

# 多种检测方法在生物医学材料领域的应用

崔小虎<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北民族大学生命科学与工程学院, 兰州 730030;

2. 西北民族大学中国与马来西亚国家联合实验室, 兰州 730030)

**摘要:** 本文聚焦生物医学材料领域, 系统阐述多种检测技术与方法的应用, 深入分析了天然产物、合成聚合物等材料设计及性能检测, 探讨3D生物打印、水凝胶等生物制造技术相关检测。通过具体实例, 以丝素蛋白的氨基酸分析技术、胶原蛋白的差示扫描量热法、壳聚糖的核磁共振检测等为例, 解析不同材料性能优化路径, 为生物医学材料在伤口愈合等场景的创新应用提供技术支撑, 助力材料研发与临床转化。

**关键词:** 检测技术; 生物医学材料; 材料设计; 性能检测; 伤口愈合

## 0 引言

生物医学材料的性能优劣直接关乎其在医疗领域的应用效果与患者健康。由细胞外基质(extracellular matrix, ECM)启发的生物材料在伤口愈合等方面展现出巨大潜力, 而准确评估其特性, 离不开多样化的检测技术与方法。检测技术贯穿于生物医学材料从设计到临床应用的各个环节, 对材料的研发、优化及质量控制起着关键作用, 是推动生物医学材料发展的重要基石<sup>[1]</sup>。本文通过系统梳理多种检测技术在生物医学材料领域的应用, 深入探讨天然产物、合成聚合物及生物制造技术的材料设计、性能评估与检测手段, 旨在为生物医学材料发展提供全面参考。

## 1 伤口愈合过程与检测需求

### 1.1 伤口愈合的多阶段复杂生理过程

伤口愈合是一个极为复杂且动态的过程, 这一过程涵盖止血、炎症、增殖和重塑四个紧密相连且相互重叠的阶段。止血作为伤口愈合的起始阶段, 血小板迅速聚集于受损血管处, 形成血栓以阻止出血, 同时维持血管的完整性。炎症阶段, 中性粒细胞和巨噬细胞分泌促炎性细胞因子并浸润伤口部位, 巨噬细胞对细胞外间质(包括天然ECM分子及其降解产物)产生反应, 清除死亡细胞, 并抑制伤口中免疫细胞的过度活化, 从而有效消除炎症。增殖阶段中成纤维细胞迁移至伤口区域, 开始合成胶原蛋白和其他ECM成分, 进而形成肉芽组织同时, 上皮细胞不断迁移和增殖, 逐渐覆盖伤口表面, 新血管也随之生成, 为新组织提供必要的营养和氧气, 并协助

清除代谢废物。伤口重塑阶段是愈合的最后阶段, 胶原蛋白和其他ECM成分重新排列组合, 增强伤口区域的愈合强度和功能, 加速伤口的最终愈合。

### 1.2 各阶段伤口愈合与生物医学材料的检测需求

ECM是一个复杂的细胞外分子网络, 在伤口愈合过程中发挥着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。它不仅为细胞提供必要的结构支架, 还影响细胞的增殖、黏附、迁移等多种行为。ECM主要由胶原、蛋白聚糖、层粘连蛋白等多种成分组成。生物医学材料在伤口愈合的不同阶段均可产生重要影响, 针对各阶段开展相应的检测十分必要。

在增殖阶段, 需重点检测生物医学材料对成纤维细胞增殖以及胶原蛋白分泌的影响。可运用细胞计数法、细胞检测技术等检测成纤维细胞的增殖情况; 采用酶联免疫吸附分析等方法测定胶原蛋白的分泌量, 以此评估生物医学材料对新组织形成的促进作用<sup>[3-4]</sup>。在重塑阶段, 核心任务是评估生物医学材料对新形成的ECM结构和功能的影响。借助免疫组化、蛋白质印迹法等技术分析ECM成分表达和分布变化; 通过力学测试可以评估伤口愈合强度。这些检测结果有助于深入理解伤口愈合机制, 为优化生物医学材料的设计提供有力依据。

