

# 混凝土屏蔽体中子衰减长度 $\lambda$ 的测定

唐鄂生 李建平

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

中子衰减长度 $\lambda$ 在侧屏蔽的计算中极为重要,它对屏蔽设计的造价起着决定性的作用。本文是对高能加速器靶室附近的混凝土屏蔽墙样品,进行了活化分析,测量了衰减长度,并与有关结果作了比较。

## 一、引 言

在质子加速器的屏蔽设计中,衰减长度 $\lambda$ 是一个极为重要的参数,因而在许多以往的屏蔽实验中,对许多屏蔽材料的衰减长度 $\lambda$ 进行了测定。在这些实验中,大部分都是在束流终端(end-stop)的几何条件下测定的,横向(lateral)的情况测量较少,而这种横向的几何条件对高能加速器的屏蔽来说尤为重要,因为它对屏蔽设计的造价有着决定性的意义。

本实验用了两种不同的测量方法和实验条件,分别测量了横向屏蔽混凝土的衰减长度 $\lambda$ ,测得重混凝土的 $\lambda_{\text{重}} = 126\text{g}/\text{cm}^2$ ,普通混凝土的 $\lambda_{\text{普}} = 117\text{g}/\text{cm}^2$ 。对此结果作了简要讨论和比较。

## 二、测量方法

### 1. 活化分析法。

分析屏蔽混凝土块中的活化核素,以测定高能中子的衰减长度。日本高能物理研究所的计数器厅于1977年5月开始进行物理实验,质子能量为12GeV,束流强度为 $2 \times 10^{12}$ ppp。 $\pi$ - $\mu$ 靶附近的混凝土屏蔽墙,由于受中子及其他带电粒子的长期辐照,引起部分元素活化。1979年10月,由于工作需要局部改造,在该屏蔽墙上开了两个孔,从而取下了两条完整的直径约为7.5cm的混凝土柱体,前一层为重混凝土(密度 $\rho_{\text{重}} = 3.65\text{g}/\text{cm}^3$ ),厚1m;后一层为普通混凝土(密度 $\rho_{\text{普}} = 2.42\text{g}/\text{cm}^3$ )厚1m,其几何位置如图1所示。

对取下的混凝土柱体,用合金钢砂轮将它们切割成2.2cm厚的样品块,为了防止污

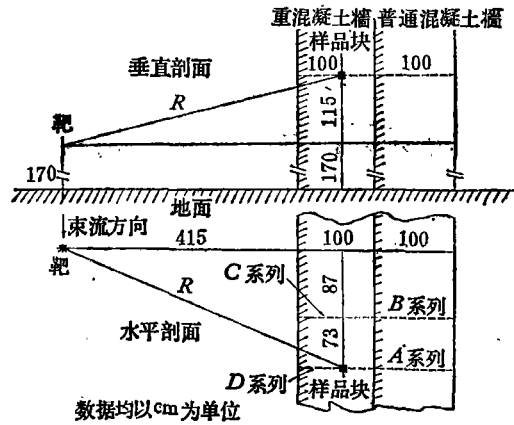


图1 混凝土样品块的几何位置

染, 将它们用塑料袋包好并编上号。用 Ge(Li) 能谱仪对样品进行逐个测量。对重混凝土块及普通混凝土块, 测量时间分别取作 30000sec 及 40000sec。测量系统如图 2 所示。测得的谱形如图 3 所示。

