

大型单板源 Co-60 辐照装置的排源方法和实践

郭 权¹ 曾民生¹ 郭仕源¹ 王建春¹ 李 阳¹ 杨小平²

¹ (深圳市金鹏源辐照技术有限公司 深圳 518019)

² (中金辐照成都有限公司 成都 611900)

摘要 本文详细论述了中金辐照成都有限公司 BFT-IV 辐照装置第二次加源所用排源方案的设计方法和过程。通过理论公式计算该辐照装置源架 16 个模件的活度占总活度的最优化比例, 将新采购的放射源按此比例分为 16 个小组, 装入源架对应模件中, 模件内部源棒由人工以均匀方式布置。利用 MCNP_4C 软件建立辐照装置数学模型, 计算剂量分布, 用第一次加源后的剂量场分布测试结果验证 MCNP 模型的有效性。分别计算因人工排列不同形成的多个排源方案的剂量分布, 选取最优的排源方案装源。装源后进行剂量分布测试, 对于 $0.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的产品, 射线利用率 16.7%, 辐照箱吸收剂量最大不均度为 1.36, 优于第一次加源后的剂量分布测试结果, 证明排源方法及方案合理有效。

关键词 BFT-IV 辐照装置, 排源方案, 模件活度比例, MCNP 模型

中图分类号 TL929

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rj.32.030801

钴源辐照装置中钴源棒在源架上的排列决定了钴源室的空间剂量场分布及辐照箱内产品的吸收剂量分布和剂量不均匀度, 进而决定了辐照装置的加工能力。国内已有一些小型辐照装置排源方法^[1-2]。本文通过计算 BFT-IV 大型辐照装置源架 16 个模件的活度占总活度的最优化比例, 进行排源, 利用 MCNP_4C 软件计算因各模件内部人工排列不同形

成的多个排源方案的剂量分布, 选取最优方案装源。

1 BFT-IV 辐照装置简介

BFT-IV 型辐照装置为双层四通道辐照装置, 单板源结构。升源后, 源架处于辐照箱的中央位置, 各辐照箱相对于源架对称 (图 1)。

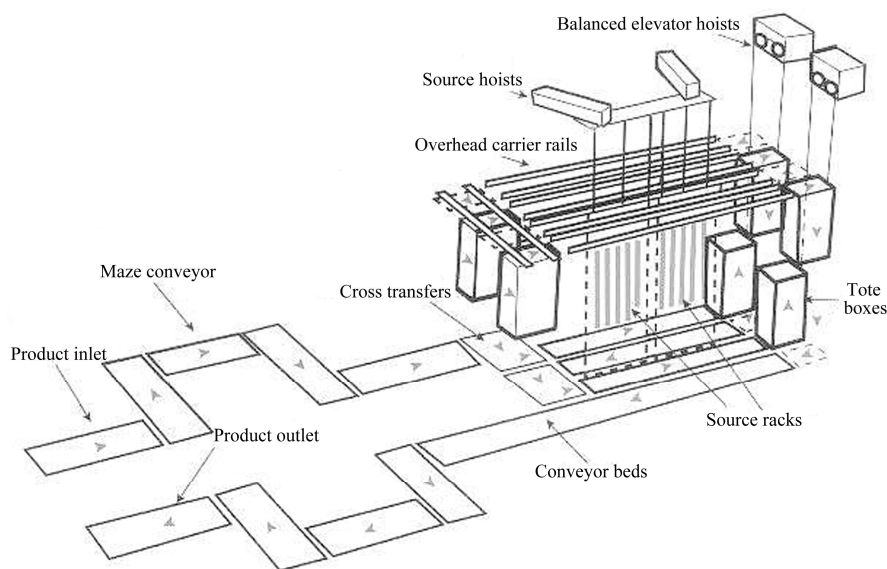


图 1 辐照装置示意图
Fig.1 Carrier irradiator schematic

第一作者: 郭权, 男, 1988 年 3 月出生, 2010 年于东华理工大学获得核技术专业学士学位, 现从事辐照工艺技术和辐照产品剂量分布等方面的研究, E-mail: jsb@jpy.com.cn

