



GelMA/GA 复合水凝胶的制备及其光热抗菌性能研究

葛亚威,吴珏菲,汤沁婴,胡康,章儒,王怡,李彬

(浙江理工大学材料科学与工程学院,杭州 310018)

摘要: 为应对传统伤口修复材料力学性能欠佳、抗菌效能不足等难题,开发了一种新型光热抗菌复合水凝胶敷料 GelMA/GA-TA/Fe³⁺。以甲基丙烯酰化明胶(GelMA)与阿拉伯树胶(GA)为主体,通过掺杂单宁酸(TA)与 Fe³⁺ 的络合物,采用光交联法制备 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶;分析 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶的微观形貌、力学性能、溶胀性能,并探究其光热抗菌能力。结果表明:GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶具有致密且均一的多孔网络结构,压缩强度达到 140 kPa,为 GelMA 水凝胶的 2.5 倍;具备良好的吸水保湿性能,溶胀率约 200%;GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶表现出优秀的光热性能,经 2 W/cm² 的 808 nm 近红外光照射 10 min 后,其表面温度迅速从室温上升至 52.5~55.8 °C,该温度可高效破坏细菌细胞膜,实现有效抗菌,对金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌的抑菌率分别达 95.69%和 95.18%。该研究制备的 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶敷料兼具力学支撑、吸水保湿、光热抗菌等多方面优势,为治疗伤口感染的实际应用提供了新策略。

关键词: 抗菌;光热效应;明胶;阿拉伯树胶;单宁酸;铁离子

中图分类号: O648.17

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2026) 09-0629-09

引文格式: 葛亚威,吴珏菲,汤沁婴,等. GelMA/GA 复合水凝胶的制备及其光热抗菌性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2026,55(5):629-637.

Reference Format: GE Yawei, WU Juefei, TANG Qinying, et al. Preparation and photothermal antibacterial properties of GelMA/GA composite hydrogels[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(5): 629-637.

Preparation and photothermal antibacterial properties of GelMA/GA composite hydrogels

GE Yawei, WU Juefei, TANG Qinying, HU Kang, ZHANG Ru, WANG Yi, LI Bin

(School of Materials Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Addressing the challenges of insufficient mechanical strength and poor antibacterial efficacy in traditional wound dressings remains a critical priority. Herein, we engineered a novel photothermal antibacterial composite hydrogel (GelMA/GA-TA/Fe³⁺) by integrating tannic acid (TA) and Fe³⁺ coordination complex into a matrix of methacrylated gelatin (GelMA) and gum arabic (GA). The morphology, mechanical properties, and swelling behavior of the GelMA/GA-TA/Fe³⁺ hydrogel were analyzed, and its photothermal antibacterial capacity was investigated. The results demonstrated that the GelMA/GA-TA/Fe³⁺ hydrogel features a dense and uniform porous network structure. Its compressive strength reaches 140 kPa, which is 2.5 times that of the GelMA hydrogel. Furthermore, the hydrogel exhibits excellent water absorption and moisture retention, with a swelling ratio of approximately 200%. Under 808 nm near-infrared irradiation (2 W/cm²) for 10 min, the surface temperature of the hydrogel rapidly increased from room temperature to 52.5~55.8 °C. This elevated temperature effectively disrupts bacterial cell membranes, achieving high antibacterial rates of 95.69% and 95.18% against

收稿日期: 2025-12-23 网络出版日期: 2026-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52103189);浙江省自然科学基金项目(LMS26E030009)

作者简介: 葛亚威(2001—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事抗菌水凝胶方面的研究。

通信作者: 李彬, E-mail: pirute@zstu.edu.cn

Staphylococcus aureus and *Escherichia coli*, respectively. Combining robust mechanical support, excellent moisture retention, and efficient photothermal antibacterial activity, the GelMA/GA-TA/Fe³⁺ hydrogel presents a promising novel strategy for combating wound infections.

Key words: antibacterial; photothermal effect; gelatin; gum arabic; tannic acid; ferric ion

0 引 言

皮肤是人体抵御外界环境的第一道屏障,其完整性对于维持机体稳态和预防感染至关重要^[1-2]。烧伤、糖尿病足溃疡及物理创伤等引起的皮肤缺损,常常会由于细菌感染导致伤口愈合延缓,同时还可能引发慢性溃疡、败血症等危及生命的并发症,给患者造成沉重的健康与经济负担^[3]。目前,传统的伤口处理主要依赖抗生素或抗菌纱布等,但长期使用易诱导细菌耐药性^[4];另外,现有敷料往往缺乏动态响应性,难以营造有利于组织再生的微环境^[5]。因此,开发兼具高效抗菌活性与主动促修复功能的新型智能敷料已成为组织工程与再生医学领域的研究热点。

近年来,抗菌水凝胶凭借优异的生物相容性、生物降解性及多样的抗菌机制,在伤口愈合、组织再生等领域展现出广阔前景^[6]。在水凝胶中通过物理负载或化学接枝银^[7]、氧化锌^[8]等无机纳米材料,能够利用金属离子的释放破坏细菌代谢,实现广谱杀菌并降低感染率^[9];利用季铵盐等阳离子聚合物,则可通过静电作用改变细菌细胞膜的通透性,达到物理抑菌的效果^[10]。此外,结合光热^[11]或光动力疗法^[12]的智能响应型抗菌水凝胶也备受关注,其产生的局部高温或活性氧(Reactive oxygen species, ROS)能有效清除顽固的细菌生物膜^[13],但合成类抗菌材料表现出强劲的杀菌能力,在实际应用中仍面临生物相容性欠佳、代谢安全隐患及合成过程复杂等挑战^[14]。因此,高生物安全性、环境友好且具备多重生物活性的天然产物是新型抗菌敷料的理想基材。

在众多天然产物中,明胶因其保留了胶原蛋白特有的细胞黏附位点(精氨酸-甘氨酸-天冬氨酸多肽序列)和基质金属蛋白酶响应性降解位点,已成为皮肤组织工程的核心基质材料之一^[15-16],但单一组分的明胶水凝胶力学性能较弱且功能单一,难以满足复杂创面对抗感染与加速组织再生的双重需求^[17]。近年来,引入功能性多糖(如海藻酸钠、壳聚糖等)构建杂化网络,并结合金属-多酚配位网络(Metal-phenolic networks, MPNs)已成为提升水凝胶综合性能的新策略。阿拉伯树胶(Gum arabic, GA)作为一种来源广泛、安全性高的水溶性复合多

