

强 γ 射线辐射场束流特性诊断

全 林^{1,2}, 苗亮亮¹, 马继明¹, 余小任¹, 宋朝晖¹, 韩长材¹, 马超伟²

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 针对校准实验室内强 γ 射线辐射场束流应用及特性诊断需要, 本文建立了辐射场束流特性模拟方法, 设计了大面积快响应闪烁体与高速 CCD 相机组成的束流诊断系统。通过理论模拟及实验测量, 在亚毫米位置分辨指标下, 实现了对该辐射场内不同距离的束流均匀性、发散角、束流中轴线及快门渡越时间测量。

关键词: γ 射线; 强辐射场; 束流轴线; 快门渡越时间

中图分类号: TL816.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2015)02-0343-06

doi: 10.7538/yzk.2015.49.02.0343

Diagnosis Method of Beam for Intensive γ -ray Radiation Field

QUAN Lin^{1,2}, MIAO Liang-liang¹, MA Ji-ming¹, YU Xiao-ren¹, SONG Chao-hui¹,
HAN Chang-cai¹, MA Chao-wei²

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to meet the requirement of application and diagnosis of beam for intensive γ -ray radiation field in the calibration laboratory, a radiation field beam simulation model was established and a large area and fast response imaging system was developed, which was composed of high-speed CCD camera and scintillation detector. Through simulation and experiment, the beam parameters were gained under measurement millimeter spatial resolution for the radiation field, including uniformity, divergence angle, the axis of the beam and shutter transit time.

Key words: γ -ray; intensive radiation field; beam axis; shutter transit time

校准实验室内, 强钴源 γ 射线参考辐射场是核辐射探测系统研发、核仪器仪表检定校准、辐射成像系统性能测试等的重要实验平台^[1], 对束流特性的准确测量是辐射场效能发挥的前提。此类辐射场照射容器结构复杂, 辐射源活度高且自吸收强, 同时屏蔽材料、实验环境散

射、照射器准直孔同心度等均会影响辐射场参数的准确定值, 而现有技术仅能满足 UNIDOSE 剂量计、热释光剂量计等对辐射场照射量(比释动能或吸收剂量)进行测量^[2-3]。虽然 ISO4037 等标准对辐射参考点的辐射剂量率、能量、照射野均匀性及快门渡越时间参数

均作了明确要求^[4],但缺乏有效的测试方法,尤其在强钴源辐射场照射野、快门特性诊断等方面一直缺乏合适的诊断手段,迫切需要开展强 γ 射线辐射场测试探索^[5-6]。本文以西北核技术研究所的万居里钴源辐射场为对象^[7],对辐射成像方法诊断辐射场束流特性进行研究。

1 束流特性模拟

本工作结合辐射源及照射器参数,采用MCNP程序^[8],对放射源自吸收、辐射场能谱、注量及束流均匀性分布进行计算,为测试方法设计及结果分析提供参考。

1.1 放射源自吸收

按照GB/T 12162.2—2004规定的校准源

表1 设定条件下模拟的放射源自吸收及能量离散

Table 1 Simulation results of source's self-absorption and energy dispersion with setting condition

辐射源	10^{-15} 光子数/ s^{-1}	10^{-13} 自吸收能量/(MeV· s^{-1})	自吸收份额/%	初始平均能量/MeV	出射平均能量/MeV
^{60}Co	2.06	1.26	13.6	1.25	1.14

1.2 束流能谱、强度及剂量率

依据图1所示的照射器结构及布源方式^[7],设置实验室空间为长方体(长10 m、宽6 m、高5 m),墙体厚度为0.5 m,照射器布置在放射源距地面1.5 m、距后墙2 m的实验室中轴线处,其准直口朝前墙,计算中忽略实验台、物品等对辐射场的影响。设定将表1所列的放射源布置在照射器源仓中心,由MCNP程序 F_5 计数,对放射源在2 m处($x=2$ m)空气中产生的能谱、 γ 光子注量率及剂量率进行模

