

· 专家论坛 ·

本文亮点:

- (1) 回顾了显微外科技术的历史演变,重点讨论了游离穿支皮瓣的技术发展和理念转变。
- (2) 分析了人工智能推动创面修复技术的智能化演进与挑战,简要总结了国内游离穿支皮瓣修复创面的新进展。

Highlights:

- (1) This paper reviewed the historical evolution of microsurgery techniques, with a focus on the technological developments and conceptual shifts in free perforator flaps.
- (2) The article provided an analysis of the intelligent progression of wound repair technologies driven by artificial intelligence and its associated challenges, while offering a concise summary of recent advances in wound repair using free perforator flaps in China.



浅谈显微外科技术和游离穿支皮瓣修复创面

邓呈亮 简喜超

遵义医科大学附属医院烧伤整形外科,遵义 563003

通信作者:邓呈亮,Email:cheliadeng@sina.com

【摘要】 显微外科技术从常规显微吻合到超级显微外科技术,再到手术机器人辅助,正持续向更精、更细、更智能的方向发展。游离皮瓣移植从仅关注受区修复到兼顾供区保护的理念转变,推动游离穿支皮瓣向超薄化、嵌合化、功能化方向发展,并开始逐步探索异体或异种移植等前沿领域。此外,人工智能技术也逐渐融入创面修复术前规划、术中导航与术后评估的全流程管理中,促使临床决策从经验依赖转向循证证据支撑。该文浅谈显微外科技术和游离穿支皮瓣修复创面,旨在为其临床应用与优化提供理论支持。

【关键词】 显微外科手术; 穿支皮瓣; 机器人手术; 人工智能; 创面修复

基金项目:贵州省科技计划临床医学研究中心(黔科合平台 LCZX[2025]005);贵州省科技计划2024年度贵州省科技创新人才团队建设项目(黔科合人才 CXTD[2025]051)

A brief discussion on microsurgery techniques and free perforator flaps for wound repair

Deng Chengliang, Jian Xichao

Department of Burns and Plastic Surgery, Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi 563003, China

Corresponding author: Deng Chengliang, Email: cheliadeng@sina.com

【Abstract】 Microsurgical techniques have evolved from conventional microsurgical anastomosis to supermicrosurgery and now to robot-assisted surgery, continuously advancing towards greater precision, detail, and intelligence. Free flap transplantation has undergone a conceptual innovation, shifting its focus from solely repairing the recipient area to also protecting the donor area. This has driven the development of free perforator flaps towards ultra-thin, chimeric, and functional directions, while also gradually exploring cutting-edge fields such as allogeneic or xenogeneic transplantation. Furthermore, artificial intelligence technology is increasingly integrated into the entire process of wound repair preoperative planning, intraoperative navigation, and postoperative evaluation, facilitating a transition in clinical decision-making from experience-dependent to

DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260224-00085

收稿日期 2026-02-24

引用本文:邓呈亮,简喜超. 浅谈显微外科技术和游离穿支皮瓣修复创面[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2026, 42(5): 1-7. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260224-00085.

Deng Chengliang, Jian Xichao. A brief discussion on microsurgery techniques and free perforator flaps for wound repair[J]. Chin J Burns Wounds, 2026, 42(5): 1-7. DOI: 10.3760/cma. j. cn501225-20260224-00085.



evidence-based approaches. This paper briefly discusses the microsurgery techniques and free perforator flaps for wound repair, aiming to offer theoretical support for their clinical application and optimization.

【Key words】 Microsurgery; Perforator flap; Robotic surgical procedures; Artificial intelligence; Wound repair

Fund program: Clinical Medical Research Center of the Guizhou Provincial Science and Technology Plan (No. LCZX-2025-005); 2024 Talent Team Construction Project of Technological Innovation of the Guizhou Provincial Science and Technology Plan (No. CXTD-2025-051)

基于显微外科技术的游离组织移植,成功解决了创伤、肿瘤、慢性溃疡及先天畸形等多种原因造成的复合组织缺损修复难题^[1-5]。皮瓣移植技术从早期的随意皮瓣和轴型皮瓣移植发展到如今的自由穿支皮瓣、嵌合皮瓣和超薄皮瓣的游离移植,旨在不断追求以更小的供区损伤实现更精准的受区修复^[1,6]。同时,随着术前血管成像技术、术中荧光造影、手术导航系统的广泛应用,以及超级显微外科技术理念和机器人、人工智能辅助技术的发展,创面修复的精准度和成功率已得到显著提升^[7-13]。本文浅谈显微外科技术和游离穿支皮瓣修复创面,旨在为其临床应用与优化提供理论支持。

