

上海光源光束线站 BL18U 韧致辐射剂量的计算与测量

徐加强^{1,2} 夏晓彬¹ 盛尹祥子¹ 秦锐芳¹ 张冬¹ 费平安¹ 姚明¹ 刘嗣鑫¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 韧致辐射是第三代先进同步辐射光源光束线站辐射屏蔽的重点。上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)是国际上正在运行的第三代先进同步辐射光源之一。上海光源蛋白质微晶结构光束线(BL18U)线站是正在试运行中的光束线站。本文采用 FLUKA 软件模拟计算了蛋白质微晶结构光束线(BL18U)线站因韧致辐射的散射和光中子引起的辐射剂量率分布。分析了因狭缝开孔尺寸、储存环内流强的变化所引起的辐射剂量变化。用高灵敏度的光子和中子探测器测量了 BL18U 光学棚屋外的光子和光中子剂量率。测量结果表明模拟计算的可靠性。本研究采用的模拟和测量方法可用于其它线站的辐射剂量水平评估,并为上海光源后续线站的屏蔽设计提供参考。

关键词 同步辐射, 光束线站, 蒙特卡罗方法, FLUKA, 韧致辐射, 辐射测量

中图分类号 TL72, R142

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070101

高能电子在同步光源储存环内旋转时,会与真空管内残余气体分子的库仑场发生非弹性碰撞,产生气体韧致辐射。在储存环偏转磁铁之间的直线节段,产生的气体韧致辐射将沿电子的轨道不断增强,形成张角为 m_0c^2/E_0 大小尖锐前冲,光子能谱范围从 $0-E_0$ 连续呈 $1/E_0$ 分布的韧致辐射源项,这里 m_0c^2 为静止电子能量, E_0 为初始电子能量^[1-2]。气体韧致辐射伴随插入件产生的同步辐射光一起传输到下游光束线站,并与光束线站上的各类光学器件相互作用后形成电磁级联簇射。光子能量超过器件光核反应阈值(大于 5-15 MeV)的韧致辐射,通过巨核偶极共振衰变、准氦核光致蜕变和核内崩溃三种机制产生光核反应中子(以下简称“光中子”)^[3]。韧致辐射的散射光子和光中子是光束线站屏蔽的主要辐射源项^[4-5]。

光束线站的辐射源项和屏蔽设计已有许多研究成果,如韧致辐射、光中子能谱、辐射剂量的测量与计算^[3,6]、次级韧致辐射的屏蔽计算等^[4-5,7-9]。这些研究都局限于测量和计算某个散射靶,而缺少对整条光束线站的辐射剂量计算和测量。本研究采用 FLUKA^[10-11]软件开展蒙特卡罗模拟计算气体韧致辐射在光束线站上产生的辐射剂量。FLUKA 软件能够模拟计算包括韧致辐射与各类光学器件相互作用

产生的电磁级联簇射,以及通过光核反应产生的光中子,并可以将注量转换为周围剂量当量^[12]得到各类粒子所致的辐射剂量。研究对象选择上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)新建的典型插入件光束线站——蛋白质微晶结构光束线(BL18U)。为了模拟计算结果与测量结果比较,对 BL18U 棚屋外的辐射剂量分布进行了实验测量。

1 BL18U 线站布局简介

上海光源的光束线站一般由一个光学棚屋和一个实验棚屋组成, BL18U 的布局特点是具有比较长的光学棚屋,以保证入射光高通量的前提下,照射至样品处的光斑尺寸尽量小。为减少建设代价,在其布局上分为两个光学棚屋。图 1 给出了沿光束线 BL18U 光学棚屋布局示意图,两个光学棚屋分别为图 1 中所示的 OE1 和 OE2。这两个光学棚屋之间通过一段 7 m 长的光束线输运管道连接。OE1 左侧为储存环屏蔽墙,右侧为实验大厅。光束线输运管道和 OE2 两侧部分空间布置了机柜,其余空间也是实验大厅。

