

功能水凝胶作为高级伤口敷料:目前进展和未来方向

代婷婷 黄 炜^(通讯作者)

西南医科大学附属医院内分泌科 四川 泸州 646000

【摘要】：水凝胶敷料因其优异的保湿性能、生物相容性及多功能可调节性，已成为伤口愈合领域的研究热点。然而，关于功能性水凝胶作为伤口敷料的全面综述仍然缺乏。本文综述了水凝胶在抗菌、抗炎抗氧化、止血、自愈合、刺激响应等方面的最新研究进展，重点分析其在复杂伤口管理中的应用优势。水凝胶通过结合纳米材料、天然抗菌成分和智能聚合物，显著提升了其在创面护理中的疗效，尤其在应对多药耐药菌和促进组织再生方面展现出巨大潜力。同时，智能水凝胶在个性化治疗和实时伤口监测中的应用前景也得到了深入探讨。最后，进一步提出了水凝胶伤口敷料用于伤口愈合的未来发展方向。

【关键词】：多功能水凝胶；敷料；抗菌；抗炎抗氧化；止血；物质运输；自愈合；刺激响应；个性化治疗；组织再生

DOI:10.12417/2705-098X.26.14.007

引言

伤口敷料的选择对加速愈合和降低感染风险至关重要。近年来，水凝胶敷料因其独特的保湿性能^[1]、优良的生物相容性^[2]和多功能调控性^[3]，成为伤口护理领域的研究热点。水凝胶材料具有高含水量，不仅有助于保持创面湿润，促进细胞迁移^[4]和组织再生^[5]，还可降低创面温度^[6]、缓解疼痛^[7]，提供理想的愈合环境。此外，水凝胶的柔软性^[8]和高弹性^[9]提高了其在敷料应用中的舒适性和贴合性。

现有研究已表明，功能性水凝胶敷料在抗菌、抗炎、止血、药物缓释和自愈等方面展现出显著优势。随着纳米材料和智能聚合物的引入，水凝胶的功能进一步拓展，能够满足复杂伤口护理的多种需求。这些创新性水凝胶在促进创面愈合、抑制感染和组织再生方面表现出巨大潜力，尤其在应对多药耐药菌和难愈性伤口上取得了积极成效。

本综述聚焦功能性水凝胶敷料的最新研究进展及其临床应用潜力。系统回顾了抗菌、抗炎抗氧化、止血、物质运输、自愈合、刺激响应、导电、伤口监测及智能化等多功能水凝胶的开发，分析其在复杂伤口管理中的应用优势。同时，本文讨论了水凝胶敷料未来发展面临的关键挑战，如生物相容性、降解性能及其在不同创面环境中的适应性。通过总结现有研究成果，本综述旨在为水凝胶敷料的创新设计提供参考，推动其在临床应用中的进一步发展。

1 水凝胶伤口敷料的高级功能

1.1 抗菌水凝胶伤口敷料

近年来，慢性伤口感染和多药耐药菌的出现对传统治疗方式提出了严峻挑战，推动了新型抗菌材料的研究与开发。通过整合抗菌成分或设计多功能化策略，抗菌水凝胶不仅能够有效抑制细菌感染，还能促进组织修复与再生。

抗菌水凝胶的核心在于其抗菌机制及材料创新。例如，Wang 等^[10]开发了一种无需载体的小分子水凝胶，能够协同抑制细菌毒力因子并减轻炎症反应，从而显著加速伤口愈合。该

水凝胶基于天然成分，降低了药物毒性和副作用的风险。此外，Liu 等^[11]设计的合成聚合物水凝胶能够自组装，对 MRSA 感染伤口表现出显著的抗菌效果，且无需药物或细胞辅助便可促进皮肤再生。

多功能水凝胶设计也取得了重要进展。例如，Zhao 等^[12]开发的光热抗菌水凝胶具备优异的组织适应性和自愈合能力，能够在低温光热治疗下有效杀灭 MRSA。Yang 等^[13]设计的多巴胺/鞣酸水凝胶则展示出优异的粘附性、自愈能力、抗菌性及抗氧化性能，特别适用于慢性伤口的治疗。

