

导电纳米复合水凝胶在颅脑创伤修复中的研究进展



杨 景¹, 卞子薇², 高若妍², 孙洪涛²

1. 中国人民武装警察部队特色医学中心康复医学科 (天津 300162)
2. 中国人民武装警察部队特色医学中心脑疾病中心 (天津 300162)

【摘要】 颅脑创伤是一种严重威胁神经功能的疾病, 亟需高效的修复材料以促进神经再生和功能恢复。导电纳米复合水凝胶 (conductive nanocomposite hydrogels, CNHs) 因兼具优异的电导性、生物相容性及良好的机械性能, 成为近年来神经组织工程领域的研究热点。本文系统梳理了 CNHs 的材料组成与结构设计, 重点阐述其在调控电活性微环境、促进神经细胞增殖、调节炎症反应及抗氧化应激中的关键作用。通过分析碳基纳米材料、金属纳米粒子及导电高分子等组分的协同效应, 揭示了机械性能调控、电导率调控、仿生微环境调控等多功能化设计可通过强化神经细胞电信号传导、抑制促炎因子释放, 显著提升颅脑创伤修复效果。同时, 本文还探讨了当前研究中存在的生物安全性、长期稳定性及临床转化的挑战, 并展望了未来 CNHs 在颅脑创伤精准治疗中的应用前景, 以期推动 CNHs 在神经修复领域的创新发展, 并为相关领域研究提供参考。

【关键词】 导电纳米复合水凝胶; 颅脑创伤; 神经修复; 微环境; 纳米材料

【中图分类号】 R 318.08 **【文献标识码】** A

Research progress of conductive nanocomposite hydrogels in traumatic brain injury repair

YANG Jing¹, BIAN Ziwei², GAO Ruoyan², SUN Hongtao²

1. Department of Rehabilitation Medicine, Characteristic Medical Center of Chinese People's Armed Police Force, Tianjin 300162, China

2. Center for Brain Diseases, Characteristic Medical Center of Chinese People's Armed Police Force, Tianjin 300162, China

Corresponding author: SUN Hongtao, Email: chenmo333@163.com

【Abstract】 Traumatic brain injury is a disease that severely threatens neural function, and there is an urgent need for efficient repair materials to promote neural regeneration and functional recovery. Conductive nanocomposite hydrogels (CNHs) have emerged as research hotspot in the field of neural tissue engineering in recent years due to their excellent electrical conductivity, biocompatibility and good mechanical properties. This article systematically reviews the material composition and structural design of CNHs, focusing on their critical roles in

DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202601044

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32571178)

通信作者: 孙洪涛, 主任医师, 博士研究生导师, Email: chenmo333@163.com

<https://slyyx.whuznhmedj.com/>

regulating electroactive microenvironments, promoting neural cell proliferation, modulating inflammatory responses and mitigating oxidative stress. Through analyzing the synergistic effects of components such as carbon-based nanomaterials, metal nanoparticles and conductive polymers, it has been revealed that multifunctional designs, including the regulation of mechanical properties, electrical conductivity, and biomimetic microenvironments, can significantly enhance the repair effect of traumatic brain injury by reinforcing electrical signal transmission in neural cells and inhibiting the release of pro-inflammatory factors. Furthermore, this paper also discusses the challenges in current research regarding biosafety, long-term stability and clinical translation, while prospecting the future application prospects of CNHs in precise treatment of traumatic brain injury. The aim is to promote the innovative development of CNHs in the field of neural repair and provide references for related research.

【Keywords】 Conductive nanocomposite hydrogels; Traumatic brain injury; Neural repair; Microenvironment; Nanomaterials

颅脑创伤作为神经系统中最常见且复杂的损伤类型之一,严重威胁患者的生命安全及生活质量。其病理机制涉及初始机械损伤及继发性病理过程,如炎症反应、细胞凋亡及神经退行性变化等,导致神经元功能受损和组织结构破坏,进而限制神经再生和功能恢复^[1]。现有治疗手段主要聚焦减轻炎症、控制水肿、阻断继发性损伤及促进神经再生,效果较有限,尤其是在复杂的颅脑环境中有效促进神经组织的结构重塑和功能恢复是临床面临的重大挑战^[2]。颅脑创伤后脑组织的损伤修复不仅需要应对神经细胞的损失,还须管理伴随的神经炎症和微环境变化,这些因素共同决定了治疗的成败^[3]。在传统神经修复材料中,水凝胶虽具备良好的生物相容性和保湿性,但无法模拟神经组织的电信号传导微环境,难以有效促进神经元功能恢复^[4];生物陶瓷材料机械强度较高,但脆性大、降解速率缓慢,且生物相容性有限,易引发局部炎症反应^[5];传统高分子支架虽能提供一定的结构支撑,但功能单一,难以同时满足电信号调控、炎症调节等多重修复需求^[6]。

