

锆： 见证地球起源的稀有金属

□ 文图 / 张志军 董 越 任柄璋

第一作者简介 张志军，高级工程师，主要从事区域地质调查、遥感技术应用与地学科普工作，主持地质调查项目2项，编写出版专著2部，发表论文（第一作者）20余篇。

通信作者简介 董越，高级工程师，主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究工作，主持多个地质调查项目，发表论文（第一作者）10余篇。

2014年，在西澳大利亚的一座牧场中，地质学家们在一块普通的岩石碎片中发现了一颗极为罕见的微型矿物晶体，其年龄达到了惊人的44亿年，几乎与地球年龄相仿，

这表明它见证了地球从诞生之初至今的演变历程。这颗古老而珍贵的矿物晶体便是锆石，它是地球历史的一名沉默的记录者。

锆石作为一种天然宝石被人们所熟知。其主要成分是硅酸锆（ ZrSiO_4 ），折射率紧随钻石之后，且拥有极高的色散值，这使得无色透明的锆石形似于钻石，因此常被视为钻石的替代品。在市场上，锆石常见的颜色有很多种，其中蓝色和无色最受欢迎，蓝色锆石尤其珍贵。

锆石的背后隐藏着一个稀有元素——锆（Zr）。锆在自然界中不常以纯金属形态存在，但通过复杂的提炼工艺，可以从锆石中获取纯净的金属锆。这种银灰色的金属既是过渡金属又是稀有金属，以其独特的物理和化学特性在现代工业中占有独特地位。

偶然发现 深入研究

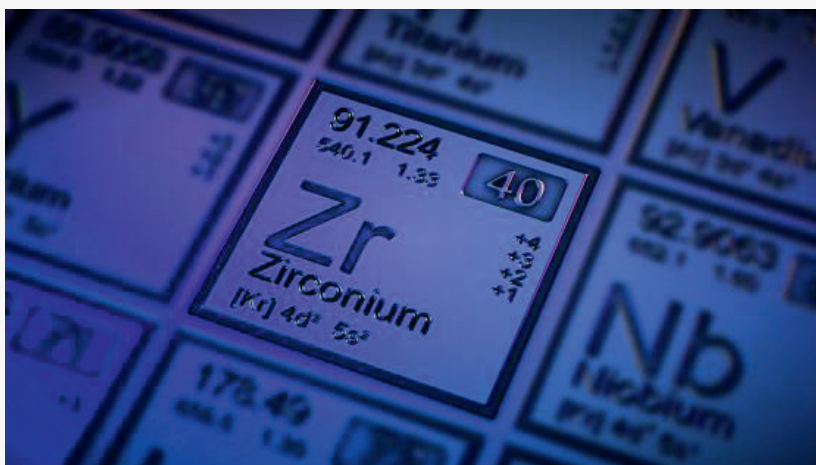
1789年，一个阳光明媚的早晨，年轻的德国化学家马



> 天然锆石晶体



> 蓝色锆石宝石



> 元素周期表 - 锆

丁·克拉普罗特 (Martin Klaproth) 正在他的实验室中进行着一项艰难的实验。他正在研究锆石的组分，试图找出它的秘密。锆石在阳光下闪闪发光，让他充满了好奇。他小心翼翼地用酸处理锆石，突然间，他发现了一种闪着银灰色光芒的金属，与他之前见过的任何金属都不同，于是他将这种金属命名为锆。

锆的发现立即引起科学界的轰动。人们对这种新元素充满了好奇，纷纷开始研究它的特性。直到 1914 年，荷兰工程师勒利和汉布格把钠与四氯化锆置于真空球内，通过电流升温，在高温下进行化学反应，使得人类历史上第一次制得了极纯的金属锆。1925 年，荷兰科学家阿克和德博尔制得有延展性的块状金属锆。1940 年以后，人们利用卢森堡科学家克劳尔提出的镁热还原法实现了锆的工业化生产。直到

