



放射性同位素 在地质勘探上的应用

苏联专家报告资料汇编之五

上海科学技术出版社

“內部資料、注意保存”



放射性同位素在地質勘探上的应用

蘇聯和平利用原子能技术展覽會

上海學習委員會

*

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

上海劳动印制厂印刷 新华书店上海发行所总經售

*

開本 787×1092 1/16 印張 3 3/8 字數 69,000

1959年4月第1版 1959年4月第1版第1次印刷

印數 1—6,000

統一書号：13119·276

定价：(十二)0.42元

前 言

苏联和平利用原子能科学技术展览会，在上海展出期间，苏联专家组的全体同志，向来自全国二十六个省、市科学研究机关、高等学校、工厂、医院等的科技人员作了百余次的专题报告和座谈会。为了让这些报告更广泛地满足我国原子能科学工作者的需要起见，因此根据报告内容汇编成：1. 热核反应和反应堆；2. 放射性同位素在工业上的应用；3. 放射性同位素在农业和生物学上的应用；4. 放射性同位素在医学上的应用；5. 放射性同位素在地质勘探上的应用；6. 同位素的生产；7. 防护技术等七本专辑。这些讲稿，有的是从原稿翻译，有的是根据记录稿整理，因时间匆促，水平有限，在内容上一定有不少错误，希望各地读者阅后提出宝贵意见。

苏联和平利用原子能科学技术展览会上海学习委员会

一九五九年三月

目 錄

1. 鈾矿普查的方法	1
2. 放射性同位素和輻射測量在地質學中的應用	8
3. 野外放射性測量的物理和地球化學基礎	19
4. 探測鈾矿床的 γ -測量方法	24
5. 射氣測量	31
6. γ -測井法	36
7. 放射性取樣方法	39
8. 實驗室放射性分析方法	42
9. 鈾矿的勘探	48
10. 怎樣找尋鈾矿	51

鈾矿普查的方法

B. J. 沙什金

現代，鈾是主要的原子核燃料。鈾的自然富集是在較多种多样的条件下形成，包括岩漿作用的最後阶段，變質現象，沉积輪迴，和風化作用这些範圍。

現代知道的鈾的工业矿床根据矿体的形狀，以及矿化的性質和圍岩，通常划分成六大类。含鈾偉晶岩和偉晶岩脉屬於第一类；在噴出岩和受強烈變質的沉积岩中的石英脉，石英碳酸鹽脉，螢石重晶石脉屬於第二类；受強烈變質的沉积岩中的成層矿体屬於第三类；海相沉积岩層的含鈾矿層屬於第四类；受微弱變質的沉积岩的成層矿体屬於第五类；在大陸相正常的沉积岩層中的成層和透鏡狀的矿体屬於第六类。

知道了鈾矿床的基本类型，就可以估价个别地区的远景，以便进行鈾矿普查場地的選擇。但是，显然，天然鈾矿所有各式各样的聚集，不仅仅限于已經知道的类型。經常可能見到不屬於已知类型的鈾矿但具有工业价值。因此地質学家同其它地質工作一道所进行的鈾矿普查和不是專家而是群众性的找矿具有很大意义。由于借助專門儀器易于发现鈾矿这就有可能大规模地进行鈾矿普查。

鈾矿的放射性，給予了在自然条件下发现矿鈾的强有力的手段和确定鈾矿普查的方法。

在鈾矿普查中起主导作用的当推辐射測量法，它是基于用各种方法和借助各种各样的儀器纪录放射性辐射。現代电子学的发达可以設計出为各种放射測量法所需要的儀器。近年来，在应用半导体和小尺寸的零件的基础上产生了放射儀的技术革新，能够制成鑒定性能很好的輕便的袖珍儀器。現在当普查鈾矿时不仅采用近代的儀器，同时也使用早先出品的已較陈旧的儀器，尽管这些陈旧儀器有一些缺点，但完全还能工作。

在鈾矿普查时，主要采用放射性辐射中最流行 γ —辐射纪录。 γ —射线被帶有气体放电計數管即所謂蓋革計數管和閃爍計數管的儀器纪录下来。閃爍計數管具有很大的灵敏度和相当小的底數。但是它們比較貴重，当用来工作时，需要有一定的技术。

因此，目前为了群众找矿，合理地运用帶有气体放电計數管的簡單儀器。

除了放射測量法以外，在鈾矿普查时相当广泛地采用发光方法。此法是基于某些鈾矿物在紫外光中具有发光的性能。这就給予了簡單确定鈾矿的可能性，鈣鈾云母、板菱鈾矿、碳酸鈾矿、含鈾的玻璃蛋白石和某些其他矿物具有这样的发光性。大多數鈾矿物不发光。但是

他們可以借助所謂珠球发光分析被确定为鈾矿物，珠球发光分析是根据被活化的氟化鈉在紫外綫中发光的性能为基础，含鈾氟化鈉珠球的发光决定于重元素如鉄、鉻、銅、錳等杂质是否存在。这些元素部分或完全地使得鈾珠球的发光性熄灭。

当含有四价和六价鈾的不发光的鈾矿物，溶解在弱酸中(醋酸、正磷酸)时，六价的鈾溶解可以形成发光的化合物。將任何鈾矿物溶解在具有氧化剂性質的弱酸(2—5%)中，結果也一样。

同样用不发光鈾矿物的这种性質来发现这些鈾矿物，为此用鈾矿物的噴霧器把酸噴到矿石的表面，当酸在鈾矿的表面蒸发以后，就形成了在紫外光中发光的感光膜。

发光分析借助最簡單の日光灯或帶有石英—水銀灯泡的发光儀进行。用石英—水銀灯泡可以在地下和山地坑道中以及夜間进行工作，目的在于直接在揭开的岩石上发现鈾矿。对于定量的珠球分析采用較复杂的发光儀。

