



寻找氦资源的新思路及初步实践

黄元^{1*}, 黄泽平², 张全震², 王业亮^{2*}

1. 北京理工大学前沿交叉科学研究院, 北京 100081;

2. 北京理工大学集成电路与电子学院, 北京 100081

* 联系人, E-mail: yhuang@bit.edu.cn; yeliang.wang@bit.edu.cn

氦资源在航空航天、医疗和基础物理研究等诸多高科技领域有不可替代的应用, 是赢得未来科技竞争的重要战略物质. 长期以来, 我国被认为是贫氦的国家, 氦资源对外依赖度极高. 氦气的稳定供应已经成为我国未来高科技发展中的潜在风险因素之一, 亟须寻找新的解决办法. 以往的学术观点通常认为, 氦气和天然气具有伴生关系, 而这方面的科学依据值得深入讨论和研究. 系统地认识与氦相关的物理和化学性质可以为我国独立自主寻找氦资源提供科学依据和指导思想, 对我国尽快解决氦资源短缺和摆脱对外依赖有重要意义. 氦资源的开发利用也将对我国其他科技领域的发展产生巨大的推动.

1 氦资源的发展及现状

人类对氦的认知始于1868年^[1], 此后许多科学家尝试将氦液化. 1908年, 荷兰物理学家卡莫林·昂内斯(Onnes H K)^[2]成功获得了液氦. 液氦的获得极大地促进了多个重要科学分支的发展, 包括超导物理、量子计算、大型加速器、航空航天工业和集成电路等. 在日常生活中, 氦气似乎并不常用, 但这种惰性气体正在诸多高新技术领域扮演越来越重要的角色, 特别是在医疗、半导体封装和低温电输运测量与应用方面, 液氦是不可替代的. 在能源应用方面, 氦也有巨大的应用潜力. 随着常规能源(煤、石油、天然气等)和核能的长期使用, 这类资源正在逐渐减少, 能源问题变得越来越迫切, 而³He(简称为氦3)提供了一种新的核聚变形式, 有望打破常规重核裂变的核能利用模式.

已有的公开数据显示, 全球氦气生产主要被美国、阿尔及利亚、卡塔尔、俄罗斯和波兰等少数几个国家垄断. 美国被认为是氦资源最丰富的国家, 约占全球的40%; 其次是卡塔尔, 约占19%, 但是卡塔尔开采氦气的核心技术受制于美国^[3]. 2018年前后, 美国将二战时期囤积的氦气库存清仓完毕, 国际氦气价格应声而涨, 目前价格已经是从前的4倍多. 我国现在每年氦气消耗量大约在4300 t, 进口价格已经在50~60元/kg, 并且价格在逐年上升, 仅氦气进口就要花费高达约18亿元人民币. 对于我国未来科技发展而言, 氦的重要性不仅仅是一种高昂的进口产品, 更是制约我国高科技发展的重要战略物质.



黄元 北京理工大学前沿交叉科学研究院教授, 博士生导师. 主要研究领域集中在低维半导体材料的制备、表征、器件加工和物性测量/调控等方向, 独立发展了普适性的二维材料解理技术, 并在二维材料的物性探测和器件研究中取得了多项国际前沿成果.



王业亮 北京理工大学集成电路与电子学院教授, 博士生导师. 长期从事新型电子材料与器件的制备、物性及应用研究, 在新型二维量子材料及其异质结构的构建、物性测量和调控、器件设计及性能测试方面取得了多项国际前沿成果.

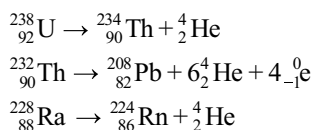
一旦国外对我们进行氦资源封锁, 许多凝聚态物理、新材料、医疗、半导体和信息领域的基础和应用研究都将受到严重的阻碍, 进而使我国的高科技发展处于全面被动的局面. 提出新的科学思路探索国内的氦气资源具有非常急迫的需求.

