

# 高压倍加器辐射防护初步评价

宋書綏 陈常茂 冷瑞平 謝建倫 聞友勤 鐘学儒\* 吳从华\*

本工作主要是对一台高压倍加器的辐射场进行了测量。结果表明,目前该高压倍加器的运行是安全的。实验厅内中子剂量主要来自电缆沟和迷宫的散射。在中子产额为 $2 \times 10^9$ 中子/秒条件下运行30分钟,距靶20厘米处由于中子活化引起的 $\gamma$ 辐射率约20微伦/秒。机械泵油中氚的浓度为 $3 \times 10^{-5}$ 居里/升,机械泵排出口氚的浓度在( $4 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-8}$ )范围内。

## 引 言

由于高压倍加器的造价低、容易操作、中子产额高等优点,因此在物理学、化学、生物学、医疗等许多领域得到了广泛应用。

我们研究的高压倍加器的主要特性是:高压在500千伏以内连续可调;束流通常在100微安左右,最大可到2.5毫安; $T(d, n)$ 反应产生的中子能量约14兆电子伏,产额通常为 $10^9$ 中子/秒,最大可到 $10^{11}$ 中子/秒; $D(d, n)$ 反应产生的中子能量约为2.5兆电子伏,产额通常为 $10^7$ 中子/秒,最大可到 $10^9$ 中子/秒。

由于 $T(d, n)$ 反应产生的中子能量高,因而穿透力强;并且 $T(d, n)$ 反应的中子产额高,在被加速的氘粒子的能量为100千电子伏时, $T(d, n)$ 反应得到的中子产额要比 $D(d, n)$ 反应的大100倍<sup>[1]</sup>。因此从辐射防护的角度考虑, $T(d, n)$ 反应是主要的。

当利用 $T(d, n)$ 反应、中子产额为 $1 \times 10^{11}$ 中子/秒时,在没有屏蔽的条件下,距靶10米处的中子通量密度为 $1 \times 10^4$ 中子/秒。对14兆电子伏的中子来说,这样的通量密度大约是17中子/厘米<sup>2</sup>秒(或2.5毫雷姆/小时)\*的500倍。由此可见,在高压倍加器的周围必须要有足够的屏蔽,以保证工作人员的安全。

该高压倍加器的屏蔽设计为:屏蔽墙是2米厚的普通混凝土;屋顶是1米厚的普通混凝土;迷宫有两个90度角的拐弯,其宽为1米,高为2米,总长为12米;靶室有一个 $3.0 \times 2.7 \times 1.2$ 米的装水大铁门(总重量为9吨,铁板厚为2厘米)。该高压倍加器的平面图示于图1。为了实验上的需要,从靶室大厅到两侧的实验厅各装有一个直径为20厘米的不锈钢管电缆沟,在地面下约70厘米。

为了评价该倍加器的辐射防护状况,估计运行人员和长期在实验厅内从事工作的实验人员所接受的剂量,并对今后倍加器的屏蔽设计提供一定的参考数据,我们利用 $T(d, n)$ 反应,在中子产额为 $1 \times 10^{10}$ 中子/秒的条件下,测量了迷宫内和实验厅内中子剂量的分布;水铁门外的中子剂量分布;倍加器的活化水平;以及机械泵排出口和机械泵油中氚的浓

\* 北京大学学生。

\* 职业放射性工作人员全身照射的年最大容许剂量当量为5雷姆,相当剂量当量率为2.5毫雷姆/小时,对能量为14兆电子伏的中子来说,其通量密度约为17中子/厘米<sup>2</sup>·秒<sup>[2]</sup>。

度。

在现有的屏蔽条件下，估计实验厅内中子剂量来自通过屏蔽墙的透射和散射、电缆沟的散射及迷宫的散射，为了查明其主要来源，找出屏蔽中的薄弱环节，在用石蜡将迷宫口和电缆沟口全部屏蔽的条件下，测量实验厅内中子剂量的分布，并与未用石蜡屏蔽时的结果进行了比较。

