

LRAD 管道内两面源的放射性测量技术

李平川¹ 庾先国^{2,3} 郑洪龙² 刘明哲^{1,3} 吴雪梅¹ 杨剑波^{1,3}

1 (成都理工大学核技术与自动化工程学院 成都 610059)

2 (西南科技大学 绵阳 621010)

3 (成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

摘要 针对核设施退役管道中多点或大面积污染情况,采用自主研发的新型长距离 α 探测技术(LRAD)测量系统,开展了管道中不同参数下两面源(不同核素、不同面活度的 α 面源)污染影响特征的对比实验。实验结果表明:两面源相对间距为 10 cm 时,探测效率均高于相对间距为 0 cm、20 cm、40 cm 三种情况,与理论分析相吻合; ^{241}Am 源距电离室近、 ^{239}Pu 源距电离室远的测量结果大于两面源前后位置颠倒的测量结果;两个面源同时测量值小于两个面源在相应位置单独测量值之和。所以多面源对 LRAD 测量值具有一定的影响规律,可为管道内 α 核素污染测量研究提供一定的技术参考价值。

关键词 长距离 α 探测技术(LRAD),两面源,探源距,相对位置

中图分类号 TL811

随着核工业的大力发展,必然导致放射性废物(例如管道、防护衣、工具等)的大量产生,亟需通过放射性污染测量技术,查明放射性污染水平,便于处理与处置。针对管道内放射性污染测量难的问题,上世纪 90 年代初期,MacArthur 等^[1]提出了长距离 α 探测技术(Long Range Alpha Detector, LRAD)。LRAD 技术可以解决因 α 粒子射程短、穿透能力弱,常规表面 α 探测器难以精确、有效、实时、非破坏性的探测异型管道内或不规则污染表面 α 放射性活度的缺点。近年来,LRAD 技术的研究较少。国内外已经研制出 LRAD 相关仪器,并找出影响 LRAD 管道内表面 α 放射性污染的多种关键影响因素^[2-6],开展了包括探源距(cm)、风速(m/s)、流量(m^3/h)、测试管管长(cm)和管径(mm)等因素影响实验。通过建立多参数与测量值的关系模型^[2,7-9],实现了对 α 放射性污染源总活度大小的预测^[10-12],且效果较好。

上述管道中多参数影响研究仅仅针对管道中一个放射性点污染的模拟实验研究,而针对管道中大面积,或者多个点污染情况还未见有研究。LRAD 以收集 α 粒子在空气中使空气电离产生的电离离子对的方法间接探测 α 粒子,根据所测得的电离电流值的大小估算出 α 放射源的活度^[3,12,13]。不同元素的单个源发射的 α 粒子能量不同,不同活度的同种元

素源发射的总 α 粒子数不同,产生电离离子对结果也存在明显差异。为了查明管道中具有多个点或大面积的放射性污染情况,进一步完善多参数影响下的仪器刻度的关系模型。本文采用两个标准 α 面源(不同核素不同活度),模拟管中两个污染源进行多源影响实验研究,并通过实验数据初步分析多源影响特征规律。

1 LRAD 测量系统与探测原理

1.1 LRAD 测量系统

实验采用课题组自主研发的新型 LRAD 测量系统^[7]如图 1 所示,该系统由(1)探测单元(Detection unit)、(2)空气驱动单元(Air drive unit)、(3)电源供电单元(Power supply unit)、(4)信号采集与处理单元(Signal Acquisition and Processing unit)、(5)存储和显示单元(Storage and Display unit)五个部分构成。其中导气管为内径 40 mm、长 10 cm 的铝管,直接与电离室相连;电离室外部尺寸:170 mm×105 mm×66 mm,其内部由两块带孔的黄铜栅板(孔径 1.5 mm)及聚乙烯绝缘柱组成,每块板长 115 mm,宽 70 mm,厚 1 mm,间距为 18 mm;风扇(型号为 KDE1206PFV1, DC-12V=2.8 W)直接与电离室外壳相连,利用 Testo405-V1 热线风速仪测量其风速,

国家杰出青年科学基金(41025015)、国家自然科学基金(40974065、41274108、41274109)、四川省青年科技创新研究团队项目(2011JTD0013)资助
第一作者:李平川,女,1985 年出生,2010 年毕业于西南科技大学,现为成都理工大学硕士研究生,专业:辐射防护及环境保护

