

具有三重交联结构导电水凝胶的制备及其性能

楼永坚,罗光彦,赵阳,付飞亚,刘向东

(浙江理工大学材料与纺织学院,杭州 310018)

摘 要: 导电高分子水凝胶作为一种新型导电材料,由于其良好的导电性和水凝胶独有的溶胀特点,在生物传感器、电器元件等领域展现了巨大的应用价值。以丙烯酰胺(AAm)作为主体材料,N,N-亚甲基双丙烯酰胺(BisAAm)作为化学交联剂,同时引入甲基丙烯酸月桂酯(LMA)和十二烷基溴化铵(DTBA)组成的胶束交联及丙烯酸钠(SAA)和甲基丙烯酰氯乙基三甲基溴化铵(DMC)形成的阴阳离子静电力交联,再添加适量的石墨粉,通过自由基聚合制备机械性能和导电性能优良的三重交联结构复合导电水凝胶。研究表明:水凝胶中 BisAAm 含量为 0.180 mol/L,DTBA 的含量为 0.148 mol/L 时,能获得最佳机械性能并兼导电性能,其压缩模量为 0.340 MPa,拉伸模量为 0.090 MPa,电导率为 1.32 S/m;该水凝胶具有一定自愈性和 pH 敏感性,是一款综合性能优良的智能导电复合水凝胶,具有广阔的应用前景。

关键词: 三重交联;导电水凝胶;机械性能

中图分类号: TB381

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2018) 11-0709-06

0 引 言

导电水凝胶是一类具有良好的生物相容性、较高柔韧性,同时具备优良电学性能的新兴材料。在传感器、生物医药和组织工程材料等诸多领域有着传统导电材料不可替代的用途^[1-3]。但大部分导电水凝胶机械性能比较差,尤其当水凝胶中含水量提高时,其机械强度大幅下降,甚至发生碎裂。

为改善导电水凝胶机械性能,较多研究采用两步法制备双网络结构的导电水凝胶。一般而言,在已聚合交联成型的水凝胶的基础上,渗入不同种类交联单体和引发剂,进行二次聚合形成双网络结构^[4-5],所获得的导电水凝胶虽然机械性能优良,但合成方法较为繁琐。部分报道采用在导电水凝胶内添加无机粒子的方法提高机械性能^[6-7],但无机粒子的添加通常遵循逾渗理论,即添加量小于阈值,机械性能增加不明显,一旦越过阈值机械性能就有明显跃迁。因此常因阈值过高,导致无机粒子堵塞导电通道,水凝胶导电性能下降。也有对纳米无机粒子

进行表面修饰,并原位聚合制备水凝胶的方法^[8]。该方法的优点是无须添加大量粒子就能明显提高力学性能,其力学性能是普通化学交联水凝胶的 10 倍以上,但该方法对纳米粒子的选择较为苛刻,且只能通过原位聚合合成,较为单一和繁琐。

导电水凝胶按导电介质可分为聚电解质水凝胶^[8-9]、导电高分子水凝胶^[10-11]及酸掺杂水凝胶^[12-13]三类。其中导电高分子水凝胶以聚吡咯、聚苯胺等高分子作为导电载体,该类水凝胶具有较高的电导率,但一些导电高分子的生物毒性和颜色限制的该类水凝胶的应用。酸掺杂水凝胶是一类以质子酸为导电载体的导电水凝胶,由于水凝胶电导率与酸含量和固含量密切相关,对使用环境要求较为苛刻,也限制了该水凝胶的应用范围。相对而言,聚电解质水凝胶凭借更好的生物相容性和电导率及较高的环境适应性,具有更广阔的应用前景。

本文采用聚丙烯酰胺(PAAm)作为该水凝胶的结构主链,以 N,N-亚甲基双丙烯酰胺(BisAAm)交联剂聚合获得的共价键交联,十二烷基溴化铵(DTBA)

