

骨增量技术的应用与临床效果：从传统方法到创新策略

侯晓璐, 梁远帆, 宁相益, 朱涵月, 李 飒, 邓久鹏*

华北理工大学口腔医学院, 河北 唐山

收稿日期: 2025年12月13日; 录用日期: 2026年1月7日; 发布日期: 2026年1月19日

摘 要

颌面部骨缺损是制约口腔种植成功的关键因素, 对功能与美学修复构成严峻挑战。当骨缺损超越临界尺寸时, 必须采用骨增量技术以重建足够的骨量。本文系统综述了骨增量技术的演进, 从传统方法到创新策略。目前, 自体骨移植凭借其优异的成骨、骨诱导与骨传导性能, 仍是临床“金标准”, 但存在供区有限及并发症等局限。颗粒状自体骨活性良好而空间维持力弱, 块状骨(如颞部、外斜线来源)虽吸收率较低, 其长期稳定性仍需关注。生物材料(如异体骨DFDBA、异种骨Bio-Oss®及牙本质基质)作为补充, 常需与自体骨或生物制剂(CGF/PRF)联用以优化成骨。引导骨再生(GBR)技术利用屏障膜创造骨再生空间, 其成效依赖于膜的机械性能; 钛网技术(特别是3D打印个性化钛网)为复杂骨缺损提供了强有力的三维支撑, 但存在软组织开裂与暴露风险。对于上颌后牙区骨量不足, 上颌窦提升术是经典术式, 其精准性与安全性因数字化导板与导航技术的应用而显著提高。综上所述, 各类骨增量技术各有其明确的适应症与优劣势, 临床决策需基于缺损形态、生物材料特性及患者个体情况综合考量。未来, 多技术融合(如3D打印个性化生物支架与生长因子控释技术结合)、数字化全程赋能以及生物活性精准调控, 将是实现骨增量效果从“可预测”迈向“最优化”的关键方向, 为患者提供更安全、高效且稳定的治疗方案。

关键词

骨增量, 成骨, 骨缺损

Application and Clinical Outcomes of Bone Augmentation Techniques: From Traditional Methods to Innovative Strategies

Xiaolu Hou, Yuanfan Liang, Xiangyi Ning, Hanyue Zhu, Sa Li, Jiupeng Deng*

School of Stomatology, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: December 13, 2025; accepted: January 7, 2026; published: January 19, 2026

*通讯作者。

文章引用: 侯晓璐, 梁远帆, 宁相益, 朱涵月, 李飒, 邓久鹏. 骨增量技术的应用与临床效果: 从传统方法到创新策略[J]. 临床医学进展, 2026, 16(1): 1550-1560. DOI: 10.12677/acm.2026.161198

Abstract

Maxillofacial bone defects are a critical factor limiting the success of oral implantation, posing significant challenges to functional and aesthetic restoration. When bone defects exceed a critical size, bone augmentation techniques become essential to reconstruct sufficient bone volume. This article provides a systematic review of the evolution of bone augmentation techniques, from traditional methods to innovative strategies. Currently, autogenous bone grafting remains the clinical “gold standard” due to its superior osteogenic, osteoinductive, and osteoconductive properties, despite limitations such as donor site morbidity and finite supply. Particulate autogenous bone offers excellent bioactivity but weak space-maintaining ability, while block bone grafts (e.g., from the chin or external oblique ridge) exhibit lower resorption rates, though their long-term stability requires further attention. Biomaterials (e.g., allografts like DFDBA, xenografts like Bio-Oss®, and dentin matrix) serve as supplements and are often combined with autogenous bone or biological agents (e.g., CGF/PRF) to optimize osteogenesis. Guided Bone Regeneration (GBR) techniques utilize barrier membranes to create space for bone regeneration, with outcomes dependent on the membrane’s mechanical properties. Titanium mesh technology, particularly patient-specific 3D-printed titanium meshes, provides robust three-dimensional support for complex bone defects but carries risks of soft tissue dehiscence and exposure. For insufficient bone in the posterior maxilla, sinus floor elevation remains a classic procedure, with its precision and safety significantly enhanced by the application of digital surgical guides and navigation technology. In summary, various bone augmentation techniques have distinct indications, advantages, and disadvantages. Clinical decision-making requires comprehensive consideration of defect morphology, biomaterial characteristics, and individual patient factors. Looking ahead, the integration of multiple technologies (e.g., combining 3D-printed patient-specific bioactive scaffolds with controlled-release growth factors), full-process digital empowerment, and precise regulation of bioactivity will be key directions for advancing bone augmentation outcomes from “predictable” to “optimal.” These advancements aim to provide patients with safer, more efficient, and stable treatment solutions.

Keywords

Bone Augmentation, Osteogenesis, Bone Defect

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

骨骼是人体最大的动态生物组织，从正畸过程中骨的改建到大范围骨缺损的再生，再到整体骨骼的健康。骨缺损在颌面区域很常见，涉及许多因素，如肿瘤、创伤、牙体缺失和牙周疾病等，缺乏水平和垂直骨可能会导致严重的临床问题，影响口腔功能和面部外观[1]。骨骼轻度受损后在适当的生理环境下可通过身体的修复机制自行愈合[2]。较小的骨缺损可以通过机体自行愈合，但骨缺损大于临界值时，超过了骨组织的自愈能力范围[3]，需要骨科植入物一定程度地恢复其愈合。垂直骨增量术是口腔科中常用的一种手术，旨在增加牙槽嵴的高度以容纳牙种植体[4]。有效的垂直骨增量对于牙槽骨丢失的患者特别有益[5]，这是由于骨组织缺失而难以获得理想修复效果的患者得以实现治疗的可能性。本文首先对骨增量技术进行了分类，并探讨了对于骨增量效果的临床评定指标。同时阐述了骨增量技术可能出现的并发症以及该技术的前沿进展。最后分析不同技术的优劣势、临床选择标准及未来的研究方向。

