

综述

颌面部爆炸伤修复重建的研究进展

王泽阳^{1,2}, 刘惠^{2,3}, 梁纯^{2,3}, 罗立波^{2,3}, 危昱章^{2,4}, 赵刚¹, 邱大横¹, 李大卓¹, 丁明超⁵, 陈犹白^{2*}

¹佳木斯大学口腔医学院附属口腔医院口腔颌面外科, 黑龙江佳木斯 154007; ²解放军总医院第四医学中心烧伤整形医学部, 北京 100048; ³内蒙古医科大学基础医学院, 内蒙古呼和浩特 010110; ⁴延边大学附属医院临床医学系, 吉林延吉 133000; ⁵空军军医大学附属口腔医院口腔颌面外科, 陕西西安 710032

[中图分类号] R782

[文献标志码] A

[DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.1006.2026.0723

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 王泽阳, 刘惠, 梁纯等. 颌面部爆炸伤修复重建的研究进展[J]. 解放军医学杂志, DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.1006.2026.0723.

[收稿日期] 2026-04-21

[录用日期] 2026-06-23

[上线日期] 2026-07-23

[摘要] 颌面部爆炸伤因其同时造成大面积骨、软组织缺损及神经损伤, 给修复重建带来极大挑战。颌面部的重建不仅是对缺损的修复, 更要恢复咀嚼、语言、表情等关键功能。近年来, 对颌面部爆炸伤重建的研究在骨组织、软组织、神经重建到功能重建等方面取得显著进展。内固定、骨移植、植皮、皮瓣移植和神经移植等传统方法是当前治疗的主要手段, 但存在供区损伤、组织匹配不足、感染风险较高和功能恢复不全等不足。数字化技术、组织工程、3D生物打印及神经导管等新技术为提高重建精度和促进组织再生提供了新思路。本文系统梳理了骨组织、软组织、神经及功能重建的核心文献, 分析关键技术突破, 并探讨当前的争议与未来方向。

[关键词] 颌面部损伤; 爆炸伤; 修复重建; 组织工程; 面神经

Advances in Repair and Reconstruction of Maxillofacial Blast Injuries

Wang Ze-Yang^{1,2}, Liu Hui^{2,3}, Liang Chun^{2,3}, Luo Li-Bo^{2,3}, Wei Yu-Zhang^{2,4}, Zhao Gang¹, Di Da-Heng¹, Li Da-Zhuo¹, Ding Ming-Chao⁵, Chen You-Bai^{2*}

¹Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Affiliated Stomatological Hospital, College of Stomatology, Jiamusi University, Jiamusi, Heilongjiang 154007, China

²Department of Burns and Plastic Surgery, the Fourth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100048, China

³School of Basic Medical Sciences, Inner Mongolia Medical University, Hohhot, Inner Mongolia 010110, China

⁴Department of Clinical Medicine, Affiliated Hospital of Yanbian University, Yanji, Jilin 133000, China

⁵Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Affiliated Stomatological Hospital, Air Force Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032, China

*Corresponding author, E-mail: chenyoubai@301hospital.com.cn

[Abstract] Maxillofacial blast injuries often cause extensive composite defects involving bone, soft tissue, and peripheral nerves, making repair and reconstruction extremely challenging. Reconstruction of the maxillofacial region is not limited to closure of tissue defects but also requires restoration of mastication, speech, facial expression, and appearance. In recent years, substantial progress has been achieved in the management of maxillofacial blast injuries with respect to bony reconstruction, soft-tissue repair, nerve restoration, and functional rehabilitation. Conventional approaches, including internal fixation, nonvascularized autologous bone grafting, vascularized osseous free flaps, skin grafting, free flap transfer, and nerve grafting, remain the mainstay of treatment; however, they are constrained by donor-site morbidity, tissue mismatch, infection risk, and incomplete functional recovery. Emerging techniques such as virtual surgical planning, virtual reality and augmented reality-assisted navigation, tissue engineering, biomaterial-based scaffolds, 3D printing, bioprinting, and nerve conduits have expanded reconstructive options and shown promising potential for improving precision and regeneration. This review systematically summarizes representative studies on reconstruction of bone, soft tissue, and nerve injuries after maxillofacial blast trauma, analyzes the advantages and limitations of conventional methods, highlights

[作者简介] 王泽阳, 硕士研究生, 主要从事口腔医学方面的研究

[通信作者] 陈犹白, E-mail: chenyoubai@301hospital.com.cn

recent technical advances, and discusses current controversies and future directions, with the aim of providing references for optimizing reconstructive strategies and improving long-term quality of life in affected patients.

[Key words] maxillofacial injuries; blast injuries; repair and reconstruction; tissue engineering; facial nerve

颌面部解剖位置暴露, 因此易受爆炸损伤。Prysiashniuk 等^[1]研究俄乌战争数据, 发现颌面战创伤中爆炸伤占比高达 87.2%。颌面部爆炸伤的修复重建是整形外科、颌面外科医师面对的难题。这是因为颌面部爆炸伤可引起软、硬组织的复合损伤, 其中软组织损伤主要表现为高温烧伤以及爆炸破片对皮肤、肌肉和神经的切割撕裂伤, 硬组织损伤主要表现为爆炸破片导致的粉碎性骨折^[2]。这些损伤严重影响患者生理功能, 还可能引发心理问题, 降低生活质量^[3]。因此, 颌面部爆炸伤的修复重建对于改善伤员的外观和功能、提高生活质量具有重要的作用。

