



中国地质调查成果 CGS 2018-052

“DD20160004、DD20179606”项目资助

稀有金属揭秘

XIYOU JINSHU JIEMI

高永宝 金谋顺 赵 民 滕家欣 编著
赵慧博 李 侃 燕洲泉



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE



中国地质调查成果 CGS 2018 - 052

“西昆仑铁铅锌资源基地调查与勘查示范、新疆和田地区火烧云—
大红柳滩铅锌锂大型资源基地综合调查评价”项目资助

稀有金属揭秘

XIYOU JINSHU JIEMI

高永宝 金谋顺 赵 民 滕家欣 编著
赵慧博 李 侃 燕洲泉



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

稀有金属揭秘/高永宝等编著. —武汉:中国地质大学出版社,2018. 11

ISBN 978-7-5625-4444-9

I. ①稀…

II. ①高…

III. ①稀有金属-基本知识

IV. ①TG146. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 259770 号

稀有金属揭秘

高永宝 金谋顺 赵 民 滕家欣 编著
赵慧博 李 侃 燕洲泉

责任编辑:王敏

选题策划:唐然坤 毕克成

责任校对:徐蕾蕾

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮编:430074

电 话:(027)67883511 传真:(027)67883580 E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://cugp.cug.edu.cn

开本:880 毫米×1230 毫米 1/32

字数:76 千字 印张:2.625

版次:2018 年 11 月第 1 版

印次:2018 年 11 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-4444-9

定价:22.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

稀有金属被誉为“工业的催化剂”“二十一世纪的新能源”，在国民经济发展中发挥着十分重要的作用。稀有金属元素在 18 世纪末至 19 世纪初被发现，受当时技术条件限制，未被广泛应用。20 世纪末以来，随着科学技术和现代工业的发展，稀有金属被广泛应用于冶金、机械、化工、陶瓷、珠宝加工等方面，尤其在动力电池、电子技术、航空航天、导弹火箭、原子能等高新技术领域，已成为新能源新材料的重要组成，很多国家已将其列为重要的战略资源。世界范围内稀有金属分布极不均匀，我国的稀有金属资源虽总体位于世界前列，但原矿对外依存度仍较高，亟待加强调查评价，提高资源保障程度；加强综合利用和深加工技术研发，进行绿色勘查开发。本书由长期从事稀有金属野外调查的地质科研人员编著，以地质工作者和公众需求的视角来展现丰富多彩的“稀有金属”世界。本书内容丰富，科学性、可读性强，具有重要的地球科学普及和启发意义，也有助于引导大众热爱地球科学，探索地球奥秘，培育科学探索精神。



2018 年 2 月

目 录

1. 稀有金属的“真面目”	(1)
1.1 锂(Li)	(1)
1.2 铷(Rb)	(4)
1.3 铯(Cs)	(4)
1.4 铍(Be)	(5)
1.5 铌(Nb)和钽(Ta)	(5)
1.6 锆(Zr)	(7)
1.7 铪(Hf)	(8)
1.8 锶(Sr)	(9)
2. 稀有金属的“前世今生”	(11)
2.1 稀有金属的最早发现	(11)
2.2 “二战”中重视	(12)
2.3 美苏冷战时期稀有金属的应用	(13)
2.4 新时期稀有金属的急速发展	(14)
3. 稀有金属的“应用天地”	(16)
3.1 锂——21 世纪的能源金属	(16)
3.2 铷	(20)
3.3 铯	(20)
3.4 铍	(21)
3.5 铌和钽	(21)
3.6 锆	(22)

3.7 铅	(23)
3.8 锶	(24)
4. 稀有金属的“聚集地”	(25)
4.1 稀有金属在全球的分布	(25)
4.2 世界级矿床简介	(27)
4.3 稀有金属在中国的分布	(30)
4.4 中国重要矿床介绍	(34)
5. 稀有金属的“新突破”	(37)
5.1 甲基卡锂矿	(37)
5.2 可尔因锂矿	(38)
5.3 大红柳滩锂矿	(40)
6. 稀有金属“寻宝”	(44)
6.1 祖母绿	(44)
6.2 海蓝宝石	(50)
6.3 碧玺(电气石)	(52)
6.4 金绿宝石	(58)
6.5 锂辉石	(63)
6.6 锆石	(64)
7. 稀有金属的“争夺战”	(67)
7.1 全球锂资源战略形势	(67)
7.2 锂资源的行业竞争	(70)
8. 稀有金属的“多面性”	(72)
8.1 稀有金属的“多面性”	(72)
8.2 未来思考	(73)
主要参考文献	(75)

1

稀有金属的“真面目”

