

# 离心式涡轮冷压缩机叶轮的研究

成安义, 宋庆勇

(中科院等离子体物理研究所低温工程与技术研究室, 合肥 230031)

**摘要:**对于大型氦低温系统,采用多级离心式涡轮冷压缩机在低温低压下对饱和液氮槽减压操作,获得过冷氦,是目前国际上一种比较通用的方法。文章介绍了离心式涡轮冷压缩机的国外应用情况。根据中科院等离子体物理研究所 EAST 超导托卡马克氦低温系统当中过冷槽的设计制冷量,进行冷压机叶轮设计,并对模型进行 CFD 数值模拟计算。

**关键词:**低温系统; 过冷氦; 离心式涡轮冷压缩机; 离心式叶轮

## Study on the impeller of centrifugal turbo cold compressor

Cheng Anyi, Song Qingyong

(Cryogenic Engineering Division, Institute of Plasma Physics, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Large helium cryogenic system using a multistage compressor set to pump gaseous helium from saturated liquid helium tank at low temperature and pressure for producing subcooler helium is a more uniform approach in the foreign countries. This paper described the application of centrifugal turbo cold compressor in the world. According the capacity of the helium refrigerator for the EAST superconducting Tokamak, centrifugal impeller of cold compressor for the EAST cryogenic system subcooler tank was designed and CFD numerical simulation calculation was conducted.

**Keywords:** Cryogenic system, Subcooler helium, Centrifugal turbo cold compressor, Centrifugal impeller

## 1 引言

大型氦低温系统采用超流氦或过冷氦(低于 4.2K)来冷却超导磁体,在国际上已开始使用。二十世纪 80 年代,法国 TORE SUPRA 首先使用 300W/1.8K 超流氦低温系统。此后,美国托马斯·杰斐逊国家加速器实验室的 CEBAF 连续电子束加速器是第一个使用了制冷量在 2K 下 kW 级别氦低温系统的加速器项目,其制冷量为 4.8kW/2K。欧洲联合核子研究中心(CERN)的质子-质子对撞机 Large Hadron Collider(LHC)和德国 TESLA 超导直线加速器国际合作项目,都先后使用了制冷量在 2K 下 kW 级别的低温系统<sup>[1]</sup>。目前超流氦或过冷氦的获取,国外普遍采用多级离心式涡轮冷压缩机(以下简称冷压机),在低温低压下直接对过冷槽减压降温的方法来获得。

## 2 国外冷压机的应用情况

国外对于冷压机的研究应用已较为成熟,为了使超导磁体获得 8.3T 的稳定磁场,CERN 从 1993 年开始和 Air Liquide、IHI(日本石川)和 Linde Kryotechnik 公司进行冷压机的研究设计工作,分别采用三级串联和四级串联的方式对饱和液氮槽进行真空抽取,使其氮槽减压到 1.6kPa 左右,温度降到 1.8K 的 He II 饱和温度,其单台冷压机的等熵效率高达 75% 左右<sup>[3]</sup>。日本国家聚变科学研究所的 Large Helical Device(LHD)低温系统,为了使等离子体实验在磁场强度为 3T 的参数下进行,通过冷压机对 4.4K 饱和液氮槽的真空抽取,使其压力温度由 120kPa/4.4K 下降到 23kPa/2.97K,冷却螺旋线圈的氦流通过和其换热,达到进口 3.2K 的过冷温度<sup>[3]</sup>。

目前国内无论是在超流氦的使用,还是在低温系统规模上,与国外相比,尚存在有一定的差距,对于深低温系统当中的冷压机研究也处于空白阶段。

收稿日期:2013-08-16

作者简介:成安义(1979-),男,硕士,工程师,研究方向为大型低温系统运行。

### 3 冷压机的结构原理

冷压机在整体结构上分为常温和低温工作部分。常温下包括驱动装置(三相异步变频电机)、轴承等;低温下包括冷压机叶轮、出口扩压器、蜗壳组成的低温气体流通部分。整体结构上需要解决冷压机的高流量、密封性强、低漏热和易于维护等问题。冷压机叶轮高速旋转时,槽内气体随着旋转,使气体的动能大为增加,在离心力作用下,气体被甩到后面的扩压器中,而在叶轮处形成真空地带,这时外界的新鲜气体进入叶轮。叶轮不断旋转,气体不断地吸入并甩出,从而保持了气体的连续流动。同时,气体在离心惯性力以及在叶轮叶道中降速的共同作用下,其静压能也得到大幅度提高,在叶轮后面的扩压器中部分气体动能又转变为静压能,而使气体压力进一步提高,经过几级压缩后,被压缩的气体排出机外,从而到达使槽内压力不断下降的目的<sup>[4]</sup>。图1为冷压机的结构示意图。

