

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.009

基于润湿调控的聚丙烯酸钠新型防火材料

尚佳婧¹, 马辉煌¹, 杨阳², 姚美芹², 杨志亮², 周晓东^{1,3}

(1. 华东理工大学化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237; 2. 山东昊月新材料股份有限公司, 济南 250215;
3. 特种功能高分子材料及相关技术教育部重点实验室, 华东理工大学化工学院, 上海 200237)

摘要: 为克服聚丙烯酸钠(PANa)水凝胶在疏水性植物或建筑物表面难以有效润湿及快速流失, 以至于难以严密覆盖基材, 导致防火性能大幅降低的瓶颈问题, 本文以 Tween 20、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)非离子表面活性剂, 系统构建了一种具有优异润湿与铺展性能的新型复合水凝胶, 该材料可显著增大在疏水性基材上的有效保护面积, 形成均匀、稳定的覆盖层。本研究重点考察了该复合体系在防火应用中, 对低表面能基材的润湿与铺展行为, 对水凝胶的表面张力、接触角以及铺展性能进行了研究, 对实际水源条件下表面活性剂的适用性进行了测试, 阐明了改性水凝胶的协同润湿机制。结果表明, 最优改性体系为混合表面活性剂的体系, 且 Tween 20 和 PVP 物质的量之比为 2:1 时, 可使 PANa 水凝胶的表面张力由 61.69 mN/m 降至 31.37 mN/m。在树叶和聚四氟乙烯表面由不润湿状态转变为润湿状态, 铺展面积均提升约 90%。该体系在自来水和河水自然水源中仍稳定发挥润湿功效, 为提高水凝胶在低表面能基材上的润湿能力提供了一种有效途径。

关键词: 水凝胶; 聚丙烯酸钠; 表面活性剂; 润湿; 防火

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0075-10

Novel fire prevention and extinguishing materials of sodium polyacrylate regulated by wetting

SHANG Jiajing¹, MA Huihuang¹, YANG Yang², YAO Meiqin², YANG Zhiliang², ZHOU Xiaodong^{1,3}

[1. State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Shandong Haoyue New Material Co., Ltd., Jinan 250215, China; 3. Key Laboratory of Specially Functional Polymeric Materials and Related Technology (Ministry of Education), School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China]

Abstract: To overcome the bottleneck associated with sodium polyacrylate (PANa) hydrogels—namely, their difficulty in effectively wetting hydrophobic plant or building surfaces and their rapid runoff, which makes it hard to achieve tight coverage of the substrate and results in a significant reduction in fire prevention and suppression performance. A novel composite hydrogel with excellent wetting and spreading properties was systematically developed using Tween 20 and polyvinylpyrrolidone (PVP) as nonionic surfactants in this study. This material significantly increases the effective protective area on hydrophobic substrates, forming a uniform and stable coating. The wetting and spreading behavior of this composite system on low-surface-energy substrates in fire prevention and suppression applications was focused on. The surface tension, contact angle and spreading performance of the hydrogels were investigated, the suitability of the surfactants under actual water source conditions was tested, and the synergistic wetting mechanism of the modified hydrogels was elucidated. The results show that when the optimal modification system is mixed surfactant and the substance ratio of Tween 20 to PVP is 2:1, the surface tension of PANa hydrogel decrease from 61.69 mN/m to 31.37 mN/m. On leaf and polytetrafluoroethylene surfaces, the system transitions from a non-wetting state to a wetting state, with the spreading area increasing by approximately 90%. This system continues to exhibit stable wetting performance in natural water sources such as tap water and river water, representing an effective approach to enhancing the wetting properties of hydrogels on low-surface-energy substrates.

Keywords: hydrogel; sodium polyacrylate; surfactant; wetting; fire protection

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2024CXGC010403)

通信作者: 周晓东, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为聚合物基复合材料的界面设计与控制以及纤维增强热塑性复合材料的制备与成型技术

收稿日期: 2026-04-27

引用格式: 尚佳婧, 马辉煌, 杨阳, 等. 基于润湿调控的聚丙烯酸钠新型防火材料[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 75–84.

SHANG Jiajing, MA Huihuang, YANG Yang, et al. Novel fire prevention and extinguishing materials based on wetting regulation of sodium polyacrylate[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 75–84.

如今,全球火灾形势日趋严峻,对人类社会与自然生态构成了严重威胁。如2025年的洛杉矶野火至少造成了29人死亡,烧毁了超过20 000 hm² (50 000)英亩的土地,摧毁了众多建筑物^[1-3]。频繁的火灾不仅破坏生态环境,也严重危及人民生命与财产安全^[4-5]。因此,开发高效、环保的新型防火材料已成为当前火灾防治领域的迫切需求。

高吸水树脂水凝胶作为一种具有三维网络结构的功能高分子材料,因其低流动性、高含水率、环保无毒、优异的生物相容性和可调控的物理化学性质,在新型阻燃材料领域受到广泛关注^[6-10]。该类材料能够有效附着于可燃物表面,形成覆盖层,起到隔绝氧气和冷却降温的双重作用。丙烯酸(AA)因分子中富含可形成氢键的羧基,成为合成高吸水树脂的常用单体,赋予材料优异的亲水性和溶胀性能。例如,卢青子^[11]设计了一种聚丙烯酸钠(PANa)复合凝胶,将其用于防治采空区煤自燃、灭火、堵漏风通道等领域。为了提高水凝胶的附着力,Shi等^[12]设计了一种新型灭火自黏水凝胶聚丙烯酸-海藻酸钠-单宁酸(PAA-SA-TA),将其应用于防治矿井煤炭自燃。结果表明,单宁酸(TA)的引入显著提升了单一聚丙烯酸(PAA)水凝胶的自黏性,且其阻燃效率也提高了39.53%。上述研究共同表明,AA是构建高性能吸水树脂材料的重要基础单体。

然而,水凝胶的实际应用在很大程度上受到表面性质的影响,尤其是表面润湿性和黏附性的制约^[13-15]。当水凝胶被喷涂在低表面能基材表面时(如含油污的植物、聚乙烯和防水涂层表面),水凝胶固有的亲水特性与基材的低表面能之间存在显著的不匹配性,导致水凝胶在基材表面的润湿和铺展性差,不能够严密覆盖基材,严重限制了其阻燃性能。因此,对水凝胶进行表面润湿性调控,已成为提升水凝胶功能性和适用性的关键措施。

