

基本馆藏

266343



地球化学专辑

第 6 輯

004

地质出版社

836205

目 录

内生矿床形成过程中放射性元素的性状·····	A. Γ. 别捷赫琴	(3)
铈的地球化学·····	牟田邦彦	(27)
钴的地球化学·····	R. S. 杨格	(37)
锆的地球化学·····	塞耶德、A. 爱尔·华丹尼	(55)
岩石化学的范围和趋势·····	杰克·格林, 爱利·玻尔德法特	(74)
在火成岩的硅酸盐中矿物结构对类质同象代替作用的 影响·····	Л. В. 塔烏松	(118)

地球化学专辑

第 6 辑

地质出版社

1960·北京

地球化学专辑

第 6 辑

出版者 地 质 出 版 社

北京西四羊市大街地质部内

北京市书刊出版业营业登记证出字第005号

发 行 者 新 华 书 店 科 技 发 行 所

经 售 者 各 地 新 华 书 店

印 刷 者 地 质 出 版 社 印 刷 厂

北京安定门外六铺炕40号

印数(京)1—2800册

1960年1月北京第1版

开本 787×1092¹/₂mm

1960年1月第1次印刷

字数110,000

印张5¹/₂ 插页4

定价(10)0.75元

内生矿床形成过程中放射性元素的性状

A. Г. 別捷赫琴

本文研究放射性元素，特别是铀的主要地球化学特征，及其在成矿过程中的性状。同时也分析了一些有关放射性元素在溶液中的性状问题及根据当时所处的不同的氧化-还原环境从这些溶液中形成矿物的过程。参考这些资料，本文对内生含铀矿床将作一分类①。

引 言

最近十五年来，由于在利用原子能方面一系列极端重要的问题得到了解决，几乎世界各国均对放射性元素矿床开展了广泛的研究工作，因而在铀矿地质方面，我们的任务也大大起了变化。第二次世界大战以前铀矿石只是作为镭的来源具有意义，而矿石加工时顺便取得之铀化合物主要在玻璃和陶瓷工业上用来制造颜料。但是战后由于物理学上所取得的许多伟大成就，铀在和平利用和科学研究核内能量上，开始具有绝对重要的意义。

这一期间出版了大量书籍，对世界各国所发现的含铀矿床，和各个铀矿点作了详尽的描述。最近以来的这种情况，自然促使了许多学者着手去综合在各种类型铀矿的地质条件方面所积累的资料。

如果不将一些个别地区的短篇的综合资料包括在内，属于这一类综合性文章的，例如有В. 馬克耳維 (Макелви)，Д. 厄韋尔哈尔特 (Эверхарт) 和Р. 加烈耳斯 (Гаррес) 所写的关于铀矿成因理论方面的详细文章 (1956)，这篇文章在日内瓦国际和平利用原子能会议上曾介绍过，有И. Г. 馬加克揚 (1955) 的短篇文字，可惜的是它的内容陈旧，材料不完全正确，此外还有В. С. 多馬烈夫的 (Домарева，

●外生及变质矿床的分类，将在本刊下一期中发表。

1956) 編写得很好的綜合資料, 以及Д. Я. 苏拉斯基(Суражский)关于矿床成因类型的文章(1956)和В. Г. 莫耳科夫(Мелков)和Л. Ч. 普哈烈斯基(Пухальский)的文章(1957), П. Ф. 克尔的文章(1956)等。

但是尽管战后年代所获得的实际材料很多, 在放射性元素矿床的地球化学, 矿物学和地質学方面仍有許多未能彻底明了的問題, 这也正是现在为什么对含銻矿床上的一些自然現象还經常产生矛盾的解释的原因。

現在随着普查勘探工作和科学研究工作的进一步开展我們获得了愈来愈多的新資料, 通过这些資料不仅对含有放射性元素的矿石的矿化規律能够比較肯定的进行判断, 同时对导致銻矿不富集的成矿过程和条件亦能稍正确的給予推測。

放射性元素的主要地球化学特征

大家都知道, 地壳中最主要的放射性元素为氢、鐳、釷和銻。

氢为鐳的放射性衰变物, 是一种气体, 在門捷列夫化学元素表中列于惰性气体之内。因此很清楚, 这种元素其电性为中性原子, 在自然条件下不与其它元素起任何化学反应, 在銻矿成矿地区它可以聚积在不透水和不透气的岩石下面, 一般存在于矿化水溶液中, 而不以水的成分为轉移。层間水可以含氢, 順沿山地坑道內裂隙渗透的水內也能含氢。

