

# 强背景磁场下分子泵磁屏蔽体的设计与研究

朱晓锋\* 张素平 关镭镭 潘高峰 王胜龙 张天爵  
(中国原子能科学研究院 回旋加速器研究设计中心 北京 102413)

## Design and Research of a Magnetic Shield for Turbo-Molecular Pump under Strong Stray Magnetic Field

ZHU Xiaofeng\*, ZHANG Suping, GUAN Leilei, PAN Gaofeng, WANG Shenglong, ZHANG Tianjue  
(Research and Design Center of Cyclotron, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** Currently, a 230 MeV superconducting cyclotron is under development at China Institute of Atomic Energy. The superconducting main magnet of this cyclotron is optimized to be ultra-compact to be installed in the hospital, thus inevitably has larger magnetic leakage at the turbo pump installation ports, where the magnetic flux density reaches 1000 Gauss, which is 20 times larger than the turbo pump's safe operation limit (within 50 Gs). This may further cause the malfunction of the turbo pumps. To solve this problem, a sophisticated magnetic shielding is designed using a 3D FEM model. Then a careful measurement of the magnetic flux density after shielding is performed, and the results show that the residual field within the shielding is limited below 50 Gauss. Further monitoring of the turbo pump operation parameters, like the driving current, the temperature of the turbo bearing, etc., show a good agreement with the non-magnetic working condition.

**Keywords** Vacuum system, Magnetic shield, Turbo-molecular pumps, Stray magnetic fields

**摘要** 中国原子能科学研究院目前正在研制一台230 MeV超导回旋加速器,该回旋加速器未来是安装于医院应用于质子治疗,采用了非常紧凑型的超导磁体结构设计。其分子泵所安装位置有非常大的漏磁场,其漏磁场强度达到1000 Gs,是分子泵安全运行阈值(50 Gs)的20倍,导致分子泵不能正常工作。为了解决这个问题,首先进行了分子泵磁屏蔽体的结构设计,以及3D有限元仿真分析计算,然后开展对不同分子泵磁屏蔽体内的磁场进行详细测量,结果表明磁屏蔽体内部的剩磁场均小于50 Gs,且分子泵实际长时间运行过程中监测分子泵运行参数电流、轴承温度、转子温度、加速时间均与无磁场时运行参数一致。

**关键词** 真空系统 磁屏蔽 分子泵 剩磁场

中图分类号:TL542-1

文献标识码:A

doi:10.13922/j.cnki.cjvst.202106012

近年来随着脂润滑和磁悬浮分子泵广泛的应用,与其“清洁”特性、无储存效应以及振动小等特点,成为在高真空和超高真空的应用工程领域里真空获得重要设备之一<sup>[1]</sup>。但分子泵在粒子加速器与束流传输的真空系统应用中,分子泵通常都是安装在磁体附近,其附近的剩磁会影响到分子泵的正常运行。

随着超导技术的发展,越来越多的粒子加速器采用更加紧凑的超导磁体获得更高的磁场。目前我院正在研制应用于质子治疗的230 MeV超导回旋加速器,其直径仅为3.2 m,中心磁场高达2.3 T<sup>[2]</sup>。

加速器主磁铁外围安装的附属设备如分子泵、真空规、四级质谱计等真空设备,由于剩余磁场的影响导致这些真空设备的运行不稳定或测量数值不可靠,甚至设备的损坏等。例如高速旋转的分子泵,其叶片由于切割磁场产生涡流,会造成叶片发热和叶片的线膨胀,最终会造成叶片损坏、碎泵等风险<sup>[1,3]</sup>;旋转的叶片在场中会受到洛伦兹力,而产生额外的扭矩损耗,增加泵额外负载,降低分子泵有效抽速<sup>[4]</sup>。

为了保护230 MeV超导回旋加速器真空设备免受磁场环境的影响,在设备结构尺寸和运行环境要

求基础之上,设计一套分子泵磁屏蔽体,屏蔽分子泵周围的主磁铁漏磁场。本文采用DT4低碳钢材料,通过有限元仿真计算,设计定制了一套230 MeV超导回旋加速器真空泵专用的磁屏蔽体,并和实验测试结果进行了比对。

