

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

用于 ^{211}At 生产的高功率金属Bi靶热效应模拟

熊杰 窦国梁 孙良亭 王洋 秦芝 任洁茹 赵永涛 赵红卫

Simulation of the thermal effect on high power Bi target for the large-scale ^{211}At production

Xiong Jie, Dou Guoliang, Sun Liangting, Wang Yang, Qin Zhi, Ren Jieru, Zhao Yongtao, Zhao Hongwei

引用本文:

熊杰, 窦国梁, 孙良亭, 王洋, 秦芝, 任洁茹, 赵永涛, 赵红卫. 用于 ^{211}At 生产的高功率金属Bi靶热效应模拟[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 094005. doi: 10.11884/HPLPB202436.230403

Xiong Jie, Dou Guoliang, Sun Liangting, Wang Yang, Qin Zhi, Ren Jieru, Zhao Yongtao, Zhao Hongwei. Simulation of the thermal effect on high power Bi target for the large-scale ^{211}At production[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 094005. doi: 10.11884/HPLPB202436.230403

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230403>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

质子束轰击金属靶面的二次电子效应的模拟研究

Simulation study of secondary electron effect of proton beam bombardment on metallic target surface

强激光与粒子束. 2018, 30: 064002-1-064002-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201830.170498>

乏燃料中Pu同位素含量数值模拟

Simulating plutonium isotopic composition in spent fuel

强激光与粒子束. 2017, 29: 036012 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160338>

二维弹塑性磁流体力学数值模拟

Two dimensional elastoplastic MHD numerical simulation

强激光与粒子束. 2018, 30: 065002-1-065002-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201830.170306>

导弹目标单、双基地雷达散射截面对比分析

Comparison analysis of mono-static and bi-static radar cross sections for missile target

强激光与粒子束. 2018, 30: 013203-1-013203-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201830.170273>

反场构型等离子体靶压缩过程中强磁场对 α 粒子能量的约束效应

Compressed strong magnetic field confinement effect on alpha particle energy in field-reversed configuration plasma target

强激光与粒子束. 2019, 31: 125002-1-125002-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.190047>

放射性同位素伽玛源准直照射辐射场模拟研究

Simulation of radiation field from isotopic gamma source collimation

强激光与粒子束. 2021, 33: 036002-1-036002-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.200294>



·离子束科学技术及其应用专栏·

用于 ^{211}At 生产的高功率金属 Bi 靶热效应模拟^{*}

熊 杰¹, 窦国梁^{2,3}, 孙良亭^{2,3}, 王 洋², 秦 芝^{2,3}, 任洁茹¹, 赵永涛¹, 赵红卫^{2,3}

(1. 西安交通大学 未来技术学院, 西安 710000; 2. 中国科学院 近代物理研究所, 兰州 730000;
3. 中国科学院大学 核科学与技术学院, 北京 100049)

摘 要: 为提高用于医用同位素 ^{211}At 生产的金属 Bi 靶在高束流功率作用下的可靠性与使役寿命, 对多种束流均匀化方法进行了模拟与对比, 利用计算流体力学(CFD)方法模拟分析了在 wobbler 磁铁作用下强度为 500 eμA 的 α 束流轰击 Bi 靶产生的热效应, 为靶系统的设计和寿命的延长提供了关键技术支撑。结果表明, 通过扫描实现束流均匀化可大幅降低靶上的最大热功率密度; 在靶前采用 wobbler 磁铁对束流进行周期性圆扫描可有效降低 Bi 靶的表面温度。当扫描频率为 50 Hz 时, Bi 靶最高温度为 189.8 °C, 低于其熔点(271.3 °C), 能够满足 Bi 靶在此高功率束流照射下安全运行的温度要求。

关键词: Bi 靶; α 离子束; At-211; 同位素生产; 计算流体力学

中图分类号: TL92

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230403

Simulation of the thermal effect on high power Bi target for the large-scale ^{211}At production

Xiong Jie¹, Dou Guoliang^{2,3}, Sun Liangting^{2,3}, Wang Yang², Qin Zhi^{2,3},
Ren Jieru¹, Zhao Yongtao¹, Zhao Hongwei^{2,3}

