

铬：

从地球深处到现代工业的奇妙旅程

□ 文图 / 蔡鹏捷 连东洋 芮会超 陈 鑫

第一作者简介 蔡鹏捷，博士，主要从事铬铁矿成因研究。

通信作者简介 连东洋，副教授，主要从事地幔岩与铬铁矿研究。

铬（chromium），元素符号 Cr，原子序数为 24，是一种在元素周期表中位于第 VI B 族的过渡金属。铬的名称来源于希腊文“chroma”，意为“颜色”，因为铬的化合物大多具有鲜明的颜色。铬在地壳中的含量虽然不高，仅为 0.01%，但它对人类的生产生活有着不可估量的价值。铬是一种银白色带有光泽的金属，纯铬具有良好的延展性，而含有杂质的铬则变得硬而脆。铬的密度约为 7.15 克 / 立方厘米，熔点高达 1 907℃，沸点为 2 679℃。铬不溶于水，但可以溶于强碱溶液。在空气中，铬的表面会迅速形成一层致密氧化铬薄膜，这层薄膜能有效阻止其进一

步氧化和腐蚀。铬与浓硫酸反应会生成二氧化硫和硫酸铬，但与浓硝酸反应时，由于其表面生成致密氧化物薄膜，铬会呈现钝化状态，不会被溶解。铬的价态多样，常见的有 +6、+3 和 +2 价。其中，+6 价的铬化合物如重铬酸钠（ $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ）具有强氧化性，而 +3 价的铬在酸性溶液中最稳定。铬与氧形成的氧化物中，三价铬的氧化物 Cr_2O_3 和六价铬的氧化物 CrO_3 最为常见。

铬的发现是一段迷人的旅程，从丰富多彩的矿物开始，到化学上的突破，它见证了人类对自然界奥秘的探索与理解不断深化的过程。科学家们通过不懈努力，从无数矿石中识别出这



＞ 铬铁合金

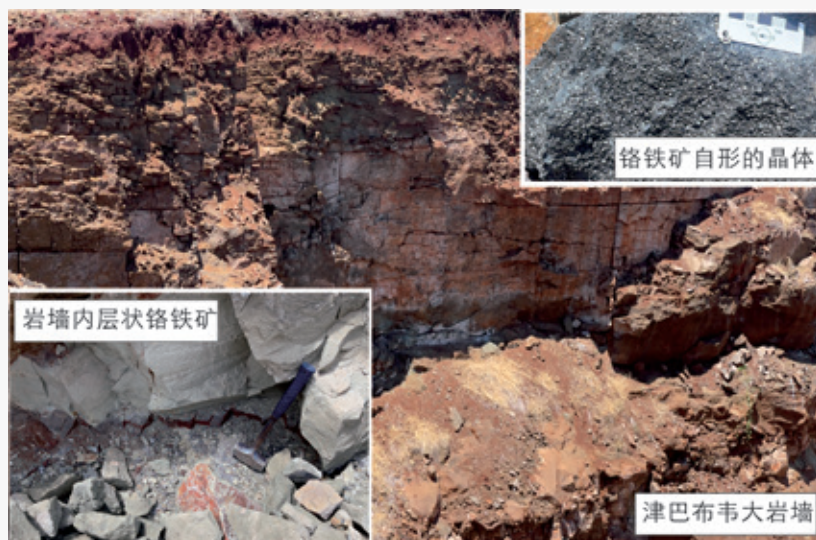
一独特的金属元素，随后在实验室中通过一系列精巧实验揭示了铬的独特化学性质与广泛应用，为材料科学、冶金学乃至现代工业的发展铺设了基石。早在铬被确认为一种元素之前，人们就欣赏并使用含铬的矿物，因为它们具有引人注目的颜色。我国古代西夏时期的工匠就使用含铬的红色矿物用于制作釉下彩。这种颜色鲜红的矿物，暗示着里面有什么特别的物质。直到18世纪末的法国，一位名叫路易斯-尼古拉斯·瓦奎林（Louis-Nicolas Vauquelin）的化学家才揭开这些彩色矿物的秘密。1797年，瓦奎林在俄罗斯乌拉尔山脉发现了一条铬铅矿的矿脉，被它强烈的颜色吸引，他决定进一步调查。瓦奎林对铬铅矿进行了一系列实验。用盐酸处理后，他得到了一种黄色溶液和一种红色沉淀物，这让他更加坚定自己发现了新的物质。通过坚持不懈和反复实验，瓦奎林在1798年成功地用碳还原氧化铬，分离出一种新元素。发现这种新元素后，瓦奎林将其命名为“铬”。由于其独特的性质，铬的应用价值被迅速开发。起初，它被用来制造充满活力的颜料和染料，彻底改变了艺术界。后来，铬进入皮革工业，成为制革必不可少的原料。特别是铬作为制造不锈钢的

