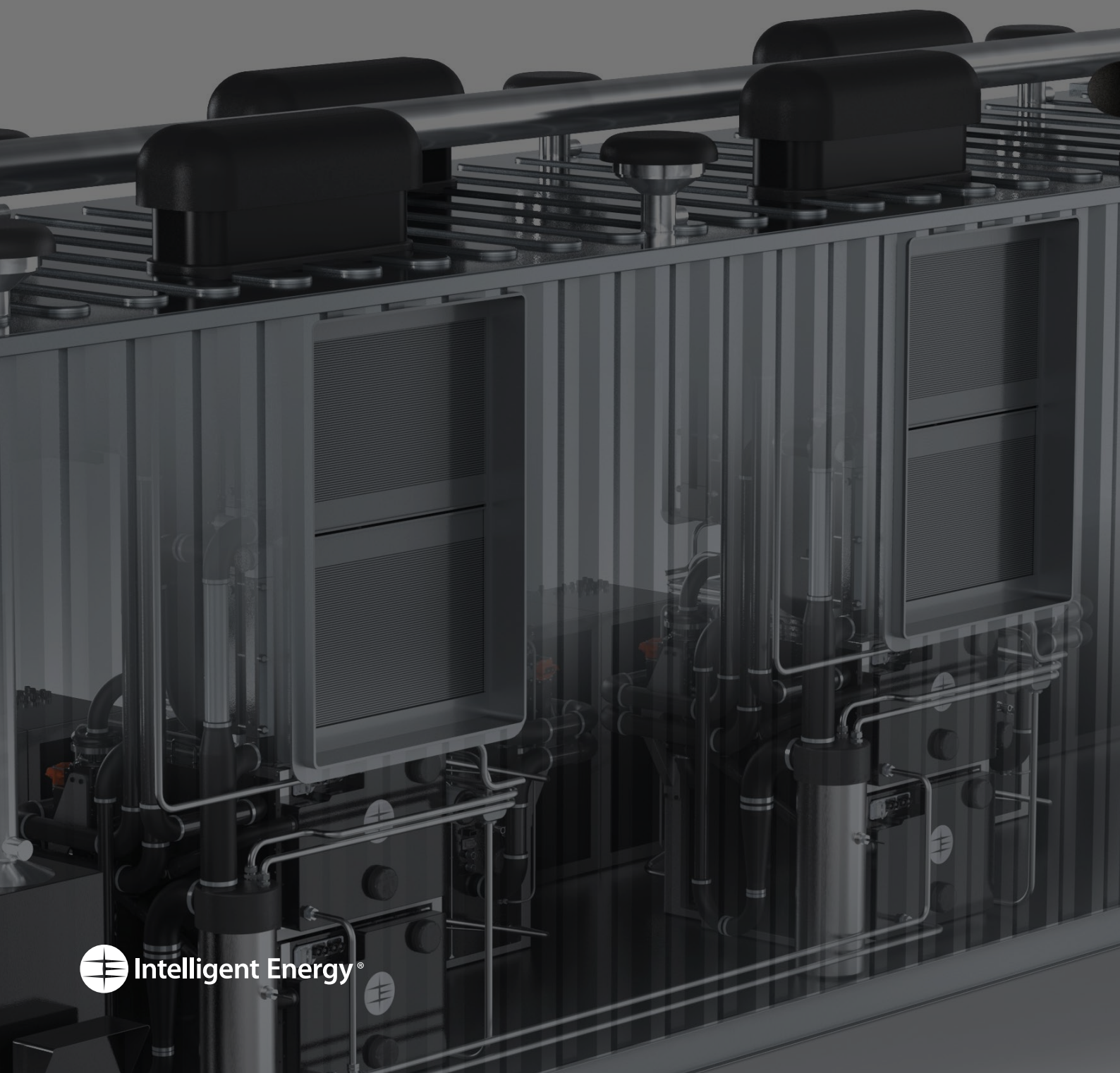




采用新型热管理技术，最大限度提高氢
燃料电池在固定式应用场景中的效率





1. 摘要

本白皮书详细介绍了固定式电源应用场景使用燃料电池（尤其是英泰力能蒸发冷却结构燃料电池）的益处，并着重强调热电联产（CHP）系统废热利用所带来的潜在热效益。

本白皮书根据《燃料电池系统说明》¹和《蒸发冷却式质子交换膜燃料电池堆的温度调节》²详细介绍的干燥空气压缩、热力学和电化学方程式采用 MATLAB Simulink 进行数据分析。

对于上述计算，另有从英泰力能的代表性燃料电池堆技术测得的偏振数据以及从代表性燃料电池系统 IE-DRIVE™ HD100 测得的压降数据对其进行补充。

所有效率计算均采用氢气的低位发热量，即 33.3 千瓦时/公斤。

作者

Chris Dudfield 博士（首席技术官）

Chris Morrow（IE-DRIVE 系列产品开发主管）

Emily Foster（营销经理）

¹ Dicks, A.L. 和 Rand, D.A.J. (2018) 《燃料电池系统说明》，第 3 版，Wiley, ISBN 978-1118613528

² Fly, A. 和 Thring, R.H. (2015 年) 《蒸发冷却式质子交换膜燃料电池堆的温度调节》，《国际氢能杂志》第 40 卷，第 35 期，第 11976-11982 页

2. 燃料电池简介

氢燃料电池的作用是通过氢与氧之间的电化学反应将化学能转化成电能。这一过程唯有的副产品是水蒸气和废热。

氢燃料电池能在使用点提供零碳排放的电源，可被用作传统内燃机和电池技术的替代电源，适合汽车、航空航天、固定式电源、轨道交通、航海和物料搬运等各行业应用场景。目前市场上存在多种燃料电池技术，各行业和应用场景基于对质量、工作温度、功率密度或燃料灵活性的要求采用性能特征匹配的燃料电池。

	质子交换膜	固体氧化物	碱性	磷酸
电解液	聚合物膜	陶瓷	氢氧化钾	磷酸
阳极催化剂	Pt	Ni + YSZ (陶瓷)	Ni、Pt、Pd	Pt
阴极催化剂	Pt	LSM (陶瓷)	Pt、Pd、Ag、MnO ₂	Pt
典型燃料	氢气	天然气、乙醇、沼气	氢气、氨气	氢气、甲醇
典型工作温度	50-100°C	500-1000°C	40-75°C	150-200°C
电池效率	50-60%	60%	60-70%	40-50%
典型应用功率	1W至+1MW	10W至+1MW	500W至 +200kW	100W至+400kW
电池功率密度 / Wcm ⁻²	2	1	1	0.3
优点	启动快速 瞬态响应 小巧 轻量	燃料灵活性高 效率高	启动快速 效率高 成本低 工作温度低	工作稳定 技术成熟 结构简单 杂质容忍度高
限制条件	氢气纯度 湿度敏感性 催化剂费用	启动时间 瞬态响应 原材料昂贵	体积相对较大 CO ₂ 敏感性 液态电解质管理	功率密度 液体与蒸汽具有腐蚀性 催化剂费用
应用场景	汽车 航空航天 无人机 物料搬运设备) 便携式电源 固定式电源	固定式电源 航海 热电联产系统	军事 固定式电源	固定式电源 热电联产系统

表1 燃料电池对比

与其他燃料电池技术相比，质子交换膜（PEM）燃料电池的重量和体积功率密度较高，且启动更快，用户负载响应时间短。这些优势在广泛的应用场景中均可充分发挥。值得强调的是，因具备上述基本特性，质子交换膜燃料电池已在汽车行业中得以应用，且技术落地进展顺利。对于固定式电源应用，燃料电池不仅提供可靠、清洁的电源，而且还可以消除对现有电网的依赖，因此可以在许多应用场景中用作可持续的微电网。这种技术的高功率密度和可扩展性使用户能够在达到兆瓦级的同时，不像其他替代方案一般受到空间限制。