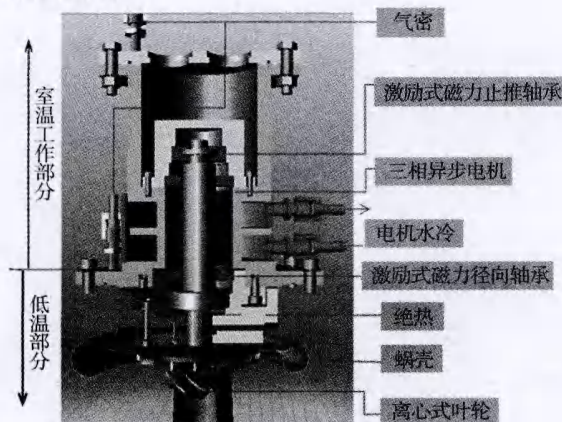


图1 冷压机结构图

Fig.1 Cross section of cold compressor

### 4 EAST 氦低温系统中过冷氦的获取过程

中科院等离子体物理研究所 EAST 超导托卡马克氦低温制冷机,是我国最大的氦制冷系统。设计制冷量为  $1050\text{W}/3.5\text{K} + 200\text{W}/4.5\text{K} + 13\text{g/s LHe}$ 。超导磁体的工作温度  $3.8\text{K}$ ,使用超临界氦冷却,超导磁体的进口氦流通过和过冷槽(设计制冷量  $1050\text{W}/3.5\text{K}$ )换热,达到进口  $3.8\text{K}$  的

过冷温度。过冷槽通过油环泵在室温下来减压制取  $3.5\text{K}$  的冷量。图2为 EAST 氦低温系统中过冷槽和油环泵的流程简图。其中过冷槽中  $3.5\text{K}$  氦对应的饱和压力为  $0.47\text{bar}$ ,考虑到负压路的阻力损失,油环泵的吸气压力为  $0.37\text{bar}$ ,当过冷槽制冷量为  $1050\text{W}/3.5\text{K}$  时,所需油环泵的流量约  $3000\text{m}^3/\text{h}$ <sup>[5]</sup>。

EAST 氦低温系统从 2003 年建成到目前已安全进行七次降温实验,在实验运行期间,发现由于油环泵在室温下通过整个低压回路对过冷槽进行减压降温操作,导致整个低压回路处于负压状态,这对于整个系统的真空要求非常严格,极易造成系统内重要部件的污染,因而大大降低了低温系统运行的稳定性。且油环泵为满足在室温下的抽速要求,其体积、噪音较大,对于未来像建设 CERN(氦制冷量达到  $144\text{kW}/4.5\text{K}$ ) 那样的大型深低温系统,油环泵的使用是明显不合适的。而采用冷压机在低温低压下直接对液氦槽抽空降压操作,不需要通过整个低压回路,这就避免了对整个系统低压回路的真空度要求。且低温低压下,饱和氦蒸汽密度大,使冷压机的抽速相对油环泵在室温下的抽速来说,也大大减少,体积也相应减小。