在骨组织修复方面, 骨折复位内固定、自体非血管化骨移植及游离血管化的骨瓣移植是临床常用手段。这些方法在恢复骨性支架结构和解剖连续性方面具有明确疗效, 但存在个体匹配度有限、供区损伤等局限性^[4-5]。虚拟外科规划通过术前完成骨瓣设计与个体化钛板预成型, 减少术中调整与截骨操作, 提高手术精确性, 缩短手术时间和降低并发症风险^[6-7]。骨组织工程通过构建具有成骨诱导能力的生物支架, 结合生长因子或干细胞实现骨组织再生, 避免供区损伤^[8]。在软组织修复方面, 植皮或皮瓣移植仍是目前的主要修复方法, 这些方法可以恢复缺损组织的覆盖, 为神经和血管等重要结构提供保护, 但存在瘢痕挛缩、供区损伤和形态匹配受限等问题。生物工程皮肤可提供细胞迁移和生长的支架环境, 甚至在体外直接培养人工皮肤减轻瘢痕挛缩和组织损伤。3D 生物打印可构建生物墨水进行组织修复, 有广泛的应用前景, 但当前仍处于探索阶段。在神经修复方面, 神经吻合、自体神经移植及神经转位是当前的主要技术, 可重建神经连续性或间接恢复目标区运动与感觉功能^[9]。但对于长段神经缺损治疗效果有限并且存在供区损伤和功能恢复有限等问题。脱细胞神经移植和神经导管移植可为轴突再生提供生长环境, 有望减少供区损伤, 但其在长段缺损的修复、安全性和功能恢复方面需要更多的研究和临床证据支持。而当前对颌面部爆炸伤的研究多聚焦于颌面部爆炸伤的模型建立、有限元分析及急救, 缺乏对颌面部爆炸伤的修复重建的综述。因此, 本文聚焦颌面部爆炸伤导致的骨组织、软组织与神经损伤的修复重建, 系统总结传统修复方法的优缺点, 并探讨数字化、组织工程、3D 打印等新技术在颌面部爆炸伤修复中的应用潜力, 旨在为颌

面部爆炸伤提供新的治疗思路, 提高颌面部爆炸伤患者的生活质量。

1 颌面部爆炸伤的流行病学和临床特点

爆炸伤是一类由冲击波、破片及热效应共同引发的高能量创伤, 常见于军事冲突、恐怖袭击及工业事故^[10]。其致伤机制复杂, 具有组织毁损范围广、创面污染严重、多发伤、复合伤和异物伤等特点^[11]。其致伤机制分为 5 种: (1)原发性爆炸伤。冲击波在体内传播; (2)继发性爆炸伤。冲击波将爆炸装置碎片或周围物体碎片高速发射; (3)三级爆炸伤。冲击波将人体抛掷, 与其他物体碰撞或被倒塌物砸击; (4)四级爆炸伤。爆炸产物造成的其他损伤, 如烧伤、窒息或接触有毒物质; (5)五级爆炸伤。爆炸装置附带的化学、生物、放射性等污染导致的损伤^[11]。

颌面部爆炸伤的临床处理不只涉及创面封闭和骨折固定, 也与气道安全、感染控制、咬合关系、语言吞咽功能、面部表情、感觉恢复、外观重建及心理社会功能恢复密切相关^[12-13]。急性期应关注气道管理、止血、清创、异物去除、感染预防和保护重要器官等。待创面污染得到控制、组织边界较明确后, 根据骨组织、软组织和神经损伤程度行分期修复。由于颌面部结构复杂且功能要求高, 爆炸伤后的修复重建应综合考虑结构连续性、组织覆盖、血供恢复、神经功能重建及提升远期生活质量等方面, 不应仅以创面闭合或缺损填补作为治疗目标。

2 骨组织修复

骨组织构成面部三维轮廓与咬合支撑结构, 颌面部爆炸伤常伴有骨折和骨缺损^[14]。骨组织修复是恢复颜面解剖结构及功能的首要环节^[15]。骨重建不仅是恢复结构, 更直接影响后续软组织修复的成功率。目前, 骨修复策略主要围绕以下四大方向: 针对可复位骨折的内固定技术、针对连续性缺损的节段性骨重建、数字化技术在骨重建中的应用以及基于再生医学的骨组织工程。

2.1 内固定 爆炸伤多为多部位的粉碎性骨折, 常伴有大块骨组织缺损、移位, 精确复位困难, 同时爆炸伤对骨折部位的血供破坏严重, 而内固定操作时会进一步破坏骨膜, 加之伤口内大量残留骨碎片、牙齿、异物, 伤口污染严重, 使得后期感染风险增加^[16]。对于清创后无明显污染、骨折碎片尚有血供并与骨膜相连的情况, 可采用钛板内固定进行复位

以保留原骨结构^[17]。传统钛固定技术中需要反复弯制钛板,增加了手术耗时,也增加了钛板断裂的风险^[4]。3D打印钛板可根据患者个性化定制钛板,显著减少手术耗时[(16.67±4.18) min vs. (33.78±8.45) min]。Wang等^[18]在兔颌骨缺损模型中分别植入3D打印钛板与传统钛板,与传统钛板相比,3D打印钛合金板的骨接触率明显增高(96.9% vs. 66.0%)。钛及其衍生物因其优异的机械性能和骨整合能力,成为新型的3D打印材料^[19]。Zhang等^[20]利用3D打印技术制备了多孔钛支架,并通过纳米尺度表面拓扑进行功能化修饰。体外实验发现,该材料可显著提高骨髓间充质干细胞的碱性磷酸酶活性、成骨相关基因表达水平及矿化结节形成能力,证实了其在促进颌面骨缺损早期成骨修复方面的潜力。植入于兔下颌角骨缺损模型后,经纳米拓扑改性的多孔钛在micro-CT分析中表现出更高的骨体积分数,组织学染色和荧光标记进一步证实,其可促进更早且更充分的新骨长入与骨整合。然而,该实验基于动物模型且观察时间短,缺乏与临床常用的钛合金内固定材料的对比。此外,钛金属熔点极高,加工难度大且成本高昂,相比于应用成熟的钛合金,目前仍缺乏大规模长期临床随访数据^[21]。

2.2 骨移植 对于软组织血运良好且创面清洁的小段骨缺损(通常<6 cm),可用非血管化自体骨移植修复^[22]。Dastgir等^[23]对50例下颌骨节段性缺损的患者进行回顾性研究发现,非血管化骨移植的成功率为90%,并发症发生率为34%,其中并发症多为感染(14%)和伤口裂开(6%)。再者,非血管化自体骨移植结合骨形态发生蛋白(bone morphogenetic protein, BMP)等生长因子、骨髓干细胞或富血小板血浆,可提高成骨效果^[5]。当骨缺损范围较大、伴有软组织缺损或局部供血不良时,可用游离带血管的骨瓣修复。该骨瓣通过显微外科吻合血管,可在受区快速重建血运,从而提高大段骨移植的成活率。游离腓骨瓣是当前常用的颌骨重建骨瓣,80%以上的颌骨大段缺损病例采用腓骨瓣修复^[24]。移植骨在受区存活是重建成功的基础,颌面部爆炸伤常造成不规则的骨缺损,传统技术难以精确恢复面部轮廓、支撑功能与咬合关系。需要借助数字化技术更精确地进行截骨设计、骨瓣塑形和植入物设计。

