

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202304077

www.dxhx.pku.edu.cn

元素王国的“竹林七贤”——稀有气体元素

周子谦¹, 颜静^{2,*}, 蔡宁静¹, 张文博², 徐运鑫², 闫毅^{2,*}¹ 西北工业大学伦敦玛丽女王大学工程学院, 西安 710072² 西北工业大学化学与化工学院, 西安 710129

摘要: 稀有气体, 又称惰性气体, 是一类化学性质极不活泼的元素群体。它们性质相似, 在人类生活生产的各个方面都有广泛的应用。本文以拟人的手法, 通过构建虚拟世界故事的方式, 介绍了目前为止发现的七种稀有气体元素(竹林七贤)的含量、密度、沸点及化学反应性等物理化学性质, 并穿插了一则稀有气体化合物的历史故事。与此同时以故事情节的发展为主线, 讲述了稀有气体在航天离子推进器、地震预测、医学诊疗等领域的应用。

关键词: 稀有气体; 离子推进剂; 地震预测; 癌症治疗

中图分类号: G64; O6

Tales of “Seven Sages” in Element Kingdom: Noble Gases

Ziqian Zhou¹, Jing Yan^{2,*}, Ningjing Cai¹, Wenbo Zhang², Yunxin Xu², Yi Yan^{2,*}¹ Queen Mary University of London Engineering School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China.² School of Chemistry and Chemical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China.

Abstract: Noble gases are a group of elements with chemical inertness. They have similar properties, and are widely applied to all aspects of human life and production. In an anthropomorphic way, the content, density, boiling point, chemical reactivity and other physical and chemical properties of seven kinds of noble gases (Seven Sages) have been introduced by constructing virtual world tales, inserted with a story of noble gas compounds. Meanwhile, with the development of the story as the main line, it mainly introduces the applications of noble gases to aerospace ion thruster, earthquake prediction, medicine and other fields.

Key Words: Noble gases; Ionic propellants; Earthquake prediction; Cancer treatment

“元素王国”历史悠久, 然而直到1869年俄国科学家门捷列夫绘制出第一张元素周期表后, 人类才逐渐意识到“元素王国”的存在, 并慢慢认识他的规律。随着科技的不断发展, 现在“元素王国”在人类的代表是“锂”。“锂”生性活泼, 充满了孩子气, 特别喜欢与人类打交道, 并在动力电池领域成为了远近闻名的“顾问”, 与长期做材料研究的周教授成为了好朋友, 经常一起聊天吹牛。

“小锂啊, 听说你们元素王国有一个小部族叫做稀有气体, 怎么也没见你给我引荐引荐啊?” 周教授问道。

“稀有气体的族人在我们‘人口统计表’——元素周期表中排第0族, 到目前为止, 他们家族有

收稿: 2023-04-21; 录用: 2023-06-23; 网络发表: 2023-07-03

*通讯作者, Emails: yanyi@nwpu.edu.cn (闫毅); yanjing@nwpu.edu.cn (颜静)

基金资助: 西北工业大学2023年度校级教育教学改革研究项目(23GZ13187, 23GZ13186, 23GZ13076); 教育部产学研合作协同育人项目2022年第二批(19GA210101); 西北工业大学本科萌创重点项目; 2023年度西北工业大学研究生教育研究基金项目(2023YMs018)

七大族人，号称元素王国的‘竹林七贤’，分别是氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)、氡(Rn)、**𫖞(Og)**，人造元素)，约占地球大气体积的百分之一。其实在门捷列夫绘制的第一张(1869年)和第二张(1871年)元素周期表中，我们并没有涵盖稀有气体元素的踪迹。经过英国科学家拉姆赛、克鲁克斯等人精确的实验发现氦元素后^[1]，门捷列夫在1902年接受了氦和氩元素的发现，并在元素周期表中将其归在0族^[2]。随后，拉姆赛又先后发现了氖、氪、氙三种稀有气体元素^[3]，因此，他也被称为惰性元素之父，并获得1904年诺贝尔化学奖。

