

柔性可拉伸应变传感器研究进展与应用

彭 军¹ 李 津¹ 李 伟¹ 陈婷婷¹ 郑通通¹ 刘 皓^{1,2,3*}

(1.天津工业大学纺织学院,天津 300387;2.智能可穿戴电子纺织品研究所,天津 300387;
3.天津工业大学教育部先进复合材料重点实验室,天津 300387)

摘 要 随着智能产品的快速发展,柔性传感器在可穿戴电子领域发挥着重要的作用。综述了近年来可拉伸应变传感器的研究进展与应用,包括传感器类型和传感机理、碳材料、金属纳米材料、混合微/纳米材料等可拉伸传感器的常用材料,可拉伸应变传感器的制造方法及其在个人健康监测、人体运动检测、人机接口、康复和娱乐技术等方面的潜在应用前景,最后提出了可拉伸应变传感器面临的挑战与未来发展的方向。

关键词 柔性传感器,可穿戴电子,制造方法,人体监测

Research progress and application of flexible tensile strain sensor

Peng Jun¹ Lin Jin¹ Li Wei¹ Chen Tingting¹ Zheng Tongtong¹ Liu Hao^{1,2,3}

(1.Department of Textiles,Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387;
2.Institute of Smart Wearable Electronic Textiles,Tianjin 300387;
3.Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials,Ministry of Education,
Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387)

Abstract With the rapid development of intelligent products, flexible sensors play an important role in the wearable electronics. This review focused on recent research advances of stretchable strain sensors and applications, including sensor types and transduction mechanisms, general materials, manufacture processes and potential applications. Common materials used in stretchable strain sensors, such as carbon materials, metal nanomaterials, mixed micro/nanomaterials, were also introduced. stretchable strain sensors also had the practical and potential applications, which focused on personal health monitoring, human motion detection, human-machine interfaces, rehabilitation and entertainment techniques. Finally, the challenges and future development of stretchable strain sensors were presented.

Key words flexible sensor, wearable electronics, manufacture process, human monitoring

随着智能产品的普及,可穿戴电子设备呈现出巨大的市场前景。传感器作为主要的核心部件之一,将影响可穿戴设备的功能设计与未来的发展^[1]。近年来,传感器在健康监测方面发挥了非常重要的作用^[2],如将传感器固定在人体胸口区域,测量人体的呼吸频率^[3];将传感器安装在手腕,测量人体心率^[4]。然而,实现柔性电子传感器的高灵敏度、高分辨率、快速响应、低成本制造和复杂信号检测仍是很大的挑战^[5]。笔者综述了近年来柔性可拉伸应变传感器的研究进展,包括传感器类型和传感机理、碳材料、金属纳米材料、混合微/纳米材料、可拉伸应变传感器的制造方法,以及可拉伸应变传感器在个人健

康监测、人体运动检测、人机接口、康复和娱乐技术等领域的潜在应用前景。

1 传感机理

柔性传感器主要是将机械变形转化为电子信号的一种方式,从中获得所需要的测量信息。柔性拉伸应变传感器主要分为电阻型^[6]和电容型传感器^[7]。尽管还有几种其他类型应变传感器,包括布拉格光纤^[8]、拉曼漂移^[9]、摩擦发电^[10]和离子压电应变传感器用于皮肤覆盖和可穿戴传感器^[11],但是由于他们复杂的测量系统、低分辨率和差的动态性能导致这些传感器面临巨大挑战^[12]。另一方面,电

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51473122);中国博士后科学基金面上资助(2016M591390);国家大学生创新训练计划(201610058035)

