

XIYOU JINSHU XUANKUANG

稀有金属选矿

冶金工业出版社

稀有金属选矿

崔广仁 编

冶金工业出版社

稀有金属选矿

崔广仁 编

•

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

850×1168 1/32 印张 97/8 插页 1 字数 257 千字

1975年 8 月第一版 1975年 8 月第一次印刷

印数 00,001~5,300 册

统一书号: 15062·3180 定价(科三) 1.00元

毛主席语录

开发矿业

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

古为今用，洋为中用。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

前 言

在毛主席无产阶级革命路线的指引下,在党的“鼓足干劲,力争上游,多快好省地建设社会主义”总路线的光辉照耀下,我国社会主义革命和社会主义建设事业正在蓬勃发展。遵照伟大领袖毛主席关于“开发矿业”的教导,冶金工业战线上的广大职工掀起了大打矿山之仗的新高潮。为了适应我国稀有金属工业发展的需要,现将有关稀有金属选矿的资料经整理、编写成书,供从事稀有金属选矿事业的工人、工程技术人员、高等院校、中等专业学校选矿专业的师生参考。

书中主要阐述了锂、铍、钽、铌、锆、钛及稀土等稀有金属矿的选矿方法,选矿研究情况,并列举了一些厂矿的生产实践。同时也简要地叙述了各种稀有金属的主要性质、用途及主要矿物和矿床类型。

在编写过程中得到我院很多同志的大力支持;在定稿时,东北工学院选矿教研室的同志进行了审阅,并提出了很多宝贵意见,在此表示感谢。

由于水平有限,经验不足,书中可能存在不少缺点和错误,希望广大读者批评指正。

有色研究院广东分院 崔广仁

31776

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 稀有金属的概念.....	1
第二节 稀有金属的发展概况.....	1
第三节 稀有金属的分类.....	2
第四节 稀有金属矿的选矿工艺特点.....	5
第二章 锂矿的选矿	6
第一节 锂的主要性质和用途.....	6
第二节 锂的主要矿物及矿床类型.....	7
第三节 锂矿石的选矿方法.....	11
第四节 锂辉石的浮选研究.....	14
第五节 其他含锂矿物的选矿.....	25
第六节 锂辉石的浮选流程及其实践.....	27
第七节 铯和铷矿的选矿.....	38
第三章 铍矿的选矿	42
第一节 铍的主要性质和用途.....	42
第二节 铍的主要矿物及矿床类型.....	42
第三节 铍矿石的选矿方法.....	46
第四节 绿柱石的浮选研究.....	48
第五节 硅铍石的浮选研究.....	61
第六节 绿柱石的浮选流程及其实践.....	64
第七节 绿柱石和锂辉石的分离.....	71
第四章 钽铌矿的选矿	78
第一节 钽铌的主要性质和用途.....	78
第二节 钽铌的主要矿物及矿床类型.....	79

第三节	钽铌铁矿的选矿	85
第四节	钽铌铁矿及细晶石的浮选研究	102
第五节	钽铌铁矿、细晶石及钛铌钙锆矿等矿物的选 矿实践	118
第六节	黄绿石(烧绿石)的选矿及其实践	130
第五章	锆铪矿的选矿	146
第一节	锆铪的主要性质和用途	146
第二节	锆铪的主要矿物及矿床类型	147
第三节	锆、钛砂矿的选矿	149
第四节	锆英石的浮选研究	174
第五节	锆矿石的选矿流程	184
第六节	锆、钛砂矿的选矿实践	190
第六章	钛矿的选矿	206
第一节	钛的主要性质和用途	206
第二节	钛的主要矿物及矿床类型	207
第三节	钛矿石的选矿方法	209
第四节	钛铁矿和金红石的浮选研究	209
第五节	钛、锆矿的浮选流程	220
第六节	钒及钒钛磁铁矿的选矿	232
第七节	钒钛磁铁矿的选矿实践	238
第七章	稀土矿的选矿	250
第一节	稀土金属的主要性质和用途	250
第二节	稀土的主要矿物及矿床类型	251
第三节	独居石砂矿的选矿方法	255
第四节	独居石及磷钇矿的浮选研究	257
第五节	独居石、磷钇矿、黑稀金矿的选矿流程及其实践	265
第六节	氟碳铈矿的选矿及其实践	273
附表 1	磨矿细度换算表	283
附表 2—1	水的硬度	283
附表 2—2	一种化合物含量	283

