

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.028

燃料电池用聚乙烯基质子交换膜研究进展

陈艳君^{1,2}

(1. 宁波职业技术学院乙烯工程副产物高质化利用浙江省应用技术协同创新中心, 浙江宁波 315800; 2. 宁波职业技术学院化学工程学院, 浙江宁波 315800)

摘要: 简介了燃料电池的重要性及质子交换膜在燃料电池中的核心地位。简述了目前燃料电池用质子交换膜研究中,设计具有成本低、加工性好、燃料选择性好等优点的质子交换膜替代全氟磺酸膜的发展趋势,分析了聚乙烯基质子交换膜的优势,介绍了近年来聚乙烯基质子交换膜的制备方法和基本性能,指出可通过聚乙烯与磺化聚合物共混、设计合成磺化聚乙烯以及聚乙烯-磺化聚合物接枝共聚物等 3 种方法制备聚乙烯基质子交换膜。最后提出设计合成具有电导率高、燃料阻隔性好、成本低、加工性好、温度和湿度稳定性好的不同结构的聚乙烯基质子交换膜以及开发其高效合成方法是未来的重点研发方向。

关键词: 燃料电池; 质子交换膜; 聚乙烯; 电导率; 合成策略

中图分类号: TQ317.9, TQ911.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0165-05

Research Progress on Polyethylene-based Proton Exchange Membrane for Fuel Cell Application

Chen Yanjun^{1,2}

(1. Zhejiang Collaborative Innovation Center for High Value Utilization of Byproducts from Ethylene Project, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China; 2. College of Chemical Engineering, Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China)

Abstract : The importance of fuel cell and proton exchange membrane as one of the key components of fuel cell was introduced. For the current research on proton exchange membranes used in fuel cell, the development trend that designing proton exchange membrane with low cost, good process ability and fuel selectivity for replacing perfluorosulfonic-acid membranes (Nafion) was briefly described. The advantages of polyethylene-based proton exchange membrane were analyzed, the synthetic strategy and the basic properties of polyethylene-based proton exchange membrane were reviewed. The polyethylene-based proton exchange membrane could be prepared by blending of polyethylene and sulfonated polymer, design and synthesis of sulfonated polyethylene as well as graft copolymers of polyethylene and sulfonated polymer. In the future, the key research and development direction is designing and synthesizing the novel polyethylene-based proton exchange membrane with different structures which exhibit high conductivity, good fuel selectivity, low cost, good process ability, good thermos-stability and humidity-stability and developing their efficient synthesis method.

Keywords : fuel cell ; proton exchange membrane ; polyethylene ; conductivity ; synthetic strategy

燃料电池具有易于运输和存储、燃料稳定性好、能量密度高、价廉易得等众多优点^[1-2],有望替代传统的能量转化装置,替代可充电电池在手机、笔记本电脑、军用装备等方面的应用。然而,燃料电池的大规模商业化还存在一些挑战,尤其在燃料电池的关键部件离子交换膜方面仍然存在短板,这是限制燃料电池发展的关键因素。离子交换膜起到隔绝电子、分隔阴阳两极并传导离子的功能。离子交换膜的导电性

直接关系到燃料电池的能量转换效率。根据传导的离子不同,离子交换膜分为质子交换膜和阴离子交换膜。杜邦公司开发的全氟磺酸膜(Nafion)是目前燃料电池中主要采用的质子交换膜,主要是因为 Nafion 膜电导率高、化学稳定性和热稳定性好。然而, Nafion 膜的成本高、加工性差、燃料选择性差、高温和低湿度条件下电导率低,限制了其大规模应用。尽管关于质子交换膜的报道很多,但寻找综合性能优异的质

基金项目: 浙江省 2019 年度高校国内访问工程师“校企合作项目”(FG2019041),2021 年度宁波市公益类科技计划项目(2021S148)

通信作者: 陈艳君,博士,副教授,主要从事烯烃聚合的研究

收稿日期: 2022-03-04

引用格式: 陈艳君. 燃料电池用聚乙烯基质子交换膜研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):165-169.

Chen Yanjun. Research progress on polyethylene-based proton exchange membrane for fuel cell application[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):165-169.

