

· 综述 ·

## 基于甲基乙烯基醚-马来酸酐共聚物的应用研究进展

王霞\*

(中石化(北京)化工研究院有限公司 北京 100013)

**摘要:** 甲基乙烯基醚-马来酸酐共聚物(PMVEMA)作为一种水溶性高分子聚合物,表现出典型的电解质聚合物特性,且具有灵活的结构修饰性、良好的黏附性和生物相容性等优点,因此,其在高附加值领域的研究中已被广泛利用。本文介绍了PMVEMA的结构与性能关系、工业化合成方法及当前面临的问题,并着重从PMVEMA的结构修饰与功能化作用出发,系统综述了其近年来在电池、环保和生物医用领域中的研究进展,具体包括锂离子电池、钙钛矿太阳能电池、废水处理、农药降解、生物成像、药物载体、皮肤贴片及抗菌材料。在此基础上,结合不同领域,进一步分析了PMVEMA产业化面临的关键挑战,并探讨了未来发展方向与策略,以期为PMVEMA的产业化研究与应用提供参考和启示。

**关键词:** 甲基乙烯基醚-马来酸酐共聚物; 聚合物电解质; 黏附性; 生物医学应用

## Research Progress on Application of Poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride)

WANG Xia\*

(Sinopec (Beijing) Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100013)

**Abstract:** Poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride) (PMVEMA), a water-soluble polymer, exhibits the typical characteristics of electrolyte polymers and offers advantages such as an easily modifiable structure, excellent adhesive properties, and biocompatibility. Therefore, PMVEMA has been widely utilized in studies of high value-added fields. This article introduces the structure-property relationships, industrial synthesis methods, and current problems associated with PMVEMA. Moreover, focusing on the structural modification and functional role of PMVEMA, this review systematically reviewed its research progress in the fields of batteries, environmental protection, and biomedical applications in recent years, including lithium-ion batteries, perovskite solar cells, wastewater treatment, pesticide degradation, bioimaging, drug delivery, skin patches, and antibacterial materials. On this basis, combined with various fields, this review further explores the current challenges and future development directions of PMVEMA in industrial applications. We hope that this review can provide a reference and inspiration for the industrialization study and application of PMVEMA.

**Keywords:** Poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride); Polymer electrolyte; Adhesive property; Biomedical applications

引用: 王霞. 基于甲基乙烯基醚-马来酸酐共聚物的应用研究进展. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.045

**Citation:** Wang, X. Research progress on application of poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride). *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.045

2026-01-27 收稿, 2026-04-02 录用

\* 通信联系人: 王霞, E-mail: wangxia.bjhy@sinopec.com

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.045

甲基乙烯基醚-马来酸酐共聚物(PMVEMA),是通过甲基乙烯基醚(MVE)和马来酸酐(MA)的自由基交替共聚得到的一种水溶性聚合物,具有良好的化学稳定性,其在多个领域的应用价值已引起广泛关注。PMVEMA的MA单元可反应开环生成羧基(-COOH),进而使聚合物表现出酸碱缓冲、螯合、黏附及成膜等多重性能,这使其在口腔护理产品中具有重要作用<sup>[1-3]</sup>。PMVEMA一方面可黏结在牙齿表面形成保护膜,并通过与口腔中固有菌群分泌的酶的活性部位处金属离子进行螯合来抑制酶对焦磷酸盐(活性物质)的降解,防止生成牙渍及牙结石;另一方面可通过相互作用结合难溶活性物质,提高其溶解性及在口腔的存留时间,进而提高其吸收率和生物利用度。此外,MA单元可与胺、醇等亲核试剂发生反应,因此PMVEMA能够用于制备交联或接枝衍生物<sup>[4,5]</sup>。与此同时,PMVEMA还具有良好的生物相容性,已被研究应用于药物递送等生物医用领域<sup>[6-8]</sup>。

目前,PMVEMA的工业化合成分方法主要是溶液聚合和本体聚合<sup>[9]</sup>。在PMVEMA的溶液聚合中,通常利用二甲苯、丙酮、环己烷、乙酸乙酯等作为有机溶剂,因此,该工艺会产生大量有机废物,且需要更多能源对共聚物进行干燥处理,这易增加能耗并造成环境污染。此外,单体可能向溶剂发生链转移反应,这导致生成分子量低的共聚物。本体聚合工艺降低了有机溶剂的使用,但在聚合反应热以及共聚物分子量分布的控制方面并不具有优势。因此,科研人员当前主要围绕以下问题进行研究:(1)有机溶剂的选择及产物中溶剂的脱除;(2)制备纯度高的共聚物并降低分子量分布宽度;(3)优化反应工艺条件,降低生产成本。

PMVEMA最大的生产厂商是美国的亚什兰,他们先将MVE和MA共聚成一系列分子量不同的聚合物,然后将其分别和水、醇或钙/钠离子反应,使MA单元开环得到具有不同化学结构的产品,这有利于改变共聚物的物理性质以适应不同的工业应用需求。相比之下,国内对PMVEMA的研究起步较晚。

本文综述了近年来PMVEMA的应用研究进展,从聚合物结构修饰、性能及用途等方面出发,重点介绍了其在电池、环保和生物医用领域的相关研究(图1),并对PMVEMA多元化应用的发展

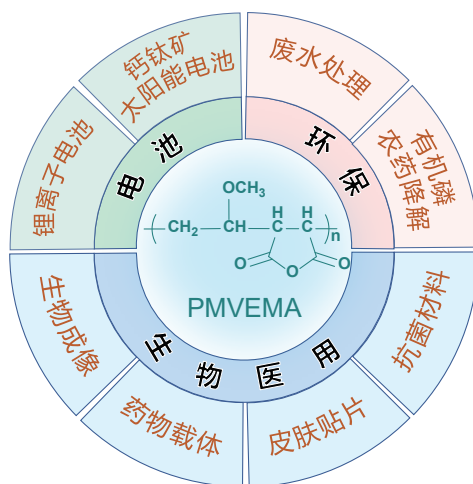


图1 共聚物PMVEMA的应用领域

Figure 1 The application fields of the copolymer PMVEMA

趋势进行探讨和展望,以期为推动PMVEMA进一步的产业化提供参考价值。

## 1 电池领域

### 1.1 锂离子电池

固体聚合物电解质由于其柔性、机械性能好且外形易加工等特性,已成为锂电池领域的研究热点<sup>[10]</sup>。作为一种新型的高性能聚合物电解质材料,PMVEMA的MA结构单元可以通过酰胺化或酯化反应接枝不同的功能性侧链,或者与锂盐通过氢键及金属配体配位来形成超分子相互作用,进而提升锂电池的电化学性能<sup>[11,12]</sup>。此外,鉴于其优异的黏附性,无毒且环境友好等优点,PMVEMA可替代聚偏氟乙烯(PVDF)在锂离子电池黏合剂中发挥作用<sup>[13]</sup>。

