

# 铼：纵横凌云 未来可期

□ 文图 / 陈海燕 彭芊芃 高 雄

**第一作者简介** 陈海燕，高级工程师，河北省科普教育基地青年科普工作者，主要从事基础地质调查及矿床学研究。

2021年7月1日，宛如雷霆的100响礼炮，骤然打开时间的闸门，中华民族100年的苦难辉煌，100年的浴血荣光，在天安门广场尽情绽放。在庆祝中国共产党成立100周年大会活动现场，由6型71架军机组成4个空中梯队呈“100”和“71”纪念字样，以米秒不差的精准度飞越天安门广场上空，向中国共产党献上生日祝福。这其中不只有护卫党旗、悬挂庆祝标语的直升机，还有首次以最大规模集中亮相的15架歼—20编队。71架军机全部由中国自主研制生产，充分向世界展示了大飞机、军机国产化的雄厚实力，而实现我国大飞机、军机航空发动机技术的重大发展离不开一种关键金属——铼（rhenium）。

## 相逢甚晚 所得不易

铼，元素符号Re，原子序数75，是自然界中最后一个被发

现的天然元素，但它的发现却经历了长达半个多世纪的曲折而漫长的过程。原来，早在1871年，俄国化学家门捷列夫就曾预言自然界中存在一个原子量为190的“类锰”元素；1913年，英国物理学家亨利·莫塞莱进一步预测出元素周期表中尚未被发现的43号、61号、72号以及75号新元素，而其中的75号便是后来被发现的铼元素；1925年，德国的化学家诺达克夫妇和奥托·伯格最终用X射线在铂矿和铌铁矿中发现了75号元素，并为纪念这来之不易的新发现，以诺达克夫人的出生地莱茵河（Rhine）的名字命名了这个元素——铼。

铼是一种特别稀有且高度分散的元素，在地壳中的丰度仅为十亿分之一数量级，比任何一种稀土元素的含量都低。铼的原子半径和离子半径与钼、铜相似，多以类质同象的杂质形式伴生于辉钼矿、斑铜矿中，因此，在自然界中很难发现铼的独立矿床。最初科学家在实验室从660千克辉钼矿中也仅艰难获取1克铼金属。现阶段铼



＞我国自主研发的第五代制空战斗机歼—20（图片来源：听风）

主要从钼、铜冶炼的烟灰和废酸等副产品中富集并分离提纯。

目前，世界上的铯资源主要蕴藏在斑岩型铜钼矿床中，此类型矿床几乎占铯总资源量的 80% 左右，典型矿床如美国亚利桑那州的阿霍斑岩铜钼矿和智利丘基卡马达斑岩铜钼矿床；产于砂页岩铜矿和砂岩型铀矿床中的铯资源次之，如哈萨克斯坦杰兹卡兹甘砂岩铜矿和美国科罗拉多高原含铀（钍）砂岩矿床。值得注意的是，近年来在乌克兰的超镁铁质岩中发现了微量的纯铯，日本北海道火山和俄罗斯库德里亚韦火山喷气孔中也都发现了纯铯矿。

据郭娟等人 2020 年的估计数据，全球含铯矿床的伴生铯资源量在 33 000 吨以上，远高于美国地质调查局（USGS）2019 年发布的 11 000 吨。根据美国地质调查局最近发布的《2022 年矿产品摘要》，全球已探明铯储量远超出 2019 年的 2 453 吨，主要分布在智利、美国、俄罗斯等国。近年来，我国铯矿勘查工作有所突破，查明铯资源储量较 2010 年增长 39.5%。但绝大多数伴生铯的矿床在进行矿产储量核算时并未对铯的资源量进行评价，因此，很难提供准确的铯金属储量数据（黄凡，2019）。

