

核设施气态流出物的环境 γ 吸收剂量 计算及实验验证

肖雪夫

(中国原子能科学研究院保健物理部, 北京, 102413)

采用有限烟云大气扩散模式, 计算了中国原子能科学研究院的 2 座核反应堆烟囱排放的放射性气态流出物在核反应堆附近产生的附加吸收剂量。对 1990—1992 年间 3 年的实验测量结果逐年进行了比较, 其偏差均在 62% 以内。

关键词 有限烟云 大气扩散 γ 吸收剂量率 气态流出物

核设施的气态流出物排入环境后所造成的附加吸收剂量是环境监测与保护等管理部门极为关切的数据之一。本工作采用有限烟云大气扩散模式, 对中国原子能科学研究院内 2 座研究堆的气态流出物高架排放对环境空气中产生的附加 γ 吸收剂量率进行计算。在与计算中相应的空间位置点上, 将采用高压电离室吸收剂量率连续监测仪进行长期的连续测量, 并对 2 种方法得到的结果进行比较和讨论。

1 简况

中国原子能科学研究院地处距北京市中心约 40 km 的房山区境内, 其地理座标为东经 116°28', 北纬 39°48'。该地区属大陆性季风气候, 冬季干旱多偏北风, 夏季温湿以偏南风为主, 春季多风沙, 一年四季昼夜温差变化较大。本地区的年均气温、风速、湿度、降水量分布及风玫瑰图等气候特征参见文献[1]。

实验测量点布置在中国原子能科学研究院院内一幢高 14 m 的 4 层楼顶上, 测点 M 与 1 号反应堆烟囱(高 44 m) 水平距离为 360 m, 与 2 号反应堆烟囱(高 60 m) 水平距离为 310 m, 其相对位置示于图 1。

2 计算方法

对于烟云或地面沉积物这一类扩展源, 空气中某点的 γ 吸收剂量与几百米内的放射性物质的分布有关。对于尺度小于 γ 辐射平均自由程的烟云, 在计算某点的 γ 吸收剂量时, 必须考虑来自烟云各组成部分的辐射。鉴于本工作实验测量点距烟云排放点较近, 计算中采用有限烟云模式。

假定有一源排放率为 Q_0 的连续烟柱, 则在烟柱附近 $(x, y, 0)$ 处的 γ 吸收剂量率 \dot{D} 可表示为^[2]:

$$\dot{D}(x, y, 0) = \frac{3.935 \times 10^{-14} \mu \mu_a E_\gamma Q_0 (Q_x / Q_0) (I_1 + K I_2)}{\bar{u}} \quad (1)$$

式中: $\dot{D}(x, y, 0)$ 为地面任意一点的 γ 吸收剂量率 ($\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$); μ_a 为空气能量吸收系数 (m^{-1}); μ 为空气总吸收系数 (m^{-1}); E_γ 为每次蜕变发出的 γ 光子平均能量 (MeV); Q_0 为烟囱排放放射性核素的排放率 ($\text{Bq} \cdot \text{h}^{-1}$); \bar{u} 为 x 方向风分量的平均值 (m/s); K 为 γ 射线积累因子 $(1 + K\mu r)$ 中的常数, $K = (\mu - \mu_a) / \mu_a$, r 为受照点到烟柱体积微分元的距离 (m); I_1, I_2 为求解烟云外照射 γ 吸收剂量方程时采用的积分式, 其定义式参见文献[2]; Q_x / Q_0 为初始放射性物质扣除沿途地面沉积损耗和放射性衰变损耗后的剩余份额。

为了估算长期平均吸收剂量率, 计算中必须考虑风频及各种大气稳定度的影响。通常的作法是: 针对不同风频和不同大气稳定度利用式(1)分别求出各自的吸收剂量率, 然后以风频和每种大气稳定度类型出现的频率为权重进行加权求和。

3 计算参量与计算结果

在正常运行情况下, 中国原子能科学研究院的 1、2 号 2 座反应堆经由高烟囱排入环境中的 γ 放射性核素主要是 ^{41}Ar , 其次还有少量 ^{60}Co 、 ^{131}I 等。由 1 号反应堆烟囱(以下简称 1 号烟囱)气态流出物 1981—1987 年实测数据分析可知, 其它 γ 放射性核素年排放量比 ^{41}Ar 年排放量至少低 5 个数量级^[3], 因此仅对高架排放的 ^{41}Ar 烟云在环境空气中造成的附加 γ 吸收剂量率进行计算。

