

综述

静电纺丝技术在口腔医学领域应用的研究进展

安群¹,张绍君²,冯文杰³,王元非⁴,孙德刚³

[摘要] 口腔疾病的高发病率近年来推动了新型治疗材料的出现。其中,静电纺丝技术能够制备具有良好生物学性能和仿生天然细胞外基质的纳米纤维,因此在口腔医学领域展现出巨大潜力。本文首先简要介绍静电纺丝技术的制备工艺和关键性能,然后根据临床需求,将静电纺纳米纤维在口腔医学各分支学科的研究进展进行分类阐述。最后,针对当前静电纺丝技术在口腔疾病诊治中存在的挑战进行探讨,以期为口腔医学基础研究和临床转化提供有益参考。

[关键词] 静电纺丝技术;纳米纤维;组织工程;药物递送;口腔疾病

[中图分类号] R783.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-9872(2026)04-0309-06

[doi] 10.13591/j.cnki.kqyx.2026.04.013

Research progress of the application of electrospinning technology in stomatology

AN Qun, ZHANG Shaojun, FENG Wenjie, WANG Yuanfei, SUN Degang. (School of Stomatology, Shandong Medical and Pharmaceutical University, Yantai 264003, China)

Abstract: In recent years, the high incidence of oral diseases has driven the emergence of new therapeutic materials. Among them, electrospinning technology can prepare nanofibers with good biological properties and mimic the natural extracellular matrix, thus showing great potential in the field of dentistry. This paper first briefly introduces the preparation process and key properties of the electrospinning technology and then classifies the research progress of electrospinning nanofibers in various subdisciplines of stomatology according to the clinical needs. Finally, the challenges of electrospinning technology in the diagnosis and treatment of oral diseases are discussed in order to provide useful references for the basic research and clinical transformation of stomatology.

Key words: electrospinning technology; nanofiber; tissue engineering; drug delivery; oral diseases

Stomatology, 2026, 46(4): 309-314

静电纺丝纳米纤维凭借其纳米级纤维结构、高比表面积及优良的生物相容性,在多个领域被广泛应用^[1]。近年来,静电纺丝技术在口腔医学的多个领域展现出重要潜力,从牙周组织再生、牙髓再生、颌面部组织修复,到口腔种植体表面改性、口腔黏膜疾病治疗以及正畸装置功能改良等。本文将综述静电纺丝技术的原理及其在口腔各分支学科的研究进展,并重点讨论其在跨学科应用中功能策略的异同,展望其在口腔医学中的未来发展方向。

1 静电纺丝技术

静电纺丝技术是利用高压电场使聚合物溶液形

基金项目:青岛市自然科学基金(23-2-1-165-zyyd-jch);青岛市医疗卫生重点学科(2025—2027);山东省医药卫生口腔内科学重点学科(2025—2027)

作者单位:1 山东医药大学口腔医学院,山东烟台(264003);2 青岛大学附属青岛市口腔医院修复科,山东青岛(266001);3 青岛大学附属青岛市口腔医院牙体牙髓科,山东青岛(266001);4 青岛大学附属青岛市口腔医院中心实验室,山东青岛(266001)

通信作者:孙德刚 E-mail:sundegang168@sina.com

成细小射流并被拉伸为纳米至微米级的连续超细纤维,纤维堆积后还可以构建出仿生的三维纤维支架。通过调节纺丝参数(电压、接收距离、流速等)和采用不同收集方式,可控制纤维直径、取向和孔隙率,从而调控纤维膜的结构性能。静电纺丝的优势在于其灵活的功能化方案:一方面,可以在纤维溶液中加入药物、小分子或纳米颗粒,使其均匀分散于纤维内部,赋予纤维膜抗菌、抗炎或促矿化等功能^[2];另一方面,可采用同轴静电纺丝制备核-壳结构的纤维,将不同活性物质分别封装在纤维的核层和壳层中,实现分阶段的控制释放。此外,静电纺纤维可根据需要制备为取向排列或随机排列,取向纤维可引导细胞沿特定方向生长,对于牙周组织、神经等需要有序排列的组织再生十分有利^[3-4]。

