

56.67
04088

放射性气体在研究地质 过程中的应用

[苏]A. H. 苏尔坦霍贾耶夫
B. Г. 蒂明斯基 著
A. И. 斯皮里顿诺夫



地震出版社

放射性气体在研究地质 过程中的应用

[苏]A. H. 苏尔坦霍贾耶夫
B. Г. 蒂明斯基 著
A. И. 斯皮里顿诺夫

蔡祖煌 石慧馨 译

地震出版社

1983

内 容 提 要

本书论述了放射性气体的物理和化学性质、制约过程和在自然条件下的分布特点；介绍了测定放射性气体的方法以及实验室研究成果；叙述了这一问题的研究现状，引用了解决各种地质问题对氧的变化进行多年的系统观测资料；反映了用放射成因的气体解决与构造和现代地球动力学过程有关问题的新资料。

本书可供水文地质、石油地质、铀矿地质、地球化学、地震学、矿山动力现象以及固体物理研究人员参考。

本书前三章由蔡祖煌翻译，第四章由石慧馨翻译。原文书中有不少排印错误，译者已改正。

А.Н.СУЛТАНХОДЖАЕВ,
В.Г.ТЫМИНСКИЙ
А.И.СПИРИДОНОВ

РАДИОАКТИВНЫЕ ЭМАНАЦИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФАН» УЗБЕКСКОЙ ССР
ТАШКЕНТ—1979

放射性气体在研究地质过程中的应用

(苏)А.Н.苏尔坦霍贾耶夫

В.Г.蒂明斯基 著

А.И.斯皮里顿诺夫

蔡祖煌 石慧馨 译

地质出版社出版

(北京复兴路63号)

北京新村印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

850×1168 1/32 4印张 103千字

1983年2月第一版 1983年2月第一次印刷

印数：2400

统一书号：13180·180 定价：0.63元

目 录

绪 言	氦的研究简史	(1)
第一章	氦同位素的物理和化学性质	(4)
第二章	镭同位素射气低浓度测量技术和方法	(10)
	一、用液体闪烁剂测定低含量的氦	(17)
	二、测定放射性同位素浓度的萃取-闪烁法	(21)
	三、天然水中低浓度镭的测定	(28)
第三章	放射性气体的实验室研究	(33)
	一、超声作用下放射性气体从岩石样品中析出的研究	(33)
	二、超声在溶液中提取钍射气和铀射气方面的应用	(38)
	三、在压力作用下氦的同位素从矿物和岩石样品中的析出	(40)
	四、用氦同位素研究固体的物理化学过程	(43)
第四章	用放射性测量方法阐明矿物和岩石中铀 及其衰变产物间平衡的移动(方法由 И. Г. 别尔齐娜研究并提出)	(53)
	一、阐明铀及其衰变产物间平衡的移动	(54)
	二、铀与镭间平衡移动的种类	(56)
	三、用放射性气体研究水文地质过程	(61)
	四、氦在油气普查中的应用	(72)
	五、放射成因的气体在地震预报中的应用	(75)
	六、氦在火山过程研究中的应用	(95)
	七、放射性气体在现代地球动力学运动研究中的应用	(105)
结 语		(119)
参考文献		(120)

绪言 氡的研究简史

氡的发现不止一次。每次新的发现并不推翻、而是补充先前的发现。

不同研究者独立地几乎同时(1900—1904年)找到了同一个元素(第86号元素)的不同同位素。所有这些都是居里夫妇在放射性方面工作的继续。这些研究者认为,他们中的每一个人都发现了新的放射性气体和新的元素。他们确实也不能有另外的想法,因为新发现的气体的来源和放射性主要特征——半衰期——远不相同。雷泽福德和 R. 奥恩斯发现的射气(名称来源于拉丁文 emanatio——“流出”)是钍射气。A. 杰别恩确定的镭射气由镭获得。A. 唐发现了氡,而 U. 拉姆扎伊和 F. 索季发现了尼通(俄文为 нитон, 中译名亦为氡,来源于拉丁文 niteo, 是“发光”的意思), 尼通是镭衰变的子体。

氡和尼通是相同的。A. 唐的发现比 U. 拉姆扎伊的早些。然而后者的名字理应列入第86号元素最初发现者的名单。正是 U. 拉姆扎伊首先把他发现的尼通作为化学元素来研究, 阐明了其特征性的光谱线, 测定了原子量, 解释了化学惰性, 并找到了这一元素在周期表中的位置。