在普查时当放射測量法发现岩石中放射性增高时，并且必需确証这种放射性和鈾有关，而不是和釷有关。此时，通常采用发光分析。除了上述发现鈾矿石和鈾矿物的方法外，还应提出一种最簡單的方法——攝影法。放射性元素的輻射作用打到照象底板上时发生类似的光亮作用。因与 α -射綫起着主要的作用，为了获得放射照相(放射性矿石标本的照象底片)需要直接把被研究的矿石放到照相的底片上。如果經過3—7天曝光冲洗照相的底片，那末面对放射岩石或矿物的那一面將变为暗黑。目前，攝影法主要用来研究放射性矿物在标本磨光面上的分布狀況。在儀器缺乏的时候，它有时可以被采用对个别标本的放射性的檢查。

在天然的矿体上直接利用鈾、釷的放射性进行普查与其它矿体的普查相比較，鈾的普查大大地加速和簡易化了。

在岩石露头相当多或当表土不很厚的屬於坡积層的地区各种形式的伽瑪方法將是放射性矿物普查的主要方法。

1:25000和更大比例尺的地上伽瑪普查足以保証該地区得到最大限度的观察。这样普查是在于橫越全区作一系列剖面，剖面綫之間的距离为250—100公尺，普查工作者帶着手提輻射儀順剖面移动，找寻高伽瑪輻射强度的地点。同时并測量位于剖面綫之間但与之鄰近的全部露头的伽瑪輻射。岩石的放射强度增高或根据听觉从耳机上計算脉冲頻率，或根据儀器指針的偏轉来确定。

所有高伽瑪輻射的地点都要詳細研究以便查明伽瑪强度最高的点，为此即需进行所謂异常的詳查，也就是說作詳細的面积伽瑪測量，剖面綫之間的距离为5—10公尺，測点之間的距离为1—2公尺。在高伽瑪輻射地区进行工作量不大的清除浮土或基岩表面風化層工作并选择供室内研究的岩石标本。同时應該作出該区的地質描述，如果可能的話，还应找寻与高放射活动性有关的矿物。当进行地面普查时，采用СГ—42，СРЛ—1和СРЛ—2閃爍輻射儀和帶有气体放电計數管的袖珍輻射儀。

岩石的伽瑪輻射可能与鈾礦化有关，也可能与釷礦化有关。礦化的性質可通过观察和鑒定与放射性有关的矿物加以解釋；关于样品之室内分析或野外射气观察下面还要談到。

还可以用現代的装备通过飞机和汽車进行快速的伽瑪普查。进行航空測量是采用灵敏度高而惰性低的儀器，飞行高度为25—75公尺，飞行速度为80—160公里/小时。最近已开始成功地采用。

由于照射隅角减小以及伽瑪射綫被空气吸收的結果，从地面物体发出的伽瑪輻射强度随着輻射接收器的高度而减少，减少程度与距离的平方呈比例。并且被研究物体的面积愈小，輻射强度随高度增加而减小愈快。因此为了观察地面上范围不大的矿体露头，应该尽可能飞得低些。然而当飞得低时，沿着一定路綫飞行所纪录的地帶之在宽度上又减少了。因此为了使航空測量更好地用于大面积調查，飞行高度降低同时还应伴随路綫的加密。通常路綫之間的距离采取250公尺，有的加密至100公尺。路綫方向采取橫越主要地質構造的走向。

当进行航空測量时，地区的地形严重地影响測量結果；正地形引起伽瑪輻射强度增大，而負地形則使之减低。为了随时知道飞行高度，与航空輻射儀一道，并采用无线电測高器。

現在航空伽瑪測量主要是在具有36个BC—9型計數器的ACFM—25型儀器上进行，它的灵敏度在每小时一微倫琴的照射下是50—60脉冲/秒。儀器的讀數被记录在帶子上，同时无线电測高器的讀數也被记录下来。最近作了閃爍航空伽瑪儀的試驗，在这种儀器中利用碘化鈉晶体、閃爍性的液体和塑料作为伽瑪射綫的接收器。显然，塑料制成的閃爍儀是最方便的。閃爍儀的灵敏度每一微倫琴/小时达到200—300脉冲/秒。

航空伽瑪測量所得到的伽瑪射綫强度曲綫记录在进行地形和儀器惰性的校正以后，减去天然底數和校正度數，并換算成微倫琴/小时。

航空伽瑪測量的結果使我們可以按照岩石的放射性克拉克值来識別岩石露头。这样一来，可以明显地分出具有很大大伽瑪射綫强度的酸性火成岩露头和伽瑪場特出降低的碳酸岩、基性岩露头。

岩石的改变表现出伽瑪射綫强度曲綫有节奏的变化。这些資料可用来地質制圖和部分地区为了划出放射性增高了的地区，这些地区可以视为在地面上进一步寻找放射性元素的远景地区。

狭窄的即所謂局部的异常对于寻找鈾和釷矿床有着直接的意义，这种异常与矿体表面的露头相符。在发现这种异常的时候，必須作重复飞行檢查，然后轉交給地面普查队檢查。

因为在航空伽瑪測量的时候划出的异常數量比較大，所以需要對它們进行比較大范围的地面檢查工作。为了减少可作为发现鈾矿的远景异常的數目，根据异常所屬的某种地質構造和岩石的类型，以及异常的大小和形狀来评价异常。这就可以确定了檢查异常的首要性。被发现的异常很大數量不同鈾矿体相联系，而同釷矿体联系。为了区分鈾和釷的异常現時采用能够根据能量有選擇地记录輻射的閃爍航空伽瑪輻射儀，帶有这种儀器只能測量屬於釷系元素