收稿日期: 初稿 2014-01-06; 修回 2014-03-05

辐照装置源架高 2.46 m, 宽 2.25 m, 竖直方向分为 4 层, 每层放置 4 个模件, 每个模件可并列竖

直安装源棒 50 根, 如图 2。源棒由钴源和双层不锈钢包壳组成。源棒长 0.452 m, 外半径 1.1 cm。

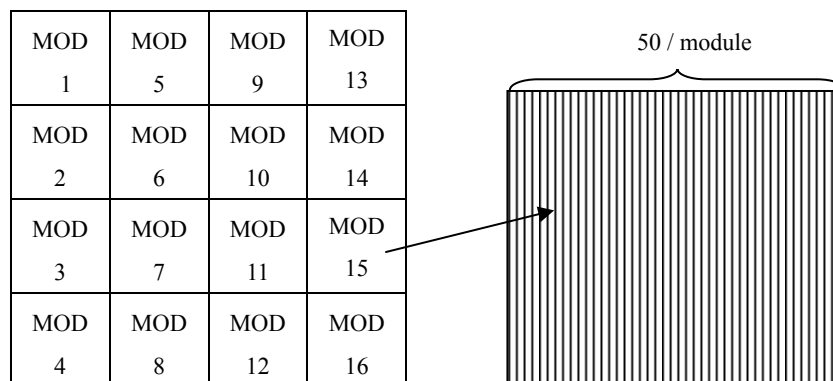


图 2 源架模件示意图
Fig.2 Source racks module

辐照箱尺寸为 120 cm×60 cm×150 cm, 日常辐照加工过程中, 在辐照箱内选取 3 个与源架平行的平面作为剂量监测面。辐照箱两侧面为 0 面和 2 面, 辐照箱中间面为 1 面。图 3 为部分源架及其所正对的上层辐照箱的相对位置示意图。

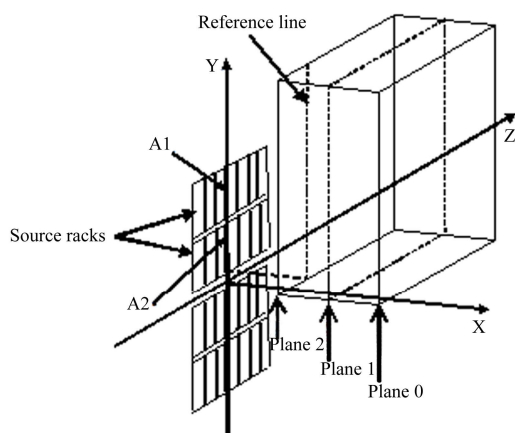


图 3 源架和辐照箱
Fig.3 Source racks and tote box

2 模件活度最优化比例计算

源架由 16 个模件组成, 为便捷地得到最优化钴源排列方案, 首先计算各模件装源活度占总活度的最佳比例, 然后考虑各模件内源棒的排列。

2.1 计算模型

2.1.1 单根线源对空间某点照射量率的计算

^{60}Co 均匀线状源对空间任一点照射量率(X)的

计算见公式(1)。

$$X = \frac{\Gamma A}{aL} \left(\arctan \frac{L+b}{a} - \arctan \frac{b}{a} \right) \quad (1)$$

其中, Γ 为照射量率常数, 对于 ^{60}Co , $\Gamma = 2.56 \times 10^{-18} \text{ C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; A 是钴源活度(Bq); L 是源棒长度(m); a 是所计算空间点到线源的垂直距离(m); b 是垂足到线源最上点的距离(m) (图 4)。

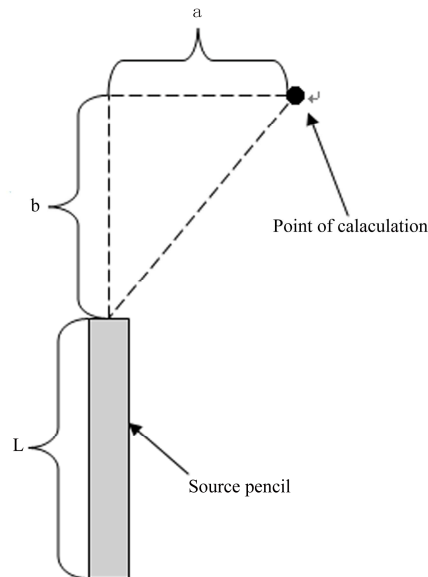


图 4 单根线源对空间某点照射量率计算参数
Fig.4 Parameters for the calculation of single source

2.1.2 两根线源对空间某点照射量率的计算

辐照装置的源架及辐照箱均具有对称结构, 源在源架的排布相对与源架中心对称。建立 X-Y 坐标

系，原点在源棒下方 0.058 m 处，钴源棒及辐照箱截面均关于 X 轴对称。参考线位于辐照箱靠近源架的面中，与钴源棒平行且水平距离最短，与源棒轴心水平距离为 0.1425 m（图 5）。

