文章编号:1674-2869(2024)06-0618-07

CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的制备及在应变传感器中的应用

柴子铧,隋忠良,吴江渝,王大威,曾小平*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:通过一锅法制备了铁离子交联的羧甲基纤维素/聚[丙烯酸-(2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸)][CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}]导电水凝胶,研究了CMC和AMPS含量对凝胶力学性能的影响,并使用万能拉伸试验机及数字万用表测试了该凝胶的自恢复性能和应变传感性能。结果表明,当CMC的质量分数为1.5%、AMPS质量分数为1.5%时,CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶综合力学性能最佳,此时CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶断裂强度为171 kPa,断裂伸长率为398%。当应变在0%~400%时,CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的规范因子达到3.55。基于CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的应变传感器能准确检测0%~500%的应变,能对人体不同尺度动作进行监测,且具有良好的循环稳定性。

关键词:导电水凝胶;离子交联;应变传感;人体运动监测
中图分类号:TQ427.26 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202404044

Preparation of CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel and its application in strain sensors

*CHAI Zihua, SUI Zhongliang, WU Jiangyu, WANG Dawei, ZENG Xiaoping**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: An electrically conductive hydrogel of carboxymethyl cellulose/poly[acrylic acid-co-(2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid)][CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}] crosslinked with iron ions was prepared through a one-pot method. The influence of CMC and AMPS content on the mechanical properties of the hydrogel was investigated. Additionally, the self-recovery performance and strain sensing properties of the hydrogel were tested using a universal tensile testing machine and a digital multimeter. Results show that the CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel exhibits the optimal overall mechanical properties when the mass fraction of CMC is 1.5% and that of AMPS is 1.5%. At this composition, the hydrogel demonstrated a fracture strength of 171 kPa and fracture elongation of 398%. With strains ranging from 0% to 400%, the gauge factor of the CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel reaches 3.55. Utilizing the CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel as a base, the strain sensor accurately detects strains from 0% to 500%, enabling monitoring of various human movements while maintaining excellent cyclic stability.

Keywords: conductive hydrogel; ion cross-linking; strain sensing; human motion monitoring

导电水凝胶作为一种具有良好的柔性、生物相容性、可伸展性和安全性的材料[1-3],在可穿戴设备[4-5]、超级电容器[6]、运动监测[7]、电子皮肤[8]和储能设备[9]等领域有着广泛的应用,是一种极

收稿日期:2024-04-30
基金项目:生物无机化学与药物湖北省重点实验室开放基金(BCMM2020003)
作者简介:柴子铧,硕士研究生。Email:1579394930@qq.com
***通信作者**:曾小平,博士,副教授。Email:xpzeng@wit.edu.cn
引文格式:柴子铧,隋忠良,吴江渝,等. CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的制备及在应变传感器中的应用[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(6):618-624.

具开发潜力的材料。导电水凝胶由于其柔软的机械特性，已经被广泛应用于人体运动监测领域。与传统的柔性可穿戴电子产品[10-12]不同，导电水凝胶具有与人体皮肤相似的杨氏模量，可以有效地避免界面剥离和皮肤擦伤等问题。

2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸（2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid，AMPS）是一种功能性单体，被广泛用于制备各种功能水凝胶[13-15]。Mao等[16]制备了一种只含AMPS的水凝胶应变传感器，可以监测一些简单的人体运动。然而，单一的AMPS水凝胶虽然具备一定的力学性能和应变传感能力，但是机械强度不高，随着应变从50%增大到100%，相对电阻变化不大，对大应变的监测不够灵敏。在水凝胶中引入金属离子除了赋予水凝胶优异的导电性，还能增强水凝胶的机械性能[17-18]。羧甲基纤维素钠（sodium carboxymethyl cellulose，CMC-Na）是一种由天然纤维素化学改性得到的钠盐，其结构中含有大量羧基，可与多种金属离子交联[19-20]。水凝胶体系中通常通过预先制备凝胶然后浸泡离子溶液的方法引入金属离子，其制备步骤复杂，且耗时长，采用简便方法制备基于离子交联的导电水凝胶[21]已成为新的研究方向。