为应对多药耐药菌的挑战，一些研究聚焦于无药物抗菌策略的水凝胶开发。例如，Kaul 等^[14]利用金纳米星与水凝胶结合的敷料，通过机械杀菌策略有效治疗细菌感染的伤口，避免了抗生素耐药性问题；Yuan 等^[15]开发的盐响应型阳离子肽水凝胶通过吸附和释放细菌实现抗菌作用，其灭菌率高达 96%。

光热疗法与抗菌功能的结合亦成为热门研究方向。Pang 等^[16]设计的聚苯胺纳米颗粒基光热水凝胶在近红外光照射下产生热能，杀灭细菌，并具备良好的机械性能和生物相容性。Li 等^[17]提出的细菌激活型巨噬细胞膜包覆水凝胶在光热治疗中展现出广谱而高效的抗菌效果。

1.2 抗炎抗氧化水凝胶伤口敷料

氧化应激和慢性炎症被认为是延缓伤口愈合的主要因素，因此，将天然抗氧化剂、纳米材料或高分子材料引入水凝胶，以增强其抗炎、抗氧化及抗菌性能。这类水凝胶通过降低活性氧（ROS）和炎症因子水平，有效加速伤口修复。

研究表明，将天然抗氧化剂引入水凝胶可显著提高修复效果。Ou 等^[18]开发的三重抗氧化水凝胶结合了葛根素、阿魏酸和聚多巴胺，可减少 ROS 生成并提高 SOD 和 GSH-Px 活性，显著促进组织再生。

纳米材料的引入进一步拓展了水凝胶的抗氧化、抗炎及抗菌功能。Mao 等^[19]在细菌纤维素/明胶水凝胶中加入硒纳米颗粒，增强了抗氧化及抗菌效果，有效抑制多药耐药菌并降低感

染风险。Wang 等^[20]开发的多巴胺和槲皮素复合水凝胶则表现出优异的自愈、抗菌和抗氧化特性，适用于慢性伤口的治疗。

为应对糖尿病患者的慢性炎症和氧化应激，Zhu 等^[21]开发了一种结合光热疗法的水凝胶，通过降低血糖并释放抗菌剂，促进血管生成及组织修复，显著缩短愈合时间。

传统水凝胶敷料常需要载体，存在毒性和批次差异等问题。Cai 等^[22]开发的无载体自愈水凝胶采用 100% 药物负载，展现出优异的抗 MRSA 活性，并通过减少促炎因子释放促进伤口愈合。

高分子材料的结合赋予水凝胶更大的设计灵活性。Chen 等^[23]利用铈碳化物纳米片开发出具有热敏性和抗菌活性的新型水凝胶，通过光热疗法及 ROS 清除显著修复糖尿病伤口。Wang 等^[24]设计的硫化镍与银掺杂复合水凝胶通过光热疗法对抗耐药细菌并清除 ROS，加速愈合进程。Zhang 等^[25]开发的鞣花酸/环糊精复合水凝胶则增强了抗氧化和抗炎效果，在感染性伤口愈合中表现出优异疗效。

1.3 止血水凝胶伤口敷料

止血是创伤管理中的首要任务，尤其在动脉破裂、大量失血和难以压迫的复杂伤口中，快速且高效的止血材料具有重要临床意义。水凝胶作为一种高分子网络材料，以其优异的吸水性、生物相容性和可塑性，成为止血敷料领域的研究热点。近年来，基于天然高分子及其复合材料的水凝胶因其良好的生物降解性和组织黏附性，在急救、动脉性出血、深层创伤以及感染性伤口的治疗中展现出极大的潜力。

例如，Hu 等^[26]开发的“4A”水凝胶展示了优异的止血、抗菌和抗氧化性能，尤其在高压颈动脉和心脏穿刺等致命性损伤中的止血效果尤为显著。其金属-酪氨酸配位机制增强了组织黏附性和促血管生成的能力，进一步提升了临床应用潜力。