(1. Department of Future Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To improve the reliability and operation life of metallic Bi targets for the production of medical isotope ^{211}At using high current α beam, several beam uniformization methods were simulated and compared. The thermal effect of 500 eμA α beam bombarding a Bi target with wobbler magnet was modeled and analyzed by computational fluid dynamics (CFD) method, which provided key technical support for the design of target system and the improvement of target life time. The results showed that the peak beam thermal effect on the target was obviously reduced by applying beam scanning. In front of the target, a wobbler magnet was used to periodically scan the beam, which could effectively reduce the temperature on Bi target surface. With a scanning frequency of 50 Hz, the highest temperature on Bi target was 189.8 °C, lower than the melting point of Bi metal (271.3 °C), which could meet the temperature requirement of Bi target under such a high beam power condition.

Key words: Bi target, α beam, At-211, isotope production, computational fluid dynamics

破-211(^{211}At)是一种理想的 α 放射性治疗核素。其半衰期为 7.2 h, 衰变过程中发射的 α 粒子在软组织中的射程约为 3~5 个细胞范围, 可实现对病灶部位肿瘤细胞的精准杀伤; 其次, ^{211}At 的线性传能密度(LET)约为 100 keV/μm, 具有极强的放射生物学效应^[1-2]。鉴于其在肿瘤放射性治疗上的独特优势, ^{211}At 是目前精准治疗放射性同位素靶向药物的国际前沿和应用研究的热点。国际上一般采用 22~28 MeV 的 α($^4\text{He}^{2+}$)束流轰击金属 ^{209}Bi 靶, 经 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$ 反应来制备 ^{211}At ^[3-4]。当前国际上主要的 ^{211}At 生产装置的 α 束流平均流强均不高于 100 eμA, 如美国杜克大学 CS-30 回旋加速器和华盛顿大学 MP-50 回旋加速器, 可分别提供 100 eμA 和 58 eμA 的 α 束流, 单次运行 4 小时的 ^{211}At 产额不超过 10 GBq; 日本理化学研究所 AVF 加速器输出流强为 40 eμA, 单次运行 1 h 的 ^{211}At 产额约为 1.3 GBq^[5]; 比利时 IBA 公司的 Cyclone 30XP 装置提供的 α 束流强度也仅为 50 eμA^[6]。 ^{211}At 放射性同位素标记的

* 收稿日期: 2024-02-15; 修订日期: 2024-06-30

联系方式: 熊 杰, xiong.jie@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者: 赵永涛, zhaoyongtao@xjtu.edu.cn。

靶向药物离规模化临床应用尚存在一定的距离,主要瓶颈问题是强流加速器和高功率同位素靶系统的欠缺。现有的 ^{211}At 生产装置绝大多数都是采用内靶技术,束流强度如上所述一般较低,利用现有装置与靶技术支撑 ^{211}At 靶向药物批量化生产和临床持续性研究尚存在较大挑战。目前西安交通大学拟与中国科学院近代物理研究所合作研制一台强流紧凑型超导回旋加速器,设计输出最高流强为 $500\text{ e}\mu\text{A}$,能量为 $30\sim 32\text{ MeV}$ 的 α 离子束,采用外靶技术,通过高强度束流轰击金属Bi靶产生高放射性活度的 ^{211}At ,该项目将有望解决目前 ^{211}At 靶向药物批量化生产的核心技术问题。

强流 α 束流与同位素靶的耦合是高效同位素生产的关键。由于Bi金属熔点仅为 $271.3\text{ }^\circ\text{C}$,数百 μA 量级的强流 α 离子束连续轰击Bi靶将产生严重的热效应,进而造成靶材熔化与损坏。近年来,西安交通大学及其合作团队在强流离子束与物质相互作用中的能量沉积和核反应研究方面取得了重要的进展^[7-10]。本文将重点分析强流 α 离子束的均匀化调控方法及其与含Bi同位素靶作用中的热效应,利用Fluent软件研究Bi靶的瞬态温度场变化,为束流传输线工程设计及束靶耦合优化方案提供重要参考。