基于以上背景，采用一锅法制备了一种基于离子交联的CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶。其中Fe^{3+}与AMPS的磺酸基团、丙烯酸（acrylic acid，AA）及CMC的羧基形成配位，可增加整个体系的机械性能，同时游离在水凝胶内部的Fe^{3+}还能够为水凝胶提供导电性。制备的CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶，机械性能良好，导电性能优异，能精准识别出不同程度的应变，可制备应变传感器用于监测人体的全尺度运动。

1　实验部分

1.1　药品及仪器

CMC、丙烯酰胺（acrylamide，AM）、AA、过硫酸钾（potassium persulfate，KPS）、六水合三氯化铁（ferric chloride hexahydrate，$FeCl_3·6H_2O$）、*N*，*N*′-亚甲基双丙烯酰胺（methylene-bis-acrylamide，MBA）、无水硫酸钠（sodium sulfate，Na_2SO_4）、AMPS，购自国药化学试剂有限公司。万能试验机（Instron5567）、恒温磁力搅拌器（DF-101S）、数字万用表（DMM6500）、电子天平（BS124S）。

1.2　CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的制备

取一定量的CMC溶解在烧瓶中，在烧瓶内加入一定量AMPS、6 mL AA、0.2 mL的$FeCl_3·6H_2O$溶液（1 mol/L）、0.04 g交联剂MBA及0.04 g引发剂KPS，固定混合溶液质量为20.00 g，搅拌一定时间至混合溶液完全溶解，将溶液注入制作好的模具内，超声脱泡处理，然后在60 ℃的恒温水浴箱中反应18 h，得到CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶。

1.3　测试表征

（1）水凝胶拉伸性能测试

将水凝胶样品（长方体，长×宽×厚为6.0 cm×2.0 cm×0.2 cm）固定在万能试验机上，按50 mm/min的速率进行拉伸，记录水凝胶的应力-应变曲线。

（2）水凝胶自恢复性能测试

将水凝胶样品（长方体，长×宽×厚为6.0 cm×2.0 cm×0.2 cm）固定在万能试验机上，按50 mm/min的速率进行拉伸，设定水凝胶的应变为50%，循环10次。

（3）水凝胶导电性能测试

规范因子（gauge factor，GF）是评价水凝胶应变传感器灵敏度的核心性能指标之一，定义为：$F=\Delta R/(R_0\varepsilon)$，其中，$\Delta R$为水凝胶应变时相对电阻，$R_0$为水凝胶初始电阻，$\varepsilon$为水凝胶的应变程度。

在不同应变下使用万能试验机对水凝胶进行拉伸，夹住水凝胶并使用数字万用表获得水凝胶电阻信号，并记录水凝胶的电阻变化。将水凝胶固定在人体不同部位上，在人体做出不同动作时，通过数字万用表记录水凝胶的电阻变化，将运动信号转换为电信号，以便监测人体各个关节的运动。

2　结果与讨论

2.1　CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的制备机理

CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的制备机理如图1所示。单体AA与AMPS在交联剂MBA与引发剂KPS的作用下形成P(AA-co-AMPS)化学交联网络，CMC链段穿插在其中，Fe^{3+}可与网络中羧基和磺酸基配位，有3种形式：如图1中所示，与CMC上的羧基配位，在CMC链之间形成离子交联；在P(AA-co-AMPS)链上的磺酸基和羧基之间形成配位，在P(AA-co-AMPS)链之间形成离子交联；与CMC上的羧基以及P(AA-co-AMPS)链磺酸基和羧基形成配位，连接CMC链与P(AA-co-AMPS)链。CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}形成了基于离子交联和化学交联的多重网络结构。

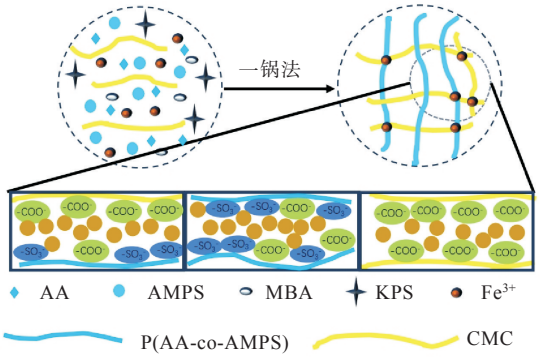

图1 CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶制备流程图

Fig. 1 Flowchart for CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel preparation

