

天然水凝胶烧伤敷料的制备与物理性能检测

李玉博 娄方杰 王之超 邢亚楠 宋晶晶

西安翻译学院健康与体育学部 陕西 西安 710105

【摘要】：为针对性改善临床传统烧伤敷料在生物相容性、创面适配性及湿润微环境调控等方面的技术瓶颈，如易与伤口粘连，造成伤口感染，不利于伤口的愈合等。本研究以壳聚糖、海藻酸钠等天然高分子材料为核心基材，通过共价交联与物理共混相结合的复合制备工艺，构建新型天然高分子复合水凝胶烧伤敷料。围绕敷料防止伤口粘连、促进伤口愈合等核心需求，寻找溶胀动力学、力学特性及透气性能等关键物理参数的量化检测，深入探究高分子原料配比、交联剂浓度及制备温度等工艺参数对敷料物理性能的调控机制。本研究构建的复合天然水凝胶敷料，既保留了天然高分子材料优异的生物相容性与易降解为无毒且不参与机体代谢的多糖的生物降解性，又通过工艺优化实现了物理性能的协同提升，为高性能烧伤敷料的研发提供了实验数据支撑与理论参考。

【关键词】：复合水凝胶；烧伤敷料；壳聚糖；海藻酸钠；

DOI:10.12417/3083-5526.25.06.010

烧伤伤口可由热、冷、电流辐射等造成，深度烧伤愈合后常瘢痕增生，局部难排汗、易破且难愈。理想烧伤敷料需保湿、抑菌、透气且不粘连伤口。传统纱布易粘连致感染，新型敷料有缺陷，应用受限。水凝胶稳定性等性能佳，广泛应用于组织工程和伤口敷料领域。天然高分子基水凝胶敷料原料来源广、生物相容性好，更具临床潜力。壳聚糖和海藻酸钠特性互补，是构建多功能敷料的理想原料。但现有天然高分子复合水凝胶烧伤敷料存在强度韧性矛盾等问题。本研究优化原料配比等制备新型敷料，明确其对物理性能的影响，为研发高性能烧伤敷料提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

基材：海藻酸钠、壳聚糖，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；交联剂：氯化钙，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；溶剂：去离子水，实验室自制（电导率 $\leq 10\mu\text{S}/\text{cm}$ ）。

凝胶作为一种新兴材料逐渐在医药、化妆品、生物工程、保健品、新型材料、建材涂料等领域得到了广泛应用。海藻酸钠(SA)源自褐藻等海洋藻类植物的天然阴离子多糖，其分子链上含有大量羧基($-\text{COO}^-$)，具备良好的水溶性、成胶性与生物安全性。其成胶特性主要依赖于与阳离子(如本实验中的 Ca^{2+})的离子交联反应，可快速形成三维网络结构，且网络结构能高效锁住水分，赋予水凝胶优异的吸水保水能力，契合烧伤创面对敷料保湿、吸液的核心需求。此外，海藻酸钠在生物体内的降解产物为天然糖类，对人体无毒性作用，不会对烧伤创面产生刺激性反应。

壳聚糖是通过从虾和蟹等甲壳类动物壳中提取的几丁质脱乙酰化制备的。它是自然界中少数带正电荷的天然多糖，含

有大量氨基($-\text{NH}_2$)在分子链上。它具有优异的生物相容性，抗菌性能和伤口修复活性。氨基可以与海藻酸钠的羧基形成稳定的阴阳键，并协同构建更致密的水凝胶网络，显著提高水凝胶的机械强度和结构稳定性；同时，其抗菌性能可以抑制烧伤创面常见病原菌的繁殖，降低感染风险，帮助伤口愈合。本实验选用脱乙酰度 $\geq 90\%$ 的壳聚糖，以保证其阳离子活性与成膜、成胶性能。

1.2 天然水凝胶烧伤敷料的制备

本实验以天然高分子海藻酸钠为基材，采用氯化钙物理交联法制备生物相容性优良天然水凝胶烧伤敷料。物理交联通过分子缠绕、离子键等物理方法形成三维网络结构，无新共价键生成，具有制备温和、易保留材料生物相容性的特点，多用于制备非永久性可逆凝胶，反应机理多样，本实验依托离子交联，即海藻酸钠分子链上的羧基与氯化钙解离出的钙离子结合形成稳定结构，赋予水凝胶良好稳定性与生物相容性。

制备分基础水凝胶和复合水凝胶敷料两个阶段，先优化海藻酸钠浓度与氯化钙交联剂比例确定最优基础配方，再引入甘油、蜂蜜等天然功能性添加剂复配改性，优化配方提升天然成分缓释性能与稳定性，严格控制温度等关键参数。实验以水凝胶成胶性能、凝胶强度为评价指标，进行多组平行实验，筛选出综合性能最优的基础配方。

1.2.1 海藻酸钠薄膜的制备

单一海藻酸钠水凝胶虽具备良好生物相容性与保湿性，但力学强度较低、易破损，且操作贴合性欠佳，难以满足烧伤敷料的临床使用需求。因此，在开展海藻酸钠天然水凝胶的正式制备工作前，本实验先完成了海藻酸钠薄膜的制备。此举核心

