

国际原子能机构技术报告丛书 第178号



食品辐照剂量学手册

SHIPIN FUZHAO
JILIANGXUE SHOUCHE

原子能出版社

国际原子能机构技术报告丛书第178号

食品辐照剂量学手册

胡福敏 译

原子能出版社

内 容 简 介

本手册以各种类型的食品辐照处理为出发点,详细地介绍了各类辐射工艺操作中的剂量学问题。包括基本概念、辐照过程中的剂量监督、各种剂量测量所使用的剂量计及其操作程序。同时对于辐照过程中使用的各种类型辐照器及它们的适用范围均作了较详细的介绍。

本书适合于从事辐照工艺、辐射化学、辐射物理学的科研工作者和高等院校师生阅读。同时,也可供使用辐射技术的农业、食品、医学、生物、制革等其他学科的科技工作者或从事这方面科学研究的人员参考。

Manual of Food Irradiation Dosimetry

IAEA, VIENNA, 1977

STI/DOC/10/178

食品辐照剂量学手册

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

重印

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

开本787×1092 1/32 印张 8.25·字数 124 千字

1988 年12月北京第一版·1988 年12月北京第一次印刷

印数 1—1,400

统一书号: 15175·879 定价: 2.20元

ISBN 7-5022-0024-X/FIL·7

译 者 的 话

为了配合我国辐照食品工业的科学研究和生产的顺利进行，我们翻译了这本书。全书共分五章，分别叙述了剂量学基础知识；辐照器的设计原理和使用方法；辐照厂及辐照产品的剂量分布；另外，还对辐照装置的运行及辐照工艺的控制等问题做了阐述；最后，还向读者详细地介绍了经常使用的若干种剂量计的设计原理、使用范围和操作方法。

该书对于从事辐照工业运行的工作人员是很有裨益的，尤其适合于从事非原子能专业，如食品、化学、医学、生物学、农业等学科转到辐照工艺学方面工作的科研人员阅读。

本书在翻译过程中得到陈鹤鸣同志的热情支持和帮助，译稿完成以后，又请滕征霖同志做了审校，在此一并表示谢意。

译者 1985.2

序 言

自150多年前发明罐头食品以来,已研究出许多种改进保持食品质量的技术,其中电离辐射保藏食品是最有前途的技术之一。采用辐射保藏法可望极大地减少食品因变质而造成的损失,甚至像谷物、马铃薯和大米等散装贮藏的大宗产品也能取得同样的效果。因而,这种技术可能为解决世界性的饥饿问题作出重大贡献。

50多个国家已研究证实食品辐照是可行的,现在有将近20个国家已实际使用。除制定法规和获准卫生许可证以外,对于每一特定的情况,辐照工厂能以商品化的规模成功地运转之前,还有经济、工程和心理学方面的问题等待解决。

应该认识到,食品辐照与冷藏法不同,它有多种辐照目的,这取决于被处理的食物性质以及预计储藏的寿命。典型的食品辐照处理的目的有:抑制发芽、延迟或刺激成熟、谷物和同类产品的杀虫或针对性的辐射灭菌等。除了上述的大宗产品以外,还可以处理新鲜的或烹调过的鱼和肉、新鲜水果、蔬菜、加工过的食品和饮料。

食品辐照处理可能使发展中国家得益最大,因为这些国家食物匮乏问题极其严重,而其他保存方法在这些国家一般也不适用或者费用过于昂贵,例如大规模冷藏就是如此。

近几年来,获准出售的辐照食品的项目有了明显的增加。可以设想,在不久的将来,有更多的国家认识到该技术的经济价值时,将会出现更多的开发计划,而且食品辐照处理终将成为一种普通的大规模工业加工过程。然而,正确、

安全和法律容许的食品辐照工厂运行的先决条件是，首先具有准确而可靠的剂量测定方法。

为了正确地用辐射处理食品，负责辐照设备运转的工作人员必须通晓辐射工程和有关的剂量学问题。本手册阐述并讨论了关于食品辐照剂量学的基本问题，同时从实际和理论上，对剂量测定学进行了充分而详尽的论述，以使读者能进行任何必要的剂量测定。

