

伯克利实验室为世界带来清洁氢的六种方式



氢是宇宙中最小的元素，作为一种清洁能源有着巨大的潜力。使用氢(H₂)作为燃料和储存能量的手段可以减少我们对石油的依赖，帮助我们减少空气污染和温室气体排放，以实现我们更清洁、更美好的气候目标。然而，大规模采用氢能源需要技术进步和新基础设施的建设。

劳伦斯伯克利国家实验室(伯克利实验室)的科学家们正在领导地方和国家项目，旨在优化氢能生命周期的各个阶段，从成本效益和环境友好型氢气生产的工程技术一直到开发高效的氢燃料电池。

以下是我们目前关注的领域综述，包括氢的生产、储存、使用和分析，以实现无碳的未来。

1、电解：从水中获得的无碳燃料

传统上，最常见的生产氢气的方法是在炼油厂重整天然气。但随着我们从化石燃料转向可再生能源，电解——利用电和催化剂分解水分子产生氢气的过程——正越来越受欢迎。

由于氢气在内燃机或燃料电池中燃烧时不会产生二氧化碳，当你用可再生电力为电解槽供电时，得到的氢燃料几乎是零碳能源。电解方法已经存在了几十年，但由于高昂的资金成本和所需的电力成本，该方法尚未在商业规模上广泛采用。

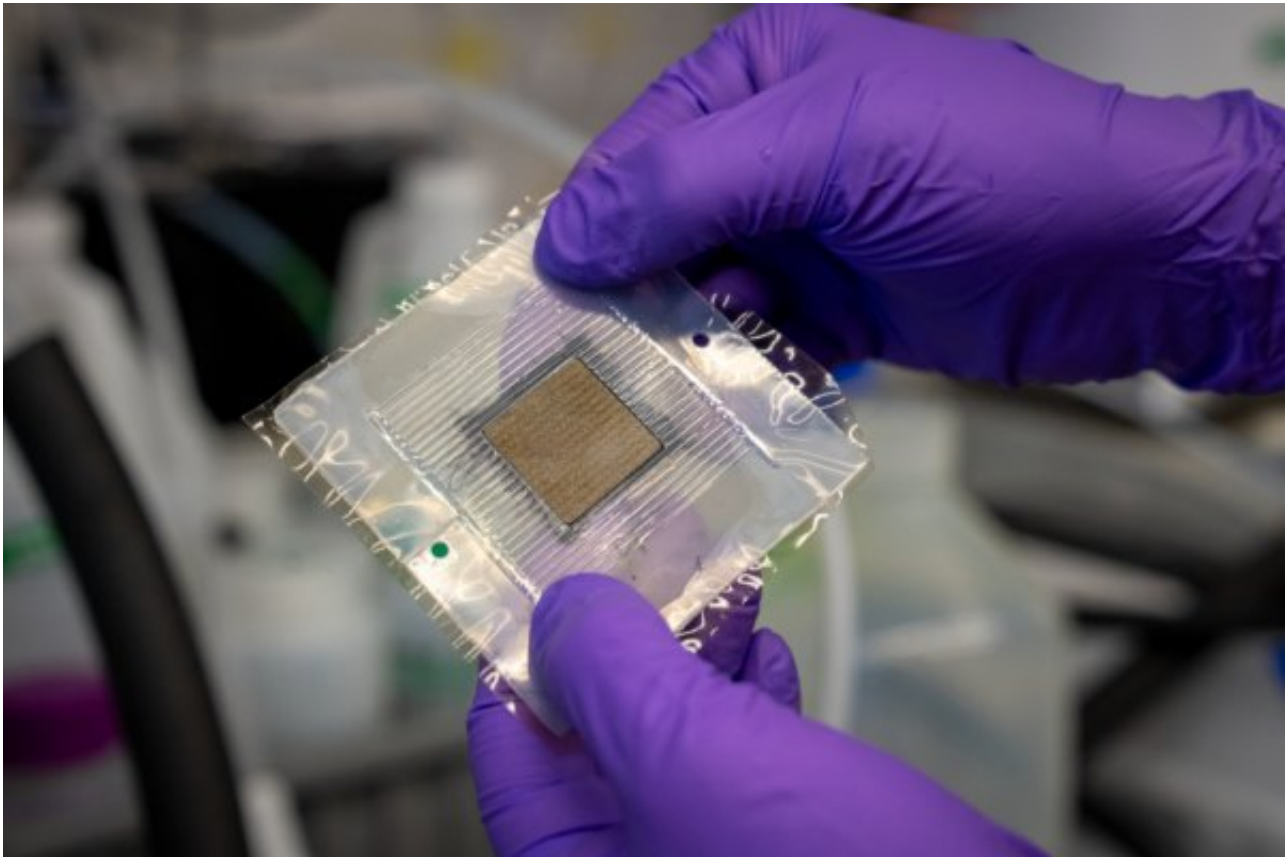
伯克利实验室的科学家们正致力于开发多种电解技术，作为“下一代水电解槽氢”(H₂NEW)多实验室联盟的一部分。该联盟的目标是使可制造的电解槽能够在2025年之前将氢的成本降低到每公斤2美元，以便与天然气制氢竞争。