表 1 给出了本厂区地面 10 m 高处风向 i 和大气稳定度 k 的联合频率分布 $f(i, k)$, 表中

表 1 风向、大气稳定度联合频率分布

Table 1 The joint frequency distribution of wind direction and atmospheric stability

稳定度	风 向															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
A	8.37	3.54	10.25	4.25	1.02	1.83	3.82	9.47	31.34	7.60	2.33		0.14		0.76	0.14
B	15.81	9.72	16.02	4.59	1.34	1.41	5.49	8.66	59.30	16.64	5.00	0.66	0.24		0.80	1.01
C	7.97	1.69	2.46	0.20	0.44	0.10	0.20	0.81	14.67	9.59	0.83	0.10	0.10		0.34	0.91
D	78.73	64.67	44.05	3.92	3.59	4.69	8.22	10.71	80.71	22.67	9.06	1.71	1.38	0.31	2.40	3.87
E	12.81	11.02	3.41	0.90	0.27	0.41	0.93	2.81	8.02	8.17	1.96	0.17	0.51		0.63	1.66
F	106.85	83.47	37.56	4.20	3.81	3.40	5.83	7.20	31.93	17.13	11.08	2.89	4.90	0.33	4.49	8.73

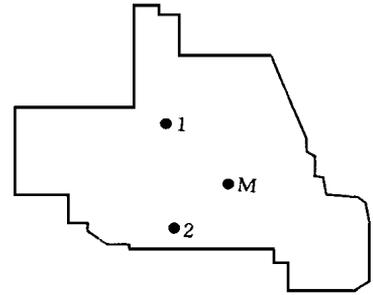


图 1 实验测量点与反应堆烟囱相对位置

Fig 1 The relative position for the monitoring point and two reactor chimneys

1——1 号反应堆烟囱; 2——2 号反应堆烟囱; M——实验测量点位置

值由文献[1]统计得到。连续烟柱中, y 和 z 方向上物质浓度分布的标准偏差 σ_y 、 σ_z 均由文献[1]给出, $\sigma = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2}$ 。本计算选用 P-G 曲线, 各 σ 值列于表 2。 I_1 和 I_2 值分别由文献[2]中的

积分式用数值积分求得。对于非地面的测量验证点而言, 计算 I_1 和 I_2 值时, 考虑了其高度修正。表 3 给出了 1、2 号 烟囱 1990—1992 年间年排放气态 ^{41}Ar 的量。

表 2 连续烟柱中物质浓度分布的标准偏差 σ_y 、 σ_z 和 σ 值

Table 2 The values of σ_y , σ_z , σ

稳定度	标准偏差/m					
	1 号烟囱			2 号烟囱		
	σ_y	σ_z	σ	σ_y	σ_z	σ
A	84	83	83	72	69	70
B	60	38	48	50	31	39
C	42	26	33	35	22	28
D	30	14	20	3	13	17
E	20	10.6	14	16	9.3	12
F	16	6.2	10	11	5.3	7.6

表 3 1990—1992 年间 1、2 号反应堆运行功率、时间及 ^{41}Ar 年排放量

Table 3 The reactors' operation data and the radioactivity (^{41}Ar) released from the chimneys (1990—1992)

反应堆烟囱号	年 份	平均功率/MW	运行时间/d	总释能/MW · d	^{41}Ar 排放量/Bq
1	1990	8.07	103.1	831.7	2.12×10^{14}
	1991	8.21	111.1	911.1	2.70×10^{14}
	1992	8.02	99.7	799.4	3.37×10^{14}
2	1990	2.94	63.4	186.5	7.20×10^{12}
	1991	3.39	74.5	252.9	5.86×10^{12}
	1992	3.62	141.1	510.9	8.81×10^{12}

各类大气稳定度的地面 10 m 高处风速列于表 4。应用下式可将地面 10 m 高处的风速转化为排放高度处的风速

$$u = u_{10}(h/10)^m \quad (2)$$

式中: u_{10} 为离地面 10 m 高处的风速 (m/s); u 为排放高度处风速 (m/s); h 为排放点高度 (m); m 为风速廓线系数。

风速廓线系数和 1、2 号烟囱高度处的风速也列于表 4。

表 4 各类稳定度的平均风速、风速廓线系数及烟囱排放口高度风速

Table 4 The average wind velocity at 10 m and chimneys' exit for different stability class

稳定度	10 m 高处平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		m 值 ¹⁾	44 m 高处平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		60 m 高处平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
A	1.14		0.01	1.32		1.36	
B	1.83		0.15	2.29		2.39	
C	2.78		0.20	3.74		3.98	
D	3.85		0.25	5.58		6.03	
E	2.76		0.35	4.64		5.17	
F	1.33		0.45	2.40		2.72	