2.2 CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶拉伸性能

2.2.1 AMPS含量对导电水凝胶拉伸性能的影响 保持CMC的质量分数为1.5%，改变AMPS的量制备不同配方的导电水凝胶。如图2(a,b)所示，随着AMPS质量分数增加，导电水凝胶的最大应力与应变的变化呈现出先升高后降低的趋势，导电水凝胶的模量随AMPS质量分数的增加而增加。这是由于$-COO^-$与Fe^{3+}配位能力要大于$-SO_3^-$，随着AMPS在聚合物链中占比增加，Fe^{3+}与$-SO_3^-$配位点增加，从而使导电水凝胶的力学性能增强。当AMPS质量分数由1.5%增加到2.0%时，Fe^{3+}与$-SO_3^-$的配位增加，而与$-COO^-$的配位几率相对低AMPS含量时有所减小，且Fe^{3+}与$-COO^-$形成的配位更加稳定，故当AMPS质量分数增多时，Fe^{3+}的配位作用有所减弱，导电水凝胶的力学性能降低。继续研究水凝胶模量与AMPS质量分数的关系，可以观察到导电水凝胶的模量随着AMPS质量分数的增加而增加，这是因为AMPS质量分数增加，Fe^{3+}与$-SO_3^-$配位点增多，离子交联程度大，导电水凝胶的强度逐渐变大，故而模量随着AMPS质量分数的增加而增加。综合应力及应变误差因素考虑，在AMPS质量分数占比为1.5%时，测得导电水凝胶拉伸性能的数据误差最小，后续实验采用AMPS质量分数为1.5%的配方进行测试。

2.2.2 CMC含量对导电水凝胶拉伸性能的影响 保持体系其他组分含量不变(6 mL AA、质量分数1.5%的AMPS、0.2 mL Fe^{3+}溶液、0.04 g MBA、0.04 g KPS)，改变CMC的质量分数，研究CMC质量分数对导电水凝胶拉伸性能的影响，结果如图3所示。图3(a)显示了CMC质量分数对导电水凝胶拉伸应力-应变曲线的影响，当CMC质量分数为0.5%时，导电水凝胶的断裂伸长率最大，而CMC质量

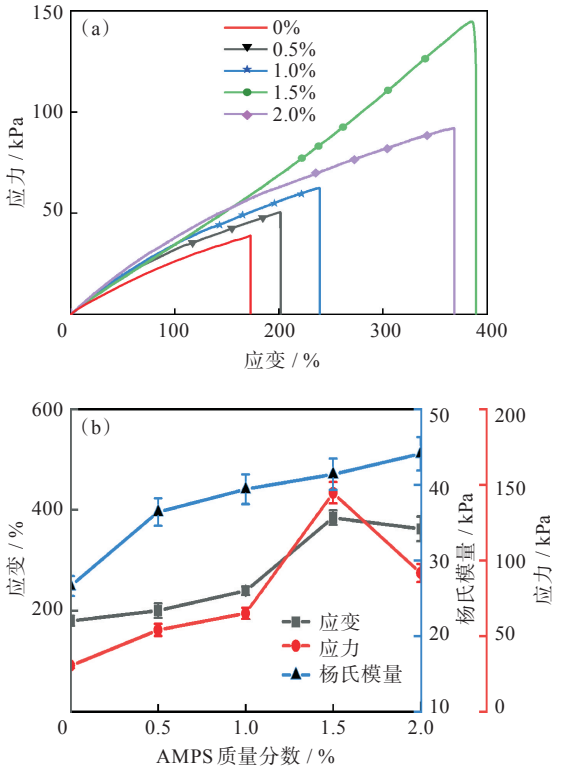

图2 不同质量分数AMPS制备的导电水凝胶的拉伸应力-应变曲线(a)和模量、应变、应力误差图(b)

Fig. 2 Tensile stress-strain curves (a) and error plots for modulus, strain, and stress (b) of conductive hydrogels prepared with different AMPS mass fractions