糖^[18-19],其丰富的羟基和羧基能显著增强敷料的抗压缩与抗疲劳性能^[20],并能通过提升屏障保湿性促进细胞定向迁移与增殖^[21]。同时,天然多酚单宁酸(Tannic acid, TA)不仅具有广谱抗菌与抗氧化活性^[22],还能与金属离子(如 Fe³⁺)通过动态配位键形成稳定的交联网络^[23]。这种金属-多酚络合物不仅能增强水凝胶的结构稳定性^[24],还能赋予材料卓越的光热转化效率,实现近红外光(Near infrared, NIR)驱动的温控杀菌并促进局部血液循环^[25-26]。因此,将明胶/多糖基质与 MPNs 的有机结合,对构建高性能、多功能的创面敷料具有重要的科学价值。

基于各组分间的协同效应,本文通过在甲基丙烯酸酯化明胶(Gelatin methacryloyl, GelMA)和 GA 混合溶液中掺杂 TA/Fe³⁺ 络合物,进一步采用光交联法制备了一种集机械支撑、生物活性与光热响应于一体的 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 复合水凝胶敷料;分析 GA 及 TA/Fe³⁺ 络合物对水凝胶微观形貌、力学性能、溶胀性能的影响,探讨 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 复合水凝胶敷料的光热性能、光热稳定性及光热抗菌效果。本文通过多组分协同设计,旨在解决传统伤口敷料在抗菌效率、力学性能和生物相容性等方面难以兼顾的问题,为伤口修复材料的开发提供新的思路。

1 实验部分

1.1 实验材料

明胶(Gelatin, 99%)和六水合氯化铁(FeCl₃·6H₂O, 99%)购自上海麦克林生化科技有限公司;阿拉伯树胶(GA, 97%)购自北京伊诺凯科技公司;甲基丙烯酸酐(Methacrylic anhydride, MA, 94%)和单宁酸(TA, 95%)购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;苯基-2, 4, 6-三甲基苯甲酰膦酸锂(Lithium phenyl-2, 4, 6-trimethylbenzoylphosphinate, LAP, 97%)购自上海毕得医药科技股份有限公司;营养琼脂培养基和营养肉汤培养基均购自青岛海博生物技术有限公司;大肠埃希菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*, *S. aureus*)购自上海通派生物科技有限公司;透析袋购自上海源叶生物科技有限公司。

1.2 GelMA 的制备

将 80 g 明胶溶解于 50 ℃ 的 800.0 mL 磷酸盐缓冲溶液(pH 7.4)中,完全溶解后,加入 7.2 mL 甲基丙烯酸酐并在 50 ℃ 下反应 4 h。反应结束后,采用截留分子量 14000 的透析袋在去离子水中透析 3 d,通过冷冻干燥得到白色海绵状 GelMA 固体。

1.3 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 复合水凝胶的合成

将 4.0 g 阿拉伯树胶和 0.5 g LAP 溶解于 90.5

mL 磷酸盐缓冲溶液(pH 7.4)中,并加入 5 g GelMA,连续搅拌 2 h。将 TA 和氯化铁以 2:1 的摩尔比溶解在上述溶液中,得到 TA 质量浓度为 1 mg/mL 的前驱体溶液。将前驱体溶液注入模具中,并用波长 405 nm 的光固化灯照射 1 min 进行光交联得到 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 复合水凝胶(制备路线如图 1 所示)。另外,根据相同的步骤但不加入 TA 和氯化铁合成水凝胶,即为 GelMA/GA 水凝胶。

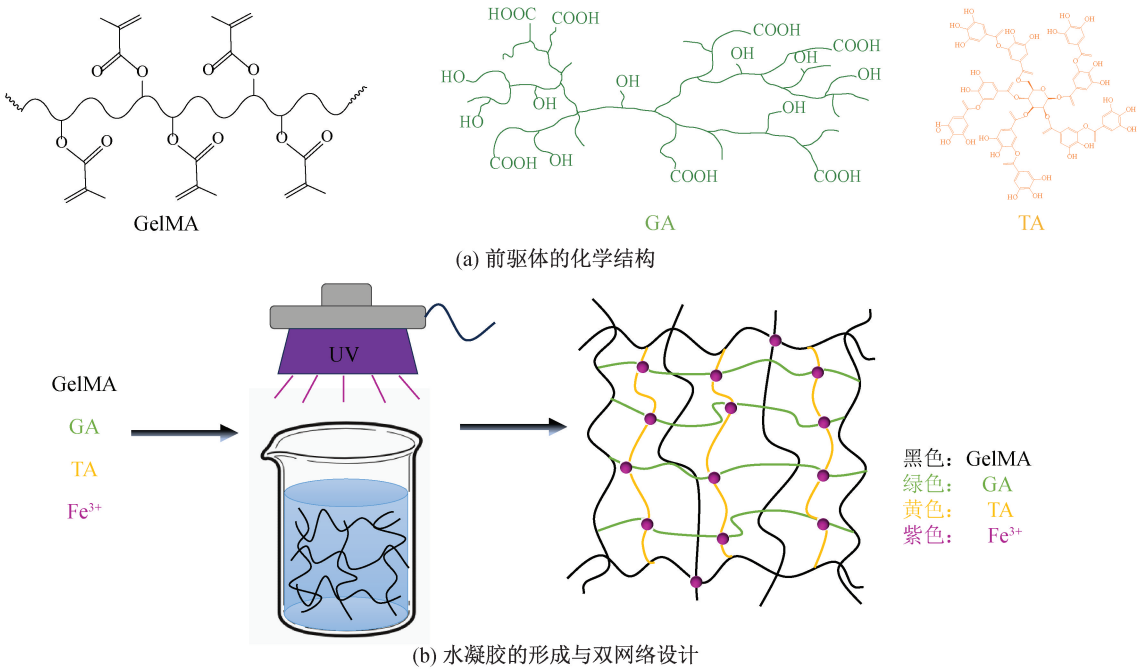


图 1 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 的制备路线图

1.4 材料表征

采用核磁共振波谱仪(AVANCE AV400MHz, 瑞士 Bruker 公司)测定 GelMA 的甲基丙烯酸酐化程度。采用扫描电子显微镜(Ultra55FE-SEM, 德国 Carl Zeiss SMT 公司)观察冻干水凝胶的形貌结构。采用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet is50, 赛默飞世尔科技有限公司)分析冻干水凝胶 GelMA, GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 的红外光谱。采用紫外可见分光光度计(U3900H, 日立 Hitachi 公司)测试 Fe³⁺、TA、TA/Fe³⁺、GelMA/GA 前驱液以及 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 复合水凝胶前驱液在 300~800 nm 的吸光度。