Cui等<sup>[14]</sup>开发了由细菌纤维素支撑的PMVEMA作为多功能聚合物电解质(PMM-CPE)的LiCoO<sub>2</sub>/锂金属电池。研究表明,PMM-CPE具有更高的离子导电率和更宽的电化学窗口,在提升锂电池的电氧化抗性、锂沉积/剥离可逆性以及循环稳定性等方面发挥了关键作用。Lian等<sup>[15]</sup>以PMVEMA和新型单离子锂化聚乙烯醇缩甲醛(LiPVFM)/双(三氟甲基磺酰亚胺)锂(LiTFSI)复合盐(双Li)为基础(图2),采用超分子策略制备了一种新型的盐掺聚合物固体电解质(PISE)。LiPVFM的羟基与PMVEMA中MA开环反应生成的羧基形成较强的氢键,同时,富含碳基的PMVEMA能够改善LiTFSI

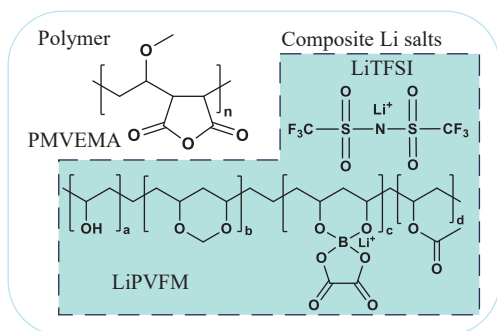


图2 盐掺杂聚合物固体电解质(PISE)中PMVEMA和复合锂盐的结构<sup>[15]</sup> (2021 Wiley 版权许可)

**Figure 2** The structure of PMVEMA, LiPVFM and LiTFSI in “polymer-in-salt” solid electrolyte (PISE) (Reprinted with permission from Ref. [15]; Copyright (2021) Wiley-VCH)

的配位性能。因此, PMVEMA 和双Li的互溶性使PISE具有高离子电导率、宽电化学窗口、高锂离子迁移数及与电极的界面相容性良好等优点。因此, 基于PISE的 $\text{LiCoO}_2\|\text{Li}$  固体电池具有优异的高电压循环性能和倍率性能,  $\text{LiNi}_{0.7}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2\|\text{Li}$  软包电池即使在恶劣的条件下也表现出显著的安全性和灵活性。

尽管黏合剂在电极组成中所占比例较小, 其在锂离子电池中依然扮演着至关重要的角色, 对电池的整体性能、稳定性和寿命具有显著影响<sup>[16~18]</sup>。基于PMVEMA的分散能力和强结合力, Zhang等<sup>[19]</sup>利用PMVEMA作为硅阳极和硫阴极的双功能水性黏合剂, 进而促进电极实现双重功能。一方面, PMVEMA作为黏合剂使得电极具有高度均匀性, 这有助于电荷快速转移和提高倍率性能; 另一方面, PMVEMA和电极间的强相互作用为电极提供了坚固框架, 增强电极机械性能, 这有利于确保其结构完整性并提高循环稳定性。因此, 通过在硅阳极和硫阴极中使用PMVEMA黏合剂, 锂离子电池展示了出色的倍率性能和长期循环稳定性。

## 1.2 钙钛矿太阳能电池

钙钛矿薄膜中由表面和晶界缺陷引起的非辐射复合损耗严重限制了其功率转换效率和稳定性, 因此开发具有多种官能团、良好疏水性及灵活聚合物链结构的多功能添加剂为增强钙钛矿太阳能电池的性能提供了实用策略<sup>[20~22]</sup>。Du等<sup>[23]</sup>将PMVEMA作为多功能聚合物添加剂加入钙钛矿前驱体溶液中, 通过共聚物中羰基基团( $\text{C}=\text{O}$ )与 $\text{Pb}^{2+}$ 的配位相互作用, 提高了薄膜的结晶度、抑制

载流子复合, 并降低陷阱态密度, 从而实现了薄膜缺陷的有效钝化, 进而提升钙钛矿薄膜质量和器件性能。在常温条件下, 经PMVEMA改性的刚性和柔性器件的光电转换效率分别为22.12%和20.05%。值得注意的是, PMVEMA中的疏水基团有助于增强钙钛矿薄膜的环境稳定性, 其柔性的聚合物链显著提高器件的机械柔韧性。

## 2 环保领域

### 2.1 废水处理

PMVEMA具有良好的亲水性和强的黏附性, 基于其开发的膜过滤技术潜力可观, 引入PMVEMA能够提升膜对水的亲和力、降低污染倾向并提高分离效率, 进而优化膜在水过滤应用中的性能。Li等<sup>[24]</sup>制备了一种经聚乙烯亚胺(PEI)改性的聚偏氟乙烯膜, 并进一步利用聚合物PMVEMA进行修饰, 以增强膜的亲水性和抗污性能。Genzer等<sup>[25]</sup>利用PMVEMA中的MA基团与PEI中的伯胺反应, 制得PEI/PMVEMA水凝胶。该水凝胶在广泛pH条件下表现出长期稳定性, 能够选择性高效吸附废水中的无机磷酸盐并使其脱附再生, 从而实现磷酸盐的可持续再利用。

