

[11] Mitrović and Wu Qiulin, 3rd Aust.-Yug.-It. Chem. Eng. Conf., Gratz, Sept. 1982.
 [12] Baszkin, A. et al., *J. of Colloid and Interface Sci.*, **43**, 190—202 (1973).

[13] Baszkin, A. et al. *ibid*, 473—477 (1973).
 [14] Lenka, S. and Nayak, P. L., *J. Appl. Polym. Sci.*, **27**, 1959—1964 (1982).

粉煤灰建材制品的放射性对居民的辐照

方 栋 李凤翔 田宜屯 徐凤刚
 (清华大学核能研究所) (水电部环境保护办公室)

由于任何来自天然环境的建筑材料都含有一定的天然放射性核素,因此,地球上几乎所有的人都接受了由建材中天然放射性造成的辐射,只是不同材料含有天然放射性的数量不同、引起的照射剂量不同而已。城市居民大多数时间在室内活动,随着工业的发展,工业废渣(尤其是粉煤灰)广泛被用来作为建筑材料,对居民的照射所占的比例也就比较大。那么,粉煤灰中天然放射性水平如何?制成建材会给人们带来多大的照射剂量?这是近年来人们十分关注的问题之一,也是粉煤灰资源进一步开发利用的一个重要问题。本文将简略介绍有关粉煤灰建材的放射性对居民的附加辐照。

一、粉煤灰中天然放射性核素含量

和一切天然物质一样,粉煤灰中的放射性来源于它所含的铀、钍和它们的放射性衰变子体,以及钾-40。因为非挥发性元素在燃烧过程中会进行富集,在粉煤灰中,这些放射性核素含量和在煤中比较大约要高2—5倍。表1给出了我国20余个大型燃煤电站所用的煤与粉煤灰的多元素中子活化分析结果的平均值和范围,以及国外有关煤、土壤、岩石的分析结果。由表1可见我国主要产煤地区煤的天然放射性核素含量比美国的要高一些,煤的天然放射性核素含量与花岗岩相近。

表2列出了某些国家不同建材中天然放

表 1 天然物质中天然放射性核素的含量

材料	地点	平均值(最小值—最大值)			参考文献
		K(%)*	U-238(ppm)	Th-232(ppm)	
煤 粉煤灰	中国	0.30(0.06—0.78)	5.13(0.3—17.1)	10.6(3.4—24.4)	
	中国	1.11(0.06—2.69)	13.5(5.4—47.8)	34.7(16.4—69.4)	
煤	美国西部		1.2	2.3	[1]
	美国东部		1.5	4.4	
	伊利诺斯州		1.5	2.1	
土壤	中国广东	0.68	2.1	8.4	[2]
	全世界平均值	1.1(0.49—2.9)	2.12(0.52—2.6)	6.4(1.5—12)	[3]
岩 石 花岗岩 砂 岩 页 岩	美国	2.6	4	12	[4]
		1.1	1.2	6	
		2.7	1.3	1.3	

* 天然钾中 ⁴⁰K 的丰度为 0.0118%

表 2 各国不同建材中放射性强度

材料	国别	平均放射性强度 (pci/g)			$D_{4\pi}$ ($\mu\text{rad/h}$)	文献
		^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th		
砖	西德	16	2.6	2.6	26	[3]
	瑞典	25	2.6	3.4	33	
红砖	苏联	20	1.5	1.0	16	
粘土砖	英国	17	1.4	1.2	16	
混凝土	西德	15	1.8	1.7	19	
重混凝土	瑞典	9	1.5	1.9	21	
	苏联	15	0.9	0.8	12	
轻混凝土	苏联	14	2.0	0.9	15	
水泥	西德	5.2	1.2	1.2	11	
	瑞典	6.3	1.5	1.5	13	
	苏联	6	1.2	1.2	8	
天然石膏	西德	2	<0.5	<0.3	<4	
	英国	4	0.6	0.2	4	
花岗岩	西德	33	2.6	22	30	
砾砂	西德	7	<0.4	<0.5	<6	
碎石	瑞典	22	1.3	1.9	20	
煤灰	西德	19	5.7	3.5	42	
	英国	15	3.7	0.6	20	
煤灰	中国	9	3.1	3.6	30	
煤灰砖	中国广西	10	5.7	3.1	36	
普通红砖	中国	13.6	1.32	1.4	15.4	
炭化砖	中国湖北通城	9.6	23.2	0.34	78.1	
	中国湖北崇阳	8.8	14.4	0.31	49.8	

