

# 土层对 $\gamma$ 散射法测量油垢厚度影响的初步研究

杨坤杰<sup>1</sup>, 艾尔肯·阿不列木<sup>1</sup>, 周 满<sup>1</sup>, 赵经武<sup>2</sup>, 时飞跃<sup>2</sup>, 阿布都莫明<sup>1</sup>, 赵农校<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 南京大学 物理系, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 利用由<sup>60</sup>Co源、NaI(Tl)探测器和微机多道谱仪等组成的实验装置, 测量了油垢厚度的散射光子计数。同时应用蒙特卡罗模拟针对不同的土层厚度及土层中含水量检测油垢厚度的散射光子数。结果显示, 随着土层厚度的增加, 油垢厚度的探测灵敏度呈减小趋势, 通过初步模拟发现, 土层中含水量对检测油垢厚度的影响有一定的规律。

**关键词:** 散射光子; 油垢厚度; 蒙特卡罗方法

**中图分类号:** TL816; O571.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2009)03-0172-05

## Preliminary Studies on the Effect of Soil Layer on Measuring Grease Stain Thickness in Pipeline by $\gamma$ Ray Scattering Method

YANG Kun-jie<sup>1</sup>, AIERKEN · Abuliemu<sup>1</sup>, ZHOU Man<sup>1</sup>,  
ZHAO Jing-wu<sup>2</sup>, SHI Fei-yue<sup>2</sup>, Abudoumoming<sup>1</sup>, ZHAO Nong-xiao<sup>1</sup>

(1. School of Physics Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Physics Department Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** A set of scattering  $\gamma$  ray photon counts corresponding to different grease stain thicknesses was obtained by using an experiment setup, which consists of a <sup>60</sup>Co  $\gamma$  radioactive source, a NaI(Tl) scintillation detector and a micro-computerized multi-channel spectrometer, etc. In addition, by using Monte-Carlo program with the similar geometry, scattering  $\gamma$  ray photon for different grease stain thicknesses were obtained for different thickness of soil layer and different water content in the soil layer. The results showed that the sensitivity of measurement was decreased when the thickness of soil layer was increased, and moreover, the effect of water content in soil layer on measuring grease stain thickness was regular from the simulation results.

**Key words:**  $\gamma$  ray scattering; grease stain thickness; Monte-Carlo method

油田输送原油的管道内壁容易结垢从而影响输油能力,严重时甚至会阻塞管道,为了及时清除油垢,对管道内油垢厚度的监控十分必要。常见的物理手段有超声、微波、射线等,这几种方法各有利弊<sup>[1-3]</sup>。由于管道多埋在地下,管道上方有土层覆盖,所以用  $\gamma$  散射法测量更有优势。为了减轻挖掘土方的繁重劳动和便于实际操作,本研究拟采用在土层中打竖直孔道的方法,把源和探测器放入孔道后进行测量。鉴于实验室条件限制,本工作拟通过蒙特卡罗模拟计算程序(MCNP-4C)模拟这一实验过程,实验结果进行对比分析,并初步模拟研究土层中含水量对检测油垢厚度的影响。

## 1 模拟条件

实验中自制矩形油垢样品并应用平行铁板模拟管道,在模拟计算中模拟管型管道并考虑保温层及管内原油的影响。

通过蒙特卡罗模拟计算程序研究土层对  $\gamma$  散射法测量油垢的影响,并进一步探讨土层中含水量对检测油垢厚度的影响,模拟中采用半油测量的方式<sup>[4]</sup>,即在测量时关小输油管道的阀门以减小原油流量,使管内原油与上层油垢间有一定的空隙,这样既可以减小原油对油垢厚度( $D$ )测量的影响,又可以保持原油输送的正常进行。

实际中原油是在很长的一根输油管道内运输,输油管道外面包裹着保温层,在研究时一并考虑在内,实验几何设计图示于图 1。模拟计算中使用的参数列于表 1,准直器出口到保温层的

距离从 0 增加到 10 cm。

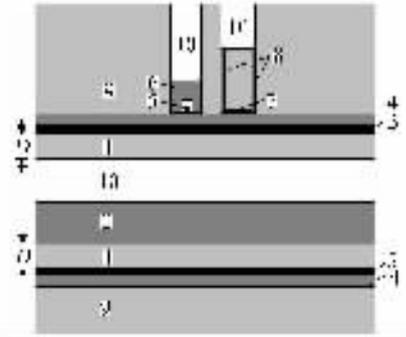


图 1 模拟几何设计图

- 1——油垢;2——石油;3——输油圆管道;  
4——保温层;5——放射源;6——准直器;  
7——探测面;8——铅屏蔽罩;9——土层;  
10——空气; $D$ ——油垢厚度