1 SK30 超导回旋加速器装置简介

为实现 ^{211}At 的大规模生产,我们设计了一台SK30超导回旋加速器。图1为SK30紧凑型超导回旋加速器系统的总体布局,其主要包括:1~14.5 GHz电子回旋共振(ECR)离子源;2-强流低能束流传输线(LEBT);3-射频四极(RFQ)注入器;4-液氮冷凝器;5-超导回旋加速器;6-引出束流管道。ECR离子源与LEBT组合向RFQ预注入器提供强流 α 离子束;RFQ加速器对 α 离子束进行预加速并兼顾纵向聚束,然后将其注入到回旋加速器的反射镜入口处; α 离子束经回旋加速器加速到 $30\sim 32\text{ MeV}$,从加速器大半径静电偏转引出;引出束流经束流传输线配送至实验终端,采用外靶技术轰击金属Bi靶实现 ^{211}At 的生产。

2 束流均匀化方法

定义束流前进方向为 z ,横向为 x 和 y 。束斑在 xy 平面上满足二维高斯分布,即

$$D(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad (1)$$

式中: σ_x 、 σ_y 分别为束斑在 x 、 y 方向上的高斯分布宽度; μ_x 、 μ_y 分别为束斑中心位置的 x 、 y 方向坐标。

通常情况下,多极磁铁或高频率扫描磁铁可被用来实现束流的均匀化^[11-13]。其中,利用扫描磁铁将较小尺寸的束斑扫描至较大的靶平面上,同时保证扫描后分布的相对均匀性,可有效降低靶上的流强密度。扫描方式有多种,如李萨如扫描、圆扫描等。李萨如扫描是在 x 和 y 方向上对束流施加不同频率的周期性作用力,使束流沿特定的李萨如图形扫描。当扫描波形为正弦波或三角波时,束斑中心轨迹分别如式(2)、式(3)及式(4)和式(5)所示。圆扫描则是在 x 和 y 方向设置为相同的扫描幅值和频率,即 $A=B=R$, $\omega_x=\omega_y$,且初始相位差为 90° ,束斑中心轨迹如式(6)和式(7)所示。

$$\mu_x = A \sin(\omega_x t) \quad (2)$$

$$\mu_y = B \sin(\omega_y t + \varphi) \quad (3)$$

$$\mu_x = A \frac{2 \arcsin[\sin(\omega_x t)]}{\pi} \quad (4)$$

$$\mu_y = B \frac{2 \arcsin[\sin(\omega_y t)]}{\pi} \quad (5)$$

$$\mu_x = R \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$\mu_y = R \sin(\omega t) \quad (7)$$

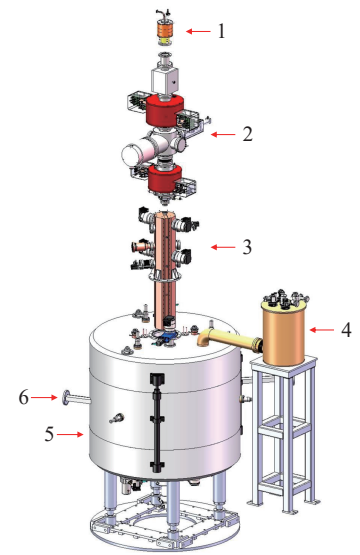


Fig. 1 Schematic diagram of SK30 Cyclotron

图1 SK30回旋加速器示意图

式中: A 、 B 分别为 x 、 y 方向上的扫描幅值; ω_x 、 ω_y 分别为 x 、 y 方向上的扫描频率, $\omega = 2\pi f$; φ 为初始相位。将强度为 $500 \text{ e}\mu\text{A}$, $\sigma_x = \sigma_y = 5 \text{ mm}$ 的束流分别按照上述扫描方式扫描至 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的靶平面上。李萨如扫描两个方向的扫描频率及初始相位差分别设定为 $f_x = 71 \text{ Hz}$, $f_y = 59 \text{ Hz}$, $\varphi = 156^\circ$ 。扫描幅值 $A = B = R = 10 \text{ mm}$ 。以上扫描方式产生的束斑分布及最大流强密度见图 2 和表 1 所示。

