

生物医用纺织材料研究应用与进展

马丕波, 梅德轩

(江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:生物医用纺织材料在维护人体健康、解除疾患、提高医疗质量上有着重要作用。简要阐述了生物医用纺织纤维与其制备技术,以应用领域进行分类,详细分析体外医用纺织品、体内医用纺织品、人工器官和卫生保健用品的应用现状,并介绍了相关前沿研究。得出生物医用纺织材料的发展应以我国医疗健康事业发展需求为导向,加快升级低端产品,着力发展中高端产品,重点突破新型高端产品。

关键词:生物医用纺织品;纤维材料;功能设计;前沿趋势

中图分类号:TS 101.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2022)03-0189-07

Research Application and Progress of Biomedical Textile Materials

MA Pibo, MEI Dexuan

(College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract:Biomedical textile materials play an important role in maintaining human health, relieving diseases and improving medical quality. The biomedical textile fiber and its preparation technology were briefly described. The application status of medical textiles in vitro, in vivo, artificial organs and health care products were analyzed in detail according to their application fields, and relevant frontier researches were introduced. It is concluded that the development of biomedical textile materials should be guided by the development needs of China's medical and health undertakings, accelerate the upgrading of low-end products, focus on developing middle-end products, and break through the new high-end products.

Key words:biomedical textiles, filamentary material, functional design, cutting-edge development

生物医用纺织材料是以生物医用纺织纤维为原料,采用不同的纺织加工技术、达到健康医疗标准的医疗器材,它具有临床诊断、治疗修复、替代脏器以及保健与防护等功能,在维护人体健康、解除疾患、提高医疗质量方面发挥着重要作用。生物医用纺织材料^[1]融合了纺织、医学、材料、生物、化学和药学等多学科技术,科技含量高,创新性强,在我国医疗康复领域中占有举足轻重的地位,具有巨大的研究潜力和广阔的应用前景。

1 生物医用纺织材料制备技术

1.1 生物医用纺织纤维

生物医用纺织纤维是生物医用纺织材料的基

础,对最终产品的性能有着决定性影响。生物医用纺织纤维分为天然纤维和合成纤维。

天然纤维^[2]包括壳聚糖、丝素、胶原等。自然界中甲壳素的资源极其丰富,其含量仅次于纤维素,将甲壳素溶解于适当的溶剂中,利用湿法纺丝进行制备,得到的纤维及其制品具有无毒、抑菌和可生物降解等特点,所得制品已成功应用于绷带、纱布、创伤敷料等生物医用纺织品中。海藻酸是从褐藻类植物中提取的一种天然高分子材料,将其溶入碱性溶剂中形成纺丝溶液,然后经过喷丝孔挤入溶液内,凝固后可形成海藻纤维。

合成纤维根据其降解性可分为不可降解纤维和可降解纤维。不可降解纤维包括尼龙、涤纶、锦

收稿日期:2022-03-29; 修订日期:2022-05-21。

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(JUSRP22026, JUSRP52013B)。

作者简介:马丕波(1984—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为产业用纺织品、纺织结构柔性材料和纺织结构复合材料等。Email: mapibo@jiangnan.edu.cn

纶等;可降解纤维包括聚乙交酯(PGA)、聚乙丙交酯(PGLA)、聚乳酸(PLA)、聚对二氧环己酮(PPDO)等。PGA 纤维可通过 PGA 高聚物切片熔融纺丝而成,具有高强、高模特性,但是对热及酸碱敏感,易于水解,一般情况下降解周期为 6 个月。目前,PGA 纤维已成功用于人体组织周围神经导管、人造血管、手术缝合线和血管内支架等医用纺织品中。PLA 纤维是以 PLA 为原料,通过挤压、双轴拉伸、纺丝等方式成形,具有良好的热稳定性、生物可降解性和生物相容性,最终降解产物为二氧化碳和水,对环境无任何污染,是理想的绿色资源。PLA 纤维在医疗领域的应用十分广泛,可制备人造骨板、骨钉、支架、手术缝合线等医用纺织品。

纤维根据细度又可分为常规纤维和超细纤维。其中:常规纤维可以通过熔体纺丝、溶液纺丝、湿法纺丝以及特殊纺丝方法制备;超细纤维可以通过静电纺丝、自组装以及相分离等技术制备。随着纺丝工艺的发展创新,一些特殊纺丝方法也逐步得到发展,如干-湿法纺丝、液晶纺丝、冻胶纺丝等。通过采用不同的纺丝技术^[3],并在纺丝或后处理过程中添加 DNA、RNA、蛋白质等生物成分,可以制得不同细度、不同形状、不同功能的生物医用纺织纤维。