氢作为一种气体同样能够比較容易地穿过矿床上面的疏松的地表浮土而通向大气, 形成一种扩散暈。这样看来, 氢的射气除了在矿泉用于医疗目的之外, 在許多情况下, 还可以通过对表土气的取样和測量它們的强度的方法用来普查銻矿。

放射性衰变产生之鐳在自然条件下仅为二价阳离子形状 Ra^{2+} 。这种离子的半径与二价鋇的离子半径相近。因此这两种元素具有許多共同的化学性質是毫不奇怪的, 其中如 Ra^{2+} 在許多鉛的外生矿物(鋇鉛矿, 磷鋇鉛矿, 白鉛矿)等中即常有发现, 呈鋇的类質同象混合物状(例如在重晶石中), 为数极微。由此不难理解, 在可能存有溶解状鋇盐

(BaCl_2 , $\text{Ba}[\text{HCO}_3]_2$, $\text{Ba}[\text{SH}]_2$ 等) 的自然溶液 (氯化物水, 重碳酸盐水, 石油水) 中也可能有钼。例如, 烏赫丁斯克前寒武紀結晶片岩中的裂隙盐水即是一例, 鑽井穿过的深度很大, 水內含有 Ra, MaTh 和一些其它的放射性元素 (費爾斯曼 1940)。

但是含有阴离子 $[\text{SO}_4]^{2-}$ 的硫酸盐水溶液中既不含钼, 也不含钼。以前曾采用过的分离钼与其它放射性元素的方法也正是根据钼的这一性質 (与阴离子 $[\text{SO}_4]^{2-}$ 合併后組成不可溶解的硫酸盐)。这也正是当富含硫化物 (特别是黄鉄矿) 的含钼矿床受到氧化时, 为什么会产生在氧化带內的钼几乎全部已为渗透水搬运到地下水面, 而钼却全部保留不动这一事实之証。

当然, 钼的硫酸盐, 作为一种矿物到目前为止我們还不了解, 但是如果注意到这种元素的数量是极其微少的, 那么就不难明白, 它的微粒构造可以为氧化带中形成的許多不同的氢的化合物所吸附。

钼在自然界中仅呈四价阳离子状存在。該元素的阳离子大小与四价钍的阳离子比較相近 (图 1), 并且与它一起或者組成独立的氧化物,

或者組成于复杂的氧化物和含氧盐 (主要为硅酸盐和磷酸盐) 之內。在岩漿活动的早期产物中, 它成一种独立的共生矿物状 (方钍石、钍石、鉄钍石和其它一些在花崗伟晶岩和霞石伟晶岩中之矿物) 分布很广泛。高温晶質钼矿和鉛石成分中經常也有所見, 成等价混合物状, 一般为数不多。在花崗正长岩块体与围岩交界处的

接触交代带中經常可以遇見一些黄色、黄褐色和褐色的含钼硅酸盐, 但其矿物关系尚未弄清。最后在許多复杂的氧化物 (烧綠石、鈦鉍鈣鉍

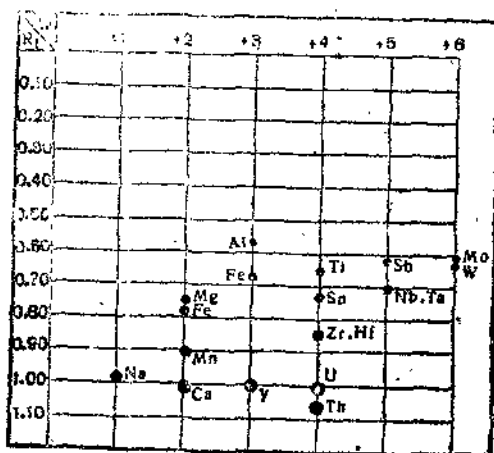


图 1. 钼矿物或含钼矿物成分中
主要阳离子的大小

矿、铜钼矿、黑稀金矿和許多其它矿物)和較高温的硅酸盐和磷酸盐(褐帘石、綠层硅鈾鈦矿、榍石、磷鈾矿、独居石等)中發現鈾和鈾能异价交替大小相近的低价离子——Y, TR, Ca 和 Na。

鈾在自然界所发现的所有放射性元素中在地質条件下不組成一种离子,而組成两种离子, U^{4+} 和 U^{6+} 的唯一金屬。这些阳离子在一定的氧化还原条件下是稳定的。这种情况不仅对鈾化合物的数量和类型有强烈影响,对我们來說更重要的是它对鈾这种元素在地壳发生各种不同的地質过程中的性状的影响。