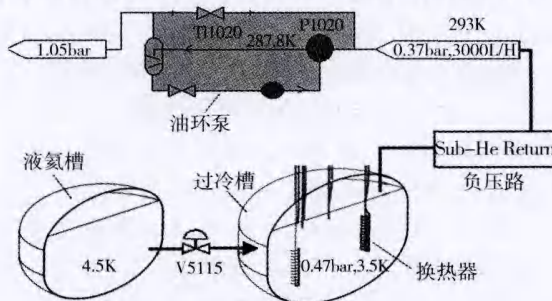


图2 EAST 油环泵系统

Fig.2 EAST oil ring pump system

### 5 针对 EAST 氦过冷槽的冷压机参数计算

#### 5.1 过冷槽的抽空降压的液氦剩余量检测

EAST 氦过冷槽的设计制冷量为  $1050\text{W}/3.5\text{K}$ ,设计压力为  $0.5\text{MPa}$ ,设计温度  $3.5\text{K}$ 。过冷槽内安装有 6 个盘管换热器,总重  $800\text{kg}$ 。6 个换热器在过冷槽内定位时,保证所有盘管不超过过冷槽中位线(液面高度 50%),且相互间错开,以保证换热效果。过冷槽用来与冷却磁体线圈的氦流

管路进行热交换,其直径 1714mm,高 1214mm,两端椭圆封头焊接,总体积为  $V = 2.043\text{m}^3$ 。根据 EAST 低温系统实验过程中的参数总结,在没有使用油环泵对过冷槽进行减压降温操作时,稳态 EAST 等离子体放电过程中,过冷槽液面高度 75% (可实验下限值 50%),饱和液氦体积  $1.2\text{m}^3/4.5\text{K}$ 。在对过冷槽抽空降压阶段,终态过冷

氦的液面高度必须大于可实验下限值 50%,根据质量守恒原理可以确定减少的液氦吸收蒸发潜热而气化变成了温度为 4.5K 的饱和汽氦,这一过程使剩余液体和蒸汽的温度降低。表 1 示出了根据上述简化原理及系统的能量守恒得出的过冷槽降压后 3.5 K 饱和液氦剩余量。

表 1 EAST 过冷槽 3.5K 饱和过冷氦剩余量

Tab. 1 3.5K saturated subcooler helium obtained in EAST subcooler tank

4.5K 饱和液氦质量 $m_{L1}/\text{kg}$	3.5K 饱和液氦剩余质量 $m_{L2}/\text{kg}$	4.5K 饱和液氦焐值 $h_{L1}/(\text{J}/\text{kg})$	3.5K 饱和液氦焐值 $h_{L2}/(\text{J}/\text{kg})$	4.5K 饱和汽氦焐值 $h_{G1}/(\text{J}/\text{kg})$	3.5K 饱和汽氦焐值 $h_{G2}/(\text{J}/\text{kg})$	4.5K 液氦汽化潜热 $r/(\text{J}/\text{kg})$
能量守恒方程 $m_{L2} = m_{L1}(r - h_{G1} + h_{G2}) / (r - h_{G1} + h_{G2} + h_{L1} - h_{L2})$						
142.7	112.8(829L)	1.164E+04	6.806E+03	3.047E+04	2.997E+04	1.875E+04

终态 3.5K 过冷槽,其饱和液氦体积为 830L,6 个盘管换热器体积  $\approx 500\text{L}$ ,通过过冷槽几何模型计算得出,终态 3.5K 过冷槽的液面高度大约为 60%。可见在过冷槽液面高度为 75% 的情况下,进行过冷槽的减压降温操作,其终态液面高度大于可进行实验的液面下限值。

5.2 冷压机和油环泵的抽速流量比较分析

油环泵在室温下来减压制取 3.5K 的冷量,其流量为 3000L/h,3.5K 饱和液氦蒸发吸收的蒸发潜热满足过冷槽的 1050W/3.5K 的制冷量。如用冷压机直接在低温低压下对过冷槽进行抽空降压造作,相对于 0.37bar/239K 的油环泵进口参数来说,其抽空时氦流密度为油环泵的 130 倍。图 3 表示出了所需的油环泵、冷压机的体积流量与过冷槽温度的关系。可见,低温低压下,冷压机的抽速相对油环泵在室温下的抽速来说,大大减少。