通讯作者:庾先国, E-mail: tuoxg@cduet.edu.cn

收稿日期:2013-06-17, 修回日期:2013-08-19

保持风速为 $0.59 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 输出电压为 11 V 的充电锂电池给电压模块和风扇供电, 电压模块供给电离室

高压为 210 V (性能测试所得)。

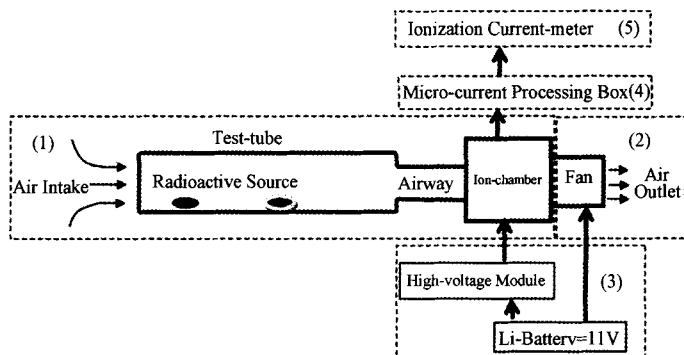


图1 LRAD 测量系统示意图

Fig.1 Measuring system diagram of LRAD.

1.2 探测原理

α 粒子电离空气每产生一个电离对将损失 35 eV 的能量^[14,15], 因此, 对于 1 Bq 核素 ^{239}Pu (衰变产生的 α 粒子主要能量为 5.115 MeV)将产生大约 146 000 个电离电子对。如图 1 所示, LRAD 测量系统的探测原理为: α 电离空气产生的电离对通过风扇驱动气流从左到右运移, 因生成的离子对在空气中复合需要较长的时间^[2,9], 电离对可以经过导气管进入电离室, 空气中所含有的正负离子对在电离室电场的作用下定向移动, 产生微弱的电流信号(微电流), 微电流经后续电路放大和处理后得到测量值(fA)。

1.3 实验方法

电荷的复合率与探测距离有直接的关系^[7,16]: 电荷复合率与电荷行走最大距离的三次方成正比。预测测量值与探源距成三次方关系, 探源距的影响在本实验系统中比重较大。

实验研究内容包括相对间距变化对多面源测量的影响实验和单源相应位置叠加与多面源测量的比较实验两部分。实验选用标准源为 ^{241}Am (3 772.2 Bq)、 ^{239}Pu (224.4 Bq), 碳钢钢管管径(66 mm、78 mm)、管长为 180 cm, 单次测量时间为 80 s, 在管道内进行两单面源单独测量和两个面源同时测量的影响特征的实验。实验方案为: 单面源在管中以探源距方向

10 cm 等间距移动进行测量; 两面源以相对间距 0 cm、10 cm、20 cm、40 cm 在管中以 20 cm 的等距移动并进行测量, 交换两源的相对位置后, 同样为 0 cm、10 cm、20 cm、40 cm 在管中以 20 cm 的等距移动并进行测量, 采用多项式拟合找出相应的变化曲线。

2 结果与讨论

2.1 相对间距变化对多面源测量的影响

假定多面源间距表示为:

$$D = \sum_{i=1}^m r_m + \sum_{i=1}^m R_m \quad (1)$$

式中, r_m 表示 m 面源的半径; R_m 表示 m 面源发射的 α 粒子射程。

例如, ^{241}Am 在衰变过程中, 发射的 α 粒子能量主要为 5.486 MeV, 射程为 $R_1=4.086 \text{ cm}$, 面源的半径为 $r_1=0.500 \text{ cm}$; ^{239}Pu 在衰变过程中, 发射的 α 粒子能量主要为 5.115 MeV, 射程为 $R_2=3.679 \text{ cm}$, 面源的半径为 $r_2=1.750 \text{ cm}$ 。理想状态下, 当两个面源间距 $d=r_1+R_1+R_2+r_2=0.500+4.086+3.679+1.750=10.015 \text{ cm}$ 时, 两面源分别发射出的 α 粒子相互干扰较小, 如图 2 所示。预计当两面源相对间距取为 10 cm 时探测效率高, 理论为最佳探测相对间距。

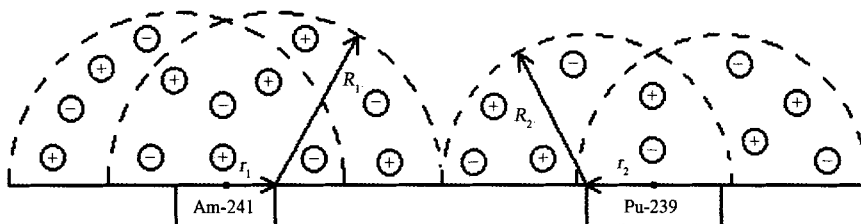


图2 两标准源最佳探测相对间距

Fig.2 Best detection of relative spacing of two standard source.

