

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.010

PVAL含量对SA/PVAL复合水凝胶性能的影响

吴闯^{1,2,3}, 孙基桔¹, 贾翰奇¹

(1.扬州大学机械工程学院,江苏扬州 225127; 2.江苏通顺动力科技有限公司,江苏南通 226399;

3.南通福乐达汽车配件有限公司,江苏南通 226372)

摘要:水凝胶已在生物医学领域表现出广阔的应用前景,但是水凝胶材料本身的力学性能和热稳定性仍有待提高。采用钙离子交联法制备了海藻酸钠(SA)/聚乙烯醇(PVAL)复合水凝胶,通过调整SA与PVAL质量比,研究了PVAL含量对水凝胶微观结构、力学性能、吸水性能、热稳定性及生物相容性的影响。结果表明,PVAL的引入显著改善了复合水凝胶的孔隙结构;与纯SA水凝胶相比,含PVAL的复合水凝胶的压缩模量下降,最大压缩应变明显提高,表明PVAL能提高SA水凝胶的塑性和韧性;随着PVAL含量的增加,复合水凝胶的溶胀率显著提升,当SA与PVAL质量比为2:3时,含PVAL的复合水凝胶溶胀率较纯SA水凝胶提升了近3倍;复合水凝胶的热稳定性随着PVAL含量的增加而提高,表明PVAL分子链为复合水凝胶提供了更强的结构支撑;复合水凝胶对上皮细胞具有良好的生物相容性,细胞存活率高,活细胞覆盖率随着PVAL含量的增加而显著提升,最高达到85%。综上所述,SA/PVAL复合水凝胶具有优异的物理力学性能和生物性能,适用于生物医学领域,尤其在药物传递、组织工程和伤口敷料等方面具有广泛应用前景。

关键词:海藻酸钠;聚乙烯醇;水凝胶;力学性能;热稳定性;生物相容性

中图分类号: R318.08 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0072-07

Effect of PVAL content on properties of SA/PVAL composite hydrogels

WU Chuang^{1,2,3}, SUN Jiju¹, JIA Hanqi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Jiangsu Tongshun Power Technology Co., Ltd., Nantong 226399, China; 3. Nantong Fuleda Vehicle Accessory Component Co., Ltd., Nantong 226372, China)

Abstract : Hydrogels have shown broad application prospects in the biomedical field, but the mechanical properties and thermal stability of the hydrogel materials themselves still need to be improved. Sodium alginate (SA) and polyvinyl alcohol (PVAL) composite hydrogels were prepared by calcium ion crosslinking method. Through adjusting the mass ratio of SA to PVAL, the effects of PVAL content on the microstructure, mechanical properties, water absorption properties, thermal stability, and biocompatibility of the hydrogels were studied. The results indicate that the incorporation of PVAL significantly improves the pore structure of the composite hydrogels. Compared with pure SA hydrogel, the compression modulus of the PVAL-containing composite hydrogel decreases and the maximum compression strain increases significantly, indicating that PVAL can improve the plasticity and toughness of SA hydrogel. The swelling ratio of the composite hydrogel increases significantly with the increase of PVAL content, and the swelling ratio of the PVAL-containing composite hydrogel increases nearly 3 times compared with pure SA hydrogel when the mass ratio of SA and PVAL is 2:3. The thermal stability of the composite hydrogel increases with PVAL content increasing, indicating that the PVAL molecular chain provides a stronger structural support for the composite hydrogel. The composite hydrogels possess excellent biocompatibility with epithelial cells, the cell survival ratios are high, and the living cell coverage is significantly improved as the PVAL content increasing, which can be up to 85%. In conclusion, SA/PVAL composite hydrogels exhibit exceptional physical and mechanical properties and biological properties, making them highly suitable for biomedical applications, particularly in drug delivery, tissue engineering, and wound dressing, with broad potential for future use.

Keywords : sodium alginate ; polyvinyl alcohol ; hydrogel ; mechanical property ; thermal stability ; biocompatibility

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(23KJD430014)

通信作者: 吴闯, 博士, 主要研究方向为增材制造及智能装备

收稿日期: 2025-01-04

引用格式: 吴闯, 孙基桔, 贾翰奇. PVAL含量对SA/PVAL复合水凝胶性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 72-78.

WU Chuang, SUN Jiju, JIA Hanqi. Effect of PVAL content on properties of SA/PVAL composite hydrogels[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 72-78.