1 从显微外科技术到超级显微外科技术及机器人辅助

显微外科技术的发展历程,体现了外科医师在手术精度和微创理念上的持续创新与突破。从 19 世纪末期法国学者 Alexis Carrel 提出的血管吻合三角定位法,到 20 世纪 60 年代我国学者陈中伟完成的首例前臂创伤性完全离断的再植手术,标志着显微外科技术临床应用逐步成熟。日本学者 Shigeo Komatsu 和 Susumu Tamai 于 1965 年成功完成了完全离断手指的再植手术,而我国学者高景恒于 1978 年在遵义完成 8 岁幼儿的游离第 2 足趾移植再造拇指,进一步推动了显微外科技术的发展。随后,日本学者 Isao Koshima 于 1998 年提出“超级显微外科技术”概念。然而,当时提出的概念较模糊,称呼上并不统一,直至 2010 年巴塞罗那会议达成“超级显微外科共识”,将“supermicrosurgery”确立为国际标准术语,其定义为吻合 0.3~0.8 mm 穿支血管的显微外科技术^[14-15]。超级显微外科技术的目的在于通过更精细的操作,在修复受区的同时,最大化保护供区。同样,超级显微外科技术在淋巴外科领域也得

到充分应用。然而,尽管超级显微外科技术对于显微外科医师极具吸引力,但其学习周期长、设备依赖性强且成本较高。在临床实践中,超级显微外科技术不应仅被视为吻合管径的缩小,其核心更在于贯穿始终的微创理念与对技术极限的精益求精。

显微外科技术的操作容易受到手部生理性震颤、疲劳和动作幅度的限制^[14,16]。机器人辅助技术因具有消除震颤、抗疲劳及提供符合人体生理结构的操作环境等优势,从而被引入显微外科领域^[17]。2014 年,首款显微外科通用手术系统 MUSA (Microsure's Universal System for All) 问世,通过主从控制与动作缩放功能,有效过滤了手部生理性震颤。然而,MUSA 系统仍存在操作延迟和缺乏真实力反馈等不足,而随后问世的 Symani 手术系统则在操作方式和手感方面进行了优化^[18]。尽管机器人辅助显微吻合学习曲线陡峭,吻合初期手术时间(约 25 min)较单纯手工操作时间(约 14 min)长,但熟练后差异显著缩小^[19]。也有研究显示,与单纯手工操作相比,在淋巴静脉吻合术中使用 MUSA 机器人可显著缩短手术时间($P<0.05$)^[15]。目前,显微外科技术正从纯手工操作向人机协同演进。然而,机器人辅助系统目前仍无法识别受区血管的质量,且面临设备成本高昂、触觉反馈缺失及伦理限制等挑战,其临床有效性尚需更多高质量证据支持。未来的探索方向应是通过将增强现实导航与触觉反馈技术深度融合,使机器人真正成为外科医师的得力助手。

2 游离穿支皮瓣的技术发展和理念转变

游离穿支皮瓣移植是创面修复领域的重要外科技术。20 世纪下半叶,显微外科技术推动皮瓣外科进入快速发展期。2010 年发布的《穿支皮瓣及相关术语的专家共识》,规范了穿支血管的分类、穿支皮瓣的定义和命名^[20]。次年,Hallock^[21]系统梳理了特殊类型穿支皮瓣的命名体系,涵盖联体穿支皮瓣、嵌合穿支皮瓣、血流桥接穿支皮瓣等多种形态及其组合模式,为这些特殊皮瓣在临床实践中的应用提供了理论框架。随后,2013 年出版的《穿支皮瓣的解剖、技术和临床应用》第 2 版英文专著^[22],以及 2021 年我国学者唐举玉^[23]总结的《特殊形式穿支皮瓣及其衍生术式的分型与命名》,进一步推动了穿支皮瓣的系统化发展。目前,穿支皮瓣的核心概念已趋于统一,特殊类型穿支皮瓣的分类体系基本

完善,相关专著的问世和广泛传播,标志着穿支皮瓣技术进入成熟发展阶段。

2.1 游离穿支皮瓣移植从仅关注受区修复到兼顾供区保护

传统游离皮瓣移植的首要任务在于覆盖受区创面,然而该术式常导致受区继发损伤,如游离肌皮瓣移植常导致供区肌肉的功能丧失、外形凹陷及神经损伤等^[1]。游离穿支皮瓣的出现有效克服了游离肌皮瓣的不足。Kroll和Rosenfield^[24]于1988年报道,采用以背阔肌穿支和臀大肌脊柱旁肌皮穿支为蒂的皮瓣,修复腰骶部、背部和臀部的低位后正中区域的组织缺损;Koshima和Soeda^[25]于1989年报道,利用腹壁下动脉穿支皮瓣游离移植修复腹股沟及舌缺损。这2项工作被业内认为是游离穿支皮瓣开始临床应用的标志。游离穿支皮瓣最初的设计理念在于通过保留源头血管及其穿过的肌肉、筋膜来“保护深层重要结构”。

