

矿物加工工程卓越工程师人才培养项目系列教材

稀土资源开发项目驱动 实践教学教程

主 编 周贺鹏

副主编 艾光华 冯 博 吴彩斌 罗仙平



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

矿物加工工程卓越工程师人才培养项目系列教材

稀土资源开发项目驱动 实践教学教程

主 编 周贺鹏
副主编 艾光华 冯 博 吴彩斌 罗仙平



北京
冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书以稀土矿资源开发为例,围绕“稀土矿石→稀土矿物组成→稀土矿物加工原理和方法→实践与应用”这条主线,结合矿物加工工程专业中“工艺矿物学”、“化学选矿”、“稀土提取技术”、“研究方法实验”、“矿物加工工程设计”等核心课程,构建了以稀土矿资源开发项目驱动为背景下课程教学、实验教学、专业实践等方面的实践教学体系,并提供了实践教学案例。

本书适合作为高等院校矿物加工工程本科生和研究生的实践教学教材,也可适合从事矿物加工技术人员和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

稀土资源开发项目驱动实践教学教程/周贺鹏主编. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 12

矿物加工工程卓越工程师人才培养项目系列教材

ISBN 978-7-5024-7716-5

I. ①稀… II. ①周… III. ①稀土元素矿床—矿产资源开发—教材 IV. ①P618.706.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 315767 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 陈嘉君 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7716-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2017年12月第1版,2017年12月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.25印张; 344千字; 217页

48.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

矿物加工工程卓越工程师人才培养项目系列教材

编 委 会

主 编：邱廷省

编 委：吴彩斌 艾光华 石贵明 夏 青

余新阳 匡敬忠 周贺鹏 方夕辉

陈江安 冯 博 李晓波 邱仙辉

前 言

最早发现的稀土矿物是硅铍钇矿，于1787年由阿仑尼乌斯(C. A. Arrhenius)在瑞典斯德哥尔摩附近的于特比(Ytterby)村发现。稀土具有独特的理化性质，目前已在冶金工业、石油化工、精密陶瓷、特种玻璃、荧光材料、发光材料、永磁材料、超导材料、磁致伸缩材料、储氢材料、医药和农业等方面得到广泛应用。

当前全球开采的稀土矿物主要有氟碳铈矿、独居石和离子型稀土矿等，这三类矿物约占稀土总量的80%以上。我国内蒙古的白云鄂博稀土矿是世界稀土总量最大的稀土矿，属于氟碳铈矿与独居石共生矿；四川的攀西稀土矿和山东的微山稀土矿是单一的氟碳铈矿，属于易选稀土矿，主要产出轻稀土；离子型稀土矿是我国特色的重型稀土资源，主要分布在江西、广东和福建等南方七省区，具有矿点多、分布广、易开采、放射性比度低、中重稀土元素配分高等优点，现已受到国内外的广泛关注。

近年来，随着稀土在材料、能源、通信等高新技术领域的重要性日益凸显，同时我国对稀土资源开采中的环境和生态要求越来越严苛，加之国内稀土应用需求的大幅增长和相应调整出口量，欧美国家重启并迅速加强了对稀土资源的开发和利用工作。如何保持我国在稀土资源开采和冶炼技术上的优势，进一步完善科研、开发和产业格局，是现代矿业开发的发展趋势和必由之路。在此过程中，高校培养具有现代矿业开发精神的矿物加工卓越工程师人才就非常关键。基于这个思想，本书以稀土矿资源开发为例，围绕“稀土矿物→稀土矿物加工原理和方法→实践与应用”这条主线，结合矿物加工工程专业中“工艺矿物学”、“矿物加工学”、“稀土提取技术”、“研究方法实验”、“矿物加工工程设计”等核心课程和认识实习、生产实习、毕业实习、毕业论文、毕业设计

等实践环节，构建了以稀土资源开发项目驱动为背景下课程教学、实验教学、专业实践等方面的实践教学体系，并提供了实践教学案例。

本书由江西理工大学矿物加工工程系周贺鹏、吴彩斌、艾光华、冯博等教师共同编写，全书由周贺鹏统稿、罗仙平审核，研究生胡洁、张永兵、钟志刚等参与了资料的整理和归纳。本书中涉及的有关研究内容先后得到了国家级卓越计划试点专业、国家自然科学基金项目（51404112、51774153）、江西省创新驱动“5511”工程项目（20165BCB18013）、江西省自然科学基金项目（20151BAB216013）等项目的资助，同时获得了国家离子型稀土资源高效开发利用工程技术研究中心、江西省矿业工程重点实验室、江西省矿冶环境污染控制重点实验室的大力支持。在此，向对本书的编写工作给予支持和帮助的单位、个人和参考文献作者表示衷心的感谢！

