

美国稀土产业布局研究及其对我国的启示

熊书玲, 郑佳, 郑彦宁

(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘要: 稀土因其应用领域的广泛性和在高新技术领域应用的不可或缺性, 被世界各国尤其是发达国家认定为极其重要的战略资源。基于此, 本文简述了中美两国在稀土产业的发展现状, 重点研究了 2010 年以来美国在稀土产业进行的一系列布局。研究表明, 美国对稀土资源具有大量需求并高度依赖进口, 且其稀土冶炼分离技术水平低下。美国的稀土产业布局旨在建成完整的稀土供应链, 以期重塑全球稀土产业竞争格局。我国在稀土产业链中上游具备显著优势, 但缺乏稀土高新技术及核心高端产品。为在稀土产业链上谋取更大、更长远利益, 我国也应积极调整战略布局。

关键词: 美国; 中国; 稀土; 发展现状; 产业布局

中图分类号: TD98; F205 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2020.07.006

稀土是指元素周期表中镧系元素(镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽、镱、铪、铟、铊、铋、钨、钼、钽、钨、铀、钍、钷、钷、钷、钷)及与之化学性质相似的钪和钇共 17 种化学元素的总称, 是不可再生资源^[1]。因具有优良的光电磁等物理特性, 稀土能与其他材料组成性能各异、品种繁多的新型材料, 可大幅度提高产品的质量和性能, 是很多高精尖产业必不可少的原料, 素有“工业维生素”之称。稀土是新材料制造的重要依托和关系尖端国防等技术开发的关键性战略资源, 广泛应用于国防工业、新能源、电子信息等领域^[2-6], 尤其镨、钕、钐、铕、钆、铽等中重稀土在关乎国防和经济安全方面的重要作用几乎无可替代。

从稀土产业链示意图可知(见图 1), 产业链上游为稀土矿开采环节, 生产稀土矿石、稀土精矿、碳酸稀土、氯化稀土等原材料产品, 所需开采技术并非高端技术, 不能构成产业进入壁垒。产业链中游为稀土加工环节, 生产经冶炼分离后的稀土化合物、稀土氧化物、稀土金属或合金等产品。产业链下游为稀土应用环节, 下游产品主

要集中于永磁体、硬质合金、催化剂及抛光粉等^[7-9], 约占稀土消费量的 70%, 其他还包括玻璃、荧光粉等。

我国在稀土领域的专利主要集中在稀土采选冶炼环节, 在产业链中上游拥有绝对优势, 但缺乏稀土高新技术专利及核心高端产品, 下游产业壁垒较大。美国在稀土领域的专利主要集中在稀土深加工及应用环节, 在产业链下游拥有绝对优势, 但在中上游有明显弱势, 产业链缺口较大。2018 年, 美国在《美国制造与国防工业基础和供应链弹性评估与强化》报告中提出, 中国对关乎美国国家安全的战略性关键材料(稀土资源)供应构成重大且不断提升的风险。事实上, 美国对此高度重视且早有布局和行动。本文梳理了 2010 年以来, 美国在稀土产业的一系列布局, 并分别从稀土产业链上、中、下游进行分析, 以期清晰展示其布局及背后用意。

1 稀土产业链上游

我国是世界上稀土资源最丰富的国家, 素有

第一作者简介: 熊书玲(1988—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为重点科技领域监测与分析。

项目来源: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金项目“重点科技领域前沿跟踪与深度研究”(ZD2020-02)。