2.3 数字化技术在骨重建中的应用 头面部解剖结构复杂,涉及面部轮廓、咬合关系及重要神经血管结构的保护,因此临床上引入多种数字化技术,以提高手术规划的准确性和骨重建的可预见性^[25]。数字化技术可帮助医师精确模拟颌骨重建,包括骨折复位、截骨设计和个性化植入物的设计,从而精确化修复骨缺损^[26-27]。口腔颌面锥形束CT(CBCT)等影

像技术可显示骨折碎片、缺损边界、牙根、神经管和颞孔等重要结构的空間关系,为术前规划和骨折复位提供依据。在复杂的颌面部爆炸伤中,虚拟外科技术可通过对侧镜像、虚拟复位或统计形态学方法恢复伤前解剖结构^[28]。Youssef等^[29]利用下颌统计形态模型,在常规咬合关系、对侧骨形态及解剖连续性均丧失的情况下,该模型通过与患者影像逐步调整完成重建。但其术中仍需依赖稳定的解剖标志,较难精准定位且该研究为临床病例应用,样本量小,依赖临床医师判断,其可重复性和可靠性仍需验证。计算机辅助设计可根据缺损范围、受区截骨边界和重建目标,预先确定截骨线、骨瓣长度、骨段角度和排列方式,并通过3D打印截骨导板实现术中转化。Borbon等^[30]对2018年1月—2023年9月的17例颌骨连续性缺损患者开展了一项回顾性研究,患者均用虚拟外科规划和院内3D打印下颌及腓骨截骨导板。研究者通过术后CT重建实际截骨面,并与术前规划截骨面进行三维比较,结果显示实际截骨与术前规划之间仅存在较小偏差,表明数字化技术可以提高截骨设计的准确性。但该研究样本量较小,且主要对象为下颌骨节段性切除后重建患者,对于颌面部爆炸伤的应用仍需进一步验证。在个性化植入物设计方面,数字化技术可结合患者影像资料和三维重建,事先确定骨缺损范围、骨瓣节段排列、重建板形态和螺钉孔位,从而完成个性化植入物的设计^[31]。虚拟现实(virtual reality, VR)技术可用于术前模拟、手术路径规划和医患沟通,帮助医师更直观地理解手术的解剖关系^[32]。增强现实(augmented reality, AR)技术可与数字化工作流程结合,用于辅助截骨定位、骨瓣摆放和植入物安置以确保术前规划顺利转化为术中操作,提升治疗效果和患者的恢复质量^[33]。

2.4 骨组织工程 随着骨组织工程的发展,骨支架联合间充质干细胞在骨再生方面取得显著进展^[34]。Destrez等^[35]使用颗粒骨替代材料联合间充质干细胞修复大鼠上颌骨缺损。生物材料+间充质干细胞组的骨体积和骨矿物质密度分别为94.64%±10.71%和96.13%±24.19%,而对照组为76.09%±7.99%和51.64%±16.51%,证实颗粒骨替代材料结合间充质干细胞可显著促进骨再生,未来研究需进一步优化材料与细胞的组合。Carlson等^[36]在复合性下颌骨缺损中,采用异体骨移植联合患者特异性骨笼进行重建,5例患者中,4例使用完全无自体骨成分的异体骨支架实现了节段性颌骨缺损的修复。然而,该研究样本量较小,且仍有1例因感染导致移植失败,该策略尚难替代游离带血管骨瓣等成熟重建方式。

3 软组织修复

软组织构成颌面部的外层,负责构成面部外形且是保护骨、神经、血管和器官的外部屏障。颌面部爆炸伤常造成颌面部软组织不规则、深层次和大面积缺损,常规植皮难以修复^[37]。皮瓣移植是当前颌面部爆炸伤的主要治疗手段,但却不可避免的会造成组织损伤。而生物工程皮肤可以减少组织损伤,但无法处理较深的组织损伤,由于含细胞产品,所以制作时间长、成本高,限制了其应用^[38]。3D生物打印虽为复杂软组织损伤提供了精准且及时的新思路,但当前仍处于实验和转化的早期,其打印精度、再生能力、成本控制和可重复性仍需进一步验证。

3.1 生物工程皮肤 植皮修复主要适用于范围较小、基底血供良好且未暴露骨面或重要神经血管的浅层缺损。然而,颌面部爆炸伤的软组织缺损通常无法利用传统游离植皮覆盖。生物工程皮肤为大面积皮肤缺损提供了解决方案,其主要分为无细胞移植和细胞移植两大类。无细胞移植由良好生物相容性和生物降解性的天然或合成聚合物制成,如胶原蛋白、纤维蛋白和聚乙醇酸等^[39]。其中胶原蛋白具有良好生物相容性和促细胞黏附和增殖作用^[40];纤维蛋白可作为支架在愈合初期参与血凝块形成^[41];聚乙醇酸是一种合成聚合物,能够被自体组织逐渐吸收和替代,同时维持早期创面张力支撑,从而减少创面塌陷^[42]。通过与含有生长因子和抗生素的纳米颗粒整合,无细胞移植可以显著提高皮肤移植的效果^[43]。此外,脱细胞真皮基质通过保留胶原三维网状结构,为细胞迁移和血管内生提供生物支架,弥补了传统游离植皮缺乏真皮层支撑的不足。Hahn等^[44]使用新型再加工微粉化脱细胞真皮基质与自体薄层皮肤复合移植治疗全层皮肤缺损的患者,发现脱细胞真皮基质可显著改善早期血运条件,提升移植成活率至91%。细胞移植是生物相容性支架引入活细胞后形成的生物工程皮肤,其常用细胞类型包括角质形成细胞、成纤维细胞及间充质干细胞等,细胞在移植后可持续分泌多种生长因子和细胞外基质,加速上皮化及血管生成^[45]。因此,在修复颌面部爆炸伤导致的大面积皮肤缺损时,细胞移植可能改善局部血运障碍并抑制瘢痕形成,从而提高修复效果。Meuli等^[46]开展了一项多中心的自身半侧对照试验,对比了由自体角质形成细胞和真皮成纤维细胞构成的生物工程皮肤和自体皮片移植修复大面积皮肤缺损的效果。结果显示,生物工程皮肤的平均创面扩展比明显高于自体皮片(10.76 vs. 1.70);术后3、6及12个月时随访显示生物工程真皮组的瘢痕观察者评分分别为2、1和2分,患者评分均为1

