

成型稳定性及外观品质改善。实验结果表明，当磷酸盐添加量处于 0.05–0.20 范围内时，饼干断裂强度由原有的 34 下降至 22–26，脆性指数提高约 20–25，使咀嚼过程中口感更加均衡。成型阶段，面团延展性能得到改善，模压尺寸偏差由 8 收敛至 2–3，烘焙后翘曲率降低约 35–45，有效减少废品率。对于油脂含量 30 以上的酥性制品体系，磷酸盐对油水界面

稳定产生积极影响，表面油渗出率由 7.3 下降至 4.5，产品表面干爽度明显提升。在储存条件下，添加磷酸盐的样品在 60 内脆性保持率维持在 85 以上，而对照组下降至 68 左右<sup>[3]</sup>。上述结果表明，磷酸盐在饼干及酥性制品中能够兼顾口感优化与结构稳定，对提升产品一致性具有重要意义，详见表 1。

表 1 磷酸盐在不同类型烘焙食品中的应用对比分析

产品类型	磷酸盐添加量范围	体积或高度变化	结构改善指标	储存性能变化	品质稳定性指标
面包类产品	0.15–0.30	比容 3.6 → 4.5	气孔均匀度 ↑ 18–25	72 硬度增长 ≤30	塌陷率 12 → 4–6
面包类产品	0.20–0.30	体积增幅 ≈25	面筋强度 ↑ 20	水分保持 ↑ 10	老化速率 ↓ 20
蛋糕类产品	0.10–0.25	高度 ↑ 12–18	大孔比例 9 → 2–4	48 水分损失 6.8 → 4.1	回缩率 7–9 → 3–4
饼干类产品	0.05–0.20	尺寸偏差 8 → 2–3	断裂强度 34 → 22–26	脆性保持率 ≥85	翘曲率 ↓ 35–45
酥性制品	0.10–0.20	形态稳定性 ↑	油渗出率 7.3 → 4.5	60 品质保持 ≥85	外观完整率 ↑ 20

5 磷酸盐在烘焙食品中的应用优化策略

5.1 基于产品类型的磷酸盐配方优化策略

不同烘焙食品对磷酸盐的功能需求存在明显差异，配方优化需紧密结合产品结构特征与加工工艺条件。面包类产品以面筋网络稳定和发酵持气能力为核心目标，磷酸盐添加量宜控制在 0.15–0.30 范围内，并与酵母用量 2.0–2.5 形成匹配关系，使比容稳定在 4.2–4.6 区间。蛋糕类产品更依赖泡沫体系支撑，磷酸盐应与化学膨松剂协同设计，在 0.10–0.25 范围内调节反应节律，使成品高度提升 12–18 且回缩率低于 4。饼干及酥性制品强调脆性与成型稳定，磷酸盐使用量宜低于 0.20，通过改善面团延展性将尺寸偏差控制在 3 以内。基于产品类型差异进行精细化配方设计，有助于发挥磷酸盐的针对性功能优势。

5.2 面向品质提升目标的磷酸盐使用参数优化

在品质提升导向下，磷酸盐使用参数需与关键工艺条件协同优化。搅拌阶段中，适宜的磷酸盐水平可使面团拉伸阻力降低约 15，同时保持延展性稳定在中等区间，有利于连续化成型。发酵过程中，磷酸盐缓冲体系可将面团 pH 波动幅度控制在 0.3 以内，使二氧化碳保持时间延长 20 左右。烘焙阶段温度升至 180–200 条件下，磷酸盐对蛋白质热变性的调节作用使结构定型时间缩短 8–12，降低塌陷风险。在储存环节，合理参数组合可使 72 硬度增长值低于 30，水分损失率控制在 4–5 范围内，整体提升产品口感稳定性与货架期表现<sup>[4]</sup>。

