

功能化异种脱细胞真皮：从被动支架到主动修复的进化

——烧伤治疗应用叙述性综述

曾 灿¹, 刘益宏^{2*}

¹吉首大学医学院, 湖南 吉首

²张家界市人民医院骨科, 湖南 张家界

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年8月26日; 发布日期: 2026年9月4日

摘 要

烧伤是热力、化学、电力或辐射等单因素或多因素导致的皮肤及皮下组织损伤, 严重时可累及深部器官并引发全身反应, 发生大面积烧伤时易引发创面感染、脓毒血症等严重并发症, 对患者的生命安全造成显著威胁。创面修复作为烧伤治疗的最终目标, 生物材料的合理选用是提升创面修复效果的关键所在。异种脱细胞真皮(Xenogenic Acellular Dermal Matrix, XADM)经特定工艺去除免疫原性成分后, 保留真皮胶原三维网状结构、基底膜、弹性蛋白、糖胺聚糖及生长因子, 制成无免疫原性、可血管化、可重塑的生物支架, 具有良好的生物相容性、组织再生诱导性和力学稳定性, 是烧伤创面修复中提升修复质量的关键生物材料, 在烧伤创面修复领域应用广泛。本文采用叙述性综述方法, 以功能化XADM从被动支架到主动修复的演变过程为核心视角, 总结了XADM制备工艺优化及生物学特性的研究进展, 探讨了其作用机制及在烧伤创面修复中的临床疗效, 并分析了当前存在的问题与未来发展方向, 旨在为优化XADM的临床应用及开展相关研究提供参考依据。

关键词

异种脱细胞真皮, 脱细胞真皮, 烧伤, 创面修复, 生物材料

Functionalized Xenogenic Acellular Dermal Matrix: Evolution from Passive Scaffold to Active Repair

—A Narrative Review of Its Application in Burn Treatment

Can Zeng¹, Yihong Liu^{2*}

*通讯作者。

文章引用: 曾灿, 刘益宏. 功能化异种脱细胞真皮: 从被动支架到主动修复的进化[J]. 临床医学进展, 2026, 16(9): 482-488. DOI: 10.12677/acm.2026.1693071

¹Medical College of Jishou University, Jishou Hunan²Department of Orthopedics, Zhangjiajie People's Hospital, Zhangjiajie Hunan

Received: August 2, 2026; accepted: August 26, 2026; published: September 4, 2026

Abstract

Burns are injuries to the skin and subcutaneous tissues caused by single or multiple factors such as heat, chemicals, electricity or radiation. In severe cases, they can involve deep organs and trigger systemic reactions. Extensive burns are particularly prone to serious complications such as wound infection and sepsis, posing a significant threat to patients' lives. As the ultimate goal of burn treatment is wound repair, the rational selection of biomaterials is critical to improving wound repair outcomes. After removing immunogenic components through specific processes, xenogenic acellular dermal matrix (XADM) retains the three-dimensional reticular structure of dermal collagen, basement membrane, elastin, glycosaminoglycans and growth factors, forming a non-immunogenic, vascularizable and remodelable biological scaffold. With favorable biocompatibility, tissue regeneration-inducing property and mechanical stability, it serves as a key biomaterial for improving repair quality in burn wound repair and is widely used in this field. Adopting a narrative review approach and taking the evolution of functionalized XADM from passive scaffold to active repair as the core perspective, this paper summarizes the progress in preparation process optimization and biological characteristics of XADM, explores its action pathways and clinical efficacy in burn wound repair, and analyzes existing problems and development directions, so as to provide references for optimizing the clinical application of XADM and conducting related research.