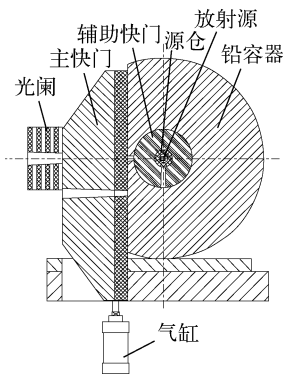


图1 照射器结构原理图

Fig. 1 Structure of irradiator

比活度及相关要求^[9],在不考虑照射器、环境散射等条件下,设置如下辐射源参数:灵敏体为圆柱形分布、活性区尺寸为 $\phi 21$ mm \times 23 mm、采用双层20 μm 不锈钢包壳、钴材料密度为8.99 g/ cm^3 ,出射光子在灵敏体中服从体均匀分布,比活度为 3.7×10^{15} Bq· kg^{-1} ,按照 4π 方向、体均匀分布模式对源粒子进行随机抽样,由 F_6 卡(栅元平均能量沉积)对圆柱表面出射粒子能量及强度进行统计,计算结果相对不确定度在1%以下,模拟得到的放射源自吸收及能量离散结果列于表1。由表1可知,对初始平均能量为1.25 MeV的 γ 射线,经放射源自吸收后,出射射线的平均能量为1.14 MeV,出射射线能量的自吸收份额占总能量份额的13.6%。

拟计算,得到在轴线 y 上不同距离处的束流模拟能谱示于图2。

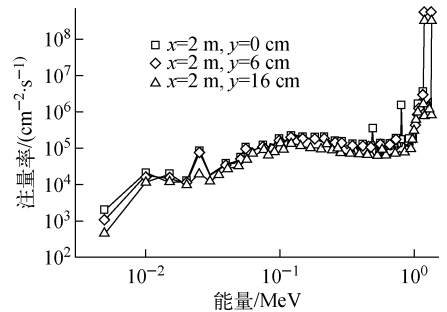


图2 距源2 m处的模拟能谱

Fig. 2 Simulation spectra at 2 m to source

模拟结果表明,活度为 5.15×10^{14} Bq的钴源,理论上平均能量为1.25 MeV,经源自吸收后,平均能量仅为1.14 MeV,当考虑照射器准直器壁效应、实验环境散射、空气散射等效应后,其在 $x=2$ m、 $y=0$ cm处的平均能量可下降至1.06 MeV,若将1 MeV以下的能量定义为散射成分,其散射成分占总计数率的份额可达27.12%,实际应用中能量畸离修正必不可少。图2中,2 m处的光子注量率可达到 $1.40 \times$

$10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 现有 HPGe 等能谱型探测器难以适应如此高注量率的测量, 后续需要探索一些新能谱测量方法(如散射法、电荷数值分析法等)来解决辐射场诊断难题^[10]。

1.3 束流均匀性

束流均匀性直接决定了辐射场对称轴的确定及中心点定位, 此参数对细准直束应用、大面积灵敏体均匀性校准等极为重要。照射器出射束流应具备良好的轴对称性, 但在实际工程实现中, 由于辐射源装源工艺缺陷、准直器安装偏差、空间环境散射等, 均会影响束流分布(如对称性及均匀性), 会为应用带来较大偏差。为便于实验应用中测量方法评价及结果分析, 参考图 2 所示的模拟方法, 对水平方向距源 2 m 处, 垂直轴线一侧束流的剂量率分布进行模拟, 采用点探测器对其进行测量, 得到剂量率随径向位置偏移的变化如图 3 所示。

