

膨体聚四氟乙烯(ePTFE)增强型质子交换膜 (PEM)在汽车燃料电池市场中的重要意义

简介

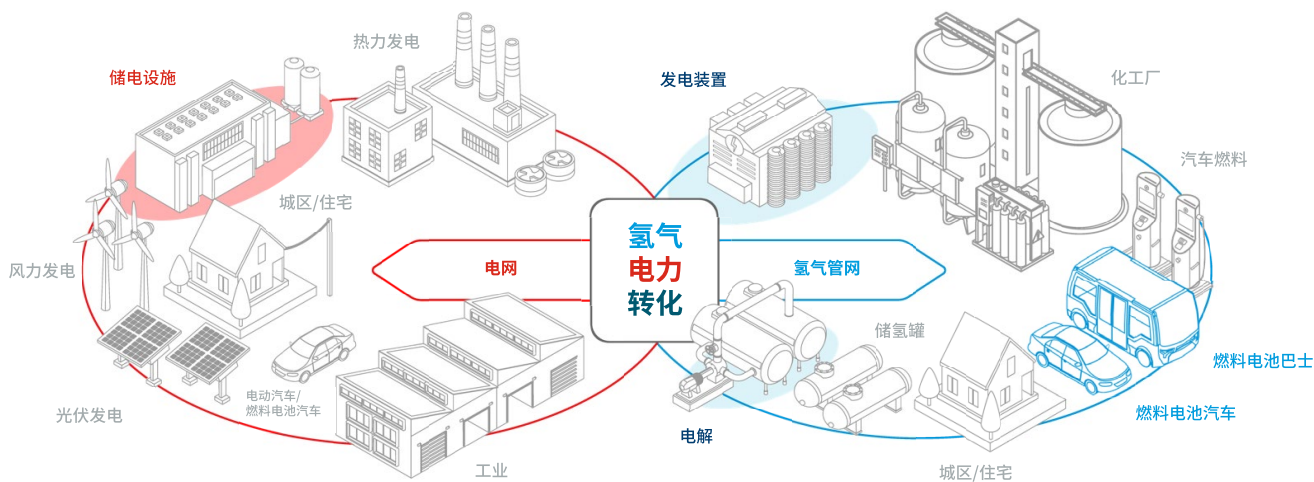
氢能是未来清洁能源的关键,也是我们从化石燃料过渡至更具可持续性的低碳型全球能源未来的重要催化剂。

交通运输领域在氢能的采用和商业化方面发挥着重要作用。从乘用车到商用车,再到横跨海、陆、空的长途物流,交通运输应用正在引领氢能经济的增长。

燃料电池技术是氢电转换背后的驱动力。目前,市面上已有多种类型的燃料电池技术。数十年的发展历程表明,质子交换膜(PEM)燃料电池技术在汽车和交通运输领域占据领先地位。

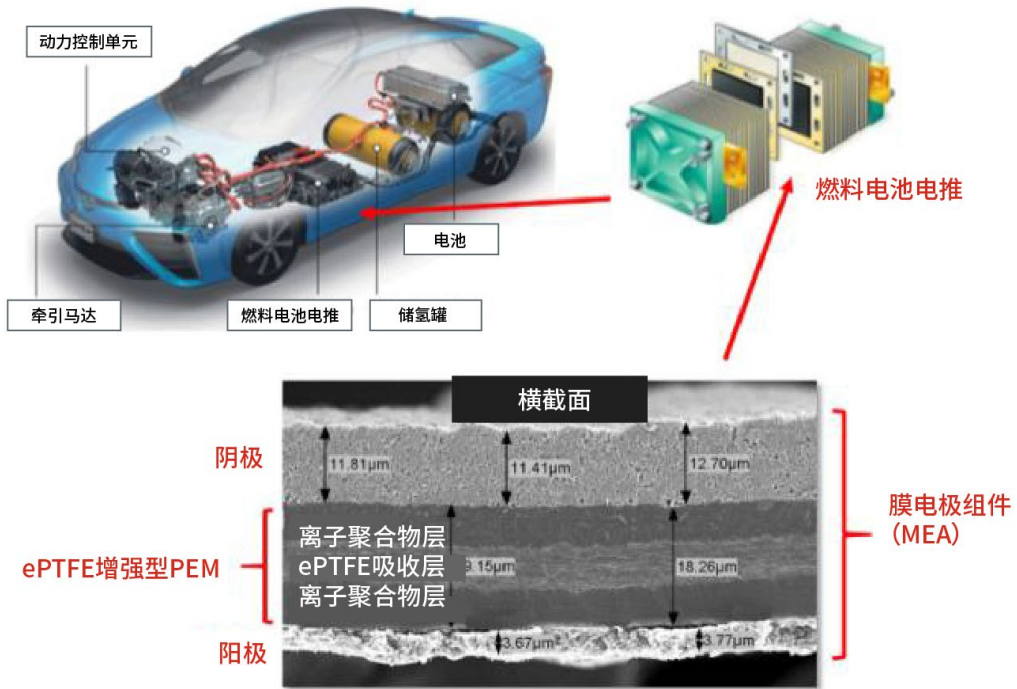
与碱性电池、直接甲醇电池和磷酸电池等其它燃料电池类型相比,PEM具有功率密度高、重量轻、体积小等优点。