对游离穿支皮瓣供区的保护主要体现为防治供区并发症。游离穿支皮瓣的供区并发症主要包括皮肤并发症、局部畸形和神经损伤(表现为感觉和运动障碍)^[26]。瘢痕增生是最常见的游离穿支皮瓣供区皮肤并发症,多因切取皮瓣过宽、无法直接缝合而需移植皮片修复所致,不仅影响外观,还可能引起疼痛和瘙痒等症状^[27-28]。因此,减少游离穿支皮瓣供区瘢痕的首要策略是避免供区移植皮片。在游离穿支皮瓣设计阶段,可通过分叶技术将皮瓣宽度转化为长度,从而缩小供区创面宽度,使其可被直接缝合。若供区仅有1条穿支,在游离穿支皮瓣切取后亦可考虑采用邻近穿支皮瓣接力修复供区。缝合阶段应采用超减张缝合技术,如心形缝合、章氏超减张缝合、武氏缝合或遵义缝合^[29],将张力释放于切口周边深层真皮,实现切缘低张力外翻闭合^[30]。此外,因瘢痕形成受遗传、张力和感染等多重因素影响,需将供区瘢痕防治理念贯穿于游离穿支皮瓣移植的术前设计、术中操作和术后康复的全过程。在预防游离穿支皮瓣供区畸形方面,应尽量保留深筋膜的完整性以减少肌疝等问题的发生。减少游离穿支皮瓣供区感觉障碍的核心策略是将皮神经保留在原位,保留感觉神经功能,推荐于浅筋膜深层切取薄皮瓣或于浅筋膜浅层切取超薄皮瓣,甚至切取纯皮穿支皮瓣^[31-32]。切取超薄皮瓣还可避免二次手术修薄,但解剖操作难度大、耗时较长,且皮瓣存活面积常较切取面积略有缩小,在修

复大面积缺损或治疗肥胖患者创面时需谨慎考虑采用该皮瓣。切取股前外侧穿支皮瓣常导致供区股神经损伤,切取腹壁下动脉穿支皮瓣常导致供区肋间神经运动支损伤,这些损伤均会导致供区运动障碍,因此,在游离穿支皮瓣切取术中需精细保护神经,若神经横跨穿支,可采用分叶技术绕行解剖。

总之,在兼顾供区保护理念的指导下,游离穿支皮瓣技术从单纯的“保留供区肌肉”扩展至对供区皮神经的保护、对供区美学的考量,以及采用肌肉内剥离等微创技术最大限度减少供区组织损伤,最终形成以“供区最小损害、受区最大功能、组织最大利用”为核心的现代皮瓣外科原则^[33]。

2.2 游离穿支皮瓣从单一组织到多组织嵌合体的演进

随着创面修复的目标向功能与形态并重的深化,临床面临的挑战也从单纯的二维覆盖转向对复合三维缺损的修复。为满足皮肤、肌肉、骨骼等多组织同时缺失的复杂修复需求,游离穿支皮瓣的设计理念实现了从“单一皮岛、单一组织”到“多皮岛、多组织嵌合”的重大跨越。1991年,Hallock^[34]首次明确提出了“嵌合皮瓣”的概念,其借喻希腊神话中狮头、羊身、蛇尾的怪物“奇美拉”,形象地比喻了这种由不同组织成分拼接而成的皮瓣特性。Hallock将嵌合皮瓣定义为由同一主干血管系统供养,但通过各组织单元独立的穿支血管供应的包含1种及以上不同组织类型(如皮肤、肌肉、骨、筋膜)的皮瓣。这使得术者在受区只需吻合1组血管(动脉和静脉),就可同时重建多个独立组织单元的血液循环,极大地提高了手术效率和立体修复的灵活性。然而,关于嵌合皮瓣的组织来源,目前仍有争议。国内多数学者认为嵌合皮瓣必须包含不同类型的组织,国外学者则认为来源于同一种组织的分叶皮瓣也属于嵌合皮瓣范畴。此外,现有嵌合皮瓣的分型均基于皮瓣内血管结构,未考虑受区所需。基于此,笔者团队根据组织来源和受区所需,提出了一种基于临床用途的嵌合皮瓣的分类方法,具体如下。I型嵌合皮瓣:由同一种组织构成的双叶或多叶皮瓣,主要用于修复大面积或不规则的单纯皮肤缺损创面;II型嵌合皮瓣:包含皮肤与另一种功能组织,如肌肉、神经、筋膜或骨,适用于修复需同时重建1种功能的皮肤缺损创面;III型嵌合皮瓣:涉及皮肤、阔筋膜、神经、肌肉、骨的3种及以上组织组合,适用于修复同时需重建2种及以上功能的复杂