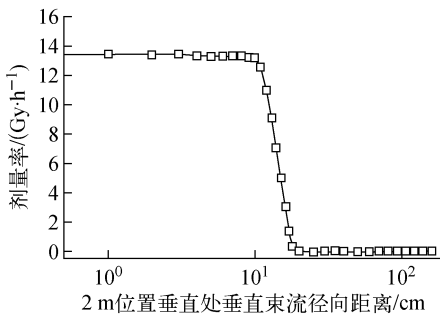


图 3 距源 2 m 处剂量率随径向位置偏移的变化

Fig. 3 Dose rate vs horizontal distance at 2 m to source

由图 3 可看出, 束流能谱及注量率随径向位置变化不大, 若按照中心剂量率最大值的 98% 定义为 γ 光子注量率轮廓, 得到边界剂量率为 $13.15 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 此位置处照射野截面为近似正方形分布, 照射野轮廓尺寸为 $20.46 \text{ cm} \times 20.46 \text{ cm}$, 若按最大值的 2% 定义为半影区的外边界, 此时剂量率为 $0.27 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 其轮廓尺寸为 $36.12 \text{ cm} \times 36.12 \text{ cm}$ 。

2 测试系统研制

针对束流的均匀性分布、发散角、束流轴线测量需要, 参考辐射场模拟结果, 本工作开发了一种基于辐射成像的实用化强 γ 辐射场诊断系统。

2.1 系统组成

所建立的诊断测试系统主要由快闪烁体和高速 CCD 相机等组成, 借助大面积高灵敏度闪烁体对不同能量及强度射线的发光强度进行测量, 通过强度变化, 反演出入射束流的注量率信息, 所建的辐射成像诊断测试系统结构示意图示于图 4, 与诊断测试实验相关的几何特性参数列于表 2。

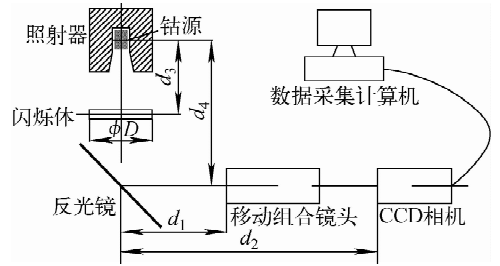


图 4 辐射成像诊断测试系统结构示意图

Fig. 4 Structure scheme of radiation imaging diagnosis system

表 2 与诊断测试实验相关的特性参数
Table 2 Performance parameters of experiment placement

位置	d_1/cm	d_2/cm	d_3/cm	d_4/cm	D/cm
位置 1	50	100	100	200	30
位置 2	50	100	200	300	30

测试系统的工作原理为: 钴源出射 γ 射线经过照射器准直器和快门后, 入射到大面积闪烁体上并激发闪烁体发光, 借助反射镜将闪烁光所成的图像反射至移动组合镜头(避开闪烁光外的射线对 CCD 测量的干扰), 通过闪烁光在 CCD 上成像, 实现对闪烁体发光强弱的识别和分辨, 完成对钴源照射野束流特性的测量。在本探测系统研制中, 选用均匀性好、剂量线性响应好的大面积硫氧化钷增感屏作为闪烁体(照射野区域 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$)。

2.2 系统刻度

系统刻度包括: 1) 能量响应刻度, 根据闪烁体特性, 采用 MCNP 程序模拟不同能量 γ 射线射入闪烁体的沉积能量, 模拟结果示于图 5; 2) 灰度与剂量率相应曲线标定, 在辐射源和闪烁体间(源和探测器不变), 设置不同厚度的铅

衰减器,以调整辐射场注量率,完成灰度随不同剂量率响应校准,响应曲线示于图6。

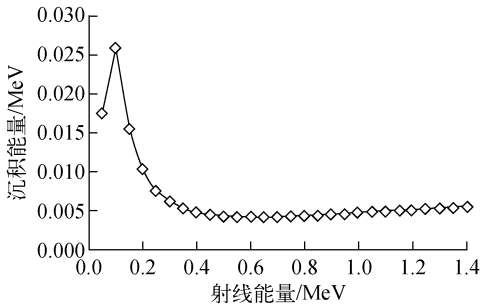


图5 沉积能量随射线能量的变化曲线

Fig. 5 Curve of energy deposition with ray energy

由图5可看出,不同能量射线在探测器中能量沉积表现出一定的非线性,尤其在0.3 MeV以下的低能区表现突出,该差异与光子在闪烁体中质能吸收系数随能量变化特性及闪烁体厚度相关。图2所示的辐射场能谱分布中,照射野内0.3 MeV以下的射线占射线总数的0.6%左右,可近似认为增感屏对钴源辐射场内射线

