

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器 低温板排气系统理论和实验研究

张素平, 潘高峰, 邢建升, 张天爵, 李振国, 秦久昌

(中国原子能科学研究院 串行加速器升级工程部, 北京 102413)

摘要:根据 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器的结构特点, 设计了一套大抽速低温板排气系统, 插入到 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器主磁铁谷区中, 该套排气系统将使 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器加速腔内真空度好于 5×10^{-6} Pa。目前该套低温板排气系统已设计完成, 用 Monte-Carlo 方法对其进行了优化, 并进行了加工、安装和初步调试, 调试时低温冷板上温度达 19 K, CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器加速腔内真空度达到 8×10^{-6} Pa。

关键词: CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器; 真空; 低温冷却系统; 大抽速; 插入式低温板排气系统; Monte-Carlo 模拟计算

中图分类号: TL542.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)02-0213-06

doi: 10.7538/yzk.2016.50.02.0213

Theory and Experiment Research of Cryopanel Exhaust System Used in CYCIAE-100 Compact Cyclotron

ZHANG Su-ping, PAN Gao-feng, XING Jian-sheng, ZHANG Tian-jue,

LI Zhen-guo, QIN Jiu-chang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-3, Beijing 102413, China)

Abstract: A set of large pumping speed tailored cryopanel exhaust system placed in CYCIAE-100 compact cyclotron magnet valley area was designed for high vacuum requirement, which makes pressure in the main tank better than 5×10^{-6} Pa. The Monte-Carlo method was used to optimize the designed structure based on the characteristics of magnet valley area. The machining and commission of cryopanel exhaust system has been done. After the first commission, the temperature on cryopanel reaches 19 K, and the pressure in CYCIAE-100 compact cyclotron main tank reaches 8×10^{-6} Pa.

Key words: CYCIAE-100 compact cyclotron; vacuum; cryogenic cooling system; large pumping speed; plug in cryopanel exhaust system; Monte-Carlo simulation

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器^[1-2]加速 好于 5×10^{-6} Pa, 根据加速腔内的气载计算得
负氢粒子时束流损失要求小于 0.5%, 真空度 到需要的有效抽速高达 140 000 L/s。而

收稿日期: 2015-07-22; 修回日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11275728)

作者简介: 张素平(1980—), 女, 河南尉氏人, 高级工程师, 博士, 核技术及应用专业

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器,由于结构尺寸的限制,其可用于真空抽气空间有限,仅有4个 $\phi 500$ mm主磁铁谷区抽气孔可用,4个抽气孔用外置泵无法达到所要求的抽速,所以本文在CYCIA-100紧凑型回旋加速器内部进行低温捕集气体,即内置低温板排气系统,从而实现大抽速、清洁超高真空环境。

1 低温板设计

1.1 低温板自由分子流状态时的抽速

低温板的抽速是指单位时间内从真空腔内流向低温板的净气体体积。低温板系统工作时,其内部的低温冷板要用挡板将其屏蔽起来,以减少低温板的热功率损耗,但挡板会相应地增加气体的流阻,降低气体温度,影响低温板的抽速。低温板在自由分子状态时的抽速,可用气体分子动力学理论计算,其计算公式^[3]为:

$$S_0 = ca\sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (1)$$

式中: S_0 为低温板的理论抽速,L/s; c 为捕获概率,可由式(2)计算^[4]; T 为被抽气体的温度,K; M 为被抽气体的摩尔质量,g/mol; R 为气体普适常数; a 为低温冷凝面的面积。

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{Pr} + \frac{1}{\omega} - 1 \quad (2)$$

式中: Pr 为粘附概率; ω 为气体分子从入口进入低温冷板表面的传输概率。 Pr 和 ω 均是与结构相关的参数,可通过追踪气体分子模拟计算得到。

1.2 低温板的抽速确定

抽速计算公式^[5-6]为:

$$S = Q/P \quad (3)$$

式中: S 为真空泵的有效抽速; Q 为系统气载; P 为真空室的真空度。

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器主真空系统的气载^[7]为 $0.7 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$,其中可凝性气载为 $0.6 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$,对于可凝性出气气载,真空度若小于 $5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$,根据式(3)可得出主排气设备对可凝性气体的抽速为 $120\,000 \text{ L/s}$,对于非可凝性气体的抽速约为 $20\,000 \text{ L/s}$ 。