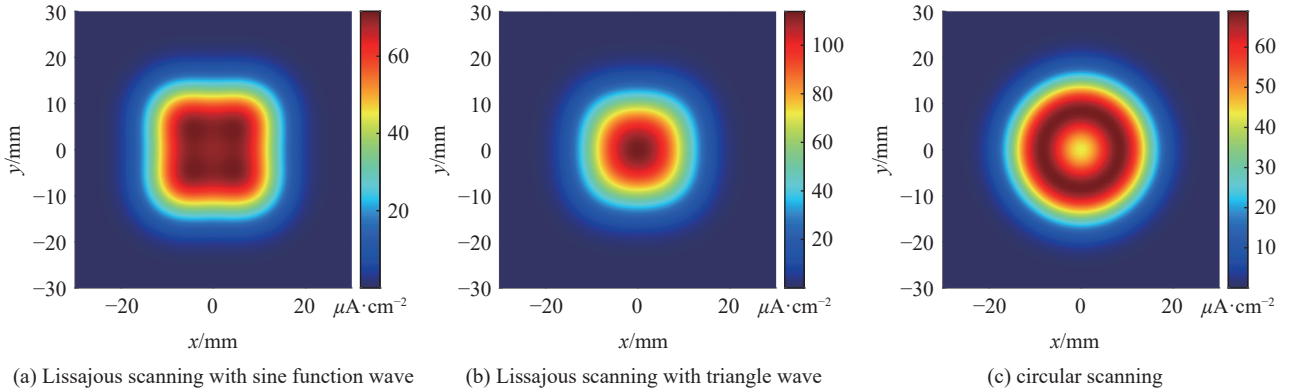


Fig. 2 Beam distribution after scanning

图 2 扫描后束斑分布

上述扫描方式均能大幅降低靶上的束流功率密度。其中, 李萨如扫描束斑中心区域可实现较为均匀的强度分布; 圆扫描束斑呈空心圆环状分布, 均匀性差一些, 但相对容易实现, 仍是被广泛采用的均匀化扫描方案。wobbler 磁铁是一种可实现束流圆扫描的核心设备^[14-16], 通常由两个分别通以频率相同、相位差 90° 的正弦交流电的磁元件组成。在两个交流电源作用下, 磁铁内部形成一旋转磁场, 束流随磁场方向旋转而受到调制并进行扫描。wobbler 磁铁实现束流均匀化扫描的原理如图 3 所示。在以降低束流在靶上的最大功率密度为主要目标, 而对时间结构与均匀性要求不高的情况下, 使用 wobbler 磁铁具有加工简单、造价低、使用方便等优点, 因此本装置 ^{211}At 生产束流线拟采用 wobbler 磁铁来实现靶上束流的均匀化, 降低靶上的功率密度。

表 1 扫描前后最大流强密度

Table 1 Maximum current density before and after scanning

scanning mode	maximum current density/ $(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
before scanning	318.31
Lissajous scanning(a)	71.16
Lissajous scanning(b)	113.88
circular scanning	68.94

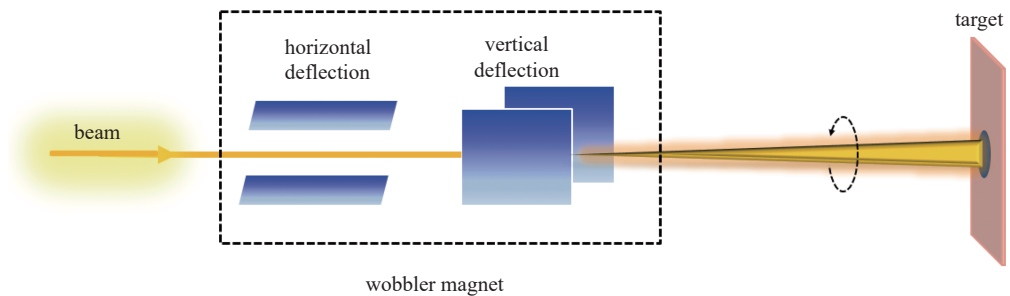


Fig. 3 Schematic diagram of scanning of ion beam with a wobbler magnet

图 3 wobbler 磁铁实现束流均匀化扫描的原理示意图

3 高功率 Bi 靶受热分析

3.1 模型建立

本装置靶系统的设计参考了日本理化学研究所 AVF 回旋加速器上用于 ^{211}At 生产的靶系统方案^[17]。图 4 为本装置 Bi 靶的几何模型, 其中图 4(a) 为 Bi 靶结构简化示意图, 图 4(b) 给出了模型结构参数。将 Bi 金属蒸镀于 Al 衬底之上, 并在 Al 衬底背面加以水冷。运行时, 轰击束流与靶面呈 15° 入射, 以此增大辐照面积, 降低靶上的功率密度, 提高靶材料的有效厚度。Bi 层与 Al 衬底的设计厚度分别为 $20 \mu\text{m}$ 和 1 mm 。相关材料物性参数见表 3。