附表 3	稀有金属选矿常见矿物表·····	284
附表 4	某些稀有金属矿物及造岩矿物的比磁化系数·····	291
附表 5	矿物比导电度及整流性·····	292
附表 6	稀有金属浮选常用的选矿药剂·····	294
主要参考文献	·····	300

第一章 绪 论

第一节 稀有金属的概念

在自然界中，已发现的 103 种元素中，除 16 种非金属和 6 种惰性气体元素外，均为金属元素。而这些金属元素中，有四分之三属于“稀有金属”。

稀有金属一般是指在地壳中含量较少，矿床比较分散，提取较为困难的金属元素。但在大多数情况下，往往是由于人们对这些元素的认识不足造成的。常见的重有色金属铜、铅、锌，我国早在公元前就已经发现并应用。而稀有金属绝大部分都是在十八世纪以后才发现的新元素，人们对它们的认识才开始不久，其生产规模都比较小。例如稀有金属钛，在地壳中含量为 0.6%，比普通金属铜、铅、锌的存在量大得多，但钛的冶炼工业性生产只是从 1945 年以后才开始的，且提取极为困难，因此目前钛还是属于稀有金属。

另外，“稀有”这个概念也是有地区差别的，钨、钼对世界上大多数国家来说，是稀有金属，但对某些国家来说，就不是稀有金属。因此稀有金属这个概念并不是绝对的，将随着社会生产和科学技术的发展而改变。

第二节 稀有金属的发展概况

人类在十七世纪以前，所知道的元素只有金、银、铜、铁、锡、锌、汞、铅、铋、碳和硫十一种元素。在十七世纪仅发现了砷、锑和磷三种元素。十八世纪发现了十三种元素，其中包括铂、钨、碲、钛、铀和钼六种稀有元素。在十九世纪一共发现了

稀有金属元素大部分是在十九世纪和二十世纪发现的，其中有二分之一以上是在1860年到1924年发现的。

在已知的 103 种元素中, 约有 81 种是金属元素, 其中被认为是稀有金属的不足 60 种, 一般来讲应包括下列元素:

2. 中性岩浆元素：锶及钕。

3. 超基性岩浆元素：钛、钒、钨、铈、钼、钨、钽及钼。

4. 硫化矿元素：镓、铟、铊、锗、硒、碲、钨及钼。

根据稀有金属的产状、性质、制备特点及应用等，一般将稀有金属分为六类，详见表1—1。其特点如下：

1. 轻稀有金属：轻稀有金属包括锂、铍、铷、铯四种元素。它们的共同点是比重小、化学性质活泼，常共生在同一矿床中。此类金属在地壳中均不能呈单独的金属状态存在，其矿物都是复杂的化学性稳定的铝硅酸盐类。在制取金属时，需要用强接触剂来分解矿物，如电解熔盐法或金属热还原法等。

从选矿方面来看，此组金属在矿物中的含量都不多，一般都不超过20%。并且金属矿物与伴生的脉石矿物的物理性质相差不太大，矿物大都是非磁性的；比重比较小，在2.7~3.5之间；在浮选时，无论是采用阳离子捕收剂还是采用阴离子捕收剂，可浮性在很大程度上受矿床的成因和杂质含量的影响而波动较大。此组元素过去多采用手选法从花岗伟晶岩中选取精矿，现在逐渐用浮选法代替。