本手册收集了大量参考文献。在基本术语和概念词汇表中，列出了许多食品辐照术语的解释和定义，同时还列出了不少辅助性术语，以使本手册自成体系。这对于发展中国家或地区，在读者不易查到参考资料时是特别有用的，详细的目录和词汇表可起到简单的主题索引的作用。

致 谢

本手册于1971年由国际原子能机构生命科学分部剂量组主持编写。同年在维也纳的顾问会议上对初步的内容范围取得了一致的意见。以下为出席那次会议的人员名单:

K. H. Chadwick 荷兰 Wageningen 农业原子科学研究所
D. A. E. Ehlermann 德意志联邦共和国, 卡尔斯鲁厄联邦食品研究所

W. L. McLaughlin 美国, 华盛顿, 哥伦比亚特区, 国家标准局

F. X. Rizzo (美国纽约州兼职) 国立布鲁克海文实验室

Y. Takashima 日本, 福岡 九州大学

出席会议的国际原子能机构代表是:

L. Chandler (主席)、H. H. Eisenlohr和B. Gross。
会后, 几位顾问拟订了本手册的初稿。书稿的审校和最后的定稿工作由以下三位作者完成:

K. H. Chadwick、D. A. E. Ehlermann和W. L. McLaughlin

在本工作中, 国际原子能机构的H. H. Eisenlohr, H. C. Yuan、K. Vas和E. R. A. Beck等工作人员给了大量的帮助。并且E. R. A. Beck还参加了编辑工作。

编 者 按 语

在编写本手册时, 考虑了1976年作为国际单位制(SI)的导出单位通过的各种辐射量单位。同时给出了专用的(即传统的)和新的两种单位, 使读者能熟悉新的单位, 并对它们彼此的相对大小有一感性认识。有关单位的详细说明和换算因子, 读者可参阅词汇表。

专用单位的使用在1986年前将逐渐废止, 而在1986年之前, 上述两种单位将并用。

目 录

译者的话	(6)
序 言	(7)
致 谢	(9)
编者按语	(9)
第一章 剂量学基础	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 吸收剂量	(2)
1.3 吸收剂量的测定	(5)
1.3.1 剂量计的响应	(6)
1.3.2 一种介质中的吸收剂量换算为另一种 介质中的吸收剂量	(6)
1.3.2.1 要求	(7)
1.3.2.2 目的	(7)
1.3.2.3 方法	(7)
1.4 积累效应、衰减和电子平衡	(24)
1.4.1 辐射吸收的物理概况	(24)
1.4.2 电子平衡	(30)
1.5 剂量测定系统	(33)
1.5.1 标准剂量计	(33)
1.5.1.1 量热计系统	(34)
1.5.1.2 硫酸亚铁剂量计系统	(35)
1.5.2 常规剂量计	(38)
1.6 剂量测定准则	(39)
1.7 选择剂量计的一般标准	(40)

1.8 剂量计的正确使用	(41)
第二章 辐照器的描述	(43)
2.1 引言	(43)
2.2 辐照器设计的准则	(45)
2.3 辐照源的选择	(47)
2.3.1 单能 γ 射线	(47)
2.3.2 韧致辐射和X射线	(48)
2.3.3 电子	(48)
2.3.4 产品内的剂量分布	(49)
2.4 专用辐照器的设计	(51)
2.4.1 放射性核素源辐照器	(51)
2.4.1.1 静态辐照器	(51)
2.4.1.2 单向多路辐照器	(54)
2.4.1.3 双向多路辐照器	(56)
2.4.1.4 其他辐照器的设计原理	(56)
2.4.2 加速器辐照器	(59)
2.4.2.1 静态加速器辐照器	(60)
2.4.2.2 单向单路辐照器	(60)
2.4.2.3 双向双路辐照器	(60)
2.4.2.4 束流扫描和剂量均匀性	(61)
2.5 实际辐照器设计举例	(64)
2.5.1 篮筐式辐照器	(64)
2.5.2 浅箱辐照器	(67)
2.5.3 谷物辐照器	(69)
2.5.4 其他多路包装辐照器	(73)
第三章 产品内部的剂量分布和处理流程的试运行	(75)

