

六. 放射源

按放射源的密封性能,放射源有密封放射源和非密封放射源之分。密封放射源是指密封在包壳里的或紧密地固结在覆盖层里并呈固体形态的放射性物质。密封源的包壳或覆盖层应有足够的强度,使源在设计的使用条件和正常磨损情况下,以及在预计的事故条件下,均能保持密封性能,不会有放射性物质泄漏出来。

按照放射源的辐射类型,大致可以分成 α 源、 β^- 源、 β^+ 源、 γ 源、中子源和放射性核素能源等。

表 6-1 放射源的基本分类

放射源类别	利用辐射	放射源类型	制源用放射性核素
α 源	α 粒子	天然核素 α 源	^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{233}U , ^{235}U
		人工核素 α 源	^{210}Po , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm
β^- 源	β^- 粒子	低能 β^- 源	^3H , ^{63}Ni ,
		中能 β^- 源	^{14}C , ^{45}Ca , ^{137}Cs , ^{85}Kr , ^{147}Pm , ^{204}Tl
		高能 β^- 源	^{90}Sr - ^{90}Y , ^{106}Ru - ^{106}Rh
β^+ 源	β^+ 粒子	正电子源	^{22}Na , ^{58}Co
γ 光子源	光子	超低能 X 射线源 (<6keV)	α 或 β 粒子轰击低原子序数靶核产生
		低能光子源 (6~150keV)	^{55}Fe , ^{57}Co , ^{75}Se , ^{109}Cd , ^{125}I , ^{153}Gd , ^{169}Yb , ^{170}Tm , ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm
		韧致辐射源	^{90}Sr 、 ^{147}Pm 、 ^{85}Kr 、 ^3H 与靶物作用
		中等强度 γ 源	^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{124}Sb , ^{182}Ta , ^{226}Ra
		高强度 γ 源 (> 10^{13}Bq)	^{60}Co , ^{137}Cs
		穆斯保尔源	$^{57}\text{Fe}/^{57}\text{Co}$, $^{119}\text{Sn}/^{119\text{m}}\text{Sn}$, $^{121}\text{Sb}/^{121\text{m}}\text{Sn}$, $^{125}\text{Te}/^{125}\text{I}$, $^{151}\text{Eu}/^{151}\text{Sm}$, $^{154}\text{Gd}/^{154}\text{Eu}$, $^{155}\text{Gd}/^{155}\text{Eu}$, $^{161}\text{Dy}/^{161}\text{Tb}$, $^{169}\text{Tm}/^{169}\text{Er}$
中子源	中子	(α ,n)源	^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{242}Cm , ^{244}Cm
		(γ ,n)源	^{124}Sb , ^{24}Na , ^{140}La , ^{88}Y , ^{56}Mn , ^{226}Ra , ^{72}Ga
		自裂变中子源	^{252}Cf
放射性核素能源	衰变能	α 源	^{238}Pu , ^{210}Po
		β^- 源	^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{147}Pm , ^{137}Cs
		β^- , γ 源	^{60}Co
标准物		气体	^3H , ^{85}Kr
		液体	多种核素
		固体	多种核素

密封放射源包括源芯和包壳两部分。

源芯制备工艺: 电化学工艺、硅酸盐工艺(玻璃、搪瓷、陶瓷)、粉末冶金和滚轧工艺、稳定的金属块等。选择那种工艺是根据放射线特点、源强度、放射性核素的元素性质和使用要求确定。

穿透能力弱的 α 源一般用电化学工艺和粉末冶金滚轧工艺,在制备过程中同时加盖保护膜。一些易与硅酸形成一体的元素如铯-90 β 源和铯 γ 源等则用硅酸盐工艺制成搪瓷或陶瓷源芯。钴-60 γ 源和铱-192 γ 源则直接用其金属做源芯。 ^{241}Am -Be中子源等只能用其粉末压制制备源芯,全靠牢固的源壳保证。

源壳材料一般选用抗腐蚀性能好，易于加工和焊接的不锈钢材料。 α 源和低能 β 和 γ 源则需要薄的源窗材料或低原子序数材料如铍、钛等，粉末冶金和滚轧工艺在工艺过程中在其发射层表面加了一层延展好的薄覆盖层。氚靶类源具有较好的稳定性，一般不需要加保护膜。 α 和 β 标准源和参考源，一般活度很低和在实验室使用，可以不加覆盖层。

生产者应确保所用包壳材料与周围环境相适应，如源托、装置、环境等要与所用包壳材料相容。

1. 放射源的质量控制

1.1 质量控制标准

放射源的质量控制包括两个方面：一是源本身的技术参数符合规定，如：尺寸规格，放射性活度，活性区放射性分布的均匀性，能谱等。另一个方面是源的安全性能。

GB4075 按照密封放射源的各种典型使用方式，规定了放射源的分级和质量标准。密封放射源的分级用一个字母和五个阿拉伯数字表示。起始用一个字母 C 或 E。C 表示源内放射性核素的活度不超过表 6-3 规定的限额，E 则表示超过此限额。以下数字依次为：

- 第一个数字表示温度特性的等级；
- 第二个数字表示外压力特性的等级；
- 第三个数字表示冲击特性的等级；
- 第四个数字表示震动特性的等级；
- 第五个数字表示穿刺特性的等级。

密封放射源的分级是根据以下几个因素确定的：

- (1) 所使用放射性核素的毒性分组规定的活度水平（见表 6-3）；
- (2) 放射性核素的毒性分组（见表 6-4）；
- (3) 典型使用的分类（见表 6-5）；
- (4) 对火灾、爆炸和腐蚀的考虑。

表 6-2 密封放射源质量检验标准

检验项目	级别						X
	1	2	3	4	5	6	
温度	免检	-40°C (20min) +80°C(1 h)	-40°C(20 min) +180°C(1 h)	-40°C(20min) +400°C(1 h) 及 400°C 至 20°C 的热冲击	-40°C(20min) +600°C(1h) 及 600°C 至 20°C 的热冲击	-40°C(20min)+800°C (1h) 及 800°C 至 20°C 的热冲击	特殊检验
外压力	免检	由绝对压力 25kPa 至大气压	由绝对压力 25kPa 至 2 MPa	由绝对压力 25 kPa 至 7 MPa	由绝对压力 25 kPa 至 70 MPa	由绝对压力 25 kPa 至 170 MPa	特殊检验
冲击	免检	50g，下落距离 1 m 或等值冲击能	200g，下落距离 1 m 或等值冲击能	2 kg，下落距离 1 m 或等值冲击能	5 kg，下落距离 1 m 或等值冲击能	20 kg，下落距离 1 m 或等值冲击能	特殊检验
震动	免检	在 49ms ⁻² (5g)条件下 25Hz 至 500 Hz 试验三次，每次 10	在 49m s ⁻² (5g)条件下 25 Hz 至 50 Hz 在峰与峰之间振幅为 0.635 mm 时 50 Hz 至	在峰与峰之间振幅为 1.5 mm 时 25 Hz 至 80 Hz 和在 196 ms ⁻² (20g) 条件	不需要	不需要	特殊检验

		min	90 Hz 和在 98 ms ⁻² (10g) 条件下 90 Hz 至 500 Hz 以上均试验三次, 每次 10 min	下 80 Hz 至 2000 Hz 以上均试验三次, 每次 10 min			
穿刺	免检	重锤 1 g, 下落距离 1 m 或等值冲击能	重锤 10g, 下落距离 1 m 或等值冲击能	重锤 50 g, 下落距离 1 m 或等值冲击能	重锤 300 g, 下落距离 1 m 或等值冲击能	重锤 1 kg, 下落距离 1 m 或等值冲击能	特殊检验

表 6-2 所示的每项检验, 要用该种类型的两个源 (样品源、假密封源或模拟源) 进行检验。以检验后密封源能否保持它的密封性能来确定是否符合标准。用浸泡或擦拭检查是否有放射性物质泄露。

表 6-3 按放射性核素毒性分组规定的活度水平

放射性核素组	规定活度 TBq (Ci)	
	可浸出的 ^a	不可浸出的 ^b
A	0.01 (约 0.3 Ci)	0.1 (约 3 Ci)
B1	1 (约 30 Ci)	10 (约 300 Ci)
B2	10 (约 300 Ci)	100 (约 3000 Ci)
C	20 (约 500 Ci)	200 (约 5000 Ci)

a 可浸出的: 依据 GB/T15849—1995 中 5.1.1 规定, 将源芯浸在 50°C 100 ml 静水中, 4 h, 水中的放射性活度大于总活度 0.01%。

b 不可浸出的: 依据 GB/T15849—1995 中 5.1.1 规定, 将源芯浸在 50°C 100 ml 静水中, 4 h, 水中的放射性活度低于总活度 0.01%。

表 6-4 放射性核素的毒性分组

A 组: 高毒 (第 1 分组: 极毒)									
²²⁷ Ac	²⁴⁹ Cf	²⁴² Cm	²⁴⁵ Cm	²³¹ Pa	²³⁸ Pu	²⁴¹ Pu	²²⁶ Ra	²²⁸ Th	²³² U
²⁴¹ Am	²⁵⁰ Cf	²⁴³ Cm	²⁴⁶ Cm	²¹⁰ Pb	²³⁹ Pu	²⁴² Pu	²²⁸ Ra	²³⁰ Th	²³³ U
²⁴³ Am	²⁵² Cf	²⁴⁴ Cm	²³⁷ Np	²¹⁰ Po	²⁴⁰ Pu	²²³ Ra	²²⁷ Th	²³⁰ U	²³⁴ U

B 组: 中毒 (第 2 高毒组)									
²²⁸ Ac	²¹⁰ Bi	³⁶ Cl(3)	¹⁵² Eu	¹²⁶ I	⁵⁴ Mn	¹⁰⁶ Ru	⁹⁰ Sr	²³⁴ Th(3)	
^{110m} Ag	²⁴⁹ Bk	⁵⁸ Co(3)	¹⁵⁴ Eu	¹³¹ I	²² Na	¹²⁴ Sb(3)	¹⁸² Ta(3)	²⁴⁰ Tl(3)	
²¹¹ At	⁴⁵ Ca(3)	⁶⁰ Co(3)	¹⁸¹ Hf(3)	¹³³ I(3)	²³⁰ Pa	¹²⁵ Sb(3)	¹⁶⁰ Tb(3)	¹⁷⁰ Tm(3)	
¹⁴⁰ Ba(3)	^{115m} Cd	¹³⁴ Cs	¹²⁴ I	^{114m} In	²¹² Pb	⁴⁶ Sc(3)	^{127m} Te(3)	²³⁶ U	
²⁰⁷ Bi	¹⁴⁴ Ce	¹³⁷ Cs	¹²⁵ I	¹²⁹ It(3)	²²⁴ Ra	⁸⁹ Sr(3)	^{129m} Te(3)	⁹¹ Y	⁹⁵ Zr(3)

B 组 (第 3 组: 中毒)									
¹⁰⁵ Ag	¹⁴ C	¹⁶⁹ Er	¹⁶⁶ Ho	⁵⁶ Mn(4)	²⁰³ Pb	²²⁰ Rn(4)	⁸⁵ Sr	¹⁷¹ Tm	
^{110m} Ag	⁴⁷ Ca	¹⁷¹ Er	¹³⁰ I	⁹⁹ Mo	¹⁰³ Pd	²²² Rn	⁹¹ Sr	⁴⁸ V	
⁴¹ Ar	¹⁰⁹ Cd(2)	¹⁵² Eu	¹³² I	²⁴ Na	¹⁰⁹ Pd	⁹⁷ Ru	⁹⁶ Tc	¹⁸¹ W(4)	
⁷³ As	¹¹⁵ Cd	¹⁵⁵ Eu(2)	¹³⁴ I(4)	^{93m} Nb	¹⁴⁷ Pm	¹⁰³ Ru	⁹⁷ Tc(4)	¹⁸⁵ W	

