



稀土企业运作管理

——理论与实践

卢虎生 贺海钧 曹建忠 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

稀土企业运作管理 ——理论与实践

卢虎生 贺海钧 曹建忠 著

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书简要介绍了稀土元素的性质和稀土材料的性能,分析了稀土产业和稀土市场的特点,介绍了下列三个方面的研究成果:(1)针对多阶段萃取形成联产品嵌套,从而无法准确计算产品成本和边际贡献的问题。提出工艺路径的边际贡献概念,产品组合决策模型以及在企业成功应用;(2)通过在时间维度上加大跨度和在产品维度上综合畅销产品和滞销产品,有效说明了“双低效应”的成因;结合市场价格及需求量参数,提出梯度模型;(3)在产品纯度附加成本的基础上,建立了柔性萃取优化模型,并给出算法设计和实现方法。

图书在版编目(CIP)数据

稀土企业运作管理:理论与实践/卢虎生,贺海钧,曹建忠著. —北京:冶金工业出版社,2011.4

ISBN 978-7-5024-5528-6

I. ①稀… II. ①卢… ②贺… ③曹… III. ①稀土金属—有色金属冶金—工业企业管理 IV. ①F407.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038902 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 卿文春 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5528-6

北京兴顺印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011 年 4 月第 1 版,2011 年 4 月第 1 次印刷

148mm×210mm;6 25 印张;182 千字;189 页

22.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

稀土被称为工业味精，是一种战略资源。“中东有石油，中国有稀土”。2010年，稀土再次成为世人瞩目的焦点，我国商务部加强了稀土出口配额管理，引起了日本等国家的关注。国土资源部也决定，继续对稀土矿（稀土氧化物 REO）实行开采总量控制，2010年的控制指标为 89200t，其中轻稀土 77000t，中重稀土 12200t。

稀土是 17 种金属元素的统称，包括 15 个镧系元素和钪、钇。稀土一般以氟碳铈矿、独居石、风化壳淋积型稀土矿的形式共生存在，经选矿、酸法焙烧或碱法焙烧分解，再应用中国科学院徐光宪院士提出的串级萃取技术，分离成单一或成组稀土产品。一套串级萃取设备，可将料液分离成易萃和难萃两个组分，配备多套设备可分离出单一稀土。料液经过多套萃取设备，形成了联产品嵌套，导致联合成本无法分摊，也增加了产品组合决策的难度。本书提出的模型及求解方法，以企业利润最大为目标，在稀土企业中被成功应用。

17 种稀土元素在稀土料液中的配分（各种稀土氧化物占所有稀土氧化物的比例）是基本固定的，但这些元素的相关产品的市场需求量却在不断波动，并时常出现“此消彼长”的情况，从而会形成各种元素的配分和相应的市场份额严重不匹配的局面。这时，稀土企业面临两难选择：若分离量少，则无法满足氧化钬等大需求量元素的订单，丢失了盈利机会；若分离量大，则氧化铈等小需求量元素必然积压，占用流动资金，增加生产成本。本书提出的适量积压模型，可支持产量决策。

纯度是稀土产品的重要指标，也是企业经营决策的重要内容。一方面，若产品纯度低，价格也低，日本等发达国家收购后

进一步提纯，可获取大量利润；另一方面，尽管产品纯度提高后，价格大幅升高，但生产成本和收得率严重恶化，尤其当提取技术水平不足时，也会大量浪费资源。本书提出柔性萃取生产优化决策模型，兼顾利润最大和资源节约两个优化目标。

本书的三方面成果是在科研实践中逐步积累起来的。2004年，我们开始在包钢稀土冶炼厂开展产品组合方面的研究，建立模型并在生产中应用，2005年6月生产利润达到293.35万元，提高了6.92万元。之后逐步扩大合作企业的范围，同时随着企业运作管理水平的不断提高，逐步发现问题，逐步解决问题，逐步形成了本书的4、5、6章。这三章分别回答了三个问题：最优的产品组合，即各种产品的比例；适宜产量，也即适宜的原料投入量，或适宜的滞销产品积压量；最优的产品纯度，以兼顾利润最大和资源利用率两个目标。这三个成果都是在稀土分离企业联产品嵌套（联产品的比例、联产品的产量、联产品的纯度）的背景下产生的，它们构成了企业生产计划的主要决策内容。因此，本书内容具有完整性。本课题组包括卢虎生、贺海钧和曹建忠三位老师，在课题研究过程中，得到北京科技大学高学东教授的精心指导。包头稀土专家和企业家熊家齐、王晓铁、宋洪芳、李振宏、周敬民、袁雨霖、郝宪库、孙喜平等也给予指导和帮助，刘刚、许立勇、田苗、程跃和侯德宝五位研究生参与了课题研究。