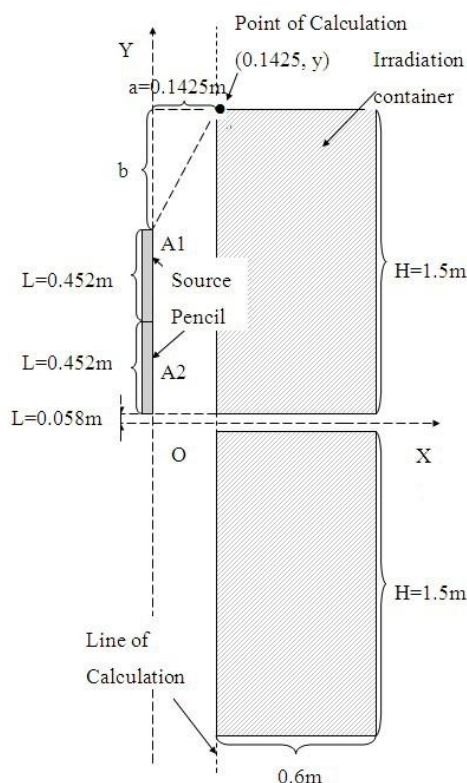


图 5 辐照装置上层的源及辐照面简图

Fig.5 Parameters for the calculation of double source

参考线上某一点 $P(0.1425, y)$ ($y \in [-1.558, -0.058]$, $y \in [0.058, +1.558]$) 的照射量率计算公式为：

$$X = \frac{\Gamma A_1}{aL} \left(\arctan \frac{L+b}{a} - \arctan \frac{b}{a} \right) + \frac{\Gamma A_2}{aL} \left(\arctan \frac{2L+b}{a} - \arctan \frac{L+b}{a} \right) \quad (2)$$

排源是对固定总活度的多根源棒进行排列，设定数学模型中上下两根源棒的总活度为定值 $A=7.4 \times 10^{14}$ Bq，活度比为 1: k，即 $A_2/A_1=k$ ，则 $A_1=A/(k+1)$ ， $A_2=kA/(k+1)$ 。由源棒活度比扩展到模件活度比，则源架竖直方向上 4 个模件的活度比例均为 1: k: k: 1。

辐照箱完成整个辐照过程，会进行上下换层辐照，上层参考点 P 上(0.1425, y)移到下层时变为 P 下(0.1425, -1.616+y)。将这两个点的计算结果相加得到只有上层装源(A1, A2)辐照箱完成全程辐照，参考点 P 的照射量率。同样的方法计算下层装源时参

考点 P 的照射量率，将两者相加得到上下 4 层均有源棒时参考点 P 的照射量率。

2.2 参考点选取

根据单贤尧等^[3]提出了判定最佳源棒的排列标准为：(1)参考面上照射量率的不均匀度最小；(2)辐照货物在辐照工位上累计吸收剂量的不均匀度最小。因标准(2)不使用理论公式计算，本文以标准(1)为约束条件，参考面选取辐照箱靠近源架的面。针对 BFT-IV 辐照装置，辐照箱在水平方向的运动，排除辐照箱壁对剂量分布的影响，产品各点吸收剂量在平行于源架的水平方向上大致一致，文中模型仅考虑参考线竖直方向上各点的照射量率和最大不均匀度。

在位于辐照箱 2 面的参考线上均匀选取 10 个点位(P0-P9)为测量点，它们在坐标系中的位置为 P0(0.1425, 0.058)、P1(0.1425, 0.224)、P2(0.1425, 0.390)、P3(0.1425, 0.556)、P4(0.1425, 0.722)、P5(0.1425, 0.888)、P6(0.1425, 1.054)、P7(0.1425, 1.220)、P8(0.1425, 1.386)、P9(0.1425, 1.558)。