“稀有气体族人的体重各异，密度最小的氦仅有 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，而密度最高的氡达到 $9.73 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。沸点最低的氦低至 4.215 K ，在所有物质中排第一，所以在低温超导领域的研究中可以提供超低温环境。而沸点最高的氡达到 211 K ，也远远低于室温，故他们在常温下都以无色、无臭、无味的单原子气体形式存在^[4]。虽然他们各有不同，但均具有化学惰性的性质，性格高冷，是元素王国的‘冰美人’。别说你们人类了，我们元素王国的其他人也难与他们结合。直到20世纪，英国化学家N. Bartlett经过多次试验，发现了 PtF_6 的强氧化性可以将氙氧化。在这位技术高超的‘媒婆’撮合下，这才有了 XePtF_6 这种桔黄色固体化合物产生^[5]。可以说，与他们成为朋友真是可遇而不可求啊！”

小锂挠挠头，继续说道：“如果说贵金属(precious metal)元素‘金’先生是稳重的话，那稀有气体(noble gases)就是稳如泰山，做材料可帮不上你。”说着小锂还佯装自豪地挺了挺胸脯。周教授看了看他，回味着这句谐音梗，不禁失笑，但仍旧对稀有气体充满了好奇。

1 翱翔星际的推手

这天，航天飞行器研究专业的同僚张教授找到了老周，“老周啊，我听说你和小锂挺熟的，有个事拜托你一下呗。电推进系统是现在航天器的主流推进系统，与传统化学燃料推进系统相比具有比冲大、推进剂效率高的特点。此外，电推进系统还可以大大节约推进剂的消耗。推进的基本原理(图1)是由空心阴极发射的电子碰撞推进剂原子，使之电离后进入放电室，电离产生的离子被离子光学系统加速从而产生推力^[6]。

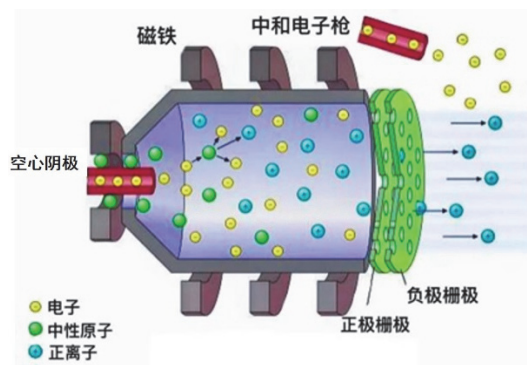


图1 离子推进器工作原理图^[6]

“先前的合作人‘汞’先生能力很强，但是对人类是有毒性的。无论是运输还是使用时大家都提心吊胆，盛装容器我们也要千挑万选反复检查。这不，领导一拍板，说要找个绿色安全点的合作人。”张教授说罢对着老周眨了眨眼。

听着同事连珠炮似地说了一大串，老周端起茶杯喝了一口，默不作声地看了他一眼，再喝一口茶，又看了他一眼，放下茶杯刚要说话，张教授又抢先开了腔，“哎呀，老周我知道，科研靠自己，但这不是国家在卫星组网的关键时候嘛，任务紧迫，帮帮忙啊！到时候该做的试验研究绝对不偷懒，该有的研究数据绝对都有。”老周表情还是没有松动，只顾着喝茶。这时候小锂不知从哪里冒了出来，说道，“我帮你发了英雄帖，‘竹林七贤’的氙说他可以试试。”张教授一抱拳，说道：“还

是锂总靠谱！”随后还不忘调侃一下老周：“不像某些人磨磨唧唧的！”然后夺门而逃，根本不看作势就要朝他扔茶杯的老周。

“周教授您好！我叫氙，我无毒无害，核外电子排布是 $5s^25p^6$ ，化学性质很稳定。我的相对分子质量比较大并且有较小的电离势能^[7]，您看看我适合这份工作吗？”氙自信满满地介绍道。周教授一听便开始思索：相对分子质量大可以提高比冲，电离势能小容易产生带电离子，化学性质稳定也利于储存，氙的确是电推进系统推进剂的绝佳人选啊。”周教授拉着氙就与同事张教授来到实验室开始了“面试”，氙完美地完成了各项测试。经过一段时间的“试用期”，氙成功地代替了“汞”先生，成为了人类翱翔星际的推手，周教授也圆满地完成了国家交给他的任务。

