

建筑材料中放射性物质检测与健康风险评估

祖洪刚

安谱检测技术（江苏）有限公司，江苏 苏州 215100

[摘要]随着我国建设项目迅速发展和对生活品质的提高，建筑材料在新建项目和既有建筑中扮演着占重要的地位。近期住建部提出了好房子建好房的要求，建设成绿色、低碳、智能、安全的“好房子”，并且在快节奏的生活中，健康已成为人们关注的话题，建筑材料与环境直接影响房屋质量和人们健康。那么建筑材料在施工及成品使用过程中，材料的有害性限被越来越重视，施工前期是否满足标准要求，后期使用中是否对人有伤害。本文就无机非金属建筑材料的放射性物质的分类指标、试验检测及健康风险评估三个方面进行简述，为建设项目施工和居民装饰装修提供参考意见。

[关键词]无机非金属；放射性；风险评估

DOI: 10.33142/ect.v3i9.17883

中图分类号: TU504

文献标识码: A

Detection of Radioactive Substances in Building Materials and Health Risk Assessment

ZU Honggang

Anpu Testing Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215100, China

Abstract: With the rapid development of construction projects in China and the improvement of quality of life, building materials play an important role in both new and existing buildings. Recently, the Ministry of Housing and Urban Rural Development has put forward the requirement of building good houses and constructing them into green, low-carbon, intelligent, and safe 'good houses'. In the fast-paced life, health has become a topic of concern for people, and building materials and the environment directly affect the quality of houses and people's health. In the process of construction and finished product use, the harmful limit of building materials is increasingly being considered, whether they meet the standard requirements in the early stage of construction, and whether they cause harm to people in the later stage of use. This article briefly describes the classification indicators, experimental testing, and health risk assessment of radioactive substances in inorganic non-metallic building materials, providing reference opinions for construction projects and residential decoration.

Keywords: inorganic non-metallic; radioactivity; risk assessment

1 建筑材料分类与技术要求

建筑材料按功能和化学组成大体主要分三类，主要包括有机、无机和复合材料。本文主要从无机非金属材料的放射性限量方面阐述。无机非金属材料包括主体和装饰装修两种材料，无机非金主体材料主要包括水泥、砂、砖、石、砼、实心砌块、混凝土预制构件。无机非金装修装饰材料主要包括建筑卫生陶瓷、石材、无机粉状粘结材料、石膏制品等。放射性主要检测指标有外照射指数 I_r 和内照射指数 I_{Ra} ，然而检测结果技术要求不尽相同，详见表 1 和表 2。

表 1 中对空心率 $>25\%$ 的材料，镭-226、钍-232、钾-40 比活度放射性，应同时满足 $I_r \leq 1.3$ 且 $I_{Ra} \leq 1.0$ ，所以大家要注意这里引出空心率的概念。材料空心制品的空心体积与整个建材空心体积之比的百分率。表 2 中 A 类装修装饰材料使用范围不受限制，B 类不可用于 1 类民用的内饰面，但可用于 2 类工民建内饰及其它一切外饰面。C 类装修材料只用于外饰面和室外其它用途。当不满足 A、B 类装修材料要求时，满足外照射指数 ≤ 2.8 时定义为 C 类装饰装修材料。

表 1 无机非金主体材料放射性限量

试验项目	限量
内照射指数 I_{Ra}	≤ 1.0
外照射指数 I_r	≤ 1.0

表 2 无机非金装饰装修材料放射性限量

试验项目	限量	
	A 类	B 类
内照射指数 I_{Ra}	≤ 1.0	≤ 1.3
外照射指数 I_r	≤ 1.3	≤ 1.9

注：无论是 I 类还是 II 类民用建筑工程，使用的无机非金主体建筑材料均必须符合《建筑材料放射性核素限量》GB6566 的要求，I 类民用建筑室内装饰装修采用的无机非金装修材料放射性限量应符合 A 类规定。

