

氧化电解水凝胶的制备及杀菌效果

朱玉婵, 景莉, 袁敏, 刘毅, 赵干, 吴祯祯, 任占冬*

(武汉轻工大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉 430023)

摘要:利用浸渍法制备了氧化电解水凝胶。结果表明,不同有效氯质量浓度氧化电解水凝胶释放曲线类似,随着浸渍时间的延长,浸渍液中有效氯质量浓度变化呈现2个峰值,分别对应着凝胶表层中氧化电解水快速释放出和凝胶内部的氧化电解水释放。氧化电解水有效氯质量浓度越高,释放出来有效氯的质量浓度越多,达到峰值时间越短。在此基础上,考察了氧化电解水凝胶的杀菌作用,随着杀菌时间的延长,氧化电解水凝胶的杀菌效果不断提高,当杀菌时间为60 min,杀菌效率达到79.76%;而对对照组(普通水凝胶)的杀菌效率仅为23.01%,提高了近4倍,说明氧化电解水凝胶具有较好的杀菌作用,且明显优于无负载氧化电解水的水凝胶。

关键词:氧化电解水;水凝胶;有效氯;杀菌

中图分类号:R187

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)05-0106-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.05.027

Preparation of electrolyzed oxidizing water hydrogel and its sterilization effect

ZHU Yu-chan, JING Li, YUAN Min, LIU Yi, ZHAO Gan, WU Zhen-zhen, REN Zhan-dong*

(School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: The electrolyzed oxidizing water hydrogel (EOW hydrogel) is prepared by impregnation method. The results show that the release curve of the EOW hydrogel with different active chlorine content (ACC) is similar. With the extension of the soaking time, the ACC of the dipping solution shows two peaks, which are corresponding to the fast release of EOW in the surface of the gel and the release of EOW from the inner of the gel. The higher ACC in the EOW, the more chlorine content is released and the shorter the peak time reaches. On the basis of the study, the germicidal efficacy of the EOW hydrogel is investigated. It has a good bactericidal effect in the continuous sterilization, which is better than the non-loaded EOW hydrogel. With the prolonging of the sterilization time, the sterilization effect of the EOW hydrogel is increasing. When the sterilization time is 60 minutes, the sterilization efficiency reaches 79.76%, while the control group (conventional hydrogel) of the sterilization efficiency is only 23.01%. It indicates that the EOW hydrogel has a good bactericidal effect.

Key words: electrolyzed oxidizing water; hydrogel; active chlorine content; sterilization

氧化电解水 (Electrolyzed Oxidizing Water, EOW) 又名酸性氧化电位水,其含有一定量的有效氯,具有低 pH ($\text{pH} < 2.7$) 和高氧化还原电位 ($\text{ORP} > 100 \text{ mV}$),大量实验研究证明,其具有杀菌广谱、迅速、强力、持续等特点^[1-2]。氧化电解水最早应用于医疗行业中,可用于手消毒、内窥镜消毒、病房空气消毒、血液透析机清洗、口腔清洗、口腔溃疡、阴道炎、特异性皮炎、擦伤、切伤、压疮、烧伤、术创、坏疽等治疗^[3-11]。另外,氧化电解水在食品安全、农业生产等领域也有着广泛应用^[12-19]。

水凝胶是一种能够吸收大量水的网状高分子溶胀体,其表面光滑,生物相容性好,在生物和医学领域有着广泛的应用。医用水凝胶可以替代传统敷料,具有迅速降低创面温度,加速创面愈合,可负载药物,缩短治疗周期,容易更换等特点。目前,研究

较多的是聚乙烯醇-壳聚糖水凝胶,该水凝胶具有较好的机械性能和溶胀性,并且对大肠杆菌具有较好的抗菌性^[20-31],这类水凝胶在皮肤修复敷料方面的应用也同样受到国内外研究者的广泛关注^[32-36]。笔者将氧化电解水高效杀菌作用与医用水凝胶相结合,制备富含氧化电解水的水凝胶,使其既具有氧化电解水高效的杀菌作用,也具有水凝胶本身良好的生物相容性。利用浸渍法制备了氧化电解水凝胶,并考察了其释放有效氯的效果和对大肠杆菌的杀菌活性。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

聚乙烯醇(PVA-124)、壳聚糖、戊二醛(5%)、冰醋酸、丙三醇、氯化钠、氯化钾、重铬酸钾、铬酸钾、

收稿日期:2015-10-19

基金项目:国家自然科学基金项目(2012FFB04803);武汉轻工大学科研项目资助(2013Y04)