雷泽福德和 R. 奥恩斯在加拿大进行的研究是最早的。A. 唐发现的氡是第86号元素寿命最长的同位素。它在镭-226发生 α 衰变时形成。这个同位素的质量数为222, 半衰期为3.82天。在自然界中它是铀-238衰变系列中的一个中间环节。

雷泽福德和 R. 奥恩斯发现的钍射气也是天然放射系的成员, 但由钍衰变产生。这个同位素的质量数为220, 半衰期为54.5秒。

A. 杰别恩发现的镭射气是镭铀(铀-235)放射系的成员。它是氡的第三个天然同位素, 寿命最短。其半衰期小于4秒(确切些

说，3.92秒），质量数为219。

U.拉姆扎伊为第86号元素提出的名称尼通看来是最合适的，因为这名称证明它属于零族气体(和氩一样)。但当移位定律尚未提出时，U.拉姆扎伊提出的支持这名称的理由似乎说服力不够。例如，F.索季在1912年倾向于保留雷泽福德提出的“射气”这一术语，因为不只是镭、还有另外两个放射性元素钷和镭也产生类似的气体或“射气”，虽然他同时认为，对气体的本性有了精确的认识后，“射气”这个不清楚的术语可以导致误解。

从“移位法则”的观点看来，指出射气位于周期表的零族内，比指出射气来源于镭、钷和镭具有更为一般且重要得多的意义。因此，大多数研究者建议用U.拉姆扎伊的术语来代替雷泽福德最初的术语，因为前者指出该放射性元素在门捷列夫周期表中的地位，这个地位比放射性系列中的地位更能说明问题。

第86号元素在很长时间内还是被称为“射气”。然而，后来国际放射性委员会采用了“氡”这一术语。

一方面，这可用力求统一来解释，因为“氡”这个名称同其他元素的名称比“射气”更相适应；另一方面，正是氡是所有射气中寿命最长并用处最大的一个。

在上述三种天然射气中，氡由于半衰期较长，具有最大的科学意义，在工业和医学中应用最广。钷射气具有较短的半衰期，只可成功地用以阐明某些专门的科学和实际课题，特别是在长的半衰期可使所研究的现象模糊的情况下（如地表附近空气的交换）。镭射气的半衰期最短，为研究气体扩散过程可能是最方便的同位素〔24〕。

氡被发现以后，医学家立即对它发生兴趣。在有关氡的文献中写道：应用的主要方面是医学。不久前用它来治疗恶性肿瘤。目前主要用于氡浴，后者对治疗某些关节病和末梢神经系统的疾患是有效的〔28〕。

最近，利用氡的范围大大扩大。这首先与其地球化学特点有

关。有意思的是，В.И. 维尔纳茨基 (Вернадский) 写道：“无疑，氦毫无区别地完全进入地球上所有的水中，正象它进入大气一样。”

М.居里在关于氦的著作中已经指出：“某些泉水析出比较丰富的气体。由于氦的溶解度相当小，氦在气体中的浓度可以超过它在水中的浓度。并已确定，泉水可以析出钷射气。”

氦在与放射性矿石接触的泉水中最为富集。例如，在亚希莫夫 (Яхимов) 铀矿山 (楚瓦什苏维埃社会主义自治共和国) 中的泉水在一升水中含氦165毫微居里，在一升气体中含氦450毫微居里。在М.居里的著作中已指出了氦性状的许多特征。

泉水的放射性与温度并没有简单的关系。放射性强度每日、每季都不同，取决于气象条件。

В.И. 维尔纳茨基1910年在科学院的会议上发表《关于镭的当前研究课题》以后，在俄国开始了研究自然对象放射性的最初工作。Л.Н. 鲍戈亚夫连斯基 (Богоявленский) 在普查有用矿床时的放射性研究方面有一项最早的发明。

稍晚一些，在1934—1936年，为比较不同岩石的透气性进行了放射性气体扩散的研究〔3〕。原来介质的孔隙度对射气运动的速度有重大的影响。后来研究了物理化学性质和湿度对射气作用的影响〔3,25,30〕。

射气作用，即含有母元素的固体析出氦的过程，取决于温度、湿度和固体结构，并在很大范围内变化。因此，在工业和科学中用射气方法研究固体物质的可能性很大。氦可以帮助研究各种材料的状态和缺陷。例如，氦指示器可以用来控制防毒面具的密封性。在钢和玻璃这些原材料的生产中，有时可用氦来追踪工艺过程的进程。

