

液态金属基导电水凝胶的制备及性能研究

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.0002

刘放 汤力 汤建新

湖南工业大学
生命科学与化学学院
湖南 株洲 412007

摘要: 针对传统导电填料与水凝胶基体界面相容性差的问题, 通过将柔性液态金属 (LM) 嵌入由 [2-(甲基丙烯酰基氧基) 乙基] 二甲基-(3-磺酸丙基) 氢氧化铵 (SBMA) 和 N-(2-羟乙基) 丙烯酰胺 (HEAA) 共聚形成的水凝胶网络中, 构建一类具有超拉伸性、高黏附性和优异传感能力的 LM/p(SBMA-co-HEAA) 新型导电水凝胶。研究表明, 通过超声分散形成的 LM 纳米颗粒, 表面具有丰富的羟基氧化镓结构, 易于与 HEAA 中的羟基发生氢键相互作用, 提高了导电填料与水凝胶基质界面间的稳定性。此外, 基于该导电水凝胶构建的应变传感器无论是在小应变 1%, 还是大应变 150% 的条件下都能保持稳定的传感性能。该应变传感器在人体运动检测、智能包装领域具有广阔的应用前景。

关键词: 水凝胶; 柔性液态金属; 应变传感器; 人体运动检测; 智能包装

中图分类号: TP212.1; TB484

文献标志码: A

柔性可穿戴多功能传感器因能将身体运动中的物理和机械变化转换为电信号, 已广泛应用于人体运动健康监测^[1-2]、人机界面^[3-6]和软机器人^[7-13]等领域, 其在智能包装应用也将逐步深化。导电水凝胶^[14-15]作为一种具有软-湿三维结构的新型功能高分子材料^[16], 具有极高的含水率^[17]、较低的弹性模量^[18]以及优良的导电性能^[19], 是构建柔性可穿戴设备的理想候选材料^[20-22]。相对于传统硬质导电金属材料, 导电水凝胶能更紧密地贴合于人体皮肤表面, 并将拉伸、压缩、弯曲等机械信号转换为可视化的电信号^[23], 从而实现其柔性传感功能^[24]。根据导电机理不同, 其可分为离子导电水凝胶和电子导电水凝胶^[25]。离子导电水凝胶具有较好的韧性^[26]、黏附

性以及环境适应性, 但受限于正负离子的迁移速率, 其电导率远低于电子导电水凝胶的电导率。此外, 电子导电水凝胶由于导电填料的掺入而具有较高的电导率, 但是柔性水凝胶基体与刚性导电填料的界面稳定性较差, 易导致柔性基体与刚性填料之间模量不匹配, 进而导致力学性能降低^[27-28]。

液态金属 (liquid metal, LM) 是一类熔点低于或接近环境温度的金属或合金, 具有良好生物相容性、低毒性、易功能化、高效催化性和刺激响应性^[14]。相比于其他导电填料构建的电子导电水凝胶^[29], LM 基导电水凝胶具有以下优点: 首先, 提高了柔性基体与导电填料之间的界面稳定性。将柔性 LM 嵌入到软聚合物基质中, 经过超声分散的 LM 纳

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51774128); 湖南省株洲联合基金资助项目 (2023JJ50184); 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目 (2018JJ4009)

作者简介: 刘放, 女, 硕士生, 主要研究方向为液态金属基导电水凝胶柔性传感器, E-mail: lf2889820095@163.com

通信作者: 汤建新, 男, 教授, 主要从事生物医用材料、生物芯片与传感器件研究, E-mail: jxtang0733@163.com

米颗粒，表面形成的羟基氧化镓易于与聚合物分子链上的羟基基团产生较强的氢键相互作用，改善导电填料与水凝胶界面间的力学性能。其次，基于镓（Ga）的 LM 在超声作用下可以产生自由基和 Ga^{3+} ，形成的导电通路可以大幅度地增强水凝胶的导电性。

本研究拟设计构建 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶传感器，利用 LM 的高导电性来增强水凝胶的导电性能，通过 LM 中氧化镓与 N-(2-羟乙基) 丙烯酰胺（含稳定剂甲氧基氢醌）（N-(2-hydroxyethyl) acrylamide, HEAA）中的羟基发生氢键相互作用，来增强水凝胶的力学性能，从而赋予水凝胶超拉伸性、高黏附性和优异的传感性能。

1 实验部分

1.1 试剂、设备与仪器

1) 主要试剂

[2-(甲基丙烯酰基氧基)乙基]二甲基-(3-磺酸丙基)氢氧化铵（[2-(Methacryloyloxy)ethyl]dimethyl-(3-sulfopropyl)ammonium hydroxide, SBMA），纯度 98.0%，上海麦克林生化科技股份有限公司；N-(2-羟乙基)丙烯酰胺（含稳定剂甲氧基氢醌），纯度 > 98.0%，气相色谱，梯希爱（上海）化成工业发展有限公司；镓铟锡合金，纯度 99.99%，长沙昆雍新材料有限公司；过硫酸铵（ammonium persulphate, APS），分析纯，上海沃凯生物技术有限公司；实验用水均为去离子水。

2) 主要设备与仪器

电子天平, FA1004 型, 力辰科技制造有限公司；电热鼓风干燥箱, 101-0BS 型, 邦西仪器科技有限公司；数显智能控温磁力搅拌器, SZCL-3B 型, 巩义市予华仪器有限责任公司；数控超声波清洗器, KQ3200DE 型, 昆山市超声仪器有限公司；电子式万能试验机, AGS-X 型, 岛津公司；超声波细胞粉碎机, JY96-IINE 型, 宁波新芝生物科技有限公司；电化学工作站, CHI660E 型, 上海辰华仪器有限公司。

