

休戚相关 同气相求

——战略性稀有气体资源氦气

□文 / 李玉宏 周俊林 张宇轩 李济远

第一作者简介 李玉宏，博士，正高级工程师，中国地质调查局氦气资源调查工程首席科学家。长期从事油气、氦气、煤炭和铀矿、氦气等资源调查研究工作，是我国氦气资源基础地质调查开拓者和我国新一轮“氦气热”的促进者。出版的我国首部氦气资源调查研究综合性专著《渭河盆地氦气成藏条件及资源前景》受到广泛关注。

> “太阳的元素”——氦气

2016年，在戈尔德施密特地球化学大会（Goldschmidt）上，牛津大学和杜伦大学的研究人员宣布在坦桑尼亚东非大裂谷发现了巨量氦气资源，媒体报道称，这一发现很可能改变全球氦气贸易的“游戏规则”。2018年2月16日，美国总统特朗普签署第13817号令，公布了对美国利益至关重要的35种关键矿产目录，氦气赫然在列。随后，澳大利亚、欧盟等27个国家或组织也陆续将氦气列入关键矿产名录。

氦（helium），是唯一在地球以外被首次发现的元素，也是分子直径最小的物质。它是一种无色、无味的稀有惰性气体。标准大气压下，氦是沸点最低的已知元素，也是唯一不能在常压下低温固化的元素。随着我国新一轮“氦气热”的展开，这种神秘气体愈发受到人们的关注，它不仅被称作“气体稀土”和“黄金气”，还有着“拯救生命的资源”之美誉，逐步成为大国角逐的战略资源，在未来科技领域意义重大。

氦气的发现是人类科学探索历程中一个重要里程碑。它不仅推动了人类对物质本质和基本规律的深入认识，也为人类在航空、航天、医疗、信息技术等领域带来诸多创新和应用。

科学家在观测日全食时，用光谱仪首次在太阳光谱中发现属于氦的神秘黄线，当时的它不属于任何已知元素，因而被称为“太阳的元素”。

“太阳的元素”自维苏威火山岩释放的气体中被发现，而当时的人们完全不相信这种说法。

科学家将钇铈矿置于硫酸中加热，获得一种未知气体，后经鉴定为氦气，这表明“太阳的元素”在地球上存在。自此，氦正式发现，并被命名为helium，在希腊语中意为“太阳”。

人们在堪萨斯州德克斯特镇的石油钻探中发现，天然气含有一种“不燃烧”的不明气体。后经化学家进一步分析，发现气体中含有1.84%的氦。这表明，氦气虽然在地球上很罕见，但可从天然气中获取。

物理学家发现，氦气是一种质量极轻的气体，它的密度只有空气的1/7左右，这是氦气的主要优势之一；科学家将 α 粒子打入真空管，并向管内放电，通过观察管内气体的发射光谱，证明了 α 粒子就是氦核。

科学家首次液化了“永久气体”氦气，开创了低温工程学和低温物理学新纪元。

科学家利用液氦冷却汞，测量到其电阻几乎降为零，于是发现了超导电性。从此，打开了超导的大门，激发了科学家在超导领域的研究热情。

在-270.98℃左右，物理学家意外发现，液氦的比热容会发生突变，由此发现了超流态现象。

1868年

1881年

1895年

1903年

1907年

1908年

1911年

1937年

> 氦的研究历史

氮气的用途

氮气具有分子最小、沸点最低、化学性质不活泼、热稳定性高、导热率高、渗透性强、密度低、扩散易、溶解难、密封难等特殊物理化学性质，虽以微量组分出于天然气中，非常稀有。但氮气在液体燃料火箭发射、深潜水领域不可或缺，极高纯度的氮气是芯片制造必备的保护气，同时氮气也是壳幔流体交换的示踪剂，广泛应用于“深空、深海、深地、深蓝”