注: 1) 取自文献[3]

计算中取 $Q_x/Q_0 = 1.0$, $E\gamma = 1.249 \text{ MeV}$, $\mu = 7.214 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, $\mu_a = 3.401 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。

为简化计算, 仅考虑了风向朝向计算点及其相邻的 8 个方位角区域。对于每个方位角区域, 均采用式(1)计算出各不同稳定度条件下所关心位置点上的吸收剂量率 $\dot{D}_{i,k}$, 然后以表 1 中列出的风向大气稳定度联合频率分布 $f_{i,k}$ 为权进行加权求和, 即可得到各反应堆烟囱高架排放气态流出物在计算位置点上产生的年平均 γ 吸收剂量率的计算值。现将计算值、实验值和以实测值为基准的计算值与实测值间的相对偏差列于表 5。

表 5 高架排放气态流出物在测点处产生的附加 γ 吸收剂量率的计算值与实测值

Table 5 The calculated and measured γ absorbed dose rate resulted from radioactive plumes

年 份	计算值/ $\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$	实测值 ¹⁾ / $\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$	偏差/%
1990	2.22	4.63	- 52
1991	2.48	4.77	- 48
1992	3.32	8.73	- 62

注: 1) 引自文献[4]

4 实验方法及结果

本工作采用高压电离室 γ 吸收剂量连续监测仪 1990—1992 年度的实测值^[4]对模型计算结果进行验证。该监测仪由高压电离室、小电流放大器、 γ 吸收剂量率自动连续记录仪和微型打印机构成。高压电离室对陆地 γ 的探测灵敏度为 $10^{-16} \text{ A}/(\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$, 监测仪测量陆地环境 γ 吸收剂量率时, 其总不确定度约为 11%^[5]。

该监测仪的工作方式为 10 s 采 1 次样, 5 min 对所采集的 30 个数据取平均, 1 h 对 12 个 5 min 的平均值再求平均并求出标准偏差值。5 min 的平均值和 1 h 的平均值及偏差值均可通过微型打印机输出或通过接口转录到盒式磁带中保存。

1990—1993 年底, 将上述连续监测系统安放在计算吸收剂量率的位置点上, 对 1、2 号烟囱高架排放气态流出物在测点处产生的附加 γ 吸收剂量率进行了长达 4 a 的连续监测。1993 年期间, 由于监测点楼顶翻修, 测量数据受人类活动干扰较大, 故本工作仅采用 1990—1992 年度的监测数据进行统计并与计算结果进行比较。

本工作将 1、2 号堆同时停堆期间作为测点处的吸收剂量率本底值。1990—1992 年间本底逐月变化情况示于图 2。3 a 间吸收剂量率本底值变化均呈现冬高夏低的规律。由反应堆运行产生的放射性气态流出物高架排放对测量点处的环境附加 γ 吸收剂量率贡献的年平均值得列于表 5。表 5 中的实验测量值是逐月开堆运行期间监测记录的 γ 吸收剂量率月平均值减去该月剂量率本底月平均值, 然后对全年参加统计的月份以开堆运行的天数为权加权平均得到。

5 讨论

1) 高架排放气态流出物产生的附加 γ 吸收剂量率的计算平均值与实验测量年均值在 62% 偏差范围内吻合, 说明本工作采用的计算模式和计算参数是可行的。

2) 计算值与实测值相比系统偏低, 其原因是: 测量点位置距 1、2 号烟囱较近, 烟云不管往哪个方位漂移, 都会或多或少地给测量点处的吸收剂量率大小造成影响, 而计算时只考虑了朝

向测量点及其邻近的 8 个方位的烟云产生的剂量; 仅对主要 γ 核素 ^{41}Ar 产生的吸收剂量进行了计算, 而没有计算其它核素(如 ^{60}Co 、 ^{131}I)和惰性气体的贡献, 其中有的核素(如 ^{131}I)是由于排放量少而予以忽略, 有的核素(如 ^{133}Xe)是没有排放量数据而无法计算。

3) 计算中采用的气象参数是 1989—1990 年的监测数据, 将这些参数延伸用于 1990—1992 年扩散计算, 与实际情况有所差异, 这可能是 1992 年计算值与实测值误差较 1990、1991 年大的另 1 个原因。

4) 本工作表明, 利用高压电离室 γ 吸收剂量率仪的监测数据, 结合 HPGe 谱仪分析烟云中各核素成分的相对含量并获取准确的大气参数, 完全可以通过反演技术推算核设施气态流出物中各放射性核素的排放量。

计算工作得到刘新河同志的热心帮助, 张永兴研究员和岳清宇研究员对计算工作给予了热情指导并对本文进行了认真审定, 夏益华研究员对本文提出了宝贵意见, 在此谨向上述同志表示衷心感谢!

