

CNIC-00911

DATI-0002

CN9501843

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

特征 X 射线源及其应用研究

STUDY OF CHARACTERISTIC X-RAY
SOURCE AND ITS APPLICATIONS

(In Chinese)



27201

中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press



李福全：核工业大连应用技术研究所研究员级高级工程师，1963年毕业于哈尔滨工业大学工程物理系实验核物理专业。

Li Fuquan, Professor of Dalian Applied Technique Institute of Nuclear Industry. Graduated from Department of Engineering Physics, Harbin Industrial University in 1963, majoring in experiment nuclear physics.

CNIC-00911

DATI-0002

特征 X 射线源及其应用研究^{*}

李福全

(核工业大连应用技术研究所)

摘 要

介绍了在低能范围内利用放射性同位素源发出的初级射线,照射和激发靶片元素产生的特征 X 射线的规律性;探讨了提高 γ , X 射线转换率的途径及减少散射射线影响的因素,包括选择不同规格的初级放射源、不同的靶片形式及源靶相对几何位置等因素对产额的影响;找出了提高信噪比的条件。按此结果制成的靶式源,通过更换靶材可以相当自由地选取 X 射线能量。该源可广泛用于核仪表和其他场合,弥补了现有同位素源能量不足的缺陷。作为应用之一制成的核辐射测厚仪,已成功地实现了在很宽的范围内对不同材质的厚度测量,丰富和扩大了这一应用领域,揭示了特征 X 射线新的应用前景。

STUDY OF CHARACTERISTIC X-RAY SOURCE AND ITS APPLICATIONS

(In Chinese)

Li Fuquan

**(DALIAN APPLIED TECHNIQUE
INSTITUTE OF NUCLEAR INDUSTRY)**

ABSTRACT

The law of characteristic X-rays emitted by target element under the radiation of isotope source in a range of low energy is discussed. Both the way of improving the rate of γ -X conversion and the method to eliminate the influence of scatter rays are introduced. The influence of the variation of isotopes source, targets and the relative position of source-target to the output of X-rays is also discussed and then the conditions of improving signal-to-noise ratio is presented. The X-ray source based on these results can produce different energy X-rays, and so can be broadly used on nuclear instruments and other fields, as a low energy source. The thickness gauge, as one of the applications, has succeeded in thickness measuring of the different materials in large range, and present a new application field for characteristic X-ray source.

前 言

元素的特征 X 射线理论早已有研究和报道,利用元素特征 X 射线建立的荧光分析法在工业中也被采用。

为了进一步探索元素特征 X 射线的产生及其规律性,制成可供实用选择的特征 X 射线源,开拓和扩大其应用领域,开展了对特征 X 射线源的应用研究。

在低能范围内,选择放射性同位素 γ 源作为初级源,照射不同元素制成的靶片,激发产生该元素的特征 X 射线,探讨提高 γ 、X 射线转换率和减少散射射线影响的途径。在此基础上,设计和制造了产生元素特征 X 射线的靶式源,它具有足够的强度和一系列优点,作为工作源可在科研和生产中采用。

利用这种靶式源作为工作源制成的核辐射仪表,诸如厚度计、密度计、原油水分测定仪等,有效地解决了一些工业参数的测量,取得了明显的效益。

1 试验条件

1.1 试验装置与仪表

(1) 试验装置 自行设计,加工了试验装置,内装有激发放射源、靶片和探测器,激发源、靶片可方便地更换,可自如地转换、改变彼此间角度、距离,具有精确的刻度等,以实现在不同条件下激发靶材特征 X 射线的目的。

(2) 探测器 采用了正比计数管和闪烁计数器两种探测系统。

(3) 仪器、仪表部分 分析和记录射线仪表,主要有自制的单道脉冲幅度分析器和 FH-461 型微处理机多道分析器(4096 道),及其它常规仪表。

(4) 放射源 采用较多的是不同活度和尺寸的²⁴¹Am 低能 γ 源和²³⁹Pu 源等,其中常用尺寸为 $\phi 10 \times 5$ mm,活性区直径为 $\phi 8$ mm。