2 氦资源开发中的认识误区

相比于石油和天然气, 氦气在几十年前并没有被作为具有重要商业开采价值的资源来对待, 它常常被作为天然气中的副产品^[4]. 早期人们在开采天然气的过程中, 发现有少部分气体在常温下无法通过压缩使其液化, 后来被证实这些难以液化的气体成分主要是氦气. 目前大部分氦气都是在开采后的天然气中分离出来的, 因此直到现在, 很多地质学方面的研究人员都有一个共识, 认为氦气和天然气具有伴生关系^[5-7]. 但是, 这种判断氦气来源的思路只是经验性的, 从物

理和化学的角度来看并没有科学依据。作为元素周期表中排名第一的惰性气体元素，氦在自然界中不与任何其他元素发生化学反应，因此与其他化合物不存在任何伴生关系。石油和天然气的勘探大部分都是在盆地中寻找，是由于这两类物质在地壳中都是以液态的形式存在。甲烷(CH_4)的分子量是16，与水分子的分子量18相当，在地下以液体形式或可燃冰的固体形式存在，而石油的分子量为100~1000，因此在聚集的过程中，由于地球重力的影响，石油、天然气这类物质将往地势低的区域聚集。氦气中比例最大的是 ^4He ，分子量是4，自然环境中氦气密度是除氢气密度以外最小的。正是由于密度低，因此氦气在离开地壳之后会迅速地逃离地球引力的束缚，难以再次收集，导致在接近地面的空气中氦气含量是极低的。当我们把眼界拓宽到更大的宇宙环境中，会发现其实整个太阳系中氦并非稀有资源，它约占太阳系的25%，仅次于氢元素。地球上的氦资源之所以稀少，主要是因为地球的重力加速度并不大(约为 9.8 m/s^2)，难以束缚原子量较小的氦元素。

氦气只能通过氢元素聚变或者放射性重元素经过 α 衰变产生，而天然气则可以通过多种化学反应合成。常见的核反应生成He的方式有



地球环境不具有天然的核聚变条件，因此地球内部的氦气主要是重元素裂变产生的。氦气和天然气之间没有必然的伴生关系，两者在生成机制上是完全不一样的。之所以在开

采的天然气中能够探测到氦气，主要原因是存储这类气体、液体需要封闭完好的地层结构，但这不等同于两者在形成机理上存在依赖关系。作为地球上自然条件下密度最轻的气体，地球内部重元素核裂变产生的氦气将向远离地心的方向迁移，在地层结构较为完好的穹顶形区域氦气更容易聚集。这种结构在几何对称性上与盆地是相反的，如图1所示。从地球的结构来看，最外层是地壳，下面是地幔和地核。由于高密度的物质倾向于往地势低的方向聚集，因此地幔和地核附近的重元素要远大于地壳。整个地壳平均厚度约为17 km，其中大陆地壳厚度较大，平均约为39~41 km；而地球的半径在6350 km左右，地幔的厚度在2800 km以上，地核的半径在3500 km左右。因此，地壳所占的厚度比例相对较小，而地球上的氦气如果是通过裂变方式产生的，那么地幔和地核处所贡献的氦气比例要远大于地壳。通过以上分析可知，地壳所占的物质比例远小于地幔和地核，地壳在重元素裂变产生氦气的过程中贡献较小，因此不同区域地壳以下所释放的氦气应该大致相同，而差别在于不同区域地壳的几何结构和完整性。氦气是所有气体中最容易逃逸和泄漏的，对地层结构的密封性要求更为苛刻，因此一些地震断裂带附近不具有存储高浓度氦气的地质条件。

3 探寻氦资源的新思路

中国是否像之前认为的那样，是一个贫氦国家？或许实际情况并非如此。我国目前氦资源面临的最大问题不是短缺，而是缺乏新的理论来指导实践，寻找具有开采价值的氦气资源。如果没有氦气，有什么样的理论依据；如果有氦气，如何

