

石墨： 个性十足的“工业黑金”

□ 文图 / 张欣 牟文斌 李福明

第一作者简介 张欣，助理工程师，从事地质矿产勘查和研究工作。

石墨，这种平凡的黑色物质，其功能与应用方式随着人类社会不断发展而不断演变，从书写工具，到工业制造的重要原料，再到电子与能源领域的广泛应用，石墨见证了人类文明进步和科技创新，展现出巨大的发展前景与应用潜力，是当今世界高新技术发展不可或缺的非金属材料，也是重要的战略性矿产资源。

作为名副其实的“工业黑金”，石墨是如何形成的，又为何具有如此之多的功能与应用呢？

溯源解密 探究成因

天然石墨是由碳元素组成的非金属矿物，是地质历史时期中经历沉积和变质共同作用的产物。其形成过程主要经历两个阶段，分别是碳质沉积富集阶段和变质成矿阶段，前者为石墨的形成提供丰富的碳质来源，后者则完成由碳质到石墨的转变。

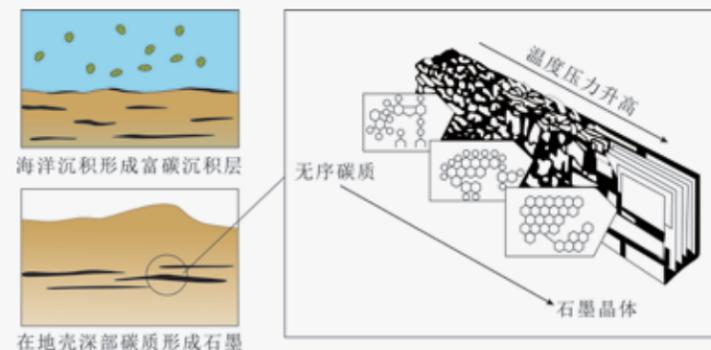
天然石墨由自然界中的碳质形成，

碳质来源主要分为有机碳和无机碳，其中有机碳占据主导地位，主要来源于原始海洋中的藻类植物、微体古生物残骸，以及其他碳质残留物；无机碳占比则相对较小，大多来源于海洋环境中形成的碳酸盐岩等含碳无机物。原生有机碳与无机碳在海底经过堆积和埋藏，形成富含碳质的沉积层。

有了充足的沉积储备后，碳质还需要一定温压条件才能转化为石墨，这一转化过程又称为石墨化过程。在地球板块运动过程中，海洋沉积的富碳沉积层逐渐移动到地壳深处，高温高压的封闭环境使得零散碳质快速有序地形成石墨晶核，之后缓慢聚集生长形成石墨晶体。其中温度和压力是碳质转变为石墨的首要条件，晶体生长时间是石墨化程度的重要因素。

寻踪索迹 分布广泛

天然石墨在全球分布广泛、储量丰富。美国地质调查局发布的《2024年矿产商品摘要》显示，截至2022年年底，全球已探明的天然石墨储量约2.8亿吨，中国储量约为8100万吨，约占全球的1/4；全球2023年石墨产量约160万吨，中国产量



> 石墨成因示意图



> 中国石墨分布图（图片来源：张艳飞等，2022，有修改）

约为123万吨，约占世界总产量的77%，是世界领先的石墨生产国。

根据《自然资源部2022年全国矿产资源储量统计表》，我国天然石墨矿石种类齐全，以晶质石墨为主，隐晶质石墨较少；矿产分布广泛，全国25个省、自治区、直辖市都发现有石墨矿点，储量相对集中，总体呈“东多西少”的特点，其中黑龙江是我国最大的晶质石墨储备省，约占全国晶质石墨储量的2/3。

形态多样 种类丰富

天然石墨色泽漆黑、质地滑腻，依据其结晶形态差异，可分为晶质石墨和隐晶质石墨。

晶质石墨晶形较好，晶体肉眼可见，可细分为鳞片石墨和块状石墨。当单层石墨有序叠加时即形成鱼鳞状的鳞片



> 鳞片晶质石墨矿石



> 隐晶质石墨矿石



> 石墨坩埚



> 石墨工业零件

石墨，若排列杂乱无章，则会形成致密的块状石墨。

隐晶质石墨晶体微小，形似土状，需借助电子显微镜才能看清晶形，因此又被称为土状石墨。

天然石墨的晶体形态与其工业价值密切相关。一般而言，结晶程度越好，其品质特性就越高，因此，鳞片石墨往往具有优于其他类型石墨的优良特性和应用价值。

在以结晶形态为依据进行种类划分的基础上，还可通过石墨形成时的地质背景和条件将石墨矿床进一步划分为区域变质型、接触变质型和岩浆热液型三种。

区域变质型石墨矿床多由古老含碳沉积地层经地壳运动区域变质而成，多形成晶形较大、品质较好的鳞片石墨，其矿石品位虽然较低，但矿床规模大，工业价值最高，是我国最主要的矿床类型，代表性产地为黑龙江柳毛、萝北、内蒙古兴和、山东平度。