Rangasamy等<sup>[26]</sup>将PMVEMA掺入聚乳酸(PLA)聚合物基质中, 开发了一种环保型生物聚合物复合超滤膜。PMVEMA和PLA两者的结合显著改变了膜的结构形态、功能特性和过滤性能, 并使其表现出更好的亲水性。PLA/PMVEMA (20 wt%)膜的分子量截留值高达66.5 kDa, 平均孔径为9.14 nm, 适用于多种超滤任务。而且, PLA/PMVEMA膜表现出更高的孔隙率和含水量, 显著提升对纯水的通量以及氯酚类化合物的溶质截留率, 其中PLA/PMVEMA (20 wt%)膜对废水中化学污染物五氯苯酚和二氯苯酚的截留率分别达到44.64%和51.85%。同时, 该膜经12次过滤循环后, 仍具有良好的稳定性和再生性能。

### 2.2 有机磷农药降解

有机磷酸化合物是农药中重要的杀虫剂类别, 其对土壤和地下水的污染给人类带来了严重的健康风险<sup>[27]</sup>, 催化降解有机磷酸的功能化聚合物体系已逐步被研究发展。Genzer等<sup>[28]</sup>将PMVEMA作为有机载体, 利用羟胺对其进行化学修饰。制得带有异羟肟酸基团的凝胶(PMVEMA-HA), 该凝胶能够高效将4-硝基苯基磷酸二甲酯

(DMNP)降解为4-硝基苯酚和二甲基磷酸(图3),在降解有机磷农药方面显示出活性。

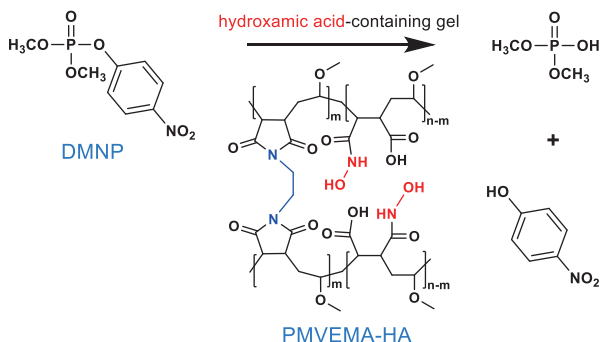


图3 PMVEMA-HA凝胶降解有机磷酸盐示意图<sup>[28]</sup> (2021 American Chemical Society 版权许可)

**Figure 3** Scheme of PMVEMA-HA gels on decomposing organophosphate (Reprinted with permission from Ref. [28]; Copyright (2021) American Chemical Society)

### 3 生物医用领域

#### 3.1 生物成像

PMVEMA因低生物毒性、良好的水溶性、化学稳定性和生物相容性,以及MA基团的高反应性在生物医用领域具有重要意义,并在生物成像中展现潜力。Shapoval等<sup>[29]</sup>用PMVEMA在核心壳体上转换纳米颗粒表面进行修饰,进而提高其长期稳定性,用于深层组织成像。Liu等<sup>[30]</sup>利用PMVEMA中的MA单元和化合物4-(2-氨基乙基)

吗啉(AML)中的氨基反应,开发了一类不含大 $\pi$ 共轭结构的非传统有机发光聚合物(PMVEMA/AML)材料。随着AML比例增加,聚合物发光颜色随之发生变化,且发光强度可随pH进行调节。同时,PMVEMA/AML材料能够靶向溶酶体,并特异性识别镁离子(图4),这为进一步研究非传统发光材料提供了参考。

#### 3.2 药物载体

PMVEMA对人体无毒无害,具有良好的pH响应性、黏膜黏附性,这使其在药物递送体系研究中的重要应用价值<sup>[31,32]</sup>。PMVEMA的pH响应性源于结构中的MA基团<sup>[33,34]</sup>,MA经开环后为羧基,在胃部酸性条件下(pH=0.9~3.5)<sup>[35,36]</sup>,羧基团质子化导致链段收缩和药物释放受限;而药物递送系统到达肠道中性环境(pH=6~8)时<sup>[36]</sup>,基团去质子化,促进载体溶胀和药物释放,这使聚合物PMVEMA适用于肠道药物输送。PMVEMA通常可通过3种途径进行载药,一是直接与带有氨基(-NH<sub>2</sub>)或羟基(-OH)等亲核基团的药物发生反应;二是用于构建多功能药物递送纳米载体;三是通过与其他聚合物形成环境敏感型水凝胶进行药物递送。

Horák等<sup>[37]</sup>利用PMVEMA修饰上转换纳米粒子,提高其在生理环境中的功能、胶体和化学稳定性,并进一步通过酯化反应将光敏剂替莫唑胺连接到PMVEMA上,以利用近红外光驱动光

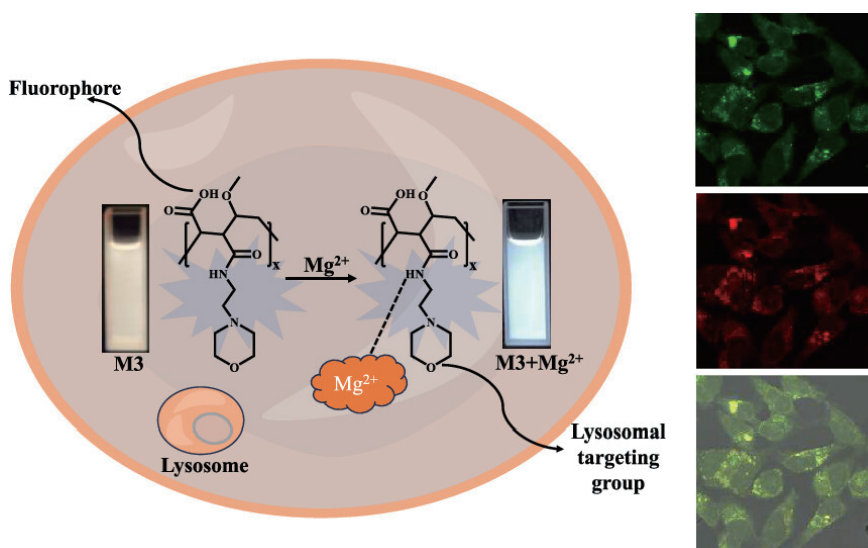


图4 PMVEMA/AML材料用于细胞荧光成像和Mg<sup>2+</sup>检测示意图<sup>[30]</sup> (2024 American Chemical Society 版权许可)

**Figure 4** Schematic diagram of polymers PMVEMA/AML for cell imaging and Mg<sup>2+</sup> detection (Reprinted with permission from Ref. [30]; Copyright (2024) American Chemical Society)

