

中能重离子微束辐照装置的真空窗*

盛丽娜^{1,2;1)} 宋明涛² 刘杰²

1(中国科学院研究生院 北京 100086)

2(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 为了辐照生物活细胞,束流须经由真空隔离窗引入大气环境中.在真空隔离窗的设计中,对结构、材料种类及其厚度的选择既要尽可能地减小束斑展宽,又要兼顾安全性.应用有限元分析软件对不同结构、不同材料的真空窗进行受力分析,模拟真空窗的形变和等效应力,运用强度理论考察候选真空窗的安全性;并运用SRIM程序模拟离子的小角散射、横向射程,计算入射离子的能量、真空窗材料及其厚度、空气层对束斑展宽的影响;最后提出真空窗适宜的结构、材料及厚度范围.

关键词 微束 真空窗 等效应力 束斑展宽

1 引言

随着重离子微束在材料学、生物学、航天、工业生产、地质探测、微加工等研究和应用领域的发展,国内迫切需要兴建重离子微束辐照装置.中国科学院近代物理研究所(IMP)正在兰州重离子加速器(HIRFL)系统中研制中能重离子微束终端,对重离子进行准确定位和精确计数.该装置主要针对中能重离子并兼顾低能重离子束流(C离子能量从7MeV/u—100MeV/u),利用三组合四极透镜强聚焦形成微米束.与国内外同类装置相比,束流能量高、能量范围宽、粒子种类多,并且在铅垂方向辐照样品种,有利于大气中进行湿细胞辐照实验.

在微束装置中,真空引出窗的设计是一个关键部分,必须将束流经由真空隔离窗引到大气中以便辐照生物活细胞.真空窗受到内外压强差的作用会发生变形,因此需要考虑它的弹性极限;另一方面,离子的种类、能量以及窗体的材料、厚度,及与样品台之间的距离都在不同程度上影响离子的多次散射,从而导致束斑展宽^[1],严重影响微束装置的品质,所以需要选择合适的结构、材料与厚度的真空窗.

2 真空窗结构、材料及形变分析

国内外已有的能够辐照生物活细胞的微束装置的真空窗材料主要采用陶瓷、热塑性塑料、金刚石以及

高分子聚合物^[2-6],结合这些材料的性质及IMP微束装置自身的特点,初步确定IMP微束辐照装置真空窗采用两种设计结构:圆形结构和框架结构;窗体材料从氮化硅、聚碳酸酯(PC)和Mylar中选择;靶位置尽可能地靠近真空窗,考虑到实际可能达到的安装精度,初步确定在真空窗后150—500 μm 处.

IMP中能重离子微束辐照装置的真空度为 $5 \times 10^{-5}\text{Pa}$,在内外压强的作用下真空窗发生很大的变形,窗体向真空室内凹陷.应用大型有限元受力分析软件模拟计算窗体的最大形变及最大Von Mises应力,运用强度理论^[7]判断所选的真空窗是否超过材料的弹性极限.为了进一步保证窗体材料的安全性,设定安全系数为0.8,即当材料的最大Von Mises应力小于极限强度或者屈服强度的0.8倍时认为真空窗是足够安全的.图1给出框架结构的真空窗模型.表1给出圆形结构真空窗的不同材料、厚度、直径所对应的最大位移量及最大Von Mises应力.

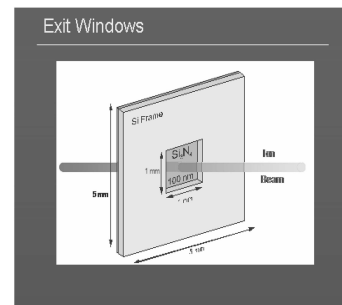


图1 框架结构真空窗

2008-01-07 收稿

* 中国科学院重大科研装备研制项目(0713040YZ0)资助

1) E-mail: shenglina@impcas.ac.cn

表 1 圆形结构几种典型窗体的最大 Von Mises 应力和最大位移

材料	薄膜直径 /mm	厚度 / μm	弹性模量 /GPa	泊松比	最大位移量 / μm	最大 Von Mises 应力/MPa	极限强度或屈服 强度/MPa
氮化硅	0.25	2	300	0.27	5.36	464	750 (600)
	0.5	4			10.625	466	
聚碳酸酯(PC)	0.25	5	2.415	0.38	19.6	47.7	72 (57.6)
	1	20			78.354	47.7	
Mylar	0.25	5	3.8	0.4	16.507	55.7	80 (64)
	1	20			66.153	62.9	

