

http://pmse.scu.edu.cn

聚天冬氨酸/聚(丙烯酰胺-丙烯酸)/Fe³⁺离子水凝胶应变传感器的制备及在人体运动监测中的应用

崔聪聪, 李汉红, 毛林韩, 陈朝霞, 张玉红

(有机化工新材料省部共建协同创新中心 湖北省功能化学品工程技术研究中心 湖北大学化学化工学院, 湖北 武汉 430062)

摘要: 将聚天冬氨酸(PASP)引入聚(丙烯酰胺-丙烯酸)(P(AA-AM))中, 制备了PASP/P(AA-AM)水凝胶基质, 将该基质浸泡于FeCl₃·6H₂O水溶液, 得到了高强度、超拉伸, 灵敏度较好的新型双离子交联PASP/P(AA-AM)/FeCl₃(PAAF)水凝胶。Fe³⁺的引入不仅提高了PAAF水凝胶力学性能, 同时也赋予了优秀的传感性能。所得的水凝胶传感器表现出优异的拉伸性能(1125%)、良好的力学强度(802.97 kPa), 出色的快速自恢复性能(几乎完全恢复), 良好的抗疲劳性和较好的灵敏度(*GF*为3.04), 可以监测不同的人体运动(例如手指、肘部和膝关节), 在小应变和大应变下都具有较好的稳定性, 有望应用于可穿戴柔性传感器领域, 监测人体运动。

关键词: 水凝胶; 传感器; 聚天冬氨酸; 人体运动监测; 拉伸性

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2023)03-000-

近年来, 柔性可拉伸电子产品在可穿戴设备、软人工智能机器人、健康互联网、电子皮肤和人机界面等领域的应用需求不断增长, 引起了广泛关注^[1,2]。可监测人体运动、生命体征和生理信号的可拉伸传感器广泛应用于健康监测、疾病早期诊断、无创治疗、假肢等^[3]。目前, 已经开发出大量基于水凝胶的离子电子器件来模拟人体皮肤、轴突、弧线、肌肉等多功能感觉能力^[4-6]。例如, Sun等^[7]展示了一种高度可拉伸的(>1000%应变)离子触控面板透明度(可见光透射率为98%)基于氯化锂渗透聚丙烯酰胺(PAM)水凝胶, 可涂抹于表皮以感知外界, 诸如在皮肤上写字和玩游戏等活动。然而, 制备集合延展性、力学兼容性、耐久性等多功能于一体的多功能柔性应变传感器仍是一种挑战。

聚天冬氨酸(PASP)是一种水溶性多肽、氨基酸类聚合物, 内含肽键和羧基等活性基团, 具有极强的螯合、分散和吸附等作用, 同时具备优异的生物降解性和保湿性^[8,9]。然而, 有限的力学性能阻碍了PASP进一步发展应用^[10]。目前改善其力学性能的

方法主要是将PASP与无机矿物材料共混或共聚合成聚合物材料^[11]。

基于此背景, 本研究将PASP引入聚(丙烯酰胺-丙烯酸)(P(AA-AM))之中, 将生物相容性好的天然高分子聚天冬氨酸钠与高强度及高韧性的聚(丙烯酸-丙烯酰胺)相结合, 制备出一种用于人体运动监测的柔性应变传感器。首先制备PASP/P(AA-AM)水凝胶基质, 随后将该基质浸泡在FeCl₃·6H₂O水溶液中, 以形成高强度和超拉伸的新型双离子交联PASP/P(AA-AM)/FeCl₃(PAAF)水凝胶传感器。探讨了该离子水凝胶材料的拉伸性能、抗疲劳与自恢复性能, 并研究了PAAF离子水凝胶传感器在不同人体运动幅度时的电信号变化, 以期进一步扩宽聚天冬氨酸水凝胶在柔性应变传感器领域的应用。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

聚天冬氨酸钠: 化学纯, ≥40%, 购自山东优索化工有限科技公司; 丙烯酰胺(AM, 化学

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0045

收稿日期: 2022-05-31

基金项目: 湖北省功能化学品工程技术研究中心项目

通讯联系人: 陈朝霞, 主要从事功能材料研究, E-mail: chenzhaoxia@hubu.edu.cn;