图1:氢电转换^a



a. 《助力未来移动出行》,德勤中国, 2022, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>

图2:位于燃料电池电堆中心的MEA

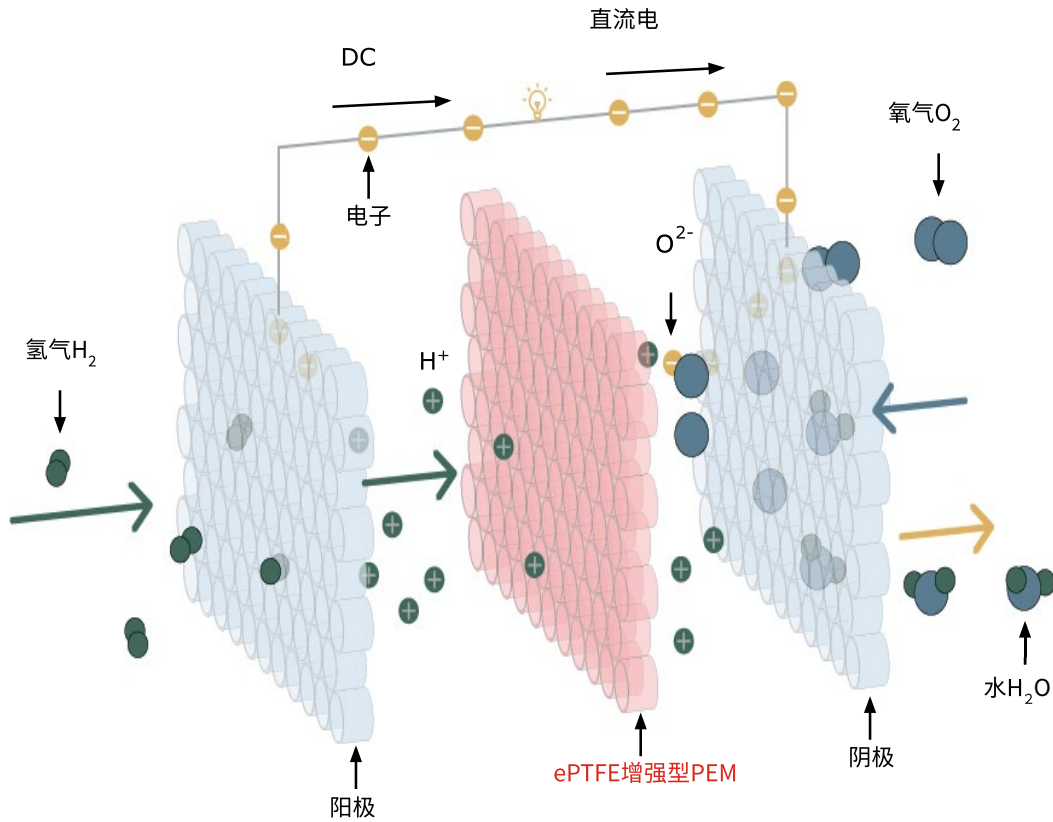


每个燃料电池电堆均由数百个膜电极组件(MEA)组成, MEA的具体数量取决于电池电堆的功率。每个MEA都由一个PEM和位于其两端的阳极和阴极电极组成。MEA是燃料电池的核心, 负责促进燃料通过电化学过程转化为电能。

燃料电池工作时, 燃料(氢气)从阳极进入, 与催化剂反应后分离为质子和电子。质子穿过PEM的离子导电聚合物到达阴极, 与氧气结合, 并在催化剂的帮助下生成水。无法穿过质子交换膜的电子会从燃料电池中流出形成电流, 产生能量(图3)。

PEM是燃料电池的核心部件。它的最终性能高度依赖于燃料电池电堆的堆叠和系统设计, 尤其是PEM所经受的工作条件。然而, 这项看似微小的技术却是燃料电池汽车动力的关键所在, 并由此推动着全球向清洁能源转型。

图3: ePTFE增强型PEM是MEA的核心。



汽车燃料电池市场对PEM的要求

零碳排放、续航里程长(300-400英里)且燃料加注快(3-5分钟)使得燃料电池汽车(FCEV)在未来交通运输领域极具吸引力。

然而,要充分发挥它们的潜力,燃料电池不仅必须具备商业上的可行性,还要真正建立起相对于传统内燃机的竞争优势,因为后者已经是拥有巨大规模经济效益的成熟技术。

PEM技术要在汽车行业实现大规模应用,必须满足制造商的以下三大类要求:

1. 性能
2. 可靠性
3. 成本

这三个类别的要求相互关联;其中一个属性的变化可能会涉及到另一个属性的权衡。

性能

这个类别所考量的基本属性可体现出PEM在不同工作条件下(相对湿度(RH)、温度、占空比等)在燃料电池电堆中的性能表现。

电导率和功率密度

功率密度是影响燃料电池汽车性能的一个主要因素。影响功率密度的一个因素便是PEM的电导率;反过来说,这种质子传输的阻力是决定整个电池电堆和系统效率的一个重要因素。

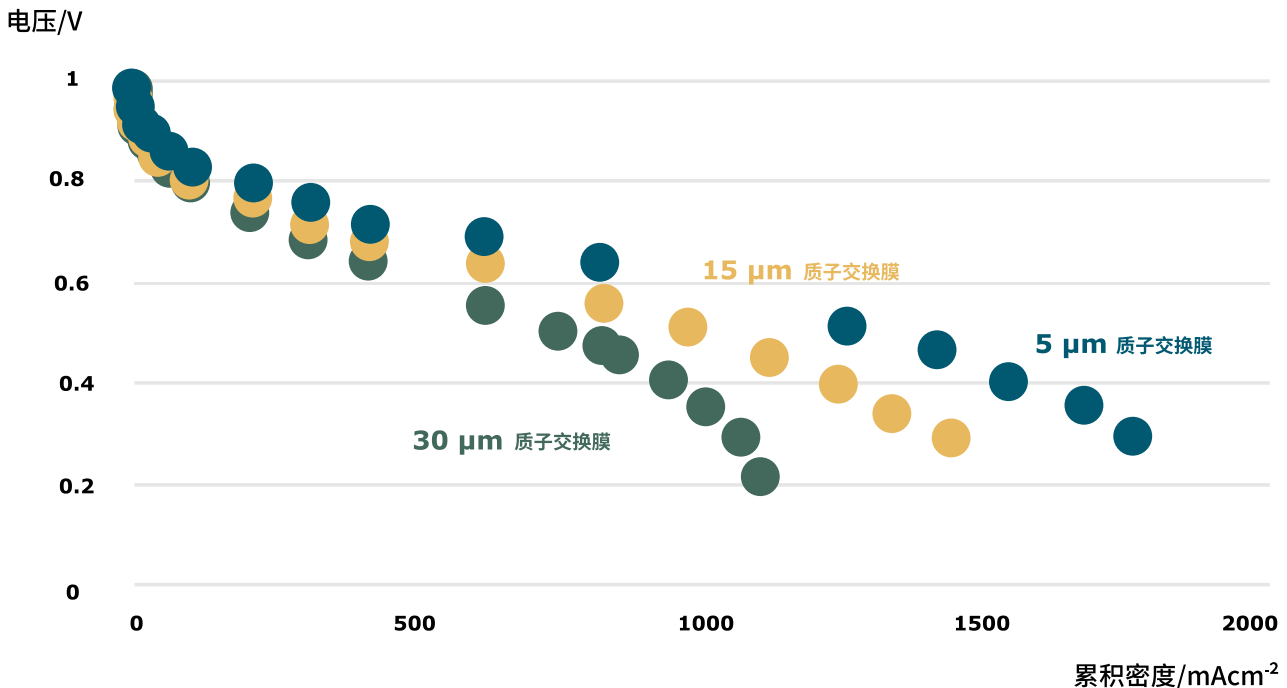
电导率主要受所用的增强型膜结构、PEM本身厚度和离子聚合物类型的影响。

以上三个因素也影响着PEM的水传输率,比如较薄的PEM质子电阻更低,使得其功率密度更高,同时还具有更高的水传输率,因此在相对湿度(RH)较低的情况下也可表现出较高性能。

但是,更薄的质子交换膜通常意味着要在气体渗透性和机械耐久性方面做出让步,从长期而言会对整体性能产生负面影响。

用膨体聚四氟乙烯(ePTFE)对PEM进行增强处理,是一种可以显著减少这种让步的解决方案。依托数十年的不断发展,戈尔的ePTFE增强型复合膜技术可在更长的PEM生命周期内表现出更出众的性能,即使在极端的工作条件下也毫不逊色。

图4:高电流密度输出



随着行业成本压力和性能要求的日益提升,研发工作应专注于更纤薄、更强韧的PEM,从而提供更高的功率密度和耐久性,同时减少对性能的影响。

这种开发和设计还必须考虑其它属性,我们将进一步探讨。

耐久性

燃料电池在实际应用环境中的耐久性是FCEV的另一个关键性能因素。根据美国能源部的规定,在实际环境中行驶的条件下,燃料电池使用寿命应达到约5,000小时,使用里程应达到150,000英里左右。

为了达到这些目标,PEM设计必须考虑两种类型的耐久性。

机械耐久性

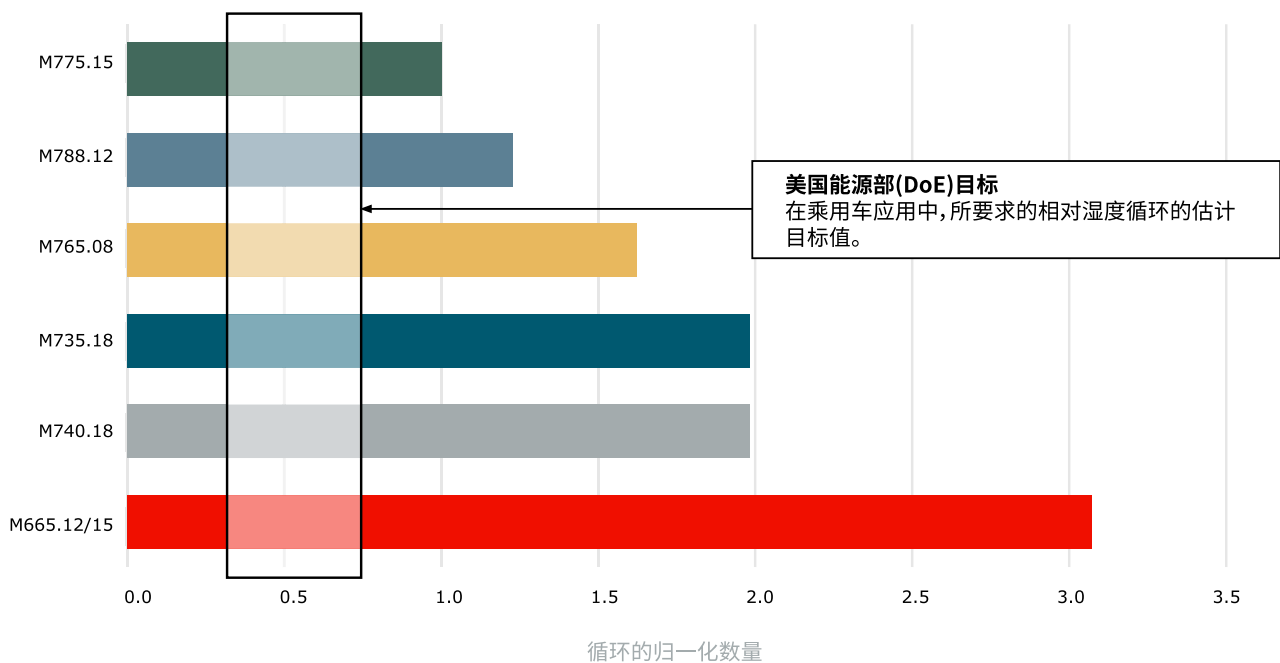
工作过程中的相对湿度(RH)循环会导致PEM的机械性能衰减。RH的升高和降低会引起PEM膨胀和收缩,从而导致MEA中出现裂纹和孔洞。

久而久之,这会造成气体渗透增加以及效率损失,并最终导致燃料电池电堆发生灾难性故障。通常,未经增强的PEM会通过增加厚度来提升耐久性,导致电导率降低,因此功率密度也更低。

业内已广泛认可,化学稳定性优异的ePTFE增强型质子交换膜可显著减少这种面内膨胀,提高RH循环耐久性,并延长电池电堆的使用寿命。这使得我们可以开发出更薄,但机械强度更好的PEM,无需在高电导率和最佳的机械耐久性之间进行取舍。