2 静电纺丝技术在口腔医学各分支学科中的应用

2.1 静电纺丝技术在牙周病学中的应用

在牙周病学中,静电纺丝技术主要应用于抗菌、消炎及促进牙周组织再生。

牙龈退缩不仅影响患者的美观,而且还会增加根面龋的风险^[5]。传统治疗方法存在继发性创伤和供体部位不足等限制。Sun 等^[6]设计的负载氧化镁纳米纤维膜体现出“结构仿生+功能释放”的双重创新:既能模拟牙龈结缔组织的纤维化网络,改善细胞黏附与增殖,又通过持续释放 Mg^{2+} 实现抗菌与促成纤维细胞迁移的双重生物学效应。动物实验证明其可加速伤口闭合与软组织重建。

牙周再生治疗的关键在于牙骨质-牙槽骨-牙周膜三维复合体的功能性重建。目前常用的引导性组织再生膜仅为惰性屏障,缺乏生物活性,难以修复严重的牙周骨缺损。对此,研究者将多种促成骨、抗菌或免疫调节因子引入静电纺纤维膜中以弥补传统膜的不足^[7-8]。例如, Yang 等^[9]将沸石咪唑酯骨架(ZIF-8)负载到聚己内酯(poly-caprolactone, PCL)与明胶(gelatin, Gel)制成静电纺纤维,利用 Zn^{2+} 的持续释放实现抗菌和成骨双重作用。这种功能化设计突破了传统屏障膜仅具隔离作用的局限,动物实验亦证实其骨再生效果更佳。另一种策略创新性利用纤维膜调节免疫环境^[10],创造利于组织再生的条件,例如 Han 等^[11]把茶多酚功能化的还原氧化石墨烯添加到聚乳酸-羟基乙酸共聚物(poly-lactic-co-glycolic acid, PLGA)/PCL 静电纺纤维膜中,这种膜可抑制巨噬细胞 M1 型的极化,降低炎症反应,促进牙周膜干细胞向骨和牙骨质方向分化。动物实验也显示其对骨质和牙骨质再生改善明显。

2.2 静电纺丝技术在牙体牙髓病学中的应用

在牙体牙髓病学中,静电纺丝技术主要用于加强复合树脂材料机械性能、赋予抗菌性能、作为支架促进活髓保存以及推进牙髓-牙本质复合体乃至牙髓再生。

2.2.1 加强材料机械性能

复合树脂是窝洞充填治疗中常用的充填材料,通过引入微米或纳米级填料可有效提升其力学性能^[12]。Amiri 等^[13]通过在树脂基质中引入表面改性的聚丙烯腈纳米纤维,有效降低了树脂的聚合收缩并增强其力学强度。这类“纤维增强”策略的创新之处在于利用电纺纤维的高比表面积和良好的界面相容性来改善材料的固有缺陷。

2.2.2 赋予材料抗菌性能

龋坏组织被去除后仍可产生继发龋。早期研究中常通过将电纺纳米纤维或纳米粒直接掺入树脂基体,以银离子、银纳米颗粒或抗生素来赋予树脂材料抗菌功能。近年来一些研究集中在黏合剂材料上, Münchow 等^[14]将负载多西环素的 PCL 电纺材料在

低温研磨后作为填料掺入黏合剂中,在不影响其黏合性能和强度的情况下,该黏合剂获得了显著的抗菌和抑制基质金属蛋白酶效果。这表明“药物缓释+材料改性”的组合是未来抗菌材料的发展方向。

2.2.3 改善材料生物活性

在活髓保存方面,电纺纤维支架多孔而且容易载药,可严密覆盖牙髓暴露面并且缓释促牙本质形成的活性因子。Sheela 等^[15]用三氧化物聚合物(mineral trioxide aggregate, MTA)或羟基磷灰石(hydroxyapatite, HAP)浸泡并涂覆电纺 PCL 纤维膜,成功促进牙髓干细胞(dental pulp stem cells, DPSCs)黏附、增殖并向成牙本质细胞分化,显著提升生物矿化水平。

2.2.4 促进牙本质矿化

在牙本质过敏症的治疗中, Liu 等^[16]制备了一种含二氧化硅-钙锶碳酸盐纳米颗粒的电纺纤维膜,可持续释放纳米颗粒,在牙本质表面形成矿化沉积并渗入胶原纤维,封闭牙小管并提高抗酸性;同时,锶的引入赋予材料抗菌性且对牙髓细胞无明显毒性。