表1 混凝土块中典型的活化核素表

活化元素	半衰期	母核及反应形式	截面	中子能量
<sup>54</sup> Mn	313.5d	<sup>54</sup> Mn(n, 2n) <sup>54</sup> Mn	940±47mb	14MeV
		<sup>54</sup> Fe(n, p) <sup>54</sup> Mn	320±48mb	
<sup>46</sup> Sc	83.9d	<sup>46</sup> Sc(n, γ) <sup>46</sup> Sc	22.3±2.2b	热中子
		<sup>46</sup> Ti(n, p) <sup>46</sup> Sc	255±25mb	14—15MeV
<sup>69</sup> Zn	245d	<sup>69</sup> Zn(n, γ) <sup>69</sup> Zn	0.47±0.05b	热中子
<sup>60</sup> Co	5.26y	<sup>60</sup> Co(n, γ) <sup>60</sup> Co	20±3b	热中子
		<sup>60</sup> Ni(n, p) <sup>60</sup> Co	175±50mb	14.5MeV
<sup>59</sup> Fe	46.5d	<sup>59</sup> Fe(n, γ) <sup>59</sup> Fe	1.01±0.10b	热中子
		<sup>59</sup> Co(n, p) <sup>59</sup> Fe	82±22mb	14—15MeV
<sup>22</sup> Na	2.58y	<sup>23</sup> Na(n, 2n) <sup>22</sup> Na	25±2.5mb	14MeV
<sup>7</sup> Be	53.6d	<sup>16</sup> O(n, spall) <sup>7</sup> Be	10mb	高能

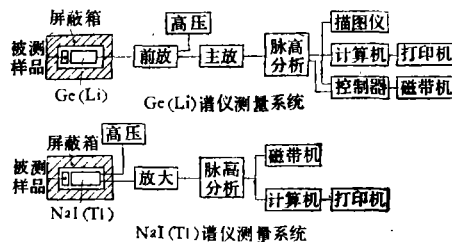


图2 测量系统方框图

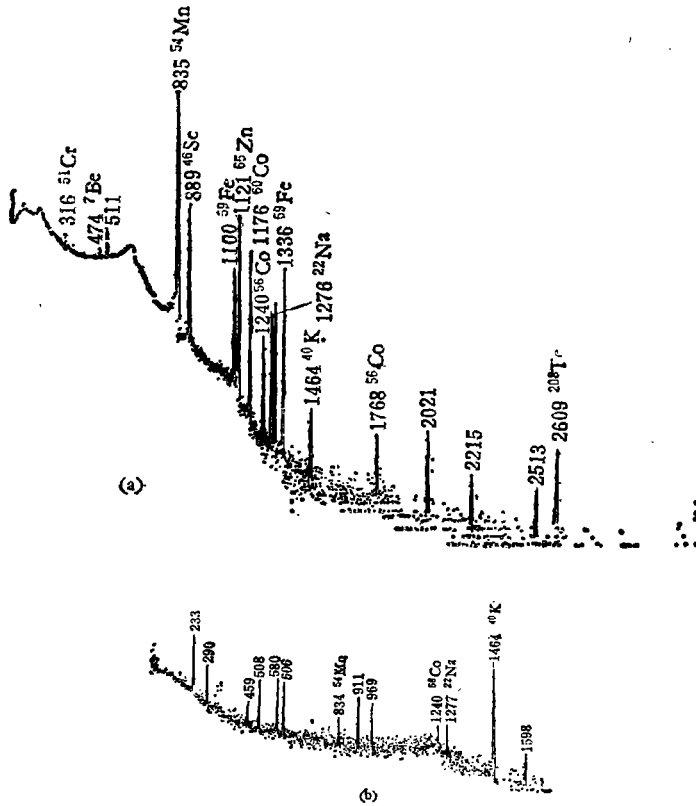


图 3 (a) 重混凝土活化核素能谱分布(峰值能量以 keV 为单位)  
(b) 普通混凝土活化核素能谱分布(峰值能量以 keV 为单位)

数据处理中,经过了样品的重量归一,半衰期 ( $T_{1/2}$ ) 的修正以及距离的几何修正,并计算了统计误差.测得的各典型活化核素如表 1 所列,其强度随厚度的变化如图 4 所示.

从活化核素的活性强度随混凝土厚度的衰减状况,可以分析出不同能量的中子通量(例如,高能中子、14MeV 的快中子及热中子)随厚度的变化规律,这对屏蔽设计来说是重要的.

