

放射性同位素 在机械制造中的应用

П. Е. 吉雅琴柯編著

熊 大 達 譯

П. Е. Дьяченко
Радиоактивные изотопы
в машиностроении
АН СССР 1956

內 容 簡 介

本书深入浅出、簡單扼要地敘述了在机械制造方面应用放射性同位素的主要方法、优点和限度。分別介紹了借射綫吸收、射綫示踪、射綫照射等所能解决的各种技术課題,包括材料和零件的探伤,測定厚度或液面高度,鑑定零件或刀具的磨損,研究金屬的扩散或轉移,照射強化零件和改变其表层化学成分等等,并敘述了选择放射性同位素的准則和活化試件的方法,指出了进一步扩大利用放射性同位素的远景。

本书可供机械制造工作者和关心放射性同位素的技术应用的广大讀者参考。

放射性同位素在机械制造中的应用

П. Е. 吉雅琴柯編著
熊 大 蓮 譯

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)
北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1959 年 11 月 第 一 版	书号: 1922 字数: 32,000
1959 年 11 月 第一次印刷	开本: 850×1168 1/32
(京) 0001—5,000	印张: 1 5/16

目 次

緒言	1
一、应用放射性同位素法的优点和限度	1
二、在技术方面应用放射性同位素的途径	3
三、放射性同位素的选择	4
四、活化机器零件的方法	4
五、放射性射线向工件中的穿透	11
六、管壁厚度的确定	12
七、金属的探伤	14
八、检查和控制工艺过程用的仪器	15
九、放射性微粒的转移	20
十、放射性同位素在金相学中的应用	21
十一、机器零件磨损的研究	24
十二、借放射性微粒的转移来解决的其他问题	32
十三、照射时金属性质的变化	35

緒 言

苏联共产党第二十次代表大会在发展苏联国民經济的第六个五年計劃(1956—1960)的指示中,要求大力扩展原子能的和平利用,尽量开展在工业中应用放射性射綫的工作,特别是用来检查各种材料的质量和控制在各种生产过程中。指示中推荐在科学研究工作中广泛地利用示踪原子。

放射性同位素乃是能够不断地放射出能量的物质。温度变化和压力变化对于射綫的特性都没有影响。放射性同位素的这些特点,使得在物理学、化学、生物学和技术方面,有可能利用它們来拟定新的实验和检查的有效方法。

现在,技术上先进的所有国家,都已经广泛地开展了放射性同位素的和平利用的工作。在日内瓦和平利用原子能会议上,苏联方面提出了許多报告,介绍了苏联应用示踪原子的工作結果。

这本小册子里敘述在机械制造方面应用放射性同位素的各种方法。

一、应用放射性同位素法的优点和限度

放射性同位素在金属加工工业、冶金工业、化学工业和石油工业方面,得到了愈来愈广泛的应用。在金属加工工业方面,放射性同位素应用于:材料試驗、探伤、研究金属的扩散过程、研究机器零件的摩擦磨损、潤滑材料和燃料的試驗、确定液面高度或顆粒体高度(在用普通测量方法所不能达到的部位)、金相学試驗、工艺过程自动化、綫性数量¹⁾的迅速精确测量等等。

1) 例如厚度的测量——譯者。

在許多場合里，借放射性同位素之助来进行研究和检查，比采用其他方法（超声法、X光法等）較為簡單和便宜。在某些場合里，放射性同位素法能够查明那些借其他研究方法所不能确定的現象。

然而也不可把放射性同位素法估計得过高。应用此法的合理性，应当根据每一个具体情况，单独地来作出估計。和任何其他研究方法一样，放射性同位素法也只是应用于一定的范围之内才是合理的。在某些場合里，放射性同位素法的应用是受到限制的。

放射性同位素法的优点是：灵敏度高（比光谱分析法的灵敏度高1000倍，例如，可以发现金属中夹杂的 10^{-20} 克的微量的錳）；測量迅速；可以对被研究的过程不断地进行測量；可以使所需的某些原子变为示踪原子；温度和压力对于放射性同位素的性能沒有影响；在技术研究方面使用最多的一些放射性同位素的价格低廉。

