文章编号:1674-2869(2026)01-0063-07

# 多功能复合水凝胶CMCS/OSA/PNIPAM的制备与性能研究

王年航[1],喻志豪[1],于上媛[1],田雪凡[1,2],王 玮[2],吴江渝*[1]
1. 等离子体化学与新材料湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205;
2. 材料成形与模具技术全国重点实验室(华中科技大学),湖北 武汉 430074

**摘 要**:本研究通过一锅法成功构建了一种基于羧甲基壳聚糖(CMCS)、氧化海藻酸钠(OSA)与聚*N*-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)的多功能复合水凝胶CMCS/OSA/PNIPAM(COP)。通过压缩试验研究了PNIPAM含量对水凝胶力学性能的影响,结果显示,随着PNIPAM含量的提高,水凝胶的压缩强度显著增强;当PNIPAM质量分数为6%时,压缩强度达到最大值20.8 kPa,相较未添加PNIPAM的水凝胶(0.5 kPa)提升约40倍。OSA含有活性醛基,与CMCS通过席夫碱反应形成动态共价键,赋予了COP水凝胶良好的自修复能力。流变学测试表明,当PNIPAM的质量分数为4%时,水凝胶展现出最佳的自修复能力,且在无外部刺激条件下于宏观尺度实现约2 h内的完全自愈。此外,COP水凝胶具备良好的温度响应性,其低临界溶解温度处于31~33 ℃之间,在50 ℃时发生明显体积收缩,失水率高达约41%,并出现显著的透明-浑浊的相转变现象,展现出智能温控材料的潜力。

**关键词**:*N*-异丙基丙烯酰胺;氧化海藻酸钠;羧甲基壳聚糖;席夫碱;温度响应
**中图分类号**:TQ427.26 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202504001

# Preparation of multifunctional composite hydrogel CMCS/OSA/PNIPAM and its properties

***WANG Nianhang*[1], *YU Zhihao*[1], *YU Shangyuan*[1], *TIAN Xuefan*[1,2], *WANG Wei*[2], *WU Jiangyu**[1]**
1. Hubei Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Materials(Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430205, China;
2. State Key Laboratory of Material Processing and Die Mould Technology(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China

**Abstract**: In this study, a multifunctional composite hydrogel CMCS/OSA/PNIPAM (COP) based on carboxymethyl chitosan (CMCS), oxidized sodium alginate (OSA) and poly (N-isopropylacrylamide) (PNIPAM) was successfully synthesized via a one-pot method. Effect of PNIPAM content on the mechanical properties of COP was investigated through compression tests. Results demonstrated that the compressive strength of the hydrogel significantly increased with a higher PNIPAM content. At a PNIPAM mass fraction of 6%, the compressive strength reached a maximum value of 20.8 kPa, representing an approximately 40-fold enhancement compared to the hydrogel without PNIPAM (0.5 kPa). OSA contains active aldehyde groups, which react with CMCS to form dynamic covalent bonds via Schiff base reactions, endowing the COP hydrogel with excellent self-healing capability. Rheological tests revealed that the hydrogel exhibited optimal self-healing performance at a PNIPAM mass fraction of 4%, achieving complete macroscopic self-recovery

**收稿日期**:2025-04-02
**基金项目**:国家自然科学基金(52177216)
**作者简介**:王年航,硕士研究生。Email:2826017147@qq.com
***通信作者**:吴江渝,博士,教授。Email:wujy@wit.edu.cn
**引文格式**:王年航,喻志豪,于上媛,等. 多功能复合水凝胶CMCS/OSA/PNIPAM的制备与性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2026,48(1):63-69.

within approximately 2 h without external stimuli. Furthermore, the COP hydrogel displayed remarkable temperature response, with a lower critical solution temperature between 31−33 ℃. At 50 ℃, it underwent significant volume contraction with a water loss rate of 41% and exhibited a distinct transparent-to-turbid phase transition, demonstrating potential as an intelligent temperature-controlled material.

