

不明放射性物品的快速鉴别

金玉仁¹, 龙斌^{1,2}, 成智威¹, 徐辉¹, 王江¹, 韩小元¹

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:社会上出现的不明放射性物品可能会产生确定性效应, 必须对其迅速处理, 作出快速准确鉴别是提出合理处置方案的基本依据。本文建立不明放射性物品鉴别方法, 通过就地 HPGe γ 谱仪等现场检测手段、实验室 HPGe γ 谱仪测量、ICP-MS 分析和密度测量等实验室分析手段, 快速鉴定 1 件不明放射性物品的属性。结果表明, 该不明放射性物品属高纯度贫化铀金属, 其²³⁵U 与²³⁸U 丰度比为 0.454%。

关键词:放射性物品; 贫化铀; 现场 γ 谱仪; ICP-MS

中图分类号: TL751

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)12-1513-04

Rapid Identification for Unaware Radioactive Material

JIN Yu-ren¹, LONG Bin^{1,2}, CHENG Zhi-wei¹, XU Hui¹, WANG Jiang¹, HAN Xiao-yuan¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The unaware radioactive material (URM) appeared in the society may induce potential deterministic effect, so it must be quickly dealt with. And the rapid and accurate identification for URM is the basis for the suggestion of reasonable treatment. An identification procedure for URM was developed, and the attributes of an URM were identified by the on-site assay methods with in-situ HPGe γ spectrometry etc., and the laboratory testing methods with laboratory HPGe γ spectrometry, ICP-MS and density measurements. The results indicate that it is a kind of high pure depleted uranium metal with the ²³⁵U/²³⁸U atomic ratio of 0.454%.

Key words: radioactive material; depleted uranium; in-situ γ spectrometry; ICP-MS

随着核技术应用的快速发展, 放射源数量激增, 同时也产生大量废源, 其中有一部分废源成为未控源和失控源。这类源的存在及核材料走私、放射源容器及辐射超标金属材料复用等, 均有可能导致社会上出现组成、活度及来源不明的放射性物品。据报道^[1], 我国完全失控源约有 2 000 枚, 其中有的属于一、二类源^[2], 对

公共卫生安全造成潜在威胁。在 1993—2003 年间, 全世界涉及放射性物质非法运输的事件共有 884 起^[3]。核材料、失控源或未控源可能被恐怖分子制造并产生有效的“脏弹”或辐射发射装置^[4], 对社会稳定乃至国家安全造成威胁。为迅速处理社会上出现的不明放射性物品 (URM), 平息有关事态, 向公众作出科学解释,

首先需对该类物品进行快速鉴别,并基于此提出合理的处理方案。本文为此制定不明放射性物品快速鉴别的方法,并对1件不明放射性物品实施现场快速检测;根据现场检测结果判断该物品的属性,并指导该物品起获、包装、转运;通过实验室HPGe γ 谱仪测量、ICP-MS分析及密度测量等手段,对所取样品进行快速准确鉴定。

1 鉴别工作程序

2007年10月,有关部门发现1件境外走私入境的鼓形放射性金属物品,该物品密度极高,重约250 kg,其具体来源、放射性核素种类、活度不明,物品被事主埋藏于室外。为迅速

处理该不明放射性物品,本文建立了如图1所示的鉴别方法。在现场用手持式 γ 剂量率仪寻测,确定该放射性物品埋藏点,并边挖掘边检测,以免人员受到超剂量限值的照射。在物品出露后,用 α/β 表面沾污仪检测物品表面 α 辐射水平,进一步确定放射性种类,指导现场作业人员的辐射防护;用就地HPGe γ 谱仪获取能谱,根据全能峰能量及其峰面积,定性判定该不明放射性物品的属性。根据现场检测结果,确定物品包装、启运和贮存方案。然后用实验室HPGe γ 谱仪和ICP-MS准确测定金属的放射性核素种类及同位素组成,并通过测量密度判别其纯度。

