

# 部分流超临界氦循环泵特性分析

张小伟 白红宇

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘要:**通过将大型超导托卡马克装置中用于超导磁体冷却的超临界氦循环泵与传统离心泵进行比较,对 BNI(Barber-Nichols Inc.)部分流超临界氦循环泵进行了结构特点和性能特点分析,重点讨论了叶轮、叶片和蜗壳的结构差异,以及由于这些结构的不同决定的流量、扬程和效率差异,为部分流超临界氦循环泵的设计及试验研究提供了理论依据。

**关键词:**超临界氦 循环泵 部分流泵 低温系统

**中图分类号:**TB655 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6516(2005)04-0024-05

## Characteristic analysis of partial emission pump of supercritical helium

Zhang Xiaowei Bai Hongyu

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

**Abstract:** CICC (Cable in Conduit Conductor) magnet of superconducting Tokamak is cooled by forced-flow cooling with a large of mass flow rate of supercritical helium. The supercritical helium circulation pump is effective and critical to achieve such a forced-flow cooling for the magnet. This paper describes the structure and performance of BNI supercritical helium pump, discusses the difference of unconventional partial emission pump and conventional full emission pump, including impeller, blade and pump housing as well as flow rate, head rise and efficiency.

**Key words:** supercritical helium; circulation pump; partial emission pump; cryogenic system

### 1 引言

大型超导磁体装置,如超导托卡马克装置,超导磁体往往采用大流量迫流冷却的 CICC(Cable in Conduit Conductor)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。此时磁体所要求的流量应小于等于制冷机节流路的流量。而事实上,根据热负荷正常设计的制冷机节流路流量往往小于磁体所要求的流量,因此为了满足大流量要

求,需将节流路的流量提高至磁体冷却所需流量。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,因而制冷机的冷量将过剩,过剩的制冷量需增加热负荷来平衡。基于这一思想,引入了超临界氦循环泵,如图 2 所示<sup>[3]</sup>。采用超临界氦循环泵,分离了制冷机的制冷循环与磁体的冷却循环,一方面可以避免瞬态热扰动对制冷机的影响,如磁体失超或等离子体破裂导致的突然升温,热扰动首先会被液氦槽吸收。另一方面,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流量。

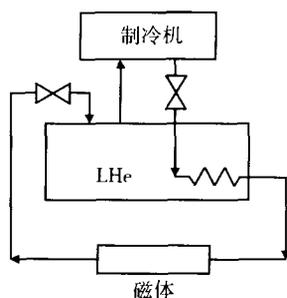


图 1 常规冷却方式

Fig. 1 Conventional circulation method

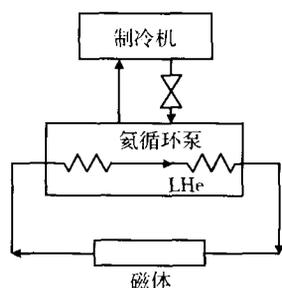


图 2 氦循环泵冷却方式

Fig. 2 Helium pump circulation method

在中国科学院等离子体物理研究所建造的 EAST 托卡马克装置是一个全超导的稳态可控核聚变装置,纵场线圈和极向场线圈采用 NbTi 低温超导材料的 CICC 绕制而成。极向场线圈由 3.8 K 的超临界氦用常规方式冷却,纵场线圈和纵场线圈盒分别由 3.8 K 和 4.5 K 的超临界氦用氦循环泵方式冷却。目前已从美国 Barber-Nichols 公司 (BNI) 引进 2 种型号的超临界氦循环泵各 2 台,分别用于纵场线圈和纵场线圈盒的迫流冷却,基本参数见表 1。本文对 BNI 部分流超临界氦循环泵的结构特点和性能特点进行分析。