Keywords

Xenogeneic Acellular Dermis Matrix, Acellular Dermis Matrix, Burn, Wound Repair, Biomaterials

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

烧伤是由热力、化学、电流、放射线照射等致伤因素引发的机体组织损害,病变以皮肤及皮下组织受累为主,严重损伤可深达肌肉层[1]。其中深Ⅱ度及以上的深度烧伤,可造成真皮深层乃至皮肤全层坏死,创面丧失依靠残存皮肤附件自主愈合的生理基础,须通过外科手术干预、生物材料移植等方式辅助修复,方可实现创面的闭合与愈合[2]。传统烧伤创面修复材料存在诸多局限:如凡士林纱布等传统敷料仅能实现基础物理覆盖,无法调控创面愈合微环境促进创面愈合进程,且换药时容易与创面粘连造成二次机械损伤和剧烈疼痛[3];自体皮移植虽被公认为创面修复的“金标准”,但受限于供皮区面积的条件,难以满足大面积烧伤患者的修复需求,并且取皮时会造成新的创伤,供皮区还会出现瘢痕增生、色素沉着等并发症[4];同种异体皮是一种很好的考虑方向,但受限于来源稀缺、免疫排斥反应风险较高,同时存在伦理争议和疾病传播隐患,在临床应用中受到严格限制[5]。

随着组织工程技术与再生医学的快速发展,XADM 凭借其独特的优势,成为烧伤创面修复领域极具应用潜力的皮肤替代材料。在 XADM 的原材料选择中,猪皮因与人类皮肤在解剖结构、胶原成分比例及

力学特性上高度相似,且猪繁殖周期短、易规模化养殖、成本可控,已成为 XADM 的首选原材料[5][6]。通过特定的脱细胞处理工艺,可以有效去除猪皮中的细胞成分、血管内皮细胞、神经末梢等免疫原性物质,同时最大程度保留天然真皮三维胶原网架结构及生物活性成分。这些保留的天然结构能为成纤维细胞、内皮细胞等修复细胞提供理想的迁移、增殖和分化支架,从而显著促进创面愈合[7]。临床研究证实, XADM 在深度烧伤创面修复中展现出显著优势,可缩短创面愈合时间、减轻疼痛程度、减少瘢痕增生,改善修复后皮肤的外观与功能,尤其适用于小儿烧伤、大面积烧伤等皮源紧缺的特殊人群[8]。本文以叙述性综述形式,围绕功能化 XADM 从被动支架向主动修复进化的核心视角,系统梳理 XADM 的制备工艺、结构-功能特性、临床应用现状与现存挑战,为烧伤修复技术的优化提供理论支撑与临床依据。

2. 异种脱细胞真皮的制备工艺

2.1. 制备核心目标与整体流程

XADM 制备的核心目标是在最大限度保留真皮天然三维结构与生物活性成分的前提下,尽可能去除异种皮肤中的免疫原性物质,降低临床应用中的免疫排斥风险。其主要制备流程涵盖取材、预处理、脱细胞处理、消毒灭菌及修饰改性等环节,取材以健康无传染病、无皮肤损伤的猪皮为首选[9]。取材后,通过机械刮除去除表皮及皮下脂肪组织,并采用梯度脱脂法去除皮肤内脂质成分。研究发现,优化梯度脱脂预处理流程可有效提升后续脱细胞处理的效率与彻底性,降低残留杂质对材料生物相容性的影响[10]。

2.2. 核心脱细胞工艺与修饰改性

XADM 制备的核心是脱细胞处理,常用方法包括物理法、化学法、生物法及多种方式联合法,各方法在脱细胞处理中存在一定的差异。物理法(如冷冻干燥)通过物理作用破坏细胞结构去除细胞成分,对胶原结构损伤较小;化学法(如去污剂处理)利用化学试剂溶解细胞成分,脱细胞效率高,但易破坏胶原天然结构与生物活性成分;生物法(如酶消化法)采用特异的酶等特异性降解细胞成分,方法可靠,操作简单,处理条件温和、靶向性强,可精准去除细胞成分,抗原性小,是理想的组织修复材料[11]-[13]。

为进一步提升材料的生物活性与临床疗效,制备后的 XADM 需进行修饰改性,常用方法包括表面改性、复合生长因子及干细胞处理等。例如,使用基因工程技术将 CTLA4Ig 基因转染至猪皮敷料中,不仅进一步降低了猪皮敷料的免疫原性,还显著增强了其抗炎和抗感染能力,从而能够更好地修复复杂烧伤创面[14]。