所放射的硬伽瑪射綫，能够在空中把鈾的异常从釷的异常中分出来。

实际上地面异常的檢查与地面詳細普查完全沒有区别，主要是用伽瑪方法进行和加上射气的方法以及有时候还进行某种形式的地球化学普查。

在表土原度很小和緩傾斜地形的地区；航空伽瑪普查得出很好的效果。在多山的地区，特别是大森林地区使用航空伽瑪測量方法的效力大大地降低。它完全不适用于具有表土厚度大的地区。

航空伽瑪測量方法发现了大量的而且主要是沉积类型的矿床，这是由于这种类型的矿床具有很大的厚度，并且在地面上有延伸的露头，很容易从空中确定它們。在良好的情况下，也可以发现热液矿体，但是这种情况是很少的，有时候在航空伽瑪測量时遺漏了地表露头不太多的富含鈾矿石的矿区，这些矿区后来被地面普查所发现。

航空伽瑪測量法能很快地普查很大的面积，但是同时决不能認為这个面积上所发现的全都有呈矿現象。为了对这个面积进行最后的远景評价必須轉入比它稍迟一点进行的地面普查。在通行汽車的地形条件下，以及在表土厚度不太大的时候，快速的伽瑪測量可以在运行的汽車进行。汽車伽瑪測量的輻射計与航空伽瑪測量的輻射計相类似，它和航空輻射計的区别仅在于技术上的細節。伽瑪輻射的强度紀錄在紀錄帶子上，并且控制帶子長度的机械与汽車的速度儀相联系，帶子的長度与汽車行进的距离是成比例的。

击輻射的接收器放在汽車棚子的上部。这就保證射綫击中輻射計接收器的地帶得到扩大。

我們把汽車伽瑪測量的剖面綫間距定为100—250公尺，但是由于缺乏道路所引起汽車运轉的困难，剖面綫往往是弯曲的，来适应地区的踰越性。

汽車伽瑪測量較之航空伽瑪測量的优点是有更大的灵敏性，在发现异常以后可以立即进行檢查，而所用的工作代价又是最小的。但是使用汽車伽瑪測量的成效完全决定于地区的踰越性。对于使用汽車伽瑪測量有利的条件是很少遇到的，因此这种方法沒有获得推广。

伽瑪射綫的穿透性弱到这种地步以致在无活动性的浮土厚50—60公分时基岩的伽瑪射綫完全被吸收掉了。因此基岩的伽瑪輻射实际上只能在岩石的露出表面上进行記錄。虽然如此，但伽瑪測量也能发现表土深达1—2公尺以下的放射性矿体，有时甚至更深。这主要由于在矿体露头的四周有放射性元素的扩散量。

量共分三种：帶有放射性矿物的岩石碎片的称为机械量；靠鈾矿物被溶解轉移到离开矿体露头的一定距离接着又在浮土中沉澱下。鈾的化合物及其蜕变产物主要是鐳，这样形成的量称为鹽量；放射性气体——氡的扩散地帶称为气体量，氡是鐳的直接蜕变产物。氡的扩散距离是决定于矿物和矿石分出氡的能力(所謂矿石的射气性)，还决定于表土的气体渗透性。射气量經常伴隨着氡的蜕变产物量。它們是鈾系的主要伽瑪輻射体。在自然界中可能有各种不同的复杂的配合和这些量的互相疊加。結果在矿体基岩表面的表土中形成了量，这种量可

以靠伽瑪測量來確定。暈的形成和他們的規模決定於岩石和礦石風化作用的性質。很容易被伽瑪測量發現的這種強度的暈，一般不超出基岩表面一公尺。

如果基岩被1公尺至3—5公尺的浮土所覆蓋，則氫射氣測量即成為普查鈾礦的主要方法，此法可以研究礦體的射氣暈，從而發現位於浮土下面的礦體露頭。

當進行深度為0.5—1.0公尺的射氣測量時，藉特制的採樣器將含有氫的土壤氣樣品抽入電離室中。樣品中氫之數量根據電離流，借一高靈敏度的電流計測出。此種電流計可以測出氫的最小濃度為0.1愛曼（一愛曼 = 1.10^{-10} 居里/公升，一個居里代表與一克鎳處於放射平衡時氫的數量）。

為了提高射氣測量的效率，設計了一種專門的野外射氣儀cr—II，它包括cr—IV型的電流計，與電流計相接是電離室，以及與電離室聯在一起用於取出土壤氣樣品的抽氣機。全部裝置安在三腳架上，當野外工作時單身一人即可攜帶。

快速射氣測量法在於挑選土壤氣樣品，使之經過特制的乾燥器再進入電離室，然後測出此樣品之電離流。測量是緊接樣品選好之後進行。這樣測量比起經過三小時當蛻變產物與氫達到平衡時再測量靈敏度要低些，但卻大大地加快了測量過程。因為當進行射氣測量時重要的在於探明氫的高濃度區，而濃度的精確數值並非主要，所以迅速測量是完全正確的。

在樣品選好之後立即測量土壤氣樣品的放射性，有時可能錯誤地將鈾射氣認為是氫。為了避免這種錯誤應該在發現土壤氣活動性增高的觀測點上，在樣品選好之後經過3—5分鐘後進行補充的測量。經過3—5分鐘後，半衰期為1分鐘的鈾射氣實際上已分解了，余下的活動性將僅和氫以及氫在此時間所積累的蛻變產物有關。

因此，射氣測量可以確定岩石之放射性是與鈾與鈾有關。這是在天然岩體中確定礦化性質的最簡單方式。

沿着剖面進行射氣測量，點與點間的距离是五公尺，剖面之間的距离通常是100—250公尺。對於一個由三人組成的小隊，射氣測量的生產率是每個工作日約做完200個點，儘管測量的效率比較低，但與伽瑪測量相比，它在比例尺大的地區和浮土厚的地區所得結果還是很好的。