动力治疗并最终实现肿瘤抑制。Sakar等<sup>[38]</sup>将带有氨基的抗癫痫药普瑞巴林(PRG)通过化学反应连接至PMVEMA,得到聚合物-药物递送系统,提高了PRG在不同pH值和模拟体液中的稳定性,从而避免其快速释放,促进增强药物疗效并降低给药频率。

Mateo等<sup>[39]</sup>利用PMVEMA和3种基于苄的阳离子共轭聚电解质制备了荧光纳米粒子,并进一步负载抗肿瘤药物阿霉素(DOX)进行递送并在生理pH条件下诱导释放。Jian等<sup>[40]</sup>利用PMVEMA构建纳米载体,进而用于递送抗肿瘤药物卡巴他赛(CTX)并提高其口服给药效果。首先,PMVEMA和D- $\alpha$ -生育酚聚乙二醇1000琥珀酸酯(TPGS)通过开环反应得到PMVEMA-TPGS共聚物,其将PMVEMA的生物黏附性和TPGS的P-糖蛋白(P-gp)抑制作用相结合。然后,将PMVEMA-TPGS共聚物对聚乳酸-羟基乙酸共聚物/单硬脂酸甘油酯杂化纳米颗粒进行修饰,制备生物黏附纳米载体(PTNPs),并进一步负载药物CTX,构建得到药物递送系统,体内药代动力学研究表明通过PTNPs的高效负载,CTX的口服生物利用度显著提高。

环境敏感型水凝胶是一类能够响应外界环境刺激(如pH、温度、酶、光等)并发生物理或化学性质变化的智能材料<sup>[41,42]</sup>,其独特的响应性使其在药物递送领域展现出巨大潜力,可实现药物的靶向释放、精准控释并减少副作用<sup>[43,44]</sup>。PMVEMA是一种可用于制备水凝胶的重要交替共聚物,Gamazo等<sup>[45]</sup>将PMVEMA和泊洛沙姆407(F127)

结合来制备热敏性水凝胶,用于药物的可控递送。Castillo-Castro等<sup>[46]</sup>通过高压灭菌工艺合成了一种基于热敏性聚合物聚乙烯基甲醚的新型半互穿聚合物网络(s-IPN),其由聚乙烯醇(PVA)和PMVEMA的交联三维结构制备而成。s-IPN的溶胀动力学受pH值和温度影响,当其负载化疗药物5-氟尿嘧啶时,可实现药物的双重响应释放。

### 3.3 皮肤贴片

MA基团的存在赋予了PMVEMA良好的黏附力,应用于成膜剂、口腔护理产品和生物黏附材料等领域<sup>[47-49]</sup>。Patrojanasophon等<sup>[50]</sup>利用N-乙烯吡咯烷酮-丙烯酸共聚物(PVPAA)和PMVEMA开发了一种新型的水性复合药物-黏合剂的压敏胶贴片(图5)。首先,这些聚合物通过与金属配位形成交联结构,之后将酮洛芬掺入其中,制备得到贴片。负载酮洛芬的PVPAA/PMVEMA贴片表现出与商业贴片相当的渗透通量,在人体研究中,其对皮肤的黏附性能优于商业贴片,且未引起皮肤刺激。因此,聚合物PMVEMA可能在制备复合药物-黏合剂的皮肤贴片方面具有潜力。

Jiang等<sup>[51]</sup>同样利用PMVEMA的良好黏附性和生物相容性,将其纳入柔性可穿戴电极的设计中。该电极(PPMA)以聚(3,4-乙烯基二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)作为导电层,并通过与聚合物PMVEMA间的双重氢键作用增强薄膜的内聚力,从而提高结构的均匀稳定性(图6)。更重要的是,PMVEMA固有的羧基能和皮肤表面的氨基形成稳定的氢键,且该作用在汗液吸收过

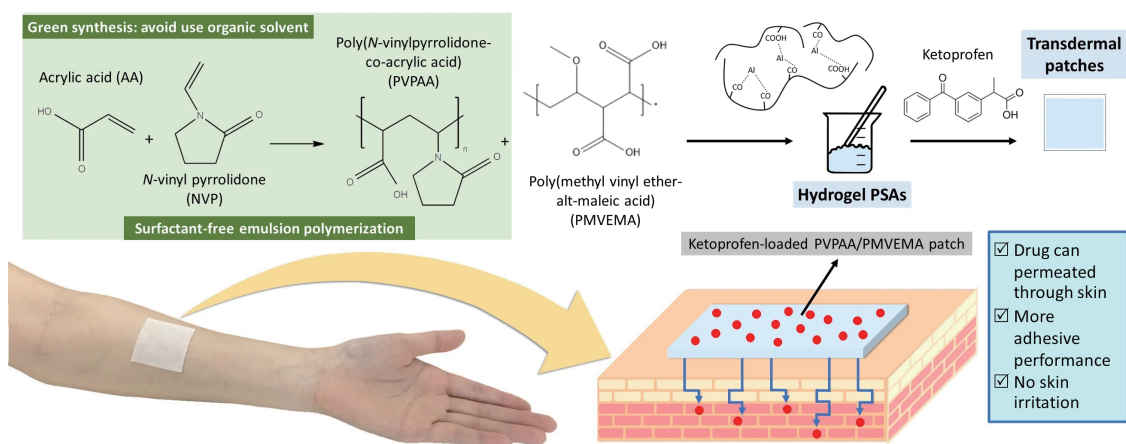


图5 PVPAA/PMVEMA皮肤贴片的制备和载药示意图<sup>[50]</sup>(2021 MDPI 版权许可)

Figure 5 Scheme of the preparation and drug loading of PVPAA/PMVEMA patch (Reprinted with permission from Ref. [50]; Copyright (2021) MDPI)