等高新技术领域，彰显着“不惧严

寒、不畏高温，高雅独立、

纯洁稀有，甘做配角、

默默奉献”的优秀

品质。随着科技

的不断进步和

应用领域的

不断拓展，

氮气的应用

前景将会越

来越广阔。

工业生产

氮气在工

业生产中有着广泛

应用。例如，在焊接

和切割中，氮气被用作保

护气体，以保证焊接和切割的质

量；氮气用于半导体生产、光纤通信、激光切

割、液晶显示器制造等领域，化学惰性和高导热率使

其成为芯片制造必不可少的保护气；第四代核反应堆

中，反应堆设计采用高达 790℃ 的气体冷媒温度，在

此温度下，只有氮气具有必需的化学稳定性、惰性、

高传热速率、低动力学压力损失和低中子有效截面。

氮气在这些方面的应用无可替代，工业生产将是未来

氮气需求增长的主要方向。

航空航天

氮气在航空航天领域有着重要的应用，人类

探索宇宙的征程离不开氮气的无私奉献。例如，

在液体燃料航天器发射中，氮气是无可替代的燃

料仓和管道系统的清洗剂、检漏剂，燃料加载的

增压气和冷却剂，等等。清洗增压液氢罐和管道

系统时，在液氢的低温环境中，任何其他气体（如

氮气或氩气），都会冻结并与液氢混合堵塞管道

和阀门，而氮气是唯一液化温度远

低于氢的惰性物质，因此能

够在液氢环境下作业；

在高空气球和飞艇

中，氮气被用作

气囊气体，以

提供浮力，

克服了氢气

球易燃、易爆

的缺点。

在飞机发

明前，氢飞

艇曾承载着

人们安全飞翔

的梦想。

深潜水

氮气在深潜水领域也

发挥重要作用，为深海探索保驾

护航。例如，潜水员通常会使用氮氧混合气

体来进行深海潜水（潜艇）。这种用氮气替代

氮气的混合气体，因氮气在血液中的溶解度明

显小于氧气，可减少氮气溶入潜水员血液所带

来的危险和不适，极大降低潜水员在返回水面

的过程中，由于压力骤降而导致气泡在血管内

聚集的风险。

民生领域

氮气在医疗领域有重要的应用，被

称为“拯救生命”的气体。例如，在核

磁共振（NMR）和磁共振成像（MRI）

等技术中，核磁共振成像的核心是超

导磁体，没有液氮就不能稳定运行，不

能保证高分辨率成像；在呼吸系统疾病

的治疗中，氮气可增加呼吸系统中氧气的

传输速度，缓解呼吸系统疾病的症状；

此外，氮气还可用于神经系统疾病的治

疗和预防。

氮气可用于制造氮气灯，氮及其同

族“兄弟”（惰性气体）共同为我们贡

献了色彩斑斓的夜景。氮气灯以氮气为

放电气体，主要用于广告灯箱、霓虹灯、

紫外线光源等方面。由于氮气能够产生

明亮的黄色光芒，常被用于商业和娱乐

场所中的灯光效果。

在电子支付领域，氮氮混合制成

的氮氮激光器便宜高效且能耗低，广