关键成分，改变了现代工业和人们的日常生活。铬的发现打开了一个色彩和创新的世界，展示了一个化学家的好奇心如何导致科学技术的重大进步。

铬铁矿双生花：“层状”与“豆荚状”

铬元素在地壳中的含量约为0.01%。值得注意的是，自然界中并不存在游离状态的铬，而铬铁矿则是含铬的主要矿石类型。根据铬铁矿的产出形态，主要分为“层状铬铁矿”和“豆荚状铬铁矿”。

层状铬铁矿，就像是“千层蛋糕”一样，岩石和矿石互相堆叠起来，主要产出于大陆克拉通中的层状镁铁质和超镁铁质杂岩体中，其分布范围广泛，主要包括南非、津巴布韦、芬兰和美国等地。其矿石类型主要以块状（铬尖晶石含量超过90%）和浸染状（铬尖晶石含量超过60%）为主。具有经济价值的层状铬铁矿的形成时代主要可以分为三个阶段：约27亿年前形成的，如美国的斯蒂尔沃特杂岩体和加拿大的鸟河席状岩体；约25亿年前形成的，如津巴布韦的大岩墙、芬兰的凯米侵入体和俄罗斯的普拉科夫斯特侵入体；约20亿年前形成的，如南非的布什维尔德杂岩体和巴西的岩床。层状铬铁矿的岩体规模通常非常巨大，例如，南非的布什维尔德，作为全球最大的层状侵入岩体，其出露面积约65 000平方千米，占据了全球铬铁矿产量的45%和储量的40%。总体而言，层状铬铁矿的资源量非常丰富，约占全球铬铁矿总资源量的75%。