自愈和可注射性水凝胶的开发成为研究的热点之一。He 等^[27]设计的基于 PVA 的自愈水凝胶具有优良的机械性能和可控降解性，在肝脏切割和股动脉损伤模型中展示出快速止血效果，展现了其在急救敷料中的应用潜力。Chen 等^[28]设计的基于明胶的注射型水凝胶具有良好的组织黏附性和止血能力，适用于内脏器官损伤等非压迫性伤口的治疗。

天然高分子材料因其良好的生物相容性和可降解性，成为水凝胶研发的重要方向。Li 等^[29]开发的壳聚糖与氧化右旋糖酐水凝胶展示了超快速原位成型性能，适用于动脉和深层出血，有助于缩短止血时间并加速感染性伤口的愈合，适合于紧急救援场景。Zhang 等^[30]开发的丝素蛋白、壳聚糖与银纳米颗粒复合水凝胶具备优异的抗菌和快速止血性能，在体内外实验中展示了良好的生物相容性和低毒性，适用于医疗环境中对抗耐药细菌感染。

水凝胶的机械性能和组织黏附性是其在临床应用中的关

键因素。Bai^[31]开发的多肽水凝胶在 12 秒内实现止血，有效减少了血液流失。其负电荷网络结构不仅增强了自愈性，还显著减少了伤口愈合过程中的瘢痕形成。Tang 等^[32]利用角蛋白设计的一种注射型水凝胶，通过二硫键和金-硫键的动态交换，实现了优异的止血效果及药物递送能力，进一步拓展了水凝胶在伤口处理中的应用。Han 等^[33]将多巴胺功能化的明胶与石墨烯氧化物结合，开发出具有导电性能的水凝胶，在大鼠肝出血模型中展现了良好的止血效果，并具备电生理监测潜力，显示出在多功能敷料和可穿戴设备中的应用前景。

1.4 自愈型水凝胶伤口敷料

随着组织工程和创伤修复领域的不断发展，具有自愈性能的水凝胶敷料逐渐成为研究热点。这类材料不仅能够有效促进伤口愈合，还具备抗菌、导电及良好的生物相容性，适用于复杂的伤口管理。

例如，Zhang 等^[34]开发了一种导电、自愈且可注射的超分子水凝胶，具备优良的抗菌性能，并可通过光热效应杀灭耐药菌，加速伤口愈合，尤其适用于全厚度皮肤损伤的修复。Zhong 等^[35]设计的水凝胶采用双重增强结构，具备超拉伸性、快速自愈和抗菌活性，显著提高了其力学稳定性，适合应用于关节等高强度活动部位的伤口。Zhao 等^[36]研究了一种金属有机框架与水凝胶组合的材料，表现出显著的拉伸性能（高达 750%）及自愈特性，同时在伤口修复过程中展示了良好的热导电率。此外，Liu 等^[37]通过引入导电网络，提出了一种导电性自愈水凝胶，在电刺激下能够有效促进组织再生，为电疗法在伤口愈合中的应用提供了新的途径。Prabhakar 等^[38]合成了一种生物活性自愈水凝胶，能有效促进糖尿病性伤口的修复。此外，Iglesias Blanco 等^[39]研究了基于刺激响应性聚合物的水凝胶，揭示了其在药物封装和可控释放中的应用潜力，有助于提高药物在伤口愈合过程中的精准释放效果。多功能自愈水凝胶的研究也取得了突破性进展。此外，Zhao 等^[40]利用中药提取物与透明质酸结合，开发了具有显著自愈性能的水凝胶，该材料在复杂创伤修复中展现出广泛的应用前景。

在动物实验中，许多自愈水凝胶显著促进了愈合过程，加速了胶原生成并缩短了炎症期。例如，Wang 等^[41]开发的壳聚糖基自适应水凝胶能够自动覆盖不规则伤口表面，加速愈合。Ding 等^[42]开发的应变敏感、可注射且 pH 响应的水凝胶不仅能够监测伤口愈合状态，还显著促进了伤口闭合。