1.2 纺织成形技术

纺织成形^[4]是生物医用纺织材料加工的关键步骤,可将纤维材料制成二维、三维成品。普通纺织品常用的成形制备方法(针织、机织、非织造、编织以及静电纺),同样适用于生物医用纺织材料的制备,只是后者对成形工艺以及仪器的要求更高。

针织是将纺织纤维通过经编机、圆纬机、横机等形成线圈结构,再经相互串套而成的一种工艺技术,针织物具有一定的空隙或孔径、较好的延展性以及弹性。如利用双针床经编机制备的人工血管有着结构稳定、不易卷边脱散及顺应性好等特点。针织技术^[5]可用于制备人造血管、疝气补片、人工韧带、金属内支架、人工气管、牙周补片、肌腱支架增强体等外科植入用纺织品。

机织是将互相垂直的一组(或多组)经纱与一组(或多组)纬纱在织机上按照一定规律纵横交织的工艺技术。利用机织技术制备的织物^[6]具有良好的结构稳定性,质地紧密,强度较大,可用于大直径人工血管、纱布、绷带等需要有一定强度且稳定性较好的医用纺织品。随着现代纺织加工技术的发展,一些类似三向织造、立体织造的多轴向技术已突破了机织的传统定义。

非织造布是以定向或随机排列而成的纤维为

主体,通过摩擦、抱合或黏合的方法制得的片状或网状物,其主要架构为纤维网主结构和纤维间的加固结构。由于非织布的原料多样,可根据需求使其具备不同的特性。非织造布可具备各向同性,也可具备各向异性;可具备导电性,也可具备绝缘性。因此,非织造布^[7]的应用十分广泛,如采用纺黏和熔喷工艺制备复合无纺布,具有比强度高、过滤性好、无黏合剂、无毒性等特性,可用于生产一次性医用手术服、口罩、绷带、无菌包装布等。

静电纺是一种制造特殊纤维的工艺技术,通过聚合物溶液或熔体在强电场中喷射进行纺丝,利用接收装置成膜。在电场作用下,针头处的液滴会由球形变为圆锥形,并从圆锥尖端延展得到纤维细丝,这种方式可以生产出直径为纳米级的聚合物细丝。在医学领域中,细胞的直径大于纳米纤维的直径,所以通过静电纺技术^[8]制得的纤维可以模拟天然细胞外基质结构和生物功能;一些用于静电纺的原料具有很好的生物相容性以及生物可降解性,可作为载体进入人体;同时静电纺纳米纤维具有较大的比表面积以及可控的孔隙率等特性,在药物缓释、创伤修复等方面得到很好的应用。

1.3 整理工艺

由于生物医用纺织材料使用环境的特殊性,对生物医用纺织纤维或由不同纺织成形方法制得的纺织品进行相关处理,可使生物医用纺织材料具有更好的功能性。生物医用纺织材料整理工艺中的功能性整理主要包括灭菌、防热、阻燃、拒液、亲水、防病毒、抗菌、抗静电、防固态微粒渗透整理等。

对纺织材料进行涂层处理可有效改变其表面性能。如用甲壳胺对非织造布进行后整理,可以使材料负载一层具有生物活性的甲壳胺薄膜,起到抑菌、促进伤口愈合等作用,有效阻止外源微生物的入侵;利用多孔热塑性或热固性薄膜与纺织材料复合可以使之获得防水、透气、隔离微生物等功效。如用聚四氟乙烯膜与纺织材料复合,可以把纺织材料的强度、柔顺性和膜的耐酸、耐碱、防水等特性有效结合,使其在医用防护类材料中发挥特殊的应用价值。

通过物理、化学、生物等方法进行改性处理可以改变纺织材料的表面结构,提高其亲水、抗菌、低黏等性能。为了提高生物医用纺织材料的亲水性能,可对纺织材料进行等离子体表面处理,改变其化学组成,增加亲水性基团,并由此改善其转送水蒸气和水的性能。选择合适的整理工艺,有助于改善和提高生物医用纺织材料的各项性能,使其得以

