

NBI 综合测试台后低温冷凝泵热负荷分析与计算

刘志伟, 胡纯栋, 谢远来, 崔伟

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: NBI 综合测试台的建立, 是为了对未来用于 EAST 装置的中性束注入器(NBI) 进行性能测试并进行相关物理实验。低温冷凝泵是为 NBI 提供稳定的动态真空环境的重要部件, 低温泵的工作状况直接关系到束的传输效率。结合后低温冷凝泵的工作情况, 对其进行了热负荷计算, 并对影响热负荷的一些因素进行了分析, 为后续的热应力分析和低温系统的设计提供参考。

关键词: NBI; 后低温冷凝泵; 热负荷; 计算; 分析

Performance analysis and calculation for rear cryopump of NBI general test platform

Liu Zhiwei, Hu Chundong, Xie Yuanlai, Cui Wei

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

Abstract: NBI general test platform is used for testing NBI of EAST and supporting related physical experiment. Cryopump is an important component supplying stable dynamic vacuum, and its working status matters beam transmission efficiency directly. In this paper, heat load was calculated, and factors effecting heat load were analysed, which could be the reference for thermal stress analysis and cryosystem designing later.

Keywords: NBI; rear cryopump; thermal load; calculate; analysis

1 引言

NBI 是一套用于产生高能带电粒子束并对其进行中生化、最终将高能中性粒子束注入到聚变装置内用以加热等离子体、驱动等离子体电流的装置。

图 1 为 NBI 结构示意图。NBI 由离子源、中性化室、偏转磁铁、低温真空系统、电源系统、测控系统等功能单元组成。

就低温真空技术而言, 要保证束的高效传输, 需要有一个稳定的动态真空, 低温泵是为 NBI 提供真空环境的主要设备, 它的运行情况直接关系到束传输效率的高低并影响到整个束线内其他部件的使用寿命与使用安全。

NBI 低温泵是由液氮冷却的防辐射挡板和液氮冷却的起冷凝吸附作用的液氮板组成, 分为前、后低温冷凝泵, 前低温冷凝泵呈圆片状, 中间预留了束通道和功率测量靶的安装位置; 后低温冷凝

泵呈圆筒状, 承担着 57% 左右的抽气任务。

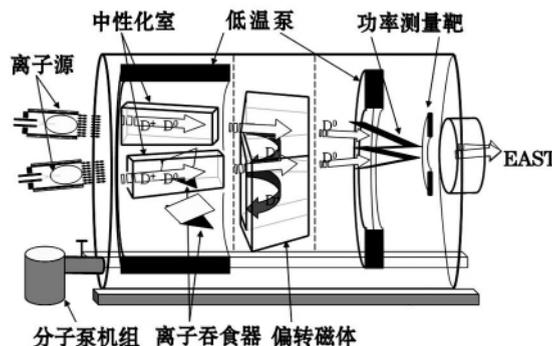


图 1 NBI 结构示意图

Fig.1 Structure schematic of NBI

2 结构

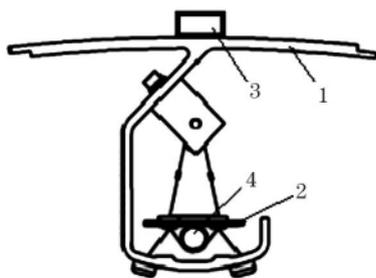
后低温冷凝泵是低温系统的一部分, 安装在 NBI 真空室第一段内, 以 30 个改进型的 Santeler 防辐射板铝制拉伸件为基础搭建起来, 长 1.633m。防辐射屏和液氮板分别采用液氮、液氮迫

收稿日期: 2012 - 02 - 06

基金项目: 国家自然科学基金(11075183) 资助。

作者简介: 刘志伟(1986 -), 男, 硕士生, 研究方向为低温泵的优化研究。

流冷却,液氮板由钢丝吊挂在防辐射屏上,钢丝与防辐射屏和液氮板之间垫有陶瓷垫片,以此增加热阻,减少导热。液氮防辐射屏和液氮板的空布置如图1所示。在真空室与低温冷凝泵之间有两层间隔0.5mm的抛光铝材制作的遮热板,运行时最外层真空室壁面温度为室温,此处取室温300K、液氮防辐射屏77K、液氮冷凝板4.2K进行计算分析。图3是装配完成后的后低温冷凝泵示意图。