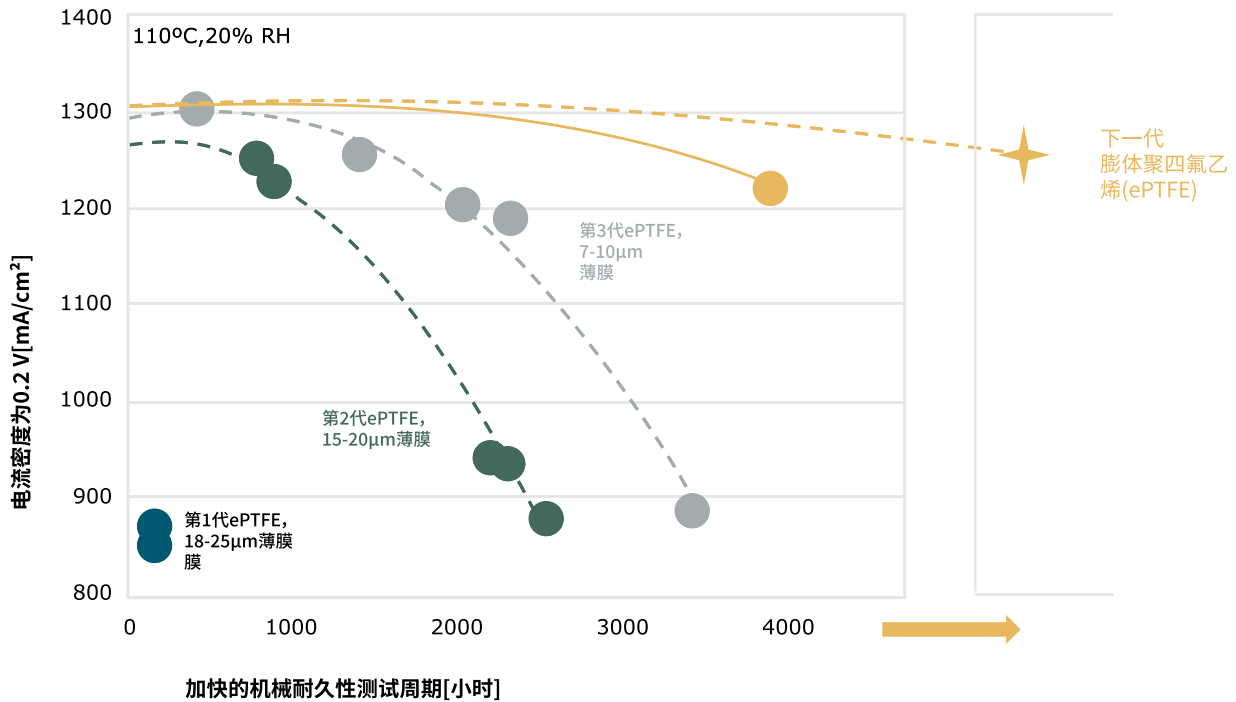
并非所有ePTFE增强型质子交换膜的性能都相同。不同的设计会给不同的应用提供不同的优势(和权衡)。戈尔的先进产品组合证明了其能够满足广泛的机械耐久性和功率密度要求。

图5: 戈尔相对湿度(RH)循环测试



开发新一代PEM技术,使其同时兼具更高的功率密度和机械耐久性,将成为降低总拥有成本,从而确保商业可行性的关键因素(稍后将加以讨论)。

图6: 戈尔的ePTFE技术可增强PEM的机械耐久性



化学耐久性

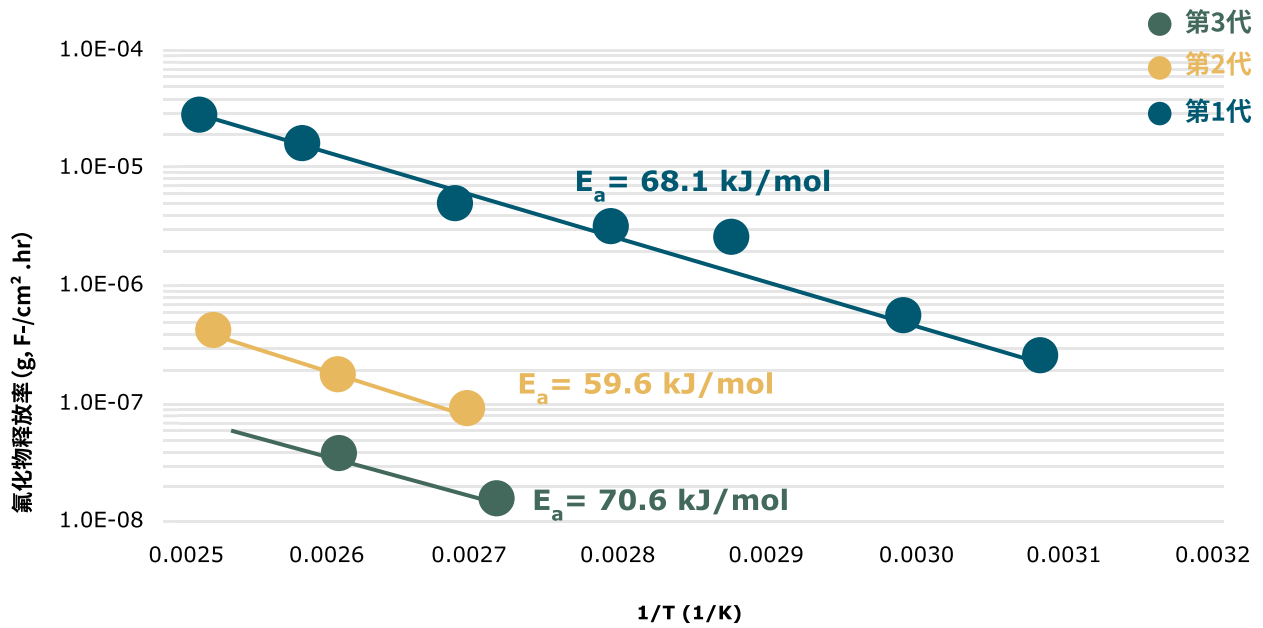
燃料电池需要在恶劣的化学环境中工作。燃料电池工作过程中产生的有害自由基会与离子聚合物发生反应,造成离子聚合物性能下降。这种性能衰减会造成燃料电池性能的持续下降,增加气体渗透,并最终导致PEM和燃料电池失效。

当离子聚合物降解时,会分解形成可以在产品水中测量的氟化氢,因此氟化物释放量是用来衡量PEM化学耐久性的常用指标。

PEM的化学耐久性不仅受PEM的自身属性影响,还受PEM的工作环境的影响。例如,温度对性能衰减有巨大影响,测试表明,温度变化30度时,氟化物释放率(FFR)大约增加10倍。(图7)