## 2 生物医学材料及检测技术

### 2.1 天然产物和合成聚合物材料的检测

#### 2.1.1 丝素蛋白

丝素蛋白作为天然高分子蛋白质, 展现出良好的机械性能、生物相容性以及生物可降解性, 但其抗菌活性较为

\* 通信作者: 崔小虎, 硕士, 研究方向为兽医学。E-mail: xiaohucui0717@163.com

匮乏。在材料设计环节,氨基酸分析技术能够精准剖析丝素蛋白的组成成分;圆二色谱则可测定丝素蛋白的二级结构,为后续优化材料性能奠定坚实基础。在性能检测方面,拉伸试验能有效检测其机械强度,体外酶解实验可用于评估降解速率。在伤口愈合的应用中,研究发现特定结构的丝素蛋白材料,在伤口愈合初期能提供约 10 MPa 的拉伸强度,满足伤口对力学支撑的需求;同时,在体外酶解实验中,丝素蛋白在模拟生理环境下 30 d 降解约 30%,降解速率较为适宜<sup>[5-7]</sup>。丝素蛋白检测技术优势明显,分析方法较为成熟;然而,其抗菌性不足的问题限制了部分应用,且对复杂环境的适应性有待提升。

### 2.1.2 胶原蛋白

胶原蛋白作为 ECM 的核心构成部分,拥有众多优良特性。在设计过程中,基因工程技术可对其来源进行定向改造,蛋白质组学分析则助力优化其结构。差示扫描量热法(DSC)用于测定胶原蛋白的热稳定性,原子力显微镜(AFM)可清晰观察其微观结构<sup>[6]</sup>。研究显示,某胶原蛋白材料的热分解温度可达 250 °C,展现出良好的热稳定性;通过 AFM 观察到其纤维直径均匀,约为 50 nm,这种微观结构有利于细胞的黏附和生长。在伤口敷料等应用场景中,利用检测技术优化的胶原蛋白敷料,相较于普通敷料能使伤口愈合时间缩短 15%~20%。基因工程与蛋白质组学结合的检测技术,为胶原蛋白性能优化提供了强大工具,但技术成本较高,对实验设备和操作人员要求苛刻<sup>[7]</sup>。

### 2.1.3 壳聚糖

壳聚糖具备抗菌、促进细胞增殖等特性。在设计阶段,核磁共振用于分析其脱乙酰度,从而明确其性能;X 射线衍射分析结晶结构,为材料优化指明方向。性能检测时,流变仪测定溶液流变性能,降解实验监测不同环境中的降解速率<sup>[8-10]</sup>。生物医学领域,如在组织工程支架应用中,特定的脱乙酰度和结晶结构的壳聚糖支架,在模拟生理溶液中 20 d 降解约 20%,细胞数量在 7 d 内增长约 3 倍。壳聚糖检测技术能够充分挖掘其独特性能,但实验过程中对环境因素较为敏感,检测结果的重复性需要通过精准控制实验条件来保障。

### 2.1.4 聚乙烯醇

聚乙烯醇(PVA)凭借多种优良性能,在生物医学领域得以广泛应用。在设计阶段,傅里叶变换红外光谱(FT-IR)可精准测定其化学结构,凝胶渗透色谱(GPC)用于测定分子量及其分布。性能检测时,拉伸试验测定机械强度,热重分析(TGA)检测热稳定性。在生物医学应用中,如作为人工角膜材料,经检测优化的 PVA 材料,因其合

适的机械强度和热稳定性,能在眼内环境中长期保持结构稳定,同时细胞培养实验表明其生物相容性良好,细胞存活率可达 90% 以上<sup>[11-13]</sup>。PVA 检测技术成熟,检测结果准确可靠,但对于复杂结构的 PVA 材料,某些检测方法的分辨率仍有待提高。