21 世纪，由于电脱氧法问世，人们掌握了电解法制备金属锆，为进一步探究锆元素的微观结构奠定了基础。

强力吸气 较耐腐蚀

锆位于元素周期表的第 40 位，其密度为 6.49 克 / 立方米，熔点 1 852°C，沸点 4 377°C。锆的化学性质非常活泼，具有

+2、+3 和 +4 等多种化合价，相对分子量为 91.22，稳定的同位素有 5 种。

锆能强烈地吸收氮、氢、氧等气体。当温度超过 900°C，锆能猛烈地吸收氮气；在 200°C 条件下，100 克金属锆能够吸收 817 升氢气，相当于铁的 80 多万倍，这种特性已被广泛利用，例如，在电真空工业中，将锆粉涂在电子真空元件和仪表的阳极和其他受热部件的表面上，吸收真空管中的残余气体，可制成高度真空的电子管和其他电子真空仪表。

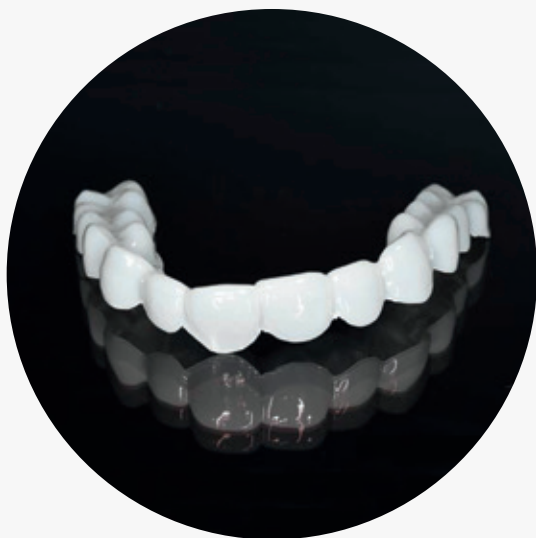
锆对氧的亲合力很强，1 000°C 时氧气溶于锆中能使其体积显著增加。锆的表面易形成一层具有光泽的氧化膜，故其外观与钢相似。锆的耐腐蚀性比钛好，但是溶于氢氟酸和王水。高温时，可与非金属元素和许多金属元素反应，生成固溶体。



> 涂有锆粉的电子真空元器件



> 氧化锆陶瓷轴承



> 人造氧化锆牙齿 (图片来源: <https://hexdent.com/>)

产品多样 应用广泛

硅酸锆 传统锆制品中的重要品种。产品以锆英砂为原料,经研磨、煅烧、粉化后即可制得。硅酸锆化学性质稳定,是一种优质、价廉的乳浊剂,被广泛应用于建筑陶瓷、卫生陶瓷、日用陶瓷、一级工艺品陶瓷等的生产中。电视的彩色显像管、玻璃行业的乳化玻璃、搪瓷釉料生产中也会用到硅酸锆。

氧化锆 (ZrO_2) 无毒、无味的白色固体,对碱溶液及许多酸性溶液都具有足够的稳定性,适用于精密陶瓷、电子陶瓷、光学透镜、玻璃添加剂、电溶锆砖、陶瓷颜料、瓷釉、人

造宝石、耐火材料、研磨抛光等行业和产品。

在铸造和陶瓷行业,锆因其优异的耐高温和耐腐蚀性质,常用于制造高性能的耐火材料。使用锆增强的耐火材料不仅能承受极端的热负荷,还能提高产品的整体耐用度和效率。例如,氧化锆陶瓷轴承在腐蚀环境中比不锈钢轴承的寿命更长,应用于无尘室不会有油渍污染的问题,在大多数酸碱碱性环境中表现出高度的耐腐蚀性,无磁性,绝缘。