1.5 流变性能测试

将样品制备成合适的尺寸后置于平行板间,采用旋转流变仪(Haake Mars60, 赛默飞世尔科技有限公司)在振荡频率扫描模型下测试 GelMA, GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶的流变性能,在室温下设定 0.5% 的恒定应变,于 0.4~

100.0 rad/s 的频率范围内扫描。

1.6 压缩性能测试

将 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶分别用模具制备为直径 10 mm、高度 5 mm 的圆柱体。采用万能试验机(UTM,LDW-5, 上海松顿仪器制造有限公司)进行压缩测试,设定压缩速率为 2 mm/min,极限应变水平设置为原始高度的 80%。

1.7 水凝胶溶胀性能测试

将冻干水凝胶在 37 ℃ 下浸入 20 mL 磷酸盐缓冲溶液中,在预定时间从溶液中取出水凝胶样品,并用滤纸去除表面水分;称重水凝胶,直到所有水凝胶样品的质量保持不变。水凝胶的溶胀率(S_R)计算公式如下:

$$S_R/\% = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \tag{1}$$

其中: W_0 为水凝胶的初始质量, g; W_t 为水凝胶的溶胀预定时间后的质量, g。

1.8 水凝胶光热性能测试

将 GelMA/GA- Fe^{3+} 水凝胶浸泡在 5 mL 磷酸盐缓冲溶液中,用 2 W/cm^2 的 808 nm 激光照射 10 min,每隔 30 s 用红外热成像仪记录 1 次温度。光热循环测试则是在照射 10 min 后,自然冷却至室温,再光照 10 min 并冷却,循环 5 次。

1.9 光热抗菌性能测试

将 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶分别放置于 5 mL 离心管中,向其中加入 $200\text{ }\mu\text{L}$ 10^6 CFU/mL 菌液和 $800\text{ }\mu\text{L}$ 无菌培养基,其中 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} + NIR 组样品采用 2 W/cm^2 的 808 nm 激光照射 10 min,其余组不光照;将离心管放入摇床于 100 r/min, $37\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下培养 4 h,将菌液稀释 10^4 倍后,取 $100\text{ }\mu\text{L}$ 涂板,并于

$37\text{ }^\circ\text{C}$ 过夜培养;待长出清晰可见的单菌落后取出平板,统计每个平板的菌落数,实验组与未处理组的比值即为抑菌率。对抗菌数据进行 Student's *t*-test 统计学显著性检验(* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$,**** $P<0.0001$)。

2 结果与讨论

2.1 GelMA 的修饰程度

图 2 为明胶和 GelMA 的核磁共振氢谱图,从图中可以看出,甲基丙烯酸酐的反应位点主要为明胶分子中赖氨酸的游离氨基。对比修饰前后核磁共振氢谱中赖氨酸亚甲基信号峰($\delta\text{ }2.9\times10^{-6}$)可知,积分面积从 2.32 降低为 1.24,下降了 46.6%,说明 GelMA 的甲基丙烯酰化程度为 46.6%。

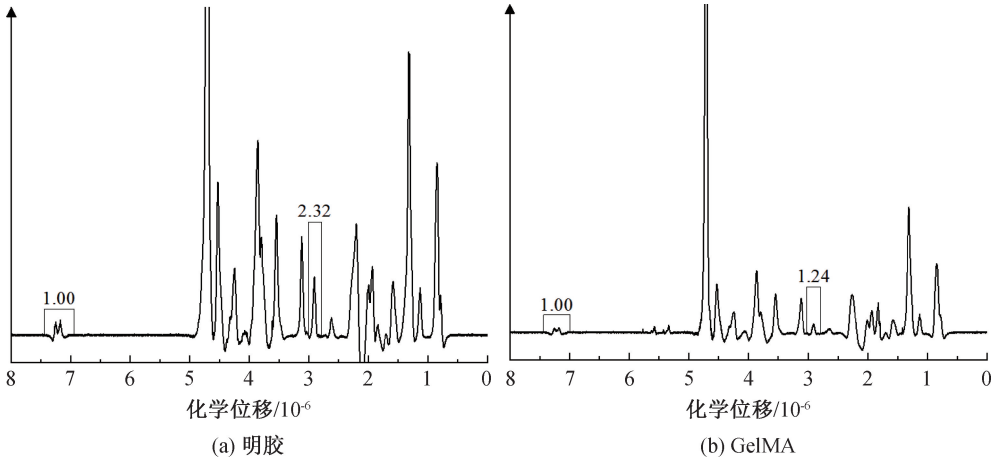


图 2 核磁共振氢谱

2.2 水凝胶的理化性质表征

2.2.1 表面形貌分析

图 3 为 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶的扫描电镜图。图 3 显示:3 种水凝胶均呈现典型的多孔网络结构,GelMA 水凝胶的孔隙较大,分布较稀疏,连通性一般并且孔壁相对光

滑,结构均匀性一般;GelMA/GA 水凝胶孔隙尺寸减小,连通性有所提升,并且孔壁出现交联后的粗糙纹理。相比之下,GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 复合水凝胶展现出致密且均一的多孔网络,说明 TA/ Fe^{3+} 络合物的引入能够通过增强交联作用提高水凝胶的微观结构均匀性和稳定性。