1 - 液氮防辐射屏; 2 - 液氮板; 3 - 液氮通道; 4 - 液氮管

图2 液氮防辐射屏和液氮板的空布置

Fig.2 Space layout of liquid nitrogen anti-radiation shield and liquid helium plate

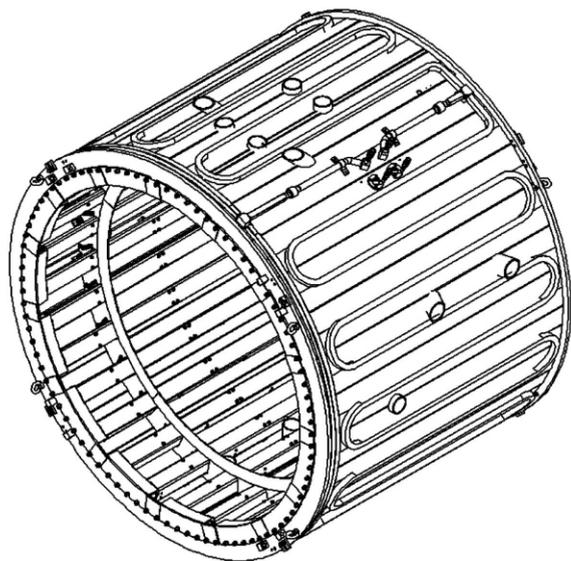


图3 后低温冷凝泵示意图

Fig.3 Structure schematic of rear cryopump

3 后低温冷凝泵热负荷分析

后低温冷凝泵的热负荷主要来自真空室的辐射、被冷凝气体载热等,为方便以后液氮、液氦耗量的计算及储槽的选择,下面分别分析计算液氮

防辐射屏和液氮板的热负荷。

3.1 液氮防辐射屏的热负荷

后低温冷凝泵液氮防辐射屏包裹着液氮板,既阻挡了室温真空筒壁对液氮板的辐射,又可防止气体分子直接与液氮板碰撞带来的大量热量产生。针对防辐射屏的工作环境,对其进行热负荷分析。

3.1.1 室温筒壁对液氮防辐射屏的辐射热

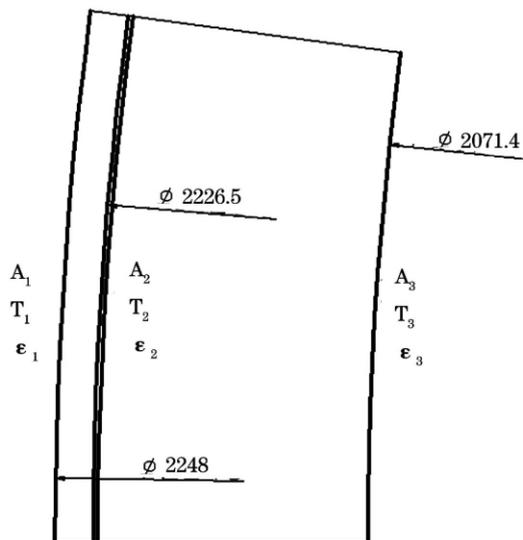


图4 计算筒壁对防辐射屏的辐射热模型

Fig.4 Model for calculating radiant heat

建立如图4所示模型来计算筒壁对防辐射屏的辐射热,从外到内依次是室温筒壁、两层铝制遮热板、液氮防辐射屏。液氮防辐射屏吸收的辐射热量 Q_1 为

$$Q_1 = \frac{\sigma_b (T_1^4 - T_3^4)}{R_{13}} \tag{1}$$

其中 R_{13} 为真空室壁与液氮防辐射屏间的辐射热阻,因两层遮热板间隔仅为0.5mm,面积相差无几,当做面积相同来处理,均为 A_2 。用下式计算

$$R_{13} = \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{X_{12} A} + 2 \left(\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2} + \frac{1}{X_{23} A_2} \right) + \frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 A_3} \tag{2}$$

