

废空气烟羽 γ 剂量估算

朱连芳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

E. Pomplum K. Heinemann

(德国尤利希核子中心辐射防护与安全部)

(ASS/KFA Jülich)

摘要 本文叙述了高架点源非连续排放的废空气烟羽的 γ 剂量估算方法,并给出了部分估算结果,讨论了该方法的应用前景.

关键词 废空气烟羽, 短期扩散因子, γ 浸没剂量, 事故排放.

1 引言

高架点源排放的废空气烟羽产生的 γ 浸没剂量是用来评价核装置环境影响的主要外照射来源. Slade^[1] 给出了一系列公式和方法,用来计算在各种条件下的 γ 浸没剂量,但这些方法用来解决实际问题时,显得非常复杂. Rohloff 等人^[2,3] 给出了用于计算 γ 浸没剂量的计算机程序,但程序复杂,未得到广泛推广.

2 基本公式

由于 γ 光子射程大,因此在考虑废空气烟羽的 γ 浸没剂量时,必须考虑到整个烟羽的剂量贡献. 因此,在计算时,必须对整个烟羽的整个体积进行积分,并同时考虑 γ 射线在空气中的散射、吸收和剂量累积效应. 相应的 γ 浸没剂量可按如下公式表示

$$D_i = A_i \hat{X} A_{g_i} \quad (1)$$

式中, D_i 表示核素 i 的 γ 浸没剂量(Sv), A_i 表示核素 i 的放射性排放总量(Bq), g_i 为核素 i 的 γ 浸没剂量因子(Sv \cdot m²/Bq \cdot s),文献[4]给出某些放射性核素的 g_i 值; \hat{X} 被定义为 γ 浸没剂量扩散因子(s/m²).

图1表示废空气烟羽侧视图. 这里 H 是有效排放高度(m); x 方向是废空气烟羽的扩散方向,即风向;点 $P(x, 0, 0)$ 是地面参考点;

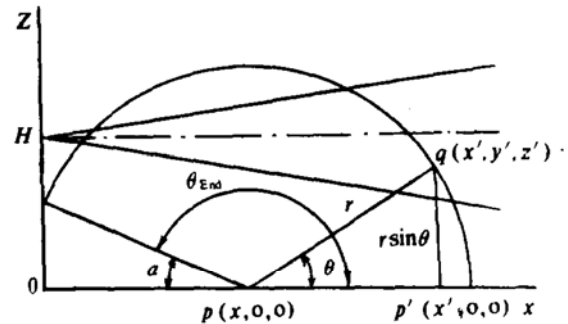


图1 废空气烟羽侧视图

$q(x', y', z')$ 是废空气烟羽的任意体积元. 对于高架点源非连续排放的废空气烟羽,其规范化的 γ 浸没扩散因子 \hat{X} 可用下式表示

$$\begin{aligned} \hat{X} &= \frac{D_i(x, 0, 0)}{g_i \cdot A_i} \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} \cdot \frac{B}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left\{-\left[\frac{y'^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z' - H)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} dx' dy' dz' \end{aligned} \quad (2)$$

式中, μ 是 γ 射线在空气中的总减弱系数(m⁻¹),对 1MeV 能量的 γ 射线,其计算值为 $7.78 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$ ^[5],该值用于其它能量的 γ 射线计算,偏差是可忽略的. $D_i(x, 0, 0)$ 是核素 i

在点 $P(x, 0, 0)$ 的 γ 浸没剂量 (Sv); r 是点 P 和 q 间的距离; B 是剂量累积因子 (无量纲), 为 r, μ 和 E 的函数, 可由下式进行粗略估算

$$B = \begin{cases} 1 + \mu \cdot r + (\mu \cdot r)^2 / 7E^{2.4} & 0.5 \text{ MeV} < E \leq 2 \text{ MeV} \\ 1 + 1.1\mu \cdot r + (\mu \cdot r)^2 & E \geq 0.5 \text{ MeV} \end{cases} \quad (3)$$