3.1	大型辐照器剂量分布的一般模式	(75)
3.1.1	放射性核素源辐照器	(75)
3.1.2	加速器辐照器	(76)
3.2	剂量分布的测定	(78)
3.2.1	引言	(78)
3.2.2	剂量极值的测定程序	(82)
3.2.2.1	剂量计的刻度	(82)
3.2.2.2	剂量测绘	(82)
3.2.2.3	辐照设备的停顿时间或传送机速度的校正	(83)
3.2.2.4	测定产品堆密度变化的影响	(84)
3.2.2.5	测定辐照设备的参数设定值	(84)
3.2.2.6	剂量均匀性比	(88)
3.2.3	通过剂量和移动剂量的影响	(91)
3.2.4	电子束浅层辐照	(91)
第四章	辐照工厂的运行和工艺控制	(93)
4.1	引言	(93)
4.2	工艺条件的控制	(95)
4.2.1	总的控制要点	(95)
4.2.1.1	γ射线辐照器	(95)
4.2.1.2	电子束辐照器	(96)
4.2.1.3	产品的分类调整	(96)
4.2.2	处理的开始或更换	(97)
4.2.2.1	处理的开始	(97)
4.2.2.2	处理品的更换	(97)
4.3	过程控制用的剂量测定法	(99)
4.4	均匀性比的极限要求	(100)

4.5 库存控制和产品检验	(190)
第五章 各种剂量计系统的详细使用说明	(193)
5.1 引言	(193)
5.1.1 剂量测定系统	(193)
5.2 标准操作程序	(194)
5.2.1 硫酸亚铁(Fricke)剂量计的操作程序	(195)
5.2.1.1 剂量测定液的配制	(197)
5.2.1.2 “标准”铁离子溶液的配制	(197)
5.2.1.3 剂量测定程序	(199)
5.2.1.4 剂量测定液辐照后的稀释	(112)
5.2.1.5 温度校正	(113)
5.2.1.6 精度	(113)
5.2.2 硫酸亚铁/硫酸铜剂量计的操作程序	(114)
5.2.2.1 剂量测定液的配制	(115)
5.2.2.2 剂量测定程序	(116)
5.2.2.3 剂量测定液辐照后的稀释	(117)
5.2.2.4 温度校正	(117)
5.2.2.5 精度	(118)
5.2.3 透明 PMMA 剂量计的操作程序	(118)
5.2.3.1 透明 PMMA 剂量计的使用	(119)
5.2.3.2 剂量测定的操作程序	(120)
5.2.3.3 低剂量测定时的预处理	(122)
5.2.3.4 精度	(122)
5.2.4 红色 Perspex 剂量计的操作程序	(123)
5.2.5 琥珀色 Perspex 剂量计的操作程序	(124)
5.2.6 辐射显色染料系统	(124)
5.2.6.1 液态氰化物染料溶液	(125)

6.2.6.2	含三苯甲烷氰化物染料的尼龙, 其他塑料 薄膜和纸	(127)
6.2.6.3	含甲氧基三苯甲烷染料的聚氯苯乙烯薄 膜	(128)
5.3	其他可能有用的剂量测定系统	(128)
5.3.1	聚氯乙烯剂量计	(129)
5.3.2	其他塑料薄膜剂量计	(130)
5.3.3	热释光剂量计	(131)
5.3.4	乙醇-氯苯剂量计	(132)
5.3.5	玻璃剂量计	(133)
5.3.6	硫酸高铈(Ⅳ)/硫酸铈(Ⅲ)剂量计	(134)
5.3.7	离子选择电极测定硫酸亚铁/氟化钾 酸性水溶液中的剂量	(135)
5.3.8	水合发光剂量计	(135)
5.4	分光光度计的校正	(135)
5.4.1	波长的检验	(136)
5.4.1.1	校准波长调节器的步骤	(136)
5.4.1.2	用玻璃滤光片(例如氧化铁、镨钕混合滤光 片等)检验波长	(137)
5.4.2	吸光度(光密度)刻度的检验	(138)
5.4.2.1	溶液的配制	(138)
5.4.2.2	吸光度的计算	(139)
5.4.2.3	测量	(139)
附录 I	基本术语和概念词汇	(142)
附录 II	换算表: 把单位转换成对应的国际单位 制单位的换算系数	(176)
参考文献		(179)