本书的编写与出版得到了内蒙古自治区高校人文社会科学重点研究基地“内蒙古产业信息化与产业创新研究中心”，以及包头市科技局“基于技术成熟度和博弈分析的白云鄂博稀土资源综合利用的对策研究”项目的支持，在此表示感谢。

作 者

2010年11月

于内蒙古科技大学

目 录

1 稀土与稀土材料	1
1.1 稀土	1
1.1.1 稀土概述	1
1.1.2 稀土的性质	2
1.2 稀土材料的应用	16
1.2.1 稀土元素特性的材料学应用	16
1.2.2 稀土化合物在材料领域的主要应用	17
参考文献	20
2 流程工业生 产计划模型及应用	21
2.1 流程工业生 产计划模型	21
2.1.1 产品组合模型	21
2.1.2 订单接受策略	26
2.1.3 原料采购模型	33
2.1.4 质量成本与质量控制	38
2.2 在钢铁、石化行业的应用	49
2.2.1 在钢铁行业中的实践	49
2.2.2 在石油化工行业的实践	53
2.3 稀土企业生 产计划运用的现状及问题	54
2.3.1 稀土企业运用生 产计划的现状	54
2.3.2 稀土企业运用生 产计划中存在的问题	55
参考文献	56
3 稀土产业与稀土市场	62
3.1 稀土产业的发展历程	62

· IV · 目 录

3.1.1 2000 年以前	62
3.1.2 2000 年以后	65
3.2 稀土产业相关政策的发展历程	69
3.2.1 国家层面的政策发展历程	69
3.2.2 地方政府层面稀土相关政策的发展历程	80
3.3 市场分析定量研究	82
3.3.1 稀土金属市场价格相关性的定量研究	82
3.3.2 稀土金属化合物市场价格相关性定量研究	89
3.3.3 稀土产品市场价格相关性的原因分析	94
参考文献	95
4 企业产品组合优化决策模型	96
4.1 问题描述及其分析	96
4.1.1 联动现象	96
4.1.2 生产路径	98
4.1.3 产值分摊成本	100
4.2 工艺流程及其模型	102
4.2.1 工艺流程	102
4.2.2 工艺模型	104
4.2.3 质量平衡约束	108
4.3 路径边际贡献	109
4.4 产品组合决策模型	112
4.5 与产值分摊成本法的对比分析	116
参考文献	121
5 综合分析法及其梯度预测模型	122
5.1 双低效应	122
5.2 综合分析法	124
5.2.1 时间维度分析	129
5.2.2 产品维度分析	132
5.3 梯度模型	135

5.3.1 供求指数和利润指数	136
5.3.2 决策策略	137
6 柔性萃取生产优化决策模型	141
6.1 柔性萃取模型的必要性及可行性	141
6.1.1 柔性萃取模型的必要性	141
6.1.2 柔性萃取模型的可行性	144
6.2 柔性萃取模型的建立	146
6.2.1 模型的假设条件	146
6.2.2 生产策略模式	148
6.2.3 生产工艺约束	151
6.3 应用实例	155
6.3.1 计算方法和步骤	155
6.3.2 计算参数和结果	158
参考文献	161
附 录	162

1 稀土与稀土材料

随着科学技术的不断进步，稀土在工业领域的应用越来越广泛，稀土新材料正得到越来越多的重视。本章简要地介绍稀土的相关知识以及稀土材料在不同领域的应用。

1.1 稀土

人类发现稀土元素已经二百多年历史了。1794 年，芬兰化学家加多林（J. Gadolin）在瑞典首都斯德哥尔摩附近的一个叫做伊特比的小镇发现了钇的矿石，这是人类历史上第一次确认稀土元素的存在^[1]。本节首先介绍稀土的基本概念和分类，然后对稀土的性质进行了描述。