表面活性剂因其独特的两亲性分子结构(亲水头基与疏水尾链),可以改善水溶液在固体基材上的润湿性。这一特性已在日常洗涤和农药增效等领域得到广泛应用^[16-18]。近年来,研究人员也开始关注水凝胶的表面润湿调控,在隐形眼镜、伤口敷料、传感器和海洋防污等领域开发了多种功能化策略^[19]。其中,添加表面活性剂是一种常见且有效的手段。

表面活性剂主要分为阴离子表面活性剂、阳离

子表面活性剂、两性表面活性剂和非离子表面活性剂。其中,非离子表面活性剂因其出色的化学稳定性、良好的相容性、不易受酸碱及电解质影响等优势,在复杂应用环境中表现出广泛的适用性^[20-21]。将表面活性剂引入水凝胶体系,可以在不改变基材表面能的情况下,降低水凝胶体系的表面张力,减小水凝胶与基材的接触角,以解决水凝胶在低表面能基材表面润湿和铺展性差的问题^[22-23],提高水凝胶的利用率和防灭火效果。

目前,关于表面活性剂在高吸水树脂水凝胶防火应用中对基材的润湿性调控相对较少,特别是在处理含油污的植物、聚乙烯和防水涂层等典型低表面能表面时的系统研究仍显不足。基于此,本研究选用具备优异润湿性能和化学稳定性的非离子表面活性剂聚山梨醇酯20(Tween 20)和具备优异颗粒分散稳定性及良好润湿能力的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)对PANa水凝胶进行功能化修饰,旨在赋予聚PANa水凝胶对含油污植被等低表面能基材优异的润湿铺展能力,并兼顾实际水源条件下的适用性。系统考察了不同表面活性剂体系对水凝胶在低表面能基材上润湿及铺展行为的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PVP:分子量8 000,北京伊诺凯科技有限公司;

Tween 20:分子量1 227,国药集团化学试剂有限公司;

丙烯酸(AA):分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;

N,N-亚甲基双丙烯酰胺(NNMBBA)、十二水合硫酸铝钾:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

过硫酸钾(KPS)、环氧氯丙烷(ECH)、甘油:分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;

无水乙醇:分析纯,上海众何化学有限公司;

氢氧化钠:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

电子分析天平:FA1104,上海东南衡器有限公司;

恒温磁力搅拌器:ZNCL-7,上海大研仪器设备有限公司;

鼓风干燥箱:SK-101,上海圣科仪器设备有限公司;

接触角测量仪:DCAT21,德国 Dataphysics 公司;

扭力天平:JN-B-2500,上海越平科学仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Bruker Vertex 70,德国布鲁克公司。

1.3 试样制备

PANa吸水树脂的制备:根据先前的研究合成 PANa吸水树脂。用30% NaOH溶液在40℃以下中和AA,中和度为90%。在氮气气氛下,将NNMBA溶液和KPS溶液缓慢滴加入烧瓶中,在一定温度下聚合反应2 h,并持续搅拌,得PANa吸水树脂,干燥粉碎后备用。

“核-壳”结构PANa吸水树脂的制备:称取适量PANa吸水树脂粉末,均匀喷洒无水乙醇并不断搅拌,使其充分分散。称取适量十二水合硫酸铝钾、环氧氯丙烷和甘油溶解于去离子水中,制得表面交联剂。将表面交联剂均匀喷洒在PANa吸水树脂粉末表面,放入烘箱在一定温度下静止聚合,进行交联反应后取出切碎,再次放入烘箱烘干并筛分,最后得“核-壳”结构吸水树脂,干燥粉碎备用,命名为PANa。吸水倍率为463 g/g,此时临界凝胶浓度为0.216%。

单一表面活性剂改性水凝胶的制备:将一定量的Tween 20和PVP分别加入到去离子水中搅拌溶解,制得不同单一组分的表面活性剂溶液,随后将0.216 g PANa吸水树脂加入上述去离子水中,在40℃下搅拌30 min,得单一表面活性剂改性水凝胶。所得水凝胶命名为PANa-XP和PANa-X_T,X分别为水凝胶中PVP和Tween 20的质量分数,具体水凝胶样品配方详见表1。

表1 水凝胶的样品配方

Tab. 1 Sample formulation for hydrogel

Samples	g			
	Tween 20 content	PVP content	PANa content	H ₂ O content
PANa	0	0	0.216	99.784
PANa-0.1P	0	0.1	0.216	99.684
PANa-0.3P	0	0.3	0.216	99.484
PANa-0.5P	0	0.5	0.216	99.284
PANa-0.1T	0.1	0	0.216	99.684
PANa-0.3T	0.3	0	0.216	99.484
PANa-0.5T	0.5	0	0.216	99.284
PANa-TP (1:1)	0.5	3.26	0.216	95.024
PANa-TP (2:1)	0.5	1.63	0.216	97.654
PANa-TP (3:1)	0.5	1.09	0.216	98.194

混合表面活性剂改性水凝胶的制备:将Tween 20、PVP以不同物质的量比($n_{\text{Tween 20}}:n_{\text{PVP}}=1:1, 2:1, 3:1$)依次加入到去离子水中,并充分搅拌溶解,随后向其中加入0.216 g PANa吸水树脂,得混合表面活性剂改性水凝胶。得到的水凝胶命名为: PANa-TP(X),X为Tween 20与PVP的物质的量比,具体水凝胶样品配方详见表1。

其他水介质水凝胶的制备:其他水介质(自来水与河水)配制的PANa与PANa-TP(2:1)水凝胶样品配方,见表2。

表2 其他水介质水凝胶的样品配方

Tab. 2 Sample formulations for other aqueous hydrogels

Samples	g				
	Water medium	Tween 20 content	PVP content	PANa content	H ₂ O content
PANa	Tap water	0.0	0.00	0.507	99.493
PANa	River	0.0	0.00	0.536	99.464
PANa-TP (2:1)	Tap water	0.5	1.63	0.507	97.363
PANa-TP (2:1)	River	0.5	1.63	0.536	97.334

1.4 测试与表征

表面张力测试:采用吊片法,通过扭力天平测量水凝胶的表面张力,将铂片完全浸入水凝胶中,调节升降台高度,读取铂片脱离液面时的读数 m ,每个样品至少平行测定三次,并取平均值,按照公式(1)计算表面张力 $\gamma^{[24]}$ 。

$$\gamma = \frac{f}{2(l+d)} \quad (1)$$

式中: f 为铂片正好接触液面时液体作用于铂片的力, $f=mg$, m 为表面张力仪指针指数,单位mg, g 为重力加速度9.8 N/kg; l 为吊片长度,单位mm; d 为吊片宽度,单位mm。