放射性核素的含量。为了便于对不同建材的辐射特征作比较,假定建材中的铀、钍和它们的衰变子体处于放射性平衡状态(如镭-226的放射性和铀-238的放射性强度是相同的)。用由建材构成的无限厚的空心球体中心的空气吸收剂量 $D_{4\pi}$ 作为建材辐射特征来比较。 $D_{4\pi}$ 是根据 Beck, H. L.^[5] 给出的天然放射性核素和空气中吸收剂量的转换因子,按下式计算:

$$D_{4\pi} = K_{4\pi \cdot K-40} C_{K-40} + K_{4\pi \cdot U-238} C_{U-238} + K_{4\pi \cdot Th-232} C_{Th-232} \quad (1)$$

式中 C_{K-40} 、 C_{U-238} 、 C_{Th-232} 分别为建材中 K-40、U-238 (或 Ra-226)、Th-232 的含量 (Pci/g); $K_{4\pi K-40}$ 、 $K_{4\pi U-238}$ 、 $K_{4\pi Th-232}$ 分别为 4π 立体角条件下 K-40、U-238、Th-232 的转换因子,它们的数值见表3。

表 3 单位浓度在球中心的空气吸收剂量

核素	空气吸收剂量 ^[5] ($\frac{\mu\text{rad}}{\text{y}} / \text{pci/g}$)	空气吸收剂量 ^[6] ($\frac{\mu\text{rad}}{\text{y}} / \text{pci/g}$)
^{40}K	$0.16 \times 2 = 0.32$	0.33
^{238}U	$1.58 \times 2 = 3.16$	3.83
^{232}Th	$2.45 \times 2 = 4.9$	4.82

二、建筑物室内的外照射剂量

建筑物室内的外照射剂量率一般都要在建筑物建成后才能测得,它不仅和建材内天然放射性核素含量有关,而且与建筑物的墙厚、房间的大小、门窗的大小、房间楼板和地面的材料有关,准确计算是十分困难和复杂的。

估计建筑物室内外照射剂量比较方便的方法之一是 Karpov^[6] 建议的方法,估计室内

空气剂量率的上限可用(1)式,至于转换因子取文献[5]和[6]的差别不大. Beck, H. L.^[5]的转换因子是取 2π 立体角条件下得到的转换因子的 2 倍, Karpov^[6] 考虑了反散射的存在,而且与文献[5]所用的 γ 谱分布不同,所以转换因子间还相差 10%.

实际上通常的墙面是有限大小的长方形, Karpov 建立了一个解析表达式(2)来计算面积为 $A \times B$, 厚度为 d 的墙,距离 C 点处的剂量率:

$$D_{a(A,B,C,d)} = D_{a,2\pi} \left\{ -\mu d E_i(-\mu d) + (1 - e^{-\mu d}) + \frac{2}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} n [\mu d E_i(\mu d S_1) - (1/S_1)(1 - e^{-\mu d S_1})] + [1 - (2/\pi) \operatorname{tg}^{-1} n] \times [\mu d E_i(-\mu d S_2) - 1/S_2 \times (1 - e^{-\mu d S_2})] \right\} \quad (2)$$

其中

$$n = B/A, S_1 = \sqrt{1 + 1.25m^2}, S_2 = \sqrt{1 + 1.25m^2n^2},$$

这里

$$m = A/C.$$

$E_{i(x)}$ 为积分指数函数,

$$E_{i(x)} = \int_1^\infty \frac{e^{-xt}}{t^i} dt;$$

μ 为能量吸收系数;

$$D_{a,2\pi} = 1.76C_{Ra} + 2.21C_{Th} + 0.154C_K(\mu\text{rad/h}).$$

Karpov 等利用式(2)计算了现代标准住房的剂量率,根据综合计算和测量的结果,认为现代砖房和混凝土建筑采用 $D_{a\text{室内}}/D_{a\text{外}} = 0.7$. 由此估算的室内空气吸收剂量与实验结果基本相符.

一个居民全年接受的全身外照射剂量为:

$$D = (CqD_a)_{\text{室外}} + (CqD_a)_{\text{室内}} \quad (3)$$

式中 D_a 为空气中的吸收剂量率, q 为居住因子(即居民在室内、外活动的时间份额), C 是

空气中吸收剂量转换成全身吸收剂量的转换因子(又称组织自屏蔽因子). 当室外 $C = 7.2(\text{mrad/y})/(\mu\text{rad/y})$, 室内 $C = 6.0(\text{mrad/y})/(\mu\text{rad/y})$ 时, 一般城市居民 $q_{\text{室外}} = 0.2$, $q_{\text{室内}} = 0.8$.