张玉红, 主要从事功能高分子材料研究, E-mail: zhangyuhong@hubu.edu.cn

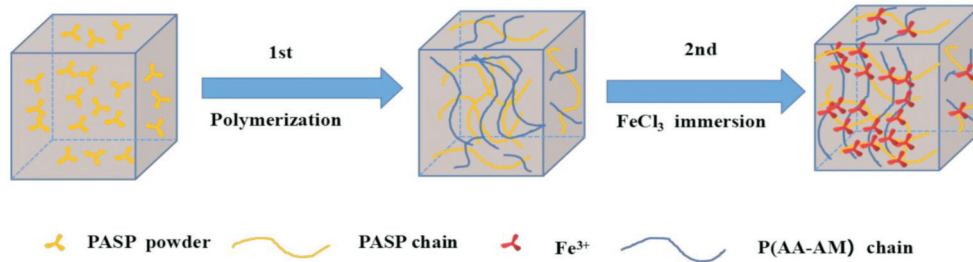


Fig.1 Schematic diagram of the preparation of PAAF hydrogels

纯, $\geq 98.0\%$)、六水合三氯化铁 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 化学纯, $\geq 99.0\%$)、 $\text{N,N}'$ -亚甲基双丙烯酰胺 (MBA, 分析纯, $\geq 98\%$) 和丙烯酸 (AA): 购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 PASP/P(AA-AM)/ FeCl_3 (PAAF) 水凝胶的制备

首先, 称取 0.3 g 的聚天冬氨酸钠溶于 10 mL 的去离子水中, 再依次加入 4 mol/L 丙烯酰胺、丙烯酸 0.2 mol/L AA 和 260 μL MBA 溶液 (0.1 g MBA 和 20 mL 水配置的溶液)。将混合溶液在 60 $^\circ\text{C}$ 的水浴中搅拌至完全溶解, 再加入 0.04 g 2-羟基-2-甲基苯乙酮搅拌 2 min, 将所得溶液注入透明模具, 并在紫外灯下聚合反应 1 h, 形成初步水凝胶。最后将初步水凝胶置于现配现制的 4 种不同浓度的 FeCl_3 溶液 (浓度分别为 0.025 mol/L, 0.05 mol/L, 0.075 mol/L 和 0.1 mol/L) 中, 30 $^\circ\text{C}$ 恒温浸泡 2 h 得到目标水凝胶 PAAF, 分别记为 PAAF-0, PAAF-0.025, PAAF-0.05, PAAF-0.075 和 PAAF-0.1。

1.3 测试与表征

1.3.1 力学性能测试: 使用 Instron 3366 型拉力机 (英斯特朗有限公司) 对制备得到的 PAAF 水凝胶样品 (直径 6.5 mm、长度 30 mm) 进行力学性能测试, 以 100 mm/min 的恒定拉伸速度测试圆柱形水凝胶样品。

1.3.2 形貌表征: 使用扫描电镜 (SEM, JSM6510LV, 日本电子) 对 PAAF-0 水凝胶和 PAAF-0.05 水凝胶进行微观形貌表征。首先将水凝胶样品置于冷冻机中冷冻干燥 24 h, 然后将所得样品喷金制样, 最后置于扫描电子显微镜中, 在 15 kV 的加速电压下进行观察。

1.3.3 电性能和传感性能分析: 使用 Keithley 2400 (美国吉利时) 数字仪表测量 PAAF 水凝胶传感器的传感性能和电导率。相对电阻变化 ($\Delta R/R_0$) 通过式 (1) 计算

$$\Delta R/R_0 = (R - R_0)/R_0 \quad (1)$$

式中: R_0 和 R 分别是不施加应变和施加应变的电阻。

2 结果与讨论

2.1 PAAF 水凝胶制备机理

Fig.1 是通过浸泡法制备聚天冬氨酸/聚(丙烯酰胺-丙烯酸)/ Fe^{3+} 离子水凝胶应变传感器的制备过程示意图。首先, 将聚天冬氨酸钠均匀溶解于去离子水, 依次加入 AM, AA 和 MBA 溶液, 将混合溶液在 60 $^\circ\text{C}$ 的水浴环境下搅拌至完全溶解, 加入 2-羟基-2-甲基苯乙酮搅拌均匀形成均一溶液, 将所得溶液注入透明模具中并在紫外灯下聚合形成 PASP/P(AA-AM) 初步水凝胶。最后将初步水凝胶置于现配现制的 FeCl_3 溶液于 30 $^\circ\text{C}$ 恒温浸泡 2 h 得到 PASP/P(AA-AM)/ FeCl_3 (PAAF) 目标水凝胶。