接触角测试:采用接触角测量仪测试不同PANa水凝胶样品在输水基材表面的接触角。

铺展系数计算:由公式(2)及Young氏方程(3)得公式(4),以铺展系数 W_s 作为体系润湿性指标^[24]。

$$W_s = \gamma_{sg} - \gamma_{lg} - \gamma_{sl} \quad (2)$$

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta \quad (3)$$

$$W_s = \gamma_{lg} (\cos \theta - 1) \quad (4)$$

式中: γ_{sg} 、 γ_{lg} 和 γ_{sl} 分别为固气界面张力、液气界面张力和固液界面张力,单位mN/m; θ 为液体在固体表面的接触角,单位(°)。

铺展面积测试:用移液枪吸取100 μ L各水凝胶样品,垂直滴于树叶和经过清洁的聚四氟乙烯板的

中心。等待60 s使其稳定,用Image J软件分析各样品的铺展面积,分析三次及以上并取平均值。

结构表征:将PANa、PANa-0.1P、PANa-0.5T和PANa-TP(2:1)水凝胶在 -80°C 下冷冻干燥,取适量固体样品与KBr混合研磨,压片制样,采用FTIR仪测定波数为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 范围的透过率。

2 结果与讨论

2.1 水凝胶的结构表征

图1为PANa、PANa-0.1P、PANa-0.5T以及PANa-TP(2:1)的FTIR谱图。在 $3\,400$ 、 $2\,930$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 附近,四个样品均出现了明显的吸收峰,分别对应O—H的伸缩振动吸收峰及分子间氢键的缔合吸收、—CH、—CH₂的伸缩振动吸收峰。在 $1\,550\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,410\text{ cm}^{-1}$ 附近,分别对应四个样品中—COO—的不对称和对称伸缩振动吸收峰,表明各样品中PANa的主体骨架结构基本保持完整。在 $1\,650\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,280\text{ cm}^{-1}$ 附近,PANa-0.1P和PANa-TP(2:1)样品出现了C=O和C—N的伸缩振动吸收峰,证明PVP成功引入到复合体系中。在 $1\,100\text{ cm}^{-1}$ 附近,PANa-0.5T和PANa-TP(2:1)样品出现了C—O—C的伸缩振动吸收峰,证明了Tween 20成功引入到复合体系中^[25]。

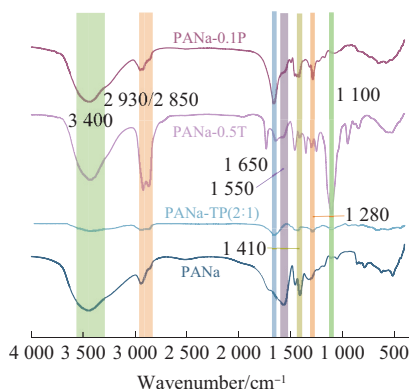


图1 水凝胶的FTIR谱图

Fig. 1 FTIR spectra of hydrogels

此外,分析PANa-TP(2:1)的FTIR谱图发现,谱图中虽同时出现了PVP的酰胺C=O峰及C—N峰($1\,650\text{ cm}^{-1}$ 及 $1\,280\text{ cm}^{-1}$ 附近)、Tween 20的醚键特征峰($1\,100\text{ cm}^{-1}$ 附近),但在 $3\,400$ 、 $2\,930$ 、 $2\,850$ 、 $1\,550\text{ cm}^{-1}$ 区域的峰大小有所降低,说明PVP与Tween 20之间可能存在一定的相互作用力^[26]。

2.2 表面活性剂对水凝胶表面张力的影响

水凝胶的表面张力是调控它在低表面能基材表面自主润湿铺展的关键参数。表面活性剂能够

显著降低水凝胶的表面张力,降低幅度与表面活性剂的浓度及分子结构密切相关^[27]。由于吸水树脂的特殊性,采用离子型表面活性剂会对树脂的吸水性能产生更大的负面效果,因为离子型表面活性剂在水中离解出的离子可能会与树脂中的离子基团发生相互作用,干扰树脂的吸水性能。为了获得更好的润湿铺展效果,采用非离子表面活性剂体系辅助润湿,考察了单一表面活性剂和混合表面活性剂对水凝胶表面张力的作用,结果如图2所示。

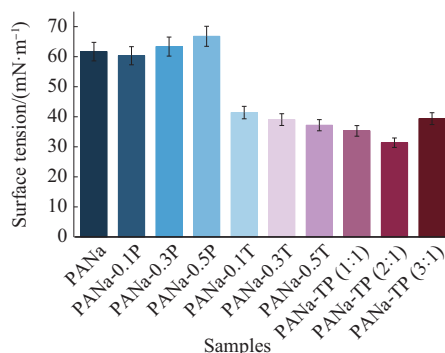


图2 各水凝胶样品的表面张力

Fig. 2 Surface tension of each hydrogel sample

当用混合表面活性剂改性时,水凝胶的表面张力降低效果显著优于单一组分,且在Tween 20:PVP的物质的量比为2:1时达到最优。这可归因于Tween 20与PVP在气-液界面上的协同吸附效应。非离子表面活性剂Tween 20由其亲水头和疏水尾驱动在界面上发生定向吸附,因此水凝胶的表面张力随表面活性剂的引入而降低。同时,PVP虽表面活性较弱,但其中的羰基(C=O)赋予了优异的水溶性,且能与PANa主链形成氢键复合,提供了一定的空间稳定性。

然而,当固定Tween 20的质量分数为0.5%,逐渐减小PVP的添加量时,水凝胶的表面张力较单一Tween 20改性样品并未进一步下降。这表明,不恰当的配比无法形成最优的界面协同效应。可能原因是,混合表面活性剂改性体系未能达到形成稳定混合胶束所需的最佳分子环境,因而无法将界面张力降至最低状态。相反,Tween 20与PVP物质的量比为2:1时,二者分子间相互作用达到最优,能够共同组装成稳定的混合胶束,从而驱动表面张力降至最低。此外,对比单一表面活性剂的影响,Tween 20在水凝胶表面张力调控中表现最为突出,添加量为0.5%时效果最佳。而当添加0.3%和0.5%PVP时,

表面张力有所升高。这是因为PVP并非强效表面活性剂,在PANa水凝胶体系里,过量的PVP与聚合物的复合作用占主导,形成了更紧密复合结构,致使自由水减少、界面结构变“硬”,因而出现表面张力升高的现象,因此PVP添加量为0.1%时效果最佳。

2.3 表面活性剂对水凝胶接触角的影响

水凝胶在低表面能基材上的润湿性能通过平衡接触角直观体现。图3为各水凝胶样品在低表面能树叶和聚四氟乙烯板表面的接触角结果。未添加表面活性剂的PANa水凝胶在低表面能基材上的接触角分别为97.8°和99.2°,处于不润湿状态。相