泛应用于条形码识别、二维码支付等

场合。

氮气可用于气体充填，如球类、气

球、气垫等，因为氮气的密度非常低，

可使充入的物体漂浮在空中；氮气还可

填充于食品包装中，以保持食品的新鲜

度和质量。

信息产业

信息化时代离不开氮气的守护。

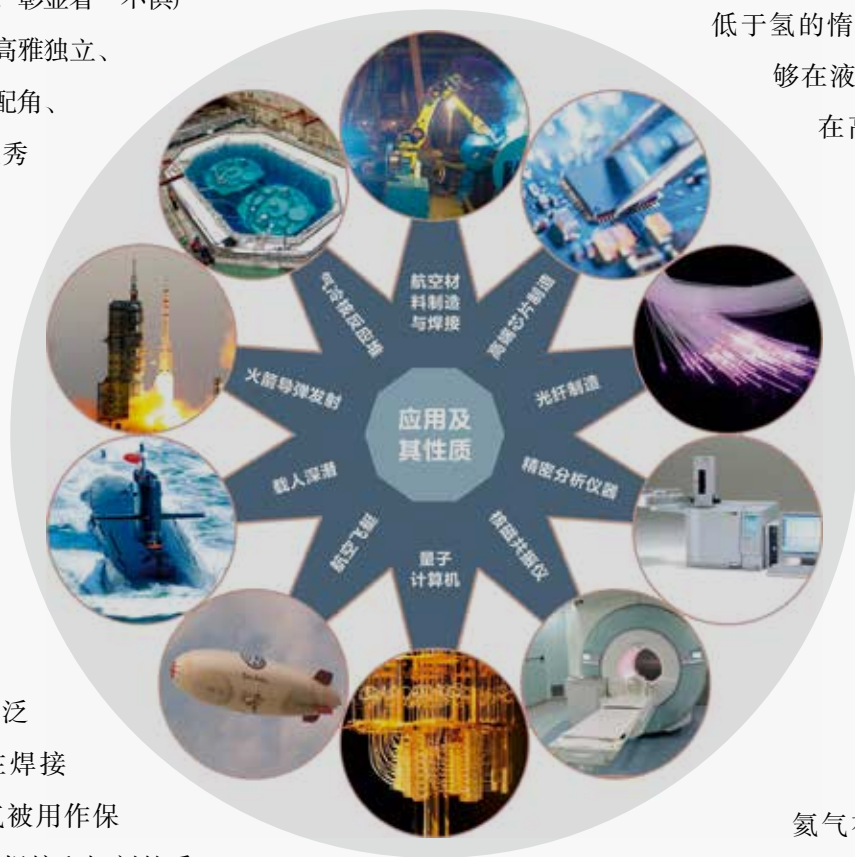
氮气在量子计算机中的应用前景广阔，

量子计算机为使量子比特温度保持在

绝对零度左右，需采用液氮冷却，离

开了氮，量子计算机将无法稳定运行。

随着大数据、云计算等的发展，氮气更



＞ 氮气的应用领域



＞ 氮气作为焊接保护气



＞ 氮飞艇



＞ 氮气用于深海潜水



> 通电氦气



> 氦气球



> 氦气用于填充硬盘

多地被用于填充硬盘。硬盘是计算机中非常重要的存储设备,在硬盘内部,盘片上涂覆着一个非常薄的磁性涂层存储数据。当硬盘运行时,盘片会高速旋转,读写端则会在盘片上寻找和读取数据。在硬盘中使用氦气可谓大有裨益,首先,相比于空气,氦气的密度更低,阻力更小,可以降低摩擦力和风阻,使盘片更加容易旋转,提高硬盘的读写速度和性能;其次,氦气的热传导性能比空气好,能够更好地散热,减少硬盘运行时所产生的热量;再次,氦气的化学惰性,能够更好地保护硬盘内部的磁性涂层和读写头,延长硬盘寿命。填充了氦气的硬盘,其使用寿命比普通硬盘高两倍以上,同时读写速度和性能也得到明显提升。

科学研究

氦气在科学研究方面有诸多用途。例如,精密分析中,氦气作为氛围气用于运载被检测气体进入分析装置,由于其化学惰性,在使用过程中不会与被检测组分发生任何化学反应,保证了检测准确性;氦气的相对分子质量和物理性质与大部分要分析的物质差别很大,利用氦气作载气,对基于热导系数、声速和密度等变化的检测器来说,均可以实现最高的检测灵敏度;氦气气溶胶能够制备纳米颗粒和涂层;氦气还可用于低温制冷、超导实验、气体探测器、流体动力学等研究领域;氦-3/氦-4值是灵敏的地壳稳定性指标,在地震监测中守护着我们的安全。

终极能源

“第一代”核聚变是氘-氘聚变,优点是燃料便宜,缺点是会产生中子,具有放射性。“第二代”核聚变是氘与氦-3 发生反应,反应本身不产生中子,但其中有氘,氘-氘反应也会产生中子。“第三代”核聚变,氦-3 与氦-3 反应,聚变过程中不产生中子,放射性小,反应易控制,既环保又安全,堪称终极聚变。氦-3 是世界公认的高效、清洁、安全、廉价的核聚变发电燃料。10 吨氦-3 就能满足我国一年所有的能源需求,100 吨氦-3 便能提供全世界能源需求。但氦-3 在地球上的蕴藏量很少,人类初步探测表明,月亮浅层含有上百万吨氦-3,足够人类使用上万年。