迄今，氙离子推进系统理论的提出已经有近一个世纪，并在空间应用了十多年，包括美国的泛美卫星(PAS-5)、深空一号(DS-1)、英国皇家空军H-Sat卫星、日本三菱电子研发的工程试验卫星6号(ETS-6)、俄罗斯的IDOR-100等在内的飞行器均使用了该推进系统。

2 预测险情的先知

今天，小锂又跑来研究所溜达，“哎，张教授，好久不见啊，老周呢，咋好久没见着人了？”“哎呀，是小...锂总啊，前一阵子老周老家地震，老周请了假回老家当志愿者去了，可能受了点刺激，回来就说要研究预测地震的方法，跑地质实验室待了好多天了。你也去劝劝他，这一天不怎么吃喝，身体怎么顶得住啊，科研哪是一朝一夕的事情啊。”

小锂悄悄摸摸地走进实验室，看着蓬头垢面、面色发白的老周，大手往他肩上一拍，“找不到好方法找我啊，自己在死胡同里钻啥呢？”老周被吓了一大跳，摸着胸口说，“你瞎凑合啥，预测地震主要是物理方向，你还能懂了？”小锂神秘一笑，“上次发了英雄帖之后我可是好好去拜访了一下稀有气体族，他们里面恰好就有个能帮上忙的。”

看着老周又露出了上次那种表情，小锂模仿老周的神态说：“我只给你介绍人啊，研究还是要做好，数据不能少啊。”老周看着小锂那模样忍不住笑了。转眼小锂就带着一个稀有气体客人出现在周教授面前，“您好，我叫氡，来自稀有气体家族。我的化学性质是惰性的，在地下水中常以溶解氡和逸出氡两种形式存在。如图2所示，我在水中的浓度会在地震前后有着明显的变化。一般来说，震级越大，浓度的变化也越大。同时，我含量异常的地区也预示着地震可能的区域^[8]。”老周迫不及待地拉着氡就开始讨论和研究，发现气态氡是由土壤、岩石和邻近地表的空气释放出来的。而Rn-222作为氡元素半衰期最长的同位素，其富集与释放受构造性活动的影响较大^[9]。氡会夺取空气中分子里的电子，触发电离层的原子离子化，产生的离子会吸附在冷凝的水滴上。这种大规模的冷凝过程中所释放的热量，可以被科学家用红外线辐射的形式检测出来。

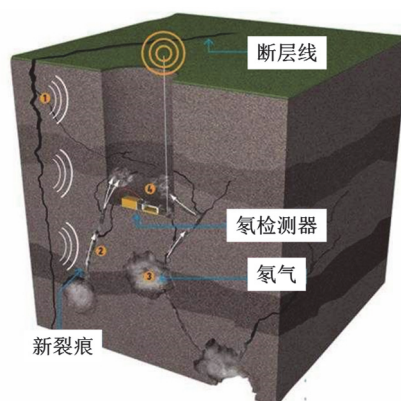


图2 地震过程中氡释放的示意图^[10]

经过几个月的摸索，老周和氦通力合作，根据氦浓度的变化，成功预测了地震的发生，提前让人们做好了准备，挽救了许多人的生命。而氦也在研究中大展身手，成为了预测险情的先知。据英国《卫报》报道，在2009年4月6日发生的意大利拉奎拉地震中，当地居民吉安保罗·朱利亚尼用自制的氦气监测仪准确预测了这次地震，带领妻儿逃过一劫^[11]。

