



Topic Insights

稀土永磁体及其在未来经济中的地位

Allan Trench^{a,b,c}, John P. Sykes^{a,b,d,e}^a Business School, The University of Western Australia, Perth, WA 6009, Australia^b Centre for Exploration Targeting, School of Earth Sciences, The University of Western Australia, Perth, WA 6009, Australia^c CRU Group, London WC2A 1QS, United Kingdom^d MinEx Consulting Pty Ltd., Subiaco, WA, 6008, Australia^e Greenfields Research Ltd., Harrogate, HG3 3HA, United Kingdom

永磁体作为一种将化石燃料向可再生能源转变的使能技术，其经济重要性日益提高[1–3]，并在电子设备小型化中得到广泛应用[2,4]，因此永磁体是现代世界技术发展的重要前沿之一。

钕铁硼 (Nd-Fe-B) 和钐钴 (Sm-Co) 永磁体及其他稀土磁体合金和无稀土/贫稀土永磁体，都是环保技术发展的前沿。

稀土永磁体是全球采用风力涡轮机技术[2,3]和电动汽车[1,2]的基础。我们正处在一个新的全球能源范式的风口浪尖，在这个范式中，选定的稀土元素而非碳氢化合物将有助于为我们未来的能源和运输需求“加油”。

在能源转换技术中使用稀土永磁体显然有利于环境。但是，人们对上游稀土提取方法存在担忧，这些方法可能具有负的环境外部性，特别是在稀土开采、加工和分离产生的废物管理方面[5]。尽管如此，虽然新一代永磁技术的最终社会影响尚不清楚，但加速采用稀土和其他永磁技术的研究仍在迅速推进，这也是本期稀土永磁材料专题的重点。

1. 稀土供应的最新变化

以合理的成本提供充足的稀土供应已经成为社会关注的焦点，大多数稀土都存在于世界和区域组织发布的众多稀有矿物或稀有金属清单中[6]。稀有金属是具有

重要经济用途的金属，但由于地缘政治或可持续发展的原因，也面临供应风险[2,7]。例如，对于许多非中国政府或产业终端客户而言，中国稀土矿的集中生产被视为地缘政治供应风险因素[8]。而有关马来西亚Lynas公司设施辐射暴露的担忧是与可持续发展（如社会和环境）相关供应风险因素的一个例子[5]。面对这样的市场约束，稀土回收[9–11]、节制或替代[11]的未来潜力正成为需求侧的明确研究重点，而供应侧的研究则旨在通过消除一个或多个价值链约束以实现更大、更环保、更“清洁”的稀土采购[12,13]。

周期表中原子序数为21、39以及57~71的稀土元素在自然界中并不罕见，并且在所有大陆的许多岩石中都少量存在[14–18]。事实上，它们在地壳中的含量与广泛开采的普通金属一样丰富[12,19]。已知的全球稀土资源和储量相对较大，例如，美国地质调查局援引的数据显示，已知储量为1.2亿吨，这远远高于目前每年17万吨的矿山产量[20]。已知储量与这一产量的比例为706:1，与其他重要工业金属（如铜）相比，后者的已知储量为8.3亿吨，年产量为2100万吨，这一比例为40:1 [21]。这样的计算也排除了进一步大量发现矿床的可能性，这在历史上一直是如此。从马尔萨斯的意义上讲[22]，世界不会很快“用完”稀土，因此，如果地缘政治和可持续供应问题得到解决，稀土有可能为建立新的“绿色”经济奠定相对可靠的基础。