為了普查鈾礦，在勘探和開采其他礦石的鉆孔和坑道中進行放射性元素的檢查具有較大的意義，檢查坑道是沿坑道的軸綫或坑道的四壁進行伽瑪測量。伽瑪測井是檢查鉆孔的，它是研究鉆孔所穿越的岩石之放射性的方法，伽瑪測井輻射儀包括：帶有計數器（氣體放電計數器或閃爍計數器）的探管和放大的串聯電路，後者通過長達100—120米的電纜與儀器的主要接頭相連，為了檢查較深的石油鉆井需採用適合較大深度的其他測井裝置。

測井方法在於使探管連續地沿鉆井的軸綫移動，測量結果藉自動紀錄器記錄下來。

根據伽瑪測井的數據不僅可發現放射性岩石，還可以確定岩石中所含放射性元素之含量，帶有鑒別能量裝置的閃爍伽瑪測井可以區分鈾礦化和鈾礦化，這在進行檢查工作時顯得

特別重要。

當普查鈾礦時，上述方法是主要方法，然而與之同時也還採用其他方法。這裡首先應該提到的是鈾量測量，此法在於研究鈾在疎松沉積中的分布情形（鈾的鹽暈），鈾量測量的深度決定於鈾在礦體中的含量，礦體厚度，礦體上部岩石的成分和濕度，鈾的分散作用的特性以及其他一系列次要因素，鈾量測量的平均深度為3—5米，鈾樣品的分析是在樣品經化學處理之後用珠球發光分析法進行，在濃度為 $10^{-4}\%$ 至 $5 \cdot 10^{-2}\%$ 的範圍中發光分析的精確度平均為±25—30%。普查性質的鈾量測量只有當其他方法由於某種原因不能發現鈾礦體的擴散量時始採用（沼澤地區，表土中放射平衡顯著地向缺鈾的方向移動，針的放射性底數相當大並且變化無常等）。通常鈾量測量是在其他方法獲得結果進行詳查時所採用的一種補充方法。

鈾量測量與普查銅，鉛和其他許多元素所採用的金屬量測量法是類似的，它也和其他的金屬量測量一樣，樣品是從植被層以下的淺坑中或自手搖鉆孔中採取。

採樣是按網格進行，剖面之間的距離決定於研究的詳細程度，點與點之間的距離大概是10公尺。

在圈定鈾的擴散量以後就進行礦體的揭露工作，由於地勢的起伏，在選擇山地坑道基點的時候，要估計擴散量遷移的可能性。

近年來，作了一些試驗把鈾量測量應用到水網中鈾分散流的普查，來查明在河底沉積中鈾的高度富集，在河床沉積中鈾的地球化學底數通常不超過 $3 \cdot 10^{-4}\%$ 但是在鈾礦床分散流的區域，在河底沉積中鈾的富集可以達到5—50 $\cdot 10^{-4}\%$ 。因與鈾分散流在水網中部分地可能和鈾礦物的機械搬運有關，那末河底沉積的樣品不僅應該作鈾的發光分析，而且應該在閃爍計數器上作確定鈾放射的伽碼研究。

正確的解釋在水網中河底沉積的鈾量測量的結果，需要各方面估計多種多樣的地球化學，地貌和水文地質的因素。

在某些場合，為了估價大面積的遠見，合理地應用放射性水文地球化學方法，在地下水和鈾礦接觸帶中，可能有鈾、釷、氫進入水中。這些元素相互間的比數決定於水的性質，決定於離開放射性元素發源地的距離，還決定於水流過的岩石的性質，在放射性水文地球化學測量時，選取水源的樣品並在水樣中測定鈾、釷和氫。發現整個三種元素或只有一種鈾元素濃度增高的地區，就值得注意。氫和釷或者只有氫的濃度提高的地區，通常作為鈾礦體存在的指南，從利用的觀點來看他們的遠見不大。

在水源進行放射性元素濃度的評價應該考慮到區域地球化學的底數。超過區域底數幾倍的濃度算是異常。通常對於鈾大於 11×10^{-5} 克/升，對於釷是 11×10^{-11} 克/升，對於氫是一百個愛曼。但是這些數字只是大略的，並且可以視具體條件大大地改變。

同樣也有地植物找尋鈾礦的方法。這種方法是以植物集中鈾的能力作為根據的。在氣候

干旱的条件下带有埋藏很深的根茎的系统，植物能够从大约10公尺深的土壤水中夺取铀。只要选择树的叶子，把它们化为灰燼，并用发光方法测定在灰燼中铀的濃度，就可以发现在植物里富含铀的地帶，这些植物可以作为在土壤深处富含铀的指示，另一种方法是这种方法的变相它利用某些种类植物很容易在富含铀的土壤中生長来作为铀的指示剂。目前使用这种方法还很有限，并且估計到可能遭到專家們的强烈反对。

测定矿石和岩石样品中放射性元素特别是铀的含量乃是对放射性元素普查工作的重要部分。铀的化学分析很复杂并且耗費時間，而輻射測量法則可既便又迅速地解决相同的任务，因此目前化学分析仅仅是極有限地用作檢驗的方法，而放射性矿石的大宗分析則用輻射測量法进行。

矿塊放射性的定性测定用常用的伽瑪或貝它計數管进行之。用特制的其中裝有几个計數器有裝置，在計數器之間放着被分析的标本，这种裝置可以半定量地测定矿塊中放射性元素的含量。

分析研成粉末的样品，可以在铀，釷和鐳的样品中精确地测定其含量，如果矿石中存在的元素仅仅是铀系列或仅是釷系列时，則可按貝它或伽瑪輻射测定样品放射性，使之与标准样品比較，借以求知这些元素的含量。然而因为通常特别是普查工作中，在分析之前并不知道样品中存在的是那种放射性元素，因此貝它伽瑪法就成为主要的分析方法，此法可测定样品中铀之含量，和样品中存在釷系列元素无关，和铀系列中放射平衡的破坏也沒有关系。此法在于根据貝它与伽瑪射线測量样品之放測性，使之与等量的铀标准样品相比較。从得到結果按公式 $U = (1+a) A\beta - aA\gamma$ 計算出铀的含量，此法之精确度并不較化学分析遜色。

