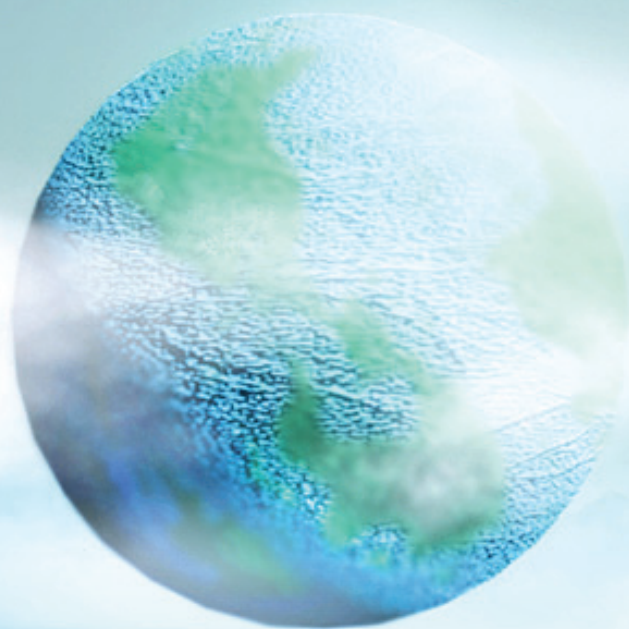




氦与氖： 同出异途的 稀有气体

□文 / 李玉宏 李济远 周俊林

> 蓝绿星球 视觉中国 / 供



第一作者简介 李玉宏，博士，正高级工程师，副总工程师，中国地质调查局氦气资源调查研究中心首席科学家、三秦英才特支计划氦气资源调查评价创新团队首席科学家，长期从事油气、氦气、煤炭等能源资源调查研究工作。开拓了我国氦气地质调查工作，支撑陕西省政府设立我国首个氦气探矿权，实现我国氦气资源勘查从无到有的突破；提出壳源氦气弱源成藏理念，总结了地质-物化探氦气综合调查技术方法，为我国氦气调查奠定了理论与技术基础；指导陕西、山西等地勘单位及油气企业开展氦气资源调查工作，是我国新一轮“氦气热”的主要促进者之一；率先开展氦国情调查，提出以拓展新领域增量富氦资源为主，落实老气区存量氦气资源为辅，同步推进高-富氦资源高效保障与低品位氦气资源有效利用的我国氦气资源多元保障路径。出版的我国首部氦气资源调查专著《渭河盆地氦气成藏条件及资源前景》受到广泛关注。

当温泉池的氦氡雾气中回响养生传说，当盛大庆典上的气球带着欢乐喜庆飘向天空，很少有人会意识到，这两种看似毫无关联的场景中，藏着一对来自元素周期表的“特殊伙伴”——氦与氖。能让声音变尖的氦气是航天发射不可或缺的“稀有精灵”，在低温领域不可替代的作用使其成为“拯救

生命”的“贵族气体”；而藏在建筑地基与岩石缝隙中的氦气却是关乎室内环境安全的“隐形杀手”。它们同属稀有气体家族，共享着化学性质稳定的“家族基因”，却在密度、毒性与应用场景中走向了截然不同的端元。二者“同出异途”的奇妙羁绊，恰是揭开稀有气体神秘面纱的绝佳入口。

幽微之辨： 氦与氡的基本性质

氡气 (radon, Rn) 是一种有害气体，氦气 (helium, He) 是重要的稀有战略资源，然二者在地球上的生成和迁移关系密切。这两种气体的形成与迁移不仅涉及复杂的地质过程，还在资源勘探中具有重要应用价值。此外，氦及其子体的团簇现象也是一个值得深入研究的重要现象。

氦原子序数为 86，其单质形态通常为气态，是无色、无臭、无味的惰性气体（也称稀有气体），具有放射性。氦的化学性质不活泼，难以与其他元素发生反应形成化合物。

氢原子序数为 2，是宇宙中较早形成的元素之一，也是仅次于氢的第二轻气体，密度仅为空气的 1/7，这一特性使其能轻松带动气球升空。氦气最显著的特点是化学性质极其稳定，几乎不与任何物质发生化学反应，同时具备极低的沸点 (-268.9°C)，是已知最难液化的气体。

