

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202304095

www.dxhx.pku.edu.cn

氢家族的三胞胎

张文博, 徐运鑫, 颜静*, 耿旺昌, 闫毅*

西北工业大学化学与化工学院, 西安 710129

摘要: 氢的同位素主要有氕、氘、氚, 在科学研究和日常生活中有着重要的应用。在化学发展史上, 氢元素的出现推翻了燃素说, 极大促进了化学的发展。本文通过氕、氘、氚三兄弟的视角, 主要介绍了其基本性质、分离方法和应用三个方面, 希望能对读者深入了解氕氘氚起到一定的帮助。

关键词: 氢的同位素; 分离; 氢燃料电池; 氘水

中图分类号: G64; O6

Three Isotopes of Hydrogen

Wenbo Zhang, Yunxin Xu, Jing Yan *, Wangchang Geng, Yi Yan *

School of Chemistry and Chemical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China.

Abstract: The three isotopes of hydrogen are hydrogen, deuterium, and tritium, and they have important applications in scientific research and daily life. In the history of chemistry, hydrogen first overturned the phlogiston theory and then became a key element in the development of chemical research. This article reviews the basic properties, separation methods, and main applications of hydrogen, deuterium, and tritium, providing readers with a deeper understanding of these three isotopes.

Key Words: Isotopes of hydrogen; Separation; Hydrogen fuel cell; Deuterium water

自从1781年卡文迪许发现氢元素以来, 氢家族已经有了两百多年的悠久历史。随着分离技术的不断完善, 氕、氘、氚三种同位素不断融入到日常生活和国防工业中, 并发挥着重要作用, 为保障人类的生活质量和增强国家的综合实力做出了巨大贡献。那么, 氕、氘、氚为何能有如此大的影响力呢? 今天, 就让我们揭开氢元素的神秘面纱, 一起去探访氢家族的三胞胎。

1 初识三兄弟

带上摄像机和一些食物, 我便出发了。

刚下车, 便见到了这次采访的一个对象——一位穿着华丽, 腆着个大肚子的男子。

“您好, 氕先生, 我这次来是为了详细了解一下氢的同位素, 您能向大家介绍一下你自己吗?” 我满怀期待地问道。

“大家好! 我的名字叫做氕, 我是由一个质子和一个电子构成的(如图1所示)。在氢的同位素中, 我的含量是最高的, 可以占到氢元素的99.98%。” 氕先生十分热情地说道。

收稿: 2023-04-26; 录用: 2023-06-05; 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); 研究生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)

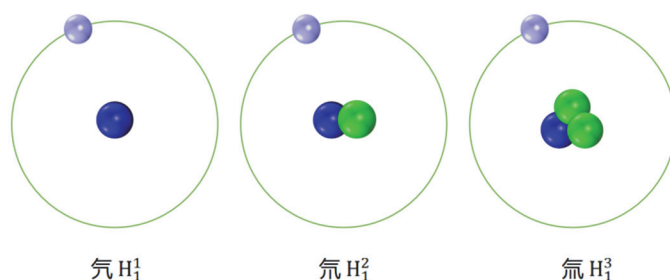


图1 氕、氘、氚结构示意图

这时又走过来两位外貌相似、体态臃肿的男子，显然是氢家族的另外两个兄弟。

看见自己的两个兄弟都过来了，氕先生显得十分惊讶。要知道，氘的丰度已经十分低了，而氚的丰度比氘还要低很多。可想而知，三个兄弟聚在一起有多难。

氕先生也显得十分激动，握着他的手说：“真想不到，这么长时间没见过面！”

氕先生抑制住内心的喜悦，说道：“你们来得正好，我正在接受采访呢。”

接着便向我介绍道：“这是氘，我的二弟，由一个电子、一个质子和一个中子组成。他的丰度只有0.02%，所以我们见面的机会并不多。尽管氘的丰度很低，但功夫不负有心人，在科学家的不懈努力下，1931年底美国科学家尤里在蒸发了大量液体氢后，利用光谱检测的方法发现了氘。尤里先生因此获得1934年的诺贝尔化学奖。值得一提的是，氘的英文名字(deuterium)也是尤里教授命名的，在希腊语中是“第二”的意思。”

“氘虽然排行老二，但在家族中的地位却和我不相上下，甚至被称为‘未来的天然燃料’。他可以在聚变时发生热核反应，放出大量的热和 β 射线后形成质量数为3的氦。”