(5) 靶片及其制备 试验采用了从原子序数 25 的锰开始的 20 余种元素,包括铁、镍、铜、锌、溴、铯、铊、铊、银、锡、碘、铀、钋、钷、钆等制成靶片,其中包括金属、非金属,单质和化合物等。对粉末状态采用自制的模具和压片机,按需要压制成不同尺寸的靶片,激发产生其特征 X 射线。

除注明外,靶片一般加工成直径 $\phi 50$ mm 的圆形平面靶,其厚度超过本身特征 X 射线自吸收层厚度。

1.2 试验流程

典型的试验系统示意图如图 1 所示。

图中 ψ 角、 ϕ 角、 θ 角分别代表激发源平面与水平面、激发源平面与靶平面、靶平面与垂直面间夹角。

L 表示靶平面中心点与探测器表面间的直线距离。

2 试验内容和结果

2.1 元素特征 X 射线的产生

采用活度为 1.11×10^9 Bq 的²³⁹Pu 和²⁴¹Am 放射源, $\phi 50 \times 5$ mm 的各种靶片,保持 $\psi = 15^\circ$ $\phi = 60^\circ$,源和靶片在边缘处接触,采用两种探测器测量,多道分析器选用 1024 道。

试验结果如图 2 所示。图 2 列出了采用闪烁计数器探测， ^{241}Am 源激发银靶的 K 层特征 X 射线谱图，其光电峰位在 125 道处，在 332 道处系散射峰。其他靶片得到各自的特征 X 射线谱。

在以下试验中，除注明外，将以整个特征 X 射线光电峰（即全能峰）作为产生特征 X 射线的强度，而把散射峰作干扰峰加以研究。

2.2 源靶尺寸和几何条件影响试验

2.2.1 改变激发源和靶片间的相对角度对产额的影响

(1) 保持靶位置 (θ 角) 不变，改变源平面角度 ψ 值，特征 X 射线的产额。

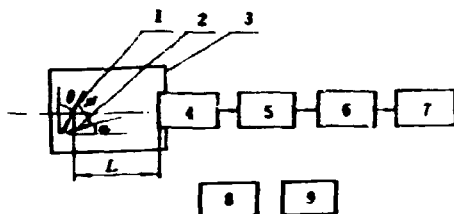


图 1 试验系统方框示意图

1——靶；2——激发源；3——防护外壳；
4——探测器；5——前置；6——主放；
7——多道谱仪；8、9——电源。

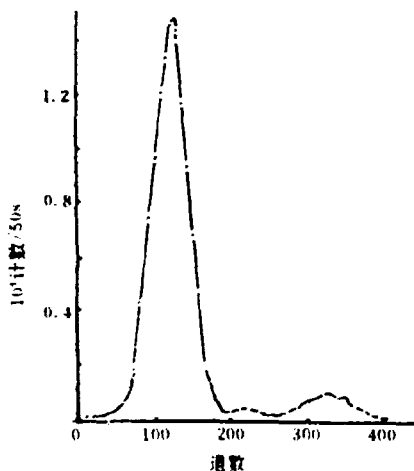


图 2 ^{241}Am -AgKX 能谱图

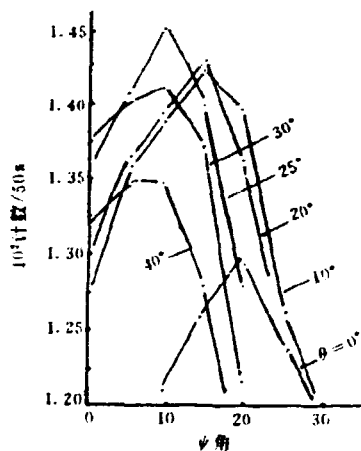


图 3 ^{239}Pu -CuKX 不同 ψ 角所对应计数

图 3 列出了 $1.11 \times 10^9 \text{ Bq}$ ^{239}Pu -CuKX 射线情况，采用正比计数管探测， $L=120 \text{ mm}$ 。

图 4 列出了 $1.11 \times 10^9 \text{ Bq}$ ^{241}Am -AgKX 射线情况，采用闪烁器探测， $L=360 \text{ mm}$ 。

