

氦制冷机的效率

白红宇 毕延芳

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 随着超导技术发展和广泛应用,它对低温系统的容量要求也越来越庞大。对于大型超导磁体系统的氦制冷系统,其效率直接影响大型超导装置的运行费用。论述了影响氦制冷机效率的各种因素,并指出了提高制冷机效率的各种基本途径。

主题词 氦制冷机 效率 超导磁体

1 引言

随着超导技术的发展,超导磁体在科研和工业中的应用越来越广泛,如核聚变工程、高能粒子加速器、超导磁体储能系统、磁流体(MHD)、强磁场研究、化学(Nuclear Magnetic resonance spectroscopy)、医学(MRI)、超导运输系统(磁悬浮列车)等方面,特别是在核聚变工程方面越来越重要。现在世界上所有在建的较大的磁约束装置,如德国的 W-7X,韩国的 KSTAR,印度的 SST-1,我国的 HT-7U 以及由欧、美、日、俄四方共建的正在设计中的 ITER 等无一不采用超导磁体技术,这是因为超导磁体相对于常规磁体能大大节约电能,建造大型超导磁约束装置已被认为是可控核聚变走向成功的必由之路。

大型超导磁体的超导材料主要采用 NbTi 和 Nb₃Sn。NbTi 的临界温度为 9.2 K, Nb₃Sn 的临界温度为 18 K。要使超导体工作于超导态,超导体的温度必须在其临界温度以下。如此低的温度只能用氦作为制冷剂来制冷。图 1 为超导磁体的冷却简图。氦制冷机在此的功能即是给超导磁体降温和在正常运行期间有效地维持超导磁体的工作温度。

2 提高氦制冷机效率的重要性

我们以中科院等离子体物理研究所正在建造的超导托卡马克装置 HT-7U 为例来分析。HT-7U 装置的制冷机在 4.4 K 下的当量制冷量为 2 kW。若采用理想的卡诺制冷循环,其制冷系数为^[1]

$$\epsilon = \frac{T_c}{T_h - T_c} = \frac{4.4}{300 - 4.4} = 0.014885$$

其中 T_c 为制冷的温度, T_h 为环境温度。这就是说每消耗 1 W 的电能仅能制取 0.014 885

本文于 2001 年 3 月 15 日收到。白红宇,男,29 岁,博士生。

的冷量 (或每制取 1 W/4.4 K 的冷量要消耗 67.2 W 的电能)。若要制取 2 kW 的冷量, 电力的消耗为 134.4 kW。事实上, 理想卡诺循环的制冷系数是达不到的。对世界上已制造出的 2 kW/4.4 K 的氦制冷机, 其平均有效能效率一般为 20%, 即其制冷系数只有理想卡诺循环的 20%。这样每制取 1 W/4.4 K 的冷量要消耗 336 W 的电能, 即制冷量与电能消耗的比为 1:336。大型超导磁体的降温时间一般为一到两个星期, 正常运行时间则每年一般有 6 个月以上。由表 1 可知, 当有效能效率从 20% 提高到 30% 时, 能大大地节约电能消耗。由于超导磁体的运行费用主要取决于低温系统的能量消耗, 因而提高制冷机的效率对于降低超导磁体的运行费用极为关键。

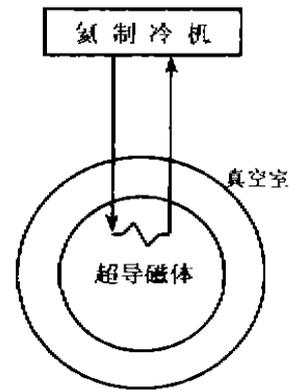


表 1

情 况	I	II
有效能效率	20%	30%
制 冷 量	2 000 W	2 000 W
每年运行时间	6 个月	6 个月
每年电能消耗	2.9×10^6 度	1.93×10^6 度

图 1

表 2 为世界上其它一些实验室的制冷系统。除法国 TORE SUPRA 外, 其它装置的容量比 HT-7U 低温系统的容量大得多。随着实验要求的提高, 将来的低温系统会越来越庞大, 因而提高低温系统的效率就显得更加重要。

表 2

装置及其所在国家	制冷机/液化器容量
法国 TORE SUPRA	300 W/1.75 K + 745 W/4.5 K + 5.6 g/s LHe + 11 kW/80 K
日本国家聚变科学研究所 LHD	5.65 kW/4.4 K + 650 L/h LHe + 20.6 kW/80 K
俄罗斯 Kurchatov 研究所 T-15	2.7 kW/4.4 K 或 800 L/h LHe + 60 kW - 150 kW/80 K
日本 JAERI ITER CSMC 测试的装置	5 kW/4.5 K 或 920 L/h
美国 BNL 的 RHIC (3.86 km 圆周)	25 kW/3.8 K
CERN 的 LHD (24 km 圆周)	8 个 18 kW/4.4 K 的低温车间
美国 Fermi 实验室	5 000 L/h