作者简介:彭军(1992-),男,硕士,主要研究方向为基于银纳米线可拉伸应变传感器研究。

联系人:刘皓,博士,副教授,主要从事智能纺织品和纳米材料的研究。

阻和电容型传感器需要相对简单的读数系统并且提供高的柔软性和可拉伸性。因而,在这篇文章中我们聚焦在电阻型和电容型传感器

1.1 电阻型传感器

电阻类型传感器是由导电敏感膜耦合柔性基底构成的。当复合结构拉伸时,在敏感膜上的微结构变化导致电阻变化与应变形成一个函数。在应变释放之后,敏感膜重建传感器的电阻恢复到它的初始状态。来自于三星先进技术研究所的 Choong 等^[13]在 2014 年研发出一种高度可伸缩的电阻式压力传感器,是通过涂覆基板具有高度伸缩性的电极来实现的。衬底包含微尺度锥体特征阵列,电极包括聚合物复合材料。当电极的压力引起的几何变化在 40% 伸长时达到最大值时,灵敏度达到 10.3kPa。Chun 等^[14]提出由微米尺寸的银薄片和用自组装银纳米粒子装饰的多壁碳纳米管组成高度导电,可拉伸的混合复合材料,通过印刷方式得到的导电聚合物传感器。最大电导率在 0% 应变下为 5,710S/cm,应变在 140% 的拉伸下,导电性仍然高达 20S/cm。

1.2 电容型传感器

电容型传感器采用在一对可拉伸电极之间砂磨的高度兼容的电介质层。拉伸应变使 2 个电极之间的距离发生变化,导致电容发生变化。这种传感器的优势在对外界刺激反应敏感,并能够在低耗能情况下检测微小静态力。Cai 等^[15]提出一种超弹性、透明的基于碳纳米管的电容式压力传感器。这种碳纳米管电容式应变传感器,即使经过数千次循环,也可以检测高达 300% 的耐受性,耐久性极好。基于碳纳米管的应变计装置在整个应变范围内表现出确定性和线性电容响应,具有优异的动态感测能力,因而被用于原型数据手套和呼吸检测仪。Bingger 等^[16]设计了一种高度灵活的电容应变仪来测量血管直径的变化,这些变化表示血压。这种传感器被植入并缠绕在动脉血管周围,可以用于连续长期监测血压和脉搏,还可以与实时神经刺激技术或药物过程组合以创建用于血压控制的闭环系统。

2 柔性传感器常用材料和制作方法

2.1 柔性基底

基底材料是柔性传感器很重要的影响因素。良好的机械性能以及光滑的表面都是柔性基底材料必须具备的。如聚二甲基硅氧烷(PDMS)、共聚酯(Ecoflex)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰亚

胺(PI)和聚氨酯(PU)等常被用作柔性电子器件的基底。PDMS 是硅橡胶类聚合物,杨氏模量低,具有光学透明、简单易得、成本低和化学性质稳定,在高温下具有较好的稳定性和传导性,其柔韧性和可伸展性使传感器具有相应的可拉伸和压缩的性能。这些优点可以满足柔性传感器的需求^[17]。Jeong 等^[18]提出用碎片化石墨烯泡沫(FGF)和 PDMS 组成的复合材料制造可拉伸和敏感应变传感器。FGF/PDMS 应变传感器表现出超过 70% 的拉伸性,耐久性高于 10000 拉伸释放周期。应变传感器用量规显示出高灵敏度,当传感器连接到人体时,它的作用就是一个健康监测设备用来检测各种人体运动。Amjadi 等^[19]通过使用碳纳米管渗透网络 Ecoflex 纳米复合材料薄膜制成可拉伸,皮肤安装和超软应变传感器。碳纳米管-Ecoflex 应变传感器对 500% 以上的应变,具有超伸缩性和高可靠性。应变传感器的灵敏度可以通过碳纳米管渗透网络的数量密度来调节。应变传感器在不同的应变水平和速率下表现出低的滞后性,具有高线性和小漂移,因此可将应变传感器安装在身体的不同部位进行皮肤运动检测。

PU 弹性好,具有优良的复原性、耐生物老化、较好的稳定性能和价格适中。因此,用来制备柔性传感器。Li 等^[20]研发了一种新的可伸缩的导电聚吡咯/聚氨酯(PPy/PU)应变传感器。通过制作多孔 PU 弹性基体,将聚吡咯分散在多孔聚氨酯基体内和表面。提出了聚吡咯/聚氨酯弹性体的可逆导电机理。然后,将这个属性用来制备一个腰带般的人体呼吸检测器。作为人体健康应用的应变传感器,它可以显示人体反复吸气和收缩时的可逆阻力变化。