收稿日期: 2020-06-03

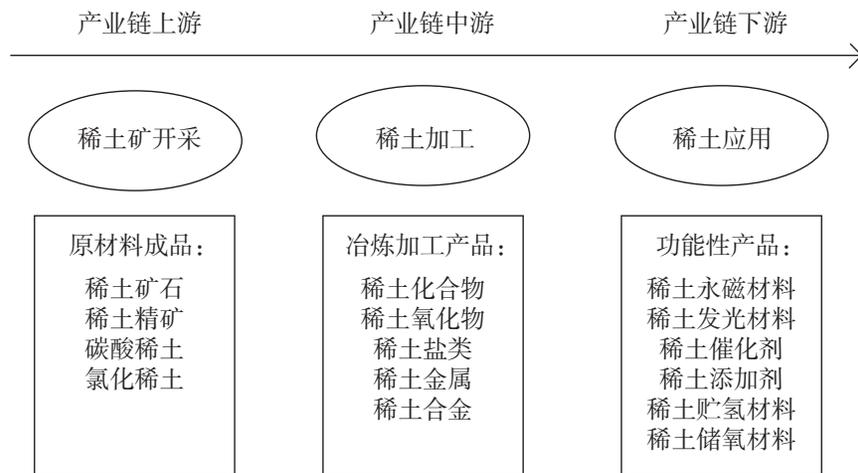


图1 稀土产业链示意图

“稀土王国”之称。我国稀土总储量第一、总产量第一、出口量第一、重稀土开采量第一。全球绝大部分中重稀土都分布在我国,且具有品质高、类型齐全、易于采选的优点^[10-12]。

2018年,美国内务部发布了35种战略矿物清单,其中包含稀土元素组。同年美国国防部在《脆弱的美国国防工业基础》报告中指出,美国对中国关键材料高度依赖,中国是美国稀土等材料的唯一进口来源国。据美国地质调查局发布的《2019年矿产品摘要》显示,美国对稀土净进口依赖度达到了100%,而这之中,有80%来自于中国。即使在中美贸易摩擦期间,美国也从未对中国稀土商品加征关税。为降低对稀土的进口依赖,美国采取了一系列措施。

1.1 建立稀土储备并扩大进口

美国议员于2010年提出建立国家战略稀土储备。美国国防部于2010年把除铈和钷以外的15种稀土元素视为重要稀土。2011年,美国能源部在《关键材料战略》报告中指出,5种稀土元素(镧、铈、铕、钆和铈)的不稳定供应将会影响清洁能源的部署,应增加研发力度并进行战略储备。美国能源部、国防部等政府部门自2011年起开始对镧、铈、铕、钆和铈等关键稀土进行战略储备。2013年,美国能源部提出计划在5年内为艾姆斯实验室提供1.2亿美元的资助用于建立能源创新中心,旨在解决稀土等重要材料紧缺的问题。同时,美国几乎不再出售关键稀土资源,并开始强化镧、

铕等中重稀土储备。从2016—2018年美国政府库存数据上看,美国在此期间已储备0.5吨镧、18吨铕和25吨氧化钇。从美国计划采购的稀土元素清单上看,美国在2018年中美贸易摩擦期间已储备总计超400吨的稀土元素产品。2019年,美国政府开始强化镧、铕等中重稀土储备,并启动对其他稀土和稀土磁体原料的储备。

此外,美国政府自2010年起开始向中国以外的国家提供资金与技术援助,以取得这些国家稀土资源的稳定供应。如2019年美国计划向蒙古国投资稀土矿产,并与马拉维、布隆迪等地的供应商接洽,寻求多元的稀土供应。

1.2 勘探、开发稀土矿

近年来,美国一直积极与国外合作勘探、开发稀土矿资源。2012年,美国陆续有400多家国内稀土创业公司在华尔街挂牌上市(目前仅存Mountain Pass Materials一家公司),旨在实现国内稀土需求的可靠供应。同年,美国Molycorp公司重启Mountain Pass稀土矿开采,实现了多年来零开采突破,后因技术、成本、环保等因素闭矿。自2012年起,美国开始开采海底锰结核矿石以提取稀土金属,同时不断寻求在科罗拉多州、怀俄明州等地开发国内稀土供应的可行性。2016年,美国勘探出其东南部发育有大量非造山高硅花岗岩单元,稀土含量可达到离子吸附型稀土矿床的工业品位。但这些稀土矿大都尚未实现商业规模生产。2017年,美国政府与阿富汗商定,支持美