\bar{u} 是平均风速 (m/s), 可由下式估算

$$\bar{u} = \frac{u_1}{1 + m} \left(\frac{2H}{Z_1} \right)^m \quad (4)$$

其中 u_1 是在高度 Z_1 处测得的风速, m 是垂直风速廓线指数, 其值列于表 1. (4) 式可以简化为下式

$$\bar{u} = u_1 \left(\frac{H}{Z_1} \right)^m \quad (5)$$

在表 1 所列 m 值范围内, 由 (4) 式简化为 (5) 式所得到的误差不大于 6%.

表 1 垂直风速廓线指数 m 值

大气稳定度类型	A	B	C	D	E	F
m	0.09	0.20	0.22	0.28	0.37	0.42

当 $H \geq 10\text{m}$ 时, 可适用 (4) 式或 (5) 式; 当 $H < 10\text{m}$ 时, 10m 处的风速可作为平均风速.

σ_y 和 σ_z 是扩散参数, 可表达为扩散距离的指数函数

$$\sigma_y = P_y x^Q \quad (6)$$

$$\sigma_z = P_z x^Q \quad (7)$$

表 2 给出了在不同排放高度 H 和不同大气稳定度情况下弥散系数 P_y, P_z, Q_y 和 Q_z 的值, 该值来自联邦德国 KFA 和 KFK 的大气野外扩散试验, IAEA 推荐在国际上采用其值. 该表数据适用于中等或大表面粗糙度的开阔地形, 即森林覆盖区, 农田或建有独立建筑物的地区以及丘陵地区, 我国建于丘陵地区的核设施环境评价也采用这组数据^[6]. 当 $H < 50\text{m}$ 时, 可采用 50m 处的值; 当 $H > 180\text{m}$ 时, 可采用 180m 处的值; 当 $50\text{m} < H < 100\text{m}$ 或

$100\text{m} < H < 180\text{m}$ 时, 弥散系数值可由下式计算

$$Q_{j,i} = \frac{(H_i - H_*)Q_{j,0} + (H_0 - H_i)Q_{j,u}}{H_0 - H_*} \quad (8)$$

$$P_{j,i} = P_{j,0} \left(\frac{H_i - H_*}{H_0 - H_*} \right)^{\sigma_j} P_{j,u} \left(\frac{H_0 - H_i}{H_0 - H_*} \right)^{\sigma_j} \quad (9)$$

这里, $Q_{j,i}$ 和 $P_{j,i}, Q_{j,u}$ 和 $P_{j,u}, Q_{j,0}$ 和 $P_{j,0}$ 是当 H 分别为 H_i, H_* 和 H_0 时, 扩散参数 $\sigma_j (j=y, z)$ 的弥散系数.

表 2 各种排放高度和大气稳定度类型的弥散系数^[5]

排放高度 $H(\text{m})$	大气稳定度类型	弥散系数			
		P_y	Q_y	P_z	Q_z
50	A	1.503	0.833	0.151	1.219
	B	0.876	0.823	0.127	1.108
	C	0.659	0.807	0.165	0.996
	D	0.640	0.784	0.215	0.885
	E	0.801	0.754	0.264	0.774
	F	1.294	0.718	0.241	0.662
100	A	0.170	1.296	0.051	1.317
	B	0.324	1.025	0.070	1.151
	C	0.466	0.866	0.137	0.985
	D	0.504	0.818	0.265	0.818
	E	0.411	0.882	0.487	0.652
	F	0.253	1.057	0.717	0.486
180	A	0.671	0.903	0.025	1.500
	B	0.415	0.903	0.033	1.320
	C	0.232	0.903	0.104	0.997
	D	0.208	0.903	0.307	0.734
	E	0.345	0.903	0.546	0.557
	F	0.671	0.903	0.484	0.500

由表 2 数据可以看出, 弥散系数与大气稳定度类型有着密切的依赖关系. 大气稳定度是表征大气扩散状况的标志, 其与大气垂直温度梯度、风速和风向等有密切关系. 表 3 给出了 Jülich 大气稳定度划分方法^[7]. 在使用表 2 数据时, 必须依据表 3 划分大气稳定度类型.