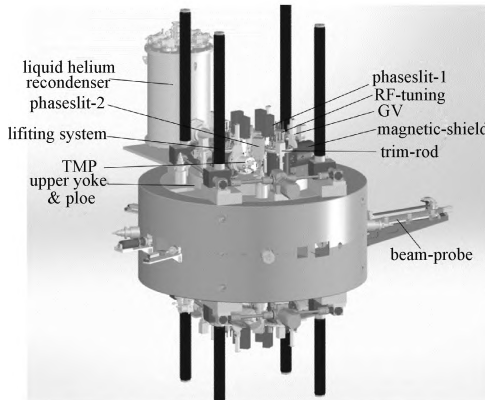
### 1 超导回旋加速器

加速器真空系统是减少粒子在加速过程中与残余气体分子碰撞而造成的束流损失和影响束流品质(发散度、能散度)<sup>[5-6]</sup>。230 MeV 超导回旋加速器物理设计要求加速器主真空室的基础压力低于 $2 \times 10^{-4}$  Pa、工作压力低于 $5 \times 10^{-4}$  Pa 的清洁少油高真空系统,并且要求其从大气压状态下抽气四小时之后达到基础压力。依据上述的真空设计要求,真空系统采用分子泵作为加速器的主泵,多级罗茨泵作

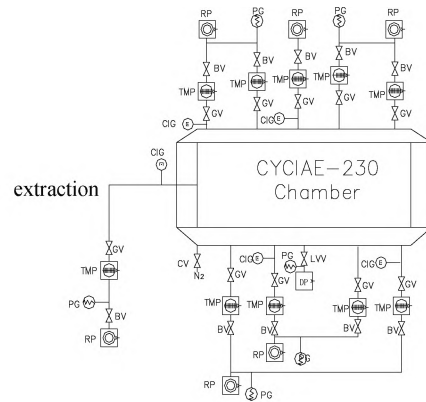
为预抽真空泵,旋片泵作为分子泵前级泵的真空系统设计方案。其在加速器上的布局以及真空系统原理图,如图1所示。

在主磁铁满电流状态,即满励磁状态下,采用霍尔效应法(利用霍尔感应探头)进行测量了分子泵所处位置的漏磁场强度。获得分子泵所处位置沿加速器轴向(即Z方向)的漏磁场强度变化曲线,漏磁场强度沿加速器轴向逐渐递减趋势,如图2所示。

230 MeV 超导回旋加速器整体结构紧凑,其外围需安装部件较多,如相位选择,磁场调谐,高频调谐以及离子源等部件,如图1所示。同时考虑与其他相关设备实现空间错位布局,因此选择分子泵安装的位置距离加速器中心平面1350-1650 mm,分子泵附近漏磁场强度介于850-1000 Gs。



(a) the 3D scheme of the cyclotron



(b) the schematic diagram of the vacuum system

注:TMP:分子泵;RP:旋片泵;DP:多级罗茨泵;BV:前级真空阀;GV:高真空插板阀;CV:放气阀;LVV:低真空阀;PG:皮拉尼真空计;CIG:冷阴极电离真空计

图1 (a),(b)分别为加速器三维布局图与真空系统原理图

Fig.1 (a) and (b) are the 3D scheme of the cyclotron and the schematic diagram of the vacuum system