和甲基丙烯酸月桂酯(LMA)构建的疏水缔合物物理交联,以及甲基丙烯酰氯乙基三甲基溴化铵(DMC)和丙烯酸钠(SAA)静电力作用形成的物理交联,构成的三重交联结构提高导电水凝胶的机械强度,依靠SAA实现水凝胶的高度导电性能,并掺杂一定的石墨粉进一步改善凝胶的机械性能,通过调整优化配比及反应条件,制备了同时具有优良机械强度和导电性能的复合导电水凝胶材料。在此基础上,探索该复合凝胶体系中DTBA、BisAAm含量及SAA和DMC摩尔比对压缩模量、拉伸模量和导电性能的影响规律,并探究该复合凝胶体系自愈性和pH敏感性。

1 材料与方法

1.1 实验试剂

丙烯酰胺(AAm),甲基丙烯酸月桂酯(LMA),丙烯酸钠(SAA),氢氧化钠,盐酸,N,N-亚甲基双丙烯酰胺(BisAAm),过硫酸铵,十二烷基三甲基溴化铵(DTBA),亚硫酸钠,甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC),以上药品均为分析纯,购买于上海阿拉丁试剂有限公司;高纯鳞片石墨(粒径小于50 μm),购买于先丰纳米材料有限公司。

1.2 水凝胶的制备

在2.30 g水中依次加入1.00 g(14.00 mmol) AAm、0.24 g(0.52 mmol) DMC、0.11 g(0.11 mmol) SAA和适量 BisAAm(详见表1),搅拌10 min,再加入0.13 g(0.52 mmol) LMA、适量 DTBA(详见表1)和(1.4 wt%)石墨粉,再次搅拌10 min,加入60 μL浓度为1.000 mol/L的亚硫酸钠和60 μL浓度为1.000 mol/L的过硫酸铵,搅拌均匀,置入圆桶形模具($d=14.5$ mm或 4.7 mm, $h=50$ mm),静置2 h后取出,得到圆柱状水凝胶。

1.3 表征与测试

扫描电镜(SEM)测试:新制水凝胶用液氮冷冻后,置于FDU-1100型冷冻干燥机中冻干(日本RIKAKIKAI)24 h,切片镀金后用JSM-5610LV型

扫描电子显微镜(日本电子株式会社)进行观察。

导电性测试:将圆柱形水凝胶放于两块石墨板间,用导线将直流电源(15.2 V,赛克1502DD)、电流表、石墨板串联,用伏安法测水凝胶电阻。再依据公式 $R=\frac{U \times S}{I \times L}$ ^[8],求得水凝胶的电导率,其中: U 为电压, I 为电流, L 和 S 分别表示水凝胶的长度和截面积。

压缩测试:直径14.5 mm的水凝胶于机械性能实验机台(SH-500,温州山度仪器有限公司)按20 mm/min压缩速率进行压缩到水凝胶开裂破碎,记录压缩应变曲线。每组样品重复3次,取其平均值。

拉伸测试:将直径4.7 mm的水凝胶于SH-500型机械性能实验机台(温州山度仪器有限公司)按20 mm/min拉伸速率进行拉伸至水凝胶断裂,记录其拉伸应变曲线。每组样品重复3次,取其平均值。

自愈合实验:将新制水凝胶从中切开,迅速的让两个断面紧密接触在一起,在室温下密封静置3 d,对自愈后的水凝胶进行导电性和拉伸测试。每组样品重复3次,取其平均值。

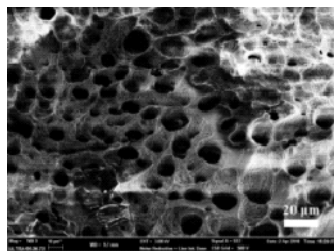
pH刺激响应测试:新制水凝胶先称重后,再浸入不同pH值NaOH或HCl溶液中,溶胀达到平衡后对水凝胶再次称重。每组样品重复3次,取其平均值。

