

^{85}Kr 测厚源的输出性能研究

彭怡刚, 梁斌斌, 王子默, 巴伟伟, 刘超, 高翔

(原子高科股份有限公司, 北京 102413)

摘要:为指导 ^{85}Kr 测厚源的制备, 采用两种材质、两种活性区、两种丰度的 ^{85}Kr 原料气制备一批同等活度(7.4 GBq)的测厚源, 采用自行研制的 ^{85}Kr 源 β 输出电压装置对制备的测厚源输出电压进行测量。结果表明, 采用钛材质、小活性区、20%丰度原料的测厚源输出电压更高。钛材质的源窗、小活性区的源壳、高丰度的原料对 β 射线的吸收更少, 因此在制备某种活度的 ^{85}Kr 测厚源时, 为提高射线输出, 应优先采用钛材质、小活性区、高丰度的原料。

关键词: 不锈钢; 钛; 原料气; 活性区; 输出性能

中图分类号: TL929

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2021)02-0127-06

doi: 10.7538/tws.2021.34.02.0127

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research for Output Performance of the ^{85}Kr Thickness Gauge Source

PENG Yigang, LIANG Binbin, WANG Zimo, BA Weiwei, LIU Chao, GAO Xiang

(HTA Co., Ltd., Beijing 102413, China)

Abstract: In the ordinary way, the output performance of ^{85}Kr radioactive source depends on activity, ^{85}Kr radioactive sources with equal activity have similar output performance. But the output performance of ^{85}Kr thickness gauge source on the market is inconsistent while the sources have the same size and activity, and this may be related to the preparation process of ^{85}Kr radioactive source by different suppliers. Furthermore, preparation process that shell material, active region and feed gas should be considered. ^{85}Kr radioactive source with equal activity (7.4 GBq) were prepared by different shell material, active region and feed gas with different abundances. The output voltage of these ^{85}Kr radioactive sources were measured by ^{85}Kr β output voltage device developed by HTA Co., Ltd. The results show that ^{85}Kr radioactive source prepared by titanium shell has larger output voltage than stainless shell, ^{85}Kr radioactive source prepared by small activity region has a little bit larger output voltage than big activity region, and output voltage of ^{85}Kr radioactive source prepared by more abundant feed gas is slightly larger than less abundant feed gas. This because that ^{85}Kr radioactive source prepared by titanium shell, small activity region and larger abundant feed gas has less absorption of beta rays than that prepared by stainless shell, big activity region and

收稿日期: 2020-10-31; 修回日期: 2021-03-04

作者简介: 彭怡刚(1989—), 男, 江西吉安人, 工程师, 从事放射源制备相关研究

通信作者: 梁斌斌(1983—), E-mail: liangbinbin@circ.com.cn

less abundant feed gas. This can guidance on of preparation for ^{85}Kr thickness gauge source based on β output efficiency.

Key words: stainless steel; titanium; feed gas; active region; output performance

^{85}Kr 测厚源一般安装在 β 射线测厚仪上, 广泛用于测量纸张、金属箔和锂电涂布片的厚度或面密度^[1-6]。 ^{85}Kr 测厚源的 β 射线输出强度影响测厚仪的精度, 随着市场对测厚仪的精度要求越来越高, 测厚仪厂商对放射源 β 射线输出强度的要求也越来越高。一般相同规格尺寸的 ^{85}Kr 测厚源输出性能和填充活度成正比。但测厚仪厂商反馈, 在同等规格尺寸和活度条件下, 市场上放射源的输出性能不一致, 这可能和各 ^{85}Kr 放射源制造商的制备工艺不同有关。出厂时放射源的填装活度为名义活度的 $1 \pm 10\%$, 但是由于制备工艺不同, 导致放射源的输出不一致, 从而影响测厚仪的精度。

^{85}Kr 测厚源的制备方法是含一定丰度 ^{85}Kr 的氩气密封在金属壳体(源壳)中^[7-9]。在制备测厚源时, 影响 ^{85}Kr 测厚源的输出性能除了填装料量, 还需考虑源壳材质、 ^{85}Kr 原料的丰度、载气活性区的体积大小。为了提升 ^{85}Kr 测厚源的输出, 一种方法是提高填装活度, 使其超过名义活度的 $+10\%$, 但会造成原料气的浪费; 另一种是改进制备工艺, 即优化源壳材质、 ^{85}Kr 原料气丰度、以及活性区体积, 以保证测厚源有较高的射线输出。为了指导 ^{85}Kr 测厚源的制备, 本文拟在同等规格尺寸和填装活度条件下, 研究源壳材质、 ^{85}Kr 原料的丰度以及载气活性区体积大小对 ^{85}Kr 测厚源输出性能的影响。