从地球化学观点看来,自然界中所有的鈾矿物均只为氧化物和含氧盐,这种情况也很重要。这說明鈾与氧具有高度的化合力。

在自然条件下四价鈾首先呈二氧化合物——晶質鈾矿或与晶質鈾矿具有相同結晶构造的瀝青鈾矿^①状出現,在我們的及所有其它的矿物学教科書中設这种矿物的化学或为 UO_2 , 某些作者将 UO_3 , PbO 等亦列入此式內这是不能同意的,理由很簡單,有如下几点。

第一,放射性衰变鉛和其它一些放射性衰变物(He, Ra, Rn等)在晶質鈾矿或瀝青鈾矿形成时显然不可能存在,因此不可能列入該矿物的化学式內。

第二, UO_3 同样是在晶質鈾矿形成之后,由于它內生或外生氧化的結果才形成的。伟晶岩內晶質鈾矿的顆粒結晶中,正如專門的化学研究所表明的一样,六价鈾的含量随着向伟晶岩中心部分接近的程度不同大大降低,这种現象不是偶然的。我們从化学和矿相研究材料中知道四价的鈾比較容易氧化到六价的鈾。虽然这种氧化的产物一般眼

①在我們的書刊中近來开始普遍运用瀝青鈾矿或瀝青鈾矿石的閏义詞——“非晶質鈾矿”,这是毫无根据的。P. B. 格采娃和 K. T. 薩維列耶娃在自己的書中曾指出这一名称是由 B. H. 維尔那得斯基起用的,可惜这不完全正确,这一矿物在 18 世紀即为人們所知,“瀝青鈾矿石”或“瀝青鈾矿”这些名称不仅在上一世紀保持下来,即使在今日的国外或国内書刊中也是常常采用的。B. H. 維尔那得斯基在 1911 年所公布的材料中将鈾的氧化物分为两组:(1)結晶的(2)“非晶質的-各种非晶質鈾矿”。由于当时还没有矿物的X光分析法,象这种分法可以同意,但是今天X光研究已經完全准确地証明瀝青鈾矿的腎状析出物不是非晶質的,而是具有晶質鈾矿那样的結晶构造。因此显然没有必要称呼它們为“非晶質鈾矿”,同样 B. H. 維尔那得斯基关于晶質鈾矿組矿物即是鈾酸鈾酸鈾的說法是无根据的。

睛看不見，但我們沒有根據將它們也列入于該礦物的化學式成分內，正如黃鐵礦結晶表面的氫氧化鐵（褐鐵礦）我們任何時候也不會將它列入黃鐵礦的化學式中一樣。

最後，X光研究表明，人工制作的不含任何其它混合物之晶質鈾礦晶体按其結晶構造（螢石）來講與晶質鈾礦和瀝青鈾礦的天然結晶無絲毫相差之處。非常有意思的是這種礦物氧化愈深，德拜圖的模糊背影上屬於晶質鈾礦的繞射綫顯示愈弱。換句話說，由於它的結晶構造遭受破壞而產生的含有六價鈾的氧化物才真正是非晶質的，因而在x-光繞射譜上不能覺察出來。

在花崗岩、花崗偉晶岩及接觸交代構造內，于較高溫度條件下形成的礦物共生體中的四價鈾可以類質同象地進入于含有與 U^{4+} 大致相同大小的陽離子的礦物成分內。並且這時可能發生等價類質同象取代，即結晶構造中四價的鈾代替這樣一些四價的陽離子，如 Th^{4+} ， Zr^{4+} ， Hf^{4+} （例如在鈦石、鈳石和榍石之一部分，等），也可能發生異價類質同象作用，即四價的鈾在总的結晶構造不受破壞，構造單位（離子）數和化合物中总的靜電平衡情況不變條件下，取代一些大致相等的，但低價的陽離子（例如在複雜的氧化物和含氧鹽中——鈣鈾礦、燒綠石和其他所謂的一些鈦-鋁-鋁酸鹽、褐帘石、磷鈾礦、獨居石組等）。

由於複雜的發生異價類質同象作用的含鈾化合物在自然界中分布非常廣泛，對這個問題必須從結晶化學的觀點出發簡單談兩句，因為許多地質人員對這究竟是怎么一回事，理解得並不完全清楚。