1.3 Monte-Carlo 计算的不同低温板结构的 Pr 和 ω

根据 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器主磁铁谷区的形状,设计的低温板排气系统的

屏蔽板如图1所示。放置在屏蔽罩中的低温冷板如图2~4所示,均是根据CYCIAE-100紧凑型回旋加速器主磁铁谷区空间实际情况排布的低温冷板,用 Monte-Carlo 方法对图2~4的低温板系统进行模拟计算,可计算气体分子经挡板入口传输至低温冷板上的 Pr 及对应挡板的 ω ,再根据 Pr 和 ω 得到低温板系统的捕获概率。

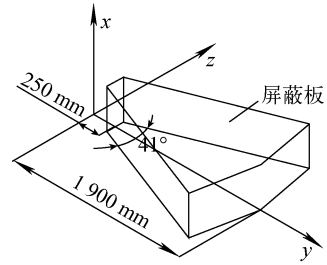


图1 屏蔽板示意图

Fig. 1 Schematic of shield plate

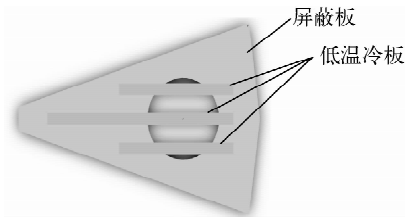


图2 屏蔽板与低温板系统1

Fig. 2 Shield plate and cryopanel system 1

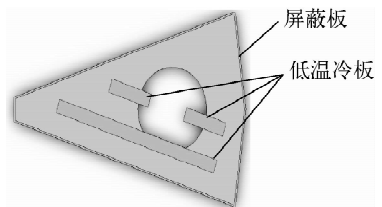


图3 屏蔽板与低温板系统2

Fig. 3 Shield plate and cryopanel system 2

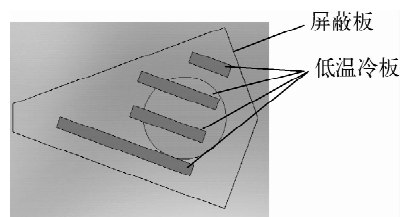


图4 屏蔽板与低温板系统3

Fig. 4 Shield plate and cryopanel system 3

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器低温板排气系统屏蔽板和低温冷板结构示意图如图 2~4 所示,屏蔽板的具体参数如下:高 420 mm、

半径 1 900 mm、长度 250 mm、角度 20°、入口面积 1.16 m²、入口流导 143 407 L/s,表 1 所列为采用 Monte-Carlo 方法计算的 Pr 结果。

表 1 低温冷板几何参数及其 Monte-Carlo 计算结果^[8]

Table 1 Parameter and Monte-Carlo calculation result of cryopanel^[8]

低温冷板	长/mm	宽/mm	高/mm	总表面积/m ²	Pr
1	1 300,800,800	70	350	2.23	0.606
2	1 200,300,300	80	350	1.4	0.473 6
3	1 200,650,700,350	70	350	2.23	0.573 7

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器低温板排气系统选取百叶窗作为低温冷板的挡板,百叶窗挡板结构如图 5 所示,图 5 中:A 为挡板片长;L 为挡板片宽;B 为挡板片之间的距离;C 为挡板片之间的重叠距离; θ 为挡板夹角。采用 Monte-Carlo 方法计算其传输概率^[9],计算结果如图 6 所示($C/B=1/6$),百叶窗挡板的透射系数计算结果如图 7 所示($\theta=45^\circ, A/B=30$)。

的结构形式,屏蔽板是根据 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器谷区定制(图 8),入口面积尽可能大,高压氦气在制冷机中膨胀制冷,传输管线将低温氦气传输至低温冷板冷却管中,将低温冷板冷却。为了减少冷量损失,挡板选择百叶窗挡板和人字形挡板相结合的形式(图 9),低温冷板阵列选择倒扣矩形的形式(图 10),低温冷板正上方用人字形挡板遮挡,倒扣矩形冷板片阵列之间采用百叶窗挡板,增加流导的同时,尽量减小透射系数。倒扣矩形低温冷板阵列之间为了防止通过挡板光子的直射,增加了中隔板,中隔板表面进行了涂黑处理。