综上所述，稀土行业的供应面仍然很复杂。首先，尽管稀土资源丰富，但大量稀土的经济积累，即稀土矿物的物理和化学形态及其绝对浓度，都足以使可通过经济环保方式进行开采加工的原材料变得稀有[12,16,20]。令人高兴的是，我们对稀土矿床的地质[14-17]和所需的矿物加工技术[23-27]的理解有了快速的进步，并做出了重大的进一步勘探尝试[18,28-30]。我们还看到了西澳大利亚州一家大型新稀土矿Mt Weld相对成功的开发，该矿在马来西亚拥有相关的分离设施，这些设施均归Lynas公司所有[28,31]。此外，加利福尼亚州Mountain Pass矿曾一度重启，但以失败告终[31]。最后，在从勘探到可行性研究的不同发展阶段，世界各地仍有一条相对稳健的稀土矿项目管道，重点是轻稀土和重稀土[14-18]。

增加稀土供应的另一种选择是通过二次供应，即废料供应，也就是回收利用。目前，稀土金属基本上没有回收利用[9,32]；然而，人们正在努力推动这一进程。尽管如此，从中短期来看，回收利用并不是我们需要的全部解决方案。稀土的经济地位极低，这意味着我们仅开采了相对较少的这些金属，即使基于最有效的回收利用，我们也无法维持未来的需求。例如，美国地质调查局估计，自1900年以来，我们开采的稀土不到330万吨[33]，这近似于历史上开采的所有稀土。这一数字与前面提到的已知地质储量（1.2亿吨）[20]、目前的年供应量（以及由此产生的需求量）17万吨[20]以及目前的复合年供应量（以及由此产生的需求量）约9.5%的增长率相比是不利的[20,33]。此外，从诸如电子产品的最终用户产品中提取稀土进行再利用的难度很大，这意味着这些稀土中有许多已被丢弃到垃圾场或其他最终散布的地方[32]。尽管如此，当前缺乏回收利用不应阻碍提高稀土回收率的研究，如一些作者在本期专题中所做的努力。实际上，他们认为提高稀土回收率是当务之急。相比之下，“典型”工业金属（如铜）的回收率为33%，这主要是基于经济机遇，而不是任何特定的环境原因。随着许多政府表示希望转向基于循环利用的循环经济[34-39]，稀土循环利用率只会成为一个更为紧迫的问题。

2. 稀土需求的最新变化

尽管稀土被归类为稀有金属，但这并没有反映在近年来稀土价格的历史低位上[30]。低价格有供需原因。

简单地说，在供应方面，如上所述，低价是金属广泛存在的证据。从需求的角度来看，2010—2012年稀土价格飙升[18,28-30]可能是大宗商品市场历史上最大的涨价之一，导致对需求的严重破坏[28]。

稀土需求的统计数据非常难以整理[30]，为了说明需求破坏的程度，本文将使用矿山生产数据[33]，合理地假设稀土二次供应（来自废料）实际上仍然不存在，并且在较长的时间周期内（如10年），库存和“困难”的影响相互抵消。因此，供应大致等于需求。基于这些假设，值得注意的是，在截至2006年（包括2006年）稀土价格较低的10年期间，全球供应（以及假定的需求）从1997年的每年68 300 t增加到2006年的137 000 t，同比增长101% [33]。随着稀土价格开始上涨，2006年是生产和需求达到峰值的暂时时期，首先是由于大宗商品市场的广泛繁荣，具体与2010—2012年的稀土价格飙升有关。然而，10年后，2015年稀土产量为13万吨，比2006年下降了5%，这是继2010—2012年价格暴涨之后的又一个转折点[33]。在过去的几年里，稀土产量（可能还有需求）迅速增长到每年近17万吨[20]，短短几年就增长了近25%。显然，影响这些数据的是供应方面的问题：一是中国稀土出口配额从2005年开始减少[18,28,30]；二是2013年开始开采Mt Weld矿[28]，以及Mountain Pass矿山从2013年至2015年间的开采和关闭[28]。然而，总体上很明显，当供给消失时，需求也随之消失，反之亦然。