3 妙手回春的仁医

老周病了，病得很重，他不敢相信自已竟然患上了肝癌这个致死性疾病。躺在病床上的老周显得有些失落，但新交的稀有气体朋友的造访似乎又给他带来了一线生机。

“氦”先生带着他的两个小老乡进入了周教授的病房，看着周教授痛苦的样子，“氦”先生一筹莫展。谁知站在“氦”先生身后的两位“后生仔”竟对着周教授的病摩拳擦掌，跃跃欲试，“我是氩！”“我是氦！”“我们能携手治疗周教授的肝癌！”他们几乎异口同声。周教授看着蹦蹦跳跳的他们有些惊讶。“这项技术叫做冷冻消融疗法，通过交替的冷冻消融来破坏癌症组织。根据焦耳-汤姆逊效应，压缩气体通过闭合线路输送到低温探针的针尖并通过一个微小的孔膨胀，此时气压减小而改变温度(图3)。对于氩气，膨胀导致温度降低，并在更高的压力下冻结。另一方面，氦气向环境释放能量，从而在膨胀时产生热量。在使用氩气和氦气的冷冻系统中，氩气用于冷冻，氦气用于解冻^[12]。”氦和氩向周教授解释了技术实现的原理。周教授有些哽咽，稀有气体族人们虽然性格高冷，但面冷心热，这次更是有机会挽救自己的生命，于是二话不说就让氦氩开始为自己治疗。

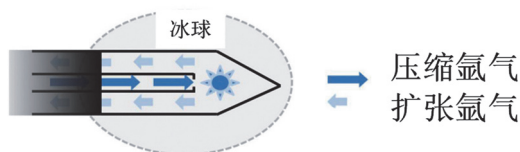


图3 氦氩冷冻消融疗法示意图^[12]

在氦氩的精妙医术下，周教授治疗期间几乎没有剧烈的疼痛。经医院后续检查，肝脏大血管和胆囊也没有被治疗过程严重破坏，他不久就康复出院。“锂”先生听闻此事，不由地夸赞氦氩是妙手回春的神医，把老友周教授从生命的悬崖边拉了回来。

4 双向奔赴的朋友

周教授康复后，多次主动邀请稀有气体族的几位族人一起讨论和学习，一起合作解决了许多难题。例如周教授在潜水使用的氧气瓶中混入氦气，减小了气体密度和压力，降低热容，也防止潜水员氧气中毒，降低了潜水过程的操控难度^[13]。之后周教授又设计出氩准分子激光器，可以应用于半导体的光加工，也可用于核聚变等离子体中轻元素的精确测定^[14]。准分子激光器的诞生也让电子设备向更轻更小的方向转型：根据脉冲波长的不同，使用不同的稀有气体元素，准分子激光器能制造出5–10 μm 直径的小孔以实现通孔尺寸和通孔片直径的减小，为多芯片模块应用所需的表面贴装技术、芯片规模封装和倒装芯片提供了良好的间距^[15]。

周教授不仅邀请稀有气体族人合作研究，还让他们“误入歧途”的族人“重归正道”。一天，周教授正在研读最新期刊中关于稀有气体应用的文献，他惊讶地发现熔盐反应堆中(图4)，氩与氦的放射性同位素本是作为放射性核废料为人类舍弃，但他们并不是“一无是处”。氩与氦的同位素的半衰期大于一小时，他们这样的核特性可指导我们将其用于特定病毒性肺炎的诊断与治疗^[16]。