能量响应为线性。由图6可看出,灰度随剂量率的变化呈现出较好的线性关系,进一步证实了低能成分不会对测试系统的响应造成较大的影响。

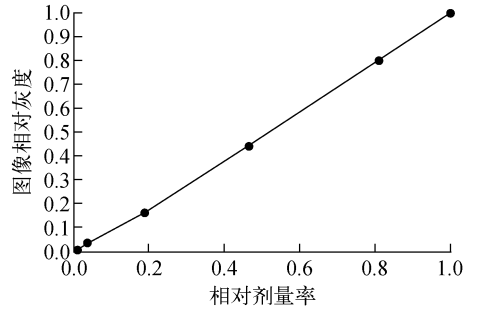


图6 灰度随剂量率的变化曲线

Fig. 6 Curve of gray with dose rate

3 测量及结果

3.1 束流强度

测试中,开启钴源照射器快门,测量得到束流在1 m及2 m处的束流强度在二维空间的分布情况示于图7。

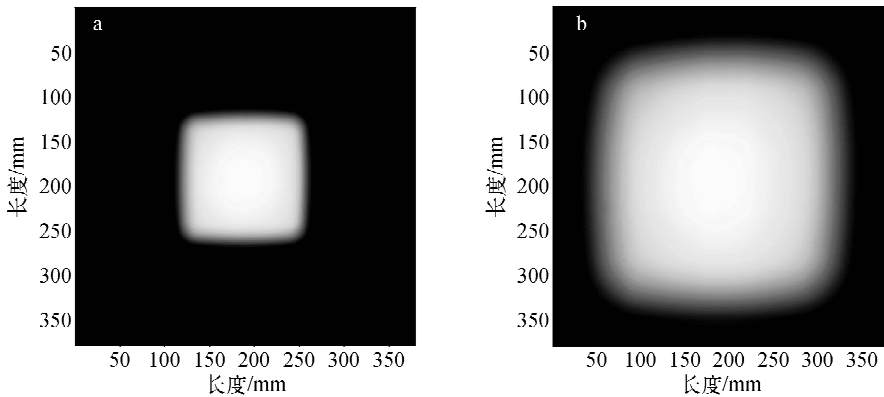


图7 1 m(a)及2 m(b)处束流强度二维分布

Fig. 7 Two-dimensional distributions of beam intensity at 1 m (a) and 2 m (b)

采用测试系统校准数据,根据图7测量得到的灰度,建立灰度与光子注量率的关系,得到2 m处束流强度的梯度分布图像如图8所示。根据图7测量得到的灰度,得到束流二维轴线上剂量率随位置分布的曲线示于图9。

由图9可看出,束流左右、上下的对称性较好,符合结构设计要求,但由于源安装或准直器装配等原因,使照射器束流上下、左右照

射野尺寸不完全相等,这会为照射野中对称轴准确确定带来一定的偏差。比较图2、9得到的束流轮廓分布可知,测量值和理论值的变化趋势基本相近,但在照射野范围内,随着 y 值的增加(由中间向边缘运动),硫酸化钷及ST401闪烁体的测量结果均表明测量值较理论值衰减快,这主要是由于实际辐射场参数中,随 y ($y=0$ cm, 2 cm, 4 cm, ...)的增大,低

