

同步辐射弯铁真空紫外光束线气体滤波系统仿真与设计

何子阳¹ 范海涛² 毕海林¹ 王旭迪^{1*} 杨玖重^{2*}

(1. 合肥工业大学 机械工程学院 合肥 230009; 2. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

Simulation and Design of the Gas Filtering System in the Synchrotron Bend-Magnet Vacuum Ultraviolet Beamline

HE Ziyang¹, FAN Haitao², BI Hailin¹, WANG Xudi^{1*}, YANG Jiuzhong^{2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract The gas filter system is filled with noble gases (e.g., argon, neon and helium), which display strong absorption above their ionization energy. This helps to filter out the high harmonics of the incident beam in the synchrotron radiation beamline. In this paper, the angular coefficient method was employed to assist in the design of gas filters. It simulates and analyses the combustion beamline gas filter and compares the results with those obtained from the experiment. It then optimizes the design of the gas filter at the mass spectrometry beamline and analyses the spatial distribution of the pressure inside the filter chambers. The results demonstrate that the simulation results for the combustion beamline gas filter are in good agreement with the experimental results. In the further design of the mass spectrometry beamline filter cell, the increase in spot size results in a higher number density of molecular beam flow inside the chamber. It is challenging to reduce the chambers' pressure by adjusting the multi-stage differential piping. Furthermore, the pressure distribution inside the differential tube exhibits a steep rise phenomenon.

Keywords Gas filter, Molecular beam, Synchrotron radiation

摘要 气体滤波系统利用稀有气体(如氩气、氖气、氦气等)在电离能以下吸收弱、在电离能以上吸收强的特性,用于过滤同步辐射真空紫外光束线由光栅衍射带来的高次谐波。文章通过角系数方法辅助气体滤波系统设计,仿真分析了已有的燃烧光束线气体滤波池,并与实验结果比对;对质谱光束线气体滤波池进行优化设计,并对滤波池内部压强空间分布进行分析。结果表明:对于燃烧光束线气体滤波池,仿真结果与实验结果具有较好的一致性。在质谱光束线滤波池优化设计中,由于光斑尺寸大小增加,腔体内部存在较高数密度的分子束流,难以通过增加多级差分管道数量降低腔体压强,且其差分管道内部压强分布呈现陡增现象。

关键词 气体滤波系统 分子束流 同步辐射

中图分类号: TL503.7 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202410013

同步辐射燃烧光束线是一条真空紫外光束线^[1-2]。由于光栅衍射的特性,光栅出射的衍射光既包含基波,也包含 $1/n$ 波长的高次谐波。高次谐波产生的信号会掩盖或超过由基波辐射产生的信号,使得实

验数据可靠性将大大降低。为降低同步辐射真空紫外高次谐波对实验的干扰,需要额外设置滤波系统对高次谐波进行抑制。

目前已应用在同步辐射光束线的高次谐波滤

波系统包括几种技术形式,利用固体滤波片吸收、依靠多重镜面反射相对减弱短波长成分或采用气体吸收等。固体滤波片如石英、氟化镁、氟化锂等具有吸收截止波长较长、容易形成色心、在同步辐射波荡器高功率光作用下容易损坏等缺点。多重镜面反射方式消除谐波的作用有限,同时基波也会有很大损失,且在 50~110 nm 范围内都没有太好的效果^[3]。因此,这两种技术在同步辐射真空紫外光束线上应用均不多。相对于其他滤波形式,稀有气体(如氩气、氦气、氖气等)可以吸收高于其电离能的光。同时,由于稀有气体在低于其电离能的波段几乎没有吸收峰,气体吸收的形式特别适合同步辐射真空紫外高次谐波的滤除。

气体滤波池常采用差分抽气形式,通过设置一系列的差分孔/管、真空泵,以满足上游光学元件和下游实验装置真空度要求。美国先进光源(ALS)化学动力学真空紫外光束线最早使用气体滤波系统,其结构为一个四级环形差分系统,差分管道孔径为 1~3 mm^[4]。合肥光源(HLS)UI4C 光束线气体滤波池采用了三级差分抽气系统,差分管道最小孔径为 0.5 mm,通氩气 1.333 kPa 时,高次谐波滤除率达 99.97% 以上^[5]。瑞士光源(SLS)真空紫外光束线气体滤波系统为 9 个差分腔体通过法兰直线串联连接,两侧非对称分布,系统长度为 0.9 m,结构紧凑,降低了真空泵泵速的要求。差分管道采用了矩形管道的结构,管道高度为 0.12~1 mm,宽度均为 2 mm^[6]。合肥光源(HLS)燃烧化学真空紫外光束线与瑞士光源结构相似,其差分管道采用了矩形管道的结构,管道高度为 0.6~2 mm,宽度为 2~3 mm^[1]。除此之外,还有巴西国家同步辐射实验室(LNLS)、中国台湾光源(TLS)也采用了多级气体滤波系统滤除高次谐波^[7-8]。但由于差分管安装在法兰中心处,多级的差分腔体会增加气体滤波系统安装时光束对准的难度。