目前，国内外普遍认同的意见是：将建筑材料的内、外照射问题一并考虑，经过理论推导、简化计算，提出了一个控制内外照射的统一数学模式，即：

$$I_{Ra} = C_{Ra}/200 \leq 1 \quad (1)$$

$$I_r = C_{Ra}/370 + C_{Th}/260 + C_K/4200 \leq 1 \quad (2)$$

式中： C_{Ra} ——建筑材料中天然放射性核素镭-226 的放射

性比活度：

C_{Th} ——建筑材料中天然放射性核素钍-232 的放射性比活度；

C_K ——建筑材料中天然放射性核素钾-40 的放射性比活度。

建筑工程中使用的无机非金属建筑主体材料制品混凝土、预制构件等制品，如所使用的原材料(水泥、砂石等)的放射性指标合格，制品可不再进行放射性指标检验。凡能同时满足公式（1）、公式（2）要求的建筑材料，即为控制氡-222 的内照射危害及 γ 外照射危害达到了“可以合理达到的尽可能低水平”，即在长期连续的照射中，人体所受到的电离辐射照射的年有效剂量当量不超过 1mSv。我国早在 1986 年就接受了这一概念，并依此形成了国家标准《建筑材料放射性核素限量》GB 6566。

2 无机非金属放射性检测

通用规范要求建筑工材料中所采用的无机非金材料必须有放射性指标检测报告。国家有关部门曾对无机非金装修材料多次抽样检测，发现部分材料放射性超标情况较多，因此要求采用的无机非金主体建筑材料和装饰装修建筑材料必须有放射性限指标检测报告。经过多年来的抽查检测汇总，大理石石材未发现超标情况，可以放开使用。

检测所用设备包括低本底多道 γ 能谱仪、天平(量感 0.1g)。此类设备在设计时就考虑到了辐射安全，它使用的标准物质均为豁免级放射源，即使标准源丢失或损毁，也不会作为放射性事故处理。 γ 能谱仪是基于 γ 射线与物质相互作用原理的核辐射探测设备，主要用于检测放射性

物质的 γ 射线能量。其主要功能包括 γ 能谱测量、核素识别及放射性元素含量分析，包括取谱、活度分析(相对效率法测量、逆矩阵法解谱)、能量刻度(贝塞尔曲线拟合)、自动寻峰(对称零面积法)、自动稳谱(特异多向性参数最小二乘法)等基本功能，可应用于铀矿勘探、地质填图、环境监测(如建材放射性检测)和核应急响应等领域。 γ 能谱仪通过探测器将 γ 射线转换为电脉冲信号，脉冲高度与射线能量成正比，经脉冲高度分析器和计数器处理后形成能谱。其探测机理包括光电效应、康普顿效应和电子对效应，不同探测器(如高纯锗、NaI(Tl)晶体)通过特定物理效应实现能量分辨，进口品牌的无钾 γ 射线探测器，探测器含钾量接近于零，利于测量低活度含 40K 的模拟土壤样品(如图 1)。

图 1 的数据表明：由于探测器材料中钾的含量极低，背景辐射的影响大大减少，更加灵敏，能够检测到更微弱的辐射信号，能够减少测量中的随机误差，提高测量的重复性和可靠性。

试验步骤：检测样品先取样，随机抽取两份，每份不少于 2kg，一份试验，一份留样封存。从一份样品中取出打碎磨细，并过 0.16mm 筛，将其放入与标样品形状一致的样品盒中，天平称重，密封，待测。这里简单介绍一下标样，放射性标准是经过准确测量、对比、公认的，可作为放射性活度标准计量的放射性物质或制品，早在 80 年代初，称之为标准放射源，当时已有近百种核素的标准放射源。放射源当按释放射线类型可分为 α 放射源、 γ 放射源、 β 放射源、和中子源等， α 射线标准源最常用的是氧化铀 (U_3O_8)。