根据图 1 和图 2, 可以得到公式 (10)

表 3 KFA 大气稳定度类型的划分方法^[7]

温度梯度* $\frac{dT}{dz}$ (°C/100m)	<-1.5	-1.4~-1.2	-1.1~-0.9	-0.8~-0.7	-0.6~0.0	0.1~2.0	>2.0
<1.0	A	A	B	C	D	F	F
风 1.0~1.9	A	B	B	C	D	F	F
2.0~2.9	A	B	C	D	D	E	F
速 3.0~4.9	B	B	C	D	D	D	E
(m/s) 5.0~6.9	C	C	D	D	D	D	D
>7.0	D	D	D	D	D	D	D

* 每 100m 温度梯度为距地面 20m 与 120m 处之温差。

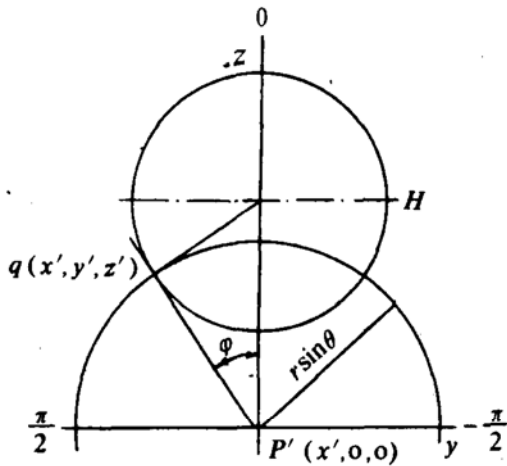


图 2 废空气烟羽在 $P(x, 0, 0)$ 点的截面图

$$\begin{aligned} x' - x &= r \cos \theta \\ y' - y &= r \sin \theta \cos \phi \\ z' - z &= r \cos \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (10)$$

此时, 在 $q(x', y', z')$ 点处, 扩散参数 σ_y 和 σ_z 应为

$$\sigma_y = P_1(x + r \cos \theta)^{\alpha_1} \quad (11)$$

$$\sigma_z = P_2(x + r \cos \theta)^{\alpha_2} \quad (12)$$

且体积元 dv 可表示为

$$dv = r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr \quad (13)$$

此时方程(2)可改写为

$$\begin{aligned} \hat{X} = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{B e^{-\mu r}}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp \left[-\frac{r^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{2\sigma_y^2} \right. \\ \left. + \frac{(r \cos \theta \sin \theta - H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \sin \theta d\theta d\phi dr \end{aligned} \quad (14)$$

方程(14)的边界条件为

$$\theta_1 = -\arccos(-x/r) \quad (15)$$

$$\theta_2 = \arccos(-x/r) \quad (16)$$

$$\phi_1 = -\arccos(r \sin \theta / H) \quad (17)$$

$$\phi_2 = \arccos(r \sin \theta / H) \quad (18)$$

原则上讲, $r_1 = 0, r_2 = \infty$, 但当 $r_2 \geq 10^6 \text{m}$ 时, $\hat{X} \rightarrow 0$, 这是因为(14)式中 $e^{-\mu r}$ 降低很快. 因此, 选 $r_2 = 5 \times 10^3 \text{m}$, 在这个扩散距离内, 高斯烟羽模型是适用的.

根据(14)编制计算程序时, 要注意对边界函数进行全面赋值, 否则程序将停止运行或给出错误结果. 为尽快对事故性排放作出及时的环境影响评价, 应尽量缩短程序的运行时间.