近年来，开始采用籍閃爍光譜儀的伽瑪輻射光譜測量法的分析放射性矿石样品，閃爍光譜儀可以在任何矿石中，不仅测定铀，还可以测定釷。

从以上有关铀矿石普查方法的很簡括的介紹（主要是輻射測量法）說明普查放射性矿床的方法之多样性。

其中某些方法相当复杂，只有技术較好的專家才可采用，而其他方法則極簡單，可以很容易地为找矿群众及愛好者所掌握，群众找矿与地質学家和地球物理学家的普查工作的正确結合乃是找寻铀矿获得成功之保證。

放射性同位素和輻射測量在 地質學中的應用

B.И. 沙什金

1. 近几年来, 核子物理学和原子工业的蓬勃发展, 对于我们解决普查和勘探各种有用矿产中所产生的许多形形色色问题, 开辟了广阔的前途。辐射测量法原先仅用于放射性及与之伴生的矿石的普查与勘探, 最近由于利用人为的放射性同位素, 这种方法已用来勘探许多与天然放射性无关的有用矿产。

进行地质制图、普查石油矿藏以及普查与勘探钾盐矿床时, 是利用天然放射性的辐射测量法。

利用人为的放射性同位素的辐射测量法, 已经应用到对煤、石油、天然气、硼、重金属元素诸如铅、钼、钨等矿床的勘探。当研究矿井所通过的岩石和有用矿物时, 特别广泛地采用一种所谓放射测井的辐射测量法。

2. 由于不同的岩石和岩层中放射性元素之克拉克值不等, 这就促使它们具有不同的 γ 活动性。用带有闪烁计数管的高灵敏度辐射仪和甚至是带有气体放电计数管的辐射仪测量 γ 辐射强度, 可以很清楚地分出具有各种克拉克值之岩石的界限。象花岗岩、酸性火成岩和粘土质岩石, 即被划分成是一些高 γ 活动性的岩石, 对于碳酸盐岩以及多数的石煤及石盐矿床则属于低 γ 领域。而对于另一些有用矿产如磷灰岩, 有时还有铝土矿和铀矿, 由于其中放射性元素含量略多, 因此可根据 γ 值的增加而分辨这些矿床。

如果磷灰岩中放射性元素的含量与 P_2O_5 呈近似的正比关系, 则根据 γ 辐射的变化, 可以估计矿石中 P_2O_5 的百分比。

利用辐射测量法, 已经发现了由含磷灰岩石风化而成的残积磷矿床。土状磷灰岩在外貌上和红棕色砂质粘土无区别, 但根据 γ 测井的数据却可很好地鉴别他们。

进行地面 γ 辐射测量只有当浮土不超过 0.5 公尺时才可采用, 当浮土较厚时, 则以采用射气测量法为宜。土壤气中氡的浓度增高, 一方面与铀系元素之浓度有关, 另一方面也和岩石的高的射气性能有关。例如中乌拉尔的变质杂岩中的石墨化岩石, 根据其 γ 辐射强度和其围岩、黑云母花岗岩片麻岩及云母片岩没有区别, 但由于石墨化岩石具有较高射气性能, 以致氡的浓度增高, 因此射气测量就将它们清楚地区分了。

天然同位素 K^{40} 的放射性被用来测定自然条件下的钾盐以及盐类样品中钾之含量。一克天然的钾 ($0.012\% K^{40}$) 每秒放出 28.3 β 粒子和 3.5 γ 量子, 在钾盐中, 实质上常常没有铀和钍系列的放射元素, 因此钾盐的放射性与其中所含之钾成正比。

γ 测井测出钾盐层具有 600~700 脉冲/分之最大值, 而同时对于石盐层则不超过 15~20 脉冲/分。根据测井图即可以进行测定钾含量定量的解释。

在带有精密的气体放电计数管 (AC, CTC-6) 的装置上, 根据 β 射线测定样品中钾的含量, 测定之准确度为 1~1.5% 的绝对值, 生产率为每 8 小时鉴定 20~30 个样品, 在地下坑道中进行 γ 测量可以确定钾盐层的位置, 这就减轻了勘探和开采工作的进行。辐射测量法对于开采中的其他阶段如钾盐的选矿和加工可能也有所帮助。

3. γ - γ 测井法的原理是基于扩散的 γ 辐射与岩石密度之关系。对于组成岩石之轻元素 ($Z < 30$), 带有能量为 0.15~9 百万电子伏特的 γ 射线, 其相互发生的主要作用就是康普敦效应。扩散的 γ 辐射之强度决定于单位体积中电子的数目, 此数目和岩石的密度呈正比。

γ - γ 测井装置系由 γ 射线源, γ 射线接收器, 以及位于二者之间的铅屏组成, 全部装置被安装在一密封的钢筒中。当整个装置顺着鑽井移动时, 扩散的 γ 辐射即被记录在接收器上。其强度决定于岩石密度、鑽井孔径、鑽井中存在之冲洗液、 γ 辐射源之能量以及屏之大小和形态等。整个装置的参数和结构 (计数管的选择, 钢壁的厚度) 应该指望它记录此种能量辐射, 此时岩石中之光电吸收可略而不计。

