

稀有元素矿床地质

第 3 輯

稀 土 元 素 及 其 矿 床

〔苏联〕A.И. 金兹堡 主編

宁 河 译

中国工业出版社

稀有元素矿床地质

第二版

周志尧 周乃基 主编

（地质部地质研究所编）

地质出版社

（北京地质研究所编）

56.5715
352
3

苏联地质保矿部全苏矿物原料研究所

稀有元素矿床地质

第 3 輯

稀土元素及其矿床

А. И. 金 茲 堡 Л. Н. 茹拉夫列娃 著
〔苏联〕 И. Б. 伊凡諾夫 В. В. 謝尔宾納
宁 河 譯 高书平 校

中国工业出版社

本輯中介紹了稀土元素的特性及其應用範圍、這些元素在國外的生產情況、這一族中各個元素的主要礦物的特徵、稀土元素在不同地質環境中的性狀，以及稀土元素礦床的最重要的成因類型。

本書對於從事稀土元素礦床普查勘探的地質人員和有關研究人員有一定參考價值，也可供地質院校師生參考。

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ И ОХРАНЫ НЕДР СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ (ВИМС)

А. И. Гинзбург, Л. Н. Журавлева,
И. Б. Иванов, В. В. Шербина

ГЕОЛОГИЯ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

выпуск 3

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
И ИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Госгеолтехиздат Москва 1959

* * *

稀有元素矿床地质

第 3 輯

稀土元素及其矿床

宁 河 譯 高书平 校

*

地質部地質書刊編輯部編輯（北京西四羊市大街地質部院內）

中國工業出版社出版（北京德勝門外大街10號）

北京市書刊出版業營業許可証出字第110號

中國工業出版社第四印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行·各地新華書店經售

*

開本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印張 $4\frac{1}{8}$ ·字數92,000

1965年3月北京第一版·1965年3月北京第一次印刷

印數0001—3,310·定價（科六）0.65元

*

統一書號：15165·3457（地質-297）

編輯委員會

A. И. 金茲堡 (主任編輯)

И. И. 馬雷謝夫, Г. Г. 羅季昂諾夫, И. С. 斯捷帕諾夫, П. А. 特
羅哈切夫, В. П. 法古托夫, Н. А. 赫魯紹夫, Ю. Л. 切爾諾斯維托
夫, И. В. 什曼年科夫, В. В. 謝爾賓納, М. А. 埃依格列斯

本輯編輯 A. И. 金茲堡, В. П. 法古托夫

目 录

原 序	4
一、有关稀土元素的基本資料 (И. Б. 伊凡諾夫)	5
二、稀土元素的工业用途 (Л. Н. 茹拉夫列娃)	14
三、稀土元素的生产 and 消費 (Л. Н. 茹拉夫列娃)	24
四、稀土元素的分布 (И. Б. 伊凡諾夫)	30
五、稀土元素矿物 (И. Б. 伊凡諾夫)	33
六、稀土元素分离的地球化学原理 (В. В. 謝爾賓納)	53
七、稀土元素矿床的成因类型 (А. И. 金茲堡, Л. Н. 茹拉夫列娃)	66
結束語 (А. И. 金茲堡)	111
参考文献 (Л. В. 契爾內舍娃)	117

07786

原 序

每年都有新的稀有元素得到工业利用。

在工业上开始广泛利用并引起許多生产部門的技术革命的一些稀有元素中包括稀土族元素。

近代工业对所有稀土元素的需要量都很大。該族的各个元素各有其专门的应用領域，并且在工业上的需要量也不同。因此，目前地质工作者的重要任务是为稀土族的每一种元素建立原料基地。为了解决这个问题，必須闡明：哪些矿物中聚集的稀土元素最多，在自然界中它們进行地球化学分离的原因，哪几种成因类型的矿床对提取各族稀土元素最有远景，到何处去寻找这些对現代工业极为重要的元素的聚集地？遺憾的是文献中对这些问题談得很少。而不解决这些问题就不能正确地进行稀土元素的找矿工作，因此我們在“稀有元素矿床地质”这套书的这一册中綜合了有关稀土元素矿物及其矿床的实际資料。