不过,研究显示,使用适当的添加剂技术可显著提高PEM的化学耐久性。(图7)

图7: 70%相对湿度的开路电压(OCV)保持测试中的氟化物释放率



气体渗透性

尽管PEM的一个关键功能是传输质子, 它还拥有另一个同样重要的功能: 隔绝氢气和氧气。

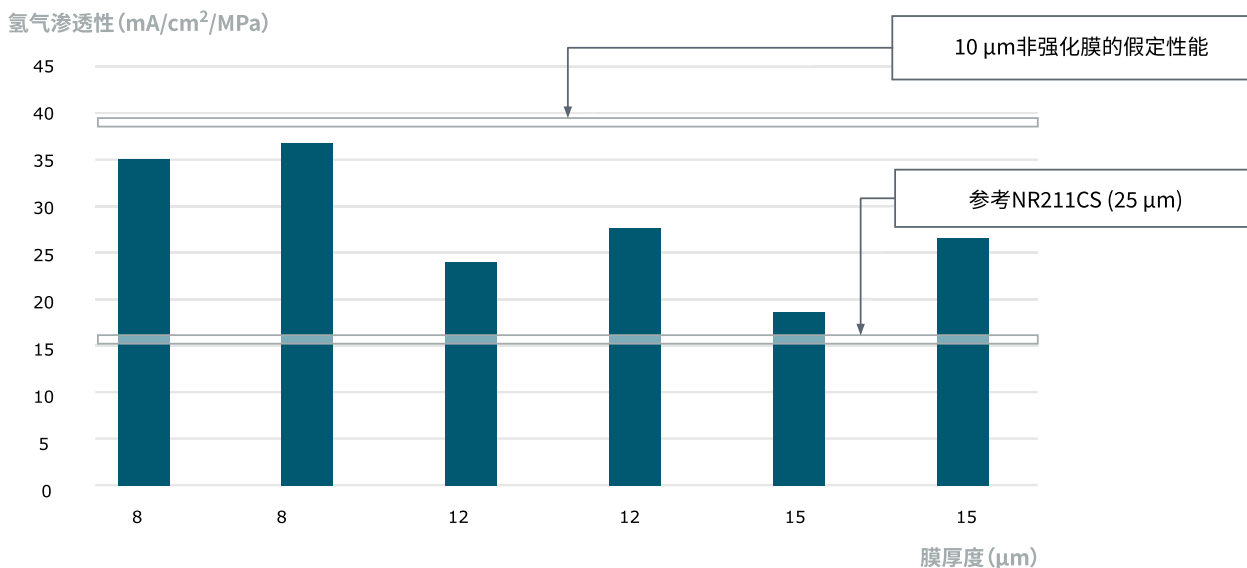
尽管目标是促进氢和氧的高效电化学转换, 但(尽可能)消除由于这些气体渗透质子交换膜而导致的燃料效率低下问题也同样至关重要。而且, 渗透的氮气还会在阳极流场中积聚, 降低氢气浓度, 导致局部燃料不足^a。

如前所述, 较薄的质子交换膜(追求功率密度的应用的首选)通常气体渗透性更高, 会导致性能下降。

戈尔的新一代薄型PEM结合了独特的膨体聚四氟乙烯(ePTFE)结构, 能够减少在气体渗透性方面的权衡, 同时提供更高的功率密度。

a. 《PEM燃料电池中气体渗透性及其影响》, Kocha, Shyam S.等, Aiche Journal, 2006年, 第52卷, 第5期, 1916-1925页。Wiley, <https://doi.org/10.1002/aic.10780>

图8: 氢气渗透



考虑到气体渗透对燃料效率的影响, 随着行业不断发展, 并从系统成本转向运营成本, 这一属性对于OEM厂商的重要性将日益提升。燃料电池制造商需将研发重点放在突破“性能与渗透性”的权衡上。

高温环境

外部温度所影响的不仅仅是氟化物释放率。高温工作需求日益受到OEM厂商的关注, 他们的共同目标是减小散热器的尺寸, 从而降低成本。

然而, 高温环境不利于PEM的工作, 会引发性能下降、耐久性降低以及PEM衰减加快等问题。

减少PEM厚度有助于改善高温下的性能, 因此ePTFE增强结构的有效性将决定对耐久性的相对影响。

PEM性能: 通过定制实现优化

这些性能因素都是相互关联的, 因此, 研发工作和PEM设计必须通过全方位的考量来了解它们彼此之间的相互作用和平衡。

随着燃料电池行业的日渐成熟, PEM供应商必须具备材料专长, 还有与其他MEA、电堆部件以及燃料电池操作策略之间的互动能力, 从而实现对系统功率、耐久性和成本的优化。