## 2 BNI 部分流超临界氦循环泵的结构特点

BNI 超临界氦循环泵为共轴立式离心泵,如图 3 所示。主要部件包括电机、转子组件(驱动轴、传动轴、叶轮)和泵体。电机运行于环境温度,采用自然冷却,由变频器 (VFD) 控制,既可方便快捷地改变泵的转速以得到所需的压头和流量,又可通过设定限值防止电机过载起到保护电机的作用。

转子组件包括驱动轴、传动轴和叶轮,运行于真空室的冷箱。与传统离心泵不同,叶轮并非由驱动轴直接驱动,中间连接 1 根长约 380 mm 的空心轴,即传动轴。这是由于传输介质为超临界氦,温度很低,故采用延伸轴,其目的是为了尽量减小常温电机区到低温超临界氦区的漏热,并在轴支撑管上焊接辐射屏,将泵体与 80 K 冷屏相连。

表 1 BNI 超临界氦循环泵的基本参数

Table 1 Basic parameter of BNI supercritical helium circulation pump

型号	体积流量/(m <sup>3</sup> /h)	扬程/m	转速/(r/min)	比转速	叶轮外径/mm	叶片数	扩散管喉部直径/mm
BNHeP-27-000	6.28	74.2	6 640	40	92.7	6	9.9
BNHeP-26-000	9.36	16.6	3 316	72	92.7	6	17.6

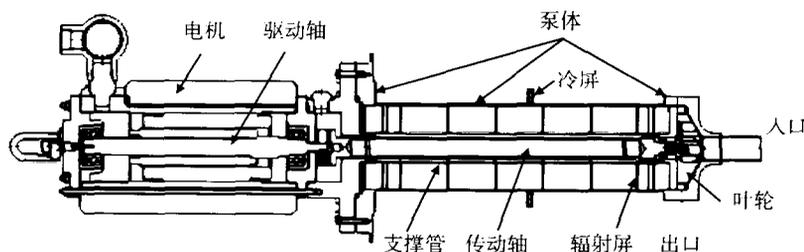


图 3 BNI 超临界氦循环泵

Fig. 3 BNI supercritical helium circulation pump

图4,图5分别是 BNI 超临界氮循环泵轴向投影的结构示意图和叶轮实体图,其结构形式表明 BNI 超临界氮循环泵为部分流泵(partial emission pump),又名切线泵(tangent pump),是1939~1945年第二次世界大战期间由巴斯克博士在德国开始研制的,当时主要是为了研究输送火箭和燃气轮机燃料的航空工业用泵,以满足军方的紧急需要。从1963年开始用于工业上,主要用来输送各种化学介质、含有悬浮颗粒的液体或高粘度液体,现在已广泛应用于航空、航天、石油、化工、消防等重要场合,成为多级低速离心泵的最有力的竞争者<sup>[2]</sup>。

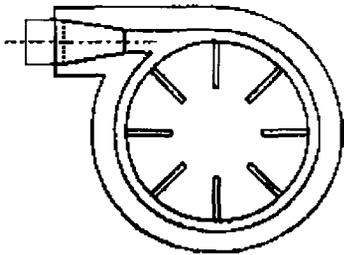


图4 部分流泵结构示意图

Fig. 4 Partial emission pump structure

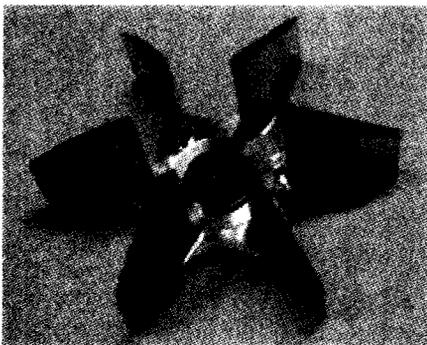


图5 部分流泵叶轮实体图

Fig. 5 Partial emission pump impeller

图6,图7分别表示常规全流泵(full emission pump)的结构示意图和叶轮实体图。可以看出,部分流泵在结构上与传统的离心泵(即全流泵)有着明显的差别<sup>[2-4]</sup>:

1) 全流泵的叶轮一般为闭式或半闭式,而部分流泵的叶轮属全开式,没有前、后盖板,因此在全流量范围内几乎不产生不平衡轴向力,这使部分流泵的结构简单紧凑,并降低了选用轴承的要求,同时也为叶轮的清洗提供了很大方便。

2) 常规的全流泵的叶片一般为后弯式,而部分

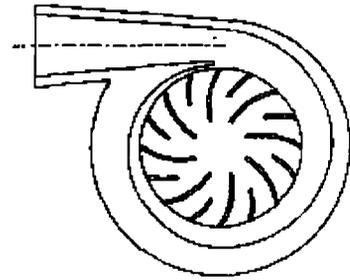


图6 全流泵结构示意图

Fig. 6 Full emission pump structure



图7 全流泵叶轮实体图

Fig. 7 Full emission pump impeller

流泵的叶轮为直径式,呈直线放射状,进出口角 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 均为 $90^\circ$ ,因此制造容易,而且刚度好,能适应高速旋转。

3) 全流泵的蜗壳是根据动量矩守恒原理设计的螺旋形,蜗壳的通流面积从蜗舌开始沿叶轮旋转方向逐渐增大,而部分流泵是同心环形的壳体,叶轮产生的动扬程向静扬程的转换靠一个锥形扩散管来实现,壳体仅起一个集液器的作用。因此泵体的受力情况好,制造更方便。

4) 常规的全流泵因叶轮的闭式结构,在进口处为了防止出口处的高压流体经过间隙流入叶轮吸入口处造成流量的泄漏,一般需放置口环。同时,为了减小叶轮口环处的间隙损失,尽量采用小的间隙,以减小泄漏量提高容积效率。而部分流泵的开放式叶轮不存在口环处的回流,无需密封口环。而且对叶片的前后端面与泵体内腔形成的间隙要求也不严。试验表明,间隙的大小对部分流泵的性能影响不大。

结构的不同导致了两种泵应用范围和流动特性的差异。在低比转速( $n_s < 80$ )范围内,如高扬程、低流量的工程应用中,若按照传统离心泵的设计方法,叶轮宽度及压出室喉部面积过分狭小,给铸造和加工带来很大困难,并且也很难保证设计点就是最高效率

点。BNHeP-27-000 和 BNHeP-26-000 的比转速分别为 40 和 72, 因此均采用部分流式结构。部分流超临界氮循环泵的基本原理与传统离心泵相同, 但泵内流体只有一部分沿着圆形压出室切线方向的锥形扩散管输出, 其它部分都随叶轮作强制回流转动, 所以称这种泵为部分流泵<sup>[5]</sup>。

### 3 BNI 部分流超临界氮循环泵的性能特点

BNI 超临界氮循环泵具有部分流泵的结构特点, 因而决定了具有不同于常规全流泵的性能特色, 其特性曲线如图 8 所示。部分流泵的优势主要在于能够在小流量、高扬程的场合中稳定运行, 而且其运行效率要高于同等工况下的全流泵。在许多场合下, 如流量小、扬程较高的使用工况, 若使用比转速较大的常规泵, 在关死点运转的机会就会增多, 这时若选用仅能满足使用工况要求的电机功率, 一旦排出阀开得过大或流程条件变动时, 就会造成电机过载, 而部分流泵则消除了这种危险<sup>[2]</sup>。