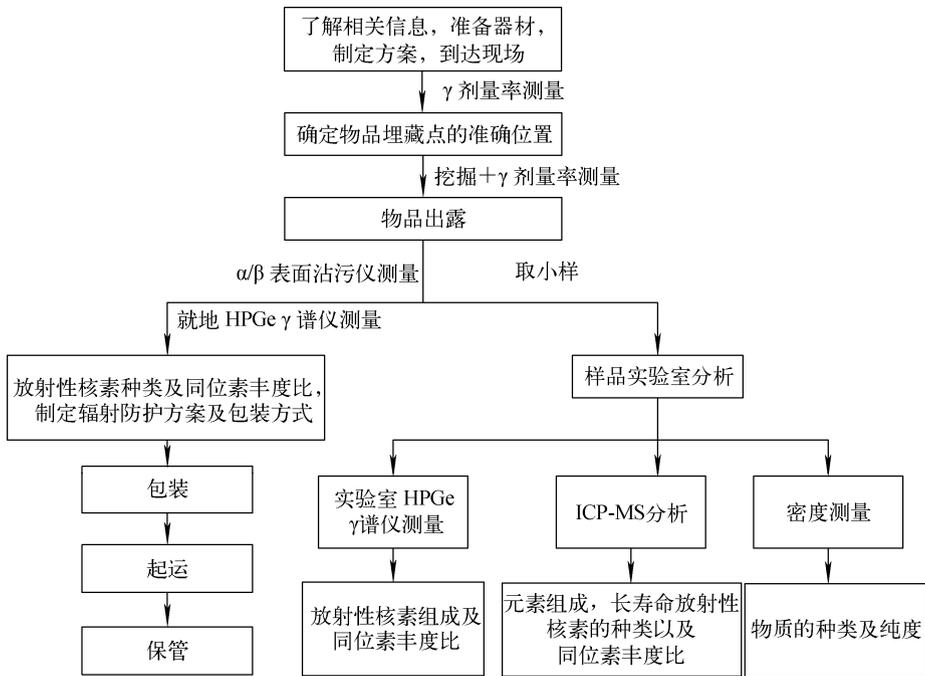


图1 不明放射性物品的鉴别方法

Fig. 1 Identification method for unaware radioactive substance

2 现场检测和初判

2.1 γ 辐射剂量测量

手持式 γ 辐射剂量仪巡测是发现放射性异常,指导不明放射性物品起获及人员防护的最简捷方法。如果 γ 辐射剂量处于职业照射限值范围内,作业人员不需作特别防护;否则,加强人员防护措施,并采取远距离操作。

本文用FD-71 γ 辐射剂量仪对物品起获全过程进行 γ 剂量率监测。结果表明,藏匿点地

表 γ 剂量率为 $1.6 \mu\text{Sv/h}$,随着挖掘深度的增加, γ 剂量率迅速升高,物品表面的 γ 剂量率达 $22 \mu\text{Sv/h}$ 。结果表明,物品起获过程(2 h)中现场人员所受照射在职业照射限值范围内。

2.2 表面 α/β 辐射水平测量

社会上可能出现的辐射源主要有流失的工农业、医疗行业用 ^{60}Co 、 ^{192}Ir 和 ^{137}Cs 等 γ 辐射源, α 放射性为主的铀、钚、 ^{241}Am 源和 ^{226}Ra 源,以及 ^{90}Sr 等 β 辐射源。因此,对于不明放射性

物品,即使其 γ 辐射较弱,仍有可能是强 α 或 β 辐射源,因而有必要测量其表面 α/β 辐射水平,以指导物品处理过程中的人员防护和物品包装方式的选择。该放射性物品的 γ 辐射虽较低,但手持式 α/β 沾污仪(Nuletron 43-89)测量显示出的埋藏地表及物品表面的 α 辐射水平很高,分别为 49 Bq/cm^2 和 101 Bq/cm^2 ,远高于国家对工作场所的放射性表面污染控制水平^[5](监督区地面的极毒 α 放射性物质的控制水平为 0.4 Bq/cm^2 ,其它 α 放射性物质控制水平为 4 Bq/cm^2)。由此判断,该金属的放射性以 α 辐射为主,在其起获、封装过程中,现场人员必须着防尘服,戴乳胶手套、防尘口罩,以避免吸入从而造成额外的内照射。

2.3 物品属性的现场初判

高密度的 α 放射性金属材料以铀、钍等锕系金属的可能性最大。铀材料中总伴有 ^{241}Am ,它的 γ 分支比较高(35.9%); ^{235}U 本身有直接可测的 γ 射线,两者均易用 γ 谱仪进行无损分析。 ^{238}U 的特征 γ 射线能量虽低,且分支比也小,但通过测量其子体的 γ 放射性可得到 ^{238}U 的活度。因此,通过现场 γ 谱仪测量,有可能确定该金属中的放射性核素种类及其活度,从而快速确定该物品的基本属性。