此处 σ_b 为斯蒂芬-波尔兹曼常数,取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k}^4)$; ϵ 为材料的发射率,取值与材料的种类及表面状况有关; A 为面积。

为了后续计算需求解两遮热板温度 T_2 和 T_2'

$$q = \frac{\sigma_b (T_1^4 - T_2^4)}{R_{12}} = \frac{\sigma_b (T_1^4 - T_2'^4)}{R_{12}'} \tag{3}$$

q 为辐射热流密度, R_{12} 为真空室壁与第一层遮热板间的辐射热阻, $R_{1'2}$ 为真空室壁与第二层遮热板间的辐射热阻。

3.1.2 气体导热

真空室壁与遮热板之间、遮热板与 77K 防护屏之间的空间存在没有凝结, 正不断运动的气体分子(主要是氢和氦), 如果气体各部分温度不同, 由于气体分子的热运动, 便发生了能量交换, 使较冷部分获得能量。

对液氮防辐射板而言, 导热主要来自遮热板与 77K 防护屏所形成空间中残余气体携带的能量。

对后低温冷凝屏区域的气体分子流态做判断, 遵从下列判断依据^[1]

$$\frac{\lambda}{D} > 1 \text{ 为分子流}$$

$$\frac{\lambda}{D} < 0.01 \text{ 为粘滞流}$$

$$0.01 < \frac{\lambda}{D} < 1 \text{ 为粘滞 - 分子流}$$

其中 $\lambda = \frac{KT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P}$, 式中 K 为波尔兹曼常数, 1.380662×10^{-23} J/K; T 是气体的热力学温度, 取 152K; σ 是气体分子的直径, 为 2.75×10^{-10} m; p 是气体的压力, 4×10^{-2} pa; D 为气体流经管道的直径, 取为遮热板与 77K 防护屏所形成空间的当量直径 0.038m。

$$\frac{\lambda}{D} = 11.38 > 1$$

根据上面的计算可知此处的气流状态为分子流。

气体的导热传热量 Q_2 可按下式粗略计算^[2]

$$Q_2 = \Lambda P \frac{\alpha}{2 - \alpha} (T_2' - T_3) A \quad (4)$$

式中系数 Λ 是分子流的热导率, 与绝热指数和温度有关; α 为温度适应系数; A 为两层板的对数平均面积

$$A = \frac{\pi 1 (d_3 - d_2')}{\ln \frac{d_3}{d_2}} \quad (5)$$

d_3 和 d_2 分别为液氮防辐射屏和内层遮热板的直径。

3.1.3 被冷却气体载热

按照上述分析层间气流状态的方法分析后低

温冷凝屏腔内的流态, 经计算, 也为分子流。此处将其简化为理想气体处理。

NBI 综合测试台真空系统的气体负载主要来自两方面: 由中性化室出口进入真空室的气体和中性束的部分粒子与束流限制器、离子吞食器等处的壁面碰撞产生的气体。总的气体负载为 Q_v 。

被冷却的气体载热 Q_3

$$Q_3 = \frac{Q_v}{\Delta p} \cdot \rho \cdot \Delta h \text{ (W)} \quad (6)$$

Δp 为驱动气体分子向冷凝面运动的压差; ρ 为气体分子的平均密度, 由理想气体状态方程 $P = \rho R_g T$ 可求出 ρ , Δh 为氢气从 750K^[4] 到 4.2K 的比焓差^[3]

$$\Delta h = \int_{77}^{750} c_p dT = \int_{77}^{750} c_v \cdot \gamma dT \text{ (J/kg)} \quad (7)$$