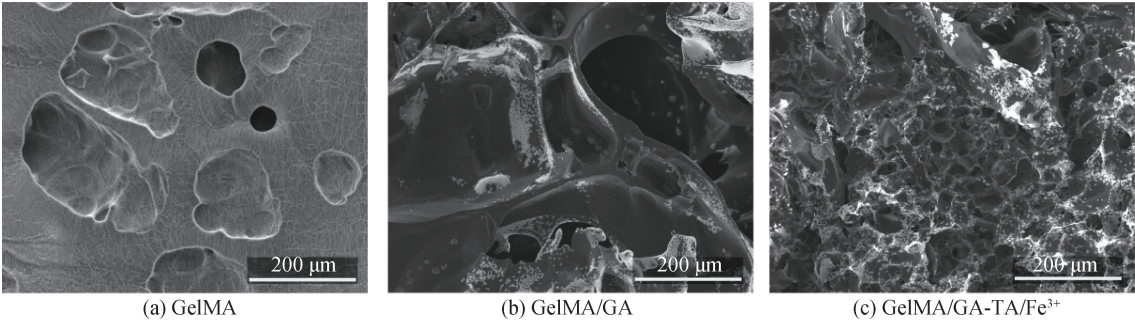


图 3 水凝胶的 SEM 图

2.2.2 红外光谱分析

图 4 为 GelMA、GelMA/GA 及 GelMA/GA-

TA/ Fe^{3+} 水凝胶的红外光谱图,从图中可以看出: 1640 cm^{-1} 处的吸收峰对应甲基丙烯酰基中 $\text{C}=\text{O}$

的伸缩振动,证实明胶的甲基丙烯酰化改性成功;1500~1200 cm^{-1} 区域出现的酰胺 II 带和酰胺 III 带特征峰,体现了明胶固有的多肽骨架结构;GelMA/GA 图谱在 1600 cm^{-1} 附近观察到明显的肩峰,对应阿拉伯树胶中糖醛酸的羧基伸缩振动;GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶的谱图在 1057 cm^{-1} 附近产生了新的振动吸收峰,这与 TA/ Fe^{3+} 络合物的形成密切相关,这表明 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 复合水凝胶的成功制备。

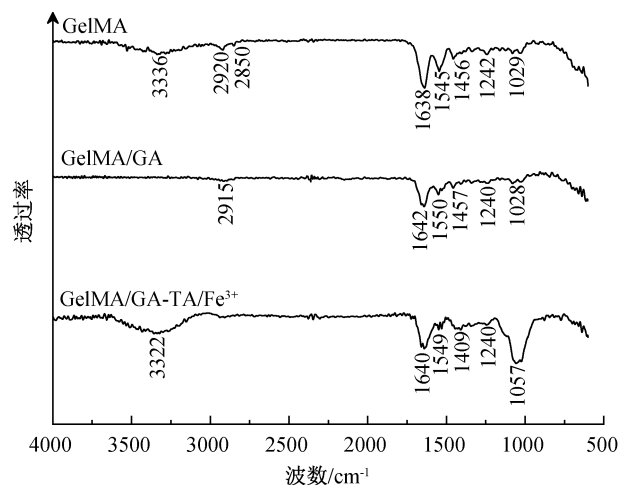


图 4 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶的红外光谱图

2.2.3 紫外光谱分析

图 5 为 FeCl_3 、TA、GelMA/GA 及 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 复合水凝胶的紫外吸收光谱。从图 5 可见:TA 在 400 nm 以上均无吸收,与 Fe^{3+} 配位后,从 350 nm 至 800 nm 范围出现了宽吸收,800 nm 附近的吸收证明了 TA/ Fe^{3+} 络合物能在 808 nm 光照下发生光热效应;GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 复合水凝胶在 400 nm 以上波长的吸收也显著增加,说明复合水凝胶的光热效应也来源于 TA/ Fe^{3+} 络合物。

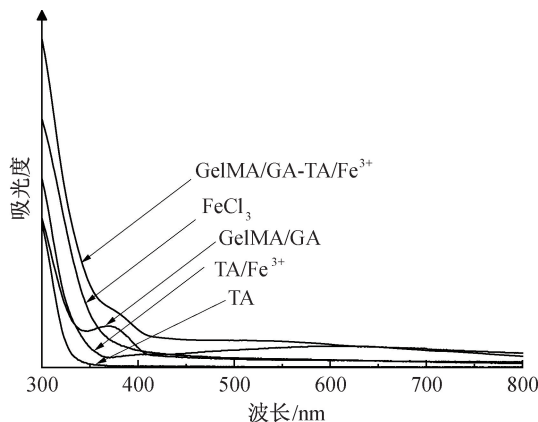


图 5 复合水凝胶的紫外吸收光谱

2.3 水凝胶的机械性能分析

2.3.1 流变行为分析

图 6 为 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶的流变特性曲线。从图中可以看出,在低频范围内($<10 \text{ rad/s}$),3 种水凝胶的储能模量(Storage modulus, G')均表现出良好的频率稳定性,未出现明显的频率依赖性。在整个扫描范围内,所有样品的 G' 始终显著高于损耗模量(Loss modulus, G''),未出现模量交叉,证明了水凝胶内部已形成了稳固的共价/物理双网络结构,表现出典型的类固体弹性行为和良好的机械稳定性。对比不同水凝胶的流变曲线可知,随着 GA 和 TA/ Fe^{3+} 的引入,水凝胶的 G' 呈现上升趋势,表明组分间的相互作用增强了网络的交联密度;但 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 复合水凝胶的 G' 较 GelMA/GA 增幅有限,这可能归因于水凝胶的弹性模量主要受控于 GelMA 的共价键网络与 GA 形成的物理纠缠网络,TA/ Fe^{3+} 动态配位键的引入则提高了水凝胶网络的稳定性并赋予其更多功能,表明 GA 及 TA/ Fe^{3+} 络合物的引入协同增强水凝胶的网络致密性与力学稳定性。