然而除上述各項优点之外，也必須指出应用放射性同位素法的可能性的限度。

必須把从活化机件放出的射綫，毫无損失地引导到放射性微粒計数器系統，这样才有可能利用此法的高灵敏度。虽然此法的灵敏度高，但是往往得不出足够的測量精度。

有时会出现这样的情况，即得不到半衰期¹⁾、射綫能量或化学成分适宜的同位素，来进行所拟定的研究工作。也可能出现射綫分布不均匀以及金属中夹杂物分布不均匀的情况，使得技术核算很困难。

从保安技术和劳动保护的观点来看，此法的应用受到更大的限制。

因此，在技术方面应用放射性同位素时，必須考虑到此法的优点和限度，根据不同的具体情况来确定各別同位素的合理应用范围。

1) 半衰期是放射性原子核的数目蜕变到只剩下起始数目的一半所需的时间——譯者。

二、在技术方面应用放射性同位素的途径

在技术方面应用放射性同位素,有下列三个主要趋向:

- 1) 确定放射性射线穿透工件时被吸收的程度;
- 2) 确定从一个工件转移到另一个工件上去的放射性金属的数量;
- 3) 用射线来照射各种物质,引起其性质变化。

这三个趋向包含了在技术方面应用放射性同位素所有已知的方式。

借确定射线在材料厚度中被吸收程度的方法,可以解决许多技术问题。 γ 射线探伤术的基础就是吸收法。 γ 射线探伤过程就是借 γ 射线透过金属的程度,来确定金属中存在的缺陷。应用这样的方法,还解决了确定工件厚度的问题,这时射线既可以从相反的两侧也可以只从一侧穿过工件。各种不同构造的液面高度计(确定封闭容器内的液面高度)、密度计、压力计、确定工件表面上镀盖金属层厚度用的仪器、确定工件的线性尺寸用的仪器等,也是属于这一范畴。

借确定放射性金属转移的数量,可以解决一系列的问题:研究机器零件和切削刀具的磨损、给出到达极限磨损量的自动信号、金属的扩散和自扩散、研究金属强化的热扩散法、金属的塑性试验、确定金属中的夹杂物、研究发动机中的气流、揭发金属中的裂纹、检查焊缝等等。

借射线照射法所能解决的问题是:金属的强化以及机械性质和化学性质的改变、加速别种金属向工件表面层金属中的扩散、利用原子衰变反应在工件表面上得出一层不同性质的金属等等。

这样看来,在技术方面应用放射性同位素,有两种方式:或者是把放射性同位素当做射线源;或者是把放射性同位素当做参与被研究过程的跟踪元素,示踪原子,借以描写被研究过程的情景。

射线源可以是固定的或是移动的。固定射线源测量射线强度的变化,而移动射线源则不断地跟随着被活化的研究物体。

測量工件的厚度、液面的高度以及液体的密度，可以作为应用固定射綫源的例子。研究管道中的液流、确定容器中液体的滲漏，可以作为应用移动射綫源的例子。研究金属的扩散、确定机器零件的磨損、研究矿石的浮选，可以作为应用放射性同位素当做跟踪元素的例子。

三、放射性同位素的选择

放射性同位素将近有一千种之多，因而可以选择最适宜的同位素来为所欲从事的技术研究或检查操作服务。在选择同位素的时候，应当注意到：

1) 同位素的化学性质，这决定着把放射性同位素引入被研究物体中去的可能性和方法；

2) 同位素的半衰期，这决定着应用某种同位素来进行实验时所能維持的时间¹⁾。从保安技术的观点看来，这个时间愈短愈好，但是这个时间应当足够用来进行所拟定的研究工作或检查操作；

3) 射綫的种类和能量，这对于选择同位素来说，具有重要的意义。在計数器与射綫源之間被厚板隔开的情況下，应当采用穿透力較强的 γ 射綫。在必需借屏板之助来消除射綫的情況下，以采用 β 射綫更为合理。

表1中列举在技术中最常用的一些放射性同位素和它們的主要特性。

四、活化机器零件的方法

为了借放射性同位素来进行研究工作，必需先使被研究零件材料受到活化，即引入一定的同位素于其中，作为嗣后研究工作中的指示剂。可以采用各种不同的方法来引入放射性同位素，依所要研究的问题；所需射綫的活度、被研究机件的材料、形状、尺寸以及使用条件而定。现在已有下述几种活化机器零件的方法：