其中 c_v 为氢气的定容比热容, γ 为氢气的绝热指数。

3.1.4 固定连接件的导热和导线传导漏热

后低温冷凝屏由 16 根细长不锈钢杆将其固定在真空室内侧, 且独特的设计保证了不锈钢杆两端固定处为线接触, 导热热阻很大, 故将此部分导热热量忽略。

低温冷凝屏 LN₂ 系统的温度测量使用 Pt100 型温度计, 温度计的测量引线紧贴在壁上, 最后由法兰引到真空系统的外边。这种引线方式增加了室温到 LN₂ 温度的传热距离, 增大了导热热阻, 减少了通过引线漏入 LN₂ 系统的热量。通过计算, 引线传入 LN₂ 系统的漏热可以忽略不计。

3.2 液氮板的热负荷

3.2.1 液氮挡板的辐射热

由于液氮防辐射屏面对冷凝板的一侧形状复杂, 且温度区间跨度大, 传热计算过程中涉及到的材料热物性参数随温度变化大, 因此理论计算有一定难度。而有限元分析软件在解决这类问题时具有独特的优越性, 故此处的辐射问题用 Ansys 软件求解。

在分析以前, 先对模型进行简化, 简化的原则为: (1) 认为液氮防辐射屏外侧温度均匀, 为 77K; (2) 防辐射挡板和冷凝板为长薄壁结构, 轴向温差小, 且轴向没有复杂的结构变化, 所以忽略轴向温度变化, 只考虑径向传热, 故将三维实体简化为二维平面计算; (3) 液氮防辐射屏所包围区域为绝对的真空, 无影响壁面辐射传热的因素存

在;(4) 为了划分网格的方便,节省计算时间,将非辐射换热面结构尽量规则化,如去除细小沟槽;(5) 忽略对传热影响不大的细小结构,如冷凝板的吊挂件。简化后的模型如图 5 所示。

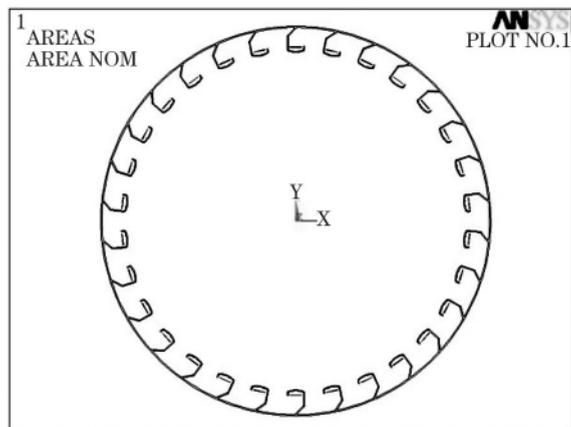


图 5 Ansys 中的模型图

Fig.5 Model created in software Ansys

3.2.2 被冷凝气体的载热

认为被冷凝的分子流有如下特性: 气体分子之间几乎不再发生碰撞,主要是气体分子与固体表面之间的持续碰撞;碰撞后的分子的平均动能由器壁温度决定;气体的流动靠分子密度梯度推动进行。

按照上述假设,气体分子经过与液氮防辐射屏碰撞后已基本处于液氮温度,它传给冷凝面的热量为以下两项之和^[4]:

第一,气体离开防辐射屏到达冷凝面,从 77K 降到 4.2K 温度时能量的变化。

$$Q_{77} = \Delta q \cdot \sigma \cdot Q_{H_2} \quad (8)$$

其中 σ 是 Santeler 型挡板的流导几率, Q_{H_2} 是到达冷凝面的氢气量(单位 Pa/l · s)。

第二,气体在 4.2K 冷凝面上凝结时传给冷凝面的热量:

$$Q_{4.2} = q \cdot \sigma \cdot Q_{H_2} \quad (9)$$

其中 q 为氢的凝结热。

3.2.3 吊挂件的导热和导线传导漏热

类似于液氮防辐射屏,此处忽略不计。

4 热负荷计算

4.1 液氮防辐射屏热负荷计算

对液氮防辐射屏而言,热负荷主要来自室温筒壁的辐射热、气体导热及被冷却气体载热,所以

其热负荷应是三者的代数和 $Q_N = Q_1 + Q_2 + Q_3$

真空室壁温度 T_1 取 300K,其材质为 6061 铝材,发射率 σ_1 为 0.7;液氮防辐射屏温度 T_3 取 77K,材质与真空室材质相同, $\sigma_3 = 0.7$;两层遮热板经过抛光处理,发射率 $\sigma_2 = 0.2$ 。各层的直径已在图 4 中标出,相应的面积 A_1 、 A_2 、 A_3 都可以算出。代入公式(1)、(2) 计算得 $Q_1 = 262.80W$,代入公式(3) 计算得 $T_1 = 277.26K$, $T_2 = 218.02K$ 。

计算 Q_2 ,取分子流的热导率 $\Lambda = 6.2W/m^2 \cdot K \cdot Pa$; 温度适应系数 $\alpha = 0.53$; 压强 $p = 4 \times 10^{-2} Pa$,代入公式(4)(5) 计算得到 $Q_2 = 135.30W$ 。

计算 Q_3 ,氢气的绝热指数 $\gamma = 1.408$,氢气的定压比热容 $c_p = 9657.88(J/kg \cdot k)$ ^[5],积分求解氢气从 750K 到 4.2K 的比焓差 $\Delta h = 9.15 \times 10^6(J/kg)$,然后将 Δh 代入公式(6) 计算 Q_3 ,气体负载 $Q_v = 2.90Pa \cdot m^3/s$,压差 $\Delta p = 2.72 \times 10^{-2} Pa$,密度 $\rho = 1.28 \times 10^{-8} kg/m^3$,经计算, $Q_3 = 13.38W$ 。

液氮防辐射屏的热负荷 $Q_N = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 411.47(W)$

4.2 液氮板热负荷的计算

在模拟计算液氮挡板辐射热的过程中,取 77K 液氮防辐射屏发射率为 0.7,4.2K 冷凝板发射率为 0.5,经计算得到辐射热流量为 $Q_{con} = 5.79W$ 。

热流分布如图 6 所示。

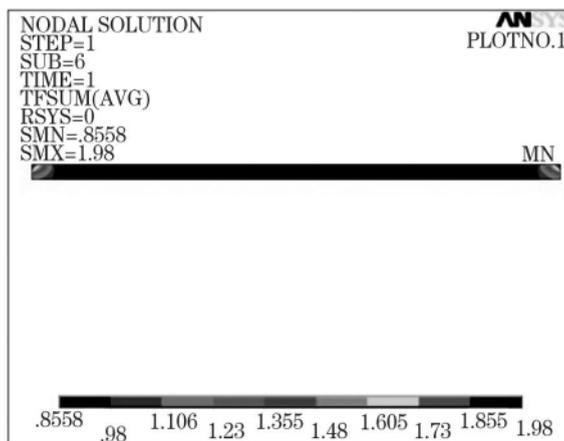


图 6 冷凝板热流分布图

Fig.6 Heat flux distribution of cold plate

冷凝气体载热分为两部分:冷却热和冷凝热。冷却热 Q_{77} 由公式(8) 计算,其 $\Delta q = 7.5 \times 10^{-4} J/$ (下转第 62 页)