子交换膜仍是质子交换燃料电池领域的重大挑战之一^[1-2]。在聚合物骨架上进行官能化或将聚合物与含官能化基团的聚合物共混是制备质子交换膜的常用方法,所涉及的聚合物很多,主要包括聚砜、聚醚酮、聚酰胺、聚苯并咪唑和聚苯乙烯类热塑性弹性体等^[3-15]。聚乙烯是产量和用量最大的合成聚合物,具有轻质、柔韧、疏水性好、成本低廉、耐酸碱等优点,且主链不含苯环,不会与电极催化剂吸附。另外,具有半结晶性和高疏水性的聚乙烯能够很好地适应燃料电池工作环境对质子交换膜在化学稳定性、电化学稳定性和物理力学性能方面的要求,因此聚乙烯是很好的高性能燃料电池膜候选基体材料^[16-25]。然而,聚乙烯主链由饱和的亚甲基链组成,不具有传导离子的能力。制备聚乙烯基质子交换膜,需要在聚乙烯基体上引入能够传导质子的官能化基团。聚乙烯基质子交换膜的制备方法主要包括:(1)聚乙烯与磺化聚合物共混;(2)设计合成磺化聚乙烯;(3)设计合成聚乙烯与磺化聚合物的接枝共聚物。根据以上方法分类,笔者总结了近年来基于聚乙烯的质子交换膜的制备方法原理及不同结构的聚乙烯基质子交换膜的性能。

1 聚乙烯/磺化聚合物共混物基质子交换膜

用于制备质子交换膜的基材都含有离子基团,如磺酸基。磺酸基的引入赋予了聚合物离子传导性,但会使聚合物的力学性能变差,对燃料(如甲醇)的阻隔性下降。解决这一问题的方法很多,将磺化聚合物与不含离子基团的普通聚合物共混是其中一种有效方法,因为共混物会结合两种聚合物的优点,同时制备共混物的常用方法——熔融共混法是一种成本低、易规模化放大的方法。

聚乙烯主链为饱和的非极性亚甲基链,不具有传导离子的能力,但具有优异的燃料阻隔性。最简单快捷的办法就是将具有质子传导功能的聚合物与聚乙烯共混,利用不同的聚合物界面间的相互作用,制备具有优异离子传导和燃料阻隔性能的质子交换膜。苯乙烯-(乙烯-1-丁烯)-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)是一种更常见的商业化热塑性弹性体,其中的苯乙烯链段可通过磺化反应引入磺酸基团,提供离子通道^[26-28]。因此,磺化SEBS膜是一种具有微相分离结构的质子交换膜,其生产成本低于Nafion膜。但与Nafion膜相似,其甲醇透过率高,限制了在甲醇燃料电池中的应用。高密度聚乙烯(PE-HD)是非极性聚合物,具有高度结晶性,对甲醇等极性溶剂的透过率低,因此将PE-HD与磺化SEBS共混,可将两者的优异性能结合起来。Mokrini等^[29]通过将PE-HD和SEBS熔融共混挤出的方法制备了PE-HD/SEBS共混物膜,再将共混物膜浸入到含有氯磺酸的1,2-二氯乙烷溶液中进行磺化得到PE-HD/磺化SEBS共混物膜。通过调控氯磺酸的浓度可以调控膜的磺化度,从而调控其质子传

导率。聚乙烯的引入,不仅提高了膜的甲醇透过率,还提高了膜的力学性能,降低了膜的吸水率和膨胀率,同时在100%相对湿度下,膜的电导率为4.5 mS/cm,且成本低,使其在甲醇燃料电池中具有潜在的应用价值。

Schauer等^[30]采用磺化聚(1,4-苯硫醚)与线型低密度聚乙烯(PE-LLD)共混可制备非均相离子质子交换膜。聚苯硫醚是一类性能优异的工程塑料,在200℃以下几乎不溶于任何有机溶剂,且具有优异的热稳定性,其熔点在260℃以上。聚苯硫醚上的苯环很容易被磺化,得到磺化聚苯硫醚。将磺化聚苯硫醚研磨得到小颗粒后与PE-LLD混合,在150℃热压可得到含有磺化聚苯硫醚颗粒的复合薄膜。磺化聚苯硫醚颗粒质量分数达到66%以上时,其电导率与Nafion117膜相当。