**Keywords**: *N*-isopropylacrylamide; oxidized sodium alginate; carboxymethyl chitosan; Schiff base; temperature response

自愈合水凝胶具有出色的生物相容性和修复能力,在柔性电子、生物医学和环境修复等领域中展现出广阔的应用前景[1−3]。水凝胶的自愈合能力来源于其内部网络结构的动态化学键和非共价相互作用,这些特性使得水凝胶在受到外力损伤后,能够在适当条件下自发修复[4−5]。温度响应性水凝胶在外界温度变化刺激下可通过分子间相互作用力的可逆调控,触发其物理化学性质发生可逆转变[6−7]。传统水凝胶因受限于共价交联网络的静态特性,普遍存在功能单一、机械性能不足及自愈合能力缺失等问题,因此开发多功能复合水凝胶成为了新的研究热点[8]。氧化海藻酸钠(oxidized sodium alginate, OSA)和羧甲基壳聚糖(carboxymethyl chitosan, CMCS)作为天然高分子材料,具有良好的生物相容性和生物降解性,且两者之间能够通过席夫碱反应形成动态共价键,赋予水凝胶优异的自愈合特性[9−10]。*N*-异丙基丙烯酰胺(*N*-isopropylacrylamide, NIPAM)则是常用的温度响应性单体,因其分子内同时存在亲水的酰胺基和疏水的异丙基,聚*N*-异丙基丙烯酰胺[poly(*N*-isopropylacrylamide), PNIPAM]能够在不同温度下实现可逆的水合和脱水,赋予材料温度响应性[11−12]。基于上述原料的独特性质,可以构建兼具自愈合性和温度响应性的多功能复合水凝胶。

Zu等[13]通过将PNIPAM与聚乙二醇复合,制备了一种兼具温度响应性和高机械强度的复合水凝胶,用于智能药物释放系统。Wang等[14]在海藻酸钠与聚(NIPAM-co-HEMIN)的温敏复合水凝胶基质中引入银纳米粒子实现抗菌抗氧化功能,使糖尿病创面愈合周期缩短至12 d,胶原沉积量提升35%,加速血管生成。Liu等[15]通过超分子自组装策略构建了一种具有超高应变响应灵敏度的多功能水凝胶,其动态可逆的非共价键网络赋予水凝胶优异拉伸性能和抗疲劳特性,适用于柔性传感器领域。上述研究通过多元策略(超分子自组装、双网络结构、主客体相互作用等)构建了多功能水凝胶体系,兼具温度响应性、超高机械强度、智能药物控释及抗菌抗氧化性等特性,协同推动水凝胶在智能医疗和柔性电子领域的应用突破[16−18]。

基于以上策略,本研究设计并制备了一种基于CMCS、OSA和PNIPAM的复合水凝胶CMCS/OSA/PNIPAM(COP),通过动态化学键与温度响应协同作用,为多功能水凝胶材料的研发提供新思路。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

海藻酸钠(sodium alginate, SA),高碘酸钠(sodium periodate, $NaIO_4$),乙二醇(ethylene glycol, EG),CMCS,亚甲基蓝(methylene blue, MB),甲基橙(methyl orange, MO),NIPAM,*N*,*N*′-亚甲基双丙烯酰胺(*N*,*N*′-methylene bisacrylamide, MBA),2-羟基-4'-(2-羟乙氧基)-2-甲基苯丙酮[2-hydroxy-4'- (2-hydroxyethoxy-2) -methylpropiophenone, HHEMP],均购自国药化学试剂有限公司。核磁共振波谱仪(Agilent 400MR)、傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet6700)、扫描电子显微镜(JSM-5510LV)、紫外固化箱(INTELLI-RAY 600W)、旋转流变仪(Discovery HR20)、万能试验机(Instron-5966)、紫外-可见光分光光度计(Lambda-35)。

### 1.2 OSA的制备

在避光条件下,将2.0 g SA与2.5 g $NaIO_4$溶于200 mL去离子水,室温搅拌6 h后加入5 mL EG淬灭过量$NaIO_4$,反应12 h,通过3 500 g/mol透析袋纯化72 h。收集透析液经离心(8 000 r/min, 10 min)、过滤后冷冻干燥24 h,获得白色絮状OSA,密封储存于−20 ℃环境。

### 1.3 水凝胶的制备

分别称取0.083 g CMCS和0.15 g OSA各5份,随后在5组中分别加入适量的PNIPAM体系(NIPAM、MBA、HHEMP)和去离子水,配制PNIPAM体系质量分数分别为0%、3%、4%、5%和6%的水凝胶预聚液,注入模具中,置于紫外固化箱中照射300 s制得CO、COP-3、COP-4、COP-5、COP-6系列水凝胶。另外,将0.23 g NIPAM、0.02 g

MBA和0.02 g HHEMP溶解于3 mL去离子水中，搅拌2 h后得到水凝胶预聚液，注入模具中经相同紫外条件固化得纯PNIPAM水凝胶，作为对照组。

### 1.4　表征与测试

1.4.1　*结构表征*　将SA、OSA分别溶于重水（$D_2O$）中。通过核磁共振波谱仪记录核磁共振氢谱（nuclear magnetic resonance spectroscopy，$^1$H NMR）谱图。