2.3.2 压缩性能分析

图 7 为 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶的压缩曲线。图 7 显示,各组分的引入有效增强了水凝胶的力学性能。80%应变下,GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 复合水凝胶的压缩应力达到了 140 kPa,分别为 GelMA/GA 和 GelMA 水凝胶的 1.6 倍和 2.5 倍,且在整个应变区间内始终保持最高应力水平。这种力学增强主要归因于交联密度的提升:一方面,GA 与 GelMA 间通过氢键形成了多糖-蛋白网络;另一方面,TA 丰富的酚羟基与 GelMA 的氨基、GA 的羟基等形成多重氢键。该多重网络结构使复合水凝胶能够为伤口提供稳固的物理支撑,有效缓解外界冲击导致的二次损伤。

2.4 溶胀性能分析

图 8 为 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶的溶胀曲线,从图中可以看出:各组水凝胶均能在 24 h 内达到溶胀平衡,GelMA/GA 水凝胶的平衡溶胀率最高(约 1400%),显著高于 GelMA 水凝胶(约 1000%),这主要是由于 GA 中富含的羟基及亲水性糖蛋白组分增强了基体与水分子的相互作用,提升了网络的吸水能力;GelMA/GA-TA/ Fe^{3+} 水凝胶的溶胀率降低为 200%,这可能是由于形成的金属-多酚配位网络显著提高了交

联密度,且 TA 的多酚结构与 GA 链间的氢键作用进一步巩固了网络结构,限制了水分子的渗透,表明

了 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 复合水凝胶仍保持了良好的吸水性能,足以满足临床创面渗出液的管理需求。

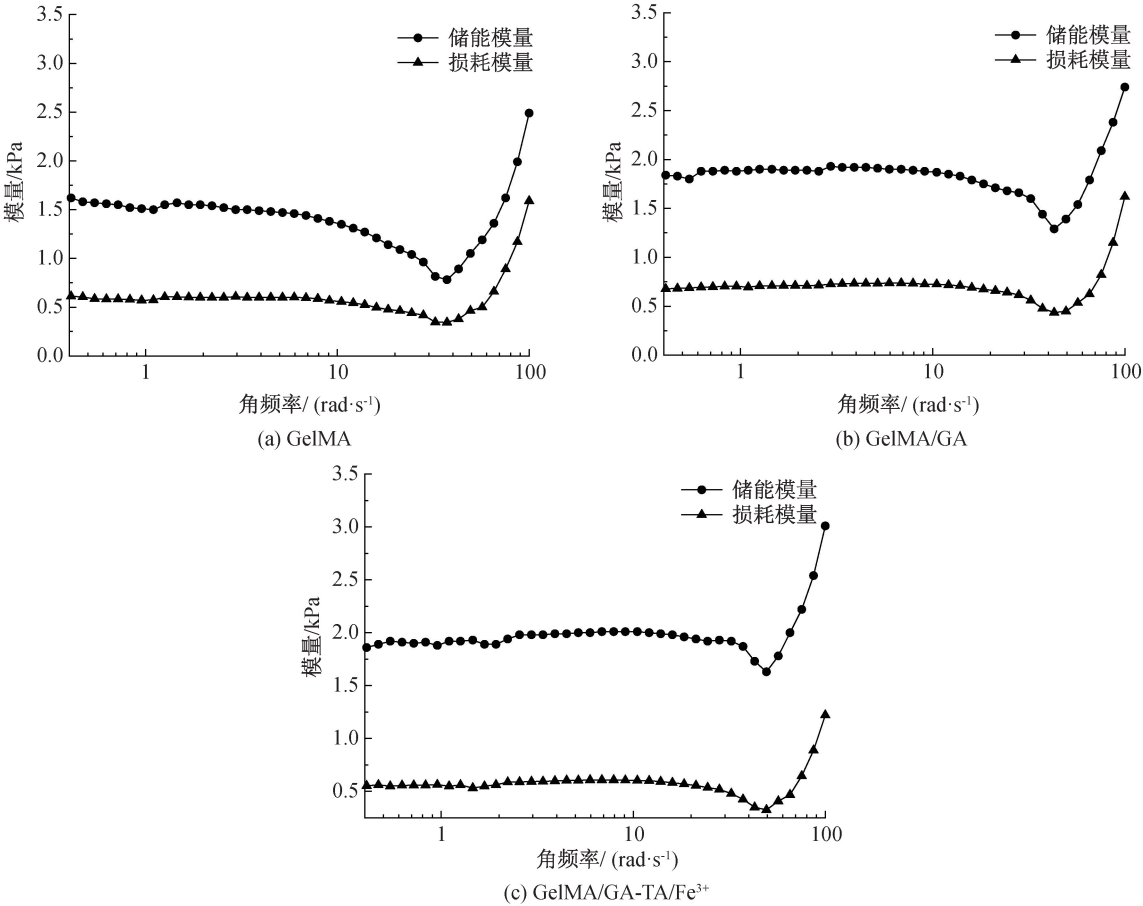


图 6 水凝胶的流变特性曲线

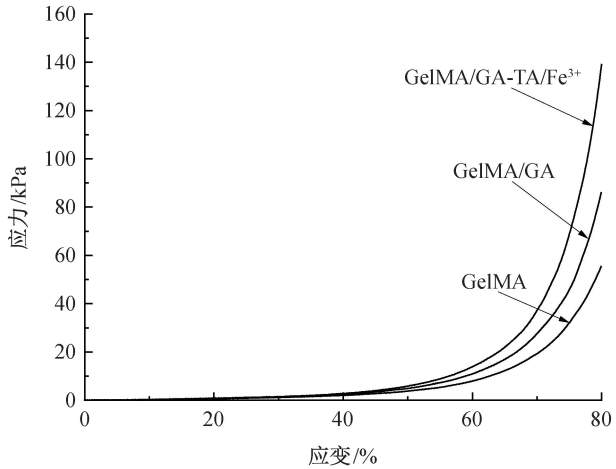


图 7 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶的压缩曲线

2.5 光热抗菌性能分析

TA/Fe³⁺ 络合物的引入赋予了水凝胶卓越的光热转化能力,图 9 为 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶在 2 W/cm² 的 808 nm 激光照射下的光热升温曲线。图 9 表明:随着照射时间的延长,水凝胶表面的温度