为了匹配上下游真空度,气体滤波系统常用于小光斑的光束线上。正在改造中的合肥光源质谱光束线是一条从弯铁引出的真空紫外光束线,发散角大、光斑尺寸大,改造前一直采用氟化锂窗片滤波,截止波长高(105 nm)。为了扩展束线波长范围,需要建设一套气体滤波系统。本工作对燃烧光束线气体滤波池进行了仿真分析,结合已有实验结果验证分子流态下角系数方法的可靠性;对质谱光束线气体滤波池结构进行设计,讨论了气体滤波池内

部气体压强分布及特殊气体效应,并结合仿真结果对气体滤波池结构进行优化。以期在今后气体滤波池或相关气体差分系统的设计提供了思路和参考。

1 仿真方法

近年来,不少学者使用了欧洲核子研究组织基于测试粒子蒙特卡洛方法(TPMC)开发的分子流仿真软件 molflow+,对分子流下差分抽气系统内部压强变化情况进行了分析^[9-10],并与理论、实验对比存在较好的效果。角系数法最早应用于理想漫射表面的热辐射计算中,其遵循兰贝特余弦定律,与真空分子流遵循的余弦定律有较高的相似性,后被引入到真空分子流的计算中^[11-12]。Zhang Y C 等^[13]证明了分子流管道流导数值计算中,基于 COMSOL 自由分子流模块与基于 TPMC 方法的 molflow+具有较好的一致性。另外,COMSOL 平台内嵌有丰富的 CAD 建模工具,其在二维、三维建模上,相较于 molflow+更具有优越性,更利于气体滤波系统结构优化过程中参数的快速迭代。

气体滤波池内部气体压强变化跨越了 10 个数量级。为实现对气体滤波池内部压强的仿真,通过理论计算获得气体滤波池粘滞流区段和过渡流区段腔体压强,并将临近分子流区域腔体压强作为 COMSOL 分子流模块的入口条件进行数值仿真。入口条件取决于腔体压力,如,腔体 C-3 符合分子流假设,则将腔体 C-2 的压强作为分子流仿真入口条件。

2 燃烧光束线滤波池仿真与验证

2.1 结构设计

燃烧光束线气体滤波池在文献 [1] 中有所介绍,其结构示意图如图 1 所示。载气(氦气或氩气)通过进气管道充入到腔体 C0 中,向左右两侧差分腔体(后简称“腔体”)扩散,并分别被分流泵(Pfeiffer Vacuum, SplitFlow 310)及分子泵(Pfeiffer Vacuum, Hipace 80)所抽除。其中分流泵泵口 H 分别连接腔体 C-3、腔体 C+3,分流泵泵口 H1 分别通过管道连接腔体 C-2、腔体 C+2,分流泵泵口 H2 分别连接腔体 C-1、腔体 C+1,其余 C-5、C-4、C+4 腔体分别连接分子泵。气体滤波池系统各级腔体通过法兰进行连接,并在法兰中心设有差分管道(后简称“管道”)。管道孔径的大小需要略大于光束光斑尺寸,确保光束的通过且降低流入下级腔体的气流量,管

道结构参数如表 1 所示。同时, 为保证安装过程中差分管在同一轴线上, 各级腔体另设置有观察窗以实现对接分管位置的微调。

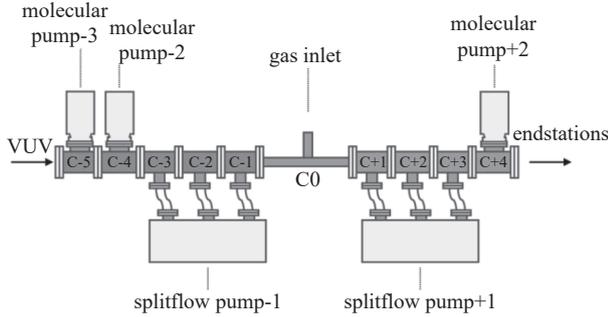


图1 燃烧光束线气体滤波系统结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the gas filter at combustion beam-line

表 1 燃烧光束线气体滤波系统差分管尺寸

Tab. 1 Differential tube size of the gas filter at combustion beamline

| 差分管 | 差分管长度/mm | 差分管孔径/mm×mm |
|-----|----------|-------------|
| T-5 | 10 | 1.8×2.8 |
| T-4 | 10 | 1.5×2.6 |
| T-3 | 10 | 1.2×2.5 |
| T-2 | 10 | 1.0×2.2 |
| T-1 | 20 | 0.8×2.2 |
| T+1 | 20 | 0.6×2.0 |
| T+2 | 20 | 0.6×2.0 |
| T+3 | 20 | 0.8×2.2 |
| T+4 | 20 | 1.0×2.2 |

2.2 理论计算

2.2.1 差分系统管道流导计算

真空差分系统中, 管道或差分孔用来限制流入到下一级腔体的气体流量, 实现多个数量级压强的过渡。管道流导与两侧腔体压强的关系为:

$$Q = U(p_1 - p_2) \quad (1)$$

其中, Q 为进气流量, U 为管道流导, p_1 为管道入口压强, p_2 为管道出口压强。

对于真空系统中气体流动, 一般将流态分为粘滞流、过渡流、分子流。可以根据 Knudsen(Kn) 数来判别^[14]:

$$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{d} \quad (2)$$

其中, $\bar{\lambda}$ 为气体分子的平均自由程(m), d 为管道特征尺寸。

$Kn > 0.5$, 分子流

$0.5 > Kn > 0.01$, 过渡流

$Kn < 0.01$, 粘滞流

粘滞流下, 矩形管道流导^[15] 为:

$$U_n = \frac{a^2 b^2}{12 \eta L} \bar{p} \psi \quad (3)$$

其中, a 、 b 为矩形截面的短边及长边, η 为气体的粘滞系数, ψ 为与 a 、 b 相关的形状系数, L 为矩形管道的长度, \bar{p} 为管道平均压强。