5.3 兼顾安全性与功能性的磷酸盐应用管理策略

在实际生产中，磷酸盐应用需在功能发挥与安全控制之间保持平衡。添加量管理是关键环节，应依据产品类型将

使用水平控制在 0.05–0.30 范围内，避免离子强度过高引发质构异常或风味偏差。原料管理方面，应结合面粉灰分、乳制品中钙含量等因素，防止络合反应导致体系不稳定。过程控制中，通过批次记录与在线监测手段，将成品体积波动控制在 ±5 以内，脆性或柔软度偏差控制在 ±10 范围内。质量管理体系中引入磷含量检测频次 2–4 次每批，可有效降低长期积累风险。在保障食品安全前提下，实现磷酸盐功能效益的稳定释放。

6 结语

磷酸盐在烘焙食品加工体系中对面团结构形成、气体保持及成品品质稳定具有重要支撑作用。通过系统分析其作用机理、应用效果及潜在风险，可以看出磷酸盐的功能表现与产品类型、工艺参数及配方设计密切相关。围绕品质提升目标开展精细化应用优化，有助于增强烘焙食品的加工适应性与货架期稳定性。同时，在实际生产中加强用量控制与过程管理，对于实现功能发挥与安全保障的协调具有现实意义。对磷酸盐应用规律的深入梳理，为烘焙食品品质控制与技术改进提供了可靠参考。

参考文献

[1] 曹爽,抗坏血酸-钼酸铵分光光度法检测食品中总磷酸盐含量的研究[J].现代食品,2025,(19):187-190.  
[2] 王天星.粤式烘焙食品中杂环胺的富集检测和生成抑制研究[D].导师:李晓玺.华南理工大学,2023.  
[3] 彭蔚,肖胜蓝,朱建中,杨敏.离子色谱法测定烘焙食品中磷酸盐[J].河南预防医学杂志,2018,29(06):421-422.  
[4] 王建宏,张艳,范艳红,刘宏,罗之纲.离子色谱同时测定烘焙食品中两种形态磷酸盐[J].食品研究与开发,2011,32(12):137-139.

# Dose level and distribution of radiation field in iridium 192 afterloading therapy room

Xiaoli Liang<sup>1</sup> Yawan Liang<sup>2</sup> Wei Jiang<sup>3</sup> Xiaomeng Yang<sup>1</sup> Yanli Zhao<sup>1</sup>

1. Henan Ecological Environment Monitoring and Security Center, Zhengzhou, Henan, 450000, China

2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

3. Henan Provincial Nuclear Technology Application Center, Zhengzhou, Henan 450000, China

## Abstract

Understanding the radiation dose field levels and distribution characteristics inside an iridium-192 brachytherapy treatment room, as well as the shielding effect of maze design on the radiation dose field, provides a scientific basis for the radiation protection design of the treatment room and personnel safety assessment. Thermoluminescent dosimeters (TLD) and radiation dose monitors were used to measure the radiation dose field levels and distribution at different positions, heights, and distances within the treatment room during both the source exposure and storage states of the iridium-192 afterloader. This study, through a combination of experimental measurements and theoretical analysis, obtained accurate internal dose field data of the treatment room and discussed the significant role of the maze structure in reducing radiation doses at the entrance. The findings provide critical insights for optimizing the design of the treatment room and radiation protection measures, ensuring the radiation safety of medical staff and patients.

## Keywords

Afterloader; Iridium-192; Cumulative dose; Radiation dose field; Distribution characteristics

# 铱-192后装治疗室内辐射剂量场水平及分布

梁小丽<sup>1</sup> 梁雅婉<sup>2</sup> 江维<sup>3</sup> 杨晓蒙<sup>1</sup> 赵彦丽<sup>1</sup>

1. 河南省生态环境监测和安全中心, 中国·河南 郑州 450000

2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 中国·河南 郑州 450000

3. 河南省核技术应用中心, 中国·河南 郑州 450000

## 摘要

了解铱-192后装治疗室内辐射剂量场水平; 分布特性及迷道设计对辐射剂量场所起的屏蔽作用, 为治疗室的辐射防护设计和人员安全评估提供科学依据。采用热释光剂量计(TLD)和辐射剂量监测仪, 在铱-192后装机出束和贮源状态下, 分别测量治疗室内不同位置, 不同高度及不同距离下的辐射剂量场水平及分布。本研究通过实测和理论相结合的方法, 获取精确的治疗室内剂量场数值, 并探讨了迷道结构对降低治疗室入口处辐射剂量的重要意义, 为优化治疗室的设计和辐射防护措施, 保证医护人员和患者的辐射安全提供了关键依据。