稀有金属按其性质、用途分类 表 1—1

稀有金属类别	金 属
轻稀有金属	锂、铍、铷、铯
高熔点稀有金属	钛、锆、铪、钒、铌、钽、钼、钨
稀散金属	镓、铟、铊、锗、硒、碲、钨
稀土金属	镧与原子序数57~71的镧系元素共15种及与其性质相近的钪、钇
放射性稀有金属	镭、锕、钍、镤、铀及超铀元素
贵稀有金属（铂族元素）	钨、铑、钼、钨、钽、钼

2. 高熔点稀有金属：高熔点稀有金属包括钛、锆、铪、钒、铌、钽、钼、钨等元素。它们的特点是熔点高、抗蚀性强，能制成耐高温的合金钢。其矿物化学性质稳定，比重大，硬度也

大，所以容易形成砂矿，其选矿方法多采用重选法进行粗选，采用电选、磁选法进行精选（钼矿大部分是采用浮选法）。

3. 稀散金属：稀散金属是指那些在自然界中没有单独矿物存在，或即使有单独矿物存在，但产量极少，没有工业开采价值的金属。其存在形式大致有以下三种：

1) 以类质同象形式置换主矿物中的主要元素，如辉钼矿中的铼置换钼，闪锌矿中的锗置换锌等等。这种形式是稀散金属的主要存在状态。

2) 以微细矿物的细小包裹体、连生体及其他混入物的形式存在于主矿物中，它们在矿物中不参加主矿物的结晶格子构造。

3) 以吸附状态存在于其他矿物的裂缝和表面上，一般在表面上比较多。

稀散元素一般都是亲硫元素，常与硫成化合物，与铜、铅、锌在热液中一起活动，成类质同象置换。其中镓、铟、锗、硒、碲、铊等稀散金属经常存在于铜、铅、锌等多金属硫化矿中，通过冶炼或从冶炼的灰尘中提取出来。其中锗从煤灰中可以提炼，镓也可以从铝土矿中提炼，而铼大部分是从辉钼矿中提炼出来的。

4. 稀土金属：稀土金属的特点是它们的化学性质十分相近，这是由于它们的原子半径和离子半径大小接近的缘故。镧系元素的另一个特点是形成“镧系收缩”。稀土金属在矿石中的特点往往是彼此伴生，并经常与钽、铌、锆等矿物共生在一起，在选别含钽、铌、钽、锆矿物时，稀土金属常富集于相应的精矿中，常采用重选、浮选及电、磁选等方法进行选别。

5. 放射性稀有金属：放射性稀有金属以铀和钍矿为典型，具有较强的放射性，大多数矿物由于放射性引起化学不稳定。放射性在很大程度上影响着此组元素的矿石处理方法和加工工艺，其矿石处理方法大部分采用水冶法。

6. 贵稀有金属：贵稀有金属包括铂族的六种金属，它们在自然界中有密切的共生关系，主要产于与超基性岩有关的岩石或

砂矿中。此类金属在物理性质和化学性质方面有很多类似的地方，对于酸的抵抗力强，形成络合物的趋势大。在选矿中常富集于重砂矿物产品中进行回收。

第四节 稀有金属矿的选矿工艺特点

由于稀有金属矿物大部分是复杂的氧化矿，原矿品位又低，并且在同一矿床中经常伴生有很多种有价金属成分，因此稀有金属矿大部分都是比较难选的，在选矿工艺上有以下特点：

1. 矿石的选矿流程大部分是多段的、复杂的。在选矿时，为了使所有的有价成份都能综合回收，往往采用多种选矿方法的联合选矿流程进行处理。

2. 稀有金属矿大部分是氧化矿，用一般浮选药剂较难分离，因此常用脂肪酸及其皂类等较贵重的药剂进行浮选，并且水质对其影响较大。

稀有金属中的稀散金属大部分无独立矿物，无法进行选矿，目前大部分都是在冶炼时从多金属硫化矿的精矿中提炼出来的，而贵稀有金属的铂族元素及放射性稀有金属又有其独特的处理特点，所以本书中对稀散金属、贵稀有金属及放射性稀有金属的选矿不做叙述，只介绍目前有着重要意义的锂、铍、铷、铯、钽、铌、锆、钨、钼和稀土矿石的选矿。