然后他又走到氚的身边，紧紧地握着他的手说：“这是我的三弟，比氘多了一个中子，也被称作超重氢。氚在自然界中的含量极少，丰度仅有0.004%。在尤里先生发现氘后不久，大名鼎鼎的卢瑟福先生于1934年在加速器上用加速的氘核轰击氘靶制备出了氚。除了加速轰击的方法，还可以通过中子轰击锂得到氚(如反应(1)所示)。我们三兄弟之间有着密切的联系，通过反应(2)和(3)我们可以实现彼此的转换。”



看着这么复杂的反应方程式，听着氕先生不停地讲“轰击”，我不由地问：“氘和氚会不会衰变产生辐射呢？”他微微一笑说：“我们三兄弟中只有氚是具有放射性的，这也是为什么他今天穿着隔离服的原因。他的半衰期大约为12.4年，所以放射性比较强。但是请不要恐慌，毕竟他的丰度很低。”

“接下来，让我们带你参观一下氢同位素分离的加工厂吧。”在诺大的厂房中，有着各式各样的化学仪器，一路走来，眼前的设备由简易粗陋变得更加精密，反映了氢家族对科学和真理的不断追求。看着前人智慧的结晶，我感叹良久。

2 游览加工厂

进入工厂之前，氕先生介绍道：“氢同位素的分离技术在国防工业中有着重要应用。经过近七十多年的发展，目前较为成熟的方法有低温精馏法、热扩散法、选择性吸附法、含热循环吸附法和钯膜分离法等^[1]”。顺着他的手势，映入眼帘的是许多巨大的不锈钢罐子，嗡嗡地运转个不停。一排排的支架上，不锈钢罐子整齐地摆放着，密密麻麻的管道穿梭在这些银白色的罐子之间，最终汇聚在一起，向前延伸着。

氙先生嘴角微微上扬，他无比自豪地介绍道：“这是目前广泛使用的一种气气分离方法——低温精馏法。这种方法是利用氢同位素沸点与蒸发速率不同进而实现分离的^[2]。”

氙先生一边指着罐子的底座一边讲解道：“在分离氘气时，首先使气体液化，然后采用精馏的方法使气体分离获得氘气和氕气。你看，放在最下面的是再沸器，它的主要作用就是使液体吸收热量，蒸发出低沸点的组分。与此同时，这些气体会在温差的推动下向上流动，而在罐子的顶部放置的冷凝器，同样会使高沸点的组分液化(如图2所示)。当然，仅仅经过一次精馏是不可能达到纯度要求的，因此我们需要反复重复这个过程，使气体分离程度最大化。”

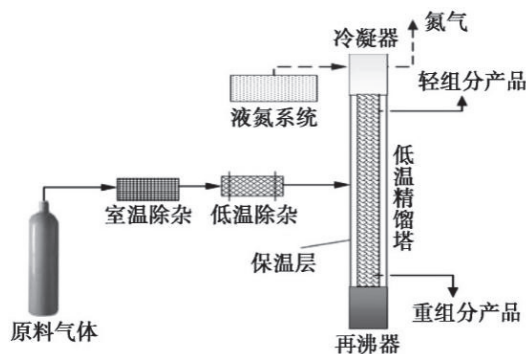


图2 低温精馏法原理示意图^[2]

“哦，我明白您的意思了，”我恍然大悟地说道，“所以在收集的时候，可以在罐底得到高沸点的组分，而在罐顶得到低沸点的组分。”

氙先生回答道：“是的，而且批量化、快速化的生产特点使低温精馏法得以广泛应用。”看着眼前井然有序的工厂，我呆呆地站在那里，一时间竟然不知道要说些什么，思绪仿佛也跟着气体一起蒸发、液化，再通过密密麻麻的管道，一直向前涌去。直到氙先生拍了拍我的肩膀，我才从幻想中醒来，慌乱地夸赞了几句。

接下来，一个像海绵的蓬松物体出现在了我们的面前，不同类型的“海绵”被放在一个玻璃管里。源源不断的氢气从左端输入，依次经过不同的吸附材料，滞留下一些物质后便从右端出去了。

看着这个似乎是过滤的装置，我好奇地问道：“这些形状各异的‘海绵’是用来干什么的？使氢气更纯吗？”

氙先生愉快地笑了笑，回答道：“哈哈，这是含热循环吸附法，也是用来分离氢的同位素的一种方式。这些‘海绵’实际上是不同的吸附剂，你看，它们的孔洞有着不同的形状和大小，代表着它们吸附能力的不同。选择合适材料，并把它们按一定的顺序组合在一起，就可以实现同位素的分离^[3]。”