通过扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）对PNIPAM、CMCS/OSA（CO）水凝胶和COP水凝胶的断面结构进行观察。将样品冷冻干燥48 h后置于液氮中冷冻10 min，淬断，在20 mA下喷金20 s后贴于导电胶上，设定加速电压为10 kV。

通过傅里叶变换红外光谱仪扫描PNIPAM、CMCS-OSA水凝胶和COP水凝胶样品的傅里叶变换红外光谱（Fourier transform infrared spectrum，FTIR）。将样品冷冻干燥48 h后进行测试，测试范围为4 000~500 $cm^{-1}$，扫描32次，分辨率8 $cm^{-1}$，采用衰减全反射模式。

1.4.2　*力学性能测试*　室温下，使用万能试验机进行单轴压缩实验。以溶胀平衡后的圆柱形水凝胶（直径10 mm，高20 mm）为样品，压缩速率为20 mm/min，采样频率为1 Hz。通过曲线在0%~5%应变阶段的拟合直线斜率计算压缩模量$E$[式(1)]，最终结果取3个平行样的平均值。

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \qquad (1)$$

式(1)中：$\Delta\sigma$为应力变化量，$\Delta\varepsilon$为应变变化量。

1.4.3　*流变性能测试*　通过旋转流变仪测试COP水凝胶的应变振荡流变曲线和时间扫描流变曲线，从而表征水凝胶的动态黏弹性。将厚度为1.0 mm的COP水凝胶样品放置于直径为20 mm旋转流变仪的平行板之间，记录25 ℃时COP水凝胶的储能模量（$G'$）与损耗模量（$G''$）随应变（$\varepsilon$）的变化，采样频率1 Hz，应变范围1%~1 000%，得到应变振荡流变曲线。将厚度为1.0 mm的COP水凝胶样品放置于直径为20 mm旋转流变仪的平行板之间，测试25 ℃时COP水凝胶分别在1%应变和1 000%应变下的储能模量（$G'$）与损耗模量（$G''$）随时间（$t$）的变化，得到时间扫描流变曲线。

1.4.4　*自愈合性能测试*　首先，在室温条件下，将COP水凝胶（直径10 mm，厚2 mm）从中间切开，分别用MO溶液和MB溶液染色，然后将水凝胶沿切口紧密对接，拍照记录样品的愈合情况。

1.4.5　*温度响应性能测试*　通过紫外-可见光分光光度计测定水凝胶在不同温度下的透光率。将水凝胶预聚液注入比色皿中固化成型，使之填充满整个比色皿，随后以空气为参比，通过透光率表征水凝胶的相变行为。

## 2　结果与讨论

### 2.1　FTIR和$^1$H NMR分析

SA和OSA的FTIR和$^1$H NMR谱图如图1所示。由图1(a)可知，SA与OSA的FTIR谱图在1 700 $cm^{-1}$附近均显示出归属于羰基（C=O）的特征吸收峰。对比发现，OSA光谱中新增的振动峰证实氧化反应促使SA分子中生成了醛基官能团[19]。由图1(b)可知，当以$D_2O$溶剂峰（$\delta$=4.65）为基准时，OSA的$^1$H NMR谱图在$\delta$=3.1~4.0区间呈现糖醛酸单元$H_2$-$H_5$质子的多重共振峰[20]。相较于原始SA，OSA谱图中$\delta$=4.1~5.0范围的特征峰对应氧化糖醛酸$H_6$-$H_7$质子信号，同时在$\delta$=5.38和$\delta$=5.66处观测到半缩醛结构的特征峰，这些谱学证据共同验证了OSA的成功制备。