更精准地应用。

2 生物医用纺织材料应用

生物医用纺织材料的最终指向是生物医用纺织品,根据应用领域^[9]可将生物医用纺织品分为体外用生物医用纺织品、体内用医用生物纺织品、人工器官和卫生保健用品。

2.1 体外用生物医用纺织品

2.1.1 伤口保护类 伤口保护类的生物医用纺织产品主要有脱脂棉、纱布类、敷料类以及膏药布创可贴等。其作用^[10]包括止血清创、促进伤口愈合、抗炎杀菌以及保护受伤部位,避免伤口受到二次损伤。此类产品可通过针织、机织、非织造以及静电纺等技术进行生产加工。

GUO H W 等^[11]以壳聚糖、聚氧乙烯醚和聚己内酯为原料,采用同轴静电纺丝技术,成功制备了一种以壳聚糖/PEO 为壳、PCL 为核的纳米纤维垫,用于伤口止血。由于在外壳(壳聚糖/PEO)中添加用于止痛的盐酸利多卡因,在核结构中添加抗炎剂姜黄素,这种纳米纤维垫可在伤口愈合过程中达到即时镇痛效果,同时保持长期抗菌活性。

2.1.2 绷带类 绷带包扎是外伤救治中不可或缺的措施之一,绷带作为常用的生物医用纺织品具有重要的作用^[12]:①保护受伤部位,避免二次损伤;②止血,预防或减轻水肿;③防止或减轻骨折段错位;④保温止痛以及固定医用敷料等。根据加工方法,可将绷带分为机织绷带、针织绷带、非织造绷带以及复合绷带。随着现代技术的发展,绷带也向着多功能化方向发展,如可塑性绷带可以很好地代替石膏,并且具有质地轻、成型快、透气防水、透 X 光、环保等优点。

金晓冬^[13]采用双针床拉舍尔经编机,以锦纶和氨纶为原料,开发出一种一次成形的医用绷带,具有透气性好、使用方便、弹性好、防脱散的特点。李书龄等^[14]利用玻璃纤维,经过涂覆改性聚氨酯,研制成医用专用玻璃纤维聚氨酯,用于制备经编医用绷带。该医用绷带具有舒适安全、硬度高、质量轻、X 光透射能力好、防水以及操作简易的特点。

2.2 体内用生物医用纺织品

2.2.1 修补材料 植入医用补片是修补人体缺损部位的重要手段,广泛应用于普外科、胸心外科、口腔科等手术中。典型修补材料有软组织修补网、可吸收颅内修补网、心包网、血管补片、心脏补片、牙

周补片等^[15]。作为体内植入物,这些材料应具备以下特性:理化性质稳定,且具有良好的生物相容性;具有一定的物理机械性能;可以任意剪裁等。随着现代医学的发展以及患者对医疗需求的提高,体内修补材料朝着长效抗感染、服帖舒适、轻质化及个性化等方向发展。

MAO Y 等^[16]为了解决传统聚丙烯引发炎症以及粘连等问题,以聚丙交酯-乙交酯和聚己内酯为原料,利用静电纺丝技术制备防粘连纤维膜,将其与藻酸盐水凝胶以及大孔轻量型 PP 补片进行一体化复合,构建出防粘连复合型补片。LANZALACO S 等^[17]将 2D 聚丙烯补片转换为 4D 动态响应系统补片,利用基于温敏水凝胶的传感涂层材料增加传统补片的适应性,可以实现补片的自适应和自固定功能,从而减轻人体因材料刚性产生的疼痛。

2.2.2 缝合线 缝合线广泛应用于各类外科手术中,用于伤口缝合、连接组织以及结扎。根据缝合的生物降解性^[18]可将其分为不可吸收缝合线和可吸收缝合线。不可吸收缝合线必须通过手术取出;而可吸收缝合线在组织内可以降解成可溶性物质,通常在 2~6 个月后自行消失。不可吸收缝合线^[19]主要包括以下几种:蚕丝缝合线,主要应用于普通外科、心血管外科、眼科和神经手术;聚酰胺缝合线,适用于各种手术的缝合、包扎,缺点是持结性差;聚酯缝合线,适用于普通外科、心血管外科、眼科、神经外科等手术,尤其适用于制作人工血管以及大动脉的移植和缝合手术;聚丙烯缝合线,适用于心血管手术以及需要大面积对合的伤口缝合;金属缝合线,主要用于腹部伤口缝合、疝修补、胸骨对合以及肌腱修补。可吸收缝合线^[20]主要有以下几种:胶原缝合线,适用于五官科、眼科等面部精细手术;甲壳质缝合线,因其对胰液、胆汁等碱性消化液有良好的耐受性而用于体内缝合,但强度不高,尤其是勾结强度低;合成高分子可吸收缝合线,包括聚乙交酯(PGA)缝合线、聚乳酸(PLA)缝合线、聚对二氧环己酮(PDS)缝合线等。根据降解时间以及使用部位,将不同材料共聚,如将乙交酯(GA)和乳酸(LA)共聚制成的 PGLA 缝合线,特别适用于体内伤口的缝合。