取一小块该金属样品,在现场用Canberra公司的BE5030 HPGe γ 谱仪(相对效率50%,FWHM 2.2 keV(^{60}Co ,1 332.5 keV)),获取 γ 能谱(图2)。从图2可见,明显区别于本底的有 ^{235}U 及 $^{234}\text{Pa}^m$ (^{238}U 子体),未见 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 等其它人工放射性核素。说明该金属的放射性主要来自铀,因其密度也异常大,初判其为铀材料。

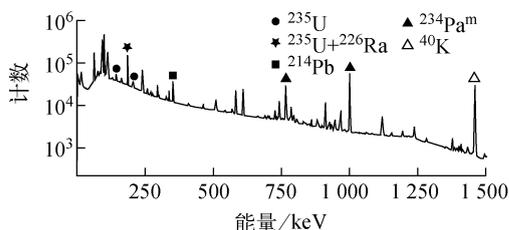


图2 现场获取的URM的 γ 能谱

Fig. 2 In-situ γ spectrum of URM

根据文献^[6]的方法,测量该铀样品中 ^{235}U 与 ^{238}U 的丰度比为 $0.004 61 \pm 0.000 28$,小于

天然铀中 ^{235}U 与 ^{238}U 的丰度比(0.007 25)。因此,初判该不明放射性物品为贫化铀,不属于核武器装料和核燃料。

3 实验室分析鉴定结果

3.1 实验室HPGe γ 谱仪测量

与现场就地HPGe γ 谱仪相比,实验室HPGe γ 谱仪所处的环境更稳定,本底更低,给出的测量结果更为准确可靠。用低本底HPGe γ 谱仪(LB3830,晶体尺寸为 $\phi 70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,对 ^{60}Co 1 332.5 keV能峰的能量分辨率为1.7 keV,相对效率为34.7%)测量获得的 γ 能谱示于图3。比较图3和2可见,实验室HPGe γ 谱仪未发现除 ^{235}U 、 ^{238}U 外的其它放射性核素,进一步确认了该物品的 α 放射性来自铀同位素(及其子体)。采用2.3节相同的方法,测得的 ^{235}U 与 ^{238}U 丰度比为 $0.004 85 \pm 0.000 26$ 。

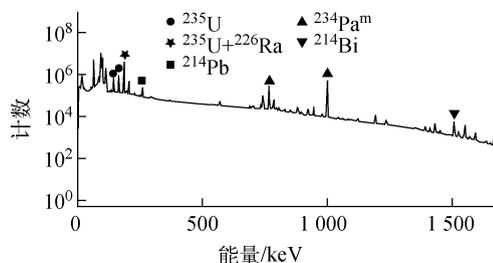


图3 实验室HPGe γ 谱仪给出的URM的 γ 能谱

Fig. 3 Laboratory HPGe γ spectrum of URM

实验室HPGe γ 谱仪测得的 ^{235}U 与 ^{238}U 丰度比与质谱分析结果的差异比就地HPGe γ 谱仪更大,其主要原因是现场测量时取用的小块金属样品比带回实验室分析的样品更大,形状更规则,就地HPGe γ 谱仪测量时,用无源刻度软件建立的几何模型更接近样品的几何形状,从而得到的效率刻度曲线更准确。

3.2 ICP-MS分析

ICP-MS分析中的干扰少,制源要求简单,适用于长寿命超铀元素的快速、高灵敏度分析。在核材料鉴别过程中,不仅可通过扫描实现迅速定性,还可进行准确定量,给出较高精度的同位素丰度比。本文用其进行该贫铀样品组份的快速扫描测量和铀同位素比测定。通过取 μg 量级上述金属样品,用10 mL 2 mol/L HNO_3

溶解,加超纯水稀释后用 ICP-MS(美国热电 X 系列 II 型)测量。先扫描给出质量谱,再进行 ^{235}U 与 ^{238}U 比的准确测定。扫描给出样品中的金属元素主要为 ^{235}U 和 ^{238}U 及少量 Mn, 不含 Pu、Am、Np、Nb、Hf 等元素。 ^{235}U 与 ^{238}U 丰度比测量结果为 $0.004\ 54 \pm 0.000\ 04$ 。

3.3 密度测量

用容量法测得该金属密度为 $18.44\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。

3.4 鉴定结果

实验室 HPGe γ 谱仪测量发现有 ^{235}U 及 ^{238}U 子体的特征 γ 能峰,未见 ^{241}Am 这一与钚伴生核素的 γ 能峰;ICP-MS 扫描测量发现该金属的放射性核素主要为 ^{238}U 和 ^{235}U , 不含 ^{239}Pu 等其它锕系核素,说明该物品的放射性来自铀同位素及其子体。