目前对实际上所有的地表对象都进行射气研究，因此可把射气方法视为一套地质工作中的标准方法。

第一章 氦同位素的物理和化学性质

氦同位素按下述定律由镭同位素积累：

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t) \right]^* \quad (1)$$

式中 N_2 —— 第二种物质（子体）的原子数目；

N_{10} —— 第一种物质（母体）的初始原子数目；

λ_1, λ_2 —— 相应为母体和子体物质的衰变常数；

t —— 第二种物质的积累时间。

考虑到对氦的所有同位素 $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ，式(1)可采取更简单的形式：

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2} \left[1 - \exp(-\lambda_2 t) \right]. \quad (2)$$

由镭（克）形成的氦量（居里）由下式计算：

$$Q_{R_n} = Q_{R_a} [1 - \exp(-\lambda_{R_n} t)]. \quad (3)$$

1 居里氦重 6.5 微克，在标准状态下占体积 0.660 立方毫米。氦在液相和气相间的分配服从亨利定律：

$$\alpha = \frac{Q_{R_n}^{\text{液}} V_{\text{空}}}{Q_{R_n}^{\text{气}} V_{\text{液}}}, \quad (4)$$

式中 α —— 氦在液体中的溶解度系数；

$Q_{R_n}^{\text{液}}, Q_{R_n}^{\text{气}}$ —— 氦在液体和空气中的含量；

$V_{\text{液}}, V_{\text{空}}$ —— 液体和空气的体积。

这样，知道了体积 $V_{\text{液}}$ 和 $V_{\text{空}}$ ，只要测量氦在液体中的数量及其在周围空气中的浓度，即可测定 α 。

* $\exp(-\lambda_1 t) = e^{-\lambda_1 t}$ —— 译者注。

氮溶于水约比氙快一倍，比氙快三倍〔24〕。

下面援引水中溶解度系数与温度关系的测定结果〔24〕：

t, °C	α	t, °C	α	t, °C	α
0	0.510	30	0.195	70	0.117
5	0.420	40	0.159	80	0.112
10	0.351	50	0.138	90	0.110
20	0.254	60	0.125	100	0.108

由这些数据可知，在70°以上氮在水中的溶解度随温度变化不大，而在70至100°的范围内，氮射气的10%左右含在水中。大体上可以说，如果水和空气体积相等，则在 $t = 20^\circ\text{C}$ 时，四分之一的氮含于水中，而四分之三在空气中。

天然水中氮的含量一般未达到饱和极限，因此，氮在天然水中的浓度变化很大（由0.01至13500马海单位）*。氮水在水与岩石相互作用时形成，因此，这现象在很大程度上取决于一系列地质和水文地质因素。饮用水和河水约含氮1埃曼，含镭 5×10^{-13} 克/升。大多数泉水的放射性强度通常不超出饮用水和河水的放射性强度。迄今已知的最富氮的泉水之一，位于亚希莫夫铀矿山（楚瓦什苏维埃社会主义自治共和国）内，每升水中含镭 2×10^{-10} 克，水中含氮1650埃曼，气中含氮4500埃曼。海水中约含氮0.3埃曼，1升水中含镭 $(4-14) \times 10^{-15}$ 克。在所有条件下，天然水中的氮与镭相比有些过剩。

氮在水中的溶解度系数取决于温度和水的矿化度，随温度和盐浓度的升高而减小〔24〕。溶液沸腾时，氮实际上完全由液相中析出。

氮在有机溶剂（非水）中的溶解度大于在水中的溶解度。援

* 1马海=3.64埃曼——译者注。

引氮在有机液体中的溶解度系数 (α)。

液 体	α	液 体	α
橄榄油和其他类似油	28	煤油	10
硫化碳	23	石蜡油	9
环己烷	18	乙酸乙酯	7.4
己烷	17	丙酮	6.3
松节油、乙基醚、氯仿、 醋酸戊醇酯	15	乙醇	6.2
甲苯、二甲苯、苯	13	苯胺	3.8
凡士林油	10	无水甘油	1.7
		汽油	12.8

氮同位素常吸附在固体表面。氮同位素的吸附取决于吸附剂的内表面面积。氮的良好吸附剂有橡胶、赛璐珞、蜡、石蜡、海泡石、粘土〔24〕。但是最好的吸附剂是活性碳，它甚至在常温下可吸附大量同它接触的氮，而在液态空气温度下碳吸附氮的量是很大的，这实际上是瞬时吸附。伊夫指出了木炭从空气流中吸附氮的性质〔28〕，建议利用木炭测定空气中氮的含量。