GUAN Q F 等^[21]开发了一种仿生莲花纤维螺旋结构水凝胶细菌纤维素纤维,即仿生水凝胶纤维。因仿生水凝胶纤维自身的螺旋结构赋予其良好的机械性能,同时水凝胶是一种具有高含水量和生物相容性的材料,可使之具有高强度、高拉伸性、

高耗能、高亲水性、多孔结构和良好的生物相容性,成为一种理想的外科缝合线材料。由此制成的缝合线具有良好的可拉伸性和能量耗散性,能够从伤口周围的组织变形中吸收能量,并有效保护伤口。ZHANG Q 等^[22]为了消除因手术缝合后缝合线的不良负荷转移导致肌腱愈合过程中再次撕裂、炎症感染等问题,通过在多孔带缝合线上装饰壳聚糖/明胶-单宁酸(CS/GE-TA)制备了多功能缝合线。该多孔胶带缝合线具有良好的机械性能以及足够的组织整合空间。与未添加装饰材料的缝合线相比,CS/GE-TA装饰缝合线(TA100)的肌腱拔出力增加了332%,表明再次撕裂率降低;同时,TA100 显示出优越的抗炎和抗菌性能。体内实验进一步证明,TA100 不仅能减轻炎症反应,而且能促进胶原沉积和血管形成。这种多功能缝合线为肌腱愈合提供了更好的帮助。

2.2.3 血管移植 当血管出现动脉硬化、假性动脉瘤、血栓等无法正常工作时,需通过血管替代物置换、搭桥或介入等外科手术进行治疗。通常血管移植应满足以下几个条件^[23-24]:①抗血栓性;②具有适当的多孔结构和合理的孔隙率;③具有一定的强度和抗弯折性;④内部具有应力的应变响应性;⑤具有与人体血管良好的贴合性以及缝合的柔软性。治疗时可根据病人的实际需求,选取不同的制备工艺制成血管移植。

从制造工艺上可将血管移植分为针织型、机织型和编织型等,制备工艺的不同直接决定其使用情况。对于血流速度较快的部位或个体,如胸主动脉或血液凝血机制损伤的患者,通常使用机织人工血管;然而,机织人工血管刚度较大、易散边,并且顺应性较差,手术不易操作。针织人工血管主要采用经编方法制成,具有尺寸稳定性好,易于手术处理,顺应性高的特点,有利于提高植入后的长期通畅性,在一定程度上可以弥补机织人工血管的不足;但是它存在结构紧密度较大、管壁较厚的问题。对于小口径人工血管,目前是采用整体成型法及非织造技术制备,但是此类小口径人工血管并未达到成熟生产与应用的要求。

FU J Y 等^[25]利用静电纺丝技术,将聚己内酯(PCL)包覆于多孔聚癸二酸甘油酯(PGS)制备合成血管。为了增加细胞的浸润性,同时便于细胞迁移,采用了大直径的 PCL 纤维和多孔结构。此种合成血管具有良好的机械性能以及更高的弹性蛋白、胶原蛋白含量,增加了移植血管重塑的可行性。

JUNGST T 等^[26]提出一种溶液静电纺丝和熔融近场电直写两种技术相结合的混合制造方法,利用该方法成功制备了一种可以模拟人体组织的双层复合管状支架(包括内层随机取向的致密纤维网和外层取向可控的纤维)。此结构可以诱导细胞形成连续的管腔单层内皮细胞和定取向的平滑肌细胞层,从而促进组织细胞特异性分化。实验结果表明,这种管状支架可以自行起到诱导细胞生长和分化的作用。