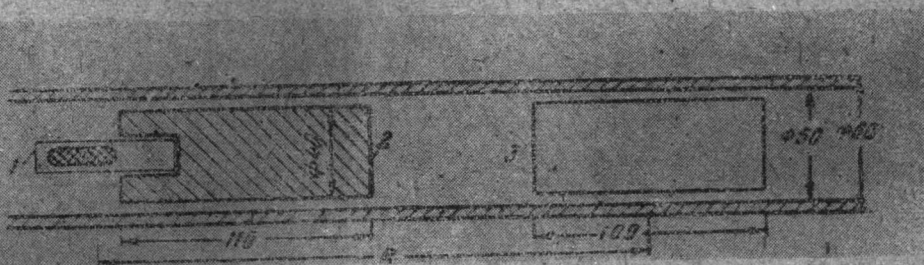


图 1. 在测井钢筒内的铅屏、 γ -射线源及 γ -射线接收器的配置图

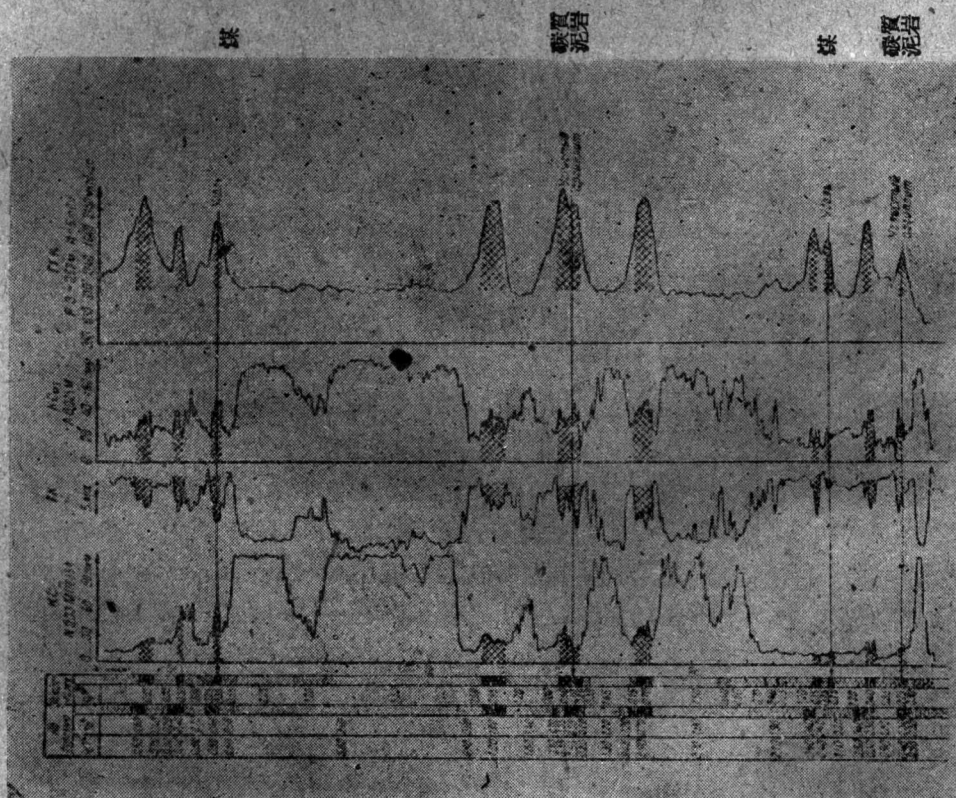
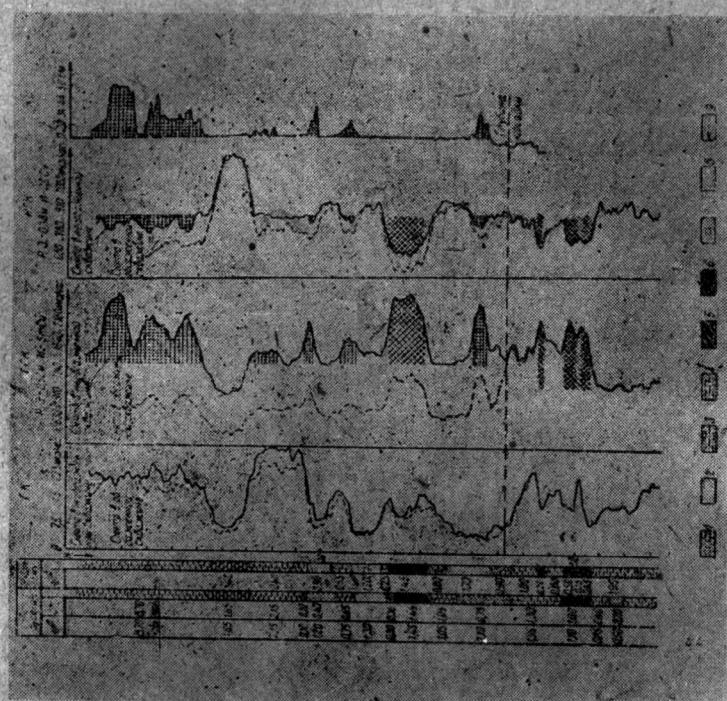
1—装 γ -射线源的瓶 2—铅屏 3— γ -射线接收器 4—筒壁 R—接收器中心和射线源中心之距离。

因此对于密变 γ - γ 测井采用较强烈的 γ 辐射源 Co^{60} , 钢筒壁厚 3~4 mm, 并采用 MC 或 CTC 气体放电计数管。对于 γ - γ 测井, 采用强度为 3~5 微居里的辐射源, 探管长度 (从辐射源至计数管中部之距离) 通常采用 0.5~0.8 m。当钢筒上升速度约为 150 米/时, γ - γ 测井可连续进行。岩石密度愈大, 被记录之 γ 辐射强度愈小, 密度小的岩石 (如煤) 在 γ - γ 测井曲线上显示出最高值, 而密度大的岩石 (如硫化物矿石) 则呈现最低值 (图 2、3)。

所记录的扩散 γ -辐射强度和岩石密度的关系表现在: 一方面是岩石密度的 γ -辐射康普敦扩散的或然率, 而另一方面是扩散的 γ -辐射的吸收。这种吸收是由于 γ -辐射的一次生扩散, 这时扩散量子的能量就小于该装置记录所必需的能量了。