另外土层中的水分对  $\gamma$  射线造成吸收和散射,这会减少  $\gamma$  射线的探测效率。本工作从干燥的土壤样品(即从零含水量的样品)开始,依次增加 5% 的含水量,计算不同含水量对  $\gamma$  射线检测油垢厚度的影响。取最大含水量为 30%,这是考虑到土壤的饱和含水量通常小于 30%。

在 MCNP 输入程序中,需要用材料卡对其物质的成分和各成分的相对含量进行描述。相对含量是各元素质量与样品总质量(或原子数)之比。当土层中的含水量改变时,样品中除 H、O 元素外;其余各元素的相对含量赋值不变因此只改变 H、O 元素的相对含量赋值<sup>[7]</sup>。

表 1 模拟参数

参数	量值	参数	量值
管道外径	11.0 cm	管壁厚度	0.5 cm(铁质)
管道长度	40.0 cm(源在中点处)	保温层厚度	1.0 cm
源距	12 cm	油垢厚度	0~15 mm
原油成分 <sup>[5]</sup>	C:H:S:N:O=85:12:0.5:1:1.5(质量比)	原油密度	0.85 g/cm <sup>3</sup>
油垢成分 <sup>[5]</sup>	C:H=25:52(原子数比)	油垢密度	0.91 g/cm <sup>3</sup>
保温层成分 <sup>[5]</sup>	C:H=1:2(原子数比)	保温层密度	0.92 g/cm <sup>3</sup>
模拟土层成分 <sup>[6]</sup>	Si:Al:Fe:O=33:10:7:50(质量比)	土层密度	1.20 g/cm <sup>3</sup>

## 2 模拟计算结果与分析

模拟计算得到的典型散射能谱图示于图 2(探测面至保温层距离为 7.5 cm,油垢厚度

6.0 mm,相对含水 15%)。模拟时探测器接收到的散射计数是近 180° 散射,而且通过验证得知每组模拟数据中大于 1 MeV 的散射计数不随

油垢厚度增加而增加,故经散射至探测器的光子总计数为 0~1.4 MeV 能量道内的计数和。

模拟计算无土层及有干燥土层时散射计数与油垢厚度的关系,结果示于图 3,图 3 中 0~10 cm 表示的是探测面至保温层之间的距离。由图 3 可知,无土情况下散射计数随着探测距离的增加呈减小趋势,而有土情况下散射计数随探测距离的增加而增加。

计算所得散射光子计数扣掉管道后的净计数采用最小二乘法运用线性关系  $Y=A+B \times D$  进行拟合。其中,  $Y$  为散射光子数,  $B$  为增加单位厚度(mm)油垢时散射光子增加量(简称灵敏度),  $D$  为油垢厚度,  $A$  为油垢厚度为零时的光子计数。模拟运算线性拟合后的结果列于表 2。表 2 中,  $X$  为探测面至保温层距离,  $R^2$  为线性相关系数,  $s$  为计数额标准偏差,  $s/B$  为油垢厚

度测量的精度,  $N$  为散射光子数。表 2 结果表明:随着土层中含水量的增加,油垢的单位厚度灵敏度变化不大,但是散射光子数也随着含水量的增加呈增加趋势;并且零含水量时候要比含水量时候灵敏度高一些。