1.1.1 稀土概述

稀土是 17 种元素的总称，因此稀土元素的定义与其他的金属元素定义有所不同。这 17 种元素根据其电子层结构又可以进行分类，不过分类的方法并不唯一。

1.1.1.1 稀土元素的定义

根据国际纯粹与应用化学联合会对稀土元素的定义，稀土类元素是门捷列夫元素周期表中第三副族中原子序数从 57 至 71 的 15 个镧系元素，即镧（57）、铈（58）、镨（59）、钕（60）、钷（61）、钐（62）、铕（63）、钆（64）、铽（65）、镱（66）、铥（67）、镱（68）、镱（70）、镱（71），再加上与其电子结构和化学性质相近的铪（21）和钇（39），共计 17 个元素。除铪和铈外，其余 15 个元素往往共生。铪的化学性质与其他 16 种元素有较大的差别，一般在稀土研究、生产和应用中将其单独列出。另外，铈是具有放射性的元素，在自然界中非常少见，通常也不作为一般

的稀土元素进行研究。

1.1.1.2 稀土元素的分类

对于钪以外的 16 种稀土元素, 根据它们的电子层结构以及由此反映的物理、化学性质上的某些差别可以分成两组: 即镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕称为铈组稀土或者轻稀土; 而钆、铽、镱、铒、铕、铈、镨和钐称为钐组稀土或重稀土。根据稀土分离的工艺, 也可以将稀土元素分为三组: 铈组稀土、钐组稀土和钐组稀土; 或者称为轻稀土、中稀土和重稀土。组间的界限随着稀土分离工艺的不同而稍有差别。例如, 按照硫酸复分离工艺, 组间的界限在钐—铕和铕—钐之间; 而按照二磷酸 (P_{204}) 萃取分离工艺, 组间的界限应该在钐—钐和钐—铕。这样, 镧、铈、镨、钕称为轻稀土; 钐、铕、钆称为中稀土; 铽、镱、铒、铕、铈、镨再加上钐称为重稀土; 这是目前最常用的分类方法。

1.1.2 稀土的性质

稀土材料具有许多优异的物理、化学及材料学性能而使其得到极其广泛的应用, 这是与稀土元素所具有的特殊的原子结构紧密相关的^[2]。

1.1.2.1 稀土元素的结构特点与价态

A 稀土元素在周期表中的特殊位置

稀土元素位于元素周期表中Ⅲ_B族, 而且镧及其后的 14 种元素 (57~71 号) 位于周期表的同一格内, 这 15 种元素性质相似, 同属Ⅲ_B族的钪 (39 号) 的原子半径接近镧, 而且钪位于镧系元素离子半径递减顺序的中间, 因而钪和镧系元素的化学性质非常近似。稀土元素所处的这种特殊周期表位置使它们的许多性质 (如电子能级、离子半径等) 只呈现微小而近乎连续的变化, 赋予稀土元素许多优异性能。

B 稀土元素的电子层结构特点

稀土元素原子和离子的电子层结构和半径列于表 1-1。

表 1-1 稀土元素的电子层结构和半径

原子序数	元素名称	元素符号	原子的电子层结构					原子半径/nm	RE ³⁺ 的电子层结构	RE ³⁺ 半径/nm
			4f	5s	5p	5d	6s			
57	镧	La	0	2	6	1	2	0.1879	[Xe] 4f ⁰	0.1061
58	铈	Ce	1	2	6	1	2	0.1824	[Xe] 4f ¹	0.1034
59	镨	Pr	3	2	6		2	0.1828	[Xe] 4f ²	0.1013
60	钕	Nd	4	2	6		2	0.1821	[Xe] 4f ²	0.0995
61	钐	Pm	5	2	6		2	(0.1810)	[Xe] 4f ⁴	(0.098)
62	铕	Sm	6	2	6		2	0.1802	[Xe] 4f ⁵	0.0964
63	镱	Eu	7	2	6		2	0.2042	[Xe] 4f ⁶	0.0950
64	镱	Gd	7	2	6	1	2	0.1802	[Xe] 4f ⁷	0.0938
65	铽	Tb	9	2	6		2	0.1782	[Xe] 4f ⁸	0.0923
66	镝	Dy	10	2	6		2	0.1773	[Xe] 4f ⁹	0.0908
67	钬	Ho	11	2	6		2	0.1766	[Xe] 4f ¹⁰	0.0894
68	铒	Er	12	2	6		2	0.1757	[Xe] 4f ¹¹	0.0881
69	铥	Tm	13	2	6		2	0.1746	[Xe] 4f ¹²	0.0869
70	镱	Yb	14	2	6		2	0.1940	[Xe] 4f ¹³	0.0858
71	镱	Lu	14	2	6	1	2	0.1734	[Xe] 4f ¹⁴	0.0848
			内部填满 18个电子	3d	4s	4p	4d	5s		
21	钪	Sc	1	2				0.1641	[Ar]	0.0680
39	钇	Y	10	2	6	1	2	0.1801	[Kr]	0.0880