应将测量点放在探管的中間。这样异常对于岩层就是对称分布了。当岩层厚度大于探管尺寸时, 岩层界线可以在 γ - γ 测井的曲线上, 用高峰高度一半的两点来确定。这样可保证在更换接收器和辐射源的位置时, 曲线的形状不变。

鑽井直径对 γ - γ 测井的结果有着很大影响。若探管长度为 0.7 公尺, 被记录在緻密岩石里的强度中, 扩散到冲洗液里的 γ -辐射部分多于 75%。探管长度为 0.5 公尺时, 鑽井直径减少二厘米, 那末扩散的辐射强度即减少 20~25%; 而在直径增大 6~10 厘米时, 所记录的射



綫就增高到 75~100% 或更大些。

由此可見，鑽井壁上很多空洞在 γ - γ 測井曲綫上以最大值表示出來。這是 γ - γ 測井方法的最大缺點。為了解釋所得結果就要同時進行測定鑽井直徑改變的井徑測量。

要減少沖洗液的影响，就要運用特別裝置探管。在儀器的底部是回轉裝置，它的主要部分是波狀的鉛制扇形片，它是和球形軸承上的軸緊密連接一起的。鉛制扇形片上的槽是用來放置計數器和 γ -量子源的。在傾斜的鑽井中，儀器順井壁滑下，在重力作用下，鉛制扇形片位置經常處在鑽井彎曲面。因此輻射源和計數管成為靠近井壁而和沖洗液以鉛層隔開。

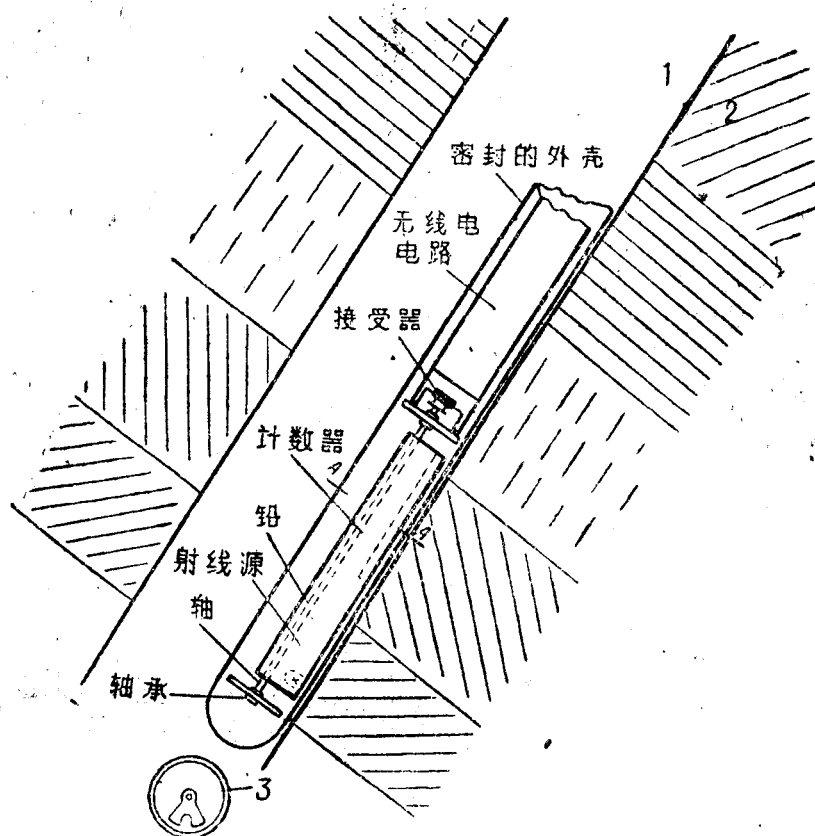


圖 4. 用 TTK 儀器測量示意圖

1. 鑽孔 2. 岩層 3. A-A 斷面

γ - γ 測井的穿透深度不能高於幾厘米。因此在鑽井壁上所形成的泥層有着很大影响。 γ - γ 測井的深度隨探管長度的增加而增加。這樣，泥層的影响就減小了。取 γ - γ 測井儀的標準可在滿裝一定密度物質（如水）的大容器中进行。在這樣情況下所得到的計算速度就作為單位。

这种计算表明了当测量 γ -辐射强度精确度为 3% 时, 对于 2.7 克/厘米³ 左右的密度数值, 仪器上所记录岩石密度的最小变动在 0.05 克/厘米³ 左右。

γ - γ -测井的方法在煤矿中有着广泛的应用。煤可根据显著的最大值被划分出来。

γ - γ -测井可以用来测定煤的灰分。其密度是有规律地与灰分的增大同时增高。灰分增大 10% 与其相适应的密度也增高 0.1 克/厘米³。这样的密度的改变当辐射源为 5 微居里和探管长度为 0.52 公尺时, 会引起辐射强度改变 200~250 微伦琴/小时。

γ - γ -测井的方法可用来在勘探石油时区分出具有高密度的岩石 (图 5)。密度较小孔隙较多的岩石表示出最大值。在岩石的矿物密度 (S_u) 和充满孔穴的液体密度 (S_K) 已知时, 可以按公式来计算岩石的孔隙度 (m):

$$S = S_u(1 - m) + S_K m.$$

4. γ - γ -测井的进一步发展, 创造了选择性 γ - γ -测井。理论计算证明, γ - γ -测井时, 当测井探管的结构和参数一定时, 所记录的射线强度与岩石中存在少量高原子序数的元素混入物, 有很大的关系。