近年来,导电纳米复合水凝胶(conductive nanocomposite hydrogels, CNHs)逐渐成为神经修复领域的研究热点。CNHs结合了导电材料的优良电子传导特性和水凝胶的三维仿生结构,能够构建出类似神经组织的电活性微环境,为神经元的电信号传递和细胞功能恢复提供了理想的载体平台^[7]。随着碳基纳米材料、金属纳米粒子及导电高分子技术的快速发展,CNHs的设计与制备技术日趋成熟。多种材料的复合不仅提升了导电

性能和力学强度,还增强了材料与神经细胞的相容性和功能整合能力。同时,3D打印等先进制造技术的应用使CNHs在形态和结构上更贴近生理需求,能够实现个性化定制,满足复杂颅脑损伤修复的需求^[8-9]。这种纳米复合水凝胶的多尺度结构赋予其优异的生物力学性能和电化学特性,为临床神经修复提供了新的思路和可能。本文对CNHs在颅脑创伤中的应用进行综述,探讨其在促进神经元功能恢复、调控神经炎症及促进组织重塑中的多维优势,旨在为颅脑创伤的治疗新策略提供参考。

1 导电纳米复合水凝胶的组成部分

1.1 碳基纳米材料

碳基纳米材料,特别是碳纳米管和石墨烯衍生物,因其卓越的导电性和机械强度,成为CNHs的核心组成部分。碳纳米管因其一维纳米结构,可以提供优异的载流通道,增强水凝胶的整体电子传导能力,促进神经细胞的轴突再生和电活动恢复。石墨烯及其氧化还原衍生物则因其二维蜂窝状结构,具有极高的比表面积和优异的电导率,且能增强水凝胶的机械弹性和韧性,从而为神经组织提供更稳定的支撑环境。石墨烯的二维特性有助于模拟神经细胞外基质的平面结构,可促进细胞黏附和生长^[10]。然而,碳基纳米材料本身的生物相容性较差。由于纳米材料比表面积大,分子间作用力会驱动它们自发相互吸引,形成尺寸更大的团聚体,即使通过超声等手段暂时分散,团聚体也容易在短时间内重新聚集,无法长期保持均匀状态。团聚体可能被免疫

细胞识别为异物,引发炎症反应^[11]。因此,需要引入表面改性技术,如聚合物包覆法和接枝改性法,提升碳基纳米材料的分散性,进而提升 CNHs 的稳定性和可控性^[12]。其中聚合物包覆法操作简便、成本较低,适用于大规模制备。Zhang 等采用聚乙二醇包覆多壁碳纳米管后,其在水凝胶基质中 14 天内无明显团聚,复合水凝胶的细胞存活率较未改性组提升了 35%^[13]。接枝改性法可精准提升生物相容性,但其合成步骤复杂,适合对生物相容性要求极高的场景。Li 等将具有生物活性的精氨酸甘氨酸天冬氨酸多肽接枝于氧化石墨烯表面,构建了一种新型仿生纳米界面,显著提升了其生物相容性,促进了人牙周膜成纤维细胞在生物膜表面的黏附与增殖^[14]。

1.2 金属纳米粒子

金属纳米粒子在 CNHs 中主要发挥功能整合作用。首先,铁氧化物纳米粒子赋予水凝胶显著的磁响应性能,使得水凝胶能在外加磁场的作用下实现定向控制和靶向作用,有助于精准调控局部修复环境。Surkatti 等发现铁氧化物纳米粒子可以均匀分散于聚乙烯醇基纳米复合水凝胶中,显著改善了水凝胶的机械强度和稳定性,同时其超顺磁特性为生物载体的磁控输送提供了技术基础^[15]。其次,金属粒子可作为功能性纳米模板,在复合水凝胶的三维网络结构中形成有利于神经细胞迁移和轴突延伸的微环境^[16]。纳米金属粒子能够通过调节水凝胶的电导率,促进神经细胞间的电信号传递,进一步促进神经再生和功能恢复^[17]。

1.3 导电高分子

导电高分子在 CNHs 中的功能主要表现为构建稳定且高效的电导网络。导电高分子的代表物质为聚(3,4-亚乙基二氧噻吩)和聚吡咯,二者不仅具有较高的电导率,还因其分子结构赋予了水凝胶良好的柔韧性和生物相容性,使得 CNHs 在机械性能上更贴近神经组织的力学特性,从而有效减少植入或应用过程中因机械不匹配导致的组织损伤和炎症反应。由于脑组织极其柔软且对机械刺激敏感,因此,这种机械匹配对于颅脑创伤的修复尤为关键,导电高分子水凝胶的柔韧性能使其能够顺应脑组织形变,维持良好的界面接触和长期稳定性^[18]。