比之下,经表面活性剂改性的样品接触角显著降低,其中PANa-TP (2:1)水凝胶的润湿性最优,在树叶和聚四氟乙烯上的接触角分别降到60.3°和65.4°,转变为润湿状态。根据Young氏方程,表面张力(γ_{lg})的降低将直接导致接触角减小,从而显著改善润湿性。因此,PANa-TP (2:1)样品展现出最优的润湿性能。此外,表面活性剂Tween 20与PVP的引入为水凝胶提供了额外的亲水基团(如聚氧乙烯醚结构、羟基、酰胺基等),这些亲水基团可有效降低水凝胶的表面张力,增加其与基材的界面吸附能,从而显著改善水凝胶在低表面能基材表面的润湿性。

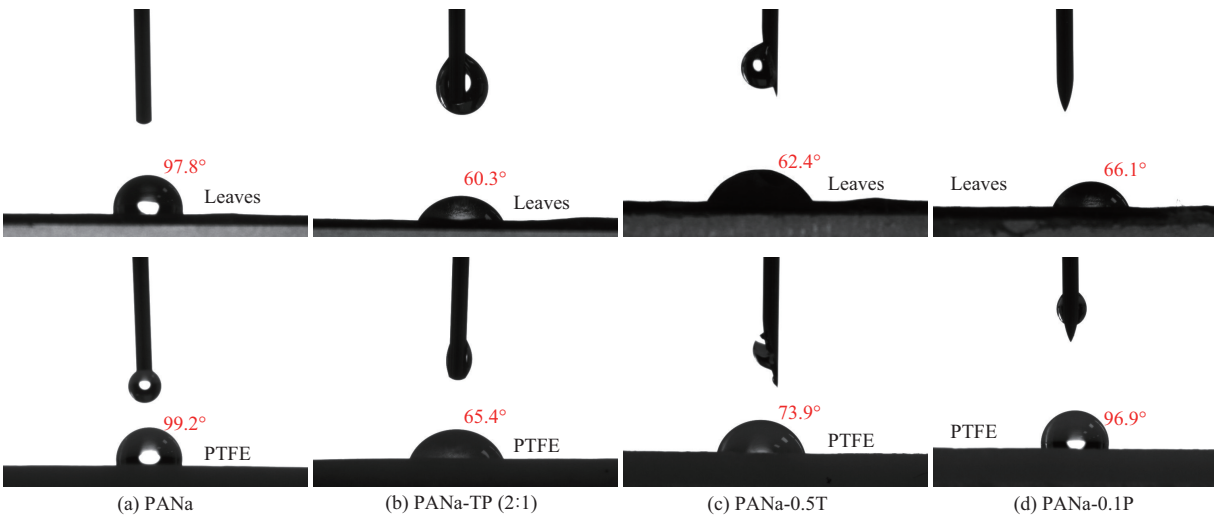


图3 水凝胶在低表面能基材上的接触角

Fig.3 Contact angle of hydrogels on low surface energy substrates

2.4 表面活性剂对水凝胶铺展系数的影响

水凝胶被用于喷洒在植被及建筑物表面以达到阻燃目的时,不仅希望该过程中水凝胶能附着于基材表面,更希望其能自发铺展成均匀的薄膜,覆盖更大的面积,使得保护面积提高,达到更好阻燃效果。铺展过程的实质是以固液界面代替固气界面,同时还伴随气-液界面的扩展^[24]。

对水凝胶在树叶和聚四氟乙烯表面的铺展系数进行了理论计算,计算结果见表3。其中 $W_s < 0$ 说明自发铺展受阻,且负值绝对值越大,润湿性越差^[28]。未添加表面活性剂的PANa水凝胶铺展系数负值很大,润湿性较差,加入表面活性剂后 W_s 绝对值减小,且加入混合表面活性剂后, W_s 绝对值减小更加明显。由前文表面张力和接触角测试结果可知,混合表面活性剂体系($n_{\text{Tween 20}}:n_{\text{PVP}}=2:1$)对水凝胶

表现出最佳的润湿调控效果: PANa水凝胶的表面张力由61.69 mN/m降至31.37 mN/m,其在树叶和PTFE表面的接触角亦显著减小。铺展系数的计算结果与上述测试高度吻合,进一步证实PANa-SC/TP (2:1)水凝胶在低表面能基材表面具有最优的润湿铺展能力,能够有效增大水凝胶覆盖面积。

表3 水凝胶在基材上的铺展系数

Tab.3 Spread coefficient of hydrogel on substrate

Samples	$\gamma_{lg}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	Substrates	$\theta/(\text{°})$	W_s
PANa	61.69	Leaves	97.8	-70.06
		PTFE	99.2	-71.55
PANa-TP (2:1)	31.37	Leaves	60.3	-15.83
		PTFE	65.4	-18.31
PANa-0.5T	37.19	Leaves	62.4	-19.96
		PTFE	73.9	-26.88
PANa-0.1P	60.32	Leaves	66.1	-35.88
		PTFE	96.9	-67.57

Notes: γ_{lg} is surface tension; θ is contact angle; W_s is spread factor.

2.5 表面活性剂对水凝胶铺展面积的影响

基于上述铺展系数的理论分析与计算,为了更加直观地探究表面活性剂对水凝胶铺展性能的影响,进一步采用Image J软件对铺展面积进行了定量分析,结果如图4所示。由图4看出,PANa水凝胶在树叶和PTFE上的铺展面积分别为 36.07 mm^2 和 35.09 mm^2 ,液滴呈明显的球冠状,表明PANa水凝胶在低表面能基材表面的润湿性较差。引入混合表面活性剂后,液滴形态趋于扁平,相较于单一表面活

性剂改性水凝胶体系,PANa-TP (2:1)水凝胶表现出更为优异的铺展性能,铺展面积分别为 69.73 mm^2 和 66.77 mm^2 ,相较于PANa水凝胶均提升约90%,表明表面活性剂的引入降低了水凝胶的表面张力。该实验测试结果进一步验证了混合表面活性剂之间可能存在的协同增效作用。此外,更大的铺展面积意味着水凝胶能够在基材表面形成更完整、更连续的覆盖层,从而更有效地隔绝氧气和热量,最终体现为优异的隔热阻燃性能。