这一册的基本任务是向广大的地质工作者介紹稀土元素的特性及其应用范围、这些元素在国外的生产情况、这一族中各种元素的主要矿物的特征、稀土元素在不同地质环境中的性状，以及稀土元素矿床最重要的成因类型。

一、有关稀土元素的基本資料

发现和研究稀土元素的历史已有150多年了。加多林(Гадолин)于1794年首次研究了 иттербит(Ytterbite, 中文譯为硅铍钇矿)这一矿物[后来改称 гадолинит(gadolinite, 中文亦譯为硅铍钇矿)], 并在其中发现了“钇土”。接着于1803年由“氟碳铈重石”(Тяжелый Камень Бастнеза)[后来叫做 Церит(cerite, 中文譯为硅铈石)]中分析出了“铈土”。过了差不多40年, 才将钇土分解为钇、铈和铈的氧化物, 将铈土分解成了镧、铈和迪迪姆^①(Диديم)的氧化物。

光谱分析的发明和应用(研究稀土元素时也应用它), 为查明新的元素提供了可能性。1890年在稀土族元素中已知有13种元素, 到了1905年就增加到了15种。

1913年发明伦琴射线光谱法以后, 就有了确定尚未发现的稀土元素的可能性的数目。当时仅有原子序数为61的这一元素尚

元 素	发现和分析出的年代	元 素	发现和分析出的年代
Ce	1825 ^①	Tu	1879
Y	1828 ^①	Gd	1880
Tb	1834	Pr	1885 ^①
La	1839	Nd	1885 ^①
Er	1843	Dy	1886—1907 ^①
Yb	1878	Eu	1896—1901 ^①
Sm	1879—1880 ^①	Lu	1905—1907 ^①
Ho	1879	Pm	1947

① 由稀土族元素中分析出该元素的年代。

① 正如后来所查明的, 迪迪姆乃是镧、铈、钕和钐的化合物的混合物。

未发现，后来于 1947 年发现了该元素。

稀土族元素通常包括镧系和钇，镧系有 15 种元素，属于门捷列夫周期系的第三族，原子序数从 57 到 71，包括：镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕、钆、铽、镱、镱、镱、镱，它们位于门捷列夫周期表的一个格子里，在钪与铅之间。

钷在自然界见不到，只能用人工的方法取得。

对稀土元素的复杂的光谱和磁性的研究表明，它们的原子在结构上仅内部电子层彼此有所区别；而外部价电子层的结构（化学性质主要取决于外部价电子层）对于该族的所有元素都是相同的。所有的稀土元素由于结构相似，具有极相近的化学性质。

表 1 中列有稀土元素电子壳的结构。离子半径取自 V.M. 戈尔德施密特的资料。

从表中可以看出，稀土族元素的元素之间的差别仅仅在于电子壳 N（轨道 4f）的结构。

根据 V.M. 戈尔德施密特的资料，由伦琴射线研究算得的稀土元素氧化物的克分子体积，随着元素原子序数的增大而减小。此外，当原子序数增大时，离子半径并不增大，正如同周期系垂直族中所有其它元素一样，而是大致保持不变，甚至稍微减小（由 La^{3+} 的离子半径 $1.22 \text{ \AA}$ 减小到 Lu^{3+} 的 $0.99 \text{ \AA}$ ）。这种现象称做“镧系收缩”，正因为如此，才使得稀土元素之间具有极密切的关系。

除了镧系以外，在周期系的第三族还有两个在性质上与稀土元素相近的元素：钪和钇。但是镧、铈、钐、铕和钇这样一些稀土元素在岩石和矿物中总是一起出现，而钪则由于离子半径小得多（ $0.83 \text{ \AA}$ ）以及它在性质上与镁相近，所以虽然也常常与钇一起见到，但它具有自己特有的地球化学特征。

