $T_1 = 5\text{K}$, 且保证磁体出口的氮为超临界氮。

(1) 若氮循环泵的压头 $\Delta P = 0.2\text{MPa}$, 则根据式(7)和(13)估算的结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,当 \dot{m}_m/Q_m 小于 0.2 g/s/W 时,只要氮循环泵的绝热效率大于 40% , 则氮循环泵冷却方式比常规氮冷却方式更有效。当 \dot{m}_m/Q_m 小于 0.3 g/s/W 时,只要氮循环泵的绝热效率大于 60% , 则氮循环泵冷却方式比常规氮冷却方式更有效。当氮循环泵的绝热效率大于 80% , 无论 \dot{m}_m/Q_m 为何值时,采用循环泵来提供大流量总是更有效。而且氮循环泵的绝热效率越高,冷却效果越好。

(2) 若氮循环泵的压头 $\Delta P = 0.15\text{MPa}$, 则根据式(7)和(13)估算的结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,当 \dot{m}_m/Q_m 小于 0.26 g/s/W 时,只要氦循环泵的绝热效率大于 40%,则氦循环泵冷却方式比常规氦冷却方式更有效。当 \dot{m}_m/Q_m 小于 0.4 g/s/W 时,只要氦循环泵的绝热效率大于 50%,则氦循环泵冷却方式比常规氦冷却方式更有效。当氦循环泵的绝热效率大于 60%,无论 \dot{m}_m/Q_m 为何值时,采用循环泵来提供大流量总是更有效。同样,氦循环泵的绝热效率越高,冷却效果越好。

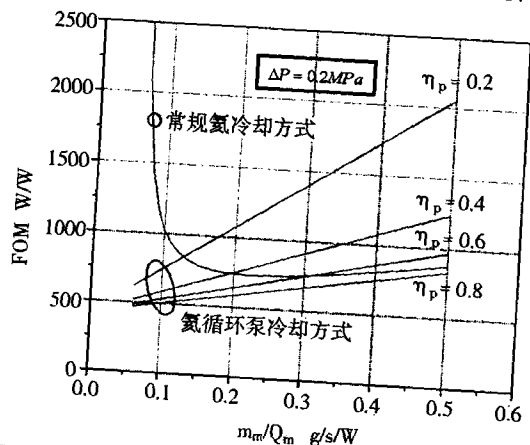


图 4 两种冷却方式的热效率比较图($\Delta P=0.2MPa$)

Fig. 4 Thermal efficiency comparison of two methods when $\Delta P=0.2MPa$

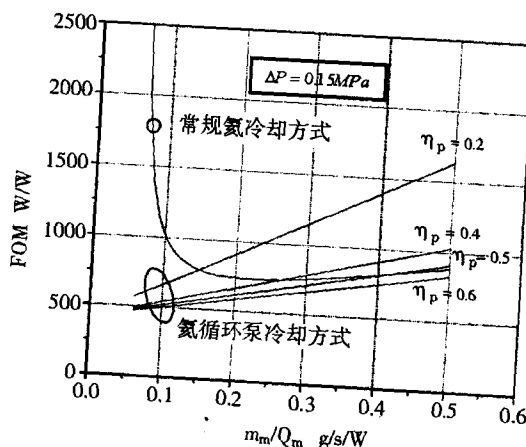


图 5 两种冷却方式的热效率比较图($\Delta P=0.15MPa$)

Fig. 5 Thermal efficiency comparison of two methods when $\Delta P=0.15MPa$

EAST 纵场线圈的热负荷大约 1kW,所需要的冷却介质流量为 240g/s,压降小于 0.15MPa,因此只要选取绝热效率高于 40%的超临界氦循环泵,磁体的冷却效果将会优于常规氦方式的迫流冷却。

6 结论

(1)引入氦循环泵可以分离制冷机的制冷循环与磁体的冷却循环。(2)使用氦循环泵可以方便快捷的提高超导磁体冷却循环流量以及磁体的入口压力,从而提高磁体的冷却效果。(3)得到了具有参考价值的常规氦冷却方式和氦循环泵冷却方式的热效率比较图。为类似于 EAST 磁体冷却装置的氦循环泵的选用提供理论依据。(4)证明了氦循环泵的合理性和有效性,如 EAST 纵场线圈,只要选用绝热效率高于 40%的超临界氦循环泵,磁体的冷却效果将会优于常规氦方式的迫流冷却。

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,2002.06:95-97.
- 2 张小伟,白红宇. 部分流超临界氦循环泵的特性分析. 低温工程,2005,(4).
- 3 DESY Supercritical helium circulator BNHeP-19B-000 Installation, Operating, and Maintenance Manual. Barber-Nichols Inc. 2001.
- 4 Mayri C, Berthier R, et al. Test of high mass flow rate pump in He I. ICEC18,2000.
- 5 Pengo R, et al. Test results of a 1.2 kg/s centrifugal liquid helium pump for the ATLAS superconducting Toroid, ICEC18,2000.
- 6 Makoto Sugimoto, Takashi Kato, et al. Flow reduction by AC losses for a forced flow superconducting coil with a cable-in-conduit conductor. Cryogenics,1999.
- 7 Goldacker W, Heller R, et al. Development of superconducting and cryogenic technology in the Institute for Technical Physics (ITP) of the Research Center Karlsruhe. Cryogenics,2002.
- 8 Darweschad M, Fink S, et al. Test of the EURATOM LCT coil (NbTi conductor) with forced flow He II cooling. Cryogenics, 2002
- 9 Komarek P, Salpietro E. The test facility for the ITER TF model coil. Fusion Engineering and Design,1998.
- 10 Kato T, et al. Study of supercritical helium circulation pump for a forced-flow cooled magnet using CICC. Advances in Cryogenics Engineering, 1998,43:705-712.