根据 $Q/\%=\frac{(W-W_0)}{W_0} \times 100$ ^[9]计算溶胀度,其中: W 是水凝胶溶胀平衡后质量, W_0 是初始水凝胶质量。

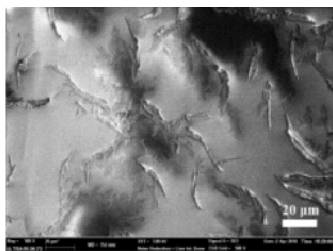
2 结果与讨论

2.1 复合导电水凝胶合成表征

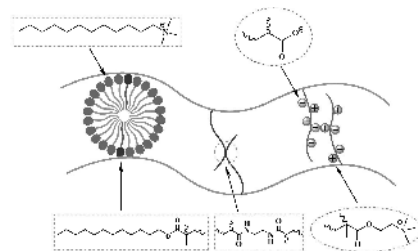
图1为导电复合水凝胶电镜照片及其结构示意图。通过电镜对水凝胶冻干样截面(图1(a))观察发现,自由基聚合形成的化学交联使水凝胶内部成为一个多孔交联网络,其近似圆形的孔型具有较为均一的孔径(均在20 μm左右)。图1(b)为水凝胶表面形貌电镜照片,可以清楚看到水凝胶中的鳞片石墨,其尺寸大小基本符合商品规格(小于50 μm),且较为均匀分散在水凝胶内部。



(a) 水凝胶截面照片



(b) 水凝胶表面照片



(c) 水凝胶结构示意图

图1 导电复合水凝胶电镜照片及其结构示意图

2.2 交联结构对水凝胶机械性能的影响

表 1 为水凝胶的制备条件及相应机械性能比较。从表 1 中 1~5 组实验结果可以看出,随着化学交联剂 BisAAm 含量增加,水凝胶的压缩及拉伸模量均呈现先增后减变化,最大值出现在 BisAAm 含量为 0.180 mol/L 时。表中最小和最大压缩模量值相差约 3 倍,拉伸模量相差约 2 倍。这可能是由于增加 BisAAm 含量使水凝胶化学交联密度升高,引起交联点间分子链段运动阻力变大的结果。当 BisAAm 含量增大为 0.270 mol/L 时,压缩和拉伸模量均较 BisAAm 浓度为 0.180 mol/L 的凝胶明显下降。这是由于水凝胶的化学交联密度过高会使柔韧性下降,抗形变能力降低^[14]。Cohen 等^[15]在以 BisAAm 与 AAm 共聚制备的水凝胶也有类似结果:随着 BisAAm 含量增加,其压缩模量出现先增后减过程,在 BisAAm 含量为 5.6 wt%(相对总单体质量)时,其压缩模量为最大值 0.080 MPa。

表 1 水凝胶的制备条件及相应机械性能

组样	BisAAm /(mol · L ⁻¹)	DTBA /(mol · L ⁻¹)	压缩模量 /MPa	拉伸模量 /MPa
1	0.036	0.024	0.030	0.010
2	0.072	0.024	0.070	0.010
3	0.108	0.024	0.080	0.012
4	0.180	0.024	0.090	0.021
5	0.270	0.024	0.075	0.016
6	0.180	0.048	0.140	0.050
7	0.180	0.148	0.340	0.090
8	0.180	0.240	0.180	0.050
9	0.180	0.336	0.160	0.040

DTBA 含量变化对水凝胶机械强度影响如表 1 中 4 组和 6~9 组实验所示。当 DTBA 含量从 0.024 mol/L 增加至 0.148 mol/L 时,导电水凝胶的压缩模量和拉伸模量分别提高 3.7 倍和 4.5 倍。结合图 1 分析,水凝胶中 DTBA 含量增加,可能会使水凝胶内的胶束量增多,导致水凝胶的疏水缔合物理交联密度提高,压缩和拉伸强度也随之增强^[16]。当 DTBA 含量为 0.240 mol/L 或 0.336 mol/L 时,大量的 DTBA 导致水凝胶内胶束量过多,那么平均每个胶束内包裹的 LMA 分子数量则减少,对应交联点的官能度在下降,自由基聚合后胶束与胶束之间的主链链长变短,无法形成高强度的疏水缔合交联,且水凝胶体系微结构均一性被破坏,因此拉伸及压缩强度也相应变小^[17-18]。

