

文章编号: 1007-4627(2016)01-0072-05

金刚石探测器用于C-ADS注入器II束损探测的模拟研究

左伟^{1,2}, 苏有武¹, 庞成果³, 李武元^{1,2}, 徐俊奎^{1,3}, 李宗强¹,
毛旺^{1,4}, 严维伟^{1,5}, 徐翀^{1,2}, 付鑫^{1,2}

- (1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 兰州大学, 兰州 730000;
4. 西北师范大学, 兰州 100049;
5. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要: 加速器驱动次临界系统C-ADS注入器II采用强流超导质子直线加速器, 设计流强达到10 mA。强流质子束产生的束流损失有可能损伤超导腔, 需要专用的束流损失监测系统, 束流损失探测器(BLM)需要在高能沉积导致超导腔失超之前提供警报。通过MCNPX模拟计算10 MeV质子在半波谐振腔(HWR)不同位置损失产生的辐射场, 比较选取超导腔管道进出口处4个位置为推荐束损探测器放置的位置, 结合HWR腔结构和束损探测器选择的影响因素, 计算了次级辐射在金刚石探测器中的能量沉积以及 $1^\circ \sim 5^\circ$ 不同质子入射角度对探测的影响。结果表明, 根据不同位置处探测器的能量沉积关系可以推断出束损点; 不同入射角度不会影响生成粒子的能量分布, 只轻微影响生成粒子的数目。

关键词: HWR; 辐射场; 束流损失探测器; MCNPX

中图分类号: TL77 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.01.072

1 引言

加速器驱动次临界系统C-ADS以高能强流质子束轰击靶核引起散裂反应, 产生的散裂中子作为外中子源驱动和维持次临界堆芯中的核嬗变反应^[1]。加速器采用强流超导质子直线加速器, 其注入器II包括离子源, RFQ及超导加速段。最终质子束流被加速到10 MeV, 流强为10 mA^[2]。

质子在加速器中被加速时, 强束流的空间电荷效应不仅会扰动线性磁聚焦系统, 其具有的强非线性效应, 使得束流电荷密度出现非均匀化, 引起束流发散度增长、并造成低密度束晕的形成, 加之束流准直的误差等因素会造成束流损失^[3], 并且随着加速器流强的不断提高, 损失的束流也会不断增加, 过强的束流损失会造成超导腔失超从而影响加速器稳定运行, 同时也会产生次级辐射, 这是加速器在建设和运行中都必须考虑的问题。束流损失产生的辐射分为瞬发辐射和剩余辐射, 瞬发辐射是由于损失质子轰击在加速器管道上, 产生次级

粒子, 如中子、光子、电子等, 在空气中产生辐射场。C-ADS注入器II的超导加速段采用半波谐振腔(HWR), 超导腔比常温的加速段对束流损失更敏感, 因此, 必须建立专用的束流损失监测系统。

导致超导腔失超的因素很多, 如束流的能量、流强、损失的位置, 允许沉积在超导腔上的热量等^[4]。尤其在低能段, 由于次级辐射产生率较低, 同时在材料中沉积的能量会更高, 因此束流损失监测变得很困难, 目前尚未有成熟的经验可以借鉴。

束流损失探测器(BLM)的选择需要考虑探测器固有的灵敏度、信号的输出类型、是否易于刻度、探测器的测试、探测器材料抗辐照性能、辐照损伤下刻度漂移、可维护性、成本(包括后端电子学)、物理尺寸、动态范围、时间分辨、对辐射响应的占空比、信号幅度、强辐射场对探测器性能的影响、探测粒子类型、探测器需要放置的位置等^[5]。本文根据ADS注入器II的HWR腔的结构, 用蒙特卡罗方法模拟质子在超导腔中损失产生的辐射场, 从而选择BLM的最佳位置, 同时也模拟

收稿日期: 2015-03-03; 修改日期: 2015-04-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120096);