2 导电纳米复合水凝胶的制备

2.1 纳米材料的均匀分散技术

由于纳米材料往往具有较高的表面能,容易发生团聚,导致复合材料内部结构不均匀,进而影响导电性和生物相容性。因此,采用有效的分散技术尤为重要。目前,表面修饰和超声分散是提升纳米材料在水凝胶中均匀分散的两大主流策略。表面修饰技术通过引入亲水性或功能性基团,改善纳米材料的表面性质,降低其团聚倾向。例如对碳纳米管进行非离子表面活性剂的处理,能够在纳米纤维束中实现多壁碳纳米管的均匀嵌入,显著提升复合水凝胶的热稳定性和电导性能^[19]。利用羟基、羧基等官能团对纳米粒子进行化学修饰,可增强其与水凝胶基体的相容性,抑制团聚,促进均匀分布。纳米纤维素材料通过化学、机械或酶学方法提取后,结合表面功能化处理,也能在水凝胶中实现良好的分散^[20]。Ullah 等将具有生物活性的锆和/或铁取代的羟基磷灰石纳米材料,经光交联性甲基丙烯酸酐化明胶进行化学表面修饰后,构建了有机/无机共交联水凝胶膜,该类共交联水凝胶膜/支架表现出机械性能增强、降解周期延长、pH 环境稳定、生物矿化能力改善及离子释放平稳等特性^[21]。超声分散作为一种物理方法,借助高频声波产生的空化效应,有效打散纳米材料的团聚体,促使其均匀分布于水凝胶溶液中。研究表明,利用超声分散技术制备的磁性纳米粒子嵌入树脂中,通过超薄切片技术观察,纳米粒子呈现出良好的分散均匀性,且在电子束轰击下稳定性增强,减少了仪器污染^[22]。采用超声处理后的表面修饰多壁碳纳米管能够均匀分散于聚酰胺纳米纤维中,制备出导电性能优异的纳米纤维束^[19]。

2.2 3D 打印技术

在 CNHs 的制备与应用中,3D 打印技术和微流控技术的结合为提升水凝胶的结构复杂性、空间精度及功能多样性提供了强有力的技术支撑。3D 打印技术利用其层层堆积的制造方式,能够精准构建具有复杂三维微观结构的水凝胶支架。3D 打印技术可以实现多孔结构的设计,促进营养物质和代谢废物的交换,从而更好地模拟颅脑组织的生理环境,增强修复效果。3D 打印技术还支持多材料、多功能的集成,实现导电纳米复合材料

与水凝胶基体的均匀融合,赋予材料更优异的电导性能和生物活性。Amini 等采用“冷化学气相聚合”工艺,将纤维素纳米纤维水凝胶的直写成型打印,随后经 Fe^{3+} 离子饱和并冷冻干燥,增加了材料的导电性和机械柔韧性^[23]。这种复杂结构的构建不仅提升了水凝胶的物理特性,还拓展了其在神经信号传导、伤口电刺激等功能性应用中的潜力^[24]。

2.3 微流控技术

微流控技术作为一种精准控制流体微环境的技术,能够实现纳米材料与水凝胶的高效、定制化组装。通过微流控芯片的设计,可以在微尺度上精确调控材料的流动、混合及反应过程,实现纳米复合材料的均匀分散和定向排列^[25]。有学者通过微流控技术将石墨烯纳米片、氧化铈纳米颗粒等导电组分精确组装入聚苯胺水凝胶中,不仅保证了材料的电导连续性,还增强了其对生物分子的电学响应能力,从而提升了水凝胶在生物传感和伤口电刺激中的应用效果^[26]。微流控技术支持小体积样本的连续处理和动态监测,对于颅脑创伤患者体内生物标志物的实时检测和治疗反馈调节具有重要价值。将 CNHs 集成进微流控平台,可以实现对病理微环境的精准模拟和干预,促进个性化修复方案的制定和实施。