比较表 1 中的九组数据可以看出,当 BisAAm 含量为 0.180 mol/L、DTBA 含量为 0.148 mol/L 时,各交联网络结构在水凝胶中的占比较为协调,制备的复合导电水凝胶机械性能最优。同时,本实验在第 4 组样(表 1)基础上,通过增加水凝胶中 SAA 含量来达到改变与 DMC 摩尔比,探究其对水凝胶压缩强度的影响,如图 2 所示。从中发现当 SAA 与 DMC 含量比接近 1:1 时,水凝胶的压缩模量是最大的,继续增大水凝胶中 SAA 与 DMC 摩尔比,其压缩强度反而下降。这是因为,当两者比值相同时,水凝胶内参与静电作用的正负离子含量也基本相等,正负离子吸引作用达到最大效果;当 SAA 过量,其水凝胶中过量的同性离子相互排斥,使得压缩模量下降。

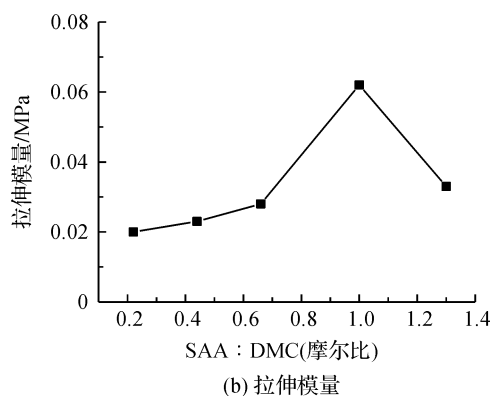
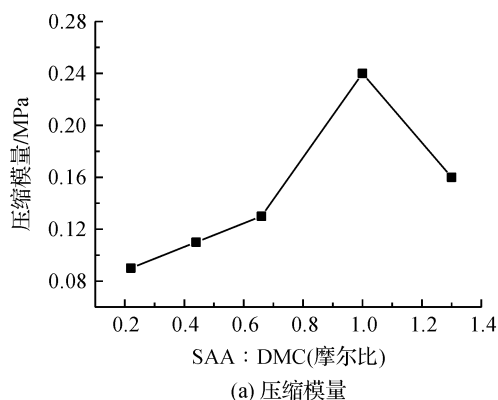


图 2 SAA 与 DMC 摩尔比值对水凝胶压缩模量和拉伸模量的影响

2.3 交联结构对水凝胶电导率的影响

聚电解质类导电水凝胶的导电能力主要来源于聚合物分子中亲水离子单元。因此,水凝胶中正负

离子的含量和其在水凝胶内运动受阻情况都能对水凝胶的导电性产生影响^[19-20]。BisAAm 含量变化对水凝胶导电性影响如图 3 所示,从图中可以看出,随

BisAAm 浓度增加,水凝胶电导率呈现先增后减的趋势。在 BisAAm 浓度低于 0.108 mol/L 时,随着 BisAAm 浓度增加,水凝胶的交联网状结构逐渐趋于稳定规整,交联密度渐增趋于适当,电导率略有提升。然而,BisAAm 浓度过高引起水凝胶交联密度过大,水凝胶中水含量过低,使得电解质运动受限,电导率随之下降^[21]。