2. 水平骨增量技术的分类

2.1. 自体骨移植

目前,自体骨仍被认为是骨移植的“金标准”[6]。自体骨可以提供具有成骨潜能的骨祖细胞;释放生长因子(含天然骨形态发生蛋白 BMPs),促进骨祖细胞的增值、分化;并且皮质骨可为成骨细胞提供支撑力,松质骨则有利于快速血管化,从而加快新骨产生。然而自体骨移植具有骨丢失的扩展和骨体去部位的发病率相关的局限性[6][7]。因此,适用于中至重度水平向骨缺损,尤其适用于需要即刻强支撑的场合。

常见的自体骨移植供区选择有颞部、磨牙后区、下颌骨、肋骨、颅骨、髂骨等处[8][9]。对于取骨部位的选择,如果口内有足够的自体骨,其应为首选,当其无法满足需要时,再选择口外取骨[10]。颗粒状骨在口腔治疗过程中应用较为广泛,并且具有较佳的成骨活性,无免疫排斥反应。少量的自体颗粒骨获取方式较为简单,种植手术过程可保留钻螺纹内的骨屑,无需二次手术和再次加工。临床中也可取上颌结节、下颌支、颞部等骨块,研磨成骨颗粒后应用。但颗粒骨的获取量有限,不能满足大范围骨缺损成骨的要求,还伴有吸收较快,维持空间能力较差等缺点,需要辅助钛网、可吸收膜等固定装置保持形态;同时容易受到唇颊舌肌运动时的影响。有学者认为[11],骨块移植时可去除骨缺损边缘骨皮质,使其与新骨创面接触,利于植骨区的松质骨可以刺激新骨形成,加速骨愈合。Sbordone [12]等在 6 年的随访调查中,采用块状和颗粒状骨进行上颌窦提升的手术结果发现,块状形式的吸收率为 21.5%,而颗粒状移植物的吸收率为 39.2%。

2.2. 引导骨再生技术(GBR)

引导骨再生术(guided bone regeneration, GBR)是目前常用的牙槽骨缺损修复方法,具有易于塑形、操作便利等优势。在水平牙槽骨缺损的病例中,应用较为局限,其适用于轻至中度水平向骨缺损(颊舌向骨宽 2~4 mm),要求骨壁尽可能完整。在大量临床研究数据中表明,屏障膜的选择对 GBR 术后骨增量效果具有决定性的影响[13]。值得关注的是,术后 6 个月的骨体积稳定性检测结果表明,采用可吸收膜的实验组骨吸收率达到了 37.5%的较高水平。这一数据有力印证了膜材料的机械稳固性能与骨组织再生成效之间存在明显的关联关系[14]。

GBR 术使用的膜性材料分为可吸收或不可吸收两大类。可吸收类膜大部分为天然胶原蛋白组成,无需二次手术取出,可自行降解,但其机械强度低,维持局部空间能力较差,会影响最终骨形成的效果。同时,形成的降解产物及交联剂可影响骨生长[15]。常用的可吸收膜的成分有:胶原膜、壳聚糖、丝质物类、有机聚合物类。由于可吸收性膜相较于不可吸收性膜有空间维持的限制性,因此对于较大范围的骨缺损不适用,但临床技术的提高也对其有一定的改进,比如香肠技术的应用[16]。除可吸收膜外,不可吸收膜在临床上应用也较为广泛,较多应用于大面积复杂骨缺损治疗中[17]。目前,临床较常使用可吸收胶原膜。

2.3. 香肠技术(Sausage Technique)

近年来,为解决水平骨增量过程中面临的挑战,Urban [18]提出了一种创新性的“香肠技术”。该方法不仅有效提升了牙槽嵴顶处自体骨移植材料的稳定性,而且避免了钛网及异体骨移植可能出现的暴露风险与成骨效率不足等问题,成为一种更加高效、简便且可靠的水平骨增量解决方案,临床应用中已显示出良好效果。

该技术使用膜钉固定可吸收性生物膜,将骨增量材料[自体骨:无机牛骨矿物质(anorganic bovine bone

mineral, ABBM) = 1:1]置入可吸收性生物膜与牙槽骨的空间中, 在手术过程中将骨增量材料上推至牙槽嵴顶处, 最后严密地减张缝合后呈现形似香肠状结构[18]。虽然香肠技术为刃状牙槽嵴水平骨增量提供可靠解决方案, 其也有一定的缺点: ① 对于严重缺损的病例, 术中又难以提供足量自体骨, 将影响骨增量的效果。② 手术翻瓣的范围较 GBR 术大, 减张范围增加, 影响角化膜的宽度。有研究表明, 随着骨增量材料的增多, 角化黏膜宽度减少也在增加[19]。③ 在垂直向缺损时, 无法维持垂直向稳定的稳固空间; 在此方面, 较差于 GBR 术。

3. 垂直骨增量技术的分类

3.1. 引导骨再生技术

传统 GBR 术需要置入膜性材料作为一层物理屏障, 隔开软组织与骨缺损区, 防止快速生长的结缔组织和上皮细胞迁移至骨缺损区, 为骨生长提供空间和有利环境, 是否能够提供稳定的空间供细胞生长是 GBR 术成功的关键影响因素。