首先必須指出，對內生礦物來講異價類質同象作用，只是在那些由不同大小的陽離子組所組成的複雜氧化物和氧鹽中才能產生。但是為了使 U^{4+} 或 Th^{4+} 能夠以類質同象混合物狀組成于這些礦物之內，離子當中必須有離子半徑大小與 U^{4+} 相近的大陽離子存在。屬於這一類的陽離子（圖1），除 Th^{4+} 外有 Y^{3+} ， Tb^{3+} ， Ca^{2+} ，和 Na^{1+} 。組成複雜的放射性氧化物和氧鹽中的另一組陽離子的離子半徑很小，因此自然不可能為上述的大陽離子所交替。屬於這類的陽離子除 W^{6+} ， Nb^{5+} ， Ta^{5+} ， Ti^{4+} 外，有（圖1）， Sb^{5+} ， Sn^{4+} ， Fe^{3+} ， Fa^{2+} ， Al^{3+} ， Mg^{2+} 。

由此應該完全清楚，這些離子如 Nb^{5+} ， Ti^{4+} 等正象書中有所

証实的一样，与鉍酸盐中的 U^{4+} 富集程度是无任何关系的。为了说明这一点可以回忆一下鈾鉄矿和鉍鉄矿从来即不含鈾，也不含鈦这一事实（如果在磨片上看不到任何其它成分的含鈾矿物的包裹体的話）。从結晶化学观点来講是因为这些化合物中缺少离子半径大小与四价鈾相近的阳离子的原故。只有当鈾鉄矿和鉍鉄矿富含二价的錳时，才有可能預期 U^{4+} 以类質同象状有少量的参入，因为 Mn^{2+} （见图1）按大小說来是界于 Fe^{2+} 和 Ca^{2+} 之中間的。

为了理解 U^{4+} 和 Th^{4+} 类質同象地进入于类似矿物的机械作用过程，現在我們举两个简单的例子談一下。在鈣鈦矿 $CaTiO_3$ 中阳离子 Ca^{2+} ，在富含稀土元素的熔浆或溶液結晶时易为相同大小的离子 TR^{3+} 所交替，并且在这种情况下为了保持静电平衡，小阳离子 Ti^{4+} 的相应部分应当为相等大小的三价阳离子 Fe^{3+} 所交替。例如鈣鈦矿 $(Ca, Ce)(Ti, Fe)O_3$ 就是这种矿物。如果溶液中大部分为鈉，那么 Na^{+} （图1）同样可以不破坏鈣鈦矿的結晶构造而进入于矿物成分之内，但有一条件，即小阳离子組中 Ti^{4+} 的位置必須由 Nb^{5+} 或 Ta^{5+} 所代替——鈦鈾鉄鈣矿—— $(Ca, Ce, Na)(Ti, Fe, Nb)O_3$ 。如果熔浆内含鉄較貧，則异价类質同象作用可能为另一种过程，部分的 Ca^{2+} 同时可能为一价和三价的阳离子（ Na^{+} 和 TR^{3+} ）所代替，并且数量大致相等。在这个时候全部大阳离子的总电荷将等于鈣的电荷即为2。岩漿結晶时如果其中含鈾，鉍和鉍很富对于形成鈦鉍鈣鈣矿—— $(Na, Ce, Ca \dots)(Nb, Ti)O_3$ 产生良好条件，大家都知道根据化学分析資料来看，在鈦鉍鈣鈣矿中也还有少量的鈦和鈾存在，它們是交代了一組大离子半径的离子（ $Na, Ca, Ce, \dots$ ）后产生的，但是这里达到了从結晶化学方面对异价类質同象作用現象所提出之全部要求。

独居石—— $CePO_4$ 可以作为第二个例子。这种矿物中的三价稀土元素在 $[PO_4]^{3-}$ 的相应部分为 $[SiO_4]^{4-}$ 所交代的同時可以为 Th^{4+} 和 U^{4+} 所交替，或者通过另一种方式，即在部分 Ce^{3+} 为 Na^{+} 以大致相等数量所取代时产生这种交替作用。很久以前已經知道含鈦很富的独居石中的二氧化硅也是很主要的一种东西，由此当时曾假設这一矿物中也有石英的机械混合物存在。但是显微鏡下研究沒有能証实这一点。

只是根据晶体化学概念,才推断出在这种情况下,部分阴离子 $[\text{PO}_4]^{3-}$ 可以为相同大小的阴离子 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 所取代。不久以前証明,独居石中的 Ce^{3+} 当阴离子部分的 $[\text{PO}_4]^{3-}$ 为 $[\text{SO}_4]^{2-}$ 所交代之同时,同样可以为 Ca^{2+} 所代替。