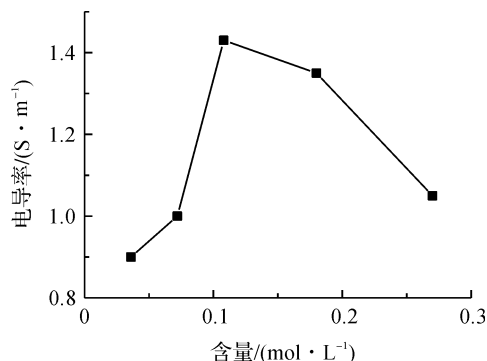


图3 BisAAm 的含量对水凝胶电导率的影响

DTBA 含量对水凝胶电导率影响(图4)类似于上述对凝胶机械强度的作用,水凝胶电导率随 DTBA 变化可达到最大值,即 1.43 S/m 。当 DTBA 浓度由 0.024 mol/L 增至 0.148 mol/L 时,水凝胶电导率不断上升至最大。因为 DTBA 含量增加,使得水凝胶内部逐渐形成有序稳定的空间交联结构,为导电介质在水凝胶内部运动减少阻碍,电导率因此上升^[22]。当 DTBA 含量继续增加($0.240 \sim 0.336 \text{ mol/L}$),水凝胶电导率反而大幅下降的原因在于胶束数量增加诱发疏水缔合交联密度过高,同时过量的增容胶束也堵塞的导电介质的运动空间,电解质分子的移动受限导致电导率下降^[23]。

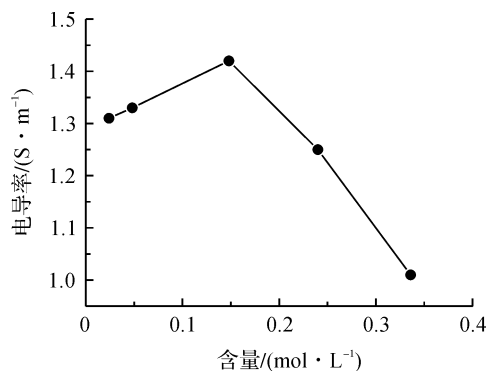


图4 DTBA 的含量对水凝胶电导率的影响

图5展现了 SAA 与 DMC 摩尔比值对水凝胶电导率影响。在 SAA 与 DMC 摩尔比值不断升高的过程中,其电导率变化与前面几个因素的影响相反,是一个先减后增的过程。这是因为在 SAA 和 DMC 的摩尔比值为 0.22 时,除却与 SAA 形成静电

力作用的消耗,DMC 仍过量,DMC 中 NH_4^+ 离子产生静电斥力,电子较为容易通过,电导率较高;随着 SAA 和 DMC 的摩尔比值增加,与 SAA 形成静电斥力作用的 NH_4^+ 离子越来越多,水凝胶内静电交联密度提高,导致导电介质在水凝胶内的运动受阻,电导率下降。在摩尔比为 1 时,体系内 SAA 和 DMC 形成的静电力作用达到最强,电子移动空间变得最小,电导率最低;比值继续增加,过量的 SAA 所产生的斥力则一定程度上扩张了电子移动空间,电导率有一定恢复。虽然 SAA 与 DMC 摩尔比值逐渐增大的过程中(小于 1),其机械性能有一定提高,但考虑到其对水凝胶电导率产生的负面作用,综合考虑后,还是将水凝胶中 SAA 含量控制在 0.11 mmol 的水平。