一个团队正在研究高效的 **高温电解系统**，该系统利用水泥和氨生产等工业过程产生的副产品产生的热量，或太阳能热电厂和核电站产生的多余热量，作为能量来帮助驱动水分解反应。

其他研究人员正在研究 **低温质子交换膜(PEM)电解**，这种电解在低于100摄氏度(212华氏度)的温度下工作，使它们能够与风能和太阳能等可再生能源相结合。低温PEM

电解技术较为发达，在计划部署的电解槽中占很大比例。

不幸的是，这些装置需要铱——地球上最稀有的元素之一——作为电极催化剂，将氢质子从H₂O分子中分离出来，并从新的单个氧原子中生成O₂。



能源技术领域(ETA)的资深科学家Rangachary Mukundan拥有数十年研究燃料电池和电解槽的经验，他说：

“当大量使用铱时，就像今天的商业电解槽一样，一切都能正常工作，而且系统非常耐用。”

但是，他指出，当你试图减少铱的用量以降低成本时，“你就会开始看到耐用性问题。随着时间的推移，铱会溶解并从催化剂层进入膜中，因此性能不再稳定。”

ETA能源转换小组的研究科学家Xiong Peng是一个团队的成员，他试图通过重新设计电解槽的多孔传输层(PTL)来解决这个问题。PTL是催化剂和流场之间的材料，也是水流经电解槽的地方。

最近的研究表明，通过激光烧蚀来修饰该层的多孔纳米结构可以改善PTL与电极的接触，从而提高其性能。



2、甲烷热解：利用温室气体制造氢燃料

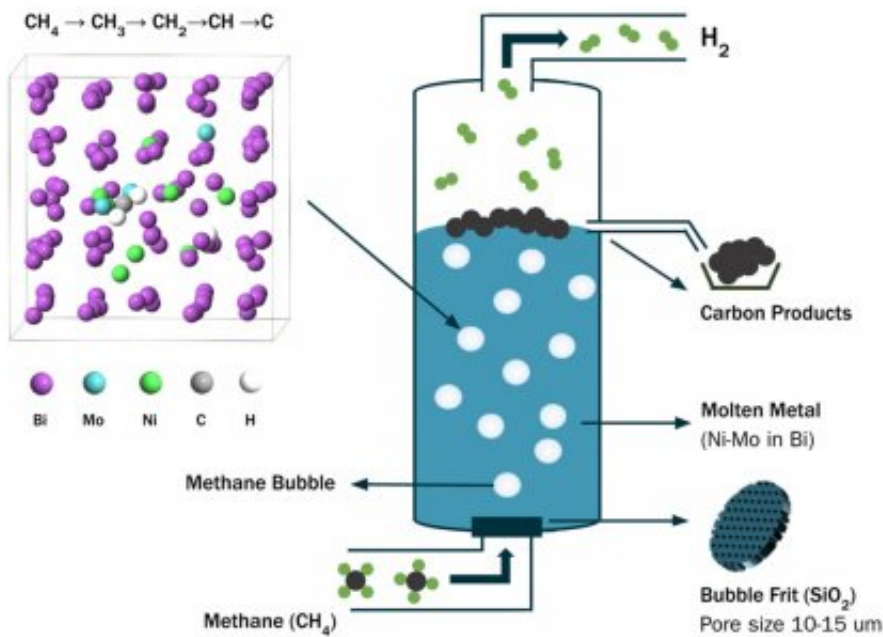
电解分解水，另一种称为甲烷热解的技术利用热量和催化剂将甲烷气体（CH₄）分解为氢气和有用的固体碳产品，如石墨、碳纳米管和富勒烯。目前还没有大规模的甲烷热解系统在使用，因为现有技术需要高热量（大于1000摄氏度或1832华氏度）来引发分子分解，因此由于能源和专门的、具有温度弹性的设备的成本，该过程变得昂贵。但考虑到这种方法提供了三对一的好处，即在生产无碳燃料和有价值的材料的同时去除温室气体，许多研究人员正在努力使甲烷热解在商业上可行。