创面;IV型嵌合皮瓣:需要采用显微外科技术吻合血管而构建的嵌合皮瓣,可根据创面修复的特定需求灵活组合^[35]。该嵌合皮瓣分型,更契合临床实践,也便于推广应用。然而,嵌合皮瓣对术者的皮瓣解剖、分离操作技巧和影像解读都提出了更高要求。总之,嵌合皮瓣的出现,使皮瓣从一种单纯覆盖创面的“自体皮肤”,成为了能够重建结构与功能的“定制武器”,将复杂创面的修复推向了功能化与个体化并重的新阶段。

2.3 游离穿支皮瓣来源从自体到异体及异种

游离穿支皮瓣切取后会造成功能障碍,且临床上有时会遇到患者全身无可利用皮瓣供区的情况,这类患者一般为大面积烧伤或有多次手术史。因此,异体或异种组织移植受到关注。然而,因皮肤免疫排斥反应较强,行异体或异种皮瓣移植的患者需长期服用免疫抑制剂,导致并发症发生风险高。现有报道中的异体移植案例多属于复合组织移植,如异体肢体移植、异体换脸^[36-38],并非严格意义上的游离穿支皮瓣移植。

异体或异种移植组织的血管内皮细胞是免疫攻击核心靶点,移植后强烈的免疫反应导致血管内皮细胞损伤和补体系统过度激活,引发血管栓塞与坏死^[39-40]。近年来,基因编辑猪在异种移植领域的研究备受关注^[40-42]。研究人员利用基因编辑技术敲除猪体内引起人体超急性排斥反应的关键抗原基因,如 α -1,3-半乳糖基转移酶、N-羟乙酰神经氨酸等,使猪皮片在治疗临床深度烧伤时能有效促进愈合并提供持久的创面覆盖,且患者未发生严重急性排斥反应,但其长期效果与免疫机制仍需进一步验证^[43-45]。此外,单纯的猪皮片移植和带血管的猪皮瓣移植存在显著区别,后者需要克服的技术瓶颈、免疫排斥风险明显增加。Gregory等^[46]的研究显示,即使在缺乏天然异种抗体IgG和IgM的松鼠猴身上进行猪皮瓣移植,皮瓣也会在15 min内引发机体超急性排斥反应,组织病理学分析显示皮瓣真皮层存在弥漫性出血及毛细血管充血。尽管基因编辑猪皮瓣移植目前仍处于实验探索的早期阶段,仍受制于强烈的免疫排斥与血栓性微血管病等核心科学难题,距离临床常规应用仍较遥远,但这些基础研究为未来无论何种形式的异种皮瓣移植都奠定了早期研究基础。

3 人工智能技术的发展推进创面修复技术向智能

化演进

当前,人工智能技术正推动创面修复的临床决策从以往的经验依赖逐渐转向循证证据支撑。在游离穿支皮瓣移植术前阶段,机器学习模型可整合切取皮瓣类型、受区血管情况、体重指数、吸烟等临床信息,输出皮瓣术后发生血管危象的风险等级,从而影响临床决策^[47]。同时,通过使用人工智能搭建的虚拟手术规划与生成式教育工具,可提高患者对手术及并发症的认知,减少医疗纠纷^[47]。在游离穿支皮瓣设计方面,人工智能通过结合术前超声、CT血管造影等影像学检查结果资料,辅助识别穿支血管的体表定位和走行,提升术前规划的准确性^[47-50]。然而,人工智能模型对影像资料的质量具有较高要求,且现有预测模型多根据单中心回顾性研究数据搭建,存在数据偏倚风险,需通过多中心前瞻性数据验证、标准化质控及临床场景持续迭代来提升可靠性。在游离穿支皮瓣移植术中,可融合人工智能与增强现实技术,将穿支血管走行与皮瓣轮廓叠加投影至术野,实现可视化导航^[51-52];人工智能还可对吲哚菁绿造影视频进行分析以评估组织灌注状态,并对手术器械及术者手部动作进行实时追踪以量化操作技巧^[47]。然而,手术过程中的组织牵拉和形变常导致虚拟图像与实际解剖结构的配准误差,以及对吲哚菁绿造影的分析易受温度、设备参数等环境因素干扰,需通过术中动态影像实时校正配准、建立荧光量化分析标准化流程并结合多模态信息融合,才能系统性地减少误差、提高可靠性。在游离穿支皮瓣移植术后,人工智能可通过自动分析皮瓣颜色、温度等指标,对皮瓣血供状态进行持续、客观的监测,有助于尽早识别血管危象^[52-54]。然而,目前针对皮瓣血供的人工智能监测仍存在一定的假阳性率,可能对临床判断造成干扰,需通过多模态数据交叉验证、临床决策分层提示及算法可解释性优化,以提高其临床决策支持的可信度。人工智能还可通过运动跟踪、深度学习及计算机视觉等技术,为显微外科技术培训提供及时、客观的评价^[55]。但是,目前用于皮瓣切取与血管吻合的模拟系统,在触觉反馈等感官体验方面与真实手术仍存在差异,一定程度上限制了高精度操作技能的训练效果。