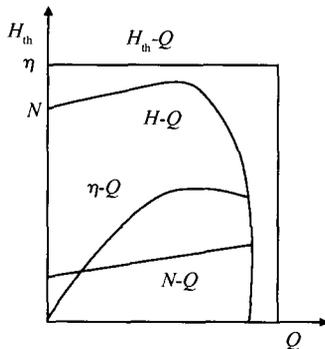


图 8 部分流泵特性曲线

Fig. 8 Characteristics curves of partial emission pump

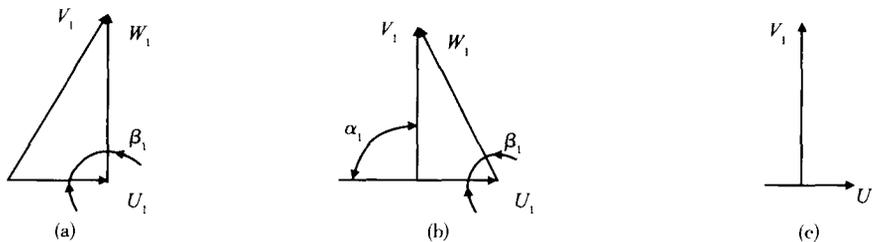


图 9 叶轮进口速度三角形

Fig. 9 Velocity triangle of the impeller inlet

由式(3)所表示的部分流泵的理论特性如图 8 中的  $H_{th} - Q$  曲线所示。在小于截止流量时理论扬程

### 3.1 流量特性

部分流泵的同轴环形壳体为其性能曲线提供了一种截止特性, 即流量大于截止流量时性能会突然下降。截止流量是当扩散管喉部的流速基本上等于叶轮周速时的流量。

在转速和叶轮直径确定的情况下, 部分流泵的流量仅取决于扩散管喉部面积, 因此可用改变喉部直径的方法决定其最大流量<sup>[2,5]</sup>。BNHeP-27-000 和 BNHeP-26-000 的扩散管喉部直径分别为 9.9 mm 和 17.6 mm。

### 3.2 理论扬程特性

部分流泵与传统离心泵一样都遵循欧拉方程, 其理论扬程  $H_{th}$  的基本方程式为

$$H_{th} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \quad (1)$$

其中  $g$  为重力加速度,  $u$  为液流随叶轮转动的圆周速度,  $v$  为液流相对泵体的绝对速度,  $w$  为液流相对叶轮的相对速度, 下标 1, 2 分别表示叶轮入口和出口。

因为部分流泵出口角  $\beta_2 = 90^\circ$ , 同时流量很小, 可认为  $v_2 \approx u_2, w_2 \approx 0$ ; 又入口角  $\beta_1 = 90^\circ$  (见图 9a) 且液体入口无预旋, 叶轮进口绝对液流角  $\alpha_1 = 90^\circ$ , 即  $v_1$  的圆周分量为零 (见图 9b)。图 9a 与图 9b 是统一的, 因此  $v_1$  与  $w_1$  重合, 见图 9c, 即  $w_1 = v_1$ 。所以式 (1) 可简化为

$$H_{th} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_1^2}{2g} \quad (2)$$

如果进一步忽略  $u_1$ , 则式(2)成为

$$H_{th} = \frac{u_2^2}{g} \quad (3)$$

呈直线, 即不随流量而变化, 只要叶轮的转速不变, 理论扬程就不会变化; 到截止流量时流量不再增大而形

成矩形,也就是相当于欧拉理论扬程曲线  $\beta_2 = 90^\circ$ , 同时蜗壳中动扬程的能量完全回收时的情况。

### 3.3 实际扬程特性

部分流泵的实际扬程-流量关系如图8中的  $H-Q$  曲线所示。在实际运行中,蜗壳的能量回收存在不完全性以及叶轮与流体之间总有相对运动,因此必有水力损失,所以截止点变为圆形曲线;实际流动中,进入扩散管的流体均有不同程度的偏斜,因此实际的截止流量比理论的截止流量小;因为靠蜗壳回收动能存在着最优的流量值,所以  $H-Q$  曲线存在驼峰。