3.2 边界条件

本文利用 FLUENT^[18] 对 Bi 靶进行受热分析。图 5 所示为利用 SRIM^[19] 计算 $28.5 \text{ MeV } \alpha$ 束与靶面呈 15° 穿越 $20 \mu\text{m}$ Bi 靶和 1 mm 的 Al 衬底的能量沉积。由图 5 可以看到, α 粒子的能损主要集中在 Al 衬底的前端区域。因此, 可将束流轰击 Bi 靶产生的热效应等效为 Al 层表面的功率输入。一般的, 靶面上的功率密度 Q 近似呈现二维高斯分

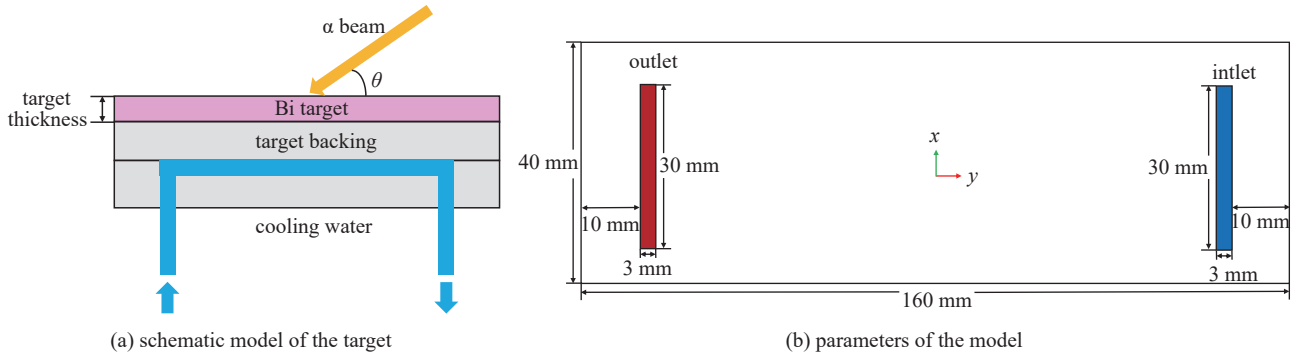


Fig. 4 Geometry model of the target

图4 Bi靶几何模型

表3 相关材料物性参数

Table 3 Physical parameters of materials

material	density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	specific heat capacity/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)
Bi	9800	130	8
Al	2719	871	202.4
water	998.2	4182	0.6

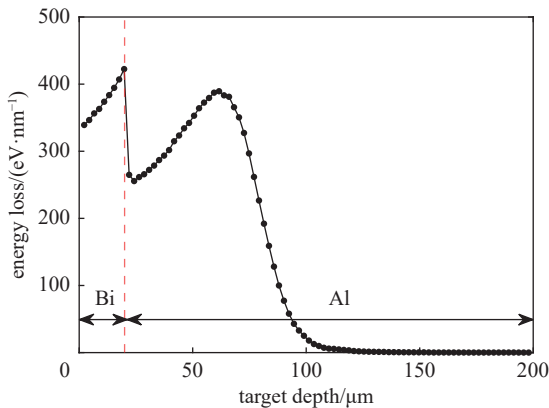
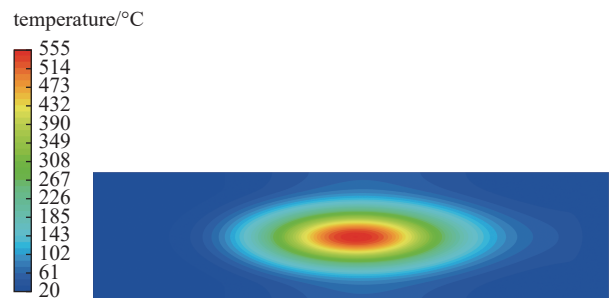
布, 考虑到束流在 wobbler 磁铁作用下与靶面呈 15° 入射的过程, 可将热源表达式记作

$$Q(x, y, t) = \frac{P}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma_x^2}(x-R\cos\omega t)^2 - \frac{1}{2\sigma_y^2}(y-\frac{R}{\sin 15^\circ}\sin\omega t)^2} \quad (8)$$