許多矿物,无论是复杂的氧化物或是含氧盐,当其中含有鈾与鈷呈类质同象混合物状态,且为数很大时,在放射性射线影响下处于变生非晶质状态,即处在结晶构造完全分裂状态。这种情况对于那些所含 U^{4+} 在氧化过程影响下可以转变为离子半径較其大大縮小的 U^{6+} 的含鈾矿物亦是如此。这种现象无条件地必将导致结晶物质^⑨的分裂。因而矿物成分中常常可能混入其它物质,其中包括 H_2O 。矿物的体积大大增加,这一点从晶面的膨胀及新鲜岩石中遭受变生分裂的矿物晶体四周出现幅射状裂隙可以判断出。

鈾在转变为六价以后,很可能受到部分的淋滤。因此說从煅烧的变生物质中所获得的X-光射线谱,是否符合于矿物的原来结晶构造是没有把握的。所有以上这些道理,基本上说明了为什么属于这一类的許多矿物的物理性质之所以有区别和化学式不能肯定之故。

在这一方面含 U^{4+} 較富的鈾鈷矿同样是很典型的。在氧化带内該矿物的所在处根据野外观察証明,确有一种暗黄色至褐色的細粉末出现。化学研究表明,它是由鈾的二氧化物和少量鈷的混合物组成的。看来在氧化过程中四价的鈾变成了六价并且在溶解状态为土壤水所淋滤。

现在再简单地来談談鈾黑,亦即一种黑色至暗灰色的鈾的粉末状(微粒的)氧化物。从成因上看,它可以属于原生的,也可以属于次生的。一般它在各种成分的岩石(砂岩、煤、富含有机物的泥灰岩),摩擦粘土,含碳的破碎带等中成分散状分布很細。偶而也可見到它成一种疏松的小斑点状聚集,从其中可以取得一些不很純的物质去进行化

●大家知道结晶构造的牢固条件是由阴阳离子大小之間这样的比例关系所决定的,即阳离子必須接触到所有在它四周的阴离子(阴离子彼此之間不一定互相接触)。但是如果天然条件下的阳离子可以有数个原子价的(例如 U , Fe , Mn 等)那么在氧化条件下低价的阳离子能够转变为高价的阳离子,因而尺寸大大縮小。这种情况使得这一类产生的尺寸小的阳离子已不能同时与其四周的阴离子接触,故导致离子間的联系受到破坏(结晶构造这时在低温条件下开始“散落”)。

学分析。在它们的成分中主要为六价的铀。这一点是可以理解的，因为微粒物质中物质的比面积正象所知道的是很大的，从而在这种情况下氧化作用自然进行得要比明显的精品构造强烈得多。

内生矿床中的原生铀黑只有通过放射性摄影可以发现，并且在显微镜下除极少数例外以外一般不能见到明显的铀的氧化物析出体。显然铀的氧化物的个别析出体太小，已超出显微镜镜头允许的可见度范围之外。从块状样品的磨片上所取得的放射性摄影片中一般可以见到小的斑点和细脉状扩散晕圈，它们或者与层理交错，或者产于在挤压条件下产生的构造变动带内的片理面上。通过印痕法可以确定这些地段内的含铀量。

按实质而言，从含铀矿石的氧化带中，特别是富含黄铁矿的铀矿石的氧化带中，所淋滤出来的六价铀在遭受部分还原之后，于胶结带中（潜水面之下）形成所谓的再生铀黑，应当也属于这一类。这种铀黑往常呈细的环边形状见于浸染状硫化物四周和沿着铁镁质岩石中的裂隙分布，部分的在辉绿岩岩墙内和接触带上，以及喷发岩的小空心裂隙、孔隙或空洞中也有所见，呈环状的疏松薄膜分布于其壁上等。

在铀黑的X-光射线相的模糊背影上一般看不到有什么物质的结晶标志，这说明它们真正是非晶质的。但是很有意思的是在某些情况下从显微镜下看磨片，发现在铀黑中具有闪光的次生晶质铀矿，呈边缘或细脉分布于柔软疏松之物质中。X-光分析这样的铀黑时在模糊的胶卷背影上所得出的线条很明显，是一种晶质铀矿所特有的线条。这显然说明铀黑在进一步还原过程中（潜水面之下）结晶的铀的二氧化物逐渐形成。