可靠性

PEM性能涉及单个或少量数据点的测量。

PEM可靠性涉及的范围更广，需考虑PEM的大批量生产和长期稳定供应。

我们对“可靠性”的定义源自《牛津词典》：“值得信赖或具有稳定良好表现的品质”。

随着燃料电池行业进入大批量生产阶段，我们必须考虑这一阶段相较于研发阶段的不同要求。毕竟，小批量的高性能产品难以满足日益增长的全球需求。

产品质量和一致性

“质量”是一个宽泛的概念，涵盖了许多基本要素，从部件的进料缺陷率(DPPM)，到“可靠性”的技术定义，即部件在特定时长内持续工作的概率，均包含在内。

计算方式如下： $R_{(t)} = e^{-\lambda t}$

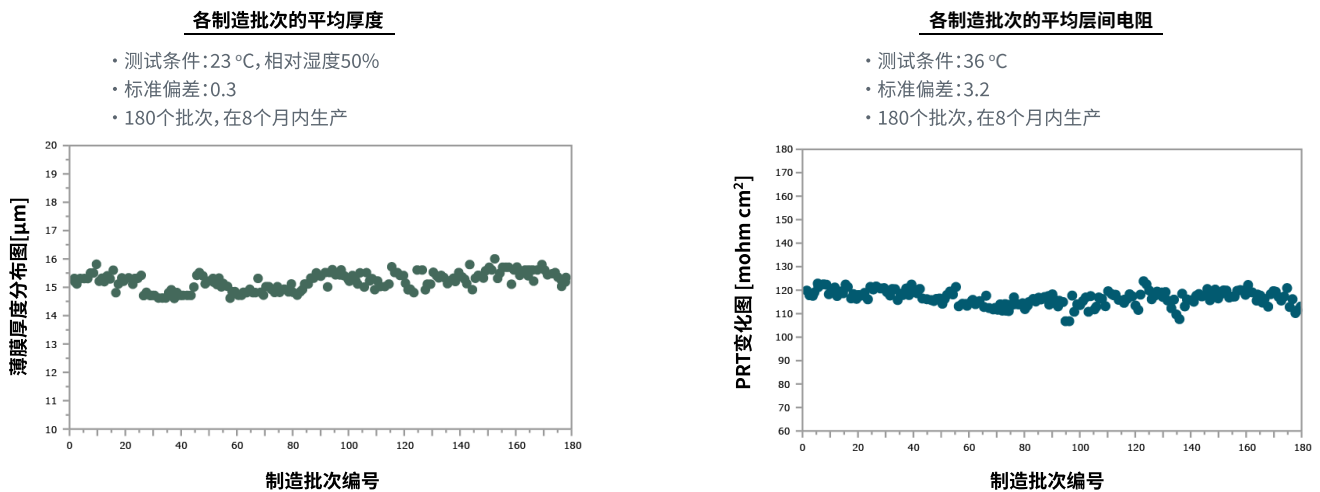
其中，R为故障概率， λ 为固有故障率(故障次数/小时)，MTBF(平均故障间隔时间)为 $1/\lambda$ 。

系统的固有故障率是其所有部件故障率的总和。这样一来，系统的可靠性便受到故障率最高的部件的限制，因此，重点应放在这个最薄弱的环节上。

这就引出了PEM。尽管测量产品属性不能保证故障消失，但能够很好地表明产品和流程的一致性，而这种一致性能够大大降低随机故障的风险。反过来，这使MEA或电池电堆制造商能够很好地把控生产流程，减少不确定因素，从而降低故障概率。

在大批量生产环境中，这对于降低工艺不良率以及减少与产品质量相关的下游成本而言至关重要。

下面的图9显示了戈尔在180个批次和9个月的生产中的PEM大批量生产数据。



产能和供应安全性

这个类别中的另一个考虑因素是PEM部件供应的可靠性，即原材料的供应，以及能够满足快速增长的市场需求的PEM产能。

PEM的关键部件包括离子聚合物、膨体聚四氟乙烯(ePTFE)增强膜、基材和添加剂。由于直到近期为止，燃料电池行业仍处于研发阶段，因此仅有极少数PEM生产商能够凭借深度的研发计划以及与次级供应商的稳定合作关系，而拥有成熟、可靠、久经验证的原材料供应链。

同样，有能力生产行业所需数量的PEM的供应商也是寥寥可数。要想建立新的产能，需要在成本、时间和经验方面进行大量投资，才能达到供货一致且可靠的水平。

前沿的PEM供应商都会通过一定程度的垂直整合来简化运营、管理成本和控制质量。例如，戈尔已将其核心的膨体聚四氟乙烯(ePTFE)增强专业知识运用于PEM产品的开发、制造和设计中。

重要的是，不仅要考虑产能的可获得性，还要考虑产能的稳定性和可靠性。

骄人往绩

设计、建造和评估燃料电池电堆及系统的成本极高。那些走在行业前列的“先行者”，他们的投资往往先于市场，以验证某种PEM的性能及其对于某个燃料电池应用的适用性。虽然并非所有电池电堆和系统的设计方式都相同，但这种方法仍然是确保PEM性能的很好的行业基准。

使用久经验证的材料和工艺制作，并在终端应用系统中验证有效的产品，对于降低下游价值链的风险至关重要。要想在新兴的市场上参与竞争，几乎没有可以犯错的余地，因此，这种风险不容忽视。

例如，中国于2020年制定了为期四年的燃料电池补贴计划^a，尽管技术要求和政策目标逐步提高，但补贴金额将逐年下降。新的处罚制度也将在期中审查后实施。

显然，价值链充分利用此政策的各项优势并在市场上站稳脚跟的机会非常有限。因此，在技术、性价比和PEM供应可靠性方面具有优势的公司将成为该政策最大的受益者。

a. 《中国燃料电池“补贴”政策:策略详解-Energy Iceberg》，Energy Iceberg, 2022年, <https://energyiceberg.com/china-fuel-cell-subsidy-design/>



成本

在实现全球无碳化目标的过程中,氢燃料电池有望成为一种可持续的替代能源解决方案——从交通运输系统到各行各业,再到我们呼吸的空气,所有的一切都将发生转变。

但是,要将“净零碳排放”愿景转化为现实,长期的商业可行性不可或缺。目前,氢燃料电池在成本上尚未与内燃机汽车(ICEV)和纯电动汽车(BEV)持平。

这在很大程度上是由于尚未实现规模经济效应,且用于制造PEM的原材料成本较高所导致。

用于制造气体渗透性较低的薄型质子交换膜的离子聚合物通常价格昂贵。其它部件,如电极、气体扩散层和双极板也都价格不菲,而且会增加燃料电池电堆的尺寸,从而进一步增加燃料电池电堆的成本。