- [2] Ma Xuehu, Chen Jiabin. Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant [J]. Applied Thermal Engineering, 2003(23): 797 - 806.
- [3] 武威, 解国珍. 利用多种余热的复合热源型溴化锂制冷机组特性分析 [J]. 船舶工程, 2009, 31: 79 - 84.
- [4] Aly S E. Gas turbine waste heat driven multiple effect absorption system [J]. Heat Recovery Systems & CHP, 1991, 11(5): 407 - 413.
- [5] Kannoh S. Heat recovery from warm waste water at dyeing process by absorption heat pump [J]. Heat Recovery Systems, 1982, 2(56): 443 - 451.
- [6] 戴永庆, 等. 溴化锂吸收式制冷技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [7] 朱明善, 等. 工程热力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [8] Kaushik S C, Arora Akhilesh. Energy and exergy analysis of single effect and series flow double effect water - lithium bromide absorption refrigeration systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2009(32): 1 247 - 1 258.
- [9] 吴业正, 等. 制冷与低温技术原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [10] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [11] Goswami D Y, Xu F. Analysis of a new thermodynamic cycle for combined power and cooling using low and mid temperature solar collectors [J]. J. Sol. Energy Eng., 1999, 121: 91 - 97.
- [12] 付林, 江亿. 从发电煤耗看热电冷联供系统的热经济性 [J]. 热能与动力工程, 1999, 14(79).
- [13] 李志亮, 金苏敏. 驱动热源温度对热管废热溴化锂机组制冷量的影响 [J]. 低温与超导, 2009, 37(3): 36 - 39.

(上接第22页)

Pa · 1, 挡板的流导几率 $\sigma = 0.7$, 到达冷凝面的氢气体量 $Q_{H2} = Q_v = 2.90 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$, 计算得 $Q_{77} = 1.52 \text{ W}$ 。冷凝热 $Q_{4.2}$ 由公式(9)计算, 氢的单位凝结热 $q = 3.68 \times 10^{-3} \text{ J/Pa} \cdot 1$, 最后得 $Q_{4.2} = 7.46 \text{ W}$ 。

液氮系统总的热负荷为以上各项“漏热”之和 $Q_{HE} = Q_{con} + Q_{77} + Q_{4.2} = 14.77 \text{ W}$ 。

5 结论

(1) 从上面的分析中可以看出, 热流最大处集中在液氮防辐射挡板的处和冷凝板的最外侧, 在降温或低温屏再生期间会对此处造成较大的冲击, 应注意此处的变形。分析中仅考虑的是液氮挡板对冷凝板的辐射, 没有考虑其他热载荷, 在所有载荷的共同作用下, 热流和温度分布都会有所变化。

(2) 两层遮热板的温度更接近于热边界(即真空室壁)。内层遮热板虽直接面向冷边界, 但是温度更接近隔着外遮热板的热边界。这意味着, 若是多层绝热, 将其贴附在热边界的绝热效果要好于将其贴附在冷边界^[1]。

(3) 经计算, 液氮系统的热负荷为 411.47 W , 可以为液氮储罐选型提供依据。遮热板对降低室温对液氮系统的辐射热效果显著, 辐射热的大小与材料表面状况及遮热板层数有关, 要降低室温

辐射, 可以采用两种方式: ①对真空室内侧、遮热板表面、液氮防辐射屏表面进行处理, 降低表面发射率; ②在有限空间内尽可能多的增加遮热板层数。为降低室温到低温壁面的导热系数, 可以在保证吊挂件强度的提前下, 增加吊挂杆件的长径比。

(4) 分析了液氮系统的热量来源并对其进行量化, 得到液氮系统的热负荷为 14.77 W , 为低温系统的设计及系统优化提供参考, 为热应力分析提供热流边界条件。

参考文献

- [1] 王绍良. 基于 M - C 方法的 NBI 实验装置真空压力分布研究及实验 [D]. 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2008: 13 - 14
- [2] 达道安. 真空设计手册 [M]. 第三版. 北京: 国防工业出版社, 2004: 77 - 78.
- [3] Kitatanni K, Kasuya T, Nakayama T, et al. Measurement of velocity distribution functions of neutral particles in ion source plasma [J]. Ion Source, 2002, 73: 959 - 960.
- [4] 张华顺. 离子源和大功率中性束源 [M]. 第一版. 北京: 能源出版社, 1987: 501 - 505.
- [5] 达道安. 真空设计手册 [M]. 第三版. 北京: 国防工业出版社, 2004: 64 - 65.
- [6] Shu Q S, Fast R W, Hart H L. Heat flow from 277K to 77K through a few layer of multilayer insulation [J]. Cryogenics, 1986, 26: 671 - 673.