近年来,天然高分子与合成高分子复合而成的水凝胶因兼具两者优良的性能而受到了广泛关注。其中,海藻酸钠(SA)和聚乙烯醇(PVAL)是常用的两种材料。水凝胶是一种具有三维网络结构的高分子材料,因其优异的生物相容性、保水性和可调节的物理化学性质,广泛应用于生物医学、药物传递、组织工程及环境保护等领域^[1]。

SA是一种天然多糖,来源于褐藻,具有良好的生物相容性和生物降解性。SA独特的离子交联特性使其能够与二价阳离子(如钙离子)发生反应,形成稳定的三维网络结构^[2]。这一特性使得SA在药物释放、细胞培养和伤口敷料等领域具有广泛的应用前景。

PVAL是一种广泛应用的合成聚合物,因其优异的物理性能和化学稳定性而备受关注^[3]。PVAL的水溶性和可交联特性使其能够与多种天然聚合物结合,形成性能优异的复合材料。此外,PVAL在共混改性方面的配方可调节性为水凝胶性能的优化提供了更大的可能性。

研究发现,SA与PVAL复合形成的水凝胶能够在保持良好的生物相容性和水合作用的同时,改善传统水凝胶在力学性能和稳定性方面的不足。例如,使用静电纺丝技术制备的SA/PVAL水凝胶,能够通过调节两种材料的比例和交联方式,优化水凝胶的孔隙结构和力学性能^[4]。一些研究采用了冷冻-解冻交替法、化学交联法等方式,在SA和PVAL的复合材料中引入交联剂,如戊二醛、环氧化物等,以提高水凝胶的强度和稳定性。

例如,Yang等^[5]采用PVAL和SA复合,利用静电纺丝技术制备了具有良好孔隙结构的纳米纤维水凝胶。研究表明,PVAL的引入不仅增强了水凝胶的亲水性,还有效提高了细胞在水凝胶表面的附着和生长能力。与此同时,PVAL的加入则改善了水凝胶的力学性能,使纳米纤维水凝胶在力学性能和稳定性方面能够更好地模拟天然组织。此外,研究还发现,PVAL与SA的复合水凝胶在药物释放系统中表现出较好的缓释效果,能够在较长时间内持续释放药物,满足临床需求^[6]。

然而,尽管SA/PVAL复合水凝胶在生物医用领域表现出较好的前景,但仍存在一些问题需要进一步解决。例如,水凝胶的力学性能仍不足以应对某些应用场景中的高负荷需求,且降解速率较快或较

慢都会影响其在体内的应用效果^[7]。因此,如何通过调整SA和PVAL的比例、交联方式及复合材料的微观结构,进一步优化SA/PVAL复合水凝胶力学性能和降解特性,是当前研究的重点。

笔者旨在探讨SA/PVAL复合水凝胶的制备方法及其特性。利用钙离子对SA/PVAL复合水凝胶进行交联,与冻融交联制备的水凝胶相比,该交联方法可提高水凝胶的交联效率。通过调节SA与PVAL的比例,研究PVAL含量对水凝胶物理力学性能和生物性能的影响,为SA/PVAL复合水凝胶在生物医学和环境应用中的进一步开发提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SA:分析纯,上海展云化工有限公司;

无水氯化钙:10005861,国药集团化学试剂有限公司;

PVAL:分析纯,无锡市亚泰联合化工有限公司;

碧云天活/死染剂盒、CCK-8细胞活力试剂盒:市售。

1.2 主要仪器及设备

磁力搅拌水浴锅:SHJ-2A,常州金坛友良仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):GeminiSEM 300,德国Carl Zeiss公司;

鼓风干燥箱:101-OB,绍兴市苏珀仪器有限公司;

电子万能试验机:LT-5000,洛泰精密仪器(东莞)有限公司;

冷冻干燥箱:XU-10N-60A,上海市析牛莱伯仪器有限公司;

热重(TG)分析仪:Pyris 1 TGA,美国PerkinElmer公司;

倒置荧光显微镜:M165FC,德国徕卡公司;

多功能酶标仪:Thermo MULTISKANGO,美国Thermo Multiskan公司。

1.3 复合水凝胶溶液配制

将适量的PVAL粉末溶解于60~80℃的去离子水中,得到均匀的PVAL溶液后冷却至室温;同时,将SA粉末溶解于去离子水中得到SA溶液;然后按所需质量比(1:1和2:3)混合SA与PVAL溶液,搅拌均匀,形成SA/PVAL混合溶液;再制备氯化钙溶液,将SA/PVAL溶液倒入模具并浸入氯化钙溶液中,或