由于时间和水平有限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2017年10月

目 录

1 稀土资源概况	1
1.1 世界稀土资源分布	1
1.1.1 全球稀土资源储量分布	1
1.1.2 国外稀土资源开发状况	2
1.1.3 全球稀土资源供需情况	4
1.2 我国稀土资源分布	4
1.2.1 我国稀土资源储量分布	4
1.2.2 我国稀土资源开发状况	6
1.2.3 我国稀土资源供需情况	8
1.3 稀土资源选矿方法	8
1.3.1 矿物型稀土选矿方法	8
1.3.2 离子型稀土选矿方法	15
2 稀土资源开发项目驱动下的实践教学体系	23
2.1 实践教学体系构建内容	23
2.2 课程实验教学大纲	24
2.2.1 “工艺矿物学”课程实验教学大纲	24
2.2.2 “化学选矿”课程实验教学大纲	24
2.2.3 “稀土提取技术”课程实验教学大纲	25
2.2.4 研讨式教学内容设计	26
2.3 实习类实践教学大纲	27
2.3.1 “认识实习”实践教学大纲	27
2.3.2 “生产实习”实践教学大纲	27
2.3.3 “毕业实习”实践教学大纲	28
2.4 研究类实践教学大纲	28
2.4.1 “研究方法实验”实践教学大纲	28
2.4.2 “毕业论文”实践教学大纲	29
2.5 设计类实践教学大纲	30
2.5.1 “矿物加工工厂设计”课程教学大纲	30
2.5.2 “毕业设计”实践教学大纲	31
2.6 实践教学体系的考核	31
2.6.1 “课程实验教学”考核	31

2.6.2 “课程设计”考核	32
3 稀土资源开发项目驱动下的实践教学指导书	33
3.1 “工艺矿物学”实践教学指导书	33
3.1.1 稀土矿物的显微镜鉴定	33
3.1.2 稀土矿物解理及夹角的测定	34
3.1.3 油浸法测定稀土矿折射率	35
3.1.4 X射线衍射定性稀土物相分析	35
3.1.5 稀土矿石中稀有矿物定量	36
3.1.6 稀土矿物单体解离度测定	37
3.2 “化学选矿”实践教学指导书	38
3.2.1 稀土矿石孔隙率的测定	38
3.2.2 稀土提取浸出剂种类条件实验	39
3.2.3 稀土提取浸出剂浓度条件实验	40
3.2.4 稀土提取浸出剂流速条件实验	41
3.2.5 稀土提取浸出剂 pH 条件实验	41
3.2.6 稀土提取矿石含水率条件实验	42
3.2.7 稀土提取矿石粒度条件实验	43
3.3 “矿物加工学”实践教学指导书	44
3.3.1 稀土矿石沉降法水力分析	44
3.3.2 稀土矿石摇床分选实验	46
3.3.3 稀土矿石螺旋溜槽选矿实验	47
3.3.4 稀土矿比磁化系数测定	49
3.3.5 稀土矿磁性矿物含量测定	52
3.3.6 稀土矿高梯度磁选实验	54
3.3.7 稀土矿物润湿性的测定	55
3.3.8 稀土矿物捕收剂实验	59
3.3.9 稀土矿物调整剂实验	60
3.3.10 稀土矿物起泡剂性能测定	62
3.3.11 稀土矿伴生矿物浮选实验	63
3.4 “稀土选矿厂设计”实践教学指导书	66
3.4.1 “稀土选矿厂设计”的内容	66
3.4.2 稀土选矿厂设计计算的步骤	67
3.4.3 稀土选矿厂设计总体布置与设备配置	79
3.5 “研究方法实验”实践教学指导书	85
3.5.1 稀土矿石试样的制备及物理性质测定	85
3.5.2 稀土矿石探索性实验	85
3.5.3 稀土矿石磨矿细度实验	86
3.5.4 稀土矿捕收剂种类及用量实验	87

3.5.5	稀土矿调整剂种类及用量实验	88
3.5.6	稀土矿石开路流程实验	89
3.5.7	稀土矿石闭路流程实验	90
3.5.8	实验报告撰写	91
3.6	“认识实习”实践教学指导书	91
3.6.1	“认识实习”的目的与要求	91
3.6.2	“认识实习”内容安排与要求	92
3.6.3	实习注意事项	93
3.6.4	实习成果和成绩评定	93
3.7	“生产实习”实践教学指导书	93
3.7.1	“生产实习”的目的与要求	93
3.7.2	“生产实习”内容安排与要求	94
3.7.3	实习注意事项	96
3.7.4	上交成果和成绩评定	96
3.8	“毕业实习”实践教学指导书	97
3.8.1	“毕业实习”的目的与要求	97
3.8.2	“毕业实习”内容安排与要求	97
3.8.3	注意事项	101
3.8.4	上交成果和成绩评定	101
3.9	“毕业设计”实践教学指导书	101
3.9.1	“毕业设计”目的	101
3.9.2	“毕业设计”一般规定	102
3.9.3	“毕业设计”计算步骤	103
3.10	“毕业论文”实践教学指导书	103
3.10.1	“毕业论文”的目的和类型	103
3.10.2	“毕业论文”的要求	103
3.10.3	“毕业论文”原则	103
3.10.4	“毕业论文”任务及深度	104
3.10.5	“毕业论文”时间安排	104
3.10.6	实验研究论文	104
3.10.7	软件工程类	105
4	稀土资源开发项目驱动实践教学案例	106
4.1	离子型稀土矿研究方法教学案例	106
4.1.1	矿石性质	106
4.1.2	浸出剂种类条件实验	107
4.1.3	浸出剂浓度条件实验	108
4.1.4	浸出剂流速条件实验	108
4.1.5	浸出剂溶液 pH 值条件实验	109