3 导电纳米复合水凝胶的物理性能

3.1 机械性能调控

机械性能是 CNHs 的关键参数之一。通过合理调节纳米材料的含量和水凝胶的交联密度,可以实现水凝胶与脑组织相匹配的弹性和强度,从而更好地适应颅脑组织的生理环境。纳米材料如碳纳米管、多壁碳纳米管、石墨烯氧化物及导电高分子等,因其优异的机械性能,被广泛引入水凝胶基质中,形成纳米复合结构,显著提升了水凝胶的力学性能。研究发现,随着导电碳黑含量的增加,含有导电碳黑的明胶-壳聚糖纳米复合水凝胶机械性能得到显著改善,同时表现出与软组织相似的力学行为和优异的结构稳定性,适合支持电响应细胞的生长和组织再生^[27]。采用多重物理交联和纳米颗粒增强策略,如聚丙烯酰胺-丙烯酸共聚物与聚合物接枝纤维素纳米晶体的复合,利用界面氢键作用赋予水凝胶抗肿胀性能以及高达 1.5 MPa 的拉伸强度,还兼具快速自恢复

能力,适合在水环境中作为柔性应变传感器使用^[28]。交联密度的调节同样是机械性能优化的关键。通过控制水凝胶网络的交联程度,可以调节其弹性模量和断裂强度,使其力学性能趋近于脑组织的软弹性特征。在以聚乙烯醇为基质的纳米复合水凝胶中,纳米材料的引入显著增强了其机械强度,尤其是碳纳米管和石墨烯氧化物的掺杂,显著提升了水凝胶的延展性和强韧性^[29]。类似地,利用多壁碳纳米管作为增强剂和光引发体系,快速合成的聚丙烯酰胺/多壁碳纳米管复合水凝胶展现出优异的机械性能,能够满足 3D 打印及复杂结构制造的需求^[30]。

3.2 电导率调控

电导率的合理调节是实现有效神经信号传导和促进细胞功能恢复的关键因素。首先,通过调整纳米导电组分的种类和含量,可以显著改变水凝胶的电学性能。Arambula-Maldonado 等通过将多壁碳纳米管均匀分散于明胶甲基丙烯酸酯基胺和生物活性玻璃纳米复合水凝胶中,成功制备出具有类骨电机械性能且电导率显著提升的材料^[31]。其次,金属纳米颗粒和纳米线等也被用于提高水凝胶的电导率。Curry 等将超长银纳米线引入聚(N-异丙基丙烯酸酯)水凝胶中,不仅显著提升了电导率,还实现了温度响应性电性能的可逆切换,其最高电导率在湿润状态可达到较高水平,展现出优异的导电网络结构,有利于神经电信号的有效传导^[32]。Lim 等利用金纳米片增强的水凝胶纳米复合材料,实现了高达约 520 S/cm 的电导率及良好的拉伸性能,这种高导电且可拉伸的水凝胶特别适用于软性生物电子器件,能够满足神经修复对导电和柔韧性的双重需求^[33]。不同纳米组分的表面功能化和复合方式对电导率调节也有重要影响。通过引入多种功能性多糖修饰剂,如阿拉伯胶、羧甲基纤维素钠和黄原胶,与石墨烯基填料形成多重动态配位键,能够提升水凝胶的电学稳定性^[34]。

3.3 仿生微环境调控

纳米复合水凝胶因其三维多孔结构与优异的生物相容性,成为模拟脑组织微环境的理想材料之一。支架结构设计是三维水凝胶构建中的关键环节,有研究利用 3D 打印技术制造具有定向微通道的水凝胶支架,这些微通道为神经干细胞迁移和轴突延伸提供了物理指导,显著提升了细胞的空间排列和组织整合度^[35]。Da Silva 等利用胶

原蛋白和透明质酸等天然高分子复合制备的支架,能够在保证生物相容性的同时提供适宜的刚度和弹性环境,促进神经细胞的生长与分化^[36]。Chen 等通过结合碱性成纤维细胞生长因子和神经生长因子,以及干细胞的复合支架,不仅提供了结构支持,还促进了神经网络的再生和功能恢复^[37]。CNHs 的降解性能与颅脑创伤修复周期的匹配性也是仿生设计的重要考量因素之一。Zhang 等通过加入皮质多氯胺素,使水凝胶的降解速度降低,且药物释放速率变得均匀且缓慢,更加适配颅脑创伤急性期修复需求^[38]。