1.2 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的制备

将不同配比（0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%）的 LM 纳米颗粒的水溶液分别放入离心管中，超声分散处理 10 min，得到 LM 分散液，并分别倒入 20 mL 的玻璃瓶中。然后，在分散液中依次加入 SBMA、HEAA 和 APS，在室温下搅拌至所有反应物全部溶

解，得到预聚液。将预聚液迅速注射进厚度为 1 mm 的自制玻璃模具中，放入 65 °C 电热鼓风干燥箱中热引发聚合 30 min，得到 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶。表 1 为 LM/p(SBMA-co-HEAA) 各组份质量配比。

表 1 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的原料质量配比

Table 1 Raw material mass ratios of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogels g

样品	LM	SBMA	HEAA	APS	H ₂ O
SBMA _{14%} HEAA _{30%} LM _{0%}	0	0.70	1.50	0.05	2.75
SBMA _{14%} HEAA _{30%} LM _{5%}	0.25	0.70	1.50	0.05	2.75
SBMA _{14%} HEAA _{30%} LM _{10%}	0.50	0.70	1.50	0.05	2.75
SBMA _{14%} HEAA _{30%} LM _{15%}	0.75	0.70	1.50	0.05	2.75
SBMA _{14%} HEAA _{30%} LM _{20%}	1.00	0.70	1.50	0.05	2.75
SBMA _{14%} HEAA _{30%} LM _{25%}	1.25	0.70	1.50	0.05	2.75

1.3 性能测试

1.3.1 力学性能测试

1) 拉伸性能测试

在室温条件下，使用电子式万能试验机以 100 mm/min 的拉伸速率对 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶试样进行拉伸测试。将待测 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶制备为哑铃型，规格为 17 mm × 4 mm × 1 mm。

试验的拉伸应力（ σ ）为

$$\sigma = F/A_0,$$

式中： F 为载荷力； A_0 为原始横截面积。

拉伸应变（ ε ）为

$$\varepsilon = \Delta l/l_0,$$

式中： Δl 为拉伸长度； l_0 为原始长度。

通过拉伸测试获得水凝胶的拉伸应力 - 应变曲线后，计算应力 - 应变曲线在 1%~5% 应变之间的斜率，获得试样的弹性模量，而水凝胶的韧性通过对应力 - 应变曲线进行积分获得。

2) 加载 - 卸载循环测试

在室温条件下，采用电子式万能试验机以 100 mm/min 的拉伸速率对水凝胶试样进行加载 - 卸载循环测试。当试样拉伸到预设应变，再以相同的速率恢复到原始标距，即可得到水凝胶的加载 - 卸载曲线。

体积韧性（ W ）为

$$W = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_b} \sigma_{\text{load}} d\varepsilon,$$

式中： ε_b 和 σ_{load} 分别为加载过程中相应的断裂应变和应力。

能量耗散 (U_{hys}) 为

$$U_{\text{hys}} = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_x} (\sigma_{\text{load}} - \sigma_{\text{unload}}) d\varepsilon,$$

式中： ε_x 为预设应变； σ_{unload} 为卸载过程中相应的应力。

1.3.2 自恢复性能测试

采用电子式万能试验机以 100 mm/min 的拉伸 / 回复速率对水凝胶试样进行设有间隔时间的加载 - 卸载循环测试，以测试水凝胶试样的自恢复性能。此试验的试样规格与拉伸试验的相同。两次加载 - 卸载试验的间隔时间为水凝胶的休息时间。水凝胶的自恢复效率能够根据第 2 次加载 - 卸载曲线计算得到的耗散能、峰值应力分别与相应从第 1 次加载 - 卸载曲线计算得到的耗散能、峰值应力的比值进行评估。

1.3.3 抗疲劳性能测试

采用电子式万能试验机以 100 mm/min 的拉伸 / 回复速率对水凝胶试样进行无间隔时间的连续加载 - 卸载循环测试，以测试试样的抗疲劳性能。此试验的试样规格与拉伸试验的相同。水凝胶的抗疲劳性能能够根据第 n 次加载 - 卸载曲线计算得到的耗散能、峰值应力分别与相应从第 1 次加载 - 卸载曲线计算得到的耗散能、峰值应力的比值进行评估。

1.3.4 自愈合性能测试

将水凝胶试样切成两段后，重新贴合两个切割面，置于模具中用玻璃板覆盖，用保鲜膜密封 30 min 后对愈合后的水凝胶进行拉伸测试。用定量表征水凝胶的自愈合性能，自愈合效率为

$$\text{自愈合效率} = \sigma_i / \sigma_0 \times 100\%,$$

式中： σ_0 为原始凝胶的峰值应力； σ_i 为不同温度或不同时间下自愈合凝胶的峰值应力。

1.3.5 黏附性能测试

90°剥离测试：将固体基材在超声机上依次用丙酮、乙醇和水清洗 30 min，在烘箱中干燥；然后，用聚四氟乙烯垫片 (20 mm × 100 mm × 2 mm) 在干净的衬底上制备水凝胶样品；用一层透明的疏水性塑料膜覆盖在模具上部。下面的水凝胶也用上述工艺制备。试验前，在水凝胶顶部粘贴 3M 胶带。然后根据测试需要，在标准的 90°剥离试验装置上对水凝胶样

品进行剥离测试。界面韧性 (g) 为

$$g = F_{\text{max}} / d,$$

式中： F_{max} 为剥离过程中的最大载荷力； d 为被测水凝胶样品的宽度。

180°剪切测试：黏附强度通过剪切试验进行评估。电子式万能试验机配有 200 N 的测压元件，加载速率为 100 mm/min。试件被切割成 20 mm × 20 mm 的小块，夹在两个相同的基材之间进行剪切试验。黏附强度为测量的最大载荷除以结合面积。

