

外敷用高分子材料研究进展

李 涛,吕思瑶,翟文中,何玉凤,王荣民*

(生态环境相关高分子材料教育部重点实验室,西北师范大学高分子研究所,
西北师范大学化学化工学院,兰州 730070)

摘要:皮肤受损后需要立即使用外敷材料,从而加速止血、保护创面、防止细菌感染,并促进创面愈合。本文在介绍伤口的分类和敷料的选择的基础上,就典型的敷料制备、干燥和成型技术,以及目前常见的外敷材料药物负载方法进行了概述。其次,重点阐述了天然高分子和合成高分子外敷材料的最新研究进展。其中天然高分子因其生物相容性好、生物可降解等特点,常用于治疗烧伤、创伤引起的皮肤和组织缺损。而合成高分子优点为:具有很长的保质期、较强的机械性能和较低的炎症反应,几乎没有携带病菌并传播的风险。目前,改性天然高分子、合成高分子及其复合材料已经在生物医药、材料学领域受到越来越多的关注。纳米技术和药物控释技术的发展,将会大大推动外敷材料的研究开发并拓宽其应用领域。

关键词:外敷材料; 药物负载; 天然高分子; 合成高分子

引言

人体皮肤受到损伤后,容易被细菌感染、甚至引起各种并发症,危及生命。因此,受损皮肤需用伤口外敷材料(Wound dressing materials)处理,从而可防止细菌感染^[1]、加速止血与促进创面愈合^[2,3]。理想的敷料应具备无毒、无致敏、不与伤口组织粘连,而且能保护受损皮肤、清理创面、减轻疼痛、去除坏死皮肤等功能。近年来,多种类型的高分子材料被应用于外敷领域,并取得了长足进步。这里,就外敷用高分子材料研究进展做一综述。

1 伤口的分类和敷料的选择

当机体某一部分受到伤害,导致某种程度上的损害或破损,即为伤口。伤口按照愈合时间长短可分为急性伤口和慢性伤口。按受损原因可分为受物理损害的伤口;受电源、辐射以及化学品腐蚀伤口;受温度引起的伤口和血管性疾病引起的伤口。按照皮肤的生理结构被破坏程度可分为部分皮层受损的伤口和全部皮层受损的伤口。

1988 年 Cuzzell 提出创面颜色评估法^[4],即用红、黄、黑三种颜色评估伤口情况。红色创面表示伤口有健康血流的正常肉芽组织,干净或正在愈合的伤口;黄色创面表示伤口内有腐肉、渗出液或感染;黑色创面表示伤口内有缺乏血液供应的坏死组织、软或硬的结痂。对黑色创面,需采用外科清创术,还需用水凝胶类敷料。对黄色创面,可用藻酸盐类、纤维素类敷料。对红色创面,可用水胶体敷料。

2 外敷材料的干燥成型与药物负载方法

2.1 外敷材料的干燥成型技术

外敷材料主要有凝胶状、纤维状、膜状等,不同形态的外敷材料需要不同的方法制备。经典的干燥成

10.14028/j.cnki.1003-3726.2016.01.003
收稿:2015-03-16;修回:2015-05-14;
基金项目:国家自然科学基金(21263024,21364012);
作者简介:李涛(1991—),男,研究生,主要从事天然高分子的研究;
* 通讯联系人:E-mail: wangrm@nwnu.edu.cn.

型方法有冷冻干燥和喷雾干燥法。冷冻干燥是利用水溶剂作为材料成孔剂,再将溶剂冷凝、干燥后形成多孔材料^[5]。冷冻干燥能保持材料原有的结构与形态。喷雾干燥是将料液分散为细小的雾滴,并在热干燥介质中迅速蒸发溶剂形成干粉产品^[6],可制成粉状、颗粒状、空心球状或团粒状等,从而可增加其比表面积。

纤维状外敷材料可用湿法纺丝技术^[7]、静电纺丝技术^[8]和离心纺丝技术制备。静电纺丝制得的无纺布具有孔隙率高、比表面积大、纤维精细程度与均一性好、长径比大等优点,其纳米纤维支架可模拟天然细胞外基质的结构,更有利于细胞在其上黏附、增殖、分化。但静电纺丝技术存在对溶剂有限制、产量低和纤维直径分布较宽等缺点^[9,10]。离心纺丝技术可通过改变离心力的大小制备不同粒径的纤维材料^[11]。