2.3 各点计算结果

取 $K \in [1.5-3.5]$, $A=7.4 \times 10^{14}$ Bq, $I=2.56 \times 10^{-18}$ C·m²·kg⁻¹·Bq⁻¹·s⁻¹，利用 Excel 计算得出 k 与参考点最大照射量率、最小照射量率以及不均匀度的关系（图 6）。

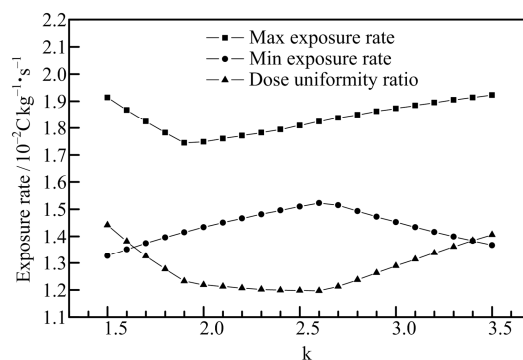


图 6 参考线最大照射量率、最小照射量率与不均匀度

Fig.6 The max. exposure rate, min. exposure rate and uniformity ratio of the reference line

2.4 模件最优化比例计算结果

从表 1 中可以看出， $2.0 \leq k \leq 2.7$ 时，参考线具有良好的剂量不均匀度。在未考虑钴源罩和辐照箱体结构的情况下， $k=2.6$ 时，最低照射量率最大，此

时辐照装置射线利用率最大。

源架水平方向上,与源架平行的有 5 个辐照工位,总长度约 6 m,比源架长 3.54 m。根据一次静态辐照试验结果,两端的工位吸收剂量相对很小,低点剂量不到总剂量的 1%,我们将钴源在水平方向上均匀排布,无须按中间大两端小的方式排列。

鉴于钴源供应商提供的第一次加源排源方案中 $k=2$,第二次加源也取 $k=2$ 。计算得出源架各个模块的活度占源架总活度的百分比(表 1)。

表 1 源模块活度百分比

Table 1 The percentage of the source racks activity (%)			
4.17	4.17	4.17	4.17
8.33	8.33	8.33	8.33
8.33	8.33	8.33	8.33
4.17	4.17	4.17	4.17

3 钴源排源

3.1 钴源分组

将新购 54 根源棒按表 1 活度比分为 16 组(表 2),S/N 表示钴源棒编号,Curies 为源棒活度(Ci)。

表 2 16 组新购源棒

Table 2 The 16 groups of new source

MOD1		MOD5		MOD9		MOD13	
S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies
AY371	8835	AW674	12546	AY819	12544	AY818	12400
AY369	8857	AY257	11814	AY814	12305	AY823	12414
AW714	10018	—	—	—	—	—	—
MOD2		MOD6		MOD10		MOD14	
S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies
AY248	11506	AY498	10414	AY503	10183	AY505	10284
AY242	10920	AW723	10369	AW715	10382	AY502	10270
AY240	10833	AY377	10257	AW711	10403	AY496	10098
AW721	10453	AW712	10125	AW708	10225	AW724	10355
—	—	AW709	10289	AW700	10310	AW716	10419
MOD3		MOD7		MOD11		MOD15	
S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies
AY247	11456	AY493	10132	AW722	10318	AY494	10501
AY241	10984	AW727	10254	AW704	10204	AY246	11456
AY237	10819	AW726	10403	AW703	10390	AY243	11063
AW710	10461	AW725	10376	AW702	10188	AY236	10642
—	—	AW713	10297	AW701	10390	—	—
MOD4		MOD8		MOD12		MOD16	
S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies	S/N	Curies
AY794	12790	AY820	12544	AY821	12422	AY822	12408
AY250	11671	AY816	12082	AY813	12350	AY812	12408