不足为奇的是，在2010—2012年价格飙升之时，西方国家在稀土供应安全、回收、替代和节源方面开展了许多研究项目[40]。随着这些研究计划的成熟，我们可能会在不久的将来看到这些努力的结果，在本期专题中就可以看到一些。我们已经看到稀土作为荧光粉在照明和显示器中的有效应用已经结束，取而代之的是铟基发光二极管（LED）[28,41,42]。尽管无法将稀土荧光粉的需求旺盛与2010—2012年价格飙升之间建立直接联系，但价格上涨很可能是一个背景因素。总的来说，稀土需求的增长并没有5~10年前预期的那么强劲[43]。

因此，与5年前相比，现在使用稀土的经济环境已大不相同。低廉的价格使得稀土成为许多技术可负担的选择，正如本期中许多论文的作者所做的那样，应该把努力导向最终用途的创新。未来廉价可靠的稀土供应，将使本文所讨论的永磁创新进入主流经济的可能性大大增加[32]。此外，需求多样性是需求“创造”的一个未被充分认识的组成部分[32]。最大的金属市场以广

泛的需求模式为代表, 这些金属利用了金属的几种化学或物理特性, 在多个关键行业、多种应用和数千种产品中使用。例如, 据我们所知, 铜的最大需求部门是非常广泛的“工业设备”类别(31%) [44], 而钕和镝的最大需求类别是更具体的钕铁硼磁体, 比例分别为76%和100% [12,32]。铜的需求如此多样化, 这对价格稳定至关重要, 供应多样化也是如此。通过为稀土永磁体提供新的不同的用途, 并希望不仅限于磁体, 在这一问题上的创新可能有助于刺激需求的多样性。

尽管如此, 稀土在永磁体中经济高效的利用将继续成为下游技术的关键挑战之一, 永磁体性能、生产效率和可持续性的不断提高已成为研究的重点。无论供给方面的情况如何, 这些因素只能起到刺激需求的作用。成本效益仍将是稀土价值链各个阶段以及与稀土技术互补的相关合金金属(如钴)的主要重点。从“矿山到磁铁”的持续成本改善将加速并推动永磁体的需求, 同时将打开新兴的最终用途市场, 因为这确实会增强磁性性能并提高重量效率。在此基础上, 我们欢迎在本期稀土永磁材料专题上发表的8篇论文, 这些论文介绍了针对改进的永磁体价值链的一些最新研究进展。

在本期中, Coey讨论了稀土永磁体的前景, 同时回顾了稀土元素的矿物经济学和永磁体的历史发展。除了目前在可再生能源和电力运输中使用永磁体的传统方法外, 随着制造过程自动化的步伐加快, Coey还将机器人技术视为未来终端应用市场的一个主要机会。

杨金波等讨论了用快速热处理技术制备纳米复合钕铁硼的结构和磁性。这些作者提出, 如果能形成宽度在临界尺寸范围内的软磁相连续包围硬磁相, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{-B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米复合磁体的性能将得到进一步提高。

梁文会等研究了非晶态Sm-Co薄膜的磁各向异性的结构特性, 指出了其在信息存储介质和自旋电子学材料中的巨大应用潜力。

尹小文等的研究旨在有效利用Nd-Fe-B污泥对高性能烧结磁体进行有效回收的潜力, 以降低回收成本并提高商业规模的回收效率。

Rial等研究了无稀土MnAl永磁体的替代生产工艺对磁体性能的优化, 重点研究了纳米结构与短时间球磨(以避免球磨过程中的高温)的相关性。

Isnard和Kinast通过对 $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ 磁性结构及其自旋重取向进行中子衍射研究, 提供了关于温度依赖性的磁性行为基础研究。

Kovacs等发表了关于少(无)稀土永磁体计算设计

的研究, 并概述了如何根据第一性原理[包括纳米结构、晶界条件和(较小程度上)晶粒形状]预测虚拟磁体的非本征磁性, 如矫顽力和磁能积。

最后, Hadjipanais等发表了关于使用 ThMn_{12} 型永磁合金的报告, 并指出具有 ThMn_{12} 型结构的富铁化合物可以满足对高能量密度贫稀土永磁材料的需求。