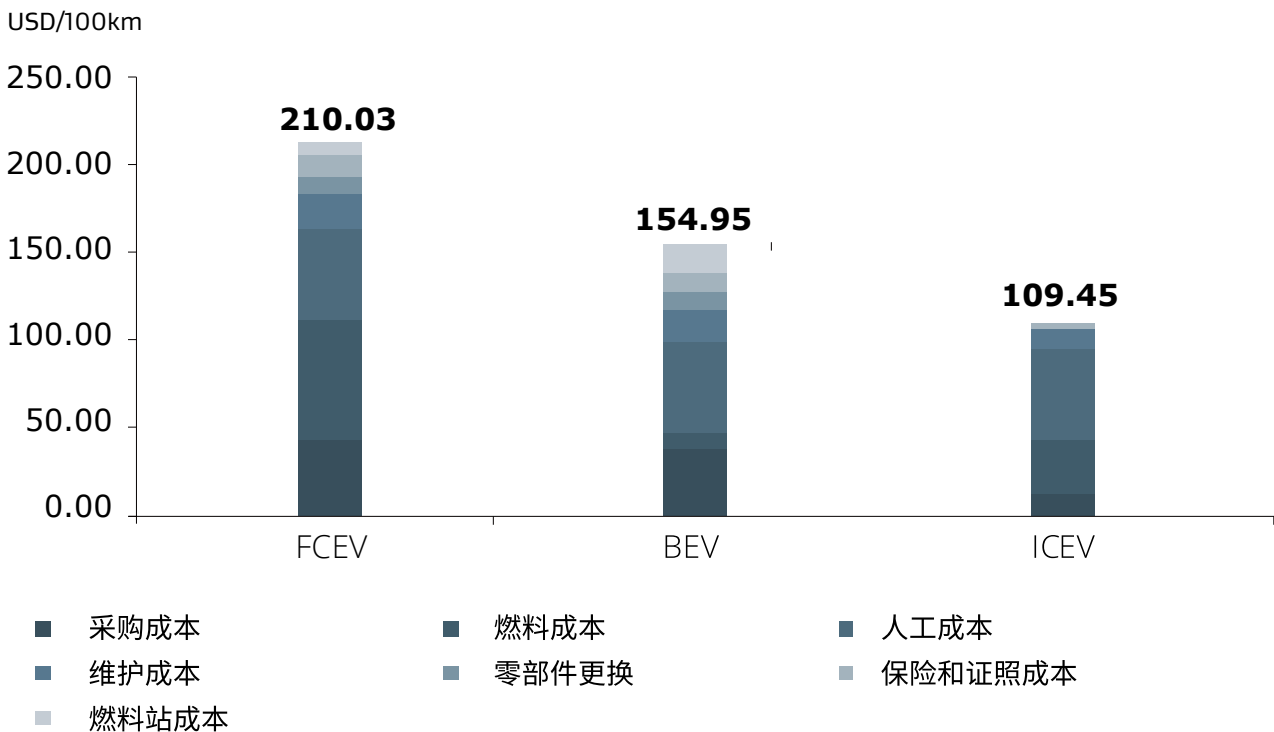
制造商的高生产成本转移到消费者的商用车价格上,导致FCEV过于昂贵,无法与BEV和ICEV竞争。

要在成本上持平,产量必须增加——如果材料成本仍然居高不下,这一点将无法实现。

这在全球各个国家和地区的政策层面上均已得到体现,已有66个国家/地区致力于可持续能源转型,全球投资规模超过5000亿美元^a。全球10大经济体中有8个承诺到2050年实现净零碳排放目标。

法规和财政支持不可能无限期地持续下去,因此,必须在燃料电池价值链上制定降低成本战略。

图10:FCEV、BEV和ICEV的系统成本



a. 《促进能源有效转型》,世界经济论坛,2022年, https://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2021.pdf

传统的成本降低战略考虑单个部件的成本贡献,并设定相应目标以推动总成本降低。

然而,我们已经发现了燃料电池电堆部件及其属性之间相互依赖的特性,在这种情况下,以总拥有成本(TCO)为着眼点的全方位考量显然更为合适。

制定TCO衡量指标的第一步就是了解用户需求。例如:

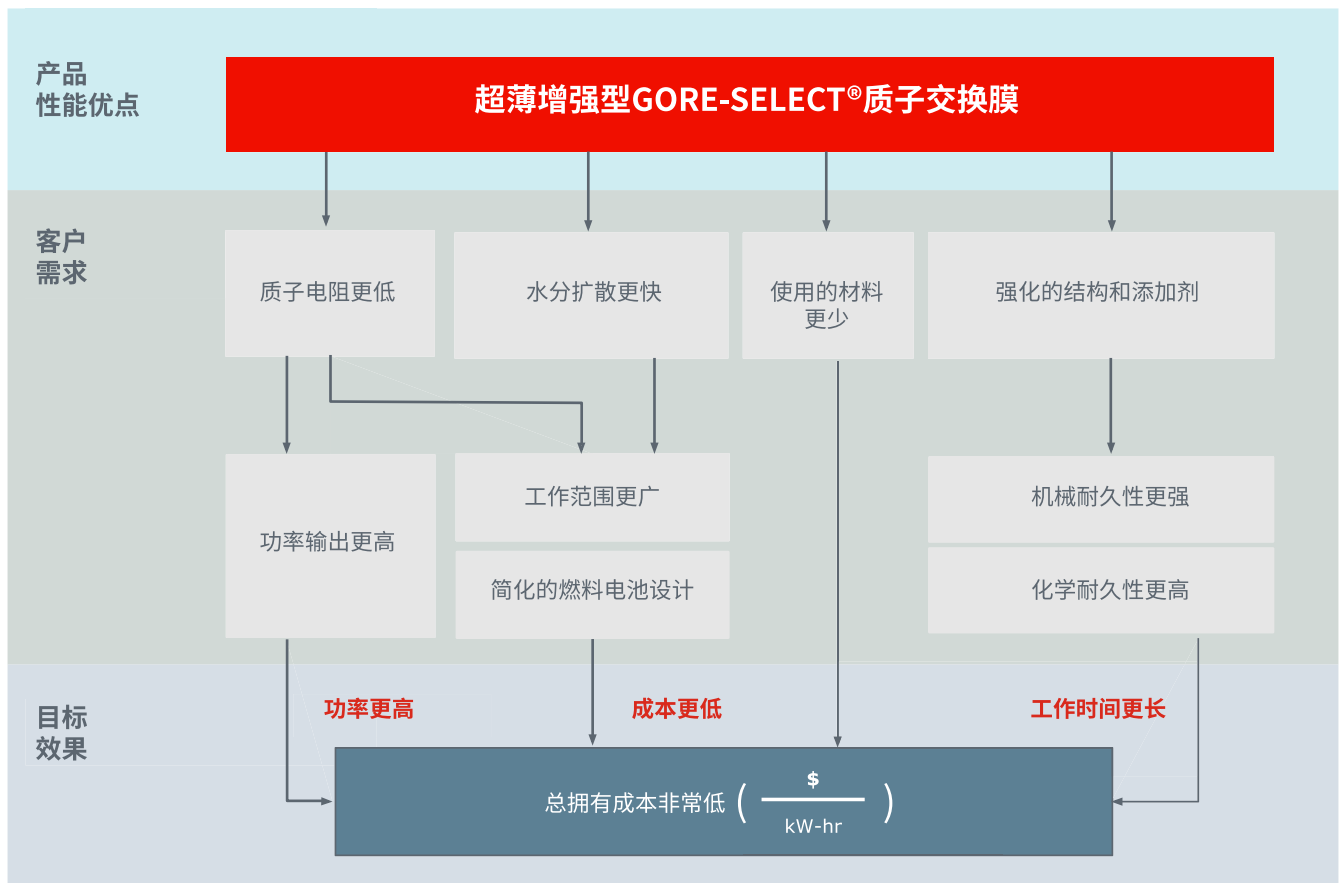
- 影响燃料电池系统最终成本的因素有哪些?
- 如何确定能够产生更高功率的PEM的货币价值?
- 牺牲部分功率来降低PEM成本是否更好?