2.2 药物负载方法

将药物负载于聚合物基质中的方法有药液吸附法、乳化溶剂挥发法、喷雾干燥法、自乳化溶剂扩散法和相分离法^[12]等。Muzzarelli 等^[13]采用高结晶度的甲壳素纳米纤维,壳聚糖乙醇酸酯和洗必泰为原料制得医用敷料,动物及临床实验表明,其适用于皮肤损伤面较大且出血量小的伤口处理。超临界溶液浸渍法是将小分子物质负载到聚合物中的技术,药物首先溶解于超临界二氧化碳中,通过扩散作用进入聚合物基质中。在减压后,CO₂ 挥发,药物留在聚合物中,形成具有缓释功能的载药聚合物材料^[14,15]。

3 高分子外敷材料及其应用

外敷材料根据来源可分为天然高分子和合成高分子材料,其中,天然高分子主要包括多糖类(如纤维素、甲壳素、壳聚糖、海藻酸、琼脂、果胶、树胶和糖胺聚糖)和蛋白类(如植物蛋白、胶原蛋白、明胶、纤维蛋白、角蛋白、丝素蛋白等)。合成高分子主要是聚乙烯醇、聚乙二醇、聚乳酸、聚乙烯吡咯烷酮等生物相容性和降解性较好的材料。

3.1 天然高分子外敷材料

3.1.1 多糖基高分子外敷材料 纤维素制成的敷料常用于渗出液较多的慢性伤口。由细菌合成的纤维素(BC)具有很好的细胞粘附性^[16],可作为局部深 II 度烧伤外敷材料^[17]。细菌纳米纤维素(BNC)可用于组织修复和大面积皮肤移植^[18]。将奥替尼啶^[19]、支链淀粉衍生物^[20]等抗菌组分负载于 BNC,具有药物释放可控、抗菌活性等特性。Kim 等^[21]制得的细菌纤维素-壳聚糖敷料膜,具有适宜的细胞粘附性和抗菌性能,可保持创面湿润,待伤口愈合后便于从伤口上去除,适用于治疗红色创面^[22]。

将壳聚糖制成水凝胶、膜、海绵体和支架^[23]材料后,可用于伤口护理及组织工程领域^[24]。将环丙沙星盐酸盐负载于壳聚糖/海藻酸基双层复合膜中,可有效抑制微生物在创面的生长,降低皮肤创面进一步的感染^[25]。研究表明:壳聚糖与丝胶蛋白复合可制得抗菌性的纳米纤维敷料^[26];与聚环氧乙烯复合制得机械性能和生物相容性较好的纤维垫敷料^[27];与蜂蜜和明胶复合,可制得具有抗菌性和无刺激性的敷料^[27];与谷氨酸盐和透明质酸复合可得到针对不同渗出液的海绵状敷料^[29]。Liu 等^[30]发现京尼平交联的壳聚糖纳米银复合物具有 pH 敏感的溶胀性和较好的机械性能,有望用作外伤和烧伤敷料。Zhou 等^[31]制备了具有高液体吸收能力和抗菌活性的壳聚糖纤维敷料,可应用于皮肤修复中。壳聚糖互穿网络聚合物膜^[32]与壳聚糖水凝胶^[33]外敷材料能促进伤口的快速愈合。

海藻酸盐敷料能在伤口表面形成凝胶,为伤口提供湿润环境,特别适合于治疗黄色创面。海藻酸双亲性薄膜负载药物后,能促进轻度化脓的伤口愈合^[34]。含银海藻酸盐敷料具有抗菌和消炎作用,能促进轻度感染伤口的愈合^[35]。海藻酸盐与有天然抗菌性能的高分子复合,制备的外敷材料具有优异的抗菌性能^[36, 37]。

Miguel 等^[38]制备的琼脂糖-壳聚糖温敏性凝胶,可促进细胞内化(Internalization)和增殖,并能修复创伤表面。Dias 等^[39]制备的负载生物活性组分(如抗炎作用的槲皮素,麻醉作用的百里香酚)的琼脂糖基天然高分子外敷材料,具有药物释放可控和吸收伤口渗出液能力。研究表明:琼脂糖与透明质酸复合