3. 燃料电池在固定式电源中的应用

热电联产系统结构允许捕获、利用发电反应的副产品——热电。这种热量的利用使得热电联产系统成为一种更高效的系统配置选择。

微电网是能源独立的系统，可由一种或多种分布式能源配置而成。通常，这些微电网系统可与太阳能、风能等可再生能源相结合，再加上适当的储能技术，例如电池或氢气或这两种技术，从而成为特定半径范围内用户的可持续绿色发电枢纽。

由于独立于电网运行，微电网既可支持远程应用场景，又适用于需要恒定功率且无间歇性风险（即高可用性）的情况，同时具有加强、平衡电网供电等优点，如图 1 所示。

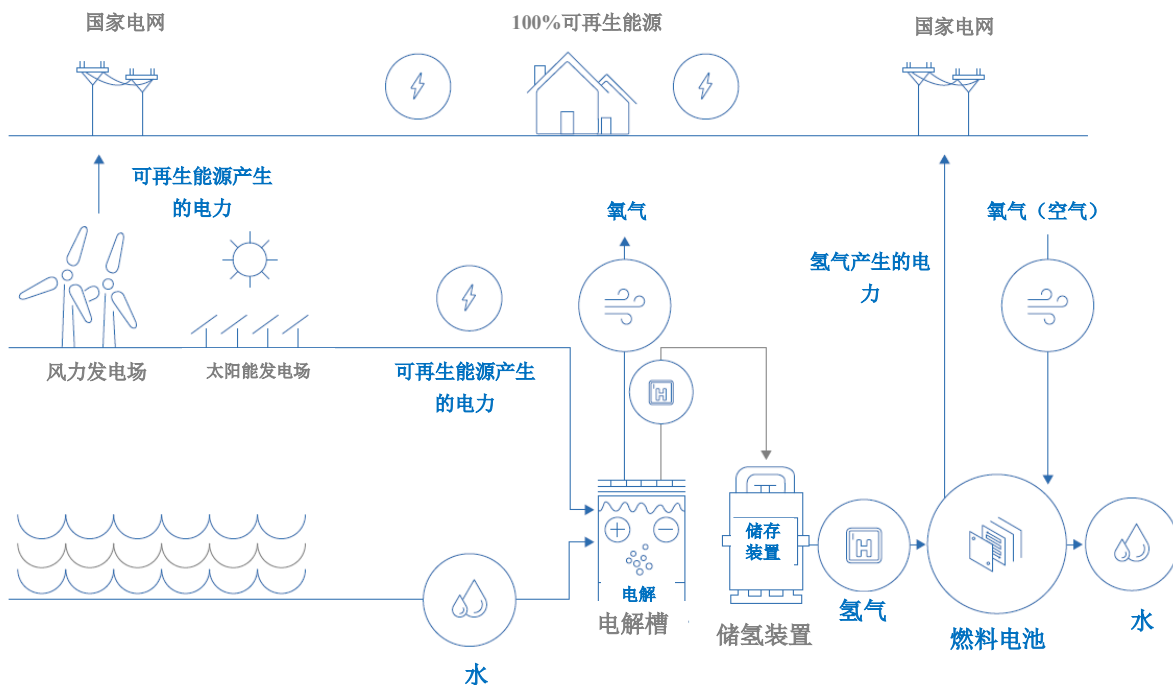


图1 典型的微电网

随着质子交换膜（PEM）燃料电池成为汽车行业首选的燃料电池技术，大幅降低生产成本和规模制造的机会赫然涌现。例如，加州燃料电池合作伙伴联盟提出 2030³年实现 100 万辆燃料电池电动汽车产量的目标，这表明乘用车市场将成为主要的上量契机。基础设施需要不断改进，以支撑不断增加的产量，相关的制造流程也会对成本和质量产生积极影响。

³加州空气资源委员会， https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2019-07/AB8_report_2019_Final.pdf

因此，质子交换膜（PEM）技术的成本会降低，从而满足固定式电源等其他应用的成本目标。美国能源部⁴和英国先进推进中心⁵发布的最新质子交换膜（PEM）燃料电池系统成本目标分别为 2030 年和 2035 年的 80 美元/千瓦。

预计，降本目标还可以通过实施国家补贴和补助机制推动供应链进一步增长和批量生产来实现。例如，美国能源部通过区域清洁氢中心资助计划（H2Hubs）提供高达 70 亿美元的公共资金⁶，这一举措旨在在美国各地建立七个区域清洁氢中心，以形成国家清洁氢网络的基础，为各经济部门的脱碳做出重大贡献。这些中心旨在落实制造业和基础设施，鼓励规模经济的发展。

美国《通胀削减法案》（IRA）也支持降低氢气生产成本，因为这显然是燃料电池技术规模化和部署的关键因素。

氢的成本是固定式电源应用总拥有成本（TCO）的主要影响因素之一。随着生产成本的降低，每公斤氢的成本预计将随着时间的推移而下降，首要原因是主要生产工艺从蒸汽甲烷重整转向低成本可再生能源电解。

2021 年，可再生能源中氢气的成本约为 5 美元/公斤⁷。国际清洁交通委员会（ICCT）估计，到 2030 年⁸，该成本在美国将降至 3.5 美元/公斤。

普华永道预计，到 2050 年，中东、非洲、俄罗斯、中国、美国和澳大利亚部分地区的绿氢生产成本将在 1 美元至 1.62 美元/公斤之间⁹。

面向消费者的价格还将包括压缩、运输和分配，在生产成本的基础上有较大幅度的加价。

4 美国能源部，《国家清洁氢能战略和路线图》（2023 年）

5 英国先进推进中心，《2020 年燃料电池路线图》（2021 年）

6 美国能源部，<https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-7-billion-americas-first-clean-hydrogen-hubs-driving>

7 美国能源部，<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>

8 国际清洁交通委员会 <https://theicct.org/the-price-of-green-hydrogen-estimate-future-production-costs-may24/#:~:text=The%20ICCT's%20central%20estimates%20of,compared%20with%20other%20published%20values>

9 普华永道，<https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html>

4. 燃料

电池热管理

燃料电池提供的电力还需要耗散热能。输出电力越高，意味着需要耗散的热能越多。由于燃料电池技术和应用场景不同，燃料电池系统的冷却要求和配置也不同。根据应用和辅助系统（BOP）要求，质子交换膜（PEM）燃料电池有三种不同的热管理方法：

- 空气冷却
- 液体冷却
- 蒸发冷却

空冷式燃料电池的相关系统最为简单，其中在阴极处为氧化剂提供的空气也是去除反应所产生热量的机制。此类系统往往在千瓦以下到 20kW 的区域正常运行。除此之外，空气流量要求变得更加苛刻，尤其是在封装限制成为主要要求的情况下。

由于冷却剂工艺的性质，液冷式和蒸发冷却式系统的结构比空冷式燃料电池复杂得多，致使其辅助系统（质量、体积、成本）与净电力输出不成比例，从而阻碍了它们在低功率场景中的应用。但是，它们非常适合 20kW 以上的功率输出。

得益于阴极的设计同时能接受空气和水，这种技术可以利用更高的电堆功率密度和许多热管理的优点，通常需要略微提高空气压缩机的负载，以增加所需压力比，并确保整个系统效率降幅不超过 2%。

值得注意的是，为生成液冷式燃料电池相关的数值，本白皮书作了一些相关假设，主要是使用一致的电堆极化数据，以便能够对整个系统性能进行类似的比较。

然而，由于蒸发冷却式燃料电池的电堆不需要专用的板间冷却通道或加湿器，功率密度的增加以及与换热器相比尺寸明显缩小的冷凝器抵消了效率的不足，从而大大提高 IE-DRIVE 和 IE-GRID 系统的实际可用性。