表 1 列出了不同角度时所对应的最高计数及其条件。

表1 θ 角不变, 最高计数及所对应的 ψ, ϕ 角

θ 角	最高计数值/ 10^4		对应最高计数的 ψ 角		对应最高计数的 ϕ 角	
	Po-CuK β	Am-AgKX	Po-CuKX	Am-AgKX	Po-CuKX	Am-AgKX
0°	25865	111242	20°	20°	70°	70°
10°	28405	120647	15°	15°	65°	65°
15°	28567	122234	15°	15°	60°	60°
20°	28502	126309	15°	15°	55°	60°
25°	28725	129981	10°	10°	55°	55°
30°	28288	129066	10°	10°	50°	50°
40°	26912	125752	5°	10°	45°	40°
50°	24757	111072	5°	5°	35°	35°

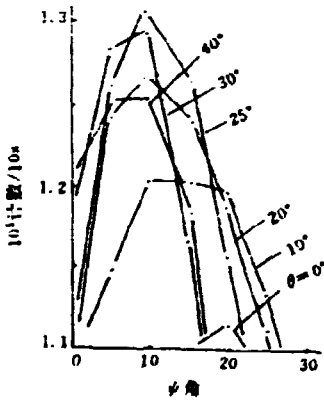


图4 $^{241}\text{Am-AgKX}$ 不同 ψ 角所对应的计数

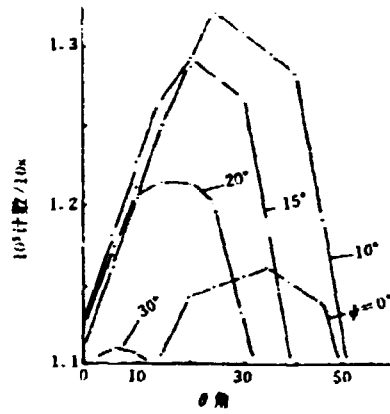


图5 $^{241}\text{Am-AgKX}$ 不同 θ 角所对应的计数

从表1中列出结果可见, 最高计数出现于 θ 角在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 之间, ψ 角在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 之间, 其中当 $\theta = 25^\circ, \psi = 10^\circ$ (即 $\phi = 55^\circ$)时X射线产额最高。还发现, 随着靶的倾斜 (即 θ 角增大), 改变激发源 ψ 角时, 其在探测器位置最大X射线产额出现规律是源靶间夹角即 ϕ 角值越来越小, 对应 $\theta = 0^\circ$ 时, $\phi = 70^\circ$, 而当 $\theta = 50^\circ$ 时, ϕ 角值只有 35° 了。

试验对其它靶材 (包括化合物靶材) 取得了相同的结果。

(2) 保持激发源位置 (ψ 角) 不变, 改变靶平面 θ 角, 特征X射线的产额。

图5列出了 $1.11 \times 10^6 \text{ Bq } ^{241}\text{Am-AgKX}$ 射线情况, 采用闪烁探测器, $L = 360 \text{ mm}$ 。

表2列出了不同角度时, 所对应的最高计数及条件。

从表2中可见, 其最大计数出现在 $\psi = 10^\circ, \theta = 25^\circ$ 时, 这与试验(1)情况相同。

结果可见, 保持 ψ 角不变, 改变 θ 角度时, 其特征X射线最高计数均出现在 $\phi = 90^\circ - \psi - \theta = 55^\circ$, 即确定激发源位置后, 即可找出其特征X射线最高计数对应的靶片位置。

表 2 ψ 角不变, 最高计数及所对应的 θ, ϕ 角

ϕ 角	最高计数值/10 s	对应最高计数的 θ 角	对应最高计数的 ψ 角
0°	117189	35°	55°
10°	134147	25°	55°
15°	129602	20°	55°
20°	123477	15°	55°
25°	114477	10°	55°
30°	111205	5°	55°
40°	92058	0°	50°