在内生和外生氧化条件下（潜水水面附近）形成于原生铀矿物所在处（主要为晶质铀矿或沥青铀矿）的“残余铀黑”应当属于次生铀黑一类。

可能许多对一般热液矿床的矿物曾进行了详细研究的地质人员都会觉察到，在最后的一些共生矿物中经常有这样一些矿物，如重晶石、赤铁矿、结晶针铁矿等，它们完全肯定地证明了本矿化阶段的残余溶液中氧的数量是有所增长的。因此自然这时从溶液中沉出的矿物都是一

些富含氧的化合物(別捷赫琴, 1949)。如果矿石中含有在这个時間以前从溶液中沉出的瀝青鈾矿的話, 那么在磨片中就不难发现, 它的反射力在它析出物的四周或沿裂隙处大大降低, 这証明瀝青鈾矿明显地已起了氧化作用。它的晦暗部分很易腐蝕, 常常局部地轉变为粉末状的一种物質这就是典型的残余鈾黑。这种现象在胶結帶上部潛水面附近的原生鈾矿物处, 或在原生鈾矿石中的沿着与地表相通的变动帶和裂隙处皆有发现, 情况完全类似。在氧化帶本身中鈾黑一般是見不到的。

关于化合物 U_3O_8 , 化驗人員經常利用它来表示矿物或矿石中含鈾量, 必須指出到目前为止这种成分的矿物在天然条件下还没有可靠地遇见过。当然这并不表示說这种矿物或与其类似的矿物根本不存在。也可能作者在硫化物矿石中所遇到的小腎状体即是由这种物質組成的。在磨片下它的反射力較低为典型的瀝青鈾矿析出物所包围, 在薄片这种物質呈浓綠色。 U 和 H_2O 的微化学反应为阳性, 全化学分析的材料未能收集到。人工可以制成微結晶状的 U_3O_8 化合物 (Milne, 1951; 和最近 Xonja 与 Mana)。

关于 U_3O_8 結晶构造方面之資料目前彼此还互有矛盾。根据 K. A. 轟那得凱維奇的口头报告, 化驗人員在煅烧六价鈾的水化物这种化学分析的沉淀物时之所以能取得 U_3O_8 化合物, 是因为瓦斯灯上煅烧的温度远达不到将其轉为 UO_2 所需的温度。

六价鈾在自然界中广泛分布, 黑氧鈾, 即綜合阳离子状 $[UO_2]^{2+}$ 存在, 大部分与其它阳离子共生。它与四价鈾相反, 产生于氧化条件下, 并且不能組成普通的无水氧化物。

在鈾矿床的氧化帶中 U^{6+} 主要呈不同成分的氢氧化物和含水盐状分布, 不同程度地溶解于潛水和河水的渗透水中。正如上面所指出的, U^{6+} 在氧化条件下是易于轉变为离子半径很小的 U^{5+} 的, 并且在此时导致以四价鈾为主的矿物的結晶构造遭受破坏, 导致所有与四价鈾在結晶物質中組成一統一整体的离子被解脫出来。与氧鈾一起組成新矿物的阴离子类型取决于在风化过程中遭受分解的原生矿石和岩石的成分。属于这些类型的有 $[SiO_4]^{4-}$ ——产生六价鈾的硅酸盐, $[PO_4]^{3-}$ ——磷酸盐 $[AsO_4]^{3-}$ ——砷酸盐, $[VO_4]^{3-}$ ——钒酸盐, $[MoO_4]^{2-}$ ——

鉍酸盐 $[\text{OO}_2]^{2-}$ ——碳酸盐, $[\text{SO}_4]^{2-}$ ——硫酸盐。在表面溶液中当上述阴离子缺少或不足时形成六价鉍的水化物。

不同成分的盐的溶解程度彼此相差很大: 六价鉍的硅酸盐最难溶解, 硫酸盐最易溶解。这一点当普查地表鉍矿时应随时注意。关于这个问题在叙述矿床风化壳时将再详细地谈一谈。

最后必须提一提关于所谓的鉍的“有机化合物”问题。属于这一类的到目前为止有下列几种: 图霍矿 (Тухолит), 碳鉍矿和水碳磷鉍矿, 其形状有时呈浸染状或细脉状, 有时亦呈粉末析出物状。它们在伟晶岩, 碳酸盐脉, 沉积变质矿床(維特瓦斯特兰)及其他类型矿床中皆可見到, 对于維持瓦斯特兰矿床的图霍矿及其它矿物, 第一次进行详细的显微镜下研究的是P. 拉姆道尔 (Ramdohr, 1955)。根据他的插有許多显微照象的资料来看, 图霍矿是一种碳化物质, 其中扩散有一定数量的细小的但大部分形状不规则的晶質鉍矿或瀝青鉍矿包裹体。这种类似无烟煤的碳化物, 正如矿物間相互关系所表明的那样, 它形成的时期比黄铁矿、磁黄铁矿及其它較年青的碳化物还要早。有时它呈滚圆颗粒形状, 与碎屑颗粒相似。有时在它之中也还含有稀土元素、钍、铀、鉄、鋁、鈣等。因而“图霍矿”显然和“碳鉍矿”及“水碳磷鉍矿”一样, 不是一种独立的矿物, 而是碳化物与晶質鉍矿, 有时也和硫化物及其它矿物一起的混合物。