19 世纪末，科学家们发现了钍会持续释放一种气态放射性物质，该物质具有化学惰性且原子量较高，因来源于

“兴登堡号”飞艇事故

飞艇曾承载着人类的飞行梦想。德国“兴登堡号”飞艇被誉为“空中泰坦尼克号”，一度是上流社会的象征。1936 年，它完成了首次横越大西洋的飞行。这艘长度超过 240 米的飞艇，是当时世界上建造的最大飞艇。乘客可坐在舒适豪华、设备齐全的机舱内，以每小时 135 千米的速度飞行。它曾 10 次安全往返于大西洋两岸，累计载客 1 002 人次。

1937 年 5 月 6 日下午约 7 时 30 分，“兴登堡号”飞艇在美国新泽西州莱克赫斯特海军航空总站上空准备着陆时，一个火花点燃了泄露的氢气，仅用 34 秒，整艘飞艇便被熊熊烈火吞噬。

事实上，氦气曾是“兴登堡号”飞艇浮力气体的首选——它是当时可用于飞艇的最安全气体。但在建造“兴登堡号”的年代，氦气极为稀有且价格昂贵，当时仅有美国具备氦气生产的能力，而美国因担忧德国可能将氦气用于武器制造，对其实施了出口管制。

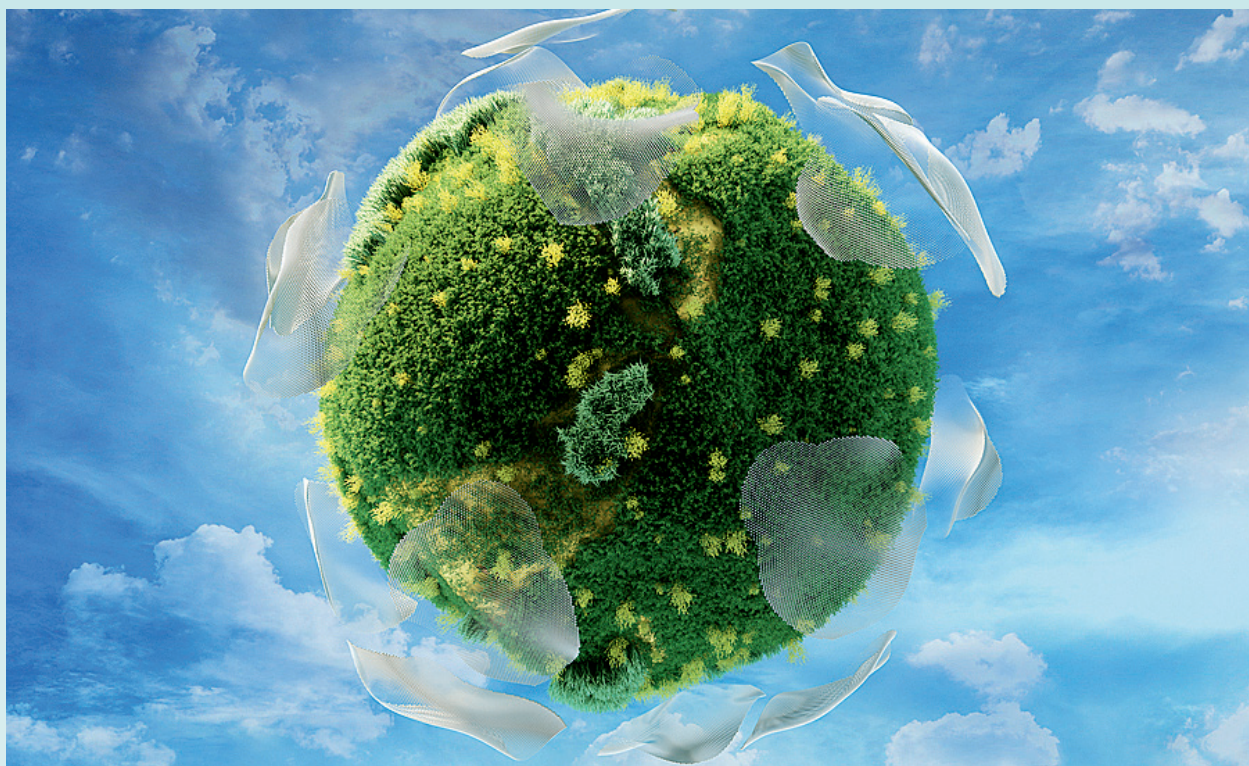
尽管氢气易燃易爆，可除了氢气，当时尚无其他可大规模生产的气体能为飞艇提供足够升力。同时，氢气可被任何工业国家以低廉成本大量生产，且比氦气更轻，能提供更强的浮力。因此，“兴登堡号”最终仍选择了氢气作为浮力气体。