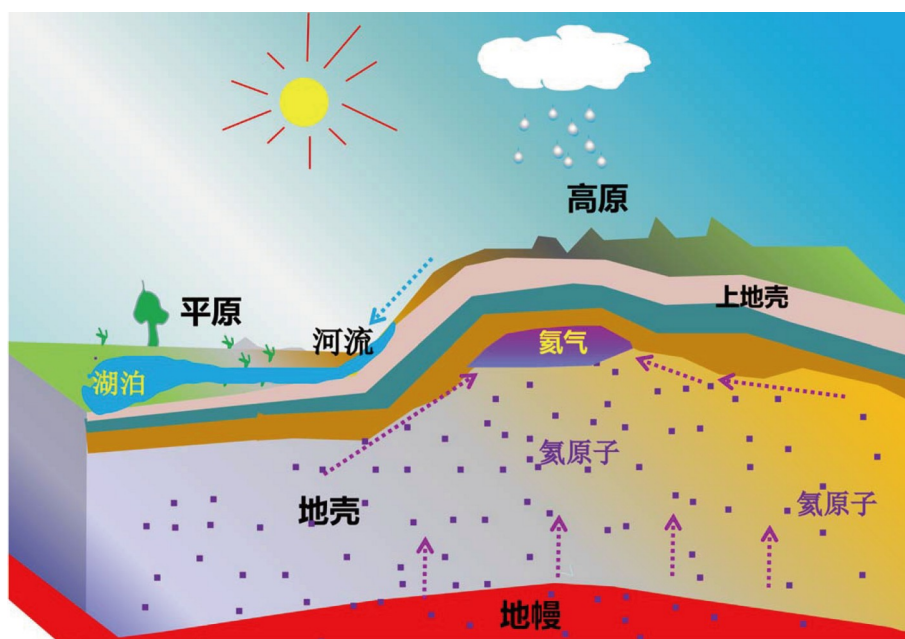


图1 地球内部重元素发生 α 衰变后产生的氦原子运移示意图

Figure 1 Schematic image of the movement of helium atoms after the α decay of heavy elements in the Earth's interior

建立新的理论框架去寻找氦气。

我们在之前的相关研究^[8,9]中指出, 我国的青藏高原地区可能存在较多的氦资源。这主要是由于青藏高原亚欧板块与印度板块碰撞后形成的高原海拔较高(约在3000~5000 m)^[10], 是世界最高的高原, 并且整体的板块结构较为完整, 这种地质结构为氦气提供了一个天然的存储区域。因此, 有望在青藏高原发现高浓度的氦气。尽管我国地质学方面的研究已报道了青藏高原热泉中存在较高浓度的氦气^[11], 但并没有深入讨论其形成机理以及未来是否具有开发价值。更为关键的是, 之前的研究并没有提出新的理论体系纠正氦气与天然气的伴生关系, 寻找氦气的主要思路仍然是将目光盯在富含石油和天然气的盆地地区。我们新的理论体系指出, 在高原地区有望找到更高浓度的氦气资源。

4 青藏高原氦资源的初步实践

2021年6月初, 北京理工大学王业亮和黄元团队在西藏拉萨、日喀则市和那曲市开展了野外实地实验, 并在多个温泉、土壤及空气中采集气体样品。研究人员将样品带回北京理工大学后, 通过高精度的质谱分析仪, 对采集的气体样品进行了测量(图2)。研究发现, 西藏热泉中的气体成分中都含有较高浓度的氦气(图3)。测量时的背景压强为 8×10^{-7} Torr (1 Torr=133.3 Pa), 而西藏热泉的气体中, 氦气的分压可以达到约 2×10^{-9} Torr(图3(c)), 氦气浓度可以达到0.25%。考虑运输和保存过程中损耗带来的影响, 实际的氦气浓度应大于该数值。研究人员还对北京和西藏的空气进行了测量, 没有在空气中发现氦气的质谱信号。通过对不同位置的热泉气体进行收集, 我们也总结了海拔与氦气浓度的关系(图4)。由于目前采集的数据量不是特别充足, 海拔与氦气浓度之间的关系需要进一步验证。最为重要的是, 我们所探测的所有西藏热泉



图2 西藏热泉中气体的采集与分析。(a) 西藏热泉的照片; (b) 研究人员采集西藏热泉中的气体; (c) 对采集后的气体进行质谱分析
Figure 2 Collection and analysis of gases in hot springs in Tibet. (a) One image of hot springs in Tibet. Images of researchers when collecting gases from hot springs (b) and carrying out mass-spectrum analysis (c)