第一章 剂量学基础

1.1 引言

成功的食品辐照处理，在很大程度上是由处理厂的下述能力决定的：(a) 测量食品受到的吸收剂量；(b) 测定食品包装中的剂量分布图；和(c) 一旦投产就控制辐照过程。负责辐照工厂运行的人员必须熟悉辐射工程及有关辐射剂量学问题^[1,2]。

完成这些任务所需的各种方法和操作程序应是准确、实用、简便易行和廉价的，特别是要得到许多国家有关加工食品卫生管理机构的许可。这些各不相同，有时还相互矛盾的要求，是很难满足的。然而实际上，在食品加工过程中，为达到指定的辐射效应，对辐射的能谱和可能被采用的辐射源一直到产品的各种几何条件都有一定的限制范围。本手册的目的是阐述在食品辐照处理过程中，能够满足设备常规运行的，符合剂量学要求的操作程序。

在食品加工中，使用的总辐射剂量的大致范围基本上是从2krad至6Mrad^[3,4]。

辐射能谱的能量范围约从0.1至10MeV。一般来说，使用的强辐射源可以是电子加速器，X光机，以及常常是装有钴-60、铯-137、或镅-241源的放射性核素强辐照器。

辐射场的几何形状与产生辐射的方法有关，X光机和电子辐照器产生直线的扫描射束；而放射性核素源辐照器则是产生各向同性辐射的矩形平面源或圆柱形源。

辐照产品的几何形状仅限于销售食品的包装中经常采用的几何形状和尺寸（诸如装有食品罐头、散装马铃薯或盒装蔬菜、谷物、及谷物制品的圆柱形、球形或矩形小包装的长方形纸板箱）。

由于吸收剂量是用于描述产品预期的辐射效果（辐射消毒、辐射灭菌、针对性辐射杀菌、抑制发芽等）*与辐照器性能参数（几何位置、源强度、射束功率、处理能力）关系的量；因此适当而准确的剂量测定技术是不容忽视的。使用不适当的测量技术会引起产品吸收剂量的不足或超剂量，使产品得不到有效的处理，这一点已被深刻认识。此时，食品辐照加工厂可能要承担法律和经济上的责任，而消费者则可能因不得不丢弃已变质的食品而遭受经济损失。

本手册着重介绍了食品辐照中最常用的剂量测定技术。这些技术能够适合改进后的食品辐照系统，使之成为有效的并在大规模应用中业已证明是成功的系统。

除了考虑剂量水平和包装尺寸的差异之外，这里叙述的剂量测定和控制方法类似于其他辐射研究和辐射工艺应用中使用的方法^[5-11]，例如：聚合物辐照^[5,10,11]、医用品消毒^[6,10,11]和在农业方面的应用^[7-8]等。

1.2 吸收剂量

在食品辐照处理中，为获取关于整个包装所受辐射效应的准确而有意义的数，据，可信赖的辐射量是吸收剂量。而有些参数，例如源的类型、源的强度、传送机的速度或停顿时

* 在食品辐照和剂量学中出现的一些术语的定义可在词汇表中找到。

间、多路辐照方式、射束的几何形状、以及被辐照物质的堆密度、有效原子量、尺寸大小和成分的复杂性等，均能影响食品辐照的吸收剂量。

食品监督机构或验收食品的其他机关，首先要知道整个包装是否已经在容许剂量限值范围内进行了处理。辐照工厂的最后投产，将取决于它的运行人员能明确证实：它的所有系统和产品确实做到了这一点。

食品辐照的程度，通常是以辐照食品或某种类物质（有些情况下可以是水）的吸收剂量表示。

吸收剂量（有时简称剂量） D ，是在一定范围内的某点处，单位质量被辐照物质所吸收的辐射能的量。国际辐射单位和测量委员会⁽¹²⁾把吸收剂量定义为，电离辐射授予某一体积元物质的平均能量 $d\bar{\epsilon}$ ，除以该体积元物质的质量 dm ：