作者简介:朱玉婵(1980-),女,博士,副教授,研究方向为功能材料及应用,zhuyuchan@163.com;任占冬(1978-),男,博士,副教授,研究方向为应用化学,通讯联系人,renzhandong@163.com。

碘化钾、盐酸、3,3,5,5-四甲基联苯胺、硫代硫酸钠、酵母浸膏粉、蛋白胨、琼脂粉,以上试剂均为分析纯。

1.2 氧化电解水的制备

在自制离子膜电解槽中进行氧化电解水的制备,如图1所示。阳极是自制的钽铌氧化物电极(有效面积为 1dm^2),阴极为纯钛板。中间用均相阳离子交换膜将电解槽分成了阳极区和阴极区,体积为500 mL。电解过程中,添加质量分数为0.1%的NaCl溶液作为电解质,电流密度为 $5\text{A}/\text{dm}^2$,电极间距为2 cm,电解一定时间后,在阳极区得到氧化电解水(EOW),阴极区得到还原电解水(ERW)。通过调整电解时间可以获得不同有效氯质量浓度的氧化电解水。有效氯质量浓度的测定是以3,3,5,5-四甲基联苯胺溶液($0.3\text{g}/\text{L}$)为显色剂,在449 nm处测定吸光度,并根据余氯测定标准曲线并计算有效氯质量浓度。

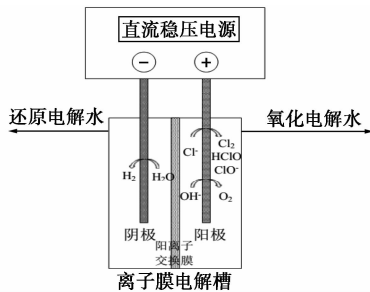


图1 氧化电解水的制备

1.2 聚乙烯醇-壳聚糖水凝胶的制备

称取0.25 g聚乙烯醇(PVA)于18 mL 0.349 mol/L的醋酸溶液中溶胀一段时间,随后水浴加热至 80°C 进行溶解。当其完全溶解后,加入1.25 g的壳聚糖(CS),在 65°C 下加热搅拌溶解45 min。然后依次加入丙三醇(加入量为聚合物总量的2倍)和0.28 mL 2%戊二醛溶液,待搅拌均匀后,静止反应15 min, 40°C 真空干燥24 h得聚乙烯醇-壳聚糖水凝胶。

1.3 氧化电解水凝胶的制备

将2 g聚乙烯醇-壳聚糖水凝胶浸渍在25 mL氧化电解水中,每隔一段时间取0.5 mL浸泡液进行有效氯质量浓度分析,并补充相同体积的氧化电解水溶液。有效氯分析方法是先将所取的0.5 mL浸泡液用去离子水稀释至100 mL。取稀释后的溶液9.5 mL,加入0.5 mL四甲基联苯胺溶液,混合后在449 nm处测吸光度,根据测得的吸光度,由有效氯标准曲线得出浸渍液的有效氯质量浓度。

1.4 氧化电解水凝胶的释放

将上述制得的2 g氧化电解水凝胶放入透析袋中,浸渍在25 mL PBS缓冲溶液中。每隔一段时间,取0.5 mL缓冲溶液进行有效氯质量浓度分析,方法同1.3,并补充等量新鲜PBS缓冲溶液。

1.5 氧化电解水凝胶杀菌效果

将2 g氧化电解水凝胶加入至25 mL 1.0×10^8 cfu/mL大肠杆菌悬液中,在300 r/min的振荡摇床上分别振荡20、30、40、50 min和60 min。振荡后取0.5 mL大肠杆菌悬液加入到4.5 mL $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 中和作用10 min。取0.5 mL接种培养,采用平板计数法分别测定对照组和杀菌组样品的活菌浓度,所有活菌浓度数据以3次平行测定($P < 0.05$)的平均值为准。

2 结果与讨论

2.1 不同有效氯质量浓度氧化电解水的制备

不同电解时间下所制备氧化电解水的有效氯质量浓度如图2所示。从图2中可以看出,随着电解时间的延长,有效氯质量浓度逐渐增加。当电解时间为50 min时,有效氯质量浓度达到139 mg/L;电解时间为60 min时,有效氯质量浓度达到168 mg/L;电解时间为80 min时,有效氯质量浓度达到201 mg/L。