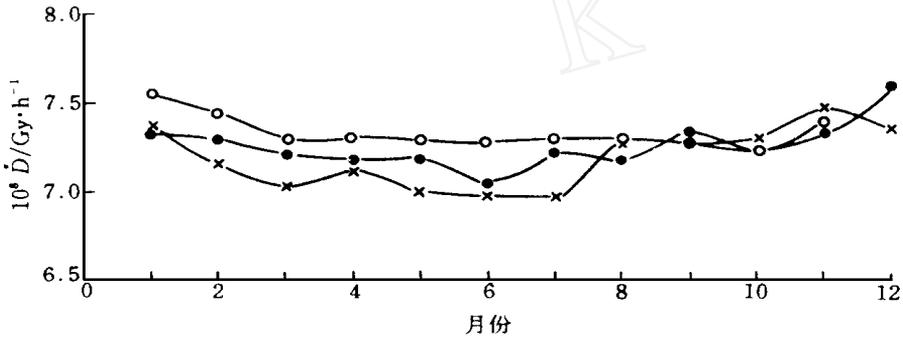


图 2 测点处吸收剂量率本底变化情况

Fig. 2 Monthly variation of environmental γ absorbed dose rate background from 1990 to 1992

x — 1990 年; ● — 1991 年; ○ — 1992 年

参 考 文 献

- 1 姜希文, 刘森林, 徐 , 等. 中国实验快堆(CEFR)环境影响报告书(可行性研究阶段)上册. 中国原子能科学研究院资料 1994
- 2 斯莱德 DH. 气象学与原子能. 张永兴, 胡二邦, 汪佳明, 等译. 北京: 原子能出版社, 1987. 323
- 3 金华晋, 贾占礼, 闫童林, 等. 重水研究堆安全分析报告. 中国原子能科学研究院资料 1993
- 4 岳清宇, 肖雪夫, 金 花, 等. 核设施环境连续监测. 中国原子能科学研究院资料 1995
- 5 岳清宇, 金 花, 江有玲, 等. 高压电离室环境辐射剂量率仪. 辐射防护, 1986, 6(1): 29

CALCULATION OF γ ABSORBED DOSE RATE RESULTED FROM THE NOBLE GAS PLUME AND COMPARISON WITH MEASURED RESULTS

Xiao Xuefu

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-83, Beijing, 102413)

ABSTRACT

The calculation of γ absorbed dose rate resulted from the noble gas plume, releasing from two reactor chimneys of China Institute of Atomic Energy, is made. The finite cloud atmospheric diffusion model is used in the calculation. The calculation values of γ absorbed dose rate are compared with measured values for years (1990—1992) and they are in agreement within 62%.

Key words Finite cloud Atmospheric diffusion γ absorbed dose rate Gaseous effluent

美刊公布世界核电状况

据美国《核新闻》杂志今年 3 月号报道, 核电运行机组数名列前 10 名的国家是: 美国, 109 个机组, 电功率 99673MW; 法国, 55 个机组, 电功率 57373MW; 日本, 50 个机组, 电功率 39655MW; 英国, 35 个机组, 电功率 12728MW; 加拿大, 22 个机组, 电功率 15439MW; 德国, 21 个机组, 电功率 22811MW; 乌克兰, 14 个机组, 电功率 12095MW; 瑞典, 12 个机组, 电功率 10075MW; 韩国, 10 个机组, 8170MW; 中国, 9 个机组, 6984MW, 其中, 6 套在台湾省。

按照在建机组统计, 前 10 名的国家是: 韩国, 8 个机组, 电功率 6700MW; 乌克兰, 6 个机组, 电功率 5700MW; 俄罗斯, 6 个机组, 电功率 5275MW; 法国, 5 个机组, 电功率 6410MW; 印度*, 4 个机组, 电功率 1748MW; 罗马尼亚, 5 个机组, 电功率 3100MW; 日本, 4 个机组, 电功率 4037MW; 中国, 4 个机组, 电功率 3170MW; 斯洛伐克, 4 个机组, 电功率 1664MW; 西班牙, 3 个机组, 2950MW。

摘自《科技新闻》1996 年第 4 期

* 引者注: 按排名顺序, 印度的在建机组数和电功率可能有误