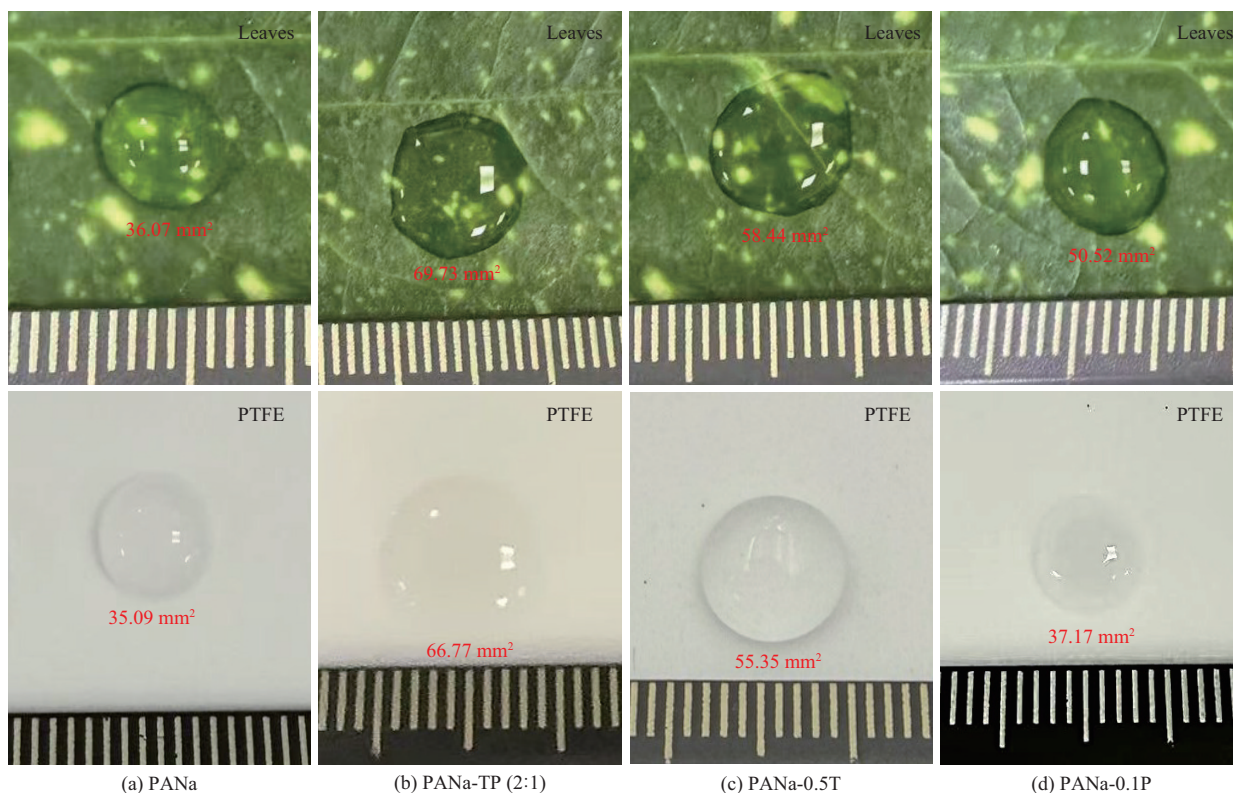


图4 水凝胶在基材上的铺展面积

Fig. 4 Spreading area of hydrogels on substrate

2.6 不同水介质体系的润湿差异

在野外防灭火作业中,水源往往就近取自自来水管网或天然河流。因此,为了探究实际水源差异对水凝胶润湿性能的影响及表面活性剂的适用性,本研究在前述去离子水体系的研究基础上,进一步探究了以其他水介质(自来水、河水)配制的PANa和PANa-TP (2:1)水凝胶在树叶和聚四氟乙烯板表面的润湿情况。图5为用自来水与河水分别配制的PANa和PANa-TP (2:1)水凝胶的表面张力测试结果。由图5可知,PANa水凝胶的表面张力分别为 62.14 mN/m 和 64.28 mN/m ,较去离子水体系均有所上升;PANa-TP (2:1)水凝胶的表面张力分别为

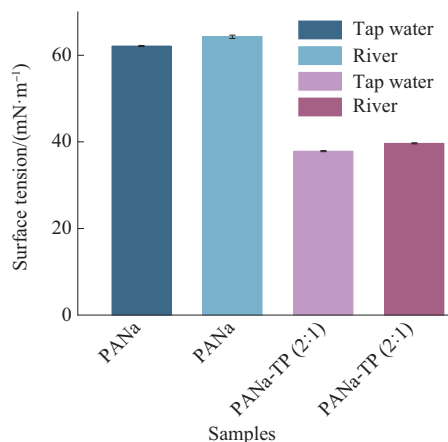


图5 其他水介质水凝胶的表面张力

Fig. 5 Surface tension of hydrogels in other aqueous media

37.86 mN/m 和 39.67 mN/m, 同样较去离子水体系均有所上升(如图2所示)。这是因为自来水与河水中不可避免地含有一些无机离子、有机物或微生物等杂质, 这些组分可能影响表面活性剂的界面行为, 进而减弱水凝胶的润湿铺展性能。此外, 经混合表面活性剂改性后, 水凝胶的表面张力显著降低, 说明尽管实际水源中的杂质对表面活性剂的界面吸附效率产生了一定程度的干扰, 但 Tween 20 与 PVP 的协同作用仍可在复杂水质条件下有效发挥降低表面张力的能力。

图6为用自来水与河水分别配制的 PANa 和

PANa-TP (2:1)水凝胶在树叶和聚四氟乙烯板表面的接触角测试结果。由图可知, 两种水介质体系的 PANa 水凝胶在基材表面均表现为不润湿状态, 且河水体系的接触角高于自来水体系, 这一变化规律与其表面张力的变化规律相吻合(如图5所示)。而经混合表面活性剂改性后, 两种水介质体系的润湿性均得到了显著改善, 在基材上由不润湿状态变为润湿状态。可见无论水源为自来水还是河水, 混合表面活性剂的引入均能显著减小 PANa 水凝胶在低表面能基材上的接触角, 在实际水源条件下同样具有良好适用性。