分数为1.5%时，导电水凝胶的断裂强度最大。图3(b)为CMC质量分数对导电水凝胶应力以及应变的影响。其中断裂强度和断裂伸长率都随着CMC质量分数的增加而先增加后减小，断裂强度在CMC质量分数为1.5%时达到了最大值171 kPa，而随着CMC质量分数继续增加到2.0%时，导电水凝胶的最大应力和应变均减小，当CMC质量分数为2.0%时断裂伸长率不及CMC质量分数为1.5%时的50%。图3(b)中显示，导电水凝胶的模量随CMC质量分数的增加而明显增大。当CMC质量分数为0.5%时，导电水凝胶的模量仅为79.8 kPa，而当CMC质量分数为2.0%时，导电水凝胶的模量增大至185 kPa，增加了近3倍。这是因为当CMC质量分数增加，CMC上的羧基与Fe^{3+}配位作用加剧，导电水凝胶内部交联密度增加，此时导电水凝胶的最大应力和应变均有所增加，而CMC质量分数进一步增加时，Fe^{3+}进一步与$-COO^-$以及$-SO_3^-$配位，导电水凝胶网络更密集，此时导电水凝胶变得更脆且容易断裂，降低了导电水凝胶的力学性能，故而最大应力和应变随着CMC质量分数的进一步增加而开始减小。综合考虑导电水凝胶的机

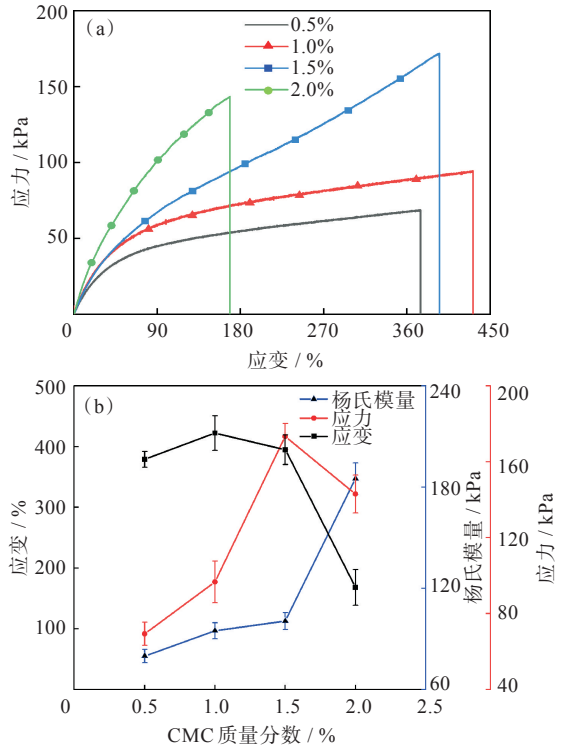

图3　不同质量分数CMC制备的导电水凝胶的拉伸应力-应变曲线(a)和模量、应力、应变误差图(b)

Fig. 3　Tensile stress-strain curves (a) and error plots for modulus, stress, and strain (b) of conductive hydrogels prepared with different CMC mass fractions

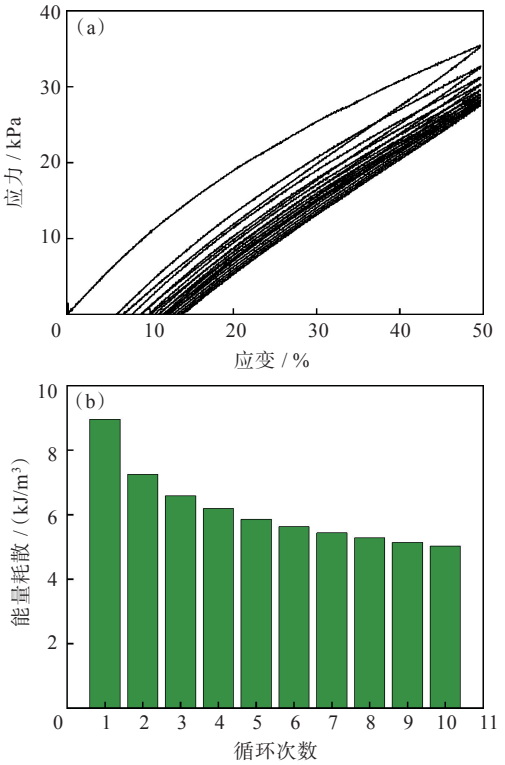

图4　在应变50%时拉伸循环10次应力-应变曲线(a)和能量耗散(b)

Fig. 4　Tensile cyclic loading for 10 cycles at 50% strain: stress-strain curves (a) and energy dissipation (b)