随着智能医疗设备的发展，结合传感功能的自愈水凝胶将成为研究重点。Wang 等^[43]开发的双网络自愈水凝胶不仅加速了伤口愈合，还可实时监测健康状况，为个性化医疗提供技术支持。Xu 等^[44]提出了一种集成生物电子界面的自愈水凝胶敷料，能够实时监测伤口愈合情况，提供了精准的伤口护理方案。

这些材料不仅提供了稳定的机械强度和自愈特性，还通

过多功能设计进一步提升了伤口护理的效果。未来研究可聚焦于优化水凝胶的生物相容性、加速血管生成及智能化集成应用,推动自愈型水凝胶在临床实践中的广泛应用。

1.5 刺激响应性水凝胶伤口敷料

刺激响应型水凝胶凭借其对外部刺激(如 pH、温度、ROS、光等)的敏感响应,在伤口治疗中展现出广泛的应用潜力。多重响应机制、抗菌抗氧化功能、自愈与智能监测的结合,以及对复杂环境的适应性,使其成为难治性伤口治疗的多样化解决方案。Peng 等^[45]研发的 pH 与温度双响应型微凝胶嵌入水凝胶,具备出色的机械性能,并通过双重药物释放有效促进伤口愈合。Shi 等^[46]开发的动态自愈型水凝胶对 pH 和 ROS 响应,展现了强大的抗菌和抗氧化能力,有助于抑制感染并加速愈合。这种多重响应机制为伤口治疗提供了灵活而高效的手段。

抗菌和抗氧化功能是水凝胶敷料的核心优势。Wang 等^[47]研发的双响应型水凝胶,通过 pH 和 ROS 响应,在糖尿病感染性伤口中实现定向药物释放,有效减轻炎症并促进修复。此外,Zhao 等^[48]也强调,刺激响应性水凝胶能根据伤口的微环境变化调控药物释放,提高抗菌效果,并通过抗氧化功能加速愈合过程。

水凝胶的智能监测功能使其在复杂伤口管理中独具优势。Fan 等^[49]设计的导电水凝胶具备 pH 响应、自愈和抗菌特性,能够作为传感器实时监测愈合情况,为个性化医疗提供可能性。这类智能化功能不仅提升了治疗效果,还为医护人员提供了伤口愈合的实时反馈。

在复杂环境中,水凝胶需具备更高的智能化和快速响应能力。Guo 等^[50]研发的微环境响应型水凝胶能够智能识别伤口病理特征,展示了优异的止血、抗菌及促血管生成能力,尤其适用于糖尿病慢性伤口的治疗。

2 结论与未来展望

水凝胶敷料在抗菌、抗炎、自愈合、刺激响应、导电和药物传递等方面展现出多功能性,其高含水量和柔软质地有助于

保持伤口湿润、减轻疼痛并防止感染。通过引入纳米材料和智能聚合物,水凝胶在促进伤口愈合、抑制感染和组织再生方面表现出显著效果。近年来,水凝胶敷料逐渐朝着多功能化方向发展,通过整合抗菌、抗氧化、导电和自愈合成分,更好地满足了复杂创面愈合的需求,实现了愈合过程中的精准治疗。

然而,伤口愈合的多阶段性和个体差异使得理想敷料的开发充满挑战。愈合过程包括炎症期、增殖期和重塑期,各阶段需求不同,因此理想的水凝胶敷料需要具备动态调节能力,以在不同阶段释放适宜的治疗因子。此外,患者个体差异(如伤口类型、年龄、免疫状态等)也要求水凝胶具备智能响应能力,能够根据具体微环境进行调整,实现个性化治疗。