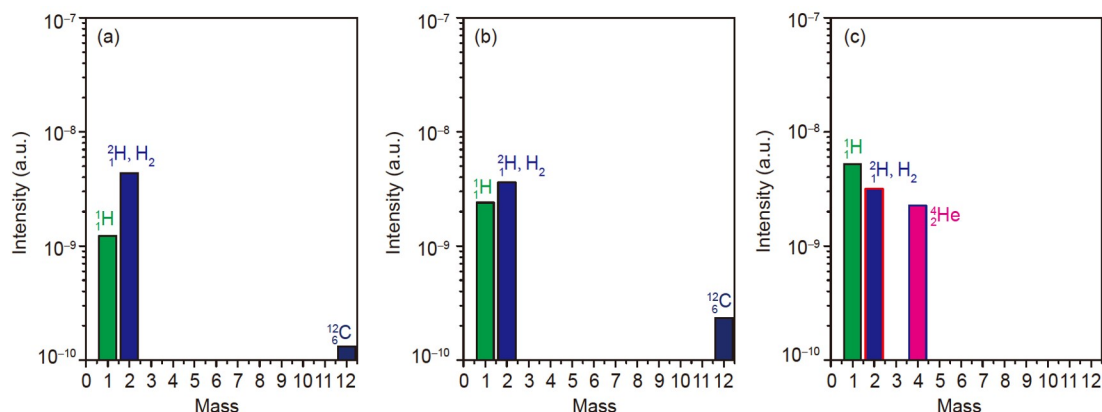


图3 不同气体样品的高分辨质谱数据。(a) 北京的空气; (b) 西藏的空气; (c) 西藏热泉内的气体。质谱测量时背景压强为 8×10^{-7} Torr
Figure 3 High-resolution mass spectra results of different gas samples. (a) Air in Beijing; (b) air in Tibet; (c) air in hot springs in Tibet. The background pressure in the mass spectrum measurement is 8×10^{-7} Torr

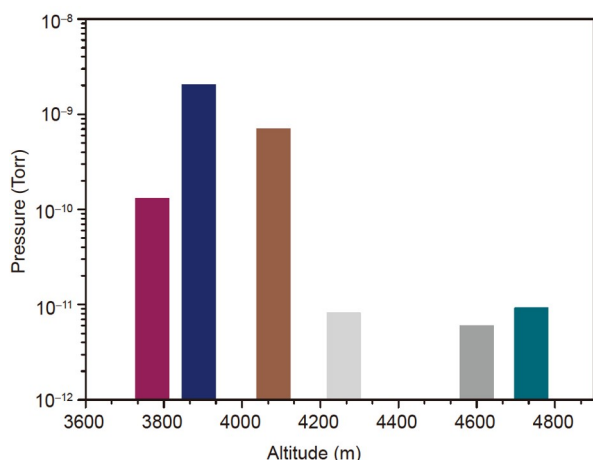


图4 氦气浓度与海拔之间的关系。气体样品来自6个不同区域的西藏热泉。测量时背景压强为 8×10^{-7} Torr

Figure 4 The relationship between the helium concentration and altitude. The gas samples are collected at six different hot springs in Tibet. The background pressure in the mass spectrum measurement is 8×10^{-7} Torr

气体中均含有氦气，而根据我们的理论，青藏高原的热泉处还不是氦气浓度最高的区域，一些具有更高浓度氦气的区域仍然需要进一步考证。对青藏高原地区热泉中气体的质谱测量为寻找氦气的理论提供了关键证据。

我国塔里木盆地的和田河气田，氦气含量为0.30%~0.37%^[3]，与在西藏温泉气体中探测到的浓度较为接近。云贵高原也有较多热泉，特别是在云南省境内(平均海拔为2000 m)，热泉中氦气浓度在0.01%量级范围^[12]。在低海拔地区的热泉中，氦气浓度都较低，如辽东半岛^[13]、长白山地

区^[14]。与这些区域相比，西藏热泉中的氦气浓度较高，与理论模型吻合较好。关于西藏氦气储量以及是否具有可开采价值方面的研究和论证仍然需要大量的工作，这不仅需要多个领域的科研人员精诚合作，也需要更多高校和科技职能部门一起来推动。如果这种寻找氦气的假说被证实，将极大地推动我国氦气资源的开发利用，进而解决一系列卡脖子技术问题，包括高温超导、核聚变、军工和医疗等领域都会带来极大的发展。