注: 最大位移量指的是与窗体垂直方向上材料的最大变形; 最大 Von Mises 应力针对的是真空窗所有材料; 极限强度或屈服强度一列中括号内数值为相应强度值的 0.8 倍。

框架结构采用的是外框 $5\text{mm}\times 5\text{mm}$, 内框 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$, 厚度为 $200\mu\text{m}$ 的硅板, 一定厚度的真空窗材料用双组分环氧胶粘在硅板上. 该结构的优点是硅板分担了一部分大气压力, 使得真空窗的厚度可以更小. 分析可得 200nm 的氮化硅的最大位移为 $0.47\mu\text{m}$, 最大 Von Mises 应力为 273MPa ; 500nm 的聚碳酸酯的最大位移为 11.3nm , 最大 Von Mises 应力为 5.15MPa ; 500nm 的 Mylar 的最大位移为 $0.8\mu\text{m}$, 最大 Von Mises 应力为 5.03MPa .

3 小角散射

应用 TRANSPORT 程序^[8]模拟离子的轨迹得到真空中束斑尺寸为 $1\mu\text{m}$. 束流在经过真空隔离窗时, 由于受介质中原子核电场的作用, 离子发生多次小角度散射, 致使束斑的尺寸展宽. 小角度散射近似为高斯分布. 采用 SRIM 程序^[9]模拟离子与物质的相互作用, 通过追踪离子在物质中的传输得到离子的电子能损、核能损、射程以及相应的歧离. 随机选取 1000 个离子进行跟踪, 对位置分布做高斯拟合, 计算离子横向散射的半高宽. 得到空气中束斑最终尺寸: $1\mu\text{m}\text{-width}\sim 1\mu\text{m}+\text{width}$, 其中 width 指的是束流横向散射的半高宽.

表 2 几种窗体材料允许的最大厚度

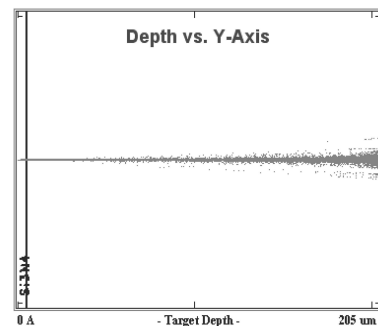
介质	最大厚度/ μm	
	7MeV/u C 离子	50MeV/u C 离子
氮化硅+500 μm 空气	1.5	40
氮化硅+200 μm 空气	6	130
氮化硅+150 μm 空气	10	170
聚碳酸酯+500 μm 空气	5	150
聚碳酸酯+200 μm 空气	25	340
聚碳酸酯+150 μm 空气	35	400
Mylar+500 μm 空气	5	150
Mylar+200 μm 空气	20	300
Mylar+150 μm 空气	30	340

窗体材料及厚度的选择对空气中束流的空间分辨率及真空的安全性影响很大, 根据微束装置的设计指标——空气中束斑的尺寸小于 $2\mu\text{m}$ (FWHM), 得到表 2 几种窗体材料允许的最大厚度. 表 3 给出典型的低能 C 离子在几种候选真空窗和空气中的传输情况. 其中

的横向射程指的是离子在介质的出射面 y 、 z 方向的投影. (定义离子的入射方向为 x 轴, 称之为纵向; 与入射方向垂直的坐标轴为 y 轴、 z 轴, 称之为横向.) 图 2 为 7MeV/u 的 C 离子穿过真空窗和空气的剖面图.