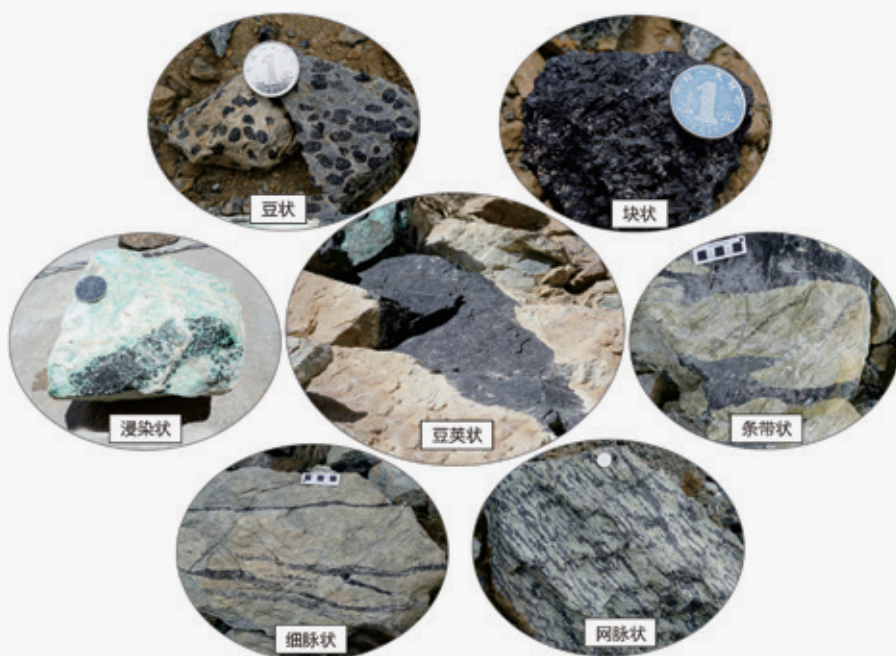
＞ 典型层状铬铁矿

豆荚状铬铁矿则是以不规则形态（如豆荚状、透镜状、板状等）产于蛇绿岩地幔和壳幔过渡带中的铬铁矿类型。其分布也相对广泛，主要分布在土耳其、哈萨克斯坦、菲律宾、阿尔巴尼亚、阿曼和俄罗斯等国家。豆荚状铬铁矿在全球铬铁矿总产量中的占比约为25%。与层状铬铁矿相比，豆荚状铬铁矿体的规模通常较小，大型矿体的延伸往往仅数百米。这类铬铁矿的围岩多为纯橄岩，部分可与二辉/方辉橄榄岩直接接触，其矿石结构相比层状铬铁矿则显得更为丰富多样。

地球深部的秘密： 铬铁矿裹挟的信息

铬铁矿的成因模式一直是科学家们深入探索的课题，它与地球的动力学背景及物质循环紧密相连。对于层状铬铁矿的成因，科学界已达成共识，认为其与岩浆作用密切相关。这一认知主要基于层状铬铁矿的产出特征及相关岩石组合的研究，明确了岩浆混合作用、分离结晶过程及同化混染作用在成矿过程中的重要作用。

然而，豆荚状铬铁矿的成因模式则显得更为复杂多变，这反映了科学是一个不断发展、不断观察、再认识、再突破的过程。很久以前，科学家们就



＞ 豆荚状铬铁矿中丰富多变的矿石类型

开始研究这些豆荚状铬铁矿是怎么形成的。他们认为，豆荚状铬铁矿的形成与基性-超基性岩浆在位于地幔或壳幔过渡带中的岩浆通道或岩浆房中的分离结晶作用有关，与层状铬铁矿的成因有相似之处。而这个过程并不是那么简单。科学家们还提出了一个叫作“部分熔融残余”的理论，即地幔岩石在高温高压下部分熔融，形成了铬铁矿。豆荚状铬铁矿还有个特别之处，就是它们外部经常披着的“纯橄岩薄壳”外衣。科学家们认为，这是岩石和熔体之间“亲密互动”的证据，也就是“岩石—熔体反应”的结果。最令人兴奋的是，科学家们在豆荚状铬铁矿中竟然发现了原位的金刚石。杨经绥院士领导的研究团队在全球十多个国家的造山带蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中，都找到了金刚石的踪迹。这些金刚石告诉我们，这些铬铁矿可能来自地球非常深的地方，那里的压力之大和温度之高都是我们无法想象的，瞬间打开了通往地球深部秘密世界的大门。