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1-1)$$

吸收剂量率 $\dot{D}$ 定义为吸收剂量随时间的变化率。

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (1-2)$$

吸收剂量的国际单位制（SI）的导出单位是戈瑞（Gy），在1986年以前，戈瑞将逐步取代现有的吸收剂量专用单位拉德（rad）：

$$\begin{aligned} 1\text{rad} &= 0.01\text{Gy} = 0.01\text{J/kg} & 1\text{Gy} &= 1\text{J/kg} \\ &= 10^{-6}\text{W}\cdot\text{s/g} & &= 1\text{W}\cdot\text{s/kg} \\ &= 100\text{erg/g} & &= 100\text{rad/kg} \\ &= 6.24 \times 10^{13}\text{eV/g} & &= 6.24 \times 10^{13}\text{eV/kg} \end{aligned}$$

在任何既定的辐照条件下，由于不同材料具有不同的辐射吸

收性质，故必须规定被辐照特定物质的吸收剂量。

在实际测量中，由于准确测量很小体积物质（或者物质内某一精确参考点）的吸收剂量和剂量率，经常是不可能的，所以只能在比定义规定的体积大的物质中，测出 D 和 D 的平均值。为了方便起见，在本手册中，将把吸收剂量视为一平均值。如果所用剂量计有一定尺寸，则吸收剂量平均值可在其灵敏体积内测出；或者当空腔理论适用时，如果剂量计很小很薄，也可在紧靠剂量计的周围物质中测得^[13]。测出的这个量可能是周围物质的平均吸收剂量，在这种情况下必须对这两种物质（剂量计及其基质）在辐射相互作用、吸收特性上的差异作出适当的校正（对这种转换的讨论见 1.3）。

这里还要介绍食品辐照剂量学中用得很少且最终将变为多余的另一个辐射量。这就是照射量（仅用于能量高达数百万电子伏的致电离光子辐射）它是单位质量 (dm) 空气中，由 γ 或 X 射线作用所产生的各种符号离子总电荷的绝对值 (dQ)。ICRU^[12,14]（国际辐射单位和测量委员会）明确规定，此量限于光子与空气相互作用产生的全部次级电子在空气中完全被阻止时，即存在次级电子平衡时才适用。因而把照射量 X 定义为：

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1-3)$$

相应地照射量率的定义为：

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (1-4)$$

照射量的专用单位为伦琴（缩写 R），其定义为能使每立方厘米空气中产生一个静电单位电荷的辐射量。即

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} C / \text{kg 空气}$$

在空气中，照射量和吸收剂量之间的数字关系为：

$$1R \approx 0.87 \text{ rad}$$

完全可能用照射量来度量某些物质中的吸收剂量，即采用经适当校正的电离室作为标准吸收剂量计 (ICRU⁽¹⁴⁾)。然而，由于电离室在高剂量率的扫描射束或脉冲射束的作用下会发生饱和效应，故这种方法在食品辐照处理中一般是很不实用的。因此，本手册对电离室将不予以考虑。对电离室感兴趣的读者，在许多辐射剂量学的教科书中均可找到有关使用这类仪器的大量资料。

1.3 吸收剂量的测定

量热计是能直接读出吸收剂量的仪器。它根据吸收体的热性能，测量物质中射线消散的总能量或能量消散速率。所以，这种仪器可以认为是一种绝对标准剂量计，可用于刻度

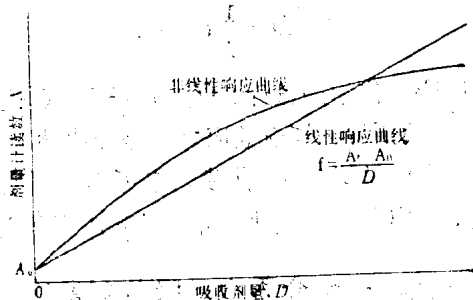


图1.1 典型的线性和非线性剂量计响应曲线
线性曲线：响应 f 是常数并等于该曲线的斜率，即代表辐射效应的剂量计读数差（已辐照的减未辐照的）除以吸收剂量值。
非线性曲线： f 是随剂量而变化的，因而对任何给定的吸收剂量值均需进行测定。