从表 1-1 可以看出, 在 17 个稀土元素中, 钪和钇的电子层构型分别为 $[\text{Ar}] 3d^1 4s^2$ 和 $[\text{Kr}] 4d^1 5s^2$ 。镧系元素原子的电子层构型为 $[\text{Xe}] 4f^0 \sim 14 5d^0 \sim 16 s^2$ 。其中, $[\text{Ar}]$ 、 $[\text{Kr}]$ 、 $[\text{Xe}]$ 分别为稀有气体氩、氪、氙的电子层构型。钇与钪原子的外层电子层结构相似, 虽然钪和钇没有 4f 电子, 但其外层有 $(n-1) d^1 ns^2$ 的电子层构型, 因此在化学性质方面与镧系元素相似, 这是将它们划为稀土元素的原因。镧系元素原子电子层结构的特点是: 原子的最外层电子层结构相同 (都是 2 个电子); 次外电子层结构相似; 倒数第 3 层即 4f

轨道上的电子数从0→14，随着原子序数的增加，新增加的电子不填充到最外层或次外层，而是填充到4f内层，又由于4f电子云的弥散如图1-1所示，使它并非全部分布在5s、5p壳层内部。因此，当原子序数增加1时，核电荷增加1，4f电子虽然也增加1，但是由于4f电子只能屏蔽所增加核电荷中的一部分（约85%），而在原子中由于4f电子云的弥散没有离子中大，故屏蔽系数略大。所以当原子序数增加时，外层电子受到有效核电荷的引力实际上是增加了，这种由于引力的增加而引起原子半径或离子半径缩小的现象，叫做“镧系收缩”。镧系收缩导致两个重要的结果：其一是使镧系元素的同族、上一周期的元素铈的三价离子半径位于镧系元素中铈的附近，铈的化学性质与镧系元素非常相似，在天然矿物中铈和镧系元素常共生于同一矿物中，彼此分离困难；其二是使镧系后面各族过渡元素的原子半径和离子半径分别与相应的同一族上面一个元素的原子半径和离子半径极为接近，例如，IV_B族中的Zr⁴⁺（80pm）和Hf⁴⁺（81pm）；V_B族中的Nb⁵⁺（70pm）和Ta⁵⁺（73pm）；VI_B族中的Mo⁶⁺（62pm）和W⁶⁺（62pm）离子半径相近、化学性质相似，结果造成锆与铪、铌与钽、钼与钨这三对元素在分离上的困难。此外，Ⅷ族中的两排铂系元素在性质上的极为相似，也是镧系收缩所带来的影响。

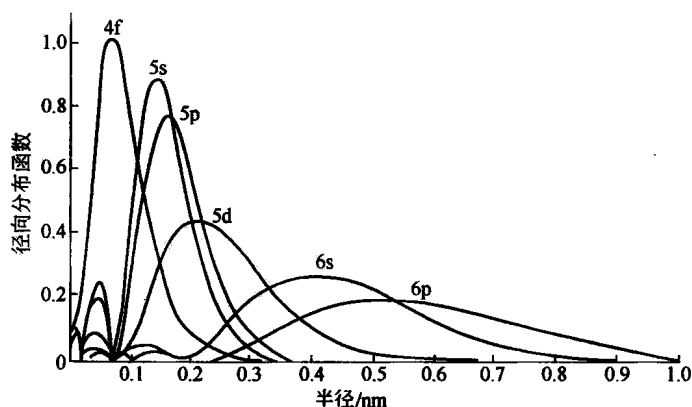


图1-1 4f, 5s, 5p, 5d及6s, 6p电子云的径向分布

由于镧系收缩，镧系元素的离子半径的递减（表 1-1），从而导致镧系元素的性质随原子序数的增大而有规律地递变。例如，使一些配位体与镧系元素离子的配位能力递增；金属离子的碱度随原子序数增大而减弱；氢氧化物开始沉淀的 pH 值渐降等。