考虑到水力损失,引入扬程系数  $\varphi$ , 则实际扬程  $H = \varphi \cdot u^2/g$ , 据文献[2,3],  $\varphi \approx 0.7$ , 即实际扬程为理论扬程的0.7左右,而常规全流泵关死点的扬程通常为理论扬程的0.57左右,因此,在同一直径同一转速下比较,部分流泵具有常规全流泵1.2~1.4倍的高扬程,而且扬程在整个实用的范围内变化很小,这种情况在常规的  $\beta_2 < 90^\circ$  叶轮不可能出现。常规全流泵的扬程曲线是陡降的,在流量范围内扬程变化很大。

### 3.4 效率特性

在低比转速范围内,部分流泵的效率比常规全流泵高,在高比转速范围内则相反<sup>[6]</sup>。巴斯克认为:蜗壳内流体的旋转速度与叶轮的旋转速度相等,即流体相对叶轮没有相对运动,叶轮与流体保持一种刚体关系<sup>[2]</sup>。因此水力损失小,同时没有从口环处回流产生的泄漏损失,即使叶轮和壳体之间有较大的间隙也不受影响。对常规的全流泵而言,泄漏损失是效率降低的主要原因,比转速越低,泄漏损失越大,使得效率越低。此外,常规全流泵的圆盘摩擦损失的大小对效率也有明显影响,而部分流泵采用全开式叶轮,没有前、后盖板,因此无圆盘摩擦损失。以上3点构成了部分流泵在低比转速范围内的高效原因。

特别地,BNI超临界氦循环泵为了减小常温电机到低温超临界氦的漏热,采用了延伸轴设计。理想情况时,超临界氦的压缩过程认为是可逆等熵过程,而实际过程中,由于摩擦、传热等因素,实际总功耗总是大于可逆过程的定熵压缩功,将一定压力的增加所需的定熵压缩功和实际总功耗之比定义为绝热效率。很显然,减小传热能提高绝热效率,具体关系还需要进行试验来进一步说明。

部分流泵的效率-流量关系如图8中的  $\eta-Q$  曲

线所示,其最高效率点在最大流量附近,亦即扬程突然下降处。实际使用时,最好不要在流量超过最高点很多的地方运行。在这个范围内运转,虽然对泵的机能无多大损害,但在锥形扩散管喷嘴处会引起气蚀,从而增加噪声,而且扬程变得不稳定<sup>[2]</sup>。若要在比最高效率点大的流量处运行,要改用大的喷嘴,即增大喉部面积,此时最高效率点也相应的向大流量侧移动。流量增加之后,功率也会增加,如图8中的  $N-Q$  曲线所示。

## 4 结论及展望

(1) BNI部分流超临界氦循环泵采用延伸轴设计,总体结构比较简单、紧凑,其部件易于加工铸造; $H-Q$ 曲线比较平坦,全流量范围内扬程变化小;在其它条件相同的情况下,流量大小取决于锥形扩散管喉部面积,应用不同的喉部直径可保证泵在接近最佳工况下运转;在相同的低比转速情况下,效率要高于同等工况的传统离心泵。

(2) 超临界氦循环泵是超导磁体冷却装置的关键设备,其效率越高,磁体冷却循环的冷却效果越好<sup>[7]</sup>。因此对超临界氦循环泵进行理论分析及高效率设计具有重要的现实意义及研究价值。

(3) 为部分流超临界氦循环泵的设计及试验研究提供了理论依据。

(4) 在以后的工作中,将在此基础上进行设计及测试试验的继续研究。

## 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 李新宏. 部分流泵整机非定常流动数值计算及研究:[博士学位论文]. 西安:西安交通大学,2003.09:1~12
- 3 杨敏官. 液态硫磺泵的特性分析及实验研究. 江苏理工大学学报(自然科学版),2000,21(6):54~57
- 4 孙德明,董志国,张英. 切线泵与离心泵的结构和性能比较分析. 通用机械,2004(7):84~86
- 5 沈阳水泵研究所,中国农业机械化科学研究院. 叶片泵设计手册. 北京:机械工业出版社,1983:326~327
- 6 Weisend J G II. Handbook of Cryogenic Engineering. Germany,1998. 381~390
- 7 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