然而，外泄的氢气最终引发了这场惨烈火灾。地面上的人们束手无策，只能眼睁睁看着容积将近 20 万立方米的氢气囊几乎瞬间被烈焰吞没，燃烧的飞艇骨架坠地后摔得粉

碎，“兴登堡号”在浓烟中彻底焚毁。经过海军人员与乘务人员的全力营救，97 名乘客及乘务人员中虽有多人获救，但仍有约 36 人不幸遇难。



“兴登堡号”着陆时起火爆炸 视觉中国 / 供



科技浮翼 视觉中国 / 供

钍而称其为钍射气，符号为 ThEm。1900 年，德国物理学家多恩同样发现了镭射气（radium emanation），符号为 RaEm。1903 年，又有研究者发现一种锕射气（actinium emanation, AcEm），以及一种名为 niton 的惰性气体。随后，在 1918 年，德国化学家施密特对这些发现进行了系统梳理。他参照惰性气体氡、氦等的命名方式，将钍射气更名为 thoron，元素符号定为 Tn，正式确定其为一种元素；又将镭射气更名为 radon，元素符号定为 Rn。后来经进一步研究证实，钍射气本质是氡-220，锕射气是氡-219，niton 是氡-222，三者均为氡的天然同位素。

溯源寻踪：氡与氦的生成和迁移机制

氡与氦的生成与关联性

氡是地壳中放射性铀、钍和钍的蜕变产物，

是一种放射性稀有气体，地壳中含有放射性元素的岩石总是不断向四周扩散氡气，使得空气和地下水中始终含有一定量的氡气。在氡的 3 种天然同位素中，只有氡-222 的半衰期略长（3.825 天），这使其有足够的时间从土壤和岩石中释放出来，穿过地面向上传播并扩散到空气中。氡-219 和氡-220 的半衰期均以秒计，在空气中含量甚微。此外，氡-222 也可能存在于地下水中，会在人们使用地下水时，释放到空气中。

氦也是一种稀有气体，主要通过两种途径生成：放射性衰变和宇宙射线作用。氦-4 是由铀-238、钍-235、钍-232 等重元素通过 α 衰变产生，每个 α 粒子实际上是一个氦-4 原子核。因此，在铀、钍的衰变链中，氦会持续生成。氦-3 则主要是宇宙射线与大气中的氮、氧原子核相互作用的产物。

氡和氦的生成关系紧密，在富铀地区，氡的

生成过程会伴随大量氦的产生。地表和大气中主要存在的是氦-222，氦-222 主要来源于放射性同位素镭-226 的衰变，而镭-226 是铀-238 衰变链中的一员，在这个衰变链中，铀-238 衰变形成 1 个氦-222 时，会伴随 4 个 α 粒子的释放，而 1 个氦-222 的衰变最终又可释放 4 个 α 粒子。由于铀钍元素密切伴生，铀-238 衰变形成氦-222 的过程中，必然伴随有铀-235、钍-232 等衰变，同时生成更多的 α 粒子。

正因为氦和氡的生成关系密切，富含氦的地区往往也是氡资源富集区。通过勘探氡的浓度，可以间接推测该地区氦的储量，这对氦气资源的勘探具有重要指导意义。例如，在寻找氦气资源时，可先检测地下氡气浓度，氡气浓度高的区域，往往预示着氦气的潜在富集。