1.3.6 电导率测试

在电化学工作站上用交流阻抗法测定水凝胶电阻。测量频率范围为 0.1 Hz~1 MHz，开路电位阻抗幅值为 5 mV。电导率 (k) 为

$$k = \Delta l / (R \times S),$$

式中： Δl 为水凝胶的长度； R 为水凝胶拉伸过程中实时电阻； S 为水凝胶截面积。

1.3.7 传感性能测试

将电子式万能试验机与电化学工作站联用对水凝胶柔性传感器的传感性能进行测试。灵敏度 (GF) 是柔性传感器的重要性能指标。 GF 为

$$GF = (\Delta R / R_0) / \varepsilon,$$

式中： ΔR 为动态拉伸过程中电阻的变化量，即 $R - R_0$ ； R_0 为水凝胶柔性传感器的初始电阻； ε 为水凝胶柔性传感器的应变。

2 结果与讨论

2.1 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的成胶机理

通过一锅法制备高拉伸、高黏附性和优异传感性能的导电水凝胶 LM/p(SBMA-co-HEAA)，其反应机理如图 1 所示。SBMA 中 $-N^+(\text{CH}_3)_2$ 和 $-\text{SO}_3^-$ 的两性离子基团之间可以形成强静电相互作用，同时 HEAA 的两个官能团羟基和酰胺基之间可以形成分子内和分子间的氢键，并且 SBMA 的 $-\text{SO}_3^-$ 也能与 HEAA 的羟基形成氢键。分子结构中键合作用的复杂性和多样性，赋予了 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶优异的机械性能。在 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶中引入 LM 纳米颗粒，不仅水凝胶的导电性能得到极大提高，而且 LM 表面的羟基氧化镱能与 HEAA 的羟基之间形成氢键，进一步增强水凝胶的力学性能。

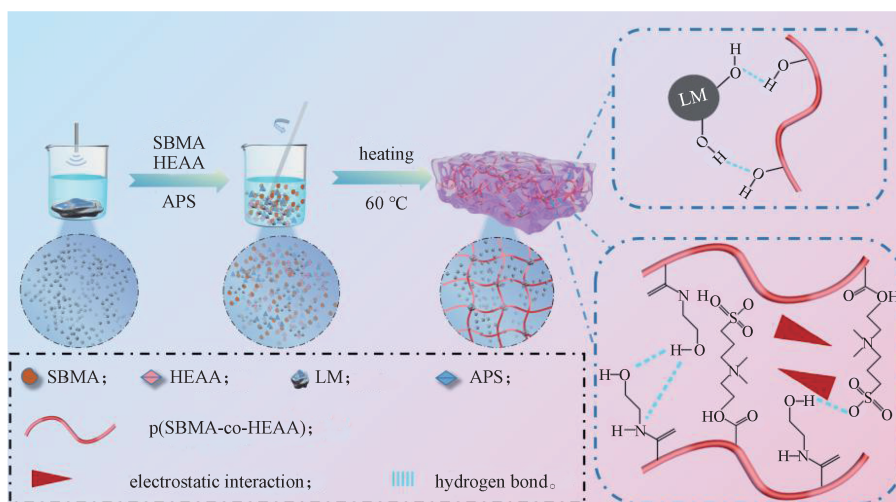


图 1 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的制备示意图

Fig. 1 Preparation of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogels

2.2 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的力学性能和导电性能

LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶的力学性能如图 2 所示。水凝胶在经历显著的拉伸后仍能恢复到原始长度，这凸显了其出色的柔软性和自恢复能力；水凝胶能够承载高达 200 g 的重物，且保持完整无损，这展现了其优异的耐久性。

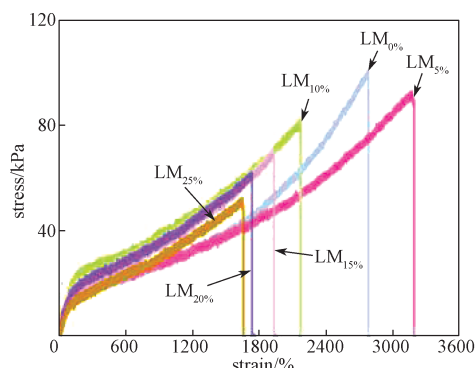


图 2 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶力学性能示意图

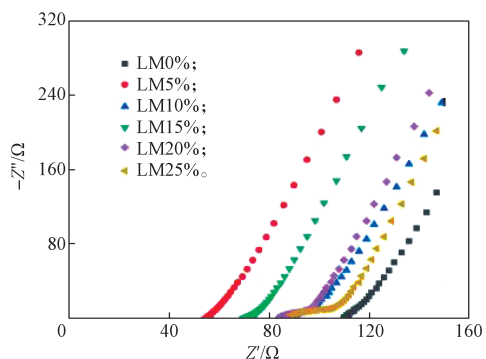
Fig. 2 Schematic diagram of mechanical properties of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogel

为定量评估 LM 纳米颗粒含量 (0%~25%) 对水凝胶力学性能与导电性能的影响，首先通过单轴拉伸

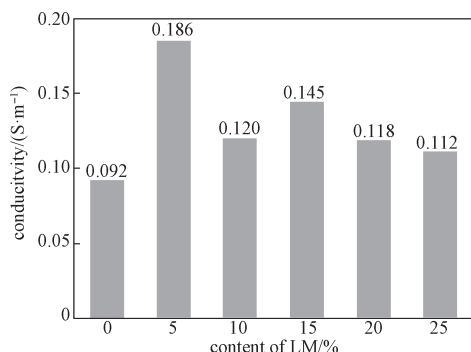
测试对不同 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶的力学性能进行初步探究，结果如图 3a 所示。由图 3a 可知，随着 LM 的质量分数由 0% 增加至 5%，水凝胶的断裂伸长率 / 抗拉强度从 2786.65%/101.13 kPa 变化到 3194.98%/89.84 kPa，这是因为 LM 表面的氧化镓与 HEAA 中的羟基发生氢键相互作用，使得水凝胶的断裂应变增大，而聚合物分子链密度降低导致应力减小；随着 LM 含量的持续增加，过量的 LM 使得聚合物网络被破坏，造成 p(SBMA-co-HEAA) 聚合物基质不连续，导致水凝胶的断裂应变和应力都在降低。水凝胶传感性能好坏往往取决于其电导率的高低。如图 3b~c 所示，LM 的引入在一定程度上增加了水凝胶的电导率，随着 LM 含量由 0% 增加到 5%，水凝胶的电导率从 $0.092 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加到 $0.186 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ，当继续增加 LM 的含量，过量的 LM 使得水凝胶基体的网络结构被破坏，从而导致 LM 难以被包裹，水凝胶电导率降低。