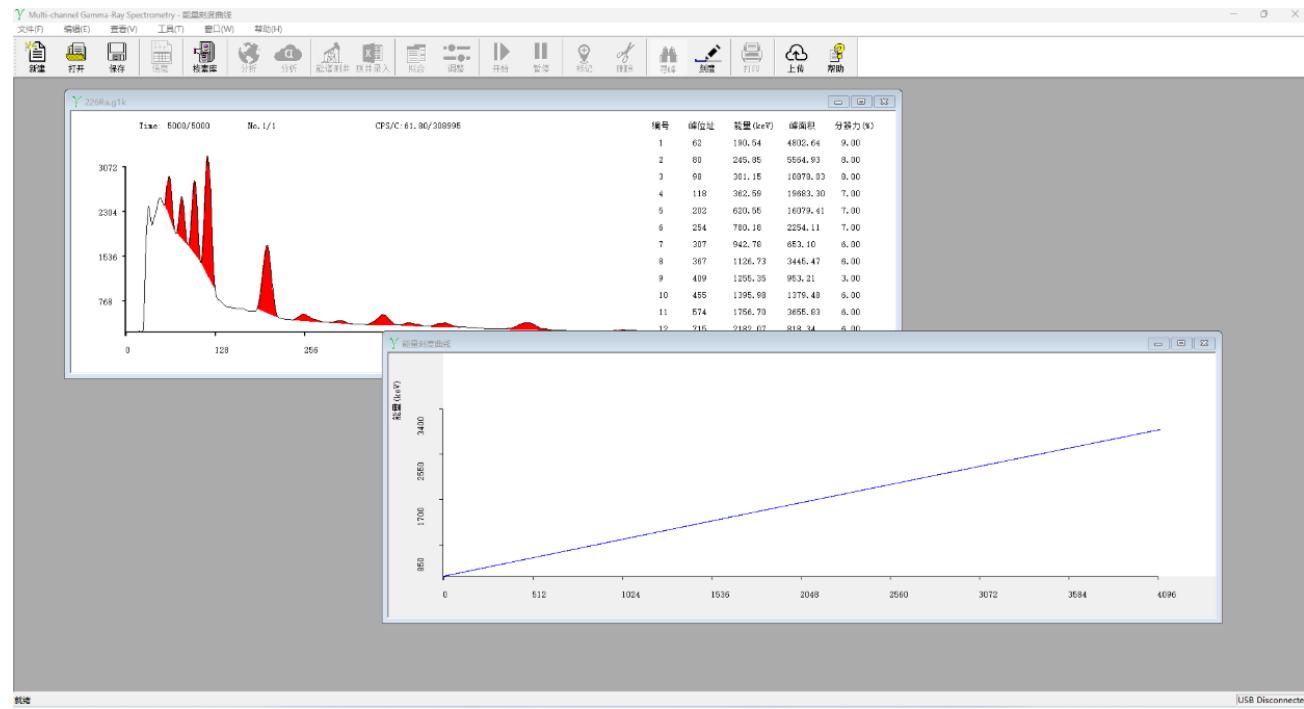


图 1 无钾 γ 射线检测器低活度(含 40K) 土壤样品检测

当氧化铀 (U_3O_8) 储存超过 ^{234}Th (UX_1) 的十倍半衰期 (24.1d), 使 ^{238}U 与 ^{234}Th 、 ^{234}Pa 达到放射性平衡, 是常用的 β 标准源。 γ 射线标准源使用的是密封的与衰变子体达到放射性平衡的纯镭制成的。当按形态分为液态、固态、气态三类。它们分别有各自用途和特点, 但在特定情况下并不适用, 随着技术的进步, 现在大多采用标准样, 该标准样品为人工制备, 它的特点是与待测样品的物理、化学特性相同或极其接近, 且含有已知量的放射性核素, 譬如供环保及卫健部门的环境样品, 例如土壤、水等, 以及食品样品监测用的标准样品, 如肉、牛奶类等, 建材实验室目前采

用的是 γ 放射性标准源, 用该标准源放进设备进行试验, 获得实验室对设备的标定数据, 数据如下 (图 2~图 5)。

通过以上标准源试验数据来看, 按标准测量时间测量结果在范围内, 表明设备状态良好。

实验室样品试验。依据 GB655 检测标准及设备操作规程, 下面例举不同产地、不同部位的陶瓷制品对其放射性进行检测汇总, 表 3 为样品基本信息。

①通体大理石, 称重样品质量为 285.4g, 试验结果如下:

40K=1350.77Bq/kg Ua=9.0% k=2

226Ra=127.29Bq/kg Ua=4.0% k=2

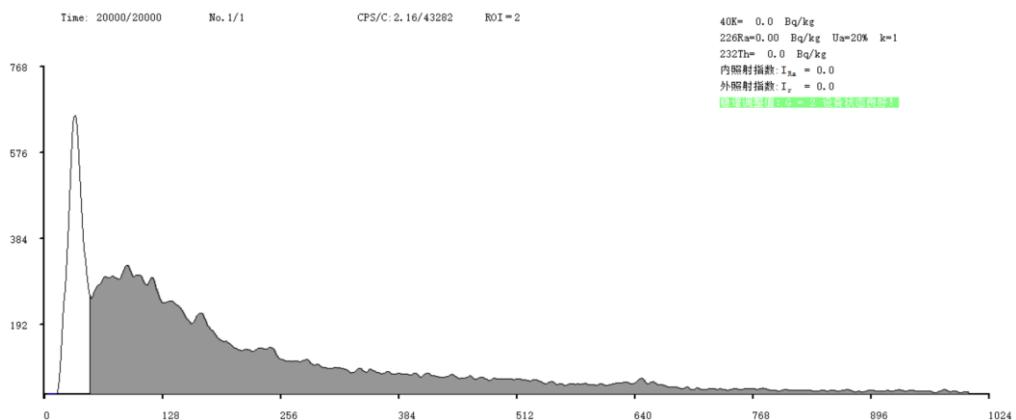


图 2 γ 放射性标准源设备进行标定数据 Base 值

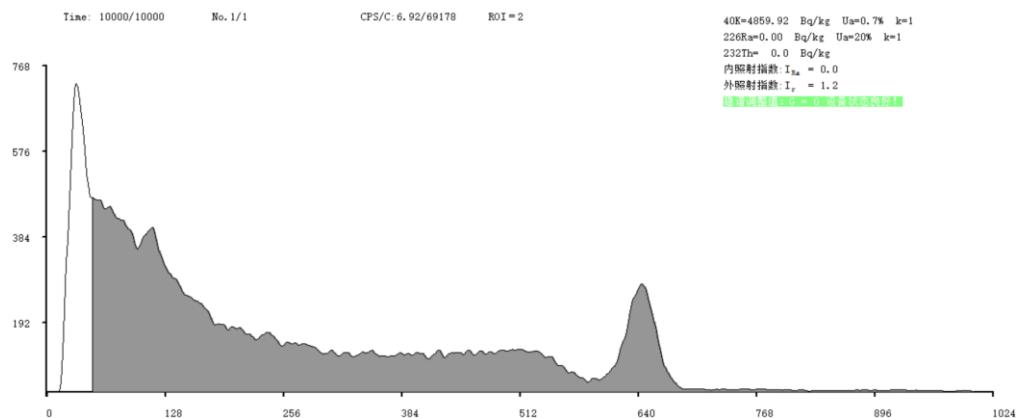


图 3 γ 放射性标准源设备进行标定数据 40_K 值

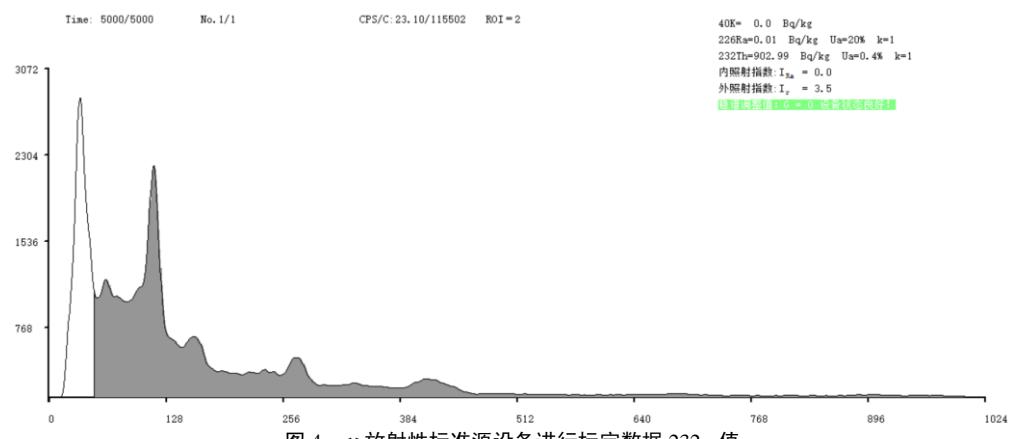


图 4 γ 放射性标准源设备进行标定数据 232_{Th} 值

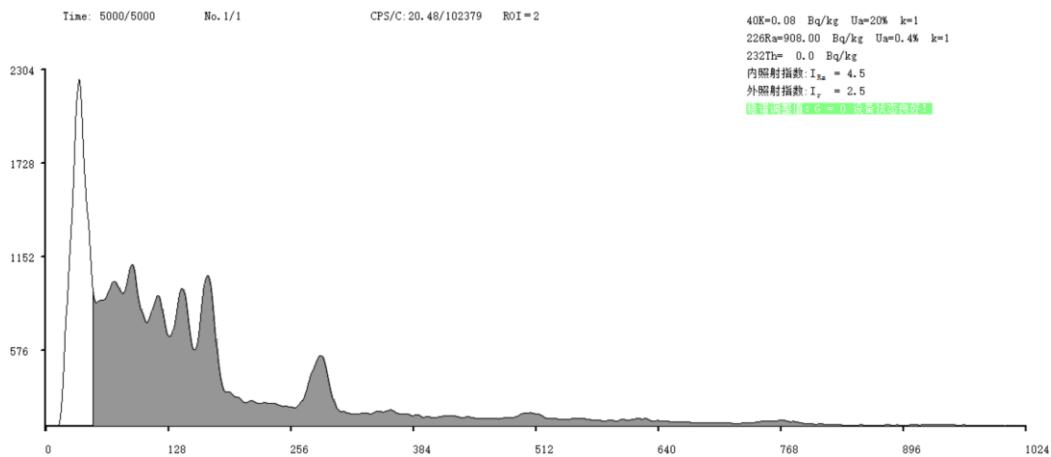


图 5 γ 放射性标准源设备进行标定数据 226_{Ra} 值

表 3 样品基本信息

品种	序号	样品名称	厂家(产地)	结构部位	测试次数/重量
陶瓷砖	1	通体大理石	淄博金斯威	地面	10/285.4g
	2	瓷质釉面砖	佛山金满堂	地面	10/318.6g
	3	经典石代瓷砖	蒙娜丽莎	地面	10/311.5g
	4	地砖	佛山奥古特	地面	10/301.5g
	5	中板	佛山新卓悦	卫生间墙面	10/296.2g
	6	自由连纹通体大理石	广东佛山	地坪	10/306.2g

232Th=36.75Bq/kg Ua=12.8% k=2

外照射指数: $I_r=0.7$

内照射指数: $I_{Ra}=0.6$

曲线图

外照射指数: $I_r=0.8$

图 6: 序号①通体大理石放射性曲线图

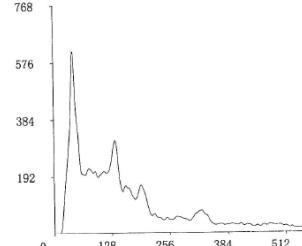
②瓷质釉面砖, 称重样品质量为 318.6g, 试验结果如下:

40K=1020.57 Bq/kg Ua=11.2% k=2

226Ra=117.88 Bq/kg Ua=4.0% k=2

232Th=62.23 Bq/kg Ua=7.0% k=2

内照射指数: $I_{Ra}=0.6$



外照射指数: $I_r=0.8$

图 6 序号②瓷质釉面砖放射性曲线图

③经典石代瓷砖, 称重样品质量为 311.5g, 试验结果

如下:

40K=1058.15 Bq/kg Ua=10.4% k=2

40K=1115.45 Bq/kg Ua=10.4% k=2

226Ra=123.77 Bq/kg Ua=4.0% k=2

226Ra=123.77 Bq/kg Ua=4.0% k=2

232Th=37.04 Bq/kg Ua=11.6% k=2

232Th=39.05 Bq/kg Ua=11.6% k=2

内照射指数: $I_{Ra}=0.6$

外照射指数: $I_r=0.8$

曲线图

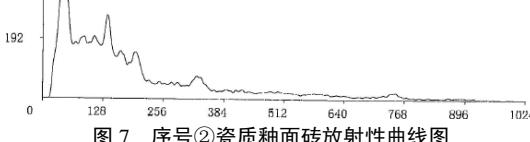


图 7 序号③经典石代瓷砖放射性曲线图

④地砖, 称重样品质量为 301.5g, 试验结果

如下:

40K=1058.15 Bq/kg Ua=10.4% k=2

40K=1115.45 Bq/kg Ua=10.4% k=2

226Ra=117.41 Bq/kg Ua=4.0% k=2

226Ra=123.77 Bq/kg Ua=4.0% k=2

232Th=37.04 Bq/kg Ua=11.6% k=2

232Th=39.05 Bq/kg Ua=11.6% k=2

内照射指数: $I_{Ra}=0.6$;

外照射指数: $I_r=0.8$

曲线图

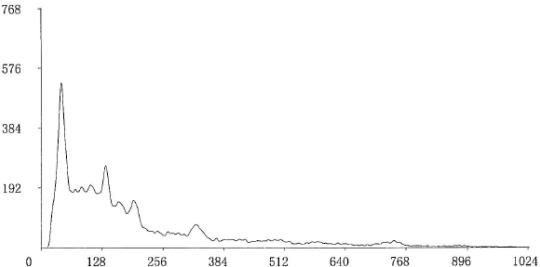


图 8 序号④地砖放射性曲线图

⑤中板, 称重样品质量为 296.2g, 试验结果如下:

40K=1239.83 Bq/kg Ua=10.2% k=2

226Ra=144.47 Bq/kg Ua=3.6% k=2

232Th=61.16 Bq/kg Ua=7.8% k=2

内照射指数: $I_{Ra}=0.7$

外照射指数: $I_r=0.9$

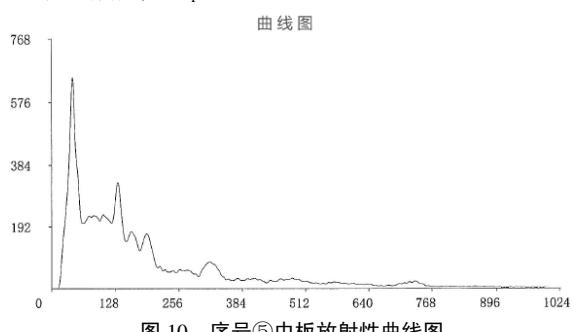


图 10 序号⑤中板放射性曲线图

⑥自由连纹通体大理石, 称重样品质量为 306.2g, 试验结果如下:

40K=1070.53 Bq/kg Ua=11.4% k=2

226Ra=145.19 Bq/kg Ua=3.4% k=2

232Th=58.90 Bq/kg Ua=7.8% k=2

内照射指数: $I_{Ra}=0.7$;

外照射指数: $I_r=0.9$

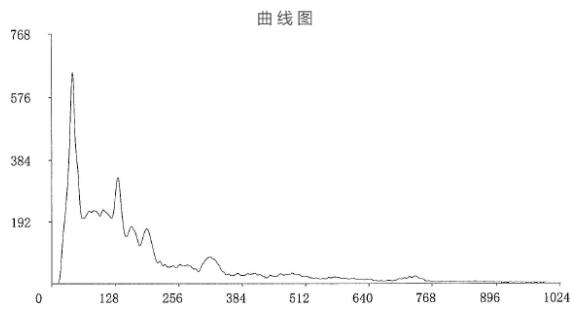


图 11 序号⑥自由连纹通体大理石放射性曲线图

在此试验过程中需注意测量不确定度。样品的比活度和大于 37 Bq · kg⁻¹ 时, GB 6566 标准要求测量不确定度 $\leq 20\%$ 。根据 JJF1059.1 《测量不确定度评定与表示》输入量 C_{Ra} 、 C_{Th} 、 C_K 的不确定度来源有两部分: 一是测量重复性引入的标准不确定度 U_{1rel} , 采用 A 类方法进行评定; 二为低本底多道 γ 能谱仪、天平引入的标准不确定度 U_{3rel} , 采用 B 类方法进行评定。