4 导电纳米复合水凝胶在颅脑创伤中的生物学功能

4.1 促进神经细胞增殖与分化

在颅脑创伤修复过程中,促进神经细胞的增殖与分化是实现神经功能恢复的关键步骤。CNHs 通过模拟和调控细胞微环境中的电信号,能够有效激活神经元膜电位,从而促进神经干细胞向神经元的分化。一方面,导电水凝胶中的碳纳米管等纳米材料为神经干细胞提供了良好的导电平台,可以激活细胞膜电位,增强细胞的电活动性,促进神经元的功能成熟。Xu 等开发的多功能导电大孔纳米复合水凝胶通过空气-水皮克林乳液模板制备,成功调控水凝胶的孔径、电导率和力学性能,显著促进了神经干细胞 NE-4C 的扩展和分化,显示出良好的神经再生潜力^[29]。另一方面,纳米材料的表面特性在调控细胞黏附与迁移方面发挥着重要作用。纳米复合水凝胶通过调整表面粗糙度、化学官能团及机械弹性,优化细胞与材料的界面相互作用,促进细胞黏附和迁移,进而增强细胞间的网络形成。一项针对外科手术中局部应用注射型纳米复合水凝胶的研究,利用羧甲基壳聚糖和氧化右旋糖多肽作为基质,负载多孔聚多巴胺纳米颗粒并携带地塞米松,展现了良好的生物相容性和抗氧化能力,同时在体内实验中未见明显毒副作用,且有效缓解了脑水肿,促进了神经元增殖,说明此类纳米复合水凝胶在保证安全性的同时具备良好的治疗潜力^[38]。这种复合材料的微环境调控作用有助于神经细胞形成稳定的细胞网络,推动神经组织的再生。

4.2 调控神经炎症反应

CNHs 通过其电活性微环境和多功能材料特

性,可发挥调控神经炎症反应的作用。颅脑创伤后,神经炎症作为继发性损伤的关键环节,主要表现为小胶质细胞和星形胶质细胞的激活、促炎因子的大量释放以及免疫细胞的异常浸润,这些过程加剧神经组织损伤,阻碍神经功能恢复。CNHs 内融合的免疫调节纳米组分,如碳基纳米材料、金属纳米颗粒和导电聚合物,能够协同发挥电学、生物活性和机械性能优势,调节脑损伤微环境中的炎症水平。Zhang 等将黑磷和甘草酸整合到甲基丙烯酸酯修饰的丝素蛋白中,构建可注射水凝胶,发现该水凝胶在脊髓损伤中可以促进巨噬细胞向抗炎 M2 表型极化,降低炎症因子的表达,改善炎症微环境,显示出了显著的神经修复作用^[39]。Han 等将集落刺激因子 1 受体抑制剂 PLX5622 与纳米颗粒水凝胶结合,应用于颅脑创伤损伤部位,发现其可有效清除损伤部位的小胶质细胞,抑制神经炎症并减少炎性因子释放,减轻脑水肿,促进了创伤性脑损伤小鼠模型的神经功能恢复^[40]。由此可见,CNHs 可通过结合免疫调节纳米组分,实现对脑损伤微环境中炎症反应的调控。

4.3 抗氧化应激作用

CNHs 的抗氧化应激作用主要依赖于纳米金属氧化物与导电聚合物的协同作用,这种复合材料能有效清除自由基,从而减轻氧化损伤。Kumar 等基于石墨烯纳米片与 CeO_2 纳米颗粒构建的复合体系,结合导电聚合物聚苯胺形成的水凝胶,不仅提供了良好的电子传导路径,还通过其三维多孔结构显著增强了对过氧亚硝酸根等活性氧自由基的电化学氧化能力,实现了高效的自由基清除^[26]。其中纳米金属氧化物如 CeO_2 具有优异的催化活性,能够模拟天然抗氧化酶的功能,催化过氧化物和其他活性氧种的分解,从而降低细胞外和细胞内的氧化压力。Pu 等构建的含有 MnO_2 纳米片的双网络天然生物基水凝胶体系,可以加速清除活性氧并局部释放氧气,显著降低细胞内活性氧水平,减轻氧化应激引发的细胞损伤和凋亡^[41]。但 MnO_2 降解较快,且降解产物 Mn^{2+} 在体内蓄积可能导致神经毒性,若能验证出 MnO_2 的最佳应用浓度,将在颅脑创伤中展现出良好的应用前景。这一策略通过强化水凝胶的生物活性,调节微环境中的氧化还原平衡,可能有助于促进颅脑创伤后的组织修复。

5 展望

颅脑创伤由于其病理机制复杂且患者个体差异显著,传统治疗方案往往难以满足不同类型颅脑创伤患者的需求。因此,基于个性化治疗理念设计定制化的 CNHs 成为未来的主要研究方向。例如针对急性期血脑屏障破坏和神经炎症反应,水凝胶可以设计成具有抗炎和促进血脑屏障修复的功能材料;而在亚急性及慢性期,则侧重于促进神经再生和调控持续低度炎症的材料属性,从而为不同病理阶段的颅脑创伤提供多样化的修复策略。此外,依托智能响应技术使水凝胶能够根据外部环境或病理状态的变化,实现动态调控药物释放或电刺激强度,也是未来研究的重点。尽管当前存在智能响应灵敏度不足及诊疗一体化设备难以微型化等问题,但随着脑机接口和纳米技术的发展,未来 CNHs 有望集成多种功能,实现诊疗一体化,进一步提升颅脑创伤患者的康复质量。