分;而自体皮片移植组的观察者评分为5、4和3分,患者评分为7、2和5分,证实生物工程皮肤可以有效抑制瘢痕增生。然而,细胞移植因制备周期长,无菌条件及细胞活性要求高,以及成本高昂等瓶颈,限制了其在临床的广泛应用。

3.2 皮瓣移植 对于爆炸伤导致的大面积、深层次的软组织缺损,游离皮瓣移植是当前主要的修复手段^[47]。血管化组织瓣具有确切的血供,抗感染能力强,可以早期关闭创面,为后期功能重建创造更有利的条件。面部软组织重建的常用皮瓣包括前臂桡动脉皮瓣、股前外侧皮瓣、背阔肌皮瓣、锁骨上动脉皮瓣等^[48]。其中,股前外侧皮瓣因其血供可靠、组织量充足、供区损伤小、无需变换体位等优势,已成为颌面部软组织重建的首选皮瓣^[49]。Osmanov等^[50]采用股前外侧皮瓣修复了俄乌战争中的21例面部爆炸伤后软组织缺损,皮瓣成活率为90.5%,进一步证实了股前外侧皮瓣应用于颌面部爆炸伤修复的可靠性。雷德林等^[51]建立了犬颌面部爆炸伤模型,在伤后72 h第2次清创后利用股薄肌皮瓣游离移植对组织缺损进行修复,结果显示皮瓣愈合良好。白振西等^[52]建立了犬颌面部爆炸伤模型,对比了伤后不同时间利用游离皮瓣修复的效果,发现伤后6 h的早期修复均失败,而72 h时二次扩创的皮瓣成活率为75%。史文进等^[53]比较了犬颌面部爆炸伤与枪弹伤的特点和修复方法,发现爆炸伤的创口入口口径大于出口口径,而枪弹伤出口口径大于入口口径,两组犬创面均出现感染,在多次清创后,伤后72 h时利用吻合血管的游离皮瓣移植修复,取得了较好的修复效果。此外,一些先进的影像学技术可以辅助判断血管情况和皮瓣血供,提高游离皮瓣的成功率。例如,光子计数计算机断层扫描(PCCT)技术可提供更高的空间分辨率,在显示直径<1 mm的小穿支血管方面显著优于CT血管造影(computed tomography angiography, CTA),提高了穿支皮瓣的手术成功率^[54]。此外,吲哚菁绿近红外荧光血管造影是目前游离皮瓣血运监测的核心技术之一,可实时、动态显示皮瓣的灌注范围、速度与分布,直观识别低灌注区域,降低坏死风险,提升皮瓣成活率。在皮瓣切取前,吲哚菁绿可辅助定位穿支血管,优化皮瓣设计;血管吻合后,可利用吲哚菁绿验证吻合口通畅性,判断动脉供血与静脉回流是否充足;术后则可以早期预警血管危象^[55-56]。

3.3 3D生物打印 3D生物打印为软组织重建提供了个性化重建方案,根据患者缺损类型精确定制生物支架,模拟原有组织结构,提高植入物契合度、功能和美学恢复效果^[57]。该技术以自体细胞和生物材料为基础构建组织替代物,具有良好的生物相容

性,并可减少传统皮瓣移植带来的供区损伤。根据打印方式不同,3D生物打印可分为体外打印和原位打印:前者是在体外构建并培养组织,待其成熟后再植入体内^[58]。Li等^[59]使用具有快速应力松弛特性的水凝胶生物墨水,以明胶甲基丙烯酰基与纤维蛋白原复合物为基础,通过紫外光诱导光交联形成第一网络,并经凝血酶作用使纤维蛋白原发生酶促交联,形成第二网络,进而获得双网络水凝胶。之后,在其上培养C2C12肌母细胞,构建用于修复肌肉缺损的各向异性3D骨骼肌支架。在打印过程中,该水凝胶生物墨水被挤出打印在Carbopol支撑凝胶中,以形成模拟肌肉排列结构的支架。植入大鼠大体肌肉缺损模型后,结果显示炎症细胞浸润减轻,支架诱导形成肌球蛋白重链(myosin heavy chain, MHC)阳性的成熟肌纤维,并出现自发收缩行为。通过与空白组、单纯水凝胶组进行对比,组织学分析显示支架组中心核肌纤维数量约为52条,明显高于空白组(约18条);Masson染色显示,支架组胶原沉积比例约为20%,低于空白组(约42%),证明该支架可以促进骨骼肌组织再生而非单纯瘢痕性修复,并恢复肌肉收缩功能,提示体外打印技术在修复大面积肌肉缺失及功能方面具有巨大潜力。

为克服体外打印细胞培养与成熟时间长的限制,原位生物打印技术(*in situ* bioprinting)成为新兴的研究热点。该技术利用机械臂或便携式打印设备扫描创面后,将含细胞的生物墨水直接打印至缺损部,实现精确的细胞定位,且避免了耗时的体外分化步骤,减少了手术次数^[60]。Levin等^[61]开发了一种用于皮肤缺损的原位生物打印机,以胶原水凝胶作为基质加入杜氏改良Eagle培养基、三羟甲基氨基甲烷、血小板裂解液和皮肤成纤维细胞构建了生物墨水,在大鼠及猪的不规则皮肤缺损处逐层打印,并在无体外培养条件下原位成型。以分析组织切片面积内的炎症细胞数量和微血管截面数量分别作为炎症指数和血管生成指数,与单纯胶原水凝胶组对比,复合生物墨水组在大鼠模型中的炎症指数由9~10下降至6~7,小型猪模型中炎症指数由26~28降至18~20。血管生成指数明显提高:在大鼠模型中由6~7条微血管单位面积增加至10~11条,在小型猪模型中由约8条增加至14~16条,加入血小板裂解液后胶原凝胶收缩率提高15%~20%,内皮细胞球体扩散面积在48 h内增加约2.3倍,明显高于单纯胶原水凝胶组的1.2倍,有效减轻了炎症反应,促进血管新生,且未见异常纤维化及排异反应,证实其具有快速封闭大面积不规则创面并促进原位再生的能力。然而,原位生物打印存在难以维持稳定的打印精度及易受术中出血、组织液渗出等因素干扰等缺陷,限制了其临