3.2 钴源排布

不改变第一次加源的钴源排布,将表 2 中每组源棒均匀的插入到对应源模块中,得到辐照装置第二次加源的初步排源方案。

4 排源方案优化

4.1 MCNP 模型建立^[4-5]与验证

使用 MCNP_4C 软件计算模拟产品吸收剂量。根据设备图纸及实际测量值,进行适当简化,编写

inp 文件的删元卡和曲面卡。通用源卡为 SDEF 卡,钴源每次衰变放出两个能量分别为 1.17 MeV 和 1.33 MeV 的光子,概率为 0.5:0.5。钴源所在栅元和活度由第一次装源报告决定。材料卡有空气、水(液体剂量计)、0.1 g·cm⁻³ 纤维素(模拟产品)、铝(货箱壁)、钢(钴源包壳、货箱支持机构)和钴。计数卡选用 F6 卡,得到粒子在液体剂量计栅元的能量沉积,单位 MeV·g⁻¹,乘以钴源活度及辐照时间可以得到液体剂量计栅元吸收剂量(Gy)。

MCNP_4C 软件运行 24 时所得结果经处理后,

与第一次加源后模拟产品剂量场分布测试^[6-7]结果比较（图 7），各点位剂量值绝对偏差小于 10%，高低剂量区域一致，认定 MCNP 程序运算结果有效。

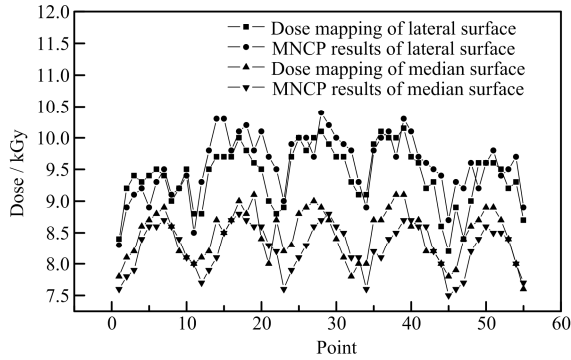


图 7 第一次加源后剂量场测试和 MCNP 计算的侧面和中间面剂量

Fig.7 The first dose mapping and MCNP results of lateral and median surface

4.2 最优化排源方案的确定

根据新编制的排源方案编写 MCNP 输入文件，计算模拟产品剂量分布情况，根据计算结果，适当调整 3.2 中钴源插入位置，修改 MCNP 输入文件并进行运算。重复进行 5 次以上的调整和运算，得出最终的钴源排布方案和 MNCP_4C 运算的剂量场分布结果。

5 装源及剂量场测试

辐照装置完成装源后进行剂量分布测试，测试结果与 MNCP_4C 运算的剂量场分布结果相比较（图 8），各监测点位的吸收剂量绝对偏差小于 10%，装置加工性能在预计范围内。

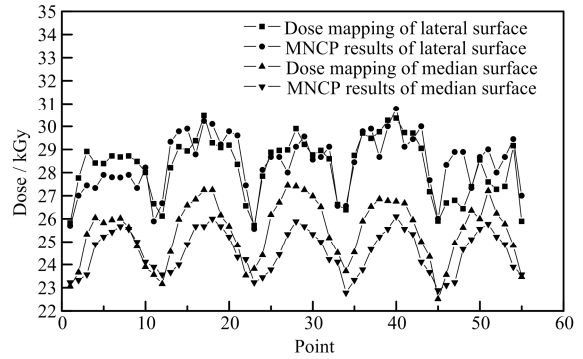


图 8 第二次加源后剂量场测试和 MCNP 计算的侧面和中间面剂量

Fig.8 The second dose mapping and MCNP results of lateral and median surface

将辐照装置加源前后的设备性能和 MCNP_4C 软件运算的设备性能相比较（表 3），可以看出辐照装置性能得到优化。

表 3 辐照装置设备性能
Table 3 The irradiator performance

性能指标 Performance index	第一次加源后剂量分布测试 Dose mapping for the first source adding	第二次加源后剂量分布测试 Dose mapping for the second source adding	第二次加源后 MCNP 计算剂量分布 MCNP results of dose for the second source adding
钴源活度 / Bq Source activity	4.39×10^{16}	6.49×10^{16}	6.49×10^{16}
高剂量点位 Max. zone	P17, P28, P39	P17, P39, P40	P17, P40
低剂量点位 Min. zone	P32, P45	P45	P34, P45
剂量率 / $\text{kGy} \cdot \text{min}^{-1}$ Dose rate	1.44–2.03	2.25–3.07	2.27–3.08
最大不均匀度 Max. ununiformity	1.41	1.36	1.36
加工能力 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ Process capability	3.14	3.32	3.29
射线利用率 / % Energy utilization efficiency	15.9	16.8	16.7