制备的可降解凝胶材料无细胞毒性,可治疗关节损伤^[40]。

果胶和树胶作为伤口敷料时有助于伤口的血管生成和创面粒化^[41],在治疗红色创面时效果显著。采用罗望子多糖制备的敷料具有很高的溶胀系数和热稳定性,可用于伤口外敷领域^[42]。Prezotti 等^[43]制备了结冷胶/果胶材料,其溶胀、降解和药物控释性能均具有 pH 响应性。由抗氧化性较好的阿拉伯树胶制得的水凝胶,具有很高的液体吸收能力,在负载抗生素后,能促进伤口纤维母细胞和毛细血管更好的形成^[44]。

糖胺聚糖(透明质酸、肝素、硫酸软骨素)是主要的有机细胞外基质组分,可以调节皮肤和骨前驱细胞的吸引力,在骨和皮肤再生的过程中起到必不可少的作用^[45]。Diasa 等^[16]将 jucá 果实(产自巴西的一种铁树: *Libidibia ferrea*)提取物负载于透明质酸敷料,使敷料具有抗炎、抗菌、止痛和抗溃疡能力,透湿性和透氧量也较为理想,可在伤口愈合的不同阶段使用。Lequeux 等^[47]将尼生素(抗菌肽)接枝到透明质酸制得了具有抗菌性能的外敷材料,可避免伤口感染和腐烂。将透明质酸接入冻干纤维薄片后,可制得具有很好保水性能,又能促进烧伤和糖尿病并发症溃烂的快速愈合敷料^[48]。Fajardo 等^[49]发现负载磺胺嘧啶银的硫酸软骨素/壳聚糖膜敷料,具有 pH 响应的溶胀和液体吸收能力,对绿脓假单菌和金黄色葡萄球菌具有长效的抗菌性。肝素涂覆的纳米纤维材料能改善深层皮肤缺损创面内皮细胞的渗透性,并能促进体内外的组织重建^[50]。

3.1.2 蛋白质基高分子外敷材料 玉米醇溶蛋白与壳聚糖复合后通过电喷丝技术,可制得具有一定力学强度的复合膜^[51]。Peles 等^[52]制备了一种可生物降解,并对庆大霉素有可控释放的大豆分离蛋白膜,对烧伤和皮肤溃疡有很好的治愈效果。聚氨酯-大豆分离蛋白-醋酸纤维素纳米纤维支架材料具有很好的亲水性、细胞粘附性、促进细胞增殖和血液凝固能力,可促进皮肤伤口的愈合^[53]。

将鱼鳞胶原蛋白与硬皮豆提取物结合制备的海绵体,具有很好的抗菌活性和生物相容性,可用于皮肤创伤/烧伤的敷料^[54]。Chikazu 等^[55]制备的胶原蛋白凝胶敷料,对开放性创伤非常有效,可用于表皮缺损和皮肤溃疡的治疗。Ghica 等^[56]发现胶原蛋白-米诺环素基水凝胶,对感染的皮肤伤口有很好的局部药物释放效果。Fullana 等^[57]制备的胶原蛋白支架材料可用于人造血管的接枝和伤口修复。

Zhou 等^[58]合成的纳米银粒子/明胶/羧甲基壳聚糖凝胶,可作为抗菌外敷材料使用。Saarai 等^[59]发现 Ca^{2+} 交联的明胶/海藻酸钠凝胶具有很好的保湿性、弹性和机械性能,并对伤口渗出液有较好的吸收性能。Sarika 等^[60]将阿拉伯树胶醛经氧化处理后与明胶交联,制得具有细胞相容性且无细胞毒性的支架材料。Kwak 等^[61]将硅藻提取物负载于明胶纳米纤维上,可赋予其很好的抗菌活性,有望用作抗菌外敷材料。

牛血清白蛋白(BSA)化学交联后具有良好的机械性能,在术后缝合、伤口外敷和促进伤口闭合方面有很大的应用价值^[62]。将金属铜纳米颗粒氧化物均匀分布于 BSA 基质中,制得具有抗菌活性的 BSA-Cu 纳米复合物可用作抗菌剂和外伤敷料^[63]。新型的角蛋白基伤口敷料能改善敷料的机械性能,对抗生素和生长因子有显著的控释效果^[64]。Xu 等^[65]制备了能促进血管形成和皮肤再生的人发角蛋白支架材料,其在修复深层皮肤过程中具有很好的降解性能。

