

## 3D 打印制备<sup>131</sup>I 甲状腺体源方法研究

韩逸雯, 郑健宁, 夏 文, 徐利军, 刁立军, 郭 维, 朱保吉

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 本研究探讨了利用 3D 打印技术和相转移法制备含有放射性核素<sup>131</sup>I 的光敏树脂, 以模拟颈部-甲状腺体源模型, 用于探测器的效率校准。通过优化相转移剂的种类、用量、混合时间以及<sup>131</sup>I 的添加量, 成功制备了均匀性良好的<sup>131</sup>I 光敏树脂。通过 3D 打印技术, 制作了甲状腺体源模型, 并与 IAEA(国际原子能机构)/ANSI(美国国家标准学会)颈部体模进行了对比测量。结果表明, 使用<sup>131</sup>I 光敏树脂制备的甲状腺体源模型的探测效率与 IAEA/ANSI 颈部体模一致, 证明 3D 打印技术和相转移法用于制备光敏树脂甲状腺体源可行, 可为其他复杂异形体源的制备提供一种新思路。

**关键词:** 3D 打印; 相转移法; <sup>131</sup>I; 甲状腺体源; 探测器效率校准

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2025)03-0224-08

doi: 10.7538/tws.2025.youxian.009

## The 3D Printing Method for Preparing <sup>131</sup>I Thyroid Body Source

HAN Yiwen, ZHENG Jianning, XIA Wen, XU Lijun, DIAO Lijun, GUO Wei, ZHU Baoji

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** This research investigates the utilization of 3D printing technology and the phase transfer method to fabricate photosensitive resin containing the radionuclide <sup>131</sup>I, aiming to simulate the neck-thyroid source model for the efficiency calibration of detectors. Through optimizing the type, dosage, mixing time of the phase transfer agent, as well as the addition amount of <sup>131</sup>I, a well-uniform <sup>131</sup>I photosensitive resin was successfully prepared. By means of 3D printing technology, the thyroid source model was fabricated and a comparative measurement was conducted with the IAEA (International Atomic Energy Agency)/ANSI (American National Standards Institute) neck phantom. The experimental results indicate that the detection efficiency of the thyroid source model prepared using <sup>131</sup>I photosensitive resin is in line with that of the IAEA/ANSI neck phantom, proving the feasibility of 3D printing technology and phase transfer method for preparing photosensitive resin thyroid body source and offering a novel approach for the preparation of other complex heterogeneous source models.

**Key words:** 3D printing; phase transfer method; <sup>131</sup>I; thyroid body source; detector efficiency calibration

在核能应用的众多领域中, 放射性测量是一项基础且关键的技术。随着核技术不断取得

进展, 对探测器效率的要求也在持续提升<sup>[1]</sup>。为了实现更精细的效率校准, 确保测量结果的

准确性和可靠性,对于能够模拟待测源几何形状的异形体源的需求日益增长。

在核工业制造、反应堆运作以及核燃料后处理等核相关领域,放射性气体和气溶胶的形成是一种常见现象。这些物质可能通过呼吸或消化系统进入人体,并在肺部、甲状腺、骨骼等关键器官沉积<sup>[2]</sup>。<sup>131</sup>I在甲状腺中具有高沉积性,因此本研究开发新的体源制备方法,并用于制备颈部-甲状腺体源模型,以更真实地模拟实际情况。

3D打印技术,作为一种新兴的制造技术,为核成像系统的标准验证提供了新的可能性。这项技术可以制作具有精细结构的人体模型,如不同器官和高度不规则的肿瘤病变。3D打印技术与传统的减材加工技术相比,避免了加工过程中产生的废料和污染,具有高效、清洁的特点<sup>[3]</sup>,适于特殊形状放射源的制备。通过计算机断层扫描(CT)或磁共振成像(MRI)<sup>[4]</sup>,获取甲状腺的精确几何数据,使用MATLAB软件对数据进行分析,构建甲状腺的3D模型。考虑到放射性体源的密度和成分需要尽可能接近真实体源以及放射性的掺杂难度等问题,采用液态的光敏树脂作为体源的基材。