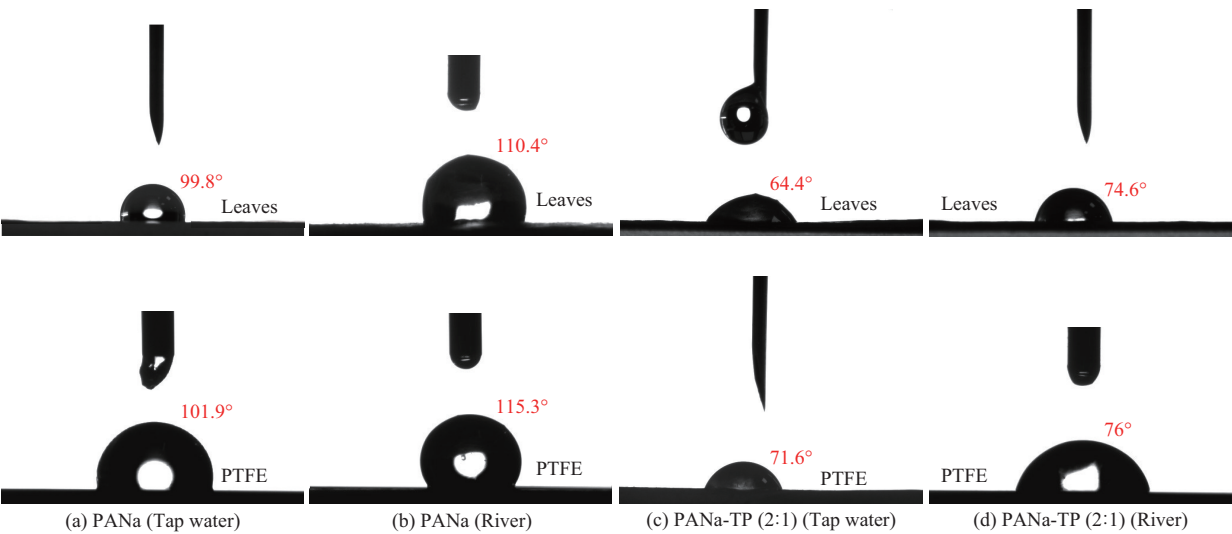


图6 其他水介质水凝胶在低表面能基材表面的接触角

Fig. 6 Contact angles of other aqueous hydrogels on low-surface-energy substrates

表4和图7分别为 PANa 和 PANa-TP (2:1)水凝胶在低表面能基材表面的铺展系数和铺展面积数据。由表4可知, 两种水介质体系的 PANa 水凝胶在基材上的铺展系数绝对值较大, 说明自发铺展过程受到阻碍。经混合表面活性剂改性后, 自来水与河水体系的铺展系数绝对值均显著降低, 表明铺展能

表4 其他水介质水凝胶在低表面能基材表面的铺展系数

Tab. 4 Spread coefficients of hydrogels on low-surface-energy substrates in other aqueous medias

Water medium	Samples	$\gamma_{lg}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	Substrates	$\theta/(^{\circ})$	W_s
Tap water	PANa	62.14	Leaves	99.8	-72.72
			PTFE	101.9	-74.95
River	PANa	64.28	Leaves	110.4	-86.69
			PTFE	115.3	-91.75
Tap water	PANa-TP (2:1)	37.86	Leaves	64.4	-21.50
			PTFE	71.6	-25.91
River	PANa-TP (2:1)	39.67	Leaves	74.6	-29.14
			PTFE	76	-30.07

力大幅提升。此外, 由图7可知, 引入混合表面活性剂后, 水凝胶在树叶和聚四氟乙烯表面的铺展面积同样有了大幅提高, 与铺展系数的变化趋势一致。

综上所述, 三种水介质体系的 PANa-TP (2:1)和 PANa 水凝胶润湿性差异均较为明显, 且润湿性大小顺序呈现同一规律: 去离子水>自来水>河水。这种差异主要源于水介质中离子与有机物、微生物等含量的不同, 这些离子可能与表面活性剂中的亲水基团形成络合物或出现竞争性吸附。此外, 与去离子水体系相似, 同一水介质中, 水凝胶在树叶上的润湿性始终优于聚四氟乙烯表面, 这是因为树叶的表面能相对高于聚四氟乙烯, 根据 Young 氏方程, 较高的固-气界面能更有利于润湿铺展。值得注意的是, 无论用何种水介质配制水凝胶, 混合表面活性剂 Tween 20 与 PVP($n_{\text{Tween 20}}:n_{\text{PVP}}=2:1$)的引入均能够发挥协同功效, 有效提高 PANa 水凝胶的润湿铺展

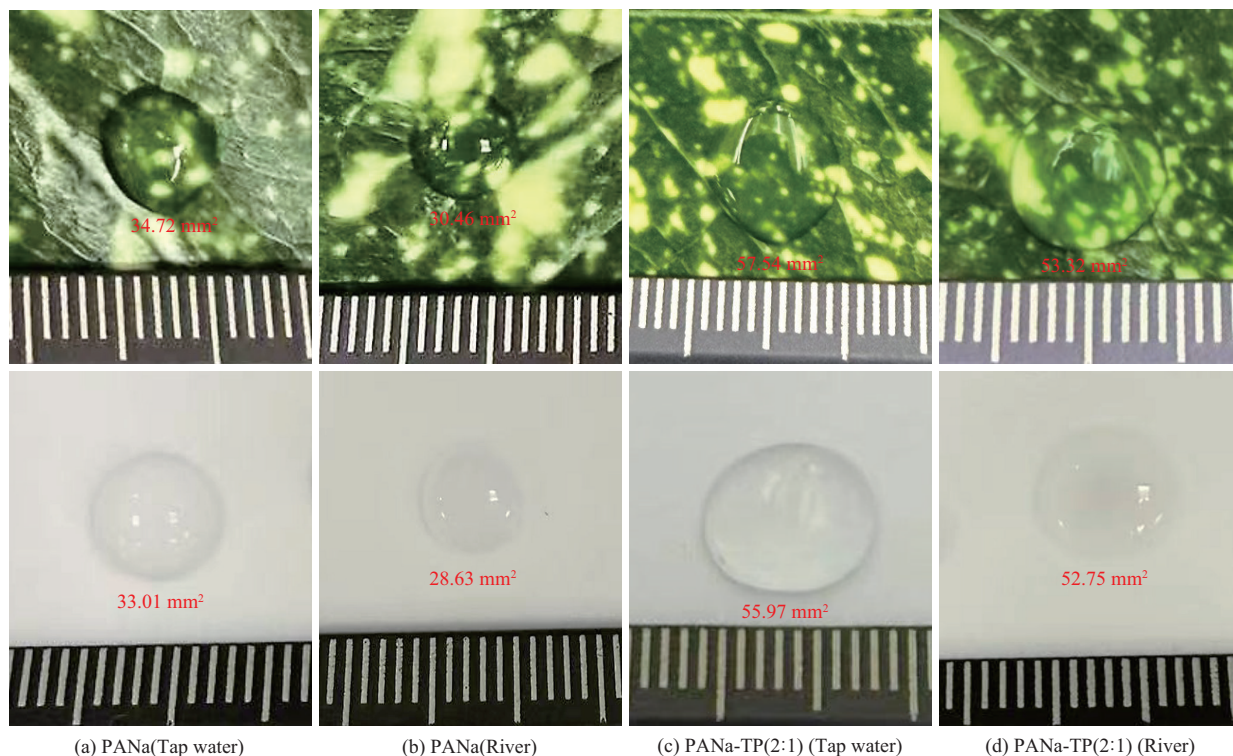


图7 其他水介质水凝胶在低表面能基材表面的铺展面积

Fig. 7 The spreading area of hydrogels on low-surface-energy substrates in other aqueous medias