1) 參看第1节中的脚注——譯者。

表 1 在技术中最常用的放射性同位素的性質

元 素	半 衰 期	射 线 能 量 (百万电子伏)		应 用 范 围
		β	γ	
铍 ^{Be⁷}	52.93 天	0.386	0.480	研究青铜的各别組織成分的磨损
硼 ^{B¹⁰}	0.65 秒	13.7	—	研究催化过程, 确定碳在钢中的扩散和浓度, 测量紙張的厚度
碳 ^{C¹⁴}	5720 年	0.155	—	化学方面的研究工作
鈉 ^{Na²²}	2.6 年	0.542	1.277	同上
鎂 ^{Mg²⁷}	9.39 分	0.79	0.84	研究磨粉对于机器零件磨损度的影响, 研究借磨料进行精加工的过程
硅 ^{Si³¹}	2.62 小时	1.471	—	研究液体和气体的混合, 研究机器零件的冲压过程, 确定液层的厚度, 确定沿金属晶粒边界存在的有害杂质, 确定印刷油墨薄层的厚度, 确定磷在鋼和渣中达到平衡的过程的速度, 确定鋼号, 研究鉄的脱磷
磷 ^{P³²}	14.3 天	1.708	—	研究軸承合金的磨损度, 射线照相的研究, 粘液纖維生产过程的研究, 确定金属晶粒边界的有害杂质, 确定液层的厚度
硫 ^{S³⁵}	87.1 天	0.1601	—	确定从其他气体分离量的最佳条件
氫 ^{A³⁷}	35 天	—	0.815	确定玻璃的扩散系数, 确定熔鋼时的夹杂物, 研究熔渣中的轉移現象
鈣 ^{Ca⁴⁵}	163 天	0.254	—	研究硬質合金切削刀具的耐磨性
鈦 ^{Ti⁵¹}	72 天	1.9	0.32	同上
钒 ^{V⁴⁸}	16 天	0.716	0.990	研究两摩擦表面間的金属轉移, 研究电解过程中的金属轉移, 研究扩散鍍絡
鉻 ^{Cr⁵¹}	27.75 天	—	0.237	冶金方面的研究工作
錳 ^{Mn⁵⁴}	310 天	—	0.835	研究鋼在退火时的扩散, 研究重結晶等
鉄 ^{Fe⁵⁵}	2.94 年	—	—	研究两摩擦表面間的金属轉移, 研究鋼鉄的腐蝕
鉄 ^{Fe⁶⁰}	47.1 天	0.271	0.195	

(續表 1)

元 素	半 衰 期	射 綫 能 量 (百万电子伏)		应 用 范 围
		β	γ	
鈷	4.95 年	0.306	1.1728	探伤术, 确定工件的厚度, 确定金属的密度, 确定土壤的密度, 金属厚层的射线照相, 研究机器零件和切削刀具的磨损, 确定高炉炉壁的溫度
銅	12.88 小时	0.571	1.34	研究銅的自扩散, 研究銅在高温时的氧化机理, 确定銅在合金中的减断特性
鋅	250 天	0.225	1.118	研究机器零件的磨损(借嵌入試片来活化)
砷	1.115 天	0.48	0.555	研究玻璃形成的机理, 确定空气中的微量的砷, 确定含砷黃銅的腐蚀速度
溴	1.495 天	0.181	0.248	确定通过土壤渗漏的液体, 研究化学反应, 确定从溶液吸附的氯化物的数量
鉀	19.9 年	0.54	—	确定普通紙、玻璃紙和銅箔的厚度
鈷	65 天	0.36	0.23	金相学方面的研究工作
鈷	38.7 天	0.148	0.016	研究高温合金或鋼的偏析
鉀	2.8 天	0.445	0.0020	作为指示剂
鉀	210 天	1.04	0.46	研究热扩散过程
鉀	17 天	—	0.04	研究金属中元素的痕迹
銀	270 天	0.088	0.116	研究减摩合金的磨损, 确定鑄造管子报废的原因
鐳	43 天	0.32	0.337	检查产品和物理过程
鐳	48.5 天	—	0.192	研究轴承合金的磨损, 作为研究自扩散速度的指示剂
錫	125 天	1.42	0.394	研究减摩合金的磨损, 确定液层的厚度
錫	2.8 天	1.36	0.568	研究机器零件的磨损, 借渗透法确定缺陷, 研究玻璃形成的机理, 作为研究管道中液流的指示剂, 研究鋇从一种状态(Ⅲ价)轉变成另一种状态(V价)的速度
鋇	60 天	0.48	0.121	
鋇	2.75 年	0.128	0.035	