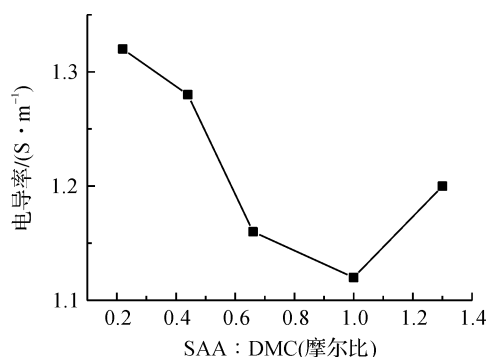


图5 SAA 与 DMC 摩尔比值对水凝胶电导率影响

2.4 水凝胶自愈合实验

图6和图7分别是水凝胶自愈合照片和水凝胶自愈合前后电导率。结合图6及比较图7中水凝胶(表1中组样3, $d=4.7 \text{ mm}$)自愈合前后与未切断水凝胶的电导率变化,发现刚切断水凝胶电导率较原愈合水凝胶样品有明显下降(10%);当切断水凝胶静置三天后,其电导率又有小幅上升(5%),且拉伸强度也恢复到原来的 25% 左右。该结果表明,该水凝胶具有一定的自愈合能力。这是由于该水凝胶含有部分疏水缔合结构,当水凝胶被切断后,其断面处交联结构被破坏,刀口附近的链端和部分交联网络会向刀痕两侧分散躲避,使断面空间发生扭曲变形,导致聚电解质离子在断面处的移动受阻,电导率下降。而被劈开的胶束可通过疏水缔合重新聚合,分散在刀口两侧的部分交联网络经过分子构象的调整会重新分布在切口附近,使断面结构得到一定程度的恢复,水凝胶电导率因而上升。虽然该水凝胶的修复效果与一些完全靠疏水缔合形成的水凝胶仍有一定差距(拉伸强度恢复大于 35%)^[17],但一定的自愈性也能提高水凝胶的环境适应性。

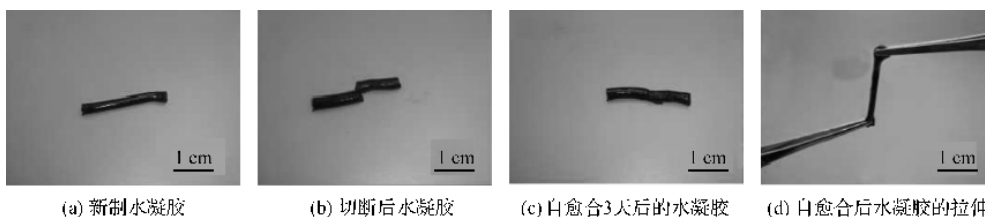


图6 水凝胶自愈合照片

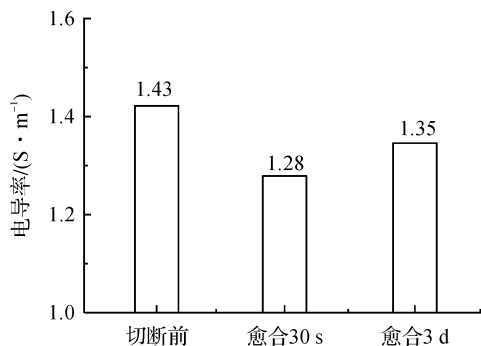


图7 水凝胶自愈合前后的电导率

2.5 水凝胶的 pH 刺激响应分析

图8是pH值对水凝胶的溶胀度的影响。如图8所示,水凝胶(表1中组样3, $d=4.7$ mm)溶胀度随pH值增大呈现先减后增趋势。在pH为8时溶胀度仅为4%。这是因为水凝胶中含有一 COO^- 和一 $\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ 两种离子基团,在适当pH条件下形成离子键,提高水凝胶交联密度,降低溶胀度。当pH值减少,凝胶中 $-\text{COOH}$ 官能团增多,与 $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ 形成的离子键相应减少,交联密度降低,水凝胶溶胀度提高^[24]。同样,pH值增大, $-\text{COO}^-$ 增多,交联密度降低,水凝胶溶胀度也提高。有趣的是,Zhang等^[25]以丙烯酸/丙烯酰胺/聚烯丙基氯化铵及交联剂BisAAm合成的半互穿双网络水凝胶,仅能随pH值增大,而吸水溶胀。这可能是由于该水凝胶为半互穿结构,其线性聚烯丙基氯化铵与主网络结构交联较少,相应 $-\text{COO}^-$ 与 $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ 相距较远,无法充分发挥 $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ 作用。良好的pH刺激响应性为该型水凝胶在智能材料领域的应用提供良好基础。