钛网具有良好的机械性能, 同时对较大范围骨缺损的病例可较高程度地保持空间。钛网分为传统钛网、预制个性化钛网和 3D 打印个性化钛网。传统钛网通常与可吸收胶原膜联合使用, 防止周围软组织通过钛网孔隙渗入骨增量区域, 从而影响成骨效果。传统钛网在进行骨增量修复时, 愈合期间较容易出现钛网暴露的并发症。造成这些的原因可能有: (1) 切口的设计不当, 如过于靠近钛网边缘或未作足够的松弛切口使在缝合时张力过大, 压迫血管, 导致局部缺血裂开; (2) 钛网修剪后的锐利边缘刺激压迫上方的软组织; (3) 刚性结构的钛网与周围软组织在进行功能性运动(如说话、咀嚼、面部表情)中, 钛网与软组织间产生摩擦和相对运动。

为此, 采用 CAD-CAM 技术制作的预制个性化钛网更加贴近骨缺损, 并有文章[20]指出预制个性化钛网在手术时长和暴露率上均明显优于传统钛网, 并且骨增量的效果也较佳。但其成型过程仍旧存在锐利的边缘导致软组织开裂和钛网暴露, 精度较 3D 打印个性化钛网较低。有研究表明, 传统钛网的暴露率高达 80.0% [21], 而 3D 打印及 CAD-CAM 打印的个性化钛网的暴露率可降至 37.01% 以下[22], 且在上颌骨区域的暴露率显著高于下颌骨[23]。

3.2. 上颌窦提升术

在临床种植案例中, 由于牙齿缺失, 上颌后牙区域常存在因牙槽嵴的萎缩及气腔化现象等复杂因素导致的上颌骨剩余牙槽骨高度不足, 这一现象极大地提升了手术的复杂性, 降低了种植远期成功率。

侧壁开窗式上颌窦提升术和经牙槽嵴顶上颌窦提升是目前针对这一现象临床常用的解决办法。上颌窦牙槽嵴顶提升术又称上颌窦内提升适用于剩余牙槽嵴高度中度不足(通常为 5~8 mm)的病例, 凭借低并发症、微创性及高手术效率等优点, 在临床上广泛应用[24]。有研究表明[25]内提术中, 植骨对于成骨及并发症的影响在近期有较好的改善, 但在远期效果来看, 是否植骨对新生骨程度及其并发症发生情况无明显差异。上颌窦外提升是由上颌窦的外侧壁开窗, 创伤较内提升大, 但视野清晰。随着计算机辅助数字化技术与临床实际的良好结合, 例如静态导板、动态导航系统等实现更精确的上颌窦侧壁开窗, 清晰指示上颌窦侧壁拟开创的前后和上下边界, 准确标记窦间隔和窦内血管, 从而有效减少手术并发症[26]。上颌窦囊肿[27]是常发生于上颌窦黏膜的囊肿, 发病率比较高。在进行侧壁开窗的同时可处理上颌窦囊肿。

3.3. Onlay 植骨技术

研究表明, 牙齿缺失后的六个月内, 牙槽骨会呈现显著的萎缩趋势, 其宽度与高度的平均吸收量分

别可达 3.8 mm 和 1.24 mm [28]。值得注意的是,若牙齿缺失源于牙周疾病或外伤,则会进一步加剧牙槽骨在垂直和水平方向上的吸收速[29]。针对复杂的II~IV型牙槽骨缺损,Onlay 植骨术被视为骨重建的金标准[30]。该技术核心是移植具备优异骨生成、骨诱导及骨引导能力的自体骨块。为解决自体骨吸收率高的问题,手术通常采用过增量策略,可有效补偿自体骨移植后不可避免的吸收过程,最终确保种植体植入时具有充足且稳定的骨量。在实际种植操作过程中,由于多重影响因素的干扰比如手术者的操作技巧、患者自身的全身情况、口腔局部情况及骨块的取材来源及骨块放置部位等多种因素的影响,导致植骨后骨块的吸收率不同,但有文献报道表明口内植骨来源的骨吸收程度要小于口外来源骨。因此,骨块移植结束后临床医生应定期复查植骨部位骨块长期吸收率问题。

自体骨取材位点最常用的为髂前上棘、颅骨、口内取骨。口内自体骨不需要口外第二术区,患者接受度高。下颌外斜线区块状取骨是临床上常用的自体骨移植术之一,此区域主要以皮质骨为主,骨密度高且骨量较为充足,在术后对患者面部外形改变较小,相关神经的并发症较少[31],这相较于髂部取骨具有一定的优势。根据下颌骨解剖特点,外斜线取骨区域前缘可达第一或第二磨牙,后缘至下颌支前缘,下缘为下颌神经管上端 2 mm,上缘为牙槽嵴顶,颊侧面为颊侧壁,舌侧面最深距离磨牙牙根颊侧 2 mm 处[32]。一项 10 年前瞻性病例系列研究表明,颞部移植植物比外斜线移植植物更显著地维持了牙槽骨增量后的骨体积。6 个月时,颞部移植植物表面吸收量为 (0.37 ± 0.53) mm,10 年时吸收量增加了 (0.22 ± 1.53) mm;外斜线处骨移植植物 6 个月时表面吸收量为 (0.22 ± 0.26) mm,10 年时为 (1.25 ± 1.98) mm,外斜线取骨吸收量更高[33]。随着生物材料的创新与临床技术的不断发展,不同的骨增量技术可与外斜线自体骨相结合,例如:引导性骨组织再生术、钛网技术(或 3D 打印个性化钛网)、帐篷顶技术等。