表 3 7MeV/u 的 C 离子穿过真空窗和空气介质后的横向射程半高宽

窗体结构	厚度	横向射程	
	$t/\mu\text{m}$	y/nm	z/nm
氮化硅+空气	2+400	986.58	988.72
	2+200	496.33	466.26
	6+200	964.06	1063.30
聚碳酸酯+空气	0.2+200	131.33	127.01
	5+500	843.51	963.07
	5+200	345.49	330.72
Mylar+空气	20+200	789.59	856.93
	0.5+200	84.56	89.94
	5+500	966.14	952.46
	5+200	380.95	414.90
	20+200	978.78	983.26
	0.5+200	91.56	99.70

图 2 7MeV/u 的 C 离子穿过 $5\mu\text{m}$ 氮化硅和 $200\mu\text{m}$ 空气的 x - y 剖面图

4 讨论

通过对真空窗的安全性及束斑展宽分析可知: 离子的能量越高, 束斑展宽越小; 窗体和空气层的厚度越小, 束斑展宽越小. 氮化硅属脆性材料, 硬度大而韧度小, 用框架结构比较合适, 最大等效应力出现在硅板边缘. 聚碳酸酯和 Mylar 属有机聚合物材料, 容易发生形变, 用圆形结构比较合适, 最大等效应力出现在薄膜边缘; 聚脂薄膜的真空窗可以同时作为样品的被衬最小化窗体与样品台的距离.

5 结论

运用有限元分析软件和SRIM程序模拟分析得到两种不同类型的候选真空窗. 1) 厚度为200nm的

氮化硅框架结构真空窗(框架为厚度200 μm , 外框5mm \times 5mm, 内框1mm \times 1mm的硅板材料). 2) 厚度为5 μm –20 μm 直径为0.25mm–1mm圆形结构的聚脂薄膜. 空气的厚度200 μm 为宜.

参考文献(References)

- 1 Greif K D, Brede H J, Frankenberg D et al. Nucl. Instrum. Methods B, 2004, **217**: 505–512
- 2 Polak W, Hajduk R, Lebed S et al. Report No 1955/AP
- 3 Matsuyama S et al. CYRIC Annual Report 2005
- 4 Ontalba Salamanca M A, Ager F J, Ynsa M D et al. Nucl. Instrum. Methods B, 2001, **181**: 664–669
- 5 Sakai T, Oikawa M, Sato T. Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, 2005, **6**(1): 69–71
- 6 Cholewa M, Saint A, Legge G J F et al. Nucl. Instrum. Methods B, 1997, **130**: 275–279
- 7 HUANG Jin-Chang. Material Mechanics. Beijing: Aeronautics Industry Press, 1993. 137–140 (in Chinese) (黄锦常. 材料力学. 北京: 航空工业出版社, 1993. 137–140)
- 8 CAREY D C, BROWN K L, ROTHACHER F. TRANS-POT Code. <http://fermitools.fnal.gov/index.html>
- 9 Ziegler J F. SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter, www.srim.org

Vacuum Window of Intermediate Energy Heavy-Ion Microbeam Irradiation Facility^{*}

SHENG Li-Na^{1,2;1)} SONG Ming-Tao² LIU Jie²

¹(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China)

²(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The beam must be extracted into the air through the vacuum window to irradiate the living cell. In the window design, the material and thickness must be chosen to compromise the beam spot size broadening and the window safety. The structure-static analysis on the window of different structures and materials is done with the finite element analysis method, and the deformation and the equivalent stress are simulated. The safety of these candidates is investigated using the intensity theory. In addition, the small angle scattering and the transverse range of ions are simulated using SRIM code, including all the effects on the beam spot size broadening, such as the incident ion energy, the material and the thickness of the window and the air composing. At last, the appropriate vacuum windows are presented, including the structure, material and thickness.

Key words microbeam, vacuum window, equivalent stress, beam spot broadening

Received 7 January 2008

^{*} Supported by Development of the Key Equipment for Research of CAS (0713040YZ0)

1) E-mail: shenglina@impcas.ac.cn