⁷⁴ As	¹⁴¹ Ce	¹⁸ F(4)	¹³⁵ I	⁹⁵ Nb	¹⁴⁹ Pm	¹⁰⁵ Ru	^{97m} Tc	¹⁸⁷ W
⁷⁶ As	¹⁴³ Ce	⁵² Fe	^{115m} In(4)	¹⁴⁷ Nd	¹⁴² Pr	³⁵ S(4)	⁹⁹ Tc(4)	¹³⁵ Xe(4),
⁷⁷ As	³⁸ Cl(4)	⁵⁵ Fe	¹⁹⁰ Ir	¹⁴⁹ Nd(4)	¹⁴³ Pr	¹²² Sb	^{125m} Te	⁸⁷ Y
¹⁹⁶ Au	⁵⁷ Co	⁵⁹ Fe	¹⁹⁴ Ir	⁶³ Ni	¹⁹¹ Pt	⁴⁷ Sc	¹²⁷ Te(4)	⁹⁰ Y
¹⁹⁸ Au	⁵⁸ Co	⁶⁷ Ga	⁴² K	⁶⁵ Ni(4)	¹⁹³ Pt(4)	⁴⁸ Sc	¹²⁹ Te(4)	⁹² Y
¹⁹⁹ Au	⁵¹ Cr(4)	⁷² Ga	⁴³ K	²³⁹ Np	¹⁹⁷ Pt	⁷⁵ Se	^{131m} Te	⁹³ Y
²³¹ Ba	¹³¹ Cs(4)	¹⁵³ Gd	^{85m} Kr(4)	¹⁸⁵ Os	⁸⁶ Rb	³¹ Si(4)	¹³² Te	¹⁷⁵ Yb
⁷ Be(4)	¹³⁶ Cs	¹⁵⁹ Gd	⁸⁷ Kr	¹⁹¹ Os	¹⁸³ Re	¹⁵¹ Sm(2)	²³¹ Th	⁶⁵ Zn
²⁰⁶ Bi	⁶⁴ Cu(4)	¹⁹⁷ Hg	¹⁴⁰ La	¹⁹³ Os	¹⁸⁶ Re	¹⁵³ Sm	²⁰⁰ Tl	^{69m} Zn
²¹² Bi	¹⁶⁶ Dy(4)	^{197m} Hg	¹⁷⁷ Lu	³² P	¹⁸⁸ Re	¹¹³ Sn	²⁰¹ Tl(4)	⁹⁷ Zr
⁸² Br	¹⁶⁹ Dy	²⁰³ Hg	⁵² Mn	²³³ Pa	¹⁰⁵ Rh	¹²⁵ Sn	²⁰² Tl	

C 组 (第 4 组: 低毒)								
³⁷ Ar	⁷¹ Ge	^{113m} In	¹⁵ O(3)	⁸⁷ Rb	^{85m} Sr	Th(2)	^{131m} Xe	⁹³ Zr(2)
^{58m} Co	³ H	⁸⁵ K r	^{191m} Os	¹⁸⁷ Re	^{96m} Tc	²³⁵ U	¹³³ Xe	
^{134m} Cs	¹²⁹ I	⁹⁷ Nb	^{193m} Pt	^{103m} Rh	^{99m} Tc	²³⁸ U	^{91m} Y	
¹³⁵ Cs	^{111m} In	⁵⁹ Ni	^{197m} Pt	¹⁴⁷ Sm	²³² Th(2)	天然 U	⁶⁹ Zn	

说明: 括号内组别为欧洲原子能联营指导书 84/466 和 84/467 推荐的类别, 这里的 (2)、(3) 和 (4) 分别表示的组别为 2 组、3 组或 4 组。该组别可与国际标准一起使用

表 6-5 典型使用的密封放射源级别 (性能) 要求

密封放射源使用方式		密封源级别 (由检验确定)				
		温度	压力	冲击	震动	穿刺
工业射线照相	密封源	4	3	5	1	5
	装置中源	4	3	3	1	3
医用	射线照相	3	2	3	1	2
	γ射线远距离治疗	5	3	5	2	4
	近距离治疗 ^a	5	3	2	1	1
	表面敷贴器 ^b	4	3	3	1	2
γ仪表 (中、高能)	无防护源	4	3	3	3	3
	装置中源	4	3	2	3	2
β仪表、低能γ仪表或 X 射线荧光分析 ^b		3	3	2	2	2
油田测井		5	6	5	2	2
便携式湿度计和密度计 (包括手提和车载)		4	3	3	2	3
一般中子源应用 (不包括反应堆启动)		4	3	3	2	3
仪器刻度源, 活度>1 MBq		2	2	2	1	2
γ辐照源	I 类 ^b	4	3	3	2	3
	II、III、IV 类 ^c	5	3	4	2	4
离子发生器 ^c	色谱	3	2	2	1	1
	静电消除器	2	2	2	2	2
	感烟探测器	3	2	2	2	2

a 这种类型的源在使用时可能会严重变形, 生产者和使用者应商定附加的或专门的检验程序。
b 不包括充气源。
c 可以用装置中源或源组件作检验。

表 6-5 给出的分级未考虑火灾、爆炸及腐蚀的影响。除非需要, 只有当密封源活度超过表 6-3 所示规定值时才须考虑对火灾、爆炸、腐蚀和放射性核素毒性的影响进行评价。

如果活度超过规定值，则应根据不同情况来考虑密封源的分级；活度不超过表 6-3 的规定值，无须进一步考虑毒性和可溶性就直接使用表 6-3。

引起腐蚀的一般条件是：(1) 大气中有 SO_2 、 HS_2 、 Cl_2 和 HCl ；(2) 液体中含有盐，特别是氯化物中的阴离子；(3) 源和源托材料不同，且处于潮湿环境中；(4) 源的强辐射引起空气电离。

放射源生产厂家对源的使用寿命规定建议使用期 (RWL)。超过使用期的源应退役，或者经过检验仍可使用的，应规定检验周期。源在使用过程发生火灾、爆炸、腐蚀等意外情况应对源检验后，确定是否可以继续使用。经常用擦拭检查源是否有泄漏。新出厂的源规定表面擦拭检查不超过 200Bq。

1.2 泄漏检验

放射性检验方法。探测阈值是 10~1Bq， 限值是 200 Bq。

浸泡检验：

(1) 热液体浸泡检验。

将密封源浸泡在既不腐蚀源表面材料，又能在这种条件下有效地去除泄漏出来的所有痕量放射性物质的液体中（蒸馏水、稀的洗涤剂或螯合剂、5%左右的微酸性溶液或微碱性溶液）。将液体加热到 $50\pm 5^\circ\text{C}$ ，使源在该温度下浸泡 4 小时。取出源并测量液体的放射性活度。

(2) 沸腾液体浸泡检验

将密封源放在沸腾水中煮沸 10 分钟，取出源后，测量液体的放射性活度。

(3) 将密封源浸泡在 $20\pm 5^\circ\text{C}$ 的室温的液体中 24 小时，取出源并测量液体放射性活度。

(4) 将密封源浸泡在液体闪烁液中 3 小时，取出源并用液体闪烁计数器测量放射性活度。

擦拭检查：用干滤纸或湿滤纸擦拭源表面，测量滤纸放射性活度，不超过 200 Bq。

非放射性检验法：

(1) 氦质谱仪泄漏检验法。

(2) 真空鼓泡。将源放入真空室（15~25kPa）的液体中，观察是否有气体从源中移出。

(3) 热液体鼓泡检验。将源置于 90~95 度水浴中，观察是否有气泡移出。

(4) 将源加压（1MPa）后，取出源放入溶液中，观察是否有气体移出。

2. 放射源的特点和应用

2.1 α 放射源

放射性核素衰变发射的 α 粒子能量不是连续的，一般在 4~8MeV，在空气中射程是 3~5cm。在金属中的射程是十微米左右，外照射防护容易，但是对源窗材料的选择和确定其厚度造成一定限制。

表 6-6 ^{210}Po α 粒子(5.304MeV)在某些物质中的射程

材料	密度(g/cm^3)	射程	
		mg/cm^2	μm
空气	1.29×10^{-3}	5.00	38400
聚酯薄膜	—	—	40
云母	2.76~3.00	5.00	17~18
铍	1.93	3.46	19
铝	2.70	5.97	22
钛	4.50	7.97	18
不锈钢	7.86	8.60	11
铜	8.93	8.93	10
镍	8.90	8.82	9.9

银	10.49	11.5	11
钽	16.6	15.5	9.3
金	19.3	16.2	8.4
铂	21.5	16.1	7.5

表 6-7 不同厚度金覆盖层对 ^{241}Am 所发射的 α 粒子能量 (5.485MeV) 的影响 (6) 82

金覆盖层厚度 (μm)	1.27	2.57	3.81	5.08	6.35
α 粒子最大能量 (MeV)	4.7	3.8	3.0	2.2	1.3

表 6-8 主要 α 放射源

种类	半衰期	α 粒子 能量 (MeV) 和分支比 (%)	γ 和 X 射线能量 (keV) 和分支比 (%)	主要制备工艺	主要用途
^{210}Po	138.376 d	5.30438 (100)	803(0.00121)	电镀 粉末冶金和滚轧	静电消除器
^{241}Am	432.2 y	5.4429(13.3) 5.4856(85.1)	26.344(2.4) 33.196(0.126) 59.54(35.78) XL:13.9(42)	粉末冶金和滚轧	离子发生器 色谱仪 感烟探测器
^{238}Pu	87.7 y	5.4563(28.98) 5.49903(70.91)	43.498(0.0395) 99.853(0.00735) 152.72(0.000937) XL:13.6(11.7)	粉末冶金和滚轧	离子发生器 色谱仪 静电消除器
^{242}Cm	162.8 d	6.066942(25.9) 6.11272(74.1)	44.08(0.0325) 101.93(0.0025) 157.42(0.0014) XL:14.3(11.4)	粉末冶金和滚轧	
^{244}Cm	18.1 y	5.7627(23.6) 5.80482(76.4)	42.824(0.024) 98.86(0.00162) XL:14.3(9.7)	粉末冶金和滚轧	

放射性静电消除器。放射性静电消除器是根据正负电荷中和原理工作的。它是由放射源和固定源的金属托架组成，托架接地，不需要电源，它既可以中和带电体的正电荷，也可以中和负电荷，并可消除静电到接近零。放射性静电消除器常用 ^{210}Po 放射源，也可以用 ^{238}Pu 和 ^{241}Am 以及 β 放射源。

放射性静电消除器的工作能力以源最大放电电流来表示。一个放射源所能提供的最大电离电流（饱和电流）为 I_s (A)，

$$I_s = \frac{A \cdot E \cdot q}{W}$$

式中，A 为放射性活度(Bq)；E 为发射粒子能量 (eV)；q 为离子带电电量 (1.6×10^{-19} C)；W 为每产生一正负对正负离子所消耗的平均能量，在空气中约为 35 eV。比如活度为 1GBq 的 ^{210}Po 源，在空气中最大电离电流为

$$I = \frac{1 \times 10^9 \times 5.3 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{35} = 24 \mu\text{A}$$

静电消除器实际工作能力是理论计算值的十分之一左右。根据需要消除的静电电荷量选择放射源强度。有些物体表面积累的电荷量不再增加，可以通过控制消除静电的时间，使静电降到允许水平。多数情况静电电荷是不断积累的，消除静电的速度只有大于电荷积累速度

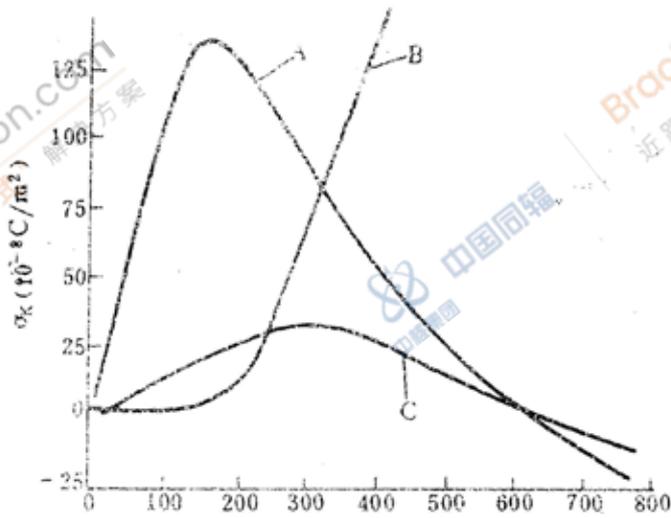
才有效。

实际工作中不直接测量电荷密度 ($\sigma=C/m^2$) 而是测量静电电位 E,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{A \cdot E \cdot q \cdot \eta}{W \cdot u \cdot e \cdot b}$$