2.2 碳材料

柔性可拉伸应变传感器常用的碳材料有碳纳米管和石墨烯等。以碳纳米管和石墨烯为代表的纳米碳材料兼具良好的柔性和优异的导电性,且具有化学稳定、热稳定等优点,在柔性导电材料领域展现了极大的应用潜力。Yamada 等^[21]提出了一种用于人体运动检测的可拉伸碳纳米管应变传感器,由可排列的单壁碳纳米管薄膜制成的可穿戴和可拉伸的装置。当拉伸时,纳米管薄膜断裂成间隙和岛状物,并且将桥接在间隙上。这种机制允许薄膜作为应变传感器,能够测量高达 280% 的应变,具有高耐久性、快速响应和低蠕变性。Boland 等^[22]研发出一种石墨烯-橡胶复合材料的高敏感、高应变和高速度人

体运动传感器。其显示出 104 倍的电阻增加和在超过 800% 的应变条件下工作。灵敏度相当高,测量因数高达 35。更重要的是,这种传感器可以有效跟踪动态应变。因此,可以有效监测关节和肌肉运动以及呼吸和脉搏。

2.3 金属纳米材料

金属材料主要应用于电极和导线。金属纳米线和纳米颗粒具有良好的导电性能。在柔性传感器中,金属纳米线和纳米颗粒被用作导电材料^[22-23]。Amjadi 等^[24]提出由三明治结构的弹性纳米聚合物制备应变传感器,其中银纳米线薄膜嵌入到两层 PDMS 弹性体之间,具有强的压阻特性,可调控应变系数在 2 至 14 范围内,高伸缩性高达 70%,高于传统的应变传感器。此外,这种传感器的线性度和灵敏度可以由银纳米线的密度决定,并在实现高度可拉伸和线性应变传感器中起到重要的作用。该研究发现夹层结构应变传感器对弯曲和接头角度测量有很好的响应。将可拉伸应变传感器应用于智能手套,用于实时运动检测和对虚拟环境中化身的控制。

2.4 混合微/纳米材料

灵活,可拉伸和可佩戴的传感器可以方便地安装在衣服上或直接附着在身上。对人体运动检测,需要高度可拉伸和敏感的应变传感器。有些导电材料由于自身的物理性质或化学性质的限制,需要与其他材料共同作用来弥补或改进这种材料,以达到理想的效果。Zhang 等^[25]提出了用银纳米颗粒/碳纳米管复合材料制造高度可拉伸,灵敏和柔性的应变传感器。通过改变碳纳米管的表面,并降低材料之间的界面电阻,来实现传感器高的拉伸性能和灵敏度。

2.5 制作方法

可拉伸传感器可以通过不同的方法制作,过滤方法、3D 打印技术、转移和微模型法、涂层技术、液相混合法和化学合成法是可拉伸传感器的常用制作方法。Xu 等^[26]采用过滤方法制作了一种高度可伸缩的、敏感的基于银纳米线弹性体纳米复合材料的应变传感器。银纳米网络薄膜首先被涂在一个中间基底并且随后通过过滤技术被转移到 PDMS 矩阵上。Muth^[27]采用嵌入 3D 打印技术制备高拉伸性和柔性应变传感器,粘性纳米材料墨水通过一个沉积喷嘴被直接嵌入进弹性体材料内。Hempel 等^[28]采用喷射石墨烯片在 PET 基底上制备柔软和灵敏的应变传感器。薄膜的透光性和电导性通过喷射溶液的量来控制。成长的薄膜通过不同的转移技术被

转移到柔性基底上^[29-30]。在镍催化层上沉积的石墨烯薄膜通过 PDMS 印章被转移到 PDMS 基底上。得到的石墨烯-PDMS 复合材料被进行应变敏感性表征^[30]。将纳米材料填料和液相高聚物被放在一起充分混合以获得纳米复合结构。Kong 等^[31]提出了通过溶液混合法制备的基于炭黑-聚二甲基硅氧烷(CBs-PDMS)纳米复合膜的可拉伸传感器。

3 柔性传感器的应用

3.1 健康监测

柔性传感器有大量潜在的应用。可拉伸和灵敏的应变传感器能够被用做身体集成电子设备。他们能被附着在服装上或直接叠层在人体皮肤上用于身体应变测量。可穿戴技术由于具有容易实现,早期诊断和长期监控能力而获得高度的关注^[32]。在可穿戴传感器中,可拉伸应变传感器有潜在的应用价值。这些传感器是高度可拉伸的和柔软的以模拟人体皮肤或服装的复杂和大变形,并且拥有高灵敏度以检测由于血流脉搏和呼吸导致的微小皮肤的应变,如血压^[16]、呼吸率^[33-34]和心跳^[35-36]等。柔性电容传感器用于检测体外血压,由于血流压力导致的血管直径变化被测量,具有快速响应时间(50ms)和灵敏度(0.045%mmHg)^[16]。