接触变质型石墨矿床是岩浆在侵入煤系地层时，由煤层中的碳变质形成，又称为煤系石墨。石墨结晶程度偏低，呈微晶或隐晶质，矿石品位较高，可达60%~90%，代表性产地为湖南鲁塘、吉林磐石。

岩浆热液型石墨矿床是由含碳岩浆热液冷却结晶形成，规模一般较小，矿体形态不规则，石墨的结晶程度差别较大，大多为中细鳞片石墨，矿石品位较低，代表性产地为新疆黄羊山、苏吉泉。

个性十足 工业之珍

天然石墨特殊的结构赋予其多种优异特性，也大大拓展了其在工业领域的用途。

质地软 石墨的摩氏硬度为1，是自然界最软的矿物。这是因为石墨中的碳原子凭借结合力极强的共价键在平面上构成了稳定的六边形层状结构，而层与层之间距离较远，仅依靠微弱的吸引力相结合，这导致其碳原子层内很牢固，但层与层之间的联结较弱，在受力之后，层与层之间极易滑动分离，就像一摞扑克牌，轻轻一推，牌和牌就错落滑动。这也

是石墨能用于制作铅笔的原因，在纸上轻轻一划，石墨铅芯层层剥落，留下一层黑色痕迹。甚至还有艺术家在铅笔芯上雕刻创作，演绎一出现代版“核舟记”。

耐高温 石墨具有优越的耐高温性能，熔点接近4000℃，沸点达到4250℃。石墨是原子晶体，碳原子之间的共价单键是一种键能很高的化学键，需要极强的能量才能将其破坏，所以石墨的熔点很高，在超高温环境下重量损失极小。因此，在冶金、

铸造等工业部门中，石墨可用于生产镁碳耐火砖及耐高温的石墨坩埚。

耐腐蚀 石墨具有优异的防腐蚀性能，能够承受各种强酸、强碱和有机溶液的侵蚀，而且石墨与大多数化学溶液的“亲和力”极小，表面不易结垢，可在化学工业中制作成高纯度耐腐装置，如化学管道、反应槽、燃烧塔，等等。

润滑性 石墨是使用历史悠久的固体润滑剂。石墨容易滑动的层状结构，赋予其优异的润滑性。

两种“工业黑金”的区别

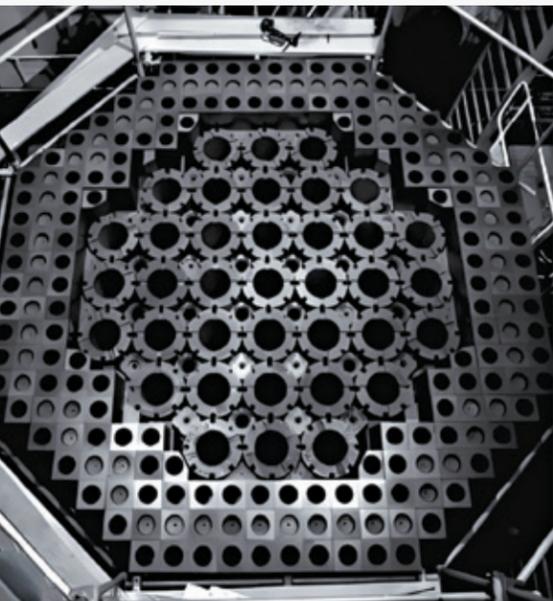
天然石墨和煤炭都是由碳元素组成的物质，且都有“工业黑金”的美誉，但两者在结构性质、成因等方面差异较大，在工业应用上也各有千秋。

从结构性质角度来看，天然石墨和煤炭差别较大。天然石墨是由碳元素构成的单质体矿物，碳原子层层有序排列，晶体结构均匀。煤炭则是由碳、氢、氧等多种元素共同组成的混合物，碳原子与其他原子构成不同的有机分子，与无机化合物无序组合在一起，结构复杂凌乱。因此，石墨的物理化学性质远比煤炭稳定，燃点、熔点及导热性都远高于煤炭。这也是二者虽然都富含大量碳元素，但煤炭可以用作燃料，而石墨却不能的原因。