看着这个简便的装置，我在心里暗自想着：“跟刚才的方法相比，吸附似乎更有利于提高纯度，不知道为什么只有这么几个装置？”

于是我又问道：“含热循环吸附法分离出来的同位素貌似有着更高的纯度，如果能够批量生产的话，应该可以创造更大的经济效应吧，为什么这里只有这么几个设备呢？”

一直没有说话的氙先生点了点头，说道：“嗯，这种方法的分离纯度的确很高，吸附材料都是纳米级的，而且分离速度快，操作也很简单。不过，由于材料的吸附能力有限，它能分离气体的体积很少，不能实现大规模的生产。”

“啧啧，啧啧！”我不禁感叹道：“想不到你们竟然能在纳米尺度上对氢的同位素进行吸附和分离，而且这些‘海绵’居然有这么广泛的应用，化学可真是神奇。”

“哈哈！”氙先生笑了笑，继续说道：“这还只是雏形，为了让它实现工业化生产，科学家对

这种方法做了进一步改进，创造出了钯膜分离法^[1]。这种方法依赖于金属氢化物，利用钯的氢同位素效应以及氢同位素效应与温度之间的关系，进而实现氢同位素的分离。分离后，轻的同位素位于柱的上端，重的同位素位于柱的下端。当然，钯膜分离法会受温度影响，温差越大，分离效果就会更好。”

紧接着，氘先生进一步解释道：“由于我和氕具有相同的分子直径，传统的分子筛方法已经无法在分子尺度上将我们分离。1995年荷兰科学家Beenakker试图从量子层面将氕和氘分离，提出了十分新颖的量子筛原理(Quantum sieving effect)^[4] (图3)，这无疑引起了家族中科技工作者的注意。”

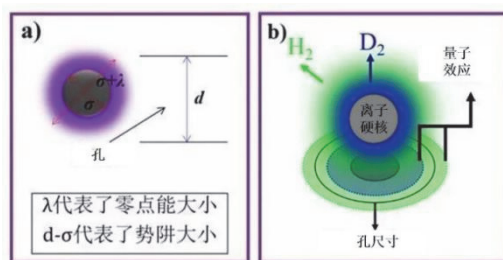


图3 量子筛分离氢同位素原理示意图

(a) 孔尺寸与分子硬核大小示意图；(b) 量子筛分 H_2 和 D_2 示意图^[5]

“与分子筛不同的是，量子筛避开了分子直径相同这一窘境，巧妙利用了物质波的性质。具体来讲，就是当微孔孔径和气体分子硬核直径的差别与气体分子的物质波波长相近时，存在量子态分子筛分离现象，这一现象为分离氕气提供了可能。”

我追问道：“那量子筛原理对于分离氕气有没有其他的优势呢？”

氘先生肯定地点了点头：“先从物质波说起吧。我们可以用物质波来描述氕、氘、氚的量子状态，随着质量数的增大，物质波的波长会降低，同时量子态尺寸也会减小，这使得氕气在纳孔中的扩散速率快于氢气。这样不仅能够快速分离出氕气，也可以降低对能源的消耗，提高能源利用率^[5]。”

听完氘先生和氕先生的讲述，我了解到氢家族分离氢同位素的许多方法，但我知道这也仅仅是冰山一角，一定还有许多不为人熟知的方法。我心中不禁感叹道：“正是一代又一代家族成员的不懈奋斗，才造就了这个神奇而且壮观的加工厂，为知识的宝库又增添了一笔财富。”