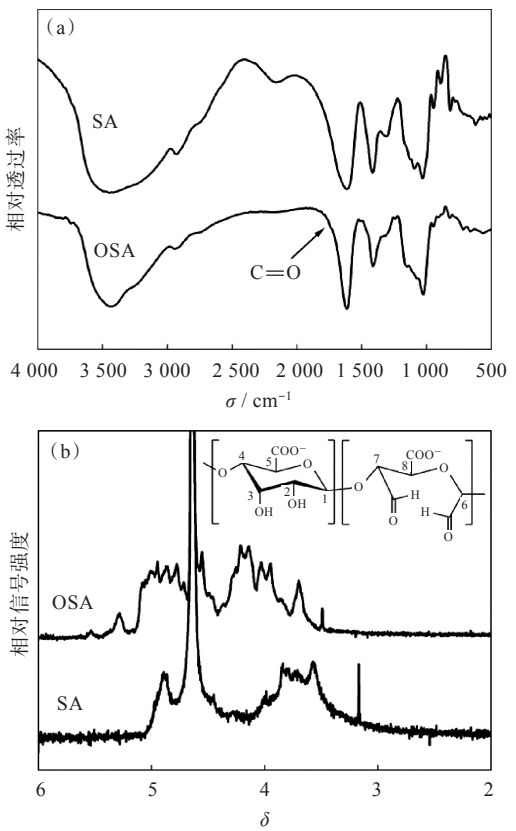


**图1　SA及OSA的FTIR谱图(a)和$^1$H NMR谱图(b)**

Fig. 1　FTIR spectra (a) and $^1$H NMR spectra (b) of SA and OSA

CO、PNIPAM、COP水凝胶的FTIR谱如图2所示。PNIPAM水凝胶的C—H伸缩振动峰出现在

2 970 $cm^{-1}$，C—H弯曲振动峰出现在1 457 $cm^{-1}$，证实了PNIPAM分子中—$CH_2$—的存在；CO水凝胶中1 600 $cm^{-1}$处的吸收峰是C=N（亚胺键）宽峰，表明了席夫碱结构的形成；COP水凝胶结合了CO水凝胶和PNIPAM水凝胶的特性，1 600 $cm^{-1}$附近的峰与席夫碱的C—H弯曲振动有关，进一步表明COP结构中含有席夫碱；此外，COP水凝胶与PNIPAM水凝胶在2 970 $cm^{-1}$处均出现吸收峰，表明COP水凝胶中PNIPAM的存在。

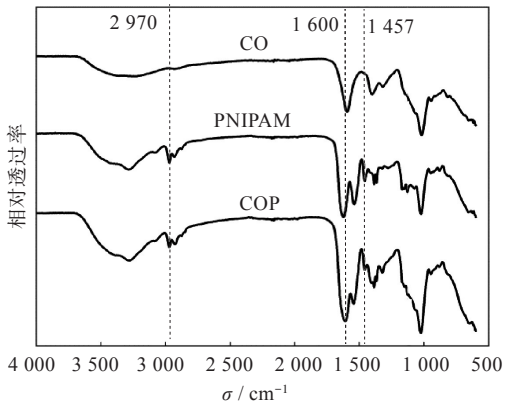


**图2 COP、PNIPAM及CO水凝胶的FTIR谱图**

Fig. 2 FTIR spectra of COP, PNIPAM and CO hydrogels

## 2.2 微观形貌分析

为了观察水凝胶的内部微观结构，使用SEM对水凝胶3种样品的断面结构进行观察（图3）。如图3(a)所示，PNIPAM水凝胶呈现疏松多孔的结构，空隙直径从数微米到几十微米不等，表面较光滑；如图3(b)所示，COP水凝胶则呈现疏松不规则多孔的结构，较PNIPAM水凝胶的结构更加复杂，且孔隙之间的连接较为明显，呈现更加疏松的网状结构。这种复合水凝胶的孔隙结构较开阔且不规则，有助于提高其吸水性和自愈合能力，同时也有利于温度变化时的响应性；如图3(c)所示，CO水凝胶的孔隙结构较PNIPAM水凝胶和COP水凝胶更加紧密，孔隙较小且分布不均匀，使其具有较强的亲水性。

## 2.3 力学性能分析

水凝胶的压缩应力-应变曲线及压缩模量如图4所示，随着PNIPAM含量的增加，水凝胶的压缩强度逐渐增大，CO水凝胶的压缩模量仅有0.5 kPa左右，而COP-6水凝胶的压缩模量达到20.8 kPa左右。这是因为PNIPAM链在网络中形成了均匀分布的动态交联点（氢键和疏水相互作用），提高了网络的弹性支撑力和动态重建能力，使水凝胶强度提高。

## 2.4 流变性能分析

图5(a)展示了不同PNIPAM含量COP水凝胶的应变振荡流变曲线行为。在较小应变范围(1%)时，各组水凝胶的储能模量($G'$)显著高于损耗模量($G''$)，说明此时水凝胶网络的物理和化学交联处于完整状态，表现出明显的弹性主导特性。随着应变逐渐增大，储能模量($G'$)开始下降，而损耗模量($G''$)则逐渐升高。当两者曲线出现交叉(即$G'=G''$，约1 000%)时，表示水凝胶的储能能力和能量耗散能力达到平衡，此时材料的结构由弹性主导状态向塑性主导状态转变，交联网络遭到破坏，水凝胶发生“屈服”或流动，达到水凝胶的破坏点。由图5(a)可知，COP-6的模量最大，即PNIPAM含量越高对应的模量越大。这可能是因为PNIPAM作为一种温敏性聚合物，其疏水性和链段的可控性使其能够在水凝胶体系中引入额外的动态物理交联点。随着PNIPAM含量的增加，材料内部交联点的密度提高，分子链凝聚力增强，因而提高了水凝胶的储能模量以及整体的强度。另外，不同PNIPAM含量的水凝胶的破坏点所对应的应变值都接近1 000%，因此选择1 000%为破坏水凝胶结构的高应变条件进行时间扫描来反映其自修复性能。

