

γ 射线散射法检测输油管油垢厚度的初步实验研究

艾尔肯·阿不列木¹, 买买提热夏提·买买提¹, 丁 杰², 王世亨¹, 刘圣康²

(1. 新疆大学物理系, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 南京大学物理系, 江苏 南京 210093)

摘要:本文用石蜡模拟油垢, 用 γ 射线垂直入射, 以一定的散射角接收散射 γ 光子数, 发现散射 γ 计数与被测石蜡厚度之间存在很好的线性关系。为散射法检测油垢厚度的实验研究奠定了基础。

关键词: γ 光子数; 散射法; 石蜡; 微分界面

中图分类号: O571.323 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2007)06-1256-03

用 γ 射线透射法测定架空输油管道油垢厚度不管在理论还是在实验上有了较好的研究工作^[1-4]。 γ 射线散射法是利用 γ 光子在物质上的反散射强度与被测物质的密度、厚度、元素组成等因素相关的原理, 通过检测反散射 γ 光子计数可以确定被测物质的某些特征^[5]。为此对于埋在地下的输油管道, 利用 γ 射线反散射法检测油垢厚度, 比透射法将更为方便、可行。本文以康普顿散射理论为基础, 讨论了 γ 射线散射法的基本原理。并用不同厚度的石蜡模拟油垢厚度, 在 γ 光子垂直入射条件下, 对一定的散射角测量了散射光子数与石蜡厚度之间的关系。

1 原理

当一束准直后的 γ 射线垂直射入靶核上时, 会与靶核介质产生三种效应, 即光电效应、康普顿效应和电子对效应。对于 ^{137}Cs 放射源发射的 0.662 MeV 的 γ 射线入射到石蜡样品时主要发生康普顿散射。康普顿散射可认为是

γ 光子与静止状态的自由电子之间的弹性碰撞。入射 γ 光子能量和动量就由反冲电子和散射光子两者之间进行分配。(如图 1 所示)

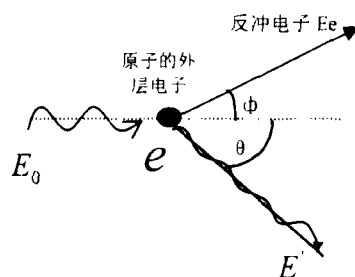


图 1 康普顿散射示意图

用相对论的能量和动量守恒定律, 可推导出散射光子能量 E' 和入射光子能量 E_0 与散射角 θ 之间的关系为^[6]:

$$E_0 E' (1 - \cos\theta) = (E_0 - E') m_0 c^2 \quad (1)$$

或

$$E' = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (2)$$

其中: $\alpha = E_0 / m_0 c^2$ 即为入射 γ 射线能量与电子静止质量所对应的能量之比。可以看出: 当光子的散射角 $\theta = 0^\circ$ 时, 散射后光子的能量 $E' = E_0$, 达到最大值。当光子的散射角 $\theta = 180^\circ$ 时, 散射后光子的能量最小, 即为反散射光子。当入射能量 E_0 一定时, 不同散射角的散射光子

收稿日期: 2007-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10565003)

作者简介: 艾尔肯·阿不列木 (1956—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 副教授, 物理专业

能量是不同的。

对于散射光子强度而言,在 $\theta \rightarrow (\theta + d\theta)$ 之间的立体角 $d\Omega$ 内康普顿散射光子强度 $dI(\theta)$ 为:

$$dI(\theta) = I_0 N D \sigma_c(\theta) d\Omega \quad (3)$$

其中: I_0 为入射光子强度(s^{-1}), N 为单位体积内靶核数(cm^{-3})即电子密度, D 为靶厚(cm),

$\sigma_c(\theta) = \frac{d\sigma}{d\Omega}$ 为康普顿散射微分截面。当靶材料选定后, N 为常数。对于 ^{137}Cs 放射源的 0.662MeV 能量, 根据 Klein-Nishina 公式^[7], 散射角 θ 在 $100^\circ - 180^\circ$ 之间, 康普顿散射微分截面 $\sigma_c(\theta) = \frac{d\sigma}{d\Omega}$ 变化不大, 基本为常数。(见图 2)

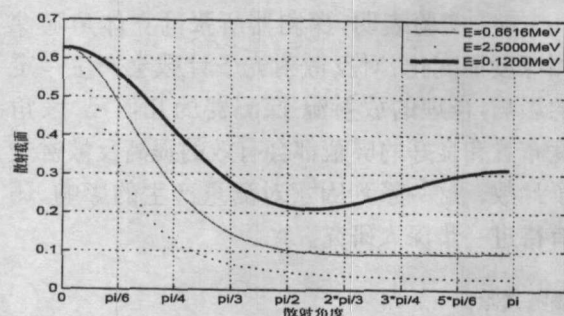


图 2 康普顿散射微分截面与散射角度以及入射光子能量关系曲线

所以,

$$\frac{dI(\theta)}{I_0} = N\sigma(\theta) D d\Omega = k D d\Omega \quad (4)$$

对于一定厚度的样品, θ 变化范围为 $\theta_1 - \theta_2$, 则散射光子与入射光子强度比之为:

$$\begin{aligned} \frac{I(\theta)}{I_0} &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{dI(\theta)}{I_0} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} N\sigma(\theta) D d\Omega \\ &= k D \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\Omega = k' D \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $k = N\sigma(\theta)$, $k' = k \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\Omega$ 是比例常数。用多道谱仪测量 θ 方向散射光子数, 以获得 $I(\theta)$ 对于 D 的依赖关系。通过初步实验研究, 对不同 θ , 比例常数 k' 有差异, 但实验结果显示该差异不大。所以在不考虑样品自吸收条件下, $\frac{I(\theta)}{I_0} \sim D$ 之间基本上为线性关系。