图 1 给出了 BL18U 光束线上对韧致辐射有较大影响的关键光学设备。这些设备包括:光学前端区

第一作者:徐加强,男,1974年出生,2001年于上海大学获硕士学位,现为博士研究生,研究领域为核技术及应用

通讯作者:夏晓彬, E-mail: xi Xiaobin@sinap.ac.cn

收稿日期:2014-04-16, 修回日期:2014-05-12

的安全光闸(Safety Shutter)、在 OE1 内的水冷狭缝 (Slits)和准直吸收器 1(Collimator 1)、在 OE2 内的单

色仪(Monochromator)和吸收器 2 以及安全光闸 2 (Safety Shutter 2)。

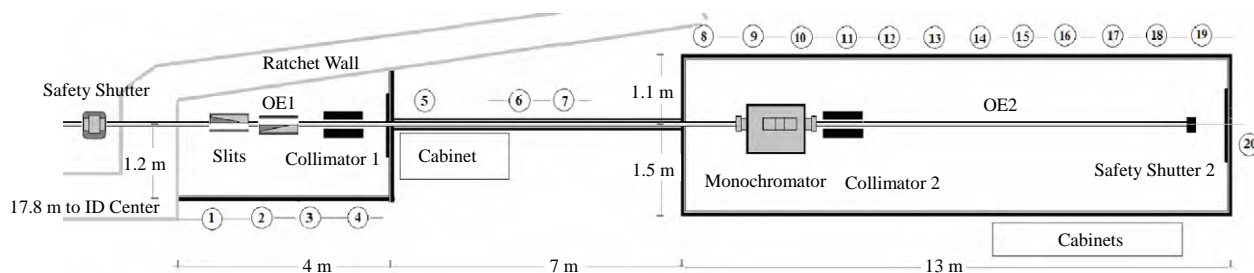


图 1 BL18U 线站平面布局及监测点布置示意图

Fig.1 Layout of BL18U plane view and arrangement of measurement points.

2 剂量率的模拟计算

2.1 计算模型的建立

采用 FLUKA 软件模拟计算了气体韧致辐射在直线节内产生后,在光束线站 BL18U 光学棚屋内的传输过程。计算模型根据 BL18U 布局图(见图 1)和 BL18U 的射线追迹图(见图 2)建立。如图 2 所示,3.5 GeV 能量的电子在长 12.5 m 的标准直线节真空管内传输,在直线节末端电子通过 1.27 T 的偏转磁场转移到储存环的下一个单元;产生的气体韧致辐射通过打开的前端安全光闸和储存环的锯齿屏蔽墙开孔,进入到 BL18U 的光学棚屋;然后与 OE1 内的水冷狭缝和准直吸收器相互作用,透过狭缝和准直吸收器开孔的韧致辐射又通过光束运输管道进入到 OE2 内,与单色仪作用后最终损失在最后一个准直吸收器上。气体韧致辐射被器件散射后入射到光

学棚屋和管道上,产生的光子和光中子经棚屋屏蔽层的衰减,最后到达棚屋外。BL18U 插件所在直线节处的真空度平均值约 99.32 nPa,其真空管内残余气体有效 Z 值为 3.42,其主要成分依据真空测试数据如表 1 所示。

表 1 SSRF 储存环直线节真空管内的残余气体成分
Table 1 Compositions of the residual gas in the electron storage ring of SSRF.