密度是衡量物质纯度最简便、快捷的方法之一,并可一定程度上判别物质种类,密度越接近某物质的文献值,说明其纯度越高。密度高于 $18\ \text{g}/\text{cm}^3$ 的物质只有铀、铀、钨、金、钨、铼、铈和钚,而该金属样品的 ICP-MS 扫描结果未发现除铀以外的前述其它几种元素,因此可确认其为金属铀。实测该金属密度达 $18.44\ \text{g}/\text{cm}^3$, 与纯金属铀的密度($19.05\ \text{g}/\text{cm}^3$)很接近,这不仅说明其为金属铀,且其纯度较高。

现场和实验室 γ 谱仪测量给出 ^{235}U 与 ^{238}U 的丰度比分别为 $0.004\ 61$ 和 $0.004\ 85$, ICP-MS 测得 ^{235}U 与 ^{238}U 丰度比为 $0.004\ 54$ 。两类完全独立的方法给出的铀同位素丰度比在实验不确定度范围内基本一致,并显著低于天然铀中 ^{235}U 与 ^{238}U 的丰度比。由此,可认定其为提取过 ^{235}U 的贫化铀,但 ^{235}U 与 ^{238}U 的丰度比较典型的贫化铀的 $(0.002)^{[7]}$ 高,说明 ^{235}U 的提取率较低。

综上可确定,该不明放射性物品为高纯度贫化铀金属。

4 结束语

采用本文的放射性物品鉴别方法,在到达事发现场后当天完成了现场检测,初判该不明放射性物品为贫化铀,并依据检测结果指导完成了该物品的起获、包装、转运等工作。样品到达实验室当天给出了最终鉴定结论,通过几种完全独立的分析方法,确认该样品为高纯度贫化铀金属,为国家有关部门迅速、有效地处理该

不明放射性物品走私事件提供了科学依据。

社会上可能出现的不明放射性物品会对公共卫生安全构成潜在威胁。快速、准确的鉴别工作是科学处理该类物品的基本依据。我国地域广阔,周边核形势复杂,并存在一些放射源失控的现实问题,除有关部门加强核材料的管控、放射源的监管和核废物的管理外,海关、交通等部门应设立有效监测放射性物品的措施,有关监测部门应对废品收购站等进行放射性巡查。一旦发现不明放射性物品,职能部门应在尽可能短的时间内对其进行处理。快速、准确的鉴别工作是科学处理该类物品的基本依据,国内从事核测量的科研单位应当建立核应急检测能力和应急检测预案,以作为有关行政和安全部门的技术依托机构,遂行有关鉴别工作。

参考文献:

- [1] 邹士亚,张文仲,毛用泽. 核和辐射恐怖活动防范与处置的核监测需求研究[J]. 防化研究,2005(1):67-76.
ZOU Shiya, ZHANG Wenzhong, MAO Yongze. Study of nuclear monitoring in countering against nuclear terrorism[J]. Fanghua Yanjiu, 2005(1): 67-76(in Chinese).
- [2] 潘自强,谢武成,赵永明,等. 放射源安全和保安的新进展[J]. 辐射防护,2005,25(6):384-387.
- [3] 王百荣,田新,杨忠平. 非法运输放射性物质的探查[J]. 辐射防护,2005,25(6):376-379.
WANG Bairong, TIAN Xin, YANG Zhongping. Detection of illicit trafficking of radioactive materials[J]. Radiation Protection, 2005, 25(6): 376-379(in Chinese).
- [4] 王善强,邹士亚,张文仲. “脏弹”及其应对策略[J]. 辐射防护,2008,28(5):323-328.
WANG Shanqiang, ZOU Shiya, ZHANG Wenzhong. “Dirty bomb” and its countermeasures [J]. Radiation Protection, 2008, 28(5): 323-328 (in Chinese).
- [5] GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [6] 龙斌,金玉仁,李公平,等. ISOCS 在铀同位素丰度比测量中的应用[J]. 辐射防护,2009,29(5):289-294.
LONG Bin, JIN Yuren, LI Gongping, et al. Application of ISOCS to measurement of isotopic abundance ratio of uranium[J]. Radiation Protection, 2009, 29(5): 289-294(in Chinese).
- [7] SHINS J O, AKERBLOM G. 贫铀的军事利用与健康 and 环境影响[J]. 郝建中,译. 辐射防护, 2001,19(3):182-188.