械性能，当AMPS质量分数为1.5%、CMC质量分数为1.5%时，导电水凝胶的机械性能最优异，故而选取此配方进行后续实验。

2.3　CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶自恢复性能

用作应变传感器的水凝胶应具有良好的拉伸恢复性，即在施加应变后能够迅速恢复原状，避免长时间形变或塑性变形。这有助于传感器在多次应变加载和卸载周期中保持稳定的性能。对CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶进行拉伸循环测试来探究水凝胶的拉伸自恢复性能，设定水凝胶的拉伸应变为50%时得到的CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶拉伸循环曲线如图4所示。在应变设定为50%时能观察到明显的迟滞环，在无回复时间的拉伸循环实验中，水凝胶存在明显的能量耗散，证明在每次循环中，水凝胶的内部结构发生变化，配位键被打破和重组，从而消耗了大量的能量。在第1个循环中，由于初始状态下水凝胶的内部结构相对较紧密，配位键的解离和重组过程会引起较大的能量损耗，因此能量耗散会大于后面几次循环，第1次循环的能量耗散为8.96 kJ/m³，第10次循环的能量耗散为5.03 kJ/m³，为初次循环的56%，如图4(b)所示，能量耗散最大的为第1个循环，而后续循环能量耗散变化不大。并且在最后3次循环中，能量耗散变化率在2%左右，说明CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶在重复拉伸过程中拥有良好的自恢复性能，具有作为应变传感器的潜能。

2.4　CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶应变传感性能

水凝胶应变传感器的GF值越高，表明在单位应变下产生的电信号变化越大，传感器的灵敏度越高。将待测的CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶固定在万能试验机上，用导线将CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶与数字万用表连接测量其电阻。如图5所示，设定最大拉伸应变为400%，测定CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶在不同应变范围内对应的相对电阻变化。当水凝胶的应变范围为0%~100%，GF系数为1.48；当水凝胶应变范围在100%~200%，GF系数为2.38；水凝胶在更高的应变范围200%~400%，GF系数为3.55。以上结果表明，CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶具有良好的应变敏感性，可以用作应变传感器。

CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的相对电

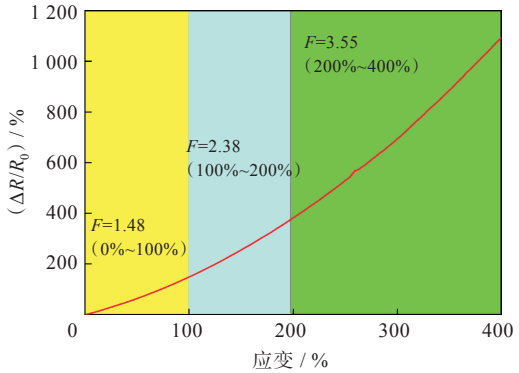

图5 CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶相对电阻变化与应变之间的关系曲线,斜率为GF

Fig. 5 Relationship curve between relative resistance change and strain for CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel, with a slope of GF

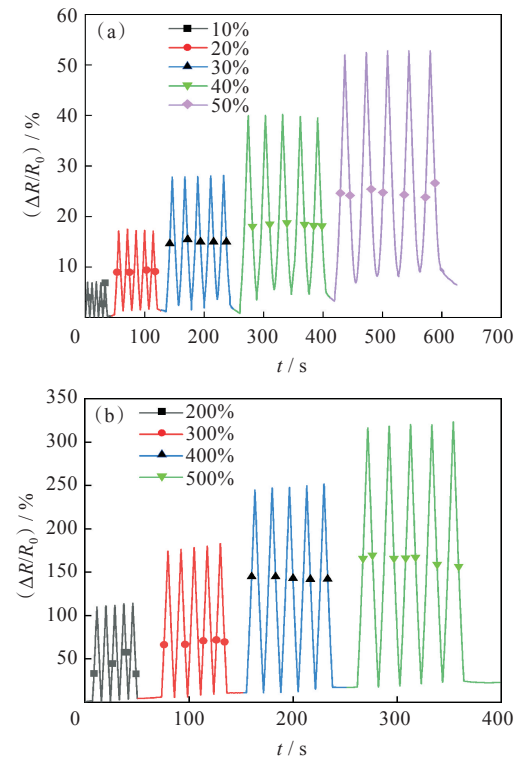

图6 水凝胶应变传感器在小应变(10%、20%、30%、40%、50%)(a)及大应变(200%、300%、400%、500%)(b)时的相对电阻变化

Fig. 6 Relative resistance change of hydrogel strain sensors at small strains (10%, 20%, 30%, 40%, 50%)(a) and large strains (200%, 300%, 400%, 500%)(b)