图 3 为相对间距变化对多面源测量的影响。曲线采用三次多项式拟合而成, 拟合方程见表 1 和表 2, 其测量值随探测距离的变化相关系数 R^2 均接近

1, 说明拟合效果均较好, 且验证了测量值与探源距呈三次方减小关系(下同)。

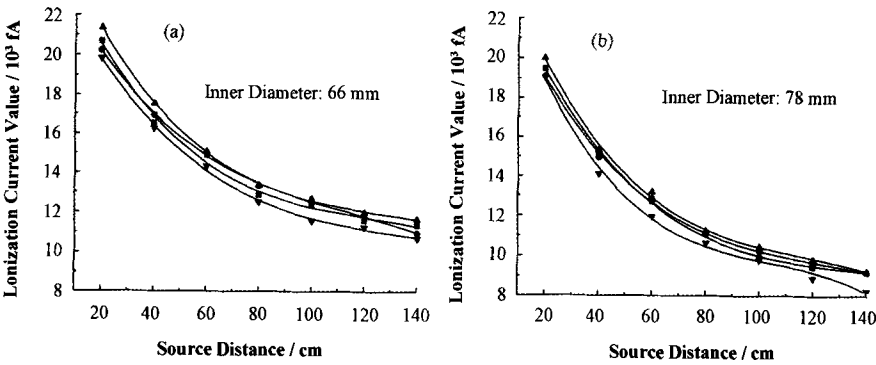


图 3 相对间距对两面源测量的影响
Fig.3 Effect of relative distance on two-surface source measurement.
■ Am/Pu relative distance: 0 cm; ▲ Am/Pu relative distance: 10 cm;
● Am/Pu relative distance: 20 cm; ▼ Am/Pu relative distance: 40 cm

表 1 66 mm 管中单面源与两面源测量的特征方程
Table 1 Characteristic equation of single surface source and two-surface source measurement in 66-mm pipe.

相对间距 Relative distance / cm	特征方程 Characteristic equation	R^2
Am front of Pu 0	$y = 25\,818.571\,4 - 307.157\,5x + 2.363\,8x^2 - 0.006\,5x^3$	0.988\,9
Am front of Pu 10	$y = 26\,676.300\,0 - 310.567\,8x + 2.306\,0x^2 - 0.006\,1x^3$	0.999\,2
Am front of Pu 20	$y = 24\,681.042\,8 - 261.367\,5x + 1.972\,5x^2 - 0.005\,7x^3$	0.998\,1
Am front of Pu 40	$y = 24\,440.985\,7 - 268.649\,1x + 1.887\,9x^2 - 0.004\,7x^3$	0.996\,4
Pu front of Am 10	$y = 22\,637.514\,2 - 271.069\,4x + 2.300\,0x^2 - 0.006\,7x^3$	0.986\,3
Pu front of Am 20	$y = 17\,380.200\,0 - 125.550\,3x + 1.258\,6x^2 - 0.004\,9x^3$	0.974\,6
Single Am plus Pu 0	$y = 25\,860.771\,4 - 292.721\,3x + 2.398\,9x^2 - 0.007\,0x^3$	0.996\,0
Single Am plus Pu 10	$y = 25\,661.148\,5 - 285.944\,4x + 2.318\,9x^2 - 0.006\,7x^3$	0.996\,5
Single Am plus Pu 20	$y = 25\,466.571\,4 - 280.001\,6x + 2.263\,7x^2 - 0.006\,5x^3$	0.996\,0
Single Am plus Pu 40	$y = 25\,335.942\,8 - 276.097\,5x + 2.226\,1x^2 - 0.006\,4x^3$	0.996\,6
Single Pu plus Am 10	$y = 23\,172.848\,5 - 236.439\,6x + 1.940\,3x^2 - 0.005\,7x^3$	0.999\,9
Single Pu plus Am 20	$y = 20\,453.242\,8 - 170.467\,5x + 1.380\,4x^2 - 0.004\,1x^3$	0.995\,1

表 2 78 mm 管中单面源与两面源测量的特征方程
Table 2 Characteristic equation of single surface source and two-surface source measurement in 78-mm pipe.