2 含磺酸基侧基的聚乙烯基质子交换膜

由于聚乙烯与含离子基团的聚合物相容性差,在两者共混时很难实现均匀混合,对材料的性能有一定影响。将能够传导离子的基团引入到聚乙烯大分子链上,可有效解决混合均匀性差的问题。然而,由于聚乙烯分子链由化学惰性的亚甲基组成,通过聚乙烯官能化反应合成官能化聚乙烯需要苛刻的反应条件,所能引入的极性基团也有限^[31-33]。乙烯与极性单体共聚是制备官能化聚乙烯最直接、最经济的方法,后过渡金属催化剂对极性基团的耐受能力好,广泛应用于催化乙烯与极性单体的共聚中,合成了众多极性基团官能化聚乙烯;用前过渡金属催化剂催化乙烯与烷基铝保护的极性单体共聚也可制备极性基团官能化聚乙烯,但相关聚合物还未见直接应用于质子交换膜的报道^[34-38]。目前报道的用于制备质子交换膜的磺化聚乙烯基聚合物主要通过聚乙烯磺化法、非环二烯烃易位聚合(ADMET)和含可反应官能团磺化法3种方法制备。

2.1 磺化聚乙烯基质子交换膜

聚乙烯直接磺化是制备磺化聚乙烯最直接的方法,然而聚乙烯是非极性的,很难与极性的磺化试剂反应。Kazimi等^[39]以低密度聚乙烯(PE-LD)膜为原料,以环己烷和乙醇为溶剂,通过溶胀的PE-LD与硫酸反应,可制备磺化聚乙烯。研究表明,通过磺化反应,PE-LD的接触角可降低30℃,然而,并没有对得到的磺化聚乙烯进行电导率的测试。Kumar等^[40]将PE-LD膜放入不同浓度的氯磺酸中反应不同的时间(7~30 min),可得到磺化度为9%~15%的磺化聚乙烯,但该类聚合物的离子交换当量低(0.0056~0.048 meq/g),电导率也较低($2.67 \times 10^{-5} \sim 4.74 \times 10^{-3}$ S/m)。增加氯磺酸浓度会导致交联反应的发生,不利于高质量膜的制备。由于反应过程为非均相反应,反应的可控性差。

近年来,聚合物合成技术的进步促进了微观结构可控

聚合物的制备,通过控制聚合物的微观结构和构型,可控制聚合物的聚集态结构,从而可调控聚合物材料的构型。Seita 等^[41]和 Gaines 等^[42]将这一思路用于质子交换膜材料的设计中。他们采用 ADMET 及后续的加氢还原反应(如图 1 所示),成功合成了结构可控的官能化聚乙烯。通过采用含不同碳原子数的官能化非环二烯烃,可调控官能化聚乙烯的官能化度以及两个官能团之间的间隔长度,从而调控官能化聚乙烯的自组装行为和聚集态结构。当每 21 个碳原子中含有一个磺酸基团时,有利于大分子链折叠形成聚乙烯结晶和紧密的亲水层,如图 1 所示。聚乙烯的结晶结构有利于提高磺化聚乙烯的质子传导率。在相对湿度低于 60% 时,该磺化聚乙烯膜的电导率低于 Nafion117,当相对湿度大于 60% 时,该磺化聚乙烯膜的电导率与 Nafion117 膜相当,甚至超过 Nafion117 膜。在 40℃ 且相对湿度为 100% 时,该类官能化聚乙烯的电导率可达到 100 mS/cm^[43]。因此,制备具有特定结构的磺化聚乙烯,调控磺化聚乙烯的相分离结构,构筑离子通道,有利于设计合成具有优异性能的质子交换膜。然而,采用 ADMET 的方法需要设计合成具有特殊结构的单体,合成步骤多,成本高;此外,需要对生成的含双键的聚合物加氢还原,工艺流程复杂,不利于大规模生产。