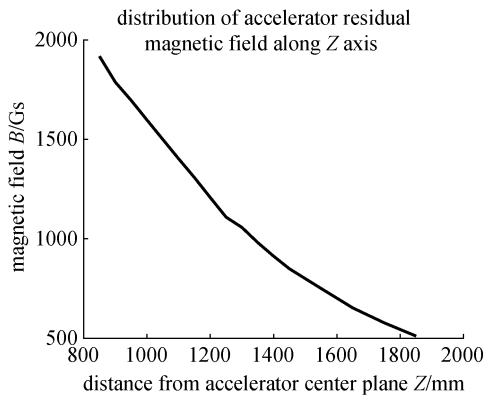


图2 加速器周围漏磁场分布

Fig.2 Stray magnetic fields around the cyclotron

### 2 磁屏蔽体的设计

磁屏蔽体是利用具有高磁导率 $\mu$ 的铁磁材料做成屏蔽罩屏蔽外磁场,以保护内部部件免于外界的磁场影响,其原理可以用磁路的概念来说明,通常把铁磁材料与空腔中的空气作为并联磁路来分析<sup>[7]</sup>。因为铁磁材料的磁导率比空气的磁导率要大几千倍,所以空气的磁阻比铁磁材料的磁阻大得多,外磁场的磁感应线的绝大部份将沿着铁磁材料壁内通过,而进入空气的磁通量极少。这样,被铁磁材料屏蔽的空腔中就基本上没有外磁场,从而达到静磁屏蔽的目的<sup>[8]</sup>。

一般屏蔽体的结构是采用圆形或无限长的圆柱体几何形状,是由于磁力线偏转90°是相对困难的。相对于采用长方体的屏蔽体,采用圆柱体或是具有圆形角的屏蔽体更加容易改变磁力线的方向。因此在磁屏蔽体设计中一般基于以下原则:(1)保持可提供低磁阻路径的屏蔽体形状简单或磁场运动的“最低磁阻路径”;(2)材料的磁导率愈高,筒壁愈厚,屏蔽效果就愈显著;(3)屏蔽体应足够长并尽量减少不必要的开口。

基于上述磁屏蔽体的设计原则,且由于230 MeV超导回旋加速器分子泵所处位置漏磁场强度介于850-1000Gs,分子泵运行环境磁场要求低于50Gs。度量磁屏蔽体的屏蔽性能的好坏,通常用屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)来表示,单位为dB。两种场分别在具有同一波阻抗的同一介质中进行测量,其效能计算方程为

$$SE=20\lg(Hb/Ha)$$

式中,  $Hb$  为安装屏蔽体前的磁场强度,  $Ha$  为安装屏蔽体后的磁场强度。

屏蔽效能  $SE$  越大,表明材料的磁屏蔽效果越好。所以要求磁屏蔽体屏蔽效能大于25 dB<sup>[9]</sup>。从屏蔽效率和经济成本方面,选择DT4低碳钢进行磁屏蔽体的结构设计、有限元仿真计算,并对设计结果进行了实验测试。DT4低碳钢的B-H曲线,如图3所示。