(續表 1)

元 素	半 衰 期	射 綫 能 量 (百万电子伏)		应 用 范 围
		β	γ	
碘	8.14 天	0.25	0.08	測量橡皮薄膜的厚度(約 1 微米), 确定管子里液体的波漏 研究自然通风或人工通风时的空气交换量 研究橡皮或其他塑料的磨损損, 应用于射綫照相方面
氙	8 天	—	0.04	
铯	9.6 天	—	—	
	2.3 年	0.085	0.2025	
	33 年	0.523	0.6614	研究管道中的液体流量, 确定添加剂对于潤滑油受氧化所形成的沉淀的影响 用做研究物理过程的指示剂, 用于需要微弱射綫时的射綫照相工作 測量化学过程的进行速度, 确定磷中鈷的浓度 作为研究金属痕跡的指示剂 薄截面的射綫照相, 确定磷中鈷的浓度 測量化学过程的速度, 研究化学反应的机理 检查产品和过程 研究切削刀具的磨損 化学过程的分析, 确定金属中的微量杂质
銀	11.7 天	—	0.0787	
	13.4 天	0.48	0.014	
	3 年	—	0.9	
鐳	33.11 天	0.1029	0.1457	作为研究金属痕跡的指示剂 薄截面的射綫照相, 确定磷中鈷的浓度 測量化学过程的速度, 研究化学反应的机理 检查产品和过程 研究切削刀具的磨損 化学过程的分析, 确定金属中的微量杂质
錒	1.5 天	0.710	0.0349	
	11.9 天	0.384	0.0912	
	15.6 年	0.75	0.1220	
釷	16 年	0.34	0.1232	測量化学过程的速度, 研究化学反应的机理 检查产品和过程 研究切削刀具的磨損 化学过程的分析, 确定金属中的微量杂质
釷	12.41 年	0.01795	无	
釷	46 天	0.408	0.1329	
	73.2 天	0.430	—	
釷	23.85 小时	0.32	0.0072	測量化学过程的速度, 研究化学反应的机理 检查产品和过程 研究切削刀具的磨損 化学过程的分析, 确定金属中的微量杂质
	94.7 天	0.135	0.1631	
	15 天	0.101	0.0417	

(續表 1)

元 素	半 衰 期	射 綫 能 量 (百万电子伏)		应 用 范 围
		β	γ	
铀	1.3 天	1.034	0.0731	射綫照相的研究
鈾	74.37 天	0.240	0.1359	
鈾	19 小时	0.43	0.38	
金	2.697 天	0.290	0.41177	照相底片工业方面的研究工作, 确定金在高温下蒸发所得薄膜的厚度
汞	3.4 天	0.242	0.0496	銀的提純, 确定空气中的汞量
汞	2.71 天	—	0.0774	
鉍	47.9 天	0.208	0.2795	确定鍍膜合金組織成分(鉛青銅中的鉛)的磨損, 研究纖維的松弛, 确定纖維中染料的重置, 确定金屬箔板的厚度
鉍	2.71 年	0.765	0.0760	研究金屬中針的“冷”扩散, 确定薄板的厚度(約几微米)
鉍	9 天	5.21(α)	0.8	研究銀的薄层
鉍	4.989 天	1.17	—	确定紙漿中的微量的氯化物, 研究銅在海水中的腐蝕
鉍	0.44×10^4 年	0.716	—	
鉍	14.25 小时	0.64	0.63	确定鐳(Ge)中杂质的影响
鉍	7.4×10^4 年	0.069	0.007	研究磁性合金的磁学性质, 研究鉄的鈍性
鉍	85 年	0.063	—	