2.2 Fe^{3+} 浓度对 PAAF 水凝胶拉伸性能的影响

Fig.2(a~c) 分别显示了 PAAF-0, PAAF-0.025, PAAF-0.05, PAAF-0.075 和 PAAF-0.1 水凝胶的应力-应变拉伸曲线、韧性和弹性模量。从图中可以看出, PAAF-0 水凝胶仅具有 80.64 kPa 的拉伸强度、761.66% 的断裂伸长率、0.34 MJ/m^3 的韧性和 0.0859 kPa 的弹性模量, 而 PAAF-0.025 水凝胶则为 416.31 kPa, 918.75%, 1.496 MJ/m^3 和 0.43 kPa, 分别是 PAAF-0 水凝胶相应性能的 5.16, 1.2, 4.4 和 5 倍, PAAF-0.05 水凝胶则展示了更优异的性能 (分别为 PAAF-0 水凝胶的 9.96, 1.48, 9.96 和 8.15 倍)。之后, 随着 Fe^{3+} 浓度增大, 力学性能开始减弱。PAAF-0.075 水凝胶和 PAAF-0.1 水凝胶则分别只有 PAAF-0 水凝胶相应性能的 6.6, 1.1, 4.9, 7.2 倍和 4, 0.78, 2.3, 6 倍。在 FeCl_3 浓度达到 0.05 mol/L 之前, PAAF 水凝胶机械应力的升高主要是归因于 Fe^{3+} 与 PASP 分子以及聚(丙烯酰胺-丙烯酸)链之间的离子交联的改善^[12, 13], 然而, 加入过量 Fe^{3+} 会导致 PAAF 水凝胶内部过度且不均匀的离子交联, 从而引起 PAAF 水凝胶力学性能的下降。

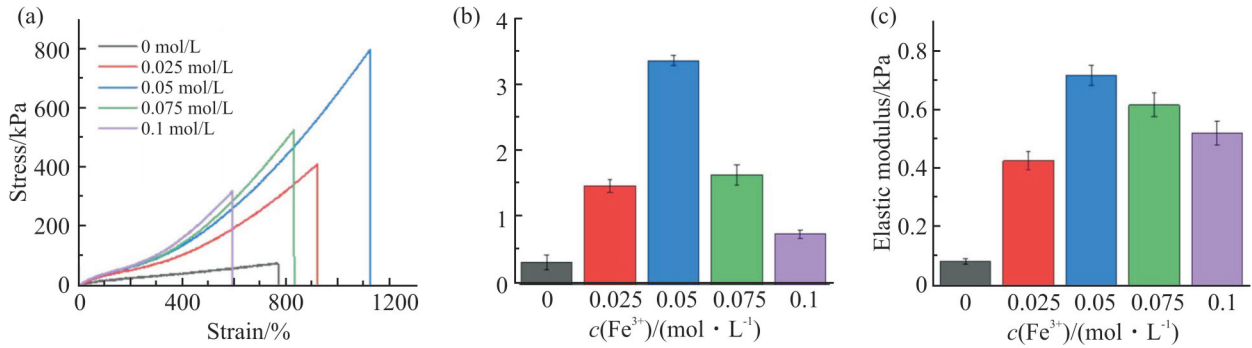


Fig.2 Mechanical properties of PAAF hydrogels immersed in FeCl_3 solutions with different concentrations
(a): stress-strain curves; (b): corresponding toughness; (c): corresponding Elastic modulus

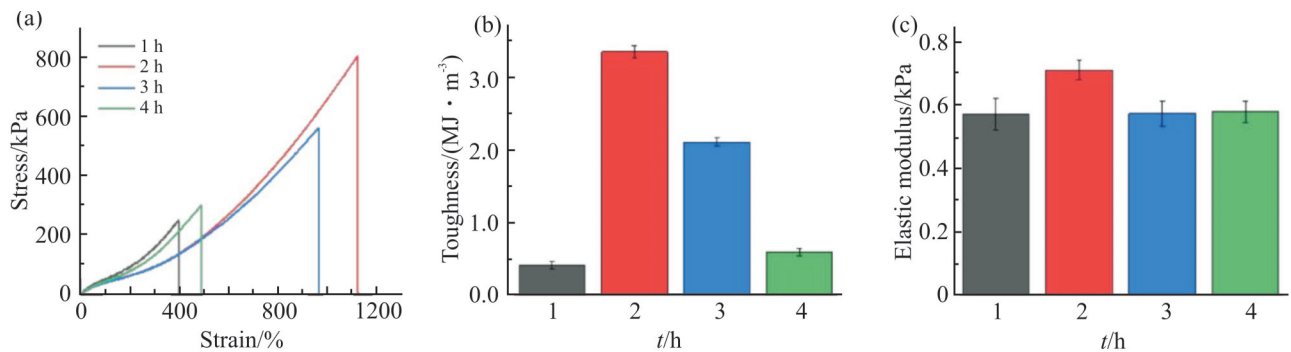


Fig.3 Mechanical test results of PAAF-0.05 hydrogel after soaking in 0.05 mol/L of FeCl_3 solution for different time (1 h, 2 h, 3 h, and 4 h)
(a): stress-strain curves; (b): corresponding toughness; (c): corresponding Elastic modulus

