

钪、铟、铯、镱、镳及铷），轻稀土的用量大，尤其钕，是轻稀土中价格最高、用量最大的元素。钕铁硼永磁体是目前磁性最强的永磁材料，应用于电视机、医疗设备、磁悬浮列车、混合动力车中。玻璃工业是轻稀土应用的重要市场，常见的玻璃成品如照相机镜头、电视电脑的荧光屏、眼镜玻璃、阴极射线管、精密光学仪器，生产过程中所涉及的玻璃抛光、脱色、着色以及特殊性能玻璃制作，都需要铈、镧、钕和镨等轻稀土。

从氟碳铈矿到终端应用产品，需要经历复杂的选矿、冶炼及深加工过程。人们首先从富集氟碳铈矿的矿石中将它分选出来，然后通过复杂的化学工艺制造出稀土的初级产品，如合金、氧化稀土和氯化稀土，再通过进一步分离和提纯得到单一的稀土氧化物或金属，最终生产出用于制造某些高端产品所需的稀土产品，如抛光粉、催化剂，或将不同纯度的氧化物或金属添加到应用产品中。

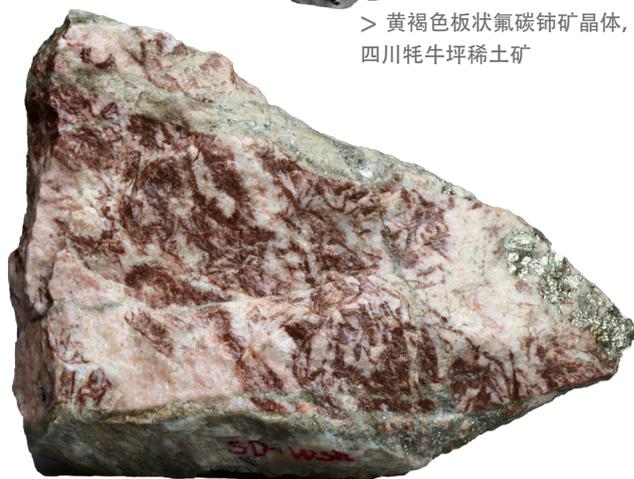
重量级的稀土矿物

氟碳铈矿是已知稀土含量最高且分布最广的稀土矿物，分子式为 $(\text{Ce},\text{La})[\text{CO}_3]\text{F}$ ，稀土氧化物高达67%~73%，铈和镧的含量占稀土总量的70%~90%。氟碳铈矿英文名为Bastnasite，以发现地瑞典的Bastnas矿山命名。氟碳铈矿呈黄色、淡棕色及红褐色的柱状或板状晶体，玻璃或油脂光泽，显微镜下呈现鲜艳的干涉色。稀土氟碳酸盐矿物家族庞大，有选择性富集镧、铈等轻稀土元素的矿物，如氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、新奇钙铈矿；也有选择性富集镱、铷等重稀土元素的矿物，如氟碳铷矿、新奇钙铷矿；还有轻、重稀土元素都富集的矿物，如氟碳铈铷矿，但除了氟碳铈矿外，其余家族矿物并不常见，尤其是富含重稀土元素的矿物。我国稀土氟碳酸盐矿物种类多样，南方离子吸附型稀土矿中分布稀有的含重稀土的氟碳酸盐矿物，这也是南方有重稀土资源的主要原因。

氟碳铈矿在自然界分布比较广泛，但全球形成的具有工业意义的矿床并不多。目前发现的



> 黄褐色板状氟碳铈矿晶体，四川牦牛坪稀土矿



> 棕色板状氟碳铈矿晶体，山东微山稀土矿

有名的氟碳铈矿产地是美国的芒廷帕斯和我国的白云鄂博。此外，还有越南都巴奥，我国山东微山、四川牦牛坪和大陆槽，以及布隆迪喀隆戈，它们都是全球开采的重要矿山，尤其是我国的白云鄂博、微山、牦牛坪和大陆槽是全球主要轻稀土产地。除了白云鄂博是氟碳铈矿和独居石的混合矿外，其余均为单一的氟碳铈矿，矿石品位高，布隆迪喀隆戈矿山号称是全球稀土品位最高的稀土矿山之一。