第二章 锂矿的选矿

锂是最轻的一种金属，外观呈银白色，于1817年在透锂长石中被发现，1818年首次用氯化锂制得金属锂。但是，锂的大量生产还是在第二次世界大战以后。

第一节 锂的主要性质和用途

锂的主要性质：

1. 重量轻：比重为0.534，比水轻一半；
2. 熔点低（ 179°C ）；
3. 金属锂很软，可用小刀切割。韧性大，易于拉伸成丝和压延成片；

4. 天然锂是由 Li^6 及 Li^7 两个稳定同位素组成。其中 Li^7 平均占92.61%， Li^6 平均占7.39%；

5. 锂的化学活泼性很大，能被大气所侵蚀，不能直接作结构材料。

锂的主要用途：

1. 在原子能工业方面：同位素 Li^6 是生产氢弹不可缺少的原料。用中子轰击 Li^6 时生成氦，而氦化 Li^6 就是氢弹和氢铀弹的“炸药”；

2. 在高能燃料方面：锂和锂的化合物可作成高能燃料，用于火箭、飞机或潜艇上；

3. 民用方面：用氢氧化锂调制成的锂基润滑脂，可以在 -50°C 到 $+150^{\circ}\text{C}$ 之间使用；锂盐用于制造特殊的光学玻璃及陶瓷；无水氢氧化锂和氧化锂具有很强的吸收二氧化碳能力，可用作二氧化碳的吸收剂和空气调节剂；锂可以作高能电池的原料；

锂及其化合物还可用作有机合成药品、催化剂、漂白剂等。

第二节 锂的主要矿物及矿床类型

锂在地壳中的含量为 $6.5 \times 10^{-3}\%$ ，已知锂的矿物有150种之多，以锂为主的矿物约有30种。目前具有工业价值的锂矿物，主要有锂辉石、锂云母、透锂长石、锂磷铝石和铁锂云母五种（表2—1）。其中以锂辉石为最重要，占锂矿物总开采量的一半以上。

锂 的 重 要 矿 物 表 2—1

矿 物	分 子 式	品位 $\text{Li}_2\text{O}\%$		比 重	硬 度 (莫氏)
		理论上	实际上		
锂 辉 石	$\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	8.10	4.5~8	3.2	6.5~7
锂 云 母	$\text{KLi}_{1.5}\text{Al}_{1.5}(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$ $(\text{F}, \text{OH})_2$	5.9	1.23~5.90	2.8~2.9	2.3
锂磷铝石	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)\text{F}$ 或 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot$ $2\text{LiF} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{Li}_2\text{O}$	10.1	8~9.5	3~3.15	6.0
铁锂云母	$\text{KLiFeAl}(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})[\text{F} \cdot$ $\text{OH}]_2$	4.13	2~3.5	2.9~3.2	2~3
透锂长石	$(\text{Li}, \text{Na})\text{AlSi}_4\text{O}_{10}$	4.89	2~4.0	2.39~2.46	6~6.5

锂辉石通常呈灰白色、淡黄色或淡绿色，具有玻璃光泽，硬度为6.5~7，比重为3.2左右，无磁性。在锂辉石中除含有4.5~8.0% Li_2O 外，还经常含有0~3% Rb_2O 和0~1% Cs_2O 。锂辉石在花岗岩伟晶岩中与石英、长石、云母等经常共生在一起，极易风化，并且其中的锂易被钠及钾所置换。锂辉石有两种晶型结构，将锂辉石加热到1000°C时由 α 晶型变到 β 晶型，而且易被破碎成粉末。

锂云母大多数呈粉红色或淡紫色的小碎片，很少见到白色的锂云母，硬度为2.3左右，比重为2.8~2.9，无磁性。在锂云母中除含有1.2~5.9% Li_2O 外，还经常含有1~3% Rb_2O 及0~1.5% Cs_2O 。