- 1) 用放射性金属进行电镀；
- 2) 在熔化及浇铸时引入放射性金属；
- 3) 借嵌入放射性金属试片的方法来活化机件；
- 4) 利用重粒子的照射来进行活化；
- 5) 用放射性金属进行扩散饱和；
- 6) 在进行电火花加工¹⁾时引入放射性金属。

将放射性金属电镀到零件表面上去的方法可以应用于，譬如，研究机器零件的磨损。这时被研究的可以是由一种元素（铜、锌、银、锡等）制成的各个零件，或是各种电镀耐磨薄层（铅层、铅锡层、铅钼层等）。放射性同位素的电镀也可应用于借扩散法进行活化的场合，有时还应用于借嵌入放射性金属试片的方法来进行活化的场合。

电镀法的主要优点是可以在零件表面薄层中得到较高浓度的放射性金属，因而使得所花费的放射性物质最少而效率最高，不必把大量的同位素引入大尺寸的零件中，免除了放射性金属的损失，便利了操作同位素的保安规则的遵守。电镀法的缺点是，可以用来研究组成复杂的各种合金的所有金属并非都能进行电镀，此外还很难得到质量高和足够厚的镀层。

采用工业上常用的各种电解液，即各种有关盐类的水溶液，来进行电镀活化。引入电解液中的同位素的数量，根据所需镀层的厚度、电解液的体积、以及所用电解液在电解作用的条件下的电流效率来计算确定。现在已经拟定了许多种应用电镀的方法——镀钼、镀银、镀铬、镀锌、镀含有放射性锡的铅锡合金等。

若被研究零件的尺寸比较小（尤其是有色合金零件），则在熔化及浇铸时引入同位素是合理的。在熔化时引入同位素的优点是能够使放射性金属沿被研究零件的很大厚度内均匀分布。此法的缺点是必需引入比较多量的同位素（约为电镀法所引入的 100 倍之多），必需进行特别的防护措施，因为同位素有成为气态而析出

1) 这里所指的是利用电火花表面强化法来镀盖放射性金属——译者。

的危險，熔化及澆鑄時合金可能四向飛濺，在機械加工時切屑會飛出和散開。此法對於尺寸比較大的零件是不適用的，因為製造這樣的零件需要進行大量的機械加工和熱處理操作，使得保安技術措施複雜化。

在研究摩擦表面比較大的零件的磨損時，借嵌入放射性試片的方法來活化零件往往是合理的。這時是根據小嵌入試片的磨損，來判定大表面的磨損。此法也應用於研究有限表面上（齒輪的齒、活塞環等）所發生的局部磨損。然而當工作表面各別部位的接觸應力較高時，想要判定整個表面的磨損是不可能的。此外，應該注意到，嵌入試片材料和零件材料之間可能發生電化學相互作用，嵌入試片也可能使零件受到削弱。為了能夠正確地判定零件的磨損，嵌入試片應當用與零件相同的材料或性質與之接近的材料製成。嵌入試片應當具有較大的比活度。通常是將直徑不大（約1毫米）的金屬絲狀的嵌入試片，壓入被研究的零件中去，或是借電鍍法鍍入零件上預先切出的槽溝中去。

利用元粒子（ α 粒子、質子、氦核、中子）來照射的方法，對於尺寸不大的零件是適宜的。在製造這些零件時，需要經過大量的冶金操作和機械加工。在零件全部製造完成之後再接受照射。在照射時，零件材料組份中的某幾種元素可能一下子都變成放射性的。此法的缺點是活化需要較長的時間，沿零件厚度各深淺部位的活度不均勻，而且零件材料的機械性質還可能發生變化。

將放射性金屬向工件表層擴散飽和以進行活化的方法是很少被採用的。因為在這種情況下要想使得同位素在被研究零件中均勻地分布就必需很長的時間，而且在許多場合里還需要相當高的溫度。在電鍍同位素之後，兩表面緊密接觸之下，可以進行擴散活化，或是按照熱擴散處理法（滲硼、滲鋁、滲硅、滲鋁、熱擴散滲鋁）來進行活化。此法的缺點是放射性元素在工件表面層中分布不均勻。