阻变化如图6所示,图6(a)是CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶在小应变范围内(10%、20%、30%、40%、50%)的相对电阻变化,图6(b)是CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶在大应变范围内(200%、300%、400%、500%)的相对电阻变化。10%应变下相对电阻变化率为8%左右,随着应变的增加,相对电阻变化率也逐渐增加,并且不同应变下的相对电阻变化率有良好的稳定性。CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶在大应变下的相对电阻变化率有良好的稳定性及特异性,200%应变下相对电阻变化率为110%左右,而随着应变增大,相对电阻变化率也在不断增大,500%应变下相对电阻变化率为310%左右。这些结果说明了CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶对小应变和大应变都能够良好且稳定的进行监测。

评估水凝胶能否作为应变传感器应用在实际生活中的重要依据还包括能否稳定输出电信号及可重复性。如图7(a)所示,在设定应变50%下对CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶传感器连续进行100次的拉伸-加载循环测试。水凝胶表现出稳定的连续实时监测能力。从图7(a)中可以看出,在100次连续不断的拉伸循环过程,最大值略微提高,且截取其中10次循环如图7(b)所示,最大电阻变化率基本保持不变,略微有所上升,比较稳定,以上数据证明CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶用作应变传感器具有稳定的电信号输出能力并且重复性良好。

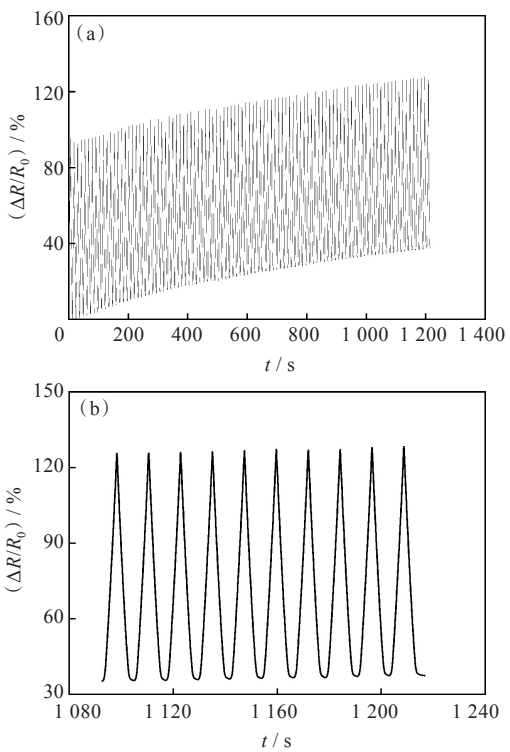

图7 连续拉伸循环100次(a)及100次循环中最后10次循环(b)的CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的相对电阻变化曲线

Fig. 7 The relative resistance change curves of CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel under 100 cycles of continuous stretching (a), and during the last 10 cycles of the 100 cycles (b)

2.5　CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶对人体的运动监测

为了表征CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶传感器对于人体运动监测的性能，使用胶布将CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶样品固定于手指模型上，调节手指弯曲角度分别在0°、30°、60°和90°，使用数字万用表测量CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的电阻变化，如图8所示。图8(a)显示在手指弯曲角度发生变化时，电阻也会随着手指弯曲角度的变化而变化，当停止动作时，电阻的变化也会迅速停止。当弯曲角度从0°逐渐增加到90°时与从90°逐渐减少到0°时，CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的电阻变化曲线较为类似，表明CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶对于细小器官的运动监测具有一定的可重复性。如图8(b)所示，CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶对于人体手指关节运动的监测非常敏感，在0.455 s内就能对手指运动做出响应。