将氯化钙溶液滴加至SA/PVAL溶液表面,使钙离子与SA中的羧基交联5 min形成水凝胶;交联完成后,取出水凝胶并用去离子水多次冲洗,去除未反应的氯化钙及杂质,最后可根据需要对水凝胶进行干燥处理,得到SA/PVAL复合水凝胶。采用相同方法(不包括溶液混合步骤)制备纯SA水凝胶,简称为S0;SA与PVAL质量比为1:1和2:3的SA/PVAL复合水凝胶简称为S1和S2。

1.4 测试与表征

1.4.1 SEM表征

将制备好的水凝胶冷冻干燥24 h后,用SEM拍摄水凝胶的横截面以及表面微观形貌^[8]。使用ImageJ软件提取孔隙并计算孔隙面积,然后根据圆的面积公式计算孔隙大小(直径)。

1.4.2 力学性能测试

参考GB/T 1448-2005,使用电子万能试验机对水凝胶进行压缩性能测试^[9],压缩速度为5 mm/min。

1.4.3 吸水性能测试

将制备好的水凝胶记录初始重量(W_0)后,分别在去离子水中浸泡1,3,5,7,9,13,24,32 h,然后记录不同时间 t 的水凝胶质量(W_t)。用重量法^[10]计算SA/PVAL水凝胶的溶胀率 A ,见式(1)。

$$A = \left(\frac{W_t - W_0}{W_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

1.4.4 热稳定性分析

水凝胶的热稳定性^[11]采用TG分析仪进行测试。将样品干燥至恒重,并密封在铝板中,然后放入TG分析仪中开始测试。当系统达到平衡时,加热速率为10 °C/min,升温范围为20~100 °C,分析水凝胶的热稳定性。

1.4.5 生物性能检测

良好的生物相容性是判断复合水凝胶能否用于生物医学领域的一个非常重要的标准,只有良好的生物相容性才能够有利于细胞在水凝胶上的黏附、增殖与分化^[12]。实验采用笔者课题组培养的上皮细胞,将其接种到3种水凝胶上,并进行5 d的细胞培养。

通过对上皮细胞进行染色从而观察细胞在复合水凝胶上的生长情况。分别将培养了1,3,5 d的含上皮细胞的复合水凝胶放置在倒置荧光显微镜下,使用碧云天活/死染料盒对复合水凝胶上的上皮细胞进行染色^[13],观察不同组别水凝胶上皮细胞在不同天数的生长情况,并利用倒置荧光显微镜的拍

摄功能对复合水凝胶样品的活细胞与死细胞分别进行拍摄^[14]。利用ImageJ软件分析活细胞覆盖率,计算公式见式(2)。

$$P_c = \frac{P_{CA}}{P_{TA}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_c 为活细胞覆盖率; P_{CA} 为活细胞覆盖面积; P_{TA} 为检测样品面积。

为了验证制备的SA/PVAL复合水凝胶对细胞的毒性,需要对其进行细胞毒性检测^[15]。将3种复合水凝胶分别裁剪成与96孔板中的孔大小一致的圆片,放入96孔板中,并在这些待检测的圆片上进行细胞培养。使用CCK-8细胞活力试剂盒对培养后的圆片进行毒性检测并使用多功能酶标仪测量光吸收值(OD值)^[16],按照式(3)计算细胞存活率。

$$P = \frac{A_s - A_b}{A_c - A_b} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P 为细胞存活率; A_s 为实验孔的OD值; A_c 为对照孔的OD值; A_b 为空白孔的OD值。

2 结果与讨论

2.1 水凝胶的微观结构

图1分别显示了3种水凝胶的表面和截面微观结构。由图1看出,SA/PVAL复合水凝胶具有相互渗透的多孔网络结构,孔分布均匀。PVAL粒子没有明显的团聚,它们在SA基体中分布均匀,起到分散强化的作用。加入PVAL后的水凝胶表面形貌相对粗糙、致密,有利于细胞的黏附和伸展。

从图1可以观察到,SA/PVAL复合水凝胶的孔隙结构比纯SA水凝胶更加发达,这可能是因为PVAL的加入增加了水凝胶的交联密度,从而提高了其孔隙率^[17]。此外,复合水凝胶的孔径分布也更加均匀,这有助于改善细胞的生长环境,促进细胞的增殖和分化。通过对比不同PVAL含量的复合水凝胶,可以发现随着PVAL含量的增加,水凝胶的孔隙结构变得更加细致,这表明PVAL的加入对水凝胶的微观结构具有显著的调控作用。