式中: P 为束流功率; σ_x 和 σ_y 分别为 x 方向和 y 方向的束流分布宽度; R 为扫描半径; ω 为扫描角频率。移动热源通过用户自定义函数(UDF)程序实现。综合考虑水冷流量和冷却要求, 对于本文所有的传热模拟计算, 入水流速设定为 3 m/s , 初始温度为 10°C , 且假设制冷剂功率足够保持水温恒定。取 $\sigma_x=5\text{ mm}$, $R=10\text{ mm}$ 。为保证计算精度和束流轨迹的准确模拟, 将时间步长设定为扫描周期的 $1/50$, 即每加热 50 个加热区为一个周期, 以循环往复的加热方式, 对 Bi 靶进行瞬态分析。

3.3 结果与分析

当未采用 wobbler 扫描, 即束流持续照射同一点时, 2 s 时刻靶面温度分布如图 6 所示。靶面形成一椭圆形高温区域, 最高温度达 555.4°C , 远高于 Bi 金属熔点 271.3°C 。当扫描频率为 10 Hz 时, Bi 靶在第一个周期内各时刻及 2 s 时刻的温度分布如图 7 所示。从图 7 可以看到, 束流在 wobbler 磁铁作用下作周期性扫描, 靶面温度逐渐升高。Bi 靶最高温度随时间的变化如图 8 所示。 1 s 后, Bi 靶最高温度达到动态平衡, 约为 213°C 。与束流持续照射同一点相比, 采用 wobbler 磁铁对束流进行周期性圆扫描显著降低了 Bi 靶最高温度。图 9 给出了不同扫描频率时的最高温度。随着扫描频率的增加, Bi 靶最高温度有所降低, 但降温效果逐渐减弱。扫描频率为 50 Hz 时, 最高温

Fig. 5 Energy deposition of 28.5 MeV α particles in bismuth layer and aluminum backing图5 28.5 MeV α 粒子在 Bi 层和 Al 衬底中的能量沉积Fig. 6 Target surface temperature distribution without wobbler at 2 s 图6 未采用 wobbler 时 2 s 时刻靶面温度分布