2.2.5 牙髓再生

牙髓再生是当前研究的重点方向,其核心在于干细胞招募、生物活性支架构建和无菌环境维持。静电纺丝技术通过可调控的纤维结构、负载生物活性因子及抗菌药物,可促进干细胞黏附迁移并维持抗菌环境^[17]。Terranova 等^[18]设计了一种由电纺聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)纳米纤维、电喷雾 PCL 和单宁酸微粒组成的复合纤维膜,并在体外模拟根管系统中证实该复合纤维膜能够促进 DPSCs 的增殖和迁移。另一方面,根管内无菌状态是再生性牙髓治疗成功的前提。Ribeiro 等^[19]将含有各种抗生素和抗菌活性物质的纳米纤维在低温下研磨成颗粒后添加到甲基丙烯酸酯水凝胶中。该复合材料不仅保留了原有的抗菌和抗炎特性,而且改善了生物降解性,其注射形式也为实际临床应用提供了有利条件。这些研究共同表明,静电纺纳米纤维在牙髓再生中不仅可作为支架,更是药物递送与微环境调控的平台。

2.3 静电纺丝技术在口腔颌面外科学中的应用

口腔颌面外科在处理软、硬组织缺损以及术后恢复问题时,传统治疗方法虽然成熟,但是在组织再生、功能恢复以及预防并发症方面存在局限。近年来静电纺丝技术在骨缺损修复、神经再生、手术创口愈合、颞下颌关节盘修复以及肿瘤术后局部治疗中展现出独特优势。

2.3.1 颌骨缺损修复

颌骨缺损常见于创伤、肿瘤切除或感染,传统治疗方式多采用自体或异体骨移植,但是存在供区创伤大、移植骨吸收快且骨结合差等弊端。引导性骨组织再生术常用的胶原膜虽可阻挡纤维组织侵入,却缺乏成骨活性。静电纺纳米纤维膜由于其结构类似天然细胞外基质,可通过掺入生物活性无机纳米颗粒赋予抗菌和成骨功能,成为颌骨修复的新兴策略^[20-22]。Jiang等^[23]制备了负载白细胞介素4(interleukin 4, IL-4)和磷酸三钙(tricalcium phosphate, TCP)的聚乙醇酸(polyglycolic acid, PGA)-丝素蛋白(silk fibroin, SF)同轴纤维支架,模拟自然骨骼结构并实现IL-4和TCP的双模式释放,同时IL-4和TCP在减轻炎症和增强成骨分化方面起协同作用。体外研究表明,PGA/TCP-SF/IL-4支架促进巨噬细胞M2型极化并上调成骨相关基因的表达,将该支架植入大鼠颌骨缺损模型中显著增加了新骨的形成。Feng等^[24]将石墨烯(graphene, Gr)掺入左旋聚乳酸(poly-L-lactic acid, PLLA)中制备了压电PLLA/Gr纳米纤维支架,体内大鼠骨缺损修复实验证实,该支架实现了无需外源性生长因子或干细胞即可促进骨髓间充质细胞成骨分化的效果。

2.3.2 颌面神经再生

颌面神经受损会引起受累神经支配区域的感觉障碍、肌群废用、神经痛^[25],传统修复依赖自体神经移植,但受供体不足和再生方向不佳等限制。随着组织工程技术的进步,人工神经导管被视为自体神经移植有前途的替代品^[26-27]。Xu等^[28]采用同轴静电纺丝技术制备多腔PLGA导管,内衬高度取向纳米纤维并加载血管内皮生长因子A(vascular endothelial growth factor A, VEGFA)基因修饰的DPSCs,在大鼠面神经长段缺损模型中,该体系显著加速轴突定向再生与髓鞘形成,并缓释VEGFA提升局部血管化及功能恢复效率。

2.3.3 术后创面愈合

口腔术后创面常伴有感染、疼痛等并发症,以往敷料仅起到机械屏障作用而且缺乏生物活性。静电纺丝技术可赋予纤维膜高比表面积和优良的药物负载性能,实现药物的可控释放与功能化改良^[29-31]。Slowik等^[32]设计的双重载药黏附性电纺纤维膜在拔牙术后应用中,通过温敏聚合物聚-N-异丙基丙烯酰胺(poly-N-isopropyl acrylamide, PNIPAM)在体温下由亲水膨胀态转变为疏水致密态的特性,实现布比卡因的缓释以延长镇痛效果。同时,另一层快速释放抗炎药物,预防感染并降低干槽症发生。该研究在设计上实现了不同药物的可控释放和单向递