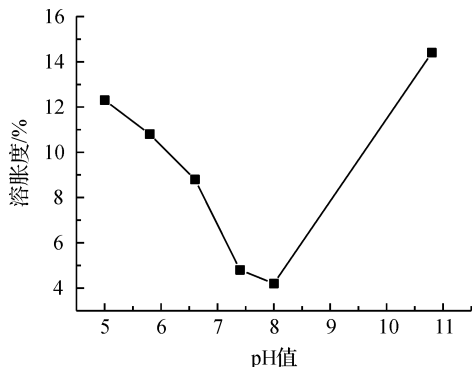


图8 pH值对水凝胶的溶胀度的影响

3 结论

以BisAAm作为化学交联剂,以DTBA为主构建疏水缔合物物理交联,通过DMC/SAA静电作用形成物理交联,制备出具有三重交联结构的复合导电水凝胶。在此基础上,着重分析了BisAAm含量、DTBA含量及SAA含量对水凝胶机械性能和导电性能的影响,并对水凝胶自愈合性能和pH刺激响应进行测试。主要研究结论如下:

a) 经优化的水凝胶在BisAAm含量为0.180 mol/L,DTBA的含量为0.148 mol/L,能获得最佳的综合性能,其压缩模量达0.340 MPa,拉伸模量达0.090 MPa,电导率为1.32 S/m。

b) 当SAA与DMC摩尔比为1时,其水凝胶的机械性能达到最大值,但导电性也降到最低值。

c) 该水凝胶同时具备一定的自愈合性和pH刺激响应,pH为8时,溶胀度最低,增大或降低pH值均能提高溶胀度。

参考文献:

- [1] 翟茂林,哈鸿飞. 水凝胶的合成、性质及应用[J]. 大学化学,2001,16(5):22-27.
- [2] 邵亮,柳明珠,邱建辉,等. 导电水凝胶的制备[J]. 化学进展,2011,23(5):923-929.
- [3] 毕曼,郝红,李涛. 智能水凝胶研究最新进展[J]. 离子交换与吸附,2008,24(2):188-192.
- [4] Gong J P. Why are double network hydrogels so tough? [J]. Soft Matter,2010,6(12):2583-2590.
- [5] Santin M, Huang S J, Iannace S, et al. Synthesis and characterization of a new interpenetrated poly(2-hydroxyethylmethacrylate)-gelatin composite polymer [J]. Biomaterials,1996,17(15):1459-1467.
- [6] Vaz C M, Reis R L, Cunha A M. Use of coupling agents to enhance the interfacial interactions in starch-EVOH/hydroxylapatite composites [J]. Biomaterials, 2002,23(2):629-635.
- [7] Haraguchi K, Li H J, Matsuda K, et al. Mechanism of forming organic/inorganic network structures during In-situ free-radical polymerization in PNIPAA-Clay nanocomposite hydrogels[J]. Macromolecules,2005,38