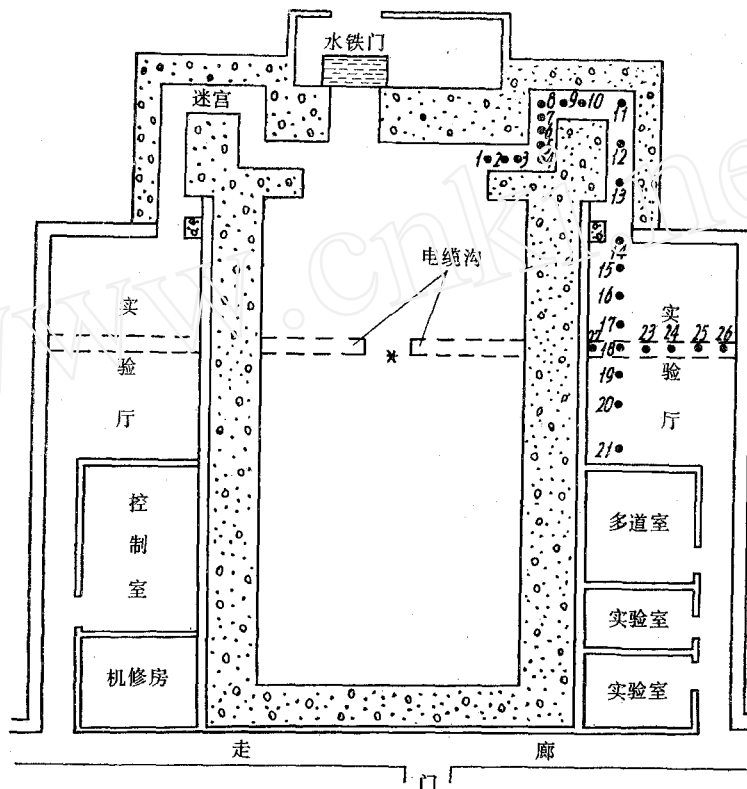


图 1 高压倍加器的平面示意图  
图中数字表示测量点的位置

## 仪器和方法

测量中子剂量用的两台仪器如下：

(1) 用中子剂量当量率仪 (0075 型) 测量中子能量从热能到 14 兆电子伏范围的总中子剂量当量率  $\dot{H}$ <sup>[3]</sup>。为了读数准确，将仪表的输出经过放大器输入到定标器，由下式将定标器的读数换算成剂量值：

$$\dot{H} = n/f, \quad (1)$$

式中， $\dot{H}$  为总中子剂量当量率，毫雷姆/小时； $n$  为定标器的计数率，计数/秒； $f$  为计数率与剂量当量率之间的换算系数，此处， $f = 2.9$  计数/秒/毫雷姆/小时<sup>[4]</sup>。

(2) 用  $BF_3$  正比计数器 (SZJ-1 型) 和壁厚为 1 毫米的镭套，从无镭套和有镭套时  $BF_3$  正比计数器的计数率可以得到热中子\*的剂量当量率：

\* 此处热中子的能量范围指镭截止能以下，即中子能量  $E \leq 0.5$  电子伏。

$$\dot{H}_t = (n_a - n_b)g, \quad (2)$$

式中， $\dot{H}_t$  为热中子剂量当量率，毫雷姆/小时； $n_a$  和  $n_b$  分别为无镉套和有镉套时  $\text{BF}_3$  正比计数器的计数率，计数/分； $g$  包括了  $\text{BF}_3$  正比计数器的效率以及通量密度与剂量当量率之间的换算系数等。经刻度，此处  $g = 6.9 \times 10^{-4}$  毫雷姆/小时/计数/秒。

用 FJ-317 型  $\gamma$  剂量仪测量  $\gamma$  剂量率。

用双道液体闪烁仪 (FJ 353 G 1) 测量机械泵油样品中氚的浓度。

用 FJ-357 型低能  $\beta$  气体测量仪 (连续测量) 测量机械泵排出口氚浓度。

测量点的位置如图 1 所示。探测仪器的中心距地面的高度约为 1.3 米。

## 结果及分析

### 1. 迷宫内的测量

迷宫内中子剂量的测量结果列于表 1，并示于图 2。可以看出：

(1) 迷宫内总中子剂量当量率随迷宫距离 (迷宫距离从图 1 测量点 1 算起) 的增加明显地减小，在拐弯的地方尤为突出。在距迷宫起点 5 米附近 (测量点 9~10) 就已降至 2.5 毫雷姆/小时以下，在迷宫终点降至  $3 \times 10^{-3}$  毫雷姆/小时以下。

(2) 经过第一个拐弯 (距离为 4 米)，总中子剂量当量率减小约 100 倍，而热中子剂量当量率减小约 3.5 倍；经过第二个拐弯 (距离为 6 米)，总中子剂量当量率减小约 350 倍，而热中子剂量当量率减小约 180