4. 骨增量技术的前沿进展

4.1. 异体骨与异种骨移植

同种异体骨是指源于同物种不同个体获取的骨组织,其来源通常为人类捐赠者(如遗体捐献),经深低温冷冻、辐照等技术处理,去除抗原性和活性细胞后保留的骨基质结构;但存在免疫排斥风险(虽经处理已降低)及潜在感染(如病毒传播)的可能性。脱矿冻干骨(DFDBA)即是同种异体骨。Kumar 等[34]结合 CBCT 分析 DFDBA 与异种骨分别结合浓缩生长因子(CGF)治疗牙周骨下袋的效果对比:与异种骨相比,DFDBA 是治疗双壁骨下袋缺损的更优选。

异种骨是从不同物种获取的骨组织,常见来源如牛、猪等动物骨骼,经脱蛋白、脱矿等处理去除抗原后保留的无机骨基质。目前,异种骨在临床操作实践中也日渐广泛。牛骨矿物基质(Bio-Oss)从牛骨中提取,经过特殊处理去除蛋白质等有机成分,与人体骨骼结构几乎相同[35],但 Bio-Oss 骨粉不含纤维蛋白原或生长因子,故临床上通常与自体骨按比例混合,或与 CGF 或者第三代浓缩生长因子(PRF)混合诱导成[36]。周辰[37]等采用 CGF 结合 Bio-Oss 骨粉用于治疗牙槽骨缺损大鼠的疗效,结果显示两者联合可有效改善成骨细胞凋亡及牙槽骨微观形态,并促进了 BMP2/4 表达,在组织学观察中表现出更为规则的骨小梁排列、骨密度增加和骨小梁连接性改善。王金梦[38]等在为期 12 个月的随诊周期内,对比了同种异体骨与异种骨对牙周骨下袋缺损的治疗效果,结果同种异体骨表现更为优越。

有研究证实自体牙本质基质(dentin matrix, DM)具有骨再生能力。DM 包括脱矿 DM 和脱细胞 DM,其主要依靠牙本质内 BMP-2 骨诱导作用,同时 DM 可作为 BMP-2 的良好缓释系统和载体。脱矿 DM 是一种新的可供口腔颌面部骨修复选择的材料,成分内含有胶原蛋白、生物活性蛋白及蛋白多糖,空间结构由羟基磷灰石晶体组成[39]。Gomes 等[40]将脱矿牙本质基质放入兔颅骨中,3 个月后,与未进行移植的缺损相比,骨缺损的修复速度加速并且牙本质基质完全吸收。Kim 等[41]在健康裸鼠背部皮下植入脱矿

DM, 组织学检测显示其可在软组织中独立诱导骨和软骨形成, 脱矿 DM 被视为一种较好的自体骨移植材料。但脱矿 DM 的成骨效果优于脱细胞 DM [39], 这是由于脱细胞 DM 在制备过程中将其含有的 BMP-2 脱去, 仅保留骨桥蛋白、骨连接蛋白、牙本质基质蛋白(dentin matrix protein, DMP)-1、牙本质磷酸蛋白[42]等。DMP-1 也与羟磷灰石的矿化相关, 不同形式的 DMP-1 共同调控矿化的过程。除了 DM 外, 还有一种来源于牙本质基质。Anderson 等人[43]将人前磨牙牙本质基质块分别充填到新西兰兔的胫骨骨洞和下颌骨骨洞, 三个月后观察结果: 骨替代物被吸收, 并且未观察到炎症变化的迹象, 说明异体牙本质移植植物也可作为骨诱导物并且被骨替代, 但下颌骨部位可能是由于肌肉牵拉导致移位, 说明在保证良好骨愈合环境下, 其同样可以被新生骨替代。

虽然上述几种骨替代材料获取途径相较于自体骨非常广泛, 但对机体产生的免疫反应不容小觑, 在尽可能减少与机体免疫排斥、病毒感染等因素情况下, 是仅次于自体骨的不二之选, 在临床工作中已被广泛应用, 相关操作医务人员的经验也在逐渐积累。

4.2. 生物活性材料与组织工程

成功的骨增量不仅需要支架提供物理支撑, 更需要生物信号引导细胞迁移、增殖和分化, 最终完成骨再生。生物活性材料的核心作用即是模拟或增强这一生理过程, 为骨再生提供“生物动力”。他们从单纯的“空间维持”转向主动的“生物学引导”, 显著提高了骨增量的可预测性和效率。

生长因子是一类能够调节细胞行为的蛋白质, 在骨修复中扮演着关键角色。骨形态发生蛋白(Bone Morphogenetic Proteins, BMPs)是迄今为止发现的诱导成骨能力最强的生长因子, 其中 rhBMP-2(重组人骨形态发生蛋白-2)已获得 FDA 批准用于临床。在实际临床操作中, 有实验结果表明[44]。rhBMP-2 联合 Bio-oss 骨粉适用于牙槽外科常见的骨增量手术, 如: 拔牙位点保存术、牙槽骨 GBR 水平骨增量术、上颌窦底内提升术和根尖囊肿同期植骨术等。rhBMP-2 联合胶原支架同样也展现出强大的成骨能力[45]。将负载了重组人骨形态发生蛋白 2 (rhBMP-2)的 PLGA 微粒与矿化胶原支架结合, 所构建的复合支架能实现 rhBMP-2 的生物活性持续释放, 并在体内实验中有效促进了骨组织的再生与缺损愈合[46]。相较于单一生长因子的应用, 多种生长因子组合所展现的功能化效果更为显著。通过 SDF-1 α 与 BMP-2 的协同负载[47], 该策略成功放大了低剂量 BMP-2 的骨诱导潜力。体内实验显示, 其骨再生效果可与高剂量 BMP-2 组相媲美, 同时避免了后者可能引发的不良反应。