伯克利实验室能源转换小组的Ji Su领导的一个多机构团队正在开发一种新型液态金属催化剂，有望在450-800摄氏度（842-1472华氏度）的较低温度下实现高效、高耐久性的甲烷热解。最近，一篇描述催化剂原理和早期实验数据的论文发表在《科学》杂志上，该团队获得了《2023 R&D 100》大奖。

Su说：“低温活动为甲烷热解过程提供了利用其他工业过程废热的机会，而不是其他本身产生碳的能源。例如，在我们的催化剂使用范围内，欧盟每年产生的总废热估计约为120TWh。此外，低操作温度是使用可再生能源进行电加热的理想选择，这将提高效率并实现零二氧化碳足迹。”

该团队的原型系统非常简单。催化剂是镍、钨和铋的合金。一层只有几厘米高的合金薄层装在一个小的弯曲石英管中，放在一片多孔石英的顶部。管被加热，使催化剂变成液体。甲烷通过底部管道进入，并通过多孔石英起泡进入液体催化剂，在那里，合金的金属原子混合物共同作用，将CH₄分子分解。氢气从管的顶部流出，在那里可以收集氢气，而碳的副产品——在这些测试中是纯石墨——整齐地堆积在催化剂的顶部。科学家们指出，在原型系统中，催化剂中的一克镍可以在一小时内产生2.4升氢气。在800摄氏度下连续运行120小时后，该系统仍然运行平稳，没有检测到石墨以外的化学产品，这表明甲烷具有良好的耐久性和完全分解能力，没有任何可能损坏系统或成为污染源的意外副产品。

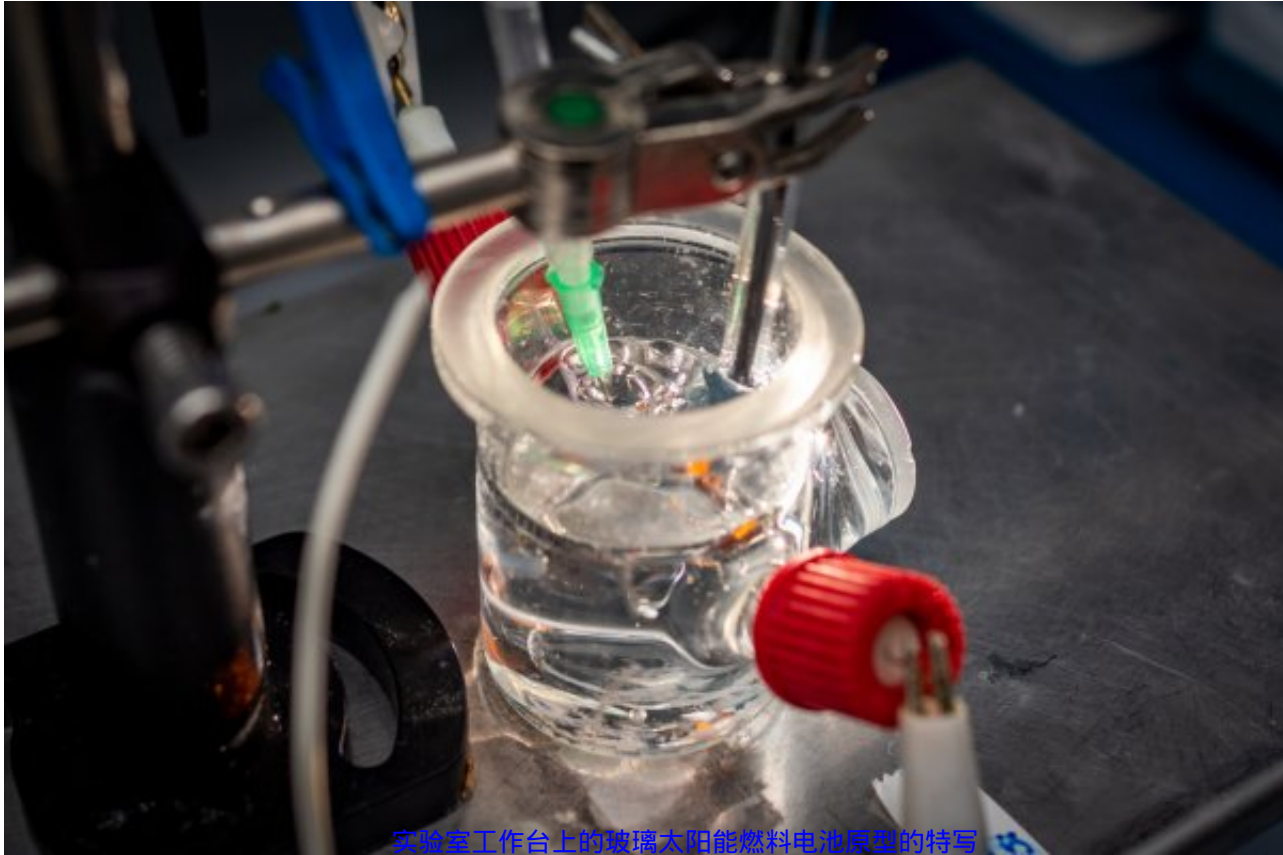
尽管这项技术仍处于早期开发阶段，但该团队乐观地认为，它将在商业规模上运行良好。“我们的技术超过了任何其他甲烷热解催化剂的整体性能，”Su说。他和其他人计划下一步建造一个一米长的甲烷反应器，并设想不久的将来，一个将许多管式反应器与热源并联的系统可以同时运行，生产大量清洁的氢燃料。



