



在全球高度关注氢能经济的当下，中国应如何做出独特贡献？氢能供给体系和产业链将如何变革，能否满足清洁低碳、高效节能等多重目标？本刊日前采访了中国科学院院士、西安交通大学教授郭烈锦，他认为，氢电互补是未来能源体系变革的核心内容，但氢能作为二次能源不可能替代作为一次能源的化石能源。基于化石能源的清洁无污染制氢和可再生能源的低成本高效大规模制氢，将是我国乃至世界能源科技产业及其供给体系的重重大战略选择和终极目标。

## 低价低碳的氢源哪里来

——访中国科学院院士郭烈锦

文 / 本刊记者 王伟

## 氢能潜力仍被低估

《能源评论》：2019年以来，世界各国都在高度关注氢能发展，您如何看待氢能的重要性？

郭烈锦：在全球范围，氢能发展风起云涌。美国从2015年开始，把每年10月8日（氢的相对原子质量是1.008）定为全国氢能与燃料电池日，意在提高国内公众对燃料电池和氢能技术的广泛关注。

氢能被视作21世纪最具潜力的二次能源，将成为未来能源的主体。迄今为止，有关氢能产业的各种预期，其实都远远低于它的未来潜力和前景。目前全球每年生产氢气近7000万吨，累计建设400座加氢站，投用超30万个固定燃料电池动力系统，部署超1.3万辆燃料电池汽车。据测算，能源体系变革成以氢为主体后，氢能及其相关产业链的产值将达到十数万亿至数十万亿元。

《能源评论》：从国家能源安全角度，其战略意义如何体现？

郭烈锦：中国面临着化石能源储量有限、油气资源短缺、供给安全堪忧的挑战，2018年石油对外依存度已经超过70%。2019年9月举行的国际氢能部长级会议呼吁全球联合起来，在10年内部署10万座加氢站、1000万辆氢动力汽车。氢能可能主导未来的国家能源供给安全，中国必须高度重视这一战略方向，快速构建坚实而强劲的基础设施与技术产业，并力争在这个新赛道上做出我们应有的独特贡献。

纵观人类发展的历史，每一次能源技术的创新和能源体系的转变，都必然带来重大的社会进步，这也是引领大国崛起和发展的重要标志。未来的能源供给体系将走向以氢为主体、氢电互补的新型能源产业和供给体系，它有别于今天的传统能源供给体系的突出特点就是可以很自然地达到清洁、低碳、安全、高效的多重目标协同，实现可持续发展。

氢能将成为未来能源的主体，迄今为止有关氢能产业的各种预期，其实都远远低于它的未来潜力。

《能源评论》：但现实的能源禀赋问题如何解决，二者之间究竟该如何走向更好的互补和耦合？

郭烈锦：对于中国而言，由于能源资源的禀赋是富煤缺油少气，要短期内实现快速的能源结构调整并不现实。因此，基于资源禀赋的特性，逐步合理地走向能源体系的变革，特别是能源供给体系的变革，从现在的高碳体系走向低碳甚至是无碳的能源体系，是顺应人类可持续发展的必然要求。

《能源评论》：在氢能产业链中，制氢是氢能新型产业链上最为重要的一环。您如何评价其产业价值？

郭烈锦：要实现以氢为主体、氢电互补的新型能源产业和供给体系的变革，就必须解决氢的来源问题，现在到了要高度关注这个问题的时候了。首先要澄清一些误解，当前社会上一些关于氢能将会在未来一次能源或终端能源的供给体系中占有多少比例的说法其实是有问题的，因为氢是一种二次能源，它不可能成为任何某种一次能源的替代物。我们应该把氢能放在客观科学的位置上：它是一种二次能源，可以与电作为互补、相互转化，但它不是一次能源，不可能替代化石能源，也不可能替代终端用能的终极目标要求。当人类将氢能作为社会能源供给体系中的一种主体能源来使用时，不是因为氢能替代了化石能源而实现了二氧化碳的减排，而是人类转化利用化石能源的技术方式和供给体系发生了根本性转变，使得化石能源



转化利用时产生的二氧化碳得到了低能耗的自然富集并资源化利用，实现低碳或无碳排放。这种能源体系的变革对于引领和带动新的氢能产业及其上下游产业链的形成和发展，甚至推动人类社会整个工业体系的变革，具有重大的意义和潜在的巨大价值。因此未来产业的产值当下实在是难以估价的。

## 氢源清洁经济为重

**《能源评论》：**您曾提出，要走有中国特色的制氢之路，怎么解决碳排放问题？

**郭烈锦：**基于中国能源的禀赋，我们必须走以化石能源的清洁无污染制氢和可再生能源的低成本高效大规模制氢的道路，这也是我国能源科技产业链及其供给体系的重重大战略选择和终极目标。

具体而言，煤制氢加上在制氢过程中的自然低成本碳捕集，应该是中国近中期发展的主要技术途径和方向，也是既立足现实，又与向氢能为主体、氢电互补的新一代能源供给体系的变革相结合，并紧密协调一致的方向。类似于当前国际上广泛宣传的CCS（碳捕获与封存）或CCUS（碳捕获、利用与封存）等传统高耗能的二氧化碳捕获思路和技术并不是中国所需要的，也解决不了我们现存的问题。低成本的可再生能源大规模制氢是未来可以把中国的能源供给体系推向完全清洁可持续发展的最终选择。