氦与氡的迁移机制

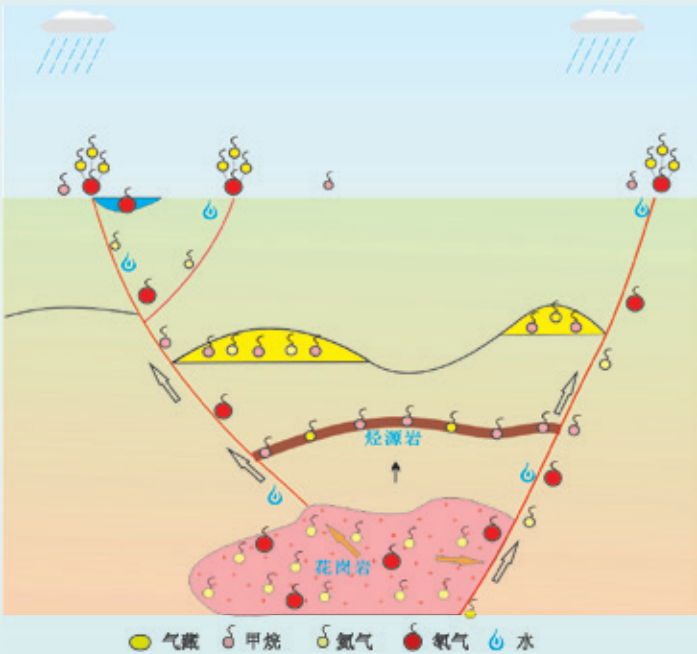
氦气的迁移主要依靠扩散和对流机制，在地下环境中，氦气先从岩石或土壤的微小裂缝和孔隙中释放出来，随后通过扩散作用，或被地下水携带，逐步向上移动。扩散是指氦气分子从高浓度区域向低浓度区域迁移，这种机制在多孔介质中起主要作用；对流则是由于地下水流动、温度变化等因素导致氦气随流体一起运动。裂隙、断层等地质构造也为氦气提供了快速向上迁移的通道。岩石和土壤的孔隙度决定了氦气的运移路径和速度，孔隙度高的介质（如沙土）有利于氦气的快速迁移，而孔隙度低的介质（如黏土）则会限制氦气的移动；断层活动可以使深部的氦气沿

着这些构造带快速上升，甚至到达地表。这些构造为氦气从深层到表层的快速上升提供了通道。地下的温度和压力变化也会影响氦气的运移，温度升高通常会加速氦气的扩散速度，而压力的变化则会影响氦气的释放和迁移路径，例如，地震活动可以导致地下压力的急剧变化，从而加速氦气的释放和迁移。

氦气由于其惰性和低溶解度，能够在地壳中积累并通过扩散和对流的方式迁移。氦气比氡气更轻，因此更容易通过扩散机制向上迁移。它在岩石和土壤中的迁移路径与氡相似，但由于氦的惰性，不容易与其他元素或矿物发生关系，因此迁移路径相对简单。此外，氦气可以溶解于地下水中并随水流动，但其溶解度比氡气低。

氦与氡的迁移关系

氦和氡均是气态，虽然氦与氡的成因和化学性质不同，但它们在地壳中的迁移路径却有一定相似之处。二者都可以通过扩散和对流机制迁移，也都能够沿着裂隙和断层等通道快速向上迁移。然而，氦与氡在迁移过程中存在显著差异。由于氦在水中溶解度高，而氡的溶解度低，所以地下水流动对它们的迁移影响有所不同。另外，由于氦具有



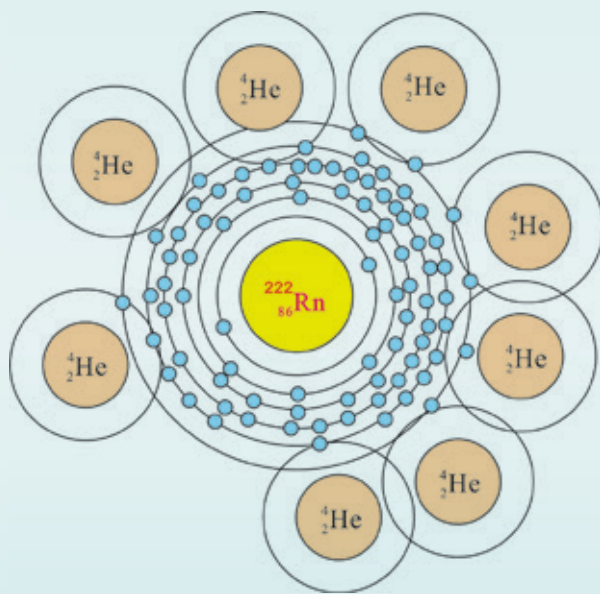
> 氦与氡的迁移

放射性，会在迁移过程中不断衰变，其子体也具有放射性并可能吸附在土壤和岩石颗粒上，影响其迁移行为；氦则不具有放射性，其惰性特质使其迁移路径更加简单和直接，不会受到物理作用的影响。

总结来说，氡和氦的生成过程有着密切关系，在地下的迁移路径也有相似之处，但由于放射性和溶解度的差异，导致它们的迁移行为存在显著不同。了解这些差异有助于预测和解释地质过程中氡与氦的行为和分布，为资源勘探提供重要线索。