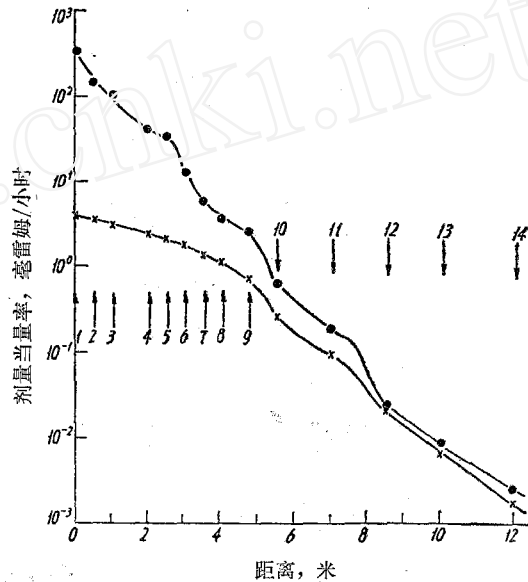


图 2 迷宫内中子剂量当量率随迷宫距离的变化  
· 总中子剂量当量率  $\dot{H}$ ；× 热中子剂量当量率  $\dot{H}_t$ 。

表 1 迷宫内各测量点剂量当量率

测量点	1	2	3	4	5	6	7
距离, 米	0	0.5	1.0	2.0	2.5	3.0	3.5
$\dot{H}$ , 毫雷姆/小时	$3.31 \times 10^2$	$1.42 \times 10^2$	$4.76 \times 10^1$	$4.07 \times 10^1$	$3.19 \times 10^1$	$1.20 \times 10^1$	$5.68 \times 10^0$
$\dot{H}_t$	毫雷姆/小时	$3.81 \times 10^0$	$3.53 \times 10^0$	$3.05 \times 10^0$	$2.34 \times 10^0$	$2.10 \times 10^0$	$1.78 \times 10^0$
	%	1.1	2.5	3.2	5.7	6.6	14.8
测量点	8	9	10	11	12	13	14
距离, 米	4.0	4.75	5.5	7.0	8.5	10.0	12.0
$\dot{H}$ , 毫雷姆/小时	$3.48 \times 10^0$	$2.50 \times 10^0$	$6.18 \times 10^{-1}$	$1.83 \times 10^{-1}$	$2.39 \times 10^{-2}$	$8.60 \times 10^{-3}$	$2.60 \times 10^{-3}$
$\dot{H}_t$	毫雷姆/小时	$1.11 \times 10^0$	$7.02 \times 10^{-1}$	$2.65 \times 10^{-1}$	$9.41 \times 10^{-2}$	$2.05 \times 10^{-2}$	$6.77 \times 10^{-3}$
	%	31.9	28.0	43.0	51.5	86.0	67.5

倍；经过总长为 12 米的迷宫，总中子剂量当量率减小约  $1 \times 10^5$  倍，而热中子剂量当量率减小约  $2 \times 10^3$  倍。

(3) 热中子剂量当量率占总中子剂量当量率的百分数开始随迷宫距离的增加而逐渐上升，在距迷宫起点 8.5 米处（测量点 12）约为 86%。距离更远时，随距离的增加而逐渐下降，在迷宫终点（测量点 14）约为 67%，这主要是由于实验厅内的快中子和中能中子的百分数较高所致。

### 2. 实验厅内的测量

(1) 沿迷宫方向的测量。沿迷宫方向的中子剂量当量率的测量结果列于表 2，并示于图 3。可以看出，在电缆沟附近（测量点 17 和 18）总中子剂量当量率有一个“凸起”；而热中子剂量当量率随距离的增加继续下降，在电缆沟附近的“凸起”并不十分明显。这说明在电缆沟附近由于来自电缆沟的快中子和中能中子的百分数较高而使总中子剂量当量率增加。

(2) 沿电缆沟方向的测量。在电缆沟上沿电缆沟

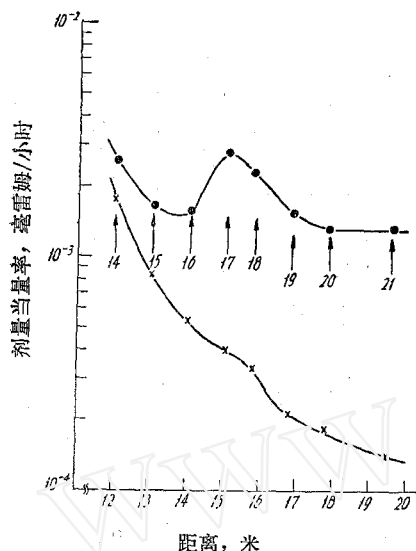


图 3 实验厅内沿迷宫方向中子剂量当量率随迷宫距离的变化  
 • 总中子剂量当量率  $\dot{H}$ ; × 热中子剂量当量率  $\dot{H}_t$ 。