a) 应力 - 应变曲线



b) 阻抗谱图



c) 电导率

图3 不同 LM 含量对 LM/p(SBMA-co-HEAA) 的力学性能与导电性能的影响

Fig. 3 Effects of different LM contents on mechanical and electrical properties of LM/p(SBMA-co-HEAA)

2.3 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的自恢复性能

氢键作为一种具有动态可逆特性的物理键，能够在遭到破坏后再次自发成键。因此，基于多氢键的 SBMA、HEAA 以及经超声处理的 LM 表面羟基氧化镓制备而成的 LM/p(SBMA-co-HEAA) 氢键交联水凝胶具有良好的自恢复性能。在室温下，通过带有休息时间（0, 30, 60, 120, 180, 300 s）的加载-卸载循环测试 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的自恢复性能，结果如图 4a~e 所示，相应的峰值应力和耗散能的自恢复效率如图 4f 所示。由图 4 可知，随着休息时间的增加，水凝胶的峰值应力和耗散能的自恢复效率逐渐增加，从 96.80%/31.07% 增长到 98.27%/69.11%。可以看到，水凝胶经过 300 s 的休息后，水凝胶的力学性能近乎恢复到初始水平，表明该水凝胶具有优异自恢复性能。

2.4 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的自愈合性能

图 5 显示了 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶的自愈合过程。在图 5a~c 中，水凝胶与 LED 灯、电源、分压电阻连成导电通路。自愈合水凝胶连入电路后，LED 灯的亮度与原始水凝胶连入时的亮度一样，表明该水凝胶具有自愈合性能。

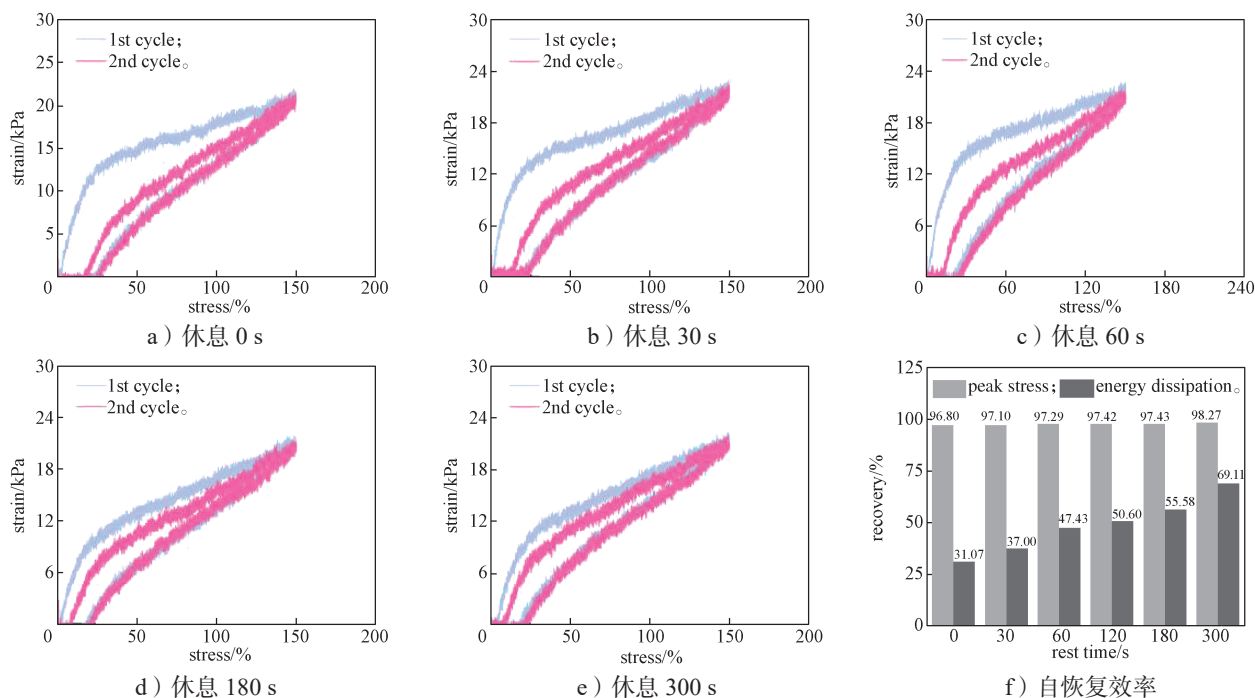


图4 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的自恢复性能

Fig. 4 Self-recovery efficiency of the LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogels