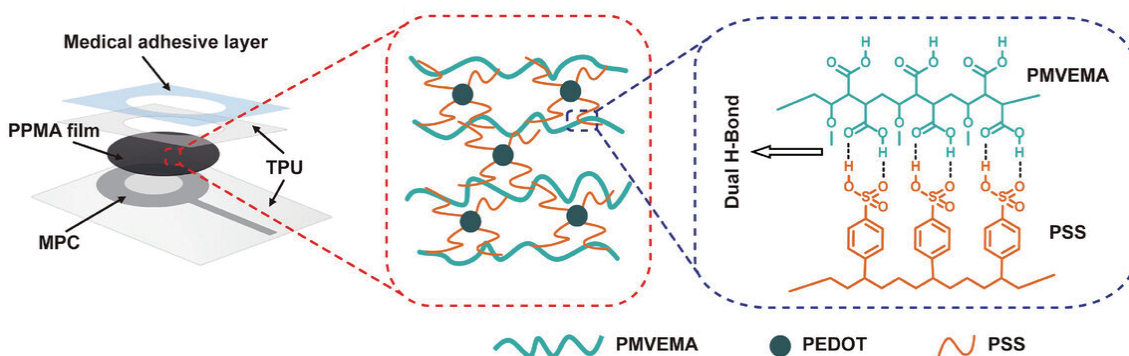


图6 PPMA贴片的多尺度结构示意图<sup>[51]</sup> (2025 Wiley 版权许可)

**Figure 6** Schematic diagram of the multi-scale structure of PPMA patch (Reprinted with permission from Ref. [51]; Copyright (2025) Wiley-VCH)

程中进一步增强,使得PPMA表现出远优于传统电极的附着性能,从而实现高出汗率下的有效黏附和稳定生理监测。此外,PMVEMA的引入还进一步增强了PPMA薄膜的剥离强度和拉伸性能并降低其杨氏模量,这对于实际使用过程中电极的皮肤顺应性和稳定信号传输具有重要意义。基于此,研究人员利用PPMA材料制造了各种形状和尺寸的贴片,当其与无线采集和传输模块结合使用时,可实现生理信号的实时数据可视化以及后续处理,这在远程和智能医疗领域展现出应用潜力。

### 3.4 抗菌材料

PMVEMA中的MA基团经水解后得到羧基,其能与带有羟基的化合物或聚合物通过分子间

氢键作用形成水凝胶,进而展现出良好的溶胀能力、力学性能、黏附性和抗菌活性等特性<sup>[52,53]</sup>。Khutoryanskiy等<sup>[54]</sup>通过将PVA和PMVEMA的水溶液进行加压灭菌,合成了具有良好机械性能的水凝胶,而且,这些水凝胶能够有效抑制革兰氏阳性菌——金黄色葡萄球菌的生长。Zeng等<sup>[55]</sup>向PMVEMA/PVA体系中引入单宁酸(TA),进而三者水溶液可通过简单共混快速制得PPTA水凝胶,其形成过程是由TA的邻苯二酚基团、PVA的羟基以及PMVEMA的羧基基团之间的氢键相互作用所驱动的(图7)。PPTA水凝胶具有优异的黏附性,并可用于制备高机械强度的纤维。而且,PPTA水凝胶对大肠杆菌(革兰氏阴性菌)和耐甲氧西林金黄色葡萄球菌表现出良好的抗菌特性。

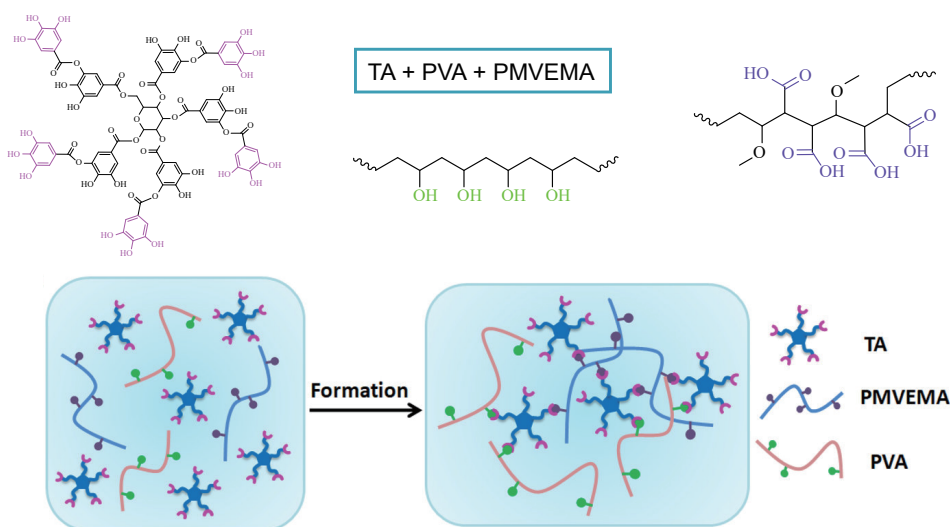


图7 具有抗菌特性的PMVEMA-PVA-TA (PPTA)水凝胶的形成机制<sup>[55]</sup> (2022 American Chemical Society 版权许可)

**Figure 7** Antibacterial PMVEMA-PVA-TA (PPTA) hydrogel formation mechanism (Reprinted with permission from Ref. [55]; Copyright (2022) American Chemical Society)

## 4 结语

PMVEMA具有良好的化学稳定性和生物相容性、强黏附性和易功能化修饰等优点,在国内外已被产业化,应用于口腔护理产品、义齿稳固剂等。但目前,PMVEMA在电池、环保、生物医用等领域的应用仍处于早期研究阶段,缺乏成功商业化案例,其产业化仍面临多重挑战:(1)在电池领域,尽管可通过对PMVEMA的功能化分子设计提升离子电导率和电化学窗口,但其实际性能仍难以满足锂离子电池的严苛要求。相比之下,PMVEMA应用在电池黏结剂中的产业化更易实现,与商用的油性PVDF黏结剂进行对比,PMVEMA黏结性能良好并无毒,且有利于提高电池的倍率和循环性能;(2)在环保领域,连接PMVEMA的功能材料在吸附、降解速率方面可能难以满足废水处理或土壤修复等对高效、可控降解的要求。且共聚物合成成本较高,没有价格优势,难以取代现有材料;(3)在生物医用领域,PMVEMA由于水解稳定性问题而影响药物的精确释放或医疗器械的长期性能,且PMVEMA的长期毒性、免疫反应及体内的代谢路径仍需系统评估。