原子序数 Atomic number Z	残余气体成分 Residual gas composition	摩尔百分比 Mole fraction / %	质量百分比 Weight percent / %
2	H ₂	88.8	35
10	H ₂ O	1.0	4
14	CO	8.3	45
18	Ar	0.9	7
22	CO ₂	1.0	9

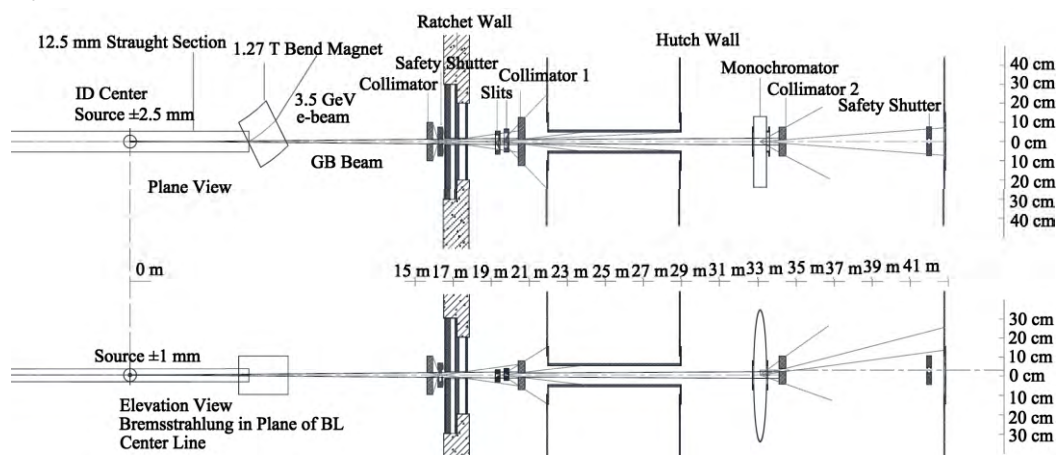


图 2 BL18U 韧致辐射射线追迹示意图

Fig.2 Bremsstrahlung ray trace of BL18U.

2.2 剂量分布

用 FLUKA 软件模拟了 BL18U 线站在储存环工

作在恒流注入模式,束流强度为 220 mA 和 300 mA 时,气体韧致辐射与各类光学器件相互作用后产生的所有粒子在光学棚屋区域的剂量率分布。束流强

度为 220 mA 时的结果如图 3 所示。从图 3 可看出辐射剂量最大点集中在水冷狭缝和单色仪周围。

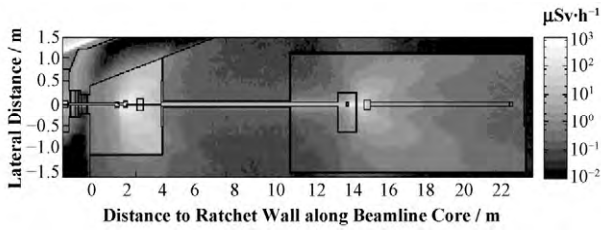


图 3 BL18U 线站光学棚屋的剂量率分布

Fig.3 Dose rate distribution at BL18U optical enclosure.

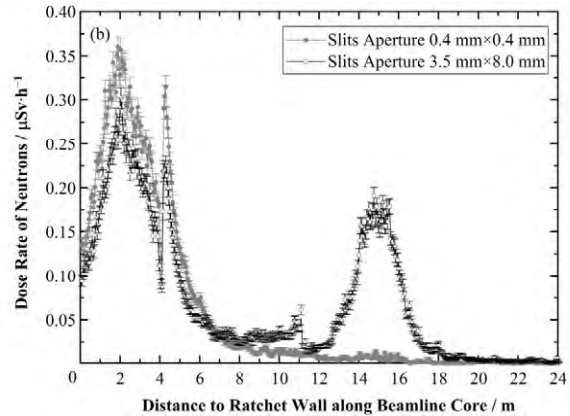
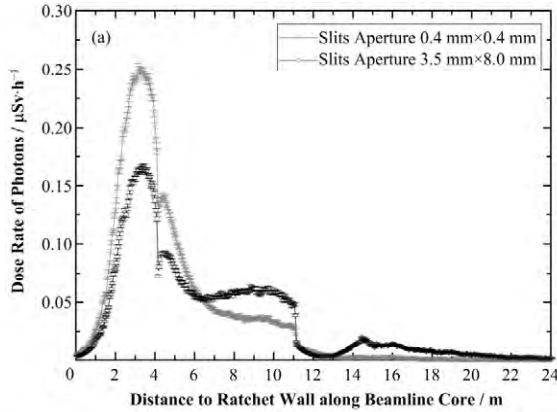


图 4 不同狭缝开口大小, 棚屋外的光子(a)和光中子(b)剂量率分布

Fig.4 Dose rate distribution of photons (a) and photoneutrons (b) out of optical enclosure for different size of slits.