由于建筑物对居民造成的辐照剂量可按

$$D_{\text{建}} = D_a - (CD_a)_{\text{室外}} = q_{\text{室内}}[(D_a C)_{\text{室内}} - (D_a C)_{\text{室外}}] \quad (4)$$

计算. 我们可利用(1)(4)两式计算 $D_{a\text{室内}}$ 和 $D_{\text{建}}$ (取 $D_{a\text{室外}} = 92\text{mrad/y}$ ^{[2][7]}).

表 4 列出了根据 20 余个粉煤灰样品分析结果计算的 $D_{a\text{室内}}$ 和 $D_{\text{建}}$.

三、室内放射性氡气及其子体的浓度

由于天然放射性铀-238 和钍-232 在衰变过程中分别产生氡-222 和氡-220, 而氡气是一种惰性气体, 它能够从建材中渗出, 进入周围的空气中并被人体吸入. 尽管惰性气体不会被人体器官或组织吸收, 但氡-222 和氡-220 的放射性子体却很容易沉积于人的呼吸系统中, 造成人体的内照射, 人们对此很关注. 不过室内空气中氡-222 和氡-220 的浓度, 除和建筑材料中天然放射性 U-238 (或 Ra-228) 以及钍-232 的含量有关外, 还同建材的疏密程度, 室内的温湿度条件, 室内的通风状况有关. 虽然已有许多人测量了各种材料的室内氡-222、氡-220 的水平 and 它们的子体浓度, 但是由于测量条件不同, 也不便于相互比较.

我们借助于文献[3]的经验公式

$$C = C_0 + eT/(\lambda_v + \lambda)V \quad (5)$$

对粉煤灰砖房内的氡-222 浓度进行估计. 式中: e 是发射率 ($\text{pci}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$); T 是发射氡气的墙面积 (m^2); V 是房间的体积 (m^3); λ 是氡-222 的衰变常数(等于 0.00755 1/h); C_0 是房间外氡气的浓度 (pci/m^3); λ_v 是房间的换气次数.

考虑到氡-220 的半衰期只有 55 秒, 一般情况下它来不及从砖中渗出就已发生衰

变,因此对人的内照射贡献比氡-222 要小得多,故只作了氡-222 的浓度的估算。

我们的估算采用了如下条件: $T=42\text{m}^3$, $V=37\text{m}^3$, $e=0.05\text{pci/m}^3/\text{pci/g}$, $\lambda_p=1/h$, $C_0=810\text{pci/m}^3$, 估算结果列于表 4。结果表

明大多数粉煤灰建材盖的房子内氡气浓度一般是不高的,而且墙面抹上水泥灰浆,疏密程度要比砖好,所以实际情况要比计算结果更好,即氡气浓度实际上要比计算的结果低。普通住房的实测结果如表 5 所示^[8]。Pohl 等

表 4 不同粉煤灰砖房的外照射和氡-222 浓度的估算

序号	$D_{\text{外}}$ ($\mu\text{rad/h}$)	$D_{\text{住}}$ ($\mu\text{rad/h}$)	$D_{\text{屋}}$ (mrad/y)	$C_{\text{Rn-222}}$ (pci/l)	$\frac{C_{\text{K}}}{130} + \frac{C_{\text{U}}}{10} + \frac{C_{\text{Th}}}{7}$	C_{DHP} (pci/g)
1	24.5	17.2	19.3	1.17	0.727	7.04
2	27.1	19.0	26.8	1.36	0.759	7.09
3	37.3	26.11	56.7	1.37	1.07	9.75
4	23.8	16.7	17.1	1.36	0.64	6.21
5	34.3	24.0	47.9	1.57	0.94	8.97
6	34.8	24.3	49.1	1.55	0.96	9.09
7	41.7	29.2	69.7	1.40	1.19	10.9
8	23.5	16.5	4.13	1.3	0.66	6.1
9	34.0	23.8	47.0	1.40	0.966	8.88
10	52.3	36.8	101.7	2.10	1.45	13.7
11	27.5	19.3	28.1	1.33	0.76	7.18
12	28.4	19.8	30.2	1.50	0.76	7.41
13	16.8	16.8	-3.4	1.19	0.47	4.37
14	34.4	24.1	29.8	1.69	0.95	8.99
15	50.5	35.4	73.9	1.54	1.45	13.1
16	81.6	57.1	187.0	4.00	2.18	21.3
17	75.5	52.9	169.5	3.22	2.05	19.7
18	74.0	51.8	164.7	3.14	2.02	19.3
19	23.4	16.4	15.9	1.39	0.65	6.1
20	25.6	17.9	22.2	1.40	0.697	6.67
21	25.6	17.9	22.2	1.36	0.71	6.70
22	30.8	21.5	37.4	1.40	0.87	8.06
23	31.6	22.1	39.4	1.69	0.88	8.26