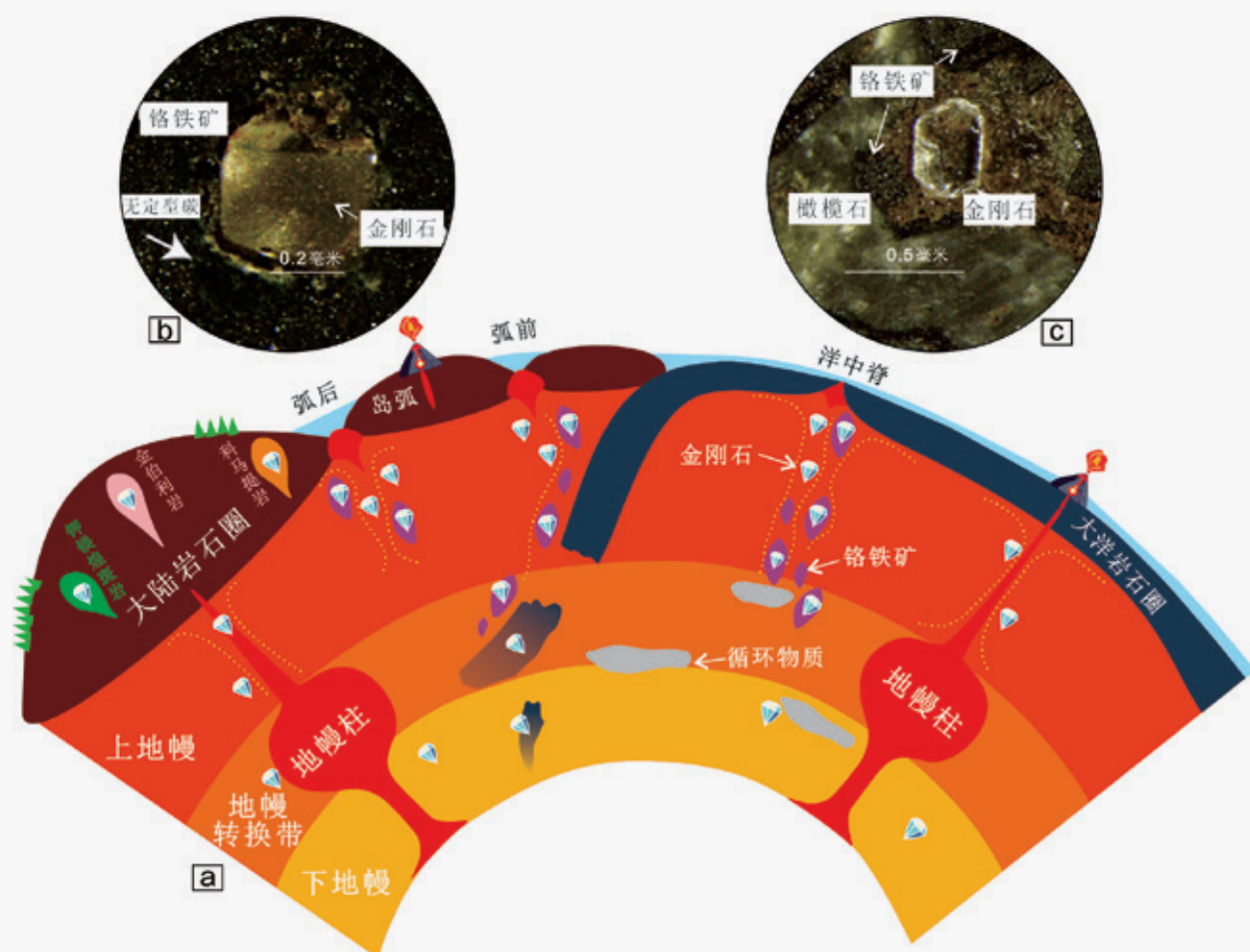
铬的跨界之旅： 从矿石到现代工业的奇妙应用

铬是一种多功能元素，凭借其独特的物化性质，在众多行业中展现出了广泛的应用价值。

在冶金工业中，铬是制造不锈钢的关键元素之一。不锈钢之所

以具备出色的耐腐蚀性能，主要归功于铬在其中形成的致密氧化铬膜。此外，铬还广泛应用于各种金属合金中，以提高材料的硬度、强度和耐磨损、耐腐蚀性能。例如，镍铬合金常用于加热元件，而特定的高温合金则用于喷气发动机和燃气轮机中。在电镀领域，铬电镀层因其优异的耐腐蚀性和美观性，广泛应用于汽车、家电、电子等行业。铬镀层不仅能有效提升金属制品的防腐性能，还能为其赋予独特的光泽。铬及其化合物还在耐火材料中发挥着重要作用，这些材料能够承受极高的温度，对于窑炉和其他高温工业设备的衬里至关重要。在化工与催化剂方面，铬及其化合物作为催化剂在化学工业中得到广泛应用，能够加速多种化学反应的