作者简介: 左伟(1989-), 男, 四川乐山人, 硕士研究生, 从事核技术及应用研究, E-mail: zuou@ihep.ac.cn。

通信作者: 苏有武, E-mail: suyowu@impcas.ac.cn。

金刚石探测器置于不同位置时, 束损产生的次级辐射在探测器中沉积的能量分布, 研究金刚石作为低能质子BLM的可能性, 为建立C-ADS注入器II BLM系统做前期研究。

2 蒙特卡罗(MC)模拟计算

2.1 质子在铌中射程的模拟

质子在物质中的射程用SRIM程序^[6]来模拟。HWR腔最里层采用铌, 厚度为3 mm, 外层为钛, 图1为1 ~ 10 MeV的质子分别在铌和钛中的射程, 10 MeV质子在铌中射程约为284 μm, 而铌腔管壁的厚度为3 mm。由此可知, 管道内发生束流损失时无论质子以任何角度入射到铌中, 也无法穿透铌, 进入到环境中。因此, BLM系统不能通过在真空系统外探测质子来实现。

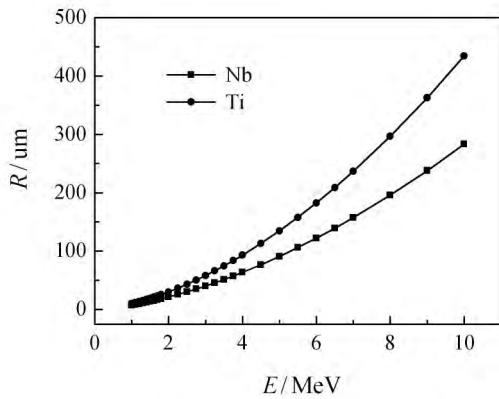


图 1 质子在物质中射程

2.2 HWR腔次级辐射场的模拟

注入器 II 超导段采用 HWR 腔, HWR 腔结构复杂, 图 2 左边为超导腔腔体剖面图, 白色为里层, 材料为铌, 绿色为外层, 材料为钛, 中间为液氮用于超导腔的降温, 中心为束流真空管道, 直径 10 cm。图 2 右边为模拟计算采用的简化模型。

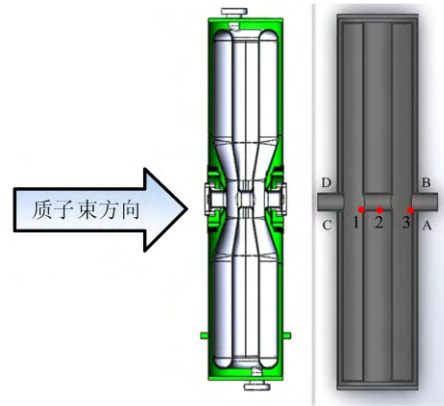


图 2 (在线彩图)HWR腔剖面图及模拟计算简化模型剖面图

使用MCNPX软件^[7], 选取HWR腔具有代表性的3个点(见图2红点标注1, 2, 3点), 计算束损发生在这3点以及腔体内均匀损失产生的辐射场, 得到次级粒子的分布信息。辐射场中光子与中子有相同的分布趋势, 光子产额最高, 电子的射程很短, 穿过钛进入环境中数量很小, 相同位置电子产额比光子产额小两个量级。图3(a), 3(b), 3(c)分别表示1, 2, 3点, 图3(d)表示线源均匀损失时, 10 MeV单一质子产生的中子分布。由