分子流下, 矩形管道流导^[15] 为:

$$U_f = \frac{3}{8} K_j \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} \quad (4)$$

其中, R 为摩尔气体常数, K_j 为与 a 、 b 相关的形状系数, M 为气体摩尔质量。

粘滞-分子流下, 矩形管道流导^[11] 为:

$$U_{n,f} = U_n + K_j U_f \left[\frac{1 + 1.23(a/\bar{\lambda})^{0.3}}{1 + (16K_j/3\pi)1.23(a/\bar{\lambda})^{0.3}} \right] \quad (5)$$

其中, $\bar{\lambda}$ 为气体分子的平均自由程, K_j 为与 a 、 b 相关的形状系数。

2.2.2 差分系统各级压强计算

差分系统原理图如图 2 所示, 对于腔体 C_x , 根据流量守恒公式有:

$$Q_{x+1} + Q_L + Q_d = S e_x p_x + Q_x \quad (6)$$

其中 Q_{x+1} 为腔体的进气量, Q_d 为腔体材料的放气量, Q_L 为腔体泄漏外部泄漏的气体量, $S e_x$ 为腔体所连接真空泵的有效抽速, p_x 为腔体的内部压强, Q_{x-1} 为腔体流入到下一级腔体的气体量。理论计算过程中, 不考虑材料放气及漏气的影响, 则有:

$$Q_{x+1} = S e_x p_x + Q_x \quad (7)$$

结合式(6)、(7), 差分系统其余各级腔体压强计算公式有:

$$U_x(p_x - p_{x+1}) = S e_x p_x + U_{x-1}(p_{x-1} - p_x) \quad (8)$$

对于 C_0 腔体到 $C-1$ 到 $C+1$ 腔体气体流量与压强分布有:

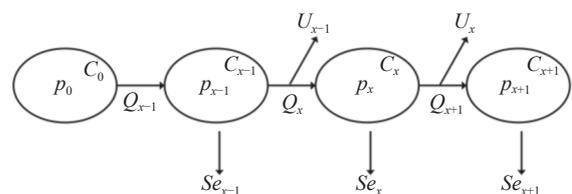


图2 差分系统理论计算原理图

Fig. 2 Theoretical calculation schematic of differential system

$$Q_0 = S e_1 p_1 + S e_{-1} p_{-1} \quad (9)$$

2.3 仿真模型与边界设置

其结构模型如图3所示,仿真中不考虑腔体放气,选用贮槽为入口边界条件。对于燃烧光束线气体滤波池,入口压强根据腔体C-2的实测数据选取。各腔体泵口泵速根据分流泵、分子泵额定抽速来选取,如表2所示。仿真中采用了非结构化网格,网格无关性验证如图4所示,综合计算精度与计算效率,最终选择的网格数为358296。

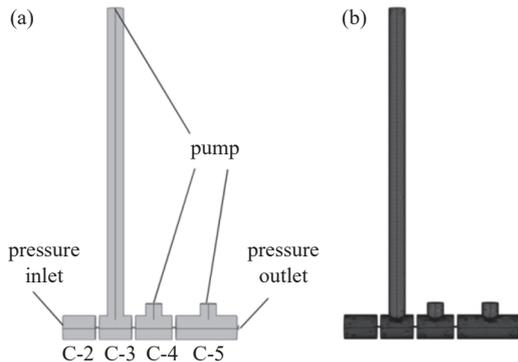


图3 燃烧光束线气体滤波池仿真模型及网格划分。(a)仿真模型, (b)网格划分

Fig. 3 Simulation model and mesh of the gas filter at combustion beamline. (a) Simulation model, (b) meshing

表2 燃烧光束线气体滤波池仿真值与实测值比对

Tab. 2 Comparison of simulated and experimental data of the gas filter at combustion beamline

| 腔体 | 泵速设定/(L/s) | 仿真值/Pa | 实测值/Pa |
|-----|------------|----------|----------|
| C-5 | 52.8 | 3.59E-06 | 1.80E-06 |
| C-4 | 52.8 | 1.60E-04 | / |
| C-3 | 76 | 1.00E-01 | 1.5E-01 |
| C-2 | 76 | 1.2E+01 | 1.2E+01 |