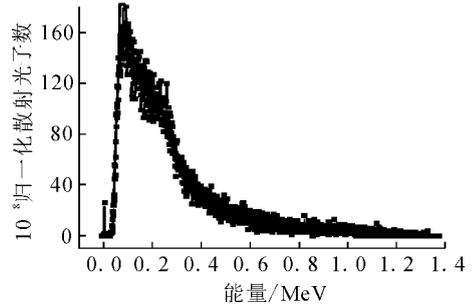


图 2 典型散射能谱图

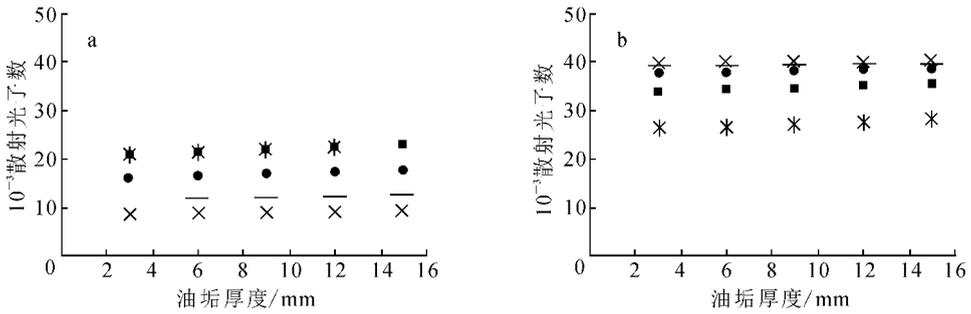


图 3 无土层及有干燥土层时散射计数与油垢厚度的关系

a——无土层;b——干燥土层

\*——0 cm; ■——2.5 cm; ●——5 cm; ———7.5 cm; ×——10 cm

表 2 模拟线性拟合结果

$X/cm$	相对含水量/%	$B$	$A$	$R^2$	$s$	$s/B$	$N_0$ (管道)	$N_1$ (扣管道)
0.0	0	159.1	135.1	0.997	42.300	0.3	25 502	646
	5	158.1	140.1	0.999	27.609	0.3	25 608	634
	10	158.9	141.5	0.998	36.698	0.2	25 690	622
	15	158.1	140.5	0.996	50.286	0.3	25 630	635
	20	156.0	121.3	0.998	32.666	0.2	25 622	592
	25	156.8	106.6	0.998	30.241	0.3	25 806	590
	30	158.5	122.3	0.998	32.895	0.2	25 665	617
2.5	0	134.4	50.4	0.979	107.680	0.8	33 352	500
	5	131.6	62.7	0.996	44.486	0.3	33 752	453
	10	129.0	69.9	0.995	46.154	0.4	33 977	444
	15	128.9	67.3	0.993	56.392	0.4	34 237	433
	20	129.7	70.8	0.995	47.682	0.4	34 391	439
	25	123.8	51.0	0.993	56.280	0.5	34 794	390
	30	125.3	67.7	0.994	52.971	0.4	35 229	410

续表 2

X/cm	相对含水量/%	B	A	$R^2$	s	s/B	N0(管道)	N1(扣管道)
5.0	0	79.13	46.2	0.985	52.210	0.660	37 423	259
	5	74.00	74.6	0.991	36.829	0.498	38 212	281
	10	67.30	96.9	0.994	27.308	0.406	38 857	285
	15	67.43	44.7	0.983	48.043	0.712	39 568	213
	20	64.90	19.7	0.990	35.194	0.542	39 973	192
	25	61.86	28.0	0.993	28.007	0.453	40 635	139
	30	60.10	19.1	0.986	38.683	0.644	40 984	179
7.5	0	34.06	99.8	0.998	7.545	0.222	38 973	194
	5	31.16	183.7	0.985	20.399	0.655	39 911	273
	10	33.40	54.0	0.995	12.394	0.371	40 945	150
	15	30.16	92.1	0.999	5.122	0.170	41 667	182
	20	30.03	39.7	0.998	5.997	0.200	42 181	131
	25	28.16	62.9	0.997	7.847	0.279	42 951	143
	30	25.90	15.7	0.992	12.192	0.471	43 566	81
10.0	0	18.60	13.4	0.988	10.899	0.586	39 894	62
	5	14.83	67.1	0.985	9.810	0.662	40 936	106
	10	13.43	58.3	0.948	17.126	1.275	41 979	85
	15	11.70	49.1	0.910	20.076	1.716	42 661	64
	20	11.50	23.5	0.918	18.828	1.637	43 272	43
	25	11.16	25.9	0.956	13.098	1.174	44 045	47
	30	9.17	26.3	0.991	4.771	0.521	44 619	50

### 3 实验部分

实验装置示意图示于图 4。制作了 8 块厚度约为 3 mm、长宽为 20 cm×6.5 cm 的油垢样品,用两块相距 11 cm、厚度为 1.9 mm 的铁板模拟管道,在铁板内侧对称加油垢样品。实验在有土环境下进行,为尽量避免两侧的油垢样品厚度差别造成的影响,两侧的油垢样品进行交换测量,共测量两次,两次测量所得的计数取平均,比较与平均厚度之间的关系。