此外，对原始水凝胶和自愈水凝胶分别进行了应力-应变测试，结果如图 5d~e 所示。原始水凝胶与自愈水凝胶的峰值应力分别为 82.37, 37.03 kPa，

自愈合效率为 45%。水凝胶具有良好的自愈合性能主要归因于氢键的动态可逆特性，即水凝胶断裂面接触之后，断裂的氢键逐渐恢复。

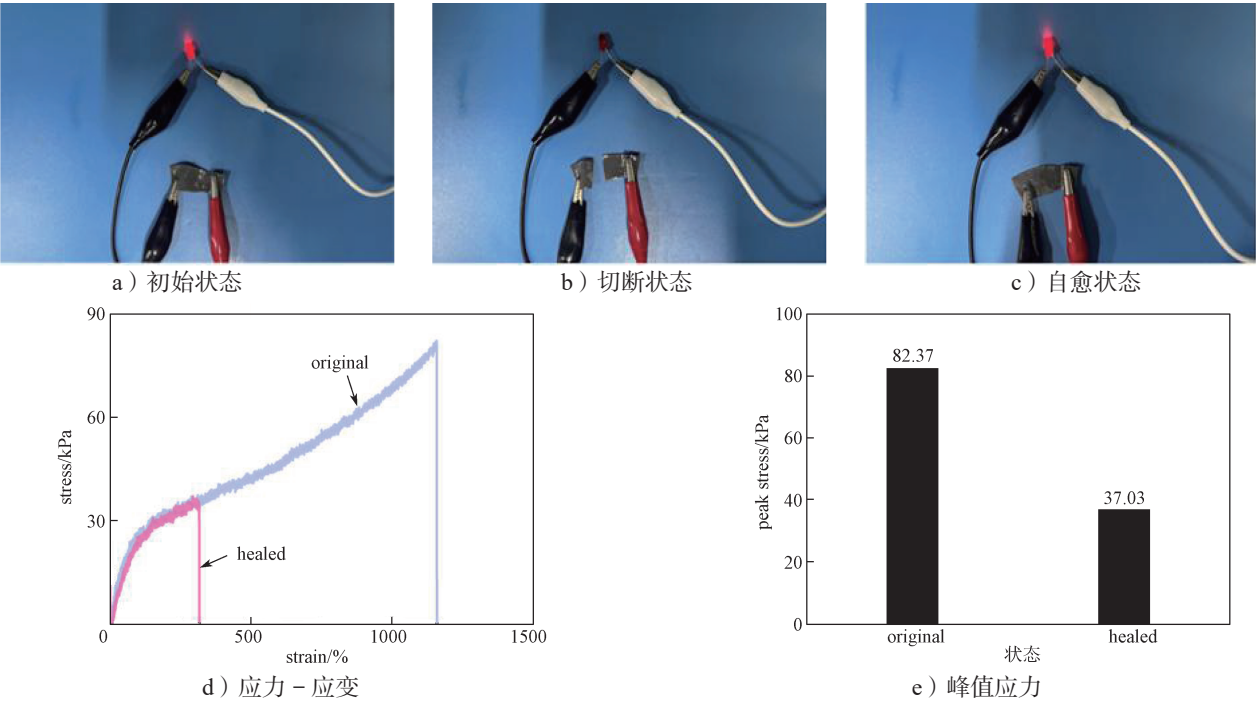


图 5 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的自愈合性能

Fig. 5 Self-healing properties of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogels

2.5 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶的黏附性能

水凝胶的黏附性能对提高柔性传感器的便携性和灵敏度有着重要意义。SBMA 的引入也提高了水凝胶黏附性能。图 6 展示了 LM/p(SBMA-co-HEAA)

水凝胶对不同基材（PET 塑料、玻璃、塑料、铝板、钛板和皮肤）的黏附图像，表明水凝胶对各类基材均具有一定的黏附能力。

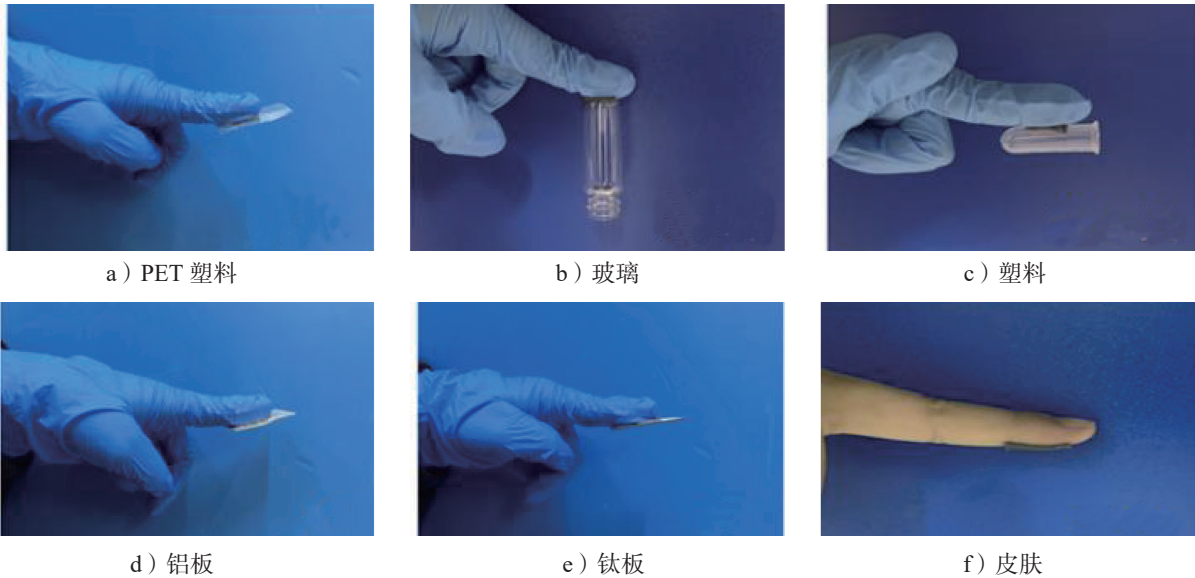


图 6 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶对不同基材的黏附图片

Fig. 6 Adhesion picture of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogel on different substrates