6 结论

本文论述了中金辐照成都有限公司 BFT-IV 辐照装置第二次加源所用排源方案的设计方法和过

程。首先确定源架各模件放射源活度的最佳比例，然后确定源棒在各模件的位置。对于大型板源辐照装置，此方法降低了排源的难度，缩减了排源的工作量。利用 MCNP 软件建立辐照装置数学模型，进

行剂量场分布测试, 为优化和寻求最佳排源方案提供了解决方法。本次辐照装置加源后的剂量分布测试结果优于第一次加源后的剂量分布测试结果, 证明排源方法及方案合理有效。

参考文献

- 1 杨磊, 刘义保, 刘玉娟. 基于模拟植物生长算法的钴源源棒的排列优化 [J]. 核技术, 2009, 32(12): 1-8.
YANG Lei, LIU Yibao, LIU Yujuan. Optimization of source pencil deployment based on plant growth simulation algorithm [J]. Nuclear techniques, 2009, 32(12): 1-8.
- 2 雷鹏, 祝清俊, 邓鹏, 等. 辐照装置源棒排列与参考面不均匀度的关系 [J]. 核农学报, 2007, 21(4): 387-389.
LEI Peng, ZHU Qingjun, DENG Peng, *et al.* Relation of source pencil arrangement and ununiformity of standard plane at irradiation facility [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2007, 21(4): 387-389.
- 3 单贤刍, 关迟, 徐力平, 等. 强 ^{60}Co 源辐照装置的最佳源棒排列设计及其辐射场的分布 [J]. 原子能科学技术, 1990, 24(5): 40-45.
SHAN Xianchu, GUAN Chi, XU Liping, *et al.* Optimum designing of bars arrangement and distribution of radiation field for a strong ^{60}Co irradiator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 1990, 24(5): 40-45.
- 4 Brisesmeister J F. MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport code, Version 4C [R]. LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
- 5 刘江平. ^{60}Co 辐照加工产品剂量分布的蒙特卡罗模拟 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2010, 28(1): 57-61.
LIU Jiangping. Monte Carlo simulation for the dose mapping of products irradiated by ^{60}Co γ -ray [J]. Journal of radiation research and radiation processing, 2008, 28(1): 57-61.
- 6 ISO 11137-3-2006. Sterilization of health care products Radiation-Part 3 Guidance on dosimetric aspects [S].
- 7 ASTM E2303-2011. Standard guide for absorbed-dose mapping in radiation processing facilities [S].

A proposal and practice for source pencil deployment of large single plate source Co-60 irradiator

GUO Quan¹ ZENG Minsheng¹ GUO Shiyuan¹ WANG Jianchun¹ LI Yang¹ YANG Xiaoping²

¹(Shenzhen JPY Ion-tech. Co., Ltd., Shenzhen 518019, China)

²(Zhongjin Irradiation Chengdu Co., Ltd., Chengdu 611900, China)

ABSTRACT We discussed the proposal and process of arraying source racks in the second time source adding for BFT-IV irradiation device in Zhongjin Irradiation Incorporated Company (Chengdu Branch), and calculated the optimized proportion of each module's activity among total 16 modules' by theoretical calculation. The new radiation source was added to each module with the optimized proportion. The new radiation source racks were arrayed in each module in a uniform manner. The dose mapping was calculated by MCNP-4C with the mathematical model which was validated by the result of the first time dose mapping test. The optimal scheme of arraying source racks was selected through calculating multiple scheme of arraying source racks by MCNP-4C. The source racks were loaded with the optimal scheme of arraying source racks. The energy utilization efficiency is 16.7%, and the max uniformity is 1.36 in the dose mapping test for $0.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ products after the second time source loading. The result is better than that of first time source loading. It proves that the method and the scheme of source arraying are reasonable and effective.

KEYWORDS BFT-IV gamma-ray irradiator, Radioactive source racks array, Proportion of module's activity, MNCP model

CLC TL929