$^{46}\text{Sc}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  及  $^{54}\text{Mn}$  等核素的活性强度的衰减开始时较快,而经 50~60cm 后(约相当于中子在混凝土中 2 个自由程),衰减较慢.在半对数坐标中,其衰减规律呈直线变化,并且各核素的衰减曲线互相平行.这表明,此时各种活化核素的相对比例保持常数,也就是说,中子经约 2~3 个自由程的厚度后,中子能谱已达到平衡.由高能中子及快中子形成的  $^{7}\text{Be}$  及  $^{54}\text{Mn}$  和  $^{22}\text{Na}$  出现平衡更早些.测定这些衰减曲线的斜率,可以求出高能中子在混凝土中的衰减长度  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{d_2 - d_1}{\ln \frac{c_1 R_1^2}{c_2 R_2^2}} \quad (1)$$

式中:  $d_1, d_2$  分别表示混凝土层的厚度 [cm]  $R_1, R_2$  分别表示混凝土样品所在点离靶的距离 [cm].  $c_1, c_2$  分别表示在  $d_1, d_2$  处混凝土样品的活化强度 [ $c/g \cdot \text{sec}$ ].

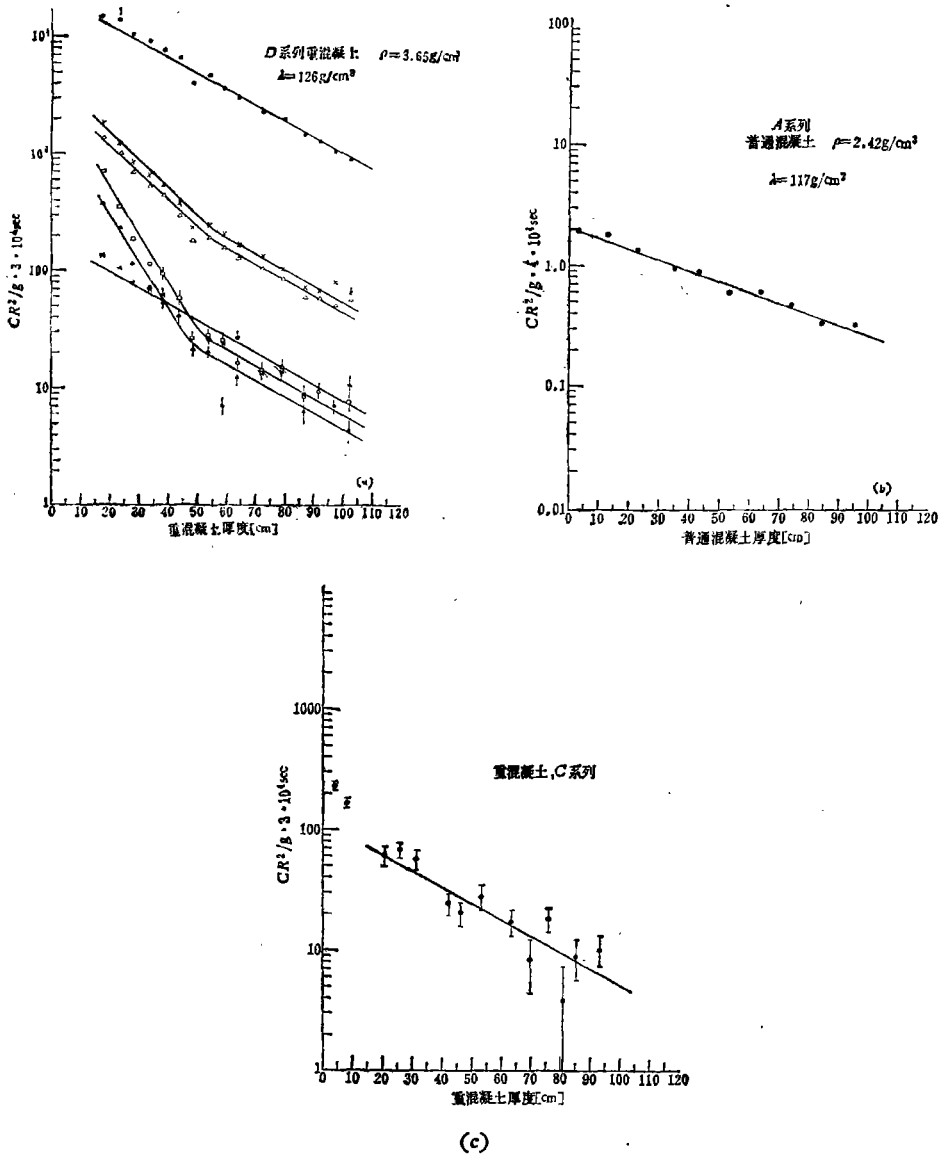


图4 (a) 各活化核素在混凝土中的衰减图

●  $^{54}\text{Mn}$  ×  $^{46}\text{Sc}$  △  $^{49}\text{Zn}$   
□  $^{60}\text{Co}$  ▲  $^{59}\text{Fe}$  \*  $^{22}\text{Na}$

(b)  $^{54}\text{Mn}$  在普通混凝土中的衰减

(c)  $^7\text{Be}$  在重混凝土中的衰减

按照  $^{54}\text{Mn}$  或其他核素谱平衡部分的衰减曲线,由公式(1)可以求出高能中子的衰减长度  $\lambda$ 。对  $^{54}\text{Mn}$  的实验点,用回归分析的数理统计方法计算出的  $\lambda$  的精确值为:

$$\lambda_{\text{重}} = 125.8\text{g/cm}^2$$