2.2.2 改变激发源与靶片间的水平距离对 X 射线产额的影响

(1) 斜靶情况 保持 $\psi = 15^\circ, \phi = 55^\circ$, 改变源靶间距离, 看其特征 X 射线产额, 结果参见表 3。

表 3 $\theta = 15^\circ, \psi = 55^\circ$ 时, 源、靶间距离影响试验

激发源种类	探测器种类	源与探测器间距离, mm	X 射线类型	激发源与靶片间不同距离时产额, 计数/10 s							
				0 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
Pu	正比计数器	120	FeKX	17504	17635	17699	17762	17438	17196	16662	15918
Pu	正比计数器	120	CuKX	18760	18805	19374	19399	19209	18496	17838	17417
Am	闪烁计数器	360	AgKX	123998	124044	124099	124383	121682	119416	115081	107850

距离 0 mm 表示, 激发源与靶片在下边缘处接触, 1, 2, 3, ... 分别表示其间距离为 1, 2, 3, ... mm。

从结果可见, 其最高产额均出现在距离为 3 mm 时。

(2) 直靶情况 (即 $\theta = 0^\circ$) 激发源放置靶中心, $\psi = 90^\circ$, 结果参见表 4。

表 4 $\theta = 0^\circ, \psi = 90^\circ$ 时, 源、靶间距离影响试验

激发源种类尺寸	探测器种类	源与探测器间距离 L, mm	X 射线类型	激发源与靶片间不同距离时产额, 计数/10 s							
				0 mm	2.5 mm	5.0 mm	7.5 mm	9.0 mm	10 mm	12.5 mm	15.0 mm
Pu, $\phi 10 \times 5$	正比计数器	120	FeKX		23062	14530	15987	17064	16826	16625	15856
Pu, $\phi 10 \times 5$	正比计数器	120	CuKX		14016	19758	25309	28417	26963	27601	27052
Am, $\phi 10 \times 5$	闪烁计数器	360	AgKX	46289	81125	103618	116238	116463	112418	109711	106414
Am, $\phi 15 \times 6$	闪烁计数器	360	AgKX	48095	146965	186919	188089	197106	194678	183561	173079

结果可见, 最高产额出现在激发源和靶片间距离约 9 mm 时。

2.2.3 靶片尺寸对产额的影响

试验条件: 选用厚度相同, 不同直径的锡靶, 1.11×10^9 Bq ^{241}Am 激发源, 保持相同的几何条件, 结果参见表 5 和图 6。

表 5 靶片直径对产额的影响结果

靶片直径, mm	50	40	35	30	25	20	15
X 射线产额, 计数/10 s	143341	136014	127007	123626	114468	96191	84330
产额降低率, %		5.11	6.62	2.66	7.40	15.90	12.33

产额降低率定义为: $\frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100\%$

N_1, N_2 分别表示不同两组计数值, 按此计算 $\phi 15$ 与 $\phi 50$ 的靶片, 在相同的激发条件下,

X 射线产额降低率为 41.16%。

从表 5 可见，保持靶一定尺寸，如 $\phi 25$ mm，获得 X 射线强度与较大尺寸靶降低不很明显。这样可根据需要、装置尺寸、靶材的成本，决定选取靶材大小。

改变激发源与靶片间径向接触点，看其对产额影响。图 7 列出了直靶 ($\theta = 0^\circ$)， $^{238}\text{Pu-CuKX}$ 射线情况。源放在靶中心即 $a = 0$ mm 与在边缘处即 $a = 25$ mm 时，计数分别为 108319/50 s 和 133613/50 s，产额降低为 19%。