式中, σ 为表面电荷密度; ϵ 为介电常数; η 为消除器工作效率(%); u 为带电物体移动速度(m/s); b 为物体宽度(m)。

当表面静电电荷很高时, 放射性静电消除器不能把它消除到允许水平, 这时要采用感应电晕放电消除器, 它是由成排的金属丝或导电纤维组成, 在高电荷密度下金属丝尖端感应电晕放电, 电离空气消除静电。但是感应放电消除器起始工作电压高, 消除后残余电荷多。它与放射性静电消除器合并使用效果好。



A: 感应放电静电消除器; B: 放射性静电消除器; C: 联合式静电消除器; σ_H : 消除前表面电荷密度; σ_K : 消除后表面电荷密度。

图 6-1 各种静电消除器的工作特性

表 6-9 常用放射性静电消除源特性

核素	半衰期	衰变类型	最大能量 MeV	平均能量 MeV	空气中射程 cm		平均电离比值 (离子对/cm)	饱和电流 $\mu A/GBq$
					最大	平均		
^{241}Am	432.2 y	α	5.442 5.485			4.0	3.86×10^4	25
^{238}Pu	87.7 y	α	5.499 5.456			4.0	3.91×10^4	25
^{239}Pu	24110 y	α	5.105 5.144 5.156			3.6	4.94×10^4	23
^{210}Po	138.4 d	α	5.304			3.8	3.99×10^4	24
^{204}Tl	3.78 d	β	0.763	0.267	215	48	171	1.3
^{147}Pm	2.623 y	β	0.224	0.062	38	4.3	444	0.3
^{85}Kr	10.78 y	β	0.687	0.249	178	44	174	1.2
3H	12.33 y	β	0.0186	0.005	0.44	0.07	2200	2.5×10^{-3}
$^{90}Sr-^{90}Y$	28.79 y	β	0.546 2.28	0.200 0.931	136 808	31 275	191 104	0.97 0.46

^{241}Am α 放射源的重要用途是离子感烟探测器电离源。 α 放射源的其他用途有：放射性同位素避雷器；负氧离子发生器；色谱仪中的离子发生器。在测量分析仪表中应用有：电离式气体密度计或压强计；电离式混杂浓度计；电离式气体湿度计；同位素甲烷测量报警装置；气体流量测量； α 粒子透射式仪表等。

2.2 β 放射源

β 放射源包括发射 β^- 粒子、 β^+ 粒子，以及发射俄歇电子的放射源，其中发射 β^- 粒子的放射源是主要的，通常写成 β 放射源，其他电子源则应用专门的名词核符号。

核素发射的粒子能量是连续能谱，其能量可以用最大能量或平均能量表示。 β 放射源按发射的最大能量可分为：低能 β （电子）源，中能 β 源和高能 β 源。

表 6-10 主要 β 放射源

按发射最大能量分类	放射源	核素半衰期	β 粒子能量, keV		β 粒子最大射程	
			最大能量	平均能量	在空气中, mm	mg/cm ²
低能	^{55}Fe	2.73 y	5.4, 5.6		0.3	0.05
	^3H	12.33 y	18.587	5.69	5.2	0.8
	^{63}Ni	100.1 y	66.945	17.0	40	6.3
中能	^{14}C	5730 y	156.467	49.4		30
	^{147}Pm	2.6234 y	224.6	62.1		50
	^{85}Kr	10.779 y	687.4	251		280
	^{204}Tl	3.78 y	763.7	243		300
高能	$^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$	28.79 y	2280	931		1100
	$^{106}\text{Ru} - ^{106}\text{Rh}$	373.59 d	3541(78%)	1505		1800

电子俘获鉴定器电离源。在色谱仪的电子俘获鉴定器中装有低能 β 放射源作电离源。鉴定器应有较高的信噪比。可供选择的放射源有 ^{55}Fe , ^3H , ^{63}Ni , ^{147}Pm β 放射源和 ^{241}Am α 放射源。它们的性能见表 6-11。从表中可见 ^{63}Ni 是比较好的。

表 6-11 安装不同放射源电子俘获鉴定器的工作性能

放射源	源活度 (MBq)	饱和 I_s (nA)	工作 I_{op} (nA)	噪声 (pA)	信号(pA)		信—噪比	
					F-11	CCl_4	F-11	CCl_4
^3H	1.85×10^4	30	15	3	132	30	44	10
^{241}Am	0.56	16	7	30	110	35	3.7	1
^{63}Ni	555	9	5.3	1.5	80	19	54	13
^{63}Ni	18.5	0.48	0.034	0.4	10	2.8	25	7
^{55}Fe	185	0.5	0.3	0.1	6.4	1.7	64	17

用于电子器件高可靠性引发放电和导电。数码显示管、电涌放电器、辉光放电管以及其他各类电子管和真空计等，需要起始电子引发放电，通过一个很弱的 β 放射源，使它周围介质气体电离，可以确保器件启动迅速，稳定性好，延长使用寿命。

β 反散射测厚。 β 粒子的散射作用与 β 粒子能量、散射体厚度、密度及其原子序数有关。 β 反散射技术的重要用途是测量覆盖层厚度，测量的灵敏度与基体与覆盖层材料的原子序数之差成比例，它们之间的差越大，越灵敏。

β 反散射技术主要用在以下几个方面：

- (1) 在金属板上所加的纸、塑料、橡胶层的厚度；
- (2) 在各种织物、塑料、橡胶和纸等材料上所加薄层材料的厚度；

- (3) 在纸、塑料、橡胶板生产中控制厚度。仪表安装在金属滚筒处，以金属滚筒作为基体；
- (4) 在镀锡、镀锌金属板材料生产中，控制镀层厚度；
- (5) 在印刷电路板生产中控制金、锡、铝—锡合金、铜以及绝缘涂层和镀层的厚度；
- (6) 精密电子器件和计算机器件的金、银、钯、铑、锡、铅—锡合金层的厚度测量和控制；
- (7) 汽车工业上所用铝质汽缸上的镍和铬镀层，活塞上锌和铅层以及各种机械设备所用滚珠轴壳内的合金层和各种机械工具上碳化钛及氮化钛坚硬镀层的厚度控制；
- (8) 各种生活用品和装饰品镀层控制，如珠宝镀金和银餐具、眼镜架、表壳、表带镀金或仿金材料。
- (9)

表 6-12 β 反散射技术测量覆盖层厚度的应用范例

应用方面	β 放射源	放射源活度 (MBq)	测厚范围 (μm)	误差
钢板热浸锌	^{204}Tl	74	25~75	$\pm 3\%$
	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	1.7	50~125	$\pm 3\%$
钢基体覆盖塑料	^{147}Pm	37	<25	$\pm 5\%$
	^{85}Kr	37	<150	$\pm 5\%$
	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	3.7	<750	$\pm 5\%$
铜基体镀金	^{85}Kr	3.7	<25 小面积	$\pm 3\%$
镍基体镀金	^{85}Kr	3.7	<25 小面积	$\pm 3\%$
塑料基体镀铜	^{85}Kr	3.7	<25 小面积	$\pm 3\%$
锆基体镀铬	^{147}Pm	37	<25	$\pm 2\%$

β 射线透射测厚。 β 射线通过吸收体将被吸收，其被吸收而减弱的程度与吸收体的厚度及密度有关。 β 射线通过厚度为 d 的吸收体后，其辐射强度从 I_0 变为 I_d ，以下式来表示：

$I_d = I_0 e^{-\mu d}$ ，如果以质量衰减系数 μ_m 代替线性衰减系数 μ 时，上式改为 $I_d = I_0 e^{-\mu_m \rho d}$ 或者

$$\rho d = \frac{1}{\mu_m} \ln \frac{I_0}{I_d}$$

不同能量的 β 粒子穿透物体的厚度不同，根据待测材料的厚度范围来选择合适能量的放射源和强度。

表 6-13 几种主要 β 测厚源的特性 (6)422

放射源	铝中半厚度 (mg/cm^2)	最大射程 (mg/cm^2)	可测范围		
			Al(mm)	Fe(mm)	其他材料 (mg/cm^2)
^{14}C	2.5	~30			2~10
^{147}Pm	4.5	50	0.004~0.12	0.001~0.04	6~18
$^{85}\text{Kr}, ^{204}\text{Tl}$	25	280	0.04~0.8	0.08~0.25	20~100
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	120	1100	0.3~3	0.1~1	100~600
$^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$	200	1600	0.6~4.5	0.2~1.5	200~1000

2.3 γ 放射源

低能光子源。除用发射低能 γ 射线核素制备低能光子源外，亦可用 α 粒子， β 粒子， γ 光子激发靶物发射次级 X 射线，制成低能光子源

表 6-14 放射性核素低能光子源和与相应靶物组成的次级低能光子源的光子发射率

能量 keV	低能光子源	光子发射率 (s ⁻¹ · Sr ⁻¹)
1.49(AIK _α)	⁵⁵ Fe-Al	4x10 ² (⁵⁵ Fe—370MBq)
1.55(AIK _β)		
1.74(SiK _α)	⁵⁵ Fe-Si	8x10 ² (⁵⁵ Fe—370MBq)
1.83(SiK _β)		
2.31(SK _α)	⁵⁵ Fe-S	5.5x10 ² (⁵⁵ Fe—370MBq)
2.46(SK _β)		
3.69(CaK _α)	⁵⁵ Fe-Ca	1.5x10 ⁴ (⁵⁵ Fe—370MBq)
4.01(CaK _β)		
4.09(ScK _α)	⁵⁵ Fe-Sc	2x10 ⁴ (⁵⁵ Fe—370MBq)
4.46(ScK _β)		
4.51(TiK _α)	⁵⁵ Fe-Ti	2.5x 10 ⁴ (⁵⁵ Fe—370MBq)
4.93(TiK _β)		
5.89(MnK _α)	⁵⁵ Fe	1.6x10 ⁴ (⁵⁵ Fe—1.85MBq)
6.49(MnK _β)		
6.4(FeK _α)	⁵⁷ Co	6x10 ³ (⁵⁷ Co—37kBq)
7.06(FeK _β)		
8.04(CuK _α)	²⁴¹ Am-Cu	2.5x10 ³ (²⁴¹ Am—370MBq)
8.91(CuK _β)		
11.9(NpKX)	²⁴¹ Am	2.2x10 ² (²⁴¹ Am—37kBq)
13.37(RbK _α)	²⁴¹ Am-Rb	8.8x10 ³ (²⁴¹ Am—370MBq)
14.97(RbK _β)		
14.4	⁵⁷ Co	2.7x10 ³ (⁵⁷ Co—37kBq)
14.4	⁸⁸ Y	1.8x10 ⁴ (⁸⁸ Y—37kBq)
17.44(MoK _α)	²⁴¹ Am-Mo	2.43x10 ⁴ (²⁴¹ Am—370MBq)
19.63(MoK _β)		
17.8(NpL _β)	²⁴¹ Am	5.3x10 ³ (²⁴¹ Am—37kBq)
20.1(NpL _γ)	²⁴¹ Am	1.4x10 ³ (²⁴¹ Am—37kBq)
22.1(AgK _α)	²⁴¹ Am-Ag	3.85x10 ⁴ (²⁴¹ Am—370MBq)
24.99(AgK _β)		
22.1(AgK _α)	¹⁰⁹ Cd	3x10 ⁴ (¹⁰⁹ Cd—370kBq)
24.99(AgK _β)		
27.4(IK _α)	^{123m} Te	1.4x10 ⁴ (^{123m} Te—370kBq)
31.1(Ik _β)		
32.06(BaK _α)	²⁴¹ Am-Ba	4.65x10 ⁴ (²⁴¹ Am—370MBq)
36.55(BaK _β)		
32.06(BaK _α)	¹³⁷ Cs	2.3x10 ³ (¹³⁷ Cs—37kBq)
36.55(BaK _β)		
39.5(SmK _α)	¹⁵² Eu	1x10 ⁴ (¹⁵² Eu—370kBq)
45.2(SmK _β)		
44.23(TbK _α)	²⁴¹ Am-Tb	7.6x10 ⁴ (²⁴¹ Am—370MBq)
50.65(TbK _β)		
59.5	²⁴¹ Am	1x10 ⁴ (²⁴¹ Am—370MBq)
72.2(TiK _α)	²⁰³ Hg	7.4x10 ³ (²⁰³ Hg—74kBq)
83.0(TiK _β)		
88	¹⁰⁹ Cd	1x10 ³ (¹⁰⁹ Cd—370kBq)