3 影响氦制冷机效率的因素

氦制冷机主要由压缩机、水冷却器、油过滤系统、吸附器、换热器、膨胀机、各种传输连接管道和阀门以及测量控制系统等组成。制冷机的效率定义^[1]为

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\sum E_{x_{\text{gain}}}}{\sum E_{x_{\text{pay}}}}$$

对于可逆制冷机, 其有效能效率为 100%。而实际制冷机存在许多不可逆因素, 它们都会影响制冷机效率, 这些因素是:

(1) 压缩机的不可逆损失, 它是影响制冷机效率的主要因素之一。由于氦制冷机要求长

期可靠运行,因而螺杆压缩机被广泛用于氨制冷系统中。螺杆压缩机总效率一般为 0.5~0.6,若想减少压缩机部分的损失,要尽量使压缩过程接近等温压缩机,然而这受到压缩机本身制造工艺的限制。另外可用离心式压缩机代替螺杆压缩机,离心式压缩机的效率可达 0.65。

(2) 膨胀机的绝热效率。理想的膨胀过程是可逆绝热膨胀,其绝热效率是 100%。实际干式膨胀机其绝热效率为 0.7~0.8。

(3) 膨胀机的外泄漏及轴承气损失。

(4) 各种阻力损失,如换热器,吸附器,管道中的阻力损失,阻力损失也会导致有效能损失,所以制冷机的设计应减少系统的阻力损失,若设计合理,阻力损失将会很小。

(5) 跑冷损失,也就是制冷机冷箱的绝热效果。制冷机的设计应尽量提高冷箱的绝热效果。

(6) 各换热器不完全热交换损失,它取决于各换热器的温差。这也是影响制冷机效率的非常重要的因素。要减少不完全热交换损失,就要减少换热器的换热温差。减少换热器的温差是有限的,另外还受到换热器尺寸的制约。

(7) 换热器的轴向导热损失。

(8) 制冷循环的参数配置,如冷却级数、各冷却级的温度、高压压力等。制冷机参数配置的好坏直接影响着制冷机的效率。

(9) 是否采用节流阀。若将节流阀换成湿式膨胀机,将会大大提高制冷机的效率。对于大型氨制冷系统,它显得尤为必要。

上面的各因素中,各设备(如压缩机、膨胀机等)的效率取决与该产品的制造工艺水平、提高它们的效率是有限的。在制冷机设计时,以上所有的因素都应考虑到氨制冷循环的热力计算中。下面主要讨论从制冷机循环流程设计上来提高制冷机的效率。

4 提高制冷机的效率 I——合理选择换热器的温差

根据热力学第二定律,只有存在温差,才会发生传热,然而传热的温差却引起不可逆损失。对于换热器,要减少有效能损失就要减小换热温差,换热器的换热如图 2 所示。图 3 为换热器有效能传递示意图。随着温度的降低,氨的有效能增加得越来越快,如图 4 所示。这说明虽然低温度级的换热器的换热量比高温度级的换热器的换热量要小,但低温度级换热器所交换的有效能比高温度级换热器所交换的有效能大得多,所以要减少换热器的有效能损失,特别是减少低温度级的换热器的有效能损失。

若假设各温度下的有效能损失与所交换的有效能之比均相同,则

$$\frac{I}{Ex_0} = \frac{T_0 \Delta T}{(T - T_0)(T - \Delta T)} = \text{const}$$

于是得到 $\Delta T = \frac{300T - T^2}{C - T}$

其 T 为温度, C 为一常数,它由所允许的有效能损失比例确定。若 80 K 时允许的温差为 2 K,则 $C = 3120$,此时温差与温度的关系如图 5 所示。由图 5 可知,在 80 K 以下,温差随温度的降低而降低。而在 80 K 以上,由于交换的有效能比较小,而换热量又很大,因而可不受此关系的约束,此时的约束主要是换热器的尺寸。在 15 K 以下,交换的有效能非常大,