聚散之间：氡及其子体的团簇现象

虽然氡及其子体的密度大于空气，但它们向上运移能力依然很强，这主要是因为氡从产生到衰变均与 α 粒子有着密不可分的联系，可形成 α 粒子与氡及其子体的团簇。氡及其子体和母体衰变会辐射出 α 粒子， α 粒子减速后成为带有两个正电荷的 ^4He 核。正 2 价的 ^4He 核周围存在电场，能使原子序数较大、外层电子多的氡及其子体和母体钋、铋、铅、铀、钍、镭等中性原子极化。在电场作用下， ^4He 核和氡及其子体和母体之间产生强相互作用力；而中性的 ^4He 原子之间通过范德华力也能发生弱相互作用。



＞ 氡核与氦核形成的团簇

因此， ^4He 核及 ^4He ，借助与氡及其子体和母体之间的强相互作用力和弱相互作用力，便能结合在一起形成团簇，就像在一个较重物体上挂了多个氦气球，由于 ^4He 很轻，当团簇的重量小于空气的浮力时便可在空气中自行上升。

团簇可小可大，它能由两个 ^4He 构成，也可多至 106 个 ^4He ，并且团簇极易掺入不同的原子和分子，包括其他惰性气体等，即由惰性气体、金属等多种组分相互作用，构成复合团簇。由于团簇具有极大的比表面积，且随团簇尺寸减小而增大，团簇的表面能增高，进而使其吸附作用增强，更容易吸附周围的粒子，即团簇能较好地与其衰变体的母体和子体凝聚在一起，并使团簇增大。

氡及其子体可以被土壤和岩石颗粒吸附，特别是在含有高黏土矿物的区域，黏土矿物具有较大的比表面积和较强的吸附能力，显著增加局部区域的氡浓度。氡及其子体在迁移过程中形成的团簇可能进一步吸引和捕获周围的氡原子，形成局部高浓度区。不同的矿物组成和化学环境对氡及其子体的吸附能力不同，含有较多有机质的土壤可能更容易吸附氡气，而富含某些金属离子的环境也可能影响氡及其子体的移动和聚集。地下水的存在可以影响氡气的溶解和迁移，在含水层中，氡气可以溶解于水并随水流移动，但也可在某些区域由于化学条件变化（如酸碱值、氧化还原电位等）而析出，形成高浓度的氡团簇。

总之，氡及其子体的向上运移是一个复杂的过程，受多种因素的影响，包括放射性衰变、扩散、对流、岩石和土壤的孔隙度、地

质构造、温度和压力，等等。团簇现象是氡气在特定地质和化学条件下形成局部高浓度的现象，主要由化学吸附、核团簇效应、矿物组成和化学环境，以及地下水的影响等原因导致。这些原因共同作用，使得氡及其子体在地下环境中的运移和分布具有复杂性和多样性。了解这些内因和现象，有助于更好地预测和控制氡气的释放和迁移，从而保护人们的健康和环境安全。

总而言之，研究氡及其子体的团簇现象，可以更好地理解氡气在地下环境中的分布和迁移规律。这对于预测氡气的释放风险和制定相关的防护措施具有重要意义。

安危相系：氡与氡的健康危害与防护

氡气的健康危害与防护措施

与重要的战略资源氡气不同，氡气是一种危害环境的气体。氡气及其衰变产物（如钋-218、铅-214 和铋-214 等）通过呼吸道进入人体后，发生衰变的 α 粒子可造成人的上呼吸道和肺辐射损伤，甚至引发肺癌。若存在吸烟行为，患癌风险会更大。长期接触氡气还可能导致其他呼吸系统疾病，如慢性支气管炎和肺纤维化，这些疾病可能是由氡气及其子体在呼吸道和肺部的积累和放射性损伤引起的。也有研究表明，成人和儿童接触氡气会增加罹患白血病的风险。

氡气在室外的浓度通常相对较低，空气中大约为 0.1 pCi/L（皮居里每升，放射性活度单位。室内建议安全标准为 4 pCi/L），而在家庭和建筑物内可能有更高浓度的氡气滞留。建筑材料是室内氡气的最主要来源，如花岗岩、砖砂、水泥及石膏之类，特别是含放射性元素的天然石材，最容易释出氡气，呼吸时氡气通过鼻子或嘴巴进入肺部，会损害肺部组织，造成严重的健康风险。