$$\lambda_{\text{普}} = 116.6\text{g/cm}^2$$

## 2. 阈能活化探测器方法.

用阈能活化探测器对增强器束流捕集器附近的普通混凝土屏蔽墙进行了衰减长度  $\lambda$

的测定。增强器的质子能量为 500MeV，束流强度为  $6 \times 10^{11}$ ppp。采用的探测器为  $^{27}\text{Al}$  和  $^{12}\text{C}$ 。用胶布将它们固定在混凝土屏蔽墙内外两侧(见图 5)。探测器在来自捕集器的高能中子的辐照下， $^{27}\text{Al}$  及  $^{12}\text{C}$  被活化，产生如下反应：

反 应	$\sigma$ [mb]	$T_{1/2}$	衰变方式	阈值 [MeV]
$^{27}\text{Al}(n,spal)^{18}\text{F}$	8	109.7m	$\beta^+$	>50
$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	22	20.3m	$\beta^+$	>20
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	10	14.96hr	$\gamma$ 1.37MeV 2.75MeV	>6

用 NaI(Tl) 单晶谱仪分别测出活化核素的活性，按下列公式可算出不同方向上的中子能谱分布。

$$F = \frac{\lambda_d(C - B)}{\epsilon\sigma N(1 - e^{-\lambda_d t_i})e^{-\lambda_d t_w}(1 - e^{-\lambda_d t_c})} \quad (2)$$

式中： $F$  为 中子 通量 [ $n/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ ]； $\lambda_d$  为 活化核素的衰变常数 [ $1/\text{sec}$ ]； $t_i$ 、 $t_w$ 、 $t_c$  分别表示辐照时间、等待时间和计数时间。 $\epsilon$  为谱仪对给定能量的射线的探测效率； $\sigma$  为活化截面 [ $\text{cm}^2$ ]； $N$  为对应母核的核数； $C$  为计数时间  $t_c$  内样品的计数； $B$  为计数时间  $t_c$  内的本底计数。