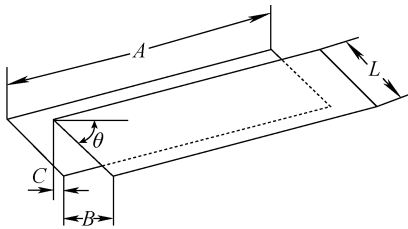


图 5 百叶窗挡板示意图

Fig. 5 Schematic of chevron baffle

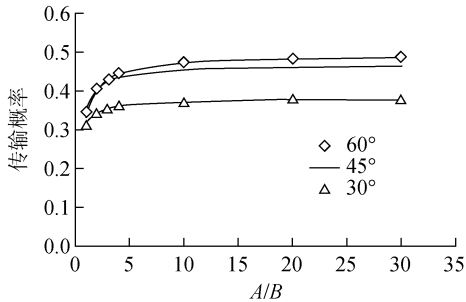


图 6 不同角度的百叶窗挡板的传输概率

Fig. 6 Chevron baffle transmission rates under different angles

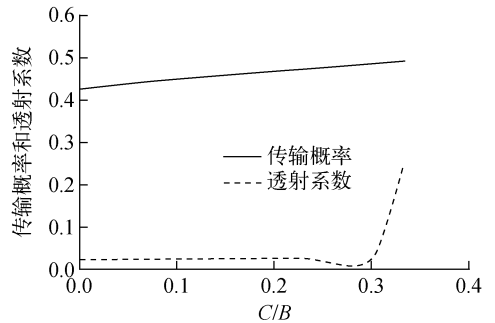


图 7 百叶窗挡板的传输概率和透射系数

Fig. 7 Transmission rate and transmission coefficient of chevron baffle

表 2 几种低温冷板的捕获概率

Table 2 Capture rates of different cryopanel

图号	低温冷板长/mm	Pr	传输概率	捕获概率
2	1 300,800,800	0.606	0.45	0.33
3	1 200,300,300	0.473 6	0.45	0.30
4	1 200,650,700,350	0.573 7	0.45	0.321

表 2 列出 3 种低温冷板的捕获概率计算结果,根据上述计算,选择图 4 作为低温冷板

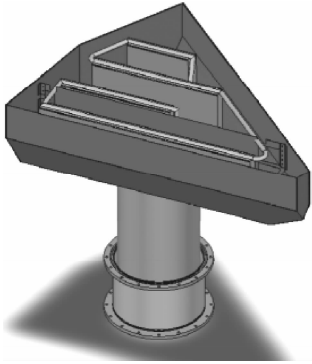


图8 低温板系统组装图

Fig. 8 Assembly of cryopanel system



图9 百叶窗挡板截面图

Fig. 9 Section of chevron baffle

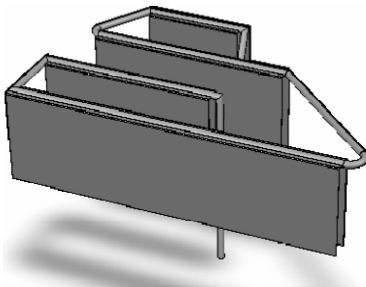


图10 低温冷板及其冷却管路

Fig. 10 Cryopanel and its cryoline

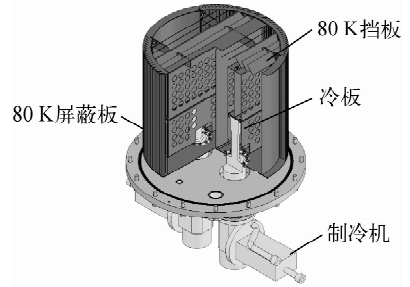


图11 实验低温板系统结构

Fig. 11 Structure of experimental cryopanel system

2.2 实验低温板性能测试

实验低温板系统性能测试罩如图12所示,抽速测试采用定压法,测试罩中高真空测量采用BA规(ZJ-12),测量范围为 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-2}$ Pa,低真空测量采用电阻规(ZJ-52T),测量范围为 $1.0 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^5$ Pa,配置ZDF-5214真空计。

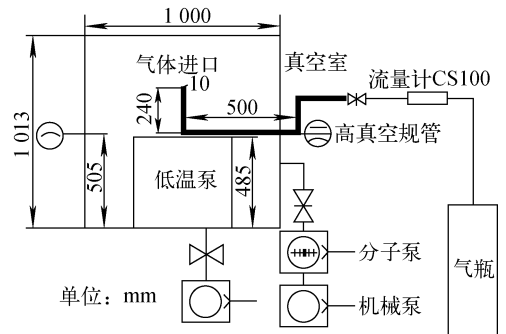


图12 实验低温板系统测试罩示意图

Fig. 12 Test dome for experimental cryopanel system

2 实验验证

为了对CYCIAE-100紧凑型回旋加速器低温板排气系统的设计及Monte-Carlo的模拟计算进行验证,设计了一套实验低温板抽气装置,采用内置式,对氮气的抽速为15 000 L/s,低温板实验系统的设计极限压力为 5×10^{-6} Pa。