3、太阳能发电：受自然启发的可持续燃料

电解和热解并不是获得可持续氢气的唯一途径。另一种途径是太阳能发电，这是一类受光合作用启发的技术，利用阳光中的能量驱动化学反应，将水和大气中的气体转化为燃料。隶属于液体阳光联盟（LiSA）的科学家们正在努力使这些太阳能燃料系统成熟，并使其达到工业使用所需的规模。

最近，LiSA团队开发了一种新的人工光合作用单元，该原型单元由氧化亚铜（ Cu_2O ）制成，顶部有薄层银，底部有金和氧化铁。氧化亚铜是一种很好的太阳能燃料催化剂，因为它价格低廉，易于获得，对光的反应性很高，但就其本身而言，它很快就会被化学反应中产生的腐蚀性自由电子和带电分子损坏。该团队发现，他们的“三明治”设计通过将顶部表面产生的电荷通过铜材料输送到金和铁的“水槽”中，大大减少了腐蚀，延长了寿命。尽管他们的实验是为了产生另一种气体燃料乙烯，但这项技术可以很容易地用于生产氢气（ H_2 ）。

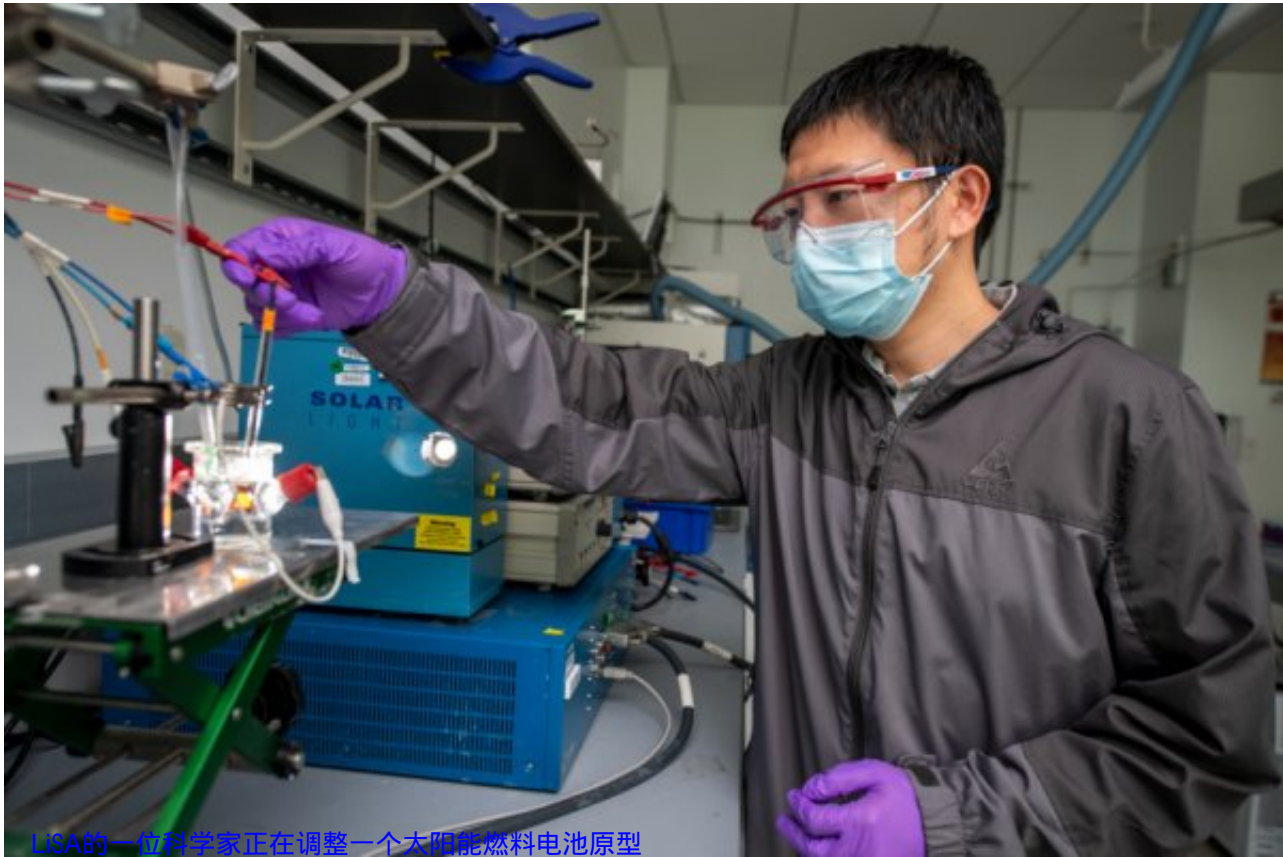


实验室工作台上的玻璃太阳能燃料电池原型的特写

该研究的合作者、材料科学家Joel Ager说：“Cu₂O研究中的新见解同样适用于制造氢等其他太阳能燃料。太阳能制氢是一项更成熟的技术，但它仍然缺乏商业使用所需的寿命。我们很高兴能将从Cu₂O中学到的见解应用到其他系统中。”

Ager领导HydroGEN的光电化学团队，HydroGEN是一个由五个美国能源部国家实验室组成的联盟，与行业和学术合作伙伴合作开发先进的水分解材料。通过HydroGEN，伯克利实验室的科学家开始与密歇根大学的研究人员合作，分析该小组基于硅和氮化镓的人工光合作用设备。过去几年的实验表明，该装置在生产氢气方面非常有效。而且，与其他所有人工光合作用催化剂（以及大多数技术）不同，氮化镓随着时间的推移会变得更高效，而不是分解。通过伯克利实验室分子铸造厂进行的先进电子显微镜和X射线光谱能够表明，该设备中使用的纳米线侧壁的氢气产量增加是性能提高的原因。HydroGEN联盟的另一个成员Lawrence Livermore国家实验室进行的工作随后揭示了造成这种影响的原子机制。

“我们已经研究这种材料超过10年了，我们知道它是稳定高效的。但这种合作有助于确定它变得更坚固、更高效而不是退化的基本机制，”该材料的发明者、密歇根大学电气和计算机工程教授Zetian Mi说。Mi说：“这项工作的发现将帮助我们以更低成本建造更高效的人工光合作用设备。”