在实际应用中,水凝胶敷料还面临体内降解速度与愈合速度不匹配、力学性能不足等问题,这可能导致其在早期失效或功能减弱,从而影响治疗效果。

未来的研究应关注以下几个方向。首先,针对伤口微环境动态变化的智能响应型水凝胶仍是研究的重点。开发能够根据 pH、温度、ROS 等外部刺激实时调整功能的材料,将显著提高水凝胶在不同愈合阶段的适应性。其次,结合先进传感技术,实现对伤口愈合过程的实时监测,并与按需药物释放系统联动,是提升伤口管理精准性和疗效的重要途径。此外,水凝胶敷料在生物相容性、可降解性及长期安全性方面仍需优化,并通过广泛深入的临床试验验证其在实际应用中的疗效和稳定性。

在抗菌耐药性问题日益严重的背景下,无药物抗菌策略及多重抗菌机制的结合将是未来水凝胶设计的关键方向。同时,开发更适合人类皮肤特性的动物模型,以及深入研究创面愈合机制,有助于缩小实验室研究与临床应用之间的差距。

总体而言,水凝胶敷料的多功能性和智能化设计使其在生物医学领域具有广阔前景。随着研究的深入以及新材料和技术的融合,水凝胶敷料在创面护理领域的应用将更加成熟,为患者提供更高效、便捷和个性化的治疗方案。

参考文献:

- [1] Zhu,L.,Chen,J.,Mao,X.,&Tang,S.(2021).Ay-PGA/KGM-based injectable hydrogel as immunoactive and antibacterial wound dressing for skin wound repair.Materials Science&Engineering C,129,112374.
- [2] Amirian,J.,Zeng,Y.,Shekh,M.,Sharma,G.,Stadler,F.,Song,J.,Du,B.,&Zhu,Y.(2021).In-situ crosslinked hydrogel based on amidated pectin/ oxidized chitosan as potential wound dressing for skin repairing.Carbohydrate Polymers,251,117005.
- [3] Asadi,N.,Pazoki-Toroudi,H.,Rahmani Del Bakhshayesh,A.,Akbarzadeh,A.,Davaran,S.,&Annabi,N.(2020).Multifunctional hydrogels for wound healing:Special focus on biomacromolecular based hydrogels.International Journal of Biological Macromolecules.
- [4] Liu,S.,Jiang,T.,Guo,R.,Li,C.,Lu,C.,Yang,G.,Nie,J.,Wang,F.,Yang,X.,&Chen,Z.(2021).Injectable and Degradable PEG Hydrogel with Antibacterial Performance for Promoting Wound Healing.ACS Applied Bio Materials,4(3),2769-2780.
- [5] Sun,J.,Deng,Y.,Han,Q.,Ma,D.,Chan,Y.,He,S.,Zhou,X.,Wang,H.,Fu,X.,&Gan,X.(2023).Photonic double-network hydrogel dressings for antibact-