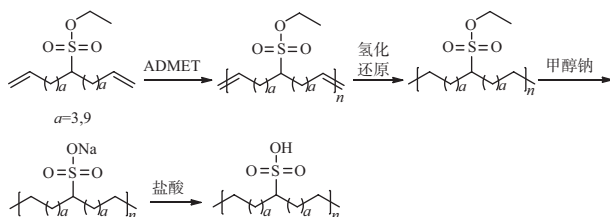


图 1 基于 ADMET 合成结构明确的磺化聚乙烯

2.2 磺化乙烯基共聚物基质子交换膜

含可反应基团官能化法是合成官能化聚乙烯的一种主要方法。以乙烯和含可反应取代基的烯烃共聚得到含可反应基团的乙烯基共聚物,然后对可反应基团进行官能化反应即可得到官能化乙烯基共聚物。由于可反应基团不参与共聚反应,对催化剂不影响,该方法可采用常规的催化剂;可反应基团具有一定活性,与饱和的亚甲基相比,更容易进行官能化反应,比直接对聚乙烯进行官能化反应更容易。例如, Daigle 等^[44]以钨配合物为催化剂,催化乙烯、降冰片烯与羧基取代降冰片烯共聚的方法制备含有这三种结构单元的共聚物,先在三乙胺(Et_3N)存在下与甲磺酰氯(MsCl)反应,再与硫代乙酸钾(CH_3COSK)反应将共聚物侧链的羟基转化为硫代乙酸酯基,再将侧链含有硫代乙酸酯基的聚合物铺膜,放入到双氧水(H_2O_2)溶液中进行氧化,这种绿色环保的氧化方式可将硫代乙酸酯基完全转化为磺酸基,从而得到侧链含有磺酸基的乙烯-降冰片烯共聚物,如图 2 所示。这种方法制备的膜在 110℃ 仍具有一定的电导率(0.5 mS/cm)和低吸

水率(18.4%)。但是,目前报道的这种方法合成步骤多,有待进一步改进。

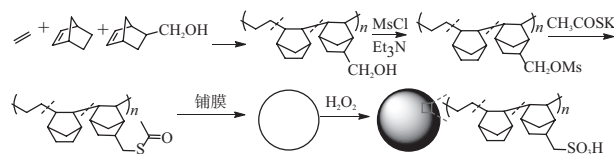


图 2 乙烯与含可反应取代基的极性单体共聚法合成磺化聚乙烯

3 聚乙烯-磺化聚合物接枝共聚物基质子交换膜

对没有离子导通能力的惰性聚合物基体进行改性是合成离子交换膜的一种重要方法。将具有离子导通能力的聚合物或其前体接枝到惰性聚合物上是合成手段之一,从而得到主链为惰性聚合物、支链具有离子交换功能的接枝共聚物。合成接枝共聚物的方法主要有三种:“接入接枝”、“接出接枝”和大分子单体法。在离子交换膜的合成中,主要采用“接出接枝”和“接入接枝”法。以下将根据所接的支链的不同进行讨论。

3.1 聚乙烯-磺化聚苯乙烯接枝共聚物基质子交换膜

聚苯乙烯中含有大量苯环,极易进行磺化改性得到具有离子传导功能的磺化聚苯乙烯。磺化聚苯乙烯是最早用于燃料电池质子交换膜中的聚合物。然而,磺化聚苯乙烯吸水率高、力学性能差、化学稳定性差,已被 Nafion 膜替代。但由于磺化聚苯乙烯制备简单、成本低,越来越多的研究者通过各种方法将其与其它聚合物共聚来提高其性能,将磺化聚苯乙烯接枝到聚乙烯上是其中一种方法。将磺化聚苯乙烯接枝到聚乙烯链上可制备具有离子传导功能的聚乙烯-磺化聚苯乙烯接枝共聚物(PE-g-SPS)离子交换膜。常用的方法为“接出接枝”法,该方法通过辐射使聚乙烯主链产生自由基,引发苯乙烯聚合,得到聚乙烯-聚苯乙烯接枝共聚物,再对聚苯乙烯进行磺化得到 PE-g-SPS 质子交换膜,如图 3 所示。

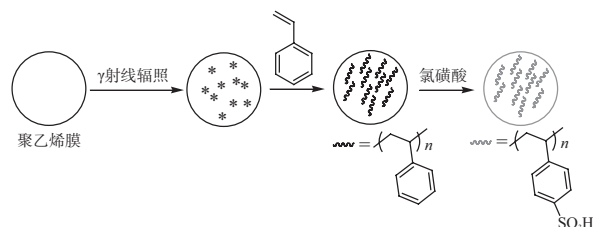


图 3 PE-g-SPS 质子交换膜的制备方法

Sherazi 等^[45]以超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)粉末为原料,通过 γ 射线辐照,在 PE-UHMW 的表面产生自由基,产生的自由基引发苯乙烯聚合,得到 PE-UHMW-聚苯乙烯接枝共聚物(PE-UHMW-g-PS),通过调控接枝反应过程中苯乙烯单体的浓度可调控聚苯乙烯的接枝率(12%~44%)。得到的 PE-UHMW-g-PS 通过热压成膜后,浸入到含有氯磺酸的二氯乙烷溶液中反应 5 h 便可得到 PE-UHMW-磺