5 结论

氦气是重要的战略物质，对我国的经济、军事和科技发展都有重要影响。随着许多高精尖科技领域的快速发展，氦气和液氦所扮演的角色变得越来越重要。中国作为氦气的需求大国，长期以来主要依靠国外进口。面对瞬息万变的国际形势和不断上涨的氦资源价格，中国需要独立自主地开展氦气勘探和开发方面的研究，努力实现这一战略物质的自给自足。尽管目前国内外商业化的氦气都是在开采天然气的过程中附带分离出来的，但这并不能证明两者存在必然的伴生关系，寻找氦气应该打破之前的认识误区。

在我国寻找氦气需要建立完善的理论体系，结合我国的地质特征提出新的模型。从氦气的本质分析来看，在地势高、地层结构完整的区域有望探测到储量较大的氦气资源。结合我国的地形地貌来分析，特别是从初步研究结果来看，我国青藏高原地区存在具有较大经济开发价值的氦气藏。

新的理论模型和精密的氦气测量手段将会为氦气勘探提供新思路，而规模化的氦气开发和利用将会为我国很多尖端高科技领域注入亟需的血液，对推动我国科技和经济都具有重要的战略意义。

致谢 感谢国家重点研发计划(2019YFA0308000, 2018YFA0704201)、国家自然科学基金(62022089, 11874405, 61725107, 92163206)和中国科学院B类战略性先导科技专项(XDB30000000)资助。感谢中国科学院青藏高原研究所赵平研究员、张强弓研究员在温泉气体采集过程中给予的帮助和指导。

推荐阅读文献

- 1 Pang A S K. Empire and the Sun: Victorian Solar Eclipse Expeditions. Stanford: Stanford University Press, 2002
- 2 Onnes H K. Investigations into the properties of substances at low temperatures, which have led, amongst other things, to the preparation of liquid helium. In: Nobel Lectures in Physics 1901–1921. Singapore: World Scientific, 1998
- 3 Tao X W, Li J Z, Zhao L B, et al. Helium resources and discovery of first supergiant helium reserve in China: Hetianhe gas field (in Chinese). Earth Sci, 2019, 44: 1024–1041 [陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等. 我国氦气资源现状及首个特大型富氦储量的发现: 和田河气田. 地球科学, 2019, 44: 1024–1041]
- 4 Xing G H. Status and development of the technology on helium gas abstracted from natural gas (in Chinese). Nat Gas Ind, 2008, 28: 114–116 [邢国海. 天然气提取氦技术现状与发展. 天然气工业, 2008, 28: 114–116]
- 5 Han W, Liu W J, Li Y H, et al. Characteristics of rare gas isotopes and main controlling factors of radon enrichment in the northern margin of Qaidam Basin (in Chinese). Nat Gas Geosci, 2020, 31: 385–392 [韩伟, 刘文进, 李玉宏, 等. 柴达木盆地北缘稀有气体同位素特征及氦气富集主控因素. 天然气地球科学, 2020, 31: 385–392]