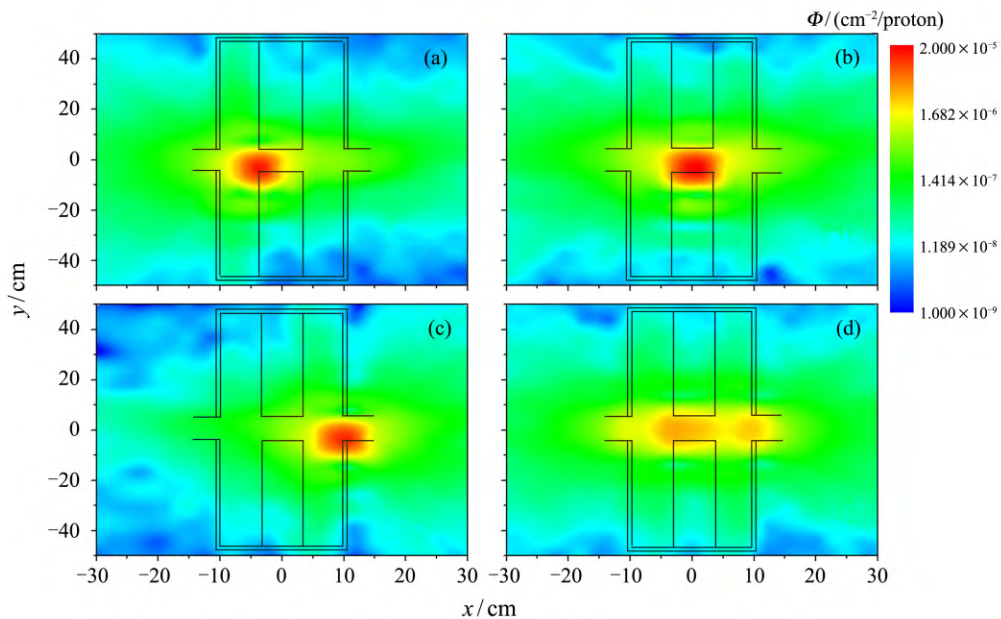


图 3 (在线彩图)单一质子在不同点处及均匀损失产生的中子分布

结果可知由于 HWR 腔结构复杂,束损发生在不同点或者是均匀损失时,管道外不同位置的粒子通量相差很大,即单一探测器放置在相同位置由于束损点不同造成探测器探测到的粒子数也不同,无法判断束流损失量和位置,所以 HWR 腔的束损探测必须采用多个探测器组合用作束损探测。由辐射场信息可以选出粒子通量最高的 4 个位置,即管道进出口上下两端 4 个位置(见图 2 标注 A、B、C、D 4 个位置)。结合探测器选择的影响因素以及 HWR 腔的结构、可供探测器放置的位置,上述 4 个位置为推荐 BLM 放置的合理位置。

2.3 金刚石探测器在束损探测的模拟

金刚石探测器 (Poly-crystalline Chemical Vapor Deposition, PCVD) 是半导体探测器,其中的碳原子以共价键结合,内部没有自由电子。当电离辐射辐照到金刚石探测器上且沉积能量超过 13 eV 时,在金刚石晶体内部可激发出电子空穴对,而电子空穴对在外加电场的作用下定向移动形成电流,该电流可用灵敏电流计或耦合成电压信号被外电路测量(如图 4 所示)。金刚石探测器具有耐辐照强度高(1 MGy)、体积小(10 mm×10 mm×0.5 mm)、计数率高、时间分辨好(1 ns)、能在极低温条件下工作等特点^[8]。大型强子对撞机(LHC)上的 ATLAS 和 CMS 实验,均采用金刚石探测器对束流的状态进行监测,并作了相关的模拟计算工作^[9-12],CMS 实验将金刚石探测器用作快保护,将其放置在碰撞点附近,判断粒子通量,提供实时的束流信息,如果加速器中的部件发生故障,产生束损,监测系统标记异常束流反馈给加速器,必要时产生终止信号截断束流。由于金刚石探测器的诸多优点,可作为 HWR 腔束损探测的候选探测器。

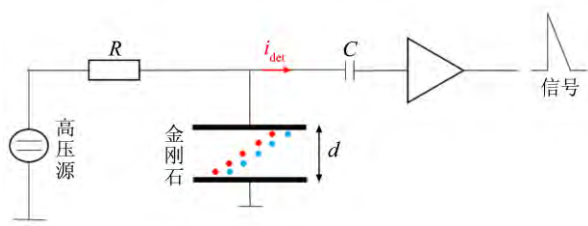


图 4 (在线彩图) 金刚石探测器工作原理

质子损失是以很小的角度入射到腔体管壁上,因此以图 2 为计算模型,质子束以 1 ~ 5° 不同角度入射到 HWR 腔内表面,在 A-D 点放置金刚石探测器,用 MCNPX 模拟进入金刚石探测器的次级粒子通量和能量沉积。图 5 表示 10 MeV 单一质子损失在 3 号点时,进入 A、B、C、D 4 个位置处探测器的粒子通量随入射角