关于瀝青、瀝青煤、瀝青頁岩和瀝青岩, 在这些有机物质中可能有鉍存在, 呈一种有机化合物状, 具体的研究尚嫌不足。

这样看来, 正象我們所見到的, 鉍作为一种元素, 它的地球化学特点比其它放射性元素要复杂得多。完全可以理解, 这一点毫无疑问地对岩石和矿石形成时所发生的各种不同地质过程中的鉍的性状一定起着影响。

現在我們对金屬矿床形成过程中鉍化合物的分布及性状問題作一详细的探討。

内生矿床形成过程中鉍的性状

目前可以有充分根据的說, 尽管必須強調指出远非所有矿床經常

可能含有鈾矿，但鈾矿物或含鈾矿物在現時地壳中已知的所有成因类型的金屬矿床中均有可能遇到，但是苏联和其他国家的广泛深入的研究表明，鈾在成矿过程中的性状在許多情况下和矿石的其它金屬組成物是不同的。因此鈾矿床与其他相比较有着一系列独特之处。

为了进一步了解鈾和鈷的化合物在成矿过程中的性状特点，現在我們对鈾矿床作一簡述。

鈾和鈷的內生矿床，在成因上是和酸性及硷性的深成火成岩发生关系的。純岩浆矿床和接触交代矿床見得比較少。

鈾与鈷的矿物經常聚集于伟晶岩內，而鈾的富集矿石主要集中于典型的热液矿床中。

岩浆矿床 在花崗岩中遇到成瀝青鈾矿浸染状的鈾的机会是非常少的，并且也无工业价值例如尼日里亞(非洲)的圣庫魯花崗斑岩組。但是在尼日里亞岩組的其它花崗岩，特别是在鈾閃花崗岩中烧綠石成一种附生顆粒状分布很广泛，其中根据化学分析資料含鈾的氧化物3.1%、鈷的氧化物3.3%及五氧化鈷和鉬41.1%。烧綠石分布地区放射性底数显著增高，因而通过現代輻射研究容易圈定。

根据阿卑尔欽和費立德曼 (Ф.Р. Апелъцин и Л. Г. Фельдман) 的綜合資料来看，在焦斯 (Джос) (北尼日里亞) 高原的广闊地区內的其他无数的中生代正常黑云母花崗岩中鉬和鈷組成附生銅鉄矿 (不是烧綠石)，与其伴生的經常是黑云母 (不是鈾閃石)。因此說在具有增高硷度的岩浆的酸性轉生岩中聚积鈾和鈷的条件比較有利。这种花崗岩在风化作用影响下崩解非常剧烈，致使其中之附生矿物与其他矿物已脱离联系，破坏深度局部达30米或更多一些。象这种疏松的花崗岩易于用推土机，挖土机和水力冲泥机进行露天开采和重力选矿，以获取含有銅鉄矿，鉄鉄矿，錫石及局部烧綠石等之重砂。必須指出目前在开采銅鉄矿方面尼日里亞占世界第一位。

此外，烧綠石和其它一些含鈾和含鈷的鉍鉬酸盐在許多国家的霞石正长岩中呈附生矿物状也有存在，但暫時在这些岩石中尚未发现独立的具有工业价值的鈾和鈷矿床。

从科学观点上看，由彼此互层但成分又各有不同的霞石正长岩(异

性霞石正长岩，霞石正长岩、霓霞岩等）所组成的鈦鉍鈣鈾矿床具有特殊意义。霞石正长岩在这里组成一典型的有层理的侵入体。大家知道鈦鉍鈣鈾矿中富含稀土元素、鉍、鈦和少量的鈷及鈾。这种矿物在某些岩石中具有增高含量。鈦鉍鈣鈾矿虽然看来呈一种很完美的立方晶体或連生双晶状，但实际証明它仍然属于变斑晶一类，即是经过交代作用在晚期岩浆析出时所形成的矿物。