在老的分析化学著作中往往把钪也列入稀土族元素中。钪的化学性质与稀土元素有某些接近，但在地球化学方面则有显著的差别。同样必须指出，钪、钇和钪的内电子壳的配置与镧系不同

表 1 稀土元素电子壳结构

原子序数	元素名称	符 号	原子量	离子半径 (Å)	氧化物 的克分 子体积	各 电 子 层 上 的 电 子 分 布															
						K	L		M			N				O		P			
							1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s		5p	5d	6s
57	镧	La	138.92	1.22	50.28	2	2	6	2	6	10	2	6	10	0	2	6	1	2		
58	铈	Ce	140.13	1.18	47.89	2	2	6	2	6	10	2	6	10	1	2	6	1	2		
59	镨	Pr	140.92	1.16	46.65	2	2	6	2	6	10	2	6	10	2	2	6	1	2		
60	钕	Nd	144.27	1.15	46.55	2	2	6	2	6	10	2	6	10	3	2	6	1	2		
61	钐	Pm	(145)	—	—	2	2	6	2	6	10	2	6	10	4	2	6	1	2		
62	铕	Sm	150.43	1.13	48.38	2	2	6	2	6	10	2	6	10	5	2	6	1	2		
63	钆	Eu	152.00	1.13	48.28	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6	1	2		
64	铈	Gd	156.9	1.11	47.58	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6	1	2		
65	铽	Tb	159.2	1.09	46.38	2	2	6	2	6	10	2	6	10	8	2	6	1	2		
66	镱	Dy	162.46	1.07	45.49	2	2	6	2	6	10	2	6	10	9	2	6	1	2		
67	铈	Ho	164.94	1.05	44.89	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6	1	2		
68	铒	Er	167.2	1.04	44.38	2	2	6	2	6	10	2	6	10	11	2	6	1	2		
69	铥	Tu	169.4	1.04	44.11	2	2	6	2	6	10	2	6	10	12	2	6	1	2		
70	镱	Yb	173.04	1.00	42.50	2	2	6	2	6	10	2	6	10	10	2	6	1	2		
71	镱	Lu	174.99	0.99	42.25	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1	2		
39	钇	Y	88.92	1.06	45.13	2	2	6	2	6	10	2	6	1	0	2					

(鈳、釷和鈾在 $4f$ 軌道上沒有电子)。

因此，現在列为稀土元素的有鐳系(15种元素)和性质与它們极为相近、經常与它們一起見到的釷。

“稀土元素”(Terra Rara—TR)这个名称是历史上形成的，大多数学者用这个名詞时仅仅是为了称呼这族元素，并没有把这个名称同这些元素在自然界分布的多少联系起来。

在分析化学中整个鐳系元素按其性质通常分为两族，其区别是族的盐类在硫酸鈉或硫酸鉀的飽和溶液中的溶解度不同。

(1) “鈾土”亚族——从鐳到鎢諸元素的复硫酸盐，这种盐类不溶于硫酸鉀或硫酸鈉的飽和溶液中；

(2) “釷土”亚族——从釷到鎢諸元素的复硫酸盐，这种盐类溶于碱金属元素硫酸盐过剩的溶液中。

化学上把这两个亚族的界綫划在鎢与釷之間，但从物理学的观点(在 $4f$ 层上区别出平行的和不平行的电子自轉)来看，界綫应划在釷与鈾之間。

矿物学和地球化学資料証实，这样划分鈾族和釷族的界綫是对的。虽然釷在主要的釷矿物(磷釷矿)和主要的鈾矿物(独居石)中都有，但它对独居石类型的矿物更有代表性。鎢也应当属于鈾族，因为它主要是存在于鈾矿物中。