目的在于依托薄膜与水凝胶构建“薄膜-水凝胶”复合烧伤敷料体系，借助薄膜良好的支撑与防护性能，弥补单一水凝胶存在的性能缺陷，同时进一步提升敷料的综合功能性与实际应用通用性，该薄膜可作为烧伤敷料的支撑基材或复合功能层使用。具体操作步骤如下：

(1) 原料预处理：将海藻酸钠粉末置于 60℃ 真空干燥箱中干燥 2h，去除水分杂质，避免影响溶解效果；氯化钙置于干燥器中密封保存，防止吸潮结块。

(2) 初始膜液的制备：将 8g 海藻酸钠加入到 100mL 去离子水中，搅拌均匀形成初始膜液。

(3) 铸膜液的制备：取 24mL 初始铸膜液，用电子天平称取 0.48g、0.72g、0.96g 的壳聚糖凝胶状沉淀，加入到膜液中，使用混匀仪混合均匀，得到最终的铸膜液。

(4) 海藻酸钠薄膜的形成：将混合均匀的铸膜液缓慢的加入到平底塑料培养皿中（直径 88mm，高度 14mm），在台式鼓风干燥箱中设置 37 度充分干燥 8h，得到最终的海藻酸钠薄膜，如图 1-1 所示。



图 1-1 海藻酸钠薄膜

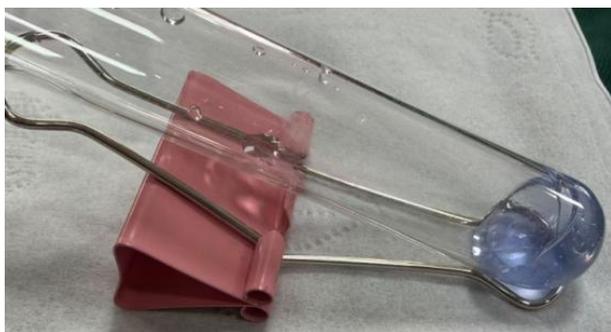


图 1-2 加入蓝墨水后流动状态的海藻酸钠水凝胶

1.2.2 海藻酸钠水凝胶制备

(1) 海藻酸钠溶液配制：依据实验设计的聚合物浓度梯度，分别称取 1g、2g、3g 干燥海藻酸钠粉末，按 1%、2%、3% 的目标浓度，缓慢加入去离子水中。以 200-300r/min 的速度搅拌 30s 后，常温溶解 30-60 分钟，若溶解困难可水浴加热至 40-50℃（不超过 60℃ 以防降解），直至完全溶解，形成均匀

透明溶液。静置 10 分钟排除气泡，确保无颗粒、结块，完成不同浓度海藻酸钠溶液制备。

(2) 交联剂溶液配制：准确称取 1g、2g、3g 氯化钙，加入去离子水，室温搅拌至完全溶解，得到 1%、2%、3% 不同浓度梯度的氯化钙交联剂溶液。

(3) 交联成胶反应：为筛选最优基础配方，设三组平行实验。按“0.1g 海藻酸钠加 9.9mL 氯化钙交联剂”等配比，将对应浓度氯化钙溶液缓慢滴加至复合基材水溶液，滴加时持续搅拌保证混合均匀，形成未烘干的流动海藻酸钠水凝胶。加入 1 滴蓝墨水示踪以观察流动性，其分散状态如图 1-2 所示。根据目标形状，可制成块状或微球状，得到三组不同配比的块状样品。

(4) 水凝胶干燥处理：将冷却成型的基础水凝胶样品置于台式鼓风干燥箱，37℃ 干燥 8h，去除游离水分，获形态稳定干凝胶样品，且 37℃ 模拟人体生理环境，避免高温破坏生物相容性，为后续实验提供标准化样品。

(5) 泡发性能测试：取干燥后的干凝胶样品，精确称量初始质量，浸入去离子水进行泡发实验，在 2h、4h、8h 时取出，用滤纸吸干表面水分后精确称量质量。

2 物理性能检测（结构表征）

2.1 成胶原理

本项目所制备的烧伤敷料，其核心是一种基于海藻酸钠的离子胶联型物理水凝胶，其主材料是从褐藻中提取的一种天然线性多糖——海藻酸钠，而氯化钙则作为交联剂在其中起着异常重要的作用。

海藻酸钠的分子链上存在着大量带负电荷的羧酸根（ $-CCO^-$ ），氯化钙溶液里的钙离子（ Ca^{2+} ）则带有两个正电荷，当把用离子水溶解后的呈粘稠状的海藻酸钠胶体滴入或者浸入到氯化钙溶液当中时，钙离子便会和海藻酸钠分子链上的羧酸根产生离子键合，一个钙离子能够同时跟两条或者多条海藻酸钠链上的羧酸根基团相结合，就好似一座‘桥梁’一般，把原本处于分散状态的高分子链交联到了一起，在溶液和钙离子相互接触的这个界面上，会逐步形成一个三维网络结构，并且快速朝着内部不断延伸，进而将数量众多的水分子都牢牢地锁定在这个网络之中，最终便形成了那种湿润、柔软并且还具备一定强度的固态凝胶。