> 畅想月球氦基地



> 液氮

氦气的赋存与产量供应

世界氦气资源勘查程度低,已探明和已开发氦气资源非常有限,分布相对集中。天然气中氦气平均含量为 0.04%,目前全球探明氦气储量仅占天然气探明储量的 0.005 6%,表明可达到工业品位的氦气资源极少。

由于其在自然界中分布极为稀少,全球可用的氦气资源储量也十分有限。根据天然气中可利用的氦气含量,一般将天然气分为少见的特富氦天然气(氦气含量 $\geq 1.00\%$)、提氦效益良好的富氦天然气(氦气含量 0.30% ~ 1.00%)、可直接提氦的中氦天然气(氦气含量 0.10% ~ 0.30%)、可联产提氦利用的低氦天然气(氦气含量 0.03% ~ 0.10%),以及难以利用的贫氦天然气(氦气含量 $< 0.03\%$)。

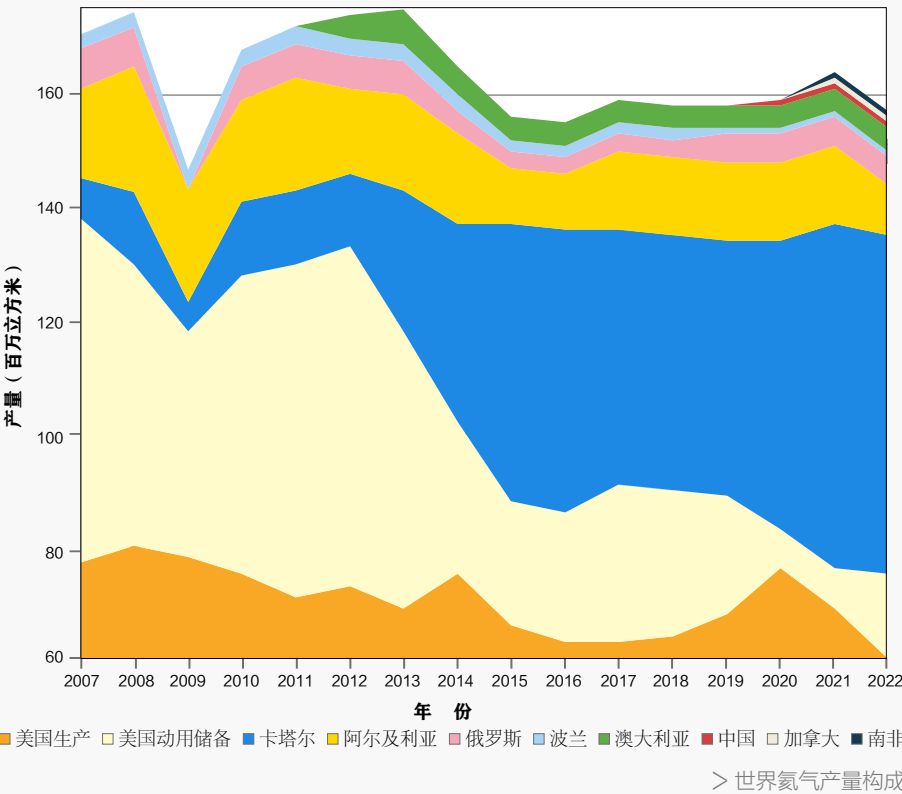
资源量及分布

截至 2022 年年底,世界氦气总资源量约为 484 亿立方米,其中美国、卡塔尔、阿尔及利亚、俄罗斯资源量分别为 171、101、82、68 亿立方米,共占世界资源量的 87%。世界氦气总探明储量约为 120.85 亿立方米,其中美国

氦气储量约 85.61 亿立方米，占世界总储量的 71%；卡塔尔氦气资源来自液化天然气尾气（闪蒸气）提纯回收，资源量巨大，但缺乏达到工业品位的氦气储量；阿尔及利亚氦气储量 18 亿立方米；俄罗斯氦气储量 17 亿立方米。美国、阿尔及利亚、俄罗斯三国氦气总储量占世界已公布探明储量的 99.99%（USGS，2022）。此外，坦桑尼亚鲁夸区可能蕴含多达 39.1 亿立方米的氦气资源量，但仍需钻探证实（Helium One，2022）。中国、印度、澳大利亚、阿根廷等也可能拥有氦气资源，有待证实。