β 粒子和物质相互作用可产生轫致辐射和特征辐射，这两种辐射是同时存在的。 β 粒子在单位径迹范围内消耗于轫致辐射的能量 $(dE/dx)_{\text{轫致}}$ 与 β 粒子能量 (E) 、介质原子序数 (z)

及密度 (ρ) 有关

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{轫致}} \propto \rho E_{\beta} Z^2。$$

高能 β 粒子在原子序数高、密度大的介质中产生的轫致辐射强度比较大。轫致辐射能谱是连续谱，其最大能量和 β 能谱最大能量的大小相近。轫致辐射谱形与放射性核素 β 粒子能谱有关，也与靶物性质、厚度及靶物与核素的组合形式等因素有关。

表 6-15 B 粒子激发不同靶物的光子产额

核素	靶物	β 源活度 GBq	靶材料	靶厚度 mg/cm ²	光子产额 (光子/ 粒子) %
³ H	Ti	177.6	源基体	7.25	1.3x10 ⁻²
³ H	Zr	88.8	源基体	7.25	4.2x10 ⁻³
¹⁴⁷ Pm	Al	5.55	源基体+Al 靶	60	2x10 ⁻¹
¹⁴⁷ Pm	Mg	1.295	源基体+Ag 靶	50	3x10 ⁻¹
⁸⁵ Kr	C	3.7	源基体+Ni 靶	150	1
²⁰⁴ Tl	Ag	3.5	Al 靶	30	2
⁹⁰ Sr— ⁹⁰ Y	Al	0.03	Al 靶	200	6.1

高能 α 粒子与低原子序数的物质作用可获得较高产额的特征 X 射线。

表 6-16 ²⁴⁴Cm α 粒子激发低能光子源的特性 (²⁴⁴Cm 源强 74MBq)

靶物	材料	原子序数 Z	光子能量 keV	光子产额/ [光子/(s·Sr)]
Be	金属	4	0.109	>3.4x10 ⁵
B	元素	5	0.184	4.6 x10 ⁴
C	石墨	6	0.279	4.4 x10 ⁴
	有机物	6	0.279	6.1 x10 ⁴
F	聚四氟乙烯	9	0.675	2.6 x10 ⁴
Mg	金属	12	1.255	2.9 x10 ⁴
Al	金属	13	1.487	2.4 x10 ⁴
Si	元素	14	1.742	2 x10 ⁴
S	元素	16	2.317	5 x10 ³
Ca	CaCO ₃	20	3.719	3 x10 ³
Ti	金属	22	4.55	3.1 x10 ³
Ag	金属	47	2.98 (Ag—LX)	4.1 x10 ³

γ 辐射探伤。 γ 射线通过被测件的正常部位后，其强度 $I=I_0e^{-\mu_m \rho d}$ 。式中 I_0 为无被测件时，探测器测量到的射线强度， ρ 和 d 分别为被测件的密度和厚度， μ_m 为材料对所用能量 γ

射线的质量衰减系数。射线通过被检件的缺陷部位后，其强度为 $I_1=I_0e^{-\mu_m(d-d')\rho-\mu_m d' \rho'}$

$\frac{I_1}{I} = \frac{e^{-\mu_m(d-d')\rho-\mu_m d' \rho'}}{e^{-\mu_m d \rho}}$ 。由于填充缺陷的物质通常是空气，或其它密度不同的物质，则反映出

$\rho \mu_m'$ 值与 $\rho \mu$ 值不同。式中 d' 和 ρ' 为缺陷部位的密度和厚度； μ_m' 是填充缺陷部位材料的质量衰减系数。

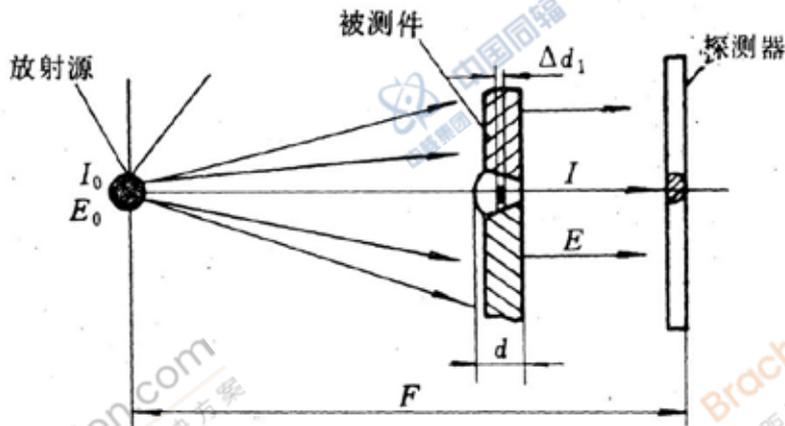


图 6-2 辐射探伤工作示意图 (6) 425)

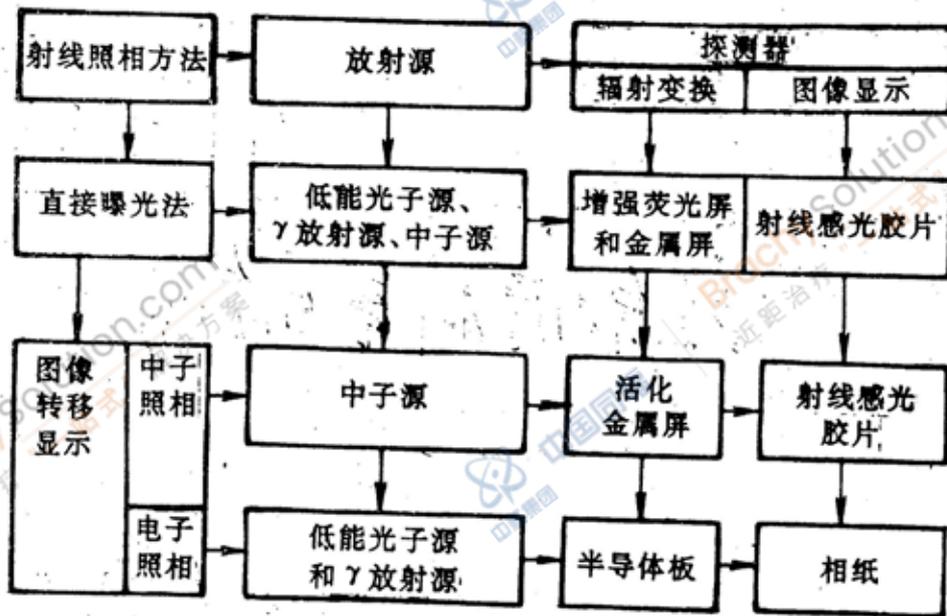


图 6-3 射线照相分类 (6) 426)

表 6-17 工业用射线照相方法的特性比较

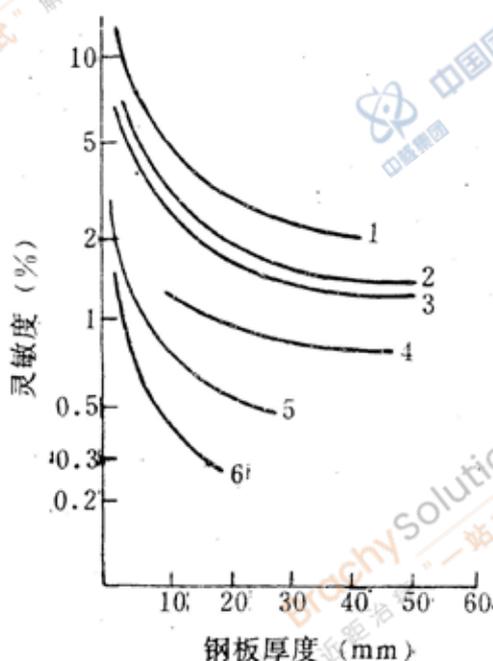
射线照相方法	放射源	探测器	检查对象	优点	缺点
放射源照相直接曝光	低能光子源, γ 放射源	射线照相胶片	焊缝接口, 铸件, 锻件, 冲模, 各种组件、材料 (包括金属、合金、塑料、陶瓷等)	不需电源; 可携带; 可测钢件厚 250mm; 可在很难进入位置探伤。	对于不同厚度和密度要有合适的源; 探测灵敏度有限制
中子照相图象	同位素中子源	被活化的转换	放射性物质制件, 重金属包壳中的	对被检件和放射源的其它类辐射不灵敏;	设备复杂; 中子注量密度低; 中子源

转移显示		屏和射线照相胶片	轻质材料	可能探测到元素的同位素；中子对重元素易透过而对轻元素不易透过	价格较高。
电子射线照相	低能光子源, γ 放射源	半导体板和相纸	焊缝接口, 铸件, 锻件, 冲模, 各种组件、材料(包括金属、合金、塑料、陶瓷等)	获得电子射线照相速度快; 不要照相室; 消耗少, 因不需要处理相片, 半导体板可以多次使用。	在半导体板上可能损坏, 分辨差; 缺少柔软的半导体板; 缺少电子射线照相的自动设施。

利用放射性测量方法探伤。简单快速可在生产现场对产品质量进行检查, 包括快速运动中的产品。在显示屏上, 根据透过被检查件的辐射, 可动态显示出检查件的内部结构和缺陷。可以多角度快速连续观察被检查件。

表 6-18 辐射探伤用放射源的特性

放射源	半衰期	γ 能量 (MeV)	最佳厚度		
			钢 (mm)	轻金属合金 (mm)	其它材料 (g/cm^2)
^{60}Co	5.271 y	1.173 1.332	50~150	150~450	40~120
^{137}Cs	30.018 y	0.661	30~100	150~300	40~80
^{192}Ir	73.827 d	0.296~0.675	12.5~62.5	40~190	10~50
^{170}Tm	127.8 d	0.084 0.052~0.059	2.5~12.5	7.5~37.5	2~10
^{169}Yb	32.018 d	0.063~0.308 Tm KX 射线	2.5~15	7.5~45	2~12
^{241}Am	432.2 y	0.0595	1~3		0.5~8



1: ^{60}Co 源; 2: ^{137}Cs 源; 3: ^{192}Ir 源; 4: ^{154}Eu 源; 5: 200 keV X 射线; 6: 120 keV X 射线。

图 6-4 γ 射线照相探伤检查灵敏度 (6) 431)

γ辐射测量物位。γ物位计是一种简单快速的物位测量装置。它是由γ放射源(一般是⁶⁰Co、¹³⁷Cs, ²⁴¹Am源)、探测器和相应的电子学仪器组成的。它可对密闭容器中的物位进行非接触性测量。

物位计分为三种类型:

- (1) 浮子式物位计是根据探测器与放射源间距离变化来测定物位。
- (2) 连续测量物位计是根据γ辐射通过物料强度减弱的变化来测定物位。
- (3) 继电器开关式物位计。它只给出‘有’和‘无’信号。

γ辐射测量厚度。γ辐射通过吸收体后其强度的减弱与吸收体材料厚度及密度有关。其关

系式为 $d = \frac{1}{\rho \mu_m} \ln \frac{I_0}{I}$, 当材料密度已知时, 便可确定该材料的厚度。

γ厚度计常用的放射源是⁶⁰Co, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am源。这些放射源的γ射线通过钢板的半值层分别是16mm, 12mm, 0.4mm。⁶⁰Co, ¹³⁷Cs源可用于较厚钢板等材料的测厚和生产过程控制, 而²⁴¹Am源可用于木板、塑料板和铝合金板测厚和生产过程控制。

γ辐射测量密度。γ辐射通过吸收体后其强度的减弱与吸收体材料密度有关。其关系式为

$\rho = \frac{1}{d \mu_m} \ln \frac{I_0}{I}$ 。当材料厚度已知时, 便可确定该材料的密度。密度计常用于测量容器或管道

中液体物料密度的变化。可以知道物料密度变化。

河水和水库中泥沙含量测定是水治理的重要依据。对于高含沙量水质用铯-137源, 源强度是7.8 GBq, 探测下限是7 kg/cm³; 低含沙量水质用镅-241, 源强度是37 GBq, 探测下限是1.3 kg/m³。