基于上述挑战,为推动PMVEMA材料从实验室研究向规模化应用的转化,未来发展需进一步聚焦合成工艺和分子结构优化、高性能化和功能化材料设计及产业链整合:(1)采用可控聚合技术(如活性自由基聚合)改善PMVEMA的分子量分布和结构均一性,并确保生产中批次间一致性;(2)通过化学改性(如侧链修饰)或共混复合以增强PMVEMA在不同应用中的作用与性能,提升其竞争力;(3)进一步对PMVEMA开展多学科交叉研究(如毒理学、人工智能、电子工程),推动PMVEMA在柔性电子皮肤贴片、智能透皮给药系统等新兴领域的应用转化。综上,PMVEMA因优异性能在高附加值应用领域展现出可观的前景,今后随着技术的进步与创新,基于PMVEMA功能化材料的性能将进一步提升,有望迎来更广阔的发展空间。

## 参考文献

- 1 Andrews, G. P.; Laverty, T.; Jones, D. S. Mucoadhesive polymeric polyogels designed for the treatment of periodontal and related diseases of the oral cavity. *Polymers*, **2024**, 16(5), 589.
- 2 Jones, D. S.; Laverty, T. P.; Morris, C.; Andrews, G. P. Statistical modelling of the rheological and mucoadhesive properties of aqueous poly(methyl-vinylether-co-maleic acid) networks: redefining biomedical applications and the relationship between viscoelasticity and mucoadhesion. *Colloids Surf. B Biointerfaces*, **2016**, 144, 125–134.
- 3 Smart, J. D. Recent developments in the use of bioadhesive systems for delivery of drugs to the oral cavity. *Crit. Rev. Ther. Drug Carrier Syst*, **2004**, 21(4), 319–344.
- 4 Xu, J. F.; Genzer, J.; Efimenko, K. Phosphate recovery and selective desorption with a PEI/PMVEMA hydrogel in a column study. *ACS Appl. Eng. Mater.*, **2026**, 4(1), 225–233.
- 5 Corrêa, T. O.; Tavares, W. S.; Sousa, F. F. O. Ellagic acid-loaded poly-methyl vinyl ether-co-maleic anhydride (Gantrez®) - gelatin sponges for wound bandaging: preparation, characterization and *ex-vivo* antibiofilm activity. *J. Drug Deliv. Sci. Technol*, **2024**, 102, 106403.
- 6 Pawlaczyk, M.; Schroeder, G. Dual-polymeric resin based on poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride) and pamam dendrimer as a versatile supramolecular adsorbent. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2021**, 3(2), 956–967.
- 7 Mira, A.; Mateo, C. R.; Mallavia, R.; Falco, A. Poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic acid) and ethyl monoester as building polymers for drug-loadable electrospun nanofibers. *Sci. Rep.*, **2017**, 7, 17205.
- 8 Badía-Hernández, P. V.; Carrió, J. M.; Fuentes-Baile, M.; Losada-Echeberría, M.; Díaz-Puertas, R.; Mira, A.; Saceda, M.; García-Morales, P.; Mallavia, R. Electrospun PMVEMA nanofibers developed as a fast-release platform for antineoplastic drugs tested in glioblastoma primary cultures. *Pharmaceutics*, **2025**, 17(9), 1172.
- 9 Zhu, Y.; Geng, B.; Xu, A. H.; Zhang, L. Q.; Zhang, S. X. An alternating copolymer of maleic anhydride and ethyl vinyl ether: synthesis in supercritical carbon dioxide, characterization, and properties. *Des. Monomers Polym.*, **2013**, 16(3), 283–290.
- 10 Xia, S. X.; Wu, X. S.; Zhang, Z. C.; Cui, Y.; Liu, W. Practical challenges and future perspectives of all-solid-state lithium-metal batteries. *Chem*, **2019**, 5(4), 753–785.
- 11 Tang, B.; Zhou, Q.; Du, X. F.; Zhang, J. J.; Zhang, H. R.; Zou, Z. Y.; Zhou, X. H.; Cui, G. L. Poly(maleic anhydride) copolymers-based polymer electrolytes