相对间距 Relative distance / cm	特征方程 Characteristic equation	R^2
Am front of Pu 0	$y = 25\,091.371\,4 - 330.781\,2x + 2.417\,0x^2 - 0.006\,1x^3$	0.997\,9
Am front of Pu 10	$y = 26\,141.685\,7 - 367.731\,3x + 2.962\,5x^2 - 0.008\,5x^3$	0.995\,4
Am front of Pu 20	$y = 24\,441.600\,0 - 317.171\,1x + 2.410\,5x^2 - 0.006\,6x^3$	0.997\,2
Am front of Pu 40	$y = 25\,695.042\,8 - 410.035\,0x + 3.690\,1x^2 - 0.011\,8x^3$	0.993\,7
Pu front of Am 10	$y = 20\,164.557\,1 - 280.397\,7x + 2.418\,5x^2 - 0.007\,4x^3$	0.978\,1
Pu front of Am 20	$y = 20\,442.128\,5 - 332.196\,2x + 3.331\,9x^2 - 0.011\,3x^3$	0.957\,1
Single Am plus Pu 0	$y = 25\,244.028\,5 - 327.286\,0x + 2.514\,1x^2 - 0.006\,9x^3$	0.986\,5
Single Am plus Pu 10	$y = 25\,035.861\,4 - 320.849\,0x + 2.440\,0x^2 - 0.006\,7x^3$	0.987\,3
Single Am plus Pu 20	$y = 24\,971.014\,2 - 321.834\,2x + 2.477\,2x^2 - 0.006\,9x^3$	0.985\,8
Single Am plus Pu 40	$y = 24\,597.942\,8 - 308.443\,4x + 2.323\,0x^2 - 0.006\,3x^3$	0.987\,7
Single Pu plus Am 10	$y = 22\,220.257\,1 - 267.471\,7x + 2.035\,9x^2 - 0.005\,5x^3$	0.999\,9
Single Pu plus Am 20	$y = 19\,504.985\,7 - 213.905\,1x + 1.674\,3x^2 - 0.004\,7x^3$	0.974\,8

从图3(a)和(b)总体可以看出,两源间距为10 cm时,测量结果均高于其他三种情况,当两面源相对间距为0 cm时,两面源相互接触,不同核素的面源发射的 α 粒子在运动方向及能量上存在差异^[17], α 粒子与两面源发生碰撞,损失部分能量,并且离子浓度大,复合率大。当两面源相对间距大于10 cm时,虽然两面源的相互干扰的程度没有相互接触时强烈,但是在同一 ^{241}Am 源位置处, ^{239}Pu 源距探测器相对位置变大(例如两面源相对间距为20 cm、 ^{241}Am 的探源距为20 cm时, ^{239}Pu 的探源距为40 cm),探测效率降低。故综合两方面因素,两面源间距为10 cm时为最佳相对间距,此次测量结果与前面理论分析的结论相吻合,验证了测量的准确性。也可以作为接下来进一步研究大面积污染的依据。

2.2 单源相应位置叠加与多面源测量的比较

图4和图5为66 mm管和78 mm管中单面源与两面源比较,从图中可以看出,当 ^{241}Am 置于 ^{239}Pu 前面,除了在两源相对距离为10 cm时,两个面源在相应位置单独测量时测量值相加(用S表示)的曲线与两个面源同时测量值(用M表示)的曲线在探源距为40 cm处有交叉之外,其他三种相对距离的S

的曲线均高于M的曲线,说明两面源测量值大于单源相应位置叠加值,且随两源整体探源距的增加,S与M的差值越来越大;图4和图5中的(a)和(c)用●和▼标注的曲线代表 ^{239}Pu 置于 ^{241}Am 前面,可以得到,两源相对距离在10 cm和20 cm时,S的曲线也均高于M的曲线,而随着两源整体探源距的增加,S与M的差值变化不大。

两个面源同时测量,不同面源发射的 α 粒子在运动方向及能量上存在差异,由于 α 粒子都带正电,相互接近时受到库仑斥力作用, α 粒子间发生非弹性碰撞,造成能量损失,同时使 α 粒子原来的运动速度和方向发生改变,造成更多的 α 粒子不能继续沿着原来的运动路径运动,从而促使更多非弹性碰撞的效果^[14],而能量损失在非电离空气上,从而影响测量结果。其次,面源数量的增加,单位时间内管道中 α 粒子数量增加,电离的离子对浓度亦增大,离子复合几率增大。两者共同造成了两面源测量结果小于单面源测量值叠加结果。