γ辐射探测集装箱内容物。近年新开发的用⁶⁰Co放射源或¹³⁷Cs放射源, 探测集装箱内容物, 是γ密度计的有效应用。

核辐射称重。采用γ辐射称重可连续自动测量各类运输带上, 螺旋推进送料器, 牵引送料器罐和货车中各种物料的流量。

仪器所用的放射源一般是条型⁶⁰Co, ¹³⁷Cs源, 其长度大于送料器的宽度, 安装在送料器的下部, 在正上方安装探测器。

表 6-19 核子称与电子称比较

比较项目	核子称	电子秤
安装情况	称固定在托辊间的纵梁上, 安装时不影响生产	要对输送机支架和纵梁进行修改, 要停产安装
安装空间	选择托滚间宽度为 300 mm	至少在称的前后有 2 m 宽的距离
露天作业与恶劣气候条件	影响不大	输送机要避免风、气候或温度变化对它的影响
物料泄漏	如果探测器保持清洁, 影响不大	在称与输送机间一旦发生堵塞, 就会出现大的误差
维护保养	无运动部件需要维修	需定期检查称的机械磨损情况和物料是否堵塞
维修成本	电子元件寿命长, 故障率低, 可随时替换	需定期替换皮带轮和压力传感器, 以保证其精度, 要停产检修
物料隆起堆积, 碰撞皮带轮	无影响	在大块物料撞击皮带时将引起误差
现场工作环境(如腐蚀、高温等)	影响不大	影响大
皮带张力	无影响	皮带张力变化会引起很大误差

皮带硬度	无影响	皮带硬度变化是产生误差的重要原因
皮带长度	无影响	皮带长度变化引起张力变化
中心线不重合度	无影响	影响极大, 空转跑偏在称量范围内引起大的误差
托辊偏心率	无影响	空带称量偏心率必须精确在 0.015mm 范围
托辊润滑	无影响	如果不给称的托辊补充润滑剂会明显增加称量误差

γ放射源示踪。利用放射源做示踪指示是用辐射仪表跟踪放射源,了解设备的工作状态。

- (1) 把放射源埋在熔炼炉的炉衬中,从炉外测量监测炉衬损坏情况。
- (2) 检查输油管刮腊刮子停留位置。

γ射线选择吸收分析物质成分。煤炭灰分是指煤炭中所含的铁、钙等氧化物,准确测量其含量,可有效控制煤炭质量。常用的放射源 ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{109}Cd 等。用 $1.1\text{GBq } ^{238}\text{Pu}$, $3.7\text{GBq } ^{241}\text{Am}$ 放射源可测灰分范围为 2~4.5%, 测量误差为 0.5~2%。

利用 **γ反散射**技术测量煤炭灰分效果比较好。

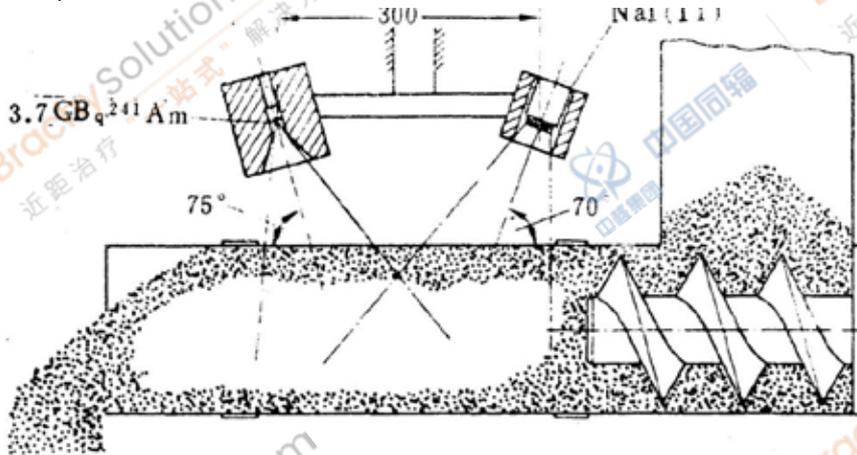


图 6-5 γ反散射仪测量煤炭灰分示意图

γ—γ' 测井。γ—γ' 测井是以岩层对γ射线散射和吸收为基础。这种技术很适合煤田勘探。煤炭的密度是 $1.3\sim 1.5\text{g/cm}^3$, 粘土的密度是 2g/cm^3 , 石灰石的密度是 2.75g/cm^3 。通过分析各层散射γ强度,可以确定各层介质的密度,从而确定煤层。所用放射源是 ^{60}Co , ^{137}Cs 或 ^{241}Am 源,源强度一般是几十 mCi。在源和探测器间放置一个屏蔽体,射线不会直接进入探测器。

低能光子源在 **X 荧光分析**中的应用。用同位素放射源做光子源的 X 射线荧光分析仪,称做“放射性同位素荧光分析仪”。它具有体积小,重量轻,便于携带的特点。选择合适的放射源可对元素周期表中绝大多数元素进行分析。

表 6-20 用于 X 射线荧光分析的低能光子源

核素	半衰期	衰变类型, 能量 (keV), 分支比 (%)	光子能量(keV) 与绝对强度 (%)	可激发的元素原子序数
H^3/Ti	12.33 y	β 18.5866(100)	Ti KX 4.5~4.9 韧致辐射	13~21(K 系) 37~52(L 系)
H^3/Zr	12.33 y	β 18.5866(100)	Zr LX 2~2.5 韧致辐射	12~30(K 系) 37~71(L 系)
^{55}Fe	2.73 y	EC(100)	Mn KX 5.898~6.49	13~24(K 系)

				40~58(L系)
⁵⁷ Co	271.8 d	EC(100)	Fe KX 6.4~7 14.4(9.15); 122.06(85.5); 136.47(10.7)	64~92(K系)
⁷⁵ Se	119.79 d	EC(100)	As KX 10.543~11.7 121(17.2);136(58.3);264 (58.9);279(25);400(11))	73~92(K系)
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y(靶物 Al,Pb,U等)	28.79 y	β 546(100) 2280(99.99)	靶物特征辐射和韧致辐射	50~92(K系)
¹⁰⁹ Cd	461.4 d	EC(100)	Ag KX 22.98~26.1 88.033(3.7)	22~42(K系) 74~92(L系)
¹²⁵ I	59.407 d	EC(100)	Te KX 27.47 35.49(6.67);	26~48(K系) 74~92(L系)
¹⁴⁷ Pm+靶物	2.6234 y	β (100), 224.6(99.99)	靶物特征辐射和韧致辐射	25~56(K系)
¹⁵³ Gd	240.4 d	EC(100)	Eu KX 41.54 69.67(2.42);97.43(29); 103.2(21.1)	40~83(K系)
¹⁷⁰ Tm	127.8 d	β (99.87), 883.7(18.3) 968(81.6)	Yb KX 51~59 84.255(2.48)	40~80(K系)
²³⁸ Pu	87.7 y	α 5456(28.98) 5499(70.91)	U LX 13.6~22(11.7)	20~35(K系) 50~82(L系)
²⁴¹ Am	432.2 y	α 5442(13.3) 5485(85.1)	Np LX 13.9(42) 26.344(2.4);59.54(35.78)	40~65(K系)

每一种低能光子源可以激发几种元素发射特征 X 射线。可以用加滤光片的办法，把不希望的辐射吸收掉。

X 荧光分析技术测涂层厚度。利用 X 荧光分析技术测涂层厚度比用 β 反散射法灵敏。可以测涂层材料的特征 X 射线，也可以测透过涂层的基体材料的特征 X 射线。既可用于产品质量鉴定也可用于生产过程质量控制。

表 6-21 X 荧光分析技术测涂层厚度

对象	放射源	活度 (GBq)	探测的辐 射	滤光片	厚度范围 (μm)	误差	测量 时间 (s)
钢上镀锡	³ H/Zr	92.5	Fe—KX	无	0.03~1	±1%	10
钢上镀锌	³ H/Er	92.5	Fe—KX	Ni	0.1~10	±2%	10
钢上热浸锌	¹⁴⁷ Pm/Al	18.5	Zn—KX	Cu—Ni	2.5~50	±6%	100
	²⁴¹ Am	5.55	Zn—KX	Cu—Ni	25~75	±3%	2
钢上镀铬	⁵⁵ Fe	0.185	Cr—KX	V—Ti	<12	±2%	10
钢上镀铜	³ H/Er	92.5	Fe—KX	Co	~2.5	±2%	200
钢上镀镉	¹⁴⁷ Pm/Al	18.5	Cd—KX	无	2.5~7.5	±1%	10
铜上镀铬	⁵⁵ Fe	0.185	Cr—KX	V—Ti	<12	±3%	10
铜上镀镍	³ H/Zr	92.5	Ni—KX	Co	1.5~15	±2%	100
铜上镀镉	¹⁴⁷ Pm/Al	18.5	Cd—KX	无	2.5~7.5	±1%	10
在塑料上涂镍或	³ H/Zr	92.5	Ni—KX	Co			

铜 后再镀金	或 ¹⁴⁷ Pm/Al	18.5	或 Cu—KX	或 Co—Ni	~12	±5%	10
在钛上镀金或铂	³ H/Zr	92.5	Ti—KX	无	0.05~1.2	±2%	40
锑上镀镍	¹⁰⁹ Cd	0.037	Sr—KX	Al	2.5~12	±3%	10
铀上镀铝	¹⁰⁹ Cd	0.037	U—LX	无	375~625	±3%	10
铜丝上镀银	³ H/Zr	92.5	Cu—KX	无	0.25~2.5	±10%	10
纸上墨迹	³ H/Zr	92.5	Fe—KX	无	0.04~0.4	±5%	30
铝印刷板上墨迹	³ H/Zr	92.5	Fe—KX	无	0.04~0.4	±5%	30
纸上光亮层	³ H/Zr	92.5	Ti—KX	无	0.25~5	±5%	30
纸上压力灵敏涂 层	³ H/Zr	166.5	Ca—KX	无	0.25~5	±2%	10
电接触件上镀银	¹⁴⁷ Pm/Al	18.5	Ag—KX	Al	5~50	±5%	40

同位素 X 荧光分析仪在矿石样品分析，合金组分分析，水泥生产中钙含量分析，环保样品的分析，人体甲状腺的吸碘功能测定等都有很好的实际使用效果。

2.4 中子源

同位素中子源。用放射性核素衰变发射的 α 粒子或高能 γ 射线与某些轻元素，如 Be、B、F 或 D 等作用，通过 (α, n) 或 (γ, n) 反应产生中子，或某些重元素核素自发裂变发射中子，这样的中子源称做同位素中子源。有时把中子发生器也列入同位素中子源类。

同位素中子源的特点是：

- (1) 体积小，易移动。
- (2) 中子发射率稳定，其中子发射率变化只与核素的半衰期有关。
- (3) 易生产，价格便宜，安全性能好。
- (4) 中子发射率低，一般不大于 10^8ns^{-1} 。

(α, n) 中子源。 (α, n) 中子源的产额是与 α 粒子能量、靶元素及其量有关。 α 粒子能量越高，产额越高；靶元素中以铍的产额最高；靶元素的量应是厚靶，能保证 α 粒子充分与其作用。

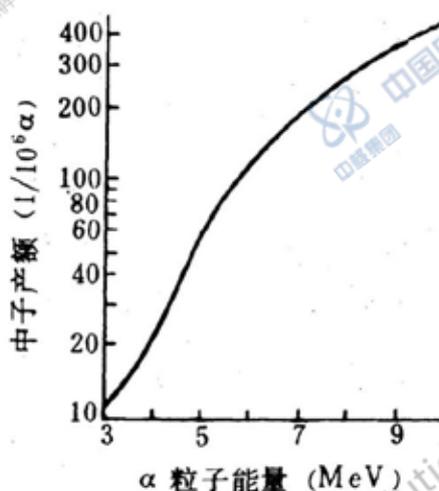


图 6-6 Be(α, n)反应厚靶中子产额曲线

表 6-22 不同靶物的 (α, n) 中子源的产额

中子源	中子能量 (MeV)		典型中子产额		实际可能中子输出 (n/s)
	最大	平均	n/(GBq·s)	n/(Ci·s)	
²⁴¹ Am-Be	11.5	4~5	$6.0 \sim 7.5 \times 10^4$	$2.2 \sim 2.8 \times 10^6$	$2 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^8$

