

Views & Comments

对可再生氢发展前景的思考

Michael J. Brear^{a,b}^a Melbourne Energy Institute, University of Melbourne, Parkville, VIC 3010, Australia^b Department of Mechanical Engineering, University of Melbourne, Parkville, VIC 3010, Australia

在过去的两年左右时间里，澳大利亚[1–3]和全世界对氢作为一种能源越来越感兴趣。值得注意的是，这不是氢第一次引起我们的兴趣。最新的情况是在21世纪，全世界对氢的研究、开发和示范进行了大量投资。在此之前，20世纪70年代的石油危机也促进了对氢的大量投资。更早以前，还缺乏关于氢的文献。但是，氢能经济仍然只是一个概念。

如果确实有氢能经济，这会有什么不同？

这是我们大家都需要问的一个重要问题，笔者只能给出两个可能的答案。首先，自从最初有所关注以来，我们就迫切需要大幅减少温室气体（GHG）排放。其次，相比以前，现在可再生能源的可负担能力要高得多，在支持者最强有力的支持下，其在降低成本方面也一直超出预期。

尽管可再生能源成本的持续降低是非常有希望的，但实现大幅减少温室气体排放仍然是一个有难度的关键问题。此外，应对这一挑战需要对社会和经济带来尽可能少的不利影响。

在考虑氢可能起到什么作用时，我们首先应该仔细考虑全球能源系统的庞大的规模和复杂性，以及主要能源商品的常见价格。这些可以为氢能的发展提供各种观点。对于像澳大利亚这样人口较少的温带国家，在以能源为基础的前提下，国内天然气和运输燃料市场比电力市场更大[4]：

- 电力：消耗 $\approx 9 \times 10^{17} \text{ J} \cdot \text{a}^{-1}$ ，常见批发价=60 AUD·

$\text{MW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ；

- 天然气：消耗 $\approx 1.5 \times 10^{18} \text{ J} \cdot \text{a}^{-1}$ ，常见批发价 $\approx 8 \text{ AUD} \cdot \text{GJ}^{-1} \approx 29 \text{ AUD} \cdot \text{MW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ；
- 汽油、柴油和煤油：消耗 $\approx 2.3 \times 10^{18} \text{ J} \cdot \text{a}^{-1}$ ，常见批发价 $\approx 30 \text{ AUD} \cdot \text{GJ}^{-1} \approx 108 \text{ AUD} \cdot \text{MW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

毫不奇怪，寒冷国家的天然气市场通常大于电力市场。但是，这种比较表明，运输燃料的价格相对较高，用氢代替的前景更为广阔，在减排上其规模可与电力部门相提并论。

(1) 制氢途径

如今，氢气主要通过改造天然气制得，煤炭气化和技术和电解技术被认为是最有前景的替代方式。值得注意的是，天然气和煤炭技术路径都必须包括碳捕集与封存（CCS）技术以减少排放，这增加了清洁制氢的成本[2]。

然而，最近的许多研发都集中在使用可再生能源来给电解器提供能量。碱性和高分子电解质膜（PEM）技术是最常用的技术，两者都有一些领先的制造商（如参考文献[5,6]），并且通过上述文献可以清晰理解它们的优缺点。

(2) 电价和资产利用的重要性

不管是否考虑碱性电解或PEM电解，图1均显示电价和电解槽利用率是决定可再生氢生产成本的主要因素。如附录A中给出的定义所述，如果没有补贴，可再生能源要与液体燃料竞争，就需要比当前的可再生能源便宜，并能提供高利用率的电解器。

向电解器供应间歇性可再生电力是另一个难题，因为图1显示，电解器需要以高容量系数运行才能实现最经济的性能。这可以通过多种方式来解决，最常见的是采用足够稳固的电力供应，例如，通过综合运用可再生能源以及综合运用水能、核能或化石发电中的几种来实现。值得注意的是，通过化石能源生产的稳固性电力供应会增加氢气生产中的温室气体，如果不加注意，这会破坏电解制氢的温室气体效益。