化聚苯乙烯接枝共聚物(PE-UHMW-g-SPS)。通过对不同聚苯乙烯接枝率的PE-UHMW-g-SPS质子交换膜的电导率和甲醇透过率研究表明,在相同测试条件下(35℃,100%相对湿度),接枝率为12%~22%的PE-UHMW-g-SPS膜的电导率为16~61 mS/cm,接枝率为33%~44%的PE-UHMW-g-SPS膜的电导率为111~140 mS/cm,达到甚至超过Nafion117膜在相同条件下的电导率。而PE-UHMW-g-SPS膜的甲醇透过率为 $4.86 \times 10^{-8} \sim 1.45 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$,低于Nafion117膜。在PE-UHMW-g-SPS膜的电导率与Nafion117膜的电导率相当的情况下,PE-UHMW-g-SPS膜的甲醇透过率仅为Nafion117的1/5,说明PE-UHMW-g-SPS膜的选择性(电导率与甲醇透过率的比值)优于Nafion117膜。

以普通聚乙烯膜为原料也可进行接枝反应^[46-48], Safronova等^[46]在接枝聚苯乙烯时向苯乙烯单体中掺入少量二乙烯基苯交联剂,在接枝反应过程中形成交联网络,磺化后可得到交联型PE-g-SPS质子交换膜,发现在低相对湿度下(30%),膜的吸水率和电导率随着交联度的增加而增加,而甲醇透过率随着交联度的增加而降低,说明交联有利于提高膜的选择性。除了 γ 射线辐照,还可以使用紫外线辐照的方法使聚乙烯产生自由基,引发苯乙烯单体聚合^[48-49]。

3.2 聚乙烯-磺化聚丙烯酸酯接枝共聚物质子交换膜

在聚乙烯分子链上,通过辐射产生的自由基还可以引发其它单体,如丙烯酸酯类单体进行自由基聚合反应,在聚乙烯分子链上接枝聚丙烯酸酯。Abd-Elmabood等^[50]以PE-LD膜为原料,通过辐射在PE-LD膜表面产生自由基,引发甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)与丙烯酸甲酯(MA)共聚反应,在PE-LD表面接枝GMA与MA的共聚物。通过亚硫酸钠与聚甲基丙烯酸缩水甘油酯链段中的环氧基团反应,得到磺化的接枝链段,如图4所示。根据接枝率的不同,采用上述聚合物制备的质子交换膜的离子交换容量(IEC)在0.89~2.08 meq/g范围内,电导率为0.84~28 mS/cm。

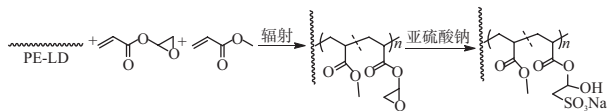


图4 聚乙烯-磺化聚丙烯酸酯接枝共聚物的合成方法

3.3 聚乙烯-磺化聚砜接枝共聚物质子交换膜

虽然通过自由基聚合接枝改性聚乙烯能够方便地得到相应的燃料电池膜,但能够接枝的聚合物种类有限,得到的聚合物结构复杂,同时还存在交联的问题,可控性差。另一种制备磺化聚合物接枝聚乙烯的方法是“接入接枝”法。先合成官能化聚乙烯和具有质子传导能力的聚合物,再通过两种聚合物间的官能团反应,将具有质子传导能力的聚合物接枝到聚乙烯链上,制备结构明确、可控的聚乙烯基接枝