送,将传统敷料功能从单纯物理屏障提升为多功能生物活性材料,为术后管理提供了新思路。

2.3.4 颞下颌关节盘修复

退变或外伤导致的颞下颌关节盘缺损会引发颞下颌关节功能障碍与疼痛。天然关节盘组织复杂且难以获得,目前尚无理想替代物。Gan等^[33]利用静电纺丝技术构建了仿生三维PCL/PLA/碳纳米管盘状支架,该支架通过设计纤维取向模拟天然关节盘的各向异性微结构,并复合碳纳米管增强支架力学性能。实验证实,该仿生支架不仅能够诱导成纤维细胞定向排列和软骨样组织形成,还在动物模型中被验证了关节盘修复与骨保护效果,为颞下颌关节重建提供了新思路。

2.3.5 肿瘤术后局部治疗

口腔鳞状细胞癌术后局部残留病灶容易导致复发,而全身化疗副作用较大。Chen等^[34]利用静电纺纤维膜作为肿瘤局部治疗载体,将5-氟尿嘧啶等化疗药物或天然抗癌物质负载形成口腔贴剂,实现药物局部缓释,在杀灭残余瘤细胞的同时降低对正常组织的毒性。双药协同负载的静电纺膜在体外对肿瘤细胞凋亡诱导更强。此外,静电纺纳米结构还具备调控肿瘤微环境pH值及响应性释放药物的能力,进一步提高治疗的精准性与有效性^[35]。静电纺纳米纤维的创新之处在于将局部缓释、双药协同与微环境调控结合,增强药物靶向性,突破了传统全身化疗副作用大的局限,为口腔肿瘤局部精准治疗提供了新途径。

2.4 静电纺丝技术在口腔黏膜病学中的应用

在口腔黏膜疾病中,因为口腔黏膜表面湿润,并且容易受到机械刺激,局部用药大多时候会被唾液稀释,还会因食物摩擦而导致疗效受限^[36]。静电纺纳米纤维膜柔韧且有黏附性,可以紧贴黏膜形成稳定的药物载体膜,与其他给药方式相比,纳米纤维膜避免了频繁给药的缺点和部分副作用。此外,纳米纤维膜还可以装载多种药物,控制药物释放速度,实现黏膜疾病的持续局部治疗^[37]。

2.4.1 义齿性口炎

义齿性口炎是一种活动义齿相关的口腔念珠菌感染,严重影响佩戴者的口腔健康与舒适度。Ribeiro等^[38]采用静电纺丝技术将天然抗菌活性物质肉桂包载于PLGA聚合物中,制得纳米纤维涂层并覆盖于义齿基托材料聚甲基丙烯酸甲酯(poly-methyl methacrylate, PMMA)内面,实现义齿表面局部抗菌功能。体外实验显示,该纤维膜显著抑制义齿表面的念珠菌黏附和生物膜形成,对口腔上皮细

胞无明显毒性,生物相容性良好。

2.4.2 口腔扁平苔藓

针对糜烂性口腔扁平苔藓的靶向治疗,现已开发出一种双层贴片——Rivelin®-CLO,其结合了含有丙酸氯倍他索的黏附多孔层和背向黏膜的不渗透、不粘连的背衬层,其中黏附层吸收水分黏附并释放药物直接进入病变组织,实现局部精准药物释放,背衬层阻止药物向唾液扩散,保护健康组织不受药物影响,具有更长的黏附时间,减少了治疗所需的药物剂量^[39]。Ⅱ期临床试验显示,该贴片具有良好的治疗效果及安全性,利用双层结构实现药物靶向与局部控制释放,兼顾疗效与安全性,为口腔黏膜疾病的局部治疗提供了新思路^[40]。

2.4.3 口腔白斑

口腔白斑是一种常见的癌前病变,对于无法手术切除的病例,如何实现局部持续给药抑制恶变仍是一大挑战。Xu等^[41]采用同轴静电纺丝技术制备岩藻多糖核-壳纳米纤维膜,可避免药物被唾液冲刷并实现缓释。细胞实验表明岩藻多糖可诱导异常增生的口腔上皮细胞凋亡并抑制增殖;动物模型中贴敷该纤维膜数周后,病变明显缩小、异型增生减轻,同时对正常口腔黏膜几乎无刺激。该研究结合同轴静电纺丝核-壳结构实现局部可控缓释药物,并靶向消灭癌前病变细胞,提供了一种潜在的非手术干预策略。