5. 蒸发冷却式燃料电池技术

蒸发冷却技术是将水直接注入每个有源燃料电池。随着这些水的蒸发，电化学反应产生的热能在水相变过程中被吸收。蒸发的水以及缺氧反应物空气从电池阴极排出。

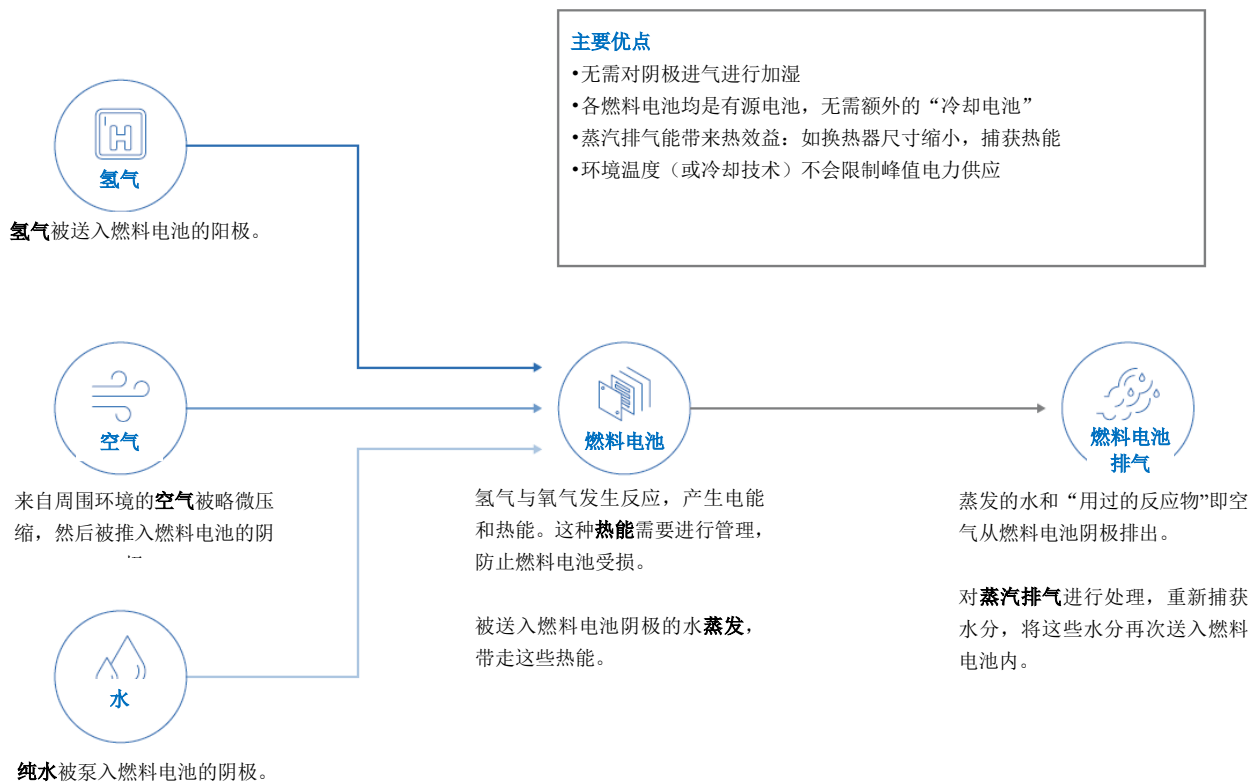


图2 蒸发冷却式燃料电池

由于蒸发冷却式燃料电池采用的电池冷却机制，使用这款燃料电池所需要的电厂辅助设备可能比配合传统液冷（LC）燃料电池使用的设备更简单；其简化示意图如图3所示。蒸发冷却式燃料电池系统的核心流控元件可以概括为：

- **蒸发冷却式燃料电池堆**：系统的核心，将化学能转化为电能和热能
- **空气压缩机**：为燃料电池堆的阴极提供用作反应氧化剂的空气

- **氢气调节装置：**为燃料电池堆的阳极提供氢气燃料
- **水箱和水泵：**用于储水的缓冲水箱、向燃料电池堆供水并实现蒸发冷却的泵
- **冷凝器和水分离器：**将阴极排气中蒸汽重新冷凝至液体状态的换热器，以及收集液体并将其返还至水箱、以便为燃料电池进一步供水的水分离器。

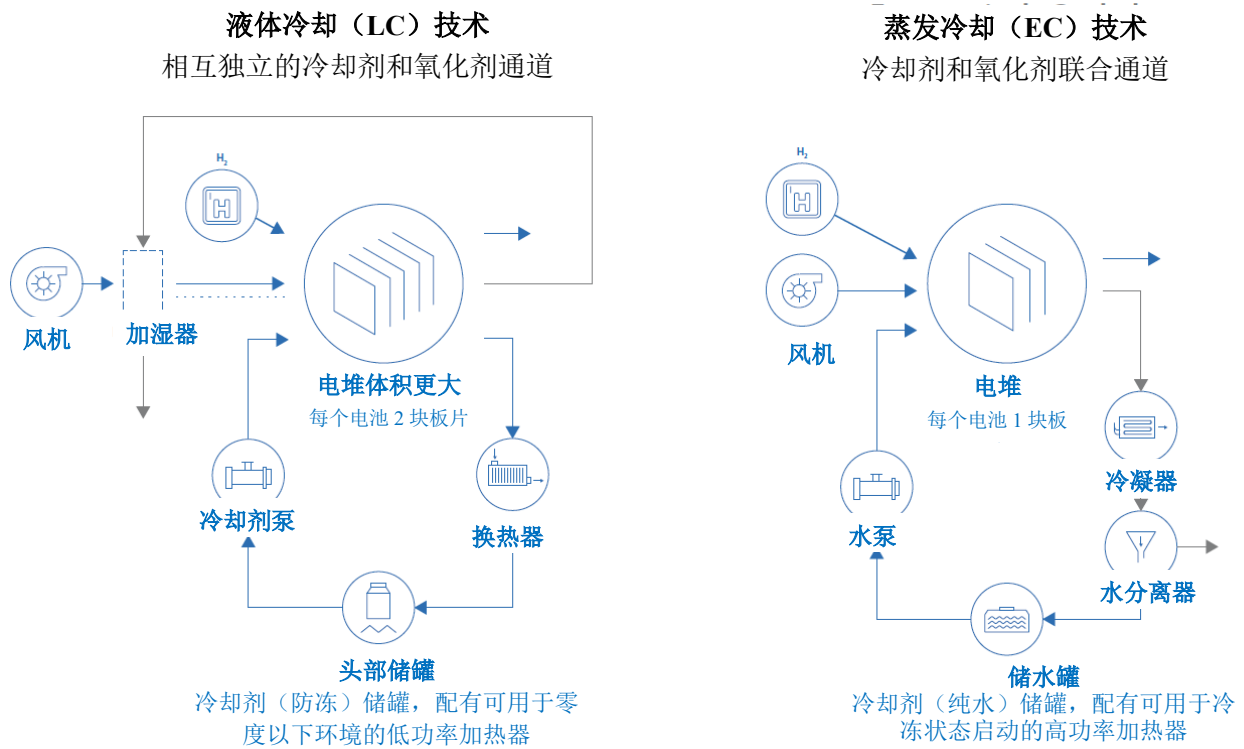


图3 蒸发冷却式和液体冷却式燃料电池技术的对比

图 4 是 IE-GRID 标准系统架构的基本架构布局，图形重点是阴极流控元件（空气与水）。附录 1 是主要系统组件术语表，仅供参考。

这种标准配置采用 IE-DRIVE HD100 系统，突出显示的数字表示：

- 耗电量，即寄生损失，用负数表示（红色标注）
- 发电量，用正数表示（绿色标注）
- 产生的热能（琥珀色标注）

为与替代配置进行比较，模拟已设置为满足建模的 100kW 净电力输出。

图 4 所示标准系统中，燃料电池堆产生 117kW 总输出功率，为压缩机（消耗 14kW）和冷凝式换热器风扇（消耗 3kW）供电，从而产生 100kW 的净电力输出。