近年来, 以干细胞为核心的再生医学为骨缺损修复提供了极具前景的新策略, 特别是骨髓间充质干细胞在骨增量中的策略及研究进展。细胞膜片技术是指在体外通过接种高密度细胞, 培养并使其叠层生长, 最终形成一张富含细胞及细胞外基质的膜状结构, 并能够完整地保留细胞膜表面及细胞间的蛋白、离子通道等[48]。目前已有将膜片技术用于牙周膜、骨缺损和软骨缺损修复的实验性研究。碱性成纤维细胞生长因子(basic fibroblast growth factor, bFGF)可诱导骨髓干细胞增殖, 加速骨形成过程[49] [50]。在碱性成纤维细胞生长因子的诱导下, 大鼠骨髓间充质干细胞膜片不仅表现出显著的成骨倾向, 其成骨分化进程的晚期还伴随有转化生长因子 β 1 表达的上调[51]。当联合使用 BMP-2 与 bFGF-2 时, 二者可产生协同作用, 不仅加速 BMSCs 膜片的扩增, 也使其成骨诱导潜能得到显著增强[52]。

4.3. 数字化技术的应用

近年来, 数字化技术的引入显著提升了种植手术的精确性和可预测性, 尤其是对于前牙美学区、骨质较为疏松、颧部或翼部种植手术, 也可将治疗计划可视化进行医患沟通。目前临床上较为常用的数字化技术包括: 数字化口内扫描技术、数字化导板、数字化导航技术等。与传统流程的种植术相比, 全数字化工作流程的临床准确性较高, 实际种植偏差较小。相较于静态的数字化导板而言, 动态导航技术可

通过实时追踪在可视化的情况下最大限度地减少种植位置与术前设计方案的偏差,这在一方面可提高经验丰富医师的精准度,另一方面也为初学种植医师缩短了学习曲线[53]。在种植手术中,骨劈开技术能缓解牙槽嵴宽度不够的情况,但此技术依赖于操作医师的经验,并且易产生皮质骨折裂等并发症。Hamzah [54]在数字化导板的指导下进行骨劈开手术,相比于自由手降低骨丢失率约 (1.38 ± 0.91) mm,伤口愈合良好,不仅减少了术中及术后的并发症,也降低了热性骨坏死的风险,避免边缘骨丢失。

4.4. 新型生物材料

在骨组织工程中,仿生支架的设计遵循着从“结构仿生”到“功能仿生”的逻辑主线。首先,在结构层面,通过先进制造技术赋予支架以纳米/微米级的纤维拓扑结构,从而模拟天然细胞外基质的物理形态,为细胞提供关键的接触引导。进而,在材料层面,主要采用明胶、壳聚糖等天然聚合物或聚乳酸(PLA)、聚己内酯(PCL)等可降解合成聚合物来构建支架;这些材料不仅构成了支撑骨架,更可通过进一步的生物活性修饰,整合识别位点与信号分子。最终,这种结构与材料的协同作用,共同营造出一个适于骨源性细胞定居与功能表达的再生微环境,从而精准地促进局部骨组织的修复与再生。有实验表明,基矿化胶原蛋白支架制备成三层木材基结构具有优异的机械强度,同时促进骨髓间充质干细胞的梯度软骨-骨分化[55]。

4.5. 微创与加速骨再生技术(超声/激光辅助、低强度脉冲超声 LIPLUS)

超声作为一种物理刺激,可以在靶区启动药物载体的释放,然而强度过大的超声也可能对周围的组织再生造成一定的不利影响。而低强度脉冲超声(low-intensity pulse ultrasound, LIPUS)作为一种安全的骨再生方法已被用于临床治疗中。LIPUS 是一种强度为 $1 \sim 100$ mW/cm²、频率超过 20kHz 的声波[56]。有研究表明,LIPUS 可促进 SDF-1 α /BMP-2/PEG-PLGA 的药物释放,同时还实现生长因子一定程度的控释,这对成骨过程分化的精确控制给予启发[57]。LIPUS 可促进镁离子内流,上调成骨相关标志物 ALP、RUNX2 表达量,从而促进成骨细胞 MC3T3-E1 矿化及钙沉积,有利于骨折、骨不连等疾病的康复[58]。

5. 讨论与未来展望

综上所述,自体骨移植长期以来被奉为骨增量手术的“金标准”,其源于自身的生物相容性、骨诱导性与骨传导性优势无可替代,但这一地位正逐渐面临争议与挑战——随着新型生物材料、组织工程技术的发展,自体骨来源有限、供区并发症(如疼痛、感觉异常、瘢痕形成)、二次创伤等固有缺陷愈发凸显,在部分中等程度骨缺损病例中,其与高性能异种骨、复合支架的临床效果已无显著差异,“金标准”是否仍需绝对化、是否应根据缺损类型进行分层选择,成为当前领域的核心争议之一。而在各类替代材料中,异种骨的应用争议尤为突出:尽管通过脱蛋白、脱细胞等处理技术,其免疫原性已大幅降低,且具备良好的骨传导结构,但远期吸收速率不均、吸收程度不可控的问题始终未能彻底解决,如何通过复合生长因子、干细胞或表面改性技术,实现异种骨吸收与新骨形成的同步匹配,仍是制约其广泛应用的关键瓶颈。