2.2 成胶过程与时间

把海藻酸钠依照 1%、3% 还有 6% 的不同浓度分别溶解在等离子里，与此把氯化钙也按同样浓度溶解在另一份等离子里，如此一来便得到了不同浓度的呈粘稠状态的海藻酸钠胶体以及氯化钙溶液。接着，利用注射器将海藻酸钠胶体吸取出来，然后缓缓地推注并滴入与之浓度相同的氯化钙溶液之中，在这个滴入的过程当中，海藻酸钠胶体从原本的粘稠形态

逐步转变成了拥有一定弹性和硬度的透明固体凝胶，而这种凝胶所具有的弹性和硬度是和材料的浓度有所关联的，依据记录显示，其成胶所需的时间大约为3至4秒。

2.2.1 凝胶的吸水性及溶胀性

该项目把形成的固体凝胶经烘干处理后，将其浸泡于纯水当中，并且在固定时刻对其质量加以称量，以此来观测不同浓度固体凝胶所具有的吸水性以及溶胀性。我们针对1%、3%以及6%这三种浓度的凝胶，在8个小时之内的吸水增重情况展开了测定工作。各浓度的凝胶其吸水量随着时间呈现出不一样的变化趋势。在这之中，3%浓度的凝胶凸显出了较为显著的溶胀特性，它的吸水量会随着时间急剧地上升，在8小时的时候达到了6.82克。而1%浓度的凝胶，其吸水量的增长态势比较平缓，最终仅为0.57克；6%浓度的凝胶，其吸水量在初期阶段就逐渐趋于饱和状态，仅仅维持在0.17克左右的程度。这一测定结果说明，凝胶的吸水性能存在着一个最为适宜的浓度点（在这个体系当中为3%），一旦偏离这个点，就会使得其网络结构出现要么过于松散（如1%的情况），要么过于致密（如6%的情况）这样的状况，进而无法达成有效的吸水以及溶胀效果。

2.3 性能表征（力学与屏障性能）

2.3.1 力学性能测试

用万能试验机对水凝胶样品进行力学性能定量检测，评估

其是否满足临床敷用需求及创面承压耐受性。测试前，将水凝胶裁成标准试样。拉伸测试以每分钟5毫米速率进行，记录应力-应变曲线，计算拉伸模量和断裂强度，评估其延展性，确保敷用时贴合创面且不易破损。压缩测试以每分钟2毫米速率加载至试样形变达50%，提取压缩模量和抗压强度，验证其能承受日常活动压力，防止因压迫变形破损而失去保护作用。综合各项指标判定水凝胶敷料的机械适配性，确保其易敷用且结构稳定。

3 结论

克服现有烧伤敷料在生物相容性、创面适配及湿性环境维持等方面的局限性，本研究基于壳聚糖与海藻酸钠等天然高分子材料，通过共价交联与物理共混相结合的复合工艺，成功开发出一种新型天然高分子复合水凝胶烧伤敷料。围绕临床应用需求，系统研究了敷料的溶胀动力学、力学性能和透气性等关键物理参数，并深入探讨了原料配比、交联剂浓度及制备温度等工艺条件对材料性能的影响规律。研究结果表明，所制备的复合水凝胶敷料兼具良好的生物相容性与可调控的物理性能，在保持天然材料降解特性的同时，实现了功能协同优化。本工作作为高性能烧伤敷料的开发提供了可靠的实验依据与理论参考，具有一定的技术创新性和临床应用前景。

参考文献：

- [1] 武胡雯,邓晗彬,周涵,等.水凝胶敷料减轻烧伤创面瘢痕的研究进展[J].海南医学院学报,2024,30(13):1027-1034.
- [2] 黄金,葛瑞兴,张哲豪,等.海藻酸钠/纤维素/壳聚糖凝胶材料制备方法及其应用研究进展[J].山东农业大学学报(自然科学版),2025,56(04):628-641.
- [3] 杨璐遥,纪丁愈,成明华,等.钙离子交联的MXene/海藻酸钠高性能屏蔽织物的制备[J].电子元件与材料,2023,42(07):832-838.
- [4] 李盛波.钙离子交联海藻酸水凝胶负载去铁胺和纳米铜促进糖尿病创面愈合[D].华中科技大学,2022.
- [5] 侯恩凤,田秀枝,蒋学.壳聚糖/聚己内酰胺复合纳米纤维膜的制备及染料吸附性能[J/OL].高分子材料科学与工程,1-15[2026-01-29].
- [6] 罗建斌,方国芳.水凝胶烧伤敷料研究进展[J].生物医学工程学杂志,2004,(01):156-159.
- [7] 吴婷,李东泽,刘嘉懿,等.海藻酸盐/聚(N-异丙基丙烯酰胺)-聚赖氨酸复合水凝胶的制备和性能[J].海南师范大学学报(自然科学版),2025,38(02):183-191.