燃料电池还产生 101kW 的热能，其中 77kW 需要被耗散，以将所需量的蒸汽冷凝成液体，而这些液体会被送回燃料电池堆内，以确保连续运行而不会导致电池过热，剩余 24kW 的热能将从排气口排出。随之产生的系统效率为 46%，这是用系统有效输出功率除以耗氢量简单计算得出的数值。

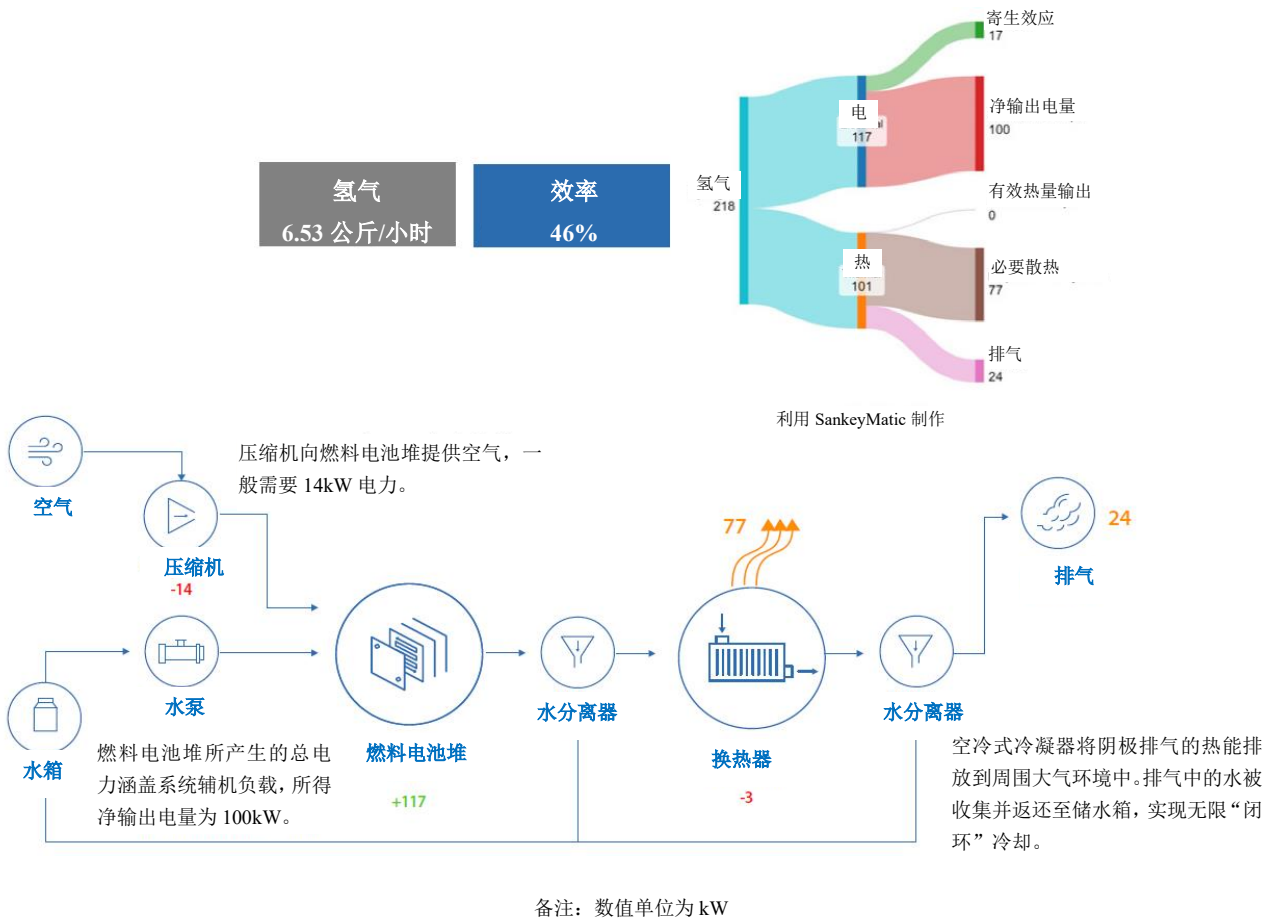


图4 IE-GRID 标准版 (100kW)



与蒸发冷却式燃料电池设计相关的优点包括：

- 各个燃料电池均是通过注入液态水实现完全加湿，无需外装大型加湿器或采用更复杂的电池组件设计来实现电池间加湿。
- 拆除“冷却电池”，即可提高整个燃料电池堆的功率密度（以千瓦/公斤和千瓦/升为单位）。各个电池均参与发电，所有极板均是真正的双极板。
- 在同等额定功率下，冷凝式换热器正面面积比传统液冷系统的正面面积小 27%¹⁰。
- 由于热惯性较低，并且直接注水可以更好地实现即时动态补水，因此，瞬态负载下的耐久性更佳。

本文件将进一步探讨蒸发冷却结构的两个独有优势：

- 不受环境温度影响
- 提供更高品级的热量

英泰力能的蒸发冷却技术拥有 400 项专利。

¹⁰ Fly, A. 和 Thring, R.H. (2016 年) 《燃料电池车蒸发冷却和液体冷却方法的比较》，《国际氢能杂志》第 41 卷，第 32 期，第 14217-14229 页

6. 不受环境温度影响

传统液冷式燃料电池利用液体冷却剂（如乙二醇）的再循环去除电化学反应所产生的热能。冷却剂重新进入燃料电池之前，需被冷却至适宜温度，否则会对燃料电池的可用电力造成限制。

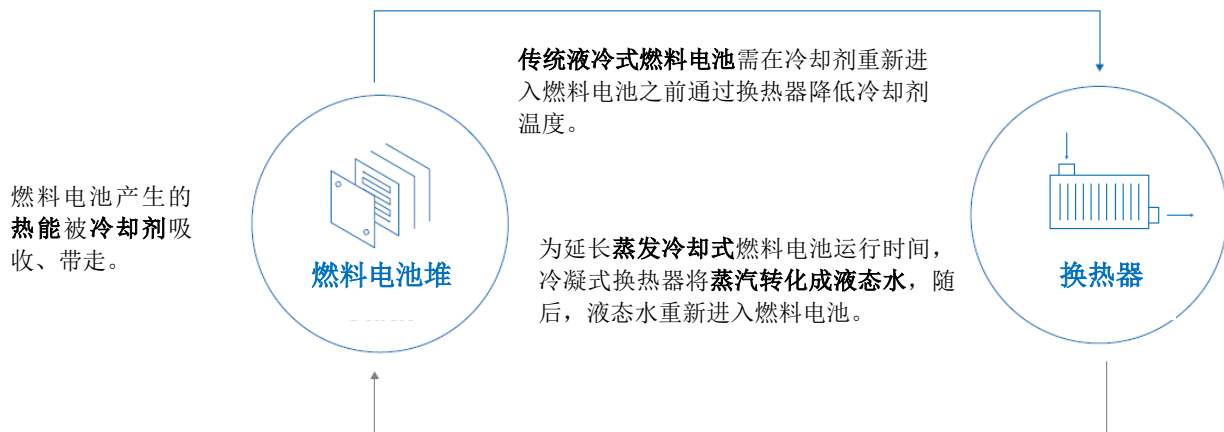


图5 燃料电池管理回路

蒸发冷却式燃料电池只要求水冷却剂在任何温度下都是液体（即不是蒸汽），这使得燃料电池的可用电力输出不受冷却剂温度影响。对于汽车应用，蒸发冷却式燃料电池所获得的峰值电力远高于标准运行功率或者“额定”功率。此外，对于固定式电源应用，可以完全拆除换热器，仅需引入少量“补充”水流。