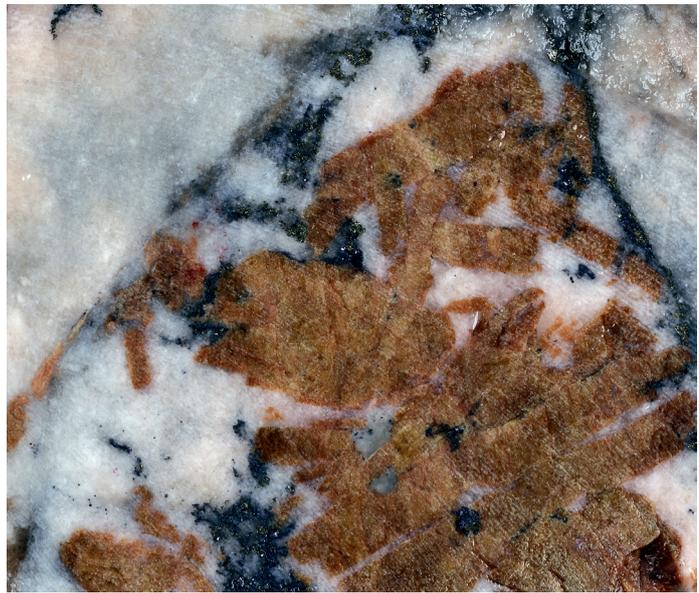
目前，提取稀土的重要工业矿物有：氟碳铈矿、独居石和离子吸附型稀土。尽管氟碳铈矿的开采史比独居石的开采史短得多，提取的稀土元素种类也不如离子型稀土矿的多，但却具有极其重要的工业价值。与独居石或离子型稀土矿石相比，氟碳铈矿的化学组成简单，钍含量低；矿石中伴生的矿物少，主要以钙和钡矿物为主，如重晶石、方解石及萤石；不同矿床中矿物的粒度变化虽较大，但整体粒度较粗，如四川牦牛坪和山东微山的氟碳铈矿颗粒粗大，通常有几厘米。因此，单一的氟碳铈矿矿石较易分选。

影响全球稀土工业的矿山

全球稀土工业始于 19 世纪末期。1953 年之前，稀土几乎全部提取自独居石，因此，稀土工业早期称为独居石时代。后因美国芒廷帕斯和中国白云鄂博氟碳铈矿的发现和开采，全球稀土工业进入氟碳铈矿时代。目前，全球稀土产量主要来自我国氟碳铈矿和少量离子吸附型稀土矿。

第二次工业革命之后，德国在电器、冶金、化学等新兴工业方面发展迅猛。由于对稀土的需求（铈用于制造汽车纱罩），1884 年德国开始开采巴西的独居石，1895 年后扩大了开采规模，1911 年德国又开始在印度大规模开采独居石，1913—1948 年间巴西和印度共生产了 6.79 万吨独居石，占世界稀土产量 95%。在此期间，德国垄断了全球的稀土资源，其稀土工业也得到了快速发展，第二次世界大战期间，德国已研制了 4 种稀土铝合金用于制造发动机、内燃机的复杂零件，这些零件部分则用于坦克等高端军事装备。