稀有元素是自然界中储量、分布稀少(一般地壳丰度为 100×10^{-6} 以下)的元素总称。稀有金属的名称具有一定的相对性,随着人们对稀有金属的广泛研究,新产源及新提炼方法的发现以及它们应用范围的扩大,稀有金属和其他金属的界限将逐渐消失。有的稀有金属在物理-化学性质上近似而不容易分离成单一金属,过去制取和使用得很少,因此得名为稀有金属。19 世纪即有稀有元素(Rare Elements)一词,20 世纪 20 年代在此基础上定名为稀有金属。稀有金属开发较晚,所以有时还称为新金属(New Metals)。第二次世界大战以来,由于新技术的发展,需求量增大,稀有金属研究和应用迅速发展,冶金新工艺不断出现,这些金属的生产量也逐渐增多。

稀有金属元素包括锂、铷、铯、铍、铌、钽、锆、钨、镱等(据《矿产资源工业要求手册(2012 年修订本)》),稀有金属元素在元素周期表中的排列见图 1-1。

1.1 锂(Li)

锂是最轻的碱土金属,原子序数为 3,原子密度为 0.534g/cm^3 ,熔点为 180.54°C ,沸点为 1347°C 。锂在干燥的空气中呈银白色,比铅软,富延展性(图 1-2)。

锂常形成氧化物并赋存于硅酸盐类矿物中。锂常与钾、铷、铯、铯发生置换,并与铍、硼密切共生。锂主要聚集于岩浆结晶分异晚期的伟晶作用阶段和气成热液阶段,尤其是在伟晶作用晚期,常形成有价值的伟晶岩型锂矿床。在富硼镁的盐湖里,锂以离子状态赋存于卤水中,形成规模巨大的盐湖型锂矿。

注: 相对原子质量录自2001年国际原子量表, 并全部取4位有效数字。

图1-1 稀有金属元素

71	Lu	镥	175.0	70	Yb	镱	173.0	69	Tm	铥	168.9	68	Er	铒	167.3	67	Dy	镝	162.5	66	Tb	铽	158.9	65	Gd	钆	157.3	64	Eu	铕	152.0	63	Sm	钐	150.4	62	Pm	钷	(145)	61	Nd	钕	144.2	60	Pr	镨	140.9	59	Ce	铈	140.1	58	La	镧	138.9	57	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍	(232)	80	Pa	镤	(231)	79	U	铀	(238)	92	Ac	锕	(227)	89	Fr	钫	(223)	88	Ra	镭	(226)	87	At	砹	(210)	86	Po	钋	(209)	85	Bi	铋	(208)	84	Pb	铅	(207)	83	Tl	铊	(204)	82	Hg	汞	(200)	81	Th	钍
----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	---	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---	-------	----	----	---

锂矿物主要包括锂辉石、锂云母、锂磷铝石、透锂长石、铁锂云母等。

锂辉石是重要的含锂矿物之一(图 1-3),化学分子式为 $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, 氧化锂含量 8.04%, 单斜晶系, 晶体常呈柱状、粒状或板状。颜色呈灰白色、灰绿色、翠绿色、紫色或黄色等, 玻璃光泽, 条痕无色。硬度为 6.5~7, 密度为 $3.03\sim 3.22\text{g}/\text{cm}^3$ 。锂辉石主要赋存于富锂花岗伟晶岩中, 共生矿物有石英、钠长石、微斜长石等。透明的锂辉石可以作为中档宝石。



图 1-2 锂金属

(引自 360 百科)



图 1-3 锂辉石

锂云母又称“鳞云母”(图 1-4), 化学分子式为 $\text{KLi}_{1.5}\text{Al}_{1.5}[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{F}, \text{OH})_2$, 含 Li_2O 为 1.23%~5.90%, 常含铷、铯等。单斜晶系, 常呈细鳞片状集合体, 淡紫色, 有时黄绿色, 玻璃光泽。锂云母是最常见的锂矿物, 是提炼锂的重要矿物。它是钾和锂的基性铝硅酸盐, 属云母类矿物中的一种。



图 1-4 锂云母

锂云母一般只产在花岗伟晶岩中, 颜色为紫色和粉色, 并可浅至无色, 具有珍珠光泽, 呈短柱体、小薄片集合体或大板状晶体。

1.2 铷(Rb)

铷是银白色轻金属(图 1-5),原子序数为 37,原子密度为 $1.532\text{g}/\text{cm}^3$,熔点为 38.89°C ,沸点为 688°C 。



图 1-5 玻璃管中的金属铷

铷质软,在空气中能自燃,遇水激烈燃烧甚至爆炸,具有较高的正电性和最大的光电效应。铷和铯由于化学性质相近而密切共生,铷与钾的地球化学性质相近,而参与钾矿物的晶格中,一般含在云母与长石中(在锂云母中可高达 4.5%),迄今为止尚未发现铷的独立矿物。目前铷主要从锂云母、铁锂云母、光卤石中提取。