Çalamak 等^[66]制备了具有抗菌性的丝素蛋白/聚乙烯亚胺基生物纳米纺织材料,由于其具有较高的比表面积和生物粘附性、可控药物释放和促进细胞增殖能力,可作为长效抗菌绷带材料使用。丝素蛋白基双层外伤敷料,可减少细胞粘附性,加速胶原蛋白形成和促进深层皮肤损伤的愈合^[67]。Gu 等^[68]制备的丝素蛋白/壳聚糖共混膜具有很好的水吸收能力和水蒸气渗透性,并能促进细胞增殖,有望作为商业敷料在临床中应用。Uslu 等^[69]将马尾草提取物负载于丝素蛋白/透明质酸海绵体中,可赋予外敷材料天然的抗菌和抗癌性能。丝素蛋白和乳酸-乙醇酸共聚物制成的杂混支架材料,可促进慢性伤口和糖尿病并发症溃疡的快速愈合^[70]。

3.2 合成高分子外敷材料及其应用

合成高分子可直接用作外敷材料,也可用于改性天然高分子外敷材料。常见的合成高分子材料有聚

力,并能促进伤口的血液凝固,加速表皮愈合^[84]。Kim 等^[85]将蜂胶负载于聚氨酯上,制得了具有优良抗菌性的纳米纤维复合垫,该复合垫具有细胞相容性,可用于外伤处理和皮肤组织工程领域。

聚乳酸和聚丁二酸丁二醇酯共混物通过静电纺丝法制备的高机械强度纤维垫对病原微生物有较好抗菌性能,可作为抗菌敷料使用^[86]。Nguyen 等^[87]将具有抗氧化、抗炎症,促进伤口愈合的姜黄素负载于聚乳酸中,制得的聚乳酸/姜黄素纳米纤维材料具有无毒、高比表面积和高孔隙率,能促进细胞粘附和增殖,有利于伤口的愈合。醋酸纤维素、聚乳酸和聚乳酸-羟基乙酸共聚物等生物相容性高分子,通过负载紫草素并制成纤维网,使其具有抗菌、抗炎、抗氧化和抗癌活性,可用于创伤皮肤修复、皮肤再生和皮肤组织工程领域^[88]。Park 等^[89]制备了甲氧基聚乙二醇-聚乳酸-羟基乙酸共聚物(mPEG-PLGA)复合膜和交联的胶原-透明质酸膜(Col-HA),mPEG-PLGA 复合膜细胞粘附性较低,Col-HA 膜的成纤维细胞附着性较好,能促进术后伤口愈合,且不会引起炎症和组织反应。

将活性组分白藜芦醇固定于 PVP 凝胶中,可作为治疗皮肤病的敷料^[90]。Wang 等^[91]制备的 PVP/PVDF(聚偏二氟乙烯)核-壳结构的纳米纤维垫,其具有超疏水性和多孔结构,气体流通性较好,有望应用于伤口的修复。Dai 等^[92]利用静电纺丝技术,制备的负载大黄素的 PVP 共混纳米纤维膜,具有优异的药物释放性能,能促进感染伤口的愈合。

Yang 等^[93]利用逐层聚电解质组装技术,制备的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物膜是一种无菌半渗透膜,具有抗菌活性,可用于渗出液较少的轻度伤口处理。陈晨等^[94]采用紫外辐照法,在 PTFE 多孔膜表面接枝温敏性的聚 *N*-异丙基丙烯酰胺(PNIPAAm),制备的膜材料(PTFE-*g*-PNIPAAm),在创面愈合后,敷料易从新生组织表面剥离,且不会对新生组织造成二次损伤。还有研究表明:负载链霉素和双氯芬酸的聚环氧乙烯/角叉菜胶基复合膜能有效抑制金黄色葡萄球菌、绿脓杆菌和大肠杆菌滋生,并能防止伤口感染和减轻患者的疼痛^[95]。