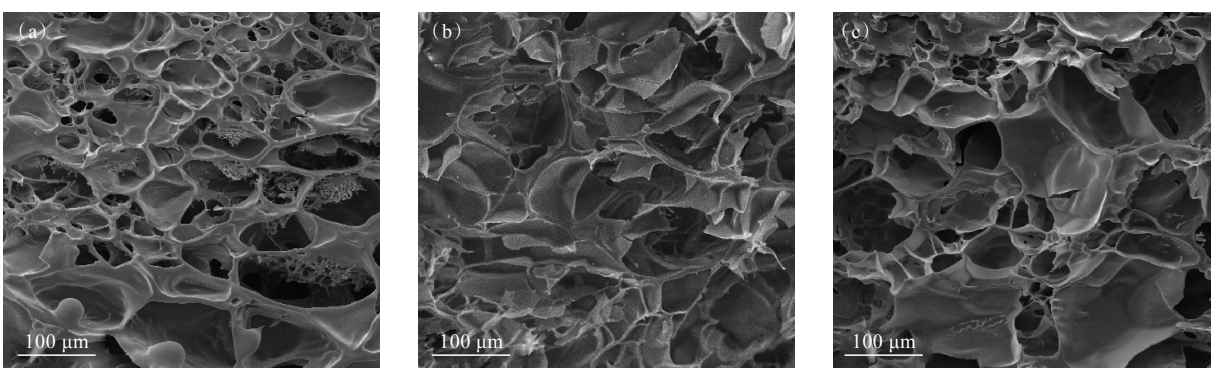


**图3 水凝胶的SEM图：(a)PNIPAM水凝胶，(b)COP水凝胶，(c)CO水凝胶**

Fig. 3 SEM images of hydrogels: (a) PNIPAM, (b) COP, (c) CO

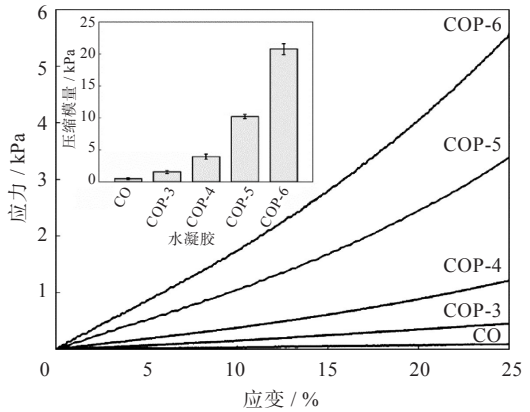


**图 4　水凝胶的压缩应力-应变曲线和压缩模量**

Fig. 4　Compression stress-strain curves and compression modulus of hydrogels

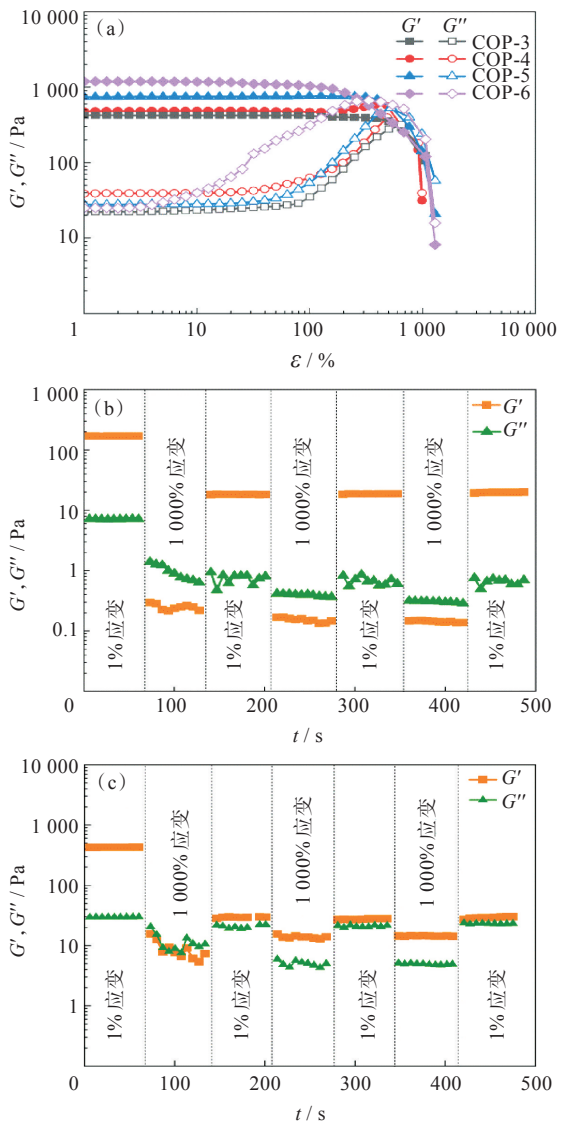


**图 5　COP 水凝胶的流变图：(a)不同 PNIPAM 含量 COP 水凝胶的应变振荡流变曲线，COP-4(b)和 COP-5(c)水凝胶的时间扫描流变曲线**

Fig. 5　The rheological curves of COP hydrogels: (a) strain oscillation rheological curves of COP hydrogels with different PNIPAM contents, time scanning rheological curves of COP-4 (b) and COP-5 (c) hydrogel

如图 5(b)所示，COP-4 在高应变(1 000%)破坏后，COP-4 的动态交联点通过可逆的席夫碱键断裂和重组高效修复网络结构，使其在低应变条件下(1%)$G'$仍然大于$G''$。如图 5(c)所示，COP-5 因 PNIPAM 链含量过高，交联网络在高应变破坏后呈现不均匀分布，导致其$G'$无法恢复且与$G''$相差不大，表现出较低的动态修复能力。综合实验结果分析，PNIPAM 含量是影响自愈合性能的关键因素。COP-4 中 PNIPAM 链的动态交联点(氢键和疏水相互作用)数量和分布达到优化状态，既能维持交联网络的强度，又具有高效的自愈合性能。然而，当 PNIPAM 质量分数超过 4%，网络动态特性失衡，过量的 PNIPAM 链段可能导致局部网络过于松散且难以修复，从而削弱了材料的自愈合性能。