人工智能技术推进了创面修复技术的智能化演进,但仍面临以下问题:(1)人工智能尚缺乏对个体血管解剖差异、组织质地变化或突发性出血等临

床复杂情境的判断及应急处理能力;(2)非结构化环境的适应能力有限,仅能协助吻合血管,而不能控制机器人完全自主切取穿支皮瓣及独立判断受区吻合血管质量;(3)算法模型普遍缺乏可解释性及临床适用性;(4)技术发展不均衡;(5)人工智能在临床中的应用还面临数据隐私保护、医疗责任界定等一系列法律与监管的挑战。因此,未来创面修复领域的人工智能技术发展应聚焦于持续提升算法性能、开发可解释性人工智能模型和构建多样化的高质量数据集,并建立健全相关法律法规以及伦理监管政策。

4 国内游离穿支皮瓣修复创面的新进展

近年国内游离穿支皮瓣应用逐渐向功能化、精准化和智能化的方向发展。为实现受区功能最大化,王欣和潘佳栋^[56]基于血管体区和功能性外科理论创新提出功能性穿支皮瓣的概念,该团队在前臂动力肌和软组织缺损修复中使用功能性胸背动脉穿支皮瓣嵌合背阔肌游离移植,实现了复杂创面的覆盖和前臂毁损肌群的精准重建^[57]。Liu等^[58]通过引入混合现实技术实现股前外侧穿支皮瓣穿支血管的三维可视化,并利用人工智能算法提高穿支血管定位准确率,精准切取穿支皮瓣。Lan等^[59]率先将光子计数CT(photon-counting computed tomography, PCCT)用于穿支皮瓣的术前规划,利用PCCT将细小的穿支血管走行及体表定位进行精准投影,便于术前充分评估穿支来源及变异,简化皮瓣设计,同时缩短皮瓣切取时间,此外,患者的辐射暴露极低。然而,这些前沿技术均面临费用昂贵、技术要求高等问题,目前仍处于早期探索阶段。血管危象是游离穿支皮瓣移植的严重并发症,近年来,组织血氧饱和度与氧分压监测已成为评估皮瓣血供的研究焦点。Wu等^[60]设计了一种基于脉搏血氧传感器的无创、无线柔性皮肤贴片,可实时动态监测血氧饱和度,早期识别皮瓣血管危象,为临床提供及时干预的客观依据。总之,我国在游离穿支皮瓣修复创面方面,不管是修复理念,还是临床技术,均走在国际前沿。

5 展望

未来,穿支血管的术前定位精准度将随着PCCT等影像学设备的更新换代而得到进一步提升。通过融合多模态影像和可解释性模型的构建,

人工智能将从创面修复的辅助工具演进为可靠的决策支持系统。手术机器人将朝着更小型化、智能化和触觉反馈方向发展,与增强现实导航、术中实时灌注监测等技术结合将实现术中可感知和可决策,甚至能够独立切取穿支皮瓣、准备受区血管和吻合穿支。基因编辑技术与免疫耐受诱导方案的突破,有望为异体乃至异种游离穿支皮瓣移植开辟新路径。最终,这些进步共同指向一个核心目标:实现创面功能与美学的完美重建,同时将手术创伤及患者负担降至最低。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Hong JP, Kwon JG, Suh HP, et al. The evolution of perforator flaps and the future of microsurgery[J]. JPRAS Open, 2025, 47: 33-42. DOI: 10.1016/j.jpra.2025.09.016.
- [2] Martin P, Pardo-Pastor C, Jenkins RG, et al. Imperfect wound healing sets the stage for chronic diseases[J]. Science, 2024, 386(6726): eadp2974. DOI: 10.1126/science.adp2974.
- [3] Hsieh HH, Shieh SJ. Reconstruction with flow-through chimeric anterolateral thigh flap combining vascularized fibular bone graft for extensive composite tissue defect of the forearm: a case report[J]. Ann Plast Surg, 2024, 92(1S Suppl 1): S65-S69. DOI: 10.1097/SAP.0000000000003758.
- [4] 林芳, 康永强, 芮永军, 等. 骨整形理念在 Gustilo IIIB 型踝关节开放性骨折治疗中的应用研究[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2026, 42(5):. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260108-00016.
- [5] 陈涛, 邓呈亮, 高绍莹, 等. 垂直褥式联合水滴形端侧动脉吻合技术在游离皮瓣修复四肢创面中的临床应用效果[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2026, 42(5):. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260131-00061.
- [6] 钟硕, 王云鹏, 徐婵军, 等. 股前外侧皮瓣联合 Y 形大隐静脉移植在修复小腿大面积皮肤软组织缺损的临床应用[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2026, 42(5):. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20260130-00055.
- [7] Thamm OC, Eschborn J, Schäfer RC, et al. Advances in modern microsurgery[J]. J Clin Med, 2024, 13(17): 5284. DOI: 10.3390/jcm13175284.
- [8] Shammam RL, Matros E. Latest research in microsurgery[J]. Clin Plast Surg, 2026, 53(1): 93-100. DOI: 10.1016/j.cps.2025.08.009.
- [9] 董帅, 王石, 滕志成, 等. 吡啶菁绿血管造影联合彩色多普勒超声在股前外侧穿支皮瓣穿支定位中的临床应用效果[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2025, 41(11): 1091-1100. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20240629-00254.
- [10] Rapolti D, Neumeister MW. Technology in microsurgery[J]. Clin Plast Surg, 2026, 53(1): 183-186. DOI: 10.1016/j.cps.2025.09.003.
- [11] Brown H, Brown RA, Lenkiu L, et al. Robotic-assisted supermicrosurgery in plastic surgery: a systematic literature review[J]. Plast Reconstr Surg Glob Open, 2025, 13(7): e6912. DOI: 10.1097/GOX.0000000000006912.
- [12] Dong KX, Zhou Y, Cheng YY, et al. Clinical application of digital technology in the use of anterolateral thigh lobulated perforator flaps to repair complex soft tissue defects of the limbs[J/OL]. Burns Trauma, 2024, 12: tkae011[2026-02-24].