近来許多学者[穆拉塔(Murata)、罗泽(Rose)、卡伦(Karron)，1953年；謝苗諾夫(Семенов)，1958年]建議將鈾族和釷族元素更詳細地分为亚族。如K. 穆拉塔、H. 罗泽和 M. 卡伦[1953, 1957]根据独居石中各种稀土元素含量間的关系，建議將鈾族划为两个亚族：鐳亚族(La, Ce, Pr)和釷亚族(Nd, Sm, Er, Gd)。E. И. 謝苗諾夫[1958]認為这种划法不合理，他建議以偶数元素为主导划分为成对的元素亚族。如果采用这种划法，則稀土族元素的分类可以表示如下：

鈾族 $\left\{ \begin{array}{l} \text{鈾亚族 (Ce, La)} \\ \text{釷亚族 (Nd, Pr)} \end{array} \right.$

鈰族	{	鈰亞族 (Sm, Eu)
		釓亞族 (Gd, Tb)
釔族	{	鐳亞族 (Dy, Y, Ho)
		鉕亞族 (Er, Tu)
		鐿亞族 (Yb, Lu)

稀土元素的物理性质

稀土金属的物理性质至今研究得尚不够。这是由于純稀土金属的提取有很大困难的緣故。表 2 中列出了純稀土金属的某些物理常数。

关于稀土金属机械性能的准确資料还没有。有意义的是：各种金属的机械性能显然是极不一样的：例如，鐳和鈰是柔軟的、有延展性的，鐳和釓具有較高的硬度，而鈰可达到鋼的硬度。可見，稀土金属随着原子序数的增大，硬度有变大的趋势。

所有的稀土金属在室温下都是順磁性的。已經开始的、在低温下研究稀土金属物理性质的工作，看来在实用上是极为重要的。

鈰族金属的电阻率大致是 $60-89 \times 10^6$ 欧姆·厘米。稀土金属的原子热容量在 0° 到 100° 間为 $6.2-6.5$ 卡/克原子，在 253 到 -196° 間为 $4.4-4.6$ 卡/克原子。

金属鐳在空气中很快就发生变化。甚至一个粗的鐳金属棒经过几个星期就变成粉末。鈰在空气中覆有一层厚壳，具有特別显著的发火性能（摩擦或打击时便产生火花，因此可用于打火机和許多仪器中），但純淨光亮的金属不具发火性能。

稀土族金属中間的几种金属腐蚀的速度最小：鈰和釓經数月仍可保持光亮的表面。接近稀土金属系列末尾的金属，腐蚀的性能则又趋于增大。

稀土元素的化学性质

稀土元素——金属在游离状态下在冷时分解水很慢，加热时

表 2 純稀土金屬的某些物理常數

元 素	a_0 (Å)	c_0 (Å)	晶 格 類 型	原 子 半 徑 (Å)	比 重 (克/厘米 ³)	熔 點 (°C)	沸 點 (°C)	熱中子吸收截面 (單位巴恩) ($\sigma \cdot 10^{-24}$ 厘米 ²)
α -鐳	3.754	6.063	六方	1.870	6.194	920 $\pm$ 5	4515	8.9
β -鐳	5.284		面心立方體	1.872	6.180			
α -銻	3.65	5.96	六方	1.81	6.768	804 $\pm$ 5	3600	0.70
β -銻	5.140		面心立方體	1.817	6.810			
α -鐮	3.662	5.908	六方	1.824	6.776	935 $\pm$ 5	3400	11.2
β -鐮	5.151		面心立方體	1.821	6.805			
釹	3.650	5.890	六方	1.818	7.007	1024 $\pm$ 5	3300	43.2
釷	8.996	?	斜方	?	7.540	1052 $\pm$ 5	1900	8900
鈾	4.573	?	體心立方體	2.042	5.166	900	1700	4500
鈾	3.622	5.748	六方	1.794	7.948	1350 $\pm$ 20	3000	44000
鈾	3.585	5.664	六方	1.773	8.332	1400—1500	2800	44
鈾	3.578	5.648	六方	1.769	8.562	1475—1500	2600	1200
鈾	3.557	5.620	六方	1.759	8.764	1475—1525	2700	64.3
鈾	3.532	5.589	六方	1.748	9.164	1475—1525	2600	166
鈾	3.523	5.564	六方	1.737	9.740	1530—1650	2400	188
鈾	5.468	?	面心立方體	1.933	7.010	824 $\pm$ 5	1800	90
鈾	3.509	5.559	六方	1.737	9.740	1650—1750	3500	?
鈾	3.663	5.814	六方	1.814	4.84	1475—1525	3500	30