回归技术本身,各类骨增量术式仍存在明确的性能短板:引导性骨再生技术虽成熟可控、适用于多数水平向骨缺损,但其成骨量受限于屏障膜稳定性与患者自身愈合能力,对于垂直向骨缺损或严重骨量不足病例效果有限,且屏障膜暴露、感染的风险仍不可忽视;块状骨移植能提供即刻机械支撑,在严重骨缺损轮廓重建中效果显著,但除供区问题外,高达 30%~50%的远期吸收率及移植骨与受区骨的融合效率,仍是亟待优化的核心;钛网技术的三维空间维持能力极强,可实现大范围、复杂缺损的精准重建,成骨量优势突出,但软组织裂开、钛网暴露的发生率居高不下,且二次手术取出给患者带来额外创伤与

经济负担, 如何提升钛网表面生物相容性、优化软组织缝合技术以降低暴露风险, 或研发可降解、无需取出的新型支撑材料, 成为其技术升级的关键。因此, 临床决策绝非单一技术的优劣比较, 而应基于对缺损形态、生物材料特性、技术敏感性、患者愈合潜力及期望值的综合考量, 在争议中寻求个体化最优方案。

展望未来, 骨增量技术的演进将不再局限于单一技术的精进, 而是迈向多学科交叉融合的智能、个性化时代, 且必须聚焦核心科学与技术挑战逐一突破。首要攻克挑战是血管化组织工程骨的临床转化——当前组织工程骨虽在实验室层面实现了骨再生模拟, 但临床应用中因缺乏充足血供, 往往面临中心区坏死、成骨效率低下的问题, 未来需通过 3D 生物打印技术精准构建含血管通道的仿生支架, 或复合内皮祖细胞、血管内皮生长因子(VEGF)实现“骨-血管”同步再生, 才能真正实现大段骨缺损的组织工程修复; 其次, 高风险技术的并发症控制是临床转化的前提, 无论是钛网暴露、牵张成骨感染, 还是引导性骨再生的屏障膜问题, 均需通过材料改性、手术流程优化、围手术期管理升级(如精准抗感染方案、愈合监测技术)等多维度发力, 降低并发症发生率; 此外, 个性化与智能化精准治疗将成为核心发展方向: 3D 打印技术不仅需实现支架形态的精准定制, 更要结合患者 CT 数据、基因检测结果(如骨代谢相关基因多态性), 个性化调控支架孔隙率、降解速率及生长因子负载浓度, 实现“量体裁衣”式治疗; 而低强度脉冲超声、体外冲击波等生物物理刺激技术, 需进一步明确其作用机制与最佳参数, 通过与 3D 打印支架、干细胞治疗的深度融合, 实现对骨再生过程的“精准加速”, 尤其针对老年人、糖尿病患者等愈合能力欠佳的高危人群, 提升治疗成功率。

同时, 针对前述争议与瓶颈, 未来研究还需聚焦两大方向: 一是通过大样本、长期随访的随机对照实验(randomized controlled trial, RCT), 明确自体骨与各类替代材料在不同缺损类型中的分层应用标准, 为“金标准”的合理定位提供高级别证据; 二是通过材料科学与再生医学的交叉创新, 解决异种骨远期吸收不均、支架材料生物活性不足等核心问题, 研发出兼具机械支撑力、可控降解性与高效骨诱导性的下一代替代材料。这些技术突破与理念革新的深度融合, 将逐步突破现有技术天花板, 推动骨增量效果从“可预测”向“最优化、低创伤、长稳定”飞跃, 为不同类型骨缺损患者提供更安全、高效、个性化的治疗方案。

参考文献

- [1] Zhang, Y., Li, Z., Guo, H., Wang, Q., Guo, B., Jiang, X., *et al.* (2024) A Biomimetic Multifunctional Scaffold for Infectious Vertical Bone Augmentation. *Advanced Science*, **11**, Article ID: 2310292. <https://doi.org/10.1002/adv.202310292>
- [2] Zhu, G., Zhang, T., Chen, M., Yao, K., Huang, X., Zhang, B., *et al.* (2021) Bone Physiological Microenvironment and Healing Mechanism: Basis for Future Bone-Tissue Engineering Scaffolds. *Bioactive Materials*, **6**, 4110-4140. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.03.043>
- [3] 邹波, 高秋明, 黄强, 等. 大段骨缺损外科治疗方法的应用研究进展[J]. 山东医药, 2021, 61(36): 91-95.
- [4] Maevskaia, E., Ghayor, C., Bhattacharya, I., Guerrero, J. and Weber, F.E. (2024) TPMS Microarchitectures for Vertical Bone Augmentation and Osteoconduction: An *in Vivo* Study. *Materials*, **17**, Article No. 2533. <https://doi.org/10.3390/ma17112533>
- [5] Urban, I.A., Montero, E., Monje, A. and Sanz-Sánchez, I. (2019) Effectiveness of Vertical Ridge Augmentation Interventions: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Periodontology*, **46**, 319-339. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13061>
- [6] Brum, I.d.S., Frigo, L., Ribeiro da Silva, J.F., Ciambarella, B.T., Nascimento, A.L.R., Pereira, M.J.d.S., *et al.* (2024) Comparison between Nano-Hydroxyapatite/beta-Tricalcium Phosphate Composite and Autogenous Bone Graft in Bone Regeneration Applications: Biochemical Mechanisms and Morphological Analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, **26**, Article No. 52. <https://doi.org/10.3390/ijms26010052>
- [7] Li, Q., Feng, C., Cao, Q., Wang, W., Ma, Z., Wu, Y., *et al.* (2023) Strategies of Strengthening Mechanical Properties in