从上面看来，根据目前已有的资料岩浆岩中的鈾和鈷只能从富含一些在现代工业中具有重要意义的稀有金属，如鉍、鉍、稀土元素等的附生矿物或浸染矿物中順便提取。因此显然这种矿床只有在儲量很大，岩石中矿物分布較均匀，可以大量开采并且选矿方法較賤的条件下才具有工业意义。

伟晶岩矿床 含鈾的和含鈷的伟晶岩在世界各国广泛分布。但是这些金属具有工业品位和儲量的矿床很少見到。

在这組矿床中根据其成分可分出兩組：（1）含放射性元素的花崗伟晶岩和（2）霞石正长伟晶岩或正长伟晶岩。

伟晶花崗岩在成因上与产于深成条件下的原生花崗岩有着密切联系。因此在地壳表面它們主要发现于前寒武紀和古生代花崗岩侵入体中。对这些伟晶岩来講鈾和鈷的共生現象非常显著。它們一般在象晶質鈾矿——方鈷石、鈾鈷矿，有时也有磷鉍矿、鉛石、褐帘石、独居石等这样一些矿物中經常彼此同形交替。至于它們和其他矿物在共生关系方面的一般規律尙未能发现。

晶質鈾矿、鈷石、褐帘石及其他一些含有鈾和鈷的矿物經常在大顆粒长石上成一种很好的嵌晶状出現。但是正如B.Д.尼基亭(1957)所証明的这些矿物不是早期形成的，而是典型的变晶在它的内部經常可以見到长石和其它矿物被交代后的残余物。此外，这些晶体經常呈鎖鏈状沿伟晶岩內封口裂隙分布的現象也很典型。

这样看来，我們感到有兴趣的矿物并不是伟晶岩中的早期构造，这一点已很明显。同样必須強調指出的是我們发现某一种矿物的生成时期，例如晶質鈾矿是可以有几个世代的，直到大量鈉长石化作用出現之前均可产生（即已到热液作用阶段）。

由于伟晶岩体内鈾矿物和釷矿物分布非常不均，金屬含量一般較低，伟晶岩体本身也比較小，所有这些都說明虽然純瀝青鈾矿的巢状聚积有时能达到数公斤之重，但是伟晶岩不是放射性元素，只有在个别情况下（例如，加拿大的沙利波阿湖地区、薩斯卡奇溫省、班克勞夫特地区、安大略和其他地方）发现含鈾矿物分布較均匀，含量也較高。当伟晶岩体内的其它矿产（綠柱石、鋁矿物、粗粒結晶云母等）具有工业富集时，鈾、釷和稀土元素的矿物可以順便开采。

霞石正长伟晶岩比伟晶花崗岩遇到的要少得多。但是在它們中間現在已知脉状伟晶岩体中具有工业品位的釷和鈾。

这些矿床的矿物特点是鈾釷化合物不是品質鈾矿或方釷石，而一般是燒綠石，此外也有一些少量的与其伴生的鈮、鋇和鈦的复杂氧化物。

正长伟晶岩的情况大致与上相同。在烏拉尔正长伟晶岩产出于霞石正长岩地块附近厚度很大的正长岩边缘之中。这里的含鈾和含釷矿物从霞石正长伟晶岩及正长伟晶岩中同样可以与另外一些矿产順便开采，例如陶瓷工业中所用的霞石和长石。

硅卡岩矿产 某些研究人員将在变質岩或沉积岩与花崗岩侵入体接触处附近有时遇到的含硫化物、石英、螢石等的瀝青鈾矿細脉归屬於这一类。但是最近的研究証明它們只是一般的，有时成因上甚至与侵入体无关的热液形成物。

典型的接触交代形成物，主要指含釷形成物，有时呈一种溶液与正长岩侵入体相互作用后的产物，可惜的是对釷矿物直到現在尚未足够的注意研究，因而这些矿床的矿物学研究也很差。根据現有的不完全的化学分析看来，釷在这些矿床中大部分为黄色或褐色的复杂氧化物。鈾一般呈混合物状存在于这些硅酸盐中。但是这并不說明在这种类型的矿床中不可能发现鈾矿石与釷矿石具有工业儲量的地段。

热液矿床 这一种类型的内生矿床与上述类型相比在工业意义上是最重要的一种，其中特别是在接近地表的脉状矿床内，經常可見含鈾极富之地段，鈾呈一种胶状的瀝青鈾矿产出。

較早以前就曾指出热液矿床的地球化学特点是釷、稀土元素和鈾只有在高温和很大深度条件下形成的脉中方能共同存在，而在接近地