4.1.6	原矿含水率条件实验	110
4.1.7	原矿粒度条件实验	111
4.1.8	矿层高度条件实验	112
4.1.9	离子型稀土矿浸出过程优化调控实验	112
4.1.10	不同电解质离子对铝浸出行为的影响	113
4.1.11	硫酸铵浓度对铝浸出行为的影响	114
4.1.12	浸出剂流速对铝浸出行为的影响	114
4.1.13	浸出剂 pH 值对铝浸出行为的影响	115
4.1.14	碳酸氢铵沉淀稀土的沉淀及结晶过程	116
4.1.15	加料方式对稀土沉淀及结晶过程的影响	118
4.1.16	碳酸氢铵浓度对稀土沉淀及结晶过程和沉淀物粒度的影响	120
4.1.17	搅拌对稀土沉淀及结晶过程和沉淀物外观形貌的影响	120
4.1.18	稀土溶液原始 pH 值对稀土沉淀及结晶过程和沉淀物粒度的影响	123
4.1.19	稀土浓度对稀土沉淀及结晶过程和沉淀物粒度的影响	124
4.1.20	温度对稀土沉淀及结晶过程和沉淀物粒度的影响	125
4.1.21	陈化时间对碳酸稀土结晶过程、外观形貌和粒度的影响	127
4.1.22	杂质离子对稀土沉淀及结晶过程的影响	128
4.2	稀土分析检测方法	133
4.2.1	概述	133
4.2.2	常用标准溶液的配制及标定	137
4.2.3	稀土精矿分析	141
4.2.4	稀土冶金中间控制分析	156
4.2.5	稀土金属及其化合物的分析	166
参考文献		212

1 稀土资源概况

稀土是我国优势矿产资源，包括元素周期表ⅢB族中原子序数为21、39和57~71共17种化学元素，因其具有无法取代的优异磁、光、电性能而广泛应用于冶金、军事、石油化工、玻璃陶瓷、农业工业及新材料等领域，是未来新兴产业发展所必需的关键性战略资源。本章介绍了世界稀土资源的分布、开发及其供需现状，分析了我国稀土资源的储量、开发利用及需求状况，介绍了矿物型和离子型两种稀土资源的赋存状态、基本特征、选矿方法和提取加工技术。

1.1 世界稀土资源分布

1.1.1 全球稀土资源储量分布

稀土元素在地壳中含量分布不均匀，因其富集成可供开采的矿床数量较少，导致已查明的资源量较低，在全球的储量分布也极不均衡。截至2015年，全球稀土矿储量1.3亿吨，储量前三的国家为中国、巴西、澳大利亚，分别占总储量的42.31%、6.92%、2.46%。中国的稀土资源主要赋存于内蒙古包头、四川冕宁、江西赣州、广东、广西和福建等地。内蒙古白云鄂博铁-铌-稀土矿床是中国乃至全球查明资源量最大的矿床，资源储量占全国总量的96%左右，且以轻稀土为主，镧、铈、镨和钕四种元素占98%以上。我国华南地区广泛分布的离子型稀土矿床虽然查明资源总量不高，但其富含极为稀缺的中、重稀土元素，现已成为全球稀土资源的重要组成部分。

美国、澳大利亚、巴西、马来西亚、印度等国家的稀土资源储量也较为丰富，同时独联体国家的稀土资源更为丰富，且主要分布于俄罗斯的科拉半岛和吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦等国家，但其开发利用较晚。美国是全球重要的稀土资源赋存地。截至2011年，美国的稀土储量估计为1300万吨，约占全球总量的11%，且分布地域较广，主要在加利福尼亚、怀俄明、爱达荷和阿拉斯加等12个州。其中加利福尼亚的Mountain Pass是未来几年内除中国之外最重要的稀土矿山，该矿在20世纪60年代至80年代是全球稀土供应的重要产地，但后续因种种原因关闭。截至目前，Mountain Pass已查明的稀土资源REO总量为207万吨，且以轻稀土为主，镧、铈、镨和钕四种元素占稀土总量98.75%。美国估计储量最大的稀土矿床为科罗拉多州的Iron Hill，估计资源量为969.6万吨，但该矿勘查程度较低，开发前景不明朗。印度的稀土储量REO约为310万吨，占全球的比例为2.7%，主要赋存在海滩冲积砂矿的独居石矿物中，据印度原子能部公布的数据，印度独居石资源量达1021亿吨，折合REO总量约613万~663万吨，主要分布在安德拉邦，约占总量的36.5%，其次为泰米尔纳德邦、奥里萨邦和喀拉拉邦，分别占比18.1%、17.8%和13.4%。印度独居石矿以轻稀土为主，其中镧、铈、镨、钕四种元素约占稀土总量的92.5%。