储存环流强为 300 mA, 直线节真空度为 133.32 nPa 时, 气体韧致辐射引起的光学棚屋外辐射剂量率分布如图 5 所示。从计算结果可知, 经过棚屋屏蔽层的衰减吸收, 光子最大剂量率为 $0.3 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, 光中子的最大剂量率为 $0.55 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。水冷狭缝中心距离锯齿墙约 2 m, 而棚屋右侧墙距离束流中心 1.2 m。棚屋外的中子剂量率的最大点对应在图 1 中的 2 测量点, 是水冷狭缝侧向约 90° 的位置处; 而光子剂量率最大点在在图 1 中的 3 号测量点, 约在水冷狭缝靶点前方侧向的 45° 位置处。

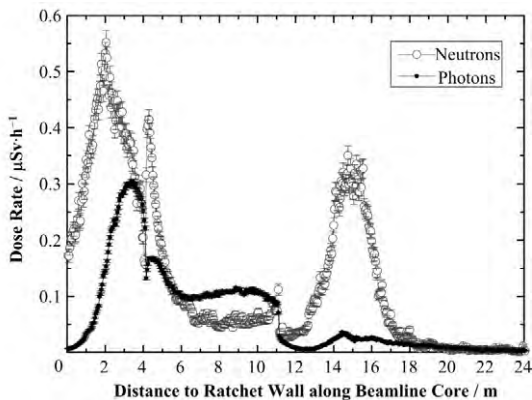


图 5 储存环 300 mA 流强, 直线节 133.32 nPa 真空条件下棚屋外的剂量率分布

Fig.5 Dose rate distribution at the outer OE1 (In case of beam current of 300 mA in storage ring and vacuum of 133.32 nPa in straight section).

2.3 光子和光中子能谱

通过模拟计算统计棚屋内距离水冷狭缝侧向 0.5 m 处和棚屋外距离水冷狭缝侧向 1.2 m 处的光子和光中子能谱如图 6 和图 7 所示。由于韧致辐射能谱近似呈 $1/E$ 分布, 经狭缝、单色器和准直吸收器散射后的光子在经过 16 mm 以上的铅屏蔽墙后, 低能部分被衰减吸收, 能量最可几分布在 1 MeV 左右, 见图 6。光核反应中, 巨共振光核反应的截面较大, 因此散射到侧向的中子主要来自于各项同性的巨共振中子, 平均能量约 2 MeV, 如图 7 所示。

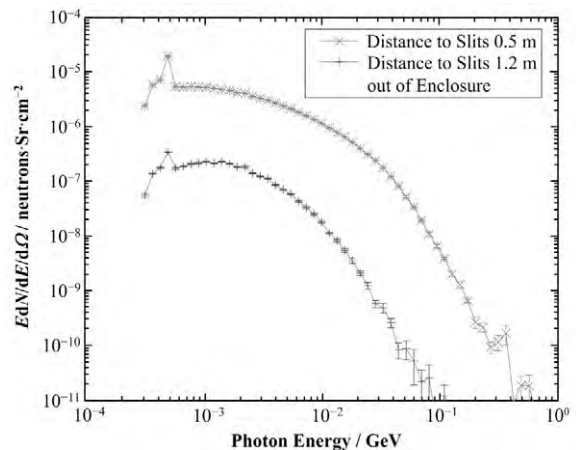


图 6 OE1 侧向屏蔽墙内外的光子能谱
Fig.6 Photon spectrum at the inner and outer OE1.