1 实验材料

1.1 主要材料

^{85}Kr 测厚源源壳: 不锈钢与钛材质, GB 牌号分别为 022Cr17Ni12Mo2 与 TA1, 外形尺寸为 $\phi 22 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$, 其中源壳厚度为 $30 \mu\text{m}$, 自行设计研制; 5%、20% 丰度 ^{85}Kr 原料气: 常压下的比活度约 2.5 GBq/cm^3 和 10 GBq/cm^3 , 购自俄罗斯 RAIMS ltd。

1.2 主要仪器及装置

Kr-85 充气系统: 可同时对 6 个源壳充气,

充气压力 1~5 个大气压, 原子高科股份有限公司研制; DigiBASE(-E)NaI(Tl) 数字化谱仪: 美国 ORTEC 公司; ^{85}Kr 源 β 输出电压装置: 源与探测器距离 3 cm, 探测灵敏面积 $\phi 24 \text{ mm}$, 原子高科股份有限公司研制。

1.3 ^{85}Kr 源壳结构

根据活性区大小将 ^{85}Kr 源壳分 I 型和 II 型两种结构, 如图 1 所示。I 型和 II 型源壳的外形尺寸外壳完全一致, I 型源壳活性区体积为 II 型的 2 倍, I 型结构活性区体积 4 cm^3 , II 型结构体积 2 cm^3 , 两种结构的放射源均通过国家标准规定的安全性能等级 C33322^[10]。

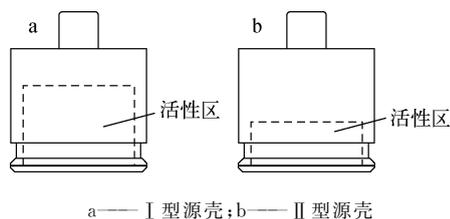


图 1 ^{85}Kr 源壳结构中 I 型放射源活性区和 II 型放射源活性区

Fig. 1 Active region of type I and type II radioactive source in ^{85}Kr thickness gauge source

2 实验过程

2.1 充气实验

准备不锈钢材质和钛材质的 I 型 ^{85}Kr 源壳和 II 型源壳若干个; 将源壳接入 ^{85}Kr 充气系统, 抽空源壳至内部压力为 5 Pa, 再释放 5% 丰度原料气和 20% 丰度原料气。

充气压力通过公式(1)计算。

$$P = \frac{(A_0/A_{pv})}{V} \quad (1)$$

式中: A_0 为期望载气活度, GBq; A_{pv} 为原料气比活度, GBq/cm³; V 为活性区大小。

期望载气活度 A_0 为 7.4 GBq , 5% 丰度原料气的 A_{pv} 为 $2.5 \text{ GBq/cm}^3 \cdot (0.101 \text{ MPa})^{-1}$, 20% 丰度原料气的 A_{pv} 为 $10 \text{ GBq/cm}^3 \cdot (0.101 \text{ MPa})^{-1}$, I 型源壳、II 型源壳活性区大小分别为 4 cm^3 、 2 cm^3 。通过公式(1)计算得出:

若充 5% 丰度原料气, I 型源需充 74.74 kPa, II 型源需充 149.4 kPa; 若充 20% 丰度原料气,

I 型源需充 18.69 kPa, II 型源需充 37.38 kPa; 实际充气压力列于表 1。

表 1 实际充气压力和实际充气活度
Table 1 Actual inflation pressure and activity

源壳编号	源壳材质	源壳结构类型	原料气丰度	实际充气压力/kPa	实际载气活度/GBq
KR-0001	不锈钢	I	5%	75.2	7.44
KR-0002	不锈钢	II	5%	150.1	7.43
KR-0003	钛	I	5%	75.2	7.44
KR-0004	钛	II	5%	150.1	7.43
KR-0005	不锈钢	I	20%	18.7	7.41
KR-0006	不锈钢	II	20%	37.3	7.39
KR-0007	钛	I	20%	18.7	7.41
KR-0008	钛	II	20%	37.3	7.39