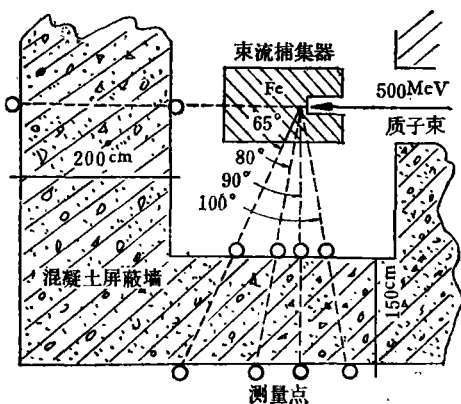


图 5 活化法测量  $\lambda$  的几何布置

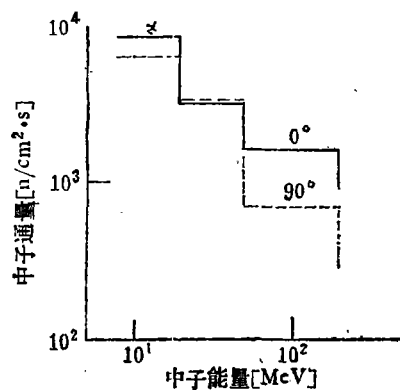


图 6 中子能谱

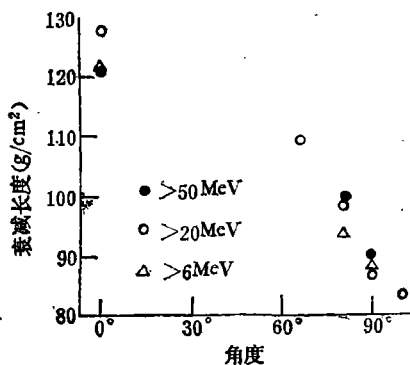


图 7 衰减长度的角分布

不同能量中子通量分布的计算结果如图6所示。

探测器的效率 $\epsilon$ 用蒙特卡罗方法计算给出。在计算 $^{18}\text{F}$ 及 $^{11}\text{C}$ 的 $\beta^+$ 衰变与 $e^-$ 湮没而引起的光电峰时, $\epsilon$ 要增大1倍,因为每次湮没同时放出2个0.511MeV的光子。

根据墙内外中子通量的衰减,由公式(1)可以求出不同角度时高能中子的衰减长度 $\lambda$ (见图7)。

应该指出,在该方法中,探测器处于极端的几何条件下,中子能谱尚未达到平衡,因而测得的 $\lambda$ 是粗略的,但可供比较。

### 三、讨论及结论

1. 高能入射中子在混凝土屏蔽体中,因发生级联及其他核反应,经2~3个自由程后,中子能谱达到平衡,此时测量衰减曲线的斜率,即可求出高能中子的衰减长度 $\lambda$ 。

2. 衰减长度 $\lambda$ 对入射高能中子的能量响应是不灵敏的。这是因为高能中子在屏蔽体中的衰减主要是通过非弹性散射进行的,而能量大于150MeV的高能中子,其非弹性散射截面 $\sigma_{in}$ 近似为一常量 $\sigma_{in} \approx 43A^{2/3}\text{mb}$ (见图8)。高能中子的衰减服从恒定的指数衰减规律,其衰减长度可近似给出: $\lambda \approx 38A^{1/3}[\text{g}/\text{cm}^2]$ <sup>[13]</sup>,此处 $A$ 为原子量。对混凝土可取 $A_{eff} \approx 27$ ,故 $\lambda \approx 114[\text{g}/\text{cm}^2]$ ,与实验值接近。

3.  $\lambda$ 与方向有关。实验结果表明,与束线成 $0^\circ$ 度方向的衰减长度,较横向 $90^\circ$ 度方向的衰减长度约高出30%,而从 $60^\circ$ — $90^\circ$ 范围内, $\lambda$ 变化约20%。

4. 与国外某些测量值的比较如表2所示。

最早的横向衰减长度 $\lambda$ 的实验值是由阿贡和杜布纳实验室完成的,它们的实验值较大。较小的实验值由CERN在1970年测出。两者相差达50%以上。为了说明它们之间的差别,用CASIM程序作了计算,结果也引入表2。实验与理论之间的矛盾来自实验条件,测量方法,以及混凝土的成分及密度的差异等因素。1966年CERN-LRL-RHEL的联合大型屏蔽实验中测出 $\lambda = 117 \pm 2[\text{g}/\text{cm}^2]$ ,与本工作的结果相符合。