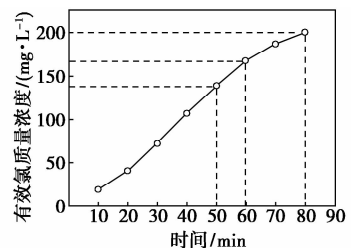
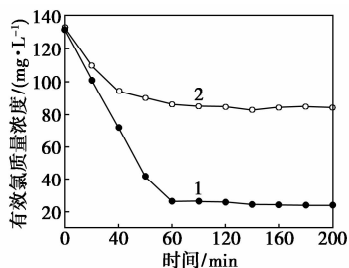


图2 电解时间对氧化电解水有效氯的影响

2.2 氧化电解水凝胶的制备

分别采用上述3种不同有效氯质量浓度的氧化电解水,采用浸渍法制备氧化电解水凝胶。采用有效氯质量浓度为139 mg/L的氧化电解水作初始浸渍液,其在制备过程中有效氯的变化情况如图3所示。从图3中可以看出,随着浸渍时间的延长,浸渍液中有有效氯质量浓度不断下降。这一方面是归因于凝胶对氧化电解水吸收;另一方面则是电解水本身不稳定而导致分解。为了证明氧化电解水的确被凝胶所吸收,采用没有加凝胶的电解水作为对照。从图3中也可以看出,对照组的有效氯质量浓度也随着时间延长而下降,但是下降的幅度小于水凝胶组。

当浸渍时间为 100 min 时,对照组的有效氯质量浓度为 85.10 mg/L;而水凝胶组有效氯质量浓度为 26.36 mg/L,说明水凝胶对氧化电解水有明显吸收作用。当浸渍时间达到 80 min 后,有效氯的质量浓度变化不大,其达到吸附平衡。当然初始氧化电解水有效氯质量浓度不同时,其平衡时间会有所不同,为了保证其充分达到平衡,后续电解水凝胶制备时,浸渍时间选定为 2 h。

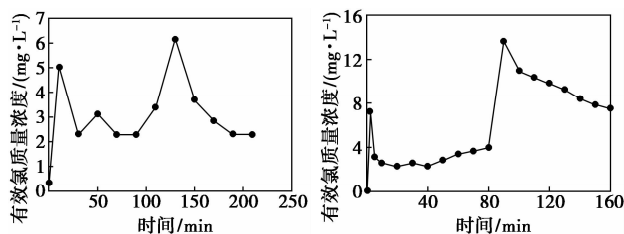


1—水凝胶;2—对照组(没加水凝胶)

图 3 氧化电解水凝胶制备过程中有效氯的变化

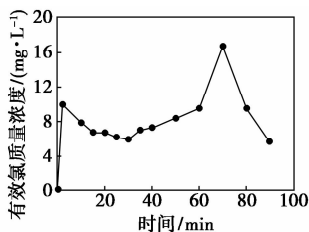
2.3 氧化电解水凝胶的释放过程

考虑氧化电解水凝胶在医药行业中实际应用,考察了上述 3 种不同有效氯质量浓度电解水凝胶的释放过程,通过测试溶液中有效氯质量浓度来代表氧化电解水释放效果。不同有效氯质量浓度氧化电解水凝胶的释放曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着浸渍时间的延长,浸渍液中有效氯质量浓度变化呈现 2 个峰值。当氧化电解水凝胶刚加入溶液时,凝胶表层中氧化电解水快速释放出来,使得溶液中有效氯质量浓度迅速增加;而后则由于氧化电



(a) 有效氯质量浓度为 139 mg/L

(b) 有效氯质量浓度为 168 mg/L



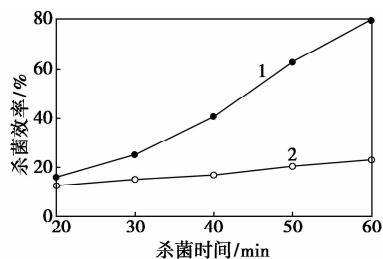
(c) 有效氯质量浓度为 201 mg/L

图 4 不同有效氯质量浓度氧化电解水凝胶的释放曲线

水自身分解而不断下降,并逐渐达到释放与分解平衡,有效氯质量浓度基本不变,进入一个平稳期。而当浸渍时间过长时,对凝胶的溶胀作用加强,使得凝胶内部的氧化电解水释放出来,所以有效氯质量浓度再一次增加并达到平衡。另外,从图 4 中可以看出,制备时氧化电解水有效氯质量分数越高,释放出来有效氯质量浓度越多,达到峰值时间越短。当制备时有效氯质量分数为 139 mg/L 时,其释放有效氯质量分数峰值达到 6.17 mg/L,时间为 130 min;制备时有效氯质量分数为 168 mg/L 时,其释放有效氯质量分数峰值达到 13.68 mg/L,时间为 90 min;制备时有效氯质量分数为 201 mg/L 时,其释放有效氯峰值达到 16.74 mg/L,时间为 70 min。