尽管3D打印技术在直接制造体源模型方面的研究不多,但已有研究表明其具有巨大潜力。例如,英国皇家马斯登NHSFT和癌症研究所的研究人员采用Polyjet技术,将高锆酸盐溶液与光敏树脂混合,直接3D打印出用于SPECT和PET系统的质量控制模型<sup>[5]</sup>。本研究使用的3D打印机为SLA技术,因此放射性的掺杂需在打印前进行,使用相转移法<sup>[6]</sup>来制备含有<sup>131</sup>I的光敏树脂,确保放射性溶液和光敏树脂能够实现均匀融合。人体甲状腺中<sup>131</sup>I活度的测量参考国际原子能机构(IAEA)和美国国家标准学会(ANSI)共同推荐的IAEA/ANSI颈部体模<sup>[7]</sup>。

本研究提出了使用相转移法来制备含有<sup>131</sup>I的有机液态树脂,并将其应用于3D打印甲状腺模型。目前可行性研究仅限于少数放射性核素,未来有望扩展到不同的3D打印材料和放射性核素,将促进该技术在放射性体源制造中的进一步应用。拟为核医学领域带来更高效、更精确的体源模型,从而提高放射性测量的准确性和可靠性。

## 1 仪器与试剂

### 1.1 主要仪器

多联加热磁力搅拌器: OAIC OHS4Pro型,浙江欧迈科实验仪器有限公司;超声波清洗机(ShapeWash 040S型)、3D打印机(RAYSHAPE Shape 4K型): 苏州铼赛智能科技有限公司;氧弹燃烧-离子色谱: Thermo ICS-5000型,美国赛默飞世尔科技公司;悬臂式电动搅拌器: LC-OES-60SH型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;溴化镭探测器(B380型)、数字化谱仪(DIGIBASE-E型): 美国ORTEC公司;碘化钠探测器: 3M3/3-X型,法国圣戈班集团。

### 1.2 主要试剂

标准树脂 Standard White 光敏树脂、耐高温-Hi-Temp 160 光敏树脂: 苏州铼赛智能科技有限公司;碘化钠、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)(99.5%)、三正辛胺(90%)、异戊醇(98.5%): 上海麦克林生化科技有限公司;二甲基亚砜(DMSO): AR, 国药集团化学试剂有限公司;放射性<sup>131</sup>I溶液: 原子高科股份有限公司。

## 2 实验方法

为制备在密度和成分上接近真实器官的放射性体源,并解决放射性核素掺杂难题,本研究采用液态光敏树脂作为基材,结合光固化3D打印技术(基于DLP数字光处理系统)进行体源构建。由于DLP技术通过逐层固化树脂实现模型成型,在打印体积较大的器官模型(如肺部、肝脏)时耗时较长,需确保放射性核素在整个打印过程中长期稳定且均匀地分散于光敏树脂内。然而,放射性核素化合物普遍具有亲水性,难溶于光敏树脂这类有机体系,导致打印体源的放射性分布不均匀、模拟精度下降。因此本研究引入相转移法,通过将放射性核素水溶液与相转移剂混合,利用其两亲特性将水相中的核素转移至有机相光敏树脂中。该方法无需对树脂或核素进行复杂化学改性,实验流程大幅简化,且全程可在常温条件下完成,既避免了高温可能引发的树脂变性风险,又显著提升了放射性掺杂的工艺可控性与操作安全性,最终实现核素在树脂体系中的稳定均匀分散,为高精度放射性体源的制备提供了可行路径。使用3D打印制备甲状腺体源的流程示于图1。