进行。例如，铬可用于制造合成氨的催化剂，而氧化铬(Cr_2O_3)则用于有机合成和合成橡胶的生产中。铬化合物以其鲜艳的颜色而著称，能够调制出色彩鲜明的红、黄、橙、绿等色调，是非常稳定的颜料成分。由铬铁矿加工制成的铬盐，在颜料、染料、陶瓷等领域有着广泛的应用。例如，氧化铬是一种绿色颜料，常用于油漆、油墨和陶瓷中；而铬酸铅(PbCrO_4)则能生产亮黄色颜料，常用于校车、道路标志的涂装。在医疗领域，铬也有着重要的应用。它可用于制造人工心脏瓣膜、人工关节等人工器官。此外，铬还是人体必需的微量元素之一，其参与胰岛素的活动并在葡萄糖代谢中发挥作用。因此，铬也用于治疗糖尿病等疾病，吡啶甲酸铬



> a. 全球构造背景下铬铁矿的深部成因模式；b,c. 豆荚状铬铁矿内金刚石

是一种常见的膳食补充剂。在半导体制造过程中，铬被用作掩膜版的关键材料。由于其在紫外光下表现出的高光学密度，铬能够有效阻挡光线，确保光刻过程的精确性。在航空航天领域，铬被用作保护涂层，以提高部件的耐用性并减少维护需求。这些应用进一步展示了铬在多个行业中的广泛价值和重要性。

全球铬铁矿资源版图： 现状与未来的双重奏

全球铬铁矿的资源分布呈现出极不均衡的特点，主要的铬铁矿开采国有芬兰、印度、哈萨克斯坦、南非和土耳其等国家。相比之下，我国的铬铁矿资源则显得相对匮乏。根据中国矿产资源报告 2014—2023 年的数据，2019 年我国铬铁矿的资源保有量还有 1 210.8 万吨，但到了 2022 年，资源保有量已经锐减至 279.47 万吨。这一减少趋势反映了我国铬铁矿资源的紧缺状况。

根据 2023 年中国海关总署的最新数据，中国进口了 1 833.26 万吨铬铁矿，与 2022 年同期的 1 500.74 万吨相比，同比增长 22.16%。近十年来，我国的铬铁矿进口量一直保持着高速增长的态势，而对外依存度更是高达

99% 以上，凸显了我国在铬铁矿资源方面严重依赖进口的现状。

当前，我国高碳铬铁的产量已稳居世界第一，2023 年年产量达到了惊人的 792 万吨（数据来源：Mysteel 年报），这一数字约占全球总产量的半壁江山。展望 2024 年，全球铬铁矿的供应预期总产量将达到 4 240 万吨，与上一年相比有 1.9% 的增幅（数据来源：Mysteel 年报）。由于我国是不锈钢消费市场的最大占比国，2023 年的不锈钢表观消费量达到了约 3 108.22 万吨，比上年增加了 296.97 万吨，增幅为 10.56%（数据来源：

中国特钢企业协会不锈钢分会网站统计数据）。随着经济的稳步恢复，未来铬铁矿的需求仍将保持不断增长的趋势，对外依存度也将持续上升。然而，国内铬铁矿储量已经接近枯竭，这使得我国的资源安全保障面临着重大的挑战。