2.4 氧化电解水凝胶的杀菌作用

氧化电解水凝胶的杀菌效果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着杀菌时间的延长,氧化电解水凝胶的杀菌效果不断提高,而对对照组(普通水凝胶组)杀菌效果增长缓慢。当杀菌时间为 20 min,氧化电解水凝胶和普通水凝胶的杀菌效率接近,分别为 15.88% 和 12.39%;当杀菌时间为 40 min,氧化电解水凝胶增长到 40.75%,提高了 2.57 倍,而普通水凝胶的杀菌效率为 16.81%,仅提高了 35.67%;当杀菌时间为 60 min,氧化电解水凝胶杀菌效率达到 79.76%;而对对照组(普通水凝胶)的杀菌效率仅为 23.01%,两者相差近 4 倍。因此,当普通水凝胶负载氧化电解水之后,可以大大提高了其杀菌效率。



1—电解水凝胶组;2—对照组

图 5 氧化电解水凝胶的杀菌效果

3 结论

利用浸渍法制备了氧化电解水凝胶。结果表明,不同有效氯质量浓度的氧化电解水凝胶释放曲线类似,随着浸渍时间的延长,浸渍液中有效氯质量浓度的变化呈现 2 个峰值,分别对应着凝胶表层中氧化电解水快速释放和凝胶内部氧化电解水释放。氧化电解水有效氯质量浓度越高,释放有效氯越多,达到峰值时间越短。在此基础上,考察了氧化电