床应用^[62]。且含细胞生物墨水对无菌条件、细胞活性、材料黏弹性、降解速度和力学性能要求高,制备及质量控制流程复杂。生物墨水成分、交联条件、细胞密度、打印分辨率和打印后培养方案等参数在不同研究中差异很大,也阻碍了可重复性和实验室间的可比性,未来建立标准化的评估方案是加速3D生物打印发展和临床转化的迫切需求^[63]。

4 神经修复

颌面部爆炸伤常伴随神经的撕裂或离断,其中以支配面部表情肌的面神经损伤最为常见^[64]。因此,颌面部爆炸伤后面神经的重建,是感觉和运动功能恢复的关键环节。根据不同损伤情况,神经修复方式主要包括神经吻合与移植修复、神经转位修复及神经导管修复等^[65]。在污染严重、软组织缺损广泛或无法实现无张力吻合的情况下,不应行一期修复^[66]。应对神经断端进行清晰辨认并以缝线标记,为二期神经修复保留条件^[67]。

4.1 神经吻合与移植修复 传统神经修复技术包括端端吻合和神经移植,对损伤范围小、神经断端清晰的伤者,可采用神经显微吻合修复^[66]。然而,爆炸伤多呈现为高能量损伤,常伴随神经挫裂、缺损及周围组织污染,直接吻合的适用范围有限。当神经缺损长度大、无法实现无张力直接吻合时,可采用自体神经移植^[68]。截取可牺牲的感觉神经(如腓肠神经、耳大神经等)作为神经桥梁连接断端^[69]。但神经移植存在供区感觉障碍、数量有限和神经直径不匹配等问题。为了减少供区神经损伤,脱细胞异体神经移植进入人们的视野。脱细胞神经移植通过去除供体神经中的细胞成分及主要免疫原性抗原并保留神经结构,为神经再生提供导向通道,避免自体神经移植的供区并发症。Safa等^[70]通过多中心研究对385例患者进行回顾性分析,发现脱细胞神经移植修复神经的成功率与自体神经移植相当,有意义的功能恢复($\geq$ S3/M3)达82%,复杂损伤如爆炸伤的恢复率较低(74%),且未观察到与移植物相关的严重不良反应。然而,脱细胞神经移植需经过供体筛选、脱细胞处理、灭菌、保存及质量检测等流程,制备工艺复杂,不同脱细胞方法会影响细胞去除程度、细胞外基质和神经支架质量^[71]。脱细胞神经移植在长距离缺损的修复中轴突的再生能力受限^[72],可能是导致其在长段神经缺损中修复效果较差的原因^[73-74]。

4.2 神经转位修复 神经转位是把供体神经移位缝合到受损神经的末梢,以恢复目标区功能的方法,该技术常用于近端神经缺失,修复延迟时间过长或神经吻合和神经移植疗效不佳的情况^[75]。Granados

等^[76]在一项为期4年的回顾性研究中,对22例完全性面瘫患者使用舌下神经与咬肌神经双神经转位术,通过舌下神经-面神经端吻合改善静态对称性,通过咬肌神经-面神经颊支恢复中面部运动。患者术后4个月出现自主面部运动,约6个月形成自发性微笑,Sunny-brook面神经评分由术前的(17.95±3.56)分提高至(58.75±7.40)分,面部临床评估量表生活质量评分由(33.41±4.73)分提高至(56.76±7.58)分。

4.3 神经导管修复 神经导管为神经断端提供封闭的管状结构,可为轴突再生创造稳定的环境,引导神经向远端生长^[77]。当前,多数美国食品药品监督管理局(FDA)获批的神经导管是由各种天然或合成生物材料构建的空心管,对神经缺损的治疗范围较小,治疗效果相较于神经移植也较差^[78]。但随着组织工程技术的进展,研究正采用新的构建技术,选择合适的生物材料,改变导管管腔的形态,植入种子细胞,并改善再生微环境,以促进神经生长并加速轴突再生^[73]。Drewry等^[79]采用无支架组织工程策略,通过微沟槽基底诱导牙髓干细胞定向排列并沉积内源性细胞外基质,使细胞沿沟槽方向排列并同步分泌定向排列的胶原性细胞外基质,随后将形成的细胞片从基底剥离并组装,形成无外源支架的圆柱状神经导管结构。体外表征结果显示,该无支架神经导管在保持细胞外基质纵向排列的同时,可持续表达脑源性神经营养因子和胶质细胞源性神经营养因子。在体内实验中,研究者将该导管植入大鼠面神经颊支5 mm节段性缺损模型,以自体神经移植和空缺损为对照。12周后组织学分析显示,导管修复组在缺损区形成了类似正常神经的束状结构,并可观察到连续分布的有髓神经纤维。功能学评估中,导管修复组在复合肌肉动作电位(compound muscle action potential, CMAP)峰-峰值振幅、激活阈值及胡须运动幅度方面均与自体神经移植组相当,表明该无支架神经导管在结构和功能恢复方面具有与自体神经移植相当的修复效果。神经导管修复是当前神经修复的重要发展方向,该技术可避免供区神经功能损伤,供体来源受限的问题且手术创伤小、操作较神经移植简便^[80]。尽管当前神经导管的研究取得了显著进展,但也存在诸多挑战,尤其是在修复长距离神经缺损方面,许多神经导管策略仍处于实验阶段。此外,神经导管的制造工艺复杂、成本高、可重复性和安全性等问题也亟须解决^[81]。

5 总结与展望

颌面部爆炸伤具有高能量、复合伤、重污染与组织缺损广泛的特点,常同时累及软组织、颌面骨骼及邻近重要器官结构。显微外科与重建理念的

断发展,促使颌面部爆炸伤的治疗从单纯解剖修复转向结构-功能一体化重建。血管化骨瓣和游离皮瓣仍是当前复杂缺损修复的主要方法。基于吲哚菁绿、CTA、PCCT、三维重建和虚拟手术规划的术前评估,可实现对血管走行、缺损形态及重建路径的精准分析,为皮瓣设计、骨瓣塑形提供个体化方案。组织工程与生物材料的发展为骨、软组织及神经修复提供了新的策略,但其临床转化仍需更多循证医学证据支持。