## 2.5　自愈合性能分析

图 6 展示了 COP-4 水凝胶的自愈合过程，两部分已染色的水凝胶 2 h 后可以观察到 2 种染料颜色重合且无切口痕迹，并且在重力作用下水凝胶不会从拼接处分离。实验结果表明，无外界刺激条件下，断裂的 COP-4 水凝胶断面可在 2 h 内实现界面完全愈合，且愈合后的水凝胶能够承受重力作用不发生二次断裂，从而证明了 CMCS 分子链上的氨基与 OSA 的醛基通过席夫碱反应生成动态共价交联网络，其键合过程兼具共价键的稳定性和非共价相互作用的可逆性。当水凝胶受到外力破坏时，断裂界面的动态亚胺键可发生解离与重组，促使分子链重新扩散并重建交联网络，从而实现自修复功能。

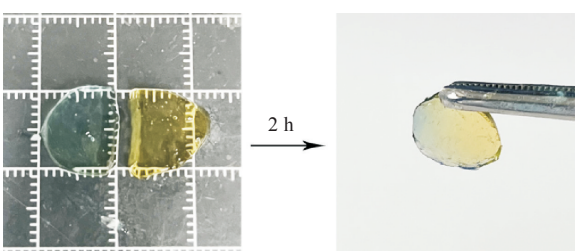


**图 6　COP 水凝胶的自愈合过程**

Fig. 6　Self-healing process of COP hydrogel

## 2.6　温度响应性能分析

为了分析 COP 水凝胶的相变行为，测定了样品对 600 nm 波长入射光的透光率，结果如图 7(a)所示：COP 水凝胶的低临界溶解温度(low critical solution temperature，LCST)在 31~33 ℃之间；温度低于 LCST 时，分子链中的酰胺基与水分子形成氢键，高分子链在溶液中舒展，此时水凝胶为透明状态；温度高于 LCST 时，分子链中的异丙基占主导作

用，高分子链在溶液中聚集，此时水凝胶透光率下降，而CO水凝胶的透光率基本上无变化。图7(b)为COP水凝胶的体积收缩情况，将直径为10 mm、厚度为2 mm的圆形水凝胶样品置于50 ℃的水中，观察到COP水凝胶体积收缩明显，失水率达到约41%，而CO水凝胶无明显体积收缩变化，失水率仅约0.5%。这归因于COP水凝胶中PNIPAM的加入，PNIPAM与原有网络形成物理缠绕结构或弱交联的互穿结构，并且其分子链能够在32 ℃附近发生亲水-疏水转变。这表明COP水凝胶既保留了动态共价键的自愈合特性，又保留了温度响应特性。