表 2 实验厅内沿迷宫方向各测量点剂量当量率

测量点	14	15	16	17	18	19	20	21
距离, 米	12.0	13.0	14.0	15.0	15.75	16.75	17.75	19.45
$\dot{H}$ , 毫雷姆/小时	$2.60 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-3}$	$1.56 \times 10^{-3}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{-3}$	$1.54 \times 10^{-3}$	$1.34 \times 10^{-3}$	$1.34 \times 10^{-3}$
$\dot{H}_t$	毫雷姆/小时	$1.75 \times 10^{-3}$	$8.34 \times 10^{-4}$	$5.24 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-4}$	$3.36 \times 10^{-4}$	$2.11 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-4}$
	%	67.5	50.2	34.7	14.4	15.8	13.7	13.6

方向中子剂量的测量结果列于表 3，并示于图 4。可以看出，随距屏蔽墙距离的增加，总中子剂量当量率和热中子剂量当量率都在减弱，在距屏蔽墙 1~2 米附近有个“凸起”，然后随屏蔽墙距离的增加而下降，但总中子剂量当量率的下降速度要快一些。

(3) 电缆沟上方的测量。距屏蔽墙 20 厘米，在电缆沟上方测量，其中子剂量如表 4 所示，并示于图 5。可以看出，在距地面 0.5 米以内，随高度的增加，总中子剂量当量率和热中子剂量当量率的减弱非常明显；而在 0.5 米以上，减弱比较缓慢。说明来自电缆沟的散射是很重要的。为了进一步说明这一问题的重要性，可以从下面的实验结果看得更为清楚。

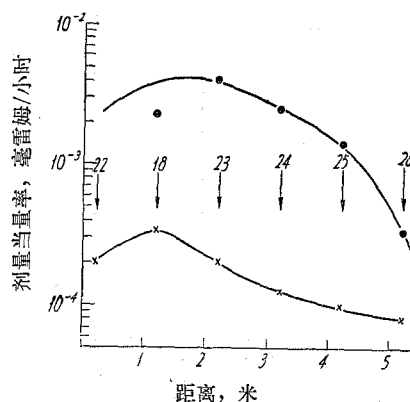


图 4 实验厅内沿电缆沟方向中子剂量当量率随距屏蔽墙距离的变化  
 • 总中子剂量当量率  $\dot{H}$ ; × 热中子剂量当量率  $\dot{H}_t$ 。

表 3 沿电缆沟各测量点剂量当量率

测量点	22	18	23	24	25	26
距离, 米	0.2	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2
$\dot{H}$ , 毫雷姆/小时		$2.31 \times 10^{-3}$	$4.08 \times 10^{-3}$	$2.47 \times 10^{-3}$	$1.41 \times 10^{-3}$	$3.40 \times 10^{-4}$
$\dot{H}_t$	毫雷姆/小时	$2.02 \times 10^{-4}$	$3.36 \times 10^{-4}$	$2.02 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-4}$	$9.62 \times 10^{-5}$
	%		14.5	5.0	5.0	6.8
						22.6

### 3. 实验厅内中子剂量主要来源的测量和分析

为了进一步查明实验厅内中子剂量的主要来源, 我们用 50 厘米厚和 30 厘米厚的石蜡分别将迷宫起点位置和终点位置进行屏蔽, 以防止来自迷宫的散射; 又用 60 厘米厚的石蜡将电缆沟在靶室大厅一侧的入口进行屏蔽 (实际上由于电缆沟内有电缆, 电缆沟口是不能完全被屏蔽的), 以防止来自电缆沟的散射。在这种条件下测量了实验厅内的中子剂量, 与无屏蔽时的结果的比较列于表 5。可以看出, 用石蜡屏蔽后实验厅内的总中子剂量当量率与本底相近, 热中子剂量当量率在迷宫终点附近的减弱倍数要比远离迷宫终点位置的减弱倍数大得多 (相差 10 倍左右), 并且用石蜡屏蔽后, 整个实验厅内的热中子剂量当量率在  $(4.0 \sim 6.0) \times 10^{-5}$  毫雷姆/小时之间。这就进一步说明实验厅内的中子剂量主要来自电缆沟的散射和迷宫的散射。