尽管锆不是人体必需的微量元素,但锆在医学领域展现出独特的优势,特别是在生物相容性和耐腐蚀性方面,使其成为制造人体植入物的理想材料。氧化锆用来制造人造关节和牙科植入物,密度和强度高,能有效抵抗体液的腐蚀,而且对牙龈无刺激、无过敏反应,使用寿命一般为 15~20 年。

氧化锆在新能源领域展现出巨大的潜力,成为推动技术革新的重要材料之一。固态电池作为一种革新的电池技术,因其高能量密度、长寿命及卓越的安全性,被公认为下一代电池技术的代表。固态电池的核心部件之一是固态电解质,主流技术包括聚合物、氧化物和硫化物 3 种类型。氧化物电解质,尤其是锂镧锆氧 ($Li_7La_3Zr_2O_{12}$),扮演着关键角色。在三元锂电池中,锆的添加比例仅为 0.4%,而在固态电池中,锆的含量可高达 20%。预计如果全球电池产业全面转向固态技术,



> 固态电池



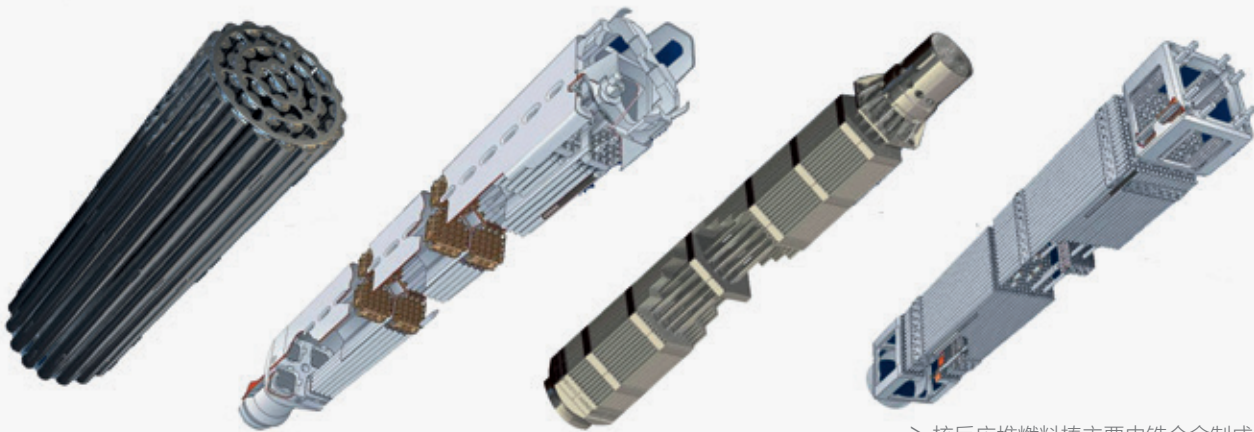
> 航天服

对氧化锆的需求量将激增至 25 000 ~ 30 000 吨，市场需求将至少增加 50 倍。

碳化锆 (ZrC) 一种硬度大的高熔点材料和极好的高温耐火材料，可用作火箭发动机中固体推进剂的原料和

用于生产合金钢，还是生产金属锆和四氯化锆的原料。纳米碳化锆具有高效吸收可见光、反射红外线的特性，可吸收 2 微米以下的短波长，反射超过 2 微米红外线波长，通过能量转换，防止人体热量损失，用于制造新型保温调温纺织品。另外，碳化锆陶瓷力学性能好，在高温苛刻环境下有很高的耐高温性能，是航天航空领域必不可少的材料之一。

锆金属 锆的重要性在核技术领域尤为突出。核级锆是一种严格去除杂质、高度纯净的锆金属，通常其中铪 (Hf) 的含量被控制在 0.01% 以下，专门用于核反应堆中的材料。由于锆具有低热中子吸收截面的特性，还有助于保护冷却剂（通常是流经反应堆堆芯的水）免受污染，因而广泛应用于核动力航空母舰、核潜艇及民用发电反应堆中，特别是作为铀燃料元件的包壳材料，极大提升了核反应堆的安全性和使用寿命。据估计，全世界生产的锆中有超过 80% 用于核电工业。海绵锆是一种高度纯净、呈多孔状结构的锆金属，因其出色的吸氢性能，成为航天器氢储存系统的理想材料。它是通过复杂的冶炼工艺从锆矿石（如锆英石）中提取出来的纯锆产品，是制造高纯度锆材料（如核级锆）的中间产品。