2.2.4 心脏瓣膜以及心基修复用导电生物材料 心脏瓣膜^[27]主要功能是阻止血液回流,保证血液从心房流向心室(或从心室流向主动脉/肺动脉)。人工心脏瓣膜主要分为机械瓣膜(单叶瓣和双叶瓣)和生物瓣膜(支架生物瓣膜和无支架生物瓣膜)。钙化主动脉瓣病是老年人最常见的瓣膜疾病,最常见的治疗方案是向患者体内植入支架。STADELMANN K 等^[28]建立了一种类似于瓣膜细胞外基质形态的三维体外主动脉瓣模型,并模拟了人体主动脉瓣中纤维瓣和海绵瓣的机械和生理行为;在此基础上利用低温静电纺技术设计了一种双层低温电纺支架(BCES)。该支架具有一定的形貌,允许瓣膜内皮细胞(VEC)黏附和瓣膜间质细胞(VIC)向支架内生长。此项研究有助于开发瓣膜特异性诊断工具和医学治疗,为心脏疾病的预防和治疗提供新方案。

心肌梗死是全球致人死亡的主要疾病之一,治疗心肌梗死的关键是对受损心肌组织进行有效的重建和功能修复。导电生物材料可用于重建心脏内部电信号传导以实现心肌修复。LI Y M 等^[29]通过对纤维/织物采用导电涂层/接枝、导电纺丝等方法,制备具有一定力学性能与耐疲劳性能的导电膜,用于制备心脏修复导电支架。

2.3 人工器官

人工器官是用人工材料和电子技术制备部分或全部替代人体自然器官功能的器件或装置,用于补偿、替代或修复病损的自然器官。人工器官目前属于体外治疗用器官替代物,主要生物医用纺织品有人工肾(血液透析器)、人工肝、人工肺(氧合器)等。表1列出了生物医用纺织材料在部分人工器官中的应用。

然而,目前人工器官与人体器官之间仍存在较大差距,如使用寿命较短、与人体有排异反应、功能不够完善等。随着对新型材料的开发应用以及对仿生学、生物医学等领域研究的不断深入,未来人

工器官的研究方向朝着长期或永久替代、体内应用、功能完整化等方向发展。

表 1 纺织材料在人工器官中的应用
Tab. 1 Application of textile materials in artificial organs

人工器官	纤维类型	主要功能
人工肾	铜氨纤维、醋酸纤维、黏胶纤维、聚丙烯腈、聚砒等	去除病人血液中的废物
人工肝	聚丙烯腈中空纤维、黏胶中空纤维 ^[30] 等	分离、处理病人血浆并补充新鲜血浆
人工肺	硅橡胶、聚丙烯中空纤维、聚砒腈等	去除病人血液中的 CO ₂ , 补充新鲜 O ₂

2.4 卫生保健用品

2.4.1 防护用品 近年来,由于新冠疫情的影响,人们对防护用医用纺织品的要求不断提高,具有隔离、抗菌功能的纺织品在公共场合作为避免交叉感染的防护品显得越来越重要。江南大学针织技术教育部工程研究中心^[31-32]利用横编全成形技术,制备了一种 3D 防护口罩。这种口罩立体效果明显,贴合人体面部,通过添加滤层起到良好的防护效果;且洗涤后可多次循环使用,清洁环保。

另外,工作中经常接触病菌的医疗工作者对相关医用纺织品的需求也非常迫切,特别是突发卫生安全事件时需要大量安全的防护用医用纺织品。这些防护用医用纺织品包括外科手术中使用的手术服、手术帽、床单、外科覆盖布、手术包等,还有防疫用品中的防护口罩、防护服^[33]等。

2.4.2 衬垫材料 经编间隔织物、气垫等结构稳定、质量轻、透气性好、压缩弹性好,可用作防褥疮床垫、手术垫和轮椅坐垫等。

吴梦婕等^[34]设计了 4 种具有不同网面组织的医用经编间隔织物,探究不同结构参数对其透气性的影响。此外,建立了关于间隔织物的流体模型,可较好重现经编间隔织物透气性实验过程,模拟结果与实验结果相符,模型准确度高,可用性好,可为新型医用衬垫材料设计和结构优化提供参考,并为 3D 纺织材料透气性仿真模拟提供理论支持。

2.4.3 压力纺织品 压力治疗是临床治疗中常用的一项重要技术,通过改变机体的外部压力,达到促进血管内外物质交换、组织再生、修复,消除水肿、支撑塑形的目的。压力纺织品^[35]包括矫形固定、术后治疗、运动护具、支撑塑形等方面的应用。