2.2 测厚源制备

充气结束后, 进行剪切、源帽焊接, 制备出一批活度(7.4 GBq)相近的⁸⁵Kr测厚源。

2.3 NaI 能谱 γ 计数率

制备好的⁸⁵Kr测厚源经过检验不泄露后, 采用 DigiBASE(-E)NaI(Tl) 数字化谱仪测量这批源的伽马能谱计数率,⁸⁵Kr测厚源与 NaI 能谱仪探头距离为 1 m, 测量时本底计数率应小于 2 s^{-1} , 测量 3 次, 统计平均值。

2.4 输出电压

采用⁸⁵Kr源 β 输出电压装置测量这批源的输出电压,⁸⁵Kr源 β 输出电压装置的探测探头与 β 测厚仪完全一致, 如图 2 所示,⁸⁵Kr测厚源的源窗面发射出的 β 粒子, 经过探测器被吸收, 转变为电压信号, 经过放大到显示器读取, 其测量结果为放射源的输出电压, 可以表征⁸⁵Kr测厚源的 β 输出性能。

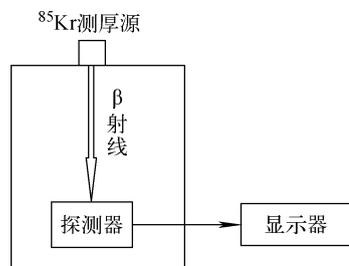


图 2 ⁸⁵Kr源 β 输出电压装置

Fig. 2 Schematic diagram for ⁸⁵Kr β output voltage device

3 结果与讨论

3.1 NaI 能谱 γ 计数率

KR-0001 至 KR-0008 测厚源的 NaI γ 能谱仪计数率列于表 2, 为便于讨论, 将测厚源的 γ 能谱计数率除以实际载气活度得到每 1 GBq 的计数率归一化值(s^{-1})。

表 2 NaI γ 能谱仪计数率

Table 2 Counts per second for NaI γ energy spectrometer

源壳编号	计数率/ s^{-1}	归一化值 (每 1 GBq)/ s^{-1}
KR-0001	2 285.8 \pm 4.2	307.23
KR-0002	2 282.0 \pm 4.6	307.13
KR-0003	2 283.2 \pm 3.5	306.88
KR-0004	2 283.3 \pm 3.4	307.31
KR-0005	2 286.6 \pm 4.1	308.58
KR-0006	2 278.7 \pm 3.6	308.35
KR-0007	2 282.9 \pm 3.2	308.08
KR-0008	2 277.8 \pm 4.0	308.23

从表 2 中可以看出, KR-0001 至 KR-0008 测厚源在 1 m 处的 γ 能谱计数率相差不大, 说明装载活度相同时, 源壳材质、原料气丰度、活性区大小对 NaI γ 能谱计数率影响不大。这是因为在 1 m 处, NaI 能谱仪探测到的是⁸⁵Kr 的衰变分支: 强度为 514 keV 的 γ 射线, 而该能量

的 γ 射线穿透能力强,几乎不发生自吸收,也几乎不被源窗阻挡,强度未发生明显改变,故而该批源的NaI能谱计数率相近。这也表明采用NaI能谱 γ 计数率可以相对地测量 ^{85}Kr 测厚源的载气活度。

3.2 输出电压

KR-0001至KR-0008测厚源的输出电压结果列于表3,为便于讨论,将源的输出电压除以实际载气活度得到每1GBq的输出电压。

表3 测厚源 β 输出电压
Table 3 Output voltage
of ^{85}Kr thickness gauge source

源壳编号	输出电压/V	归一化值(每1GBq)/V
KR-0001	7.25	0.97
KR-0002	7.43	1.00
KR-0003	10.27	1.38
KR-0004	10.94	1.47
KR-0005	7.91	1.07
KR-0006	8.16	1.10
KR-0007	11.22	1.51
KR-0008	11.71	1.58

3.2.1 源壳材质对输出性能的影响 从表3中可以看出,原料气丰度为5%、活性区为I型时,不锈钢材质的KR-0001测厚源输出电压小于钛材质的KR-0003。其余同等原料气丰度、同等活性区体积、不锈钢材质的测厚源输出电压均小于钛材质的测厚源。这说明同等条件下,钛材质的测厚源输出性能高于不锈钢材质的测厚源。