> 核反应堆燃料棒主要由锆合金制成



海绵铅金属

铅合金 在航天工业领域，铅及其衍生产品凭借其显著优势，在关键技术应用中发挥了不可替代的作用。它的轻质、高强度和卓越的高温性能使其在航空发动机部件制造方面提升了设备的整体性能和可靠性。铅添加铌、钛、铝等元素制成的铅合金，常用于制造火箭发动机的喷嘴和燃烧室等核心部件。

在军事工业中，铅的加入显著提高了钢材的强度和硬度。含铅的装甲钢、锻件钢和不锈钢成为制造装甲车、坦克、大炮和防弹板的首选材料。此外，铅的加入也显著改善了锌镁合金的性能，使其密度更低，耐高温性能更强。微量的铅添加到铜中，可以在不影响导电性的同时提高其熔点，使其成为高压电线的理想材料。

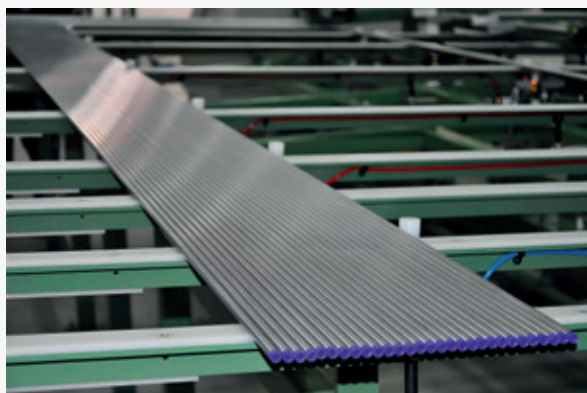
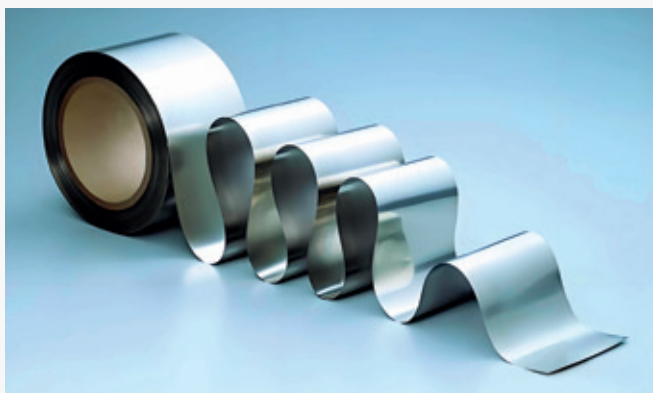
另外，铅基合金在氢气储存和运输中起着关键作用。铅基储氢材料具有高储氢密度和良好的稳定性，能够有效解决氢气储存和运输中的安全问题。在太阳能领域，铅基涂层