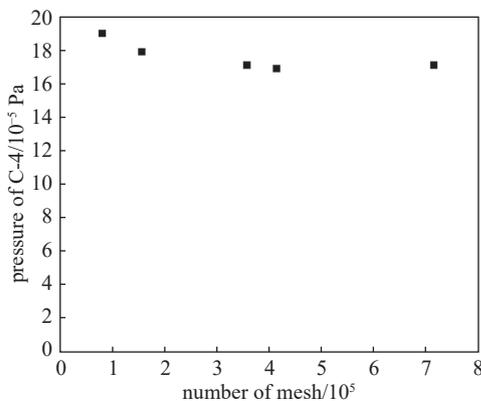


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

2.4 结果比对与讨论

如图5所示,为燃烧光束线气体滤波池C-3~C-5级腔体压强分布图。C-4腔体未安装真空计,无对应实测值。C-3、C-5腔体仿真结果,与实测结果在同一量级,且在实测值两倍以内。考虑到实际测量中存在真空计测量及有效泵速的选择带来的误差,仿真结果与实测结果间具有较好的一致性。基于角系数方法的COMSOL分子流模块能有效分析气体滤波池分子流下的压强分布。

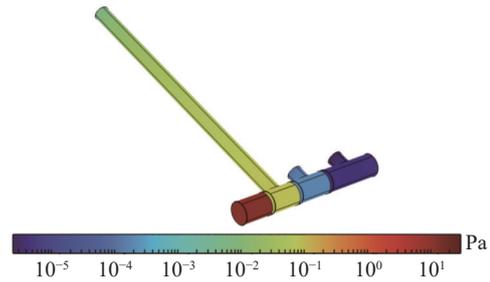


图5 燃烧光束线气体滤波系统压强分布图

Fig. 5 Pressure distribution of the gas filter at combustion beamline

3 质谱光束线滤波池设计与仿真

3.1 结构设计

为了适配实验站光斑尺寸需求,质谱光束线出射光焦点设置在滤波池C+4腔中心,如图6所示。相较于燃烧光束线气体滤波系统,质谱光束线气体滤波系统的差分孔更大,其最大差分管道截面等效半径为前者的4.7倍。鉴于管道流导与管道半径成正比,这极大地提升了光束线侧气体差分抽气的难度。同时,腔体采用铝腔一体成型,以提高差分管道的准直性,降低系统安装时光束对准难度。腔体C-1、C+1通过管道与干泵(Leybold Vacuum, ECODRY 65 plus)相连,以降低分流泵H2口的抽气负载,避

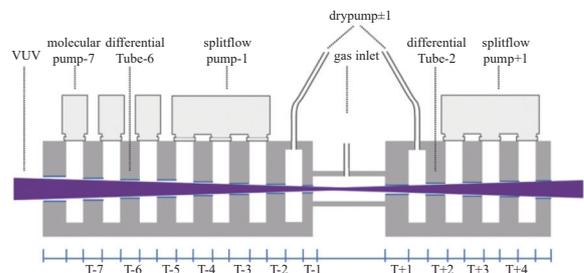


图6 质谱光束线气体滤波系统结构示意图

Fig. 6 Schematic drawing of the gas filter at mass spectrometry beamline

免分流泵过热而降低抽速,并充当分流泵、分子泵前级泵。分流泵(Pfeiffer Vacuum, SplitFlow 310)相对于腔体 C0 对称布置,其中分流泵泵口 H 分别连接腔体 C-4、腔体 C+4,分流泵泵口 H1 分别通过管道连接腔体 C-3、腔体 C+3,分流泵泵口 H2 分别连接腔体 C-2、腔体 C+2。其余腔体 C-5、C-6、C-7 分别连接分子泵(Pfeiffer Vacuum, Hipace 80)。各级腔体预留接口与真空计相连,监测腔体压强。

根据理论计算及光路光斑尺寸初步选定的管道参数如表 3 所示。管道孔径与管道的流导之间存在平方关系,这意味着管径的增大会导致气体滤波系统的抽气压强增加。相对于燃烧光束线滤波池,质谱光束线光束线侧差分级增加至七级。

表 3 质谱光束线气体滤波池原始结构差分管尺寸表

Tab. 3 Differential tube size of the gas filter at mass spectrometry beamline

| 差分管 | 差分管长度/mm | 差分管孔径/mm×mm |
|-----|----------|-------------|
| T-7 | 100 | 7.3×15.5 |
| T-6 | 40 | 6.4×13.7 |
| T-5 | 131 | 5.6×11.9 |
| T-4 | 100 | 4.7×10.1 |
| T-3 | 51 | 4.0×8.6 |
| T-2 | 40 | 3.6×7.7 |
| T-1 | 40 | 3.3×7.0 |
| T+1 | 40 | 3.3×7.0 |
| T+2 | 40 | 1.7×3.6 |
| T+3 | 51 | 1.4×3.0 |
| T+4 | 100 | 1.1×2.2 |
| T+5 | 72 | 1.0×2.0 |

3.2 仿真模型与边界设置

其结构模型如图 7 所示,仿真中不考虑腔体放气,选用贮槽为入口边界条件。对于质谱光束线气体滤波池,通过理论计算值,选取过渡流态处腔体压强为入口压强;各腔体泵口泵速根据分流泵、分子泵额定抽速来选取,如表 4 所示。仿真中采用了非结构化网格,网格设置尺寸与燃烧光束线滤波池一致,综合计算精度与计算效率,最终气体滤波池左、右两侧选择的网格数分别为 1079408、515168。