2.2 水凝胶的力学性能

图2为3种水凝胶的压缩应力-应变曲线。观察图2可以发现,当复合水凝胶中加入适量PVAL后,复合材料的压缩模量有所下降。这是由于PVAL本身具有更高的柔软度和塑性。这种变化导致在较低应力水平下,应力-应变曲线变得更加平缓,意味着在相同的应变条件下,所需施加的应力减少。另外,含PVAL的复合水凝胶的最大压缩应变较纯SA

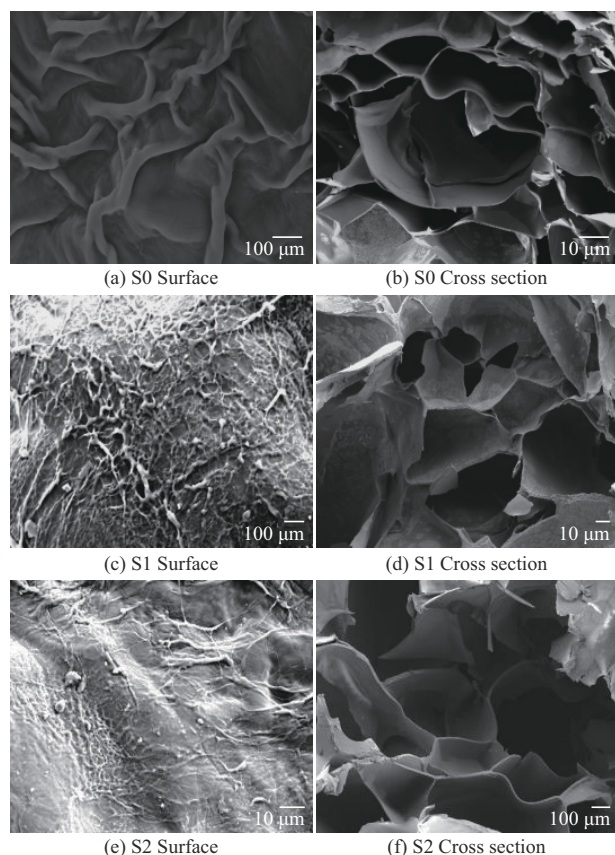


图1 纯SA水凝胶及SA/PVAL复合水凝胶的微观形貌

Fig. 1 Microscopic morphology of pure SA hydrogel and SA/PVAL composite hydrogels

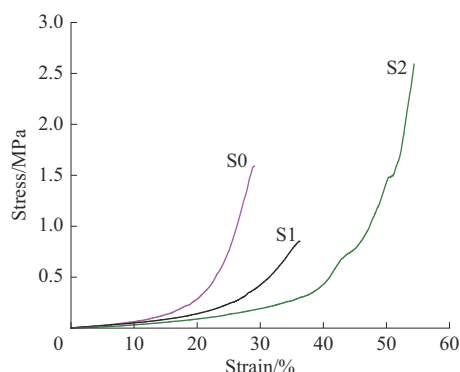


图2 纯SA水凝胶及SA/PVAL复合水凝胶的压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Compression stress-strain curves of pure SA hydrogel and SA/PVAL composite hydrogels

水凝胶有明显提高。SA与PVAL之间的相互作用可能对复合水凝胶力学性能产生影响^[18]。这些相互作用可能包括氢键或其他分子间作用力,它们可以增强或减弱材料的强度和弹性。SA与PVAL的比例对复合材料的压缩性能有着显著的影响。通常情况下,提高PVAL的含量会降低复合水凝胶的模量和强度,但同时可能会提升其韧性和塑性。另外,压缩后期,S2的压缩应力明显提高,这可能是因