结合加速器空间结构布局,以及分子泵结构参数,如表1所示,进行磁屏蔽体的结构初步设计,确定磁屏蔽体基本结构参数设计范围,以此为基础进

行不同磁屏蔽体的有限元仿真计算。

为了更加准确描述磁屏蔽体的结构,定义以下几个参数进行描述:直径  $d$ , 长度  $l$ , 转子工作区长度  $l_1$ , 见图4(a)。

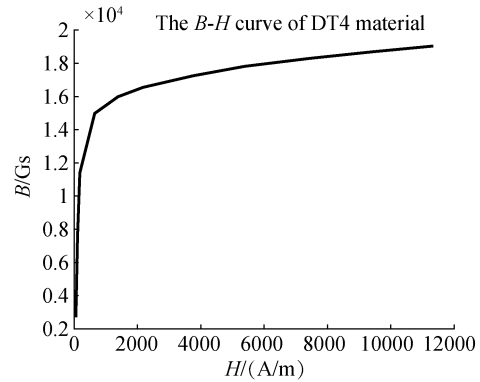


图3 DT4低碳钢的BH曲线

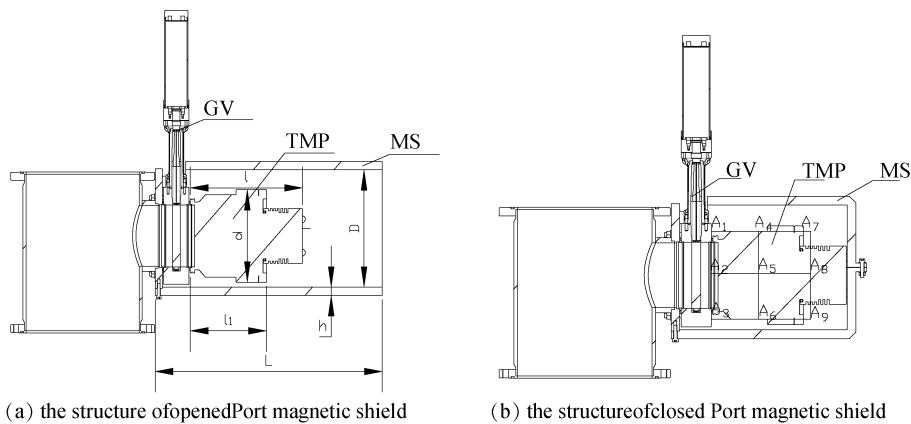
Fig.3 The BH curve of DT4 mild steel

表1 分子泵结构参数

Tab.1 The structure parameters of turbo-molecular pump

直径 $d$ /mm	长度 $l$ /mm	转子长度 $l_1$ /mm
225	317	201

在分子泵的磁屏蔽体的设计中,磁屏蔽体的结构通常包含两种形式<sup>[10]</sup>,其一为两端均为开口的形式,如图4(a)所示,该结构由于是敞口式结构,有利于内部设备空气对流散热,但其结构尺寸相对较大;其二为一端为封闭,一端是开口形式,如图4(b)所示,该种结构不利于内部设备的以空气对流方式散热,需要采用水冷散热方式,可以实现与设备相匹配的紧凑型结构设计。



注:TMP:分子泵;GV:高真空插板阀;MS:磁屏蔽体

图4 分子泵磁屏蔽体的结构形式

Fig.4 The structure of TMP magnetic shield

综合考虑到加速器安装空间以及整体结构紧凑型要求,分子泵选择为水冷冷却方式,磁屏蔽体采用了图4(b)封闭端口的结构形式,在其末端分别开有电源线孔、前级管道孔、水冷管孔。

### 3 磁屏蔽体的有限元仿真计算

在确定磁屏蔽体的结构形式,采用有限元方法进行仿真计算和优化磁屏蔽体的结构参数,使其屏蔽体内部的磁场小于 50 Gs,满足分子泵正常运行条件。

影响磁屏蔽体的磁屏蔽效能的结构参数,主要包括材料磁导率 $\mu$ 、磁屏蔽体的内径 $R$ 、长度 $L$ ,厚度

$h$ 。考虑到内径 $R$ 、长度 $L$ 均与分子泵的尺寸、加速器的安装空间有关,可改变范围较小,以及其变化对磁屏蔽体效能影响相对较小<sup>[10]</sup>。因此设定磁屏蔽体不同厚度 $h$ 作为主优化参数,并在设计中选择DT4低碳钢作为磁屏蔽体的材料,其 $B-H$ 曲线见图3,并设定在垂直于磁屏蔽体轴线方向,加载磁场强度载荷为1000 Gs,进行有限元仿真计算。分别设定磁屏蔽体厚度 $h$ 为5, 10, 15, 20 mm,计算结果如图5所示。从计算结果可知,5, 10, 15 mm的磁屏蔽体内磁场均大于50 Gs,20 mm后的磁屏蔽体内部剩磁小于50 Gs,满足分子泵运行环境磁场强度要求。