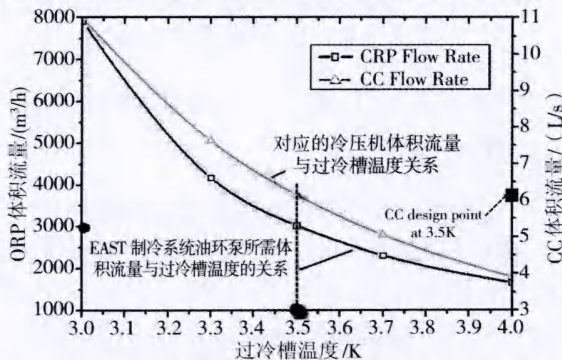


图 3 油环泵、冷压机的体积流量与过冷槽温度的关系  
Fig. 3 The flow rate of oil ring pump and cold compressor versus temperature of subcooler tank

6 EAST 氦过冷槽冷压机叶轮造型设计

冷压机通过离心式叶轮对气体做功,使气体获得能量。对离心式涡轮冷压缩机来说,叶轮设计的好坏,对于冷压机的特性起决定性的作用。

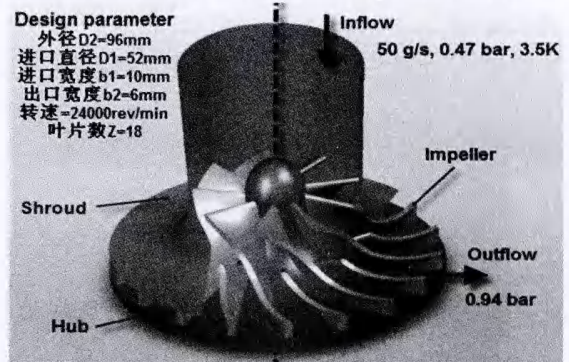


图 4 过冷槽冷压机离心式叶轮设计模型

Fig. 4 3D part drawing of cold compressor centrifugal impeller  
在过冷槽冷压机的叶轮叶片设计中,采用后弯叶片式,从效率的角度考虑,后弯叶片式叶轮比较容易获得高的级效率。叶轮结构上采用半开式叶轮,叶轮叶片型线采用扭曲叶片。叶轮叶片采用长短叶片交错排列方式,长短叶片结构对于提高叶轮能量头系数,减少由于叶道进口处的阻塞系数和叶道中的二次涡流所带来的效率下降影响都是有利的。目前,国外综合冷压机叶轮、驱动装置和轴承性能得出,冷压机的进出口压比一般小于 4.0。EAST 过冷槽冷压机整个流通部分的设计

压比为 2.3 (1.1bar/0.47bar), 但就单独叶轮分析计算而言, 气体在叶轮中得到的静压能只是占气体经叶轮后得到能量头当中的一部分, 剩余的能量头部分为气体经叶轮后提高的动能, 在随后的扩压元件中继续转变为静压能, 所以叶轮出口的设计压力通过计算, 取设计值 0.92bar。图 4 为针对 EAST 氦过冷槽设计的冷压机离心式叶轮结构。