3.3 仿真优化与讨论

3.3.1 气体束流效应

通过 COMSOL 分子流模块,对表 3 结构尺寸下气体滤波系统进行仿真,并与理论计算值进行比

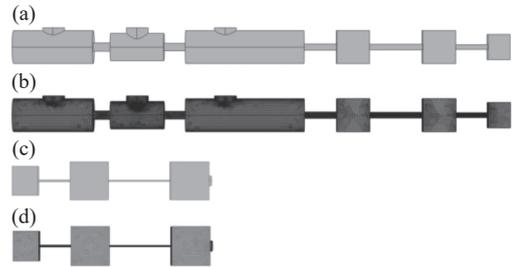


图 7 质谱光束线气体滤波池仿真模型及网格。(a)仿真模型(左),(b)网格划分(左),(c)仿真模型(右),(d)网格划分(右)

Fig. 7 Simulation model and mesh of the gas filter at the mass spectrometry beamline. (a) Simulation model (left), (b) meshing (left), (c) simulation model (right), (d) meshing (right)

表 4 质谱光束线气体滤波池原始结构理论/仿真压强

Tab. 4 Theoretical/simulation pressure on the original structure of the gas filter at the mass spectrometry beamline

| 腔体 | 抽速/(L/s) | 理论 | 数值 |
|-----|----------|----------|----------|
| | | 计算压强/Pa | 计算压强/Pa |
| C-7 | 65 | 8.81E-08 | 2.85E-05 |
| C-6 | 65 | 1.10E-06 | 3.05E-05 |
| C-5 | 65 | 2.38E-05 | 1.99E-04 |
| C-4 | 160 | 1.38E-03 | 2.21E-03 |
| C-3 | 20 | 4.46E-01 | 6.45E-01 |
| C-2 | 10 | 3.06E+01 | 3.06E+01 |
| C-1 | 10 | 2.21E+02 | 2.21E+02 |
| C0 | / | 7.11E+02 | 7.11E+02 |
| C+1 | 6 | 5.40E+01 | 5.40E+01 |
| C+2 | 5 | 6.43E-01 | 5.61E-01 |
| C+3 | 100 | 1.79E-04 | 2.30E-04 |
| C+4 | 160 | 7.53E-09 | 1.84E-06 |

对,各腔体压强分布图如图 8(a)所示。表 4 为各腔体压强理论计算与数值计算值,理论计算方法见 2.2 节。通过比较发现,在孔径较小的一侧,即腔体 C+1~C+3 侧,仿真值与理论计算值之间差别较小。腔体 C+4 数值计算偏高的原因是仿真中对最右端出口压强进行约束,压强最小值不低于 1×10^{-6} Pa。然而,在孔径较大的一侧,即腔体 C-1~C-7 侧,仿真值与理论计算值差别较大。其中,腔体 C-3、C-4 数值计算值与理论计算较小,而对于腔体 C-5~C-7,数值计算值与理论计算相差了约 1~3 个数量级。

如图 8(b)所示,为进一步研究数值计算值与理论计算值相差较大的原因,选取了气体滤波系统的轴向截面数密度分布。在气体滤波系统左右两侧

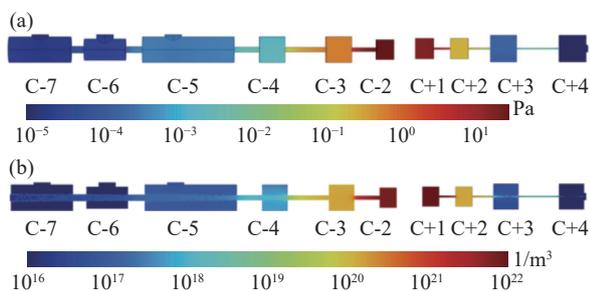


图8 质谱光束线气体滤波池(原始结构)仿真压强/空间数密度分布图。(a)壁面压强分布图,(b)轴向截面数密度分布图

Fig. 8 Simulated pressure/spatial number density distribution of the original structure of the gas filter at the mass spectrometry beamline. (a) Pressure distribution at the wall, (b) number density distribution in the axial cross-section

均能发现一较高密度的气体束流。系统右侧气体束流对腔体 C+4 影响较弱,而左侧差分系统中存在一数密度较高的分子束流,无阻碍地穿过腔体 C-4~C-7。气体束流穿越腔体 C-5~C-7 时,其数密度约为腔体 C-4、C-5 数密度的 2 倍,约为腔体 C-6、C-7 空间数密度的 10 倍。由于定向束流难以被扰动,腔体 C-6、C-7 压强难以降低。对比表 2、表 4,对于大孔径无窗口的差分真空系统,差分抽气过程中会存在充气气流效应^[16],气体分子在分子流态下会无碰撞地进入下游的腔体,与真空设计手册上分子流流导计算的假设相悖。传统的理论计算存在较大的误差,具体的管道参数仍需通过进一步仿真确定。

传统理论计算基于假设:①管道两侧腔体均为大腔体,②气体通过管道进出口角度遵循余弦分布,③出口处气体在空间分布均匀。结合图 8(b)、表 4 可以发现,在分子流态下,对于气体滤波系统无阻碍、大孔径气体侧中后端的管道(如 T-6、T-7),气体分子运动方向受前端管道影响,束缚在较小的角度范围内,对腔体内部压强的计算存在着较大的影响。为进一步抑制束流效应、降低光束线侧压强(腔体 C-7 腔体压强),后续主要针对气体滤波系统大孔径侧(后简称“系统左侧”)进行仿真分析。