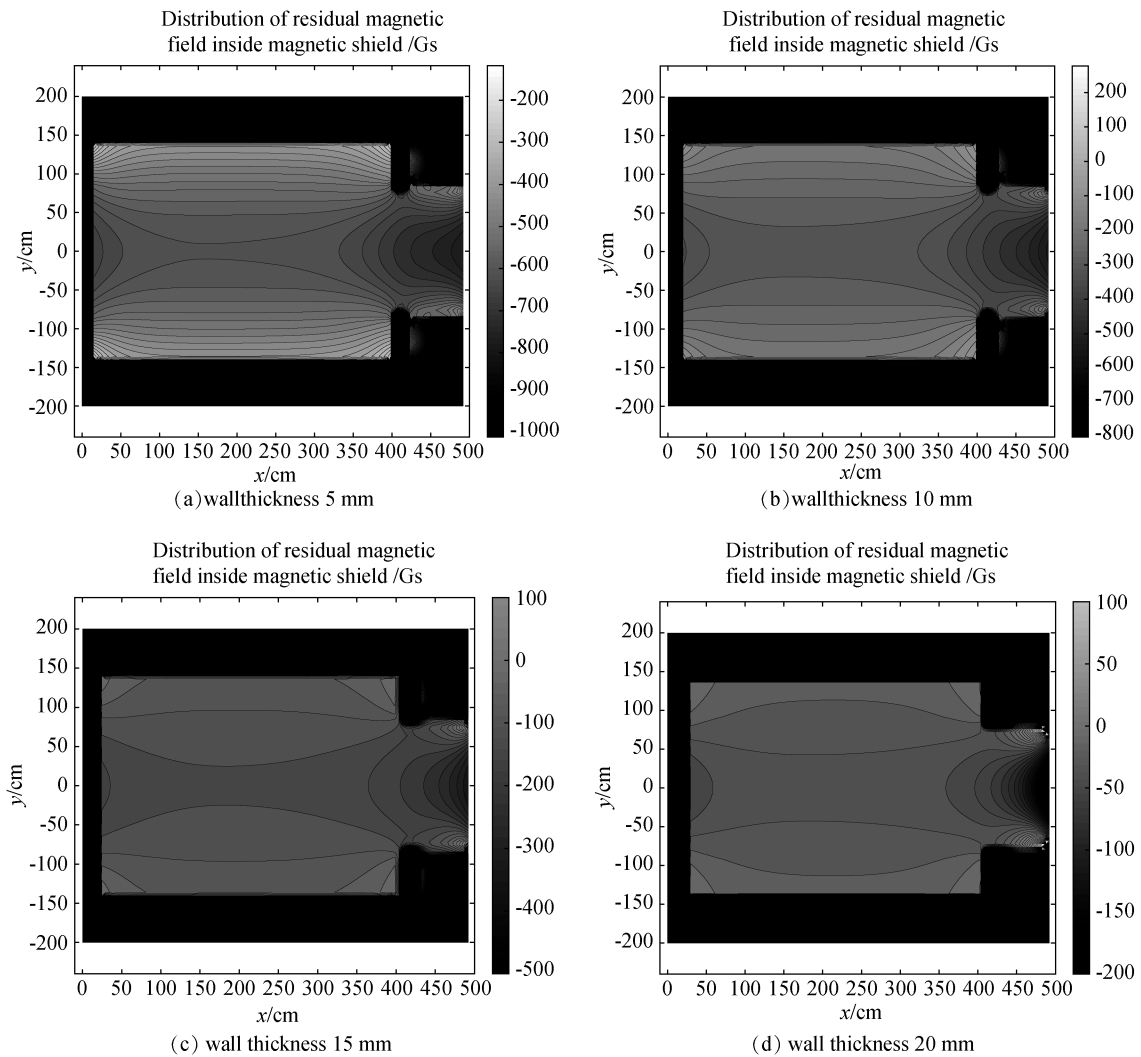


图5 磁屏蔽内部磁场分布

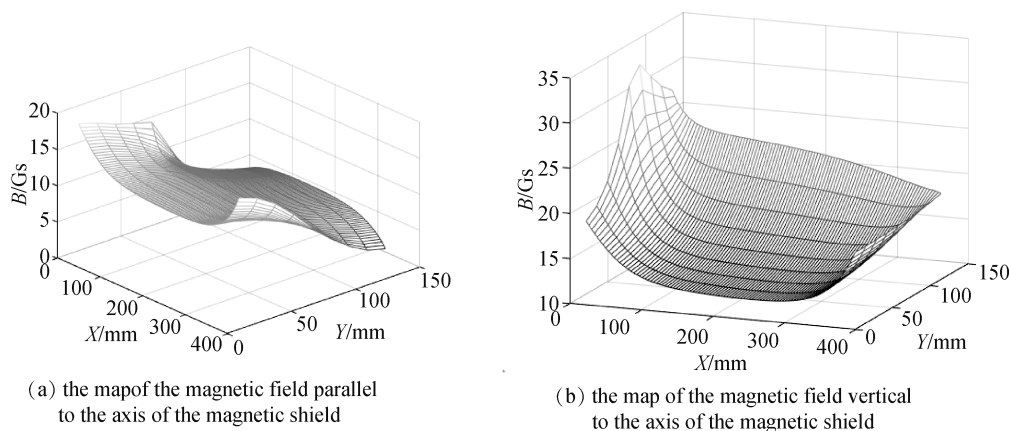
Fig.5 Magnetic field map inside magnetic shield