拆除换热器

如前所述，只要以所需流速向燃料电池供水，排气中的热能便可以从燃料电池堆和系统中消散，因此，可以将换热器从燃料电池系统回路中移除。为此，必须向燃料电池系统提供一定量的水进行冷却，如图 2 所示，例如，对于 100kW 的净电力输出，水流速约为 125 公斤/小时（2 升/分钟）。

形式最简单的冷凝式换热器采用风冷设计，这种设计运行原理简单，通过向换热器（低温侧）供应空气，吸收燃料电池排气（高温侧）中的热量。因此，空气（环境）温度对换热器的性能起着主要作用；消除对这种换热器的需求，便可以不受环境温度影响。

消除燃料电池对换热器的依赖，能够带来不受环境影响的好处，同时也使系统效率显著提高。为燃料电池反应提供空气的空气压缩机不再需要克服换热器对燃料电池阴极的背压限制。由于空气压缩机是燃料电池系统上为阴极反应提供氧气的最大寄生负载，因此，压缩机耗电量有任何减少，均会大大提高整个燃料电池系统的效率，并减少整个燃料电池系统的运行成本，因为其氢耗量降低。

此外，蒸发冷却式燃料电池会通过加热的空气和蒸汽来“排出”反应过程中所产生的各种热能，这一性质使能量回收变为可能，并可以通过涡轮膨胀机来实现，从而将压缩机的电力需求有效减少约 40%。

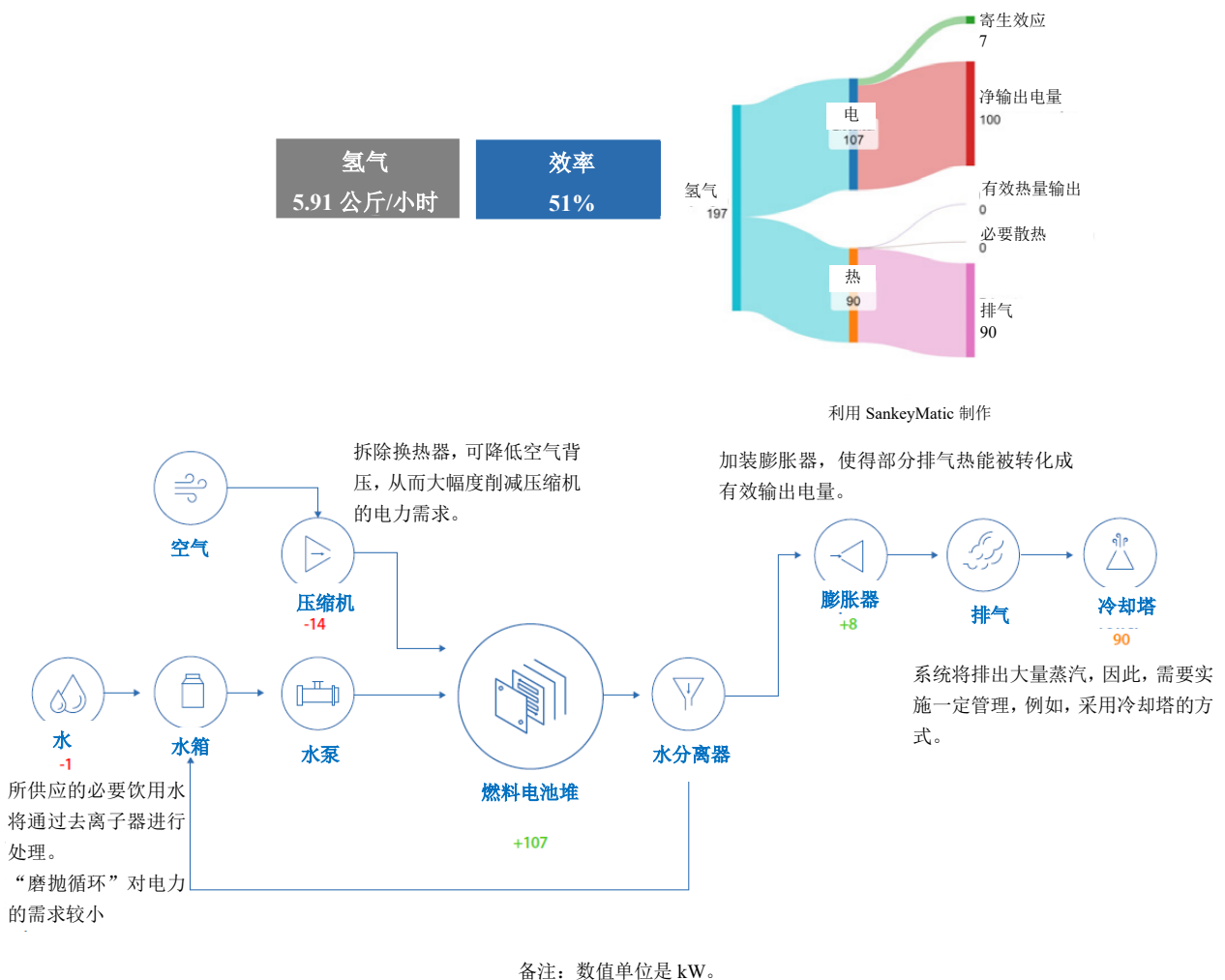


图6 不带冷凝器的IE-GRID (100kW)

7. 提供更高品级的热量

质子交换膜（PEM）燃料电池的电池温度通常为 75°C ($\pm 10^{\circ}\text{C}$)，使得反应产生的废热品级较低，这意味着由于低温差对工艺加热要求高，废热更难被有效地再利用。作为参考，从化石燃料燃烧中获得的高品级热量通常可以 $>400^{\circ}\text{C}$ 。为利用质子交换膜（PEM）燃料电池废热，必须提高温度以满足工艺热量需求。

提高电池温度的方法之一是增加阴极的背压。这种方法的限制包括对阴极空气压缩机压力需求的增加以及对燃料电池材料温度的考虑。压缩机用电需求的增加再次被涡轮膨胀机回收能量部分抵消。将废热用于工艺加热，目前被认为是额外的有效输出能量，因此显著提高整个系统的效率，如图 7 所示。