度的变化,图中 Ap, An, Bp, Bn, Cp, Cn, Dp, Dn 分别表示 A、B、C、D 点处光子和中子的通量。可以看到随着入射角度的增加,各点处的粒子通量都有所增加,但增加的量很小。图 6 表示 10 MeV 单一质子损失在 3 号点,进入 A、B 两个位置处不同粒子的能量分布随入射角度的变化。图中 $A_iN(P)$, $B_iN(P)$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) 表示入射角度为 i° 时,进入 A、B 点处中子(光子)的能量分布。从图中可以看到,不同入射角度不会影响生成粒子的能量分布,只轻微影响生成粒子的数目。

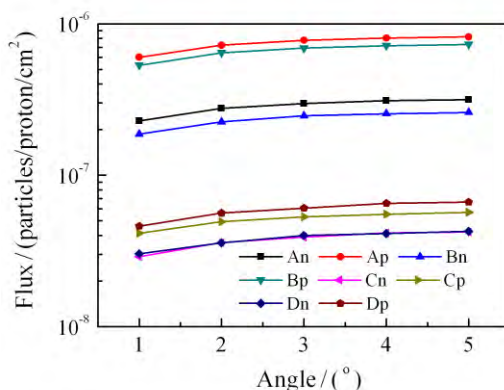


图 5 (在线彩图) 各点处次级粒子通量

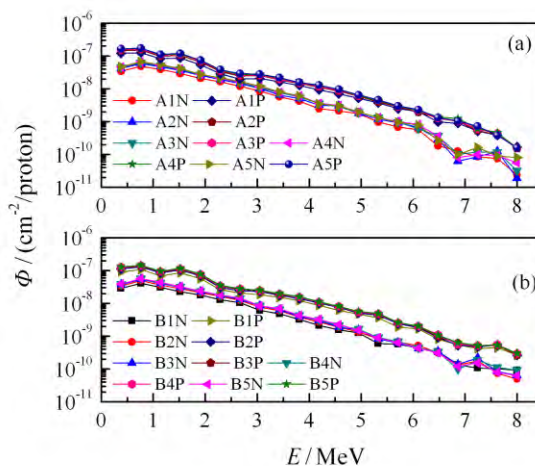


图 6 (在线彩图) 次级粒子能量分布随入射角度的变化

表 1 ~ 3 表示 10 MeV 单一质子分别在 1, 2, 3 号点处损失,进入各个位置处探测器的粒子数和探测器中沉积的能量,设计合适的后端电子学线路,即可将沉积的能量转化为可测量的电子学信号,从而达到探测束流损失的目的。从表中可以看到沉积的能量正比于进入探测器的粒子数,且不同位置处发生束损,各探测器中沉积的能量也不同。以 1 号点处损失为例,4 个位置沉积能量大小 $C > D > B > A$,因此,根据 4 个探测器组成系统的能量沉积大小和关系,可以大致判断束损量和位置。

表 1 1号点处损失时各位置粒子通量及能量沉积

入射角度 Angle/(°)	粒子注量 Φ /(cm ⁻² /proton)								能量沉积(n+p) E/MeV			
	An ($\times 10^{-8}$)	Ap ($\times 10^{-8}$)	Bn ($\times 10^{-8}$)	Bp ($\times 10^{-7}$)	Cn ($\times 10^{-7}$)	Cp ($\times 10^{-7}$)	Dn ($\times 10^{-7}$)	Dp ($\times 10^{-7}$)	A ($\times 10^{-9}$)	B ($\times 10^{-9}$)	C ($\times 10^{-9}$)	D ($\times 10^{-9}$)
1	6.07	8.72	7.30	1.34	1.46	3.95	1.16	2.83	1.72	2.68	6.11	4.12
2	6.90	8.58	8.17	1.51	1.81	4.76	1.39	3.43	1.34	2.73	8.54	4.80
3	6.80	8.25	8.50	1.53	1.97	5.15	1.54	3.71	1.09	2.99	9.19	5.36
4	6.78	7.85	8.66	1.57	2.06	5.35	1.58	3.86	5.85	3.14	1.05	5.47
5	6.61	7.50	8.69	1.59	2.11	5.47	1.62	3.92	4.27	3.21	1.07	6.04