3.3.2 管道内部的压强变化

如在对系统左侧结构进行优化分析的过程中,发现管道内部的气体压强分布出现陡增后下降的现象。通常情况下,当气体沿管道流动时,由于两侧存在压差,气体从高压区向低压区流动,即使存在定向束流,预期的压强变化应表现为一条单调递

减的曲线,如图 9 中距离入口 300 mm 前压强分布。图 9 为管道 T-4 不同长度下系统左侧轴线压强变化图,发现相较于管道 T-4、T-6 区域,T-5 管道区域存在中间压强高两侧压强低的情况,且其常出现管道较长的区段。本节针对管道 T-5 管道,并对 T-4 管道长度、T-5 管道长度进行了调整,探究差分管内部压强上升的原因及差分管内部压强升高对最终腔体压强值的影响。

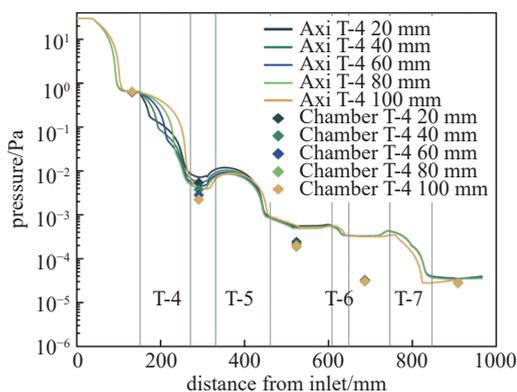


图9 管道 T-4 不同长度下系统左侧轴线/腔体压强分布图
Fig. 9 Axial pressure/chamber wall pressure distribution on the left side of the gas filter at different lengths of tube T-4

前级差分管的长度影响管道压强的最大值。图 9 为管道 T-4 不同长度下系统左侧轴线压强、腔体压强分布图。管道的孔径的宽、高随管道长度的增长缩小约 0.3~0.5 mm。随着管道 T-4 长度增大,通过的气体量降低,最终导致 T-5 管道内部压强最大值减小。此外,随着管道 T-4 长度增大,腔体 C-3 压强越大,腔体 C-4、腔体 C-5 压强越小。管道 T-4 管道长度的变化,对于腔体 C-6、腔体 C-7 压强影响不大。

差分管长度影响管道内部压强的最大值大小及位置。图 10 为管道 T-5 不同长度下系统左侧轴线上压强分布图。随着管道 T-5 长度的增长,管道 T-5 内部压强的最大值逐渐远离管道入口处,且 T-5 内部压强的最大值逐渐增大。随着管道的增长,进入管道的分子束流中发散角度更小的气体无法直接穿越管道,与壁面发生碰撞。碰撞后的气体在管道内部漫反射,并且气体碰撞点两侧管道长度增大,流导减小,进一步限制了气体的扩散,从而在碰撞点处形成较高的压强值。管道 T-5 长度的变化对腔体 C-7 压强影响不大,仅对腔体 C-5、C-6 产生影响。

仿真过程中不考虑系统壁面气体放气。管道 T-

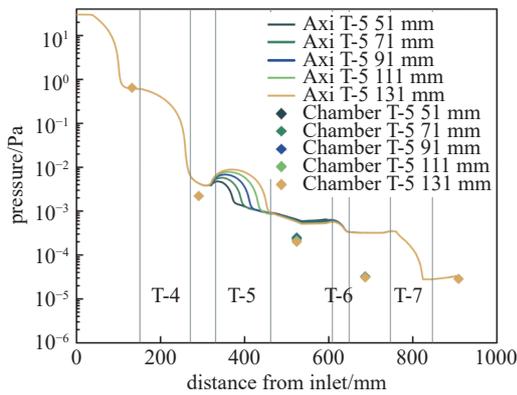


图10 管道 T-5 不同长度下系统左侧轴线/腔体压强分布图
Fig. 10 Axial pressure/chamber wall pressure distribution on the left side of the gas filter at different lengths of tube T-5

5 内部的压强陡增后下降的现象主要由于高数密度束流与管道壁面碰撞。分子流中, 不考虑气体间的碰撞, 气体与壁面的碰撞遵循漫反射的规律。气体碰撞后按余弦定理向两侧进行扩散, 从而形成管道中间高, 两侧低的压强分布情况。其内部压强的最大值主要受分子束流数密度大小、分子束流发散角度相关以及管道长度影响。此外, 管道内部压强单调下降是由于气体束流与管道碰撞较小, 气体无阻碍地穿越了管道。

3.3.3 差分管管道尺寸调整

管道 T-4、T-5、T-6、T-7 尺寸的调整见图 9、图 10、图 11、图 12 所示。由于管道 T-5 内部出现压强非单调变化现象, 管道 T-4、T-5 的调节及对应压强的分布于 3.2.2 节讨论。图 11 为管道 T-6 不同长度下气体滤波系统左侧轴线压强/腔体压强分布图。其中轴线压强指的是气体滤波系统中心轴线处压强分布, 用于监测腔体内部气体束流强度; 腔体压强指的是气体滤波系统腔体壁面安装真空计处压强变化。如图 11 所示, 发现调整管道 T-6, 管道连接的上、下游腔体压强变化较小, 轴线压强基本保持不变, 对束流的抑制效应较差。