3. 结构-功能一体化: XADM 的生物学特性与修复作用机制

XADM 并非通过单一途径实现创面修复,而是通过自身结构特征与生物活性组分协同发挥作用,从物理屏障、炎症调控、组织引导到瘢痕抑制形成完整修复链条,实现从被动支撑到主动调控的功能升级。

3.1. 三维胶原网架: 物理屏障与组织再生引导

深度烧伤会破坏皮肤天然屏障功能,使创面直接暴露于外界环境,病原菌易侵入并引发感染。XADM 覆盖创面后,可快速形成物理屏障,有效阻挡细菌、真菌等病原菌的侵入;部分经过抗菌修饰的 XADM (如复合银离子、抗菌肽)还能直接发挥抑菌或杀菌作用,进一步增强创面抗感染能力[15][16]。

同时,脱细胞处理后保留的真皮天然三维胶原网架结构,孔径分布均匀、孔隙率高,能为成纤维细胞、内皮细胞等修复细胞提供稳定的附着与增殖空间,引导新生组织有序生长,有效抑制瘢痕组织无序增生,使修复后皮肤质地更接近正常皮肤[9][17][18]。该网架结构通透性良好,可允许氧气和营养物质渗透,为成纤维细胞增殖分化、新生胶原合成提供有利微环境,同时促进内皮细胞迁移与有序排列,加

速创面血管化与上皮化进程。研究证实,清创术后使用活性 XADM 可显著提高创面上皮化率,缩短组织再生周期[19] [20]。

3.2. 生物活性组分: 炎症微环境调控与愈合适配

过度或持续的炎症反应会破坏创面愈合微环境,延缓愈合进程。XADM 能够调控炎症细胞浸润和细胞因子分泌,平衡炎症反应。CTLA4Ig 基因修饰的猪皮敷料可显著降低创面组织中肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6 等促炎因子的表达水平,同时增加白细胞介素-10 等抗炎因子的分泌量,对创面炎症反应起到明显减轻作用[14] [21]。此外,XADM 的降解产物可促进巨噬细胞由促炎的 M1 型向抗炎修复的 M2 型转化,M2 型巨噬细胞能分泌多种抗炎因子与生长因子,进一步优化创面愈合微环境[22] [23]。

XADM 主要成分为胶原蛋白,具有良好的生物降解性,其降解速率与创面愈合进程精准匹配,降解产物可被机体吸收利用,参与新生组织构建[24] [25]。同时材料中保留的糖胺聚糖、内源性生长因子等生物活性成分,可直接调控修复细胞的生物学行为,提升创面组织中血管内皮生长因子、碱性成纤维细胞生长因子的表达水平,促进创面血管化和上皮化进程。

3.3. 力学性能与生物相容性: 功能修复的基础支撑

天然胶原网架赋予 XADM 适宜的拉伸强度与弹性,能够耐受创面收缩过程中产生的机械张力,以及日常活动带来的反复应力。在临床应用中,XADM 与自体皮联合移植用于修复手部深度烧伤,术后患者关节活动度良好,无修复部位挛缩或破损发生[26]。

通过脱细胞处理去除主要免疫原性成分后,材料的免疫排斥风险显著降低,具备良好的生物相容性。临床研究发现,将 XADM 应用于创面治疗时,患者的白细胞介素、干扰素等免疫炎症指标无明显异常升高,材料与自体组织形成了良好的整合,未出现明显的排斥反应[5] [27],为其主动修复功能的发挥提供了安全基础。