性能。这些数据充分证明了该混合表面活性剂体系在实际防火应用中具有良好的水源适用性,能够满足复杂水质条件下的润湿需求。

2.7 协同润湿机制

Rosen等^[29]建立了二元混合表面活性剂的协同作用理论框架,指出当两种表面活性剂的交互参数 β 为负值时,即混合体系的表面张力低于单一表面活性剂体系,表现出协同增效效应,且 β 负值绝对值越大,协同增效效应越强,表面张力越低。因此,PANa-TP(2:1)复合水凝胶在低表面能基材表面具有优异的润湿效应主要归因于Tween 20与PVP的协同作用机制,如图8所示。

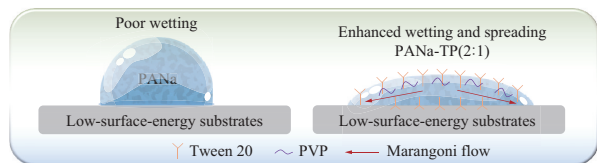


图8 水凝胶对低表面能基材的润湿机制

Fig. 8 Wetting mechanism of hydrogels on low-surface-energy substrates

表面活性剂对水凝胶润湿性能的改善首先体现在对气-液界面张力的调控。根据Young方程,降低气-液界面张力是减小接触角和改善润湿性最直接的途径。在PANa-TP(2:1)体系中,Tween 20作为

非离子型表面活性剂,其分子中含有月桂酸酯疏水链端和聚氧乙烯亲水链端,可迅速吸附至气-液界面,并以疏水尾朝向气相和亲水头朝向液相的取向排列,有效降低界面自由能。水分子在原始状态下受到分子间作用力的影响,形成氢键网络,亲水头基团与水分子受到静电力的作用,产生了一定程度的亲和力,且大于水分子自身之间的作用力。因此,水分子倾向于聚集在非离子表面活性剂周围。同时,Tween 20分子的尾链受到分子间作用力的排斥,导致表面活性剂分子呈规则且紧密地排列^[30]。而PVP自身表面活性较弱,可通过与Tween 20形成氢键络合作用,调控界面吸附层的分子排列密度和构象,形成空间稳定层,从而进一步降低界面张力^[31]。

其次,当水凝胶滴于低表面能基材表面时,液滴前沿与顶部之间会形成表面张力梯度,从而引发Marangoni流动,推动液滴向外铺展。同时,Tween 20与PVP之间的表面活性差异会形成额外的表面张力梯度,从而增强Marangoni对流,增强了气液界面自修复能力和整体润湿效率,促进水凝胶在低表面能基材表面的快速铺展^[32-34]。

此外,Tween 20在气-液界面的排列存在间隙,PVP可嵌入其中,提高界面吸附层的堆积密度。当

Tween 20 与 PVP 物质的量比为 2:1 时,两者的分子数量比恰好使 PVP 能够充分填充 Tween 20 的分子间隙而不产生过量堆积或稀疏分布,界面吸附层最为紧密,从而表现出最优的协同润湿效果。

3 结论

(1)混合表面活性剂($n_{\text{Tween 20}}:n_{\text{PVP}}=2:1$)对 PANa 水凝胶的润湿改性效果最优,将水凝胶表面张力由 61.69 mN/m 降至 31.37 mN/m,在低表面能基材上的润湿性均有所提高,有效驱动了水凝胶在低表面能基材表面的润湿铺展。

(2) PANa-TP (2:1)水凝胶的润湿机制由 Tween 20 与 PVP 协同作用。通过 Tween 20 的两亲性结构、Tween 20 与 PVP 的分子间相互作用及 Marangoni 对流协同发挥润湿功效。

(3)在实际水源中,混合表面活性剂体系($n_{\text{Tween 20}}:n_{\text{PVP}}=2:1$)仍能有效发挥协同润湿功效,在低表面能基材上的润湿性均有所提高,在复杂水质条件下仍具有良好的水源适用性。