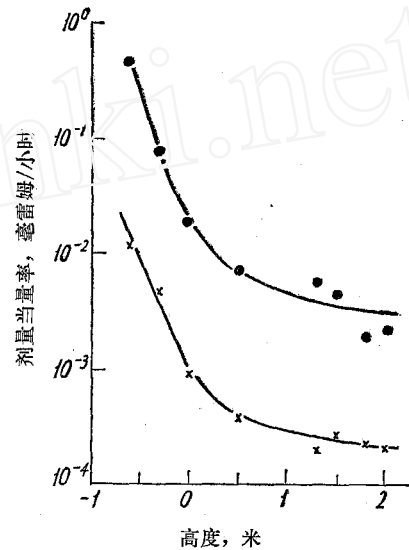


图 5 实验厅内电缆沟上方中子剂量当量率随离地面高度的变化  
 • 总中子剂量当量率  $\dot{H}$ , × 热中子剂量当量率  $\dot{H}_t$ 。

表 4 电缆沟上方各测量点剂量当量率

测量点	22-1	22-2	22-3	22-4	22-5	22-6	22-7	22-8
高度, 米	-0.6	-0.3	0	0.5	1.3	1.5	1.8	2.0
$\dot{H}$ , 毫雷姆/小时	$4.72 \times 10^{-1}$	$7.72 \times 10^{-2}$	$1.91 \times 10^{-2}$	$7.00 \times 10^{-3}$	$5.54 \times 10^{-3}$	$4.47 \times 10^{-3}$	$1.90 \times 10^{-3}$	$2.15 \times 10^{-3}$
$\dot{H}_t$	毫雷姆/小时	$1.24 \times 10^{-2}$	$4.72 \times 10^{-3}$	$9.23 \times 10^{-4}$	$3.88 \times 10^{-4}$	$2.02 \times 10^{-4}$	$3.03 \times 10^{-4}$	$2.33 \times 10^{-4}$
	%	2.6	6.1	4.8	5.0	2.5	5.7	8.8
								6.9

### 4. 屏蔽墙效能测定

将雷姆仪放在与靶同高度、紧贴屏蔽墙, 测量点的选择使得距靶的距离最近。测得的屏蔽墙两侧 (在靠实验厅这一侧测量时, 屏蔽条件同上节) 的中子剂量当量率分别为  $8.5 \times 10^2$  毫雷姆/小时和  $1.9 \times 10^{-4}$  毫雷姆/小时。所以中子通过 2 米厚的屏蔽墙后, 减弱了  $4.5 \times 10^6$  倍。

表 5 迷宫和电缆沟用石蜡屏蔽和无屏蔽时各测点中子剂量当量率 (毫雷姆/小时)

测量点		14	15	16	17	18	22-1
无屏蔽	$\dot{H}$	$2.60 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-3}$	$1.56 \times 10^{-3}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{-3}$	$4.72 \times 10^{-1}$
	$\dot{H}_t$	$1.75 \times 10^{-3}$	$8.34 \times 10^{-4}$	$5.24 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-4}$	$3.36 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-2}$
有屏蔽	$\dot{H}$	$4.5 \times 10^{-4}$	$-1.7 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-3}$	$-7.6 \times 10^{-4}$	$-5.6 \times 10^{-4}$	
	$\dot{H}_t$	$6.0 \times 10^{-5}$	$5.4 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-5}$	$4.7 \times 10^{-5}$	$5.8 \times 10^{-5}$	$8.3 \times 10^{-4}$

测量点		22-2	22-3	22-5	22-7	23	24
无屏蔽	$\dot{H}$	$7.72 \times 10^{-2}$	$1.83 \times 10^{-2}$	$5.54 \times 10^{-2}$	$2.15 \times 10^{-2}$	$4.03 \times 10^{-2}$	$2.47 \times 10^{-2}$
	$\dot{H}_t$	$4.72 \times 10^{-3}$	$9.23 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-4}$	$2.33 \times 10^{-4}$	$2.23 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-4}$
有屏蔽	$\dot{H}$			$1.9 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$-2.76 \times 10^{-4}$	$-6.3 \times 10^{-4}$
	$\dot{H}_t$	$2.6 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-5}$	$5.2 \times 10^{-5}$		$4.4 \times 10^{-5}$	$4.1 \times 10^{-5}$