4. 异种脱细胞真皮在烧伤治疗中的临床应用

XADM 适用于深 II 度烧伤、III 度烧伤、大面积烧伤、儿童烧伤及特殊部位烧伤等多种烧伤类型,常与自体皮移植、清创术、削痂术等联合应用,以提高临床疗效。

4.1. 深 II 度烧伤

深 II 度烧伤创面愈合周期长,易形成增生性瘢痕。临床研究表明,应用 XADM 敷料可显著缩短创面愈合时间,降低疼痛评分,提高治疗舒适度[28]。

4.2. III 度烧伤

III 度烧伤损伤累及皮肤全层,甚至深达皮下脂肪、肌肉,植皮手术是治疗关键。临床常采用 XADM 与自体刃厚皮片联合移植方案,XADM 作为真皮替代物为自体皮片提供稳定生长支架,减少皮片收缩,同时引导形成结构完整的皮肤组织。该联合方案不仅能提升修复质量、减少瘢痕增生,还可有效节约自体皮源,适用于皮源有限的 III 度烧伤患者[4]。

4.3. 大面积烧伤

大面积烧伤治疗的核心难点是皮源短缺。XADM 联合自体皮移植为解决这一问题提供了有效方案。研究采用自体微粒皮联合异种猪皮移植治疗大面积烧伤,通过将自体皮制成微粒皮与 XADM 复合应用,显著提高了皮片扩展率和修复成功率[29]。

4.4. 儿童烧伤

儿童皮肤娇嫩、再生能力强,但增生性瘢痕发生率高,XADM 凭借良好的生物相容性和低免疫原性展现出独特优势。研究证实,基因修饰后的猪皮敷料在儿童烧伤的治疗中,不仅安全性更高,还可通过调控炎症反应提升治疗效果[30]。

综合以上研究表明,XADM 在多种烧伤治疗中存在显著优势,不仅能够缩短愈合时间、提高上皮化效率、降低感染率、减轻疼痛、减少瘢痕增生,还能有效节约自体皮源,为大面积烧伤等特殊病例解决皮源短缺问题。

5. 问题与挑战

尽管 XADM 在烧伤创面修复中表现出显著优势,但其临床应用仍面临诸多问题与限制,制约了其进一步推广与功能升级。首先是免疫原性残留风险。材料中仍可能残留微量异种蛋白等免疫原性物质,这些残留成分可引发迟发性免疫排斥反应,临床表现为创面红肿、渗出、疼痛加剧,进而影响创面愈合[31][32];此外患者个体免疫状态存在差异,对 XADM 的免疫应答各不相同,如何精准评估每位患者的免疫反应并制定个性化治疗方案,仍是临床面临的一大挑战。其次是制备工艺标准化不足。目前全球范围内尚未形成统一的 XADM 制备行业标准,不同生产厂家在原料取材地域、预处理方法、脱细胞试剂选择、灭菌参数设定等方面差异较大,导致不同批次、不同厂家产品的生物相容性、力学性能、生物活性等指标参差不齐,产品质量稳定性难以保障。建立标准化的制备流程与严格的质量控制体系,是实现 XADM 规模化生产与广泛临床应用的关键。第三是复杂创面疗效有限。在脱细胞与灭菌过程中,生长因子、糖胺聚糖等部分生物活性成分可能发生流失或失活,导致单一成分的 XADM 在感染严重、血供较差的复杂烧伤创面修复中疗效有限[33]。通过表面改性、复合生长因子、干细胞负载、抗菌功能修饰等功能化改造,强化材料的主动修复能力,是当前突破这一瓶颈的核心研究方向。

此外,XADM 制备涉及组织取材、预处理、脱细胞、灭菌、质量控制等多个复杂环节,部分高端改性技术成本较高,导致临床应用费用高昂。对于需要大量使用 XADM 的大面积烧伤患者而言,较高的治疗成本限制了其在基层医院及经济欠发达地区的推广应用。

6. 结论

异种脱细胞真皮作为一种优质生物材料,凭借取材广泛、生物相容性良好、组织再生能力强等优势,在烧伤创面修复中发挥了重要作用,尤其为大面积烧伤患者面临的皮源短缺问题提供了有效解决方案。其核心价值在于通过构建物理屏障、调控炎症反应、引导组织再生、抑制瘢痕增生等多途径协同作用,实现创面高质量修复,显著缩短愈合时间、减少瘢痕增生,提高患者生活质量。

当前 XADM 正从单纯的被动支架材料,向具备炎症调控、抗菌抗感染、主动促再生的功能化材料进化。但仍存在免疫排斥风险、制备标准化不足、复杂创面疗效有限、治疗成本较高等问题。未来围绕功能改性升级、制备工艺标准化、成本控制优化等方向持续突破,将进一步释放 XADM 的临床价值,推动烧伤修复领域的技术发展。

基金项目

张家界市科技创新项目(2024017)。

参考文献

- [1] 栗明超, 张彦霞, 张媛媛, 等. 中重度烧伤患者营养治疗的研究进展[J]. 护理实践与研究, 2026, 23(1): 8-15.