- 6 Li Y H, Zhou J L, Zhang W, et al. Helium resource survey in Weihe Basin (in Chinese). *Manage Res Sci Technol Achiev*, 2019, 3: 69 [李玉宏, 周俊林, 张文, 等. 渭河盆地氦气资源调查. *科技成果管理与研究*, 2019, 3: 69]
- 7 Du J, Xu Y, Sun M. $^3\text{He}/^4\text{He}$ and heat flow in oil and gas-bearing basins China's mainland. *Chin J Geophys*, 1998, 41: 239–247]
- 8 Xu H, Yuan Z Y, Huang T F, et al. Inspiration of wrinkles in layered material for the mechanism study of several geological activities (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 026101 [许宏, 苑争一, 黄彤飞, 等. 层状材料褶皱对几种地质活动机理研究的启示. *物理学报*, 2020, 69: 026101]
- 9 Huang Y. The coldest element—Helium (in Chinese). *Physics*, 2020, 49: 551–554 [黄元. 最高冷的元素——氦. *物理*, 2020, 49: 551–554]
- 10 Zhang Y, Li B Y, Liu L S, et al. Redetermine the region and boundaries of Tibetan Plateau (in Chinese). *Geogr Res*, 2021, 40: 1543–1553
- 11 Hou Z Q, Li Z Q. Possible location for underthrusting front of the India continent: Constraints from helium isotope of the geothermal gas in southern Tibet and eastern Tibet (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2004, 78: 482–493 [侯增谦, 李振清. 印度大陆俯冲前缘的可能位置: 来自藏南和藏东活动热泉气体He同位素约束. *地质学报*, 2004, 78: 482–493]
- 12 Wang Y, Liu Y, Zhao C, et al. Helium and carbon isotopic signatures of thermal spring gases in southeast Yunnan, China. *J Volcanol Geotherm Res*, 2020, 402: 106995
- 13 Ren J, Wang X, Chen J, et al. Leakage of mantle helium from the Liaodong Peninsula, China. *Chin Sci Bull*, 1998, 43: 761–764
- 14 Wei F, Xu J D, Shanguan Z G, et al. Helium and carbon isotopes in the hot springs of Changbaishan Volcano, northeastern China: A material connection between Changbaishan Volcano and the west Pacific plate? *J Volcanol Geotherm Res*, 2016, 327: 398–406

Summary for “寻找氦资源的新思路及初步实践”

New ideas and preliminary practice for searching helium resources

Yuan Huang^{1*}, Zeping Huang², Quanzhen Zhang² & Yeliang Wang^{2*}

¹ Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

* Corresponding authors, E-mail: yhuang@bit.edu.cn; yeliang.wang@bit.edu.cn

Helium resources have irreplaceable applications in many high-tech fields such as aerospace, medical treatment, and basic physics research. Thus, helium resources have become an important strategic material to win future scientific and technological competition. Currently, the main international helium exporters are the United States, Russia and Qatar. For a long time, China has been regarded as a helium-poor country, and the helium resources mainly rely on imports. Helium has become one of the potential risk factors in China's future high-tech development, and it is urgent to find new solutions. Through the analysis of the physical and chemical properties of helium, it can be seen that helium can only exist as a gas state after being produced by nuclear fission inside the Earth. As the most inert gas, helium does not react with any other elements. Therefore, helium is not associated with other compound gases, such as natural gas (CH₄), CO₂, H₂S, etc. Besides, helium has a molecular weight of 4 or 3, which is only heavier than hydrogen (molecular weight is 2). As the lightest gas, helium tends to get rid of the constraints of the Earth's gravity. Thus, helium tends to accumulate in a dome-shaped stratum structure with higher altitude and good sealing characters, rather than a region with a basin structure. In previous studies, people have always believed that helium and natural gas have an accompanying relationship. Therefore, many geological theories of searching for helium gas often focus on the basin area. Here in this work, we propose a new theory on the migration and accumulation of helium, which indicates that the Tibet Plateau is expected to find helium resources with exploitable value. In June 2021, our team members went to Tibet and collected the gas in the hot spring. In order to ensure the purity of the gas, we use the drainage method to collect the gas from the hot spring. This method can avoid pollution caused by gas components in the air. By using a high-resolution mass spectrometer, we analyzed the gas composition in the hot springs in Tibet. All the gas samples from hot springs are detected with high concentration of helium, which is a good verification of the new-proposed model. The air in Beijing and Tibet was used as a reference sample, and the mass spectrometry measurement was also carried out, but no signal of helium gas was found. The concentration of helium in the hot springs in Tibet is comparable to the concentration of helium in the Hetian River gas in the Tarim Basin. The higher concentration of helium in the Qinghai-Tibet Plateau is worthy of further exploration. This point of view breaks the previous habit of thinking that the search for helium must be in the basin area. The plateau area provides a new option for searching for helium gas. It is of great significance for China to solve the shortage of helium resources and external dependence, and will also give a huge boost to the development of other scientific and technological fields in China.

helium resources, liquid helium, Tibet Plateau, basin

doi: [10.1360/TB-2021-0866](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0866)