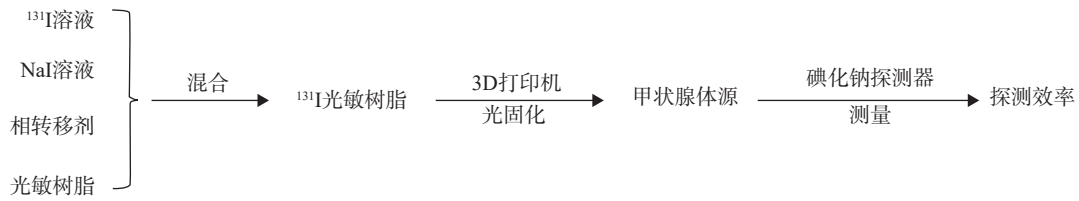


图1 3D打印制备甲状腺体源流程

Fig.1 Process for preparing thyroid body source by 3D printing

### 2.1 $^{131}\text{I}$ 光敏树脂制备

根据 ICRP 110 号文件<sup>[8]</sup>、IAEA/ANSI 颈部体模<sup>[7]</sup>的材料标准,结合 3D 打印树脂物性参数,选取两种 3D 打印机配套的不同特性光敏树脂,分别模拟颈部肌肉和甲状腺,其中耐高温光敏树脂作为甲状腺模拟材料的主体基材。为降低放射性实验风险并减少废物产生,前期采用非放射性碘载体进行实验,以完成 $^{131}\text{I}$ 光敏树脂的配方研究和工艺流程的优化,使用氧弹燃烧-离子色谱法<sup>[9]</sup>定量检测树脂中碘元素。使用基于萃取机理的相转移法掺杂碘元素,其核心在于利用相转移剂的分子/离子跨相迁移特性,将水相中的碘离子转移至有机相光敏树脂中。通过调整相转移剂的种类、用量、混合时间以及碘的添加量等条件,树脂固化后检测其中碘元素的含量,以评估不同因素对碘含量的影响,从而优化 $^{131}\text{I}$ 光敏树脂的制备工艺。同理,若掺杂其他核素或选用不同类型的光敏树脂,应根据其性质来选择合适的相转移剂,并通过实验确定具体核素掺杂光敏树脂的制备工艺。

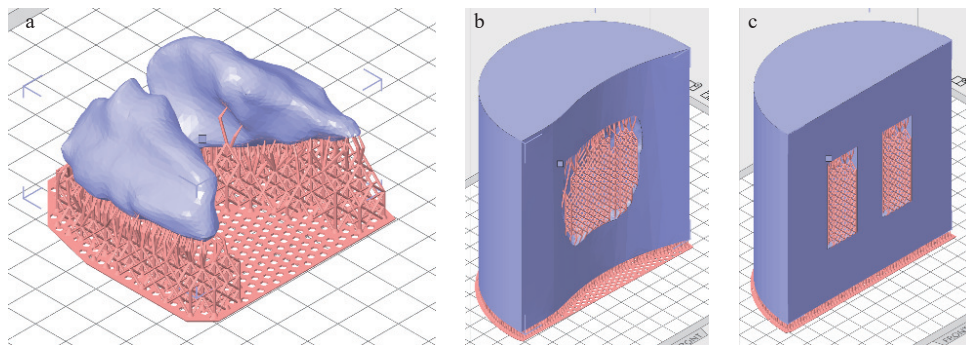
### 2.2 甲状腺及颈部三维模型建立

从 CT 医学图像中获取甲状腺的解剖数据,并且参考 ICRU 48 号文件<sup>[10]</sup>、中国数字化可视

图谱<sup>[11]</sup>以及解剖学<sup>[12-13]</sup>等提供的尺寸,使用 MATLAB 软件将二维图像数据转换为三维体积数据,获得甲状腺的 3D 模型。导入 Voxeldance Tango 添加支撑并切片,如图 2a 所示,得到甲状腺的切片文件,颈部模型用圆柱体代替,并根据甲状腺模型形状镂空,如图 2b 所示,同时设计了对比的 IAEA/ANSI 颈部体模颈部模型,如图 2c 所示。由于在 3D 打印机配套的光敏树脂中添加了核素溶液以及相转移剂,为了确定对光敏树脂体系不会造成影响且 3D 打印机能够完成打印,在打印前调整 3D 打印机的光照参数以确保打印效果符合要求。

### 2.3 颈部-甲状腺体源模型测量

制作多个圆柱体体源并测定其质量与计数率,验证 $^{131}\text{I}$ 光敏树脂的均匀性。通过钴源辐照,并用扫描电子显微镜观察树脂辐照前后是否变化,验证 $^{131}\text{I}$ 光敏树脂作为体源基材的抗辐照性能。利用质量法对甲状腺体源进行活度定值后,将其放入颈部模型并固定,使用碘化钠探测器紧贴模型前颈侧面进行测量,获得探测效率。对于 IAEA/ANSI 颈部体模,将装有 $^{131}\text{I}$ 溶液的小瓶活度定值后放入颈部模型并固定,同样使用碘化钠探测器进行测量,以对比碘化钠探测器对两种模型探测效率的测量结果。