表 5 广西不同建材建筑的住宅中室内空气吸收剂量和氡气浓度实测值^[8]

房屋类型	空气中吸收剂量率 (mrad/h)	氡-222 浓度 ($\times 10^{-15} \text{Ci/l}$)	氡-220 浓度 ($\times 10^{-14} \text{Ci/l}$)
混凝土预制板房	8.95	7.52	2.8
水磨砖墙房	13.3	22.13	2.8
方砖地普通砖房	13.3	8.81	1.68
泥地旧式砖瓦房	17.6	7.98	1.97
三合土煤渣砖房	21.9	4.17	1.48
泥地泥砖瓦房	18.7	6.85	2.35
木板房	11.6	6.01	2.38
地下室	13.5	15.0	7.08
防空工事	18.0	970.7	43.37

指出正常环境中室内空气中 ²²²Rn 的浓度年平均值为 0.2—3 pci/l^[9]。

四、小 结

鉴于我国目前尚无建材中天然放射性含量的允许范围的标准，只能参照国外的有关标准进行比较。苏联国家辐射防护委员会 1971 年颁布的标准是：在室内的性腺外照射吸收剂量不超过 150mrad/y 的条件下，建材中 ⁴⁰K、²²⁶Ra、²³²Th 的容许浓度 (pci/g) 应满足

$$\frac{C_{K-40}}{130} + \frac{C_{Ra-226}}{10} + \frac{C_{Th-232}}{7} \leq 1.$$

在 1976 年颁布的辐射安全规定 (HPБ-76) 天然放射性核素的镭当量浓度

$$C_{\text{ЭKB}} = C_{Ra-226} + 1.26C_{Th-232} + 0.086C_{K-40} < 10\text{pci/g},$$

作为公共建筑物的建材限制，在此情况下，其最大的吸收剂量率为 100mrad/y。

目前世界上仅有苏联、波兰等少数国家制定了建材中的放射性标准，相比之下，苏联的标准更有可取之处。因此，我们选用它作为参照值，对所测的 23 个火电站粉煤灰做了

初步评定。结果表明其中大多数是满足要求的，即给居民带来的照射不大，少数电站的粉煤灰中铀、钍的含量偏高，目前应加以限制，待我国标准颁布后再作出明确规定。为了合理地开发粉煤灰资源，有关部门应共同努力，加强协作，尽快地制定出我国的建材标准。同时对开发方式也应进行评定，以选择符合国际辐射防护委员会第 26 号报告书建议的原则(正当、最优化)的最合理方案。

参 考 文 献

- [1] Ruch, R. R. et al., *J. Radioanalysis Chem.*, **38**, 415 (1977).
- [2] 广东高本底辐射研究组, 中华放射医学和防护杂志, **2**(2), 9(1982).
- [3] UNSEEAR, *Source and Effects of Ionizing Radiation*, (1977).
- [4] Ersenbud, M., *Environmental Radioactivity*, McGraw-Hill Book Company Inc., 1963.
- [5] Beck, H. L., USAEC CONF-720805-P1, 101—134 (1972).
- [6] Karpov, V. I., et al., *Health Physics*, **39**(5), 819 (1980).
- [7] 沙市市卫生防疫站, 中华放射医学和防护杂志, **1**(1), 52 (1981).
- [8] 崔广志等, 中华放射医学和防护杂志, **2**(4), 43 (1982).
- [9] Pohl, E., et al., *Health Physics*, **31**(4), 343 (1976).

天然放射性核素在使用含铀磷肥 作物中的蓄积规律*

杨 刚 廖 赤 武

(广西壮族自治区卫生防疫站)

在磷肥中，铀是以和海源性磷酸盐沉积物伴生的形式存在的，铀及其衰变系列的 ²²⁶Ra 等具有生物学意义^[1]。国内有的学者认为^[2]，当土壤中铀含量达 0.5 克/公斤泥时，所培育的农作物供人畜食用，每日摄入总铀量超过容许标准。为进一步探讨农作物从磷肥

中摄取铀等核素的转移蓄积规律，估价环境污染，为促进农业生产提供科学依据，我们从 1975 年起进行了本实验研究工作。

* 参加本工作的还有邱雪英、黄仕昭、黄玉龙、黄金庭、于双第、苏石、顾祖根、毛玉嬿、陈嘉春、谭承平、李定英等同志。对浦北县卫生防疫站、农科所、化肥厂给予的积极协助，谨表谢意。