²³⁸ Pu-Be	11.0	4~5	6.0~7.3x10 ⁴	2.2~2.7 x10 ⁶	2 X 10 ⁵ ~1.2x 10 ⁸
²⁴¹ Am-B	6	2.5~3	1.35~1.895x10 ⁴	0.5~0.7x10 ⁶	5 X 10 ⁴ ~2.5 x 10 ⁷
²³⁸ Pu-B	—	2.5~3	1.35~2.0x10 ⁴	0.5~0.75x10 ⁶	5 X 10 ⁴ ~2.5x 10 ⁷
²⁴¹ Am-F	2.7	1.5	0.4 x10 ⁴	0.15x10 ⁶	1 X 10 ⁴ ~7.5 x 10 ⁶
²³⁸ Pu-F	3.2	1.5	0.35~0.56x10 ⁴	0.13~0.21x10 ⁶	1 X 10 ⁴ ~7.5 x 10 ⁶
²⁴¹ Am-Li	1.5	0.4	0.08~0.16x10 ⁴	0.03~0.06x10 ⁶	4 X 10 ³ ~2 x 10 ⁶
²³⁸ Pu-Li	—	0.4	0.08~0.14x10 ⁴	0.03~0.07x10 ⁶	4 X 10 ³ ~2 x 10 ⁶

(γ, n) 中子源。(γ, n) 中子源又称光中子源。它是由可发射高能 γ 射线的核素与 Be 和 D₂O 靶物以某种形式组合成的。(γ, n) 是吸热反应, 反应能等于核内中子结合能。在稳定原子核中, 中子结合能最小的是 ⁹Be(1.666MeV) 和 D(2.226MeV)。光致反应的阈值等于粒子在核中的结合能。

光中子源的中子发射率与 γ 放射源的强度 I_γ , 光激中子的有效截面 $\sigma_{\gamma, n}$, 靶物质的厚度 R 以及 γ 射线在靶物质中的吸收系数 μ 有关。单位体积的中子发射率为 $b = I_\gamma \frac{N_0 \sigma_{\gamma, n}}{4\pi R^2} e^{-\mu R}$ 。

式中, I_γ 是 γ 源每秒钟在 4π 立体角方向发射的光子数, N 是在单位体积内靶物质原子数目。

光中子源的中子能量 $E_n = \frac{A-1}{A} (E_\gamma - |Q|)$ 。式中, A 是靶核的质量数; E_γ 是入射 γ 射线能量 (MeV); Q 是反应能(MeV)。

表 6-23 某些 (γ, n) 中子源标准产额

放射性核素	半衰期	铍靶		氘靶	
		平均中子能量 (MeV)	标准中子产额 (10 ³ n/GBq·s)	平均中子能量 (MeV)	标准中子产额 (10 ³ n/GBq·s)
²⁴ Na	14.96h	0.83	3.5	0.22	7.2
		0.80	2.9		5.8
⁷² Ga	14.1 h	0.27	1.4	0.13	1.6
⁸⁸ Y	106.63d	0.158	2.7	0.27	0.08
		0.22	1.4		
¹²⁴ Sb	60.2 d	0.035	5.1		
		0.024	4.1		
¹⁴⁰ La	1.678d	0.62	0.07	0.13	0.2
				0.15	0.12
²²⁶ Ra(平衡)	1600 y	<0.670	0.8	0.12	0.027
			1.2		0.17

自发裂变中子源。自发裂变是指原子核在没有外来粒子或能量的作用下发生的核过程。自发裂变核素的一个原子核在发生自发裂变过程中释放出 2~4 个中子, 利用这种特性制备了自发裂变中子源。

表 6-24 某些自发裂变核素的特性

核素	半衰期 (自发裂变)	半衰期 (α 衰变)	核裂变成形的 α 衰变数	核裂变释放的中子数	核裂变释放中子产额 (g ⁻¹ ·s ⁻¹)
²³⁶ Pu	2.1E+9 y	2.851 y	7.3E+8	2.21	5.9E+4
²³⁸ Pu	4.7E+10 y	87.7 y	5.4E+8	2.24	2.6E+3
²⁴⁰ Pu	1.16E+11 y	6.563E+3 y	1.8E+7	2.17	1.0E+3
²⁴² Pu	6.77E+10 y	3.75E+5	1.8E+5	2.153	1.7E+3

²⁴² Cm	7.05E+6 y	162.94 d	1.6E+7	2.538	2.0E+7
²⁴⁴ Cm	1.344E+7 y	18.1 y	7.4E+5	2.696	1.1E+7
²⁵² Cf	85.5 y	2.638 y	3.1E+1	3.7675	2.35E+12

²⁵²Cf 是α和自发裂变放射性核素，α衰变半衰期是 2.638 y；自发裂变半衰期是 85.5 y，分支比是 3.09%，自发裂变中子产额为 $2.35 \times 10^{12} \text{ g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。²⁵²Cf 的有效半衰期（包括α衰变和自发裂变）是 2.659 y。²⁵²Cf 自发裂变中子产额的质量分布和能谱与 ²³⁵U 相近。

中子管和中子发生器。中子管的基本部件是由高压倍加器加速氘核与氚靶或氘靶作用产生中子。产生中子的能量：[D—T] 为 14 MeV，[D—D] 为 2.5MeV，能量单一，便于调制。中子管和高压倍加器及其控制系统，统称为中子发生器。中子发生器是体积不大的中子源，因此用它加工的仪器是可以移动的。

中子发生器的中子发射率可以达到 10^8 n/s ，在常温下使用寿命可答数百小时。中子发生器在某些方面的应用可以替代同位素中子源，如中子石油测井，煤炭质量分析，爆炸物及毒品在线分析，中子照相，中子治癌，中子活化分析等。

中子测井。中子测井是利用中子与物质的相互作用的各种效应来研究井剖面的岩层性质，寻找矿产资源的物理测井方法。中子测井可以分为‘中子—中子’测井和‘中子—γ’测井。常用的中子源是 ²⁴¹Am-Be 和 ²³⁸Pu-Be。源强度一般是 $3\sim 4 \times 10^7 \text{ n/s}$ 。有时为了确定岩层密度，要和 ¹³⁷Cs γ源一起用。

中子测水分。中子测水分是基于快中子在通过物质时，与原子核相碰撞能量减弱的速度不同。中子在一次碰撞前后的动能之比的对数平均值叫做平均对数能降 ζ。

$$\zeta = \ln \frac{E_1}{E_2} = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A+1}{A-1}$$

式中，E₁，E₂ 分别为散射前和散射后中子动能，A 为散射核的原子量。

表 6-25 几种元素ζ值和由 2 MeV 降到 0.025eV 的平均碰撞次数

物质名称	氢	钾	铍	碳	氧	铀
平均对数能降ζ值	1.000	0.268	0.209	0.158	0.120	0.00838
中子的平均碰撞次数	18	67	86	114	150	2172

通常用中子指数来表示快中子通过某些材料时的性能变化。

表 6-26 某些物质中子指数

元素或化合物	密度 (g/cm ³)	有效截面(靶)		慢化痕迹 (cm)	散射平均自由行程 (cm)	热中子平均自由行程 (cm)	热中子平均存在时间 (10 ⁻⁴ s)	扩散距离,cm
		散射	俘获					
H	0.0898*	45	0.3	—	—	—	—	—
C	1.6	4.8	0.005	—	2.5	2710	123	47.5
O	1.429*	4.1	0.02	—	—	—	—	—
Na	0.9	3.5	0.5	—	11.7	82	3.7	17.9
Mg	1.7	3.6	0.4	—	6.5	58.5	2.7	11.2
Al	2.7	1.5	0.2	—	11	75	3.4	16.6
Si	2.4	1.7	0.2	—	11.3	120	5.4	21.2
P	1.8	10.4	0.3	—	2.8	98	4.4	0.5
S	2	1.5	0.5	—	17.6	53	2.4	17.6
Cl	—	10	33	—	—	—	—	—
K	0.8	1.5	3.8	—	52	20.4	0.9	19

Ca	1.6	9.5	0.5	—	4.5	85	3.9	11.3
Mn	7.2	2.4	12.8	—	5.2	0.95	0.04	1.3
CaSO ₄	3	27.4	1	27	2.7	74	3.4	8.2
H ₂ O	1	94	0.62	7.7	0.3	48	2.2	2.3
2H ₂ O	2.3	215	2.26	11	0.57	55	2.5	3.2
Fe ₂ O ₃	5.1	34.4	4.8	34	1.5	10.7	0.5	2.3
Fe	7.9	11	2.4	—	1.1	4.9	0.2	1.3
CaCO ₃	2.7	26.6	0.5	35	2.3	119	5.4	9.5
SiO ₂	2.6	9.9	0.16	37	3.8	2.3	10.6	17
Al ₂ O ₃	4	15.3	0.44	—	2.7	95.5	4.3	9.3

*气体为 g/l

轻原子对 neutron 减速起主要作用，所以水与土壤中其他成分相比，它是优良的快中子减速剂，可以根据材料对 neutrons 的慢化程度来确定材料中的水分。根据这个原理制成的中子水分计。它具有测量速度快，不需要专门取样分析，可在现场连续测量，可测出水分的连续变化。

中子水分计广泛用于土壤水分测量，在公路铁路路基水分测量的同时利用 ¹³⁷Cs γ 源进行密度测量。常用的中子源是 ²⁵²Cf 或 ²⁴¹Am-Be，强度是 1×10^5 n/s，密度测量所用的 ¹³⁷Cs γ 源强度是 370MBq，为适应中子水分密度仪器的需要，把源设计成环状，有的把 ¹³⁷Cs γ 源和 ²⁴¹Am-Be 源封在一个源壳中；用三氟化硼计数管测中子；用碘化钠探测器测量 γ 辐射。这种水分—密度计小巧轻便，便于携带。

中子照相。中子照相一般是指热中子照相，需要相应的中子源，中子慢化剂，中子束流准直器，中子转换屏和像探测器。

物质对所通过的中子束的减弱程度的大小，与物质的密度关系不大，主要决定于核素的性质。中子在通过含氢、硼、锂等材料时很快被减弱，但是容易通过某些重金属材料，可以检查金属包壳中轻质材料，如检查子弹内装药情况。中子对原子序数相近的物质甚至不同同位素的分布情况也可检出。中子照相可对放射性物品进行无损检验。

表 6-27 可用于热中子照相的同位素中子源

中子源	半衰期	对于 10^8 s^{-1} 源所需要的体积 (cm^3)	平均中子能量 (MeV)	慢化因子	1 m 处 10^8 s^{-1} 源 γ 剂量	
					γ 能量 (keV)	剂量率 ($2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \cdot \text{h}$)
¹²⁴ Sb-Be	60.2 d	20(至少)	0.024	10, 45	2090	80, 不能直接曝光
²⁴¹ Am-Be	432.2 a	~20	4~6	200, 500	59.5	<0.1 可直接曝光
²³⁸ Pu-Be	87.7 a	~20	4~6	200, 500	13.6	很小, 可直接曝光
²⁵² Cf	2.645 a	<0.05	2	100	15	0.007, 可直接曝光

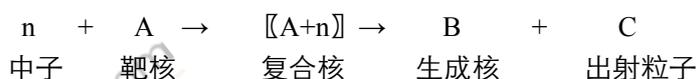
表 6-28 热中子照相常用的转换物质

转换元素	核反应	所用同位素在天然元素中的相对丰度, %	热中子截面, $\text{b}^{(d)}$	所用核反应产物的半衰期
Li	⁶ Li(n, α) ³ H ^(a)	7.52	910	瞬时
B	¹⁰ B(n, α) ⁷ Li ^(a)	18.8	3830	瞬时
Rh	¹⁰³ Rh(n, γ) ^{104m} Rh ^(b)	100	11	4.4 min
	¹⁰³ Rh(n, γ) ¹⁰³ Rh ^(b)	100	139	43 s
Ag	¹⁰⁷ Ag(n, γ) ¹⁰⁸ Ag ^(b)	51.35	35	2.42 min
	¹⁰⁹ Ag(n, γ) ¹¹⁰ Ag ^(b)	48.65	91	24.4 s
Cd	¹¹³ Cd(n, γ) ¹¹⁴ Cd ^(c)	12.26	20000	瞬时
In	¹¹⁵ In(n, γ) ^{116m} In ^(b)	95.77	157	54 min