KUMAR B 等^[36]使用形状记忆聚氨酯和尼龙长丝组成的混纺纱设计了一种智能压力长筒袜,通过外部加热改变纱线结构中的内应力,从而控制或调节袜子对包裹位置施加的压力(只需加热即可产生

高达 50% 的额外压力)。这种压力长筒袜可在一定程度上克服传统压力袜的局限性,在加压治疗过程中,可根据需要自由调节外部压力水平。

2.4.4 医用智能纺织品 医用智能纺织品是结合纺织、电子、化学、生物、医学等多学科综合开发的具有高智能化的纺织品,它基于仿生学概念,能够模拟生命系统,同时具有感知和反映环境变化(如负载、应力、应变等及其变化)双重功能。医用智能纺织品具有以下特征:传感功能^[37]、反馈功能、信息识别、自诊断、自修复、自适应能力。医用智能纺织品大体可以分为两类:①治疗类,如智能绷带、智能敷料、仿生抗菌光电传感缝合线、新生儿黄疸或光化性角化病光疗织物等产品;②监测类,如汗液监测、糖尿病病人尿糖监测、肌肉血氧监测、呼吸监测等。

WANG L 等^[38]将多股亲水棉纤维和基于碳纳米管的传感纤维混合加捻制备得到芯鞘传感纱线,并将其刺绣到超疏水织物基底上,开发了一种新型织物电化学汗液传感器。再把该传感器与外置芯片等集成制作成智能运动衬衫,用于实时监测用户在温和出汗状态和剧烈运动状态下汗液的多种化学信息。KALIDASAN V 等^[39]为了监测体内深部伤口情况,研发了一种无线操作生物电子缝合线。它是利用医用复丝缝合线,经导电聚合物聚(3,4-乙基二氧噻吩)-聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)功能化制成,在保持内层缝合线机械柔韧性的同时兼具无线响应特性,可对深部手术伤口直接监测。

3 结 语

目前,我国生物医用纺织产业发展有以下特点:①产业规模持续增长,市场需求不断增加;②研发项目多集中在保健卫生、防护类用品和治疗类纺织品等方面;③部分纺织原材料合成难度大、一些关键技术无法解决,许多成果仍处于实验室阶段,高端生物医用纺织品仍然需要进口。

生物医用纺织材料涉及学科多,其前沿方向是通过整合不同领域的技术,不断提升低端产品;进一步完善纺织成形技术、更新医用生产设备等,着力发展中高端产品;以理论构建和临床应用为目标研发功能更完备、治疗对象更广泛、适应性更精确、疗效更精准的新型高端产品。

参考文献:

[1] 魏娟媛. 医用纺织品的应用研究进展[J]. 毛纺科技, 2020, 48(9): 104-109.