References

- [1] Widmer JD, Martin R, Kimiabeigi M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable Mater Technol* 2015;3:7–13.
- [2] Sykes JP, Wright JP, Trench A. Discovery, supply and demand: from metals of antiquity to critical metals. *Trans Inst Min Metall B* 2016;125(1):3–20.
- [3] Pavel CC, Lacał-Arântegui R, Marmier A, Schüller D, Tzimas E, Buchert M, et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resour Policy* 2017;52:349–57.
- [4] Lixandru A, Venkatesan P, Jönsson C, Poenaru I, Hall B, Yang Y, et al. Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment. *Waste Manag* 2017;68:482–9.
- [5] Ali SH. Social and environmental impact of the rare earth industries. *Resources* 2014;3(1):123–34.
- [6] Hayes SM, Mccullough EA. Critical minerals: a review of elemental trends in comprehensive criticality studies. *Resour Policy* 2018;59:192–9.
- [7] Graedel TE, Barr R, Chandler C, Chase T, Choi J, Christoffersen L, et al. Methodology of metal criticality determination. *Environ Sci Technol* 2012;46(2):1063–70.
- [8] Gulley AL, Nassar NT, Xun S. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies. *Proc Natl Acad Sci USA* 2018;115(16):4111–5.
- [9] Binnemans K, Jones PT, Blanpain B, Van Gerven T, Yang Y, Walton A, et al. Recycling of rare earths: a critical review. *J Clean Prod* 2013;51:1–22.
- [10] Swain N, Mishra S. A review on the recovery and separation of rare earths and transition metals from secondary resources. *J Clean Prod* 2019;220:884–98.
- [11] Seo Y, Morimoto S. Comparison of dysprosium security strategies in Japan for 2010–2030. *Resour Policy* 2014;39:15–20.
- [12] Sykes JP, Wright JP, Trench A, Miller P. An assessment of the potential for transformational market growth amongst the critical metals. *Trans Inst Min Metall B* 2016;125(1):21–56.
- [13] Skirrow RG, Huston DL, Mernagh TP, Thorne JP, Duffer H, Senior AB. Critical commodities for a high-tech world: Australia's potential to supply global demand. Canberra: Geoscience Australia; 2013.
- [14] Weng ZH, Jowitt SM, Mudd GM, Haque N. Assessing rare earth element mineral deposit types and links to environmental impacts. *Appl Earth Sci* 2013;122:83–96.
- [15] Weng ZH, Jowitt SM, Mudd GM, Haque N. A detailed assessment of global rare earth element resources: opportunities and challenges. *Econ Geol* 2015;110(8):1925–52.
- [16] Van Gosen BS, Verplanck PL, Seal II RR, Long KR, Gambogi J. Rare-earth elements. In: Schulz KJ, DeYoung JH, Seal RR, Bradley DC, editors. *Critical mineral resources of the United States—economic and environmental geology and prospects for future supply*. Reston: United States Geological Survey; 2017. p. 539–72.
- [17] Verplanck PL, Hitzman MW. Rare earth and critical elements in ore deposits. Littleton: Society of Economic Geologists; 2016.
- [18] Paulick H, Machacek E. The global rare earth element exploration boom: an analysis of resources outside of China and discussion of development perspectives. *Resour Policy* 2017;52:134–53.
- [19] Rudnick RL, Gao S. Composition of the continental crust. In: Rudnick RL, editor. *The crust*. Oxford: Elsevier-Pergamon; 2003. p. 1–64.
- [20] Gambogi J. Rare earths. Tolcin, editor. In: *Mineral Commodity Summaries*. Reston: United States Geological Survey; 2019. p. 132–3.
- [21] Flanagan DM. Copper. Tolcin, editor. *Mineral Commodity Summaries*. Reston: United States Geological Survey; 2019. p. 52–3.
- [22] Malthus TR. *An essay on the principle of population*. London: J. Johnson; 1798.
- [23] Demol J, Ho E, Soldenhoff K, Senanayake G. The sulfuric acid leach and leach route for processing of rare earth ores and concentrates: a review. *Hydrometallurgy* 2019;188:123–39.
- [24] Klyucharev DS, Volkova NM, Comyn MF. The problems associated with using non-conventional rare-earth minerals. *J Geochem Explor* 2013;133:138–48.
- [25] Kumari A, Panda R, Jha MK, Kumar JR, Lee JY. Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: a review. *Miner Eng* 2015;79:102–15.
- [26] Hidayah NN, Abidin SZ. The evolution of mineral processing in extraction