a——甲状腺切片; b——颈部模型; c——IAEA/ANSI 颈部模型

图2 甲状腺模型及两种颈部模型

Fig.2 Thyroid model and two neck models

### 3 结果与讨论

#### 3.1 <sup>131</sup>I光敏树脂制备

**3.1.1 相转移剂选择** 选择三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)<sup>[14]</sup>、二甲基亚砆、*N,N*-二甲基甲酰胺<sup>[15]</sup>三种相转移剂,由于三正辛胺使用异戊醇 1:1 稀释,因此其他实验组另外增加一组异戊醇 1:1 稀释的对照实验。将 0.25 g 相转移剂、25 mL 0.1 mol/L NaI 溶液和 25 g 耐高温光敏树脂混合,静置 4 h,弃去上层溶液,下层树脂均匀分成 6 份,用紫外灯在表面皿中固化,用氧弹燃烧-离子色谱测量,数据列于表 1,由表 1 可知,使用三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)作为相转移剂的耐高温光敏树脂平均 I 元素含量为 491.3 mg/kg,空白对照组平均碘元素含量为 116.9 mg/kg,证明三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)作为相转移剂提高了 I 在耐高温光敏树脂中的溶解度。另外两种相转移剂二甲基亚砆和 *N,N*-二甲基甲酰胺对 I 的转移量在使用异戊醇 1:1 稀释后有所提高,但仍与对照组差别不大,可能是因为这两种相转移剂在树脂相中的溶解度低所致。因此选择三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)作为 I 的相转移剂。

表 1 碘的相转移剂种类选择

Table 1 Selection of phase transfer agent types of iodine

相转移剂	平均碘含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	相对 标准偏差/%
无	116.9	6.5
三正辛胺	348.4	13.0
二甲基亚砆	106.3	6.1
<i>N,N</i> -二甲基甲酰胺	89.5	6.0
无(+异戊醇)	227.1	10.3
三正辛胺(+异戊醇)	491.3	9.9
二甲基亚砆(+异戊醇)	223.4	9.6
<i>N,N</i> -二甲基甲酰胺(+异戊醇)	102.9	10.0

**3.1.2 相转移剂用量** 将不同质量的三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)与 25 mL 0.1 mol/L NaI 溶液和 25 g 耐高温光敏树脂混合,静置 4 h,弃去上层溶液,下层树脂均匀分成 6 份,在表面皿中固化,用氧弹燃烧-离子色谱测量,数据列于表 2,由表 2 可知,相转移剂用量为 0.750 g 即与耐高温光敏树脂的质量比为 3:100 时相转移效果最好,此时碘元素平均含量为 594.6 mg/kg,因此选择相转移剂与耐高温光敏树脂质量比为 3:100。

表 2 碘的相转移剂用量选择

Table 2 Selection of phase transfer agent dosage of Iodine

三正辛胺 (+异戊醇)/g	平均碘含量/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	相对标准 偏差/%
0.125	488.8	12.9
0.250	491.3	9.9
0.500	547.7	8.4
0.750	594.6	6.3
1.000	594.5	5.4
1.250	546.8	12.9

**3.1.3 混合时间** 将 0.75 g 三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)与 1000 μL 0.1 mol/L NaI 溶液和 25 g 耐高温光敏树脂混合不同的时间,混合后的光敏树脂均匀分成 6 份,在表面皿中固化,用氧弹燃烧-离子色谱测量,数据列于表 3,由表 3 可知,随着混合时间的延长,同一批次碘元素含量的相对标准偏差逐渐变小, <10%,I 的转移效率在混合时间为 2 h 时最高,为 74.8%,因此混合时间为 2 h 时比较合适。

表 3 碘的混合时间选择

Table 3 Selection of mixing time of Iodine

混合时间/h	相对标准偏差/%	转移效率/%
0.5	9.1	68.3
1.0	7.2	68.9
2.0	7.5	74.8
4.0	7.7	74.0
8.0	7.0	71.8
16.0	4.6	71.8