水凝胶的杀菌作用,其具有较好的持续杀菌效果,明显优于无负载氧化电解水的水凝胶。

参考文献

- [1] Thorn R M S, Lee S W H, Robinson G M, *et al.* Electrochemically activated solutions; evidence for antimicrobial efficacy and applications in healthcare environments [J]. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*, 2012, 31: 641 – 653.
- [2] Alexander Kraft. Electrochemical water disinfection: A short review [J]. *Platinum Metals Rev*, 2008, 52(3): 177 – 185.
- [3] Robert Pintaric, Joze Matela, Stefan Pintaric. Suitability of electrolyzed oxidizing water for the disinfection of hard surfaces and equipment in radiology [J]. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2015, 13: 6 – 11.
- [4] Meakin N S, Bowman C, Lewis M R, *et al.* Comparison of cleaning efficacy between in-use disinfectant and electrolyzed water in an English residential care home [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2012, 80(2): 122 – 127.
- [5] Chittoria R K, Yootla M, Sampatrao L M, *et al.* The role of super oxidized solution in the management of diabetic foot ulcer; Our experience [J]. *Nepal Med Coll J*, 2007, 9: 125 – 128.
- [6] Vorobjeva N V, Vorobjeva L I, Khodjaev E Y. The bactericidal effects of electrolyzed oxidizing water on bacterial strains involved in hospital infections [J]. *Artif Organs*, 2004, 28(6): 590 – 592.
- [7] Fenner D C, Bürge B, Kayser H P, *et al.* The anti-microbial activity of electrolysed oxidizing water against microorganisms relevant in veterinary medicine [J]. *J Vet Med B Infect Dis Vet Public Health*, 2006, 53(3): 133 – 137.
- [8] Thorn R M S, Greenman J, Austin A J. In vitro method to assess the antimicrobial activity and potential efficacy of novel types of wound dressings [J]. *J Appl Microbiol*, 2005, 99(4): 895 – 90.
- [9] Park G W, Boston D M, Kase J A, *et al.* Evaluation of liquid- and fog-based application of Sterilox hypochlorous acid solution for surface inactivation of human norovirus [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2007, 73(14): 4463 – 4468.
- [10] Morita C, Nishida T, Ito K. Biological toxicity of acid electrolyzed functional water; effect of oral administration on mouse digestive tract and changes in body weight [J]. *Arch Oral Biol*, 2011, 56(4): 359 – 366.
- [11] Hadi S F, Khaliq T, Bilal N, *et al.* Treating infected diabetic wounds with superoxidized water as anti-septic agent; A preliminary experience [J]. *J Coll Physicians Surg Pak*, 2007, 17: 740 – 743.
- [12] Hao J X, Lia H Y, Wan Y F, *et al.* Combined effect of acidic electrolyzed water (AcEW) and alkaline electrolyzed water (AIEW) on the microbial reduction of fresh-cut cilantro [J]. *Food Control*, 2015, 50: 699 – 704.
- [13] McCarthy S, Burkhardt III W. Efficacy of electrolyzed oxidizing water against *Listeria monocytogenes* and *Morganella morganii* conveyor belt and raw fish surfaces [J]. *Food Control*, 2012, 24: 214 – 219.
- [14] Wang J J, Sun W S, Jin M T, *et al.* Fate of *Vibrio parahaemolyticus* on shrimp after acidic electrolyzed water treatment [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2014, 179: 50 – 56.
- [15] Mansur A R, Tango C N, Kim G H, *et al.* Combined effects of slightly acidic electrolyzed water and fumaric acid on the reduction of foodborne pathogens and shelf life extension of fresh pork [J]. *Food Control*, 2015, 47: 277 – 284.
- [16] Ni L, Cao W, Zheng W C, *et al.* Efficacy of slightly acidic electrolyzed water for reduction of foodborne pathogens and natural microflora on shell eggs [J]. *Food Science and Technology Research*, 2014, 20: 93 – 100.
- [17] Torlak E. Inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in aqueous suspension and on apples by neutral electrolyzed water [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2014, 185: 69 – 72.
- [18] Xiong K, Liu H J, Li L T. Product identification and safety evaluation of aflatoxin B₁ decontaminated by lectrolyzed oxidizing water [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60: 9770 – 9778.
- [19] Dev S R S, Demirci A, Graves R E, *et al.* Optimization and modeling of an electrolyzed oxidizing water based Clean-In-Place technique for farm milking systems using a pilot-scale milking system [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 135: 1 – 10.
- [20] Qin C Q, Xiao Q, Li H, *et al.* Calorimetric studies of the action of chitosan-*N*-2-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride on the growth of microorganisms [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2004, 34: 121 – 126.
- [21] Xu T, Xin M H, Li M C, *et al.* Synthesis, characteristic and antibacterial activity of *N,N,N*-trimethyl chitosan and its carboxymethyl derivatives [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 81: 931 – 936.
- [22] Li R, Pei H, Ren X H, *et al.* Antimicrobial *N*-halamine modified chitosan films [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92: 534 – 539.
- [23] Yang J H, Cai J, Hu Y, *et al.* Preparation, characterization and antimicrobial activity of 6-amino-6-deoxychitosan [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87: 202 – 209.
- [24] Dong W, Qu L J, Guo X Q. Study on the properties of the gelatin modified chitosan film [J]. *Textile Auxiliaries*, 2012, 29(2): 36 – 38.
- [25] Gao Mingjie, Wang Zhiqiang, Sun Lei, *et al.* Preparation and antibacterial properties of chitosan modified silver nanoparticles [J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(8): 1038 – 1041.
- [26] Li Lihua, Deng Jiancheng, Deng Hui ren, *et al.* Preparation, characterization and antimicrobial activities of chitosan/Ag/ZnO blend films [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 160(1): 378 – 382.
- [27] Siripatrawan U, Noipha S. Active film from chitosan incorporating green tea extract for shelf life extension of pork sausages [J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 27(1): 102 – 108.
- [28] Jia Yongtang, Gong Jian, Gu Xiaohua, *et al.* Fabrication and characterization of poly(vinyl alcohol)/chitosan blend nanofibers produced by electrospinning method [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 67(3): 403 – 409.