C 稀土元素的价态

稀土元素的最外层 5d、6s 电子构型基本相同，在化学反应中易于在 5d、6s 和 4f 亚层失去 3 个电子成为 +3 价态离子，表现出典型的金属性质，它们的金属性仅次于碱金属和碱土金属，比其他金属元素活泼。根据洪特（Hund）规则，在原子或离子的电子结构中，对于同一亚层，当电子分布为全充满、半充满和全空时，电子云的分布呈球形，原子或离子体系比较稳定。因此， La^{3+} ($4f^0$)、 Gd^{3+} ($4f^7$) 和 Lu^{3+} ($4f^{14}$) 比较稳定。在 La^{3+} 之后 Ce^{3+} 比 $4f^0$ 多了一个电子， Gd^{3+} 之后 Tb^{3+} 比 $4f^7$ 多了一个电子，它们有进一步被氧化成 +4 价的倾向。而在 Gd^{3+} 之前 Eu^{3+} 比 $4f^7$ 少了一个电子， Lu^{3+} 之前 Yb^{3+} 比 $4f^{14}$ 少一个电子，它们拥有获得电子而被还原为 +2 价的倾向。图 1-2 为镧系元素价态变化示意图，其横坐标为原子序数，纵坐标线的长短表示价态变化倾向的相对大小。

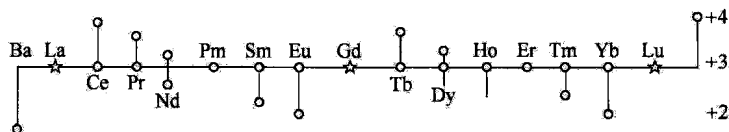


图 1-2 镧系元素价态变化示意图

稀土元素一般都能生成反映Ⅲ_B族元素特征的 +3 价氧化态。但在一定条件下，它们还能生成 +2 价和 +4 价氧化态。由于稀土元素的电子结构以及热力学和动力学因素，其中钐、铕、铈和镱等较其他稀土元素更易呈 +2 价氧化态，而铈、镨、铽和镱等可呈 +4 价氧化态。稀土元素的价态变化对稀土元素之间的分离提取具有重大意义，这是采用氧化还原方法分离它们为单一元素的理论基础，即用氧化方法使 Ce、Tb、Pr 变成四价状态，用还原法使 Eu、Yb、Sm 变

成二价状态,从而增大它们与其他三价稀土元素在性质上的差异以达到分离的目的,如生产上采用的优先氧化除铈及选择性还原提取铈。稀土元素的价态变化在稀土新材料的研究、开发及应用中也有很重要的意义,由于发现不少非三价稀土化合物具有很多特殊性质,可用作半导体、磁性材料、发光材料等。目前,许多有实用价值的二价及四价稀土化合物都被成功制得。随着对非三价稀土元素的深入研究,将会研制出更多更稳定的非三价稀土化合物,这对于稀土分离、稀土新材料开发以及稀土基础理论研究都具有重要意义。