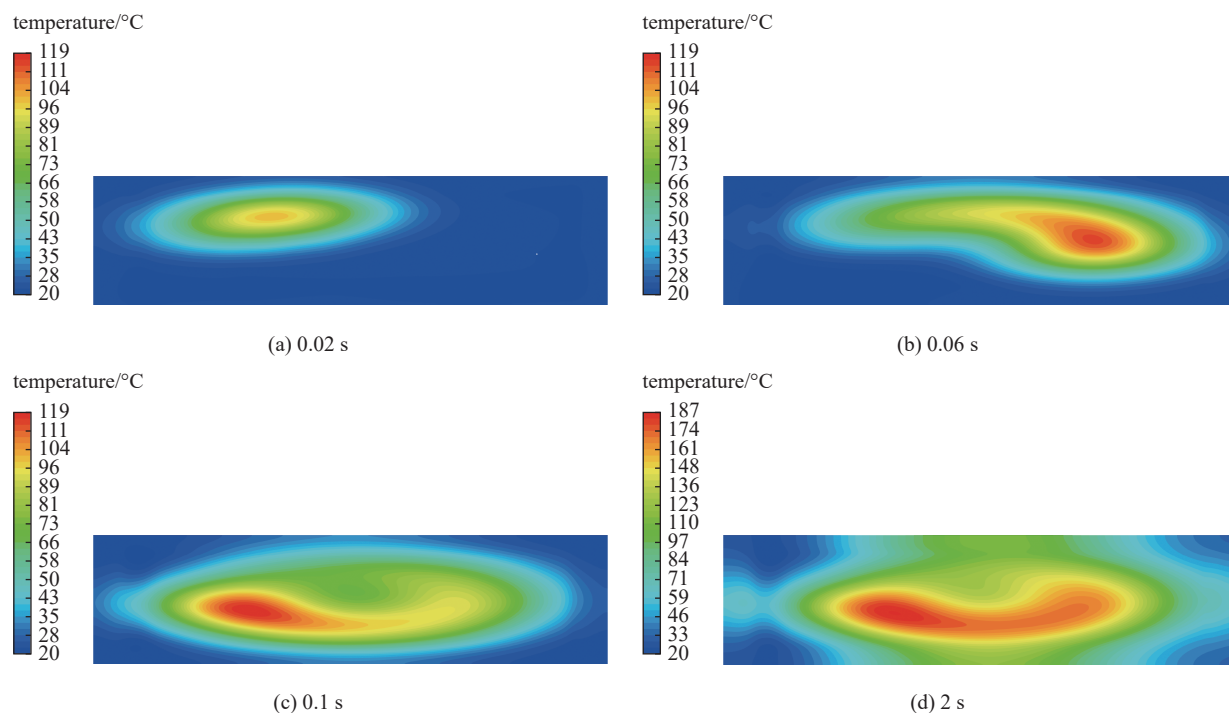


Fig. 7 Target surface temperature distribution with wobbler

图 7 各时刻靶面温度分布

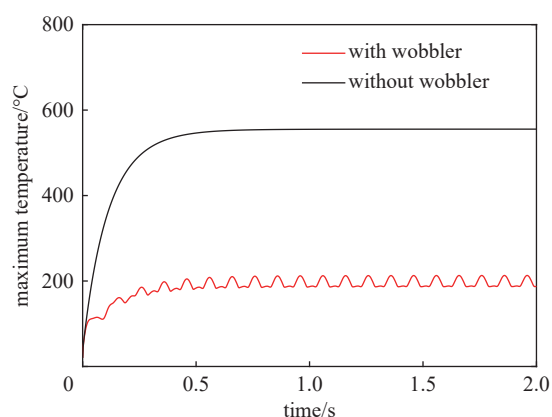


Fig. 8 Maximum temperature changes with time

图 8 最高温度变化曲线

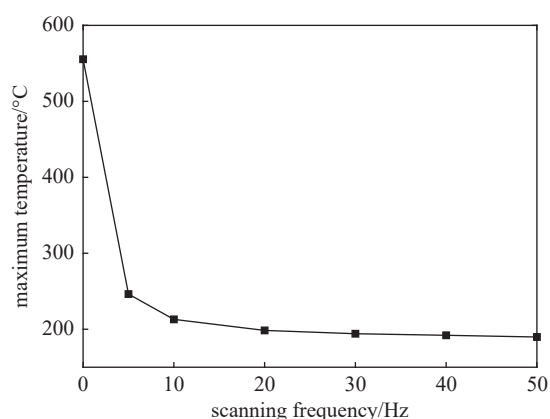


Fig. 9 Maximum temperature with different scanning frequencies

图 9 不同扫描频率下的最高温度

度降至 $189.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,采用 wobbler 磁铁并选取适当的扫描频率能够满足 Bi 靶的温度要求。

4 结 论

本研究对束流入靶的均匀化方法进行了模拟对比,并采用 CFD 计算,分析了 $500\text{ }\mu\text{A}$ α 束流在 wobbler 磁铁作用下轰击 Bi 靶产生的热效应,得到以下结论:通过扫描实现束流均匀化可有效降低靶上的束流功率密度。较其他的束流扫描方案, wobbler 磁铁因性价比更高而得到广泛使用,且束流均匀化效果明显,若以 50 Hz 运行,可脱离复杂功率源的要求,具有造价低、加工简单等优势;与无束流扫描相比,扫描后的最高温度大幅降低,且最高温度随扫描频率升高而降低,但很快趋近平衡状态,降温效果逐渐减弱。采用该靶系统与扫描设计可以满足 $500\text{ }\mu\text{A}$ α 束流轰击 Bi 靶时的温度要求。按照近物所现有生产效率 $30\text{ MBq}/\mu\text{A}\cdot\text{h}$ 推算, ^{211}At 产额约可达到 $120\text{ GBq}/\text{天}$,完全可支撑批量化生产与临床应用的需求。为了进一步提高冷却效果与模拟精度,在后续的研究中需要进一步的优化与完善。对 Bi 靶增加更加高效的冷却结构设计,并增加模型的网格单元数量以完善并提高系统的仿真效果。同时计划利用中国科学院近代物理研究所的强流重离子加速器装置 LEAF^[20] 提供的强流离子束流进行高功率束流打靶实验验证。