从成因角度来看，虽然天然石墨与煤炭均为远古植物残骸经历沉积与变质作用的产物，但石墨的形成必须在地壳深处经历高温高压变质作用，碳质才能形成石墨晶体。煤炭只需在地壳浅部经历沉积作用就可形成褐煤，经历低程度变质作用可形成烟煤和无烟煤。若温压条件继续升高，也可实现由煤炭到石墨的转化，例如，接触变质型煤系石墨，就是由无烟煤层受岩浆侵入时高温变质形成的。

在工业应用方面，天然石墨与煤炭大相径庭。天然石墨主要用作工业原料，用来制作工业器械零件及碳基材料。煤炭则主要用来燃烧供能及提取有机化合物，如发电、炼钢，以及制备甲醇、粗氨，等等。

值得一提的是，无论是石墨还是煤炭，我国都是世界上主要的储备国和生产国，储量位居前列，产量全球第一。其中，石墨集中分布在黑龙江和内蒙古两省（自治区），煤炭则集中分布在山西、内蒙古、新疆和陕西四省（自治区）。巨大的“工业黑金”储量，为我国工业发展提供了有利条件和坚实基础。



> 以石墨作为减速剂的核反应堆

在吸附空气中的气体和水汽之后，石墨层间距离会增大，更易于滑移，进一步加强了其润滑性。因此，在机械制造等行业中，石墨既可作为固体润滑剂来帮助铸件脱模，也可与其他金属制成无油润滑轴承等摩擦性材料，同时也是日常生活中解决锁芯生锈常用的润滑材料。

导电性 石墨是一种常用的非金属导电材料，这与石墨中碳原子的电子排布结构有关。碳原子最外层有4个电子，而石墨蜂巢式层状结构中每个碳原子都利用3个电子分别与周围另外3个碳原子连接形成共价键，因此，每个碳原子会多出一个自由电子来传输电荷，这就使石墨拥有了优良的导电性。因此，石墨在电气行业中应用广泛，常用作强光灯泡灯丝、碳棒、电刷等，或以电极形式应用于小电极碳管、水银整流器正极、焊接碳、

电话配件等零件上。

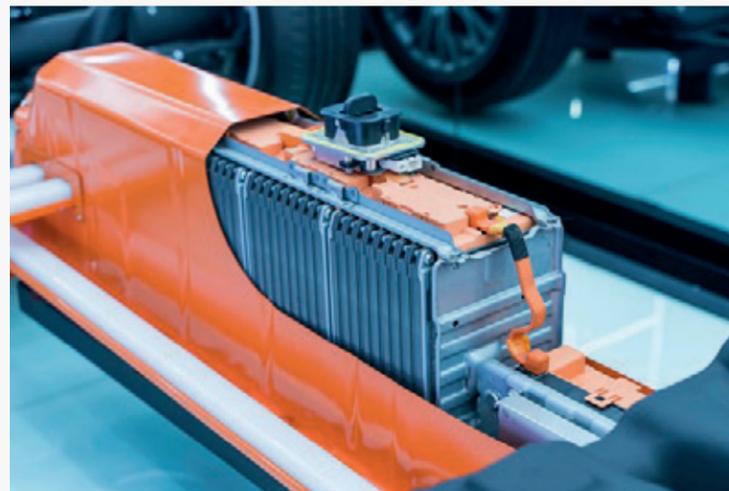
此外，石墨稳定的物理化学性质决定了其可作为化学反应减速剂和良好的隔热剂，并以此在核工业材料、航天设备部件等尖端工业领域中得到重用。我国目前投入商业运行的第四代高温气冷反应堆中，就使用了性质稳定的石墨作为反应堆的减速剂。

新型材料 未来可期

全球新一轮工业革命的到来，为石墨的研究和应用带来新的机遇和挑战。科技进步和产业升级，使得石墨深加工技术不断取得突破，石墨特性得到深度开发和利用，石墨行业开始向高新技术产业发展，一系列新型石墨材料应运而生，如柔性石墨、球形石墨、石墨烯，等等。

柔性石墨是由天然鳞片石墨经过特殊化工处理后快速加热膨胀制成的，因其膨胀制作工艺，又称为膨胀石墨。柔性石墨不仅继承了天然石墨的优良性质，还拓展了柔软性、回弹性、吸附性等特性，可以在高温、高压或辐射条件下工作，能够作为阻燃和密封材料。利用其亲油疏水的特性，可以作为吸附剂来处理油类物质，常用于处理原油泄漏及油田废水；还可以除去可溶于油的物质，如农药等一些有机或无机有害成分，或用于脱除工业废气及汽车尾气中的有害物质。