康普顿散射光子数与油垢厚度线性拟合结

果列于表 3。用康普顿散射部分谱获得散射光子数,扣掉铁板后的净计数采用最小二乘法运用线性关系  $Y=A+B \times D$  进行拟合。

由表 3 可见,随着土层厚度的增加,油垢厚度的探测灵敏度呈减小趋势。而实验受实际条件的限制,如源距为 14.5 cm、用铁板模拟管道等。对比表 3 及表 2 中模拟数据线性拟合结果,可以发现模拟与实验中油垢厚度的探测灵敏度变化趋势一致。

表 3 康普顿散射光子数与油垢厚度实验得到的线性拟合结果

准直器出口到铁板距离/cm	A	B	$R^2$	s	s/B
1.5	-824.9	971.4	0.995	369.67	0.4
5.0	1 114.0	885.1	0.999	149.95	0.4
7.5	-295.7	706.3	0.989	399.39	0.6
10.0	2 517.0	586.6	0.957	682.96	1.4
15.0	5 676.0	266.3	0.994	108.65	0.4
均值			0.987		0.6

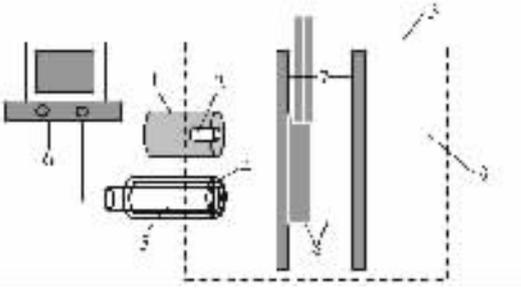


图 4 实验装置示意图

- 1——源准直器;2—— $\gamma$ 源( $^{60}\text{Co}$ );  
3——木箱;4——铅屏蔽罩;5——NaI(Tl)闪烁体探测器;  
6——微机多道分析仪;7——铁板;8——油垢;  
9——土(木箱中除标注位置)

#### 4 小 结

有土层条件下,在实验室用平行铁板模拟管道探讨散射光子数与矩形油垢样品厚度之间的关系,得到线性相关系数  $R^2$  平均值 0.987,平均测量精度为 0.6 mm,线性良好,精度较高,符合实验的要求,表明该方法可行。

采用半油测量的方式,通过蒙特卡罗模拟计算程序 MCNP 研究土层对  $\gamma$  散射法测量油垢厚度的影响,并初步模拟探讨土层中含水量对检测油垢厚度的影响,模拟结果与实验有着相同的规律。这进一步表明使用  $\gamma$  射线散射法测量厚度是一可行的测量途径。土层中含水量对检测油垢厚度的影响存在一定的规律,能够进一步完善表面型  $\gamma$  射线管道测垢仪研制工作。

另外研究采用的是 $^{60}\text{Co}$ 放射源,研究中发现

存在探测深度不够的问题,可以考虑用 $^{137}\text{Cs}$ 放射源,强度大一些,适当缩小准直器与探测器之间距离条件下,可以使探测深度更大一些。

致谢:感谢张国光老师在 MCNP 计算程序方面所给予的指导和帮助。

#### 参考文献:

- [1] 刘圣康,张治平,郭大永,等.用 $\gamma$ 射线透射幅度谱研究管道油垢厚度的响应[J].核技术,2003,26(8):595-597.
- [2] 王世亨,刘圣康. $^{137}\text{Cs}$  $\gamma$ 射线透射法检测输油管道油垢的初步实验研究[J].原子能科学技术,2002,36(6):535-538.
- [3] 艾尔肯·阿布列木,买买提热夏提·买买提,甫尔开提·夏尔丁,等. $^{60}\text{Co}$ 放射源检测油垢厚度的初步实验研究[J].新疆大学学报:自然科学版,2007,24(3):260-268.
- [4] 丁杰,艾尔肯·阿布列木,刘圣康,等.管内石油对油垢厚度测量的影响[J].原子能科学技术,2007,41(6):725-728.
- [5] 周百昌,何彬,朱文凯,等.透射法测量输油管道油垢厚度响应关系的蒙特卡罗计算[J].原子能科学技术,2006,40(增刊):89-92.
- [6] 刘广山.中国土壤 $\gamma$ 射线质量减弱系数[J].核标准计量与质量,1996,(2):14-19.
- [7] 陈忠,徐家云,周钢,等.土壤样品中的含水量对HPGe $\gamma$ 谱仪探测效率的影响[J].核电子学与探测技术,2005,25(3):318-321.