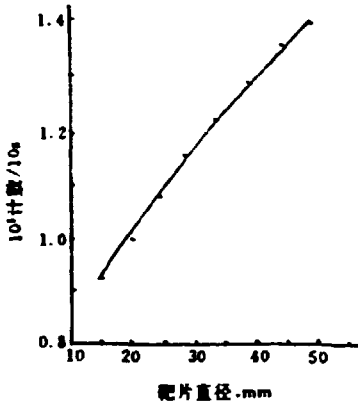


图 6 不同靶片尺寸的产额

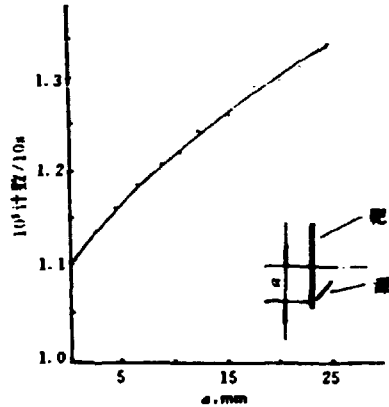


图 7 源、靶不同接触点的产额

2.2.4 激发源与靶片间配置形式试验

我们主要进行了三种源、靶结构形式的 X 射线产额研究，其示意图如图 8 所示。

- (a) 斜靶情况：激发源与靶片在边缘处接触。
- (b) 直靶情况：激发源与靶片在边缘处接触，靶垂直放置。
- (c) 直靶、中心源情况：靶垂直放置，激发源在靶片中心位置（此情况，也曾作过弧形靶，如图 8 (c) 中虚线所示）。

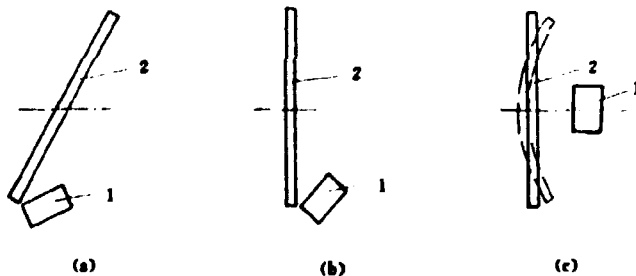


图 8 激发源与靶片的配合形式

1——初级源； 2——靶片。

试验结果见表 6。

表 6 源靶不同配置时最大计数比较

配置方式	最大计数		
	Po-FeKX/50 s	Po-CsKX/50 s	Am-AgKX/10 s
斜靶	89021	143464	129981
直靶	79802	129325	111242
直靶中心源	84133	138006	115463

表 6 所列数据均表示在各种配置下，最高产额值。

从表中可见，以斜靶时产额最高，直靶中心源次之，但总的相差不大。对于直靶情况可以在四周放上多块放射源以提高激发源强度，增加 X 射线产额。表 7 列出了放置两块源和单源的比较结果。

表 7 直靶时单源和双源产额比较

源数量	与探测器间距 L, mm	探测方式	计数/50 s
源 1	240	正比计数器	15538
源 2	240	正比计数器	8295
源 1+2	240	正比计数器	23330

从表 7 中可见，两块激发源同时作用时的产额，等于各自单独激发之和。因此利用直靶情况可通过四周多放置激发源提高 X 射线产额。

2.2.5 激发源尺寸影响试验

试验采用两块标明强度为 1.11×10^8 Bq 的 ^{241}Am 激发源，其尺寸分别为 $\phi 15 \times 6$ mm, $\phi 10 \times 5$ mm, 活性区分别为 $\phi 12$ 和 $\phi 8$ mm, 实际测定的结果是当源强分别为 8.46×10^8 和 5.60×10^8 Bq, 两源强比值为 1.512。

对 $\phi 15 \times 6$ mm 激发源进行的条件试验表明，对上述尺寸为 $\phi 10 \times 5$ mm 激发源的试验结果也完全适用。

两种尺寸的激发源产额对比的试验结果参见表 8。

表 8 $\phi 15 \times 6$, $\phi 10 \times 5$ 尺寸的 ^{241}Am 源产额对比试验

源尺寸(mm)	实际源强	源、靶配置	靶材	计数/10 s
$\phi 15 \times 6$	8.46×10^8 Bq	斜靶: $\theta = 25^\circ, \psi = 10^\circ$	Ag	212903
$\phi 10 \times 5$	5.60×10^8 Bq	斜靶: $\theta = 25^\circ, \psi = 10^\circ$	Ag	133052
$\phi 15 \times 6$	8.46×10^8 Bq	直靶: $\theta = 0^\circ, \psi = 20^\circ$	Ag	175005
$\phi 10 \times 5$	5.60×10^8 Bq	直靶: $\theta = 0^\circ, \psi = 20^\circ$	Ag	110835