此外，为了量化水凝胶-基质的黏附强度，对 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶在不同基底上进行 90°剥离测试和 180°剪切测试，结果如图 7 所示。水凝胶对不同基材表现出优异的黏附性，在 PET 塑料、玻璃、塑料、铝板、钛板和猪皮上的界面韧性/黏附强度分别是 37.96 N/m/16.39 kPa、626.21 N/m/34.06

kPa、467.59 N/m/23.37 kPa、474.05 N/m/17.50 kPa、456.18 N/m/29.22 kPa 和 49.78 N/m/7.37 kPa，尤其在玻璃基材上黏附性能最强，界面韧性/黏附强度达到 626.21 N/m/34.06 kPa。由此可知，LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶为柔性可穿戴多功能传感器的制备奠定了基础。

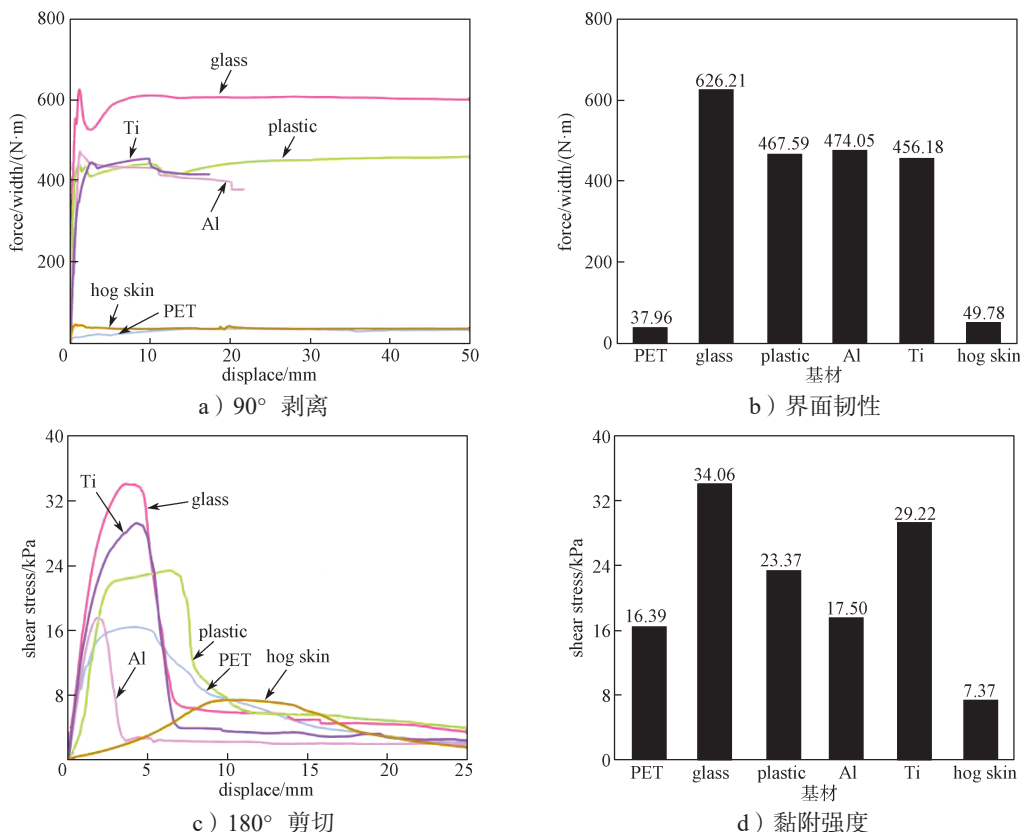


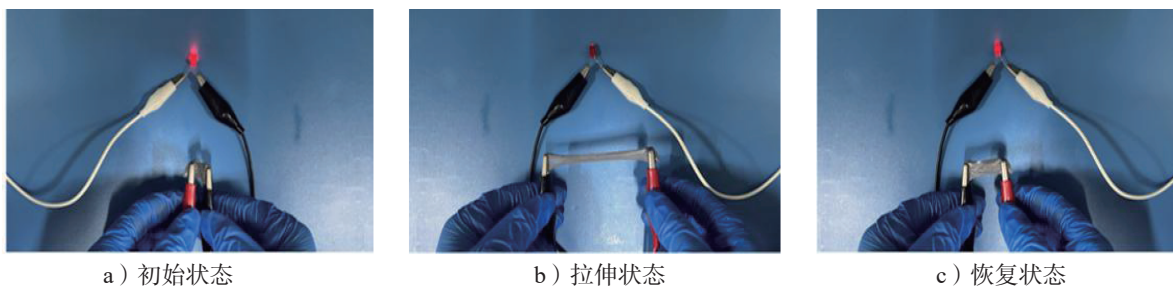
图 7 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶在不同基材上的黏附性能

Fig. 7 Adhesion strength of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogel on different substrates

2.6 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶的传感性能

将 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶连接到带有 3.3 V 电源的电路中，检测 LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶作为柔性应变传感器的传感性能，结果如图 8 所示。LED 灯的亮度随着水凝胶的拉伸而降低，水凝胶表现出明显的应变依赖性。即使在 1% 的极小

应变和 150% 大应变下，柔性应变传感器均能够获得明显且稳定的信号，表明柔性应变传感器在各应变下均具有良好的传感能力。此外，在 0%~400%、≤ 400%~800% 和 ≤ 800%~1200% 应变范围内，该柔性应变传感器的 GF 分别为 2.37, 7.02, 14.31，远高于大多数已报道的水凝胶柔性应变传感器，表明本柔性应变传感器具有优异的应变灵敏性。