为S2的韧性和塑性较好,能够被更大幅度地压缩,因此在压缩后期能够承受更高的压缩应力。

2.3 水凝胶的吸水性能

图3为3种水凝胶的溶胀率-时间曲线。由图3看出,随着PVAL含量的增加,SA/PVAL复合水凝胶的溶胀率显著提升,S2的溶胀率较S0提升了近3倍。这说明PVAL的引入显著增强了SA的吸水性能。不同PVAL含量的复合材料吸水率的差异可能与PVAL的亲水性和交联密度有关^[19],SA分子链上含有丰富的羟基和羧基,这些官能团能够与水分子形成氢键,从而提升吸水性。PVAL同样富含羟基,这两种高分子的亲水官能团能够协同作用,进一步增强水凝胶的吸水能力。PVAL是一种高吸水性聚合物^[20],其分子链上的羟基能够与水分子形成氢键,吸收大量水分。当PVAL与SA结合时,复合水凝胶的亲水性得到增强,从而进一步提升了水凝胶的吸水性能。综上所述,SA与PVAL复合后,通过分子间相互作用、亲水性增强、交联密度调节等多种因素的共同作用,实现了复合水凝胶吸水性能的显著提高。

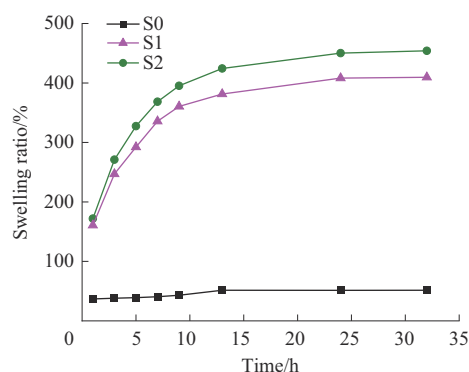


图3 纯SA水凝胶及SA/PVAL复合水凝胶的溶胀率-时间曲线

Fig. 3 Swelling ratio-time curves of pure SA hydrogel and SA/PVAL composite hydrogels

2.4 水凝胶的热稳定性

TG分析是一种热分析技术,用于分析材料在加热或冷却过程中的质量变化,以了解材料的热稳定性和组成^[21]。图4为3种水凝胶的TG曲线。从图4可以看出,随着温度不断升高,3种水凝胶皆出现不同程度的质量损失。其中,S0即纯SA水凝胶的质量下降速率最快,表明其热稳定性相对较差。而S1和S2,即含有不同PVAL含量的复合水凝胶,显示出更为缓慢的质量损失速率,这表明PVAL的加入提高了复合水凝胶的热稳定性。此外,S2的质量损失曲线在高温区域更为平缓,表明其具有最佳的

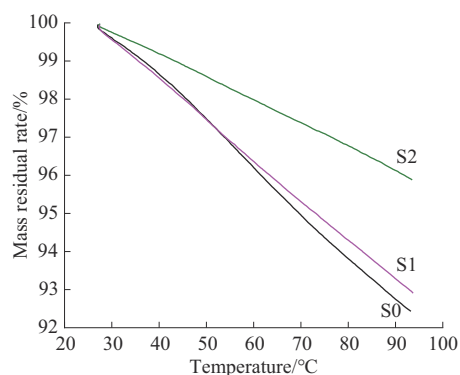


图4 纯SA水凝胶及SA/PVAL复合水凝胶的TG分析曲线

Fig. 4 TG analysis curves of pure SA hydrogel and SA/PVAL composite hydrogels

热稳定性^[22]。这可能是因为PVAL的高分子链在高温下能够提供更强的结构支撑,从而减缓了材料的热分解过程。通过TG分析可以得出结论,SA/PVAL复合水凝胶的热稳定性与PVAL的含量密切相关,适量的PVAL添加能够显著提升水凝胶的热

稳定性。

2.5 水凝胶的生物性能

在生物医学应用中,水凝胶的生物相容性^[23]是决定其成功应用的关键因素之一。因此,对SA/PVAL复合水凝胶的生物相容性进行了细胞实验评估。通过细胞培养和活/死染色方法观察上皮细胞在水凝胶上的生长情况,同时评估水凝胶对细胞的毒性,以评价水凝胶的生物性能。

2.5.1 细胞培养与染色

使用碧云天活/死染剂盒对3种水凝胶上的上皮细胞进行染色,获得的活细胞荧光显微镜图像如图5所示,其中绿色荧光代表活细胞。图5表明,复合水凝胶具有较好的细胞附着性^[24],且随着培养时间的延长,细胞在水凝胶表面不断增殖。具体而言,SA/PVAL复合水凝胶的活细胞覆盖率逐渐提高,细胞在水凝胶表面的生长和扩展良好。