1.1.2.2 稀土元素的晶体结构

常温、常压下稀土金属晶体结构见表1-2。

表1-2 稀土金属的室温晶体结构及有关性能

金属名称	晶体结构	晶格常数/nm		原子半径 /nm	原子体积 /cm ³ ·mol ⁻¹	密度/g·cm ⁻³
		a	c			
钪	密排六方	0.3309	0.5268	0.1641	15.039	2.992
钇	密排六方	0.3648	0.5732	0.1801	19.893	4.472
镧	双密排六方	0.3774	1.2171	0.1879	22.602	6.174
铈	面心立方	0.5161		0.1825	20.696	6.771
镨	双密排六方	0.3672	1.1833	0.1828	20.803	6.782
钕	双密排六方	0.3658	1.1797	0.1821	20.583	7.004
铈	双密排六方	0.365	1.165	0.1811	20.24	7.264
钐	菱形	0.3629	2.6207	0.1804	20.000	7.537
铕	体心立方	0.4583		0.2042	28.979	5.253
钆	密排六方	0.3634	0.5781	0.1801	19.903	7.895
铽	密排六方	0.3606	0.5697	0.1783	19.310	8.234
镱	密排六方	0.3592	0.5650	0.1774	19.004	8.536
铥	密排六方	0.3578	0.5618	0.1166	18.752	8.803
镱	密排六方	0.3559	0.5585	0.1757	18.449	9.051
铪	密排六方	0.3538	0.5554	0.1746	18.124	9.332
铈	面心立方	0.3485		0.1939	24.841	6.977
镱	密排六方	0.3505	0.5549	0.1735	17.779	9.842

稀土金属共有四种晶体结构，如下所述：

(1) 密排六方结构。这是最多的一类，铈、钇以及从钆到镨（镱除外）都是这种结构。原子堆积次序为 ABAB，其结构中的轴比 c/a 为 1.6 左右，如图 1-3 (a) 所示。

(2) 双密排六方结构。镧、镨、钕和钷属这类结构，其原子堆积为 ABACABAC，轴比 c/a 为 3.2 左右，比普通六方结构约大一倍，如图 1-3 (c) 所示。

(3) 面心立方结构。铈和镱是这种结构，其原子堆积次序为 ABCABC，可将其视为六方结构，其 c 轴为一般六方结构的 $1/2$ ，如图 1-3 (b) 所示。

(4) 三重六方结构 (Sm 型)。钐是菱形结构，这是一种特殊的晶体结构，不仅在稀土金属中，就是在元素周期表中也没有第二种元素与之相同。其 c 轴长度比一般六方结构的轴长大 3.5 倍，原子堆积次序为 ABABCBCABABCBC，如图 1-3 (d) 所示。

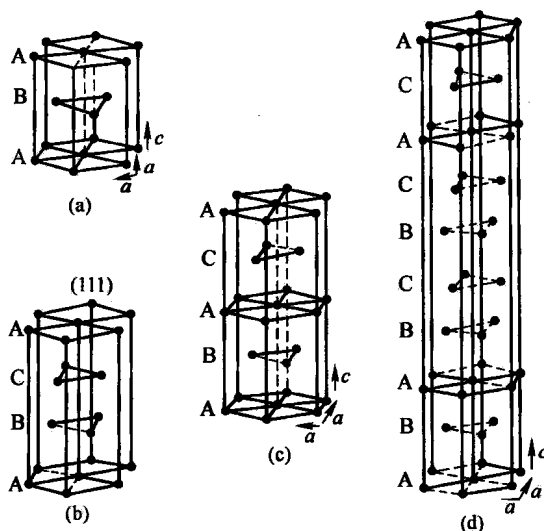


图 1-3 稀土金属的晶体结构

- (a) 普通密排六方结构 (Mg 型); (b) 面心立方结构 (Cu 型);
(c) 双 c 轴密排六方结构 (La 型); (d) 三重六方结构 (Sm 型)