3.2 运动监测

在现代社会中,随着社会的快速发展,越来越需要对人体活动进行实时监测。通过安装可穿戴应变传感器在人体的不同部位,对人体的运动状况进行监测。监测人体运动的策略可以分为 2 种:一种是监测大范围运动,如手、胳膊和腿的弯曲运动;另一种是监测像呼吸、吞咽和说话过程中胸和颈的细微运动。所以,具备好的拉伸性和高灵敏度的柔性可穿戴电子传感器在运动监测领域至关重要^[1]。Yamada^[21]研究了一种用于人体运动检测的可拉伸碳纳米管应变传感器。将传感器安置在人体喉咙处测量呼吸频率,以及贴在膝盖关节和手套上,可监测膝盖弯曲运动以及手指的运动情况。因此,通过安装柔性可拉伸应变传感器在人体的不同部位,传感器能够实现运动性能检测的功能。

3.3 人机接口

当前技术的主要目标是建立智能人机接口,人们能够通过可穿戴感知系统实现智能人机接口。可穿戴应变传感器的信号能够被用于驱动智能机器人。如用可拉伸的、皮肤覆盖的和可穿戴应变传感器开发的各种智能手套。这些应变传感器被贴在手

套的手指上用于手指弯曲角度的测量。当一个手指关节弯曲后,弯曲应变被应变传感器感知,并且转变为电信号变化,当手指伸直,应变传感器松弛,并且应变降低,伴随着电信号的复原^[37]。Gong 等^[38]设计和制造了一种智能手套系统,通过无线信号封装铜纳米线/聚苯胺(AuNWs/PANI)传感器来远程控制机器人手臂。因此,穿戴这种智能手套可以远距离控制机器人的手臂。手指的弯曲和伸直被用于控制机器人执行不同的任务。机器人通过智能手套系统远距离控制,能够有利于执行外科手术操作或一些人类无法完成的精细化和危险工作。

3.4 康复和娱乐技术

柔性传感器还有一个潜在的应用,柔性应变传感器能够在虚拟现实和交互式游戏中被用作运动传感器和输入装备^[39]。在人体贴上可穿戴运动传感器,可以用来通过姿势驱动游戏。同时,可穿戴传感器也能够用于医疗训练、家庭康复和治疗应用。Patel 等^[40]提出了腰痛治疗系统,通过将无线可穿戴运动传感器与互动游戏相结合,提供了一种有吸引力的方式进行治疗。患者可以设定治疗目标,获得有关其表现的反馈并跟踪其进展情况。