国企业前往阿富汗开发稀土矿。2012—2017年间，美国稀土年消费量约1.7万吨，年产量约4千吨，稀土产量仍远低于其需求量。2018年，Mountain Pass Materials公司再次启动Mountain Pass稀土矿开采，每年将向中国出口近5万吨稀土浓缩物用于进一步加工。同年，Ucore公司与美国政府讨论开发国内稀土，以促使其于2020年在阿拉斯加步入积极生产的正轨。2019年，美国商务部在《确保关键矿物安全可靠供应的联邦战略》报告中指出，通过推进供应链转型、加强与盟国合作、减少矿产资源开发审批限制等，促进国内稀土等矿物的生产。同年，美国阿拉斯加州参议员莉萨·穆尔科斯基推出一项矿产安全法案，旨在批准更多研究和支回收来鼓励美国国内生产。

1.3 促进稀土回收

稀土回收是降低稀土矿开采量的最有效方法之一^[13]。2012年，美国能源部艾姆斯实验室开发了利用镁合金熔体从无镀层含钕、镨、镱稀土元素的烧结磁体中回收稀土的技术。2015年，美国科研人员利用膜辅助稀土溶剂萃取技术在连续回收过程中同时萃取和反萃取稀土元素，从废弃的永久磁铁中回收了90%的镧系元素，并减少了20%~30%的化学废弃物。2019年，美国罗格斯大学利用矿物和有机酸，从合成磷石膏中高效提取了钇、铈、钕、钐、铕和镱。同年，美国能源部橡树岭实验室发明了一种高效节能、低成本且环保的新程序，可从旧硬碟等来源的报废磁铁中萃取纯度高达99.5%的稀土。

美国能源部自2015年开始向社会征集从煤炭及其副产品中回收稀土的优质技术方案（预计2025年正式投产），随后资助690万美元用于相关研究。2017年，美国肯塔基大学从煤炭中生产出高品位的稀土精矿，经分离富集后的混合物中稀土氧化物含量高达98%。2018年，美国科研人员探索利用加热压缩的二氧化碳从煤灰中选择性地溶解和提取稀土。

1.4 开发稀土替代技术

美国相关技术研究主要集中在催化剂及磁性材料领域。2011年，Grace Davison公司推出低稀土含量和无稀土的催化裂化催化剂和添加剂，如ResidUltra催化剂比渣油加氢催化剂稀土含量减少

40%，而无稀土的REactoR和REplaceR催化剂使用了Z-22沸石，可用于低金属原料油催化裂化。

美国能源部车辆用稀土磁性材料项目（2009—2012年）主要开发新型高能量密度、低稀土含量的磁纳米技术，以降低混合动力、插入式混合动力的电动汽车马达和先进风力发电机涡轮机的重量并提高效率。2014年，橡树岭实验室从钐和钕里发现了一种新型无稀土永磁合金，比稀土材料更耐高温，可缓解专业磁体在新能源行业的潜在供应压力。2015年，艾姆斯实验室通过电弧熔炼等方法开发出钕、铁、硼、铈和钴共掺杂的新型磁性合金，通过使用廉价且丰富的稀土铈替代昂贵且稀有的稀土镱，使生产成本至少降低20%~40%。该合金在高温下抵抗退磁的能力远超过含镱的磁体，是在汽车发动机和风力涡轮机中应用的高性能永磁体的潜在替代品。同年，美国弗吉尼亚联邦大学合成出由铁纳米颗粒及具有磁性的钴和碳纳米颗粒构成的新型无稀土磁性材料，可媲美传统稀土制永磁材料，且能在516.85℃的高温下存储信息，有望降低工业生产对稀土的依赖。2018年，美国能源部关键材料研究所将钴、铁、铜和铈的不同组合进行试验，利用激光金属3D打印技术快速制作并识别出有前景的磁铁样品，将永磁材料转变为昂贵的稀土钕铁硼磁体的经济替代品。

2 稀土产业链中游

我国是目前世界上规模最大且唯一能够大量供应全部17种稀土元素冶炼分离产品的国家。我国的稀土分离技术和产业化水平位于世界首位，稀土的冶炼分离已能达到很高的纯度，可根据需求灵活稳定控制分离产品的质量，且实现了绿色高效的分离流程和产业^[14]。