3 三兄弟各放光彩

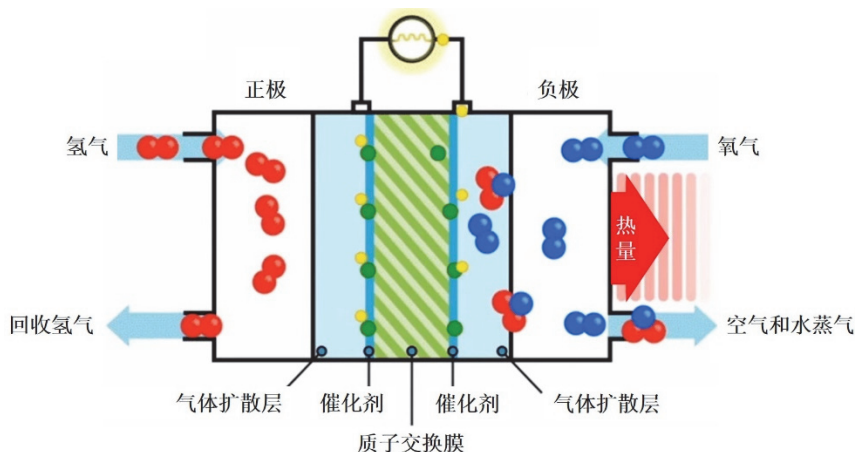
3.1 氢燃料电池

接着，我们一行来到了现代科技园区。还没进门，就被工作人员拦住了，要求我们换鞋并穿上无尘衣。在一尘不染的车间里，放在最中央的一台设备吸引了我的目光。我好奇地问道：“氕先生，这台设备是用来干什么的？怎么中间还有一个大水池？”

氕先生笑着说道：“我正要向你介绍呢，这是氢燃料电池，它可离不开我的帮助！”说着便跳到了池子里，没有顾虑地游了起来。

看着我不可置信的样子，氕先生笑着解释道：“哈哈，不用担心我，没事的。你看到左边那个通气装置了吗，那里通的是氢气。在催化剂的作用下，氢气会失去电子变成质子，也就是我，然后我会游过质子交换膜到达阴极。右边通入的氧气同样会变成氧负离子，和我发生反应并得到质子。这样，一个完整的通路就形成了(图4)。”

氕先生扶着栏杆爬上来说道：“虽然它的原理很简单，但是千万不要小看氢燃料电池，这种能量转化不仅清洁无污染，而且转化效率高，是一种十分理想的新型替代能源^[6]。令人振奋的是，通过科学家们夜以继日的奋斗，目前已经攻克了质子交换膜、高效催化剂等许多关键难题！”

图4 氢燃料电池工作原理^[6]

我追问：“您刚才讲的都是原理方面的突破，在现实生活中，氢燃料电池有哪些实际应用呢？”

氙先生思考片刻后说道：“在20世纪60年代，氢燃料电池就因其体积小、容量大的特点成功应用于航空航天领域，往返于太空和地球之间的‘阿波罗’飞船就安装了氢燃料电池！随着科学家对制氢技术的不断改进，氢燃料电池已经推广到发电、汽车、手机和笔记本电脑等多个领域。”

“除此之外，科学家还试图在无人机上应用氢燃料电池，成功研发出国内首架氢燃料电池无人机‘飞跃一号’，几年后又研发出了性能更加优异的六旋翼氢燃料电池无人机^[7]。”

3.2 氘水

接下来，我们来到了最神秘的车间——氘水生产车间。经过了层层安检后，我们来到了一个十分敞亮的车间。三兄弟也变得略微紧张，庄重地向里走去。氙先生向我介绍道：“这里是用来生产氘水，是我们氘家族保密程度最高的地方。”

氙先生继续说：“氘水也叫重水，与普通水一样，都是由两个氢和一个氧组成，只不过重水中的氢原子是氘。重水与普通水的化学性质相似，物理性质却略有不同，普通水的凝固点为0℃，而重水的凝固点为3.8℃^[8]。重水在自然界中的存在量极少，50吨水中才能提炼出一公斤的重水^[9]。”

我有些不解地问道：“重水究竟有怎样的用处，竟值得你们耗费这么大的精力去生产？”

氙先生严肃地补充道：“在国防中，重水是一种极其重要的战略物资。比黄金还贵的重水是制造氢弹不可缺少的原料，家族想要发展壮大，没有核武器作保证是不可能实现的^[9]。此外，重水也可以用来做核电反应堆的减速剂和冷却剂，同时是我国‘人造太阳’计划中核聚变的主要原材料^[10]。

‘人造太阳’一旦实现，获得无限的清洁能源将不再是幻想，到那时候，人类也不会被能源危机困扰，走向太空、殖民星球也不再是科幻小说中的情节！”

听到这些疯狂的想法后，我十分震惊地看着他，刚想张嘴，却又将已经到了嘴边的话咽了回去。我暗自思忖：“科技真是一把双刃剑，在给人类带来巨大福利的同时，也可以产生毁灭性的力量。”