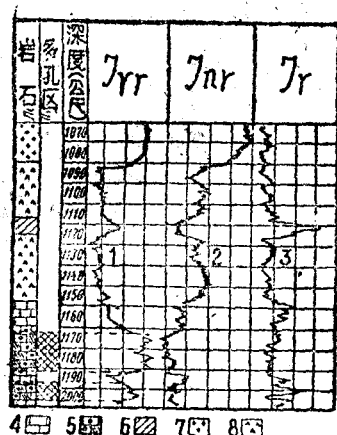


图 5: 用 γ - γ 测井来区分井中的孔隙岩石。在 $\Gamma\Gamma K$ 曲线上最大值是多孔灰岩和岩盐, 而最小值是硬石膏和无孔灰岩。

- 1. γ - γ -测井曲线; 2. 中子- γ 测井的曲线;
- 3. γ -测井曲线; 4. 緻密灰岩;
- 5. 多孔灰岩; 6. 頁岩;
- 7. 岩鹽; 8. 硬石膏; 多孔区中用斜线表示

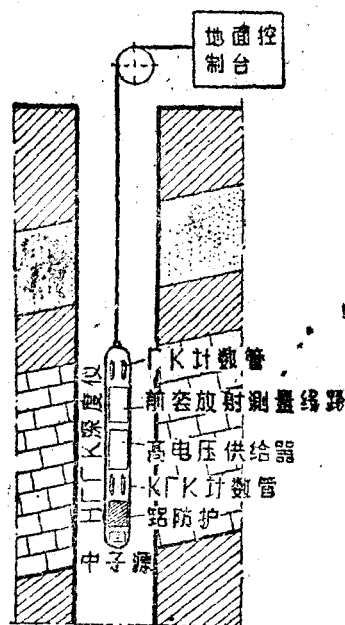


图 6. 放射鑽孔测井图和同时进行 ΓK 和 HNK 的深度仪示意图

假如仪器装置的参数和结构是指望记录软射线的话 (对于这种软射线, 岩石中光电吸收作用有着重大的作用), 那么这种被记录的辐射强度将不仅要取决于密度, 同时也取决于岩石的物质组成, 在某些条件下辐射强度就可以作为岩石成分的指南。

从扩散的 γ -辐射谱分布的曲线看出, 如图 6 所示, 在硬的部分中 [$s > 0.5 mc^2$ (0.25 百万电子伏特)], 射线扩散强度实际上并不依赖于介质的成分。这种光谱部分的射线应该用于密度测井中。在量子能量很小的地区, 辐射强度显示出突然增长到最大值, 进一步减少能量

时，突然的下降到零。介质原子序数增大的同时，最大的强度也就下降，而最大值的位置就转移到大能量方面去。这样的光谱特性就引起了两种竞争着的作用：在多次康普敦扩散和光电吸收作用中量子能量的减低。第一种作用的强度实际上并不依赖于介质的成分，强度与量子能量同时减小，造成低能量量子的积累；第二种作用的强度与介质原子序数的增大及量子能量的减低同时显著的增高。对于两种原子序数相差很大的介质在原则上可以挑选具有这样一种能量的初生射线源。这种射线将强烈地扩散在原子序数小的介质里。实际上在大原子序数的介质中完全吸收了。在这些条件下第二种介质的少量物质的杂质将对第一种介质引起射线扩散的显著减弱。

在勘探重金属矿的矿井中，区分和研究富集重金属的地区是以这个原则作为基础的。重金属浓度很小时，就有把握得到测量的异常效应。实际上这种浓度不影响岩石的密度，这是很多有色金属和稀有金属（铅、钨、水银等）的特征。

选择性的 γ - γ 测井和密度测井的区别在于测井装备的结构。这种装备能用以记录出量子能量大于0.05百万电子伏特的软 γ 射线。为此，计数管的钢筒和探管中装辐射源的容器，应由易于使软 γ 射线透过的原子序数小的物质制成，由铝或者更好一点用有机塑膠制成。最好是采用带有重金属制成的阴极的计数管（BC型），它对于软 γ 射线具有高的灵敏度，或者用闪烁计数管，它同样对于软的 γ 辐射具有高灵敏度。采用带有闪烁计数管的微分图解用来分出一定的软 γ 辐射的带，看来是有希望的。为了减少洗井液的影响，测井探管应该紧靠井壁，并且它必须具有前已提过的定向灵敏度。

放出软 γ 射线的同位素应当被利用作为最初的 γ 辐射的放射源，例如利用具有 γ 量子能量的铯75获得成效，采用具有能量为0.065和0.024百万电子伏特能量的锡119和具有0.159及0.089百万电子伏特的碲123也很方便。

当运用碲123放射源的时候，存在于岩石中的中等原子序数的金属，如铅、铋、汞、钨等，它们使辐射强度减弱，大致每0.1%的含量降低强度20%。另一些金属如锡及铊，在同样条件下得到的反常效应，是每0.1%含量减弱13%。

当进行选择性 γ - γ 测井时，沿着井内传播的射线，岩石密度和成分的改变（这种改变对被测成分并无联系），对测量会造成干扰。为了减少矿井中这种射线影响，除了用与密度测井共同的方法以外，还可在测井探管的表面，在放射源与计数管之间的空间盖上一层铅，那么扩散到探管壁和矿井之间的软 γ 射线即被铅所吸收。根据同时进行的密度 γ - γ 测井的资料，可以知道岩石密度的变化。岩石成分变化的效应与被测的异常效应不能截然分开，当需要解决选择性 γ - γ 测井建立的可能性这一问题时，应该估计每一具体矿体由于成分变化而引起的干扰程度。当估计干扰程度时，仅需考虑重元素含量的变化，因为经常的含量（尽管是高的）并不造成干扰。

5. 中子测井的两种变态是：中子测井（HHK）和中子 γ 测井（HTK）。

当中子测井时，沿着钻孔移动的探管是含有中子源的，当发现反应堆后，钋-铍源便是最适当的中子源。在反应器中用热中子照射铋²⁰⁹得到钋²¹⁰。铋²⁰⁹捕获中子变成钋²¹⁰，反应是：