4 总结与展望

外敷材料在伤口愈合中起非常重要的作用。按照愈合时间、受损原因和被破坏程度可对伤口进行分类,而且针对不同愈合情况伤口可采用不同类型的敷料。外敷用高分子材料应具有良好的生物相容性、透气吸湿性和适宜的粘附性。然而天然高分子敷料在机械性能、多功能化方面尚存在明显不足。合成高分子虽然机械性能较好,但在细胞毒性和生物相容性方面与天然高分子相比也有不足之处。随着人们生活水平的不断提高,对高分子敷料的要求也会越来越高。因此,具有生物相容性、生物可降解性和多功能化的外敷用天然、合成高分子及其复合材料逐渐受到关注。未来,随着材料制备技术和药物控释技术的发展,外敷材料将会向多元化、功能化、智能化方向发展。

参考文献:

- [1] Hutchinson J J, McGuckin M. Am J Infect Control, 1990, 18: 257~268.
- [2] Deng C, He L, Zhao M, Yang D. Carbohydr Polym, 2007, 68(3):583~589.
- [3] Oztuk E, Agalar C, Kececi K, Denkbaz E B. J Appl Polym Sci, 2006, 101 (3):1602~1609.
- [4] Cuzzell J Z. Am J Nurs, 1988, 88(10):1342~1346.
- [5] 姚响, 虞新林, 王晓工. 化学进展, 2009, 21(Z2): 1546~1562.
- [6] 黄立新, 王宗濂, 唐金鑫. 化学工程, 2001, 29(2): 51~55.
- [7] Bao X, Hayashi K, Li Y, Teramoto A, Abe K. Mater Lett, 2010, 64(22): 2435~2437.
- [8] 李岩, 黄争鸣. 高分子学报, 2006, (5): 12~17.
- [9] Valipouri A, Ravandi S A H, Pishevar A R. Fiber Polym, 2013, 14(6): 941~949.
- [10] McEachin Z, Lozano K. J Appl Polym Sci, 2012, 126 (2): 473~479.
- [11] Sarkar K, Gomez C, Zambrano S, Ramirez M, Hoyos D E, Vasquez H, Lozano K. Mater Today, 2010, 13(11): 12~14.
- [12] 袁君杰, 谢幼专. 生命科学, 2013, 25(3): 329~333.