- (8):3482-3490.
- [8] Guo H, Kurokawa T, Takahata M, et al. Quantitative observation of electric potential distribution of brittle polyelectrolyte hydrogels using microelectrode technique [J]. *Macromolecules*, 2016, 49(8):3100-3108.
- [9] Zygañfo-Monikowska E, Florjańczyk Z, Wielgus-Barry E, et al. Proton conducting gel polyelectrolytes based on 2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid (AMPSA) copolymers with polyfunctional monomers. Part I. Anhydrous systems [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(1):385-391.
- [10] Small C J, Too C O, Wallace G G. Responsive conducting polymer-hydrogel composites [J]. *Polymer Gels & Networks*, 1997, 5(3):251-265.
- [11] Shirakawa H. The discovery of polyacetylene film-the dawning of an era of conducting polymers [J]. *Cheminform*, 2001, 32(39):3-10.
- [12] Wiczorek W, Stevens J R. Proton transport in polyacrylamide based hydrogels doped with H_3PO_4 or H_2SO_4 [J]. *Polymer*, 1997, 38(9):2057-2065.
- [13] Przyłuski J, Połtarzewski Z, Wiczorek W. Proton-conducting hydrogel membranes [J]. *Polymer*, 1998, 39(18):4343-4347.
- [14] Oyen M L. Mechanical characterisation of hydrogel materials [J]. *International Materials Reviews*, 2014, 59(1):44-59.
- [15] Cohen Y, Ramon O, Kopelman I J, et al. Characterization of inhomogeneous polyacrylamide hydrogels [J]. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*, 1992, 30(9):1055-1067.
- [16] Tokuyama H, Ishihara N, Sakohara S. Effects of synthesis-solvent on swelling and elastic properties of poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels [J]. *European Polymer Journal*, 2007, 43(12):4975-4982.
- [17] 姜国庆, 刘凤岐. 高强度疏水缔合水凝胶的交联网络结构形成机理 [J]. *功能高分子学报*, 2011, 24(1):43-48.
- [18] Regalado E J, Selb J, Candau F, et al. Viscoelastic behavior of semidilute solutions of multisticker polymer chains [J]. *Macromolecules*, 1999, 32(25):8580-8588.
- [19] Leibler L, Rubinstein M, Colby R H. Dynamics of reversible networks [J]. *Macromolecules*, 1991, 24(16):4701-4707.
- [20] 李文波, 谭颖, 徐昆, 等. 表面活性剂对疏水缔合水凝胶性能的影响 [J]. *高分子学报*, 2013, 21(8):993-998.
- [21] Pissis P, Kyritsis A. Electrical conductivity studies in hydrogels [J]. *Solid State Ionics*, 1997, 97(1-4):105-113.
- [22] 牛娜, 李志英, 高婷婷, 等. 疏水缔合水凝胶 [J]. *化学进展*, 2017, 16(7):757-765.
- [23] Argun A, Algi M P, Tuncaboylu D C, et al. Surfactant-induced healing of tough hydrogels formed via hydrophobic interactions [J]. *Colloid & Polymer Science*, 2014, 292(2):511-517.
- [24] Yao L, Krause S. Electromechanical responses of strong acid polymer gels in DC electric fields [J]. *Macromolecules*, 2003, 36(6):2055-2065.
- [25] Zhang Y X, Wu F P, Li M Z, et al. pH switching on-off semi-IPN hydrogel based on cross-linked poly (acrylamide-co-acrylic acid) and linear polyallylamine [J]. *Polymer*, 2005, 46(18):7695-7700.

Preparation and properties of conductive hydrogel with triple-crosslinking structure

LOU Yongjian, LUO Guangyan, ZHAO Yang, FU Feiya, LIU Xiangdong

(College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: As a new conductive material, conductive polymer hydrogel shows great application value in biosensors, electrical components and other fields because of its good conductivity and unique swelling characteristics. A compound conductive hydrogel with triple crosslinking structure, good mechanical property and conductivity was prepared via a radical copolymerization method. In the preparation process of conductive hydrogel, based on acrylamide (AAm) was used as the main material, and N, N-methylenebisacrylamide (BisAAm) was used as the chemical crosslinking agent. Meanwhile, micelle crosslinking composed of lauryl methacrylate (LMA) and dodecylammonium bromide (DTBA), and the ionic crosslinking formed between the sodium acrylate (SAA) and methacryloxyethyltrimethyl ammonium chloride (DMC) were introduced, and proper amount of graphite powder was added. The results showed that, the optimal mechanical property and conductivity could be gained under the following conditions: BisAAm content in the hydrogel 0.180 mol/L and the DTBA content 0.148 mol/L. The compression modulus was 0.340 MPa, tensile modulus was 0.090 MPa, and the conductivity was 1.32 S/m. The hydrogel also has certain self-healing and pH sensitivity. It is an intelligent conductive composite hydrogel with excellent comprehensive performance and broad application prospect.

Key words: triple crosslinking structure; conductive hydrogel; mechanical property

(责任编辑: 刘国金)