表 2 2号点处损失时各位置粒子通量及能量沉积

入射角度 Angle/(°)	粒子注量 Φ /(cm ⁻² /proton)								能量沉积(n+p) E/MeV			
	An ($\times 10^{-7}$)	Ap ($\times 10^{-7}$)	Bn ($\times 10^{-7}$)	Bp ($\times 10^{-7}$)	Cn ($\times 10^{-7}$)	Cp ($\times 10^{-7}$)	Dn ($\times 10^{-7}$)	Dp ($\times 10^{-7}$)	A ($\times 10^{-9}$)	B ($\times 10^{-9}$)	C ($\times 10^{-9}$)	D ($\times 10^{-9}$)
1	1.06	1.65	1.20	2.45	79.50	1.17	97.60	2.16	2.07	2.99	1.45	2.46
2	1.22	1.83	1.41	2.88	98.30	1.39	1.17	2.57	2.16	4.07	1.50	3.48
3	1.27	1.88	1.52	3.02	1.06	1.50	1.32	2.77	2.39	4.22	1.70	3.54
4	1.29	1.86	1.55	3.10	1.11	1.57	1.35	2.89	2.53	4.37	1.88	3.71
5	1.29	1.86	1.58	3.10	1.15	1.60	1.40	2.97	2.52	4.37	1.99	4.03

表 3 3号点处损失时各位置粒子通量及能量沉积

入射角度 Angle/(°)	粒子注量 Φ /(cm ⁻² /proton)								能量沉积(n+p) E/MeV			
	An ($\times 10^{-7}$)	Ap ($\times 10^{-7}$)	Bn ($\times 10^{-7}$)	Bp ($\times 10^{-7}$)	Cn ($\times 10^{-8}$)	Cp ($\times 10^{-8}$)	Dn ($\times 10^{-8}$)	Dp ($\times 10^{-8}$)	A ($\times 10^{-8}$)	B ($\times 10^{-8}$)	C ($\times 10^{-10}$)	D ($\times 10^{-9}$)
1	2.29	6.02	1.87	5.32	2.90	4.14	3.03	4.61	5.26	1.18	2.11	1.18
2	2.76	7.23	2.25	6.44	3.59	4.93	3.58	5.62	5.97	1.65	3.50	1.33
3	2.97	7.78	2.47	6.91	3.90	5.31	3.99	6.06	6.81	1.94	4.49	1.50
4	3.11	8.05	2.55	7.18	4.15	5.53	4.11	6.53	6.99	2.10	5.70	1.59
5	3.16	8.20	2.60	7.31	4.22	5.70	4.25	6.65	7.17	2.26	6.10	1.66

3 总结与展望

中国科学院先导专项 C-ADS 注入器 II 超导加速段采用的是 HWR 腔, 由于 HWR 腔对于束流损失所沉积的能量很敏感, 必须建立 BLM 系统。在该能量段 (10 MeV 以下), 质子损失产生次级粒子的量很小, 腔体的结构复杂, 对于探测器以及探测点的选择也是一个难点, 目前国内外也没有类似经验可以借鉴, 本文对此进行了前期研究。由于 10 MeV 及以下质子射程很短, 不能穿过腔体进入环境, 因此, 在此能量段质子不能作为束损探测的粒子; 利用 MCNPX 模拟计算了不同位置处束流损失产生的辐射场。根据辐射场信息以及 HWR 腔的结构选择束损探测点。由于金刚石探测器在束损探测中的诸多优势, 模拟计算了次级辐射在金刚石探测器中的能量沉积, 根据 4 个探测器组成系统的能量沉积大小和关系, 可以推断出束损量和位置。质子以不同角度入射时, 产生的次级粒子能量分布不受影响, 其数目影响也很小。