澳大利亚稀土储量 REO 约 160 万吨, 占全球总量的 1.4%。据澳大利亚地学科学局公布的数据, 截至 2010 年底, 澳大利亚经济的证实资源量为 183 万吨, 次经济的证实资源量为 3483 万吨, 推断的资源量为 2419 万吨。另外, 在重砂矿床中有独居石资源量 610 万吨, 折合 REO 总量约 367 万吨, 但这些资源因含有的钽和铀处理成本过高, 因而无法进行有效的经济开发, 被认为是不经济的资源。澳大利亚稀土矿床种类多, 且特色突出, 如西澳州的 Mount Weld 矿床以品位高而著称, 平均品位高达 9.7%; 南澳州的 Olympic Dam 矿床资源量高达 4500 万吨, 但品位过低, 约 0.5%, 目前未进行开发利用。

除上述国家外, 近年来随着稀土勘查力度的不断增加, 加拿大、格陵兰、南非以及东南亚各国目前都有稀土资源重要发现, 在越南也发现了一些较大型的稀土矿床。这些国家的稀土资源量也都在一百万吨以上, 有的达到了上千万吨, 个别甚至超过了一亿吨, 构成了世界稀土资源的主体。中国以外的这些稀土资源可能在短期内无法使全球稀土资源的分布格局发生重大变化, 但由于全球稀土消费量仍处于较低水平, 一旦这些矿床有部分开发投产, 就足以对未来全球稀土的供应格局产生较大影响。

由于稀土资源分布的不均匀性、稀土矿勘探的困难性以及统计周期和统计技术的各不相同, 各个国家所统计到的数据会有所不同。根据中国工业与信息化部 2012 年公布的数据显示, 中国的稀土矿储量占全世界储量的比例已下降到 23%, 俄罗斯占到 19%, 美国占比为 13%。美国稀土资源主要是独居石和氟碳铈矿, 另外还有在分离其他矿物的时候作为副产品而回收的稀土矿物。澳大利亚的稀土资源储量相比于 20 世纪 80 年代的统计数据高出十几倍, 其矿种主要是独居石, 独居石是作为生产金红石和锆英石以及钛铁矿的副产品而加以回收的。印度的稀土资源也主要是独居石, 分布在内陆砂矿和海滨砂矿中。稀土总储量约为 110 万吨, 占世界储量的 1% 左右。巴西是世界上生产稀土的最古老国家, 在 1884 年就开始向德国输出独居石, 也因此一度名扬于世。

1.1.2 国外稀土资源开发状况

随着近年国际稀土市场供应偏紧和价格不断走高, 国外矿业公司纷纷加大了稀土的勘查开发力度。一方面, 原有的停产矿山积极筹措资金争取复产, 如美国的 Mountain Pass; 另一方面, 一些原以其他矿产为主的矿山也开始以稀土作为主要产品来制定勘查和开发计划, 如格陵兰的科瓦内湾 (Kvanefjeld)。这些活动使得全球稀土资源勘查开发领域呈现一派繁荣景象。

据技术金属研究公司 (Technology Metals Research LLC) 统计, 除中国外全球有 31 个稀土开发项目进行到了高级阶段, 部分项目已公布了生产计划, 确定了投产时间。这 31 个项目查明的资源总量 REO 高达 2779 万吨, 如表 1-1 所示。

表 1-1 世界稀土开发项目分布表

序号	国家	项目数/个	资源量 (REO)/t	资源量占比/%
1	澳大利亚	6	3536608	12.72
2	巴西	1	226530	0.82
3	加拿大	11	13014750	46.83
4	格陵兰	2	6759598	24.32

续表 1-1

序号	国家	项目数/个	资源量 (REO)/t	资源量占比/%
5	吉尔吉斯斯坦	1	46608	0.17
6	莫桑比克	1	22555	0.08
7	马拉维	1	107272	0.39
8	瑞典	1	32670	0.12
9	坦桑尼亚	1	85470	0.31
10	美国	4	2987448	10.75
11	南非	2	974920	3.51
	合计	31	27794429	100.00