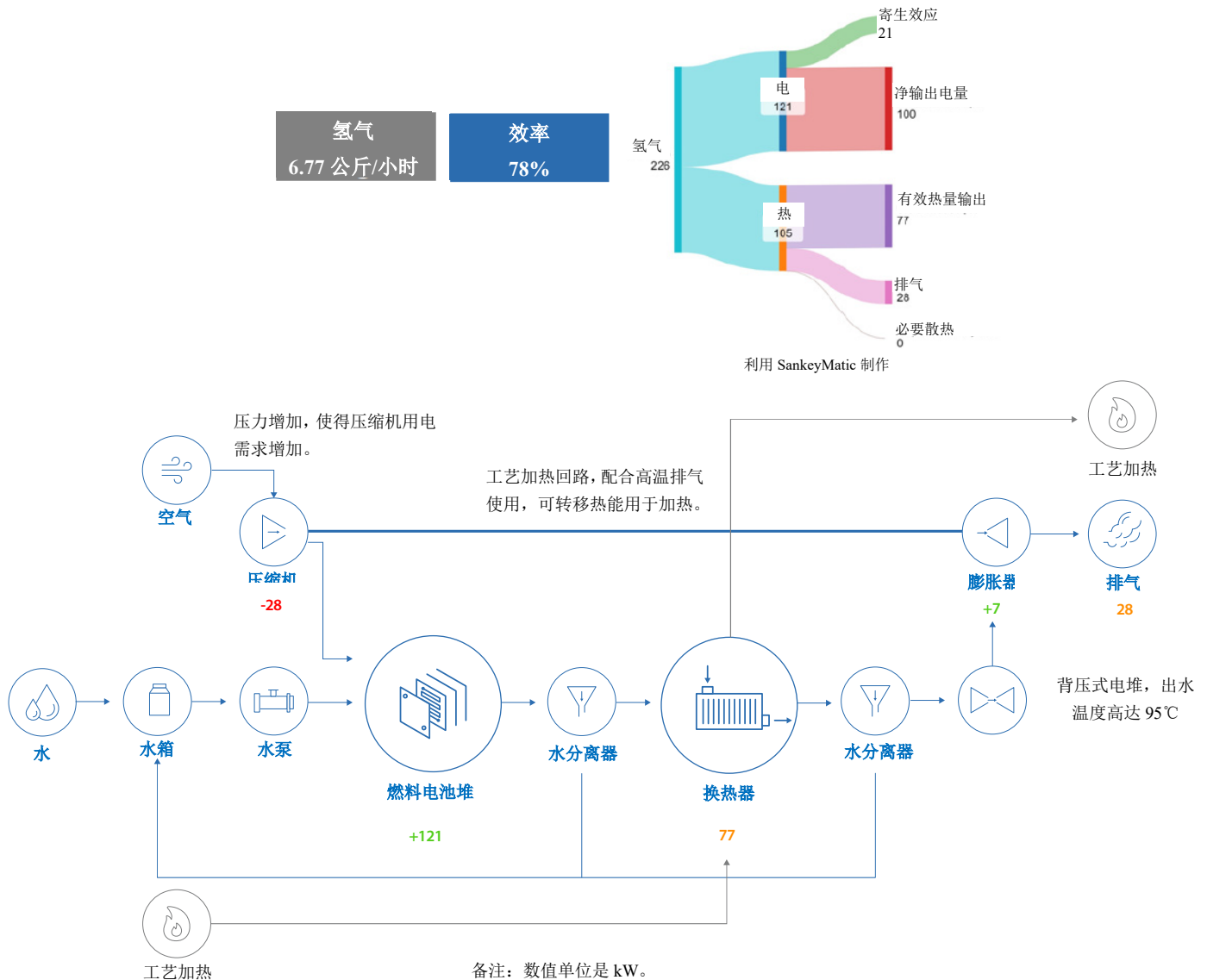


图 7 IE-GRID 阴极背压 (100kW)

由于蒸发冷却式燃料电池提高排气温度这一性质，所以第二种选项比较可行。排气中的蒸汽可以通过增加压缩级，在不影响电池温度或影响电池材料选择的情况下提高排气的温度。这使应用环境能够在 $\geq 100^{\circ}\text{C}$ 的可用温度下获得燃料电池反应产生的热能。如图 8 所示，换热器的高温侧温度较高，可以将大量能量转移到加热回路。

由于这是通过增加压缩级实现，因此，当寄生负载增加时，氢耗量也会增加。但是，当典型的“低效”热损失被回收时，整个系统的效率会提高。

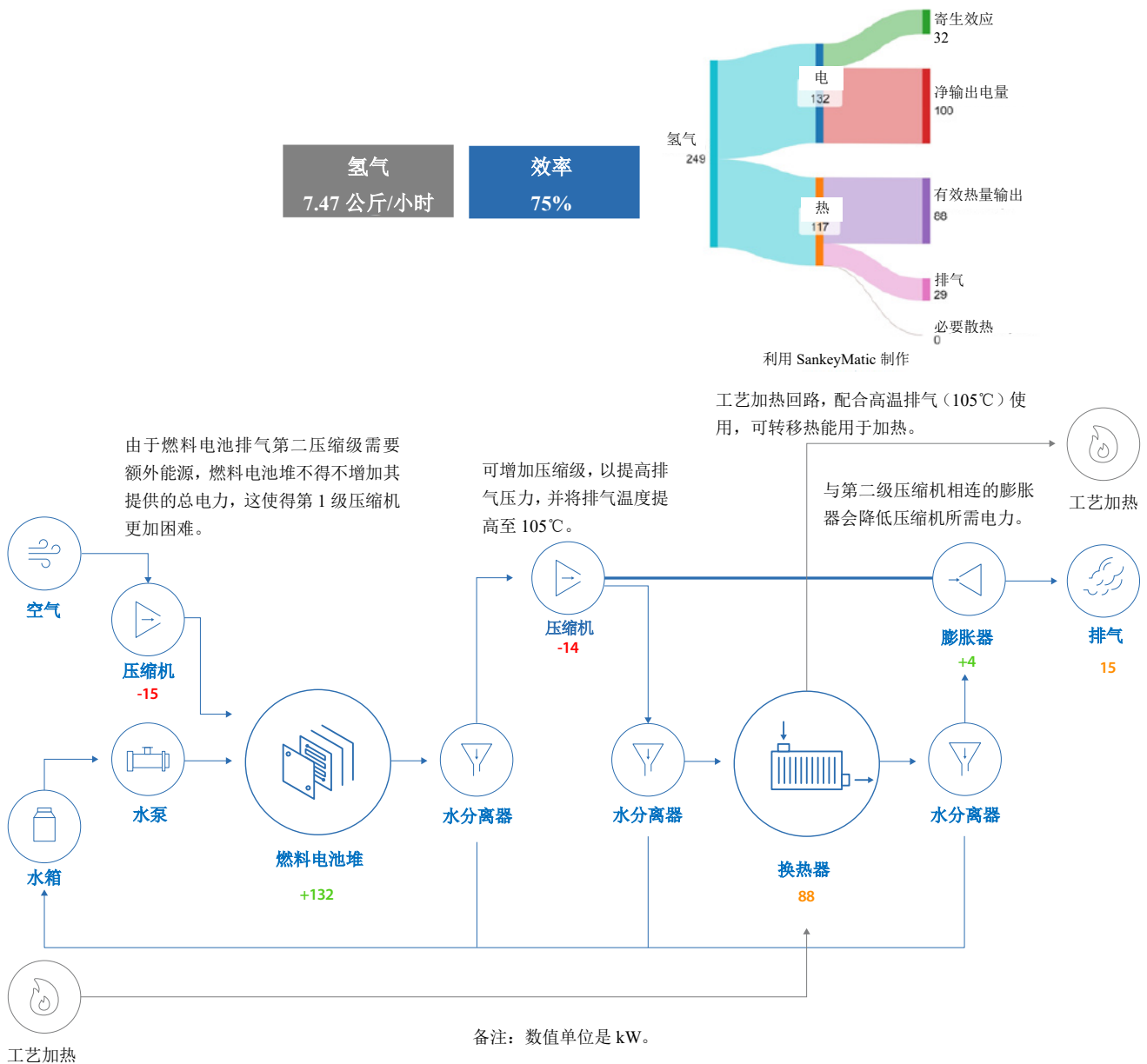


图 8 IE-GRID (排气压缩) (100kW)

8. IE-GRID的模块化组合

全球对基于装箱燃料电池的解决方案有着巨大的需求，主要包括备用电力系统、电网平衡和永久电源。美国已经安装超过 550MW 的固定式燃料电池，提供清洁、分布式电源¹¹。

燃料电池技术和英泰力能质子交换膜（PEM）燃料电池产品的一项关键优势是通过模块化设计实现可扩展性。尤其，IE-GRID™ 是以市场上现有 IE-DRIVE HD100 产品（图 9）为基础，将两个核心系统纳入一个合适的发电配置中，形成一个 200kW 的模组（图 10）。这使得英泰力能够按照需求为各行各业供应相匹配的电力，甚至高达兆瓦级的装箱解决方案，也可以在后面根据要求部署扩展。质子交换膜（PEM）燃料电池在重型商用车内的应用具有特定特征，例如长时间连续高功率工作，这非常适合固定式电源应用。



图9 IE-DRIVE HD100

这一 200kW 的构建块反过来可以进行扩展，根据应用环境要求使用辅助系统组件实现更高的电力输出，例如将 400kW 安装在 10' 标准集装箱内（图 11），将 1MW 安装在 30' 标准集装箱内（图 12）。