2.1 检测重复性引起的不确定度

依据 GB 6566, 对广东佛山某品牌墙面陶瓷砖进行试

验, 共取 10 组数据。试验数据见表 4:

试验结果的最佳估计值: $\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_x$:

根据公式计算得 $C_{Ra}=95.05$ Bq · kg⁻¹, $C_{Th}=55.64$ Bq · kg⁻¹, $C_K=613.36$ Bq · kg⁻¹。

根据贝塞尔公式, 单个试验结果值

$$f_x \text{ 实验标准差为 } s(c_x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}$$

根据公式计算得 $S_{Ra}=2.94$ Bq · kg⁻¹, $S_{Th}=2.79$ Bq · kg⁻¹, $S_K=33.61$ Bq · kg⁻¹。

计算检测重复性引起的 A 类标准不确定度 $U_1 = \frac{s(t_x)}{\sqrt{n}}$ 。

根据公式计算得 $U_{Ra}=0.93$ Bq · kg⁻¹, $U_{Th}=0.88$ Bq · kg⁻¹, $U_{Th}=10.63$ Bq · kg⁻¹。

A 类相对标准不确定度 $U_{1rel} = \frac{U_{Ra}}{c} = 0.98\%$, $\frac{U_{Th}}{c} = 1.59\%$, $\frac{U_K}{c} = 1.73\%$ 。

2.2 多道 γ 能谱仪引起的相对标准不确定度 U_{2rel}

放射性检测的不确定度来源于仪器的测量不确定度, 查设备的校准证书, 校准证书给出得置信概率取 $k=2$ 时的不确定为 7.00%, 因此 $U_{2rel}=7.00\%$ 。

2.3 合成标准不确定度评定

由于检测重复性引起的不确定度、 γ 能谱仪引起的不确定度彼此独立或无关, 因此放射性测量不确定度为:

$$U_{rel}(T) = \sqrt{U_{1rel}^2 + U_{2rel}^2}$$

根据公式计算得 $U_{rel}(Ra) = \sqrt{0.98\%^2 + 7.00\%^2} = 7.07\%$, $U_{rel}(Th) = \sqrt{1.59\%^2 + 7.00\%^2} = 7.18\%$, $U_{rel}(K) = \sqrt{1.73\%^2 + 7.00\%^2} = 7.21\%$ 。

2.4 扩展不确定度评定

根据 JJF1059.1-2012, 在通常情况下(置信概率为 95%)包含因子 $k=2$, 因此比活度扩展不确定度 $U_{95rel}(T)=U_{rel}(T) \times 2$ 。

根据公式计算得 $U_{rel}(Ra) = 7.07\% \times 2 = 14.14\%$, $U_{rel}(Th) = 7.18\% \times 2 = 14.36\%$, $U_{rel}(K) = 7.21\% \times 2 = 14.42\%$ 。

2.5 试验结果表示

比活度测定不确定: $C_{Ra}=(95.05 \pm 13.44)$ Bq · kg⁻¹, $C_{Th}=(55.64 \pm 7.99)$ Bq · kg⁻¹, $C_K=(613.36 \pm 88.46)$ Bq · kg⁻¹, $K=2$, 其中扩展不确定度 $U_T=13.44$ Bq · kg⁻¹、 7.99 Bq · kg⁻¹、 88.46 Bq · kg⁻¹ 是由标准不确定度 $U_{rel}(T)=7.07\% 、 7.18\% 、 7.21\%$ 乘以比活度和包含因 $k=2$ 得到, 取包含因子 $k=2$ 。

表 4 广东佛山某品牌墙面陶瓷砖 10 组数据汇总(单位: Bq · kg⁻¹)

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
放射性	C_{Ra}	99.68	97.52	97.88	95.54	96.53	90.37	91.54	94.46	92.92
	C_{Th}	49.79	55.50	54.94	55.20	55.43	59.76	57.10	53.06	58.08
	C_K	671.77	581.37	652.19	562.68	606.41	594.86	598.59	601.31	642.05