再次强调,燃料电池的各个部件基本都是协同发挥作用,因此还需要考虑其它因素。尽管厚度更薄,但ePTFE增强型PEM仍然可以产生高功率,加快水分扩散,因此可改善低RH工作条件下的性能,从而扩大工作温度范围。ePTFE增强型PEM更加经久耐用,因此可降低其生命周期内的总系统成本。

而且,PEM厚度的减少自然也意味着原材料用量的减少,这可降低部件材料成本——不仅是PEM自身的成本,还有其它电池电堆部件的成本,因此,只需更小、更轻(且更便宜)的电池电堆便可产生相近的功率。

在原材料供应固定的条件下,更薄的PEM还可以实现更高的产量和装运量。

图11: GORE-SELECT®质子交换膜的多种性能优势相结合,有助于降低总拥有成本。



而且, PEM厚度的减少自然也意味着原材料用量的减少, 这可降低部件材料成本——不仅是PEM自身的成本, 还有其它电池电堆部件的成本, 因此, 只需更小、更轻(且更便宜)的电池电堆便可产生相近的功率。

在原材料供应固定的条件下, 更薄的PEM还可以实现更高的产量和装运量。

尽管燃料电池系统的价格目前仍然高于纯电动汽车(BEV)和内燃机汽车(ICEV), 但最近的研究和总拥有成本分析结果十分令人振奋^a, 前景一片光明。

从总拥有成本的角度来看, FCEV的成本预计到2026年就能低于BEV, 2027年左右将低于ICEV——总体而言, FCEV的总拥有成本将于未来十年间下降50%。这一预测源自以下几个收购和运营因素:

- 随着技术日趋成熟和规模经济效应的提高, 汽车制造成本将会下降
- 随着采购和供应链的高度发展, 原材料成本将会下降
- 全球在基础设施和运输机制的生产和发展中将增加可再生能源的使用, 氢燃料成本将因此大幅下降
- 公共部门和私营部门的投资、补贴和激励措施增加
- 由于管制力度增加、排放标准提高或市场对纯ICE汽车的全面禁止, ICE汽车的定价压力将增加

研究人员自己也承认, 这些预测甚至可能过于保守。正如我们在其它新兴技术中所看到的那样, 产量增长和成本下降的幅度甚至会超出预期。随着全球对燃料电池技术的兴趣日益浓厚, 这种趋势可能会呈现指数级变化。

最重要的是: 更纤薄、更强韧的ePTFE增强型PEM可以使燃料电池电堆运行更持久, 功率更强劲。

a. 《助力未来移动出行》, 德勤中国, 2022, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>



展望更光明、更清洁的未来

ePTFE增强型PEM是燃料电池电堆的核心,也是清洁能源运动的关键所在。通过高效的产品设计和可靠的制造,它能对燃料电池系统的运行、耐久性和可靠性产生直接和决定性的影响,进而影响到系统的商业化可行性。

燃料电池汽车行业在过去十年取得了巨大进展,并有望在未来十年实现更大的飞跃。由于具有续航里程长、燃料加注速度快、能量密度高,当然还有零排放等优点,FCEV为商用和重型交通运输应用提供了一种极具吸引力的解决方案。

由于气候危机仍然是全球政策的关键议题,氢能为未来清洁能源提供了最佳的可持续解决方案,而汽车燃料电池行业将成为推动这一运动向前发展的动力。

对有志于在该领域寻求发展的公司和制造商而言,具有骄人往绩、出众研发实力、精深工艺知识以及供应安全可靠的合作伙
伴,将能助力他们实现这一承诺。



联系我们

全球各地联系方式

澳大利亚	+61 2 9473 6800	墨西哥	+52 81 8288 1283
比利时、荷兰、卢森堡	+49 89 4612 2211	斯堪的纳维亚	+46 31 706 7800
中国	+86 21 5172 8299	新加坡	+65 6733 288
法国	+33 1 5695 6565	南美	+55 11 5502 7800
德国	+49 89 4612 2211	西班牙	+34 93 480 6900
印度	+91 22 6768 7000	台湾	+886 2 2173 7799
意大利	+39 045 6209 240	英国	+44 1506 460123
日本	+81 3 6746 2570	美国	+1 410 506 7812
韩国	+82 2 393 3411		

戈尔(深圳)有限公司上海分公司

地址:中国上海市南京西路1468号中欣大厦43楼
电话: 86-21 5172 8299
传真: 86-21 6247 9199
电邮: info_china@wlgore.com
gore.com.cn/alt-energy

立即扫码
获取技术支持



仅限工业用途。不适用于食品、药品、化妆品或医疗设备等制造、加工或包装作业。

本文所有技术信息和建议都依据戈尔先前的经验和/或实验结果给出。戈尔公司尽力提供这些信息,但对此不承担法律责任。客户应检查具体应用中的适应性和可用性,因为只有具备了所有必要的操作数据才能判断本产品的性能。上述信息可能会不时变更,不作为产品规格使用。

戈尔公司的销售条款适用于戈尔产品的销售。

GORE、GORE-TEX及其设计是W. L. Gore & Associates (戈尔公司)的注册商标。