**《能源评论》：**您更看中制氢的经济性还是清洁性？

**郭烈锦：**二者同等重要。制氢道路千万条，对可再生能源制氢而言，能不能大规模、低成本、高效是我们也要关注的问题；对于化石能源制氢而言，它是不是清洁、低碳，是我们必须考虑的问题。因此，清洁、低碳和大规模、低成本、高效，这些限定词必须要加在制氢技术方案之上，才能对技术作出合适的判断。

中国已是世界第一制氢大国，2018年，氢气产量约2100万吨，但大量的氢是伴生在有大量二氧化碳及污染物排放的工业混合废气或传统气态环境下的化石燃料热解气化产品合成气之中（有人称其为“灰氢”），它不能直接当成氢能的产量。因此，在大力发展燃料电池产业的同时，现在就必须高度关注氢气的来源，清洁环保、经济可靠的氢气制备路径才能使整个产业链成为有源之水、有本之木。我们需要的是低能耗的、避免甚至消除了二氧化碳排放的由化石能源转化制取的氢气（有人称之为“蓝氢”）和由可再生能源低成本、高效、清洁方法制取的氢气（有人称之为“绿氢”）。

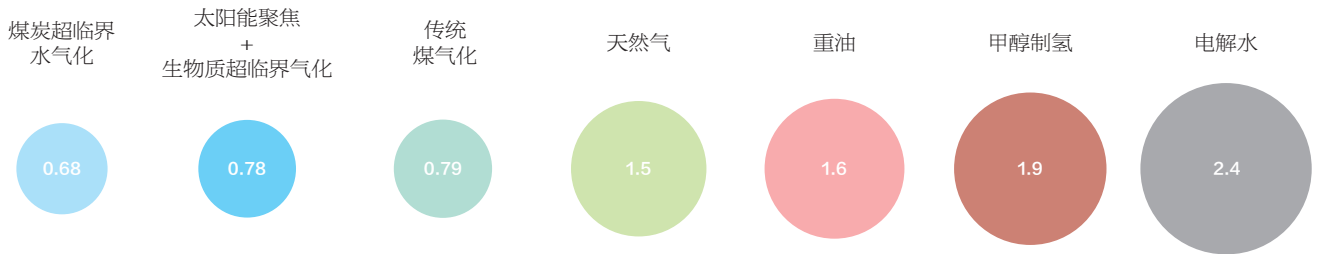
**《能源评论》：**这背后折射了什么样的理念转变？

**郭烈锦：**人类用能的历史一直是传承着“一把火烧”这样一个无序化程度很高的能量转化利用过程。自“工业革命”至今，起主宰作用的依然是以燃烧为主的燃料能源利用方式。也正是“一把火烧”+简单热力循环，导致了现在的高能耗、高污染、高碳排放局面。

要解决这个问题，必须从热力学和转化途径两方面进行深刻地思考。从热力学角度看，传统的燃煤发电靠单一提高参数和容量来提高效率，过程中只是匹配温度、压力等参数，而没有考虑能源转化利用涉及到的多方面的性质，包括载能物质的物质属性变化，能量的品位、质量和势位间的匹配，从物质转化来看走了一条先污染后治理的路子，忽略了在能源转化过程中的物质转化和能量转换之间的有机关联，因此造成严重污染，也带来能量品质的巨大损耗，也就是载能物质的做功能力被大幅度地无效损失了；而从载能方式上看，各载能子又是各自独立、互不耦合的。从科学与工程的角度看，能源转化和利用的过程既是物质转化、又是能量转换、还是载能子形式的变化，因此主动将这种物理变化和化学变化必然耦合的两种变化有

## 各种制氢成本对比

单位：元/标方



注：煤制氢按照2000d/t计算 &gt;&gt; 数据来源：采访对象提供

机关联起来，主动有意识地去优化设计其转化和利用的全过程，并使之无序化程度降低、朝更加有序化的终极目标逼近，是我们在能源转化和利用的过程进行设计和系统构建必须深刻思考和努力的方向。

《能源评论》：您认为应该从哪里突破创新？

郭烈锦：从能源转化利用的角度来说，就是要主动地思考能源转化的物质流、能量流的全流程匹配耦合和过程、系统、体系构建的有序化，达到清洁无污染、高效节能，总体讲就是要实现能源有序转化。这就要求我们实现从传统的“热流体热动能势的单一匹配、载能子的独立使用和简单的热力循环”的模式，转化成“载能物质的多种物理能和化学能的能势的整体匹配（比如光、热、化学能势的整体匹配和梯级利用）、光声热耦合的多种载能形式互补、以及物质循环和热力循环同步加载的模式。这种将物质转化和能量转化有机关联，去构建完全洁净、可持续发展的产品链，可以简称为碳氢循环过程。最终实现清洁、低碳、高效、低成本、节水的多重目标，做到从源头控制污染物的生成和二氧化碳排放。