3 讨论

图 3 表示当 $H = 100 \text{m}, \bar{u} = 4.0 \text{m/s}$ 时, γ 浸没扩散因子 \hat{X} 、扩散距离 x 与大气稳定度类型之间的依赖关系. 当大气处于极不稳定(A)、不稳定(B)和轻微不稳定(C)时, \hat{X} 随 H 的变化非常小, 且函数渐趋近于某一常数. 当大气处于中性(D)、基本稳定(E)或稳定(F)状态时, \hat{X} 随 H 的增加而缓慢降低. 因此, 有效排放高度 H (即烟囱高度) 的增加, 并不始终是降低废空气烟羽 γ 浸没剂量的有效方法. 尤其对于大气稳定度经常处于不稳定或中性状态的地区, 选择一定高度的烟囱是必要的, 但应进行利益和代价的权衡, 那种认为烟囱越高越安全的想法并不科学.

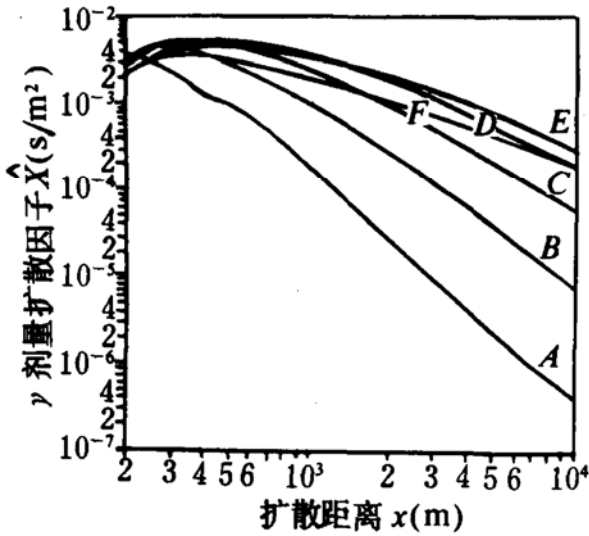


图 3

本方法适用于计算高架点源非连续排放的废气烟羽的 γ 浸没剂量. 对于排放时间小于 1 小时的单次排放, 本方法可适用. 如果在同样风向和大气稳定度条件下, 进行数次排放, 累积剂量应按次数相加. 如果单次排放超过 3 小时, 且总排放量不变时, 排放时间分别相应于 6 小时、12 小时或 24 小时, 按本方法计算的剂量值应被 2、3 或 6 除^[1].

当核设施周围有较高建筑物、障碍物、堤坝和其它种类的地形隆起或洼陷时, 应考虑对扩散参数 σ_y, σ_z 和有效排放高度 H 进行必要的修正^[6].

对于核电站或核燃料后处理工厂放射性核素的事发性排放, 或非计划性控制排放时, 可利用本法快速估算放射性烟云的 γ 剂量, 以

便及时作出环境影响评价. 本法也可用于估算加速器感生放射性对周围环境产生的 γ 剂量^[8].

本文作者对 F. Rohloff 先生给予的多次有益的讨论和 Ch. Mönig 女士在使用计算机方面所给予的帮助表示感谢. 本工作于 1990~1991 年度完成于德国 Jülich 核子研究中心.

参 考 文 献

- 1 Slade D H. Meteorology and Atomic Energy, USAEC TID - 24190, 1968
- 2 Rohloff F, et al. LIGA n Programm zur Berechnung der Lokalen Individuellen γ -Submersionsdosis durch Abluftfahnen aus Kerntechnischen Anlagen, KFA, Jan. 1979
- 3 Rohloff F, et al. LIGA 2 Ein Verbessertes Rechenprogramm zur Berechnung der Lokalen Individuellen γ - Submersionsdosis durch Abluftfahnen aus Kerntechnischen Anlagen, KAF, Aug. 1991
- 4 TRANSLATION - SAFETY CODES AND GUIDES. EDITOR: Gasellschaft fur Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 11/80
- 5 Bundesanzeiger, Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung. Ermittlung der Strahlen - exposition durch die Ableitung Zadioaktive Stoffe aus Kerntechnischen Anlagen Oder Einrichtungen, 21, Feb. 1990
- 6 潘强岩等. 辐射防护, 1989, 9(4): 241-247
- 7 Polster G, Gei ß H, Heinemann K, Der Meteorologische Turm der Kernforschungsanlage Jülich, Jül - 2095, Nov. 1986
- 8 Zhu Lianfang. KAF - ASS - IB - 0530, June. 1991