参考文献

- Nout-Lomas YS. Traumatic nervous system injury[J]. Vet Clin North Am Equine Pract, 2022, 38(2): 363-377. DOI: [10.1016/j.cveq.2022.04.005](#).
- Theus MH. Neuroinflammation and acquired traumatic CNS injury: a mini review[J]. Front Neurol, 2024, 15: 1334847. DOI: [10.3389/fneur.2024.1334847](#).
- Cente M, Matyasova K, Csicsatkova N, et al. Traumatic microRNAs: deconvolving the signal after severe traumatic brain injury[J]. Cell Mol Neurobiol, 2023, 43(3): 1061-1075. DOI: [10.1007/s10571-022-01254-z](#).
- Lorke M, Kuth S, Frischknecht R, et al. Development of oxidized hyaluronic acid based hydrogels for neuronal tissue engineering: effects of matrix stiffness on primary neurons[J]. Acta Biomater, 2025, 205: 454-466. DOI: [10.1016/j.actbio.2025.09.007](#).
- Su Z, Guo C, Gui X, et al. 3D printing of customized bioceramics for promoting bone tissue regeneration by regulating sympathetic nerve behavior[J]. J Mater Chem B, 2024, 12(17): 4217-4231. DOI: [10.1039/d4tb00214h](#).
- Du Jiahui, Yilei H, Yulan L, et al. Advanced biomaterial-based strategies for craniofacial bone regeneration[J]. Biomaterials, 2026, 327: 123736. DOI: [10.1016/j.biomaterials.2025.123736](#).
- Raciti L, Raciti G, Calabrò RS. What is new in spinal cord injury management: a narrative review on the emerging role of nanotechnology[J]. Biomedicines, 2025, 13(9): 2176. DOI: [10.3390/biomedicines13092176](#).
- Marin MM, Gifu IC, Pircalabioru GG, et al. Microbial polysaccharide-based formulation with silica nanoparticles: a new hydrogel nanocomposite for 3D printing[J]. Gels, 2023, 9(5): 425. DOI: [10.3390/gels9050425](#).
- Cernescu AI, Dinu AI, Stancu IC, et al. Nanoengineered biomimetic hydrogels: A major advancement to fabricate 3D-printed constructs for regenerative medicine[J]. Biotechnol Bioeng, 2022, 119(3): 762-783. DOI: [10.1002/bit.28020](#).
- Lu T, Chen Y, Sun M, et al. Multifunctional carbon-based nanocomposite hydrogels for wound healing and health management[J]. Gels, 2025, 11(5): 345. DOI: [10.3390/gels11050345](#).
- Swathi S, Yuvakkumar R, Ravi G, et al. Copper molybdenum sulfide coupled with multi-walled carbon nanotube nanocomposite for robust water splitting process[J]. CARBON, 2024, 229: 119466. DOI: [10.1016/j.carbon.2024.119466](#).
- Lin Y, Wu A, Zhang Y, et al. Recent progress of nanomaterials-based composite hydrogel sensors for human-machine interactions[J]. Discov Nano, 2025, 20(1): 60. DOI: [10.1186/s11671-025-04240-8](#).
- Zhang M, Shen W, Jiang Q, et al. Engineering a curcumin-loaded porphyrinic metal-organic framework for enhanced cancer photodynamic therapy[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2022, 214: 112456. DOI: [10.1016/j.colsurfb.2022.112456](#).
- Li JJ, Zheng LL, Lin Z, et al. RGD Peptide-grafted graphene oxide as a new biomimetic nanointerface for impedance-monitoring cell behaviors[J]. Journal of Nanomaterials, 2016, (1): 2828512. DOI: [10.1155/2016/2828512](#).
- Surkatti R, van Loosdrecht M, Hussein IA, et al. PVA-TiO(2) nanocomposite hydrogel as immobilization carrier for gas-to-liquid wastewater treatment[J]. Nanomaterials (Basel), 2024, 14(3): 249. DOI: [10.3390/nano14030249](#).
- Carvalho T, Bártolo R, Pedro SN, et al. Injectable nanocomposite hydrogels of gelatin-hyaluronic acid reinforced with hybrid lysozyme nanofibrils-gold nanoparticles for the regeneration of damaged myocardium[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2023, 15(21): 25860-25872. DOI: [10.1021/acsami.3c03874](#).
- Wen N, Jiang B, Wang X, et al. Overview of polyvinyl alcohol nanocomposite hydrogels for electro-skin, actuator, supercapacitor and fuel cell[J]. Chem Rec, 2020, 20(8): 773-792. DOI: [10.1002/ter.202000001](#).
- Moghaddasi M, Oktay B, Bingol AB, et al. Conductive nanocomposite hydrogels for neural tissue engineering: a systematic scoping review of recent trends[J]. Adv Sci (Weinh), 2025, 12(38): e16085. DOI: [10.1002/adv.202416085](#).
- Dou H, Liu P, Li XY, et al. Effect of MWCNT on the structure and property of nanofibrous bundles by blown bubble spinning[J]. Recent Pat Nanotechnol, 2019, 13(3): 171-180. DOI: [10.2174/1872210513666190426143559](#).
- Antony Jose S, Cowan N, Davidson M, et al. A comprehensive review on cellulose nanofibers, nanomaterials, and composites: manufacturing, properties, and applications[J]. Nanomaterials (Basel), 2025, 15(5): 356. DOI: [10.3390/nano15050356](#).
- Ullah I, Hussain Z, Zhang YJ, et al. Inorganic nanomaterial-reinforced hydrogel membrane as an artificial periosteum[J]. Applied Materials Today, 2024, 39: 102281. DOI: [10.1016/j.apmt.2022.101532](#).
- Bian L, Cao Q, Zheng L, et al. Ultramicrotomy preparation of