球形石墨是对天然鳞片石墨采用机械物理法进行球形化处理得到的，球状形体使其具有优良的导电性、充放电容量和循环寿命，



> 以球形石墨作为负极材料的汽车电池

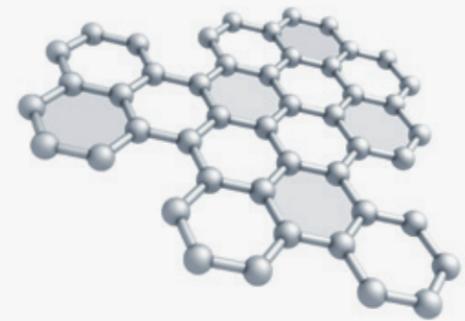
是目前较为理想的锂电池负极材料。近些年，锂离子电池在计算机、通信及娱乐等电子产品中的使用量迅速增长。随着清洁环保的电动汽车行业快速壮大，对高性能锂离子动力电池的需求量不断增长，随之也带动了球形石墨的需求与发展。

在目前所有的新型石墨材料中，石墨烯是当之无愧的“材料黑马”，掀起了石墨应用的新高潮，是名副其实的新质生产力。

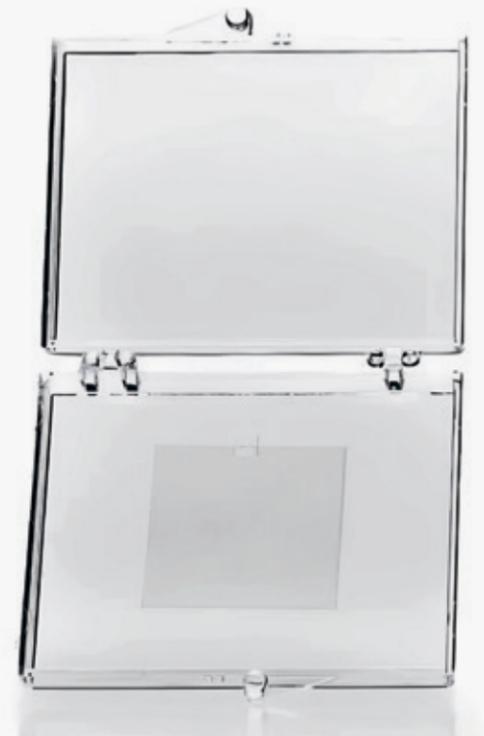
石墨烯是由碳原子构成的单层片状材料，也就是单层石墨，极薄的厚度却有着极高的强度，同时又兼具优异的导电导热性及可塑性，使其在物理、化学、生物、能源等众多领域都备受关注，具有重要的应用价值。利用石墨烯的优异性能，可用来制作石墨烯复合防腐涂料、散热薄膜材料、柔性显示设备、感知传感器等先进工业及电子产品。未来，石墨烯在生物医药、光学、电学和生态环境等领域都有广阔前景，还有望带来半导体领域的颠覆性革命，成为下一代电路、超级计算机的基础材料。

随着石墨烯生产技术的不断进步和成本的降低，其在工业和日常生活中的应用将越来越广泛。因此，我国十分重视石墨烯技术的研究与创新，并将其放在核心科技地位，争取在高新技术领域走向世界前列，引领新材料发展。

在对石墨材料的不断深入研究背景下，未来将可能出现更多具有创新性和高性能的石墨基材料，在推动工业发展、提高能源效率、保护环境等方面发挥重要作用。目前研究表明，天然石墨的品质直接影响到以其为原料制备的新材料的性能和应用范围。天然石墨品质越好、纯度越高，在制备新型材料时就更具优势。未来，应用前沿石墨材料的新能源、新材料、国防工业及航空航天等领域将对优质石墨资源有着更大需求。我国作为最大的天然石墨储备国和生产国，应继续深化石墨找矿行动，利用多手段综合寻找深部矿产、开发优质资源，并以此为依托，加强对石墨资源的综合开发利用，提升在新兴领域的研究与技术创新能力，将石墨资源优势转化为新领域的发展优势，为新质生产力发展不断赋能。 



> 石墨烯结构示意图



> 透明石墨烯薄膜

本文由中国地质调查局“黑龙江佳木斯桦南地区区域地质调查（编号：DD20230250）”项目资助。

第一作者单位 / 中国地质调查局哈尔滨

自然资源综合调查中心

自然资源部哈尔滨黑土地

地球关键带野外科学观测站

（本文编辑：何陈临秋）