- erial phototherapy and inflammation regulation in the general management of cutaneous regeneration. *Nanoscale*, 15(2), 609-624.
- [6] Feng, L., Chen, Q., Cheng, H., Yu, Q., Zhao, W., & Zhao, C. (2022). Dually-Thermoresponsive Hydrogel with Shape Adaptability and Synergistic Bacterial Elimination in the Full Course of Wound Healing. *Advanced Healthcare Materials*.
- [7] Surowiecka, A., Struzyna, J., Winiarska, A., & Korzeniowski, T. (2022). Hydrogels in Burn Wound Management—A Review. *Gels*, 8(2), 122.
- [8] Hou, Y., Jiang, N., Sun, D., Wang, Y., Chen, X., Zhu, S., & Zhang, L. (2020). A fast UV-curable PU-PAAm hydrogel with mechanical flexibility and self-adhesion for wound healing. *RSC Advances*, 10(4907-4915).
- [9] Xu, M., Miao, Y., Yu, J., & Zhang, L. (2021). Physiologically-Regulated Adhesion of Hydrogels for Wound Dressing. *Advanced Materials Interfaces*, 8(11), 211131.
- [10] Wang, Z.-J., Lu, J., Yuan, Z., Pi, W., Huang, X.-M., Lin, X., ... & Wang, P. (2022). Natural carrier-free binary small molecule self-assembled hydrogel synergize antibacterial effects and promote wound healing by inhibiting virulence factors and alleviating the inflammatory response. *Small*.
- [11] Liu, W., Ou-Yang, W.-B., Zhang, C., Wang, Q.-S., Pan, X., Huang, P., Zhang, C., Li, Y., Kong, D., & Wang, W. (2020). Synthetic polymeric antibacterial hydrogel for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*-infected wound healing: Nanoantimicrobial self-assembly, drug and cytokine-free strategy. *ACS Nano*.
- [12] Zhao, P., Zhang, Y., Chen, X., Xu, C., Guo, J., Deng, M., ... & Zhang, J. (2023). Versatile hydrogel dressing with skin adaptiveness and mild photothermal antibacterial activity for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*-infected dynamic wound healing. *Advanced Science*.
- [13] Yang, Y., Liang, Y., Chen, J., Duan, X.-J., & Guo, B. (2021). Mussel-inspired adhesive antioxidant antibacterial hemostatic composite hydrogel wound dressing via photo-polymerization for infected skin wound healing. *Bioactive Materials*.
- [14] Kaul, S., Sagar, P., Gupta, R., Garg, P., Priyadarshi, N., & Singhal, N. (2022). Mechanobactericidal, gold nanostar hydrogel-based bandage for bacteria-infected skin wound healing. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- [15] Yuan, J., Zhang, D., He, X., Ni, Y., Che, L., Wu, J., ... & Yang, J. (2021). Cationic peptide-based salt-responsive antibacterial hydrogel dressings for wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- [16] Pang, Q., Wu, K., Jiang, Z., Shi, Z., Si, Z., Wang, Q., ... & Zhu, Y. (2021). A polyaniline nanoparticles crosslinked hydrogel with excellent photothermal antibacterial and mechanical properties for wound dressing. *Macromolecular Bioscience*.
- [17] Li, J., Wang, Y.-J., Yang, J., & Liu, W. (2020). Bacteria activated-macrophage membrane-coated tough nanocomposite hydrogel with targeted photothermal antibacterial ability for infected wound healing. *Chemical Engineering Journal*.
- [18] Ou, Q., Zhang, S., Fu, C., Yu, L., Xin, P., Gu, Z., ... & Wang, Y. (2021). More natural more better: triple natural anti-oxidant puerarin/ferulic acid/polydopamine incorporated hydrogel for wound healing. *Journal of Nanobiotechnology*.
- [19] Mao, L., Wang, L., Zhang, M., Ullah, M., Liu, L., Zhao, W., ... & Yang, G. (2021). In Situ Synthesized Selenium Nanoparticles - Decorated Bacterial Cellulose/Gelatin Hydrogel with Enhanced Antibacterial, Antioxidant, and Anti-Inflammatory Capabilities for Facilitating Skin Wound Healing. *Advanced Healthcare Materials*.
- [20] Wang, L., Zhao, Z., Dong, J., Li, D., Dong, W., Li, H., Zhou, Y., Liu, Q., & Deng, B. (2023). Mussel-Inspired Multifunctional Hydrogels with Adhesive, Self-Healing, Antioxidative, and Antibacterial Activity for Wound Healing. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- [21] Zhu, W., Liu, Y., Liu, P., Cao, J., Shen, A., & Chu, P. K. (2023). Blood-Glucose-Depleting Hydrogel Dressing as an Activatable Photothermal/Chemodynamic Antibacterial Agent for Healing Diabetic Wounds. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- [22] Cai, D., Yang, Y., Lu, J., Yuan, Z., Zhang, Y., Yang, X., ... & Lei, H. (2022). Injectable Carrier-Free Hydrogel Dressing with Anti-Multidrug-Resistant *Staphylococcus aureus* and Anti-Inflammatory Capabilities for Accelerated Wound Healing. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- [23] Chen, J., Liu, Y., Cheng, G., Guo, J., Du, S., Qiu, J., ... & Chen, Z. (2022). Tailored Hydrogel Delivering Niobium Carbide Boosts ROS-Scavenging and Antimicrobial Activities for Diabetic Wound Healing. *Small*.
- [24] Wang, P., Qi, J., Zhang, W., Pu, Y., Yang, R., Wang, P., ... & Chi, B. (2021). 3D-printed antioxidant antibacterial carboxymethyl cellulose/ε-polylysine hydrogel promoted skin wound repair. *International Journal of Biological Macromolecules*.