扩展操作简单，只需重复安装 200kW 构建块，即可实现灵活的电力输出配置。各台 200kW 机组，虽然是更大整体系统的一部分，但可以根据需要产生可变负载，并独立于其他机组工作，从而在维护过程中实现冗余。通过选择适当尺寸的部件，可以对系统进行修改，以进一步提高效率、降低成本（CAPEX 和 OPEX），例如，为多台 200kW 机组配备一个共用的流体管理系统；采用能够高效提供恒定高量反应空气的双螺杆压缩机。

¹¹ 国际氢能燃料电池协会，<https://www.fchea.org/stationary>

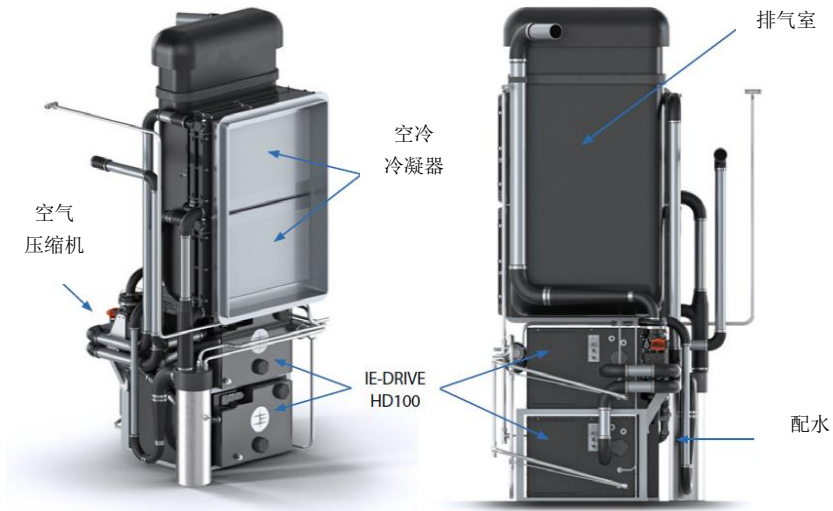


图10 IE-GRID 200kW 构建块



图11 IE-GRID 400kW 10' 集装箱概念

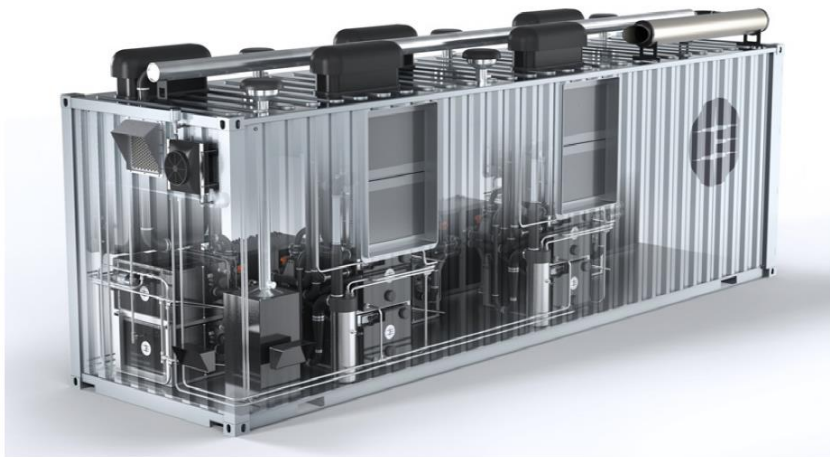


图12 IE-GRID 1MW 30' 集装箱概念

9. 结论

固定式电源的诸多应用场景皆需要可扩展、响应迅速且可靠的能量来源。燃料电池不仅能满足这些需求，还在实现能源行业的脱碳方面发挥着关键作用。

与其他代用燃料电池相比，质子交换膜（PEM）燃料电池具有显著优势：

- **结构紧凑，占地面积小，组合灵活**

体积尺寸恰到好处的设备能够满足特定的功率需求和占空比要求，发电机组的便携性也可以得到利用。

- **汽车产业带来的直接规模经济效益**

汽车产业的蓬勃发展推动了质子交换膜（PEM）燃料电池产量的提高，规模化生产在降低成本的同时也使产品质量日趋精良。

- **启动时间短，响应速度快**

与微电网相结合，质子交换膜（PEM）燃料电池可按需切换开关，使不可靠的可再生能源得以利用，并保持清洁能源的可用性。

配置	IE修改情况	是否输出有效热量?	氢耗量【公斤/小时】	系统效率【%】	费用【美元/千瓦时】	
					氢气（12美元/公斤） 典型目标氢气费用	氢气 ¹² （7美元/公斤）
IE-GRID标准版	不适用	否，温度过低	6.5	46	0.78	0.46
IE-GRID（无冷凝器）	膨胀器（导出排气）	否，排气被导出	5.9	51	0.71	0.41
IE-GRID（阴极背压）	电堆上背压 液冷式换热器 导出排气	是，80kW 95°C	6.8	78	0.46	0.27
IE-GRID（排气压缩）	压缩机位于电堆后 液冷式换热器	是，90kW 105°C	7.5	75	0.48	0.28
典型的传统液冷式燃料电池	不适用	否，温度过低	6.4	差异不超过2%	0.77	0.45

表2 IE-GRID 配置总结（各100kW机组的数据）

¹² 美国能源部，《氢能与燃料电池技术办公室未来项目计划》（2024年）

所有燃料电池系统均可经过优化，以满足最高效工作点和零部件选择的要求，例如确定燃料电池堆尺寸。然而，英泰力能 (IE) 推出的 IE-GRID™ 产品具备显著的差异化优势，其独特的蒸发冷却式燃料电池排气，在与传统液冷质子交换膜 (PEM) 燃料电池的对比中脱颖而出，如表 2 所述。

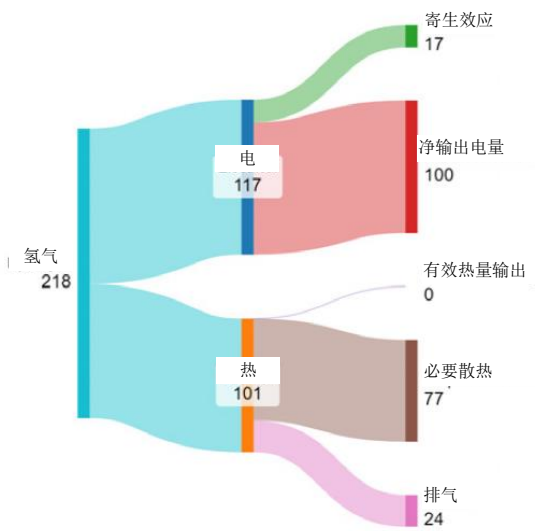
- **产出品级更高的热量**

IE-GRID™ 是一款更易实现的热电联产系统，能提高氢转化为可用能源（电能和热能）的效率。一台 1MW 发电机组能提供高达 800kW 的热能，额外氢气消耗量为 4 公斤/小时，与使用天然气相比，每年节约金额可高达 15 万美元（假设 0.05 美元/千瓦时）。

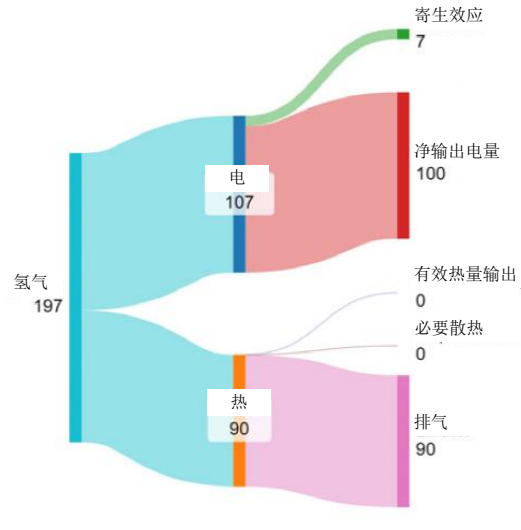
- **不受环境条件影响**

由于无需调节燃料电池冷却剂，IE-GRID™ 可用于各种环境条件，无功率限制，从而显著提高效率。对于一台 1MW 的发电机组，IE-GRID™ 的氢气消耗量比同等的传统液冷燃料少 5 公斤/小时，每年可节省 30 万美元以上。