- [2] 宋国栋, 石文, 高聪, 等. 大面积深度烧伤的早期切除与皮肤移植[J]. 中华损伤与修复杂志(电子版), 2017, 12(1): 56-60.
- [3] 李拉香格, 罗明念, 赵哲萌, 等. 功能化水凝胶应用于皮肤创面修复的研究进展[J]. 海军军医大学学报, 2025, 46(10): 1350-1354.
- [4] 李竺憬, 黄清江, 刘鸿雁, 等. 脱细胞异体真皮联合自体刃厚皮移植在大面积烧伤创面修复中的应用[J]. 中国美容医学, 2025, 34(4): 55-59.
- [5] 焦弋恩. 猪脱细胞真皮基质治疗犬皮肤机械性损伤的临床研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2024.
- [6] Garcia, O. and Scott, J.R. (2013) Analysis of Acellular Dermal Matrix Integration and Revascularization Following Tissue Expander Breast Reconstruction in a Clinically Relevant Large-Animal Model. *Plastic and Reconstructive Surgery*, **131**, 741e-751e. <https://doi.org/10.1097/prs.0b013e3182865c6d>
- [7] 杜焯, 冯自波, 李恭驰, 等. 猪脱细胞真皮基质对小鼠创面毛囊再生中基质细胞衍生因子-1 及 Wnt3a/ β -catenin 信号通路表达的影响[J]. 中华损伤与修复杂志(电子版), 2019, 14(1): 26-33.
- [8] 黄培信, 郑伟才, 孙佳琳, 等. 异种(猪)脱细胞真皮基质敷料在烧伤切/削痂创面修复中的应用[J]. 河南医学研究, 2025, 34(10): 1758-1760.
- [9] 王灵平, 张春莲, 胡顺鹏, 等. 脱细胞真皮基质的制备与性能分析[J]. 山东大学学报(医学版), 2011, 49(9): 41-44.
- [10] 王雪岑. 应用改良物理方法制备脂肪脱细胞基质构建工程化脂肪组织的策略研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2018.
- [11] 赵龙梅, 解慧琪. 细胞外基质材料与组织再生修复[J]. 中国修复重建外科杂志, 2026, 40(1): 132-145.
- [12] 王志远, 王富生, 朱伟东. 一种脱细胞真皮基质(ADM)制备方法的实验研究[J]. 北方药学, 2016, 13(1): 100-101.
- [13] 覃秋海. 脱细胞异种真皮的研究进展[J]. 现代诊断与治疗, 2012, 23(4): 248-250.
- [14] Wang, Y., Yang, H.Q., Jiang, W., et al. (2015) Transgenic Expression of Human Cytotoxic T-Lymphocyte Associated Antigen 4-Immunoglobulin (hCTLA4Ig) by Porcine Skin for Xenogeneic Skin Grafting. *Transgenic Research*, **24**, 199-211. <https://doi.org/10.1007/s11248-014-9833-9>
- [15] 林桂清, 刘平洪, 黄锦刚, 等. 异种脱细胞真皮基质敷料对深度烧伤患者创面愈合及瘢痕增生的影响[J]. 中外医学研究, 2021, 19(20): 146-148.
- [16] 刘顺财, 肖玲, 陈玲, 等. 脱细胞真皮基质对烧伤损伤修复的研究进展[J]. 中国医疗美容, 2023, 13(2): 54-57.
- [17] 李静, 陈华. 脱细胞基质在整形外科中的应用[J]. 中国美容医学, 2025, 34(6): 183-186.
- [18] 姜涛, 张爱君, 李雪阳, 等. 人新型脱细胞真皮制备及性状分析[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(7): 1006-1012.
- [19] Reddy, M.S.B., Ponnamm, D., Choudhary, R. and Sadasivuni, K.K. (2021) A Comparative Review of Natural and Synthetic Biopolymer Composite Scaffolds. *Polymers*, **13**, Article 1105. <https://doi.org/10.3390/polym13071105>