1949 年，美国在寻找制造原子弹所需的铀矿时意外发现了规模巨大的芒廷帕斯氟碳铈矿。芒廷帕斯氟碳铈矿发现后很快建厂，1952 年，开始少量生产。随着稀土需求的增加，1965 年，芒廷帕斯第一次扩建，很快供应量占据世界稀土氧化物总量的一半以上，全球稀土工业进入了美国氟碳铈矿时代。1973 年，芒廷帕斯第二次扩建，1974 年，其氟碳铈矿产量占世界稀土总产量的 65%，1975—1984 年间，美国氟碳铈矿产量由 14 940 吨上升到 25 311 吨；1978 年后，世界所需的氟碳铈矿几乎全部来自芒廷帕斯。1989 年，全球氟碳铈矿产量 24 450 吨，独居石 19 400 吨，离子吸附型稀土矿 5 800 吨，磷钇矿 150 吨。第二次世界大战到海湾战争期间，美国无疑是全球最大的稀土资源生产国和消费国，稀土在工业制造业及军事领域发挥了巨大优势，海



> 棕色板状氟碳铈矿晶体，山东微山稀土矿

湾战争中加入稀土元素镧的夜视仪成为美军坦克压倒性优势的来源。

一直以来，我国投入大量人力和物力对白云鄂博矿进行了勘探。早在 1935 年，我国科研人员在已发现的白云鄂博铁矿石中新发现了两种稀土矿物——氟碳铈矿（白云矿）和独居石（鄂博矿）。随着地质勘探和研究工作有序地开展，逐渐揭开了这座举世无双的稀土矿床的神秘面纱：稀土储量占国内 90% 以上，占世界总储量的 77%。如今，白云鄂博矿已是全球最大的稀土矿山。一个人，一个矿，一座城（白云鄂博市），不仅为我国的稀土工业带来了巨大的战略资源优势，而且改变了全球稀土产业格局。自 20 世纪 80 年代后期，随着白云鄂博铁矿开采出的稀土投入国际市场，加之我国南方优质的离子吸附型稀土资源，以及稀土分离提纯技术的突破，全球稀土生产逐渐由美国转入中国。1998 年之后，我国稀土产量占世界稀土总产量的 80%~98%，全球稀土开发进入中国稀土时代。2002 年，美国钼公司关闭了芒廷帕斯矿山，改从中国进口稀土。2018 年，中国稀土矿产量为 16 万吨，其中氟碳铈矿产量约占 62%，而中国稀土产量占据全球稀土产量的 80%。

2010 年以来，全球对稀土资源高度关注，掀起了稀土勘探及开发热潮。美国提出了确保稀土等关键矿产安全供应的政策措施，重新发展本国稀土供应链，以减少对中国稀土的依赖。2010 年年底，美国重启芒廷帕斯的开采，近

几年其稀土产量逐年增加,2019年稀土产量创新高,达到2.6万吨,已成为中国以外最大的稀土精矿生产国。日本于2012年开始投资建设越南都巴奥矿山,英国彩虹稀土公司于2017年投产布隆迪喀隆戈矿山。随着这些矿山被开发利用,氟碳铈矿的供应格局将从单一矿山来源转为全球多国供给。

未来仍可期

目前,稀土主要应用于催化剂(石油化工、汽车尾气净化等)、磁体、抛光材料、电池、冶金、玻璃及陶瓷领域,主要的消费国家和地区有中国、美国、日本及西欧,等等。美国稀土主要应用于生产催化剂,2019年,催化剂所用稀土占消费总量的75%,铈主要应用于催化剂。2012—2018年间,日本连续6年保持稀土进口增长,进口的稀土以铈和镧为主。我国是全

球钕铁硼合金的主要供应国,2016年,产量占全球总产量的89%。氟碳铈矿作为提取轻稀土最为优质的资源,未来仍有很大的市场需求和竞争力。全球为了防范稀土原料供应的风险,在注重研发资源节约型产品的同时更加注重资源供应的多元化。☑

本文由国家社科基金重大项目“中国战略性三稀矿产资源供给风险治理机制研究(编号:19ZDA111)”、中国地质调查局“中国矿产地质志(编号:DD20190379)”项目联合资助。

第一作者单位/中国地质科学院
矿产资源研究所

(本文编辑:王依卓)