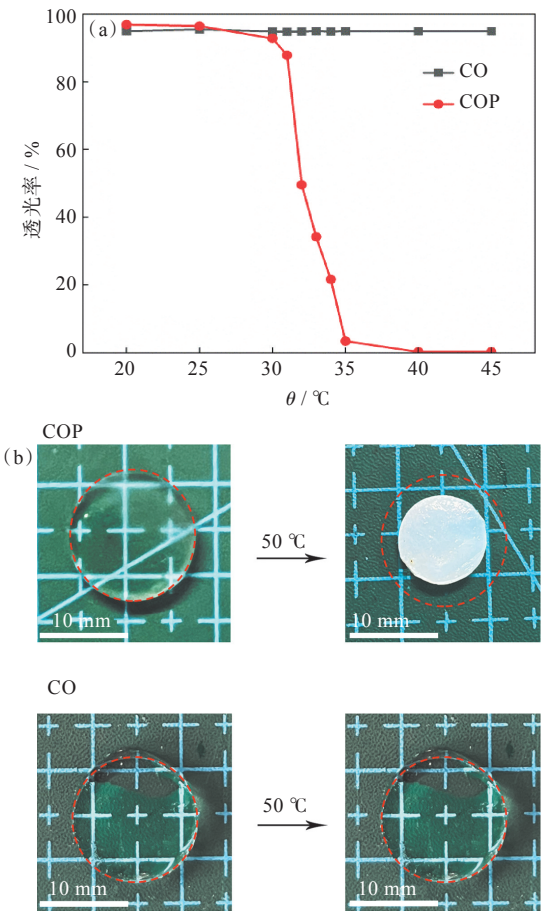


**图7 COP水凝胶的温度响应行为：(a)COP水凝胶和CO水凝胶在不同温度下的透光率，(b)COP水凝胶和CO水凝胶在50 ℃水中的体积收缩**

Fig. 7 The thermoresponsive behavior of COP hydrogel: (a) the transmittance of COP hydrogel and CO hydrogel at different temperatures, (b) volume shrinkage of COP hydrogel and CO hydrogel in water at 50 ℃

## 3 结 论

本研究基于CMCS、OSA与PNIPAM的动态交联作用，通过一锅法构建了兼具自愈合性能和温度响应性能的多功能COP水凝胶。COP水凝胶具有较高的自修复效率，可在无外部刺激条件下实现在2 h内的完全自愈，且当PNIPAM的质量分数为4%时自愈性能最佳。COP水凝胶同时具有温度响应特性，在温度高于LCST时会发生相转变且其LCST接近人体体温，该材料有望在可穿戴的温感设备领域得到广泛应用。

**参考文献**

[1] SANG F, LIU C S, YAN J Q, et al. Polysaccharide- and protein-based hydrogel dressings that enhance wound healing: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280 (Part 1): 135482.

[2] JIN J M, SUN C C, XU K Y, et al. Multifunctional self-healing peptide hydrogel for wound healing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261(Part 1): 129734.

[3] LEI J F, LI X Y, WANG S, et al. Facile fabrication of biocompatible gelatin-based self-healing hydrogels [J]. ACS Applied Polymer Materials, 2019, 1(6): 1350−1358.

[4] XIE M M, ZENG Y B, WU H, et al. Multifunctional carboxymethyl chitosan/oxidized dextran/sodium alginate hydrogels as dressing for hemostasis and closure of infected wounds [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 219: 1337−1350.

[5] XIE T, VOGT B D. A virtual special issue on self-healing materials [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(44): 49277−49280.

[6] XIAN S J, WEBBER M J. Temperature-responsive supramolecular hydrogels [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2020, 8(40): 9197−9211.

[7] WU J X, SHIN H G, LEE J H, et al. Preparation of external stimulus-free gelatin-catechol hydrogels with injectability and tunable temperature responsiveness [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(1): 236−244.

[8] LIN M Z, ZHENG Z J, YANG L, et al. A high-performance, sensitive, wearable multifunctional sensor based on rubber/CNT for human motion and skin temperature detection [J]. Advanced Materials, 2022, 34(1): 2107309.

[9] LEE Y M, LU Z W, WU Y C, et al. An injectable, chitosan-based hydrogel prepared by Schiff base reaction for anti-bacterial and sustained release applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269(Part 1): 131808.