	$^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}^{(b)}$	95.77	42	14 s
Sm	$^{149}\text{Sm}(n,\gamma)^{150}\text{Sm}^{\text{c}}$	13.8	41000	瞬时
	$^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}^{\text{c}}$	26.8	210	46.27 h
Gd	$^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156\text{m}}\text{Gd}^{\text{c}}$	14.73	61000	瞬时
	$^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}^{\text{c}}$	15.68	254000	瞬时
Dy	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165\text{m}}\text{Dy}^{(b)}$	28.1	2200	1.26 min
	$^{164}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}^{(b)}$	28.1	800	139.2 min
Au	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}^{(b)}$	100	98.8	2.89 d

注：a.利用反应产生的（瞬时） α 射线；b.利用反应终核的衰变射线；c.利用(n, γ) 反应产生的瞬时 γ 射线。

中子活化分析。活化分析是建立在核反应基础上的一种核分析技术。中子不带电，它与原子碰撞时，比较容易穿过库仑势垒，产生核反应，生成另一个核素。



如果生成核是不稳定的，它会以自己固有的半衰期发出 α 、 β 、 γ 和特征 X 射线。用探测器测得这些射线，得出生成核 B 的量，可以计算出靶核 A 的多少。中子活化分析具有灵敏度高、准确度好、适应性广、非破坏性、可同时测定多种元素的优点。中子活化分析是一种绝对测量方法，被分析的元素重量 W 可从下式直接算出：

$$W = \frac{MS\lambda T_t}{6.022 \times 10^{23} \theta \sigma \epsilon \gamma T_c (1 - e^{-\lambda t_i})(1 - \lambda T_d)(1 - e^{-\lambda T_t})} \int_0^{T_t} \phi(t) e^{-\lambda(T_t-t)} dt$$

式中，M 为相对原子量；S 为全能峰的净面积（计数）； θ 为靶同位素的天然丰度（%）； ϕ 为中子注量率（ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）； σ 为中子活化截面（b）； ϵ 为在全能峰能量点的探测效率； γ 为该条 γ 射线的绝对强度（%）； λ 为衰变常数（ s^{-1} ）； T_c 为测量的有效获取时间(s)； T_t 为测量的真实时间（s）； t_i 为照射时间（s）； T_d 为衰变时间（s）。

上述公式中的一些参数不是恒定的，所以计算出的结果误差比较大。通常是用相对比较法，即用已知含量为 W_s 的标准参照物与被分析样品在同一位置照射，比较标准样品与被分析样品的放射性，即可得到样品中某元素含量 W_x ：

$$W_x = \frac{A_x}{A_s} W_s$$

式中， A_s 和 A_x 分别代表标准参照物和样品在同一衰变时间的放射性活度。

活化分析一般是在反应堆和加速器上进行。同位素中子源只能提供低强度的中子束流，一般是 $\sim 10^7 \text{ n s}^{-1}$ ，因此同位素中子源只能用在某些具有高中子活化截面的元素的活化分析，它的优点是源体积小，设备简单，可用在现场分析。

核反应堆启动。核反应堆是用易裂变物质作燃料，以中子为媒介，能维持可控制链式反应的装置。同位素中子源能为反应堆提供大量的中子及增加反应性。源强度在 $10^8 \sim 10^{10} \text{ n/s}$ 。可用于监视燃料组件的安全装料，提高堆芯的中子通量，以确保反应堆的安全启动；还可以预测达到临界的技术条件和快速引发燃料的链式反应。

用于反应堆启动的中子源有两类。一种是初次启动中子源，作为新堆初始的冷态启动，常用的中子源是 ^{252}Cf 源，也可以用 $^{238}\text{Pu-Be}$ 和 $^{210}\text{Po-Be}$ 中子源。这些源强度大，体积小，符合反应堆设计要求。另一种是再次启动中子源，作为长时间停堆后再次启动用。常用的是 $^{124}\text{Sb-Be}$ 中子源（ ^{124}Sb 是由 ^{123}Sb 在堆内活化而成，它释放出的高能 γ 射线被铍靶吸收而放出中子，是一种产额较高的光中子源）。

表 6-29 同位素中子源的主要应用方面

应用原理	应用形式	源强度	应用说明
------	------	-----	------

		²⁵² Cf	²⁴¹ Am-Be	
中子活化	快中子核反应 (n,γ), (n,α), (n,p)	10~100μg	0.37~3.7 TBq	分析灵敏度 10 ⁻⁴ 水平
	热中子核反应 (n,γ)	1~100μg	0.037~3.7 TBq	分析灵敏度 10 ⁻⁶ 水平
	常量元素分析 (工艺过程控制)	1~10μg	37~370GBq	高反应截面材料测定在百分率水平 (如 Al、Cr、Ca、K 等测定)
中子减弱	元素总分析 (工艺过程控制)	~10μg	10~37GBq	对高中子吸收/散射截面材料在百分率水平 (如 H ₂ O、Al、B、Cd)
中子慢化 中子俘获	n—n, n—γ测井 (中子测井仪)	3~10μg	111~740GBq	测定岩、A 石孔隙率, 判定气—液, 油—水界面, 勘探开发石油、天然气
中子慢化 中子散射	水分测定 (中子湿度计)	0.1μg	1.11~3.7GBq	测定土壤、烧结料、焦炭、混凝土拌合料中水分含量, 分析准确度±0.1g 水/g 土壤
中子俘获	中子照相 (利用转换屏使底片感光)	10~100μg	0.37~3.7 TBq	对炮弹弹头透视, 观察飞机发动机排油口是否堵塞, 检查火药螺栓起爆可靠性
辐射效应	中子育种 (中子辐照装置)	1~10μg	37~370 GBq	照射鱼卵、蚕卵等, 引起基因突变, 提高产量
辐射效应	中子治癌 中子后装机	5~1000μg		实施腔内或组织间治疗, 抑制或杀灭癌细胞
多种原理	中子示范教学	0.01~10μg	0.037~370GBq	验证中子性质, 如中子活化迁移长度、费米年龄
多种原理	中子仪表刻度	0.01~1μg	37~3700 MBq	中子剂量仪表检测 中子束流检测
诱发裂变	反应堆启动	10~100μg		用于各类核反应堆启动

2.5 穆斯保尔源

自由原子核发射或吸收 γ 光子要发生反冲, 如果将发射、吸收的原子核束缚在固体中, 随着温度的降低会观察到共振吸收现象。这样一个多体系放射 (或) 吸收射线有一定的无反冲概率。通常把这种无反冲 γ 射线核共振吸收现象称为穆斯保尔效应。穆斯保尔效应主要用于研究原子核与核外环境的超精细相互作用, 进而对物质作微观结构分析。到目前为止已发现有明显穆斯保尔效应的核素有 91 种, 112 个跃迁。

表 6-30 穆斯保尔源(5)293

放射性核素	半衰期	射线能量 keV	穆斯保尔核素	基体材料
⁵⁷ Co	271.8 d	14.413	⁵⁷ Fe	Cu, Pd, Pt, Cr, Rh, Au
^{119m} Sn	293.1 d	23.87	¹¹⁹ Sn	BaSnO ₃ , CaSnO ₃ , β-Sn, SnO ₂
^{121m} Sn	55 a	37.133	¹²¹ Sb	BaSnO ₃ , CaSnO ₃ , SnO ₂
^{125m} Te	57.4 d	35.492	¹²⁵ Te	SnTe, ZnTe
¹²⁵ I	59.4 d	35.492	¹²⁵ Te	SnI
¹²⁵ Te	109 d	57.61	¹²⁷ I	SnTe, ZnTe
^{129m} Te	33.6 d	27.81	¹²⁹ I	SnTe, ZnTe

¹⁵¹ Sm	90 a	21.542	¹⁵¹ Eu	Sm ₂ O ₃ , SmF ₃
¹⁵⁴ Eu	8.593 a	123.07	¹⁵⁴ Gd	Eu ₂ O ₃
¹⁵⁵ Eu	4.761 a	86.545	¹⁵⁵ Gd	稀土元素氧化物
¹⁵⁹ Dy	144.4 d	58	¹⁵⁹ Tb	Dy ₂ O ₃
¹⁶¹ Tb	6.88 d	25.651	¹⁶¹ Dy	Gd ₂ O ₃ , GdF ₃
¹⁶⁹ Er	9.4 d	8.41	¹⁶⁹ Tm	Er ₂ O ₃ , ErF ₃

2.6 放射性核素能源

可以通过以下三条途径获得核能：

- (1) 重核裂变时释放的裂变能。例如： $U + n \rightarrow 2 \text{ 种裂变产物} + \sim 2.5 \text{ 个中子} + \Delta E$
- (2) 轻核结合时释放的聚变能。例如： $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + \Delta E$

- (3) 放射性核素衰变时释放的衰变能。例如： ${}^{238}\text{Pu} \xrightarrow[27.7 \text{ a}]{\alpha} {}^{234}\text{U} + \Delta E$

放射性核素光源。放射性核素光源属于自激发发光的永久性光源。当放射性核素放出的射线（如 α 、 β 或 γ ）作用于发光基体（又称磷光物质）的原子（或分子）时能引起激发或电离，这种处于激发态的或电离态的原子（或分子）返回基态或重新复合时就会产生发光现象。在此过程中射线的能量为发光体所吸收，并转换为光辐射。利用该原理，可设计出多种射线激发的发光光源。

射线激发发光只与发射射线的核素性质有关，不受环境条件影响，所以又叫做永久性发光材料。早期用²²⁶Ra做激发光源，现在用对人体危害较小，容易得到的³H、⁸⁵Kr、¹⁴⁷Pm放射性核素。

发光基体材料有硫化物、氟化物、氧化物、硅酸盐、钨酸盐、磷酸盐等。发光颜色随添加剂的金属离子不同而改变。如ZnS/Cu发出绿色光，ZnS/Ag发出蓝色光，ZnS/Cu和CdS/Cu发出黄色光，ZnS/Mn发出橙色光。其中ZnS/Cu磷光体最好，因为波长为52530nm的黄绿色对人体肉眼最为敏感。

放射性核素光源可分为四类：粉体光源、涂覆光源、可分离光源、气体光源。

表 6-31 各种自发光光源的最大放射性活度(美国国家标准 N-540)单位： $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq(Ci)}$

放射性核素	干粉光源	涂覆光源	可分离光源	气体光源
³ H	1	5	5	50 ^a
¹⁴ C	0.06	0.3	0.3	20(CO)
³⁶ Cl	0.006	0.03 ^b	0.03	3
⁶³ Ni	0.6	0.3	0.3	-
⁸⁵ Kr	0.006 ^c	0.003 ^c	0.003	30
⁹⁹ Tc	0.06	0.3	0.3	-
¹⁴⁷ Pm	0.06	0.3	0.3	-
²⁰⁴ Tl	0.006	0.03	0.03	-
²¹⁰ Pb	0.0003	0.0015	0.0075	-
²²⁶ Ra	0.00002	0.0001	0.0005	-
²³⁰ Th	0.00002	0.0001	0.0005	-
²⁴¹ Am	0.00002	0.0001	0.0005	-

注：a.氟氧化物不超过氙量的1%；b.氯盐；c.氟化物

放射性核素热源。放射性核素在衰变时热源放出的高速带电粒子，如 α 、 β 粒子或 γ 光子与物质相互作用，最终被阻止或吸收，使周围物质温度升高，射线的动能变为热能。利用放射性核素衰变能制成的热源，称作放射性核素热源。核素热源主要由两大部件构成：内部为放射性核素（放射性核素燃料），外部为燃料盒。