生物工程皮肤的发展为植皮和皮瓣修复治疗提供了补充方案,通过构建类皮肤的支架环境促进细胞迁移和上皮化显著减少了供区损伤,还降低了瘢痕挛缩风险。虽然临床数据显示效果不错,但若应用于复杂爆炸伤还必须缩短细胞的培养时间,提高对复杂创面的适应性。3D生物打印目前虽尚处于动物实验和早期转化研究阶段,但其在复杂组织修复中展现出极佳的前景。当前除研究性能更优的生物墨水,对其标准的制定也同样迫切。

神经修复策略从传统的吻合、自体神经移植转位逐步向脱细胞神经移植和神经导管的再生修复方向发展。脱细胞神经移植和神经导管为轴突再生提供导向结构和相对稳定的环境,但在长段神经缺损和复合组织损伤中的修复效果仍不稳定,且存在制备工艺复杂、成本较高、质量控制要求高及临床可重复性不足等问题;神经修复研究应关注导管微结构优化和远期功能评价。当前对于颌面部爆炸伤的机制认识与救治经验不断积累,但仍缺乏标准化诊疗路径与统一的评价体系;未来应在多学科协作框架下,逐步完善,细化分期节点与应用新技术,形成涵盖颌面部功能重建的治疗规范,以期在降低死亡率的同时最大限度改善患者远期功能与生活质量。

【参考文献】

- [1] Prysiazniuk O, Palyvoda R, Chepurnyi Y, et al. War-related maxillofacial injuries in Ukraine: a retrospective multicenter study [J]. Arch Craniofac Surg, 2025, 26(2): 51-58.
- [2] Grillo R, Bottura L, Lima BC, et al. The complex dynamics of maxillofacial trauma in blast and fragmentation injuries: current understanding and gaps in scientific evidence [J]. J Craniomaxillofac Surg, 2025, 53(10): 1762-1768.
- [3] Priya J, Hegde P, Rai AJ. Evaluation of quality of life and levels of depression, anxiety and stress in patients following facial trauma [J]. J Maxillofac Oral Surg, 2024, 23(3): 503-508.
- [4] Möllmann HL, Apeltrath L, Karnatz N, et al. Comparison of the accuracy and clinical parameters of patient-specific and conventionally bended plates for mandibular reconstruction [J]. Front Oncol, 2021, 11: 719028.
- [5] Bevans S, Hammer D. Tenants of mandibular reconstruction in segmental defects [J]. Otolaryngol Clin North Am, 2023, 56(4): 653-670.

- [6] Liu R, Su Y, Pu J, *et al.* Cutting-edge patient-specific surgical plates for computer-assisted mandibular reconstruction: the art of matching structures and holes in precise surgery[J]. *Front Surg*, 2023, 10: 1132669.
- [7] Yousif E, Abdalla M, Jumaa H, *et al.* 3D-printed patient-specific implants in maxillofacial reconstruction: a systematic review and meta-analysis of clinical outcomes and workflow efficiency[J]. *Cureus*, 2025, 17(12): e98224.
- [8] Aghali A. Craniofacial bone tissue engineering: current approaches and potential therapy[J]. *Cells*, 2021, 10(11): 2993.
- [9] Ray WZ, Mackinnon SE. Management of nerve gaps: autografts, allografts, nerve transfers, and end-to-side neurorrhaphy[J]. *Exp Neurol*, 2010, 223(1): 77-85.
- [10] Shuker ST. Maxillofacial air-containing cavities, blast implosion injuries, and management[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2010, 68(1): 93-100.
- [11] Kluger Y, Nimrod A, Biderman P, *et al.* The quinary pattern of blast injury[J]. *Am J Disaster Med*, 2007, 2(1): 21-25.
- [12] Perry M. Advanced Trauma Life Support (ATLS) and facial trauma: can one size fit all? Part 1: dilemmas in the management of the multiply injured patient with coexisting facial injuries[J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2008, 37(3): 209-214.
- [13] Lew TA, Walker JA, Wenke JC, *et al.* Characterization of craniomaxillofacial battle injuries sustained by United States service members in the current conflicts of Iraq and Afghanistan[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2010, 68(1): 3-7.
- [14] Zeiderman MR, Pu LLQ. Contemporary reconstruction after complex facial trauma[J]. *Burns Trauma*, 2020, 8: tkaa003.
- [15] Guo H, Li Q, Zreiqat H, *et al.* Emerging technologies for personalised oro-maxillofacial bone regeneration: design strategies and fabrication techniques[J]. *Biomaterials*, 2026, 326: 123709.
- [16] Poghosyan A, Misakyan M, Mkhitarian G, *et al.* Drone-induced midfacial blast injuries: early definitive reconstruction and 5-year outcomes from a single-center cohort[J]. *J Clin Med*, 2026, 15(12): 4588.
- [17] Pang J, Cash H, Futran N. Free tissue reconstruction of massive facial trauma: review of the literature and considerations to implement aesthetic and functional outcome[J]. *Plast Aesthet Res*, 2021, 8: 42.
- [18] Wang Q, Telha W, Wu Y, *et al.* Evaluation of the properties of 3D-printed Ti alloy plates: *in vivo* and *in vitro* comparative experimental study[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(2): 444.
- [19] Wang X, Ning B, Pei X. Tantalum and its derivatives in orthopedic and dental implants: osteogenesis and antibacterial properties[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2021, 208: 112055.
- [20] Zhang C, Zhou Z, Liu N, *et al.* Osteogenic differentiation of 3D-printed porous tantalum with nano-topographic modification for repairing craniofacial bone defects[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1258030.
- [21] Li J, Cao F, Chen X, *et al.* Additively manufactured tantalum-titanium alloys with optimized osteogenic and immunomodulatory properties for load-bearing orthopedic implants[J]. *Bioact Mater*, 2026, 58: 49-69.
- [22] Moura LB, Carvalho PH, Xavier CB, *et al.* Autogenous non-vascularized bone graft in segmental mandibular reconstruction: a systematic review[J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2016, 45(11): 1388-1394.
- [23] Dastgir R, Coffey J, Quereshy H, *et al.* Nonvascularized bone grafts: how successful are they in reconstruction of segmental mandibular defects?[J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*, 2024, 137(5): e63-e72.
- [24] Kostares E, Kostare G, Kostares M, *et al.* Prevalence of free flap failure in patients undergoing reconstruction for medication-related osteonecrosis of the jaw: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Pract*, 2025, 15(8): 151.
- [25] Sharaf BA, Abushehab A, Michaelcheck CE, *et al.* Virtual surgical planning in craniomaxillofacial surgery: a systematic review and meta-analysis of accuracy, operative time, and cost-effectiveness[J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2025, 105: 305-314.
- [26] Velarde K, Cafino R, Isla A, *et al.* Virtual surgical planning in craniomaxillofacial surgery: a structured review[J]. *Comput Assist Surg*, 2023, 28(1): 2271160.
- [27] Hou B, Li Y, Wong RCW. Next-generation craniomaxillofacial implants for reconstructive surgery: balancing biomechanics, biocompatibility, and bioactivity[J]. *Int J Oral Sci*, 2026, 18(1): 1.
- [28] Singerman KW, Morisada MV, Kriet JD, *et al.* Virtual surgical planning for management of acute maxillofacial trauma[J]. *Craniomaxillofac Trauma Reconstr*, 2025, 18(1): 18.
- [29] Youssef SALY, Klop C, Sabelis JF, *et al.* Restoring mandibular anatomy after complex trauma: clinical applications of a statistical shape model[J]. *J Clin Med*, 2026, 15(3): 1223.
- [30] Borbon C, Novaresio A, Iocca O, *et al.* Evaluating osteotomy accuracy in mandibular reconstruction: a preliminary study using custom cutting guides and virtual reality[J]. *Diseases*, 2025, 13(3): 81.
- [31] Mohamed AK, Arce K, Nathan JM, *et al.* Patient-specific titanium implants reduce hardware-related complications compared to stock reconstruction plates for virtually guided fibular free flaps in head and neck reconstruction[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2025, 83(9): 1157-1169.
- [32] Li X, Sun Q, Shao L, *et al.* Robot-assisted augmented reality navigation for osteotomy and personalized guide-plate in mandibular reconstruction: a preclinical study[J]. *BMC Oral Health*, 2025, 25: 1309.
- [33] Dubron K, Shaheen E, Jacobs R, *et al.* Validation of mixed reality in planning orbital reconstruction with patient-specific implants[J]. *Sci Rep*, 2025, 15: 2087.
- [34] Hazrati P, Alanazi A, Alrmali AE, *et al.* Clinical stem cell therapy in oral and craniofacial bone regeneration: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2026, 14: 1677400.
- [35] Destrez A, Colin E, Testelin S, *et al.* Evaluation of a granular bone substitute for bone regeneration using an optimized *in vivo* alveolar cleft model[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(9): 1035.
- [36] Carlson KJ, Liebman RM, Bak MJ, *et al.* Reconstruction of composite mandible defects using a cellular bone allograft and soft tissue free flap coverage[J]. *Craniomaxillofac Trauma Reconstr*, 2024, 17(4): NP21-NP30.
- [37] Pepper T, Kim MH, McMillan D, *et al.* Management protocol for ballistic and other high-energy avulsive facial injuries-an update for the 21st century[J]. *Craniomaxillofac Trauma Reconstr*, 2026, 19(1): 14.
- [38] Uddin A, Rahmani M, Sajini A. From basic biology to engineered therapies: the keratinocyte stem cell playbook[J]. *Front Med Technol*, 2026, 8: 1763067.