放射性金屬的電腐蝕塗鍍法¹⁾以及氣焊或電氣的金屬噴鍍法，

1) 這里所指的是用電火花強化零件表面的加工方法——譯者。

属于試用不足的几种活化方法之列。在电火花加工时采用放射性的电极来使零件表面活化。这些方法的缺点是所鍍复的放射性层不均匀,很难用来对各种过程进行定量的研究。

五、放射性射綫向工件中的穿透

当 β 射綫或 γ 射綫穿过某一物体时,这些射綫的削弱程度是取决于物体的組成成分,即取决于物体中各元素的百分含量和它們的原子序数。射綫的削弱程度近似地与物質的比重成正比。

测量放射性射綫被工件材料吸收的程度,这一原理,乃是解决許多实际問題和建立許多测量仪器的基础。这一原理也是金属探伤术(不破坏工件而检查工件质量的几种方法中的一种)的基础。

解决这些問題的方法是测量射綫穿过工件材料时的能量变化或由工件材料反射回来的能量变化。

当穿透鋼制工件的厚度小于 0.025 毫米时,应当采用 β 射綫;厚度为 0.025 至 1.25 毫米时,采用 β 射綫或X射綫;厚度为 1.25 至 50 毫米时,采用X射綫或 γ 射綫;厚度更大时,只能采用 γ 射綫。工件厚度愈大,所用射綫能量也应当愈大。可以应用镭盐、鈷、銥、鋇、铯、鐳等的射綫来穿透被研究的工件。

某些放射性同位素的射綫的波长小而穿透能力大,所以可以和倫琴射綫(X射綫)一样应用于許多方面,甚至可以代替倫琴射綫。

在利用 γ 射綫来穿透的时候,通常应用电离室或盖革-弥勒計数器(計数管)作为探测器。如果应用照相底片作为射綫穿透的探测器,那就叫做射綫照相法。射綫照相法广泛地应用于工件探伤和确定工件厚度的工作中。底片变黑的程度与透过工件的射綫强度成正比。为了发现工件材料中的微小缺陷或工件厚度的微小变化,必需保証能够查明底片黑度的微小变化,得出质量合意的相片来。影响到相片质量的因素是:射綫的硬度,弥散射綫的数量,从底片至工件及放射源的距离,摄影及显影的技术。

曝光量是射綫照相的主要参数,它等于照射时间与活度的乘

积,单位是毫克当量小时。

反射过程或反散射过程,乃是射线与物质之间的各种相互作用形式之一的结果。散射量子的能量影响到射线向表面的入射角。以测量反射射线的数量为基础的反射法,可以应用于确定一种金属在他种金属上的镀层的厚度(在基底金属和镀层金属的原子序数不同的条件下),也可以应用于确定板材的厚度(例如不超过12毫米的钢板的厚度)。反射过程简图如图1。图中A为射线源;B为探测器;C为一屏板,用来隔开探测器,使之不致受到射线源的直接照射。反射射线的数量随着板材厚度的增大而增大。嗣后,当板材厚度继续增大时,这条关系曲线就具有渐近线的特征。

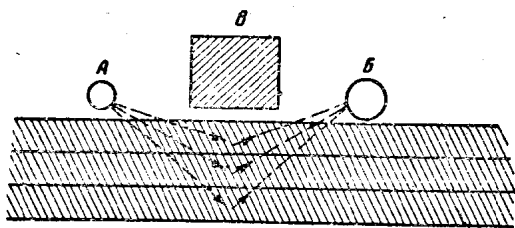


图1 反射过程简图

六、管壁厚度的确定

管壁或封闭容器壁的厚度,可以借射线穿透法或射线反射法来确定。如果管壁内表面的一侧受到了耗损,则可在不同的位置用射线来同时穿透管壁的两侧,从而确定管壁厚度的差别。射线源安置在管的一侧,而计数器则安置在管的另一侧。刚性联接的射线源和计数器相对于管的轴线旋转,在不同的角度下沿着管的轴线,射线穿透管壁的两侧。根据测量所得最大和最小数据的差别,确定管壁的厚度和厚度不均度。