当活性区中的 ^{85}Kr 释放的 β 射线经过测厚源的源窗时,强度和能量均会发生一定程度的损失。 β 射线与物质相互作用时,会以电离和辐射的方式产生能量损失^[11];以电离方式发生的单位路程上的能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{ion}}$,与穿过物质的原子序数 Z 成正比;以辐射方式发生的单位路程上的能量损失率 $(-dE/dx)_{\text{rad}}$,与穿过物质的原子序数 Z^2 成正比。

^{85}Kr 的 β 射线谱为从0~0.672 MeV连续的能量不等的一束电子,辐射能量损失率约为电离能量损失率的2%,穿过钛和不锈钢材质30 μm 的源窗后,经过估算,电离能量损失率比

值 $\Delta E_{\text{钛}} : \Delta E_{\text{钢}}$ 约为0.85:1。

能量损失的同时,射线强度也会发生减弱,主要是射线被吸收引起的,吸收规律近似为^[8,11]:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2)$$

式中, μ 为衰减系数, t 为厚度。

线衰减系数 μ_m 可表示为 μ/ρ , μ_m 和射线能量相关,根据公式(3)可以估算^[8]。

$$\mu_m = 22E_{\text{max}}^{-4/3} \quad (3)$$

通过公式(3)估算 $\mu_m = 37 \text{ cm}^2/\text{g}$,而 $\rho_{\text{不锈钢}} = 7.8 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{钛}} = 4.5 \text{ g/cm}^3$, $t = 30 \mu\text{m}$,再通过公式(2)可以得到 β 射线穿过钛材质的源窗后强度约为初始的61%, β 射线穿过不锈钢材质的源窗后强度约为初始的42%。 β 射线穿过钛材质源窗后射线强度约为穿过不锈钢材质源窗的1.45倍,而表3中,钛测厚源的输出电压约为不锈钢测厚源的1.4至1.5倍。

3.2.2 原料丰度对输出性能的影响 从表3中可知,测厚源KR-0001和KR-0005均为I型源、不锈钢材质,采用20%丰度原料的KR-0005源输出电压略高于采用5%丰度原料的KR-0001,而其他的测厚源,同等活性区大小、相同材质,20%丰度原料的测厚源输出电压均略高于5%丰度原料的测厚源。

这是因为当载气活度相同时,相同体积条件下,单位体积内的放射性 ^{85}Kr 原子数量相同,如图3所示。图3(a)为采用20% ^{85}Kr 原料气的放射源,内部压力为 P ;图3(b)为采用5% ^{85}Kr 原料气的放射源,内部压力为 $4P$ 。两种放射源的活度均为 A ,即图示内含有相同数量的

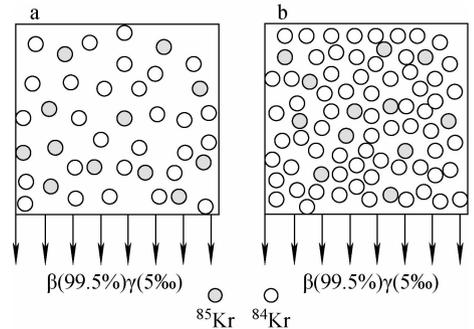


图3 20%丰度(a)和5%(b)丰度原料气的放射源内部示意图

Fig. 3 Schematic of ^{85}Kr radioactive source filled with different abundance of feed gas

⁸⁵Kr原子。采用5%丰度原料气的测厚源比20%丰度原料气测厚源的内压更高,单位体积内的非放射性⁸⁴Kr原子更多,对β射线的自吸收更强,因此5%丰度原料气的测厚源的输出电压略低于20%丰度原料的测厚源。

3.2.3 活性区大小对输出性能的影响 从表3中可知,当采用相同材质的源壳、相同丰度的原料气时,I型活性区测厚源的输出电压比II型活性区测厚源的输出电压小。

活性区大小不同时的放射源内部示意如图4所示。图4(a)II型放射源的活性区体积为V,内部压力为P;图4(b)I型放射源的活性区体积为2V,内部压力为P/2。两种放射源的活度均为A,即图示内含有相同数量的⁸⁵Kr原子。当II型活性区转变到I型活性区时,原料气的体积膨胀,有一部分⁸⁵Kr原子距离源窗处更远,⁸⁵Kr原子释放的β粒子会受到源壳内壁的阻挡吸收而不容易从源窗处发射,导致这些⁸⁵Kr原子的β输出角度更小。即当活性区从大向小转变时,放射源的β射线输出角度逐渐增大,使得更多的β射线进入探测器。因此同等丰度、相同材质条件下,小活性区的测厚源输出电压更高。