对于束损探测粒子的选择, 光子产量最高, 但是会受到场致辐射的影响。中子是唯一可以判定发生束流损失的粒子, 但是中子的探测效率较低。电子射程很短很难穿过腔体进入环境, 产量极低, 若探测器可以放置在液氦中, 探测电子比探测光子和中子更能定位束损点。在该能量段下建立 HWR 腔的束流损失监测系统, 还需要对辐射场的特性以及不同探测器的性能等进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] ZHAN Wenlong, XU Hushan. Bulletin of Chinese Academy and Sciences, 2012, **27**(3): 375. (in Chinese)
(詹文龙, 徐珊珊. 中国科学院院刊. 2012, **27**(3): 375.)
- [2] WANG Zhijun, HE Yuan, LIU Yong, *et al.* Chinese Physics C(HEP & NP), 2012, **36**(3): 256.
- [3] FU Shilian, FANG Shouxian. China Nuclear Science and Technology Report, 2001(10): 110. (in Chinese)
(傅世年, 方守贤. 中国核科技报告, 2001(10): 110.)
- [4] WITTENBURG K. Beam loss and Machine Protection[C]//

- HOFMANN I. Proc. 33rd ICFA Workshop, Bensheim, Germany, 2005: 65.
- [5] SHAFER R E. A tutorial on beam loss monitoring[C]// Proc 10th Beam Instrumentation Workshop, Brookhaven, May 2002; 44.
- [6] ZIEGLER J F, ZIEGLER M D, BIERSAKE J P. Nucl Instr and Meth B, 2010, **268**: 1818.
- [7] PELOWITZ Denise B. MCNPXTMUSER'S MANUAL. 2.5.0, 2005
- [8] ZHOU Haiyang, ZHU Xiaodong, ZHAN Rujuan. Nuclear Techniques, 2005(02): 135. (in Chinese)
(周海洋, 朱晓东, 詹如娟. 核技术, 2005(02): 135.)
- [9] HERNANDO L Fernandez, CHONG D, GRAY R, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2005, **552**: 183.
- [10] GORISEKA A, CINDROB V, DOLENC I, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2007, **572**: 67.
- [11] CASTRO E, BACCHETTA N. Physics Procedia, 2012, **37** : 2097.
- [12] SARCHIAPONE L, BRUGGER M, DEHNING B, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2007, **581**: 511.

Simulation of the Diamond Detector for the C-ADS Injector II Beam Loss Detection

ZUO Wei^{1,2}, SU Youwu¹, PANG Chengguo³, LI Wuyuan^{1,2}, XU Junkui^{1,3}, LI Zongqiang¹,
MAO Wang^{1,4}, YAN Weiwei^{1,5}, XU Chong^{1,2}, FU Xing^{1,2}

(1. *Institution of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Science Academy, Beijing 100049, China;*

3. *Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

4. *Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China;*

5. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*

Abstract: The Chinese Accelerator Driven Subcritical System (C-ADS) injector II consists of super-conduction accelerating section which is half wave resonator (HWR), the designed beam intensity is 10 mA. To avoid the damage to the resonator due to proton beam loss, special Beam Loss Monitor (BLM) system is essential. BLM system could provide alarm signal when high energy deposition occurs which may cause the resonator quenching. Radiation field of 10 MeV proton lost at different point of the HWR are simulated with MCNPX, BLM could be set at proper positions based on the simulation. Considering the structure of HWR and the BLM detector selecting influence factor, radiation energy deposition in the diamond detector are simulated with MCNPX when the proton incidence angle change from $1^\circ \sim 5^\circ$, Possible beam loss point can be deduced from the relationship of energy deposition in detectors at different locations. The results indicate that energy spectra of secondary particles are independent with incidence angle; the number of secondary particles may be influenced slightly.

Key words: HWR; radiation filed; beam loss monitor; MCNP

Received date: 3 Mar. 2015; **Revised date:** 15 Arp. 2014

Foundation item: National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project(2011YQ120096)

Corresponding author: SU Youwu, E-mail: suyowwu@impcas.ac.cn.