2.5 静电纺丝技术在口腔种植学中的应用

静电纺纳米纤维在种植学中的应用主要围绕两个目标展开:提高种植体植入初期的骨结合质量,以及预防和治疗种植体周围感染。

2.5.1 种植体初期骨结合

为提高种植体植入初期的骨结合质量,可将多功能生物活性分子与可控释放纤维膜结合作为种植体表面的功能涂层或周围的引导膜,实现骨再生信号的时序调控^[42]。例如,一种可顺序释放神经肽SP和阿仑膦酸的同轴电纺纤维膜在大鼠即刻种植模型中显著促进新骨生成与骨结合,表现为新生骨量增加、初期骨结合强度提高^[43],这为改善种植体早期稳定性提供了新思路。

2.5.2 种植体周围炎

静电纺纳米纤维还可用于种植体周围感染的预防与治疗^[44]。种植术中放置缓释抗菌纤维膜可阻挡细菌侵入界面,降低黏膜炎发生;对于已发生的种植体周围炎,翻瓣清创后将含抗生素的电纺膜填入骨缺损,可持续释放药物促进愈合。静电纺纳米纤维支架还能提高种植体周围软组织稳定性^[45],

Sakulpaptong等^[46]利用电纺胶原纤维制备三维人造牙龈支架,在纤维支架辅助下实现上皮和基质细胞向基台表面的迁移与黏附,从而阻止细菌侵入种植体-基台连接处,证明了电纺支架在增强软组织-种植体界面稳定性方面的可行性。

2.6 静电纺丝技术在口腔正畸学中的应用

正畸治疗过程中常见牙釉质脱矿、龋坏及矫治力监测困难等问题,静电纺纳米纤维材料的应用旨在赋予正畸材料抗菌防龋和智能监测功能。McDonald等^[47]将能够释放一氧化氮(nitric oxide, NO)的S-亚硝基乙酰青霉胺掺入正畸弹性结扎线中,并且通过静电纺丝技术进行涂覆,实现长效缓释NO抑制托槽周围菌斑生物膜形成,预防白斑和龋损,且不降低结扎线弹性;Yuan等^[48]在正畸粘接剂中引入PCL-Gel-银纳米颗粒(AgNPs)复合纤维,在不影响粘接性能的前提下,表现出良好的抗菌性能。此外,Feng等^[49]将压电电纺纳米纤维传感器内置于透明矫治器,可通过受力产生电信号实现佩戴时长和力值的实时监测,并同步显示至智能终端,帮助患者纠正不良口腔习惯并提高治疗效果,且纤维直径仅数十纳米,不影响矫治器透明度和舒适度。这些研究共同表明,静电纺丝技术为正畸过程中预防脱矿、提高依从性及推动个性化诊疗提供了新思路。

2.7 静电纺丝技术在口腔修复学中的应用

静电纺丝技术在口腔修复材料改良中展现出显著应用潜力。Zhou等^[50]制备DNA-DDAB电纺支架诱导HAP矿化形成DNA-HAP复合材料,制备出高强度抗菌嵌体,其抗压强度接近牙本质并且可抵抗致龋菌侵袭,实现了机械性能与抗菌性能的协同优化。Karatepe等^[51]将PMMA、SF和聚醚酰亚胺(polyetherimide, PEI)结合起来,构建了一种具有内在抗菌性和机械性能优越的义齿树脂材料,实现多组分复合材料的协同功能化。

3 展 望

综上所述,静电纺丝技术在口腔医学领域已展现出极大的应用潜力,但距离更深层次的临床应用仍面临一系列考验。首先,现有研究多停留在短期动物实验,而口腔环境长期受到唾液、菌群和机械力影响,材料的降解产物、残留溶剂及慢性免疫反应可能带来不可预期的影响,因此系统性的长期随访与毒理学评估不可缺少。其次,多功能化设计虽然有助于提升材料临床价值,但在实际应用中往往难以实现不同活性因子的稳定共存与精准释放,如何兼顾抗菌、成骨等多重效应而避免相互干扰,是当前研

究亟须突破的技术难点。此外,实验室条件下纤维性能尚可控,但在工业化生产中,一致性、批间稳定性及成本控制仍然限制其推广应用。未来研究需在确保长期生物安全性的前提下,发展更为可控的多功能材料与规模化制备工艺,并依托高质量的临床研究,逐步增强医生和患者对该技术的信任,从而推动静电纺丝技术真正实现从实验室走向临床,为口腔医学的发展注入新的动力。