### 2.1.5 聚己内酯

聚己内酯(PCL)作为合成可生物降解脂肪族聚合物,具有多种优异特性。在设计时,DSC 测定其熔融温度和结晶度,通过 GPC 控制分子量。性能检测方面,动态力学分析(DMA)研究其黏弹性,体外降解实验监测其降解行为<sup>[14]</sup>。例如,某 PCL 材料的熔融温度约为 60 °C,结晶度约为 40%,在体外模拟体液环境中,60 d 降解约 50%,且 DMA 分析显示其在体温环境下具有良好的黏弹性,能适应组织的动态力学需求。在药物缓释微球应用中,基于这些检测数据制备的 PCL 微球,能实现药物的长期稳定释放,有效延长药物作用时间。PCL 检测技术能够全面评估其性能,但体内实验周期较长,限制了研究效率<sup>[15]</sup>。

### 2.1.6 聚乙二醇

聚乙二醇(PEG)在工业和医疗领域应用广泛。在设计阶段,质谱(MS)精确测定分子量,高效液相色谱(HPLC)检测纯度<sup>[16]</sup>。性能检测方面,表面张力仪测定表面活性。例如,某 PEG 产品经 MS 测定分子量,HPLC 检测纯度达 99% 以上,表面张力仪测定其表面张力在 30 mN/m 左右,这种低表面张力使其在药物增溶、改善材料亲水性等方面表现出色。在药物制剂中,PEG 能有效增加难溶性药物的溶解度,提高药物的生物利用度。PEG 检测技术能够精准把控其关键性能指标,但检测设备价格昂贵,增加了检测成本。

## 2.2 生物制造技术及相关检测

### 2.2.1 3D 生物打印

3D 生物打印作为制备生物医学材料的前沿技术,在材料设计阶段,计算机辅助设计(CAD)软件模拟打印过程,优化支架结构和生物墨水配方;在性能检测方面,压缩试验和拉伸试验测定支架机械性能,细胞实验检测细胞在支架上的生长、增殖和分化情况<sup>[17]</sup>。研究表明,通过 CAD 优化的支架结构孔隙率可达 60%~70%,有利于细胞生长和营养物质的传输;在压缩试验中,支架能承受约 0.5 MPa 的压力,满足部分组织工程需求。3D 生物打印检测技术能够构建复杂仿生结构,为组织工程提供理想支架,但打印速度较慢,材料的选择范围相对有限。

### 2.2.2 水凝胶

水凝胶因其独特结构和性能在伤口愈合等领域应用广泛。在设计阶段,流变学测试优化交联条件,确定最佳凝胶配方;性能检测方面,动态光散射(DLS)测量凝胶粒径

分布, 降解实验监测其在生理环境中的稳定性和降解速率<sup>[18]</sup>。例如, 某水凝胶通过流变学测试优化后, 在生理环境下溶胀率可达 500%, 能有效吸收伤口渗出液; DLS 测量其粒径分布均匀, 平均粒径约为 100 nm; 降解实验表明, 该水凝胶在 7 d 内降解约 0%, 降解速率与伤口愈合进程相匹配。水凝胶检测技术能有效评估其性能, 但实验过程易受温度、pH 值等环境因素影响<sup>[19]</sup>。

### 2.2.3 静电纺丝

静电纺丝纳米纤维常用于模拟天然组织基质。在设计阶段, 通过调整电压、流速等参数, 利用电场模拟软件优化纤维制备条件; 在性能检测方面, 通过细胞黏附、增殖和迁移实验评估其对细胞行为的影响, 力学测试评估纤维膜的机械性能<sup>[20]</sup>。研究发现, 当电压为 15 kV、流速为 0.5 mL/h 时制备的纳米纤维膜, 细胞黏附率在 24 h 内可达 80% 以上, 细胞增殖和迁移活跃; 力学测试显示, 该纤维膜的拉伸强度约为 5 MPa, 能为细胞提供一定的力学支撑。静电纺丝检测技术能制备出与天然组织基质相似的纳米纤维, 但生产效率较低, 大规模制备存在一定困难。

## 3 结论与展望

多种检测技术在生物医学材料领域的应用, 为材料研发、性能评估及临床应用提供了坚实支撑。从天然产物到合成聚合物, 从 3D 生物打印到静电纺丝, 各类检测技术贯穿材料设计、制备与应用的全流程, 有力推动了该领域的发展。然而, 当前检测技术仍存在短板: 一方面, 部分方法通量低、实时性差, 难以满足大规模、动态监测需求; 另一方面, 不同检测技术的整合与联用不足, 导致数据分散, 难以形成全面、精准的材料性能画像。未来, 需着力开发高灵敏度、高通量、实时在线的检测技术, 如基于微流控芯片和生物传感器的检测方法, 实现材料性能的快速、动态评估。同时, 加强多技术联用, 构建综合检测平台, 提升数据整合与分析能力。