另外, 铕是普通体心立方结构。

1.1.2.3 稀土元素的物理化学性质

A 稀土元素的一般物理性质

稀土元素具有典型的金属性质, 除了镨、钕呈淡黄色外, 其余均为银灰色、有光泽的金属。由于易被氧化, 稀土金属通常呈暗灰色。稀土金属的某些物理性质列于表 1-3。

表 1-3 稀土元素的某些物理性质

稀土元素	相对原子质量	密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	熔点 $^{\circ}\text{C}$	沸点 $^{\circ}\text{C}$	蒸发热 $\Delta H/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$c_p(25^{\circ}\text{C})$ $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	电阻率 (25°C) $\text{}/\Omega \cdot \text{cm}$	电负性	氧化还原电位 ($\text{RE} \rightarrow \text{RE}^{3+} + 3\text{e}^{-}$)	热中子俘获截面/ $\text{b}^{\text{①}}$
Sc	44.96	2.992	1539	2730	338.0	25.5	66×10^{-4}			13
Y	88.91	4.472	1510	2930	424	25.1	53×10^{-4}	1.22	-2.73	1.38
La	138.91	6.174	920	3470	431.2	27.8	57×10^{-4}	1.1	-2.52	9.3
Ce	140.12	6.771	795	3470	467.8	28.8	75×10^{-4}	1.12	-2.48	0.73
Pr	140.91	6.782	935	3130	374.1	27.0	68×10^{-4}	1.13	-2.47	11.6
Nd	144.24	7.004	1024	3030	328.8	30.1	64×10^{-4}	1.14	-2.44	46
Pm	(147)	7.264	1042	3000					-2.42	
Sm	150.35	7.537	1072	1900	220.8	27.1	92×10^{-4}	1.17	-2.41	6500
Eu	151.96	5.253	826	1440	175.8	25.1	81×10^{-4}		-2.41	4500
Gd	157.25	7.895	1312	3000	420.8	46.8	134×10^{-4}	1.20	-2.40	44000
Tb	158.93	8.234	1356	2800	395	27.3	116×10^{-4}		-2.39	44
Dy	162.50	8.536	1407	2600	298.2	28.1	91×10^{-4}	1.22	-2.35	1100
Ho	164.93	8.803	1461	2600	296.4	27.0	94×10^{-4}	1.23	-2.32	64
Er	167.26	9.051	1497	2900	343.2	27.8	86×10^{-4}	1.24	-2.30	116
Tm	168.93	9.332	1545	1730	248.7	27.0	90×10^{-4}	1.25	-2.28	118
Yb	173.04	6.977	824	1430	152.6	25.1	28×10^{-4}		-2.27	36
Lu	174.97	9.842	1652	3330	427.8	27.0	68×10^{-4}	1.27	-2.25	108

① $1\text{b} = 10^{-28} \text{m}^2$ 。

镧系元素物理性质的变化有一定规律, 但是铕和镱明显异常, 这是由于铕和镱的原子体积不仅不随原子序数的增加而减小, 反而

增大很多(表1-2),密度也减小很多(表1-3),这是由于它们的4f亚层的电子处于半充满或全充满状态,电子屏蔽效应好,原子核对6s电子吸引力减小,因此出现原子体积增大、密度减小的现象。稀土金属的硬度不大(表1-5),镧、铈与锡相似,一般为硬度随原子序数的增加而增大(但规律性不是很强)。稀土金属中,铈和镧原子参与金属键的电子数与其他稀土元素不同,这是其许多性质异常的重要原因。

稀土金属的熔点和沸点都较高。其熔点大体上随原子序数的增加而增高,但铈和镧的熔点反而降低。稀土金属的沸点和蒸发热与原子序数的关系是不规则的,除镧、铈不生成汞齐,铈较为困难外,其余稀土金属均易生成汞齐。

钐、钐和铈的热中子俘获截面很大,而铈和铈的热中子俘获截面却很小,见表1-3。

B 稀土元素的电学性质

稀土金属的导电性较低。常温时,稀土金属的电阻率都较高,如表1-3所示。除铈外,常温下稀土金属的电阻率为 $(50 \sim 135) \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$,比铜、铝的电阻率高1~2个数量级,并有正的温度系数。镧非常特别, α -镧在4.6K时和 β -镧在5.85K时出现超导电性。

稀土元素的离子半径较其他元素的大,因此对阴离子的吸引力比较小,加之4f电子被外层的 $5s^2 5p^6$ 电子所屏蔽,难于参加化学键作用,因此稀土元素的化合物大多数是离子键型,它们的导电性能好,可以用电解法制备稀土金属。

C 稀土元素的光学性质

稀土元素具有未充满的4f亚层和4f电子被外层的 $5s^2 5p^6$ 电子屏蔽的特性。除了 $\text{La}^{3+}(4f^0)$ 及 $\text{Lu}^{3+}(4f^{14})$ 外,其余镧系元素的4f电子可在7个4f轨道之间任意排布,从而产生各种光谱项和能级。当4f电子在不同能级之间跃迁时,它们可以吸收或发射从紫外光、可见光到红外光区的各种波长的辐射。无论吸收或发射光谱都给稀土分析,尤其是稀土发光材料的研制和应用提供了依据。

稀土元素的电子能级和谱线要比普通元素丰富得多,稀土元素