- <https://academic.oup.com/burnstrauma/article/doi/10.1093/burnst/tkae011/7668079?searchresult=1>. DOI: 10.1093/burnst/tkae011.
- [13] Khoong YM, Huang X, Gu S, et al. Imaging for thinned perforator flap harvest: current status and future perspectives[J/OL]. *Burns Trauma*, 2021, 9: tkab042[2026-02-24]. <https://academic.oup.com/burnstrauma/article/doi/10.1093/burnst/tkab042/6464412?searchresult=1>. DOI:10.1093/burnst/tkab042.
- [14] Masia J, Olivares L, Koshima I, et al. Barcelona consensus on supermicrosurgery[J]. *J Reconstr Microsurg*, 2014, 30(1): 53-58. DOI:10.1055/s-0033-1354742.
- [15] van Mulken TJM, Schols RM, Scharmga AMJ, et al. First-in-human robotic supermicrosurgery using a dedicated microsurgical robot for treating breast cancer-related lymphedema: a randomized pilot trial[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 757. DOI: 10.1038/s41467-019-14188-w.
- [16] Burns HR, McLennan A, Xue EY, et al. Robotics in microsurgery and supermicrosurgery[J]. *Semin Plast Surg*, 2023, 37(3): 206-216. DOI:10.1055/s-0043-1771506.
- [17] Choe J, Aiello C, Yom J, et al. Embracing robotics in microsurgery: robotic-assisted deep inferior epigastric perforator flap breast reconstruction[J]. *J Reconstr Microsurg*, 2025, 41(5): 450-458. DOI:10.1055/a-2404-2445.
- [18] Banerjee A, Jou E, Wong KY. Supermicrosurgery: past, present and future[J]. *Br J Hosp Med (Lond)*, 2023, 84(10): 1-10. DOI: 10.12968/hmed.2022.0482.
- [19] Barbon C, Grünherz L, Uylmaz S, et al. Exploring the learning curve of a new robotic microsurgical system for microsurgery[J]. *JPRAS Open*, 2022, 34: 126-133. DOI: 10.1016/j.jpra.2022.09.002.
- [20] 张世民, 唐茂林, 穆广志, 等. 穿支皮瓣及相关术语的专家共识[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2010, 28(5): 475-477.
- [21] Hallock GG. The complete nomenclature for combined perforator flaps[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2011, 127(4): 1720-1729. DOI:10.1097/PRS.0b013e31820a662b.
- [22] Blondeel P, Morris S, Peter N, et al. Perforator flaps: anatomy, technique, & clinical applications[M]. 2nd ed. Stuttgart: Thieme Medical Publishers, 2013.
- [23] 唐举玉. 特殊形式穿支皮瓣及其衍生术式的分型与命名[J]. *中华显微外科杂志*, 2021, 44(3): 245-254. DOI: 10.3760/cma.j.cn441206-20210530-00193.
- [24] Kroll SS, Rosenfield L. Perforator-based flaps for low posterior midline defects[J]. *Plast Reconstr Surg*, 1988, 81(4): 561-566. DOI:10.1097/00006534-198804000-00012.
- [25] Koshima I, Soeda S. Inferior epigastric artery skin flaps without rectus abdominis muscle[J]. *Br J Plast Surg*, 1989, 42(6): 645-648. DOI:10.1016/0007-1226(89)90075-1.
- [26] 唐举玉. 股前外侧穿支皮瓣手术并发症的预防与处理[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2024, 42(5): 581-585. DOI: 10.13418/j.issn.1001-165x.2024.5.16.
- [27] McLeod GJ, Islur A. Donor site scar preference in patients requiring free flap reconstruction[J]. *Plast Surg (Oakv)*, 2020, 28(2): 88-93. DOI:10.1177/2292550320925922.
- [28] 王刘欣, 李云鹏, 吴思默, 等. 脂肪干细胞外泌体在皮肤瘢痕形成中的作用研究进展[J]. *中华烧伤与创面修复杂志*, 2023, 39(3): 295-300. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20220308-00057.
- [29] 王亮亮, 邓呈亮. 皮肤深层减张缝合研究进展[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022, 36(5): 648-652.