- [25] Zhang,T.,Guo,L.,Li,R.,Shao,J.,Lu,L.,Yang,P.,...&Liu,Y.(2023).Ellagic Acid-Cyclodextrin Inclusion Complex-Loaded Thiol-Ene Hydrogel with Antioxidant,Antibacterial,and Anti-inflammatory Properties for Wound Healing.ACS Applied Materials&Interfaces.
- [26] Hu,S.,Yang,Z.-W.,Zhai,Q.,Li,D.,Zhu,X.,He,Q.,Li,L.,Cannon,R.,Wang,H.,Tang,H.,Ji,P.,&Chen,T.(2023).An All-in-One"4A Hydrogel": through First-Aid Hemostatic,Antibacterial,Antioxidant,and Angiogenic to Promoting Infected Wound Healing.*Small*
- [27] He,Y.,Liu,K.,Zhang,C.,Guo,S.,Chang,R.,Guan,F.,&Yao,M.(2022).Facile preparation of PVA hydrogels with adhesive,self-healing, antimicrobial,and on-demand removable capabilities for rapid hemostasis.*Biomaterials Science*.
- [28] Chen,Z.,Wu,H.,Wang,H.,Zaldivar-Silva,D.,Agüero,L.,Liu,Y.,Zhang,Z.,Yin,Y.,Qiu,B.,Zhao, J.,Lu,X.,&Wang,S.(2021).An injectable anti-microbial and adhesive hydrogel for the effective noncompressible visceral hemostasis and wound repair.*Materials Science& Engineering:C*
- [29] Li,Z.,Li,B.,Li,X.,Lin,Z.,Chen,L.,Chen,H.,Jin,Y.,Zhang,T.,Xia,H.,Lu,Y.,&Zhang,Y.(2021).Ultrafast in-situ forming halloysite nanotube-doped chitosan/oxidized dextran hydrogels for hemostasis and wound repair.*Carbohydrate Polymers*,267,118155.
- [30] Zhang,M.,Wang,D.,Ji,N.,Lee,S.,Wang,G.,Zheng,Y.,Zhang,X.,Yang,L.,Qin,Z.,&Yang,Y.(2021).Bioinspired Design of Sericin/Chitosan/ Ag@MOF/GO Hydrogels for Efficiently Combating Resistant Bacteria,Rapid Hemostasis,and Wound Healing.*Polymers*,13(16),2812.
- [31] Bai,Q.,Teng,L.,Zhang,X.,&Dong,C.M.(2021).Multifunctional Single-Component Polypeptide Hydrogels:The Gelation Mechanism, Superior Biocompatibility,High Performance Hemostasis,and Scarless Wound Healing.*Advanced Healthcare Materials*
- [32] Tang,A.,Li,Y.,Yao,Y.,Yang,X.,Cao,Z.,Nie,H.,&Yang,G.(2021).Injectable keratin hydrogels as hemostatic and wound dressing materials. Biomaterials Science.
- [33] Han,K.,Bai,Q.,Wu,W.,Sun,N.,Cui,N.,&Lu,T.(2021).Gelatin-based adhesive hydrogel with self-healing,hemostasis,and electrical conductivity.International Journal of Biological Macromolecules.
- [34] Zhang,B.,He,J.,Shi,M.,Liang,Y.,&Guo,B.(2020).Injectable self-healing supramolecular hydrogels with conductivity and photo-thermal antibacterial activity to enhance complete skin regeneration.Chemical Engineering Journal.
- [35] Zhong,Y.,Seidi,F.,Li,C.,Wan,Z.,Jin,Y.,Song,J.,&Xiao,H.(2021).Antimicrobial/biocompatible hydrogels dual-reinforced by cellulose as ultrastretchable and rapid self-healing wound dressing.*Biomacromolecules*.
- [36] Zhao,D.,Würger,A.,&Crispin,X.(2021).Ionic thermoelectric materials and devices.Journal of Energy Chemistry.
- [37] Liu,J.,Wang,S.,Gao,Y.,et al.(2022).Conductive self-healing hydrogels for wound dressings.Advanced Functional Materials.
- [38] Prabhakar,P.K.,Tunnicliffe,D.,Kalhan,A.,et al.(2023).Nanomaterials and diabetic wound healing.
- [39] Iglesias Blanco,N.(2020).Drug encapsulation and controlled release via stimuli responsive polymeric materials.
- [40] Zhao,M.,Mu,F.,Lin,R.,et al.(2024).Chinese medicine-derived salvianolic acid B for disease therapy.The American Journal of Chinese Medicine.
- [41] Wang,Y.,Xie,R.,Li,Q.,Dai,F.,Lan,G.,Shang,S.,&Lu,F.(2020).A self-adapting hydrogel based on chitosan/oxidized konjac glucomannan/ AgNPs for repairing irregular wounds.Biomaterials Science.
- [42] Ding,C.,Tian,M.,Feng,R.,Dang,Y.,&Zhang,M.(2020).Novel self-healing hydrogel with injectable,strain-sensitive,promoting wound - healing,and hemostatic properties based on collagen and chitosan.ACS Biomaterials Science&Engineering.
- [43] Wang,Y.,He,C.,Chen,C.,Dong,W.,Yang,X.,Wu,Y.,Kong,Q.,&Yan,B.(2022).Thermoresponsive self-healing zwitterionic hydrogel as an in situ gelling wound dressing for rapid wound healing.ACS Applied Materials&Interfaces.
- [44] Xu,H.,Li,X.,Zhang,J.,et al.(2021).Self-healing hydrogel-based bioelectronic interfaces for wound monitoring.Nature Communications.
- [45] Peng,X.,Peng,Q.,Wu,M.,Wang,W.,Gao,Y.,Liu,X.,Sun,Y.,...&Zeng,H.(2023).A pH and temperature dual-responsive microgel-embedded, adhesive,and tough hydrogel for drug delivery and wound healing.*ACS Applied Materials&Interfaces*.
- [46] Shi,W.,Kong,Y.,Su,Y.,Kuss,M.A.,Jiang,X.,Li,X.,Xie,J.,&Duan,B.(2021).Tannic acid-inspired,self-healing,and dual stimuli responsi-