4 总结与展望

随着智能产品的普及,可穿戴电子设备展现出巨大的市场前景。柔性传感器作为可穿戴设备的主要核心部件,将对其未来功能发展产生非常重要的影响。随着研究进一步深入,柔性可拉伸传感器还需要解决新型传感原理、复杂环境分析和多功能集成等科学问题,以及制备工艺、材料合成与器件整合等技术上的突破。首先,需要新材料和新信号传感机制来拓展柔性可拉伸应变传感器在人体穿戴上的使用范围,满足不同场合的需要;其次,发展低能耗和自驱动的柔性传感器;再者,提高可拉伸应变传感器在可穿戴上的性能,包括灵敏度、响应时间、检测范围、集成度和多分析等,提高便携性,降低传感器的制造成本;最后,发展无线传输技术,与移动终端结合,建立统一的平台服务,实现数据实时传输、分析与反馈。随着科学技术的发展,特别是纳米材料和纳米技术的研究不断深入,可拉伸应变传感器在可穿戴领域展现出了更为广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Qian X, Su M, Li F, et al. Research progress in flexible wearable electronic sensors[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2016, 74(7): 565-569.
- [2] Dr V M, Prof R S. Tactile devices to sense touch on a par with a human finger[J]. *Angewandte Chemie*, 2008, 47(41): 7808-7826.
- [3] Paradiso R, Caldani L. Electronic textile platforms for monitoring in a natural environment[J]. *Research Journal of Textile & Apparel*, 2010, 14(4): 234-239.
- [4] Tuba Y, Robert F, Yang H. Detecting vital signs with wearable wireless sensors[J]. *Sensors*, 2010, 10(12): 10837-10862.
- [5] Chen L Y, Tee B C K, Chortos A L, et al. Continuous wireless pressure monitoring and mapping with ultra-small passive sensors for health monitoring and critical care[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5028-5031.
- [6] Hu N, Fukunaga H, Atobe S, et al. Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites[J]. *Sensors*, 2011, 11(11): 10691-10723.
- [7] Li R Z, Hu A, Zhang T, et al. Direct writing on paper of foldable capacitive touch pads with silver nanowire inks[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 23(6): 21721-21729.
- [8] Zhong J, Zhang Y, Zhong Q, et al. Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6): 6273-6278.
- [9] Raju A P A, Lewis A, Derby B, et al. Wide-area strain sensors based upon graphene-polymer composite coatings probed by Raman spectroscopy[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(19): 2865-2874.
- [10] Hwang B U, Lee J H, Trung T Q, et al. Transparent stretchable self-powered patchable sensor platform with ultrasensitive recognition of human activities[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(9): 8801-8810.
- [11] Pan C, Dong L, Zhu G, et al. High-resolution electroluminescent imaging of pressure distribution using a piezoelectric nanowire LED array[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 752-758.
- [12] Amjadi M, Kyung K, Park I, et al. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: a review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(11): 1678-1698.
- [13] Choong C L, Shim M B, Lee B S, et al. Highly stretchable resistive pressure sensors using a conductive elastomeric composite on a micropillar array[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(21): 3451-3458.
- [14] Chun K Y, Oh Y, Rho J, et al. Highly conductive, printable and stretchable composite films of carbon nanotubes and silver[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 12(5): 853-857.
- [15] Cai L, Song L, Luan P, et al. Corrigendum: super-stretchable, transparent carbon nanotube-based capacitive strain sensors for human motion detection[J]. *Scientific Reports*, 2013, 6157: 3048-3051.
- [16] Bingger P, Zens M, Woias P. Highly flexible capacitive strain gauge for continuous long-term blood pressure monitoring[J]. *Biomedical Microdevices*, 2012, 14(3): 573-581.
- [17] Keshoju K, Sun L. Mechanical characterization of magnetic nanowire-polydimethylsiloxane composites[J]. *Journal of Ap-*

- plied Physics, 2009, 105(2): 023515-023519.
- [18] Jeong Y R, Park H, Jin S W, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensors using fragmentized graphene foam[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(27): 4228-4236.
- [19] Amjadi M, Yoon Y J, Park I. Ultra-stretchable and skin-mountable strain sensors using carbon nanotubes-ecoflex nanocomposites[J]. Nanotechnology, 2015, 26(37): 375501-375512.
- [20] Li M, Li H, Zhong W, et al. Stretchable conductive polypyrrole/polyurethane (PPy/PU) strain sensor with netlike microcracks for human breath detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(2): 1313-1319.
- [21] Yamada T, Hayamizu Y, Yamamoto Y, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(5): 296-299.
- [22] Boland C S, Khan U, Backes C, et al. Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites[J]. ACS Nano, 2014, 8(9): 8819-8823.
- [23] Jiang J, Bao B, Li M, et al. Fabrication of transparent multilayer circuits by inkjet printing[J]. Advanced Materials, 2016, 28(7): 1420-1426.
- [24] Amjadi M, Pichitpajongkit A, Lee S, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J]. ACS Nano, 2014, 8(5): 5154-5163.
- [25] Zhang S J, Zhang H L. Highly stretchable, sensitive, and flexible strain sensors based on silver nanoparticles/carbon nanotubes composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 652: 48-54.
- [26] Xu F, Zhu Y. Highly conductive and stretchable silver nanowire conductors[J]. Advanced Materials, 2012, 24(37): 5117-5122.
- [27] Muth J T, Vogt D M, Truby R L, et al. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers[J]. Advanced Materials, 2014, 26(26): 6307-6312.
- [28] Hempel M, Nezich D, Kong J, et al. A novel class of strain gauges based on layered percolative films of 2D materials[J]. Nano Letters, 2012, 12(11): 5714-5718.
- [29] Park S, Vosguerichian M. A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics[J]. Nanoscale, 2013, 5(5): 1727-1752.
- [30] Bae S H, Lee Y, Sharma B K, et al. Graphene-based transparent strain sensor[J]. Carbon, 2013, 51(1): 236-242.
- [31] Kong J H, Jang N S, Kim S H, et al. Simple and rapid micropatterning of conductive carbon composites and its application to elastic strain sensors[J]. Carbon, 2014, 77(10): 199-207.
- [32] Windmiller J R, Wang J. Wearable electrochemical sensors and biosensors: a review[J]. Electroanalysis, 2013, 25(1): 29-46.
- [33] Corbishley P, Rodriguezvillegas E. Breathing detection: towards a miniaturized, wearable, battery-operated monitoring system[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007, 55(1): 196-204.
- [34] Gong S, Schwalb W, Wang Y, et al. A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires[J]. Nature Communications, 2014, 5(2): 3132-3139.
- [35] Pang C, Lee G Y, Kim T I, et al. A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres[J]. Nature Materials, 2012, 11(9): 795-802.
- [36] Wang Y, Wang L, Yang T, et al. Wearable and highly sensitive graphene strain sensors for human motion monitoring[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(29): 4666-4670.
- [37] Rahimi R, Ochoa M, Yu W, et al. Highly stretchable and sensitive unidirectional strain sensor via laser carbonization[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(8): 4463-4475.
- [38] Gong S, Lai D T, Wang Y, et al. Tattoolike polyaniline micro-particle-doped gold nanowire patches as highly durable wearable sensors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 35(7): 19700-1972.
- [39] Sawada H, Kitani M, Hayashi Y. Wearable, human-interactive, health-monitoring, wireless devices fabricated by macroscale printing techniques[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(22): 3299-3304.
- [40] Patel S, Park H, Bonato P, et al. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation[J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2012, 9(1): 21-28.