因其优异的热稳定性和抗反射性能，而用于高效太阳能电池和太阳能集热器中，显著提高了能量转换效率和设备的耐用性。

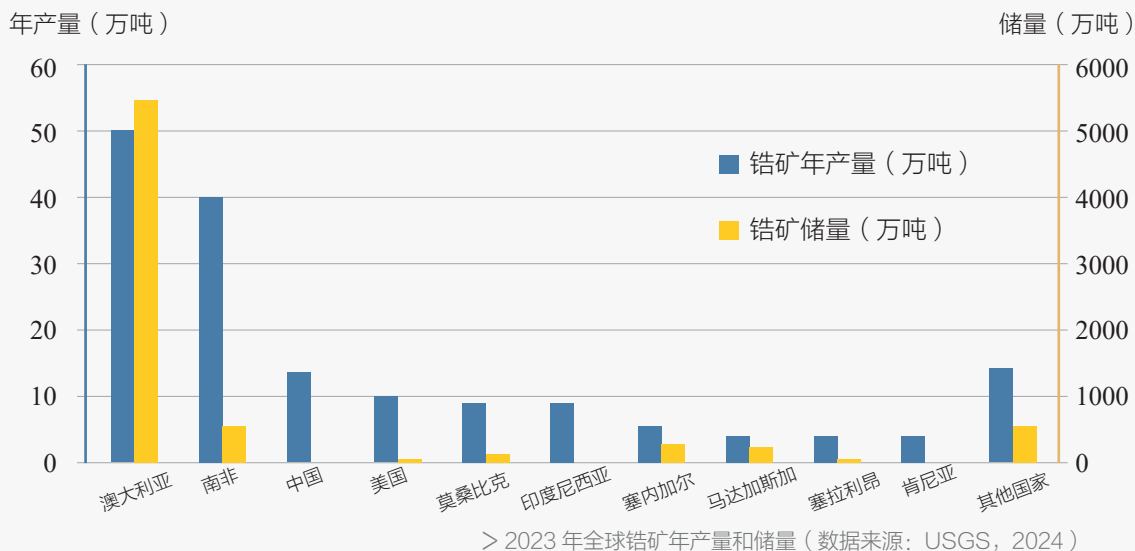
储量不足 消费升级

铅元素在地球上主要是以铅石的形式存在，通常通过提取铅英砂（含有铅石的砂矿）来获得。全球铅资源主要生产国和主要消费国呈明显分离的状态。生产主要集中在澳大利亚、南非、印度尼西亚等国家，主要消费国家和地区集中在中国、欧洲、北美，等等。根据 USGS 最新统计数据：2023 年全球铅矿资源储量（以氧化铅计）约为 7 400 万吨。其中，澳大利亚以大约 5 500 万吨的储量居于世界首位，占全球储量的 74.3%；中国铅资源储量不足全球的 1%。中国铅矿资源禀赋差、储量少，自给能力不足，85% 以上的铅英砂供应依赖进口。

铅是我国 24 种关键矿产之一，未来对铅资源的需求量仍将保持快速增长。国内铅加工企业主要生产低技术低附加值的硫酸铅、氯化铅和氧化铅等中低端产品，占市场消费 50% 以上，缺乏国际竞争力，产能过剩、能耗高和环境污染等问题突出。随着我国铅矿消费结构逐渐转变，铅英砂



铅合金钢材



将在高新技术行业得到广泛应用，用于传统陶瓷工业的铅资源需求量将下降，用于高技术行业中的铅制品需求量将快速增长，尤其是工业级、核级海绵铅需求将越来越大。

前景广阔 急需破局

综上所述，铅的市场发展前景广阔。随着核能、化工和新能源等领域的快速发展，对铅材料的需求将不断增加。全球铅市场将保持稳定增长，并面临着诸多机遇和挑战。在全球铅产业中，我国主要处于产业链中游，大量进口原矿并用于生产铅初级产品。铅产业高度依赖进口，致使上游产业链极易被“卡脖子”。美国和日本虽然也缺乏铅资源，但两国技术积累丰富，产品附加值高，反而享有很高的议价权。

因此，我国应尽快加强重视，加大铅矿勘查力度，提高铅资源储量，掌握资源主动权；加强技术创新，提高产品附加值，向高端产品延伸，争取更多议价权；关注市场变化，获取更多市场份额，及时调整战略布局，巩固产业主导权。📌

本文由中国地质调查局地质调查项目（编号：DD20242768、DD20220995、DD20230135）”资助。

第一作者单位 / 中国地质调查局廊坊自然资源
综合调查中心



> 铅英砂

（本文编辑：何陈临秋）