锂磷铝石是锂和铝的天然磷酸盐，呈白色稍带淡灰或淡绿

色，具有玻璃光泽，硬度为6，比重为3~3.15，通常含有8~9.5% Li_2O ，是含锂最富的矿物。

铁锂云母是一种富含铁的铁锂云母(经常含12.5%左右 FeO)，呈灰色、褐色、暗绿色，硬度为2~3，比重为2.9~3.2，经常与锂云母在一起共生，含铁量大时具有弱磁性。

透锂长石常呈灰色、红白色、黄白色、白色或无色，硬度为6~6.5，比重为2.39~2.46，一般产于花岗伟晶岩中，与锂云母、锂辉石、电气石及石英等矿物共生在一起。

锂的矿床类型有花岗伟晶岩、气成热液和盐湖沉积矿床三种。

1. 花岗伟晶岩矿床：含锂（主要是锂辉石）的花岗伟晶岩产于花岗岩或结晶片岩中，是目前锂的主要来源，同时也是铍、铷、铯、钽、铌等稀有金属的重要矿床类型之一，一般将其分为四种类型，详见表2—2^[8]。

2. 气成热液矿床：这类矿床的主要有用矿物有铁锂云母、磷云母、锡石、黑钨矿、绿柱石、黄玉、萤石等矿物，其矿床的形成是与岩浆的气成热液作用有关，常是钨、锡、铍、锂的综合矿床。

3. 盐湖沉积型锂矿床：在各种盐类沉积矿床中，如岩盐、光卤石、芒硝、硼砂湖及温泉中均含有锂。此类矿床的特点是储量大，开采方便，锂可作为提炼钠、钾、硼等的副产品。

现在工业上对锂矿石的要求，一般为含 $\text{Li}_2\text{O} > 0.6\%$ ，易于手选的粗粒伟晶岩，要求含锂辉石矿物量 > 10 公斤/吨。

在国外锂原料中，锂的总储量约600万吨以上，主要国家为加拿大、美国和苏联，其次为南罗得西亚(津巴布韦)^①、巴西、阿根廷等^[124]。

苏联将锂辉石精矿分为两级，一级锂辉石精矿含 $\text{Li}_2\text{O} > 4\%$ ，二级锂辉石精矿含 $\text{Li}_2\text{O} > 3\%$ ^[63]。其他国家一般要求锂辉石精矿含 $\text{Li}_2\text{O} > 6\%$ ^[99]。1971年国外锂精矿产量，按含锂量计算为5,270吨，主要国家为美国(年产3,000吨)，其次为南罗得西亚

① 在白人种族主义者统治下，下同。

稀有金属伟晶岩主要工业类型 表 2-2

基 本 特 征		第一类:	第二类:	第三类:	第四类:
		微斜长石伟晶岩	微斜长石—钠长石伟晶岩	钠 长 石 伟 晶 岩	钠长石—锂辉石伟晶岩
主要矿物的含量, %	微斜长石	60~70	25~35	达10~15	约10~15
	钠长石	10以下	25~35	35~45	35~45
	锂辉石	0	10以下	10以下	15~25
	石 英	23~26	25~30	30~40	30~35
次要矿物与标型矿物		银白色白云母、黑电气石、粗柱状绿柱石	钽铁矿、六方钽铝石、微晶石、钽钼铌矿、绿柱石、锂云母、电气石、磷钼锂石、白云母、铍榴石等	蓝黑色电气石、翠绿色白云母、磷锂矿、钠绿柱石、钽铁矿—钽铁矿	浅绿色白云母、绿帘柱石、水白云母、锡石、铌铁矿
伟晶岩体最有代表性的形状		透镜状和岩株状	透镜状和脉状	脉 状	板 状
伟晶岩的规模		小型岩体, 一般长度不超过100~200米, 厚度达10~15米	中型岩体, 长度达500~700米, 有时达1公里, 厚度10~25米, 在个别情况下达150米	小型岩体, 长度一般不超过200~300米, 厚度3~7米	大型岩体, 长度2~3公里, 厚度达20~30米