从表中可见，在斜靶情况，两种尺寸源其激发 X 射线计数比为：212903/133052 = 1.600；直靶情况为：1.580。

计数比与两源强度比近似相等，说明并没有因为增大源面积而影响计数。

同时可见，同样放射性用量，源面积大时，其自吸收少， γ 光子输出率高，可获得较高的 X 射线产额。

2.3 转换效率和激发源能量对产额的影响

转换效率指在相同的几何条件下，激发产生的特征 X 射线产额与激发源强度之比的百分数。

我们选择激发源和靶片间最佳配置方式,以获得最大的靶元素的特征X射线。图9列出了用 ^{241}Am 源激发不同元素的试验结果。

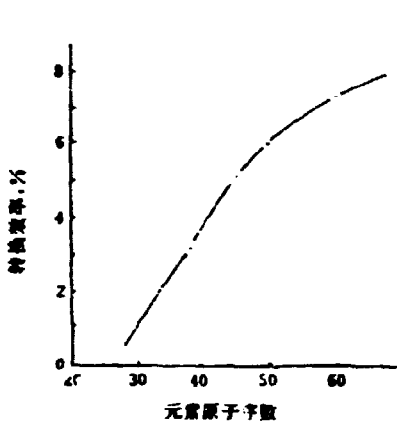


图9 ^{241}Am 源激发不同元素的转换效率

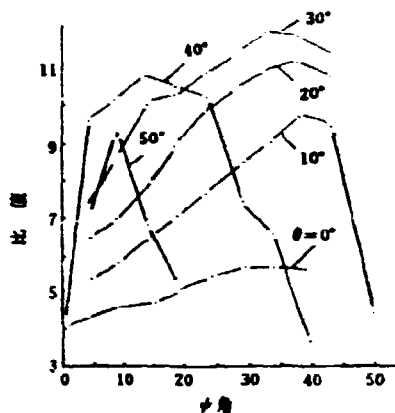


图10 不同 ϕ 角时光电峰与散射峰面积之比

从图中可见,在 ^{241}Am 源的59.6 keV γ 射线激发下,靶材的原子序数增大,其X射线产额随之增大,可以获得更高的转换效率。

试验进一步证实了初级激发源能量越接近元素的特征X射线能量,其产额越大。如表9所列。同样强度的 ^{239}Pu 源照射铜靶,X射线产额比 ^{241}Am 高约38%。

表9 不同能量源激发铁、铜KX产额

靶材种类	激发源种类	光电峰对应道数	窗内计数/50s
Cu	Pu	82	143464
Cu	Am	81	89475
Fe	Pu	58	89021
Fe	Am	58	47688

2.4 一次射线散射影响试验

提高X射线强度,同时消除或降低散射影响是我们追求的目标。现对散射影响试验结果进一步说明。

(1) 激发源发出的初级射线,对着探测器方向必须加以屏蔽,以使 γ 射线不能直接射向探测器,否则将增加散射峰强度,甚至将无法有效探测X射线。上述试验均按此要求进行的。

(2) 通过选择激发源和靶之间的几何条件,减少散射影响,试验采用 $1.11 \times 10^9 \text{ Bq}$ ^{241}Am 源激发银靶,其标准谱线如图2所示。图10绘出了一组保持 θ 角不变,改变 ϕ 角时,AgKX光电峰面积与散射峰面积之比。

从图中可见,在靶角度不变,改变源角度时,随着源靶间夹角 ϕ 的减小(即 ϕ 增大),其

信噪比增大，到一最大值后，又迅速降低，其最大值点即为选取的合适条件，但同时也要注意光峰面积的绝对值（即 X 射线强度），此值越大越有利。

(3) 纵观多种条件试验结果，激发源和靶面间夹角保持在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间，保证一定的屏蔽空间对减少散射影响是有利的。

(4) 消除散射影响的措施之一是采用电子线路，将散射峰计数甄别掉，只要其与 X 射线峰分开，这种办法是有效的。

2.5 化合物靶和复合靶试验

2.5.1 化合物靶试验

我们采用特制的模具压片机，将某种元素化合物粉末压制成 $\phi 50$ mm 的化合物靶片，激发该元素的特征 X 射线。先后曾对铜、镉、溴、钡、钐、钆等不同化合物靶试验，其规律和单质靶相同，这就解决了某些单质不易获得或保存的问题。