5. 横向衰减长度 $\lambda$ 是一个极为重要的屏蔽参数,因为它既影响着辐射场的安全,又关系着屏蔽结构的造价。如果 $\lambda$ 取得过大,则可能过于保守而使经济受损;反之, $\lambda$ 取小了,可能导致不安全的屏蔽。目前,在国外高能加速器的屏蔽设计中,对混凝土,采用 $\lambda = 120 \text{g}/\text{cm}^2$ ,这是较合理的数值。

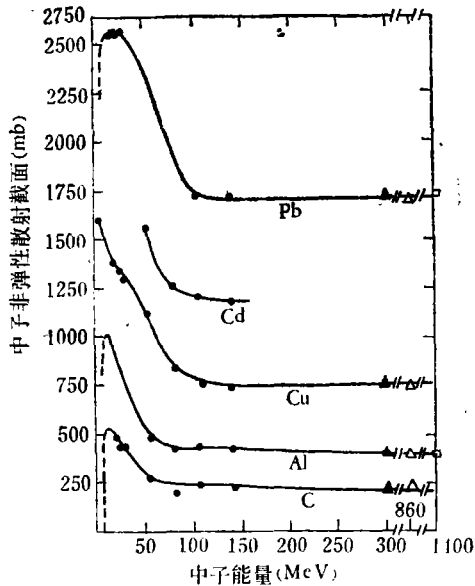


图8 非弹性散射截面图

6. 横向衰减长度 $\lambda$ 是一个极为重要的屏蔽参数,因为它既影响着辐射场的安全,又关系着屏蔽结构的造价。如果 $\lambda$ 取得过大,则可能过于保守而使经济受损;反之, $\lambda$ 取小了,可能导致不安全的屏蔽。目前,在国外高能加速器的屏蔽设计中,对混凝土,采用 $\lambda = 120 \text{g}/\text{cm}^2$ ,这是较合理的数值。

表 2 国外某些  $\lambda$  的测量值

实验室	质子能量 [GeV]	密度 $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	衰减长度 $\lambda$ [g/cm <sup>2</sup> ]			文 献
			实验值	计算值	o'Brien[5] 势垒因子导出	
ARGONNE	12.5	3.8	173	104		[2]
DUBNA.	3.2—10	2.35	171	104		[3]
CERN	19.2	2.35	107	117	107	[4]
CERN	28	1.7	117±2			[6]
KEK	12	2.42 3.65	116.6 125.8			本工作

本工作是 80 年 3 月在日本高能物理研究所完成的。加藤和明, 近藤健次郎副教授给予了热情的支持和帮助。平山英夫, 伴秀一博士参加了阈能活化探测器方法的工作, 对此表示感谢。

吴靖民和刘桂林同志参与了本文的讨论, 并提出了许多有益的提议, 在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] H. W. Patterson and R. H. Thomas, Accelerator Health Physics ACADEMIC PRESS New York, 1973.
- [2] Howe, H. J. et al., ANL-7273 Argonne, 1966.
- [3] Alenikow, B. E. et al., JINR Preprint 9-2933. Dubna 1966.
- [4] Gobel. K. and Ranft. J., CERN 70—16, Geneva 1970.
- [5] O'Brien, K., HASI-203, New York, 1968.
- [6] 1966 CERN-LRL-RHEL Shredling Experiment at CERN Proton Synchrotron, UCRL-17941, 1968.

## DETERMINATION OF THE NEUTRON ATTENUATION LENGTH $\lambda$ IN CONCRETE SHIELDING

TANG E-SHENG LI JIAN-PING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

A precise attenuation length  $\lambda$  is greatly important in calculation of shielding, since this parameter influences the radiation field transmitted by an accelerator shield. The cost may be considerably reduced, if the reasonable parameters are accepted.

Nuclide spectral analysis of concrete samples taken from the shielding wall near by the target of high energy accelerator have been made. The attenuation length  $\lambda$  is determined and compared with results from other laboratories.