[参 考 文 献]

- [1] Wang YF, Liu YN, Zhang XP, *et al.* Engineering electrospun nanofibers for the treatment of oral diseases[J]. *Front Chem*, 2021, 9: 797523.
- [2] Cui JJ, Yu XG, Yu B, *et al.* Coaxially fabricated dual-drug loading electrospinning fibrous mat with programmed releasing behavior to boost vascularized bone regeneration[J]. *Adv Healthc Mater*, 2022, 11(16): e2200571.
- [3] Liang C, Wang GY, Liang C, *et al.* Hierarchically patterned triple-layered gelatin-based electrospun membrane functionalized by cell-specific extracellular matrix for periodontal regeneration[J]. *Dent Mater*, 2024, 40(1): 90–101.
- [4] Wang XQ, Chen S, Chen XL, *et al.* Biomimetic multi-channel nerve conduits with micro/nanostructures for rapid nerve repair[J]. *Bioact Mater*, 2024, 41: 577–596.
- [5] Yadav VS, Gumber B, Makker K, *et al.* Global prevalence of gingival recession: A systematic review and meta-analysis[J]. *Oral Dis*, 2023, 29(8): 2993–3002.
- [6] Sun S, Qin J, Zhuang YF, *et al.* Development of MgO-loaded PLA/dECM antibacterial nanofibrous membranes for enhanced gingival regeneration[J]. *Biomater Sci*, 2025, 13(12): 3354–3366.
- [7] Ren MY, Li M, Boccaccini AR, *et al.* Electrospinning of recombinant human-like collagen-reinforced PCL nanofibrous membranes using benign solvents for periodontal regeneration[J]. *Int J Biol Macromol*, 2025, 284(Pt 1): 137954.
- [8] Shang LL, Liu ZQ, Ma BJ, *et al.* Dimethylallyl glycine/nanosilicates-loaded osteogenic/angiogenic difunctional fibrous structure for functional periodontal tissue regeneration[J]. *Bioact Mater*, 2021, 6(4): 1175–1188.
- [9] Yang F, Wang M, Wu CY, *et al.* Polycaprolactone/gelatin/ZIF-8 nanofiber membrane for advanced guided tissue regeneration in periodontal therapy[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 279: 135338.
- [10] Wang SR, Li CY, Chen S, *et al.* Multifunctional bilayer nanofibrous membrane enhances periodontal regeneration mesenchymal stem cell recruitment and macrophage polarization[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 273(Pt 1): 132924.
- [11] Han X, Wang FY, Ma YZ, *et al.* TPG-functionalized PLGA/PCL nanofiber membrane facilitates periodontal tissue regeneration by modulating macrophages polarization suppressing PI3K/AKT and NF- κ B signaling pathways[J]. *Mater Today Bio*, 2024, 26: 101036.
- [12] Chen XS, Liu ZQ, Ma R, *et al.* Electrospun nanofibers applications in caries lesions: Prevention, treatment and regeneration[J]. *J Mater Chem B*, 2024, 12(6): 1429–1445.
- [13] Amiri P, Talebi Z, Semnani D, *et al.* Improved performance of Bis-GMA dental composites reinforced with surface-modified PAN nanofibers[J]. *J Mater Sci Mater Med*, 2021, 32(7): 82.
- [14] Münchow EA, da Silva AF, Piva E, *et al.* Development of an anti-bacterial and anti-metalloproteinase dental adhesive for long-lasting resin composite restorations[J]. *J Mater Chem B*, 2020, 8(47): 10797–10811.
- [15] Sheela S, AlGhalban FM, Khalil KA, *et al.* Synthesis and biocompatibility evaluation of PCL electrospun membranes coated with MTA/HA for potential application in dental pulp capping[J]. *Polymers*, 2022, 14(22): 4862.
- [16] Liu CZ, Hao ZC, Yang T, *et al.* Anti-acid biomimetic dentine remineralization using inorganic silica stabilized nanoparticles distributed electrospun nanofibrous mats[J]. *Int J Nanomed*, 2021, 16: 8251–8264.
- [17] Feng WJ, Li C, An Q, *et al.* Preparation of SDF-1 α -loaded electrospun coaxial microspheres and their study on promoting migration and differentiation of dental pulp stem cells[J]. *Front Mater*, 2025, 12: 1568591.
- [18] Terranova L, Louvrier A, Hébraud A, *et al.* Highly structured 3D electrospun conical scaffold: A tool for dental pulp regeneration[J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2021, 7(12): 5775–5787.
- [19] Ribeiro JS, Münchow EA, Bordini EAF, *et al.* Engineering of injectable antibiotic-laden fibrous microparticles gelatin methacryloyl hydrogel for endodontic infection ablation[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(2): 971.
- [20] Zheng SK, Sun XM, Chen K, *et al.* Metal-phenolic modified coaxial electrospun biomembrane combined with the photothermal effect enhances bone regeneration by ameliorating oxidative stress and mitochondrial dysfunction the PI3K/Akt signaling pathway[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2025, 17(10): 15019–15034.
- [21] Tian LQ, Zhao XR, Chen FY, *et al.* A bottom-up approach to assemble cell-laden biomineralized nanofiber mats into 3D multilayer periosteum mimics for bone regeneration[J]. *Nano Lett*, 2024, 24(46): 14574–14583.
- [22] Huang QH, Han LZ, Wang RS, *et al.* Electrospun nanofibers loaded with concentrated growth factors and nanohydroxyapatite for the healing of alveolar bone in tooth extraction wounds[J]. *ACS Biomater Sci Eng*, 2025, 11(10): 5975–5990.
- [23] Jiang X, Jian YT, Zhang Y, *et al.* Dual-mode release of IL-4 and TCP from a PGA-SF core-shell electrospinning scaffold for enhanced bone regeneration through synergistic immunoregulation and osteogenesis[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, 16(43): 58148–58167.
- [24] Feng ZC, Zhang SM, Ren N, *et al.* Dispersed graphene nanosheets enhance piezoelectricity of poly(L-lactic acid) nanofibrous scaffold to promote bone defect repair[J]. *Adv Healthc Mater*, 2025, 14(15): e2404490.
- [25] Lopes B, Sousa P, Alvites R, *et al.* Peripheral nerve injury treatments and advances: One health perspective[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(2): 918.