2.3 浸泡时间对PAAF-0.05水凝胶拉伸性能的影响

选用具有最佳力学性能的PAAF-0.05水凝胶,探究了不同浸泡时间对其力学性能的影响。结果表明,经过浸泡处理后的水凝胶,其力学性能可以得到较大幅度的提高。浸泡前,PAAF-0水凝胶仅具有80.64 kPa的拉伸强度、761.66%的断裂伸长率、0.34 MJ/m^3 的韧性和0.086 kPa的弹性模量,随着PAAF水凝胶在0.05 mol/L FeCl_3 溶液中的浸泡时间逐渐增加,水凝胶的拉伸应力、断裂应变和韧性也随之逐渐提高,并且当浸泡时间达到2 h时,水凝胶的拉伸应力、断裂应变、韧性和弹性模量都达到最大值,分别为802.97 kPa, 1122.5%, 3.388 MJ/m^3 和0.72 kPa(Fig.3)。因此,可以得出结论,三价铁离子溶液的浸泡处理是改善水凝胶力学性能的有效方法。这可能是由于浸泡过程中产生的盐析效应能促进PASP和P(AA-AM)链与链之间的链缠结相互作用^[14]。但是,浸泡时间应该受到合理控制,浸泡时间过长反而对水凝胶力学性能不利。因此,在0.05 mol/L的 FeCl_3 溶液中浸泡2 h后得到的PAAF-0.05水凝胶的力学性能最佳。

2.4 PAAF-0.05的自恢复和抗疲劳性能

为了评估PAAF-0.05水凝胶的抗疲劳性能,在固定拉伸应变为500%的情况下,对水凝胶进行了连续10次拉伸和释放循环。如图4(a)和Fig.4(b)所示,PAAF-0.05水凝胶在第1次加卸载循环中耗散了大量能量,在随后连续进行的第2次循环中耗散能急剧下降,此现象表明了部分可逆的离子键在断裂后无法立刻恢复。接下来的8次循环加载卸载曲线几乎保持重叠,并且表现出几乎相同的耗散能。以上结果表明,PAAF-0.05水凝胶具有良好的抗疲劳性能。这是因为可逆的双重离子交联赋予了PAAF-0.05离子水凝胶出色的抗疲劳性能。

可逆的双离子交联不仅使PAAF-0.05离子水凝胶具有优异的抗疲劳性能,还使其具有良好的快速自恢复性能。为了评估PAAF-0.05离子水凝胶的自恢复性能,对水凝胶进行了500%固定应变下的加载-卸载循环,随后研究了PAAF-0.05水凝胶在室温下密封保存不同恢复时间的情况下的拉伸释放测试。

Fig.5a和Fig.5b显示了PAAF-0.05水凝胶在不同恢复时间(0 min, 10 min, 30 min和50 min)下的循环拉伸性能和耗散能。显而易见,与第1次循环拉伸

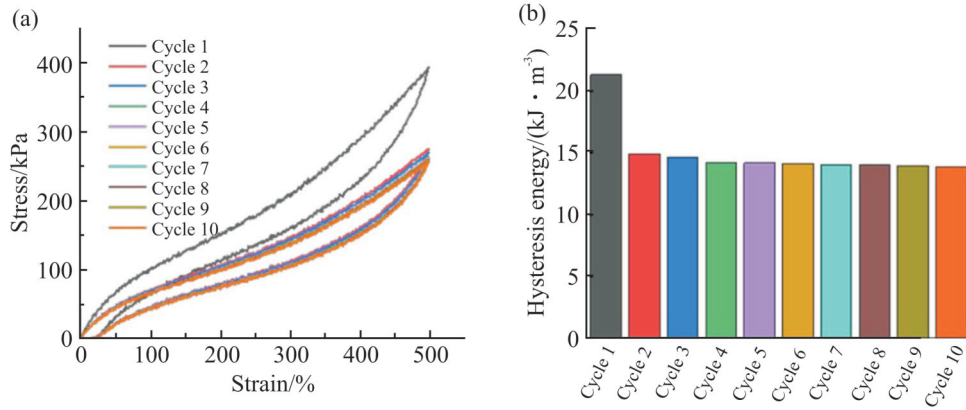


Fig.4 Anti-fatigue test results of PAAF-0.05 hydrogel

(a): ten-cycle loading-unloading curves of PAAF-0.05 hydrogel samples at a constant tensile strain of 500%; (b): dissipated energy corresponding to ten cycles