能射线较高能射线衰减快,该差异被闪烁体响应后,呈现出如图9所示的变化。通常用于强辐射场参数诊断的剂量仪在低能段敏感度较低,难以准确反映强辐射场低能射线注量的差异,而该辐射场在对某些大面积探测器均匀性校准等应用中,由于低能射线分布的不均匀性存在,可能会对实验结果带来较大影响。在束流照射野特性提取中,不能按理论值反映的信息直接确定束流边缘,需确定强辐射场束流中低能光子能量及分布后,方能准确提取辐射束流轮廓。

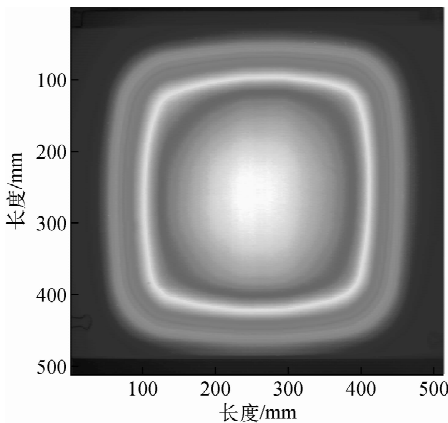


图8 束流强度的梯度分布

Fig. 8 Grad distribution of beam intensity

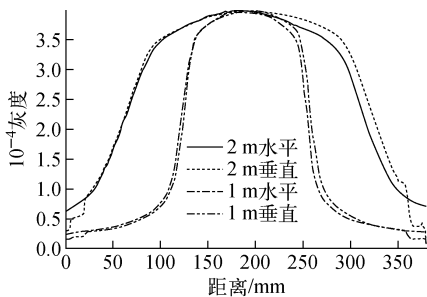


图9 束流边界分布曲线

Fig. 9 Distribution curve of beam outline

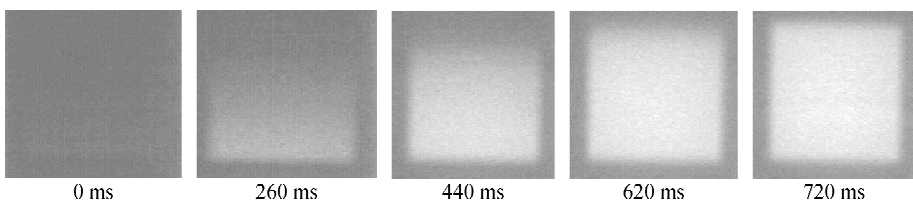


图10 快门开启过程中束流图像的变化

Fig. 10 Variation of beam image with shutter opening

从图9所获得的亚毫米空间分辨图像,能准确确定束流中心点和照射野及其发射角。图8所示的2 m处十字线中心点(与现有激光器所示束流点重合)的坐标为(188.00 mm, 193.9 mm),由图9所示的水平和垂直方向灰度分布曲线,可得到束流实际中心点坐标为(187.96 mm, 192.40 mm)。同理得到1 m处原设定中心点坐标为(188.70 mm, 192.4 mm),测试结果表明实际束流中心点坐标为(187.96 mm, 191.66 mm)。考虑测试系统对200 keV以下低能光子的响应灵敏度较高能射线灵敏度偏高,结合理论模拟对测试结果进行适当修正后,得到1 m处束流脉冲轮廓边界为10.31 cm \times 10.31 cm,半影区边界为12.56 cm \times 12.56 cm;2 m处束流脉冲轮廓边界为19.56 cm \times 19.56 cm,半影区边界为36.56 mm \times 36.56 mm(略小于理论值)。由2 m处测量结果可知,照射野内各束流均匀性(灰度波动)好于10%,利用1~2 m间束流轮廓尺寸及距离信息,在相应边界斜率情况下,计算得到束流的发散角为5.3°。