## 两轮驱动路线

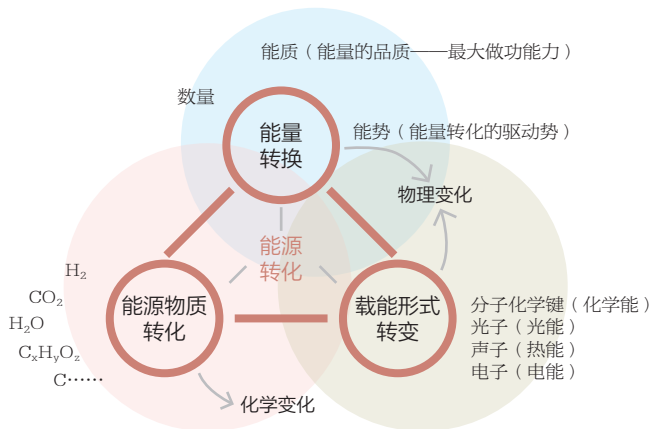
《能源评论》：在具体制氢技术路线和解决方案上，国内外有哪些领先的实践探索？

郭烈锦：在我国，在化石能源制氢领域一个最值得关注的方向是煤炭热化学气化制氢。传统的煤气化制氢是将煤炭部分氧化放热后加上水蒸气变换重整的过程，煤炭部分氧化放热与煤的燃烧产生的环境效果与产物等非常相近。这样的过程均可以概括为“以空气为基”，污染低效。我们提出“以水为基”，通过水-煤直接接触、吸热还原直接气化制氢的方法，达到清洁高效制氢的目标。经过20多年的努力，目前已经投入工程示范。通过对国内外20多种煤种以及各种农业废弃物、生活垃圾等进行系统的实验研究后，表明这一方法具有很好的适应性，对上述原料中的碳都可以实现完全气化，并达到最高的制氢效率。

与传统的煤气化制氢技术对比，这一技术的反应条件很温和，温度最高不超过700℃，一般的不锈钢就能满足这样的反应条件要求，而且它可以把煤制氢效率从传统煤气化的60%以下提高到80%，同时把耗水降到最低。



## 能源转化是制氢理论的核心



>> 资料来源：采访对象提供

《能源评论》：有没有更具有可持续性更清洁的新能源制氢方式，比如可再生能源制氢？

郭烈锦：那就是太阳能光热耦合制氢。当前的太阳能光催化制氢的效率还很低，报道的大规模制氢的全球最高效率也就是2%左右。其最主要的能量损失是高能谱光子的热化损失和低能谱光子的热损失。原因在于，传统方式只是单一地通过某一种方式，比如说热、或光、或电、或光

## Q&A

中国已是世界第一制氢大国，2018年，氢气产量约2100万吨，但大量的的是伴有大量二氧化碳排放的“灰氢”，我们需要的是避免二氧化碳排放的“蓝氢”和可再生能源制氢的“绿氢”。

催化的方式，而没有把它们耦合起来。因此，进一步降低成本的方法一定是要把太阳能的全光谱的能量使用起来，才能把效率提高。美国能源部和国际能源署提出，太阳能制氢效率如果能够达到10%，就完全可以和现在最便宜的制氢方法去竞争，进而实现商业化。

我们经过近20年的努力，在相关实验室研制出中试装置，采用了批量生产的无贵金属负载的催化剂，已经取得了直接太阳能到氢能能量转化效率从2%一步跳跃到6.6%的结果。这意味着这一技术已经接近产业化目标，未来有着很好的前景。

《能源评论》：在制氢路上，您认为终极目标和推进路线是什么？

郭烈锦：基于太阳能制氢，就是全光谱的光热的耦合利用，包括光化学、光热化学、光催化、光电化学在反应体系和材料上有机匹配和耦合，使得太阳能的转化效率不是单一的光催化效率、热催化效率，而是使得光催化、热催化、热化学甚至多个过程有机耦合起来，实现能势匹配、多子耦合，才有可能实现大的跨越。对于产物而言，基于“能源有序转化”理论的这个“以水为基”的结构体系，不仅仅可以制氢，还可以耦合产出多种产物，最终实现零碳排放、协同发展以及高效、清洁、低碳、低成本和节水多重目标同步发展、一体实现。

在推进路线方面，近中期要大力推进煤炭超临界水煤制氢的规模化应用，同时大力发展太阳能光热耦合制氢、太阳能聚焦供热的生物质超临界水制氢等可再生能源规模制氢技术；中远期，发展完全洁净的可再生能源的低成本高效制氢理论和技术，最终实现可再生能源的大规模低成本高效制氢，为氢能及其产业链的形成和发展奠定氢源基础，推动以氢能为主体的能源供给体系的快速高质量转变。■