2 实验装置

γ 射线散射法实验装置由准直 γ 射线束发射器、康普顿散射射线接收器、模拟油垢样品和数据分析处理系统等 4 部分组成(见图 3)。

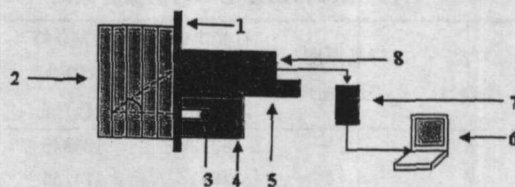


图 3 实验模拟装置图

- 1—铁板; 2—石蜡样品; 3— γ 源(^{137}Cs);
4—铅室; 5—铅屏蔽体; 6—S-35+多道谱仪;
7—高压和放大器; 8—NaI(Tl)闪烁体探测器

2.1 准直 γ 射线束发射器

活度为 148MBq(4mci) 的 ^{137}Cs γ 放射源, 放在一个直径为 15cm, 厚度为 7cm 的圆柱体状的铅屏蔽体内, 其准直孔直径为 $\phi 10mm$ 。

2.2 康普顿散射射线接收器

主要由 BH060 型 NaI(Tl) 闪烁探测器和直径为 10cm, 厚度为 2cm 的铅屏蔽体组成。

2.3 数据分析处理系统

本系统采用了美国 CANBERRA 公司的 series 35 plus 型多道能谱仪和北京核仪器厂生产的 BH1218 型线性放大器组成能谱和数据采集系统。

3 实验方法

本实验为模拟输油管道, 将一块厚度为 2mm 的铁板模拟为管壁, 再将石蜡加工成约 $200mm \times 100mm \times 10mm$ 的长方体, 紧靠铁板逐个摆放石蜡样品。根据叠加石蜡块数来模拟油垢的厚度 $D(mm)$ 。制作的 8 块石蜡样品厚度分别为 8.2mm、8.15mm、9.45mm、9.25mm、9.3mm、9.1mm、8.35mm 和 9.5mm。总厚度为 71.3mm。为了达到将 0.662MeV 的光电峰全屏蔽掉, 只探测康普顿散射 γ 光子。 γ 放射源与 NaI(Tl) 闪烁探测器之间还放置了一块 $280mm \times 200mm \times 35mm$ 的铅屏, 这样 γ 源与接受器之间的距离为 155mm。(参见图 3)

4 实验结果

我们用两种方法记录了康普顿散射光子数。(1) 有光电峰的全谱面积下的总计数(2-480 道内); (2) 无光电峰的全谱面积下的总计数(2-380 道内)。具体测量结果列于表 1 和图 4、图 5。

表1 有光电峰和无光电峰时的实验数据

样品 序号	样品厚度 (d/mm)	有光电峰 (AREA) 计数/min	无光电峰 (AREA) 计数/min
8	71.3	382929	120845
7	61.8	379617	114155
6	53.45	373323	107064
5	44.35	367358	98460
4	35.05	359521	88003
3	25.8	349686	76357
2	16.35	336762	64126
1	8.2	322515	54025
0	0	305743	45836

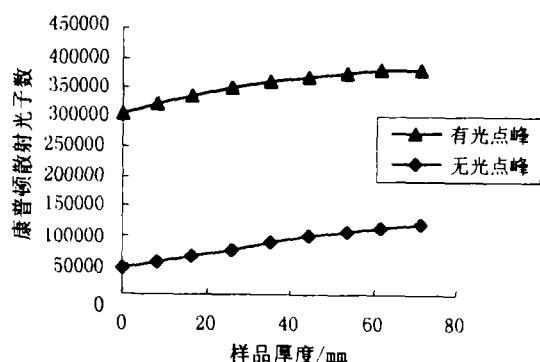


图4 康普顿计数与样品厚度实验关系

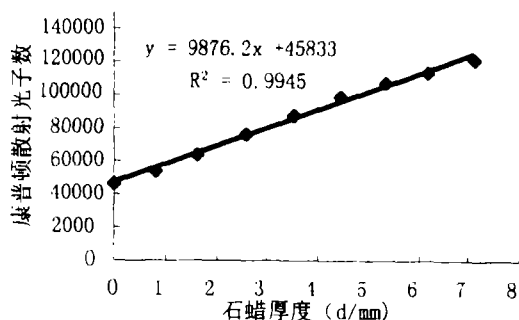


图5 散射光子数与石蜡之间的线性关系

由图4康普顿散射光子数与样品厚度之间的关系曲线可看出,有光电峰的曲线是在放射源与探测器之间屏蔽不足的情况下获取得,能谱图中出现了0.662MeV的光点峰,所以,线性度较差。当用35mm的铅块对探测器加以屏蔽后,得到了图4中的无光电峰曲线,可看出此条曲线线性度较好,图5中的实验点是加以屏蔽后测量数据的平均值,直线是采用最小二