注: α 和 β —元素的不同異形體。

則較快。它們很活潑，能直接與氧（常溫下）、氫（加熱至 200° 以上）、氮（約 800° ）、硫、磷及其他一些非金屬發生作用；容易與大多數金屬熔成合金，同時有許多合金都具有發火性能。

稀土元素在其化合物中一般是三價的。它們形成 R_2O_3 型的氧化物，而鈾、鎢和錒則還能形成更高價的氧化物： CeO_2 、 Pr_6O_{11} 和 Tb_4O_7 。 Eu^{3+} 、 Yb^{3+} 和 Sm^{3+} 離子在還原條件下轉變為 Eu^{2+} 、 Yb^{2+} 和 Sm^{2+} 離子，形成不同穩定性的鹽類。

某些稀土元素之所以除了三價以外還有其他的價，與其原子結構有關係。

與氧化物 R_2O_3 相對應的 $R(OH)_3$ 型的水化物，是所有三價元素氫氧化物中最強的鹼。按鹼度它們介於 $Mg(OH)_2$ 和 $Al(OH)_3$ 之間。三價稀土元素（以及四價的鈾）氫氧化物的鹼性，隨原子序數的增大而逐漸減小，這是由於這些元素的電離勢逐漸增大和離子容積減小的原故。稀土元素容易與鈉、鉀、鋁形成複鹽（複硝酸鹽和複硫酸鹽），與有機羧酸和含氮化合物形成絡合物，它們經常是結晶良好的，其溶解度或強度有某些差異。這一性質可被用來分離稀土元素。

稀土元素的同位素

在表 3 中列出的是稀土元素的穩定的、放射性的和某些人工提取的同位素。各同位素的分布以百分數表示，且總數量為 100%。星號表示在自然界中可以見到的放射性同位素。

如上所述，鉕在自然界中是見不到的。它是在核子反應堆中從鈾的裂變物中分離出來的。近年來的工作[維克利 (Vickery), 1953] 取得了一些吸收光譜以及電弧和火花光譜，從這些光譜得知，鉕和其它鐳系元素在化學和物理性質上不應當有差別。

最近作了根據稀土元素同位素對 ($Sm^{147} \rightarrow Nd^{143}$, $La^{138} \rightarrow Ce^{138}$, $Lu^{176} \rightarrow Yb^{176}$) 確定礦物絕對年齡的嘗試。如，摩爾霍蘭德 [Mulholland, 1952] 曾提出，同位素 Nd^{144} 可能是放射性的 (активный),

