

γ 射线吸收浓度计研究*

Study on Density Gauge of γ - Ray Absorption

罗里熊 吴伟明 许少杰 韩 君 阮向东 罗远军
Luo Lixiong Wu Weiming Xu Shaojie Han Jun Ruan Xiangdong Luo Yuangjun

(广西大学物理系 南宁市西乡塘路 530004)

(Department of Physics, Guangxi University, Xixiangtang Road, Nanning, Guangxi, 530004)

黄玉龙

Huang Yulong

(广西区防疫站 南宁市桃源路 530021)

(Guangxi Sanitary Epidemic Prevention Station, Taoyuan Road, Nanning, Guangxi, 530021)

摘要 介绍 γ 射线吸收浓度计的工作原理, 设计思想与技术要求, 并给出了部分实测结果。

关键词 放射性同位素 γ 射线吸收 浓度计

Abstract The mechanism, the design idea, and the technical specifications of density gauge of γ-ray absorption was introduced. Some practical-measured results were also shown.

Key words radiation isotope, γ-ray absorption, density gauge

用 γ 射线吸收原理测量厚度或密度(浓度)已经在工业上得到越来越广泛的应用, 并显示出方便简捷、性能稳定、精密准确、易于实现自动控制等优点。但由于某些特殊原因, 如对放射性规律了解不够, 对放射性存在害怕心理等, 至今我国在食品生产中很少应用同位素仪表。这与我们的食品生产, 特别是糖业生产的发展不相适应。外国经验, 尤其是德国、丹麦等国的经验证明, 在糖业生产中应用 γ 射线吸收浓度计不但是安全的, 而且可以大大提高自动化程度, 大幅度提高成品糖的质量和出糖率, 还可以大量节约燃料和水, 减少环境污染。因此, 同位素仪表值得在我国食品生产中推广应用。

1 原理

某些放射性同位素(如⁶⁰Co、¹³⁷Cs)在衰变过程中会放出 γ 射线。γ 射线在运动径迹上会与物质发生相互作用而被吸收。吸收方式通常包括光电效应、康普顿效应和电子偶效应。三种效应的吸收截面分别用 σ_{ph} , σ_c 和 σ_p 表示, 它们是入射 γ 射线的能量 E 和吸收物质的原子序数 Z 的函数。

单能窄束 γ 射线在物质中的吸收规律为^[1]:

$$I = I_0 e^{-\sigma_r N x} \quad (1)$$

式中 I_0 、 I 分别为 γ 射线穿过物质前、后的强度, σ_r 是总吸收截面, 即 $\sigma_r = \sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_p$, N 为吸收物质单位体积中的原子数, x 为吸收物质的厚度。

令 $\mu = \sigma_r N$, μ 称为物质的线性吸收系数, 则(1)式写成:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

γ 射线的强度用闪烁计数器探测。计数器的计数率 n 正比于 γ 射线的强度 I 。这样就可以把(2)式写成

$$n = n_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

(3)式表明, 若 μ 为常数, 计数率 n 与吸收厚度 x 成负指数关系。反之, 若 x 固定, 计数率 n 将与线性吸收系数 μ 成负指数关系。

为讨论 μ 与密度 ρ 的关系, 可将 μ 改写成^[2]

$$\mu = \mu_m \rho \quad (4)$$

式中 μ_m 为物质对 γ 射线的质量吸收系数。显然

$$\mu_m = \frac{N}{\rho} \sigma_r = \frac{N_A}{A} (\sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_p) \quad (5)$$

式中 N_A 为阿伏伽德罗数, A 为吸收物质原子的质量数。

对于糖汁(或糖膏), 其基本组成为碳、氢、氧三元素。在煮炼过程中可认为其平均原子序数和平均质量数为某一定值, 即糖汁(膏)的质量吸收系数 μ_m

Guangxi Sciences, Vol. 2 No. 1, February 1995

1995-01-13 收稿。

* 广西区科委攻关项目。

为常数。由 (3) 式得

$$n = n_0 e^{-\mu_m x \rho} \quad (6)$$

可见, 只要把吸收厚度 x 也固定为常数, 则计数率 n 与糖汁 (膏) 的密度 (浓度) 成负指数关系。或者

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{\mu_m x} \ln \frac{n_0}{n} = \frac{1}{\mu_m x} (\ln n_0 - \ln n) \\ &= \rho_0 - k \lg n \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\rho_0 = \frac{1}{\mu_m x} \ln n_0$, $k = \frac{\ln 10}{\mu_m x}$ 均为常数。可见, 密度 ρ (或浓度) 与 $\lg n$ 成线性关系。