稀土常与铀、钍等放射性元素裹挟在一起，使得稀土元素分离提取困难且成本高昂。美国传统的稀土冶炼分离技术（如溶剂萃取、离子交换和沉淀）过程缓慢且效率低下，会消耗大量的溶剂和危险化学品，并产生大量以不可回收的重稀土元素形式存在的废弃物。美国开采的半成品稀土几乎都需运到我国进行精炼加工，再返还美国。美国政府问责局在2010年的《国防供应链中的稀

土材料》报告中指出, 美国在稀土开采、分离、氧化物精炼、合金炼制和磁性材料制造等方面乏力, 在全球供应链中没有地位。在 2016 年的《稀土材料: 制定综合性手段有助于国防部更好管控供应链中的国家安全风险》报告中指出, 美国从稀土开采到冶炼、加工的供应链均依赖中国, 可能需要 15 年才能重建国内稀土供应链。为填补多年来在稀土加工环节供应链的关键缺口, 美国采取了一系列措施。

2.1 完善加工设施并加强对外合作

2016 年, Ucore 公司与 IBC 先进技术公司合作建立了 SuperLig 稀土分离试验厂。2019 年, Blue Line 集团与澳大利亚 Lynas 公司计划合资在美国建立首家稀土萃取分离厂房。同年, MP Materials 公司计划花费两亿美元重启 Mountain Pass 矿山封存的加工设备, 并重新开放该矿山的氯碱设施, 用于稀土分离过程。

2017 年, Rare Earth Salt 公司与智利 Minera BioLantanidos (MBL) 公司合作, 从 MBL 的离子粘土矿床生产、分离稀土氧化物, 旨在建立持续、高效益且环保的稀土供应链。2018 年, 美国政府与澳大利亚签署协议, 将共同冶炼、加工和开发稀土。双方于 2019 年确定了 15 个稀土和重要矿产项目, 并计划在西澳大利亚建造稀土矿和加工厂。

2.2 提高冶炼分离技术

2013 年, Rare Element Resources 公司利用草酸加工法生产出品位在 90% 以上的稀土氧化物精矿, 该技术未使用萃取溶剂去除沉淀物中的杂质, 使稀土回采率更高、原材料消耗更少, 且对环境影响甚微。随后其对传统溶剂萃取方法进行革新, 新方法无须对强酸性负载有机相进行反萃, 而采用无废水产生的技术分离稀土元素, 可使纯度达 98% 的稀土精矿中放射性钍元素全部被去除, 大幅提高了萃取效率, 并降低了成本。

2016 年, Ucore 公司采用分子识别技术分离的稀土纯度达 99% 以上。该技术不采用任何溶剂或有害化学品, 配合该公司的专利固相萃取和 X 射线分类技术去除了 99% 的放射性元素及常见杂质和氟化物, 比传统分离技术更高效、环保。2017 年, Rare Earth Salt 公司投产第一个商业分离单元用于

分离和精炼稀土氧化物, 利用规模化且可操作的分离技术生产的稀土氧化物纯度高达 99.9%, 成本及环保优势显著。

2.3 培养专业人才并寻求技术协助

美国稀土产业多年的停顿状态造成了专业人才的严重流失。因此, 美国政府十分注重培养关于稀土冶炼和分离技术方面的人才。如美国科罗拉多州矿山大学开设了以稀土为中心的关于稀有金属冶炼方面的工学课程, 专门培养相关技术人才。

美国 Molycorp 公司于 2010 年和加拿大 Neo 材料技术公司缔结了关于稀土生产、供应和流通的意向书, 并于 2012 年并购 Neo 公司, Neo 公司向钽业公司提供了关于生产稀土金属、合金和磁铁石的专项技术。

3 稀土产业链下游

稀土产业链下游环节所需要的高新生产技术研发困难且受专利保护, 我国缺乏稀土高新技术自主知识产权及核心高端产品, 下游产业壁垒较大, 目前对稀土应用消费品较为依赖进口。