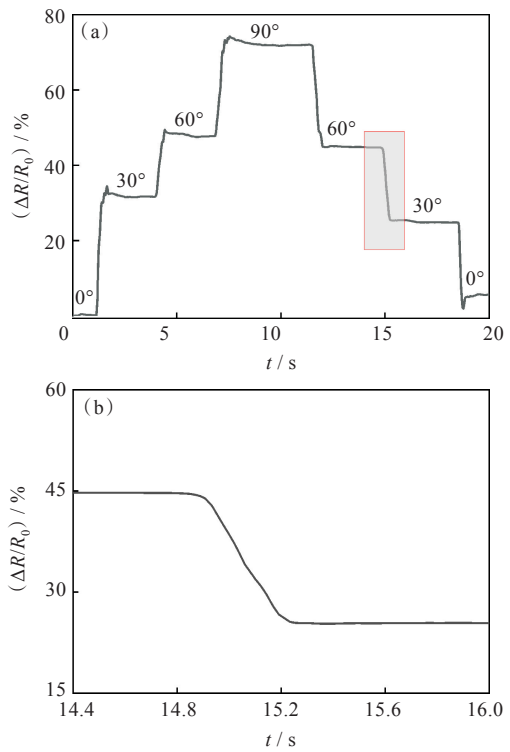

图8　CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶作为可穿戴传感器的演示：手指弯曲不同角度时水凝胶的相对电阻值变化曲线图(a)及手指弯曲角度由60°变为30°时的反应时间(b)

Fig. 8　Demonstration of CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+} conductive hydrogel as a wearable sensor: the relative resistance change curve of the hydrogel at different finger bending angles (a) and the response time when the finger bending angle changes from 60° to 30°(b)

通过对手指不同弯曲角度的监测，可以看出CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶对手指运动的识别较敏感，且响应迅速。用CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶制作应变传感器对人体不同部位的运动进行实时监测，如图9所示。图9分别记录了数次重复的弯曲手指、弯曲膝盖、大拇指动作、握拳、按压及弯曲手腕动作的电信号。当水凝胶产生的形变较大时，如膝关节及手腕弯曲动作，膝关节运动时的水凝胶的相对电阻变化率在30%左右，手腕运动时的水凝胶的相对电阻变化率在20%左右。当水凝胶的形变较小时，按压数次后水凝胶的相对电阻变化率在8%左右，且数次膝关节与手腕及按压水凝胶动作产生的电阻变化曲线较为相似，说明水凝胶对人体运动的监测具有一定的可重复性。CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶传感器能够监测这些不同的人体动作。而且随着不同的动作引起的电阻变化的曲线形状也存在一定的差异。这是因为人体在进行不同的运动动作时，CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶的形变程度不同，故而产生的电阻变化曲线也不同，未来有望在人体运动监测领域发挥出更强的功能性。

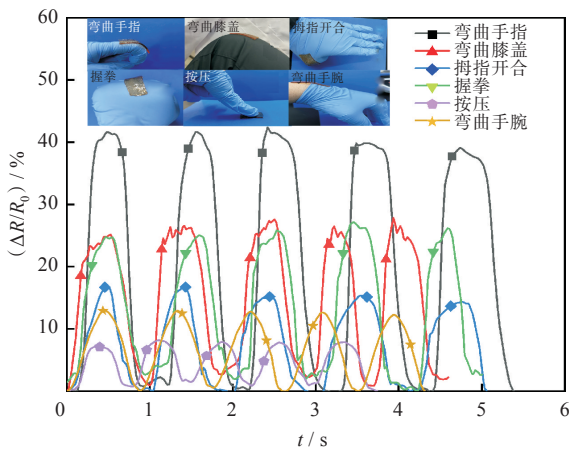

图9　弯曲手指、弯曲膝盖、拇指开合、握拳、按压、弯曲手腕时的相对电阻变化曲线

Fig. 9　Relative resistance variation curves for actions such as: finger bending, knee bending, thumb movement, fist clenching, pressing, wrist bending

3　结　论

以AA、AMPS、CMC相互作用形成交联网络，通过自由基聚合制备了一种响应速度快且对不同程度应变反应灵敏的CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶。制备的CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶具有良好的力学性能、自恢复性能以及应变传感性能。同时，CMC/P(AA-AMPS)-Fe^{3+}导电水凝胶能够在小应变及大应变下保持良好的导电

稳定性，还能用于实时监测人体运动的简单动作，如弯屈手指、弯曲膝盖、拇指开合、握拳、按压及弯曲手腕。该水凝胶有望在可穿戴设备及人体运动监测领域得到广泛应用。

参考文献

[1] McCARTHY P C, ZHANG Y C, ABEBE F. Recent applications of dual-stimuli responsive chitosan hydrogel nanocomposites as drug delivery tools [J]. Molecules, 2021, 26(16): 4735.