产量及供应情况

近年来，世界氦气产量稳中有降，增长乏力，美国战略储备消耗殆尽，全球供不应求。2022 年，全球氦气产量 1.6 亿立方米，美国是全球最大的氦气供应国，占全球氦气产量的约 47%（USGS，2022）。由于氦气的应用领域比较广泛，目前全球氦气需求量持续增加，供应情况比较紧张。据国际气体协会（IGA）预测，到 2030 年，全球氦气供应可能会面临短缺，未来几年可能会出现更加明显的供需紧张局面。为了确保全球氦气供应的持续性和稳定性，需要各国加强氦气勘探和开发，提高氦气的产量和供应能力，以确保全球氦气供应的持续性和稳定性。



氦气的来源
与富集机理

地球上的氦气有两个来源：一是在地球内部的岩石中形成；二是由太阳风辐射到地球大气层并被地球所捕获。地球内部来源的氦气储量较大，成藏条件相对比较稳定；太阳风辐射到地球大气层中的氦气储量较小，但分布范围广，难以聚集。因此，地球内部是氦气的主要来源。氦气的成藏机理是多种因素综合作用的结果，地下水流、地震等因素也会对氦气的成藏和运移产生影响。

氦气的生成速率极其缓慢，加之氦分子具有极易扩散的特征，使得经典石油地质理论针对氦气运移、聚集和保存的研究面临巨大挑战。目前不同学者从不同角度对氦气成藏的控制因素进行了研究，系统的氦气富集成藏理论还有待建立。

氦气的勘探与提取

氦气资源保障可以从多个方面开展工作，增加国内氦气产量是最重要

的途径。而寻找富（含）氦天然气资源是氦气工业生产的基础，勘探是找到氦气藏的关键环节。按照氦气赋存规律寻找富氦气藏是中长期提高我国氦气资源保障水平的必然选择。氦气以微量组分赋存于天然气中，但氦气富集和天然气（烃类）成藏机理存在差异，勘探方向不同，按照油气勘探思路发现的天然气田多数贫氦，能够“偶遇”的富氦气田极少。通过现有天然气田含氦量筛查，形成不同类型和品位资源的有效利用方案是实现短期提升氦气资源保障水平的现实应急途径；而通过全国氦气资源潜力评价，在评价的氦气远景区开展油气新区气、氦兼探，寻找资源品位高、易提取、高效益的富氦气藏是提高我国中长期氦气资源保障水平的主要方式。

目前针对富（含）氦天然气富集规律的研究有限，勘探技术也不成熟。可工业开发的氦气资源赋存于以烃类、氦气和二氧化碳等为主要成分的天然气藏中，其中又以烃类天然气为主。氦气资源勘探基本上沿用了烃类天然气的勘探技术方法，氦气资源的地球物理、地球化学勘探方法尚处在探索阶段，井下识别方法尚存在技术短板。目前自然资源部中国地质调查局已经开展了重力、磁法、电法识别方法技术和土壤地球化探勘探等氦气勘探技术方法试验，形成了一定的技术积累。氦气随钻气测录井识别评价方法（地球化学方法）和测井识别评价方法（地球物理方法）等井下勘探技术尚处在探索试验阶段，在常规

在氦气的来源方面，Mamyrin 和 Tolstikhin（1984）将氦气分为大气源、壳源和幔源三类。目前工业用的氦气主要为壳源，是铀、钍元素放射性衰变成因。

在氦气的释放机理方面，Ballentine 和 Burnard（2002）认为，氦气可通过 α 辐射、扩散、裂隙和矿物重结晶而从源岩中释放出来。由于 U-Th-He 定年的需要，氦气通过 α 辐射和扩散从矿物中释放的研究较为深入。