共聚物质子交换膜。Kim等^[51]以甲基铝氧烷(MAO)为助催化剂,采用限制几何构型茂金属催化剂(CGC cat.)催化乙烯与对甲基苯乙烯共聚得到含有对甲基苯乙烯结构单元的乙烯基共聚物,其中,对甲基苯乙烯结构单元中的甲基属于可反应性基团,容易进行官能化反应,通过过氧化苯甲酰(BPO)与N-溴代琥珀酰亚胺(NBS)的作用,可将对甲基苯乙烯结构单元中的甲基转化为苄基溴,从而得到侧链含有苄基溴官能团的聚乙烯。通过4,4'-二氯苯基砜与含两个酚羟基的化合物反应制备双端羟基聚芳砜。进一步通过末端含羟基的聚芳砜与侧链含有苄基溴官能团的聚乙烯的“接入接枝”反应,得到聚乙烯-聚芳砜接枝共聚物(聚乙烯-g-磺化聚芳砜)。将该共聚物制成20~40 μm的薄膜后,通过非均相磺化反应得到聚乙烯-g-磺化聚芳砜质子交换膜,如图5所示。接枝的磺化聚芳砜结构单元即使在高IEC(IEC>3 mmol/g)情况下吸水率也不是很高。与Nafion117膜相比,聚乙烯-g-磺化聚芳砜质子交换膜的电导率高,可达到160 mS/cm。此外,聚乙烯-g-磺化聚芳砜质子交换膜的甲醇透过率只是Nafion117的13%,远低于Nafion117^[51-52]。采用该方法制备的质子交换膜综合性能优异,未来有可能将不同磺化聚合物接枝到聚乙烯上,甚至通过改变聚乙烯的主链结构,在聚乙烯链的不同位置接枝磺化聚合物,设计具有不同拓扑结构的聚乙烯-磺化聚合物接枝共聚物。进一步通过控制聚乙烯-磺化聚合物接枝共聚物的拓扑结构,控制共聚物的微观相分离结构,控制离子通道,得到性能更优异的聚乙烯基质子交换膜。

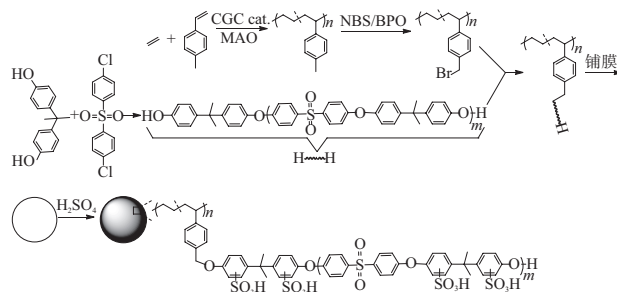


图5 聚乙烯-g-磺化聚芳砜质子交换膜的合成方法

4 结语

列举了3类聚乙烯基质子交换膜,介绍了其合成方法和基本性能。从合成方法上来讲,辐照接枝的方法简便、成本低,但得到的聚合物结构可控性差,微观序列结构不清晰。采用ADMET制备磺化聚乙烯,可精确控制产品的微观序列结构,调控其相分离,从而调控离子通道,但需要用多步有机反应合成单体,大规模应用存在困难。官能化聚乙烯与磺化聚合物接枝的方法具有一定普适性,可以通过配位聚合制备不同官能化的聚乙烯,再与不同的磺化聚合物接枝,制备不同性能的新型质子交换膜。聚乙烯骨架可提高质子交换膜

的柔性、力学性能和化学稳定性。因此,未来聚乙烯基质子交换膜具有广阔的发展前景。笔者认为未来关于聚乙烯基质子交换膜的研究还可以从以下 3 个方面寻求更进一步的突破:(1) 开发新型催化剂催化乙烯与极性单体共聚,尤其是催化乙烯与含质子传导功能的极性基团的单体共聚,直接制备可用于质子交换膜的官能化聚乙烯;(2) 合成不同结构的聚乙烯基质子交换膜,研究聚乙烯结构、磺化聚合物结构对质子交换膜性能的影响规律,找出具有商业化前景的聚乙烯基质子交换膜结构;(3) 为了促进聚乙烯基质子交换膜的商业化应用,需要进一步开发高效、低成本和规模化的合成方法。总之,开发具有电导率高、燃料阻隔性好、成本低、加工性好、温度和湿度稳定性好等优异综合性能的质子交换膜是未来学术界和产业界共同的目标。