图4和图5中(a)和(c)的★和●对比了两源位置变换的情况,可以得出:当 ^{241}Am 源距电离室近而 ^{239}Pu 源距电离室远,测量结果大于两面源前后位置颠倒的测量结果。

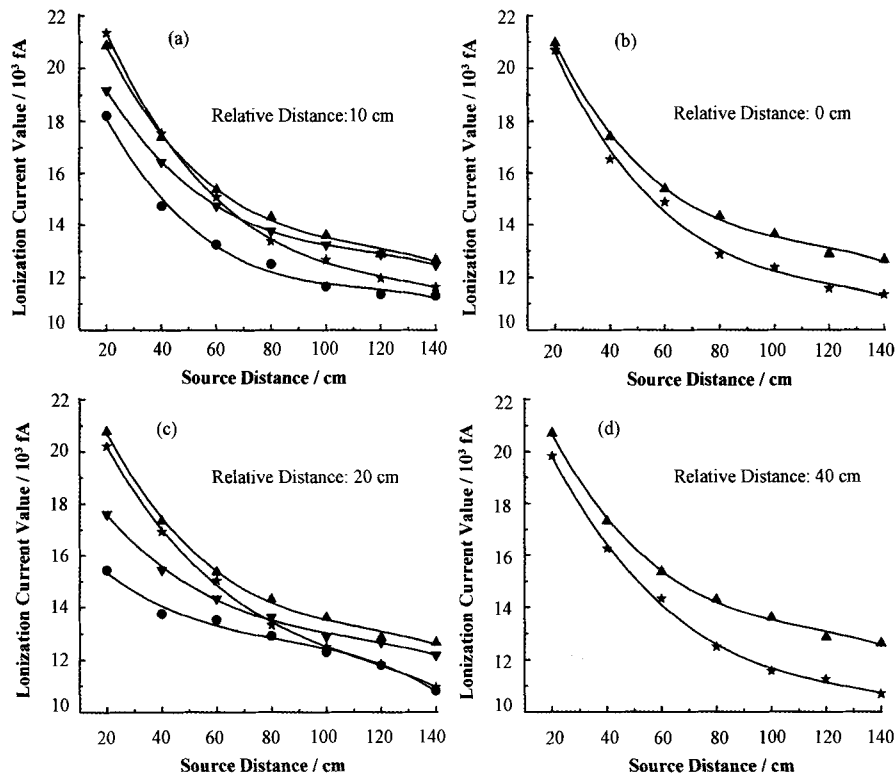


图4 66 mm管中单面源与两面源比较

Fig.4 Comparing of single surface source and two-surface source in 66-mm pipe.