2.1 实验低温板装置

实验低温板系统^[10-11]的结构如图11所示,该低温板系统有2块低温冷板、1块挡板、1个半开放式的屏蔽罩、2个GM制冷机,通过接管固定在安装法兰上。根据冷板、屏蔽板和挡板的热负荷计算结果,该低温板系统可采用2台美国CVI公司生产的CGR411双级制冷机,每台制冷机可提供一级83 W@80 K、二级7.5 W@20 K的制冷功率。

2.3 测试结果

1) 极限真空

低温板系统连续运行24 h,测试罩中的压力测试结果如下:低温板系统中低温冷板上没粘活性炭时,分子泵(80 L/s)和低温板组合工作,经24 h后,测试罩中压力为 7.2×10^{-6} Pa,当关闭插板阀时,测试罩中的压力明显上升;低温冷板上粘有28 g椰壳活性炭时,打开制冷机4 h后关闭分子泵口插板阀,经24 h后,测试罩中压力为 5.8×10^{-6} Pa。

2) 抽速

抽速测量采用CS100流量计控制进入测试罩中的气体量,对氮气的测试结果如图13、

14 所示。图 13 中,○表示低温冷板没粘活性炭工作时对氮气的抽速曲线,平均抽速为 14 500 L/s;△表示双冷板,其中 1 个内侧粘有 28 g 椰壳活性炭的抽速曲线,平均抽速为 15 000 L/s;□表示单冷板对氮气的平均抽速为 9 000 L/s。低温冷板系统粘有活性炭后对氮气和氢气的抽速如图 14 所示,氮气和氢气的平均抽速分别为 16 000 L/s 和 12 000 L/s。

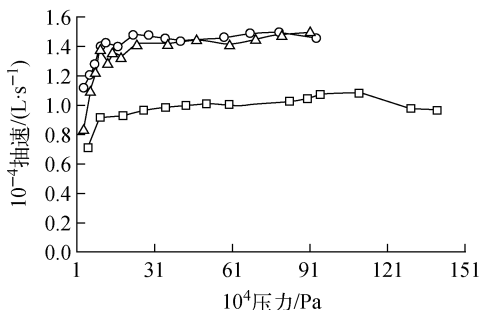


图 13 不同低温冷板组合的压力抽速曲线

Fig. 13 Pumping speed curves of different cryopanel

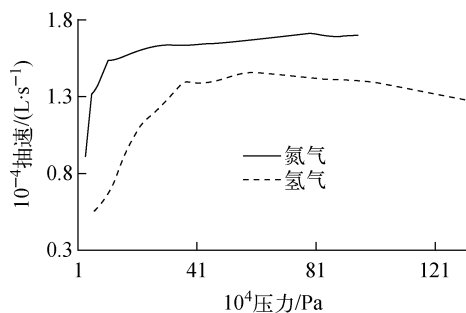


图 14 双低温冷板对不同气体的抽速曲线

Fig. 14 Cryopanel pumping speed for different gases

3) 低温冷板上温度分布

经 4 h 后,低温冷板上端、冷板上部中间温度分别为 17.25 K、18.19 K;屏蔽罩中部和屏蔽罩上端温度分别为 65.14 K、66.35 K,两者差别不大;挡板上的温度为 82.64 K;制冷机一级冷头处温度和中间隔板上的温度分别为 49.03 K 和 57.42 K,测试结果表明,350 mm 高的冷板片上温差小于 1 K。

3 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器低温板排气系统调试

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器低温板排

气系统示意图如图 15 所示,低温板排气系统所需制冷机采用斯特林制冷机 SPC-4T,利用 4 个双级冷头膨胀制冷,将低温氦气通过传输管线传输至低温冷板冷却管路中,对低温冷板进行降温。低温传输管线采用真空多层绝热结构,包括 20 K 高压氦气传输管线、80 K 高压氦气传输管线,传输管线材料均为不锈钢,漏热小于 1 W/m。20 K 及 80 K 管线的外表面用多层绝热材料绕制,为了防止多层绝热材料与外管内壁表面直接接触而使热传导增加,还需在 20 K 及 80 K 传输管线与外管内壁之间设置支撑。

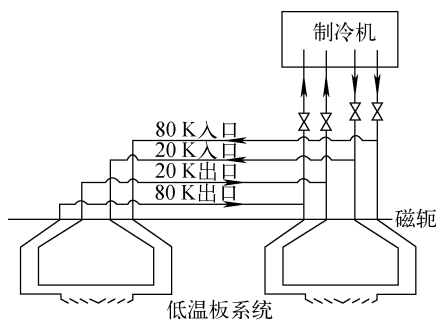


图 15 低温板排气系统示意图

Fig. 15 Schematic of cryopanel exhaust system

CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器低温板排气系统调试条件为:1) 制冷机的静态工作压力为 1.9×10^6 Pa;2) 制冷机及传输管线循环管路压力为 1.2×10^6 Pa;3) CYCIAE-100 回旋加速器的高频及磁场均未开;4) 传输管线的温度传感器为半导体温度传感器,测量范围为 4.2~333 K,温度指示采用东方晨景 218E 温度指示仪。低温冷板降温曲线如图 16 所示。