参考文献

- [1] James L, et al. Fuel cell systems explained[M]. 2nd ed. Hoboken, NJ:Johns Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [2] Apanel G, et al. Fuel Cells Bulletin, 2004, 2004(11):12–17.
- [3] Kreuer K D. Journal of Membrane Science, 2001, 185(1):29–39.
- [4] Roy A, et al. Journal of Polymer Science B:Polymer Physics, 2006, 44(16):2 226–2 239.
- [5] Bae B, et al. Angewandte Chemie International Edition, 2010, 49(2):317–320.
- [6] Lee H S, et al. Polymer, 2008, 49(3):715–723.
- [7] Choi J, et al. Journal of Membrane Science, 2008, 310(1–2):384–392.
- [8] Kim D H, et al. Journal of Membrane Science, 2007, 299(1–2):19–27.
- [9] Kim H K, et al. Macromolecular Research, 2011, 19(9):928–942.
- [10] Dai J M, et al. Science China Materials, 2022, 65(2):273–297.
- [11] Peckham T J, et al. Advanced Materials, 2010, 22(44):4 667–4 690.
- [12] Rikukawa M, et al. Progress in Polymer Science, 2000, 25(10):1 463–1 502.
- [13] Bose S, et al. Progress in Polymer Science, 2011, 36(6):813–843.
- [14] Li Q F, et al. Progress in Polymer Science, 2009, 34(5):449–477.
- [15] Haider R, et al. Chemical Society Reviews, 2021, 50(2):1 138–1 187.
- [16] Liu L, et al. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(2):123–133.
- [17] Matanovic I, et al. Chemistry of Materials, 2019, 31(11):4 195–4 204.
- [18] Hugar K M, et al. ACS Energy Letters, 2019, 4(7):1 681–1 686.
- [19] You W, et al. PNAS, 2019, 116(20):9 729–9 734.
- [20] You W, et al. Macromolecules, 2018, 51(8):3 212–3 218.
- [21] Kostalik IV H A, et al. Macromolecules, 2010, 43(17):7 147–7 150.
- [22] Robertson N J, et al. Journal of American Chemistry Society, 2010, 132(10):3 400–3 404.
- [23] Noonan K J T, et al. Journal of American Chemistry Society, 2012, 134(44):18 161–18 164.
- [24] Zhu T Y, et al. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(9):2 388–2 392.
- [25] Zhu T Y, et al. Journal of American Chemistry Society, 2020, 142(2):1 083–1 089.
- [26] Mokrini A, et al. Solid State Ionics, 2004, 166(3–4):375–381.
- [27] Mokrini A, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 83(2):367–377.
- [28] Mokrini A, et al. Polymer, 2001, 42(21):8 817–8 824.
- [29] Mokrini A, et al. Journal of Membrane Science, 2008, 325(2):749–757.
- [30] Schauer J, et al. Journal of Membrane Science, 2005, 250(1–2):151–157.
- [31] Chen L Y, et al. Chem, 2021, 7(1):137–145.
- [32] Boena N K, et al. Chemical Society Reviews, 2005, 34(3):267–275.
- [33] Bunesco A, et al. ACS Central Science, 2017, 3(8):895–903.
- [34] Birajdar R S, et al. European Polymer Journal, 2021, 143. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.110183.
- [35] Mu H L, et al. Coordination Chemistry Reviews, 2021, 435. DOI: 10.1016/j.ccr.2021.213802.
- [36] Liu G X, et al. Chinese Journal of Chemistry, 2020, 38(11):1 445–1 448.
- [37] Tan C, et al. Angewandte Chemie International Edition, 2019, 58(22):7 192–7 200.
- [38] Keyes A, et al. Angewandte Chemie International Edition, 2019, 58(36):12 370–12 391.
- [39] Kazimi M R, et al. Polymer Engineering & Science, 2014, 54(11): 2 522–2 530.
- [40] Kumar V, et al. RSC Advances, 2017, 7(35):21 890–21 900.
- [41] Seita M E, et al. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132(23):8 165–8 174.
- [42] Gaines T W, et al. Macromolecular Chemistry Physics, 2018, 219(11). DOI:10.1002/macp.201700634.
- [43] Trigg E B, et al. Nature Materials, 2018, 17(8):725–731.
- [44] Daigle J C, et al. Journal of Polymer Science, Part A:Polymer Chemistry, 2013, 51(12):2 669–2 676.
- [45] Sherazi T A, et al. Journal of Power Sources, 2010, 195(1):21–29.
- [46] Safronova E Y, et al. Journal of Membrane Science, 2016, 515: 196–203.
- [47] Golubenko D V, et al. Materials Chemistry and Physics, 2017, 197:192–199.
- [48] Sultana S, et al. Advanced Materials Research, 2010, 123–125: 1 091–1 094.
- [49] Choi Y J, et al. Journal of Membrane Science, 2003, 223(1–2): 201–215.
- [50] Abd-Elmabood H M, et al. Environmental Technology, 2022, 43(3):311–326.
- [51] Kim H K, et al. Macromolecules, 2012, 45(5):2 460–2 470.
- [52] Kim H K, et al. Membranes, 2015, 5(4):875–887.