- [13] Muzzarelli R A A, Morganti P, Morganti G, Palombo P, Palombo M, Biagini G, Belmonte M M, Giantomassi F, Orlandi F, Muzzarelli C. *Carbohydr Polym*, 2007, 70(3): 274~284.
- [14] Guney O, Akgerman A. *AIChE J*, 2002, 48(4): 856~866.
- [15] Yu J P, Guan Y X, Yao S J, Zhu Z Q. *Ind Eng Chem Res*, 2011, 50(24): 13813~13818.
- [16] Cai Z, Hou C, Yang G. *Carbohydr Polym*, 2012, 87(2), 1073~1080.
- [17] Park S U, Lee B K, Kim M S, Park K K, Sung W J, Kim H Y, Han D G, Shim J S, Lee Y J, Kim S H, Kim I H, Park D H. *Int Wound J*, 2014, 11(1): 35~43.
- [18] Fu L, Zhou P, Zhang S, Yang G. *Mater Sci Eng C*, 2013, 33(5): 2995~3000.
- [19] Moritz S, Wiegand C, Wesarg F, Hessler N, Müller F A, Kralisch D, Hipler U, Fischer D. *Int J Pharm*, 2014, 471(1/2): 45~55.
- [20] Li H, Yang J, Hu X, Liang J, Fan Y, Zhang X. *Biomed Mater Res*, 2011, 98(1): 31~39.
- [21] Kim J, Cai Z, Lee H S, Choi G S, Lee D H, Jo C. *Polym Res*, 2011, 18(4)739~744.
- [22] Lin W, Lien C, Yeh H, Yu C, Hsu S. *Carbohydr Polym*, 2013, 94(1): 603~611.
- [23] Sung J H, Hwang M, Kim J O, Lee J H, Kim Y I, Kim J H, Chang S W, Jin S G, Kim J A, Lyoo W S, Han S S, Ku S K, Yong C S, Choi H. *Int J Pharm*, 2010, 392(1/2): 232~240.
- [24] Lin Y, Tan F, Marra K G, Jan S, Liu D. *Acta Biomater*, 2009, 5(7): 2591~2600.
- [25] Han F, Dong Y, Song A, Yin R, Li S. *Appl Surf Sci*, 2014, 311: 626~634.
- [26] Zhao R, Li X, Sun B, Zhang Y, Zhang D, Tang Z, Chen X, Wang C. *Int J Biol Macromol*, 2014, 68:92~97.
- [27] Naseri N, Algan C, Jacobs V, John M, Oksman K, Mathew A P. *Carbohydr Polym*, 2014, 109: 7~15.
- [28] Wang T, Zhu X, Xue X, Wu D. *Carbohydr Polym*, 2012, 88: 75~83.
- [29] Rossi S, Faccendini A, Bonferoni M C, Ferrari F, Sandri G, Del Fante C, Perotti C, Caramella C M. *Int J Pharm*, 2013, 440(2): 207~215.
- [30] Liu Y, Kim H. *Carbohydr Polym*, 2012, 89(1): 111~116.
- [31] Zhou Y, Yang H, Liu X, Mao J, Gu S, Xu W. *Int J Biol Macromol*, 2013, 52: 327~332.
- [32] Ngadaonye J I, Geever L M, Killion J, Higginbotham C L. *J Polym Res*, 2013, 20(7): 1~13.
- [33] Ito T, Yoshida C, Murakami Y. *Mater Sci Eng C*, 2013, 33(7): 3697~3703.
- [34] Thu H, Zulfakar M H, Ng S. *Int J Pharm*, 2012, 434(1/2) 375~383.
- [35] Seo S Y, Lee G H, Lee S G, Jung S Y, Lim J O, Choi J H. *Carbohydr Polym*, 2012, 90(1): 109~115.
- [36] Liakos I, Rizzello L, Scurr D J, Pompa P P, Bayer I S. *Int J Pharm*, 2014, 463(2): 137~145.
- [37] Bueno C Z, Dias A M A, de Sousa H J C, Braga M E M, Moraes Â M. *Mater Sci Eng C*, 2014, 44: 117~125.
- [38] Miguel S P, Ribeiro M P, Brancal H, Coutinho P, Correia I J. *Carbohydr Polym*, 2014, 111: 366~373.
- [39] Dias A M A, Braga M E M, Seabra I J, Ferreira P, Gil M H, de Sousa H C. *Int J Pharm*, 2011, 408(1/2): 9~19.
- [40] Zhang L, Wu C, Huang J, Peng X, Chen P, Tang S. *Carbohydr Polym*, 2012, 88(4): 1445~1452.
- [41] Renuka M, Nishadh P, Jigar S, Tejal M. *Int J Drug Dev Res*, 2012, 4, 128~140.
- [42] Joseph J, Kanchalochana S N, Rajalakshmi G, Hari V, Durai R D. *Int J Green Pharm*, 2012, 6(4): 270~278.
- [43] Prezotti F G, Cury B S F, Evangelista R C. *Carbohydr Polym*, 2014, 113: 286~295.
- [44] Singh B, Sharma S, Dhiman A. *Int J Pharm*, 2013, 457(1): 82~91.
- [45] Salbach J, Rachner T D, Rauner M, Hempel U, Anderegg U, Franz S, Simon J C, Hofbauer L C. *J Mol Med*, 2012, 90(6): 625~635.
- [46] Diasa A M A, Rey-Ricob A, Oliveiraa R A, Marcenciroa S, Alvarez-Lorenzob C, Concheirob A, Júniorc R N C, Bragaa M E M, de Sousaa H C. *J Supercrit Fluid*, 2013, 74: 34~45.
- [47] Lequeux I, Ducasse E, Jouenne T, Thebault P. *Eur Polym J*, 2014, 51: 182~190.
- [48] Anilkumar T V, Muhamed J, Jose A, Jyothi A, Mohanan P V, Krishnan L K. *Biologicals*, 2011, 39(2): 81~88.
- [49] Fajardo A R, Lopes L C, Caleare A O, Britta E A, Nakamura C V, Rubira A F, Muniz E C. *Mater Sci Eng C*, 2013, 33(2): 588~595.
- [50] Kurpinski K T, Stephenson J T, Janairo R R R, Lee H, Li S. *Biomaterials*, 2010, 31(13): 3536~3542.
- [51] Song T, Yao C, Li X. *Chinese J. Polym. Sci.*, 2010, 28(2): 171~179.
- [52] Peles Z, Zilberman M. *Acta Biomater.*, 2012, 8(1): 209~217.
- [53] Unnithan A R, Gnanasekaran G, Sathishkumar Y, Lee Y S, Kim C S. *Carbohydr. Polym.*, 2014, 102: 884~892.
- [54] Muthukumar T, Prabu P, Ghosh K, Sastry T P. *Colloid. Surface. B*, 2014, 113: 207~212.