收稿日期: 2017-07-27

修稿日期: 2018-08-18

(上接第 38 页)

- [23] 彭琦, 袁宵梅. 超临界 CO₂ 作非溶剂制备聚乳酸膜的研究[J]. 洛阳理工学院学报, 2010, 20(1): 24-27.
- [24] Natu M V, Gil M H, Sousa H C. Supercritical solvent impregnation of poly(epsilon-caprolactone)/poly(oxyethylene-b-oxypropylene-b-oxyethylene) and poly(epsilon-caprolactone)/poly(ethylene-vinyl acetate) blends controlled release applications[J]. Journal of Supercritical Fluids, 2008, 47(1): 93-102.
- [25] 薛媛, 但年华, 但卫华, 等. 口腔修复膜的研究进展及其应用[J]. 生物医学工程与临床, 2016, 20(1): 101-102.
- [26] Pan S X, Li Y, Feng H L, et al. In vitro aging of mineralized collagen-based composite as guided tissue regeneration membrane[J]. Materials Science and Engineering: C, 2006, 26(4): 724-729.
- [27] 钱楚凡, 李小琳, 王栋. 羟基磷灰石生物陶瓷及口腔修复膜在根尖囊肿手术中的应用[J]. 中国医学创新, 2015, 12(24): 125-126.
- [28] 薛媛, 但年华, 但卫华. 多孔胶原-β-磷酸三钙-硫酸软骨素复合膜的制备与表征[J]. 材料导报, 2017, 31(1): 8-12.
- [29] 冯霆均, 廖纪云, 吴晓春. 甲壳素/天然胶乳复合膜作为皮肤创伤敷膜[J]. 生物医学工程学杂志, 1999, 16: 88-89.
- [30] 陈腊梅, 梅曹婕, 叶霖, 等. 同轴静电纺丝法制备具有核-壳纤维结构的多功能敷料[J]. 高等学校化学学报, 2016, 37(3): 600-609.
- [31] 王永清, 邓洁, 张世庆. 血液透析器透析膜的应用及研究进展[J]. 透析与人工器官, 2008, 19(3): 17-18.
- [32] 贾悦, 吕晓龙, 武春瑞. 聚醚砜中空纤维血液透析膜的制备与透析性能初步评价[J]. 生物医学工程学杂志, 2010, 27(1): 91-93.
- [33] 潘振强, 马晓华, 许振良, 等. 聚砜中空纤维血液透析膜的制备与表征[J]. 中国生物医学工程学报, 2016, 35(3): 317-323.

收稿日期: 2017-06-28