2.5.2 复合靶试验

为同时获得两种元素的特征 X 射线，制成复合靶，由同一激发源激发，产生两种能量的 X 射线值。试验采用了两种形式的复合靶，一是按需要将两种元素（或化合物）按比例混合制靶，这种情况多适用化合物粉末状态，二是制成直径 $\phi 50\times 5$ mm 靶片，其中每种元素各占一半，激发源放在中间。

表 10 列出锡、钆单质靶和锡钆各占一半时测得的特征 X 射线全能峰计数，测试采用斜靶形式， 1.11×10^9 Bq 的 ^{241}Am 激发源。

表 10 锡、钆和（锡+钆）混合靶测试结果

靶材	锡靶	钆靶	复合靶	
			锡	钆
上道	107	226	107	226
下道	226	469	226	469
窗内计数/10 s	149486	177220	77095	91545

对不同类型复合靶多次试验表明，获得两种能量的 X 射线强度，其规律同单元素靶。

3 靶式源的设计和选择

综合研究结果，我们找出了在特定条件下特征 X 射线的产生和规律，为设计和选择特征 X 射线源打下了基础。

从实用需要出发，我们设计了三种形式的特征 X 射线源，即靶式源，分别对应斜靶、直靶和直靶中心源形式。设计这种 X 光源结构的目的是尽可能提高其 X 射线的强度和尽可能降低 γ 散射线的强度。

一般地， γ 光子在靶上转化为 X 光子的效率是很高的， γ 光子即使经过康普顿散射，其能量一般仍足以激发靶材的内层电子，退激时产生其特征 X 射线，而且几率很大，但 γ 源产生的 γ 光子只有很小一部分能照射到靶上，这是总转换效率不高的原因。

图 11 列出了一种斜靶示意图，这种结构已在实践中选用。其源由初级源、靶片、外屏蔽体及相应调整机构组成。源放在源托中，对着探测器方向有呈半圆形的铅屏蔽，整个源托可在水平方向前后移动，其角度可通过机构在细颈部分调整实现，调整好由固定装置

锁死；靶放在靶托中，可绕水平轴转动调节角度。上盖由两块铁板组成，通过调节螺杆传动，可改变开口（准直孔）尺寸，在不工作时可全封闭。这种结构，可以实现源、靶方便更换，其相互位置（距离、角度）可随时调节。如若把靶面调节到水平，可作为直靶结构。

根据试验研究结果，作为标准设计靶尺寸采用 $\phi 50\text{ mm}$ 的圆片，可用单质或化合物制成，放射源可采用低能源的任一种，这样可以通过换源和换靶相当自由地选取特征X射线能量，并且通过调节准直孔尺寸改变射线强度。一般情况下，调节源平面与垂直面成 10° 角，源、靶平面间夹角为 55° ，源托与靶托在底部接触。

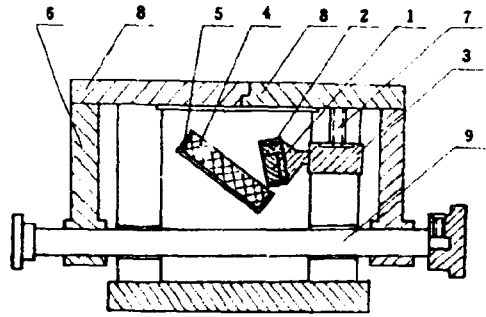


图 11 斜靶结构示意图

- 1——初级源；2——半圆形铅屏蔽；3——源托；
4——靶；5——靶托；6——外屏蔽体；
7——固定装置；8——上盖；9——调节螺杆。

作为靶式源与X光管发生的X射线比，具有明显的优点，其单色性及稳定性好、装置简单可靠、成本低，可广泛用于核仪表和其它场合作为工作源。在低能范围内弥补了现有的几种放射性同位素源能量的不足。开辟了新的应用领域。