因而更需要想办法减小换热温差。

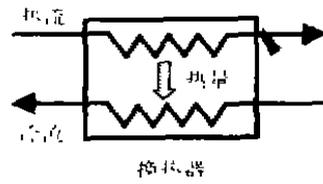


图2 换热器热量传递示意图

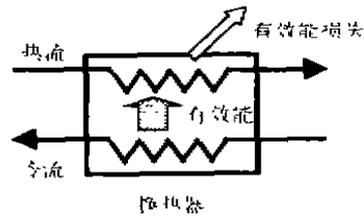


图3 换热器有效能传递示意图

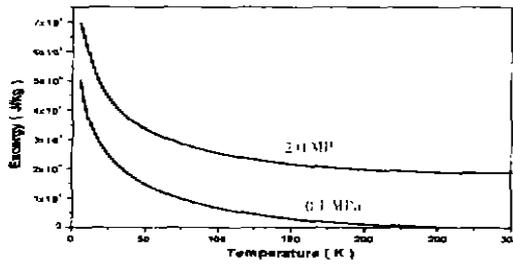


图4 氮的有效能与温度的关系

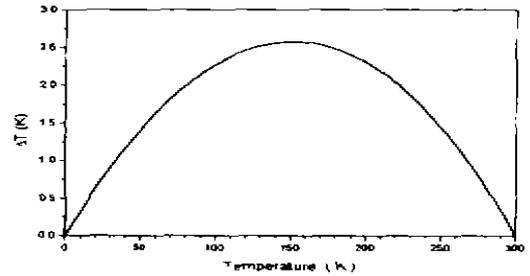


图5 换热温差与温度的关系

5 提高制冷机的效率 II ——合理选择制冷机的冷却级

对于氮制冷机，制冷的方式^[1]主要有外来冷源（如液氮预冷）、气体通过膨胀机膨胀制冷、气体通过节流阀制冷（即 J-T 效应）。根据这些制冷方式，可将制冷机分成几个冷却级。

首先是确定是否采用液氮预冷。若采用液氮预冷，氮从常温到液氮温度的 3/4 的焓降都由液氮预冷级实现，但这对于纯制冷循环效果并不明显，因为焓降基本可由回流的冷氮来实现。由于现在液氮可以很方便的从市场上买到，从而是否用液氮预冷主要取决于液氮的价格及运输费用与电力价格的比较。图 6、图 7 为采用液氮预冷的典型流程。

其次是决定采用几级膨胀制冷及各膨胀机在流程中的安排。图 6 所示的制冷循环除了液氮预冷冷却级外，采用了两级并联的膨胀制冷，它主要用于液化循环。图 7 中则采用了两级串联的膨胀制冷。

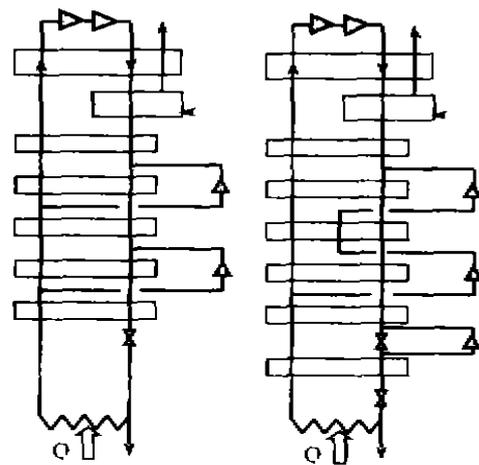


图6

图7

另外, 最末级制冷是采用节流阀, 还是采用两相膨胀机, 或者两者兼用取决于系统的大小及经费的支持。图 8 中, 流程 (a) 采用节流阀, (b) 采用膨胀机和节流阀共用, (c) 采用两相膨胀机, 由于节流阀的效率很低, 所以只用于小装置上。对于大型装置, 则广泛采用 (b) 和 (c)。从 (a) \rightarrow (b) \rightarrow (c) 它们的效率是越来越高。(d) 和 (e) 也采用了两相膨胀机, 它们是为了减小换热温差而实现的更优化的配置^[2]