1.3 铯(Cs)

铯是银白色的轻金属(图 1-6),原子序数为 55,原子密度为 $1.879\text{g}/\text{cm}^3$,熔点为 28.5°C ,沸点为 690°C ,其特性与铷相似。

铯除了形成铯榴石矿物外,还参与到锂、铍、钾的矿物晶格中(在红柱石中含量达 3%),有时在伟晶岩的围岩中形成铯云母(含氧化铯 3%~10%)。铯和铷都富集在岩浆作用晚期,尤其是在伟晶作用晚期。

自然界中铯有 3 个独立矿物:铯沸石、铯锰星叶石、铯硼锂矿。

另外,铯在铯榴石和锂云母中含量也较高。

铯沸石 $[\text{Cs}(\text{AlSi}_2\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 是目前已知的含铯最多的矿物,氧化铯含量 $17\% \sim 32\%$,为提取铯和制取铯盐的重要矿石矿物。铯锰星叶石、铯硼锂矿同属铯的矿石矿物,产于花岗岩和伟晶岩中,与锂云母、锂辉石、叶钠长石等共生。



图 1-6 玻璃管中的金属铯

(引自 <https://baike.sogou.com/v206618.htm?ch=ch.bk.innerlink>)

1.4 铍(Be)

铍原子序数为 4,原子密度为 $1.85\text{g}/\text{cm}^3$,熔点为 $1\,284^\circ\text{C}$,沸点为 $2\,970^\circ\text{C}$,属于轻金属。致密的铍呈浅灰色,粉状为深灰色,有良好的耐腐蚀性和高温强度,导热率高,有良好的辐射透过性和对中子慢化、反射及红外线的反射性能。

铍与硅的地球化学性质近似而置换硅氧四面体中的硅。在碱性岩中,铍的含量虽然很高,因其中的钛、锆、稀土的丰度高,碱性环境有利于铍形成络离子,故铍大量分散。在碱性岩浆后期气成热液作用时,由于铍重新聚合,才能形成独立矿物;在花岗岩结晶的早期,铍因缺乏高价的氧离子而很少富集,绿柱石产于钠长石花岗岩、花岗伟晶岩及气成热液矿床的整个形成过程中。

铍矿物有绿柱石 $[\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$ (图 1-7)、硅铍石 $(\text{Be}_2\text{SiO}_4)$ 、铍尖晶石(金绿宝石) $(\text{BeAl}_2\text{O}_4)$ 、日光榴石 $[\text{Mn}_8(\text{BeSiO}_4)_6\text{S}_2]$ 等。

1.5 铌(Nb)和钽(Ta)

铌是银白色金属,原子序数为 41,原子密度为 $8.66\text{g}/\text{cm}^3$,熔点为 $2\,468^\circ\text{C}$,沸点为 $5\,127^\circ\text{C}$ 。钽是深灰色的耐熔金属,原子序数为 73,原子密度为 $17.10\text{g}/\text{cm}^3$,熔点为 $2\,996^\circ\text{C}$,沸点为 $5\,427^\circ\text{C}$ 。铌、钽具有强度高、抗疲劳、抗变形、抗腐蚀、导热、超导、单极导电及吸收



图 1-7 含铍矿物绿柱石

气体等优良特性,广泛应用在电子、宇航、机械工业及原子反应堆中。

铌和钽具有完全相同的外层电子分布,相近的原子半径、离子半径,因而密切共生,并形成极完全类质同象系列(如铌铁矿-钽铁矿族)。二者常与钛、锆、钨、锡、铀、钍等共生,其中铌和钛的关系最为密切。铌和钽虽然密切共生,但因其地球化学性质仍有一定差异,所以其富集机制有所不同,从超基性岩至酸性岩或碱性岩,铌含量渐增,在霞石正长岩中达到最大富集,钽多富集于碱性长石花岗岩中。在花岗岩和伟晶岩中,随着岩浆的演化,钽和铌相对富集而形成矿床。在表生作用中,因钽、铌矿物比重大,抗腐蚀,耐风化等特点,易形成风化壳矿床及各类砂矿矿床。

铌钽矿物有铌铁矿-钽铁矿、钽铁矿-铌铁矿、褐钇铌矿、铌铁金红石、烧绿石、细晶石、锰钽矿、易解石、铌易解石、重钽铁矿等。

铌铁矿-钽铁矿 $[(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6]$ 是一种复杂的氧化物矿物(图 1-8),褐黑色至铁黑色(铌钽矿和钽钽矿颜色较浅),半金属至金属光泽,半透明至不透明,硬度为 4.2(铌铁矿)~7(钽钽矿),相对密度为 5.36~8.17,平行解理,贝壳状断口。