- [30] 《中国科技论文》体表外科卷编辑委员会, 中国研究型医院学会创面防治与损伤组织修复专业委员会, 魏在荣, 等. 外科伤口减张缝合专家共识[J]. *中国科技论文*, 2025, 20(9): 719-728. DOI:10.3969/j.issn.2095-2783.2025.09.002.
- [31] Narushima M, Yamasoba T, Iida T, et al. Pure skin perforator flaps: the anatomical vascularity of the superthin flap[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2018, 142(3): 351e-360e. DOI: 10.1097/PRS.0000000000004698.
- [32] 肖顺娥, 张天华, 吴必华, 等. 薄型游离旋股外侧动脉穿支皮瓣修复手足部瘢痕挛缩畸形[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022, 36(2): 220-223.
- [33] 唐举玉. 掌握嵌合穿支皮瓣技术进一步提升复合组织缺损重建水平[J]. *中华烧伤与创面修复杂志*, 2025, 41(1): 5-10. DOI: 10.3760/cma.j.cn501225-20241106-00435.
- [34] Hallock GG. Simultaneous transposition of anterior thigh muscle and fascia flaps: an introduction to the chimera flap principle[J]. *Ann Plast Surg*, 1991, 27(2): 126-131. DOI: 10.1097/00000637-199108000-00006.
- [35] 张演基, 李海, 吴祥奎, 等. 游离股前外侧嵌合皮瓣的临床应用与遵义分型[J]. *中华烧伤与创面修复杂志*, 2025, 41(5): 447-453. DOI:10.3760/cma.j.cn501225-20241108-00438.
- [36] Dirican O, Sazoglu B, Demir Z, et al. Bone complications after hand and face transplantation: mechanisms and management[J]. *JPRAS Open*, 2026, 48: 522-534. DOI:10.1016/j.jpra.2025.12.019.
- [37] Elsaftawy A, Jagosz M, Smoraq M, et al. From transplant to reamputation: a case report on chronic rejection and innovative treatment in hand allotransplantation[J]. *Plast Reconstr Surg Glob Open*, 2025, 13(6): e6893. DOI: 10.1097/GOX.0000000000006893.
- [38] Dean J, Niederegger T, Schaschinger T, et al. The risk profile of face transplant versus other types of vascularized composite allotransplantation surgery—a retrospective multicenter analysis[J/OL]. *J Craniofac Surg*, 2026(2026-01-06)[2026-02-24]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41493316/>. DOI:10.1097/SCS.00000000000012358. [published online ahead of print].
- [39] Java A, Sparks MA, Kavanagh D. Post-transplant thrombotic microangiopathy[J]. *J Am Soc Nephrol*, 2025, 36(5): 940-951. DOI:10.1681/ASN.0000000645.
- [40] Beare JE, Fleissig Y, Kelm NQ, et al. Mimicking clinical rejection patterns in a rat osteomyocutaneous flap model of vascularized composite allotransplantation[J]. *J Surg Res*, 2024, 295: 28-40. DOI:10.1016/j.jss.2023.08.057.
- [41] Yuan Y, Cui Y, Zhao D, et al. Complement networks in gene-edited pig xenotransplantation: enhancing transplant success and addressing organ shortage[J]. *J Transl Med*, 2024, 22(1): 324. DOI:10.1186/s12967-024-05136-4.
- [42] Ribas GT, Cunha AF, Avila JP, et al. Immune profiling in a living human recipient of a gene-edited pig kidney[J]. *Nat Med*, 2026, 32(1): 270-280. DOI:10.1038/s41591-025-04053-3.
- [43] Xu J, Ren J, Xu K, et al. Elimination of GGTA1, CMAH, β 4GalNT2 and CIITA genes in pigs compromises human versus pig xenogeneic immune reactions[J]. *Animal Model Exp Med*, 2024, 7(4): 584-590. DOI:10.1002/ame2.12461.
- [44] Holzer P, Chang EJ, Lu D, et al. Efficacy of porcine skin xenotransplants indistinguishable from allograft in first-in-human clinical evaluation[J]. *Journal of Burn Care & Research*, 2022, 43(Suppl_1): S60-S61. DOI: 10.1093/jbcr/irac012.093.
- [45] Homsombath BF, Holzer P, Rogers KM, et al. First-in-human