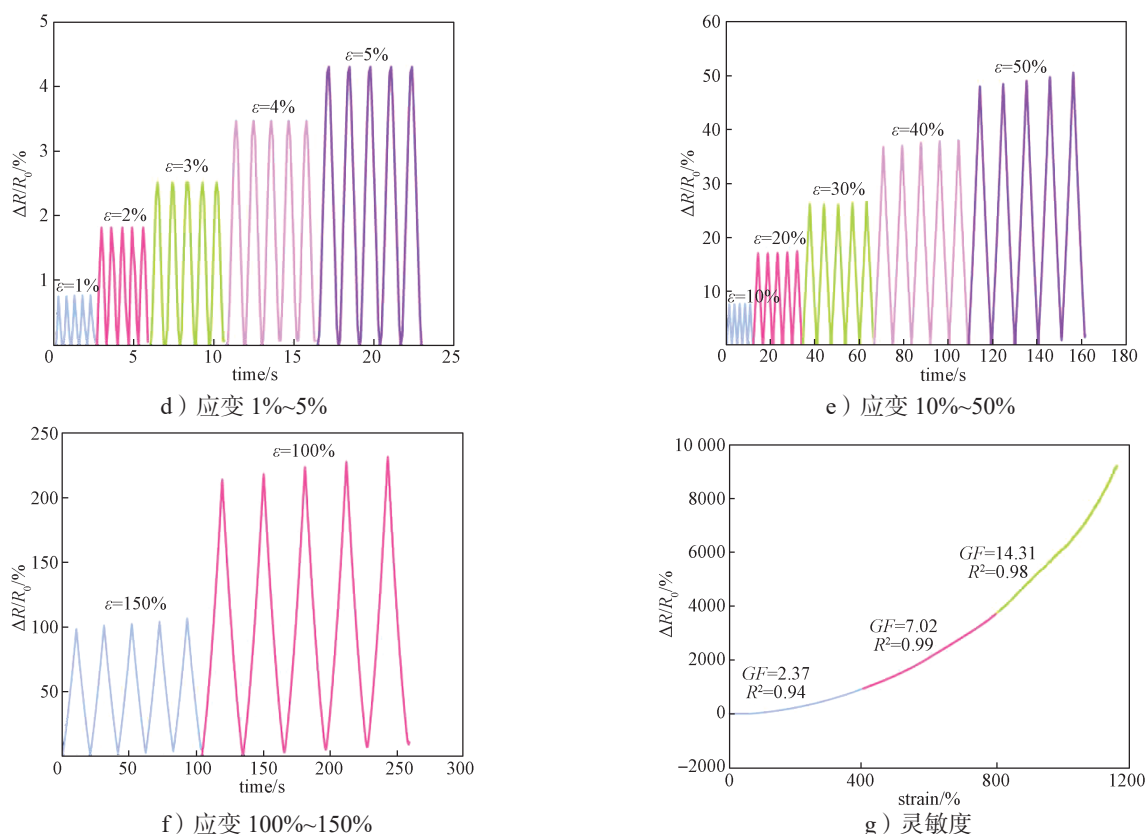


图 8 LM/p(SBMA-co-HEAA) 导电水凝胶柔性传感器的传感性能

Fig. 8 Sensing performance of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogel flexible sensor

3 结论

本研究以 p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶为基体, 引入具有高导电性和环境稳定性的 LM, 成功构建了一种超拉伸性的 LM/p(SBMA-co-HEAA) 新型导电水凝胶。通过对该水凝胶进行力学性能、黏附性能以及传感性能的探究, 得到以下结论: 1) 拉伸测试结果表明, 随着 LM 浓度的不断增大, LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶的断裂应变和应力均呈现出先增大后减小的趋势。当 SBMA、HEAA 以及 LM 质量分数分别为 14%、30%、5% 时, 水凝胶的断裂伸长率 / 抗拉强度为 3194.98%/89.84 kPa。2) 黏附测试结果表明, 所制备的水凝胶对各种基材具有较高的黏附作用, 在玻璃基材上黏附性能最强, 界面韧性 / 黏附强度达到 626.21 N/m/34.06 kPa, 表明聚合物链中官能团之间存在较强的相互作用。3) 传感信号测试结果表明, 无论在 1% 的极小应变, 还是在 150% 大应变下, LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶作为柔性应变传感器均能够获得明显且稳定的信号。可见, LM/p(SBMA-co-HEAA) 水凝胶柔性应变传感器将在人体运动监测、智能包装等

领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] JOHNSTON L, YANG J, HAN J L, et al. Intermetallic Wetting Enabled High Resolution Liquid Metal Patterning for 3D and Flexible Electronics[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2022, 10(3): 921-931.
- [2] KIM K, KIM B, LEE C H. Printing Flexible and Hybrid Electronics for Human Skin and Eye-Interfaced Health Monitoring Systems[J]. Advanced Materials, 2020, 32(15): e1902051.
- [3] HE F L, YOU X Y, GONG H, et al. Stretchable, Biocompatible, and Multifunctional Silk Fibroin-Based Hydrogels Toward Wearable Strain/Pressure Sensors and Triboelectric Nanogenerators[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(5): 6442-6450.
- [4] LIU H, ZHANG S M, LI Z K, et al. Harnessing the Wide-Range Strain Sensitivity of Bilayered PEDOT: PSS Films for Wearable Health Monitoring[J]. Matter, 2021, 4(9): 2886-2901.
- [5] ZHA X J, ZHANG S T, PU J H, et al. Nanofibrillar