- [26] Mao XY, Li T, Cheng JQ, *et al.* Nerve ECM and PLA-PCL based electrospun bilayer nerve conduit for nerve regeneration[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1103435.
- [27] Liu N, Ning XC, Zhang XP, *et al.* Gradient galectin-I coating technology: Bionic multichannel nerve guidance conduits promote neural cell migration[J]. *Adv Technol Neurosci*, 2024, 1(2): 276-289.
- [28] Xu WQ, Xu XH, Yao LH, *et al.* VEGFA-modified DPSCs combined with LC-YE-PLGA NGCs promote facial nerve injury repair in rats[J]. *Heliyon*, 2023, 9(4): e14626.
- [29] Zhang H, Zhang XP, Fu MF, *et al.* Bioactive microfiber yarns serving as sutures with antibacterial and pro-tissue repair capabilities [J]. *Chem Commun(Camb)*, 2025, 61(51): 9250-9253.
- [30] You Y, Ning XC, Zhang XP, *et al.* Development of magnesium hydroxide-doped nanofibrous spheres for repairing infected skin wounds[J]. *Biomater Adv*, 2024, 163: 213967.
- [31] Zhou ZY, Wang YF, Liu N, *et al.* Multifunctional nanofiber-based dressings in coordination with adipose-derived stem cells for accelerated burn wound healing[J]. *Mater Des*, 2025, 253: 113929.
- [32] Slowik KM, Edmans JG, Harrison S, *et al.* Controlled dual drug release from adhesive electrospun patches for prevention and treatment of alveolar osteitis[J]. *J Control Release*, 2024, 376: 253-265.
- [33] Gan ZQ, Zhao YF, Wu YK, *et al.* Three-dimensional, biomimetic electrospun scaffolds reinforced with carbon nanotubes for temporomandibular joint disc regeneration[J]. *Acta Biomater*, 2022, 147: 221-234.
- [34] Chen X, Lei S, Ning YJ, *et al.* Injectable polydopamine/curcumin dual-modified polylactic acid/polycaprolactone coaxial staple fibers for chronotropic treatment of oral squamous cell carcinoma[J]. *Int J Biol Macromol*, 2025, 292: 139094.
- [35] Hwang SR, Chakraborty K, An JM, *et al.* Pharmaceutical aspects of nanocarriers for smart anticancer therapy[J]. *Pharmaceutics*, 2021, 13(11): 1875.
- [36] Mašková E, Kubová K, Raimi-Abraham BT, *et al.* Hypromellose-A traditional pharmaceutical excipient with modern applications in oral and oromucosal drug delivery[J]. *J Control Release*, 2020, 324: 695-727.
- [37] Zhou YQ, Wang ML, Yan C, *et al.* Advances in the application of electrospun drug-loaded nanofibers in the treatment of oral ulcers [J]. *Biomolecules*, 2022, 12(9): 1254.
- [38] Ribeiro JS, Bordini EAF, Pereira GKR, *et al.* Novel cinnamon-laden nanofibers as a potential antifungal coating for poly(methyl methacrylate) denture base materials [J]. *Clin Oral Investig*, 2022, 26(4): 3697-3706.
- [39] Colley HE, Said Z, Santocildes-Romero ME, *et al.* Pre-clinical evaluation of novel mucoadhesive bilayer patches for local delivery of clobetasol-17-propionate to the oral mucosa[J]. *Biomaterials*, 2018, 178: 134-146.