数据表明,包括加拿大、澳大利亚、格陵兰和美国在内的西方发达国家和地区在未来的稀土资源开发中占据了绝对的主导地位,共计有 23 个项目,资源量高达 2630 万吨,占全部 31 个项目资源总量的 94.62%。其中加拿大无疑将在未来全球稀土供应中占据重要地位。目前加拿大进入高级阶段的项目有 11 个,占有资源量 1300 万吨,占总量的 46.83%。

在国外所有稀土开发项目中,美国的 Mountain Pass 是最有可能及早形成生产供应能力的矿山。20 世纪 60 年代中期至 80 年代,该矿曾是全球最主要的稀土资源供应地,之后受环境保护的影响以及来自中国的廉价资源的冲击,该稀土资源生产每况愈下,1998 年稀土分离工作停止,2002 年采矿和选矿活动停止。Mountain Pass 具有资源储量大、品位高的特点。截至目前,其资源总量(包括测定的、标定的和推断的)REO 约为 207 万吨,平均品位为 6.57%。Mountain Pass 以轻稀土为主,轻稀土(La-Sm)氧化物占稀土氧化物总量的 99.54%,其中氧化钕占 11.7%。

Kvanefjeld 矿是目前国外稀土开发项目中资源量最大的矿床。该矿位于格陵兰南部,是一个稀土、铀和锌共伴生矿床,包括 Kvanefjeld、Steenstrupfjeld、Zone 1 和 Zone 2 四个矿段。截至 2012 年 3 月,仅 Kvanefjeld 和 Zone 2 两个矿段估算有资源量,Kvanefjeld 资源量为 655 万吨,其中标定资源为 477 万吨,推断资源为 178 万吨,平均品位 1.06%; Zone 2 矿段有推断资源量 267 万吨,平均品位 1.10%。两个矿段合计资源量为 922 万吨。该矿重稀土(Eu-Y)含量较高,重稀土氧化物占稀土氧化物 REO 总量的 11.8%,轻稀土占 88.2%;重要元素钕、铈、铽、镝和钇占比分别为 12.9%、0.1%、0.2%、1.1% 和 7.7%。该矿计划于 2017 年投产,REO 产能在 43000 吨/年。该矿不仅产量大,而且还可供应大量更为稀缺的重稀土,因此将在稀土资源供应端占有重要地位。

Thor Lake 稀土矿位于加拿大西北领地的 Thor 湖,由五个矿段组成,是一个由稀土、钽、铌、镓和锆等多种稀有金属共伴生的矿床,其中稀土资源 REO 总量为 430 万吨,平均品位 1.36%,是加拿大资源量最大的矿床。该矿重稀土含量相对较高,达 15.46%,轻稀土占 84.54%。重要元素钕、铈、铽、镝和钇占比也相对较高,分别为 19.2%、0.46%、0.41%、1.81% 和 7.83%。该矿计划于 2017 年投产,REO 产能在 2500 吨/年。尽管重稀土含量较高,但总体产量偏低,如不进行扩产,其对全球稀土资源供应的影响有限。

Mount Weld 位于西澳州,是一个稀土、铌、钽和磷共伴生的矿床。该矿由 Central Landside Deposit 和 Duncan Deposit 两部分构成,REO 品位较高。截至目前,CLD 矿段稀土

资源总量为 145 万吨, 平均品位高达 9.7%; Duncan 矿段资源量较少, 仅 43 万吨, 平均品位为 4.8%。CLD 矿段轻稀土含量高, 达 97.15%, 其中元素钹含量为 18.13%; 重稀土元素仅占 2.75%。Duncan 矿段重稀土含量比 CLD 矿段略高, 约占 10.3%, 轻稀土占 89.7%, 重要元素钹、铈、铽、镨和钇占比分别为 17.89%、0.77%、0.26%、1.27% 和 5.17%。该矿于 2013 年投产, 初始产能在 11000 吨/年, 后续增加到 22000 吨/年, 成为重要的轻稀土供应地。

1.1.3 全球稀土资源供需情况

目前, 世界上对稀土产品需求量最大的国家是日本、美国、法国、韩国等发达国家。首先这些国家的科学技术领先, 像电子、新能源、新材料等新兴领域对稀土产品的需求量较大; 其次, 韩国和日本的国土面积有限, 资源相对匮乏, 他们需要大量的向资源丰富国家进口稀土产品以满足本国发达的电子工业制造业的发展需要, 据统计, 日本目前的稀土资源储备足够其在没有外界供给的情况下使用 50 年。美国的稀土资源占到全球稀土储量的 13%, 但是美国出于对本国环境的保护和其稀土资源战略储备计划, 早在 20 世纪末就停止了对本国稀土资源的开采, 转而是向其他国家进口价格低廉的稀土产品。