随着对战略性新兴矿产关注度不断提高，国内时有关于新发现铯矿的报道，主要以辉钼矿伴生为主，分布于西藏、黑龙江、陕西、河南、湖南、辽宁、福建、江苏和湖北等省（自治区）。我国地质工作者相继在安徽泾县湛岭钼矿、四川拉拉铜矿以及云南澜沧老厂斑岩钼矿中发现数量可观的铯资源，而且 2008 年在四川沐川发现了沉积砂岩型独立铯矿，2010 年在陕西省洛南县黄龙铺钼矿区中发现铯矿床，储量达到 176 吨，约占全球储量的 7%。

## 超级金属 横空出世

铯，具有优良的硬度、耐磨性、抗腐蚀等物理化学特性，它的密度为 21.04 克/立方厘米；熔点为 3 180℃，只排在钨、钽之后，位列第三；沸点高达 5 627℃，是所有金属中沸点最高的。尤为神奇的是，当铯作为添加剂加入到钨钼铬等合金中时，便能显著提高这些金属的强度和塑性，堪称能够起到点石成金作用的神来之笔，这种现象又被称作“铯效应”。因此铯被称作“超级金属”和“战斗金属”。

加入了铯的钨钼合金被认为是最耐高温的金属合金，如钨—



> 辉钼矿（图片来源：宇宙解码公众号）



> 斑铜矿

铯热电偶最高可测量 3 100℃ 的高温，用钨铯合金制造的电子管阴极，竟比普通钨电子管的寿命长 100 倍；添加了铯的超高温发射极材料，还可将热电子放电效果提高 20%；国内研制的镍基单晶高温合金，在第二代 DD6 和第三代 DD9 高温合金中分别添加了 2.0% 和 4.5% 的铯，在 980℃ /250 兆帕的测试条件下，第三代 DD9 合金的蠕变断裂寿命达到了 568 小时，约为第二代 DD6 合金寿命的两倍（王珏、赵巍，2022）。此外，近年来，以铯作为添加剂的新型生物医用金属材料，能够极大提升医疗技术，在创伤修复及矫形等医学领域得到广泛应用，比如，使用先



➤ 钼铌合金制造的心脏支架

进医用金属材料钼铌合金制造的心脏支架，在保证较高合金强度的同时仍具有良好的塑性、抗生理腐蚀、抗疲劳性和耐磨性，从而造福患者。

航空发动机是极为复杂、精密的工业产品之一，集成了空气动力学、结构强度、材料、工艺等相关专业的最高成就，体现着经典力学在工程应用上的极限技术。而作为航空发动机核心部件的空心涡轮叶片的设计和制造是制约航空发动机发展的核心技术，该技术门槛高、风险大、投入多、周期长，是国内目前公认的最大技术难题，

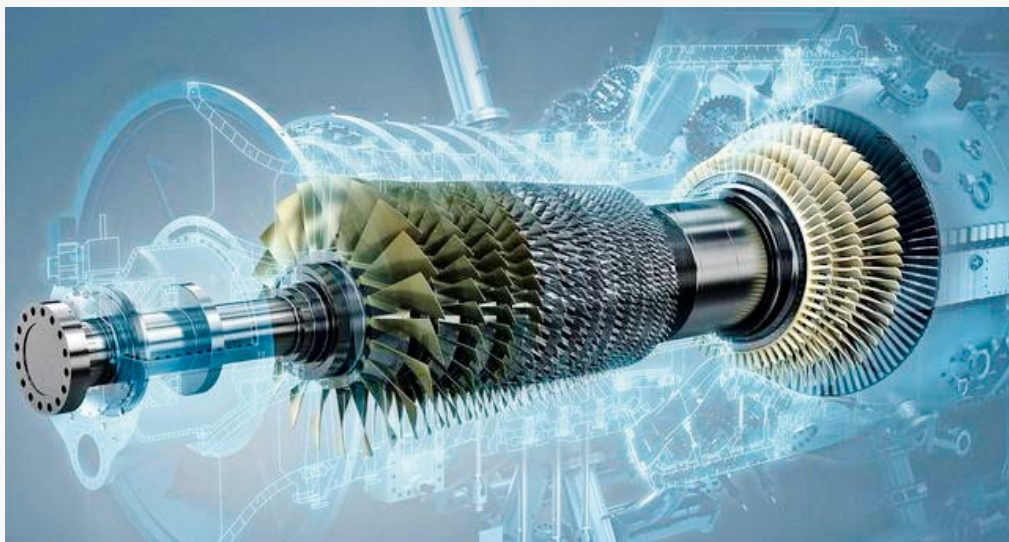
被视为我国高端制造业的“心脏病”。然而，中国科学家们经过不懈努力，发现铌的加入为解决这一难题提供了创新点。铌的熔、沸点极高，使其在航空航天工业发动机新型材料应用中成为最佳选手。添加了铌的发动机涡轮叶片、燃烧室及喷气嘴等零部件可以极大提升其在长期高温高压条件下的抗变形（抗蠕变）、抗氧化和抗疲劳性，延长使用寿命。据有关研究表明，铌添加量达 3% ~ 6% 的镍基单晶高温合