**3.1.4 碘添加量** 将 0.75 g 三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)与不同体积的 0.1 mol/L NaI 溶液和 25 g 耐高温光敏树脂混合 2 h,混合后的光敏树脂均匀分成 6 份,在表面皿中固化,用氧弹燃烧-离子色谱测量,数据列于表 4,由表 4 可知,I 的转移效率在添加量为 500~600 mg/kg 时较

表 4 碘添加量的选择

Table 4 Selection of iodine dosage

碘添加量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	相对标准偏差/%	转移效率/%
101.5	12.0	61.7
203.0	6.7	67.0
303.3	7.2	68.8
401.2	3.5	65.5
506.3	5.3	72.6
602.8	8.4	72.6



高,且在约 500 mg/kg 时同批次内相对标准偏差较小,因此碘的添加量约为 500 mg/kg 较为合适。

3.2 甲状腺体源及颈部模型制备

3.2.1 3D 打印光照参数调试 按 3.1 所述配方制备 <sup>131</sup>I 光敏树脂,转移到 3D 打印机树脂槽中,打印投射深度测试模型,打印完成后观察打印效果,重复调整光照参数至投射深度测试模型打印成功。耐高温光敏树脂的默认光照参数为

曝光光强: 60%、曝光时间: 1.50 s。经调试,最终确定 <sup>131</sup>I 光敏树脂的光照参数为曝光光强: 100%、曝光时间: 4.00 s。

3.2.2 甲状腺体源 3D 打印 使用 <sup>131</sup>I 光敏树脂打印甲状腺体源,使用标准白光敏树脂打印直径 120 mm,高 120 mm 的圆柱体模型代替颈部,分别按照甲状腺的形状和预计放入的小瓶尺寸将圆柱体中间镂空,模型示于图 3。

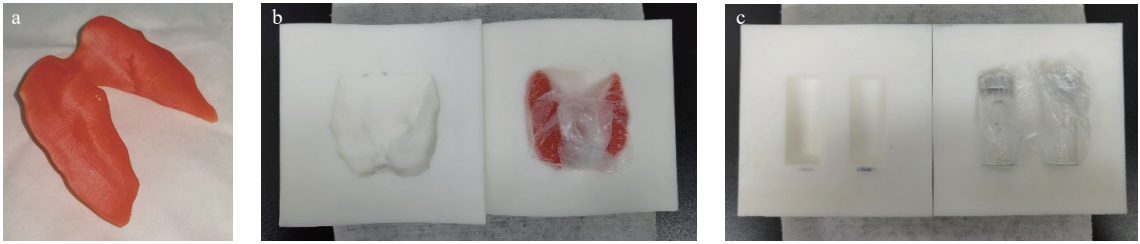


图 3 3D 打印制作的甲状腺体源(a)及两种颈部模型(b、c)  
Fig.3 3D printing thyroid gland sources (a) and two types of neck models (b、c)

3.3 颈部-甲状腺体源模型测量

3.3.1 <sup>131</sup>I 光敏树脂均匀性 3D 打印机采用的是 DLP 技术打印体源,通过逐层固化树脂实现成型,打印前在树脂槽中加入树脂,因此体源的均匀性可以由同时打印的圆柱体体源的均匀性进行验证。按照活度目标值为 10<sup>4</sup> Bq~10<sup>5</sup> Bq 进行 <sup>131</sup>I 的添加。将 <sup>131</sup>I 母液用去离子水稀释到所需活度浓度,与 24 mL 0.1 mol/L NaI 溶液混合,再与 18 g 三正辛胺(异戊醇 1:1 稀释)和 600 g 耐高温光敏树脂混合,搅拌 2 h 后,转移到 3D 打印机树脂槽中,制作直径 20 mm、高 35 mm 的圆柱体体源 20 个,在打印过程中,其中 12 个竖直放置打印,为样品 1~12,8 个水平放置打印,为样品 13~20,利用溴化镭探测器测量放射源的净计数率,判断 <sup>131</sup>I 光敏树脂均匀性。每个样品的净计数率约 40 s<sup>-1</sup>,测量 20 min,总计数大于 4 万,结果列于表 5。可通过对比不同样品中单位质量净计数率评估样品的均匀性。根据自由度(1, 18),以及显著性水平  $\alpha=0.05$  时,  $F$  分布临界值  $F_{\alpha}=4.41$  时,计算的  $F$  值为 0.13,小于  $F_{\alpha}$ ,如表 6 所示,表明竖直放置打印和水平放置打印之间均无显著性差异,样品均匀。