上述的计算结果未考虑磁屏蔽体上所需开电源线孔、前级管道孔、水冷管孔,开孔只会影响其附

近磁场强度,由于开孔位置离分子泵转子位置相对较远,几乎不会影响磁屏蔽体的屏蔽效果。并采用

一定的余量保守设计原则,选用20 mm厚的磁屏蔽体,其内部平行于分子泵磁屏蔽体轴线和垂直于分

子泵磁屏蔽体轴线的剩余磁场计算分布如图6所示。



(a) the map of the magnetic field parallel to the axis of the magnetic shield

(b) the map of the magnetic field vertical to the axis of the magnetic shield

图6 磁屏蔽内部界面上磁场

Fig.6 Magnetic field on the internal interface of the magnetic shield

## 4 实验测试

分子泵在磁场环境下运行的负载主要是气载和扭矩损耗(洛伦兹力),其负载的大小通过分子泵的电流、轴承温度、真空度、转子温度以及加速时间等特征值进行表征。其中电流是最直观的特征值,电流与负载呈现正相关性;轴承温度是表征转子在受到不均衡的洛伦磁力时,造成轴承升温的累积效应;真空度表征分子泵对真空腔体的抽气速度;转子温度是表征转子在切割磁场产生涡流的累积效应,加速时间是表征由于洛伦兹力产生的额外扭矩损耗增加电机的加速时间。因此在本实验中,本文首先采用霍尔效应法进行测量了磁屏蔽体内部的剩磁情况,以及相对应位置的磁屏蔽体的仿真计算值,均满足分子泵正常运行的条件。然后在同样的真空系统的气载条件下,分别测量分子泵在有、无磁场下的电流、轴承温度、真空度、转子温度、加速时间,验证磁屏蔽体的效能。

### 4.1 磁屏蔽体剩磁测量

将分子泵磁屏蔽体安装在230 MeV超导回旋加速器,磁屏蔽体内部不安装分子泵,将磁场测量装置固定于磁屏蔽体内部,在加速器主磁铁满励磁状态下,采用霍尔效应法进行磁屏蔽体内部磁场测量,分子泵所处位置均小于50 Gs,磁屏蔽效能高于25 dB。由于实际磁屏蔽体有局部开孔与安装误差,导致实测磁场高于仿真磁场。测量位置见图4(b)上的标注的各点,内部剩磁测量情况如表2所示。

表2 磁屏蔽体内部剩磁

Tab.2 Magnetic fields inside the magnetic shield

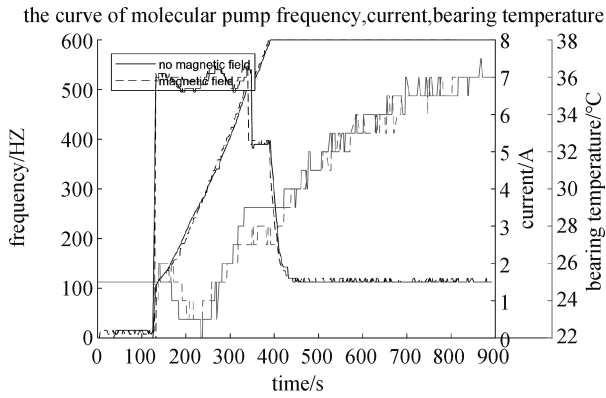
位置	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>
实测磁场/Gs	49	43	34	37	37	36	34	39	34
仿真磁场/Gs	29	26	21	22	23	22	22	21	22