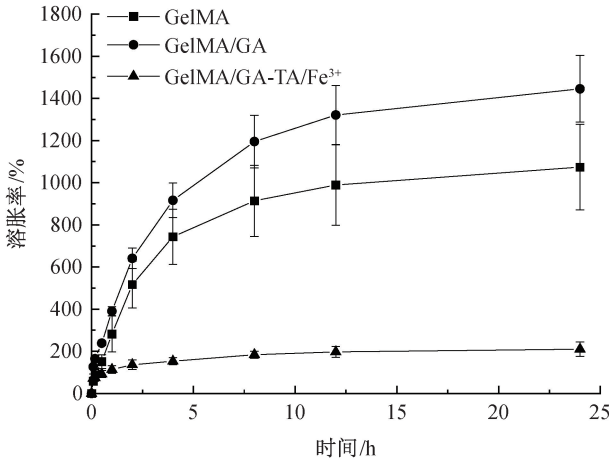


图 8 GelMA、GelMA/GA 和 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶的溶胀曲线

从室温升至 52.5~55.8 ℃并趋于稳定。该平衡温度处于细菌的致死区间,主要通过诱导蛋白质变性及破坏酶系统实现杀菌。在短时间照射下,该温度对成纤维细胞及角质形成细胞等正常细胞的损伤较小,且能适度促进局部血液循环,进而加速伤口愈合。

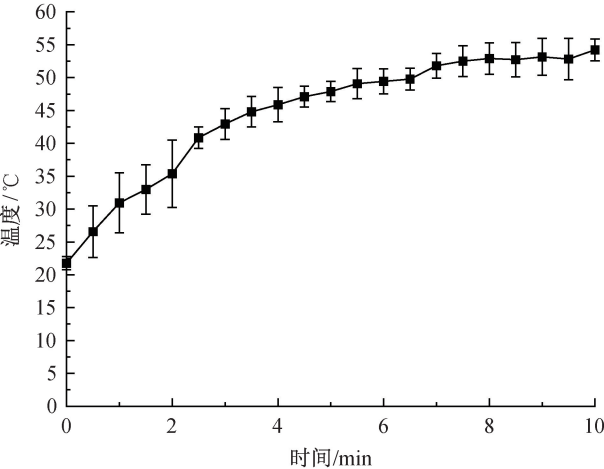


图 9 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶的光热曲线

对 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶在 2 W/cm² 的 808 nm 激光照射下的光热性能进行循环测试,结果如图 10 所示,可以看出:经过 5 次循环照射后,水凝胶表面的最高温度无明显降低,表明该水凝胶在多次重复使用的场景下仍能保持可靠的光热稳定性。

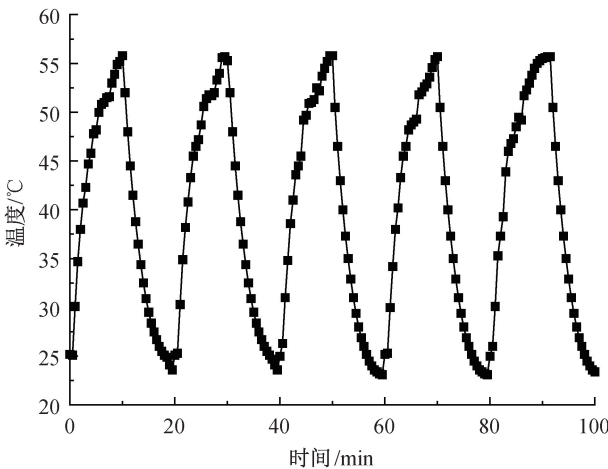


图 10 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶的光热循环曲线

通过菌落计数法评估各组水凝胶对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌效果,结果如图 11 所示,从图中可以看出:无材料组中 2 种细菌均大量生长;随着水凝胶组分逐步引入 GA、TA/Fe³⁺ 络合物以及 808 nm 激光照射处理,抑菌效果逐渐增强。

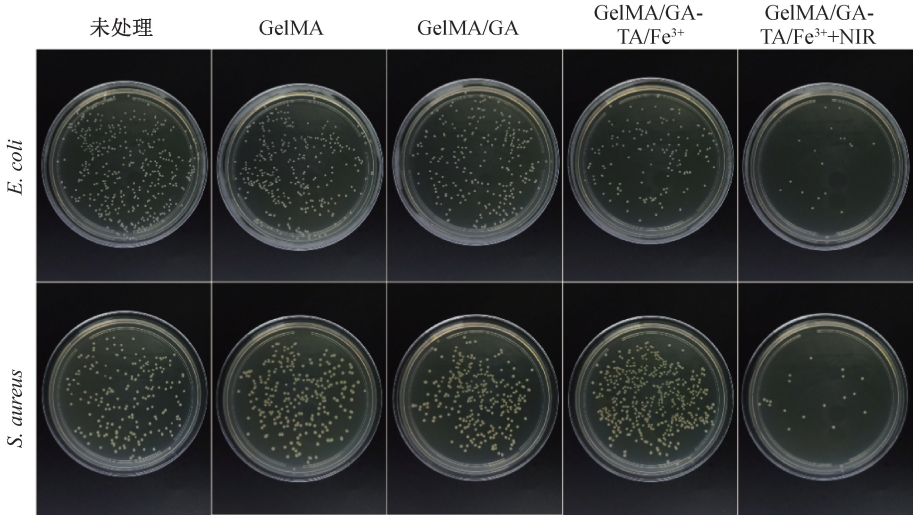


图 11 不同水凝胶处理细菌在琼脂平板上的照片

GelMA/GA 组表现出一定的固有抑菌活性,对 *E. coli* 和 *S. aureus* 分别为 41.00% 和 55.93%, 引入 TA/Fe³⁺ 络合物后, GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 组的抗菌性能显著增强,说明金属-多酚网络自身具备一定的抗菌活性; GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 在 808 nm 激光照射下表现出极强的杀菌效率,对 2 种细菌的抑菌率均超过 95%(见图 12),表明光热效应进一步增强了该水凝胶的抗菌活性。