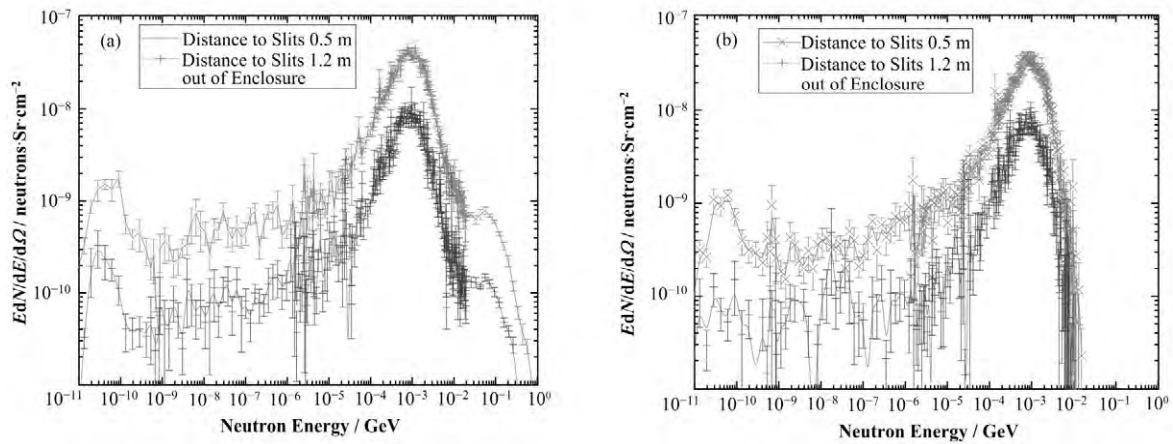


图7 OE1内外光中子能谱 (a) 所有中子, (b) 巨共振中子
Fig.7 Photoneutron spectra at the inner and outer OE1. (a) All neutrons, (b) Giant resonance neutrons

3 剂量率的测量

棚屋外辐射剂量的测量选用高灵敏度环境辐射水平 γ 监测仪(Area Gamma Monitor, AGM5-12-001)和高灵敏度环境辐射水平中子监测仪(Environmental Neutron Monitor, ENM5-12-001)。 γ 监测仪AGM采用球形高压电离室作为 γ 探测器,其直径为250 mm,不锈钢壁厚1.8 mm,容积8.5 L,内充3.333 MPa纯氙气。其灵敏度好于 $0.15 \text{ nSv}\cdot\text{Plus}^{-1}$,测量范围 $0.01\text{--}100 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$,能量响应50 keV–3 MeV。对照图6所示棚屋外的光子能谱,AGM的能量响应范围涵盖了光子注量的主要区域,未涵盖住的部分占光子总注量的20%左右。

高灵敏度中子监测仪ENM的 BF_3 正比计数管为 $250 \text{ mm}\times 350 \text{ mm}$ 的柱体,充气压力79.992 kPa。能量响应范围在0.25 eV–16 MeV,能量响应范围能够涵盖如图7(b)所示的巨共振中子能谱。其灵敏度较高,可以监测低水平的中子剂量,探测下限在 $1 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。该探测器对 $650 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下的 γ 光子剂量不灵敏,总的不确定度小于15%^[13]。

测量时,储存环运行在恒流注入模式,电子流3.5 GeV,储存环流强220 mA,束流平均寿命16 h。BL18U光束线站工作在正常工作状态,此时水冷狭缝开孔为 $3.5 \text{ mm}\times 8.0 \text{ mm}$ 。在光学棚屋外侧,选择

了如图1所示的20个测量点,用AGM和ENM进行辐射剂量的测量。测量点仪器中心高度1.3 m,与束流中心同高,测量点之间间距一般在1 m。每个地点测量约5 min,测量结果取平均值并扣除本底,其中光子本底剂量率平均为 $0.069 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$,中子本底平均剂量率为 $0.010 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