- [55] Chikazu D, Taguchi T, Koyama H, Hikiji H, Fujihara H, Suenaga H, Saijo H, Mori Y, Seto I, Iino M, Takato T. *Asian J. Oral Max. Surg.*, 2010, 22(2): 61~67.
- [56] Ghica M V, Albu M G, Leca M, Popa L, Moisesescu S T. *Die Pharm-Int J Pharm Sci*, 2011, 66(11): 853~861.
- [57] Fullana M J, Wnek G E. *Drug Deliv Transl Res*, 2012, 2(5): 313~322.
- [58] Zhou Y, Zhao Y, Wang L, Xu L, Zhai M, Wei S. *Radiat Phys Chem*, 2012, 81(5): 553~560.
- [59] Saarai A, Kasparkova V, Sedlacek T, Saha P. *J Mech Behav Biomed*, 2013, 18: 152~166.
- [60] Sarika P R, Cinthya K, Jayakrishnan A, Anilkumar P R, James N R. *Mater Sci Eng C*, 2014, 43: 272~279.
- [61] Kwak H W, Kang M J, Bae J H, Hur S B, Kim I, Park Y H, Lee K H. *J Biol Macromol*, 2014, 63: 198~204.
- [62] Dror Y, Ziv T, Makarov V, Wolf H. *Biomacromolecules*, 2008, 9(10): 2749~2754.
- [63] Rastogi L, Arunachalam J. *Colloid Surface B*, 2013, 108: 134~141.
- [64] Vasconcelos A, Cavaco-Paulo A. *Appl Microbiol Biot*, 2011, 90(2): 445~460.
- [65] Xu S, Sang L, Zhang Y, Wang X, Li X. *Mater Sci Eng C*, 2013, 33(2): 648~655.
- [66] Çalamak S, Erdöğdu C, Özalp M, Ulubayrama K. *Mater Sci Eng C*, 2014, 43: 11~20.
- [67] Kanokpanont S, Damrongsakkul S, Ratanavaraporn J, Aramwit P. *Int J Pharm*, 2012, 436(1/2): 141~153.
- [68] Gu Z, Xie H, Huang C, Li L, Yu X. *Int J Biol Macromol*, 2013, 58: 121~126.
- [69] Uslu M E, Erdogan I, Bayraktar O. *New Biotechnol*, 2012, 29: S117.
- [70] Shahverdi S, Hajimiri M, Esfandiari M A, Larijani B, Atyabi F, Rajabiani A, Dehpour A R, Gharehaghaji A A, Dinarvand R. *Int J Pharm*, 2014, 473(1/2): 345~355.
- [71] 卢祖坤, 李莉, 楚立凯, 钱晓青, 岳凌, 杨占山. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2013, 31(3): 3021~3027.
- [72] Kamoun E A, Kenawy E S, Tamer T M, El-Meligy M A, Eldin M S M. *Arab J of Chem*, 2015, 8(1): 38~47.
- [73] Shalumon K T, Anulekha K H, Nair S V, Chennazhi K P, Jayakumar R. *Int J Biol Macromol*, 2011, 49(3): 247~254.
- [74] Lim S J, Lee J H, Piao M G, Lee M K, Oh D H, Hwang D H, Quan Q Z, Yong C S, Choi H G. *Arch Pharm Res*, 2010, 33: 1073~1081.
- [75] Juby K A, Dwivedi C, Kumar M, Kota S, Misra H S, Bajaj P N. *Carbohydr Polym*, 2012, 89(3): 906~913.
- [76] Morgado P, Lisboa P F, Ribeiro M P, Miguel S P, Simões P C, Correia I J, Aguiar-Ricardo A. *J Membrane Sci*, 2014, 469: 262~271.
- [77] Zhou G, Ruhan A, Ge H, Wang L, Liu M, Wang B, Su H, Yan M, Xi Y, Fan Y. *Burns*, 2014, 40(8): 1668~1678.
- [78] Dong Y, Hassan W U, Kennedy R, Greiser U, Pandit A, Garci Y, Wang W. *Acta Biomater*, 2014, 10(5): 2076~2085.
- [79] Zaman H U, Islam J M M, Khan M A, Khan R A. *J Mech Behave Biomed*, 2011, 4(7): 1369~1375.
- [80] Shanmuganathan S, Shanmugasundaram N, Ryan S S, Conor M, David G B, Laura J S, Robert J C. *Acta Biomater*, 2011, 7(7): 2787~2796.
- [81] Zhang X, Yang D, Nie J. *Int J Biol Macromol*, 2008, 43(5): 456~462.
- [82] Costache M C, Qu H, Ducheyne P, Devore D I. *Biomaterials*, 2010, 31(24): 6336~6343.