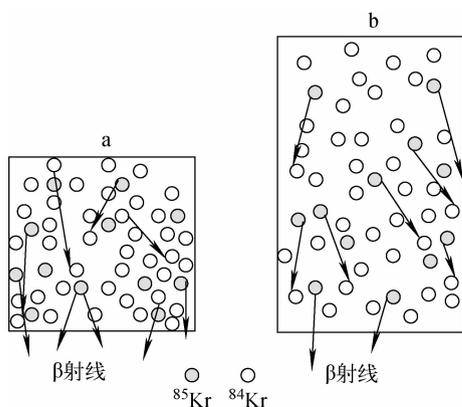


图4 活性区大小不同时的放射源内部示意图

Fig. 4 Schematic of ⁸⁵Kr radioactive source filled with different active region

4 结论

本文采用⁸⁵Kr丰度为5%和20%的原料,设计了两种活性区大小不同的源壳结构,采用了两种材质的源壳,制备了一批装载活度约为7.4 GBq的⁸⁵Kr测厚源,对该批源进行了NaI

γ能谱测量和β输出电压测试。结果表明,该批源的γ能谱计数率相近,在其他条件相同时,采用钛材质源壳的测厚源输出电压高于不锈钢,采用小活性区的测厚源输出电压高于大活性区,采用高丰度原料的测厚源输出电压高于低丰度。

因此,在制备某种活度的⁸⁵Kr测厚源时,为提高测厚源的输出性能,应优先采用高丰度原料,并且尽量减少活性区的大小,在选用源壳材质时,应尽量使用钛材质。

参考文献:

- [1] 华焕灵,于桂茹. β射线测厚仪在铝材轧制中的应用[J]. 计量技术,1998(3):36-38.
Hua Huanglin, Yu Guiru. Application of β-ray thickness gauge in aluminum rolling[J]. Measurement Technology, 1998(3): 36-38 (in Chinese).
- [2] 郑少荣. 放射性同位素氙-85在造纸中的运用[J]. 福建造纸,2002,4:12-15.
Zheng Shaorong. Application of krypton-85 in paper making[J]. Fujian Paper, 2002, 4: 12-15 (in Chinese).
- [3] 赵魁东,杨存忠. 某些工业用放射源的制备[J]. 同位素,1990,3(1):64-65.
Zhao Kuidong, Yang Cunzhong. Preparation of some radioactive sources used in industry[J]. Journal of Isotopes, 1990, 3(1): 64-65 (in Chinese).
- [4] 王云辉,孙青山,李松鞠. β射线在锂离子电池生产中的应用[J]. 电池,2018,48(5):347-349.
Wang Yunhui, Sun Qingshan, Li Songju. Application of β-ray online measurement technique in Li-ion battery production[J]. Battery Bimontilly, 2018, 48(5): 347-349 (in Chinese).
- [5] 张孝平. β射线电池极片面密度测量仪:中国, CN304231706S[P]. 2017-08-04.
- [6] 田召,王荣辉,高枫. β射线面密度在线检测技术在锂电行业的应用[J]. 电源世界,2017(6):40-42.
Tian Zhao, Wang Ronghui, Gao Feng. The application of β-ray online areal-density measurement technology in lithium batteries industry [J]. The world of Power Supply, 2017(6): 40-42 (in Chinese).
- [7] 蔡善钰,周正和. ⁸⁵Kr气体放射源的密封技术

- [J]. 同位素,1999,12(2):85-89.
- Cai shanyu, Zhou Zhenghe. Sealed techniques of ^{85}Kr gas sources[J]. Journal of Isotopes, 1999, 12(2): 85-89(in Chinese).
- [8] 孙树正. 放射源的制备及应用[M]. 第1版. 北京:原子能出版社,1992:111-114.
- [9] 张华明. 放射源的制备技术及其应用[J]. 同位素,2009,22(1):54-59.
- Zhang Huaming. Preparation technology and applications of radioactive sources[J]. Journal of Isotopes, 2009, 22(1): 54-59(in Chinese).
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. GB 4075-2009 密封放射源一般要求和分级[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [11] 杨朝文. 电离辐射防护与安全基础[M]. 第1版. 北京:原子能出版社,2009:20-23.