B.A. 尼基京 (Никитин)、Э.М. 约费 (Иоффе) 等〔24, 28, 31〕研究了在动态条件下在空气流中碳对氮的吸附和解吸，得出下列结论。

1. 碳从空气流中吸附少量氮时，氮在碳中的最大浓度不能超过 αC 值，其中 α ——亨利定律分配系数，等于 1 克碳中氮含量与 1 立方厘米空气 (气相) 中氮含量之比，而 C ——通过的空气中氮的浓度。

2. 活性碳吸附氮的能力在很大范围内变化。氮分配的平衡系数记录到的最大值等于 9650 立方厘米/克，这时的条件是 18°C 、干燥空气，碳的标号是 CKT-2M。

3. 常温下氮的吸附可用连格缪尔吸附等温线的直线段描述，与分压低的其他气体吸附动态毫无区别。

4. 被吸附的氩十分活跃，在静态条件下由最初几层向随后的几层重新分配。

5. 在静态和动态条件下活性炭的吸附能力实际上相同：吸附的静态条件下分配系数只比动态条件下大 10—15%。

6. 如果碳已吸附其他物质（苯、二氧化硫和水），而后者的浓度远未达到饱和，则这些物质的存在对碳吸附氩的数量影响很大。苯减少氩的吸附最多，二氧化硫减少程度较小，水减少氩吸附的程度则小得多。

7. 在室温下甚至优等的碳对动态条件下氩与其他气体的混合物来说也是弱的吸附剂。如果气相受到污染，则吸附速度大大降低。

如用相对湿度 100% 的空气，氩分配的平衡系数约减为干燥空气中测定值的一半。

8. 抽过碳的空气冷却时，碳的吸附容量大大增加。 $t = -60^{\circ}\text{C}$ 下，对标号为 CKT-2M 的碳来说，分配的平衡系数达 10^6 立方厘米/克。

9. 碳质量交换带的长度随空气流速度的增大而增大。

10. 如果使纯空气流与污染氩的空气流相向流动，氩自碳的解吸大大加强。空气流的速度越大，解吸也越强。

各种无机凝胶（ SiO_2 ， Al_2O_3 等）和有机胶体也极强烈地吸附氩，牢固地把氩保持住〔21〕。氩的吸附量是气体与吸附剂接触持续时间的函数。研究氩吸附量与速度的关系表明，对于给定的条件在一定的速度下吸附量不变〔28〕。

氩与空气或其他某种惰性气体的混合物，在常压和室温下被玻璃吸附不多〔24〕。在常温下不吸附放射性气体的固体表面，在低温下极易使气体冷凝。根据索季的观测〔64〕，在比通过大量物质的实验测得的饱和蒸气压低得多的压力下，微量氩冷凝在冷的玻璃壁上。

根据 Θ . 勃罗德的意见〔24〕，在微量气体（例如射气）被吸附

时，表面效应有显著影响。这是由于任何质料的表面如吸附很少一点物质，其表面效应都是很大的。

在温度 -65°C 和大气压下，氦气转化为液态。氦转化为固态的温度约为 -113°C ，熔点为 -71°C ，沸点为 -61.8°C 。在 0°C 和760毫米汞柱下，气态氦的密度等于 9.727×10^{-3} 克/立方厘米，液态氦的密度为5.7克/立方厘米。

液态氦起初是无色透明的，然后由于衰变产物逐渐变浑。它能使容器的玻璃壁发绿色荧光。固态氦不透明，能发出明亮的浅蓝色光。

铷射气的沸点为 -65°C 。在大气压和温度 -143°C 下，固态铷射气相当快地升华。

氦的可见、紫外和红外光谱都研究得很好。只能观测到新生氦的纯光谱，因为氦及其子体放射性蜕变时氦相当快地形成，其光谱叠加在氦的光谱之上。大致经过一个月后，氦的光谱消失。氦具有特征性的电火花光谱，在可见、紫外和红外区有227条光谱线。

氦同位素的原子不带电荷，它们的分子是单原子的。氦同位素位于Д.И. 门捷列夫化学元素周期表的零族内。

1936年以前，人们认为氦是化学性质不活泼的惰性气体，因为未能观察到氦进入化合物的任何标志。1936年B.A. 尼基京〔21〕获得了氦的水化物 $\text{Rn} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。