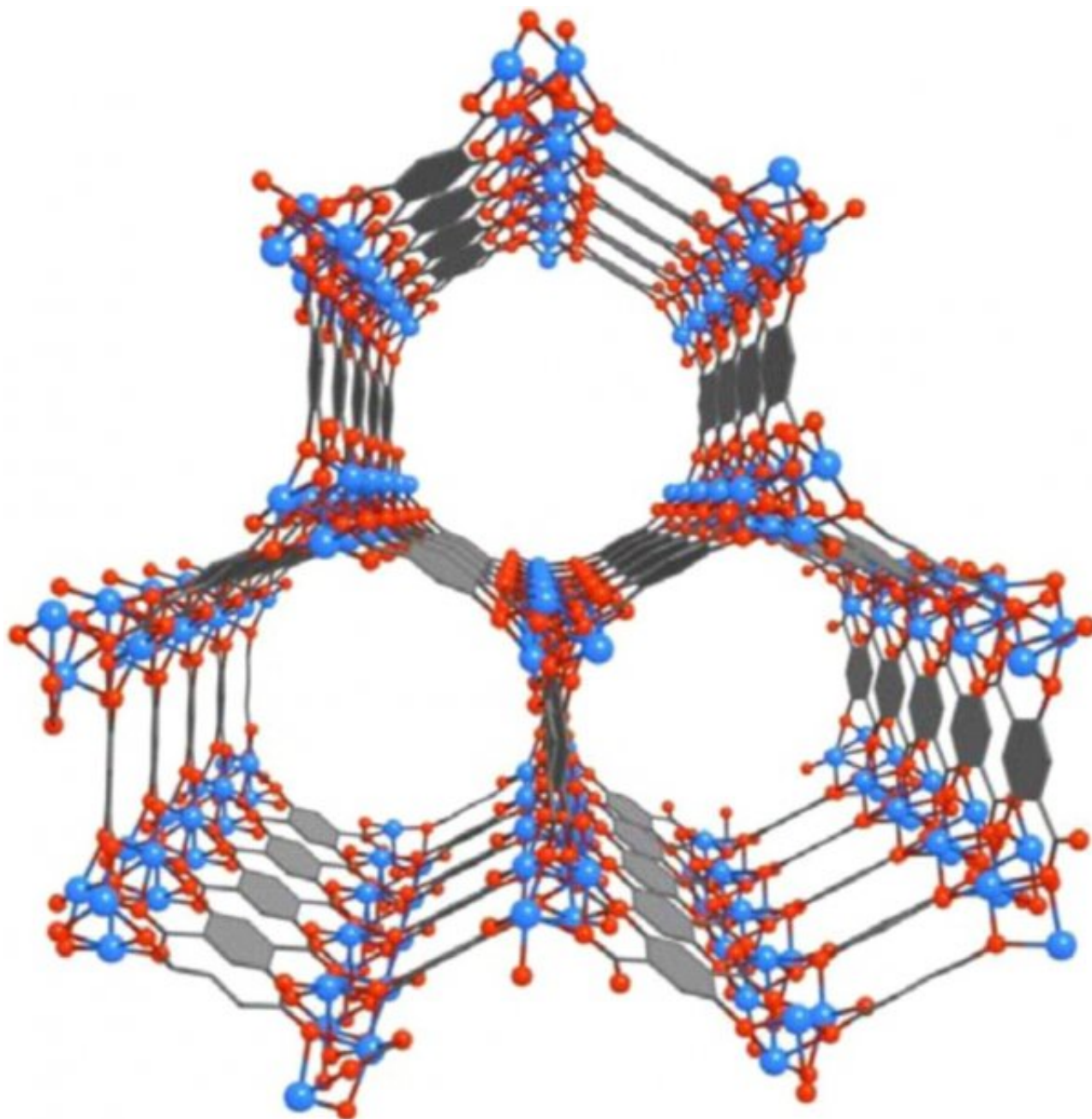


LISA的一位科学家正在调整一个太阳能燃料电池原型

4、更好的储氢方法

一旦产生氢气，就必须将其储存并运输到加油站、发电厂、化学制造中使用氢气的工厂和其他用户那里。然而，由于氢的体积很小，很难控制。由于氢分子对中的每个原子只由一个质子和一个电子组成，分子可以很容易地穿过固体材料中结合在一起的较大原子之间的空间。为了减少储存容器的泄漏，氢气通常以液体形式在非常低的温度下储存或在高压下压缩。虽然这些方法运行得很好，但它们是非常耗能和昂贵的。

伯克利实验室的科学家们正在开发一种名为金属有机框架（MOFs）的特殊材料，这种材料可以像海绵一样在更接近环境条件的压力和温度下吸收氢气。所有MOF都由被有机连接分子包围的金属原子团簇的重复单元组成，尽管确切的成分因MOF吸引的分子种类而异。



这些单元产生了多孔三维结构，每体积材料的表面积非常高。氢气很容易流入孔隙，然后紧紧地附着在内表面的带电颗粒上，直到压力降低，然后氢气被释放出来，并可以转移到其最终目的地。

ETA可持续能源与环境系统部的研究科学家Peng Peng解释道：“液氢需要冷却到负250摄氏度，压缩气体需要350-700倍大气压的高压。而MOFs在适度冷却和一半压力下可以储存与高压气体相同数量的氢气。”