世界卫生组织已将氡气列为一类致癌物，明确其为肺癌的第二大诱因，人体长期暴露在氡气环境中，会显著增加肺癌发病风险。数据显示，美国每年因氡气相关肺癌死亡的人数超 2 万，约占肺癌总死亡人数的 15%；加拿大的研究也表明，约 16% 的肺癌病例与氡气暴露有关。

氡气与一氧化碳、硫化氢等有毒气体不同，它看不见、闻不着、尝不到，为降低氡气对健康的危害，可以采取一系列防护措施。提高室内通风效率是降低氡气浓度的有效方法之一，定期开窗通风或使用机械通风设备可以有效减少室内氡气的积累。检查并密封建筑物地基、墙壁和地板上的裂缝和孔洞，可以防止地下氡气进入室内。安装氡气检测仪，定期监测室内氡气浓度，一旦检测到氡气浓度超标，应及时采取防护措施。对于氡气浓度较高的建筑物，可以请专业治理机构进行处理，这些机构可以安装氡气减压系统，减少氡气进入室内的速度和浓度。此外，还可以采用其他专业方法，如地下室排气系统和地基通风系统，来降低氡气浓度。通过这些防护措施，可以有效降低室内氡气浓度，减少其对健康的危害。



> 氡通过呼吸道进入人体

氦气的楼层分布与居家隐患

氦气可通过建筑地基、墙体裂缝、地漏等途径侵入室内，尤其在房屋装修后的3~5年内，室内氦气浓度往往达到峰值。对应的预防措施包括：每天开窗通风1小时以上，或搭配使用空气净化器；及时密封地面、墙面的裂缝与孔洞；定期向地漏加水，以形成水封，阻隔氦气渗入；装修时避免选用劣质建材；定期检测室内氦气浓度，发现超标及时处理。

中国疾控中心的调查结果显示，室内氦浓度随楼层升高呈下降趋势，低楼层（1~3层）的氦气浓度相对更高。一方面，氦气密度约为空气的7.5倍，易在低楼层积聚；另一方面，低层建筑直接与土壤接触，氦气更



易通过地基裂缝、墙缝或地漏渗入室内。其中，一楼因室内外气压差，更易吸入土壤中的氦气。而地下室的氦气污染风险更为突出，由于通风条件差且直接接触土壤，其氦气浓度可达地上建筑的3~8倍。高层住宅因空气稀释作用强，氦气渗透量减少，浓度普遍较低，但仍需注意，若使用含放射性物质的劣质建材（如不合格的花岗岩），可能导致局部区域氦气浓度超标。

为进一步发挥氦与氦在科学研究和工业应用中的价值，需加强系统研究氦气对人体健康的长期影响，尤其关注低浓度氦气暴露的风险评估，为公共卫生政策制定提供科学依据。同时，开发更灵敏、便捷的氦气与氦气检测技术，提高检测的准确性和效率，便于大范围推广应用。

氦气的健康危害与防护措施

与氦气的放射性危害不同，氦气本身无毒且化学性质呈惰性，其健康风险主要来源于物理特

性引发的特殊危害，需结合使用场景进行针对性的防护。

氦气密度仅为空气的1/7，且扩散速度快，若在密闭或半密闭空间（如实验室、储罐检修区、狭小地下室）大量泄漏，会迅速取代空气中的氧气，导致环境含氧量急剧下降（正常氧含量约21%，低于19.5%即存在缺氧风险，低于12%可引发严重窒息）。人体吸入低氧混合气后，会出现头晕、头痛、恶心、乏力等症状，严重时意识模糊、昏迷，甚至心跳呼吸骤停。日常娱乐中的“吸

氮变声”，若操作不当，如直接对着高压氮气罐吸气或在封闭容器内吸入，极易因短时间摄入大量氮气挤占氧气空间，引发急性缺氧。

液态氮沸点极低，属于超低温物质。若皮肤直接接触液态氮或其挥发形成的低温蒸气，会迅速造成冻伤，表现为皮肤苍白、麻木、刺痛，严重时可导致组织坏死；若溅入眼睛，可能引发角膜冻伤甚至失明。此外，液态氮大量挥发时会吸收巨量热量，可能导致周边设备低温收缩、脆裂，间接引发安全事故。

氮气的健康危害多与使用方式和环境相关，而非元素本身的毒性。只要严格遵守操作规范，做好通风、个人防护和设备管理，就能有效规避风险，实现安全使用。相比之下，其风险可控性远高于具有放射性危害的氦气。