3.3.2 体源基材抗辐照性能 用 3D 打印机制作直径 20 mm,高 20 mm 圆柱体 2 个,通过钴源进行  $\gamma$  辐照,总剂量为 20 kGy。辐照后树脂颜色略微变深,电镜图示于图 4,辐照前后树脂表

面及截面并无明显变化,说明其抗辐照性能良好,适用于作为体源的基材使用。

3.3.3 活度定值 由于验证了 <sup>131</sup>I 光敏树脂的均匀性,可以使用质量法来对甲状腺体源进行

表 5 <sup>131</sup>I 光敏树脂均匀性测量结果

Table 5 Measurement results of the uniformity of <sup>131</sup> I photosensitive resin			
样品编号	质量/g	净计数率/s <sup>-1</sup>	每克净计数率/s <sup>-1</sup>
1	13.28	39.47	2.97
2	13.27	38.38	2.89
3	13.28	38.72	2.92
4	13.28	39.03	2.94
5	13.28	37.63	2.83
6	13.23	38.48	2.91
7	13.29	37.90	2.85
8	13.27	38.16	2.88
9	13.26	38.42	2.90
10	13.26	38.29	2.89
11	13.30	39.14	2.94
12	13.29	37.53	2.82
13	13.36	38.99	2.92
14	13.39	38.78	2.90
15	13.33	38.62	2.90
16	13.37	39.23	2.93
17	13.39	38.00	2.84
18	13.40	38.19	2.85
19	13.34	38.03	2.85
20	13.38	39.06	2.92

表 6 <sup>131</sup>I 光敏树脂均匀性方差分析  
Table 6 Variance analysis for homogeneity of iodine-131 photosensitive resin

差异来源	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F值	F <sub>0.01</sub>	F <sub>0.05</sub>
组间	2.31×10 <sup>-4</sup>	1	2.31×10 <sup>-4</sup>	0.3	8.29	4.41
组内	3.14×10 <sup>-2</sup>	18	1.75×10 <sup>-3</sup>			
总计	3.17×10 <sup>-2</sup>	19	—			