★ Am front of Pu, ● Pu front of Am, ▲ single Am plus Pu, ▼ single Pu Plus Am

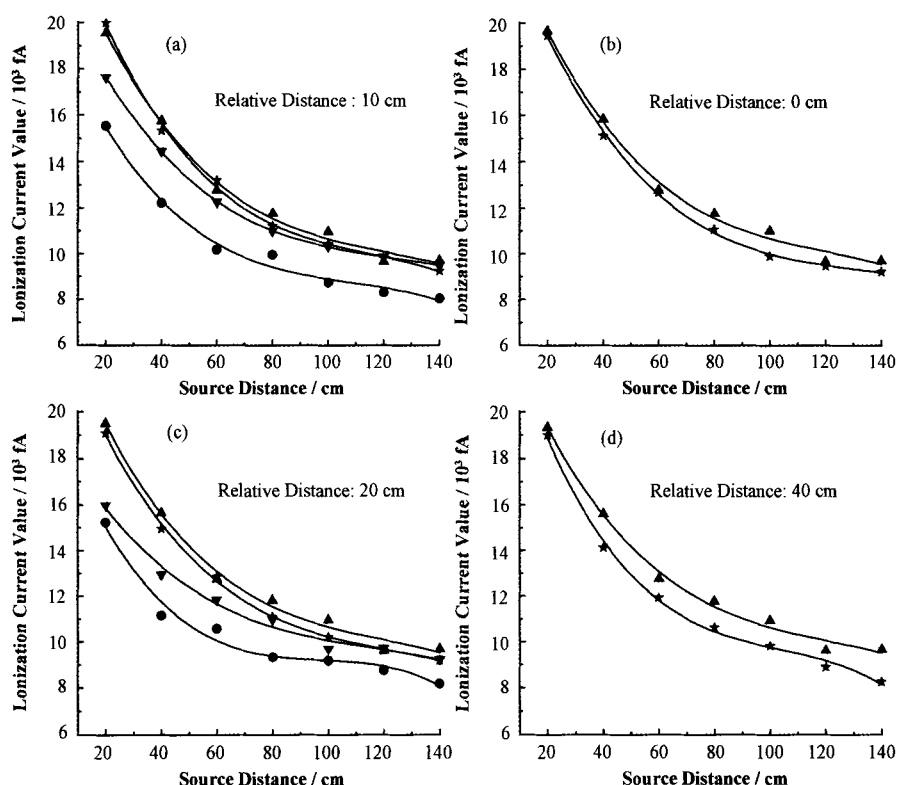


图5 78 mm 管中单面源与两面源比较

Fig.5 Comparing of single surface source and two-surface source in 78-mm pipe

★ Am front of Pu, ● Pu front of Am, ▲ single Am plus Pu, ▼ single Pu Plus Am

^{241}Am 源的活度大小为 ^{239}Pu 源的十几倍, 在进行两面源测量时, ^{241}Am 源的影响权重较大, 改变两面源位置的同时, 改变了两个面源各自到电离室的距离, 而探源距对探测效率影响很大, 且呈三次方减小, 所以当影响权重较大的 ^{241}Am 源距离电离室较近时, 探测效率更高。

图4与图5中曲线的特征方程见表1和表2, 其测量值随探测距离的变化相关系数 R^2 均接近1, 说明拟合效果均较好。

3 结语

采用自主研发的新型 LRAD 测量系统, 进行了管道内单面源和两面源的 LRAD 测量的影响特征实验研究, 取得了如下研究成果:

(1) 管道内单面源和两面源的测量结果与探源距为负相关关系, 且采用三次多项式曲线拟合效果好。

(2) 两面源相对间距为 10 cm 时, 测量结果高于两源相对距离为 0 cm、20 cm、40 cm 时的测量结果, 与理论相吻合。

(3) ^{241}Am 源 (活度大) 距电离室近和 ^{239}Pu 源 (活度小) 距电离室远的测量结果大于两面源前后位置颠倒的测量结果。

(4) 通过单面源和两面源在管道内 LRAD 测量结果对比, 得出两个面源同时测量值小于两个面源在相应位置单独测量值之和。

由于实验条件中 α 放射源和管道数量有限, 工作环境可能受到其他不定因数的影响, 实验中管道内多面源的 LRAD 测量结果可能受到一定影响。在后续的 LRAD 技术研究中, 希望能够进行更多深入细致的研究分析, 增加 α 放射源数量和管道的多样性, 并且对管道内多面源的温度和湿度影响特征进行研究, 从而得到更多实测数据, 更加精确地给出管道内多面源的 LRAD 测量的影响特征, 更进一步完善长距离 α 探测技术的影响特征基础研究。

参考文献

- MacArthur D W. Long-range alpha detector (LRAD)[R]. San Francisco: Department of Energy, 1991
- Johnson J D, Allander K S, Bounds J A, et al. Long-range alpha detector sample monitoring[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1994, 353: 486-488
- 黄连美. 管道内 LRAD 测量关键参数试验与 PLS-BP 网络校正技术研究[D]. 成都理工大学, 2011

HUANG Lianmei. Research on key-parameter experiments and PLS-BP correction approach: LRAD