各展所长：氮与氦的应用与前景

氮的用途

放射性示踪 在地质、医学与环境监测中，氮的放射性可使其作为天然示踪剂。例如，通过

检测地下水中氮的浓度变化，可辅助判断断层活动性，为地震监测提供参考。在医学研究中，可利用氮标记某些化合物，追踪其在生物体内的代谢路径。

地质找矿与资源勘探 氮是铀、钍等放射性元素的衰变产物，因此在地质勘探中，通过测量土壤、岩石或地下水中氮的异常含量，可圈定铀矿、钍矿等放射性矿床的分布范围。同时，氮在地下水的运移过程中会随水流扩散，其浓度变化也能为寻找地下水源、分析水文地质结构提供重要依据。

核物理实验研究 在基础科学研究中，氮常被用作研究放射性衰变规律、原子核结构的实验材料。科学家通过对氮及其衰变产物的能谱分析，可深入探索核衰变机制，为核物理理论的发展提供数据支持。

氮的用途

氮具有冷（最低沸点）、清（化学惰性、难溶解）、轻（低密度）、逸（高热导率）、散（易扩散、难密封）的特性，是关系国家安全和高新



＞ 接触液态氮必须佩戴防护装备

技术产业发展的战略性稀有气体资源，用途广泛且不可替代。

航天航空冷却与推进 氦气极低的沸点（ -268.9°C ）使其成为理想的冷却剂。在航天领域，液态氦被用于冷却火箭发动机的涡轮泵、航天器的红外探测器及卫星上的超导设备，确保精密部件在极端环境下稳定运行。同时，氦气也可作为火箭燃料的加压剂，通过高压推动燃料进入燃烧室，避免燃料与氧化剂接触时发生腐蚀。

医疗影像与民用高科技领域

磁共振成像

（MRI）设备的核心

部件——超导磁

体，必须在超低

温环境下才能

维持超导状态，

液态氦正是维

持这一低温环

境的关键介质，

保障了MRI影像

的清晰度与诊断的

准确性。大多数情况

下，只有液氦能比较简

便地实现超导材料需要的极

低温（ 100K 左右），超导材料在磁悬

浮列车、核磁共振成像设备中发挥关键作用。

IBM公司研制的世界首台商用量子计算机中，为使量子比特的温度保持在绝对零度左右，采用液氦冷却。离开了氦，量子计算机将无法稳定运行。因此，氦气资源将会影响未来信息产业的发展。