2.6 内照射指数按式 $I_{Ra} = C_{Ra}/200 = 0.4752$

外照射指数按式 $I_r = C_{Ra}/370 + C_{Th}/260 + C_K/4200 = 0.6169$ 。

以上数据是本实验室随机抽样检测结果，并不代表其产地的普遍水平，通过以上数据，可以看出大理石内照指数为 0.6, 0.7，外照指数为 0.8, 0.9，小于标准要求。瓷质釉面砖、石代瓷砖、地砖、中板内照射指数分别为 0.6, 0.6, 0.6, 0.7，及外照射指数分别为 0.8, 0.7, 0.8, 0.9，均满足标准要求，并且数据均匀都接近，离散性小。

3 健康风险评估

建筑材料中所含的长寿命天然放射性核素，会放射 γ 射线，直接对人体构成外照射危害。 γ 射线外照射危害的大小与建筑材料中所含的放射性同位素的比活度相关，还与建筑物空间大小、几何形状、放射性同位素在建筑材料中的分布均匀性等相关。

通过文中表 3 汇总试验数据表明无机非金属建筑材料的内照射指数和外照射指数都满足标准要求，足以证明材料中天然放射性核素的放射性比活度很小，对人体没有危害。但是不能代表一点没有。那么建筑材料如果超出通用规范要求，放射性核素对人体的危害有哪些呢？

无机非金属材料瓷砖对人体通常有两方面危害，一是体内辐射，二是体外辐射。体内辐射首先是氡对人体的辐射，氡是一个具有放射性的天然物质，无味无色，具有易分散、溶于水，且很简单溶于脂肪的特点。由于氡对人体脂肪有很高的“亲和力”，若是人体长时间吸入很多的氡，它还会影响人的神经系统，使人精神不振，昏昏欲睡。瓷砖中所释放出来的氡主要是源于一种叫作镭的化学物质。这就是我们上文提到的放射性核素中天然核素之一镭-226 放射性比活度，镭的衰变过程中会产生氡，氡是镭衰变链的中间产物，最终衰变生成铅，氡进入人体呼吸道

后，在未衰变前，一部分仍可随呼吸活动被呼出体外，另一部分黏附在呼吸道上被人体吸收，除了从呼吸道吸入以外，少量也可在咽喉部随吞咽动作进入消化道，在体内对人形成辐射，沉积在呼吸系统，释放 α 粒子造成内照射损伤，它在人体内部的辐射会使细胞发生异变，严重会演变成肺癌；体外辐射来源于原材料中含有化学元素，比方镭、钍等衰变发作的 γ 、 β 射线。 γ 射线的穿透力很强。会穿透人体并和体内细胞发生碰撞，会损坏人体的淋巴细胞，从而使人的免疫力下降。 β 射线射程较短，对小孩的影响较大，不过由于其穿透力相对较弱，一本书就可以挡住它的穿透力。若是家中有瓷砖破损了需要及时修补，由于破损的瓷砖微粒掉入食物旁边不易被发现，并且破损的瓷砖粉末更容易在空气中被人呼吸进入人体，对人体形成损害。所以主体材料及装饰材料在使用前检测是十分必要的。

本文结合标准规范就建筑材料分类和主体材料、无机非金属材料放射性技术指标进行了简述。并且针对无机非金属材料的放射性限量及其试验检测方法进行介绍，并对本实验室随机抽取瓷砖样品试验结果进行汇总分析。结合本文试验数据，对无机非金属材料对人体健康进行风险评估。

【参考文献】

- [1] GB 6566-2010 《建筑材料放射性核素限量》[S].
 - [2] 顾培龙, 姜让荣. 建筑材料中放射性物质限制标准的若干建议[J]. 核电子学与探测技术, 2003(3):25.
 - [3] 田军伟. 关于建筑材料放射性检测的探讨[J]. 科技创新与应用, 2014(18):46.
 - [4] 宋建华, 杨明亮. 建筑材料放射性的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2008(4):50.
- 作者简介：祖洪刚（1980.3—），单位名称：安谱检测技术（江苏）有限公司，毕业学校和专业：东北林业大学.土木工程。