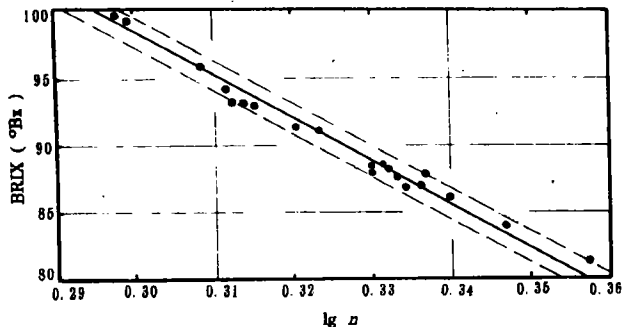


图1 糖膏锤度与计数率对数 $\lg n$ 的关系

Fig. 1 Brix of Syrup vs $\lg n$

图1为1994年3月我们在明阳糖厂煮炼车间7号煮糖罐实测的结果(糖膏锤度用化学分析法测定, 由王宗珍、黄桂华、周日研三同志完成)。纵坐标为锤度, 横坐标为计数率的对数 $\lg n$ 。实线为所有20组数据按最小二乘法拟合成的直线, 虚线给出了 $\pm 1^\circ\text{Bx}$ 的公差带。由图可见, 20个点有19个落在公差带内, 只有1个点稍有超差。理论分析和实验结果相当吻合。从图上还可看到, 直线两端的实测数据均偏向分布于直线的上方, 中部的数据则分布在直线的下方。这是因为糖和水的平均原子序数和平均质量数毕竟不同, 因此严格说起来, 不同浓度下糖膏的 μ_m 并非常数。在实际应用上, 为提高测量的准确度, 可引入校正曲线。

2 γ 源的选择

2.1 γ 射线能量方面的考虑

假设 n_0 和 μ 一定, 由 (6) 式得

$$\frac{dn}{d\rho} = -\mu_m x n_0 e^{-\mu_m x \rho} \quad (8)$$

$dn/d\rho$ 是反映仪器灵敏度的因子。 $dn/d\rho$ 大, 在浓度发生单位变化时, 计数率的变化就大, 即仪器灵敏度高。容易求出, 当

$$x = 1/\mu \quad (9)$$

时, $dn/d\rho$ 达到极大。

吸收系数 μ 是射线能量的函数。在射线能量不

太高的情况下, μ 随射线能量的增加而减少。如果选用的射线能量太低, 势必要求 x 很短, 不能充分反映整罐糖汁 (膏) 的浓度; 射线能量太高, x 太长则不必要且不利于防护。 ^{137}Cs 放出的 γ 射线的能量为 0.662 MeV, 相应于取 $x=15$ cm 左右, 是比较适宜的。

2.2 半衰期方面的考虑

随着衰变不断发生, 放射源的活度随时间按指数规律衰减。如果要求 n_0 的稳定度达到 1%, 以每个榨季 $t=0.5$ 年计, 由半衰期公式

$$T_{1/2} = \frac{t \ln 2}{\ln (n_0/n)} \quad (10)$$

可推出 $T_{1/2} \geq 34.5$ 年。

^{137}Cs 半衰期 $T_{1/2}=30.2$ 年, 基本可满足上述要求。如果对测量的准确度要求较高, 还可以在使用过程中定期修正 n_0 (亦即 (7) 式之 ρ_0) 之值。

2.3 源活度方面的考虑

源活度的选择应能满足测量误差和测量时间的要求。在这样的前提下, 源活度越小越好。现在用于糖汁 (膏) 煮炼的计量单位是锤度。在煮炼过程的自动控制中, 锤度测量的误差应小于 1°Bx 。对于甲膏或乙膏, 可取相对误差小于 0.5%。而测量时间则可定为 30 s。由 (8) 式容易求出浓度的相对误差 $d\rho/\rho$ 和计数率的相对误差 dn/n 的关系。当满足 $x=1/\mu$ 时,

$$d\rho/\rho = dn/n \quad (11)$$

dn 的来源主要是放射性测量的统计分布。取 $dn=3\sqrt{n}/t$, \sqrt{n}/t 为计数率测量的统计分布的标准差, 于是

$$dn/n = \frac{3}{\sqrt{nt}} \quad (12)$$

代入 $dn/n < 0.5\%$, $t=30$ s, 得 $n > 3.6 \times 10^5 / 30 = 1.2 \times 10^4/\text{s}$ 。

考虑到源与探测器的距离 R , 吸收体的厚度 x , 探测器的面积 S , 探测器的效率 η 以及准直和密封材料对射线的吸收等各种因素, 取源活度 $A \approx 10$ mCi 可满足计数率 $n > 1.2 \times 10^4/\text{s}$ 的要求。

综上, 选择 10 mCi 左右的 ^{137}Cs 作为放射源。该源的 γ 射线能量为 0.662 MeV, 因此不发生电子偶效应, 与物质的作用主要是光电效应和康普顿效应。

3 安全和防护

3.1 对糖产品的影响

γ 射线吸收浓度计属非接触测量。放射源经双重密封, 完全不与糖汁接触, 因此, 只要密封是可靠的, 就完全不必担心放射源会不会残留在糖产品中。我们

曾对明阳糖厂7号罐在使用该浓度计前后产出的成品糖中 ^{137}Cs 的含量作过检测。检测仪器是广西大学物理系的HpGe多道分析系统。这套系统已经过计量比对,对 ^{137}Cs 活度的探测下限为0.2 Bq(1992年7月4日通过广西区教委的技术鉴定)。对200 g样品检测的结果均在探测限以下,折合成比度为不大于1 Bq/kg,大大低于GBn 54-81规定的限制浓度(148 Bq/kg),说明放射源确实没有泄漏。