参考文献:

- [1] Li Feize, Yang Yuanyou, Liao Jiali, et al. Recent progress of astatine-211 in endoradiotherapy: Great advances from fundamental properties to targeted radiopharmaceuticals[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2022, 33(7): 3325-3338.
- [2] 陈德胜, 刘葳豪, 黄清钢, 等. 加速器生产医用同位素²¹¹At 及单抗标记[J]. *化学学报*, 2021, 79(11): 1376-1384,1416. (Chen Desheng, Liu Weihao, Huang Qinggang, et al. Accelerator production of the medical isotope ²¹¹At and monoclonal antibody labeling[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2021, 79(11): 1376-1384,1416)
- [3] Wang Yiwei, Chen Daiyuan, Dos Santos Augusto R, et al. Production review of accelerator-based medical isotopes[J]. *Molecules*, 2022, 27(16): 5294.
- [4] 张天爵, 温凯, 刘景源, 等. 中高能回旋加速器及固体靶生产医用放射性核素技术研究[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2022, 42(6): 340-346. (Zhang Tianjue, Wen Kai, Liu Jingyuan, et al. Research on medical radioisotope production technology by medium and high-energy cyclotron and solid target[J]. *Chinese Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 2022, 42(6): 340-346)
- [5] Feng Yutian, Zalutsky M R. Production, purification and availability of ²¹¹At: Near term steps towards global access[J]. *Nuclear Medicine and Biology*, 2021, 100/101: 12-23.
- [6] Kleeven W, Abs M, Delvaux J L, et al. Recent development and progress of IBA cyclotrons[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2011, 269(24): 2857-2862.
- [7] Ren Jieru, Deng Zhigang, Qi Wei, et al. Observation of a high degree of stopping for laser-accelerated intense proton beams in dense ionized matter[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5157.
- [8] Zhao Yongtao, Zhang Yanning, Cheng Rui, et al. Benchmark experiment to prove the role of projectile excited states upon the ion stopping in plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126: 115001.
- [9] Ren Jieru, Ma Bubo, Liu Lirong, et al. Target density effects on charge transfer of laser-accelerated carbon ions in dense plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130: 095101.
- [10] Wei Wenqing, Zhang Shizheng, Deng Zhigang, et al. Proton-boron fusion yield increased by orders of magnitude with foam targets[DB/OL]. arXiv preprint arXiv: 2308.10878, 2023.
- [11] Oliver C, Ibarra A, Gallego A, et al. Phase-space transformation for a uniform target irradiation at DONES[C]//Proceedings of LINAC 2016. 2017: 424-426.
- [12] Thomsen H D, Møller S P. The beam delivery system of the European Spallation Source[C]//Proceedings of HB2016. 2016: 427-432.
- [13] Tsoupas N. Uniform beam distributions of charged particle beams[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1336(1): 11-15.
- [14] Renner T R, Chu W T. Wobbler facility for biomedical experiments[J]. *Medical Physics*, 1987, 14(5): 825-834.
- [15] Katagiri K, Hojo S, Nakao M, et al. Wobbled beam irradiation system for radioisotope production in NIRS cyclotron facility[C]//Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. 2015: 1380-1383.
- [16] 贾先禄, 张天爵, 吕银龙, 等. 30MeV 医用回旋加速器束流输运线上旋转扫描磁铁的研制[J]. *高能物理与核物理*, 2007, 31(3): 292-295. (Jia Xianlu, Zhang Tianjue, Lv Yinlong, et al. Wobbling magnet design for beam line of CYCIAE-30 medical cyclotron[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2007, 31(3): 292-295)
- [17] Wang Y, Sato N, Komori Y, et al. Present status of ²¹¹At production at the RIKEN AVF cyclotron[C]//Radiochemistry & Nuclear Chemistry. 2020: 192.
- [18] 孙立军. ANSYS Fluent 2020 工程案例详解[M]. 北京: 北京大学出版社, 2021. (Sun Lijun. ANSYS Fluent 2020 engineering case[M]. Beijing: Peking University Press, 2021)
- [19] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P. SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, 268(11/12): 1818-1823.
- [20] Yang Yao, Zhai Y H, Jiang P Y, et al. Commissioning progress of LEAF at IMP[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1401: 012019.