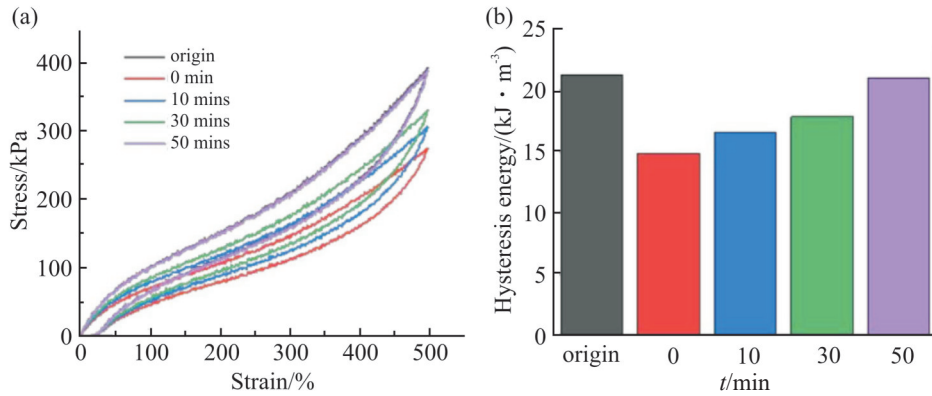


Fig.5 Self-recovery test results of PAAF-0.05 hydrogel

(a): load-unload test of PAAF-0.05 hydrogel under 500% strain and load-unload cycle curve after recovery time of 0 min, 10 min, 30 min, and 50 min (recovery process is sealed at room temperature); (b):dissipated energy at different recovery time

相比,直接进行第2次循环拉伸的耗散滞回圈面积急剧下降,随着PAAF-0.05水凝胶静置恢复时间的逐渐增加,水凝胶耗散滞回圈的面积逐渐恢复。此外,PAAF-0.05水凝胶在恢复10 min后,拉伸应力(306.56 kPa)恢复到原来的78%,耗散能(16.6 kJ/m³)恢复到原来的77.9%。随着恢复时间的延长,恢复率逐渐提高,当恢复时间达到50 min时,PAAF-0.05水凝胶的拉伸应力(390 kPa)恢复到了原来的99.2%,同时,耗散能(21.1 kJ/m³)恢复到了原来的99%。以上实验结果表明,PAAF-0.05水凝胶具有出色的快速自恢复性能。

2.5 PAAF离子水凝胶的微观结构

众所周知,水凝胶的力学性能与其内部微观结构密切相关,因此使用扫描电子显微镜直观地观察了PAAF-0和PAAF-0.05水凝胶的内部微观结构。如图6(a)所示,浸泡前的水凝胶(即PAAF-0水凝胶)具有相对较大的孔径尺寸和较薄的孔壁,导致

其三维网络结构在受到外部载荷作用时容易发生破坏,从而表现出较差的力学性能。如图6(b)所示,水凝胶经FeCl₃溶液浸泡后,Fe³⁺与丙烯酸的羧基和PASP的羧基之间产生了强离子交联,PAAF-0.05水凝胶的孔径明显变小,孔壁厚度大大提高,表明Fe³⁺的引入促进PAAF-0.05水凝胶形成了更为紧密的网络结构。致密的网络结构提高了凝胶的能量耗散能力,从而使PAAF-0.05离子水凝胶在承受外力作用后仍然可以保持良好的力学性能,即具有良好的自恢复性。

2.6 PAAF-0.05离子水凝胶的传感性能

FeCl₃溶液的浸泡处理不仅改善了PAAF水凝胶的力学性能,而且还赋予了PAAF水凝胶优异的应变敏感性能和电导率。水凝胶内部的孔隙和水环境有利于离子的传输,通过测试计算得到PAAF-0.05水凝胶的电导率为0.126 S/m。PAAF-0.05应变传感器在施加不同应变下的相对电阻变化($\Delta R/R_0$)