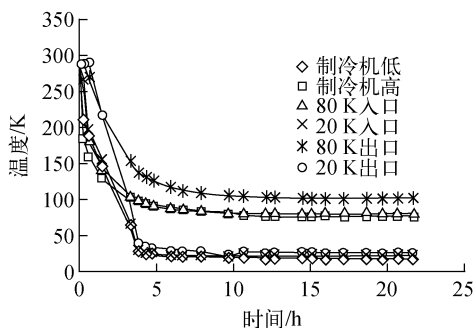


图 16 低温冷板降温曲线

Fig. 16 Cooling curve of cryopanel

低冷温板的降温时间为 16 h, 制冷机自身的一级和二级温度最低分别为 76.2 K 和 18.4 K, 传输管线 80 K 入口和出口的温度分别为 79.4 K 和 101.5 K, 20 K 入口和出口的温度分别为 21.3 K 和 25.66 K, 真空度从 4.6×10^{-4} Pa 降低至 8×10^{-6} Pa。

4 结论

本文基于 Monte-Carlo 方法设计了 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器低温排气系统, 并建立了一套实验装置, 测试了实验低温板排气装置抽速、极限压力、降温时间、抽气容量等参数, 为 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器大抽速、插入式低温排气系统提供了理论和实验数据支持, 验证了 CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器低温排气系统的理论设计。CYCIAE-100 紧凑型回旋加速器大抽速、插入式低温排气系统初步调试结果表明, 低温冷板工作温度在 20 K 左右, 主真空室的真空度可达 8×10^{-6} Pa, 满足了束流初步调试需求。

参考文献:

[1] 张天爵, 李振国, 储诚节, 等. 用于放射性核束设施驱动加速器的 100 MeV 强流质子回旋加速器[J]. 高能物理与核物理, 2006, 30(2): 159-161. ZHANG Tianjue, LI Zhenguo, CHU Chengjie, et al. 100 MeV high intensity proton cyclotron as a driving accelerator for the radioactive ion beam facility[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, 30(2): 159-161(in Chinese).

[2] 李振国. 100 MeV 真空系统初步设计[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007.

[3] 高香院. 现代低温泵[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.

[4] KUSH G. International symposium on "vacuum sci-

ence and technology"[C]. India: [s. n.], 2007.

[5] 杨乃恒. 真空获得设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987: 56-60.

[6] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 416-420.

[7] 潘高峰, 张素平, 李振国. HI-13 串列加速器升级工程 CYCIAE-100 回旋加速器主真空系统设计报告[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2009.

[8] 张素平, 潘高峰, 张天爵, 等. CYCIAE-100 回旋加速器低温冷板参数的蒙特卡罗模拟[J]. 原子能科学技术, 待发表. ZHANG Suping, PAN Gaofeng, ZHANG Tianjue, et al. Monte-Carlo simulation of cryopanel parameter in CYCIAE-100 cyclotron[J]. Atomic Energy Science and Technology, in press(in Chinese).

[9] 彭楠, 熊联友, 张亮, 等. 低温真空泵辐射挡板流导几率的计算[J]. 低温工程, 2006, 154(6): 21-24. PANG Nan, XIONG Lianyou, ZHANG Liang, et al. Calculation of transmission probability of cryopump radiation baffle[J]. Cryogenics, 2006, 154(6): 21-24(in Chinese).

[10] 张素平, 张天爵, 潘高峰, 等. 插入式低温冷板模拟抽气系统设计和实验[J]. 真空与低温, 2015, 21(3): 177-180. ZHANG Suping, ZHANG Tianjue, PAN Gaofeng, et al. The design and test of plug-in cryopanel simulated pumping system[J]. Vacuum & Cryogenics, 2015, 21(3): 177-180(in Chinese).

[11] 潘高峰, 张素平, 张天爵, 等. 实验低温冷板抽气装置性能测试及分析[J]. 真空, 2015, 52(3): 1-4. PAN Gaofeng, ZHANG Suping, ZHANG Tianjue, et al. Performance test and analysis of experimental cryopanel pumping system[J]. Vacuum, 2015, 52(3): 1-4(in Chinese).