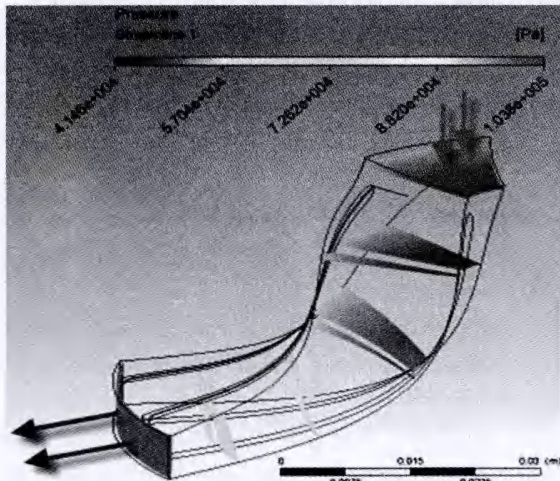


图 5 叶轮子午线等值面上压力分布图

Fig. 5 Pressure distribution on six meridional isosurfaces

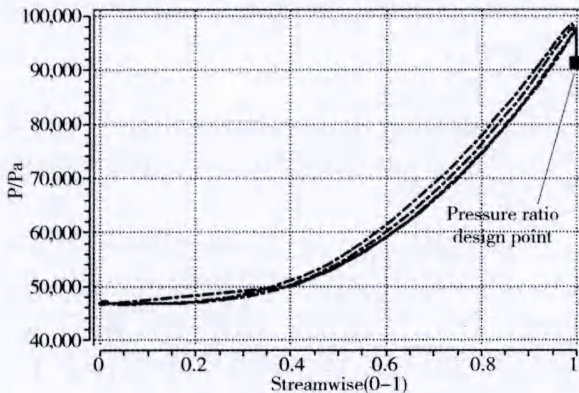


图 6 叶轮叶道中的压力曲线

Fig. 6 Streamwise curve of pressure

通过理论计算结果和建模过程, 利用一些 CFD 流体仿真软件对已建好的叶轮模型进行 CFD 模拟。采用 CFD 数值模拟技术对冷压机叶轮进行分析, 一是可以优化设计结构提高实物加工前的可靠性及节省实验成本, 二是与传统的把气流流动作为一元流理论设计相比, 利用流体的三元流动特性进行 CFD 数值模拟, 更接近流体的实际流动, 具有更准确的理论依据。图 5、图 6 为通过 CFD 模拟得出的叶轮子午线等值面上压力

分布图和叶轮叶道中的压力曲线。

从 CFD 数值模拟的结果来看, 叶轮出口压力为 0.98bar, 基本吻合理论计算结果的 0.92bar, 叶轮子午线上的压力分布和分析曲线也基本一致, 分析结果提供了理论计算结果的可信依据。

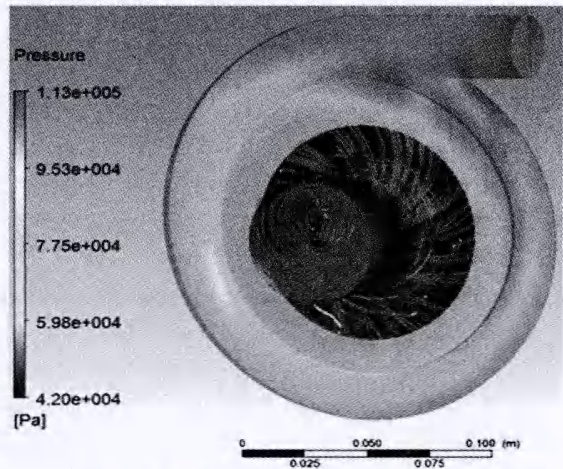


图 7 冷压机低温流通部分压力分布

Fig. 7 Pressure distribution analysis of cold compressor

冷压机低温流通部件由进气管、扩压器和蜗壳组成。进气管保证气流在叶轮进口处有均匀的速度场和压力场, 避免出现气流局部降速与分离现象。扩压器的功用主要是使从叶轮出来的具有较大动能的气流继续转变为静压能, 这部分动能对后弯式叶轮占 25%—40% 左右。蜗壳用于收集扩压器后面的气体, 将其引入低压管道中。图 7、图 8 为冷压机低温流通部分的分析结果。分析结果显示, 冷压机整体低温流通部分的出口压力为 1.12bar 左右。

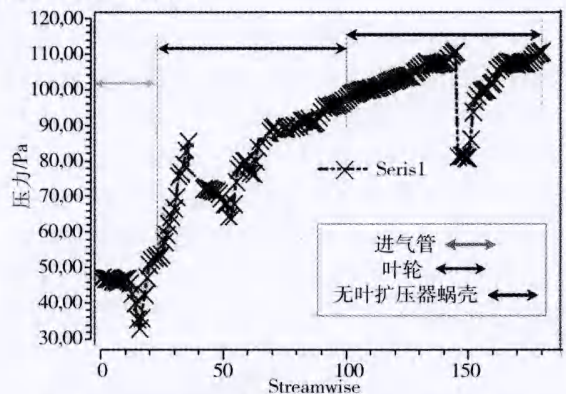


图 8 冷压机低温流通部分进出口压力变化曲线

Fig. 8 Streamwise curve of pressure from inlet to outlet

(下转 39 页)