- WEI Xianyuan. Research progress in the application of medical textiles [J]. Wool Textile Journal, 2020, 48 (9): 104-109. (in Chinese)
- [2] GUPTA D, CHAUDHARY H, GUPTA C. Sericin-based polyester textile for medical applications[J]. The Journal of the Textile Institute, 2015, 106(4): 366-376.
- [3] 秦益民, 李可昌, 邓云龙, 等. 先进技术在医用纺织材料中的应用[J]. 产业用纺织品, 2015, 33(5): 1-6, 39.
- QIN Yimin, LI Kechang, DENG Yunlong, et al. The application of advanced technologies in medical textile materials[J]. Technical Textiles, 2015, 33(5): 1-6, 39. (in Chinese)
- [4] JIANG C, WANG K, LIU Y, et al. Application of textile technology in tissue engineering: a review [J]. Acta Biomaterialia, 2021, 128: 60-76.
- [5] ZHANG X H, MA P B. Application of knitting structure textiles in medical areas[J]. Autex Research Journal, 2018, 18(2): 181-191.
- [6] 严佳, 李刚. 医用纺织品的研究进展[J]. 纺织学报, 2020, 41(9): 191-200.
- YAN Jia, LI Gang. Research progress on medical textiles [J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(9): 191-200. (in Chinese)
- [7] 王佳莹, 胡玲燕. 医用纺织品的应用及发展趋势研究[J]. 天津纺织科技, 2019(2): 62-64.
- WANG Jiaying, HU Lingyan. Application and development trend of medical textiles[J]. Tianjin Textile Science and Technology, 2019(2): 62-64. (in Chinese)
- [8] 尹玉霞, 郑秀娥, 鲁守涛, 等. 静电纺丝及其在生物医用材料中的应用[J]. 中国医疗器械信息, 2019, 25(1): 46-47, 128.
- YIN Yuxia, ZHENG Xiu'e, LU Shoutao, et al. Electro-spinning and its application in biomedical materials[J]. China Medical Device Information, 2019, 25(1): 46-47, 128. (in Chinese)
- [9] 李彦, 王富军, 关国平, 等. 生物医用纺织品的发展现状及前沿趋势[J]. 纺织导报, 2020(9): 28-37.
- LI Yan, WANG Fujun, GUAN Guoping, et al. The development status and cutting-edge trends of biomedical textiles[J]. China Textile Leader, 2020(9): 28-37. (in Chinese)
- [10] SHAH S A, SOHAIL M, KHAN S, et al. Biopolymer-based biomaterials for accelerated diabetic wound healing: a critical review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139: 975-993.
- [11] GUO H W, TAN S J, GAO J, et al. Sequential release of drugs from a dual-delivery system based on pH-responsive nanofibrous mats towards wound care [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2020, 8(8): 1759-1770.
- [12] MOEIN H, MENON C. An active compression bandage based on shape memory alloys: a preliminary investigation [J]. Biomedical Engineering Online, 2014, 13: 135.
- [13] 金晓东. 基于双针床经编机生产一次成形医用绷带的工艺设计与开发[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2019, 32(4): 6-10.
- JIN Xiaodong. Process design and development of producing one-time forming medical bandage based on double needle bed warp-knitting machine[J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2019, 32(4): 6-10. (in Chinese)
- [14] 李书龄, 李博, 邓会平. 经编医用玻璃纤维绷带的研究与开发[J]. 针织工业, 2012(5): 17-19.
- LI Shuling, LI Bo, DENG Huiping. Research and development of warp knitted medical glass fiber bandages Research and development of warp knitted medical glass fiber bandages [J]. Knitting Industries, 2012(5): 17-19. (in Chinese)
- [15] 张佩华, 王颖初, 王聪儿. 针织技术在生物医用纺织品领域的应用[J]. 纺织导报, 2014(7): 42-45.
- ZHANG Peihua, WANG Yingchu, WANG Cong'er. Application of knitting technologies in medical textiles [J]. China Textile Leader, 2014(7): 42-45. (in Chinese)
- [16] MAO Y, MENG Y X, LI S J, et al. Alginate-assistant nanofiber integrated with polypropylene hernia mesh for efficient anti-adhesion effects and enhanced tissue compatibility[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 235: 109761.
- [17] LANZALACO S, TURON P, WEIS C, et al. Toward the new generation of surgical meshes with 4D response: soft, dynamic, and adaptable [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(36): 2004145.
- [18] 张华. 生物医用功能纤维的研究进展及趋势[J]. 化工新型材料, 2009, 37(1): 11-13.
- ZHANG Hua. The researching progress and development of biomedical fibers[J]. New Chemical Materials, 2009, 37(1): 11-13. (in Chinese)
- [19] 王旭晨, 吴沁婷, 郑兆柱, 等. 医用缝合线的研究进展[J]. 安徽工程大学学报, 2020, 35(5): 1-11.
- WANG Xuchen, WU Qinting, ZHENG Zhaozhu, et al. Advances in medical sutures[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2020, 35(5): 1-11. (in Chinese)
- [20] 赵今, 刘杲, 姜红. 生物可降解材料在临床治疗与护理中的应用[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(1): 120-122, 21.
- ZHAO Jin, LIU Gao, JIANG Hong. Application of biodegradable materials in clinical treatment and nursing[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(1): 120-122, 21. (in Chinese)