由此可见, 中国仍是世界上最大的稀土资源消费国, 消费量约占全世界消费总量的 50%。除此之外, 美国、日本和一些欧盟国家稀土消费量也较大。另外, 对于整个国际市场而言, 稀土资源的消费量在总体上也呈上升趋势。伴随稀土资源利用领域的不断扩展, 全球各国对稀土资源的需求量也在不断攀升, 世界上稀土资源储量丰富的国家也不仅仅只有中国, 像印度、美国、澳大利亚、马来西亚以及一些独联体国家都拥有较丰富的稀土资源, 但是它们长期以来几乎没有稀土供给, 美国的一位能源政策分析家在 2010 年向美国国会递交了一份分析报告——《稀土元素: 全球供应链条》, 报告中详细说明了世界各国在 2009 年的稀土矿产量水平, 其中美国、俄罗斯和澳大利亚的产量都为零, 中国产量为 12.9 万吨, 占世界稀土矿总产量的 97%, 印度产量为 2700t, 占总产量的 2%。另外, 2013 年巴西国际矿物生产部对 2008~2013 年世界各国的稀土矿产量也做出了统计, 如表 1-2 所示。

表 1-2 2008~2013 年世界各国稀土矿产量

(万吨)

年份	中国	美国	澳大利亚	巴西	俄罗斯	印度	马来西亚	越南	总计
2008	12	—	—	0.065	—	0.27	0.038	—	12.4
2009	12	—	—	0.065	—	0.27	0.038	—	12.4
2010	13	—	—	0.055	—	0.27	0.035	—	13.36
2011	10.5	—	0.22	0.025	—	0.28	0.028	—	11.1
2012	10.0	0.08	0.32	0.014	0.24	0.29	0.01	0.022	11.0
2013	10.0	0.4	0.2	0.014	0.24	0.29	0.01	0.022	11.2

1.2 我国稀土资源分布

1.2.1 我国稀土资源储量分布

中国是世界上稀土资源最丰富的国家, 全国已有 22 个省份先后发现不同类型的稀土

矿床, 主要分布在内蒙古、江西、广东、广西、四川、山东等地。如 20 世纪 50 年代初期发现并探明超大型白云鄂博铁铈稀土矿床, 20 世纪 60 年代中期发现江西、广东等地的离子型稀土矿床, 20 世纪 70 年代初期发现山东微山稀土矿床, 20 世纪 80 年代中期发现四川凉山“牦牛坪式”大型稀土矿床等。这些发现和地质勘探成果为中国稀土工业的发展提供了最为可靠的资源保证, 同时还总结出中国稀土资源具有成矿条件好、分布面广、矿床成因类型多、资源潜力大、有价元素含量高、综合利用价值大等特点。

中国稀土矿床在地域分布上具有面广而又相对集中的特点。截至目前, 地质工作者已在全国三分之二以上的省份发现上千处矿床、矿点和矿化产地, 除内蒙古的白云鄂博、江西赣南、广东粤北、四川凉山为稀土资源集中分布区外, 山东、湖南、广西、云南、贵州、福建、浙江、湖北、河南、山西、辽宁、陕西、新疆等省份亦有稀土矿床发现, 但是资源量要比矿化集中富集区少得多。全国稀土资源总量的 98% 分布在内蒙古、江西、广东、四川、山东等地区, 形成北、南、东、西的分布格局, 并具有稀土元素分布北轻南重的特点。

中国稀土资源的时代分布, 主要集中在中晚元古代以后的地质历史时期, 太古代时期很少有稀土元素富集成矿, 这与活动的中国大陆板块演化发展历史有关。中晚元古代时期华北地区北缘西段形成了巨型的白云鄂博铁铈稀土矿床; 早古生代形成了贵州织金等地的大型稀土磷块岩矿床; 晚古生代有花岗岩型和碱性岩型稀土矿床形成; 中生代花岗岩型和碱性岩型稀土矿床广布于中国南方; 新生代有碱性花岗岩和英碱岩稀土矿床的形成; 第四纪有中国南方离子型稀土矿床的形成。中国稀土矿床成矿时代之多、分布时限之长是世界上其他国家所没有的。但我国稀土资源最主要的富集期是中晚元古代和中-新生代, 其他时代的稀土矿床一般规模较小。