- of rare earth elements using liquid–liquid extraction: a review. *Miner Eng* 2018;121:146–57.
- [27] Belova VV. Development of solvent extraction methods for recovering rare earth metals. *Theor Found Chem Eng* 2017;51(4):599–609.
- [28] Cox C, Kynicky J. The rapid evolution of speculative investment in the REE market before, during, and after the rare earth crisis of 2010–2012. *Extr Ind Soc* 2018;5(1):8–17.
- [29] García MVR, Krzemien´ A, Manzanedo Del Campo MÁ, Álvarez MM, Gent MR. Rare earth elements mining investment: it is not all about China. *Resour Policy* 2017;53:66–76.
- [30] Fernandez V. Rare-earth elements market: a historical and financial perspective. *Resour Policy* 2017;53:26–45.
- [31] Jamaludin H, Lahiri-Dutt K. Could Lynas make a difference in the global political economy of rare earth elements in future? *Resour Policy* 2017;53: 267–73.
- [32] Goonan TG. Rare earth elements—end use and recyclability. Scientific investigations report. Reston: United States Geological Survey; 2011. Report No.: 2011-5094.
- [33] DiFrancesco CA, Hedrick JB, Cordier DJ, Gambogi J. Rare earth statistics. Historical statistics for mineral and material commodities in the United States. Reston: United States Geological Survey; 2017.
- [34] Mathews JA, Tan H. Circular economy: lessons from China. *Nature* 2016;531 (7595):440–2.
- [35] Werner TT, Ciacci L, Mudd GM, Reck BK, Northey SA. Looking down under for a circular economy of indium. *Environ Sci Technol* 2018;52(4): 2055–62.
- [36] McDowall W, Geng Y, Huang B, Bartekova E, Bleischwitz R, Turkeli S, et al. Circular economy policies in China and Europe. *J Ind Ecol* 2017;21:651–61.
- [37] Ogunmakinde OE. A review of circular economy development models in China, Germany and Japan. *Recycling* 2019;4(27):1–14.
- [38] Brady K. Mining and metals and the circular economy. London: International Council on Mining & Metals; 2016.
- [39] Golev A, Lebre E, Corder G. The contribution of mining to the emerging circular economy. *AusIMM Bull* 2016:30–2.
- [40] Barteková E, Kemp R. Critical raw material strategies in different world regions. Maastricht: United Nations University-Maastricht Economic and Social Research Institute on Innovation and Technology; 2016.
- [41] Ku AY, Setlur AA, Loudis J. Impact of light emitting diode adoption on rare earth element use in lighting implications for yttrium, europium, and terbium demand. *Electrochem Soc Interface* 2015;24(4):45–9.
- [42] Pavel CC, Marmier A, Tzimas E, Schleicher T, Schuler D, Buchert M, et al. Critical raw materials in lighting applications: substitution opportunities and implication on their demand. *Phys Status Solidi A* 2016;213(11): 2937–46.
- [43] Alonso E, Sherman AM, Wallington TJ, Everson MP, Field FR, Roth R, et al. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. *Environ Sci Technol* 2012;46(6):3406–14.
- [44] International Copper Study Group. The world copper factbook. Lisbon: International Copper Study Group; 2019.