- [39] Dean J, Hoch C, Wollenberg B, *et al.* Advancements in bioengineered and autologous skin grafting techniques for skin reconstruction: a comprehensive review[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2025, 12: 1461328.
- [40] Amirrah IN, Lokanathan Y, Zulkiflee I, *et al.* A comprehensive review on collagen type I development of biomaterials for tissue engineering: from biosynthesis to bioscaffold[J]. *Biomedicines*, 2022, 10(9): 2307.
- [41] Al Kayal T, Buscemi M, Cavallo A, *et al.* Plasminogen-loaded fibrin scaffold as drug delivery system for wound healing applications[J]. *Pharmaceutics*, 2022, 14(2): 251.
- [42] Trucillo P. Biomaterials for drug delivery and human applications [J]. *Materials (Basel)*, 2024, 17(2): 456.
- [43] Lin Y, Chen Z, Liu Y, *et al.* Recent advances in nano-formulations for skin wound repair applications[J]. *Drug Des Devel Ther*, 2022, 16: 2707-2728.
- [44] Hahn HM, Jeong YS, Lee IJ, *et al.* Efficacy of split-thickness skin graft combined with novel sheet-type reprocessed micronized acellular dermal matrix[J]. *BMC Surg*, 2022, 22(1): 358.
- [45] Ge C, Yin L, Jia L, *et al.* Tissue-engineered dermal substitutes constructed by human embryonic stem cell-derived fibroblasts facilitate the repair of skin wounds[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2026, 14: 1777175.
- [46] Meuli M, Schiestl C, Hartmann-Fritsch F, *et al.* Safety and efficacy of bio-engineered, autologous dermo-epidermal skin grafts in adolescent and adult burn patients: 1-year results of a prospective, randomized, controlled, multicenter phase IIB clinical trial[J]. *EClinicalMedicine*, 2025, 90: 103665.
- [47] Sweeny L, Kane AC, Thomas CM, *et al.* Free flap reconstruction following head and neck trauma[J]. *Head Neck*, 2024, 46(12): 2981-2992.
- [48] Tamaki A, Zender CA. Free flap donor sites in head and neck reconstruction[J]. *Otolaryngol Clin North Am*, 2023, 56(4): 623-638.
- [49] Wei FC, Jain V, Celik N, *et al.* Have we found an ideal soft-tissue flap? An experience with 672 anterolateral thigh flaps[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2002, 109(7): 2219-2226.
- [50] Osmanov B, Karri M, Pavlychuk T, *et al.* War as a teacher: experiences of facial reconstruction with anterolateral thigh flap during the Ukrainian war[J]. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg*, 2025, 126(5S): 102407.
- [51] 雷德林, 王昭领, 白振西, 等. 颌面部爆炸伤病理特点及早期修复研究[J]. *中国急救医学*, 2003, 23(1): 5-6.
- [52] 白振西, 顾晓明, 李兵仓, 等. 颌面部爆炸伤软组织缺损早期修复的实验研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2002, 18(3): 223-225.
- [53] 史文进, 李慧增, 孙远, 等. 口腔颌面部爆炸伤与枪弹伤的对比实验研究[J]. *重庆医学*, 2005, 34(3): 330-331.
- [54] 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]. *Aesthet Plast Surg*, 2025, 49(17): 4888-4900.
- [55] Choudhary S, Khanna S, Mantri R, *et al.* Role of indocyanine green angiography in free flap surgery: a comparative outcome analysis of a single-center large series of 877 consecutive free flaps[J]. *Indian J Plast Surg*, 2023, 56(3): 208-217.
- [56] Ludolph I, Horch RE, Arkudas A, *et al.* Enhancing safety in reconstructive microsurgery using intraoperative indocyanine green angiography[J]. *Front Surg*, 2019, 6: 39.
- [57] Loukelis K, Koutsomarkos N, Mikos AG, *et al.* Advances in 3D bioprinting for regenerative medicine applications[J]. *Regen Biomater*, 2024, 11: rbac033.
- [58] Yang P, Ju Y, Hu Y, *et al.* Emerging 3D bioprinting applications in plastic surgery[J]. *Biomater Res*, 2023, 27: 1.
- [59] Li T, Hou J, Wang L, *et al.* Bioprinted anisotropic scaffolds with fast stress relaxation bioink for engineering 3D skeletal muscle and repairing volumetric muscle loss[J]. *Acta Biomater*, 2023, 156: 21-36.
- [60] Deepa C, Bhatt A. Skin substitutes: from conventional to 3D bioprinting[J]. *J Artif Organs*, 2025, 28(2): 154-170.
- [61] Levin AA, Karalkin PA, Koudan EV, *et al.* Commercial articulated collaborative in situ 3D bioprinter for skin wound healing[J]. *Int J Bioprint*, 2023, 9(2): 675.
- [62] Lu X, Chen B, Fang Y, *et al.* Decellularization of porcine dermis via supercritical CO₂-assisted co-solvent system for cutaneous wound healing[J]. *Regen Biomater*, 2026, 13: rbag010.
- [63] Perez-Barreto A, Moscalu R, Tremolada C, *et al.* 3D bioprinting of skin equivalents: towards functional wound healing models[J]. *J Tissue Eng*, 2026, 17: 20417314251407023.
- [64] Weinzierl A, Piccinni E, Kollarik S, *et al.* Future innovations for the treatment of facial nerve paralysis[J]. *JPRAS Open*, 2025, 45: 127-135.
- [65] Knoedler L, Niederegger T, Munzinger R, *et al.* Rewiring faces: advances and outcomes in facial nerve reconstruction after facial vascularized composite allotransplantation[J]. *Front Surg*, 2026, 13: 1738957.
- [66] Keller MW, Han PP, Galarneau MR, *et al.* Airway management in severe combat maxillofacial trauma[J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2015, 153(4): 532-537.
- [67] Stevens JR, Brennan J. Management and reconstruction of blast wounds of the head and neck[J]. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*, 2016, 24(5): 426-432.
- [68] Grosu-Bularda A, Vancea CV, Hodea FV, *et al.* Optimizing peripheral nerve regeneration: surgical techniques, biomolecular and regenerative strategies-a narrative review[J]. *Int J Mol Sci*, 2025, 26(8): 3895.
- [69] Grinsell D, Keating CP. Peripheral nerve reconstruction after injury: a review of clinical and experimental therapies[J]. *Biomed Res Int*, 2014, 2014: 698256.
- [70] Safa B, Jain S, Desai MJ, *et al.* Peripheral nerve repair throughout the body with processed nerve allografts: results from a large multicenter study[J]. *Microsurgery*, 2020, 40(5): 527-537.
- [71] Hundepool CA, Nijhuis THJ, Kotsougiani D, *et al.* Optimizing decellularization techniques to create a new nerve allograft: an *in vitro* study using rodent nerve segments[J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42(3): E4.
- [72] Acevedo Cintrón JA, Hunter DA, Schellhardt L, *et al.* Limited nerve regeneration across acellular nerve allografts (ANAs) coincides with changes in blood vessel morphology and the development of a pro-inflammatory microenvironment[J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(12): 6413.
- [73] Yao X, Xue T, Chen B, *et al.* Advances in biomaterial-based tissue engineering for peripheral nerve injury repair[J]. *Bioact Mater*, 2024, 46: 150-172.
- [74] Leckenby JJ, Furrer C, Haug L, *et al.* A retrospective case series