要使电解器容量系数高而又不依赖于固化的另一种方法是，相对于供应电解器的可再生能源而言，减小电解器的尺寸。如图2所示，容量远小于可再生能源供应的电解槽的容量系数趋于100%，而容量与可再生能源相同的电解器，具有与供应可再生能源的电解槽相同的容量系数。尽管非常高的容量系数似乎很有吸引力，但小型电解槽几乎不产生氢气。鉴于我们的电力和运输燃料系统的规模相似，因此我们可以选择生产相似数量的两者，如图2 (b) 中的黄色方框所示。

(3) 系统集成和其他注意事项

仍有许多尚未讨论的因素，其影响可再生制氢的经

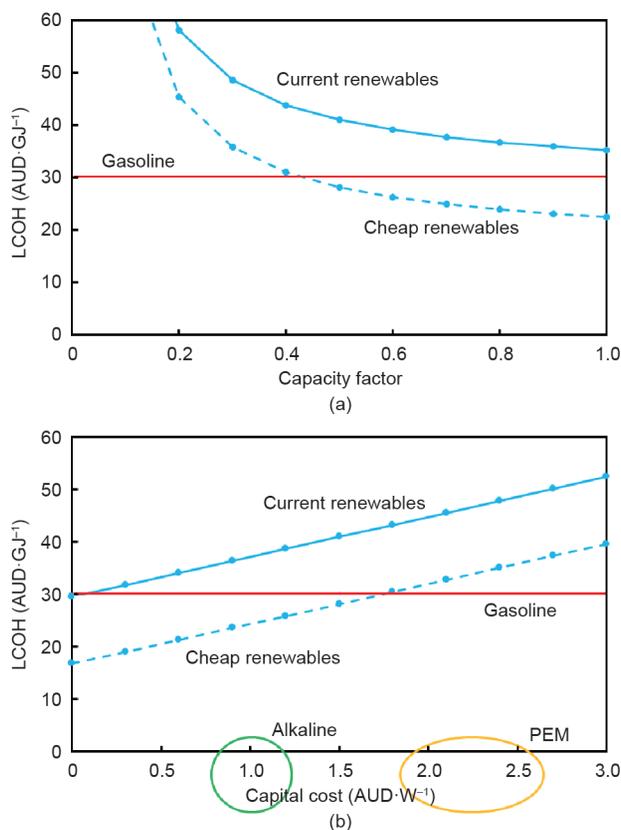


图1. 氢气的平均成本 (LCOH) 与碱性电解器的容量因子 (a) 和容量因子为75%的成本以及近似的碱性和PEM成本 (b)。

济性。这些因素包括：

- 在大规模的电力市场中由电解器提供辅助和需求响应服务，这往往使PEM优于碱性技术；
- 大型电解器的投资成本和效率将在未来十年内如何变化；
- 所有捆绑的电费，特别是网络费和成本的影响。

尽管这些因素很重要，但它们没有对本文介绍的基础经济产生显著的影响。可再生能源的价格对通过电解制得可再生氢能的前景至关重要。

(4) 结语

在未来约10年中，可再生能源生产氢气具有可观的商业前景，尤其是在脱碳运输方面。如果可再生能源价格继续下降，即使没有补贴，与传统液体燃料相比，可再生氢在成本方面仍具有很强的竞争力。在这种情况下，以能源为基础的氢生产可以与现存的可再生电力相提并论。鉴于这两个市场的规模，成本是对二者进行选择时一个重要的考虑因素。