- the Osteoinductive Calcium Phosphate Bioceramics. *Regenerative Biomaterials*, **10**, rbad013. <https://doi.org/10.1093/rb/rbad013>
- [8] 孙华, 王榆娴, 郭萌萌, 等. 基于 CBCT 的客家人群颞部移植骨块取骨量的测量[J]. 临床口腔医学杂志, 2025, 41(3): 144-148.
- [9] Schlundt, C., Fischer, H., Bucher, C.H., Rendenbach, C., Duda, G.N. and Schmidt-Bleek, K. (2021) The Multifaceted Roles of Macrophages in Bone Regeneration: A Story of Polarization, Activation and Time. *Acta Biomaterialia*, **133**, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.04.052>
- [10] Drăgan, E. and Nemțoi, A. (2022) Review of the Long-Term Outcomes of Guided Bone Regeneration and Autologous Bone Block Augmentation for Vertical Dental Restoration of Dental Implants. *Medical Science Monitor*, **28**, e937433. <https://doi.org/10.12659/msm.937433>
- [11] 唐世杰, 石伦刚. 牙槽突裂植骨吸收的原因与对策[J]. 中国实用口腔科杂志, 2012, 5(6): 332-336.
- [12] Sbordone, C., Toti, P., Guidetti, F., Califano, L., Bufo, P. and Sbordone, L. (2013) Volume Changes of Autogenous Bone after Sinus Lifting and Grafting Procedures: A 6-Year Computerized Tomographic Follow-Up. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **41**, 235-241. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2012.09.007>
- [13] 孙亮, 梁艺馨, 曲哲. 复杂骨增量技术在牙槽嵴重度骨缺损重建中的应用策略[J]. 中国实用口腔科杂志, 2025, 18(4): 398-406.
- [14] Li, S., Zhao, J., Xie, Y., Tian, T., Zhang, T. and Cai, X. (2021) Hard Tissue Stability after Guided Bone Regeneration: A Comparison between Digital Titanium Mesh and Resorbable Membrane. *International Journal of Oral Science*, **13**, Article No. 37. <https://doi.org/10.1038/s41368-021-00143-3>
- [15] Ovcharenko, N., Greenwell, H., Katwal, D., Patel, A., Hill, M., Shumway, B., et al. (2020) A Comparison of the Effect of Barrier Membranes on Clinical and Histologic Hard and Soft Tissue Healing with Ridge Preservation. *The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, **40**, 365-371. <https://doi.org/10.11607/prd.4120>
- [16] 周延民, 刘修玉, 陈思宇. 香肠技术骨增量应用现状[J]. 口腔疾病防治, 2025, 33(4): 260-267.
- [17] Her, S., Kang, T. and Fien, M.J. (2012) Titanium Mesh as an Alternative to a Membrane for Ridge Augmentation. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, **70**, 803-810. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2011.11.017>
- [18] Urban, I.A., Nagursky, H. and Lozada, J.L. (2011) Horizontal Ridge Augmentation with a Resorbable Membrane and Particulated Autogenous Bone with or without Anorganic Bovine Bone-Derived Mineral: A Prospective Case Series in 22 Patients. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **26**, 404-414.
- [19] Yeung, S. (2008) Biological Basis for Soft Tissue Management in Implant Dentistry. *Australian Dental Journal*, **53**, S39-S42. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2008.00040.x>
- [20] Sumida, T., Otawa, N., Kamata, Y., Kamakura, S., Mtsushita, T., Kitagaki, H., et al. (2015) Custom-Made Titanium Devices as Membranes for Bone Augmentation in Implant Treatment: Clinical Application and the Comparison with Conventional Titanium Mesh. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **43**, 2183-2188. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2015.10.020>
- [21] Lizio, G., Corinaldesi, G. and Marchetti, C. (2014) Alveolar Ridge Reconstruction with Titanium Mesh: A Three-Dimensional Evaluation of Factors Affecting Bone Augmentation. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **29**, 1354-1363. <https://doi.org/10.11607/jomi.3417>
- [22] Corinaldesi, G., Pieri, F., Marchetti, C., Fini, M., Aldini, N.N. and Giardino, R. (2007) Histologic and Histomorphometric Evaluation of Alveolar Ridge Augmentation Using Bone Grafts and Titanium Micromesh in Humans. *Journal of Periodontology*, **78**, 1477-1484. <https://doi.org/10.1902/jop.2007.070001>
- [23] Ciocca, L., Fantini, M., De Crescenzo, F., Corinaldesi, G. and Scotti, R. (2011) Direct Metal Laser Sintering (DMLS) of a Customized Titanium Mesh for Prosthetically Guided Bone Regeneration of Atrophic Maxillary Arches. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **49**, 1347-1352. <https://doi.org/10.1007/s11517-011-0813-4>
- [24] 艾克丽亚·艾尼瓦尔, 娜菲莎·吾普尔, 白布加甫·叶力思, 等. 上颌窦内提升不植骨与植骨即刻负重的动态应力分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(30): 6416-6425.
- [25] 罗宝, 黄咏瑜, 刘伟, 等. 上颌窦内提升术同期种植内提 3 mm 以内植入骨粉与不植入骨粉的研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2022, 38(10): 614-617.
- [26] Osman, A.H., Mansour, H., Atef, M. and Hakam, M. (2017) Computer Guided Sinus Floor Elevation through Lateral Window Approach with Simultaneous Implant Placement. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **20**, 137-143. <https://doi.org/10.1111/cid.12559>
- [27] Ata-Ali, J., Diago-Vilata, J.V., Melo, M., et al. (2017) What Is the Frequency of Anatomical Variations and Pathological Findings in Maxillary Sinuses among Patients Subjected to Maxillofacial Cone Beam Computed Tomography? A Systematic Review. *Medicina Oral, Patologia Oral, Cirugia Bucal*, **22**, e400-e409.