4 测量结果比较分析

用ENM测量OE1、输运管道和OE2外的光核反应产生的中子剂量率。测量结果如图8(a)所示,横坐标为每个测量点距离锯齿墙的距离。这些测量结果与相同位置处模拟计算得到的周围当量剂量一起表示在图8(a)中。如图8(a)所示,ENM的测量结果与只统计巨共振中子的计算结果符合较好。其中测量得到的光中子的最大剂量率,在扣除本底后为 $0.24 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。模拟计算中只统计巨共振中子时,棚屋外最大剂量率为 $0.23 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$,两者符合得很好。

用AGM测量光学棚屋外20个测量点处光子的剂量率结果如图8(b)所示。由图8(b)看出,棚屋外光子的剂量水平较低,计算得到棚屋外最大剂量率为 $0.14 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$,接近实验大厅内的辐射本底水平。受辐射本底涨落的影响,测量结果误差较大。在63%的误差范围内,光子剂量率的模拟计算结果和实验测量结果符合。

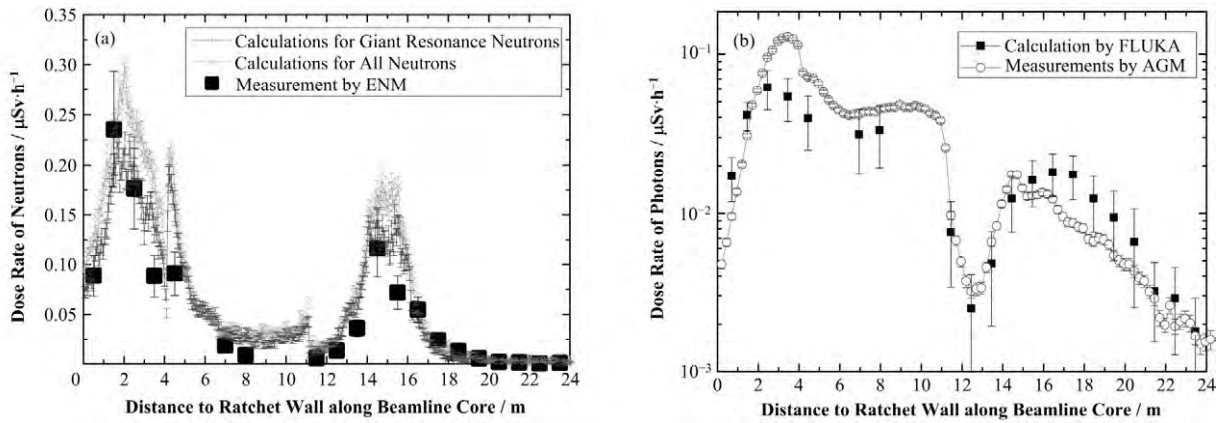


图 8 光学棚屋外辐射剂量率计算与测量结果的比较 (a) 中子, (b) 光中子

Fig.8 Dose rate comparisons of calculated and measured results at outside optical enclosure neutrons (a) and photons (b).

5 结语

本文用蒙特卡罗模拟软件 FLUKA, 通过对上海光源光束线站 BL18U 的布局和射线追迹分析建立计算模型, 模拟计算了上海光源储存环运行在不同狭缝开口、束流强度和真空条件下该线站的气体韧致辐射剂量率分布、光子和光中子能谱、以及线站光学棚屋外的辐射剂量。比较分析了储存环工作在 220 mA 恒流注入模式下 BL18U 光学棚屋和输运管道外的辐射剂量的计算与实验测量结果。光中子剂量率的计算结果与测量结果符合得很好, 而光子剂量率在 63% 的误差范围内一致。测量结果表明模拟计算的可靠性。BL18U 是上海光源 16 个标准直线节插入件光束线站之一, 本研究采用的模拟和测量方法可用于其它线站的辐射剂量水平评估, 并为上海光源后续线站的屏蔽设计提供参考。