- [20] 朱柯颖, 郭璐, 陈德滇, 等. 脱细胞真皮基质在临床治疗中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(34): 5512-5517.
- [21] 陈晓东, 施彦, 杨荣华, 等. 异种(猪)脱细胞真皮基质对大鼠深 II 度烧伤创面肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-8、白细胞介素-1 表达的影响[J]. 中华损伤与修复杂志(电子版), 2014, 9(2): 137-143.
- [22] 王晓蓉, 李炳辉, 王知, 等. 脱细胞真皮基质对 M1 型巨噬细胞向 M2 型巨噬细胞转变的影响[J]. 中华实验外科杂志, 2022, 39(9): 1670-1673.
- [23] Zhu, W., Cao, L., Song, C., Pang, Z., Jiang, H. and Guo, C. (2021) Cell-Derived Decellularized Extracellular Matrix Scaffolds for Articular Cartilage Repair. *The International Journal of Artificial Organs*, **44**, 269-281. <https://doi.org/10.1177/0391398820953866>
- [24] Begum, T., Farrelly, P.J. and Craigie, R.J. (2016) Non-Cross-Linked Porcine Acellular Dermal Matrix (Strattice Tissue Matrix) in Pediatric Reconstructive Surgery. *Journal of Pediatric Surgery*, **51**, 461-464. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2015.10.083>
- [25] Cao, Y., Shi, X., Zhao, X., Chen, B., Li, X., Li, Y., et al. (2022) Acellular Dermal Matrix Decorated with Collagen-Affinity Peptide Accelerate Diabetic Wound Healing through Sustained Releasing Histatin-1 Mediated Promotion of Angiogenesis. *International Journal of Pharmaceutics*, **624**, Article 122017. <https://doi.org/10.1016/j.iupharm.2022.122017>
- [26] 王天泉, 左海亮, 王纪龙, 等. 异体脱细胞真皮基质复合自体刃厚皮片移植在手部烧伤瘢痕患儿整形修复中的应用[J]. 妇女儿童健康导刊, 2025, 4(9): 121-125.
- [27] 林颜, 杨荣华, 阮树斌, 等. 异种(猪)脱细胞真皮基质降低深 II 度烧伤炎症反应的实验研究[J]. 中华损伤与修复

- 杂志(电子版), 2017, 12(3): 187-190.
- [28] 陈志军. 异种脱细胞真皮基质敷料促进深 II 度烧伤患者创面愈合的临床研究[J]. 智慧健康, 2025, 11(15): 63-65.
- [29] 席云峰, 张斌, 苏伟, 等. 微粒皮移植异种脱细胞真皮基质敷料覆盖术治疗大面积烧伤创面的效果[J]. 临床医学研究与实践, 2019, 4(31): 6-8.
- [30] 王隽琦, 王倩, 赵宇辉. CTLA4Ig 基因转染猪皮敷料对患儿 II 度烧伤炎症反应的影响[J]. 中国医药导刊, 2023, 25(9): 942-945.
- [31] 王海波. MMP-2、MMP-9 在创伤后创面受“再次刺激”后局部表达的变化[D]: [硕士学位论文]. 蚌埠: 蚌埠医学院, 2013.
- [32] 史新立, 谭芳奕, 陈冰. 脱细胞真皮基质的材料研究及应用[J]. 中华损伤与修复杂志(电子版), 2009, 4(4): 55-56.
- [33] 赵欢欢. 颗粒脂肪与脱细胞真皮基质微粒联合移植中巨噬细胞变化的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2024.