图 12 为管道 T-7 不同长度下气体滤波系统左侧轴线压强/腔体压强分布图。发现 T-7 管道的长度对腔体 C-7 压强影响最为显著。一般情况下, 随着管道的增长, 流入到下一级腔体的气体量越少, 下一级腔体压强越低, 如调整 T-4、T-5、T-6 均反映同样的现象。然而, 随着管道 T-7 的增长, 腔体 C-6、C-7 压强越高。与此同时, 差分管内部压强出现了逐渐升高再逐渐下降的现象, 且随着管道长度

的增加, 内部压强最高值逐渐增大。这说明, 管道 T-7 增长时, 气体束流与壁面发生了碰撞。此外, 由于气体束流数密度远大于两侧腔体数密度, 壁面碰撞反射的气体量较多, 导致两侧腔体 C-6、C-7 压强的上升。此外, 随着管道 T-7 增长, 与腔体碰撞反射的气体量越多, 导致 C-6、C-7 腔体压强随之增大。

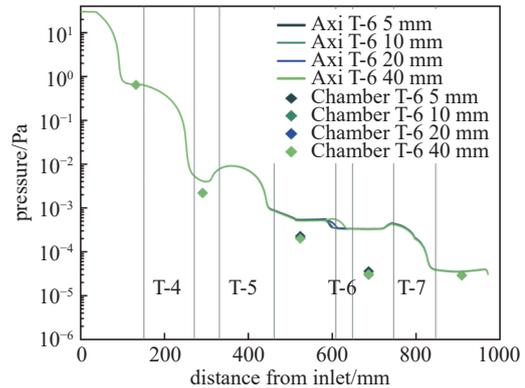


图11 管道 T-6 不同长度下系统左侧轴线/腔体压强分布图
Fig. 11 Axial pressure/chamber wall pressure distribution on the left side of the gas filter at different lengths of tube T-6

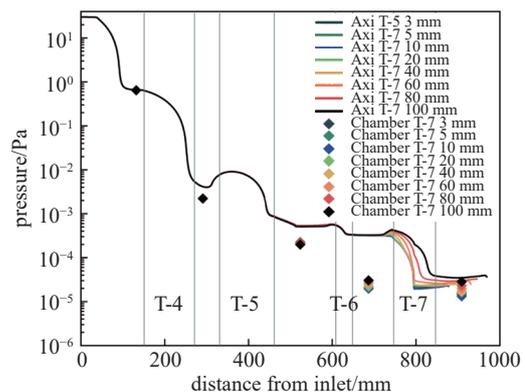


图12 管道 T-7 不同长度下系统左侧轴线/腔体压强分布图
Fig. 12 Axial pressure/chamber wall pressure distribution on the left side of the gas filter at different lengths of tube T-7

综合上述数值计算结果, 对于调整 T-5、T-6 差分管对于气体滤波系统内部压强分布影响不大。为减少进入分子流时气体束流的数密度, 将 T-3 管道进行了略微的增长, 从 51 mm 增长至 60 mm。同时, 结合实际加工情况, 对管道 T-5、T-7 长度进行缩短, 分别缩短至 60 mm、32 mm, 其最终结构管道长度及最终压强如表 5 所示。系统左侧为实现预期压强目标, 其末端额外添加一大腔体, 并使用

表5 质谱光束线气体滤波池优化前后压强分布对比

Tab. 5 Pressure distribution before and after optimization of the gas filter at the mass spectrometry beamline

| 腔体 | 抽速/(L/s) | 原始结构/Pa | 优化结构/Pa |
|-----|----------|----------|----------|
| C-7 | 65 | 2.85E-05 | 1.88E-05 |
| C-6 | 65 | 3.05E-05 | 2.90E-05 |
| C-5 | 65 | 1.99E-04 | 3.18E-04 |
| C-4 | 160 | 2.21E-03 | 2.45E-03 |
| C-3 | 20 | 6.45E-01 | 5.95E-01 |
| C-2 | 10 | 3.06E+01 | 3.06E+01 |
| C-1 | 10 | 2.21E+02 | 2.21E+02 |
| C0 | / | 7.11E+02 | 7.11E+02 |
| C+1 | 6 | 5.40E+01 | 5.40E+01 |
| C+2 | 5 | 5.61E-01 | 5.61E-01 |
| C+3 | 100 | 2.30E-04 | 2.30E-04 |
| C+4 | 160 | 1.84E-06 | 1.84E-06 |

大抽速离子泵进行抽气。

4 结论与展望

本文主要采用角系数法对气体滤波系统的气体束流效应进行了研究。本文结合燃烧光束线气体滤波系统的实验数据,采用基于角系数的COMSOL分子流模块对差分抽气系统进行仿真,并具有较高的一致性,能较好地预测气体滤波系统分子流区段内部压强分布;采用理论计算与数值模拟相结合的方式,对质谱光束线气体滤波池结构进行设计,分析了气体滤波池内部气体束流效应、差分管道内部压强分布,并对结构进行优化,其结论如下:

(1)气体束流是气体滤波系统末端腔体压强难以下降的主要原因。对于气体滤波系统大孔径侧,随着气体束流穿越腔体,束流气体密度相对于腔体空间气体密度从原来的2倍提高至10倍。

(2)管道内先上升后下降的压强分布源自于束流分子与管道的碰撞。束流分子与腔体碰撞后按漫反射向两侧腔体、管道内部进行扩散,从而在碰撞点附近形成局部的高压区。对于末端管道,由于气体束流密度较高,气体束流与管道间的碰撞会对管道两侧腔体的压强形成较大的影响。

(3)差分系统中部管道(C-3~C-6)对末端腔体真空度影响不大,差分系统末端管道(T-7)对末端腔体真空度影响较大。其原因是气体束流发散角度较小,在较长距离上无碰撞地穿越了管道。因此在最终设计中,对中部管道长度、末端管道长度缩短,

对前端管道长度进行了增长,系统获得了比原始结构更优的真空度。

同步辐射光束线常使用差分抽气系统,因其不能阻挡同步辐射光的通过,所以中间粒子也会无阻碍地传输,气体束流效应有较大的影响。本研究基于角系数法在一定程度对气体滤波池内部束流效应进行了分析与讨论。气体束流效应在分子流区段难以得到有效的抑制。但粘滞流、过渡流区段气体流动对气体束流效应的形成、强度的影响仍不大确定,有可能会对束流效应的抑制产生较好的作用。因此,后续可结合多流态仿真方法,如CFD-DSMC耦合方法,对气体滤波池粘滞流、过渡流区段进行数值分析,进一步讨论气体束流的形成原因。另外,由于气体滤波系统空间尺寸的限制,差分抽气结构的调整是有限的,需要进一步地寻找更加高效的无阻挡式气体束流抑制措施。

参考文献

- [1] Zhou Z Y, Du X W, Yang J Z, et al. The vacuum ultraviolet beamline/endstations at NSRL dedicated to combustion research[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, 23(4): 1035-1045
- [2] Du L L. Design and construction of the plane grating monochromators at Hefei Light Source[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017 (杜亮亮. 合肥光源平面光栅单色器设计及调试 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017 (in Chinese))
- [3] Kunz C. Synchrotron radiation: techniques and applications[M]. Berlin: Springer, 1979: 100-102
- [4] Suits A G, Heimann P, Yang, X M, et al. A differentially pumped harmonic filter on the Chemical Dynamics Beamline at the Advanced Light Source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(10): 4841-4844
- [5] Zhang T C, Zhu A G, Hong X, et al. A gas filter system of U14C beamline at National Synchrotron Radiation Laboratory[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(4-5): 582-585 (张泰昌, 朱爱国, 洪新, 等. 国家同步辐射实验室 U14C 光束线气体滤波器的研制 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(4-5): 582-585 (in Chinese))
- [6] Johnson M, Bodi A, Schulz L, et al. Vacuum ultraviolet beamline at the Swiss Light Source for chemical dynamics studies[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 610(2):

- 597-603
- [7] Lee J C, Ueng T C, Chen J R, et al. A differential pumping system for the gas filter of the high flux beamline at SRRC[J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research A*, 2001, 467(part-P1): 793-796
- [8] Cavasso F R L, Homen M G P, Fonseca P T, et al. A synchrotron beamline for delivering high purity vacuum ultraviolet photons[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(11): 115104
- [9] Tschernajew M, Gierschke P, Lin H F, et al. Differential pumping unit for windowless coupling of laser beams to ultra high vacuum[J]. *Vacuum*, 2020, 178: 109443
- [10] Liu Q, Xie Y, Li L, et al. Development of an ultra-high vacuum system for a cold atom physics rack in space[J]. *Vacuum*, 2021, 190: 110192
- [11] Zhang H, Yang A M, Chen Y. Numerical simulation of transmission probability for molecular gas flow through vacuum pipe with equivalent heat radiation model[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2016, 36(9): 981-986 (张篁, 杨安民, 谌怡. 热辐射等效方法计算分子流状态下真空管道的传输几率 [J]. *真空科学与技术学报*, 2016, 36(9): 981-986 (in Chinese))
- [12] LaFontaine M. Calculation of molecular flow using the heat transfer analogy[C]. *Ansys Conference Proceedings*, 1998: 1-371
- [13] Zhang Y C, Bi H L, Fan X, et al. Numerical simulation of flow conductivity of vacuum pipeline under different flow regimes[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2022, 42(4): 276-281 (张一聪, 毕海林, 樊翔, 等. 不同流态下真空管道流导值的数值模拟研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(4): 276-281 (in Chinese))
- [14] Jousten K, *Handbook of vacuum technology*[M]. Second Edition, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016: 85
- [15] Da D A. *Vacuum Design Manual*[M]. Third Edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 106-123 (达道安. *真空设计手册* [M]. 第三版, 北京: 国防工业出版社, 2004: 106-123 (in Chinese))
- [16] Zhang S P, Yang X T, Meng J, et al. Analysis of filled gas flow effect on large - aperture difference vacuum system[J]. *Vacuum*, 2007, 44(5): 48-51 (张素平, 杨晓天, 蒙峻, 等. 大孔径差分真空系统中充气气流效应分析 [J]. *真空*, 2007, 44(5): 48-51 (in Chinese))