稀土下游产业中绝大部分高技术、高附加值、高效益的稀土深加工及应用产品技术均被美国等发达国家所垄断。美国作为稀土产业链下游的主导者之一, 在稀土产业拥有较高的高新技术水平且专利意识明显, 其通过自主知识产权的发明、占有、许可和转让已获得可观的经济效益。为巩固并提高这一优势, 美国也采取了一系列措施。

3.1 成立稀土技术联盟

2012 年, 美国稀土行业唯一组织“稀土技术联盟”宣告成立, 旨在开发稀土的多种应用(如催化、陶瓷、荧光粉), 帮助业界认识并用好稀土材料。联盟成员不仅包括 Molycorp 公司等稀土生产商, 还包括 Boulder 公司等稀土应用单位以及科罗拉多矿业大学等学术研究机构。

3.2 鼓励科研创新

美国国家科学基金会已资助多项稀土相关研究, 其中稀土的应用研究主要集中在能源、环境、医学等方面的应用。如美国宇航局主要参与了稀土永久磁体在斯特林发动机上的应用研究, 以及稀土掺杂选择性激光器、稀土掺杂玻璃激光器以

及稀土掺杂光纤激光器/放大器等方面的研究项目。

3.3 增强产业安全

2014年,美国国防部在《国防工业基础的稀土元素保障程序需要改进》报告中指出,五角大楼无法在零部件和分包商层面有效监测稀土投入,国防部不应忽略下游制造业供应链面临的风险。2019年,美国议员强调加强稀土磁性材料产业安全,避免在武器系统关键部件供应上产生故障。美国《2019国防授权法案》规定,禁止美国国防部从中国等非盟国购买下游的稀土磁体。同年,美国政府开始加强对下游应用所需稀土磁体原料的储备。此外,美国政府还不断开拓进口,从爱沙尼亚、法国、日本、马来西亚等国采购稀土合金、磁铁和磁钢等加工后的稀土产品,用于高精尖技术应用领域。

4 结论

美国的一系列布局旨在推动充足、稳定且可靠的稀土供应,其特别强调稀土材料的国内供应以及对这些材料的生产和加工。虽然短期内美国欲建成完整的稀土供应链难度较大,但从长期来看,随着美国稀土产业链的不断完善,其未来有望重塑全球稀土产业竞争格局。

尽管我国在稀土产业链中上游拥有绝对优势,但稀土的开采和加工对环境危害较大。同时面对他国技术壁垒制约和自身缺乏高新技术的困境,我国稀土下游高精尖技术应用领域与美国等发达国家差距较大。为使我国在稀土产业链上谋取更大、更长远利益,在合理开采、加大环保力度、建立稀土战略储备、提高稀土定价权的同时,建议从以下方面进行布局^[15]:

(1) 突破下游高新技术壁垒,建立完整的稀土产业链。建议进一步加强对高性能永磁、高效发光、高端催化等稀土功能材料研发和器件产业化的支持。在稀土永磁体材料研发中,重点发展磁性材料轻型化等方面的加工技术,加快高性能钕铁硼材料生产、应用和产业化关键技术突破。在稀土催化材料研发中,重点研究深度脱硫工艺技术,开发高性能、低能耗清洁燃油生产用石油裂化催化材料。

在稀土抛光材料研发中,重点推进在光电子等集约、精密、高端领域的抛光粉产业化技术研发。

(2) 促进稀土资源回收利用,推动稀土产业绿色发展。积极开展废稀土材料再生资源回收利用,可大幅降低稀土采矿、加工对环境造成的影响。建立稀土废料回收体系,促进对稀土永磁废料、稀土火法冶金溶盐、炉渣、废镍氢电池、废旧永磁电机、失效稀土催化剂、废弃稀土抛光粉及荧光灯等进行回收再利用。大力开发高效清洁型稀土回收技术,开发稀土废旧物分离、提纯等方面的专用工艺、技术和设备。