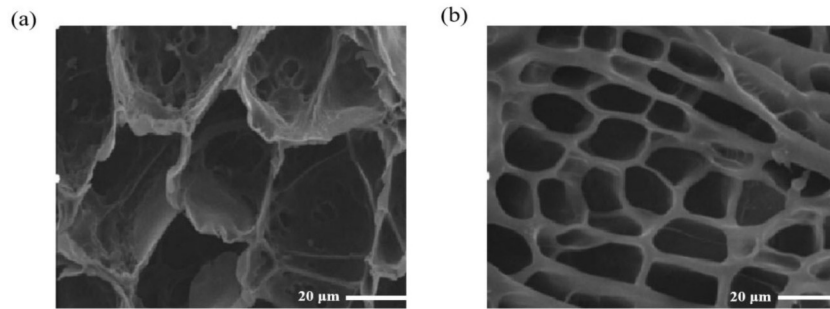


Fig.6 SEM images of PAAF hydrogels before and after soaking (scale bar = 20 μm)
(a): before soaking (PAAF-0); (b): after soaking (PAAF-0.05)

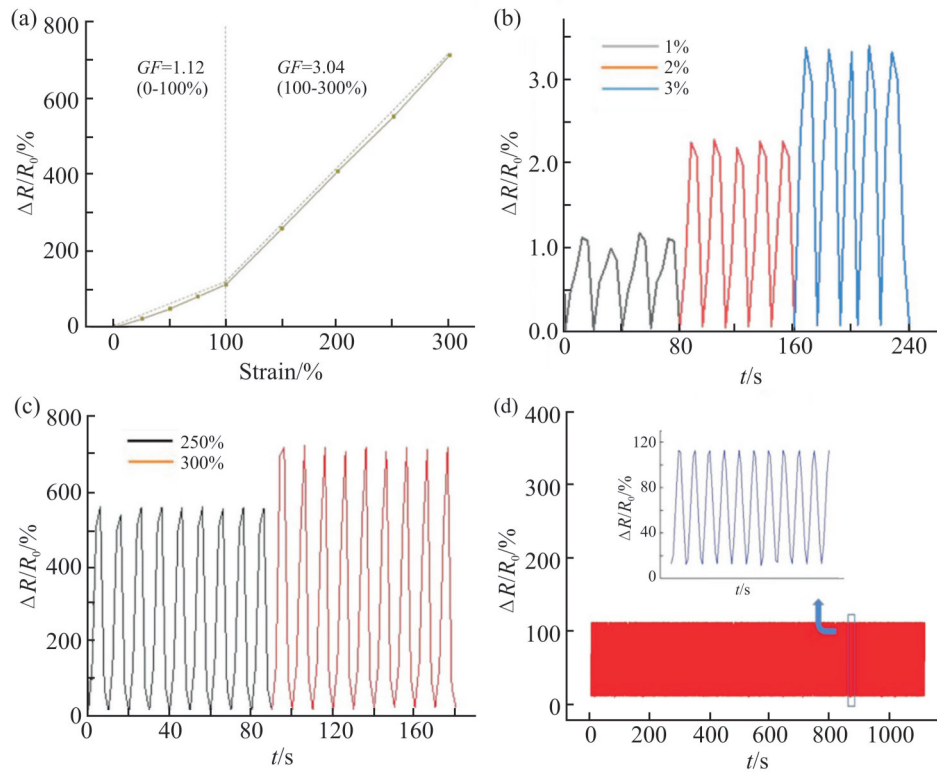


Fig.7 Sensing performance of PAAF-0.05 hydrogel sensor

(a): relative resistance change versus tensile strain; (b): real-time response signals to repetitive small strains (1%, 2%, 3%); (c): real-time response signal to repeated large strain (250%, 300%); (d): response to repeated stretching and releasing of 100% strain for 1000 cycles

可用来研究传感器的应变敏感性。灵敏因子 (GF) 被定义为 $\Delta R/R_0$ 应变曲线的斜率, 且 GF 通常被用于评估应变传感器的灵敏性。选用 PAAF-0.05 水凝胶进行传感性能探究, 如 Fig.7(a) 所示, 在 300% 的连续拉伸应变范围之内, PAAF-0.05 水凝胶传感器的 $\Delta R/R_0$ 随着外部施加应变的增加而表现出连续性的增加。将 300% 的应变范围划分为 2 个区域, 可以观察到 2 个区域具有不同的斜率, 对应着不同的 GF 。分别地, 在 0%~100% 的应变范围内的灵敏因子为 1.12, 在 100%~300% 的应变范围内的灵敏因子为

3.04。不同的灵敏因子可能是由于在不同的拉伸应变下, PAAF-0.05 离子水凝胶应变传感器的内部多孔结构会转变成不同程度的致密结构, 导致不同的离子传导途径, 从而产生不同的 $\Delta R/R_0$ [15]。制备的 PAAF-0.05 离子水凝胶应变传感器具有较好的灵敏因子, 表明 PAAF-0.05 离子水凝胶对外界施加的拉伸形变具有良好的响应能力。