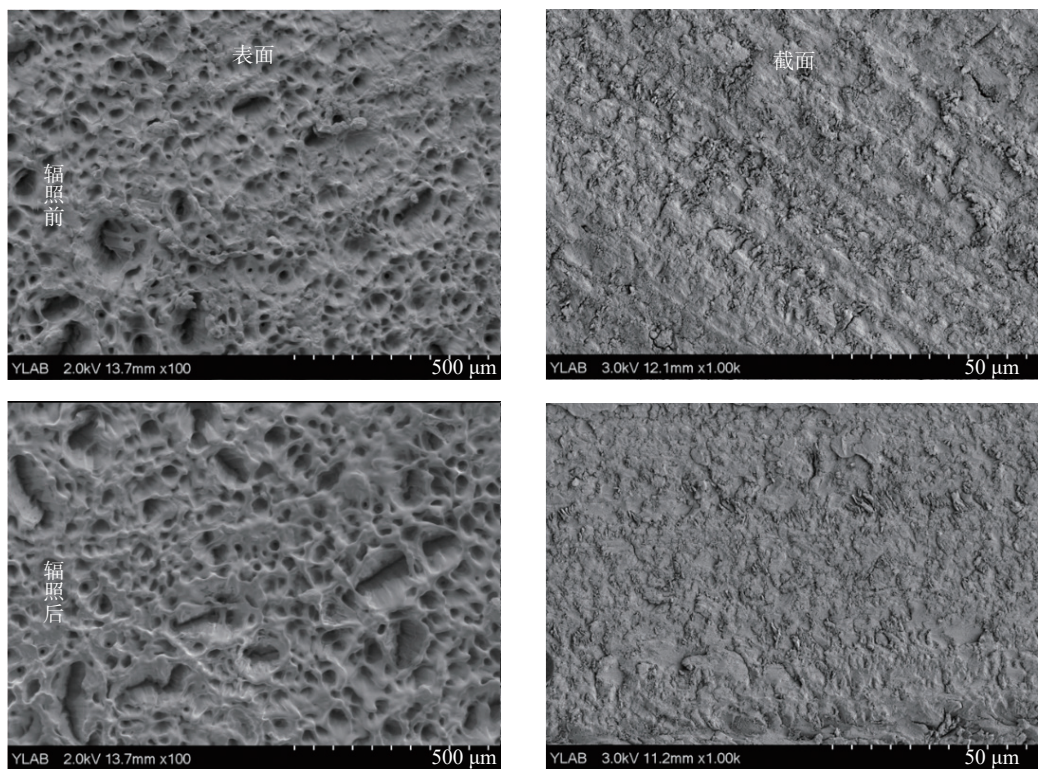


图 4 <sup>131</sup>I 光敏树脂扫描电镜图  
Fig.4 Scanning electron microscope image of <sup>131</sup>I photosensitive resin

定值,在打印甲状腺体源的过程中,同时打印一个直径 20 mm,高 35 mm 的圆柱体,采用  $\gamma$  谱仪标准装置对圆柱体的活度进行定值,圆柱体体源的活度为  $1.93\times10^4$  Bq,由质量法推算甲状腺体源的活度为  $5.1\times10^4$  Bq,合成标准不确定度为 2.0%,定值的不确定度除活度定值引入的不确定度之外还应考虑 <sup>131</sup>I 光敏树脂均匀性引入的不确定度,结果列于表 7。

对于 IAEA/ANSI 颈部体模中要放置的小瓶,在小瓶中装入 3 mL 的 <sup>131</sup>I 溶液并采用  $\gamma$  谱仪标准装置对其活度进行定值,测得装有 <sup>131</sup>I 溶液的小瓶活度为  $1.67\times10^3$  Bq,合成标准不确定度为 1.7%,评估结果列于表 8。

**3.3.4 两种模型的测量** 甲状腺体源定值后,将其放入颈部模型,固定两部分颈部模型。使用碘化钠探测器进行测量,将甲状腺体源模型的

表 7 甲状腺体源不确定度评估

Table 7 Evaluation of thyroid body source uncertainty		
不确定度分量	评定方法	不确定度/%
统计涨落	A	0.29
自吸收修正	B	1.0
发射几率	B	0.93
探测效率	B	1.0
均匀性	A	0.92
合成标准不确定度		2.0
扩展不确定度(k=2)		4.0

前颈侧面紧贴碘化钠探测器探头表面进行测量,如图 5 所示。使用碘化钠探测器测得甲状腺体源模型的净计数率为  $6.16\times10^2$  s<sup>-1</sup>,可得碘化钠探测器对甲状腺体源模型的探测效率为 1.21%。

对比用的 IAEA/ANSI 颈部体模,在小瓶定值后,用去离子水将小瓶补满,密封后放入颈部

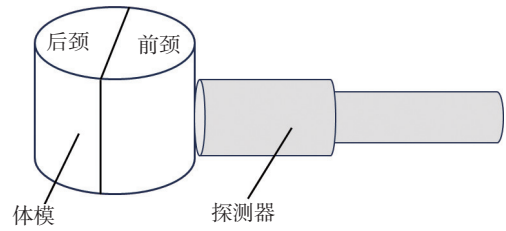


图 5 碘化钠探测器测量示意图

Fig.5 Sodium iodide detector measurement diagram

表 8 <sup>131</sup>I 溶液不确定度评估

Table 8 Evaluation of <sup>131</sup>I solution uncertainty

不确定度分量	评定方法	不确定度/%
统计涨落	A	0.3
自吸收修正	B	0.8
发射几率	B	0.93
探测效率	B	1.0
合成标准不确定度		1.7
扩展不确定度(k=2)		3.4

模型并固定, 然后使用相同方式进行测量, 如图 5 所示。使用碘化钠探测器测得 IAEA/ANSI 颈部体模的净计数率为  $19.93\text{ s}^{-1}$ , 可得碘化钠探测器对 IAEA/ANSI 颈部体模的探测效率为 1.19%。