- [83] Unnithan A R, Barakat N A M, Tirupathi P P B, Gnanasekaran G, Nirmala R, Cha Y, Jung C, El-Newehy M, Kim H Y. *Carbohydr Polym*, 2012, 90(4): 1786~1793.
- [84] Unnithan A R, Gnanasekaran G, Sathishkumar Y, Lee Y S, Kim C S. *Carbohydr Polym*, 2014, 102: 884~892.
- [85] Kim J I, Pant H R, Sim H J, Lee K M, Kim C S. *Mater Sci Eng C*, 2014, 44(1): 52~57.
- [86] Stoyanova N, Paneva D, Mincheva R, Toncheva A, Manolova N, Dubois P, Rashkov L. *Mater Sci Eng C*, 2014, 41: 119~126.
- [87] Nguyen T T T, Ghosh C, Hwang S G, Tran L D, Park J S. *J Mater Sci*, 2013, 48(20): 7125~7133.
- [88] Kontogiannopoulos K N, Assimopoulou A N, Tsvintzelis I, Panayiotou C, Papageorgiou V P. *Int J Pharm*, 2011, 409(1/2): 216~228.
- [89] Park S N, Jang H J, Choi Y S, Cha J M, Son S Y, Han S H, Kim J H, Lee W J, Suh H. *J Mater Sci-Mater M*, 2007, 18(3): 475~482.
- [90] Momesso R G R A P, Moreno C S, Rogero S O, Rogero J R, Spencer P J, Lugão A B. *Radiat Phys Chem*, 2010, 79(3): 283~285.
- [91] Wang M, Fang D, Wang N, Jiang S, Nie J, Yu Q, Ma G. *Polymer*, 2014, 55(9): 2188~2196.
- [92] Dai X Y, Nie W, Wang Y C, Shen Y, Li Y, Gan S J. *J Mater Sci-Mater M*, 2012, 23(11): 2709~2716.
- [93] Yang J M, Huang H T. *Mater Sci Eng C*, 2012, 32(6): 1578~1587.
- [94] 陈晨, 周名兵, 郭志君, 李玉宝, 张利. *功能材料*, 2014, 45(14): 2001~2004.
- [95] Boateng J S, Pawar H V, Tetteh J. *Int J Pharm*, 2013, 441(1/2): 181~191.

Advance in Polymer Materials for Wound Dressings

LI Tao, LÜ Si-yao, ZHAI Wen-zhong, HE Yu-feng, WANG Rong-min*

(Key Laboratory of Eco-Environment-Related Polymer Materials of Ministry of Education, Institute of Polymer, College of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to accelerate hemostasis, prevent bacterial infection and promote wound healing, wound dressing materials should be applied immediately when skin is damaged. In this paper, on the basis of the classification of the wounds and the choice of dressings, the production, drying and molding technologies of wound dressing materials as well as methods of drug loading are introduced. Meanwhile, we summarize the studies on the natural polymer and synthetic polymer wound dressing materials. Natural polymer has been used to heal defect of tissues and skins caused by burns and wounds, because of its good biological compatibility and biodegradability. And synthetic polymer has many advantages, such as long shelf-life, strong mechanical properties and low inflammatory response, and has almost no risks which carries and spreads bacteria. Nowadays, modified natural polymer, synthetic polymer and their composites are being paid more and more attention in the fields of biomedicine and material science. In the future, the researches and applications of wound dressings will be greatly promoted by the development of nanotechnology and controlled delivery technology.

Key words: Wound dressings; Drug loading; Natural polymer; Synthetic polymer