- measurements inside pipes[D]. Chengdu University of Technology, 2011
- 4 付军, 庾先国, 廖哲, 等. LRAD 技术在 α 表面污染监测中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(5): 830–832
FU Jun, TUO Xianguo, LIAO Zhe, *et al.* The application of LRAD technique in alpha surface contamination monitoring[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(5): 830–832
 - 5 MacArthur D W, Allander K S, Bounds J A, *et al.* Long-range alpha detection applied to soil contamination and waste monitoring[R]. Tucson: Department of Energy, 1992
 - 6 Tuo X G, Li Z, Mu K L, *et al.* Alpha contamination monitoring instrument based on LRAD technique for complex surface monitoring[J]. Nuclear Science and Techniques, 2008, (SCI): 282–285
 - 7 穆克亮. LRAD 测量系统开发及关键因素特征研究[D]. 成都理工大学, 2010
MU Keliang. Develop of LRAD measure system and influence characteristic research of key parameters[D]. Chengdu University of Technology, 2010
 - 8 Ebadian M A. Characterization of pipes using electret ion chambers[R]. Florida International University, Center for Engineering & Applied Sciences, 1997
 - 9 Rojas S P, Rawool-Sullivan M W, Williams K G, *et al.* Alpha characterization inside pipes using ion-transport technology[R]. Tucson: Department of Energy, 1995
 - 10 吴雪梅, 庾先国, 李哲, 等. LRAD 测量管道内 α 污染活度的 BP 网络模拟[J]. 核技术, 2012, 35(5): 369–374
WU Xuemei, TUO Xianguo, LI Zhe, *et al.* Application of BP neural network for LRAD-based alpha contamination monitoring inside pipes[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(5): 369–374
 - 11 MacArthur D W, Allander K S, Bounds J A, *et al.* Small long-range alpha detector(LRAD) with computer readout[R]. Washington: Department of Energy, 1991
 - 12 Rawool-Sullivan M W, Conaway J G, MacArthur D W, *et al.* Alpha contamination assessment for D&D activities: monitoring pipe interiors[R]. Washington: Department of Energy, 1996
 - 13 韩景泉. 离子收集式 α 探测器[J]. 原子能科学技术, 1998, 32(6): 503–509
HAN Jingquan. Long-range alpha detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1998, 32(6): 503–509
 - 14 陆福全, 朱胜江, 陈坚, 等. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1985
LU Fuquan, ZHU Shengjiang, CHEN Jian, *et al.* Nuclear physics experiment method[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1985
 - 15 ICRU. Average energy required to produce an ion pair[R]. 1979
 - 16 刘建忠, 靳根, 马立平, 等. 用离子收集法测量 α 粒子技术研究[J]. 核科学与工程, 2007, (3): 77–85
LIU Jianzhong, JIN Gen, MA Liping, *et al.* A study of measuring α particle by the principle of ion collection[J]. Nuclear Science and Engineering, 2007, (3): 77–85
 - 17 成都地质学院三系第二教研室. 放射性勘探仪器[M]. 北京: 原子能出版社, 1979: 2–37
The second of three lines Chengdu Institute of Geology Department. Radioactive prospecting instruments[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1979: 2–37

Radioactive measurement technology of two-surface source based on LRAD inside pipes

LI Pingchuan¹ TUO Xianguo^{2,3} ZHENG Honglong² LIU Mingzhe^{1,3}
WU Xuemei¹ YANG Jianbo^{1,3}

¹(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

²(Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

³(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract Background: The development of measuring technologies of radioactive contamination becomes more and more important. Long Range Alpha Detector (LRAD) can effectively solve some problems such as the short ranges of alpha particles, weak penetration ability and so on. LRAD also has advantages that the alpha radioactivity of interior surface of irregular pipes or just irregular surface can be measured nondestructively and precisely. **Purpose:** This paper attempts to obtain the measured value of multi-point sources and large contamination areas in pipes. And

the comparative experiments of impact factors of two different radioactive surface sources (different nuclides and radioactivities) have been done. **Methods:** In the experiment, a new domestic LRAD is utilized to measure the alpha activity of interior surface of steel pipes. Here, the inner diameter of pipes is 78 mm and there are two kinds of pipes: straight pipe and U-bend pipe. The radioactive sources include ^{241}Am (3 772.2 Bq) and ^{239}Pu (224.4 Bq). The distance between different sources takes values of 0 cm, 10 cm, 20 cm and 40 cm, respectively, and the distance between the whole mixed radioactive source and detector increases by step of 20 cm. **Results:** When the relative distance of the two surface sources is 10 cm, the detection efficiency of LRAD is higher than that of relative distance of 0 cm, 20 cm and 40 cm, which matches the result of theoretical analysis. When ^{241}Am is closer to the detector than ^{239}Pu , measuring results are much higher than those of the opposite situation. And in the same position, when the two sources are put together, the measured results are lower than those of the sum of each single source. **Conclusion:** Based on the experimental results, a self-developed new LRAD measurement system has been used to measure two non-point sources in pipes.

Key words Long Range Alpha Detector (LRAD), Two-surface source, Detector-source distance, Relative distance
CLC TL811