[2] CHATTERJEE S, HUI P C-L. Review of applications and future prospects of stimuli-responsive hydrogel based on thermo-responsive biopolymers in drug delivery systems [J]. Polymers, 2021, 13(13): 2086.

[3] ZHANG J, CHEN L D, SHEN B, et al. Ultra-high strength poly (*N*-(2-hydroxyethyl)acrylamide)/chitosan hydrogel with "repelling and killing" bacteria property [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 225: 115160.

[4] KIM J, CAMPBELL A S, de ÁVILA B E-F, et al. Wearable biosensors for healthcare monitoring [J]. Nature Biotechnology, 2019, 37(4): 389-406.

[5] 黄天龙，杜寒威，魏端丽，等. 多功能聚吡咯复合水凝胶传感器的制备与性能研究[J]. 武汉工程大学学报，2022, 44(6): 629-635.

[6] GAJEWSKI P, LEWANDOWSKA A, SZCZEŚNIAK K, et al. Optimization of the properties of photocured hydrogels for use in electrochemical capacitors [J]. Polymers, 2021, 13(20): 3495.

[7] WANG Y F, TEBYETEKERWA M, LIU Y, et al. Extremely stretchable and healable ionic conductive hydrogels fabricated by surface competitive coordination for human-motion detection [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 420 (Part 2): 127637.

[8] ZHANG L, WANG S H, WANG Z M, et al. A sweat-pH-enabled strongly adhesive hydrogel for self-powered e-skin applications [J]. Materials Horizons, 2023, 10(6): 2271-2280.

[9] LU C, CHEN X. Latest advances in flexible symmetric supercapacitors: from material engineering to wearable applications [J]. Accounts of Chemical Research, 2020, 53(8): 1468-1477.

[10] YU H, YANG X N, LIAN Y L, et al. An integrated flexible multifunctional wearable electronic device for personal health monitoring and thermal management [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 318: 112514.

[11] HAN Z Y, CHENG Z Q, CHEN Y, et al. Fabrication of highly pressure-sensitive, hydrophobic, and flexible 3D carbon nanofiber networks by electrospinning for human physiological signal monitoring [J]. Nanoscale, 2019, 11(13): 5942-5950.

[12] LI T, LI Y, ZHANG T. Materials, structures, and functions for flexible and stretchable biomimetic sensors [J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(2): 288-296.

[13] TAŞDELEN B, ÇIFÇI D İ, MERIÇ S. Preparation and characterization of chitosan/AMPS/kaolinite composite hydrogels for adsorption of methylene blue [J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(11): 9643-9662.

[14] KHANUM H, ULLAH K, MURTAZA G, et al. Fabrication and in vitro characterization of HPMC-g-poly (AMPS) hydrogels loaded with loxoprofen sodium [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1624-1631.

[15] ALI I, ALI SHAH L, REHMAN T U, et al. Investigation of the viscoelastic behavior of PVA-P(AAm/AMPS) IPN hydrogel with enhanced mechanical strength and excellent recoverability [J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(1): 7.

[16] MAO J, ZHAO C X, LIU L, et al. Adhesive, transparent, stretchable, and strain-sensitive hydrogel as flexible strain sensor [J]. Composites Communications, 2021, 25: 100733.

[17] SONG J, LI X, NIU Y H, et al. pH-sensitive KHA/CMC-Fe^{3+}@CS hydrogel loading and the drug release properties of riboflavin [J]. Particuology, 2024, 86: 13-23.

[18] YANG L Z, BAO L, DONG T, et al. Adsorption properties of cellulose/guar gum/biochar composite hydrogel for Cu^{2+}, Co^{2+} and methylene blue [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242(Part 4): 125021.

[19] ÖZKAHRAMAN B, ACAR I, EMIK S. Removal of Cu^{2+} and Pb^{2+} ions using CMC based thermoresponsive nanocomposite hydrogel [J]. Clean: Soil, Air, Water, 2011, 39(7): 658-664.

[20] GODIYA C B, CHENG X, LI D W, et al. Carboxymethyl cellulose/polyacrylamide composite hydrogel for cascaded treatment/reuse of heavy metal ions in wastewater [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 364: 28-38.

[21] 鲍伟丰，齐盼弟，卢志威. 导电水凝胶的研究进展及应用[J]. 电源技术，2023, 47(7): 844-847.

本文编辑：苗 变