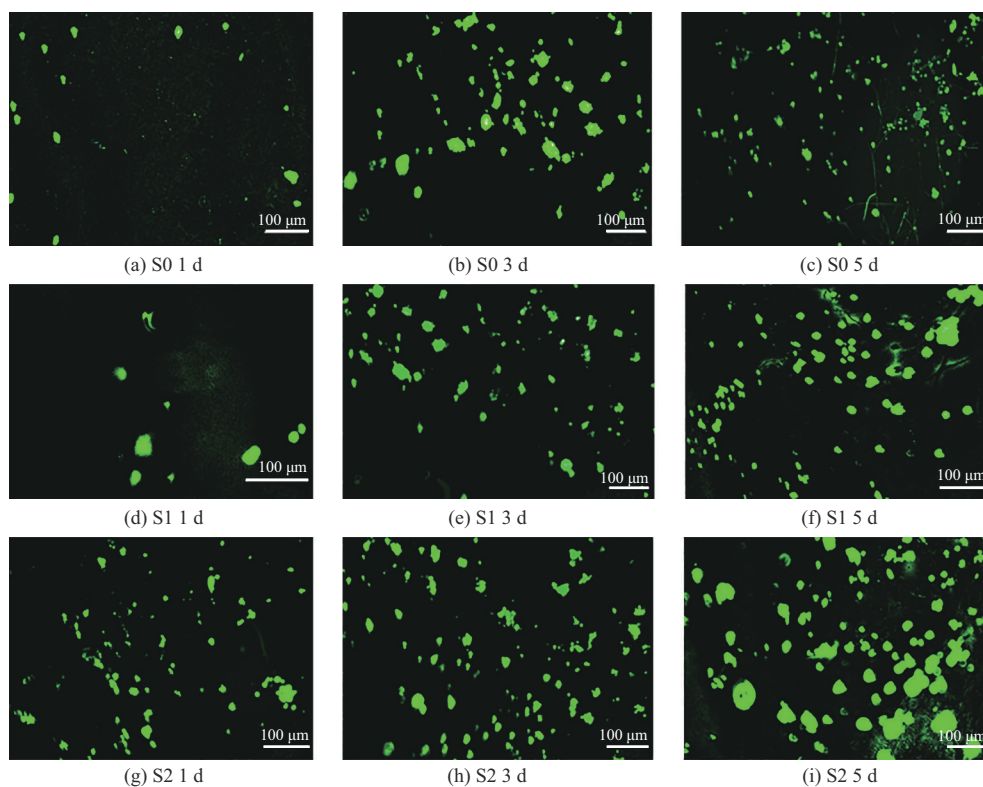


图5 纯SA水凝胶及SA/PVAL复合水凝胶在不同时间下的活细胞荧光显微镜图像

Fig. 5 Fluorescent staining images of live cells on pure SA hydrogel and SA/PVAL composite hydrogels under different times

在5 d的培养期内,S1和S2的细胞生长情况较为理想,表明这些复合水凝胶不仅具备较好的细胞附着性,还促进了细胞的增殖与分化。相较于纯SA水凝胶,加入PVAL后,复合水凝胶的细胞亲和力有所提升,这与PVAL的亲水性和更优的交联结构^[25]

有关。通过图5中的荧光显微镜图像可以得出,S2的活细胞覆盖率达到了85%,相较于S0的76%以及S1的81%,细胞存活率有较明显的提高。这表明复合水凝胶对细胞具有较低的毒性和较好的生物相容性。

2.5.2 细胞毒性检测

为了进一步验证不同PVAL含量的复合水凝胶对细胞的毒性,还采用CCK-8细胞活力试剂盒进行细胞毒性检测。通过在96孔板中培养细胞并使用CCK-8试剂盒测定细胞的存活率,得到3种水凝胶的细胞活力检测结果,如图6所示。根据图6的细胞存活率数据,可以发现3种水凝胶样品的细胞存活率普遍较高,表明它们对细胞几乎没有毒性。

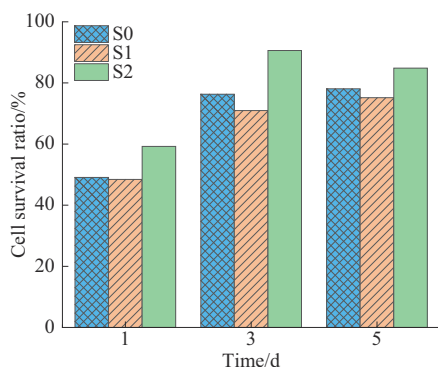


图6 纯SA水凝胶及SA/PVAL复合水凝胶在不同时间下的CCK-8细胞活力检测结果

Fig. 6 CCK-8 assay results for cell viability in pure SA hydrogel and SA/PVAL composite hydrogels under different times