[10] WANG L, WANG H N, DANG H M, et al. An

adhesive, antibacterial hydrogel wound dressing fabricated by dopamine-grafted oxidized sodium alginate and methacrylated carboxymethyl chitosan incorporated with Cu(II) complex [J]. Biomaterials Advances, 2025, 170: 214217.

[11] RASIB S Z M, AHMAD Z, KHAN A, et al. Synthesis and evaluation on pH- and temperature-responsive chitosan-p(MAA-co-NIPAM) hydrogels [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 108: 367−375.

[12] WU P, FANG Y R, CHEN K Z, et al. Study of double network hydrogels based on sodium methacrylate alginate and carboxymethyl chitosan [J]. European Polymer Journal, 2023, 194: 112137.

[13] ZU S, WANG Z H, ZHANG S, et al. A bioinspired 4D printed hydrogel capsule for smart controlled drug release [J]. Materials Today Chemistry, 2022, 24: 100789.

[14] WANG Y Y, ADDISU K D, GEBRIE H T, et al. Multifunctional thermosensitive hydrogel based on alginate and p(NIPAM-co-HEMIN) composites for accelerated diabetic wound healing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 241: 124540.

[15] LIU X Y, HU J J, HU Y C, et al. Multifunctional injectable oxidized sodium alginate/carboxymethyl chitosan hydrogel for rapid hemostasis [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2025, 245: 114346.

[16] LU X Y, LI Y L, GU X C, et al. Self-healable, self-adhesive conductive hydrogels based on integrated multiple interactions for wearable sensing [J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2023, 224 (24): 2300228.

[17] TIAN X H, WEN Y T, ZHANG Z X, et al. Recent advances in smart hydrogels derived from polysaccharides and their applications for wound dressing and healing [J]. Biomaterials, 2025, 318: 123134.

[18] 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.

[19] 候冰娜，倪凯，沈慧玲，等. 自修复氧化海藻酸钠-羧甲基壳聚糖水凝胶的制备及药物缓释性能[J]. 复合材料学报，2022，39(1)：250−257.

[20] 徐文静，梁建荣，曲萌菲，等. 乙二醇壳聚糖自愈合水凝胶的制备及性能[J]. 材料工程，2023，51(11)：144−150.

本文编辑：苗　变

☆

（上接第8页）

[24] LIU L B, XIANG N, NI Z H. Droplet-based microreactor for the production of micro/nano-materials [J]. Electrophoresis, 2020, 41 (10/11): 833−851.

[25] AKKARAWATKHOOSITH N, KAEWCHADA A, JAREE A. Continuous catalyst-free biodiesel synthesis from rice bran oil fatty acid distillate in a microreactor [J]. Energy Reports, 2020, 6: 545−549.

[26] FAN J H, LU J, SHA Z, et al. Conformally anchoring nanocatalyst onto quartz fibers enables versatile microreactor platforms for continuous-flow catalysis [J]. Science China Chemistry, 2021, 64 (9): 1596−1604.

[27] BRATSUN D, SIRAEV R. Controlling mass transfer in a continuous-flow microreactor with a variable wall relief [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 113: 104522.

[28] XU J, SHANG J K, WANG Y, et al. Synthesis of mesoporous CeMnO materials and catalytic application for selective oxidation of benzyl alcohol by molecular oxygen [J]. Catalysis Letters, 2017, 147(2): 328−334.

[29] GÓMEZ L E, MIRÓ E E, BOIX A V. Spectroscopic characterization of Mn-Co-Ce mixed oxides, active catalysts for COPROX reaction [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(14): 5645−5654.

[30] ZHANG H L, WANG F C, LOU J J, et al. Low-temperature $CeCoMnO_x$ spinel-type catalysts prepared by oxalate co-precipitation for selective catalytic reduction of NO using $NH_3$: a structure-activity relationship study [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 657: 414−427.

[31] WU M Z, ZHAN W C, GUO Y L, et al. An effective Mn-Co mixed oxide catalyst for the solvent-free selective oxidation of cyclohexane with molecular oxygen [J]. Applied Catalysis A: General, 2016, 523: 97−106.

[32] 中国石油化工股份有限公司，中国石油化工股份有限公司大连石油化工研究院. 一种环己烷氧化制KA油的方法：CN201710576354.4[P]. 2019-01-22.

[33] LIU P, YOU K Y, DENG R J, et al. Hydrotalcite-derived Co-MgAlO mixed metal oxides as efficient and stable catalyst for the solvent-free selective oxidation of cyclohexane with molecular oxygen [J]. Molecular Catalysis, 2019, 466: 130−137.

本文编辑：张　瑞