2.6 细菌形貌分析

图 13 为光热处理前后细菌形态演变的 SEM 图。从图 13 中可以看出:相较于未处理组,经

GelMA/GA-TA/Fe³⁺ + NIR 处理后的 *E. coli* 失去了典型的短杆状形态,菌体呈现明显的皱缩、扭曲及细胞膜破裂,并伴有胞内物质外泄导致的塌陷特征; *S. aureus* 则从规整的球形变为表面凹陷和微孔化,局部可见明显的菌体裂解碎片。上述结果表明, GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶既能通过物理破坏细胞膜完整性实现直接杀伤,又能通过光热作用破坏细菌生理活性。这种非抗生素依赖的杀菌方式能有效降低细菌产生耐药性的风险,为复杂创面感染的临床治疗提供了安全高效的方案。

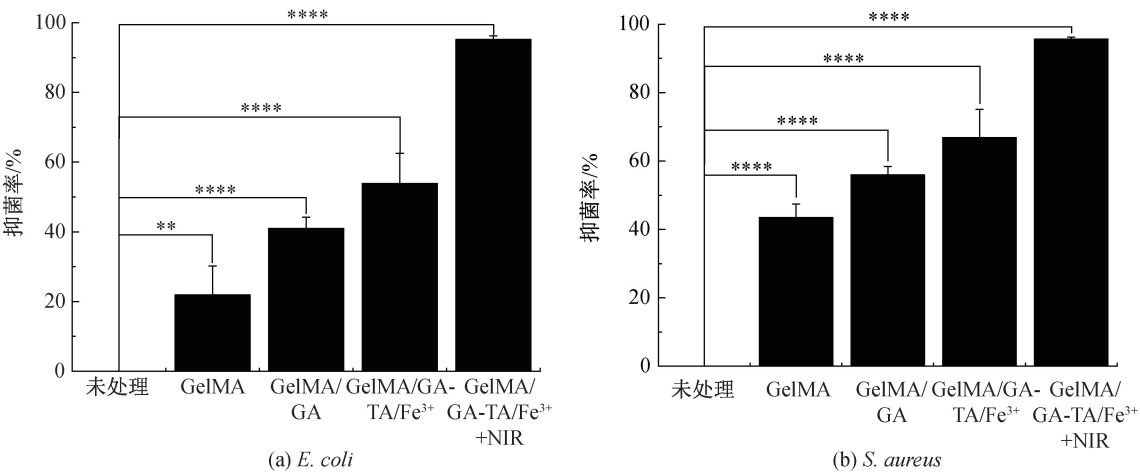


图 12 水凝胶的抑菌率柱状图

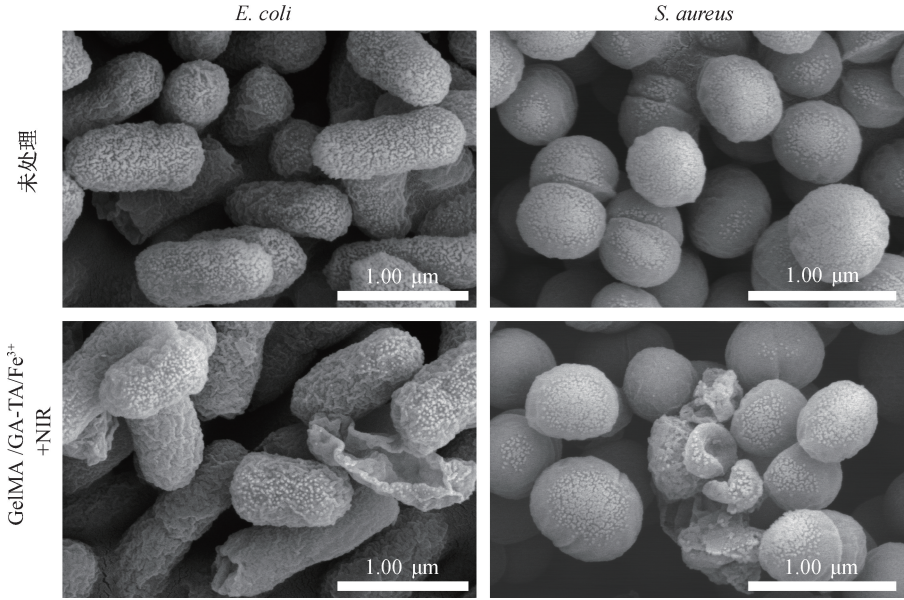


图 13 细菌经 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶光照处理前后的 SEM 图

3 结 论

本文针对传统伤口修复材料力学性能不足、抗菌效果有限及易引发细菌耐药性等关键挑战,以 GelMA 为基材,通过多组分协同设计策略成功构建了一种集力学支撑、吸水保湿与光热抗菌于一体的 GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 复合水凝胶敷料,得到主要结论如下:

- a)GA 及 TA/Fe³⁺ 的引入促成了致密、均一的多孔网络结构。多重交联机制提升了水凝胶的力学稳定性,其在 80%应变下的压缩应力达到 140 kPa,为 GelMA 水凝胶的 2.5 倍。
- b)复合水凝胶具备适宜的吸水保湿能力。TA/Fe³⁺ 配位网络的形成提高了体系交联密度,使复合水凝胶的平衡溶胀率稳定在约 200%,保留了吸收与管理创面渗出液的物理基础。

c)TA/Fe³⁺ 赋予了水凝胶光热抗菌活性。在 808 nm NIR 照射下,水凝胶表面温度可升至 52.5~55.8℃。光热效应协同 MPNs 诱导的细胞膜破裂机制,使其对 *S. aureus* 和 *E. coli* 的抑菌率分别达 95.69%和 95.18%。

综上,GelMA/GA-TA/Fe³⁺ 水凝胶具有优异的光热抗菌性能,为伤口感染治疗提供了新途径,但其体内降解行为、生物相容性、长期抗菌效果等仍需进一步系统研究。未来可结合 3D 打印、药物控释等技术,拓展其在感染创面修复、术后防黏连、智能抗菌敷料等领域的应用。

参考文献:

[1] Kim H S, Sun X Y, Lee J H, et al. Advanced drug delivery systems and artificial skin grafts for skin wound healing[J].