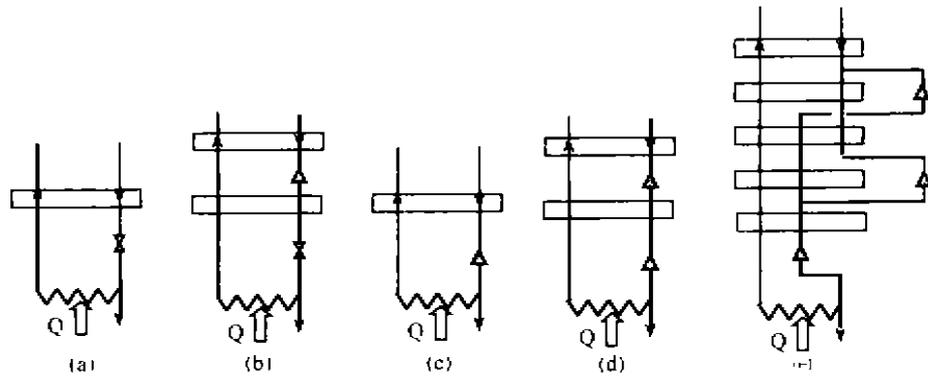


图 8 氮制冷机最末级的几种流程

图 9 示出了几种无液氮预冷的氮制冷循环^[2]。

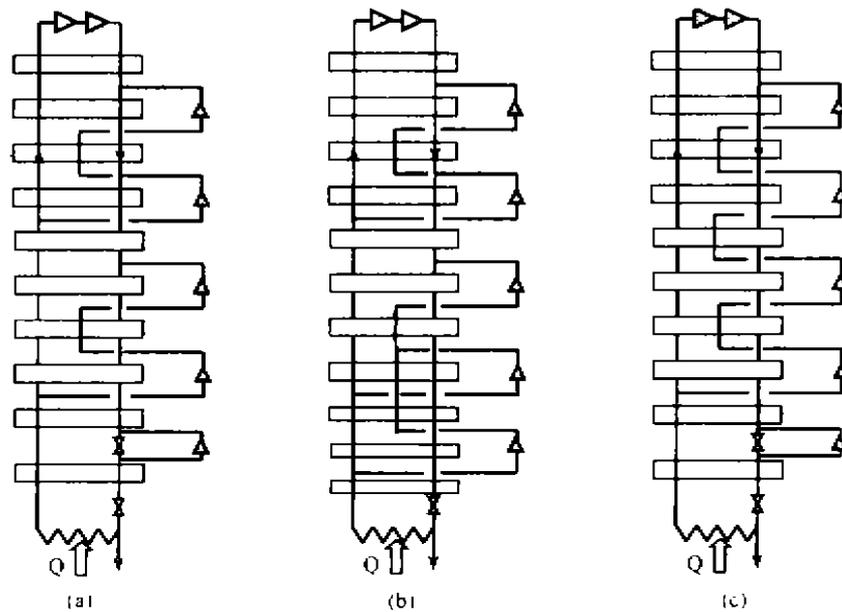


图 9 无液氮预冷的氮循环流程

6 提高制冷机的效率 III——制冷机参数的优化计算

除了制冷机流程的组织和各冷却级的温差影响制冷机的效率外, 各冷却级的温度、高压

的压力等参数也会影响制冷机的效率。各冷却级的温差和温度确定后,即可确定膨胀机的流量以及串联膨胀机的中间压力。如图7所示的制冷循环,设液氮冷却级为第一冷却级,三台膨胀机分别为第二、第二、第四冷却级,最后的一个换热器和节流阀组成第五冷却级。若我们给定每个冷却级的热端温差和正流氦与液氮换热后的温差,则影响制冷循环效率的独立参数只有压缩机后的高压压力和任意两台透平膨胀机膨胀后的温度三个参数(低压压力由大气压加上低压侧的阻力损失确定)。通常制冷循环的高压压力一般在1.5 MPa~2.0 MPa之间,于是确定该循环的真正独立变量只有两个参数,如两台透平膨胀机膨胀后的温度,

$$\eta_s = f(T_1, T_2)$$

对此函数进行最优化计算,即可得到 T_1 、 T_2 的最佳组合,从而得到该流程下最高效率的制冷循环。

7 结论

对于大型氦制冷系统,其效率直接影响大型超导装置的运行费用。本文详细阐述影响氦制冷机效率的各种因素。理论上分析了如何确定各冷却级的温差,并从温差的选取、流程的配置、制冷机参数的优化三方面论述了如何提高氦制冷机的效率。

参 考 文 献

- 1 张祉枯.低温技术原理与装置.西安:西安交通大学出版社,1985
- 2 Guy M, Gastau-Baguier. Large Helium Refrigerator. Proceedings of Beijing International Conference on Cryogenics, 2000

THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF HELIUM REFRIGERATOR

Bai Hongyu Bi Yanfang

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

ABSTRACT The size of cryogenic system is increasing with the development and wide application of superconductor technology. The running cost of large superconducting magnets mainly depends on the thermodynamic efficiency of its helium refrigerator. This paper presents the factors on which the efficiency depends and the ways to increase the efficiency of helium refrigerator.

KEYWORDS helium refrigerator; efficiency; superconducting magnet