- xenotransplantation US-FDA-clinical trials - complete wound closure of mixed-depth burns via porcine skin xenotransplant[J]. *Journal of Burn Care & Research*, 2024, 45(Suppl_1):263.DOI:10.1093/jbcr/irae036.344.
- [46] Gregory CR, Galili U, Hancock WW, et al. Squirrel monkeys hyperacutely reject porcine musculocutaneous flaps despite a lack of naturally occurring xenoantibodies[J]. *Transplant Proc*, 1998, 30(4): 1082-1083. DOI: 10.1016/s0041-1345(98)00161-4.
- [47] Shadid O, Seth I, Cuomo R, et al. Artificial intelligence in microsurgical planning: a five-year leap in clinical translation[J]. *J Clin Med*, 2025, 14(13): 4574. DOI: 10.3390/jcm14134574.
- [48] Cevik J, Seth I, Rozen WM. Transforming breast reconstruction: the pioneering role of artificial intelligence in preoperative planning[J]. *Gland Surg*, 2023, 12(9): 1271-1275.DOI:10.21037/gc-23-265.
- [49] Lim B, Cevik J, Seth I, et al. Evaluating artificial intelligence's role in teaching the reporting and interpretation of computed tomographic angiography for preoperative planning of the deep inferior epigastric artery perforator flap[J]. *JPRAS Open*, 2024, 40: 273-285. DOI: 10.1016/j.jpra.2024.03.010.
- [50] Chung MJ, Chen WH, Lu YC, et al. Artificial intelligence-assisted indocyanine green angiography for perforators identification in the anterolateral thigh flap[J]. *Ann Plast Surg*, 2026, 96(2 Suppl 2): S25-S30. DOI: 10.1097/SAP.0000000000004545.
- [51] Pu JJ, Shen D, Fan X, et al. AI-assisted soft tissue virtual planning in computer-assisted jaw reconstruction with fibula free flaps[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2025, DOI: 10.1097/PRS.00000000000012748.
- [52] Lin TC, Yang HA, Huang RW, et al. Artificial intelligence and machine learning in reconstructive microsurgery[J]. *Semin Plast Surg*, 2025, 39(3): 190-198. DOI: 10.1055/s-0045-1810062.
- [53] Kim J, Lee SM, Kim DE, et al. Development of an automated free flap monitoring system based on artificial intelligence [J]. *JAMA Netw Open*, 2024, 7(7): e2424299. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2024.24299.
- [54] Shekouhi R, Darabi H, Chim H. Diagnostic accuracy of artificial intelligence models for predicting postoperative complications following free flap reconstruction: a systematic review and meta-analysis[J]. *Microsurgery*, 2025, 45(8):e70143.DOI:10.1002/micr.70143.
- [55] Kiew CYK, Shah A, Hadjiandreou M, et al. Artificial intelligence in microsurgery and supermicrosurgery training within plastic surgery: a systematic review[J]. *JPRAS Open*, 2025, 46: 154-168.DOI:10.1016/j.jpra.2025.07.010.
- [56] 王欣,潘佳栋.功能性穿支皮瓣的概念与应用[J]. *中华显微外科杂志*, 2024, 47(6):611-613.DOI:10.3760/cma.j.cn441206-20240328-00088.
- [57] 潘佳栋,王欣,尹善青,等.功能性胸背动脉穿支皮瓣嵌合背阔肌游离移植重建前臂复合组织缺损 13 例[J]. *中华显微外科杂志*, 2024, 47(3): 241-247. DOI: 10.3760/cma.j.cn441206-20231125-00087.
- [58] Liu Y, Fan W, Yu M, et al. Comparison between mixed reality with artificial algorithms and ultrasound in localization of anterior thigh flap perforators: a prospective randomized controlled study[J]. *BMC Med*, 2025, 23(1):374.DOI:10.1186/s12916-025-04181-0.
- [59] Lan Y, Liu R, Guo L, et al. Advancing preoperative planning in perforator flap surgery with photon-counting computed tomography angiography: less challenges with more precision[J]. *Aesthetic Plast Surg*, 2025, 49(17): 4888-4900. DOI:10.1007/s00266-025-04861-5.
- [60] Wu H, Li Z, Xu Z, et al. On-skin biosensors for noninvasive monitoring of postoperative free flaps and replanted digits [J]. *Sci Transl Med*, 2023, 15(693): eabq1634. DOI: 10.1126/scitranslmed.abq1634.