另一种担心是产品经 γ 射线照射后会不会产生毒性。早在1980年10月世界卫生组织(WHO)、国际原子能机构(IAEA)和联合国粮农组织(UNFAO)在日内瓦召开的辐照食品卫生安全专家会议已指出^[3]：“任何食品经辐照保存,其平均剂量在 10^6 rad(相当于 10^4 Gy)时,不会有毒害产生,用此剂量处理的食品可不再作毒理学试验”。国家科委也肯定了上述说法。相比之下,浓度计使用的放射源的活度很低。即使考虑到最不利的情况,产品受照射的剂量都是微不足道的,完全可以认为绝对安全。

3.2 对操作人员的防护问题

根据GB 4792-84的规定,放射工作人员的剂量当量限制为 $H_E=50$ mSv/y,即每年不超过50 mSv。如果源活度为 A ,当没有任何屏蔽时,与源距为 R 的人受到外照射的剂量当量率可用下式计算^[4]:

$$H_{E0}=\bar{Q}\frac{\Gamma A}{R^2} \quad (13)$$

式中, Γ 为辐照率常数,

对 ^{137}Cs , $\Gamma=0.33 R\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Ci}^{-1}$, \bar{Q} 为品质因数,对 γ 射线, $\bar{Q}=1$ 。

按每周工作48小时,一年工作50周计算,一个距活度 $A=10$ mCi的 ^{137}Cs 源0.5 m的人,将受到 $H_{E0}=317$ mSv剂量当量的照射,为国家规定的6倍多。尽管操作人员在源边工作(0.5 m内)的机会极少,为了绝对安全,仍需采取屏蔽防护措施。

为了把 γ 射线减弱 $k=H_{E0}/H_E$ 倍,所需的屏蔽厚度 d 可由下式计算:

$$k=e^{\mu d}/B \quad (14)$$

式中 μ 为屏蔽材料的线性吸收系数, B 为积累因子。此外,如果知道源的活度,也可以从某些手册直接查出把 γ 射线减弱到容许水平所需的屏蔽厚度^[5]。计算或查表的结果为,只要 $d=6$ cm的铁作屏蔽即可满足要求。如果用铅屏蔽, d 还可以更小一些。

我们用 $A=16$ mCi的 ^{137}Cs 源做过试验。当用 $d=5.5$ cm的铁屏蔽时,在 $R=0.5$ m处连续24小时测得0.7 mSv的剂量当量(相当于70 mSv/y)与计算结果基本相符。

应当指出,按 $R=0.5$ m考虑是一种最保守的方法。在正常生产条件下,操作人员与浓度计的距离比0.5 m大得多。我们在明阳糖厂7号罐工人的实际操作位置上实测的结果,安装了浓度计后,辐射的剂量当量的增加量不超过1.5 mSv/y。这个数值与本底相当,低于GB 4792-84规定的公众个人的年剂量限值。

4 电子线路方面的考虑

电子线路设计的好坏对浓度计的性能至关重要。为了适应微机煮糖的需要,我们使用了一台PC机。闪烁探测器接收到 γ 光子的脉冲信号经放大整形后,由PC机上一块专门设计的计数卡计数,PC机通过总线获得的数据可以处理、显示、保存,并可根据需要输出相应的控制信号。整套电子线路的设计要保证仪器工作的可靠、稳定。

关于电子线路的问题,我们将专题讨论。

5 应用前景

本项目在自治区科委立项以来,已有多个单位尤其是一些已投资搞过微机控制煮炼的糖厂要求使用该仪表。微机控制煮糖无疑能带来很好的经济效益和社会效益,但从前曾经搞过的微机煮糖最后归于失败的根本原因在于一次仪表的失灵。 γ 射线吸收浓度计由于本身固有的许多优点,例如非接触连续测量,不受产品颜色、温度、压力、粘度和酸碱度影响,长期稳定性好等,给糖厂解决锤度的自动测量带来希望。并且完全能推广到许多需要测量密度、浓度、质量流量等的工业部门应用。

致谢

本项目在立项和进行中得到区科委工业处蒋国治、彭枝、韦如花,南宁糖业公司叶邕波,明阳糖厂李培春、玉大幸、陆世清、伍肇武等同志大力支持,深表谢忱。

参考文献

- 1 复旦大学,清华大学,北京大学合编.原子核物理实验方法(上).北京:原子能出版社,1984,32~34.
- 2 Glenn F Knoll. Radiation Detection and Measurement. New York: John Wiley & Sons Inc, 1979, 68~71.
- 3 国家科委新技术局.新技术预测与规划,1983,(10):4.
- 4 刘学成,韩开春.放射性物质的卫生防护与运输安全.北京:中国铁道出版社,1990,22~34.
- 5 中国科学院工程力学研究所. γ 射线屏蔽参数手册.北京:原子能出版社,1977,120~121,161.

(责任编辑:莫鼎新、唐铃弟、何启彬)

Guangxi Sciences, Vol. 2 No. 1, February 1995