- [21] GUAN Q F, HAN Z M, ZHU Y B, et al. Bio-inspired lotus-fiber-like spiral hydrogel bacterial cellulose fibers [J]. Nano Letters, 2021, 21(2): 952-958.
- [22] ZHANG Q, QIAO Y S, LI C J, et al. Chitosan/gelatin-tannic acid decorated porous tape suture with multifunctionality for tendon healing [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 268: 118246.
- [23] LIM J, KIM J. 3D vascular replicas composed of elastomer-hydrogel skin multilayers for simulation of endovascular intervention [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(51): 2003395.
- [24] 冯玉庆, 王政禄. 血管移植物的研究及应用进展[J]. 实用器官移植电子杂志, 2017, 5(6): 469-472.
FENG Yuqing, WANG Zhenglu. Progress in research and application of vascular grafts [J]. Practical Journal of Organ Transplantation (Electronic Version), 2017, 5(6): 469-472. (in Chinese)
- [25] FU J Y, WANG M, DE VLAMINCK I, et al. Thick PCL fibers improving host remodeling of PGS-PCL composite grafts implanted in rat common carotid arteries [J]. Small, 2020, 16(52): 2004133.
- [26] JUNGST T, PENNING S, SCHMITZ M, et al. Heterotypic scaffold design orchestrates primary cell organization and phenotypes in cocultured small diameter vascular grafts [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(43): 1905987.
- [27] NACHLAS A L Y, LI S Y, STREETER B W, et al. A multilayered valve leaflet promotes cell-laden collagen type I production and aortic valve hemodynamics [J]. Biomaterials, 2020, 240: 119838.
- [28] STADELMANN K, WEGHOFER A, URBANCZYK M, et al. Development of a bi-layered cryogenic electrospun polylactic acid scaffold to study calcific aortic valve disease in a 3D co-culture model [J]. Acta Biomaterialia, 2022, 140: 364-378.
- [29] LI Y M, WEI L Q, LAN L Z, et al. Conductive biomaterials for cardiac repair: a review [J]. Acta Biomaterialia, 2022, 139: 157-178.
- [30] CHEUNG T W, LI L. A review of hollow fibers in application-based learning: from textiles to medical [J]. Textile Research Journal, 2019, 89(3): 237-253.
- [31] 梁鑫花, 丛洪莲, 董智佳. 横编全成形3D防护口罩的设计与开发[J]. 针织工业, 2020(6): 5-8.
LIANG Xinhua, CONG Honglian, DONG Zhijia. Design and development of fully fashioned 3D protective masks with flat knitting technology [J]. Knitting Industries, 2020(6): 5-8. (in Chinese)
- [32] 赵博宇, 梁鑫花, 丛洪莲. 电脑横机编织三维全成形口罩结构建模与工艺实践[J]. 纺织学报, 2020, 41(12): 59-65.
ZHAO Boyu, LIANG Xinhua, CONG Honglian. Structural modeling and process practice of three-dimensional fully fashioned face masks woven by computerized flat knitting machine [J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(12): 59-65. (in Chinese)
- [33] 张月. 医用防护服的性能及应用[J]. 辽宁丝绸, 2020(4): 42-43.
ZHANG Yue. Performance and application of medical protective clothing [J]. Liaoning Tussah Silk, 2020(4): 42-43. (in Chinese)
- [34] 吴梦婕, 支超, 孟家光, 等. 医用经编间隔织物透气性研究与数值模拟[J]. 针织工业, 2021(7): 66-69.
WU Mengjie, ZHI Chao, MENG Jiaguang, et al. Study of air permeability of medical warp-knitted spacer material and numerical simulation [J]. Knitting Industries, 2021(7): 66-69. (in Chinese)
- [35] 刘晓凤, 张倩, 王璐. 医用压力袜的结构特征及其研究进展[J]. 生物医学工程学进展, 2019, 40(2): 78-82.
LIU Xiaofeng, ZHANG Qian, WANG Lu. Structural characteristics and research progress of medical compression stocking [J]. Progress in Biomedical Engineering, 2019, 40(2): 78-82. (in Chinese)
- [36] KUMAR B, HU J L, PAN N. Smart medical stocking using memory polymer for chronic venous disorders [J]. Biomaterials, 2016, 75: 174-181.
- [37] 胡吉永, 王婷婷, 邹艳玲, 等. 智能医用传感纺织品的研究现状[J]. 纺织导报, 2020(10): 81-89.
HU Jiyong, WANG Tingting, ZOU Yanling, et al. Research status of smart medical sensing textiles [J]. China Textile Leader, 2020(10): 81-89. (in Chinese)
- [38] WANG L, LU J, LI Q M, et al. A core-sheath sensing yarn-based electrochemical fabric system for powerful sweat capture and stable sensing [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(23): 2200922.
- [39] KALIDASAN V, YANG X, XIONG Z, et al. Wirelessly operated bioelectronic sutures for the monitoring of deep surgical wounds [J]. Nature Biomedical Engineering, 2021, 5(10): 1217-1227. (责任编辑: 邢宝妹)