乘法得到的线性拟合结果。

5 结论

(1) 由图4可看出,随着石蜡厚度的增加康普顿散射 γ 计数的变化是灵敏的。用石蜡模拟油垢,进行 γ 射线散射法检测油垢厚度的方法研究是可行的。

(2) 由图5得到的平均相关系数为0.9945可知,放射源与探测器之间屏蔽的好坏,对提高线性度有很大关系。

(3) 实验装置较简单,实验结果是初步的,只能做固定散射角测量。该装置只能作为实验方法的初步研究。

(4) 实验表明,探测器所张的立体角随探测深度而变化,对反散射光子计数会产生一定的影响,合理的放射源-探测器的几何尺寸、角度布置和良好的屏蔽都会有效的提高反散射光子计数。这一系列因素对测量产生的影响,还有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 王世亨,等. γ 射线透射法检测管道油垢方法的理论探讨[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2000, 17(4): 22.
- [2] 刘圣康,张治平,王世亨. 用 γ 射线透射法检测量输油管道油垢的厚度响应[J]. 核电子学与探测技术, 2002, 6: 489-491.
- [3] 王世亨,刘圣康. γ 射线透射法检测输油管道油垢的标定实验研究[J]. 核技术, 2003, 26(12): 926.
- [4] 王世亨,刘圣康. ^{137}Cs 射线透射法检测输油管道油垢的初步定实验研究[J]. 原子能科学技术, 2002, 36(6): 537.
- [5] 郑欣,郑健,向新程. 影响 γ 反散射光子计数因素的分析[J]. 核电子学与探测技术 2004, 24(2): 215~217.
- [6] 丁富荣,班勇,夏宗璜编著. 辐射物理[M]. 北京:北京大学出版社, 2004.
- [7] W. Heitler. The quantum theory of radiation [M]. Great Britain: Oxford university, 3rd ed., 1954: 219.

(下转第1209页, Continued on page 1209)

7 结论

通过对棒控棒位系统样机的功能试验,试验表明系统配置合理、软件可靠、系统功能均得到实验论证,符合设计要求。

8 结束语

本设计改进了秦山一期多年来运行、调试中存在的一些问题,在方案选择以及软件设计上,借鉴了恰希玛二期宝贵经验,大大提高了系统的可用性和可靠性。本系统设计的成功为核电整个系统全数字化做出了有益的尝试。在此,非常感谢北京核仪器厂、秦山一期以及 728 设计院各位领导专家指导性意见和同事所付出

的辛勤劳动。

参考文献:

- [1] 张法邦,吴清泉. 核反应堆运行物理[M]. 原子能出版社,2000:170-173.
- [2] 秦山一期棒控棒位系统改造设备柜技术规范书.
- [3] 汪兆强. 棒控棒位操作员培训讲义.
- [4] 史凯,马云青. 核电站仪表与控制系统数字化开发现状[J]. 世界仪表与自动化,2003. 6:40-43.
- [5] Rockwellautomation. ControlLogix Redundancy System User Manual, 2006. 9.
- [6] Rockwellautomation. ControlLogix System User Manual, 2006. 6.

Digital Rod Control and Rod Indicator System based on PLC of QNPC

TAN Ping¹, ZHOU Jian-liang¹, YAO Qiu-guo²,
LIU Chong¹, ZHAO Da-wei², WANG Zhao-qiang³

- (1. Nuclear Science and Technology Department of Nan Hua University, Hengyang of Hunan prov. , 421001, China; 2. Beijing Nuclear Instrument factory, Beijing 100176, China;
3. Qinshan Nuclear Power Company, Haiyan of Zhejiang prov. , 314300, China)

Abstract: This article has described Digital Rod Control and Rod Indicator System of QNPC , include main system function, system configuration, software flow chart and touch panel interface design etc. and has also discussed and solved some questions in the process of the software design.

Key words: Digital Rod Control and Rod Indicator System , ControlLogix

(上接第 1258 页, Continued from page 1258)

Preliminary experimental study of γ ray measurement of oil crust thickness in oil tube

Aierken. Abuliemu¹, Mamatrishat. Mamat¹, Dingjie², Wang Shiheng¹, Liu Shengkang²

- (1. Physics department of Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 830046;
2. Physics department of Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093)

Abstract: By wax presenting oil crust, and using γ ray rectilinear irradiating, we have accepting γ ray photon numbers of scattering γ ray. It was found that there is existing very good linear relation between counting numbers of scattering γ ray and thickness of wax. The result can become a fundamental base for experimental study of oil crust measurement by scattering approach.

Key words: γ ray photon number, scattering approach, differential cross section