- enlighten highly safe and high-energy-density lithium metal batteries: advances and prospects. *Nano Sel.*, **2020**, 1(1), 59–78.
- 12 Yang, J. F.; Zhang, M.; Chen, Z.; Du, X. F.; Huang, S. Q.; Tang, B.; Dong, T. T.; Wu, H.; Yu, Z.; Zhang, J. J.; Cui, G. L. Flame-retardant quasi-solid polymer electrolyte enabling sodium metal batteries with highly safe characteristic and superior cycling stability. *Nano Res.*, **2019**, 12(9), 2230–2237.
- 13 Valvo, M.; Liivat, A.; Eriksson, H.; Tai, C. W.; Edström, K. Iron-based electrodes meet water-based preparation, fluorine-free electrolyte and binder: a chance for more sustainable lithium-ion batteries. *ChemSusChem*, **2017**, 10(11), 2431–2448.
- 14 Dong, T. T.; Zhang, J. J.; Xu, G. J.; Chai, J. C.; Du, H. P.; Wang, L. L.; Wen, H. J.; Zang, X.; Du, A. B.; Jia, Q. M.; Zhou, X. H.; Cui, G. L. A multifunctional polymer electrolyte enables ultra-long cycle-life in a high-voltage lithium metal battery. *Energy Environ. Sci.*, **2018**, 11(5), 1197–1203.
- 15 Li, H.; Du, Y. F.; Wu, X. M.; Xie, J. Y.; Lian, F. Developing “polymer-in-salt” high voltage electrolyte based on composite lithium salts for solid-state Li metal batteries. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(41), 2170307.
- 16 Chen, H.; Ling, M.; Hencz, L.; Ling, H. Y.; Li, G. R.; Lin, Z.; Liu, G.; Zhang, S. Q. Exploring chemical, mechanical, and electrical functionalities of binders for advanced energy-storage devices. *Chem. Rev.*, **2018**, 118(18), 8936–8982.
- 17 Gu, X. X.; Yang, Z. G.; Qiao, S.; Shao, C. B.; Ren, X. L.; Yang, J. J. Exploiting methylated amino resin as a multifunctional binder for high-performance lithium-sulfur batteries. *Rare Met.*, **2021**, 40(3), 529–536.
- 18 Zhao, Y.; Liang, Z.; Kang, Y. Q.; Zhou, Y. N.; Li, Y. X.; He, X. M.; Wang, L.; Mai, W. C.; Wang, X. S.; Zhou, G. M.; Wang, J. X.; Li, J. G.; Tavajohi, N.; Li, B. H. Rational design of functional binder systems for high-energy lithium-based rechargeable batteries. *Energy Storage Mater.*, **2021**, 35, 353–377.
- 19 Chen, H.; Wu, Z. Z.; Su, Z.; Hencz, L.; Chen, S.; Yan, C.; Zhang, S. Q. A hydrophilic poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic acid) polymer as a green, universal, and dual-functional binder for high-performance silicon anode and sulfur cathode. *J. Energy Chem.*, **2021**, 62, 127–135.
- 20 Chen, B.; Rudd, P. N.; Yang, S.; Yuan, Y. B.; Huang, J. S. Imperfections and their passivation in halide perovskite solar cells. *Chem. Soc. Rev.*, **2019**, 48(14), 3842–3867.
- 21 Li, B.; Zhang, Q. Q.; Zhang, S.; Chase, Z.; Chidanguro, T.; Hunter Davis, A.; Simon, Y. C.; Gu, X. D.; Zheng, W. W.; Pradhan, N.; Dai, Q. L. Spontaneously supersaturated nucleation strategy for high reproducible and efficient perovskite solar cells. *Chem. Eng. J.*, **2021**, 405, 126998.
- 22 Cao, F. R.; Wang, M.; Li, L. Pushing the certified efficiency of inverted perovskite solar cells beyond 24%: a review. *Rev. Mater. Res.*, **2025**, 1(2), 100020.
- 23 Sun, J.; Chen, L.; Liu, Z. P.; Gu, Z. W.; Song, L. X.; Du, P. F. Carbonyl-functionalized polymer for synergistic regulation of perovskite crystal quality and interface stability. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(14), 9276–9285.
- 24 Wang, Z. L.; Feng, G. Y.; Yan, Z. G.; Li, S. P.; Xu, M.; Wang, C. W.; Li, Y. B. Improving the hydrophilicity and antifouling performance of PVDF membranes *via* PEI amination and further poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride) modification. *React. Funct. Polym.*, **2023**, 189, 105610.
- 25 Xu, J. F.; Efimenko, K.; Gorman, C. B.; Yingling, Y. G.; Castellano, L.; Genzer, J. Functional hydrogels for selective phosphate removal from water and release on demand. *Langmuir*, **2025**, 41(23), 14753–14764.
- 26 George, J.; Rajagopalan, V.; Kumar, P. S.; Purushothaman, M.; Perumal, P.; Vaidyanathan, V. K.; Rangasamy, G. Fabrication and characterization of poly(methyl vinyl ether maleic anhydride) blended poly(lactic acid) ultrafiltration membrane with upgraded antifouling and separation performance. *Process. Saf. Environ. Prot.*, **2024**, 191, 2237–2246.
- 27 Chen, Y. Organophosphate-induced brain damage: mechanisms, neuropsychiatric and neurological consequences, and potential therapeutic strategies. *NeuroToxicology*, **2012**, 33(3), 391–400.
- 28 Zboray, S.; Efimenko, K.; Jones, J. L.; Genzer, J. Functional gels containing hydroxamic acid degrade organophosphates in aqueous solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2021**, 60(24), 8799–8811.
- 29 Shapoval, O.; Ježek, P.; Horák, D. Liraglutide-conjugated poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic acid)-coated core-shell upconversion nanoparticles for theranostics of diabetes. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2025**, 17(30), 42863–42876.
- 30 He, M. Y.; Liu, R.; Li, X. L.; Zhang, G.; Lao, G. X.; Guo, S.; Liu, Y. L. Nonconventional luminogens based on poly(methyl vinyl ether maleic anhydride) and 4-(2-aminoethyl)morpholine for Mg<sup>2+</sup> detection and targeting lysosomes. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2024**, 6(23), 14895–14904.
- 31 Uglea, C. V.; Panaitescu, L.; Spridon, D.; Ursu, D.; Popa, I.; Ottenbrite, R. M. Biological activity of maleic anhydride copolymers. I. Biocompatibility and antitumoural effects of maleic anhydride - vinyl acetate, maleic anhydride-methyl methacrylate and maleic