(3) 降低稀土依赖,规避资源短缺风险。稀土是不可再生资源,随着全球稀土矿资源日益短缺,我国应积极开发稀土替代材料及降低关键稀土含量的技术。重点研发关键稀土替代材料,加强企业、高校、科研院所间战略合作,开发与关键稀土作用相近的经济环保型材料(如铁、氮、铅钴),替代永磁体等中稀有且昂贵的镨等关键稀土。研发降低稀土应用品中关键稀土含量的新技术,或研究使用资源丰富且廉价的稀土替代关键稀土。寻找非关键稀土替代材料,替代如用于汽车尾气净化催化剂的铈等非关键稀土,并达到实用化。■

参考文献:

- [1] 梁小蕊,江炎兰,周鸣宇,等.稀土材料的应用及发展趋势[J].化学工程师,2011,25(5):30-33.
- [2] 刘作霖,张治洲,朱永明,等.稀土材料用于锂离子电池正极材料的进展[J].电池,2019,49(6):520-523.
- [3] 周燕,吴惠英,刘采梦,等.稀土发光材料在纺织领域的研究与应用现状[J].棉纺织技术,2019,47(11):75-78.
- [4] 张士民,陈必清,高利霞,等.稀土-复合电极的研究进展[J].应用化工,2019,48(7):1681-1684.
- [5] 赵国伟,张生存,龚明健,等.稀土元素在铸钢中的应用[J].中国铸造装备与技术,2019,54(5):12-14.
- [6] 吴存,梁敏洁,廖海洪,等.稀土元素在医用镁合金中应用的研究进展[J].热加工工艺,2018,47(18):15-17.
- [7] 汪艳亮,王云,谢小豪,等.稀土硬质合金研究进展[J].有色金属科学与工程,2019,10(5):106-112.

- [8] 王新海, 马瑾. 稀土掺杂纳米二氧化钛光催化剂的研究进展 [J]. 化学工程师, 2019, 33 (8): 54-59.
- [9] 申璐. 稀土永磁材料行业发展现状及建议 [J]. 经济研究导刊, 2019 (24): 35-36.
- [10] 刘琦, 周芳, 冯健, 等. 我国稀土资源现状及选矿技术进展 [J]. 矿产保护与利用, 2019, 39 (5): 76-83.
- [11] 张苏江, 张立伟, 张彦文, 等. 国内外稀土矿产资源及其分布概述 [J]. 无机盐工业, 2020, 52 (1): 9-16.
- [12] 张臻悦, 何正艳, 徐志高, 等. 中国稀土矿稀土配分特征 [J]. 稀土, 2016, 37 (1): 121-127.
- [13] 李芳琴, 代涛, 王高尚. 稀土金属二次回收再利用研究综述 [J]. 矿产保护与利用, 2019, 39 (5): 84-89.
- [14] 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 等. 稀土元素分离与提纯技术研究现状及展望 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (7): 844-851.
- [15] 王昶, 阳香莲, 宋慧玲, 等. 基于中西方稀土战略调整演化路径的中国稀土政策研究 [J]. 矿产保护与利用, 2018 (1): 1-11.

Research on the Layout of Rare Earth Industry in the United States and Its Enlightenment to China

XIONG Shu-ling, ZHENG Jia, ZHENG Yan-ning

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: Rare earth has been recognized as an extremely important strategic resource by all countries in the world, especially the developed countries, due to its extensive application and indispensability in the field of high and new technology. Based on this, the development status of rare earth industry in China and the United States were briefly introduced, and the research of a series of layout of rare earth industry in the United States since 2010 was focused on. The research shows that the United States is highly dependent on and in great demand for rare earth resource, and its smelting and separation technology level of rare earth is low. The rare earth industry layout of the United States aims to build a complete rare earth supply chain in order to reshape the global competition pattern of rare earth industry. China possesses significant advantages in the middle and upper reaches of rare earth industry chain, but lacks high and new technologies and core high-end products. China should also actively adjust its strategic layout in order to seek greater and longer benefits in the rare earth industry chain.

Key words: the U.S.; China; rare earth; development status; industrial layout