Advanced Drug Delivery Reviews, 2019, 146: 209-239.

[2] Al Mamun A, Shao C X, Geng P W, et al. Recent advances in molecular mechanisms of skin wound healing and its treatments [J]. Frontiers in Immunology, 2024, 15: 1395479.

[3] Qi L F, Zhang C L, Wang B, et al. Progress in hydrogels for skin wound repair[J]. Macromolecular Bioscience, 2022, 22 (7): 2100475.

[4] 王斐斐, 许波, 王平, 等. 纤维素/海藻酸钠/明胶复合水凝胶的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(3): 133-142.

[5] Eming S A, Murray P J, Pearce E J. Metabolic orchestration of the wound healing response[J]. Cell Metabolism, 2021, 33(9): 1726-1743.

[6] Li Y, Hao D F, Feng G, et al. A hydrogel wound dressing ideally designed for chronic wound care[J]. Matter, 2023, 6 (4): 1060-1062.

[7] Butler J, Handy R D, Upton M, et al. Review of antimicrobial nanocoatings in medicine and dentistry: mechanisms of action, biocompatibility performance, safety, and benefits compared to antibiotics[J]. ACS Nano, 2023, 17(8): 7064-7092.

[8] Malik H, Amir F, Jahan Z, et al. Study of shape of zinc oxide nanoparticles on the in-vitro and in-vivo performance of polymeric hydrogels for wound dressing [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2025, 674: 125482.

[9] Chen L X, Guo Y X, Chen L, et al. Injectable Zn²⁺ and paeoniflorin release hydrogel for promoting wound healing[J]. ACS Applied Bio Materials, 2023, 6(6): 2184-2195.

[10] Malektaj H, Drozdov A D, deClaville Christiansen J. Mechanical properties of alginate hydrogels cross-linked with multivalent cations[J]. Polymers, 2023, 15(14): 3012.

[11] Deng Z X, Hu T L, Lei Q, et al. Stimuli-responsive conductive nanocomposite hydrogels with high stretchability, self-healing, adhesiveness, and 3D printability for human motion sensing [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(7): 6796-6808.

[12] Shin J, An S, Choi S, et al. Ferritin nanoshuttle for long-lasting self-healing of phenolic hydrogels[J]. Nano Letters, 2023, 23(13): 5934-5942.

[13] Zhang W W, Yang Y Q, Zhang X J, et al. Research on the combined antibacterial and wound-healing effects of oxygen-carrying hydrogel photodynamic and photothermal therapy-targeting biofilms[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(36): 50404-50416.

[14] Ge Z J, Wu H, Wu J N, et al. Photoresponsive hydrogel dressing containing nanoparticles with excellent synergetic photodynamic, photothermal, and chemodynamic therapies for

effective infected wound healing [J]. ACS Applied Bio Materials, 2024, 7(10): 6970-6984.

[15] Cao H, Duan L X, Zhang Y, et al. Current hydrogel advances in physicochemical and biological response-driven biomedical application diversity [J]. Signal Transduction and Targeted Therapy, 2021, 6: 426.

[16] Li W L, Wang M, Ma H L, et al. Stereolithography apparatus and digital light processing-based 3D bioprinting for tissue fabrication[J]. iScience, 2023, 26(2): 106039.

[17] 冯验军, 刘霞, 蒋海越. 基于甲基丙烯酸酯化明胶的可调刚度水凝胶构建与表征[J]. 中华整形外科杂志, 2024, 40(11): 1149-1156.

[18] Al-Hamayda A, Abu-Jdayil B, Ayyash M, et al. Advances in microencapsulation techniques using Arabic gum: a comprehensive review [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 205: 117556.

[19] 宋天龙, 杨娟, 林家洪, 等. 一种抗菌水凝胶的制备及性能研究[J]. 工业微生物, 2019, 49(5): 54-57.

[20] Gonçalves J P, da Cruz A F, Nunes Á M, et al. Biocompatible gum arabic-gold nanorod composite as an effective therapy for mistreated melanomas[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 551-561.

[21] Gan X Q, Li C, Sun J Y, et al. GelMA/ κ -carrageenan double-network hydrogels with superior mechanics and biocompatibility[J]. RSC Advances, 2023, 13(3): 1558-1566.

[22] Khan M, Shah L A, Khan M A, et al. Synthesis of an unmodified gum Arabic and acrylic acid based physically cross-linked hydrogels with high mechanical, self-sustainable and self-healable performance [J]. Materials Science and Engineering: C, 2020, 116: 111278.

[23] Fang L T, Hu J, Zhang C W, et al. Facile synthesis of tough metallosupramolecular hydrogels by using phosphates as temporary ligands of ferric ions to avoid inhibition of polymerization[J]. Journal of Polymer Science, 2022, 60(15): 2280-2288.

[24] Wang J, Sheng Z C, Liu Y Y, et al. Combined proteomic and transcriptomic analysis of the antimicrobial mechanism of tannic acid against Staphylococcus aureus [J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14: 1178177.

[25] 王鹏祥, 于跃, 房少康, 等. 海藻酸钠/单宁酸-铁复合物近红外光热响应纤维的制备及表征[J]. 大连工业大学学报, 2024, 43(3): 183-188.

[26] Xu N, Gao Y P, Li Z, et al. Immunoregulatory hydrogel decorated with Tannic acid/Ferric ion accelerates diabetic wound healing via regulating Macrophage polarization [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 466: 143173.

团队介绍

李彬学术团队专注于生物医用材料方面的研究,主要研究方向包括智能响应型纳米材料、新型肿瘤治疗与伤口修复材料等。团队包括硕士研究生 6 名。李彬于 2020 年 6 月获武汉大学高分子化学与物理博士学位,2020 年 7 月进入浙江理工大学材料科学与工程学院智能生物材料研究所从事教学与科研工作。团队承担国家自然科学基金 1 项、浙江省自然科学基金项目 1 项;发表 SCI 论文 10 余篇。团队近期开发了多种纳米复合水凝胶材料,并成功应用于肿瘤术后治疗及伤口修复,在国际上具有一定的影响力。

(责任编辑:张会巍)