良好的灵敏性有利于 PAAF-0.05 离子水凝胶应变传感器监测各种不同大小的应变。Fig.7(b) 和 Fig.7(c) 所示为 PAAF-0.05 水凝胶传感器在 3 V 的恒

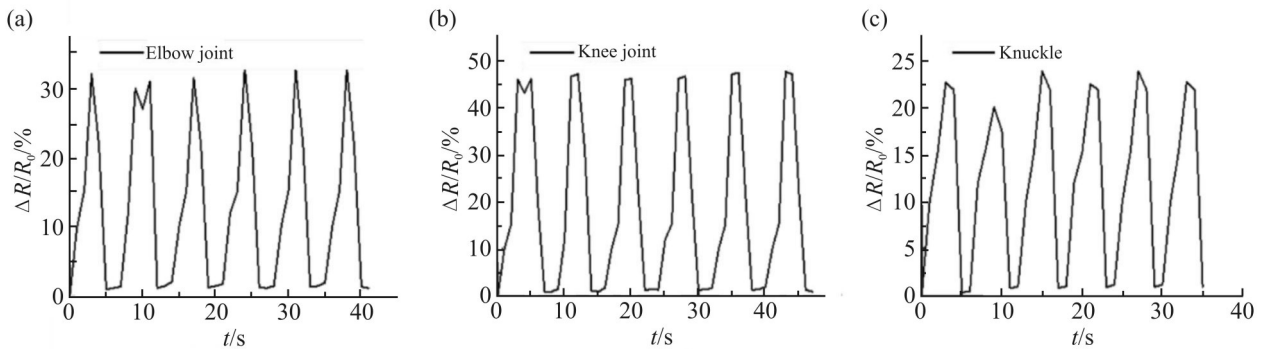


Fig.8 Real-time resistance curves of PAAF-0.05 hydrogel attached to different human joints
(a): elbow joint; (b): knee joint; (c): knuckle

定电压下对于不同拉伸应变的实时响应信号,可以看出 PAAF-0.05 水凝胶传感器不仅可以重复稳定地检测出大应变下(250%和 300%)产生的电信号,也能够准确地检测到微小应变下(1%, 2%, 3%)产生的响应信号。对 PAAF-0.05 水凝胶传感器的循环稳定性进行了测试。如 Fig.7(d), PAAF-0.05 水凝胶传感器在 1000 次 100%应变的连续拉伸-释放过程中没有表现出明显的电信号损失。以上结果表明 PAAF-0.05 水凝胶具有较好的灵敏性和动态稳定性,可应用于柔性应变传感器。

2.7 PAAF-0.05 水凝胶用于人体运动检测的性能测试

为了进一步探究 PAAF-0.05 离子水凝胶传感器在人体运动监测中的实用性,将 PAAF-0.05 水凝胶贴附在不同的人体关节进行了应变传感性测试。Fig. 8 (a~c)分别展示了附着于肘关节、膝关节和指关节上的 PAAF-0.05 水凝胶传感器的相对电阻变化实时曲线。当人体关节进行弯曲运动时, PAAF-0.05 水凝胶传感器被迅速拉长,这导致了电阻的快速增加,当关节运动恢复时,电阻信号也随之迅速恢复。通过比较 PAAF-0.05 水凝胶传感器的相对电阻变化值,可以区分不同人体关节的弯曲行为,以上结果说明 PAAF-0.05 水凝胶用于人体运动监测时具有较好稳定性和灵敏度。

3 结论

将聚天冬氨酸(PASP)引入聚(丙烯酰胺-丙烯酸)体系,形成 PASP/P(AA-AM)水凝胶基质,将该基质浸泡在 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 水溶液中,制备了高强度、超拉伸,灵敏度较好的新型双离子交联 PASP/P(AA-AM)/ FeCl_3 (PAAF)水凝胶。 Fe^{3+} 的引入不仅提高了水凝胶的力学性能,同时也赋予水凝胶的传感性能。

所得的水凝胶传感器表现出较好的拉伸性能(1125%)、良好的力学强度(802.97 kPa),出色的快速自恢复性能(几乎完全恢复),良好的抗疲劳性和较好的灵敏度(GF 为 3.04)。此外,制备的新型复合水凝胶能够灵敏地检测不同部位的人体运动(例如肘部、膝关节和手指),在可穿戴柔性传感器用于监测人体运动领域极具发展潜力。

参考文献:

- [1] Yin J, Lu C, Li C, *et al.* A UV-filtering, environmentally stable, healable and recyclable ionic hydrogel towards multifunctional flexible strain sensor[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 230: 109528.
- [2] 刘剑桥, 舒浩然, 王晓玲, 等. 导电水凝胶的构筑设计及应用[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(7): 182-190.
Liu J Q, Shu H R, Wang X L, *et al.* Construction and applications of conductive hydrogels [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(7): 182-190.
- [3] Xu J, Jin R, Duan L, *et al.* Tough, adhesive and conductive polysaccharide hydrogels mediated by ferric solution[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 211: 1-10.
- [4] Henderson K J, Zhou T C, Otim K J, *et al.* Ionically cross-linked triblock copolymer hydrogels with high strength[J]. *Macromolecules*, 2010, 43: 6193-6201.
- [5] Sun T L, Kurokawa T, Kuroda S, *et al.* Physical hydrogels composed of polyampholytes demonstrate high toughness and viscoelasticity[J]. *Nature Materials*, 2013, 12: 932-937.
- [6] Shen J, Zhou Z, Chen D, *et al.* Poly (aspartic acid) based self-healing hydrogels with antibacterial and light-emitting properties for wound repair[J]. *Colloid and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, 200: 111568.
- [7] Kim C C, Lee H H, Oh K H, *et al.* Highly stretchable transparent tonic touch panel[J]. *Science* 2016, 353: 682-687.
- [8] Li S, Zhang C, Yu Q, *et al.* Functional polyaspartic acid fibers hydrogel membrane with enhanced mechanical performance

- prepared by coaxial electrospinning[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8: 036407.
- [9] Chen X, Li J, Mao C, *et al.* A novel superabsorbent composite based on poly (aspartic acid) and organo-kaolin[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 2014, 51: 799-804.
- [10] Lu J, Li Y, Deng H, *et al.* Synthesis and properties of pH-, thermo-, and salt-sensitive modified poly(aspartic acid)/ poly (vinyl alcohol) IPN hydrogel and its drug controlled release[J]. *BioMed research international*, 2015, 2015: 236745
- [11] Wang J, Wei J, Su S, *et al.* Ion-linked double-network hydrogel with high toughness and stiffness[J]. *Journal of Material Science*, 2015, 50: 5458-5465.
- [12] Zhou H, Li S, Liu H, *et al.* High - performance flexible sensors of self - healing, reversibly adhesive, and stretchable hydrogels for monitoring large and subtle strains[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305: 1900621.
- [13] Wang L, Li Y, Lin L, *et al.* Novel synthesis of mussel inspired and Fe^{3+} induced pH-sensitive hydrogels: Adhesion, injectable, shapeable, temperature properties, release behavior and rheological characterization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 236: 116045.
- [14] Li S, Pan H, Wang Y, *et al.* Polyelectrolyte complex-based self-healing, fatigue-resistant and anti-freezing hydrogels as highly sensitive ionic skins[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8: 3667-3675.
- [15] Sun X, Yao F, Wang C, *et al.* Ionically conductive hydrogel with fast self-recovery and low residual strain as strain and pressure sensors[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2020, 41: 2000185.

Preparation of Polyaspartic Acid / Poly (Acrylamide-Acrylic Acid) / Fe^{3+} Ionic Hydrogel Strain Sensor and Its Application in Human Motion Monitoring

Congcong Cui, Hanhong Li, Linhan Mao, Zhaoxia Chen, Yuhong Zhang

(Collaborative Innovation Center for Advanced Organic Chemical Materials Co-Constructed by the Province and Ministry, Ministry of Education Key Laboratory for the Synthesis and Application of Organic Functional Molecules, College of Chemistry and Chemical Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

ABSTRACT: Polyaspartic acid/poly (acrylamide-acrylic acid) (PASP/P(AA-AM)) hydrogel matrix was prepared by introducing PASP into the poly (acrylamide-acrylic acid). A new type of double ion cross-linked PASP/P(AA-AM)/ FeCl_3 (PAAF) hydrogel with a high strength, super stretch, and better sensitivity was obtained through immersing the above matrix in $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ aqueous solution. The introduction of Fe^{3+} can not only improve the mechanical properties of PAAF hydrogel, but also endow excellent sensing properties. The obtained hydrogel sensor shows excellent tensile properties (1125%), good mechanical strength (802.97 kPa), excellent fast self-healing performance (almost complete recovery), good fatigue resistance, and good sensitivity (GF is 3.04), which could detect the different human movements (such as fingers, elbows, and knee joints) with good stability under both small and large strains. The obtained PAAF hydrogel can be used as wearable flexible sensor to monitor human movements.

Keywords: hydrogel; sensor; polyaspartic acid; human motion detection; stretchability