通常应用放射性同位素钴、锌、铁、镅等的射线来穿透钢管。装同位素的细颈瓶安置在不大的铅室里。放射性射线从铅室出来,经过钢制的准直器,成为一个窄束,射到被测量的管的表面上。

計數器也帶有鉛制的防護裝置。

根據下列公式計算放射源所必需的活度 A :

$$A = \frac{n4\pi R \sqrt{l^2 + R^2}}{3.7 \times 10^7 \times 60 \varepsilon d l e^{-\mu x} a},$$

式中 A ——活度(毫居里),

n ——給定的每分脈沖數(扣除本底之外),

R ——從射綫源至計數器的距離(厘米),

l ——計數器陰極的長度(厘米),

d ——計數器的直徑(厘米),

ε ——計數器的效率,

μ ——綫吸收係數(厘米 $^{-1}$),

x ——被測量壁厚的大概數值(厘米),

a ——一次衰變時的 γ 量子數。

例如,對於兩側壁厚之和大概為 4 厘米的鋼管,我們若給定式中 $n = 3000$ 脈沖/分;而且已知 $R = 80$ 厘米, $\varepsilon = 6 \times 10^{-3}$, $d = 2$ 厘米, $l = 10$ 厘米, $\mu = 0.37$ 厘米 $^{-1}$, $x = 4$ 厘米, $a = 2$ 。將這些數值代入式中,得出 $A = 2.8$ 毫居里。

各種不同材料的綫吸收係數是借實驗來確定的。工件的厚度 x 由下列公式來確定: $J = J_0 e^{-\mu x}$,

由此得到:

$$x = \frac{\ln J_0 - \ln J}{\mu},$$

式中 J ——有吸收體時的計算強度,

J_0 ——無吸收體時的計算強度。

若被研究的管中充滿了吸收係數為 μ_1 的物質,則當管的外徑為 D 時,管壁兩側厚度之和 x 可按下列公式來確定:

$$J = J_0 e^{-\mu x - \mu_1 (D-x)},$$

由此得到:

$$x = \frac{\ln J_0 - \ln J - \mu_1 D}{\mu - \mu_1}.$$

測量管壁厚度的精確度為 $0.2\sim 1.2\%$ 。

如果管壁厚度的測量不巧地需要在接通電流的地場進行，則可把射線穿透和射線照相結合起來應用。為此，在管的一側安置射線源，而在管的他側安置印相紙（感光紙）或倫琴底片。牌號為“倫琴 xx”的照相底片放在黑紙制成的封袋里，底片的兩側各自墊敷一張厚度為 0.2 毫米的鉛箔。封袋緊貼在管上，用橡膠卡針拉緊。一俟曝光完畢，底片應當立即顯影。底片的感光乳膠層的特性的確定，是按照表達曝光黑度（底片變黑密度）關係的曲線來進行。曝光量就是射線強度和照射時間的乘積。底片變黑密度是借显微光度表來確定。

借射線照相法所得測量結果的散漏誤差等於 5%。射線照相法對於試驗時的溫度提出了附加的要求，因為底片只經受得住 40° 以下的溫度。此外，射線照相法的試驗時間花費很長。

反射法所得結果的精確度比穿透法低。反射法可以應用於管壁厚度不大於 20 毫米時的測量，厚度更大時此法的靈敏度便急劇下降。

七、金屬的探傷

倫琴穿透射線的能（從 10 千伏到 $10\sim 20$ 百萬電子伏以上）超過放射性同位素的射線範圍，並且具有更廣泛的可能性。但是放射性同位素應用於探傷方面時，比之倫琴射線具有許多優點。譬如，應用放射性同位素時的裝置，比之倫琴射線的裝置，要簡單、輕便、低廉一些，操作起來也比較容易一些。放射性射線可以在任何時間和任何情況下利用（在車間里，在飛行中的飛機上，在農業方面直接應用於田間，在運行中的機車上等等），這在採用倫琴射線時是辦不到的事。同位素的這些寶貴的性質以及應用同位素的經濟性，已經獲得了一致的公認。

在工業上應用着兩種 γ 探傷法，即照相法和電離法。照相法的靈敏度較高，並能得出被研究工作件中的缺陷（裂紋、孔穴）的位置和特征的顯明圖景。電離法的靈敏度較低而且只能得出較不顯明