但是，很难看到可再生氢将如何与目前至少便宜3

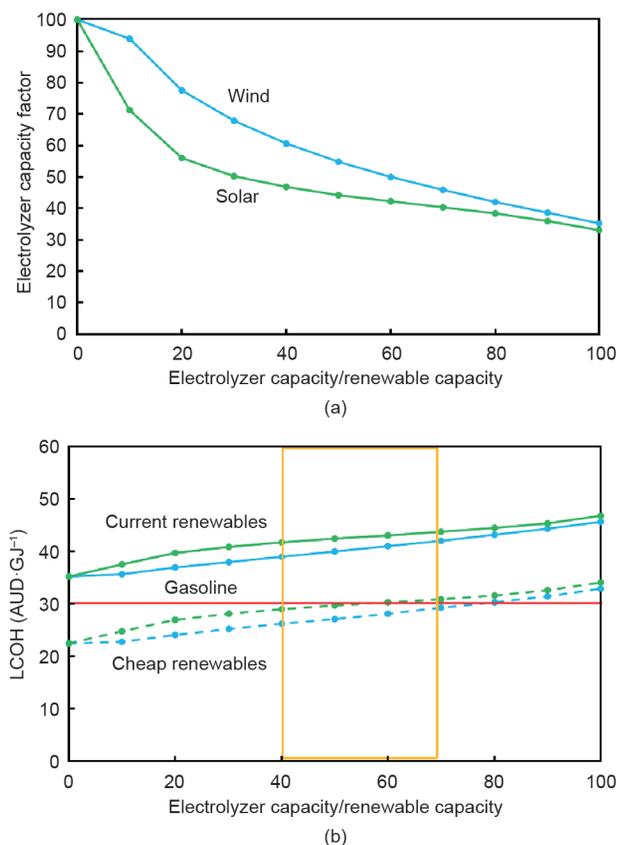


图2. 碱性电解器的容量因子 (a) 和碱性电解槽与提供可再生能源的发电机之间的LCOH (b)。发电数据来自澳大利亚国家电力市场中两个正在运营的风力和太阳能发电厂。

倍的天然气竞争。要使可再生氢的价格与化石天然气具有竞争力，需要每吨数百美元的有效碳价格[7]，而且在我们的经济中还有许多其他更具成本效益的减排方式。反过来，这表明，正如其他研究者所指出的那样[2,7]，由天然气或煤炭以及CCS产生的氢气可能在一段时间内具有明显的竞争优势。因此，坚持仅使用可再生能源很可能会减少实现氢能经济的机会。我们需要为国内和出口的氢气市场建立整个供应链。从过去约100年的电力能源、天然气和液体燃料能源的发展中可知，这将是一项持续数十年的与社会相关的基础设施监管任务。

如果这真的实现的话，那么将拥有以下非常富有吸引力的前景：

- 千兆瓦级的风能和（或）太阳能发电场，与亚千兆瓦级的电解器相连；
- 电解器为电力系统的安全性和可靠性提供辅助服务；
- 电解器还可以出售氧气，将其作为工业原料获得额外收入。

然后，公共汽车、卡车、火车和轮船可以使用在CCS或其产品中产生的可再生氢或化石氢运行。同时，混合动力或全电动轻型车辆可以提供清洁的私人出行工具，而氢能可以为工业和非电气供暖以及为清洁的电力系统提供支持。

Acknowledgements

I am grateful to the owners of a solar and a wind farm of Australia's National Electricity Market for supporting the data which are used for generating Fig. 2.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.09.008>.

References

- [1] Council of Australian Governments Energy Council Hydrogen Working Group. Australia's national hydrogen strategy. Canberra: Council of Australian Governments Energy Council; 2019 Nov 22.
- [2] Bruce S, Temminghoff M, Hayward J, Schmidt E, Munnings C, Palfreyman D, et al. The National Hydrogen Roadmap provides a blueprint for the development of a hydrogen industry in Australia [Internet]. Canberra: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation; c2018 [cited 2020 Apr 3]. Available from: [https://www.csiro.au/en/Do-business/Futures/ Reports/ Hydrogen-Roadmap](https://www.csiro.au/en/Do-business/Futures/Reports/Hydrogen-Roadmap).
- [3] Future fuels [Internet]. Future Fuels Cooperative Research Centre; c2020 [cited 2020 Apr 3]. Available from: <https://www.futurefuelscrc.com/>.
- [4] Australian energy update 2019. Canberra: Australian Energy Statistics; 2019 Sep.
- [5] Hydrogen solutions [Internet]. Washington, DC: Siemens Energy; [cited 2020 Apr 3]. Available from: [https://new.siemens.com/global/en/products/energy/ renewable-energy/hydrogen-solutions.html](https://new.siemens.com/global/en/products/energy/renewable-energy/hydrogen-solutions.html).
- [6] Nel hydrogen [Internet]. Oslo: Nel ASA; c2020 [cited 2020 Apr 3]. Available from: <https://nelhydrogen.com/>.
- [7] The Hydrogen Energy Supply Chain [Internet]. Hydrogen Engineering Australia; [cited 2020 Apr 3]. Available from: <https://hydrogenenergysupplychain.com/>.