表 6-32 常用放射性同位素热源燃料的特性

放射性同位素	射线种类	半衰期	比功率 (W/g)	燃料形式	功率密度 (W/cm ³)	毒性* (μCi/cm ³)	辐射屏蔽要求
⁶⁰ Co	β, γ	5.271 y	17.4	金属	15.2	9 x 10 ⁻¹¹	重
⁹⁰ Sr	β, X	28.79 y	0.95	SrTiO ₃	1.0	1 x 10 ⁻¹¹	重
¹³⁷ Cs	β, γ	30.018 y	0.42	铯玻璃	0.42	1 x 10 ⁻¹⁰	重
¹⁴⁷ Pm	β	2.6234 y	0.33	Pm ₂ O ₃	1.8	6 x 10 ⁻¹¹	重
²¹⁰ Po	α	138.376 d	141.3	GdPo	824	2 x 10 ⁻¹²	轻
²³⁸ Pu	α	87.7 y	0.55	PuO ₂	2.8	2 x 10 ⁻¹⁴	轻

* 以空气中最大允许浓度表示

放射性核素电源。放射性核素电源是利用放射性核素在衰变时放出的射线进行发电的一类装置。按照工作原理可分成热转换型和非热转换型。热转换型核素电池是将放射性核素热源产生的热能转变成电能。非热转换型核素电池则不需要经过热能转变成电能，而是将放射性核素在衰变时放出的高速带电粒子的动能直接转变成电能或经过某种次级效应而转变成电能的一种发电装置，这类放射性核素电池又称核电池。

表 6-33 各种放射性同位素仪表和所用放射源及探测器一览表

仪器种类	放射源		探测器
	核素	强度	
透射式厚度计	⁸⁵ Kr, ¹⁴⁷ Pm, ²⁰⁴ Tl, ⁹⁰ Sr, ²⁴¹ Am, ¹³⁷ Cs	3.7MBq~1.11TBq	电离室, 闪烁探测器
反散射式厚度计	⁸⁵ Kr, ¹⁴⁷ Pm, ²⁰⁴ Tl, ⁹⁰ Sr, ²⁴¹ Am, ¹³⁷ Cs	3.7MBq~3.7GBq	电离室, 闪烁探测器, GM 计数管
密度计	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	3.7MBq~74GBq	电离室, 闪烁探测器, GM 计数管
料位计	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	3.7MBq~370GBq	GM 计数管, 闪烁探测器
硫黄计	²⁴¹ Am	3.7~22.2GBq	电离室
电子束重量计	⁹⁰ Sr	~ 0.2GBq	电离室
气体分析仪	⁶³ Ni, ²⁴¹ Am, ³ H (靶)	0.37~37GBq	特种电离室
骨成分分析装置	¹²⁵ I, ²⁴¹ Am, ¹⁵³ Ga	0.37~37GBq	闪烁探测器, 半导体探测器
X 荧光分析装置	⁵⁵ Fe, ²⁴⁴ Cm, ¹⁰⁹ Cd, ²⁴¹ Am	3.7MBq~37GBq	正比计数管, 闪烁探测器, 半导体探测器
中子水分计	²⁴¹ Am-Be, ²⁵² Cf	370MBq~37GBq	BF 计数管
静电消除器	²¹⁰ Po, ²³⁸ Pu	10~500mCi	
感烟探测器	²⁴¹ Am	<37kBq	特种电离室

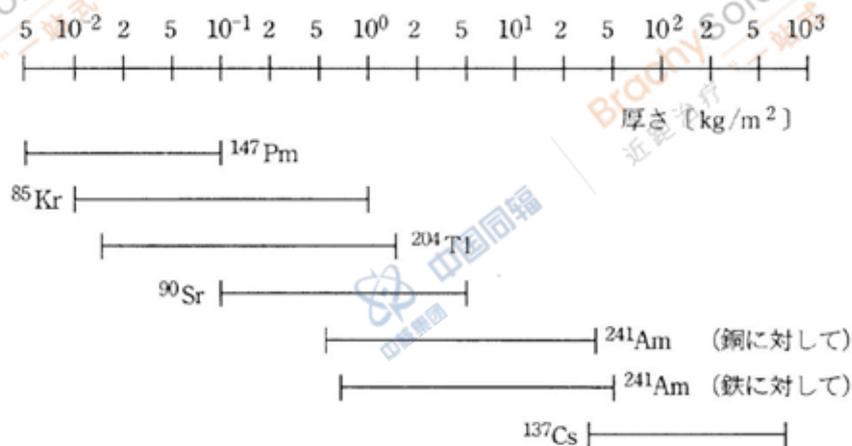


图 6-7 透射式测厚仪所用放射源和测量范围

3. 放射源分类

国家环境保护总局和国际原子能机构按照放射源对人体健康和环境的潜在危害程度，从高到低将放射源分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类，Ⅴ类源的下限活度值为该种核素的豁免活度。

- Ⅰ类放射源为极高危险源。在没有防护的情况下，接触这类源几分钟到一个小时就可致人死亡；
- Ⅱ类放射源为高危险源。没有防护的情况下，接触这类源几小时到几天就可致人死亡；
- Ⅲ类放射源为危险源。没有防护的情况下，接触这类源几小时就可对人造成永久性损伤，几周也可致人死亡；
- Ⅳ类放射源为低危险源。基本不会对人造成永久性损伤，但对长时间、近距离接触这些源，也可能造成可恢复的临时性损伤；
- Ⅴ类放射源为极低危险源。不会对人造成永久性损伤。

表 6-34 放射源分类表(62 号公告)

核素名称	Ⅰ类源,Bq	Ⅱ类源,Bq	Ⅲ类源,Bq	Ⅳ类源,Bq	Ⅴ类源,Bq
Am-241	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Am-241/Be	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Au-198	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{12}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 2 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
Ba-133	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{12}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 2 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
C-14	$\geq 5 \times 10^{16}$	$\geq 5 \times 10^{14}$	$\geq 5 \times 10^{13}$	$\geq 5 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^7$
Cd-109	$\geq 2 \times 10^{16}$	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^6$
Ce-141	$\geq 1 \times 10^{15}$	$\geq 1 \times 10^{13}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{10}$	$\geq 1 \times 10^7$
Ce-144	$\geq 9 \times 10^{14}$	$\geq 9 \times 10^{12}$	$\geq 9 \times 10^{11}$	$\geq 9 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^5$
Cf-252	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 2 \times 10^{10}$	$\geq 2 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Cl-36	$\geq 2 \times 10^{16}$	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^6$
Cm-242	$\geq 4 \times 10^{13}$	$\geq 4 \times 10^{11}$	$\geq 4 \times 10^{10}$	$\geq 4 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^5$
Cm-244	$\geq 5 \times 10^{13}$	$\geq 5 \times 10^{11}$	$\geq 5 \times 10^{10}$	$\geq 5 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Co-57	$\geq 7 \times 10^{14}$	$\geq 7 \times 10^{12}$	$\geq 7 \times 10^{11}$	$\geq 7 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
Co-60	$\geq 3 \times 10^{13}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^{10}$	$\geq 3 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^5$
Cr-51	$\geq 2 \times 10^{15}$	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 2 \times 10^{12}$	$\geq 2 \times 10^{10}$	$\geq 1 \times 10^7$
Cs-134	$\geq 4 \times 10^{13}$	$\geq 4 \times 10^{11}$	$\geq 4 \times 10^{10}$	$\geq 4 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Cs-137	$\geq 1 \times 10^{14}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^4$
Eu-152	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^6$
Eu-154	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^6$

Fe-55	$\geq 8 \times 10^{17}$	$\geq 8 \times 10^{15}$	$\geq 8 \times 10^{14}$	$\geq 8 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^6$
Gd-153	$\geq 1 \times 10^{15}$	$\geq 1 \times 10^{13}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{10}$	$\geq 1 \times 10^7$
Ge-68	$\geq 7 \times 10^{14}$	$\geq 7 \times 10^{12}$	$\geq 7 \times 10^{11}$	$\geq 7 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^5$
H-3	$\geq 2 \times 10^{18}$	$\geq 2 \times 10^{16}$	$\geq 2 \times 10^{15}$	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 1 \times 10^9$
Hg-203	$\geq 3 \times 10^{14}$	$\geq 3 \times 10^{12}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^5$
I-125	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{12}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 2 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
I-131	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{12}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 2 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
Ir-192	$\geq 8 \times 10^{13}$	$\geq 8 \times 10^{11}$	$\geq 8 \times 10^{10}$	$\geq 8 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Kr-85	$\geq 3 \times 10^{16}$	$\geq 3 \times 10^{14}$	$\geq 3 \times 10^{13}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^4$
Mo-99	$\geq 3 \times 10^{14}$	$\geq 3 \times 10^{12}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
Nb-95	$\geq 9 \times 10^{13}$	$\geq 9 \times 10^{11}$	$\geq 9 \times 10^{10}$	$\geq 9 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^6$
Ni-63	$\geq 6 \times 10^{16}$	$\geq 6 \times 10^{14}$	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^8$
Np-237(Pa-233)	$\geq 7 \times 10^{13}$	$\geq 7 \times 10^{11}$	$\geq 7 \times 10^{10}$	$\geq 7 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^3$
P-32	$\geq 1 \times 10^{16}$	$\geq 1 \times 10^{14}$	$\geq 1 \times 10^{13}$	$\geq 1 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^5$
Pd-103	$\geq 9 \times 10^{16}$	$\geq 9 \times 10^{14}$	$\geq 9 \times 10^{13}$	$\geq 9 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^8$
Pm-147	$\geq 4 \times 10^{16}$	$\geq 4 \times 10^{14}$	$\geq 4 \times 10^{13}$	$\geq 4 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^7$
Po-210	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Pu-238	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Pu-238/Be	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Pu-239	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Pu-240	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	$\geq 6 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^3$
Pu-242	$\geq 7 \times 10^{13}$	$\geq 7 \times 10^{11}$	$\geq 7 \times 10^{10}$	$\geq 7 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Ra-226	$\geq 4 \times 10^{13}$	$\geq 4 \times 10^{11}$	$\geq 4 \times 10^{10}$	$\geq 4 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Re-188	$\geq 1 \times 10^{15}$	$\geq 1 \times 10^{13}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{10}$	$\geq 1 \times 10^5$
Ru-103(Rh-103m)	$\geq 1 \times 10^{14}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
Ru-106(Rh-106)	$\geq 3 \times 10^{14}$	$\geq 3 \times 10^{12}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^5$
S-35	$\geq 6 \times 10^{16}$	$\geq 6 \times 10^{14}$	$\geq 6 \times 10^{13}$	$\geq 6 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^8$
Se-75	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{12}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 2 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
Sr-89	$\geq 2 \times 10^{16}$	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^6$
Sr-90 (Y-90)	$\geq 1 \times 10^{15}$	$\geq 1 \times 10^{13}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{10}$	$\geq 1 \times 10^4$
Tc-99m	$\geq 7 \times 10^{14}$	$\geq 7 \times 10^{12}$	$\geq 7 \times 10^{11}$	$\geq 7 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^7$
Te-132(I-132)	$\geq 3 \times 10^{13}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^{10}$	$\geq 3 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^7$
Th-230	$\geq 7 \times 10^{13}$	$\geq 7 \times 10^{11}$	$\geq 7 \times 10^{10}$	$\geq 7 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^4$
Tl-204	$\geq 2 \times 10^{16}$	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^4$
Tm-170	$\geq 2 \times 10^{16}$	$\geq 2 \times 10^{14}$	$\geq 2 \times 10^{13}$	$\geq 2 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^6$
Y-90	$\geq 5 \times 10^{15}$	$\geq 5 \times 10^{13}$	$\geq 5 \times 10^{12}$	$\geq 5 \times 10^{10}$	$\geq 1 \times 10^5$
Y-91	$\geq 8 \times 10^{15}$	$\geq 8 \times 10^{13}$	$\geq 8 \times 10^{12}$	$\geq 8 \times 10^{10}$	$\geq 1 \times 10^6$
Yb-169	$\geq 3 \times 10^{14}$	$\geq 3 \times 10^{12}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^7$
Zn-65	$\geq 1 \times 10^{14}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^6$
Zr-95	$\geq 4 \times 10^{13}$	$\geq 4 \times 10^{11}$	$\geq 4 \times 10^{10}$	$\geq 4 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^6$