ve dynamic hydrogel with potent antibacterial and anti-oxidative properties.*Journal of Materials Chemistry.B*.

[47] Wang,Y.,Wu,Y.,Long,L.,Yang,L.,Fu,D.,Hu,C.,Kong,Q.,&Wang,Y.(2021).Inflammation-responsive drug-loaded hydrogels with sequential hemostasis,antibacterial,and anti-inflammatory behavior for chronically infected diabetic wound treatment.*ACS Applied Materials&Interfaces*.

[48] Zhao,S.,Hu,M.,et al.(2021).Multifunctional Stimuli-Responsive Hydrogel Wound Dressings with Antibacterial and Antioxidant Properties.Materials Science and Engineering C,106,110-118.

[49] Fan,L.,He,Z.,Peng,X.,Xie,J.,Su,F.,Wei,D.-X.,Zheng,Y.,&Yao,D.(2021).Injectable,intrinsically antibacterial conductive hydrogels with self-healing and pH stimulus responsiveness for epidermal sensors and wound healing.*ACS Applied Materials&Interfaces*.

[50] Guo,C.,Wu,Y.,Li,W.,Wang,Y.,&Kong,Q.(2022).Development of a microenvironment-responsive hydrogel promoting chronically infected diabetic wound healing through sequential hemostatic,antibacterial,and angiogenic activities.*ACS Applied Materials&Interfaces*.