MOFs的其他优点包括与液体储存容器相比，向大气蒸发的损失更小，并且与高压罐相比，燃烧危险更低。

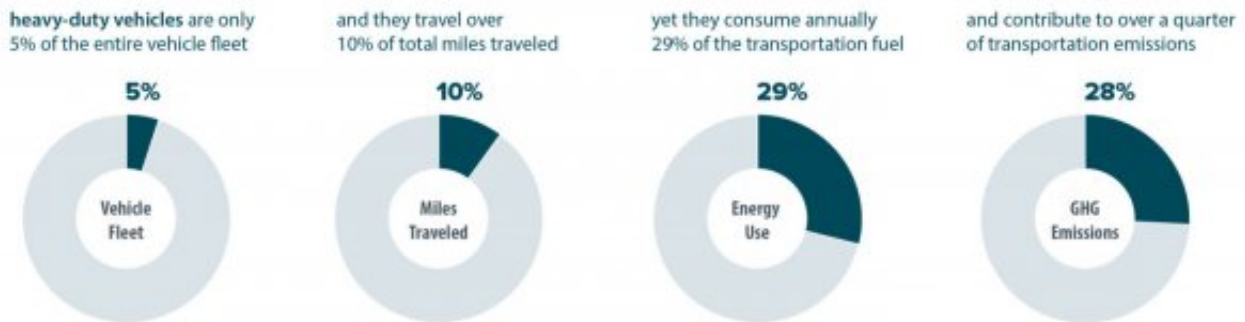
Peng和他的同事们一直在为新的MOF设定目标，并通过计算模型评估MOF的性质和性能，该模型基于加州大学伯克利分校的化学家和材料科学家合作者通过DOE氢材料高级研究联盟（HyMARC）合成的样品的小规模测试。一些材料已经进入原型阶段，少数材料已经在商业化的道路上。Peng表示，目前MOFs最大的障碍是制造这种材料和快速向其中充入氢气的高成本。

伯克利实验室的团队通过HyMARC也在研究其他储存解决方案，如结合氢原子的金属，称为氢化物，以及将氢储存在其他化学键中的方法，称为化学载体，如甲苯（ $C_6H_5CH_3$ ）。伯克利实验室的科学家们正在与学术团体和行业展开合作，设计耦合系统，将存储技术与从中馈送的耗氢设备集成在一起。

5、利用氢动力的先进燃料电池

除了生产和储存氢气，我们的研究人员还建造和测试了燃料电池，这些燃料电池可用于大规模能源生产系统，以支持电网，以及为零排放汽车供电。

后一个领域的一个关键项目是百万英里燃料电池卡车联盟（M2FCT），这是一个由伯克利实验室共同领导的多实验室DOE倡议，旨在推进PEM燃料电池，使其足够耐用，可用于长途运输的重型卡车。M2FCT的成员还对氢动力卡车进行成本分析和生命周期评估，以预测更换柴油动力卡车的影响。



描述大型卡车影响的四张饼图。（资料来源：Ahmet Kusoglu）

PEM燃料电池看起来像是反向工作的PEM电解装置。燃料电池不是用电从水中产生氢气，而是分裂氢分子，产生自由电子流——可以为发动机提供动力的电——和质子，质子穿过膜，然后与从空气进入电池的氧分子相互作用，形成水蒸气。目前，一个电池单元可以产生大约300W的功率，足以为五个标准灯泡供电。能够为汽车或卡车提供动力的燃料电池发动机由许多堆叠在一起的电池单元组成。

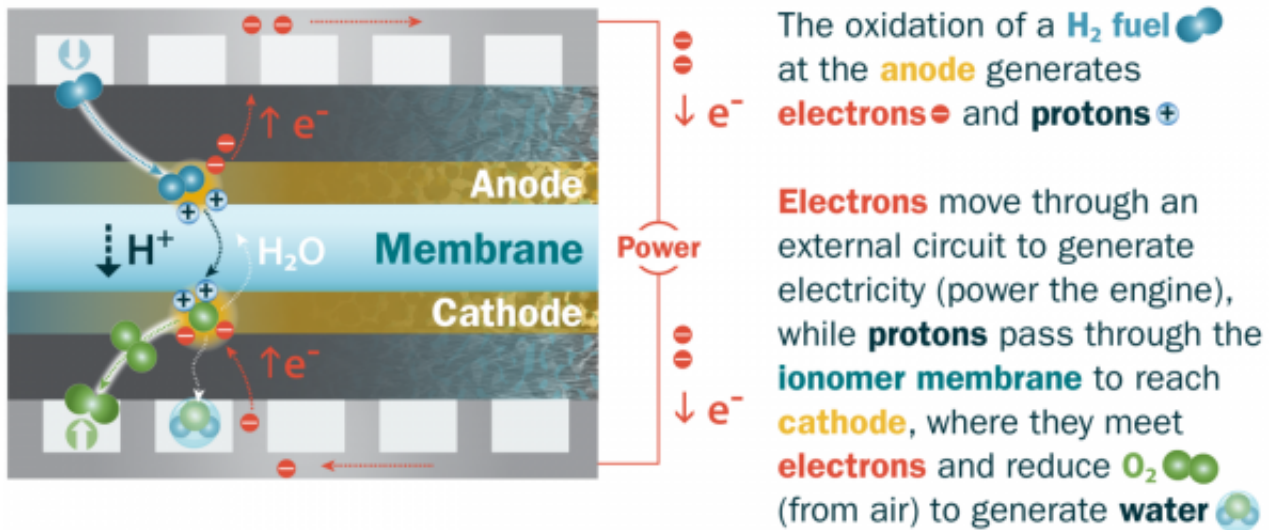
“向氢燃料电池重型汽车过渡将对减少温室气体排放产生重大影响，”能源转换小组的科学家、M2FCT团队成员Ahmet Kusoglu说。他指出，重型卡车只占美国车辆总数的一小部分（约5%），但占有所有运输排放量的约25%以上，每年消耗四分之一的燃料。