及污染成分质量分数。

1 实验

1.1 试剂和仪器

78-1 型磁力加热搅拌器,江苏省金坛市金伟实验仪器厂生产;旋转蒸发器,德国 Heidolph 生产;DHG-9070A 型干燥箱,上海一恒科技有限公司生产;Tensor 27 红外光谱仪,德国 Bruker 生产;BSA224S 电子天平,德国赛多利斯生产;OLS4000 激光共聚焦电子显微镜,lympplus 生产;D8 advance XRD 分析仪,德国布鲁克生产。

母液由沐丹阳药业有限公司提供;甲醇、乙醇、乙二醇、正丙醇、异丙醇、1,2-丙二醇、1,3-丙二醇和丙三醇均为分析纯,天津富宇精细化工有限公司生产;氢氧化钠、氯化钠和盐酸均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产。

1.2 实验方法

在烧杯中依次加入定量体积的低分子有机物和无机盐溶液/母液,继续加入适量无机盐(氯化钠)形成双相体系,通过盐酸或氢氧化钠调节体系的 pH,混合均匀后静置分层,记录双相各自体积;移取有机相,旋转蒸发浓缩,固体烘干,记录并分析固体的质量、形态和组成。

1.3 分析方法

双相体系的效率评价通过分配系数和回收率确定,分配系数 K 及回收率 η 的关系式如下:

$$R = V_i/V_o$$

$$K = C_i/C_o$$

$$\eta = V_i \times C_i / (V_i \times C_i + V_o \times C_o) = 1 / [1 + 1/(RK)]$$

式中, R 为相比; C_i 、 C_o 分别为有机相和水相中目标

产物的浓度,mg/mL; V_i 、 V_o 分别为有机相和水相的体积,mL。

辜鹏^[18]和林金清等^[19]研究发现,相比 R 与分配系数 K 具有相同的变化趋势,回收率的表达式也表明, η 与 R 也具有相同的变化趋势,因此也可以用 R 来间接表征体系的回收率。

2 结果与讨论

2.1 双相体系中最佳低分子有机物的确定

母液成分分析表明其中含有大量的氯化钠,其是能够构建双向体系的无机盐之一,笔者尝试构建低分子有机物/氯化钠双相体系。不同的小分子有机溶剂水分子的缔合能力不同,因此具有不同的分相能力。选择甲醇、乙醇、乙二醇、正丙醇、异丙醇、1,2-二丙醇、1,3-二丙醇和丙三醇进行了研究。结果表明,甲醇、乙醇、乙二醇、1,2-丙二醇、1,3-丙二醇及丙三醇均不能与氯化钠水溶液形成双相体系,而正丙醇和异丙醇均能够与氯化钠水溶液形成双相体系,但分相效果具有一定的差异性,如表 1 所示。由表 1 中可以看出,不同 pH 环境下,体系的分相效果差异性不大,即 pH 不影响分相效果,这对母液的回收处理十分有利。在酸性和中性环境中,正丙醇分相效果优于异丙醇;在碱性环境中,二者差异性不大,因此,优选正丙醇为双相体系的有机相。

表 1 丙醇/水双相体系的分相效果

有机物类型	相比 R		
	pH = 2 ~ 4	pH = 7	pH = 10 ~ 12
正丙醇	0.94	0.95	0.90
异丙醇	0.90	0.90	0.90

(上接第 109 页)

[29] Gao Xiping, Liu Jie, Zheng Xuejing, *et al.* Influence of crosslinkinh of formaldehyde on structure and properties of gelatin/PVA blend films[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(5): 5049 - 5052.

[30] 张晓红,洪宇文,段颖,等. 卤胺改性壳聚糖/PVA 抗菌复合膜的制备及性能[J]. *功能材料*, 2015, 46(12): 12110 - 12115.

[31] 宫铭,宋成建,曲建林,等. CS/PMA30 水凝胶的制备及其对中性红控释性能的研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(5): 05075 - 05075, 05083.

[32] Boucard N, Viton C, Agay D, *et al.* The use of physical hydrogels of chitosan for skin regeneration following third-degree burns[J]. *Biomaterials*, 2007, 28(24): 3478 - 3488.

[33] Jiang Shan, Liu Sha, Feng Wenhao. PVA hydrogel properties for biomedical application[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2011, 4(7): 1228 - 1233.

[34] Morgado P I, Lisboa P F, Ribeiro M P, *et al.* Poly(vinylalcohol)/chitosan asymmetrical membranes: Highly controlled morphology toward the ideal wound dressing[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 469: 262 - 271.

[35] Zhou Yingshan, Yang Hongjun, Liu Xin, *et al.* Potential of quaternization-functionalized chitosan fiber for wound dressing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 52: 3 27 - 332.

[36] 司徒方民,赵巨鹏,邸勋,等. 聚乙烯醇/季铵盐壳聚糖复合水凝胶的制备及其烫伤敷料的应用[J]. *功能材料*, 2015, 46(9): 133 - 143. ■