表 3 稀土元素的同位素

元素及其原子序数	同 位 素	自然界混合物 中的含量 %	放射性同位素的 半衰期
镧 ₅₇	*La ¹³⁸ La ¹³⁹	0.089 99.911	7 × 10 ¹⁰ 年
铈 ₅₈	Ce ¹³⁶ Ce ¹³⁸ Ce ¹⁴⁰ Ce ¹⁴²	0.193 0.250 88.43 11.07	
镨 ₅₉	Pr ¹⁴¹	100	未确定,但在4 × 10 ¹⁵ 年以上
钕 ₆₀	Nd ¹⁴² Nd ¹⁴³ Nd ¹⁴⁴ Nd ¹⁴⁵ Nd ¹⁴⁶ Nd ¹⁴⁸ Nd ¹⁵⁰	27.13 12.20 23.87 8.30 17.18 5.12 5.60	
钐 ₆₁	Pm ¹⁴¹⁻¹⁵⁶ (人工的)	—	从30年到零点几秒
铕 ₆₂	Sm ¹⁴⁴ *Sm ¹⁴⁷ Sm ¹⁴⁸ Sm ¹⁴⁹ Sm ¹⁵⁰ Sm ¹⁵² Sm ¹⁵⁴	3.16 15.07 11.27 13.84 7.47 26.63 22.53	6.7 × 10 ¹¹ 年
钆 ₆₃	Eu ¹⁵¹ Eu ¹⁵³	47.77 52.23	
铈 ₆₄	Gd ¹⁵² Gd ¹⁵⁴ Gd ¹⁵⁵ Gd ¹⁵⁶ Gd ¹⁵⁷ Gd ¹⁵⁸ Gd ¹⁶⁰	0.20 2.15 14.73 20.47 15.68 24.87 21.90	
铽 ₆₅	Tb ¹⁵⁹	100	
镱 ₆₆	Dy ¹⁵⁶ Dy ¹⁵⁸ Dy ¹⁶⁰ Dy ¹⁶¹ Dy ¹⁶² Dy ¹⁶³ Dy ¹⁶⁴	0.0524 0.0902 2.294 18.88 25.53 24.97 28.18	

續表 3

元素及其原子序数	同 位 素	自然界混合物 中的含量 %	放射性同位素的 半衰期
釹 ₆₇	Ho ¹⁶⁵	100	
鉕 ₆₈	Er ¹⁶²	0.136	1.1分
	*Er ¹⁶⁴	1.56	
	Er ¹⁶⁶	33.41	
	Er ¹⁶⁷	22.94	
	Er ¹⁶⁸	27.07	
	Er ¹⁷⁰	14.88	
鈳 ₆₉	Tu ¹⁶³	100	
鐿 ₇₀	Yb ¹⁶⁸	0.140	
	Yb ¹⁷⁰	3.034	
	Yb ¹⁷¹	14.34	
	Yb ¹⁷²	21.88	
	Yb ¹⁷³	16.18	
	Yb ¹⁷⁴	31.77	
鐿 ₇₁	Lu ¹⁷⁵	97.40	2.4 × 10 ¹⁴ 年
	*Lu ¹⁷⁶	2.60	
釷 ₃₉	Y ⁸⁹	100	

分裂时形成Ce¹⁴⁰。瓦尔[Whal, 1942]和皮乔托[Picciotto, 1949]①根据Nd¹⁴³乃是Sm¹⁴⁷分裂的产物(Nd¹⁴³/Sm¹⁴⁷)这一点, 曾提出测定古矿物(如褐帘石、磷灰石、榍石)年代的釵法。可以根据Ce¹³⁸/La¹³⁸和Ba¹³⁸/La¹³⁸的比例测定相应矿物的年代, 但这种方法甚至尚未达到实验研究的阶段。可以根据Yb¹⁷⁶/Lu¹⁷⁶的比例(K俘获)测定富含鐿的古矿物的年龄。

計算Sm¹⁴⁷分裂时产生的放射性热及其对地球热平衡的影响, 乃是一个极为有趣的例子[兰卡馬, 1956]。一克釵在一年中放出 342.5×10^6 卡·克⁻¹热。在花岗岩中釵的平均含量为17.8克/吨, 一克花岗岩中这个数量的釵所产生的热, 一年总共只有 0.006×10^{-6} 卡, 因此对地球的热平衡毫无意义。