之间电流的幅值基本相同。屏蔽层5-6的电流占比均与50%接近,较未优化前电流分布更为均衡。

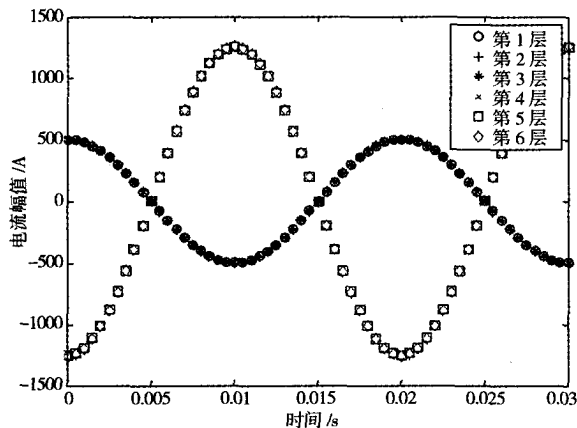


图3 优化后高温超导电缆各导电层电流分布

Fig. 3 The current distribution of conducting layers of HTS cable after optimization

## 5 结论

本文通过调节高温超导电缆各导电层的半径、带材的绕向与绕制角度等参数来改变其感抗,从而解决高温超导电缆的均流问题。建立了电缆本体的电路矩阵方程,将电缆导电层分解为仅有轴向电流的空心圆柱模型与仅有切向电流的密绕螺线管模型,利用此模型分析了导电层电流及其产生的磁场,给出了各导电层自感和层间互感的计算公式。考虑到影响高温超导电缆各层电流分布的主要因素为各导电层的自感与互感,而它们

取决于各导电层的半径与绕向角,故选取这两个量作为优化变量,建立了以电缆各层电流均衡为目标的优化函数。

另外,本文以一个有4层超导层、2层屏蔽层的冷绝缘超导电缆为例,比较了其在电磁优化前后各导电层电流分布的均匀性。结果发现,调整绕向角后,导体层1-4层电流方向一致,电流幅值最大的导体层2,其电流占比为25.3%;最小的导体层4,其电流占比为24.76%,两者差值为0.54%。因此,各导体层之间电流的幅值基本相同。屏蔽层5-6的电流占比均与50%接近,较未优化前电流分布更为均衡。

## 参考文献

- [1] 张俊莲,金建勋. 高温超导电缆技术探讨与应用[J]. 华中电力, 2006,19(6):16-20.
- [2] Kruger Olsen S, Traeholt C, Kuhle A, et al. Loss and inductance investigations in a 4-layer superconducting prototype cable conductor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999,9(2):833-836.
- [3] 戴训江,李敬东,唐跃进,等. 高温超导电缆的磁场计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003,31(12):38-40.
- [4] 刘新颖,王曙鸿,邱捷. 改进粒子群算法及其在超导电缆参数优化中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2007,41(2):219-222.
- [5] 赵臻,邱捷,王曙鸿,等. 高温超导交流电缆电流分布及结构优化的研究[J]. 西安交通大学学报, 2004,38(4):352-355.

(上接35页)

## 7 结论

目前国内氦低温系统一般采用4.5K液氮进行超导磁体等物理装置的冷却,超流氦或低于4.2K下的过冷冷却尚未广泛使用,对于氦低温系统当中的冷压机研究也处于空白阶段。针对EAST氦低温系统当中过冷槽的冷压机工作参数计算,对于未来冷压机的应用研究有一定的指导意义。当然冷压机的研究包括诸多方面,如结构上的大压比、高流量、高密封性、低漏热和易于维护等问题,冷压机的自动调节控制方法和轴承技术,这些都在未来研究中有待解决。

## 参考文献

- [1] Taviani L. Large Cryogenic Systems at 1.8K[C]. 7th European Particle Accelerator Conference, Vienna: 2000, 36-30.
- [2] Claudet S, et al. Specification of Eight 2400W @ 1.8K Refrigeration Units for the LHC[C]. 18th International Cryogenic Engineering Conference, Mumbai;2000,21-25.
- [3] Motojima O, et al. Recent development of LHD experiment[J]. Plasma Fusion Res., 2003(5):22-27.
- [4] 徐忠. 离心式压缩机原理(修订本)[M]. 北京:机械工业出版社, 1990,8-22.
- [5] 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:[学位论文][D]. 合肥:中国科学院合肥物质科学研究院, 2002.