## 关键词

后装治疗机; 铱-192; 累积剂量; 辐射剂量场; 分布特征

## 1 引言

铱-192后装机属于近距离放射治疗设备, 是治疗恶性肿瘤的重要手段之一, 是将放射源通过人体的体腔和管道置于瘤体附近来杀死肿瘤组织细胞<sup>[1]</sup>。放射源在输送和治疗过程中是处于裸露状态的, 并在治疗室内形成 $4\pi$ 方向的主束辐射场<sup>[2]</sup>, 因此了解治疗室内辐射剂量场的水平及分布对于治疗室的屏蔽设计及完善辐射安全与防护措施至关重要。本次开展铱-192后装治疗室内剂量场的实验研究具有重要

的现实意义, 尤其了解迷道这一关键设计元素对剂量场的影响以及固定式报警仪等辐射安全防护措施的安装设计, 对保护医护人员、患者和周边环境具有不可忽视的作用。

## 2 材料与方法

### 2.1 辐射源及场所

实验装置一为医科达(北京)医疗器械有限公司生产的FlexitronHDR型铱-192后装治疗机, 测量期间铱-192源实时活度为185GBq(5.139Ci); 实验装置二为山东新华医疗器械股份有限公司生产的XHDR18型铱-192后装治疗机, 测量期间铱-192源实时活度为133.3GBq(3.702Ci)。

【作者简介】梁小丽(1981-), 女, 本科, 高工, 注册核安全工程师, 从事核技术应用环评研究。

## 2.2 监测项目与方法

### 2.2.1 后装机出束状态下治疗室内不同距离、高度辐射剂量水平分布

两个后装治疗室内辐射剂量场水平均为模拟患者治疗时放射源从施源导管引出到模拟病灶状态下的结果,装置一源点距地面高度为1.2米,装置二源点距地面高度为1.25米。为精确测量剂量场分布,在治疗室内四周及迷路内外墙、源点至防护门口直线距离分别间隔固定距离并在垂直高度1.0m、1.7m和2.0m均匀布放热释光剂量计(TLD)进行轴向和垂直于轴向的辐射累积剂量测量。两个治疗室内共布放102组TLD,每组4个。该TLD均经过筛选、刻度,性能稳定可靠,分散性在 $\pm 3\%$ 之内,且经过比对考核合格。

### 2.2.2 后装机贮源状态下周围辐射场剂量水平分布

结合两台后装机所在的位置,分别以治疗机为轴线监测上部1.2米、中部0.8米和下部0.3米高度距表面0m、0.3m、0.5m、1.0m、1.5m处的周围剂量当量率<sup>[3]</sup>。测量仪器为FH40G-L10+FHZ672E-10型的环境 $\gamma$ 剂量率仪,仪器经过检定合格并在有效期内。

## 3 结果

### 3.1 后装机出束状态下治疗室内部剂量场水平及分布

后装机治疗出束状态下,两个治疗室内部TLD布放点位图以及直线路径图的监测结果详见图1和图2。

结果显示, FlexitronHDR 治疗室内不同点位累积照射剂量在0.02~3.60mSv之间,最大值在距离辐射源点最近迷道墙壁1.7米处,均值为2.94mSv;路径上累积剂量在0.03~38.00mSv之间,最大值距离辐射源点20cm处1m高度位置。迷道内墙、外墙拐口处所获得的平均累积照射剂量分别为2.61mSv和0.06mSv,防护门内平均累积照射剂量为0.02mSv。XHDR18治疗室内不同点位累积照射剂量在0.01~1.77mSv之间,最大值1.77mSv出现在后装机南侧正对墙面上1m高度;路径上累积照射剂量在0.02~7.03mSv之间,最大值出现在距离辐射源点50cm处1m高度。迷道内墙、外墙拐口处的平均累积照射剂量分别为0.28mSv和0.05mSv,防护门内处的平均累积照射剂量为0.01mSv。