- reporting the outcomes of Avance nerve allografts in the treatment of peripheral nerve injuries[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2020, 145(2): 368e-381e.
- [75] Bateman EA, Larocerie-Salgado J, Ross DC, *et al.* Assessment, patient selection, and rehabilitation of nerve transfers[J]. *Front Rehabil Sci*, 2023, 4: 1267433.
- [76] Granados CL, Rueda Vega M, Diaz MA, *et al.* Dual nerve transfer for postoperative facial paralysis: a 4-year clinical outcome report [J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2025, 282(12): 6101-6107.
- [77] Daly W, Yao L, Zeugolis D, *et al.* A biomaterials approach to peripheral nerve regeneration: bridging the peripheral nerve gap and enhancing functional recovery[J]. *J R Soc Interface*, 2012, 9 (67): 202-221.
- [78] Stocco E, Barbon S, Emmi A, *et al.* Bridging gaps in peripheral nerves: from current strategies to future perspectives in conduit design[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(11): 9170.
- [79] Drewry MD, Shi D, Dailey MT, *et al.* Enhancing facial nerve regeneration with scaffold-free conduits engineered using dental pulp stem cells and their endogenous, aligned extracellular matrix [J]. *J Neural Eng*, 2024, 21(5): 056015.
- [80] Zhang S, Sun X, Yang X, *et al.* Research progress on composite nerve guidance conduits with immune-regulatory functions[J]. *Front Immunol*, 2025, 16: 1622508.
- [81] Vijayavenkataraman S. Nerve guide conduits for peripheral nerve injury repair: a review on design, materials and fabrication methods [J]. *Acta Biomater*, 2020, 106: 54-69.

(责任编辑: 纪方方)