金蠕变断裂寿命整整提高了 10 倍。因此，从某种意义上讲，铌的添加提升了一代单晶叶片性能，而一代单晶叶片性能又直接决定了一代航空发动机，也由此导致铌的需求急剧增加。目前，全球约 80% 的铌都用于生产航空发动机单晶叶片，在军事上具有重要战略意义，铌也因此获得“航空金属”和“发动机壮骨粉”等美誉。

## 突破封锁 后来居上

在铌金属利用技术方面，目前世界上主要有美国、英国、法国、加拿大和俄罗斯 5 个国家可以生产含铌的合金钢。由于西方国家对中国进行材料和技术封锁，导致航空发动机性能问题一直都是我国航空工业中的短板。而我国在 20 世纪 60 年代开始从钼精矿焙烧烟尘中提取铌，近年来，更是不断聚焦并提高含铌金属材料的应用。

例如，成都航宇超合金技术有限公司突破欧美技术封锁，解决了铌金属提纯问题，掌握了单晶叶片的自主量产技术，达到国际标准。2016 年，中国航空发动机集团 1 000 千瓦级先进民用涡轴发



➤ 航空发动机叶片示意图





> 发动机涡轮叶片

动机（AES100）开始研发，AES100 拥有高效率、低油耗、长寿命、高可靠性、大功率储备及良好可发展性，能满足 5 ~ 6 吨级双发直升机和 3 ~ 4 吨级单发直升机的动力需求，对掌握通用航空动力自主发展权，提升我国航空发动机及直升机产业在国际航空产业链中的地位，积极参与市场竞争具有重要战略意义。2020 年，我国 5 000 千瓦涡轴发动机已进入试车阶段，短短 6 年时间就研制并达到了国际先进发动机的技术标准，让中国弥补了发动机的短板，逐渐摆脱“卡脖子”现状，成功打破西方国家在航空发动机研发领域的垄断。

从航空发动机发展历程来看，随着技术进步，铼越来越多地用作生产高性能单晶高温合金材料，增加铼含量，已成为制造航空发动机

叶片的发展趋势。但由于铼的价格极其昂贵，要降低航空发动机的研发及制造成本就需要寻找更多的铼资源。让我们寄希望于新一轮战略性矿产找矿突破行动，尽早实现战略性矿产的自主开发应用，为我国航空航天等高端装备制造产业储备充足的矿产资源，进一步提高铼资源的利用水平，实现中华民族的航天梦。❏

本文由河北省人力资源和社会保障厅“河北省涞水县紫石口一带前寒武纪风化壳—沉积型三稀金属成矿规律研究（编号：河北省高层次人才资助项目（A202001056））”和河北省地质矿产勘查开发局“廊坊市人民公园岩石地学科普示范（编号：13000022P0069B410028N）”“河北省风化壳淋积型稀土及伴生稀散、稀有金属富集机理与成矿潜力评价项目（编号：454-0502-JBN-G43D）”联合资助。

第一作者单位 / 河北省区域地质调查院  
（河北省地质旅游研究中心）

（本文编辑：何陈临秋）



> 铼矿床