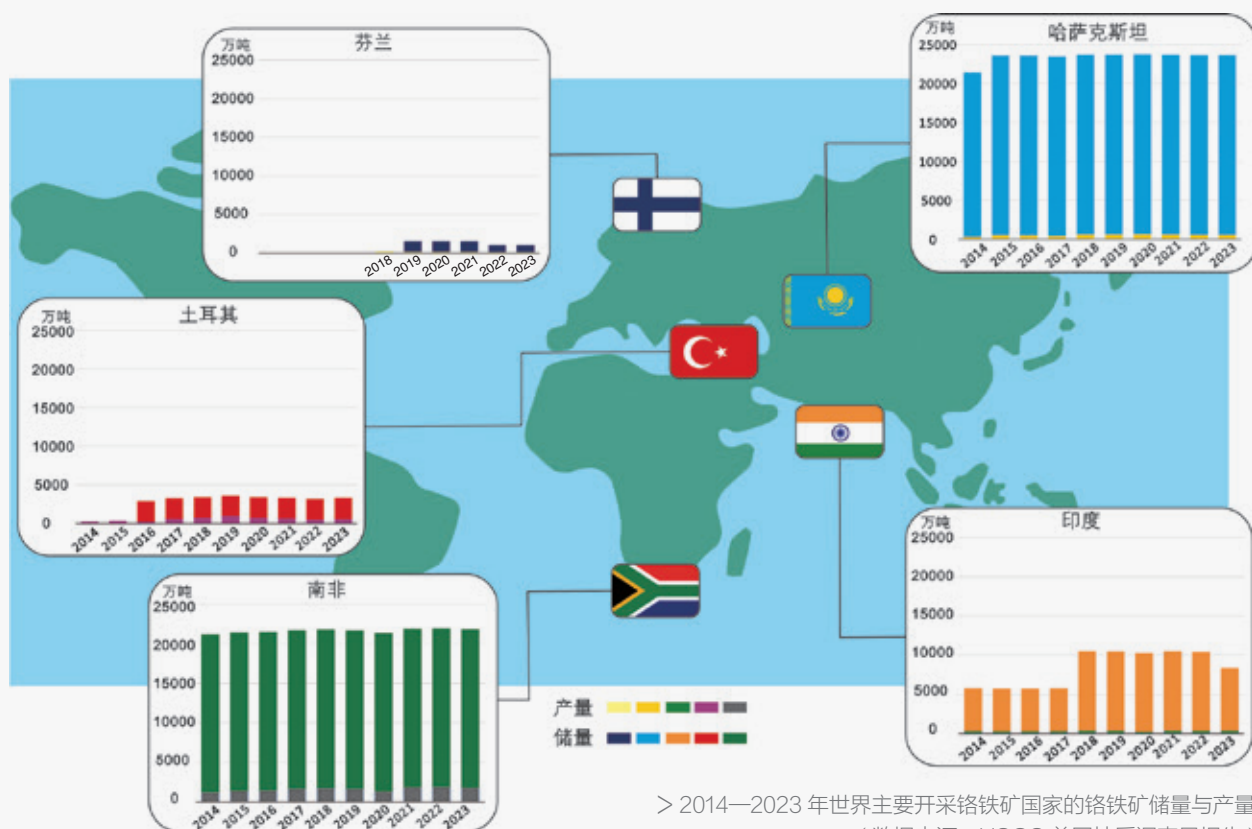
因此，我国必须加大对铬铁矿的勘查力度，积极寻找新的铬资源，以提升我国

的资源安全保障能力。值得注意的是，我国的铬铁矿进口来源十分单一，高度集中，面对当前复杂的国际形势，保障铬资源的供应变得刻不容缓。

为了降低铬铁矿进口国家单一的风险，加强“一



＞ 铬在各个行业的用途



> 2014—2023 年世界主要开采铬铁矿国家的铬铁矿储量与产量
(数据来源: USGS 美国地质调查局报告)

带一路”沿线“富铬”国家之间的资源合作,实现优势互补尤为重要。我们应该进一步开展境外铬资源的调查,摸清境外铬资源及其成矿规律,这一任务迫在眉睫。☑

本文由国家重点研发计划“地球系统与全球变化”重点专项课题(编号:2023YFF0804402)和国家自然科学基金项目(编号:42272068、92062215、42330306、42302080)联合资助。

第一作者单位/南京大学地球科学与工程学院(地幔与成矿研究院)

(本文编辑:何陈临秋)



> 2014—2023 年中国铬铁矿储量、进口量与全球铬铁矿产量对比
(数据来源: 中国矿产资源报告 2013—2023; 中国海关总署网)