中国稀土矿床不论其成因类型为何, 在构造分区上, 同世界其他地区的稀土矿床一样, 均分布于地壳活动区的褶皱系或过渡带, 如秦岭褶皱带、华南褶皱带、三江褶皱带、华北板块北缘裂谷系、川滇裂谷系等。在相对稳定的华北板块、扬子板块区虽也有一些稀土矿床的分布, 但不是主要部分。稀土资源这种受控大地构造环境的分布与活动大陆壳的发展、演化密切相关。由于中国地质构造的特殊性和稀土、稀有金属成矿的复杂性和多样性, 因而形成了多种成因类型的稀土矿床, 众多学者多以赋矿围岩为主要判别特征作为成因类型的划分依据。根据成矿主要地质特征、赋矿围岩性质及矿床规模与工业意义, 中国稀土矿床主要成因类型可分为八种, 即海底喷流沉积型、沉积型、变质岩型、花岗岩型、花岗岩离子型、岩浆碳酸岩型、碱性岩型、海滨砂矿。在已发现的稀土矿床中, 以海底喷流沉积型、碱性岩型、花岗岩离子型稀土矿床在我国最具工业意义。在世界稀土矿床成因类型中, 除含铈稀土变质砾岩型、含铈稀土砾岩、磷稀土碱性岩和铈稀土碳酸岩在我国少有发现外, 其他类型均有发现。而在我国南方七省区广泛分布的离子型稀土矿床, 世界级超大型“白云鄂博式”铁铈稀土矿床, 成矿时代最新的四川冕宁“牦牛坪式”稀土矿床, 仅在我国有所发现, 未见世界其他国家和地区有这类矿床的报导。

由于成矿地质条件有利, 中国稀土资源不仅成因类型齐全, 而且资源储量十分丰富, 居世界首位。我国稀土资源的勘查与开发始于 20 世纪 50 年代至 80 年代末, 发现并探明了一批重要的稀土矿床。据有关地质勘探和矿山生产部门提供的数据统计, 截至 2000 年底全国已探明稀土资源 REO 总量超过 10000 万吨, 预测资源远景量大于 21000 万吨, 显

示出我国稀土资源的巨大潜力。我国西部地区是轻稀土资源的最主要分布区,仅内蒙古的白云鄂博矿区地表至地下 200m 范围内已探明稀土资源量约 10000 万吨,平均稀土氧化物 REO 含量为 3%~5%,预测全区稀土资源量超过 13500 万吨;中国南方的离子型稀土矿已探明资源量正式公布的数字为 150 万吨,另有调查资料统计南方七省区(江西、广东、广西、湖南、云南、福建、浙江)已探明稀土资源量达 840 万吨,预测资源远景量为 5000 万吨,表明我国南方中重稀土资源潜力巨大。另外,我国四川凉山州的冕宁和德昌县境内已探明稀土资源量约 250 万吨,于冕宁花岗岩体东西两侧及其以南地区成矿条件有利,是寻找单一氟碳铈矿的最佳有望区,预测稀土资源远景量超过 500 万吨。

综上所述,中国不仅是世界稀土资源大国,而且在稀土资源的质量、品种和可利用性等许多方面都具有明显的优势,这种优势为中国稀土工业的可持续发展提供了最基本的资源保障,也为中国稀土在国际市场上立于主导地位创造了条件,更为新世纪、新材料、新技术革命奠定了物质基础。事实证明我国稀土资源勘查的不断突破、发现和成矿理论的创新已居世界先进水平。

中国是世界上稀土资源储量最丰富的国家,也是矿种最齐全的国家,同时中国的稀土资源品位较高,地理分布上不仅面广而且也相对集中。中国稀土资源的集中分布区包括四川凉山、江西赣南、内蒙古的白云鄂博、山东微山以及广东粤北,其中仅内蒙古的白云鄂博已探测到的稀土储量就占全国稀土总储量的 83% 左右;另外,在广西、湖南、新疆等地也探测到了不少稀土矿床。我国的稀土矿床在北、南、东、西均有分布,分布区域不同,所蕴含的主要稀土类型也不同,中国的稀土资源在总体上呈现出南重北轻的分布格局,如内蒙古白云鄂博、山东、湖南等地就盛产氟碳铈矿为主的轻稀土矿,福建、云南、江西等地主要开采中重型稀土矿。虽然我国的稀土资源不论是从已探明储量、远景储量还是从稀土矿种类来看都在世界上占有得天独厚的优势,但是中国对稀土资源的保护意识非常薄弱。不可否认,中国拥有丰富的稀土资源,理应承担相应的供给职责,但是中国在 2000 年到 2010 年这十年间对稀土资源的开采和利用都是严重过度的,特别是在 2009 年前后中国用占世界 30% 多的储量供应着全球 90% 以上的需求,这种无节制的乱开滥采不仅导致了我国稀土可采储量的不断下降,也给中国的环境带来了严重的破坏。为此,从资源可持续开发、环境保护及供需平衡角度,开展稀土资源的高效与可持续性开发是非常有必要的,一方面对稀土行业准入、开采、出口等各方面制定的政策措施,限制稀土资源破坏性、盲目性开发;另一方面,从资源利用角度,加大稀土资源的开发效率,提高稀土资源综合利用水平。