3.2 快门渡越时间

照射器采用汽缸推动快门运动的方式工作,实现对出射 γ 射线的启闭,快门渡越时间(即主快门气缸的上升或下降时间)直接影响累计剂量等参数的测量精度,准确获取该时间参数及动态过程,是诊断装置研制设计、性能检查、实验数据修正的重要依据。测试中,采用上述增感屏组成的照相法(配合HSAC高帧频快速相机),对主快门的启闭时间进行测量,得到快门渡越过程中,不同时间的成像情况示于图10,每帧图像采集时间为0.2 ms。

由图10的图像特征与时间序列关系可推知:钴源实验装置的开门时间约为(720 \pm 20) ms,关门时间约为(160 \pm 10) ms,成像中每帧图像采集时间为0.2 ms。

4 小结

通过本文的模拟及实验测量结果表明,校准实验室内强钴源辐射场应用中,不能简单认为能谱为 1.25 MeV,需要对各辐射场开展针对性测量实验,所研制的强钴源辐射场在 2 m 处平均能量为 1.06 MeV,若将 1 MeV 以下的能量定义为散射成分,此时散射占总计数率的份额可达到 27.12%。辐射场参数研究中,采用理论模拟可大致了解辐射场参数特性,由于模拟中存在装置结构、材质设定、截面库精度、实验布局等差异,使精确的参数还需依靠实验获得。辐射成像能获得亚毫米精度分布的图像信息,在照射野均匀性、束流轴线和夹角快门渡越时间测量等方面具有较强的优势。

测试结果表明,辐射场 2 m 处光子束流轮廓边界为 19.56 cm×19.56 cm,半影区边界为 36.56 cm×36.56 cm,束流均匀性好于 10%,束流的发散角为 5.3°,照射器开门时间约为 (720±20) ms,关门时间约为 (160±10) ms。本工作研制的成像法测试系统,不仅能实现亚毫米位置分辨的束流均匀性参数测量,还能对照射器快门启闭中光子注量率变化情况进行诊断,是获取束流发散角、束流中轴线及快门渡越时间的有力手段。

参考文献:

[1] 毛用泽. 军民用辐射防护仪器标准化与国防电离辐射计量[J]. 核标准计量与质量, 2002(3): 21-29.
MAO Yongze. Military and civilian use of radiation protection equipment standardization and defense ionizing radiation measurement[J]. Nuclear Measurement and Quality Standard, 2002(3): 21-29(in Chinese)

[2] 韩奎初, 丁声耀. 实用电离辐射计量学[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.

[3] JERZY Z. International basic safety standards

for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources safety[S]. Vienna: IAEA, 1996.

- [4] X and gamma reference radiation for calibrating dose meters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy, Part 1: Radiation characteristics and production methods [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1996.
- [5] KNOLL G F. Radiation detection and measurement[M]. New York: John Miley & Sons Inc., 1997.
- [6] 杨海亮, 邱爱慈, 孙剑锋. 高功率离子束的应用研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 497-501.
YANG Hailiang, QIU Aici, SUN Jianfeng, et al. Research results for the applications of high power ion beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(5): 497-501(in Chinese).
- [7] 全林, 袁建新, 苗亮亮, 等. γ 射线强源照射器屏蔽设计[J]. 应用物理, 2010, 1(4): 343-346.
QUAN Lin, YUAN Jianxin, MIAO Liangliang, et al. Shielding design of γ -ray illuminator for strong source[J]. Applied Physics, 2010, 1(4): 343-346(in Chinese).
- [8] BRIESMEISTER J F. MCNP: A general Monte Carlo N-particle transport code, LA-12625-M [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局与中国国家标准管理委员会. GB/T 12162. 2—2004/ISO 4037-2—1997 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [10] 陈星, 李剑龙, 韩文琪, 等. 用 γ 射线做康普顿散射测量[J]. 物理实验, 2006, 26(6): 33-38.
CHEN Xing, LI Jianlong, HAN Wenqi, et al. Measurements of the Compton scattering with γ -ray[J]. Physics Experimentation, 2006, 26(6): 33-38(in Chinese).