必须指出，在低于 0°C 时，各种气体能与水形成结晶水化物，成分为 $\text{X} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的络合物。对于不同的气体，这些化合物的稳定性不同，而且它们的结合能和相应的离解压力取决于水与气体分子间王德瓦力的强度，即取决于分子的极化程度。

包括氦在内的惰性气体不能形成具有离子键和原子键的化合物，不能形成盐、氧化物和通常的分子。但是，还有一类化合物，即络合物，其中分子间的连结取决于王德瓦力。它们有固定的成分，在反应物质之间可观察到化学变化关系，而且这些化合物的

结合能不大。Б.А. 尼基京获得的分子的氦结晶水化物是比较不稳定的化合物。Б.А. 尼基京指出，在可能形成络合物方面，氦在惰性气体中占有最先地位。

第二章 镭同位素射气低浓度 测量技术和方法

水和气中氡和镭（按氡）的含量可通过射气方法用带有 α 辐射闪烁检测器的以下几种仪器进行测量： α -1型或ПАИ-1型实验室装置、ЭМ-6П型野外射气仪。实验室仪器的灵敏度不超出360—380脉冲/分 $\cdot 10^{-10}$ 居里氡，而最好的灵敏度阈为 $n \times 10^{-13}$ 居里的量级。标准仪器的灵敏度常常不够，因此下面研讨提高灵敏度的某些可能性。

由于氡应用范围的扩大，测氡的快速方法具有实际意义。

除了经典的射气方法以外，现正研究测定水中氡和镭含量的其他更快速的方法，例如把闪烁粉末 $ZnS(Ag)$ 加入水中，使镭和氡衰变子体沉积在粉末上的测定方法。标准仪器的灵敏度可通过闪烁射气室结构的某些改变大大提高。

闪烁室的形状对闪烁室内 α 辐射的利用系数* 值有重大影响，因为对同一闪烁室的不同部位聚光和 α 质点的计数条件不同，取决于几何条件（光电倍增管室）、光电倍增管和闪烁室的尺寸。实验研究表明，计数速度和 α 辐射的利用系数对闪烁室敏感表面的不同地带是不同的。已经阐明，计数速度在闪烁室底部最大，因为那里聚光条件最好（表1）。

圆锥形闪烁室内 α 辐射的利用系数比在圆柱形闪烁室内的大〔8，9〕，但是由于制备圆锥形闪烁室比较困难，大批地增大利用系数较少采用。

* 利用系数——仪器记录下来的脉冲数与同一时间段内源发射的 α 质点数之比。通常用百分数表示。

表1 专门的圆锥形闪烁室不同地带活动性测定结果

工作表面	敏感表面尺寸		测得的活动性 (占总活动性%)		活动性 (相对单位)	
	厘米 ²	占总表面 %	无静电场	带静电场	无静电场	带静电场
底	88.2	21	35	56	35	56
壁, 地带1	106.1	25	27	17	22	14
壁, 地带2	112.0	26	22	14	17	11
壁, 地带3	118.2	28	16	13	12	10
总 计	424.5	100	100	100		

注: 把第4、5两列的数据折算为同一底面积, 即得第6、7两列的数据。

在对氡进行射气测量时, 用闪烁室上加电位的方法来增大 α 辐射的利用系数是简单有效的〔8〕。仪器灵敏度的提高与沉积在闪烁室荷负电表面氡衰变产物(镭A—镭C')的辐射利用系数的增大有关。由于计数的最大速度来自闪烁室底部, 因此把这底部同固定电压电源的负极相连(图1)。正电位加在闪烁室的侧壁上。

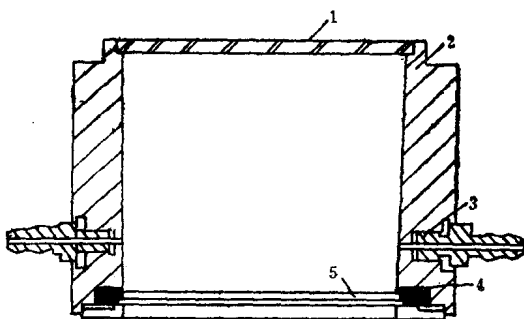


图1 闪烁室剖面示意图

1——检查玻璃; 2——闪烁室外壳; 3——引入射气的开关; 4——绝缘垫圈; 5——隔离末端

射气的短寿命衰变产物在形成时主要带正电荷, 沉积在荷负

电的闪烁室底上。底面积占闪烁室敏感表面的20%，而收集了氦衰变产物的60%左右。氦本身的 α 辐射利用系数与所加电压无关，因为射气的原子不带电荷，此外，与气溶胶也无关。