参考文献

- Rindi A. Gas bremsstrahlung from electron storage rings[J]. Health Physics, 1982, **42**(2): 187-193
- Pisharody M, Job P K, Magill S, *et al.* Measurement of gas bremsstrahlung from electron storage rings[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1997, **401**(2-3): 442-462
- Pisharody M, Semones E, Job P K. Dose measurements of bremsstrahlung-produced neutrons from thick targets[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1999, **430**: 542-558
- Asai J, Hirayama H. Radiation shielding from secondary gas bremsstrahlung for the first optics enclosure at the Canadian Light Source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, **527**(3): 264-272
- Asai J, Hirayama H. Radiological design study of first optics enclosure against secondary gas bremsstrahlung for the Canadian Light Source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2004, **517**(1-3): 9-18
- Sheu R J, Wang J P, Sheu R D, *et al.* Gas bremsstrahlung and induced photoneutrons in the NSRRC's electron storage ring: a comparison of measurements and simulations[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, **217**(4): 555-563
- Asai J. Radiation shielding considerations against gas bremsstrahlung for the transverse wall at the Canadian Light Source[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2006, **251**(2): 461-469
- Asai J, Hirayama H. Shielding design study against gas bremsstrahlung for the CLS first optics enclosures[J]. Radiation Measurements, 2006, **41**: 186-193
- Job P K, Casey W R. Shielding calculations for the National Synchrotron Light Source-II experimental beamlines[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2013, **698**: 196-201
- Fasso A, Ferrari A, Ranft J, *et al.* FLUKA: status and prospective for hadronic applications[M]. Kling A, Barao F, Nakagawa M, *et al.* ed. Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, Oct 23-26, 2000, Berlin: Springer-Verlag, 2001: 955-960
- Fasso A, Ferrari A, Sala P R. Electron-photon transport in FLUKA: status[M]. Kling A, Barao F, Nakagawa M, *et al.* ed. Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, Oct 23-26, 2000, Berlin: Springer-Verlag, 2001: 159-164
- Pelliccioni M. Overview of fluence-to-effective dose

and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2000, **88**(4): 279–297

13 Li J P, Tang Y L, Li S D, *et al.* Neutron energy response of a modified Andersson-Braun Rem Counter[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1996, **67**(3): 179–185

Dose calculation and measurement for bremsstrahlung at BL18U beamline of SSRF

XU Jiaqiang^{1,2} XIA Xiaobin¹ SHENG Yinxiangzi¹ QIN Ruifang¹ ZHANG Dong¹
FEI Ping'an¹ YAO Ming¹ LIU Sixin¹

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Gas bremsstrahlung is one of the most important radiation sources that needs to be taken into consideration for shielding design of beamlines at the third generation synchrotron radiation light source. Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is one of the third generation synchrotron radiation light source in the world. The Protein Micro-crystallography Beamline (BL18U) is one of the commissioning beamlines and is a representative insertion device beamline at SSRF. **Purpose:** Estimation of radiation dose induced by scattering bremsstrahlung and photoneutrons at BL18U. **Methods:** Dose rate distribution induced by scattering bremsstrahlung and photoneutrons at BL18U are performed by Monte Carlo simulation code FLUKA. The radiation dose was analyzed with the variation of slits size, beam current at storage ring and the vacuum. Dose rate of photons and photoneutrons at the outside of the optical enclosure of BL18U were measured by using high sensitivity photon and neutron monitors. **Results:** The measurement results show that the reliability of the simulation. **Conclusion:** The simulation and measurement methods presented in this study can be applied to evaluate the dose rate level of other beamline stations at SSRF, and provide references to the shielding design for the following beamlines at SSRF in the near future.

Key words Synchrotron radiation, Beamline station, Monte Carlo method, FLUKA, Bremsstrahlung, Radiation measurement

CLC TL72, R142