- [40] Brennan MT, Madsen LS, Saunders DP, *et al.* Efficacy and safety of a novel mucoadhesive clobetasol patch for treatment of erosive oral lichen planus: A phase 2 randomized clinical trial[J]. *J Oral Pathol Med*, 2022, 51(1): 86-97.
- [41] Xu M, Sun Y, Cong BB, *et al.* The mechanism of low molecular weight fucoidan-incorporated nanofiber scaffolds inhibiting oral leukoplakia via SR-A/Wnt signal axis[J]. *Front Pharmacol*, 2024, 15: 1397761.
- [42] Xu WJ, Gao X, Zhang MH, *et al.* Electrospun polycaprolactone-chitosan nanofibers on a zinc mesh as biodegradable guided bone-regeneration membranes with enhanced mechanical, antibacterial, and osteogenic properties for alveolar bone-repair applications[J]. *Acta Biomater*, 2024, 187: 434-450.
- [43] Ji HZ, Wang YY, Liu HH, *et al.* Programmed core-shell electrospun nanofibers to sequentially regulate osteogenesis-osteoclastogenesis balance for promoting immediate implant osseointegration [J]. *Acta Biomater*, 2021, 135: 274-288.
- [44] Ye Z, Sang T, Li K, *et al.* Hybrid nanocoatings of self-assembled organic-inorganic amphiphiles for prevention of implant infections [J]. *Acta Biomater*, 2022, 140: 338-349.
- [45] Mathur A, Kharbanda OP, Koul V, *et al.* Fabrication and evaluation of antimicrobial biomimetic nanofiber coating for improved dental implant bioseal: An study[J]. *J Periodontol*, 2022, 93(10): 1578-1588.
- [46] Sakulapong W, Clairmonte IA, Blackstone BN, *et al.* 3D engineered human gingiva fabricated with electrospun collagen scaffolds provides a platform for analysis of gingival seal to abutment materials[J]. *PLoS One*, 2022, 17(2): e0263083.
- [47] McDonald A, Warden C, Tan JL, *et al.* Synthesis and characterization of a sustained nitric oxide-releasing orthodontic elastomeric chain for antimicrobial action [J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(13): 6982.
- [48] Yuan QH, Zhang QQ, Xu XC, *et al.* Development and characterization of novel orthodontic adhesive containing PCL-gelatin-AgNPs fibers[J]. *J Funct Biomater*, 2022, 13(4): 303.
- [49] Feng H, Song WH, Li RY, *et al.* A fully integrated orthodontic aligner with force sensing ability for machine learning-assisted diagnosis[J]. *Adv Sci(Weinh)*, 2025, 12(2): e2411187.
- [50] Zhou YS, Deng JJ, Zhang Y, *et al.* Engineering DNA-guided hydroxyapatite bulk materials with high stiffness and outstanding antimicrobial ability for dental inlay applications[J]. *Adv Mater*, 2022, 34(27): e2202180.
- [51] Karatepe UY, Ozdemir T. Improving mechanical and antibacterial properties of PMMA via polyblend electrospinning with silk fibroin and polyethyleneimine towards dental applications[J]. *Bioact Mater*, 2020, 5(3): 510-515.

(收稿日期:2025-07-29)

(本文编辑:孙 鑫)