### 3.2 后装机贮源状态下周围辐射剂量水平分布

后装机贮源状态下,分别巡测机头、机身、底座三个不同高度位置,在最大剂量测量点位置进行0~1.5米间隔45度周围剂量当量率测量。其测量结果见图3和图4。

FlexitronHDR 治疗机贮源状态下周围剂量当量率介于0.10~0.66 $\mu$ Sv/h之间,最大值0.66 $\mu$ Sv/h出现在后装机中部前表面; XHDR18治疗机贮源状态下周围剂量当量率介于0.14~3.56 $\mu$ Sv/h之间,最大值3.56 $\mu$ Sv/h出现在后装机中部前表面,这与后装机内铱-192源贮源位置相符。

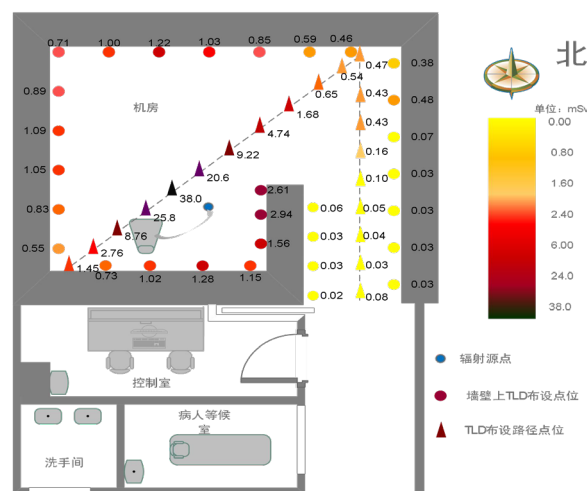


图1 FlexitronHDR 型后装治疗室监测布放图

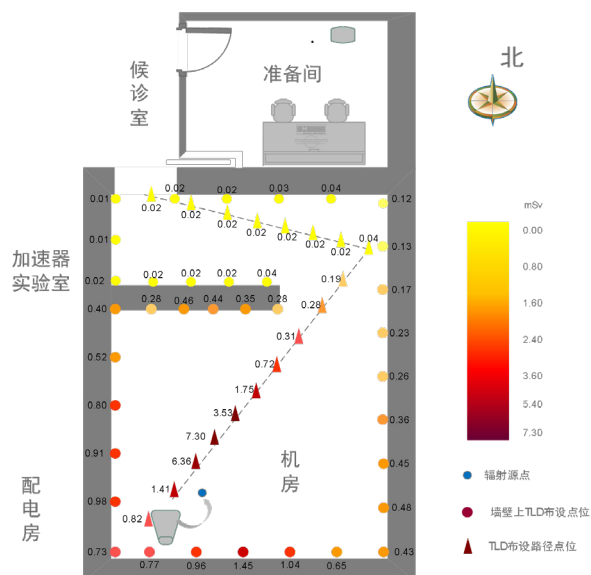


图2 XHDR18 型后装治疗室监测布放图

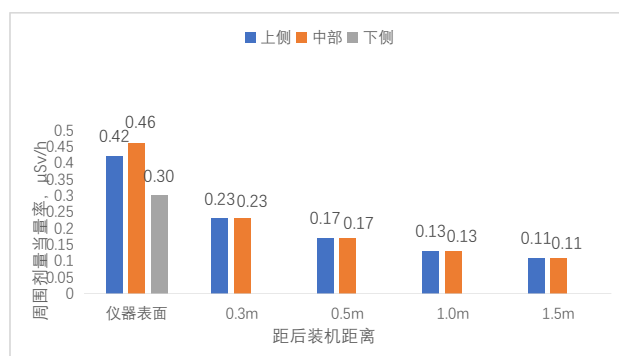


图3 FlexitronHDR 后装机周围剂量当量率变化图