对氦气运移、聚集和保存的研究重点多集中在运移通道、运移方式等宏观方面，提出了一些概念模型，但缺乏深入系统的细节认识。Nikonov（1973）、Gold 和 Held（1987）、Broadhead（2005）认为，基底断层和裂隙能使氦气在垂向上运移和聚集；Ballentine 和 Burnard（2002）认为，由于地壳中氦气低，氦气不能单独形成连续流体，因此氦气的运移依靠岩石孔隙中的流体；Ballentine 和 Sherwood-Lollar（2002）认为，美国 Hugoton-Panhandle 气田的氦气是通过地下水而运移的；Brown（2010）认为，矿物产生的氦首先溶于孔隙水，当有载体气经过时，载体气中氦气分压低，氦气便会脱溶进入载体气而随其运移至气藏。氦气的运聚与其他地下流体（水、油、气）的关系密切；氦气向上逸散过程中，储层与盖层间通量差导致了氦气的富集和保存（Sathaye 等，2016）；李玉宏（2017，2022）提出壳源氦气弱源成藏、异源同储、多源富集理念，指出氦气与烃类天然气成藏的关联性与差异性。

气测录井中增加氦气录井是氦气随钻识别最为可行的方法。

氦气主要通过天然气开采得到，由于天然气中氦气含量非常低，需要进行专门的氦气分离、提纯工艺才能得到高纯度的氦气。目前，传统氦气分离提纯技术主要有低温分馏法、压力摩尔筛法和膜分离法，等等。集成提氦方法有液化天然气联产、深冷-膜分离耦合，等等。当前，富氦天然气和液化天然气闪蒸气是提氦的两大来源。美国氦气生产原料主要为富氦天然气，卡塔尔则为液化天然气闪蒸气。

近年来，我国液化天然气闪蒸气提氦工作快速发展，成为现阶段我国氦气战略资源保障的主要力量，以鄂尔多斯盆地为代表，已建成产能达百万立方米级规模的提氦装置。油气公司也在积极推进天然气提氦项目。

氦气的未来保障模式

随着氦气的重要性得到关注，氦气保障模式也愈加受到重视。氦气的未来保障模式要从以下几个方面进行考虑：

一是采取多种措施，提高氦气资源利用率。例如，加强氦气回收技术的研发和应用，减少氦气的浪费和损失；采用先进的勘探技术和开采技术，提高氦气的采收率；开发和应用替代品，减少对氦气的需求，等等。

二是加强氦气资源管理，以保障氦气资源的可持续开发和利用。例如，制定完善的氦气资源管理制度，规范氦气资源开发和利用行为；加强氦气资源调查和监测，及时了解氦气资源的变化情况；建立氦气资源储备体系，保证氦气供应的稳定性，等等。

三是加强国际合作。氦气是一种全球性资源，其供需关系和市场价格都受到国际因素影响，因此，在氦气资源保障模式中，国际合作也是至关重要的。各国可以在氦气资源开发、利用和管理等方面开展合作，共同保障氦气的稳定供应。

四是推动氦气产业升级，这也是未来氦气保障模式的重要组成部分。可以通过加强技术创新和研发，推动氦气产业向高端化、智能化、绿色化等方向发展；鼓励企业进行技术创新和产业升级，提高氦气产业的综合竞争力，等等。

氦气是一种重要的不可再生资源，随着应用领域的扩大和需求的增长，氦气的未来供应已经成为全球范围内的关注焦点。氦气的发现、用途、产量、供应情况、未来的保障模式、资源量与资源分布、富集机理、勘探方法、开发技术等方面的研究，对于我们更好地认识和利用氦气资源具有重要的意义。当前，氦气的供应量无法满足其

广泛的应用需求。为了保障氦气的可持续供应，近年来，国家加大了氦气基础研究投入，油气企业加强了氦气调查力度，发现了塔里木、柴达木、鄂尔多斯等多个氦气新富集区。国外也出现了氦气勘探热，多家公司在美国西南部、加拿大萨斯喀彻温省和艾伯塔省、坦桑尼亚、澳大利亚和南非等地从事氦气勘探。

相信在全球的共同努力下，氦气资源的开发和利用将会更加合理、高效和可持续，为人类社会的发展作出更大的贡献。

本文由“中国地质调查局氦气资源调查评价与示范项目（编号：DD20230026）”资助。

第一作者单位 / 中国地质调查局西安地质调查中心

（本文编辑：何陈临秋 张佳楠）