周教授利用这一前沿技术，成功地变废为宝，也实现了对稀有气体族人的价值拯救，与他们搭建了双向奔赴的友谊长廊。

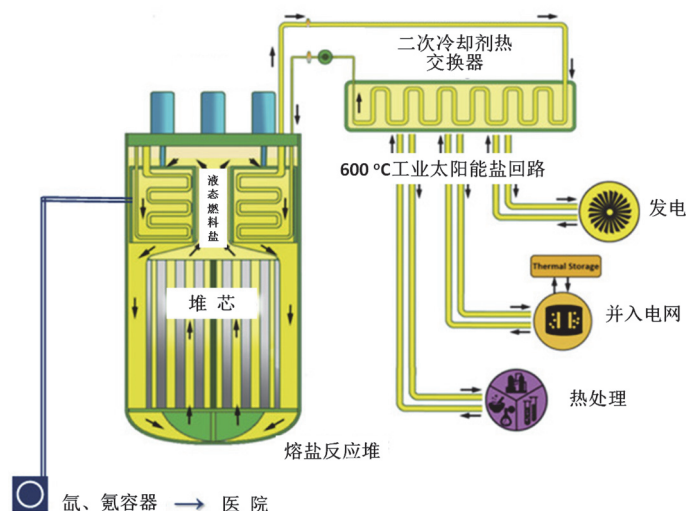


图4 小型模块化熔盐反应堆及其能源生产和氩/氦的同位素生产线^[16]

5 结语

随着时间的推移,周教授与稀有气体族人的合作越来越密切,更多的稀有气体功能被开发出来。在最近一次科学研讨会上,周教授与稀有气体族人携手走上了演讲台。周教授深情地说道:“稀有气体族的朋友们在各个领域上都不遗余力地帮助人类,外冷内热。虽然他们性质不活泼,难以发生化学反应,但只要大家去学习,去研究他们,他们也会毫不保留地将自己的超能力展现出来,造福人类社会。他们就是元素王国的‘竹林七贤’。我希望大家继续努力学习研究稀有气体,把‘竹林七贤’的能力带到各个领域发光发彩!”台上的稀有气体族人也昂起头,骄傲地等待着人们去探索,去发现自己身上的奥秘。

参 考 文 献

- [1] Ramsay, W. *Proc. R. Soc. Lond.* **1895**, 58, 80.
- [2] Bennett, P. B.; Elliott, D. H. *The Physiology and Medicine of Diving*; SPCK Publishing: London, UK, 1993.
- [3] Sir William Ramsay-Biographical. [2023-06-12]. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1904/ramsay/biographical>
- [4] Greenwood, N. N.; Earnshaw, A. *Chemistry of the Elements*, 2nd ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 1997.
- [5] Bartlett, N. *Proc. Chem. Soc.* **1962**, 6, 218.
- [6] 陈琳英, 宋仁旺, 邱家稳. 火箭推进, **2005**, 31 (4), 30.
- [7] 孔令轩, 顾左, 郭德洲, 杨福全, 王蒙. 航空动力学报, **2017**, 32 (3), 756.
- [8] 杨绍富, 张嘉敏, 徐长银. 国际地震动态, **2014**, No. 2, 30.
- [9] Vaishali, S.; Vishal, C.; Naresh, K.; Devajit, H. *Appl. Radiat. Isot.* **2020**, 166, 109327.
- [10] 科学家发现“氦”可以预测地震! 未来也可以像飓风一样被预估. [2023-04-19]. <https://www.163.com/dy/article/DOR5B9BM0512KFEI.html>
- [11] 自制氦气监测仪让他和妻儿逃过一劫意大利科学家预测了拉奎拉地震. [2023-04-19]. <https://news.sina.com.cn/c/2010-04-16/134517383078s.shtml>
- [12] Song, K. D. *Clin. Mol. Hepatol.* **2016**, 22, 509.
- [13] Hamilton, R. CHAPTER 6-Mixed-Gas Diving. In *Bove and Davis' Diving Medicine*, 4th ed.; Bove, A. A., Davis, J. Eds.; Elsevier: Philadelphia, PA, USA, 2004; pp. 95–126.
- [14] 林礼煌. 激光与光电子学进展, **1986**, No. 10, 11.
- [15] Boniface, M.; De Johan, B.; Alfons, V. *Appl. Surf. Sci.* **2003**, 208–209, 171.
- [16] Degueudre, C.; Dawson, R.; Cooley, I.; Besley E. *Med. Nov. Technol. Devices* **2021**, 10, 100057.