氙先生似乎已经读出了我心中的想法，连忙解释道：“我们只是将核武器作为国家外交和民族独立的保障，在一般情况下是绝对不会使用的。历史上，人类将核武器用于战争的例子已经给了我们惨痛的教训，要知道，核武器杀伤力和破坏范围极大，而且使用后产生的核辐射也会遗留很长时间。为此，各大家族之间签署了《禁止核武器条约》，旨在将核威胁降到最低，争取达到世界无核化。不过，重水也有它积极的一面，一旦可控核聚变成为现实，人类社会将会发生翻天覆地的变化。”

3.3 可控核聚变

在今天的访谈即将结束的时候，一直不怎么讲话的氙先生举起手说：“我还想补充一点，可以吗？”看着穿着笨重防护服的氙先生，我才意识到还没有采访他，急忙讲道：“氙先生，实在抱歉！请您讲一下您的贡献。”

氦先生缓了口气说：“我想说一下，虽然我具有放射性，但是也有着重要用途，那就是核聚变。比如我们每天都可以见到的太阳的内部进行的就是我和氘的聚变反应(图5)，而且已经持续了50亿年，源源不断地给人类供给能量。核聚变不会产生核裂变所出现的长期和高水平的核辐射，不产生核废料，当然也不产生温室气体，基本不污染环境，是绿色、可持续能源的绝佳选择。”

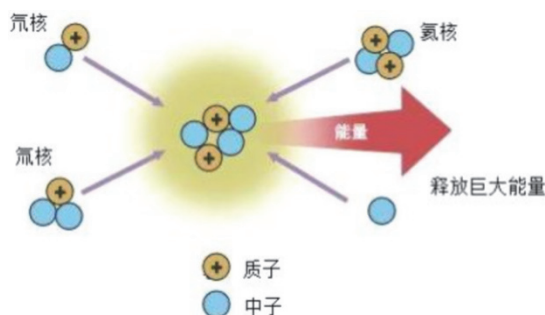


图5 氘氚核聚变原理示意图^[6]

“然而，在地球上的热核聚变反应往往都像氢弹爆炸那样不可控制，如果可以实现可控的核聚变反应，那么能源危机、环境污染等将不再是人类的难题。”

我瞪大眼睛问道：“核聚变反应还能控制吗？”

氦先生微微一笑说：“你听过托卡马克装置吗？这是目前实现可控核聚变反应的主流手段。托卡马克英文缩写是TOKMAK，是利用磁约束来实现可控核聚变的环形容器，最早是苏联科学家阿齐莫维奇等人在20世纪50年代发明的。中国的全超导托卡马克核聚变装置(EAST)于1998年立项，2007年通过验收。在2023年4月12日21时，EAST成功实现稳态高约束模式等离子体运行403秒，创造新的世界纪录。相信在不远的将来，我们就可以实现‘人造太阳’的梦想了！”

4 结语

故事到这里就接近尾声了，回顾过往，氢家族已经绵延发展了两百多年。在家族成员的共同努力下，氢家族正在不断地发展壮大。氢家族的三兄弟齐心协力，共同致力于氢同位素的分离与应用，为人类日常生活带来了便利，同时在我国国防中也发挥着不可替代的作用。

参 考 文 献

- [1] 李硕, 雷洋, 刘晓鹏, 蒋利军, 王树茂. 稀有金属, **2018**, 42 (2), 213.
- [2] 刘振兴, 张福星, 陈鸿峰, 熊伟. 现代化工, **2021**, 41 (S1), 110.
- [3] 雷强华, 罗德礼, 钱晓静, 黄国强, 熊义富. 稀有金属材料与工程, **2007**, 36 (2), 363.
- [4] Beenakker, J. J. M.; Borman, V. D.; Krylov, S. Y. *Chem. Phys. Lett.* **1995**, 232, 379.
- [5] Cao, D. W.; Ren, J. H.; Gong, Y.; Huang, H. L.; Fu, X. L.; Chang, M.; Chen, X. J.; Xiao, C. J.; Liu, D. H.; Yang, Q. Y.; *et al. J. Mater. Chem. A* **2020**, 8, 6319.
- [6] 高助威, 李小高, 刘钟馨, 饶健民. 材料导报, **2022**, 36 (14), 74.
- [7] 耿荣妹, 纪任鑫, 李虹, 陈钦. 科技创新与应用, **2023**, 13 (3), 45.
- [8] 窦光宇. 海陆空天惯性世界, **2001**, No. 3, 44.
- [9] 董必钦, 郭树涵. 装备制造, **2011**, 44 (7), 92.
- [10] 时迁. 现代班组, **2019**, 145 (1), 16.