- magnetic nanoparticles for transmission electron microscopy[J]. *Ultramicroscopy*, 2021, 227: 113275. DOI: [10.1016/j.ultramicro.2021.113275](https://doi.org/10.1016/j.ultramicro.2021.113275).
- 23 Amini M, Hashemi SA, Yu Z, et al. Flexible 3D-printed cellulosic constructs for EMI shielding and piezoresistive sensing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2025, 10(10): 2401898. DOI: [10.1002/admt.202401898](https://doi.org/10.1002/admt.202401898).
 - 24 Jović M, Prim D, Paciotti G, et al. Engineering a diagnostic platform based on a spatially resolved electrochemiluminescence immunoassay for low-plex biomarker detection at point-of-care: mild traumatic brain injury and cardiac applications[J]. *Lab Chip*, 2025, 25(21): 5428–5438. DOI: [10.1039/d5lc00360a](https://doi.org/10.1039/d5lc00360a).
 - 25 刘诗宇, 潘大伟, 汪伟. 微流控可控制备聚乙烯醇/多壁碳纳米管复合导电水凝胶微纤维[J]. *现代化工*, 2026, 46(1): 199–206. [Liu SY, Pan DW, Wang W. Controllable microfluidic fabrication of polyvinyl alcohol/multi-walled carbon nanotubes composite conductive hydrogel microfibers[J]. *Modern Chemical Industry*, 2026, 46(1): 199–206.] DOI: [10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.033](https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.033).
 - 26 Kumar V, Matai I, Kumar A, et al. GNP-CeO₂-polyaniline hybrid hydrogel for electrochemical detection of peroxynitrite anion and its integration in a microfluidic platform[J]. *Mikrochim Acta*, 2021, 188(12): 436. DOI: [10.1007/s00604-021-05105-4](https://doi.org/10.1007/s00604-021-05105-4).
 - 27 Dey K, Sandrini E, Gobetti A, et al. Designing biomimetic conductive gelatin-chitosan-carbon black nanocomposite hydrogels for tissue engineering[J]. *Biomimetics (Basel)*, 2023, 8(6): 473. DOI: [10.3390/biomimetics8060473](https://doi.org/10.3390/biomimetics8060473).
 - 28 Chen Y, Wu W, Cao X, et al. Induction of polymer-grafted cellulose nanocrystals in hydrogel nanocomposites to increase anti-swelling, mechanical properties and conductive self-recovery for underwater strain sensing[J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 274(Pt 2): 133410. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2024.133410](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133410).
 - 29 Xu M, Li Q, Fang Z, et al. Conductive and antimicrobial macroporous nanocomposite hydrogels generated from air-in-water Pickering emulsions for neural stem cell differentiation and skin wound healing[J]. *Biomater Sci*, 2020, 8(24): 6957–6968. DOI: [10.1039/d0bm01466d](https://doi.org/10.1039/d0bm01466d).
 - 30 Gallastegui A, Dominguez-Alfaro A, Lezama L, et al. Fast visible-light photopolymerization in the presence of multiwalled carbon nanotubes: toward 3D printing conducting nanocomposites[J]. *ACS Macro Lett*, 2022, 11(3): 303–309. DOI: [10.1021/acsmacrolett.1c00758](https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.1c00758).
 - 31 Arambula-Maldonado R, Liu Y, Xing M, et al. Bioactive and electrically conductive GelMA-BG-MWCNT nanocomposite hydrogel bone biomaterials[J]. *Biomater Adv*, 2023, 154: 213616. DOI: [10.1016/j.bioadv.2023.213616](https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213616).
 - 32 Curry F, Lim T, Fontaine NS, et al. Highly conductive thermoresponsive silver nanowire PNIPAM nanocomposite for reversible electrical switch[J]. *Soft Matter*, 2022, 18(37): 7171–7180. DOI: [10.1039/d2sm00700b](https://doi.org/10.1039/d2sm00700b).