### 5. 水铁门外的中子剂量测量

测量是直接用率表读数的。在水铁门开启时,水铁门外的总中子剂量当量率随地面的高度和距门的距离的分布如表 6 所示。当水铁门关闭时,由于仪表灵敏度的限制,剂量值在仪表上无反映。

表 6 水铁门开启时,水铁门外中子剂量当量率分布 (毫雷姆/小时)

高度, 米	距离, 米				
	0	2.0	5.0	10.0	20.0
0.5	15.0	5.5	2.0	0.7	0.2
1.0	17.0	7.0	2.0	0.7	
1.5	20.0				

### 6. 中子活化的测量

当倍加器在中子产额为  $2 \times 10^9$  中子/秒的条件下运行 30 分钟以后,在与靶同高度、距靶 20 厘米的位置测得的中子活化水平及衰变情况列于表 7,并示于图 6。可以看出,活化水平还是较高的,其混合半衰期为 5 分钟。值得注意的是,将靶管卸下后一星期,在靶头附近的  $\gamma$  照射率约为 2.5 毫伦/小时。

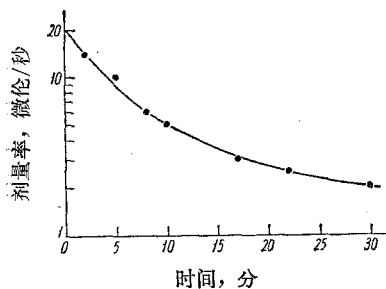


图 6 在距靶 20 厘米处中子活化衰变曲线

表 7 中子产额为  $2 \times 10^9$  中子/秒条件下运行 30 分钟,在距靶 20 厘米处的中子活化水平及衰变情况

时 间, 分	0	2	5	8	10	17	22	30
照射率, 微伦/秒	20	14	10	6	5	3	2.5	2

## 7. 氡浓度的测量

在高压倍加器的运行时间已有半年,在靶片采用水冷却的条件下,测得的机械泵油中氡的浓度为  $3 \times 10^{-5}$  居里/升;机械泵排出口氡的浓度在  $(4 \times 10^{-8} - 3 \times 10^{-6})$  居里/升之间。

## 结 束 语

该高压倍加器在中子产额为  $1 \times 10^{10}$  中子/秒下运行时,实验厅内的中子剂量当量率约  $2 \times 10^{-3}$  毫雷姆/小时,如果将中子产额归一到  $2 \times 10^{12}$  中子/秒(原设计标准),实验厅内的中子剂量当量率则为  $4 \times 10^{-1}$  毫雷姆/小时,因此原设计是留有余地的。这主要决定于设计时张弛长度的选择(原设计时张弛长度取 17 厘米)。

实验厅内中子剂量的主要来源是电缆沟和迷宫的散射。实验厅内除迷宫终点附近,其他地方快中子和中能中子是主要的。今后在设计加速器的屏蔽时,应注意薄弱环节,忽视了薄弱环节而强调增加屏蔽墙的厚度是没有意义的。

从中子活化水平的测量来看,其水平还是较高的,这对在实验厅内的工作人员来说,不会造成外照射危害,但为了换靶、检修等需要停机后立即进入靶室大厅时,将可能成为主要的外照射危害,因此应引起注意,特别在靶管、漂移管、加速管附近应尽量减少停留时间。

水铁门外的中子剂量还是较高的,建议在倍加器运行时,将水铁门关好。

为了进一步减小靶室大厅内活化气体的浓度,在力所能及的情况下,建议有良好的通风。

本测量工作误差较大。中子剂量当量率仪(0075型)在热能到 14 兆电子伏能量范围内,误差在  $+100\% - 50\%$  以内。另外,该倍加器的中子产额原设计标准为  $2 \times 10^{12}$  中子/秒,但目前还不能给出这样高的中子产额,在产额为  $1 \times 10^{10}$  中子/秒下测量时,统计误差较大,约  $\pm 30\%$ 。

## 参 考 文 献

- [1] R. F. Boggs, Radiological Safety Aspects of the Operation of Neutron Generators, Safety Series No. 42, IAEA, 1976, p. 2.
- [2] ICRP, Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources, Supplement to ICRP Publications 15, Pub. 21 (1973).
- [3] Instruction Manual for Neutron Dose Equivalent Rate Meter 95/0075-1/6, Nuclear Enterprises Ltd.
- [4] 陈常茂等,原子能科学技术, 1, 57 (1978).