1.2.2 我国稀土资源开发状况

我国稀土资源的开发利用起步于 20 世纪 50 年代,最早发现并探明的稀土矿床是内蒙古白云鄂博超大型铁铈稀土矿床,60 年代中期发现了江西、广东等地的离子型稀土矿床,70 年代发现了山东微山稀土矿床,20 世纪 80 年代发现了四川凉山“牦牛坪式”大型稀土矿床,稀土矿床的发现和勘探,为我国稀土资源的开发利用提供了可靠的资源保障。

我国稀土资源的开发利用经过了几十年的建设与发展,现已建成具有中国稀土资源特点的工业体系。如内蒙古白云鄂博稀土矿与铁矿共生,铁、铈、稀土矿分布不均匀,采取分采、分堆的方法进行资源开发,有利地保护了稀土资源。目前,稀土选矿回收率仅为

7%，大多数都损失于选别后的尾矿中，尾矿储量约为 12000 万吨，含稀土氧化物 REO 总量超过 800 万吨，且呈上升趋势，可作为二次利用的重要资源。包钢集团现已规划在稳定发展钢铁的同时大力发展稀土产业，力求将白云鄂博稀土资源的选矿回收率提高至 15% 以上。中国南方离子型稀土资源的开发经过几代的科技攻关，改变了传统的“池浸”和“堆浸”工艺，采用的新型“原地浸矿”工艺不仅提高了资源利用率，稀土浸出率由原来的 10%~15% 提高至 70% 以上，而且有效保护了矿山生态环境，避免了因稀土开发而引发的环境破坏，实现了稀土资源的绿色高效开发，取得了良好的经济、社会和环境效益。

中国是世界稀土资源大国，但这种优势正在受到严重挑战，特别是澳大利亚、俄罗斯、巴西等国稀土资源勘查、研究的不断发现，使中国稀土资源在世界总量中所占的比重大幅度下降，由 20 世纪 70 年代的 74% 下降到目前的 40% 左右。国外更有人估计：“世界已探明具有前景的稀土资源量高达 6 亿吨”，而我国仅占 15%。就拥有高品位稀土资源的国家排序，澳大利亚排首位，其次是俄罗斯、美国、巴西，中国位居世界第五位。

我国稀土资源虽探明储量不少，但多数矿区勘查工作只做到普查阶段，真正可供开采的经济储量并不多，内蒙古白云鄂博稀土矿已探明储量超过 10000 万吨，而目前保有可采储量仅 2000 多万吨；据资料统计，我国南方七省稀土远景储量 5000 万吨，新近调查显示探明储量超过 800 万吨。但保有可采重稀土储量较少，估计 10 万吨。山东微山虽探明储量不少但属地下开采，保有可采储量不足 10 万吨。我国高品位稀土资源除四川冕宁牦牛坪和白云鄂博矿区部分矿段外，因地质工作程度低，少有发现。

稀土元素常与多种金属和非金属元素共生而组成利用价值极高的共生矿床。如内蒙古的白云鄂博铁、铈、稀土矿床，可供综合利用的元素及矿物多达千余种，除铁和稀土已被开发利用外，其他有益组分均未被利用，如氟和磷非但未被利用，而且造成严重的环境污染。我国是铈资源丰富的国家，但又是铈缺乏的国家，其主要原因是铈储量虽大，但品位较低。白云鄂博共生矿床中铈资源丰富，已探明储量 218 万吨，远景储量达 600 万吨，但白云鄂博铈资源的开发利用至今仍处在试验阶段，没有实质性的突破。白云鄂博西矿区铁矿体上部白云岩中赋存有独立铈矿体，平均品位 0.268%，储量达 16 万吨，可否经过试验研究进行合理开采，目前正开展小型试验研究工作。

我国稀土资源开发治“乱”效果甚微，其原因是对稀土市场缺乏分析和认识，把稀土作为单纯的“资源型”产业来看待，而对其“功能型”性质缺乏认识，单凭一时某些产品的“热销”就盲目四处搞资源开发项目，致使源头产品猛增，产品过剩，库存积压，甚至竞相压价倾销，导致市场紊乱；管理体制不健全，尚未形成一套强有力的管理体系和有法可依、有章可循的有效管理机制，因而出现了你管我不管、管而无力的局面。出于各种眼前和局部利益的驱动，往往是一些地方管住了，另一些地方乱起来了。江西离子型稀土矿的开发由于省市采取了强有力的措施，加强对稀土矿山的整治力度，组建了赣州南方稀土集团有限公司，实现对资源开发的“四统一”管理，形成利益共同体，控制总量开采，取得了明显效果。但相邻省份未采取相应的行动与措施，离子型稀土矿的开采总量并没有减少，反而持续供大于求。又如白云鄂博铁、铈、稀土矿虽属统一采矿，但多家选矿，且规模不断扩大，其总生产能力大于 10 万吨，致使精矿产量长期供大于求。四川凉山地区稀土精矿的生产能力超过 4 万吨，经调整仍超过 2 万吨，供大于求的局面长期得不到改变，这是计划经济和自由经济的混合产