① K. 兰卡馬的“地质学中的同位素”(1956)一书中有上述学者的引文。

二、稀土元素的工业用途

稀土元素长期以来被認為是很稀少的东西，沒有得到广泛的实际应用。然而在 19 世紀末开始应用 稀土元素，1885 年巨大的巴西独居石砂矿首次投入开采，从中提取釷和鈾，将少量用于煤气灯紗罩、煤气灯、煤油灯和酒精灯灯口的罩子，以增强光亮。

随着供打火机使用的打火石生产的发展稀土元素开始較广泛地被应用，这种打火石是由鉄鈾发火合金做成的。这种合金也用于曳光枪弹和砲弹以及弧光灯的熾热碳弧上。

稀土元素在工业中的应用在很长时期內都是极为有限的，仅仅在最近 25 年內它們才被 較广泛地用于各个生产部門，首先是用于黑色和有色冶金工业、玻璃和陶瓷业中。

1950 年以后，稀土金属在工业上的应用特別迫切起来，在許多生产部門引起了技术革命。出現了新的应用领域：原子和噴气技术、电子学、无綫电工程、电工技术。

有許多著作談到了稀土金属在工业中的应用問題。近年来出版了有关稀土元素合金和化合物（火石合金^①、稀土元素的氟化物和氧化物）在各生产部門应用方面的一些著作，但是有关单个純元素的应用的资料，在文献中很少。这首先是因为它們在工业中应用得不多，主要是由于获取并提純每一单个的稀土元素很困难。

稀土元素在原料中共同存在，它們的物理和化学性质相近，这使得获取每一种純的元素非常困难，需要繁重而不經濟的操作（分离結晶法和分离沉淀法，此法要經過成千次的再結晶作用；

① 火石合金(Машметалл)——把熔化了的稀土元素 氟化物电解获得的金属混合物。

热分解硝酸盐，汞齐化；氧化和还原反应；用有机溶剂提取，等等）。

最近为了提取稀土金属（純度达 99.99%），成功地应用了一种新颖的、具体生产問題較容易解决、且比較快的离子交换法^①。例如在美国已有具 100 个离子交换管的設備在进行工作，这些离子交换管甚至能把最“稀少”的稀土金属分离到工业数量，純度达 99.99% [林德賽 (Lindsay), 1956]。

目前正大規模地进行研究稀土族元素中每一种元素的性质、提取和应用純金属或其硫化物、碳化物、硅化物、硼化物、氮化物和氢化物的巨大工作。然而直到現在为止，許多新的应用領域的研究工作仅仅还停留在實驗室阶段，因为大多数稀土元素还很昂貴。

稀土元素的特殊性质使它們广泛地用于現代的最新技术中。由于这些特性而制造了新的材料：在物理-机械指标高时使用的高耐热材料，抗腐蝕材料，在高速下高抗磨損材料；制得了具特殊光学性质的玻璃、发光化合物、优质合金鋼、特輕硬质合金、原子核技术用的材料。所有这些对进一步发展技术无疑将起极重大的作用，并且在最近的将来国民經济将会需要所有的各种稀土金属。

应用稀土金属及其化合物的大家最熟悉、最有远景的是下列部門：原子技术；黑色冶金业；有色冶金业；电工技术、电子学和无綫电工程；化学工业；硅酸盐工业；医学。

原子技术。某些稀土元素 (Gd、Pm、La、Sm、Ce、Tu) 被用

① 离子交换法是以久已知道的物质色层分离 (хроматографическое разделение) 为基础的，方法的过程如下：使含有稀土元素化合物的溶液，通过装有吸收物质（吸附剂）——合成树脂——的管。吸附剂与溶液中的物质相互作用，在管中形成一层一层的被分离出的稀土元素。各层的位置可用許多方法区别，例如用放射性同位素。

如果用溶剂冲洗树脂管，則进入溶液中的不是元素的混合物，而是每种元素循序地，一种接一种地被洗出。这样就可以获得純淨的单种稀土元素 [諾沃謝洛娃 (Новоселова), 1957]。