随着培养时间的延长,3种水凝胶样品的细胞存活率均逐渐趋于稳定,其中S2的细胞存活率高于纯SA水凝胶,进一步证明了复合水凝胶在生物医学应用中的优势。结果表明,PVAL的引入不仅改善了复合水凝胶的力学性能和吸水性能,还增强了其对细胞的生物相容性,降低了细胞毒性。

3 结论

成功制备了SA/PVAL复合水凝胶,并系统评估了其微观结构、力学性能、吸水性能、热稳定性及生物相容性。通过调整SA与PVAL的比例,考察了PVAL对水凝胶性能的影响,结果表明,PVAL的加入显著改善了复合水凝胶的物理力学性能和生物性能。

(1)PVAL提高了复合水凝胶的孔隙度和孔的均匀性,尤其在较高PVAL含量下,水凝胶孔隙结构更加细致,有利于细胞附着和增殖。

(2)加入PVAL后,复合水凝胶的塑性和韧性得到加强,可为组织工程软骨的构建提供强力支撑。

(3)PVAL的亲水性增强了复合水凝胶的吸水性能,其溶胀率较纯SA最高提升了近3倍,在水合作用和药物释放等领域表现出较好的应用前景。

(4)PVAL的加入提高了复合水凝胶的热稳定

性,表明PVAL分子链为复合水凝胶提供了更强的结构支撑。

(5)细胞培养与染色实验及细胞毒性检测结果表明,复合水凝胶具有良好的生物相容性,细胞存活率和生长情况随着PVAL含量的增加而改善,活细胞覆盖率最高可达到85%,表明SA/PVAL复合水凝胶在细胞培养和组织工程等生物医学领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 杨金川,张国俊,付华. 聚乙烯醇/海藻酸钠原位生长ZIF-67水凝胶的制备及其提高Cu(II)吸附的应用[J/OL]. 复合材料学报, 2024:1-10 [2025-01-04]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240923.002>. YANG Jinchuan, ZHANG Guojun, FU Hua. Fabrication of polyvinyl alcohol/sodium alginate in-situ growth ZIF-67 hydrogel and its application to enhance the adsorption performance of Cu(II)[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024:1-10[2025-01-04]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240923.002>.
- [2] CHEN H R, ZHANG H T, SHEN Y, et al. Instant in-situ tissue repair by biodegradable PLA/gelatin nanofibrous membrane using a 3D printed handheld electrospinning device[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9. DOI: 10.3389/fbioe.2021.684105.
- [3] WANG S B, XIONG Y, CHEN J T, et al. Three dimensional printing bilayer membrane scaffold promotes wound healing[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2019, 7. DOI: 10.3389/fbioe.2019.00348.
- [4] 徐亮,任壮,叶子嫣,等. SA/CS/PVA复合水凝胶的制备和吸附性能[J]. 湖北理工学院学报, 2024, 40(3):28-33, 49. XU Liang, REN Zhuang, YE Ziyang, et al. Preparation and adsorption performance of PVA-functionalized sodium alginate composite hydrogels[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2024, 40(3): 28-33, 49.
- [5] YANG J M, YANG J H, TSOU S C, et al. Cell proliferation on PVA/sodium alginate and PVA/poly(γ -glutamic acid) electrospun fiber[J]. Materials Science and Engineering: C, 2016, 66:170-177.
- [6] QING X Y, HE G H, LIU Z D, et al. Preparation and properties of polyvinyl alcohol/N-succinyl chitosan/lincomycin composite antibacterial hydrogels for wound dressing[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 261. DOI:10.1016.carbpo.2021.117875.
- [7] 连伟龙,连琴,焦天,等. 皮肤修复生物3D打印的研究进展与挑战[J]. 光电工程, 2021, 48(8):4-21. LIAN Weilong, LIAN Qin, JIAO Tian, et al. The research progress and challenge of 3D bioprinting for skin repairing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(8):4-21.
- [8] WU J, WU Z X, HAN S J, et al. Extremely deformable, transparent, and high-performance gas sensor based on ionic conductive hydrogel[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(2): 2364-2373.