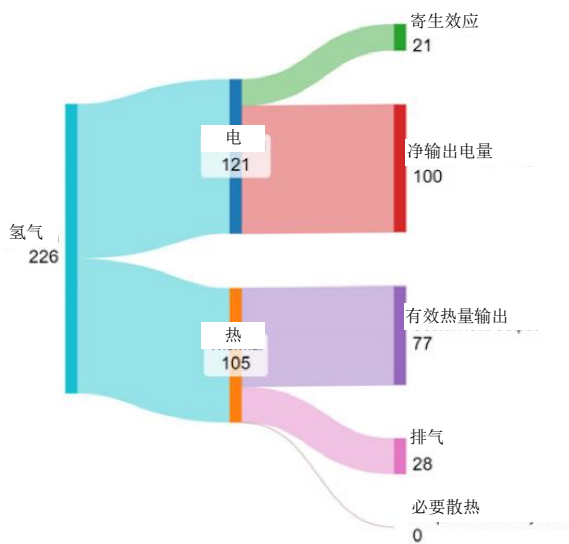
10. 附件



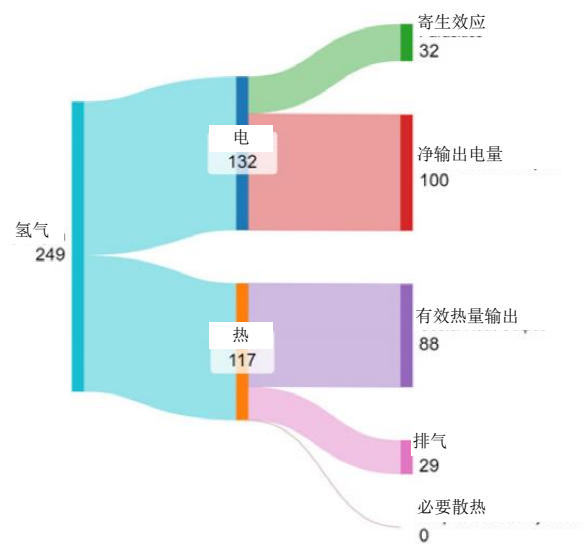
IE-GRID 标准版



IE-GRID 高效版



IE-GRID 优化版



IE-GRID HT 版

图13 能量平衡 (单位 kW)



燃料电池
电堆

燃料电池堆

一种能通过结合氢气与氧气（来自空气）将化学能转化成电能和热能的装置



压缩机

压缩机

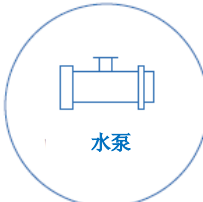
一种能为燃料电池堆供应空气流以用作燃料电池反应中氧源的装置



压缩机/膨胀器

压缩机/膨胀器

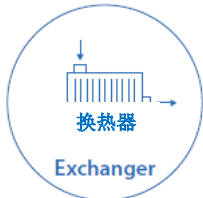
与上述压缩机相同，但配有可用作涡轮增压器的膨胀器，通过排气驱动来回收能源



水泵

水泵

一种能将水从储箱移至燃料电池堆以冷却燃料电池反应的装置



换热器

Exchanger

换热器

一种能将燃料电池排气中水蒸气冷凝成液态水的装置。一般，以空气流作为冷却剂。



冷却塔

冷却塔

与上述换热器一样，但是通过蒸发冷却。



水分离器

水分离器

一种能去除排气中液态水并使其返回至水箱的装置



水箱

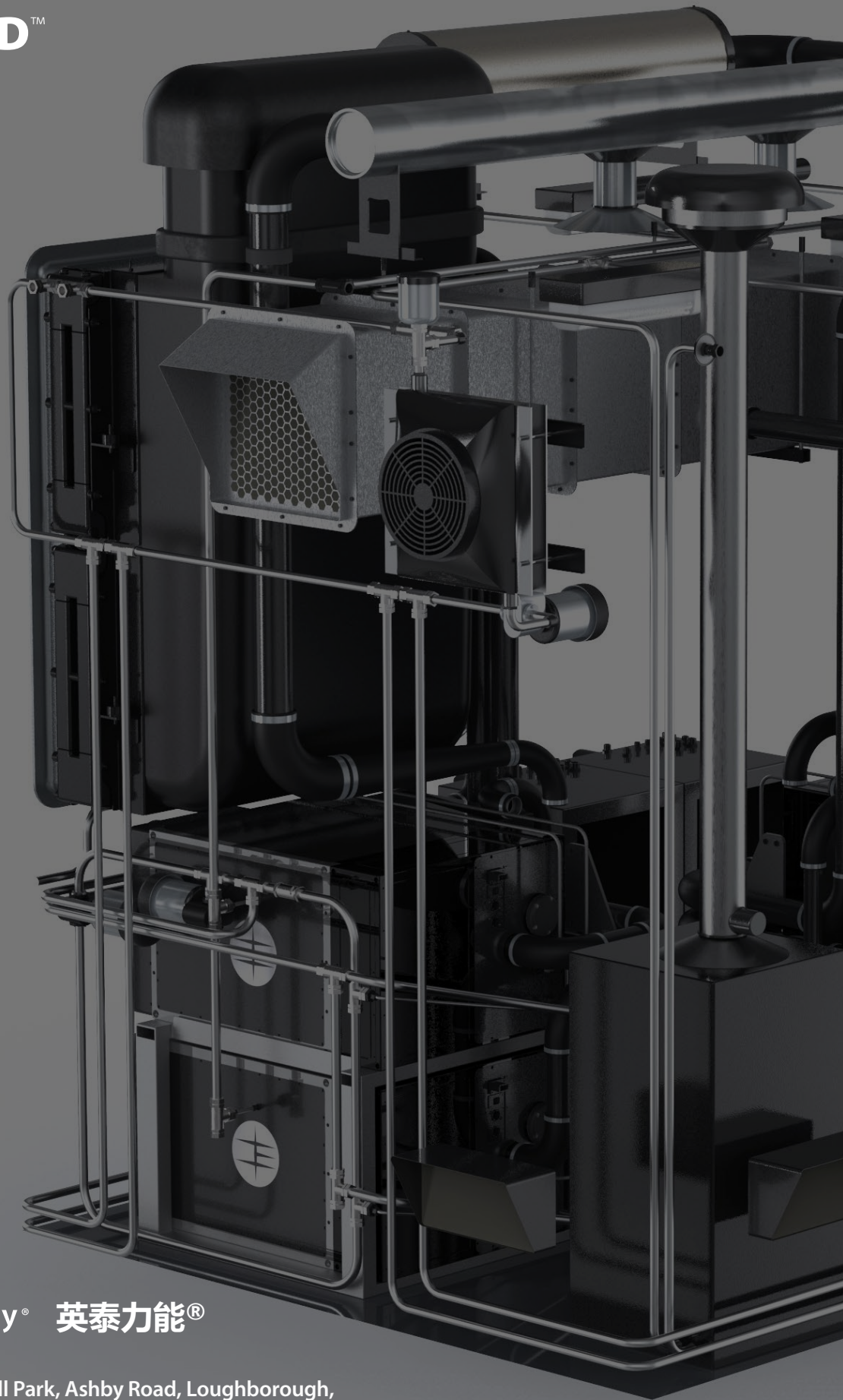
水箱

燃料电池堆冷却用水的缓冲罐

图14 原理图术语表



IE-GRID™



 **Intelligent Energy® 英泰力能®**

Charnwood Building, Holywell Park, Ashby Road, Loughborough,
Leicestershire, LE11 3GB, UK

+44 (0) 1509 271 271

intelligent-energy.com