 - 33 Lim C, Lee S, Kang H, et al. Highly conductive and stretchable hydrogel nanocomposite using whiskered gold nanosheets for soft bioelectronics[J]. *Adv Mater*, 2024, 36(39): e2407931. DOI: [10.1002/adma.202407931](https://doi.org/10.1002/adma.202407931).
 - 34 Tomić NZ, Ghodhbane M, Matouk Z, et al. Enhancement of self-healing efficacy of conductive nanocomposite hydrogels by polysaccharide modifiers[J]. *Polymers (Basel)*, 2023, 15(3): 516. DOI: [10.3390/polym15030516](https://doi.org/10.3390/polym15030516).
 - 35 Jiang J, Liu X, Chen H, et al. 3D printing collagen/heparin sulfate scaffolds boost neural network reconstruction and motor function recovery after traumatic brain injury in canine[J]. *Biomater Sci*, 2020, 8(22): 6362–6374. DOI: [10.1039/d0bm01116a](https://doi.org/10.1039/d0bm01116a).
 - 36 Da Silva K, Kumar P, van Vuuren SF, et al. Three-dimensional printability of an ecm-based gelatin methacryloyl (GelMA) biomaterial for potential neuroregeneration[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(33): 21368–21383. DOI: [10.1021/acsomega.1c01903](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01903).
 - 37 Chen M, Ye Y, Wang T, et al. Neural network reconstruction and motor function recovery in traumatic brain injury rat models via a 3D collagen/heparan/bFGF/NGF scaffold combined with mesenchymal stem cells combined scaffold-msc therapy for tbi repair[J]. *J Neural Eng*, 2025, 22(5). DOI: [10.1088/1741-2552/ae09fd](https://doi.org/10.1088/1741-2552/ae09fd).
 - 38 Zhang B, Bai M, Yang M, et al. Injectable nanocomposite hydrogel for localized precision delivery of dexamethasone after traumatic brain injury: dual modulation of neuroinflammation and blood-brain barrier restoration[J]. *J Transl Med*, 2025, 23(1): 579. DOI: [10.1186/s12967-025-06528-w](https://doi.org/10.1186/s12967-025-06528-w).
 - 39 Zhang B, Wang W, Gao P, et al. Injectable, electroconductive, free radical scavenging silk fibroin/black phosphorus/glycyrrhizic acid nanocomposite hydrogel for enhancing spinal cord repair[J]. *Adv Healthc Mater*, 2024, 13(18): e2304300. DOI: [10.1002/adhm.202304300](https://doi.org/10.1002/adhm.202304300).
 - 40 Han Y, Gu J, Xu M, et al. Intraoperative application of an antioxidant nanoparticle-hydrogel targeting microglia regulates neuroinflammation in traumatic brain injury[J]. *J Nanobiotechnology*, 2025, 23(1): 599. DOI: [10.1186/s12951-025-03682-7](https://doi.org/10.1186/s12951-025-03682-7).
 - 41 Pu Y, Wang P, Yang R, et al. Bio-fabricated nanocomposite hydrogel with ROS scavenging and local oxygenation accelerates diabetic wound healing[J]. *J Mater Chem B*, 2022, 10(21): 4083–4095. DOI: [10.1039/d2tb00343k](https://doi.org/10.1039/d2tb00343k).

收稿日期: 2026 年 01 月 16 日 修回日期: 2026 年 08 月 06 日
 本文编辑: 张 苗 黄 笛

引用本文: 杨景, 卞子薇, 高若妍, 等. 导电纳米复合水凝胶在颅脑创伤修复中的研究进展[J]. 数理医药学杂志, 2026, 39(8): 598–604. DOI: [10.12173/j.issn.1004-4337.202601044](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202601044).
 Yang J, Bian ZW, Gao RY, et al. Research progress of conductive nanocomposite hydrogels in traumatic brain injury repair [J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2026, 39(8): 598–604. DOI: [10.12173/j.issn.1004-4337.202601044](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202601044).