- [9] YAN W C, DAVOODI P, VIJAYAVENKATARAMAN S, et al. 3D bioprinting of skin tissue: from pre-processing to final product evaluation[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2018, 132: 270–295.
- [10] 李鹏, 刘慧玲, 吴康, 等. 可注射生物降解型复合淀粉水凝胶修复关节骨-软骨缺损的应用研究[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2021, 18(3): 6–12, 23.
LI Peng, LIU Huiling, WU Kang, et al. Preparation of an injectable and degradable composite starch hydrogel and its application in osteochondral defect repair[J]. *Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study*, 2021, 18(3): 6–12, 23.
- [11] 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.
WANG Feihao, XU Bo, WANG Ping, et al. Preparation and properties of cellulose/sodium alginate/gelatin composite hydrogel[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2024, 40(3): 133–142.
- [12] 王亚南, 仵丹丹, 许灿, 等. 基于PVA-SA高强度仿生水凝胶的制备及性能研究[J]. *山东化工*, 2024, 53(2): 57–58, 62.
WANG Yanan, WU Dandan, XU Can, et al. Preparation and properties of high strength bionic hydrogels based on PVA-SA[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2024, 53(2): 57–58, 62.
- [13] 吴闯, 王海翔, 孙基桔. 葎草茎纳米纤维素在聚己内酯人工血管的应用[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(12): 137–144.
WU Chuang, WANG Haixiang, SUN Jiju. Application of plant nano-cellulose in polycaprolactone vascular stents[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(12): 137–144.
- [14] 游艾佳. 海藻酸钠/明胶水凝胶敷料包载4-胆甾烯-3-酮修复全层皮肤损伤的研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2023.
YOU Aijia. The study of SA/Gel/(+)-4-Cholesten-3-one hydrogel for the repair of full-thickness skin defect[D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2023.
- [15] WANG Z W, CHEN J, WANG L F, et al. Flexible and wearable strain sensors based on tough and self-adhesive ion conducting hydrogels[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7(1): 24–29.
- [16] 林木松, 宋梦梦, 梁相永, 等. 增韧水凝胶的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(11): 174–180, 190.
LIN Musong, SONG Mengmeng, LIANG Xiangyong, et al. Progress on toughening mechanism of hydrogels[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(11): 174–180, 190.
- [17] 钟启明, 张佳雨, 郭城, 等. 海藻酸钠水凝胶3D打印效果和流变特征及其相关性分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(23): 21–28.
ZHONG Qiming, ZHANG Jiayu, GUO Cheng, et al. Correlation analysis of 3D printability and rheological properties of sodium alginate hydrogels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(23): 21–28.
- [18] 周玲童. 三种海藻酸盐基水凝胶的制备、性能及应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
ZHOU Lingtong. Preparation, properties and application of three alginate-based hydrogels[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.
- [19] 宋世金. 基于改性聚乙二醇/海藻酸钠基水凝胶及其纤维的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
SONG Shijin. Preparation and properties of hydrogels and fibers based on modified polyethylene glycol/sodium alginate[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [20] 陈婉莹, 高建平, 马晶军. 海藻酸钠复合水凝胶研究进展[J]. *北京服装学院学报(自然科学版)*, 2022, 42(4): 101–108.
CHEN Wanying, GAO Jianping, MA Jingjun. Research progress of sodium alginate composite hydrogel[J]. *Journal of Beijing Institute of Fashion Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 42(4): 101–108.
- [21] 樊凯奇, 贾彩敬, 赵帅, 等. 高弹性双网络水凝胶的制备及其性能研究[J]. *轻工学报*, 2017, 32(6): 35–42.
FAN Kaiqi, JIA Caijing, ZHAO Shuai, et al. Study on preparation and properties of highly elastic dual-network hydrogels[J]. *Journal of Light Industry*, 2017, 32(6): 35–42.
- [22] ALVAREZ-RIVERA F, CONCEIRO A, ALVAREZ-LORENZO C. Epalrestat-loaded silicone hydrogels as contact lenses to address diabetic-eye complications[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2018, 122: 126–136.
- [23] KAUR A, PREET S, KUMAR V, et al. Synergetic effect of vancomycin loaded silver nanoparticles for enhanced antibacterial activity[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, 176: 62–69.
- [24] ZARGHAMI V, GHORBANI M, BAGHERI K P, et al. In vitro bactericidal and drug release properties of vancomycin-amino surface functionalized bioactive glass nanoparticles[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 241. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122423.
- [25] CHEN K, ZONG T, CHEN Q, et al. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol/sodium alginate/carboxymethyl cellulose composite hydrogels with oriented structure[J]. *Soft Materials*, 2022, 20(1): 99–108.