### 4.2 分子泵表征参数测试

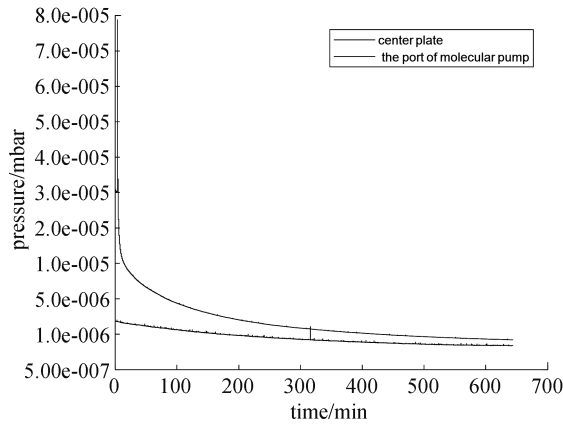
在现有的230 MeV超导回旋加速器,分别对应的位置安装分子泵以及相应的磁屏蔽体,测试分子泵在不励磁与励磁条件下的电流、轴承温度、真空度、转子温度、加速时间<sup>[11]</sup>。其中2号分子泵的电流、轴承温度、加速时间都可以通过分子泵控制器直接读取和记录,加速器主真空室的真空度通过真空计实时采集与记录,各数据详细曲线图,如图7所示,转子温度由于不具备实时测量,本文采用贴片温度贴,记录多台分子泵累积运行8 h过程最高的温度记录,如表3所示。

## 5 结论

自2019年至今,230 MeV超回旋加速器分子泵在设计的磁屏蔽体内稳定运行近3年,在实际运行过程中监测分子泵表征参数如电流、轴承温度、转子温度、加速时间均与无磁场运行参数几乎一致,且测量屏蔽体内剩磁场小于50 Gs,长期运行数据表明,所设计的磁屏蔽体可以有效保证分子泵在强背景磁场下的稳定运行,满足了230 MeV超导回旋加速器真空系统的要求。



(a) the frequency,current and bearing temperature curve of molecular pump in the presence or absence of magnetic field



(b) the Pressurecurve of the main vacuum chamber

图7 分子泵表征参数测试曲线图

Fig.7 The test curve of molecular pump characteristic parameters

表3 正常运行分子泵转子温度

Tab.3 Rotor temperature of the molecular pump in normal operation

分子泵	0磁场运行 转子温度/°C	满磁场运行 转子温度/°C
1号	44	44
2号	44	46
3号	46	44
4号	44	44

参 考 文 献

[ 1 ] Murakami Y. Performance Test of a Ceramic Rotor Developed for Turbomolecular Pumps for Fusion Use[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, 1998, 5(4):2599-2602

[ 2 ] Zhang T, Wang C, Li M, et al. Developments for 230 MeV Superconducting Cyclotrons for Proton Therapy and Proton Irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 406:244-249

[ 3 ] Becker W. Problems with Turbomolecular Pumps in Magnetic Fields[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1978, 15(2):768-770

[ 4 ] Ogiwara N, Kanazawa K, Inohara T, et al. Influence of Magnetic Fields on Turbo-Molecular Pumps[J]. Vacuum, 2010, 84(5):718-722

[ 5 ] 张素平,潘高峰,邢建升,等.CYCIAE-100紧凑型回旋加速器低温板排气系统理论和实验研究[J]. 原子能科学技术,2016,50(02):213-218

[ 6 ] 潘高峰,张素平,李振国,等.100 MeV强流质子回旋加速器超高真空系统研制[J]. 原子能科学技术,2018, 52(11):169-173

[ 7 ] De Angeli M, Gervasini G, Gittini G. Design and Test of a Magnetic Shield for Turbomolecular Pumps[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2007, 25(5):1475-1479

[ 8 ] A N O, A T Y, A Y H, et al. Development of a Turbo-Molecular Pump with a Magnetic Shield Function[J]. Vacuum, 2013, 98(24):18-21

[ 9 ] Wolf J, Bornschein B, Drexlin G, et al. Investigation of Turbo-Molecular Pumps in Strong Magnetic Fields[J]. Vacuum, 2011, 86(4):361-369

[ 10 ] Biswas S, Chattopadhyay M, Pal R. Magnetic Shield for Turbomolecular Pump of the Magnetized Plasma Linear Experimental Device at Saha Institute of Nuclear Physics [J].Review of Scientific Instruments, 2011, 82(1):768-774

[ 11 ] Robin G, Norbert K, Sebastian R, et al. Model of the Rotor Temperature of Turbo-Molecular Pumps in Magnetic Fields[J]. Vacuum, 2012, 86(7):985-989