### 参考文献

[1] WANG Y, FENG Y, YAN J, *et al.* Spiky surface topography of heterostructured nanoparticles for programmable acceleration of multistage wound healing [J]. *Materials Today Nano*, 2023, 23: 100351.

[2] 黄慧, 陈雨. 材料医学和医学材料[J]. *无机材料学报*, 2022, 37(11): 1151-1169.

[3] 林彦萍, 王庆成, 吕恕位, 等. 超疏水表面材料在生物医学检测领域研究进展[J]. *表面技术*, 2022, 51(10): 113-127.

[4] 朱兆田, 李圣凯, 宋明慧, 等. 多功能金属石墨纳米囊的生物医学应用进展[J]. *高等学校化学学报*, 2021, 42(9):

2701-2716.

[5] LIANG D, LIN W J, REN M, *et al.* m6A reader YTHDC1 modulates autophagy by targeting SQSTM1 in diabetic skin [J]. *Autophagy*, 2022, 18(6): 1318-1337.

[6] 姚晓雪. 基于微流控乳液模板法的生物医学材料制备及应用研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.

[7] 赵玥琪. 金基纳米材料的设计制备及在生物医学检测和诊疗方面的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

[8] 王俊, 张兵波. 纳米长余辉发光材料在生物医学检测、生物成像与肿瘤治疗中的研究进展[J]. *发光学报*, 2024, 45(2): 252-268.

[9] CHEN Y, WANG C, ZHANG Z, *et al.* 3D-printed piezocatalytic hydrogels for effective antibacterial treatment of infected wounds [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 268(Pt 2): 131637.

[10] 贾园, 韩钰秋, 杨菊香, 等. 磁性发光材料的开发及其在生物医学领域中的应用[J]. *中国科学: 化学*, 2022, 52(7): 1020-1026.

[11] 吴佳俊, 闫肖肖, 李志彪, 等. 微针电极监测在生物医学中的研究及应用进展[J]. *医学综述*, 2024, 30(18): 2272-2280.

[12] 郭玉娥, 周敏敏. 分子生物学技术在医学检验中的有效应用[J]. *中文科技期刊数据库(全文版)医药卫生*, 2023, 3: 190-192.

[13] MAO Y, ZHAO B, XU L, *et al.* Protein-polysaccharide based nanogel/hydrogel composite with controlled continuous delivery of drug for enhanced wound healing [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 356: 123407.

[14] 高鹏, 王忠连, 班超, 等. 浅谈荧光检测分析仪器中的光学滤光片[J]. 2024, 46(6): 88-94.

[15] 伍雨桐, 王立. 医工结合背景下医学院校《生物材料学》课程教学思考与探索[J]. *创新教育研究*, 2024, 12(9): 552-558.

[16] 郭团, 刘明贤, 吴晖, 等. 微纳材料修饰生物医学检测系统及方法: CN202110474575.7 [P]. CN113281271A [2025-04-10].

[17] 肖文谦, 韩宏娟, 杨溟程, 等. 场驱动医疗微机器人: 材料制备工艺不断优化的应用前景[J]. *中国组织工程研究*, 2025, 29(10): 2097-2104.

[18] 迟基梅, 宋延林, 苏萌. 一种全打印生物检测芯片及其制备方法和应用: CN202111210524.X [P]. CN115993350A [2025-04-10].

[19] 李雪峰, 李家林, 梁洁, 等. 3D打印骨小梁髓关节假体材料在体骨修复及离子析出中的应用[J]. *医疗装备*, 2020, 33(17): 6.

[20] 欧阳瑞镗, 杨旻杰, 陈翔, 等. 铋化合物及纳米材料在生物医学领域中的应用[J]. *科学*, 2025, 77(2): 24-30+69.