4 结论

本研究使用相转移法制备 <sup>131</sup>I 光敏树脂, 通过 3D 打印制备甲状腺体源, 研究碘化钠探测器对甲状腺体源模型的探测效率, 并与 IAEA/ANSI 颈部体模的结果进行对比。经过实验证明, 相转移法可以制备均匀性较好的 <sup>131</sup>I 光敏树脂, 不确定度为 0.92%, 碘化钠探测器对于制备的甲状腺体源的探测效率为 1.21%, 比 IAEA/ANSI 颈部体模的探测效率 1.19% 高 0.02%, 说明碘化钠探测器对两种模型的探测效率差别不大, 证明制备的甲状腺体源用于探测器效率校准的标准源具有可行性, 可为其他复杂异形体源的制备提供新思路。

参考文献:

[1] 罗上庚. 核设施退役中几个值得重视的问题[J]. 辐射防护, 2002, 22(3): 129-134, 139.  
Luo Shanggeng. Some noticeable issues of decommissioning of nuclear facilities[J]. Radialization Protection, 2002, 22(3): 129-134, 139(in Chinese).

[2] 任宏正, 李永国, 俞杰, 等. 放射性气溶胶净化技术现状与展望[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(10): 92-96.  
Ren Hongzheng, Li Yongguo, Yu Jie, et al. Current situation and prospect of radioactive aerosol removal technology[J]. Environmental Science and Management, 2020, 45(10): 92-96(in Chinese).

[3] 孙晓林. 3D 打印技术的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2013, 26(4): 108-109, 107.  
Sun Xiaolin. Application of 3D printing technology[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2013, 26(4): 108-109, 107 (in Chinese).

[4] Kairn T, Zahrani M, Cassim N, et al. Quasi-simultaneous 3D printing of muscle-, lung- and bone-equivalent media: A proof-of-concept study[J]. Physical and Engineering Sciences in Medicine, 2020, 43(2): 701-710.

[5] Gear J I, Cummings C, Sullivan J, et al. Radioactive 3D printing for the production of molecular imaging phantoms[J]. Physics in Medicine and Biology, 2020, 65(17): 175019.

[6] 杜月, 林敏, 徐利军, 等. 相转移法制备 <sup>137</sup>Cs 3D 打印用光敏树脂的可行性研究[J]. 同位素, 2023, 36(1): 20-28.  
Du Yue, Lin Min, XYU Lijun, et al. Feasibility study on preparation of photosensitive resin for <sup>137</sup>Cs 3D printing by phase transfer method[J]. Journal of Isotopes, 2023, 36(1): 20-28 (in Chinese).

[7] 李晓敦, 曹勤剑, 肖运实, 等. 甲状腺计数器多尺寸刻度模型研究[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29(5): 530-534, 539.  
Li Xiaodun, Cao Qinjian, Xiao Yunshi, et al. Research on multi-sized phantoms for thyroid counting calibration[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2020, 29(5): 530-534, 539(in Chinese).

[8] Clement C H. ICRP Publication 110: Adult Reference Computational Phantoms[J]. Annals of the ICRP, 2009, 39(2): 1-164.

[9] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 热塑性弹性体 卤素含量的测定 氧弹燃烧-离子色谱法: GB/T 34692—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[10] International commission on radiation units and measurements. ICRU REPORT 48: Phantoms and computational models in therapy, diagnosis and protection[J]. Environment International, 1993, 19(5): 530.

[11] 张绍祥, 刘正津, 谭立文, 等. 中国数字化可视人体数据集[Z]. 北京: 中国人民解放军第三军医大学基础部, 2005.

- [12] 韩利军, 王刚, 陈杰. 人体解剖学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
- [13] 丁文龙. 系统解剖学[M]. 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 2018.
- [14] 梁斌, 沈坤杰, 李贵海, 等. 有机胺萃取耦合 CO<sub>2</sub> 矿化过程中阴离子迁移规律研究[J]. [石油与天然气化工](#), 2022, 51(5): 60-64.
- Liang Bin, Shen Kunjie, Li Guihai, et al. Study on the anion migration in the CO<sub>2</sub> mineralization process coupled with organic amine extraction[J]. [Chemical Engineering of Oil & Gas](#), 2022, 51(5): 60-64(in Chinese).
- [15] 黄清怡. 金属卤化物钙钛矿单晶卤素离子交换及稳定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.