Evaluation of γ - Submersion Dose from Waste Air - plume

Zhu Lianfang

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 73000)

E. Pomplum K. Heinemann

(Abteilung Sicherheit und Strahlenschutz, KFA Julich, F. R. Germany)

Abstract A method of evaluating the γ - submersion dose from the waste air - plume emitted by

elevated point sources is presented in this paper. Results of the calculation are given in figures. Application of the method is discussed.

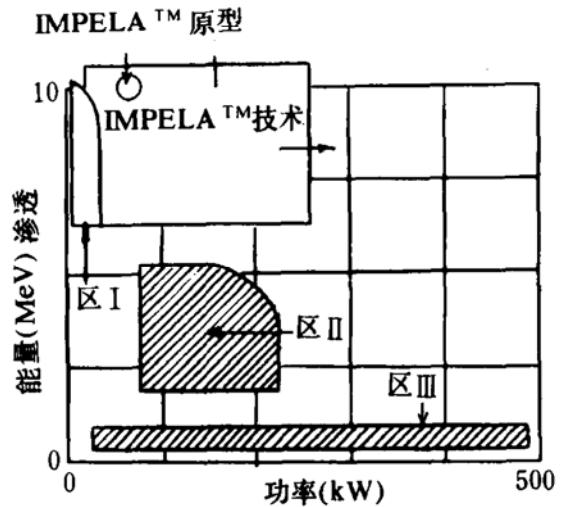
Key Words waste air - plume, short - term diffusion factor, γ - submersion dose, accident releases.

用于处理新型工业材料的电子直线加速器

加拿大原子能公司最近研制出用于处理新型工业材料的电子直线加速器(IMPELA), 能量为 10MeV, 功率为 50kW. 它综合了连续波加速器(它存在大量问题而且体积大)和通常产生脉冲设备的最佳特性, 可在每一个脉冲过程中控制加速梯度, 提供稳定品质的束流. 这种加速器结构简单, 10MeV 的设备仅 3.5m 长, 能提供高的能量和功率. IMPELA 使用一种 L 带, 在轴耦合, 驻波, 共振腔系统加速电子. 这种结构具有高并联阻抗, 保证了射频功率对加速梯度的有效转换, 同时可以高束流负载运行. 高功率运行用的冷却管道允许快速启动. 在加速器的引出端后电子束被弯转 270°, 提供垂直于加速器轴的束流. 然后, 束流通过一个发散真空室(扩展束流), 其位置可靠近到距被辐照产品 15cm 处.

该加速器是目前世界上已运行的最强有力的工业用电子直线加速器. 由于这种加速器功率大, 能量高(贯穿深度大), 能准确控制束流, 因此是处理塑料交联、半导体、新材料、医疗产品杀菌和大体积产品消灭害虫的理想工具. 加拿大原子能公司研制出的新型加速器已登记注册, 商品化生产, 并首次向美国电子束服务公司出售了一台(E-Beam Service Inc. of USA), 用于辐照加工商业服务.

图为新加速器能量与功率和现有加速器的技术对比 [IMPELA 优于短脉冲射频电子直线加速器, 钴-60 源. 图中



区 I 为高压倍加器, 区 II 为高频高压加速器(Dynamitron), 区 III 为电屏变压器].

(四川大学原子核科学研究所 王能明供稿)