- anhydride- styrene copolymers. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.*, **1997**, 8(4), 269–280.
- 32 Arbós, P.; Arangoa, M. A.; Campanero, M. A.; Irache, J. M. Quantification of the bioadhesive properties of protein-coated PVM/MA nanoparticles. *Int. J. Pharm.*, **2002**, 242(1-2), 129–136.
- 33 Henry, S. M.; El-Sayed, M. E. H.; Pirie, C. M.; Hoffman, A. S.; Stayton, P. S. pH-responsive poly(styrene-*alt*-maleic anhydride) alkylamide copolymers for intracellular drug delivery. *Biomacromolecules*, **2006**, 7(8), 2407–2414.
- 34 Rahmani, A.; Salmanipour, S.; Nami, Y.; Mousavi, H. Z.; Salehi, R. pH-responsive star-shaped poly-( $\epsilon$ -caprolactone)-*co*-poly maleic anhydride micelles for synergistic breast cancer combination chemotherapy. *React. Funct. Polym.*, **2023**, 193, 105773.
- 35 Kataoka, M.; Nakanishi, R.; Umesaki, M.; Kobayashi, M.; Minami, K.; Higashino, H.; Yamaguchi, S.; Yamashita, S. An enteric polymer mitigates the effects of gastric pH on oral absorption of poorly soluble weak acid drugs from supersaturable formulations: a case study with dantrolene. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, **2020**, 155, 29–36.
- 36 Zhao, C. K.; Yang, J. L.; Chen, M. F.; Chen, W. J.; Yang, X. Y.; Ye, H.; Wang, L. Y.; Wang, Y.; Shi, J. J.; Yue, F. X.; Ma, X. Synthetic lignin-derived therapeutic nano reagent as intestinal pH-sensitive drug carriers capable of bypassing the gastric acid environment for colitis treatment. *ACS Nano*, **2023**, 17(1), 811–824.
- 37 Shapoval, O.; Větvicka, D.; Patsula, V.; Engstová, H.; Kočková, O.; Konefař, M.; Kabešová, M.; Horák, D. Temoporfin-conjugated upconversion nanoparticles for NIR-induced photodynamic therapy: studies with pancreatic adenocarcinoma cells *in vitro* and *in vivo*. *Pharmaceutics*, **2023**, 15(12), 2694.
- 38 Cakiral, K.; Sakar, D. Modification of poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride) with pregabalin drug active substance *via* ring opening polymerization of anhydride ring in/noncatalyst media. *Polym. Bull.*, **2023**, 80(7), 7687–7714.
- 39 Rubio-Camacho, M.; Martínez-Tomé, M. J.; Mira, A.; Mallavia, R.; Mateo, C. R. Formation of multicolor nanogels based on cationic polyfluorenes and poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic monoethyl ester): potential use as pH-responsive fluorescent drug carriers. *Int. J. Mol. Sci.*, **2021**, 22(17), 9607.
- 40 Ren, T. Y.; Zheng, X. H.; Bai, R. X.; Yang, Y. H.; Jian, L. Y. Bioadhesive poly(methyl vinyl ether-*co*-maleic anhydride)-TPGS copolymer modified PLGA/lipid hybrid nanoparticles for improving intestinal absorption of cabazitaxel. *Int. J. Pharm.*, **2022**, 611, 121301.
- 41 Guo, J. H.; Luo, Z. Q.; Wang, F. Y.; Gu, H. C.; Li, M. L. Responsive hydrogel microfibers for biomedical engineering. *Smart Med.*, **2022**, 1(1), e20220003.
- 42 Fang, Z. Z.; Chen, P.; Ji, Q.; Yan, C.; Gong, A. H. Stimuli-responsive hydrogel for disease therapy. *Polym. Bull.*, **2024**, 81(3), 1981–2000.
- 43 Tian, B. R.; Liu, J. Y. Smart stimuli-responsive chitosan hydrogel for drug delivery: a review. *Int. J. Biol. Macromol.*, **2023**, 235, 123902.
- 44 Chatterjee, S.; Hui, P. C. Review of applications and future prospects of stimuli-responsive hydrogel based on thermo-responsive biopolymers in drug delivery systems. *Polymers*, **2021**, 13(13), 2086.
- 45 Pastor, Y.; Ting, I.; Martínez, A. L.; Irache, J. M.; Gamazo, C. Intranasal delivery system of bacterial antigen using thermosensitive hydrogels based on a Pluronic-Gantrez conjugate. *Int. J. Pharm.*, **2020**, 579, 119154.
- 46 García-Verdugo, K. F.; Ramírez-Irigoyen, A. J.; Castillo-Ortega, M.; Rodríguez-Félix, D. E.; Quiroz-Castillo, J. M.; Tánori-Córdova, J.; Rodríguez-Félix, F.; Ledezma-Pérez, A.; del Castillo-Castro, T. A pH/temperature-sensitive s-*ipn* based on poly(vinyl alcohol), poly(vinyl methyl ether-*alt*-maleic acid) and poly(vinyl methyl ether) prepared by autoclaving. *Macromol. Res.*, **2022**, 30(6), 353–364.
- 47 Hu, X. Q.; Wang, C.; Huang, J.; Yan, Y. H.; Liao, X. Q.; Li, Y.; Li, L. Self-adhesive epidermal bioelectrodes for long-term electrophysiological monitoring and emotion recognition. *Adv. Mater. Technol.*, **2025**, 10(10), 2401800.
- 48 Saepang, K.; Li, S. K.; Chantasart, D. Passive and iontophoretic transport of pramipexole dihydrochloride across human skin microchannels created by microneedles *in vitro*. *Int. J. Pharm.*, **2021**, 609, 121092.
- 49 Hu, X. Q.; Liu, C. D.; Wang, C.; Han, L.; Wu, Q. C.; Wang, Q.; Cheng, J.; Li, Y.; Li, L. Hybrid ion-electron conducting electrodes for long-term electrophysiological monitoring and sign language detection. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 522, 167812.
- 50 Arunprasert, K.; Pornpitchanarong, C.; Rojanarata, T.; Ngawhirunpat, T.; Opanasopit, P.; Aumklad, P.; Patrojanasophon, P. Development and evaluation of novel water-based drug-in-adhesive patches for the transdermal delivery of ketoprofen. *Pharmaceutics*, **2021**, 13(6), 789.
- 51 Liu, Y.; Chen, S. B.; Shi, L. C.; Yang, S. J.; Zhang, J. R.; Liu, C. Q.; Cheng, J. H.; Shi, J. J.; Shen, C. X.; Gu, D. F.; Jiang, X. Y. Water-enhanced adhesive interface for high-quality physiological signal monitoring in skin-device

- integration. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(12), e16396.
- 52 Larrañeta, E.; Barturen, L.; Ervine, M.; Donnelly, R. F. Hydrogels based on poly(methyl vinyl ether-*co*-maleic acid) and Tween 85 for sustained delivery of hydrophobic drugs. *Int. J. Pharm.*, **2018**, 538(1-2), 147–158.
- 53 Larrañeta, E.; Domínguez-Robles, J.; Coogan, M.; Heaney, E.; Stewart, S. A.; Thakur, R. R. S.; Donnelly, R. F. Poly(methyl vinyl ether-*co*-maleic acid) hydrogels containing cyclodextrins and Tween 85 for potential application as hydrophobic drug delivery systems. *Macromol. Res.*, **2019**, 27(4), 396–403.
- 54 Caló, E.; de Barros, J. M. S.; Fernández-Gutiérrez, M.; San Román, J.; Ballamy, L.; Khutoryanskiy, V. V. Antimicrobial hydrogels based on autoclaved poly(vinyl alcohol) and poly(methyl vinyl ether-*alt*-maleic anhydride) mixtures for wound care applications. *RSC Adv.*, **2016**, 6(60), 55211–55219.
- 55 Gao, Y. F.; Peng, X. W.; Wu, Q. Q.; Yang, D. L.; Wang, W. D.; Peng, Q. Y.; Wang, T.; Wang, J. M.; Liu, J. F.; Zhang, H.; Zeng, H. B. Hydrogen-bonding-driven multifunctional polymer hydrogel networks based on tannic acid. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2022**, 4(3), 1836–1845.