参考文献

- [1] WALL T, STEINBERG M, SHEW D. Community-led rebuilding after the LA wildfires[J]. *Nature Sustainability*, 2025, 8(4). DOI: 10.1038/s41893-025-01531-x.
- [2] WOOLCOTT O O. Los Angeles County in flames: Responsibilities on fire[J]. *Lancet Regional Health Americas*, 2025, 42. DOI: 10.1016/j.lana.2025.101005.
- [3] HERTELENDY A J, MAGGIN J, CIOTTONE G R. Health-care system adaptability during wildfire disasters: Crucial insights from LA County[J]. *The Lancet*, 2025, 405:621–622.
- [4] KLIMAS K B, YOCOM L L, MURPHY B P, et al. A machine learning model to predict wildfire burn severity for pre-fire risk assessments, Utah, USA[J]. *Fire Ecology*, 2025, 21(1). DOI: 10.1186/s42408-024-00346-z.
- [5] HE X, FENG Y T, XU F L, et al. Smart fire alarm systems for rapid early fire warning: Advances and challenges[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450. DOI: 10.1016/j.ccej.2022.137927.
- [6] JIAO Q, CAO L L, ZHAO Z J, et al. Zwitterionic hydrogel with high transparency, ultrastretchability, and remarkable freezing resistance for wearable strain sensors[J]. *Biomacromolecules*, 2021, 22(3):1 220–1 230.
- [7] QIN Z H, SUN X, YU Q Y, et al. Carbon nanotubes/hydrophobically associated hydrogels as ultrastretchable, highly sensitive, stable strain, and pressure sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(4):4 944–4 953.
- [8] HAN S J, LIU C R, LIN X Y, et al. Dual conductive network hydrogel for a highly conductive, self-healing, anti-freezing, and non-drying strain sensor[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, 2(2):996–1 005.
- [9] LI S N, CONG Y, FU J. Tissue adhesive hydrogel bioelectronics[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(22):4 423–4 443.
- [10] LIU J J, QU S X, SUO Z G, et al. Functional hydrogel coatings[J]. *National Science Review*, 2021, 8(2). DOI:10.1093/nsr/nwaa254.
- [11] 卢青子. 覆膜气化炉渣复合凝胶防灭火实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- LU Qingzi. Experimental study on fire prevention and extinguishment of film mulching gasifier slag composite gel[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [12] SHI M L, HE Z L, ZHANG Q, et al. Preparation of a self-adhesive hydrogel and research on its flame-retardant properties[J]. *Fuel*, 2022, 324. DOI:10.1016/j.fuel.2022.124691.
- [13] DING Q L, WU Z X, TAO K, et al. Environment tolerant, adaptable and stretchable organohydrogels: Preparation, optimization, and applications[J]. *Materials Horizons*, 2022, 9(5):1 356–1 386.
- [14] CHEN Z, CHEN Y J, HEDENQVIST M S, et al. Multifunctional conductive hydrogels and their applications as smart wearable devices[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(11):2 561–2 583.
- [15] ZHAO Y, SONG S L, REN X Z, et al. Supramolecular adhesive hydrogels for tissue engineering applications[J]. *Chemical Reviews*, 2022, 122(6):5 604–5 640.
- [16] TAKENAKA Y, SUMINO Y, OHZONO T. Dewetting of a droplet induced by the adsorption of surfactants on a glass substrate[J]. *Soft Matter*, 2014, 10(30):5 597–5 602.
- [17] IVANOVA N A, KUBOCHKIN N S, STAROV V M. Wetting of hydrophobic substrates by pure surfactants at continuously increasing humidity[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 519:71–77.
- [18] ALI S M, EMRAN K M. Surfactant-template sol-gel protective coatings for cast iron corrosion: Effect of the surfactant type and concentration[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 367. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.120366.
- [19] LI G N, WANG Q B, LIU G Q, et al. Hydrogel extinguishants[J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(13). DOI:10.3390/nano14131128.
- [20] ZHANG B W, GUO Q, DAI B S, et al. Quality optimization of Bi2212 films prepared by aqueous solvent sol-gel method with nonionic surfactants[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(24): 36 845–36 852.
- [21] GUERRERO-HERNÁNDEZ L, MELÉNDEZ-ORTIZ H I, CORTEZ-MAZATAN G Y, et al. Gemini and bicephalous surfactants: A review on their synthesis, micelle formation, and uses[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(3). DOI: 10.3390/ijms23031798.
- [22] GAO Y, LU J J, ZHANG P J, et al. Wetting and adhesion behavior on apple tree leaf surface by adding different surfactants[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2020, 187. DOI:10.1016/j.colsurfb.2019.110602.
- [23] WANG X N, YUAN S J, JIANG B Y. Wetting process and adsorption mechanism of surfactant solutions on coal dust surface[J].

- Journal of Chemistry, 2019(1). DOI:10.1155/2019/9085310.
- [24] 邹美帅,翟进贤,郭晓燕. 材料表面科学及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2021.
- ZOU Meishuai, ZHAI Jinxian, GUO Xiaoyan. Science and application of material surface interface[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021.
- [25] CHEN X Y, SHI B, CAO Y X, et al. Study on the wettability and methane desorption characteristics of coal under high pressure with different surfactants[J]. ACS Omega, 2024, 9(18): 20 012–20 020.
- [26] RAHMA A, MUNIR M M, KHAIRURRIJAL, et al. Intermolecular interactions and the release pattern of electrospun curcumin-polyvinylpyrrolidone fiber[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2016, 39(2):163–173.
- [27] CIESIELSKI A, SAMORÌ P. Graphene vias on silicon assisted liquid-phase exfoliation[J]. Chemical Society Reviews, 2014, 43(1):381–398.
- [28] KOVALCHUK N M, SAGISAKA M, KOMIYAMA H, et al. Spreading of aqueous surfactant solutions on oil substrates: Superspreaders vs non-superspreaders[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 661:1 046–1 059.
- [29] ROSEN M J, GAO T, NAKATSUJI Y, et al. Synergism in binary mixtures of surfactants 12. Mixtures containing surfactants with two hydrophilic and two or three hydrophobic groups[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1994, 88(1):1–11.
- [30] ZHANG H W, ZHAO H B, GE H B, et al. Regulation mechanisms and kinetic characterization of nonionic surfactants on bituminous coal wettability across multiple scales[J]. Surfaces and Interfaces, 2025, 79. DOI:10.1016/j.surfin.2025.108193.
- [31] ROSEN M J, HUA X Y. Synergism in binary mixtures of surfactants: II. Some experimental data[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1982, 59(12):582–585.
- [32] MOTAGHIAN M, VAN DER LINDEN E, HABIBI M. Surfactant-surfactant interactions govern unusual Marangoni spreading on a soap film[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 653. DOI:10.1016/j.colsurfa.2022.129747.
- [33] HSIEH T L, GAROFF S, TILTON R D. Marangoni spreading time evolution and synergism in binary surfactant mixtures[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 623:685–696.
- [34] CHENGARA A, NIKOLOV A D, WASAN D T. Spreading of a water drop triggered by the surface tension gradient created by the localized addition of a surfactant[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(10):2 987–2 995.

(上接第74页)

- [18] ZHANG Y Q, HU J R, WANG J S, et al. Hierarchical mesh-interpenetrating PEGDE-LC composite solid electrolyte for high-performance lithium metal batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 521. DOI:10.1016/j.cej.2025.166776.
- [19] SONG Y D, WANG X L, YAO Y F. LiC_3N_4 nanosheets enhanced PEO-based solid polymer electrolytes: Unveiling exceptional electrochemical and mechanical properties[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2025, 129(26):12 006–12 013.
- [20] LI J Y, WANG Z R, XU Z, et al. A glass fiber reinforced cross-linked polyurethane-based composite electrolyte with high mechanical strength and large ion conductivity[J]. Journal of Power Sources, 2025, 636. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.236556.
- [21] 徐祖婧,赵相峰. 聚离子液体复合PEO制备高性能全固态聚合物电解质[J]. 功能材料, 2024, 55(1):1 172–1 178.
- XU Zujing, ZHAO Xiangfeng. Study on a novel poly(ionic liquid)/poly(ethylene oxide) solid electrolyte for stable high-performance lithium metal battery[J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(1):1 172–1 178.
- [22] 李姗,秦舒浩,邵会菊,等. PVDF基固态聚合物电解质晶相调控研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9):227–232.
- LI Shan, QIN Shuhao, SHAO Huiju, et al. Research progress on crystal phase modulation of PVDF-based solid polymer electrolytes[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9):227–232.