经过几十年的研发，用于轻型汽车（如乘用车）的燃料电池发动机已经相当先进。但这项技术不能复制粘贴到重型车辆上。用于乘用车的燃料电池发动机被设计成重量轻、价格实惠，而卡车需要耐用的电池，可以以低运营成本持续长距离使用——重量和标价并不是什么大问题。

Kusoglu和他的同事们的目标是了解PEM燃料电池是如何以及为什么退化的，以开发材料和策略来提高系统的耐用性，使其达到100万英里的寿命目标——这将比目前的燃料电池汽车发动机的耐用性提高五倍。除了减少交通部门排放的明显好处外，该计划还将使燃料电池更容易在各种重型应用中实施，从港口设备、船舶到火车。

“重型汽车市场可能是快速部署燃料电池技术的途径，”能源转换小组组长、M2FCT联合主任、燃料电池性能和耐久性联盟前副主任Adam Weber说，该联盟专注于轻型汽车的燃料电池。“这将鼓励建设所需的加氢基础设施。”

PEM FUEL CELLS



6、构建经济和环境有效的系统

我们的科学家不仅仅是在设计氢技术，并希望它们能在现实世界中发挥作用。他们使用技术经济分析（TEA）和生命周期评估（LCA）来研究不同装置和系统的投入、产出以及环境和经济影响。TEA和LCA使科学家能够研究能源技术在处于早期开发阶段时将如何在工业规模上发挥作用，并了解技术组件的变化——例如，切换电解槽中使用的材料——将如何影响成本、性能和供应链。

Hanna Breunig，可持续能源与环境系统部副部长，专门研究氢能系统的TEA和LCA。她还是该实验室HyMARC工作的联合主任。Breunig和她的同事们在本文前面提到的许多项目上进行了合作，并领导了他们自己的研究。

该部门目前的一个分析项目侧重于使用氢气来限制钢铁和炼钢中化石燃料的使用，这是一个巨大的全球产业，是二氧化碳排放的重要来源。根据国际能源署的数据，全球钢铁生产每年贡献27.8亿吨二氧化碳排放量，即每吨钢铁约1.39吨二氧化碳。

这些排放物来自天然气或焦炭（经过加热以去除杂质的浓缩煤），在高温炉中与铁矿石（氧化铁）混合以去除氧气，从而生产出更多可与碳结合制成钢的纯净铁。天然气和焦炭与氧气反应形成 CO_2 。

但已经设计了一种替代类型的熔炉，它燃烧氢燃料，以提供从铁矿石中去除氧气所需的热量和电子。由于钢是铁和碳的合金，生产过程中总是需要一些碳，但通过改用这种新设计，所需的总量和对石油产品的依赖可能会大大减少。Breunig说：“当我们观察钢铁生产产生的排放时，它们大部分来自于高温以及还原剂供给，将铁矿石转化为海绵铁，然后进行加工。因此，从使用焦炭产品的高炉到使用氢气和某种碳源的直接还原高炉——可能是生物炭，也可能是生物甲烷——你可以将温室气体排放量减少95%以上。”

伯克利实验室的Breunig和Fabian Rosner正在与科罗拉多州的国家可再生能源实验室合作，开发一种供应链工具，将氢动力熔炉与美国海上和陆上可再生能源电解产生的氢气连接起来。使用TEA和LCA，他们已经确定了工艺改进方向，这些改进将使这种绿色钢铁对买家来说更具成本竞争力，并且对氢气输送价格的波动不那么敏感。

本文中的研究由美国能源部科学办公室和能源效率与可再生能源办公室资助。



（素材来自：Lawrence Berkeley National Laboratory 全球氢能网、新能源网综合）

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/news/201153.html>