带静电场的闪烁室内 α 辐射的利用系数与电压有关(图2)。

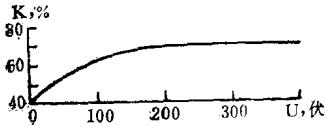


图2 闪烁室 α 辐射利用系数与电压的关系

由把纯氦引入带静电场(曲线1)和无静电场(曲线2)的射气室(仪器PAJI-1)后的电流增长曲线可见，由于氦衰变产物 α 辐射计数的增长，带静电场的闪烁室内计数速度急剧增大(图3)。

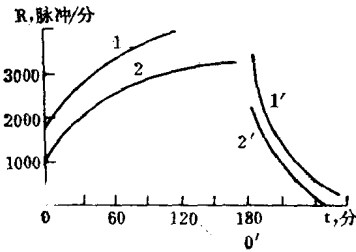


图3 标定带静电场和无静电场的闪烁室时， α 计数速度的变化(1,2)以及由闪烁室抽出射气后具有 α 活动性的衰变产物下降曲线(1',2')

闪烁室的 α 辐射利用系数由无静电场时的45%至有静电场时的65—70%(图2)。

由把纯氦引入带静电场(曲线1)和无静电场(曲线2)的射气室(仪器PAJI-1)后的电流增长曲线可见，由于氦衰变产物

为了测定衰变产物在平衡氦的总 α 辐射中的作用，在把氦引入闪烁室(带静电场和无静电场)后经过2.5—3小时，把剩余的氦抽出。氦衰变产物牢固地附着在闪烁室表面上，抽出氦后测到的放射性强度反映镭A、镭C'、镭F的数量(相应地曲线1'和1)。

测到的平衡氦的总 α 强度中衰变产物的份额，在带静电场的闪烁室内约为80—85%，而在无静电场的闪烁室内为75%。

带静电场闪烁室的灵敏度比不带静电时高50%左右。

测量钍射气时(在气流中)，用带静电场的 α 闪烁室也可大大增大利用系数，但是加在闪烁室底上的电位最优值与测量氦时的不同。

闪烁室类型	闪烁室容积, 升	静电场	辐射利用系数, %	氧衰变产物中在总强度中的份额, %	灵敏度 脉冲/分· 10^{-10} 居里氡
标准	0.6	无	47	70	350
非标准圆锥形	1.1	无	43	75	290
非标准圆锥形	1.1	加上	70	85	430

为提高闪烁室内 α 辐射的利用系数, 还可采用更灵敏的闪烁剂来涂抹射气室。

发光光谱是闪烁室的主要标志, 这个标志决定了闪烁室用于计数 α 质点闪烁的重要性。由于对大多数工业生产带铯铷负极的光放大器来说, 光谱灵敏度的最大值为4500埃左右, 闪烁剂发光光谱中的最大值也应接近此值。在硫化锌(银)基础上制备的光成分能满足这个条件。

V.克缪特和A.孔在其著作〔16〕中指出, 在硫化锌基础上不同标号的光成分(K-11, K-9, K-51, K-450和K-455), 其变换效率的差别不大于20%。光成分K-9和K-11的变换效率最高, 因此, 在计数 α 质点的放射性测量和计量仪器中用标号为K-9的闪烁剂: 硫化锌从二氯乙烷的悬浊液中沉积出来(图4)。

目前, 工业已掌握在硫化锌基础上生产大量的各种光成分-闪烁剂。这就是标号为K-11、K-430、K-450、 Φ C-2、K-455等的光成分。

某些光成分具有余辉, 要求把闪烁剂预先放在黑暗中至少10分钟(K-5, K-11, K-45), 因此它们不总是适合于放射性测量仪器。

图5表示出不同的光成分(K-9, Φ C-2, K-430)由同一组 α 辐射标准源(钋²¹⁰, 铀²³⁴, 铀²³⁸, 钷²³⁹, 钷²³²) α 计数速度

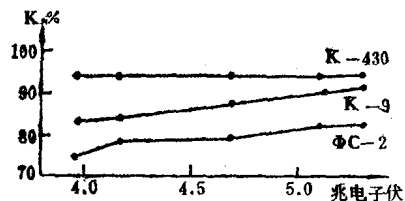


图4 各种光成分的 α 辐射利用系数与 α 质点能量的关系