此外，在核物理实验中，氦气常被用作探测器的填充气体，帮助捕捉粒子运动轨迹；在气相色谱等分析中氦气常作为载气；利用氦气渗透

性好、不可燃的特点，还可将其用于真空检漏，如氦质谱检漏仪、特高压线路检漏，等等。

工业焊接与保护 氦气凭借几乎不与任何物质发生化学反应的极强惰性，成为优质的焊接保护气。

在不锈钢、铝合金等高端金属焊接中，氦气可在焊缝周围形成保护层，隔绝空气中的氧气、氮气等气体，防止焊缝氧化、产生气孔，显著提升焊接质量。

在电子工业中，氦气还用于半导体芯片的制造，为

硅片的蚀刻、沉积等工序提供惰性

环境，避免芯片被杂质污染，

并利用其高导热性，避

免加工过程中半导体

材料过热损伤。

浮空与庆

典应用

氦气密

度仅为空气的

$1/7$ ，且安全

性远高于氢气

（无爆炸风险），

因此，它是填充

浮空气球的首选气

体，广泛应用于生日

派对、婚礼庆典、商业展

会等场景。大型载人氦气球（如

热气球的“兄弟”氦气球）还可用于观

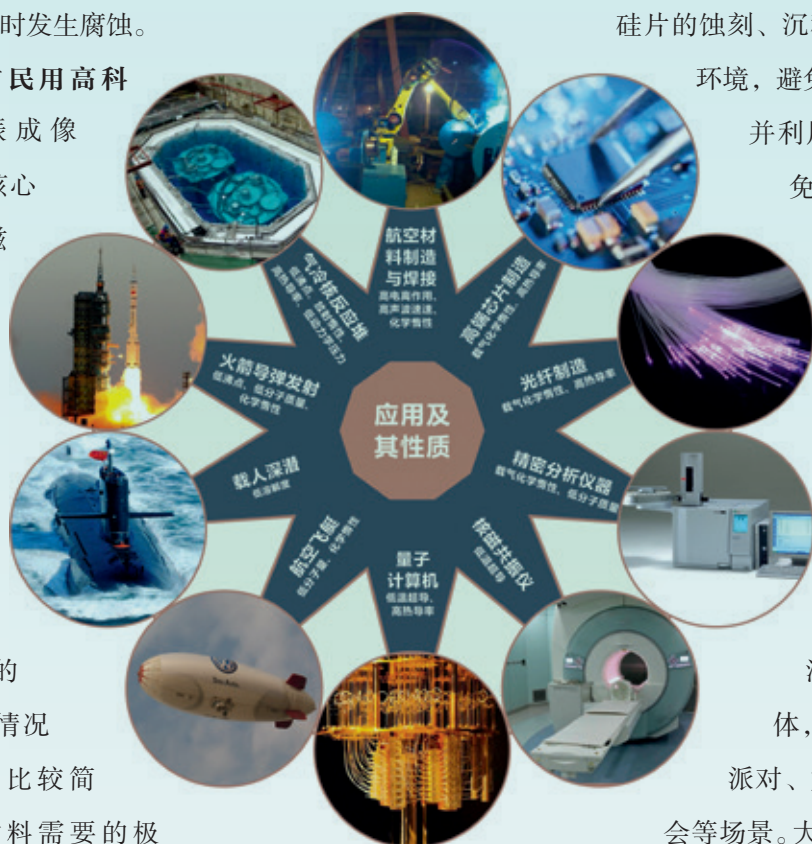
光游览与气象探测。

娱乐与趣味体验

吸入少量氦气后，人体声带振动的传播介质会发生改变（氦气声速比空气快），导致声音频率升高，从而产生独特的“卡通变声”效果，常见于综艺节目的趣味互动。不过需要注意，过量吸入氦气可能导致缺氧，此类体验需在安全环境下进行。

新能源与环保领域

开采天然气时，氦气常



> 氦的用途

作为伴生气体存在。同时，在新能源电池（如氢燃料电池）的生产与测试中，氦气可作为检漏气体，利用其小分子、易渗透的特性，检测电池密封性，确保电池使用过程中的安全性与能效。此外，在太阳能光伏板的制造中，氦气可用于薄膜沉积工艺的保护，助力提升光伏板的转化效率。

前 景

了解氦和氡的生成、迁移及氦的团簇现象，可以为资源勘探提供重要的线索。在地质勘探中，通过检测氦气浓度可以有效预测氦气的富集区，从而指导氦气资源的开采和利用。由于氦的生成伴随着大量氡的生成，在富氡地区寻找氦气资源是一种有效的方法。这种方法在氦气勘探、环境监测和资源评估中具有良好且广阔的应用前景。氦和氡的勘探技术在现代地质调查中扮演着重要角色，通过检测氦气浓度，地质学家可以识别铀矿床的位置，因为氦气是铀矿床存在的重要标志。类似地，通过检测氦气浓度，可以找到富含铀和钍的区域，因为这些区域的放射性衰变会产生大量的氦气。

此外，在构建地下储气库或评估地质储层时，检测氦和氡的浓度可以帮助评估储层的气密性和资源量。高浓度的氦气也可能预示着地下含有丰富的氦气资源。

研究氦和氡的生成与迁移关系，可以更好地预测和控制氦气的释放和



> 观光氦气球 视觉中国/供

迁移，保护环境安全和人们的健康。同时，利用这种关系也能有效地进行氦气资源的勘探，为科技和工业发展提供重要资源保障。氦和氡的研究不仅有助于我们理解地球内部的物质循环过程，还能推动相关领域的技术进步和应用拓展。

氦与氡虽同属稀有气体，却在自然界中扮演着截然不同的角色。氦以其惰性、低密度、低熔点等特性，成为航天、医疗等领域的“功臣”，却也因不可再生性敲响资源保护的警钟。氡则潜藏于土壤与岩石中，作为隐形的辐射源，时刻提醒我们关注环境安全与健康防护。地表氦气检测是氦气资源勘探方法之一，探索这对同出异途的“孪生兄弟”的奥秘，不仅是对化学世界的深入认知，更是人类与自然和谐共处的智慧体现。📍

本文由“国家重点研发计划课题（编号：2021YFA0719003）”和中国地质调查局“战略性矿产资源调查评价（编号：DD20230026）”项目联合资助。

第一作者单位 / 中国地质调查局西安地质调查中心

中国地质调查局氦气调查研究中心

（本文编辑：何陈临秋）