4 靶式源的应用实例

我们研制的靶式源，已在核仪表中作为工作源采用，核辐射测厚仪是比较典型的一种。

通常核辐射测厚仪是利用放射性同位素发射的射线穿过物质后，其强度变化与物质厚度相关的原理来检测厚度的。根据被测材质的种类、测厚范围，选择合适能量的放射源。但受同位素种类的限制，常常不能按理想状态选用合适的能量，以达到测量的最佳灵敏度和选择性，甚至无法实现有效的测量。

现在采用特征X射线制成的靶式源，根据不同测量材质和厚度范围，通过换靶和换源可以相当自由地选取射线能量，以达到测量的最佳灵敏度和选择性，使原来不可能实现的测量要求得以实现，扩大了应用领域。靶式源的应用开创了测厚仪仪表的新途径。

实际应用举例：

利用 $^{239}\text{Pu-CuKX}$ 射线实现了某铝加工厂对厚度范围 $0.010\sim 0.100\text{ mm}$ 铝箔的测定，精度在 $\pm [1\%(\text{被测厚度}) + 1\mu\text{m}]$ 以内；利用 $^{239}\text{Pu-BrKX}$ 射线，实现了对厚度范围 $0.050\sim 0.300\text{ mm}$ 铝带的测量，精度在 $\pm (1\% + 1\mu\text{m})$ 以内；利用 $^{241}\text{Am-MoKX}$ 射线，实现了对厚度范围 $0.40\sim 2.00\text{ mm}$ 铝带的厚度测量，精度在 $\pm 0.01\text{ mm}$ 以内。

这样薄的铝箔、铝带的厚度，用原有的同位素源发出的 γ 射线是不可能实现测量的，现在却很好地解决了，拓宽了厚度测量的领域，这对提高产品的质量、产量、减轻劳动强度、改善劳动条件，效果均是显著的，取得了明显的经济效益和社会效益。

这种靶式源在解决密度较大的材质的厚度测量中，同样显示了其优越性。如利用 $^{241}\text{Am-AgKX}$ 射线，实现了 $0.05\sim 0.30\text{ mm}$ 范围内铜箔的厚度测量；利用 $^{241}\text{Am-GdKX}$ 射线，实现了 $0.10\sim 2.00\text{ mm}$ 范围内的带钢厚度测量；利用 $^{241}\text{Am-SnKX}$ 射线，实现了

2.00~6.00 mm范围内玻璃的厚度测量。

5 结 论

对靶元素特征 X 射线进行试验研究,探讨了在试验条件下其发射的规律性,证明了 X 射线有足够的强度,消除了过去曾担心的 X 射线产额低、散射影响严重、不足以作为工作源的看法,丰富了特征 X 射线的知识,并为扩大其应用领域提供了依据。

根据研究结果制成的靶式源,是一种可供选择的核辐射仪表的工作源,揭示了新的应用前景,这种特征 X 射线源与 X 光管比较具有单色性好、稳定性好、简单可靠、成本低等优点。在低能范围内,弥补了现有的几种放射性同位素源能量的不足,扩大了测量项目范围。

利用这种靶式源制成的测厚仪,成功地应用在工业上对金属带、箔材和一些非金属材质的测量,首次实现了利用 γ (X) 射线对金属箔材的在线厚度测量。靶式源的应用创造了可观的效益。

参 考 文 献

- [1] 张奎麟等编著. 放射性同位素 X 射线荧光分析. 北京: 原子能出版社, 1981
- [2] 郑成法主编. 核辐射测量. 北京: 原子能出版社, 1983
- [3] 陈国珍主编. 生产过程自动分析. 北京: 海洋出版社, 1991
- [4] 《流线分析》编辑组. 流线分析. 北京: 原子能出版社, 1978

(京)新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

特征 X 射线源及其应用研究 = STUDY OF CHARACTERISTIC X-RAY SOURCE AND ITS APPLICATIONS/李福全著. —北京:原子能出版社, 1994. 11
ISBN 7-5022-1213-2

I. 特… I. 李… III. 特征 X 射线-源-应用-研究 IV.
①TL991

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 06062 号



原子能出版社出版发行

责任编辑:孙凤春

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 18 千字

1994 年 11 月北京第一版·1994 年 11 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.