烧绿石($\text{CaNb}_2\text{O}_6\text{F}$)又称黄绿石(图 1-9),含 Nb_2O_5 达 56%。当铌主要被钽置换时,则成为细晶石。常含钽、稀土元素、铀等。等轴晶系,晶体呈八面体,但多为不规则的粒状或致密块状集合体,褐色或黄绿色,也有少数为黑色,条痕淡褐色或淡黄色,树脂光泽,硬度为 5.0~5.5,贝壳状断口,密度为 4.12~4.36 g/cm^3 。具有强放射性。产于基性岩、伟晶岩或碳酸岩中,往往与锆石、磷灰石、钙钛矿等共生,是提取稀土元素、铌、钽及放射性元素的重要矿物原料。



图 1-8 铌钽铁矿
(中国地质博物馆馆藏)



图 1-9 烧绿石

(引自 <https://baike.baidu.com/item/%E7%83%A7%E7%BB%BF%E7%9F%B3>)

1.6 锆(Zr)

锆分为银灰色致密状及深灰色至黑色的粉末状两种,锆的原子序数为 40,原子密度为 6.5 g/cm^3 ,熔点为 1 850℃,沸点为 3 578℃。锆耐高温,抗腐蚀,易加工,机械加工性能好。提取锆的主要矿物有锆石(图 1-10)、铪锆石等。



图 1-10 锆石晶体

1.7 铪(Hf)

铪是光亮的银白色金属(图 1-11),原子序数为 72,原子密度为 $13.31\text{g}/\text{cm}^3$,熔点为 $2\,150^\circ\text{C}$,沸点为 $4\,602^\circ\text{C}$ 。纯铪具可塑性、易加工、耐高温抗腐蚀的特点,是原子能工业的重要材料。

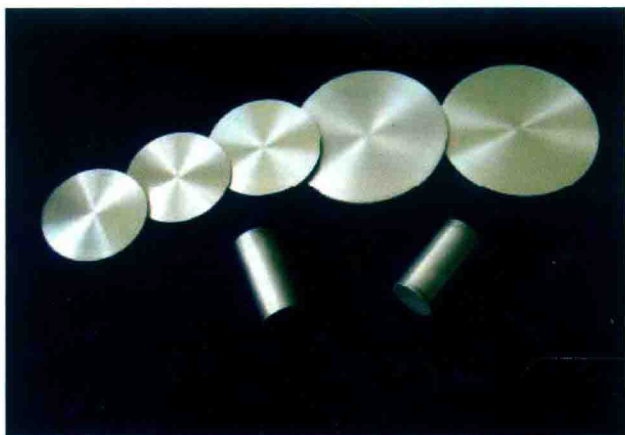


图 1-11 高纯度铪

铈和锆因具有完全相同的外层电子结构,相近的原子半径、离子半径、氧化价而密切共生。在自然界中,锆主要形成独立矿物而很少分散,而铈却很少形成独立矿物,多分散在锆矿物内。在花岗岩中,锆、铈形成锆石及其变种。在花岗伟晶岩中,锆和铈也较富集,尤其是铈,在花岗伟晶岩结晶的晚期可形成富铈锆石,甚至铈锆石。无论在花岗岩或花岗伟晶岩矿床中,从早期向晚期演化时,随着铈的含量逐渐增高,锆铈比值逐渐降低。在表生作用中,锆石和斜锆石因耐风化而常形成风化壳矿床和各种砂矿矿床。

1.8 锶(Sr)

金属锶呈银白色(图 1-12),原子序数为 38,原子密度为 $2.54\text{g}/\text{cm}^3$,熔点为 769°C ,沸点为 1384°C 。性质活泼,锶在自然界中不能以单质形态存在,只能以化合物形式出现。提取锶的主要矿物有天青石(SrSO_4)(图 1-13)、菱锶矿(SrCO_3)。



图 1-12 金属锶



图 1-13 含铈矿物天青石

2

稀有金属的“前世今生”

2.1 稀有金属的最早发现

关于稀有元素的发现可以回溯到 18 世纪中期,最早被发现的稀有元素是锆、铍等元素,其他大部分稀有金属元素是在 19 世纪被发现的。

1789 年,人类历史上首先发现的稀有元素矿物是波斯的锆石;到了 1802 年,在瑞典发现钽铁矿。

1817 年,瑞典化学家阿尔费特逊(Johan August Arfwedson)(图 2-1)在其老师贝齐里乌斯(Jöns Jakob Berzelius)的实验室分析一种矿石时,发现了锂元素的存在,定名为“Lithium”。汉语据其首字节的发音,将其翻译为“锂”。1923 年,德国金属公司(Metallgesellschaft AG),采用电解氯化锂和氯化钾的混合液工艺生产。从此,锂实现商业化生产。



图 2-1 阿尔费特逊肖像(1792—1841 年)
(引自《重要矿产资源调查计划——锂的发现和
应用:200 年大事记》,李效广)