- Poly(Vinyl Alcohol) Ionic Organohydrogels for Smart Contact Lens and Human-Interactive Sensing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(20): 23514–23522.
- [6] ZHENG H Y, LIN N, HE Y Y, et al. Self-Healing, Self-Adhesive Silk Fibroin Conductive Hydrogel as a Flexible Strain Sensor[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(33): 40013–40031.
- [7] GAO G R, YANG F J, ZHOU F H, et al. Bioinspired Self-Healing Human-Machine Interactive Touch Pad with Pressure-Sensitive Adhesiveness on Targeted Substrates[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(50): e2004290.
- [8] CHO K G, AN S, CHO D H, et al. Block Copolymer-Based Supramolecular Ionogels for Accurate On-Skin Motion Monitoring[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(36): 2102386.
- [9] JING X, FENG P Y, CHEN Z, et al. Highly Stretchable, Self-Healable, Freezing-Tolerant, and Transparent Polyacrylic Acid/Nanochitin Composite Hydrogel for Self-Powered Multifunctional Sensors[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(28): 9209–9220.
- [10] MENG X H, QIAO Y, DO C, et al. Hysteresis-Free Nanoparticle-Reinforced Hydrogels[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(7): 2108243.
- [11] ZHENG L J, ZHU M M, WU B H, et al. Conductance-Stable Liquid Metal Sheath-Core Microfibers for Stretchy Smart Fabrics and Self-Powered Sensing[J]. *Science Advances*, 2021, 7(22): eabg4041.
- [12] CHEN S, WANG H Z, ZHAO R Q, et al. Liquid Metal Composites[J]. *Matter*, 2020, 2(6): 1446–1480.
- [13] LEE Y W, KIM J K, BOZUYUK U, et al. Multifunctional 3D-Printed Pollen Grain-Inspired Hydrogel Microrobots for On-Demand Anchoring and Cargo Delivery[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(10): e2209812.
- [14] WANG D W, WANG X H, RAO W. Precise Regulation of Ga-Based Liquid Metal Oxidation[J]. *Accounts of Materials Research*, 2021, 2(11): 1093–1103.
- [15] 邹健, 陈卓, 王盛冀, 等. 导电水凝胶中交联剂含量对综合性能的影响[J]. *包装学报*, 2022, 14(6): 80–89.
- [16] LIU D P, YIN G Q, LE X X, et al. Supramolecular Topological Hydrogels: From Material Design to Applications[J]. *Polymer Chemistry*, 2022, 13(14): 1940–1952.
- [17] LI T, JANG Y, CHOI J G, et al. Bioinspired Self-Coiled Hydrogel Fiber with High Water Content and Stretchability[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(12): 9125–9131.
- [18] NGUYEN D M, WU Y H, NOLIN A, et al. Electronically Conductive Hydrogels by in Situ Polymerization of a Water-Soluble EDOT-Derived Monomer[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(10): 2200280.
- [19] WANG X W, ZHENG S J, XIONG J F, et al. Stretch-Induced Conductivity Enhancement in Highly Conductive and Tough Hydrogels[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(25): e2313845.
- [20] CUI C, FU Q J, MENG L, et al. Recent Progress in Natural Biopolymers Conductive Hydrogels for Flexible Wearable Sensors and Energy Devices: Materials, Structures, and Performance[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2021, 4(1): 85–121.
- [21] KARIMZADEH Z, MAHMOUDPOUR M, RAHIMPOUR E, et al. Nanomaterial Based PVA Nanocomposite Hydrogels for Biomedical Sensing: Advances Toward Designing the Ideal Flexible/Wearable Nanoprobes[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 305: 102705.
- [22] ZHANG L, WANG J, WANG S W, et al. Neuron-Inspired Multifunctional Conductive Hydrogels for Flexible Wearable Sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(11): 4327–4335.
- [23] 经鑫, 冯培勇, 刘跃军. 织物基自驱动传感器制备及其在运输包装中的应用[J]. *包装学报*, 2021, 13(5): 1–7.
- [24] LEI D M, XIAO Y C, XI M, et al. Thermochromic and Conductive Hydrogels with Tunable Temperature Sensitivity for Dual Sensing of Temperature and Human Motion[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(1): 232–244.
- [25] LIU D P, YIN G Q, LE X X, et al. Supramolecular Topological Hydrogels: From Material Design to Applications[J]. *Polymer Chemistry*, 2022, 13(14): 1940–1952.
- [26] 王盛冀, 经鑫, 易添灏. PAM/MXene 复合水凝胶基摩擦纳米发电机在包装运输中的应用[J]. *包装学报*, 2023, 15(1): 21–26.
- [27] WANG Z W, CONG Y, FU J. Stretchable and Tough Conductive Hydrogels for Flexible Pressure and Strain Sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2020, 8(16): 3437–3459.

- [28] PENG X W, WANG W D, YANG W S, et al. Stretchable, Compressible, and Conductive Hydrogel for Sensitive Wearable Soft Sensors[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 618: 111-120.
- [29] 陈 一, 李 朔, 李佳新, 等. 导电水凝胶在柔性电

子器件领域的研究进展 [J]. 包装学报, 2023, 15(6): 91-98.

(责任编辑: 邓 彬)

Preparation and Properties of Liquid Metal-Based Conductive Hydrogels

LIU Fang, TANG Li, TANG Jianxin

(College of Life Science and Chemistry, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Aiming at the problem of the poor compatibility of the interface between conventional conductive filler and hydrogel matrix, the flexible liquid metal (LM) was embedded in a hydrogel network formed by copolymerization of [2-(methacryloxy) ethyl] dimethyl -(3-propyl sulfonate) ammonium hydroxide (SBMA) and N-(2-hydroxyethyl) acrylamide (HEAA). A class of LM/p(SBMA-co-HEAA) conductive hydrogels with super-stretchability, high adhesion and excellent sensing capability were constructed. The results show that the surface of LM nanoparticles formed by ultrasonic dispersion had a rich structure of hydroxyl gallium oxide, which was easy to cause hydrogen bond interaction with the hydroxyl group in HEAA, and improved the stability of the interface between the conductive filler and the hydrogel matrix. In addition, the strain sensor based on the conductive hydrogel could maintain stable sensing performance under the condition of small strain 1% or large strain 150%, indicating that the strain sensor has broad application prospects in the field of human motion detection and intelligent packaging.

Keywords: hydrogel; flexible liquid metal; strain sensor; human motion detection; intelligent packaging