- [28] Atieh, M.A., Alsabeeha, N.H., Payne, A.G., Ali, S., Faggion, C.M.J. and Esposito, M. (2021) Interventions for Replacing Missing Teeth: Alveolar Ridge Preservation Techniques for Dental Implant Site Development. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, **2021**, CD010176. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd010176.pub3>
- [29] 夏婷婷, 汪涌. 重度牙周炎后牙位点保存术中联合应用浓缩生长因子的疗效评价[J]. 上海口腔医学, 2023, 32(6): 650-655.
- [30] Urban, I.A., Nagursky, H., Lozada, J.L. and Nagy, K. (2013) Horizontal Ridge Augmentation with a Collagen Membrane and a Combination of Particulated Autogenous Bone and Anorganic Bovine Bone-Derived Mineral: A Prospective Case Series in 25 Patients. *The International Journal of Periodontics and Restorative Dentistry*, **33**, 299-307. <https://doi.org/10.11607/prd.1407>
- [31] Pang, K., Shin, Y., Park, J., Kim, B., Kim, S. and Lee, J. (2021) Long-Term Outcomes of Implants Placed in Autogenous Onlay Bone Grafts Harvested from Mandibular Ramus and Risk Analysis. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **36**, 745-754. <https://doi.org/10.11607/jomi.8602>
- [32] 史远, 杨国利. 外斜线取骨自体骨移植及其他牙槽嵴骨增量法的研究进展[J]. 口腔医学, 2021, 41(6): 557-560+571.
- [33] Chappuis, V., Cavusoglu, Y., Buser, D. and von Arx, T. (2016) Lateral Ridge Augmentation Using Autogenous Block Grafts and Guided Bone Regeneration: A 10-Year Prospective Case Series Study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **19**, 85-96. <https://doi.org/10.1111/cid.12438>
- [34] Kumar, V., Dixit, J., Lal, N., Verma, U., Debnath, P. and Pathak, A. (2017) Dentascan an Excellent Tool for Assessment of Variations in the Management of Periodontal Defects. *National Journal of Maxillofacial Surgery*, **8**, 136-142. https://doi.org/10.4103/njms.njms_63_16
- [35] Zhuang, G., Mao, J., Yang, G. and Wang, H. (2021) Influence of Different Incision Designs on Bone Increment of Guided Bone Regeneration (Bio-Gide Collagen Membrane + Bio-Oss Bone Powder) during the Same Period of Maxillary Anterior Tooth Implantation. *Bioengineered*, **12**, 2155-2163. <https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1932209>
- [36] 赵弼洲, 罗海霞, 党晓兵, 等. 3D 打印个性化钛网的 GBR 术及 PRF/Bio-Oss 复合物修复牙槽骨缺损的应用[J]. 重庆医科大学学报, 2025, 50(12): 1729-1736.
- [37] 周辰, 李哲, 尹婷, 等. CGF 复合 Bio-Oss 骨粉对牙槽骨缺损大鼠成骨细胞凋亡、牙槽骨微观形态及 BMP2/4 的影响[J]. 临床口腔医学杂志, 2024, 40(12): 716-721.
- [38] 王金孟, 杨智宇, 雷浪, 等. 同种异体骨与异种骨对牙周骨下袋缺损再生治疗的疗效对比[J]. 遵义医科大学学报, 2024, 47(2): 152-158.
- [39] 达尔亚·俄尼木拜, 张迪, 古丽努尔·阿吾提. 脱矿牙本质基质和脱细胞牙本质基质成骨效果的对比研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2024, 42(1): 28-36.
- [40] Gomes, M.F., da Silva dos Anjos, M.J., de Oliveira Nogueira, T., et al. (2002) Autogenous Demineralized Dentin Matrix for Tissue Engineering Applications: Radiographic and Histomorphometric Studies. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, **17**, 488-497.
- [41] Kim, K. (2014) Bone Induction by Demineralized Dentin Matrix in Nude Mouse Muscles. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*, **36**, 50-56. <https://doi.org/10.14402/jkampr.2014.36.2.50>
- [42] 朱甜, 郭维华. 牙本质基质在组织再生中的应用[J]. 华西口腔医学杂志, 2019, 37(1): 92-96.
- [43] Andersson, L., Ramzi, A. and Joseph, B. (2009) Studies on Dentin Grafts to Bone Defects in Rabbit Tibia and Mandible; Development of an Experimental Model. *Dental Traumatology*, **25**, 78-83. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.2008.00703.x>
- [44] 王琛琦. rhBMP-2 联合骨粉在牙槽骨植骨术中的临床应用效果评价[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连医科大学, 2022.
- [45] Chao, Y., Wang, T., Chang, H. and Lin, L. (2021) Effects of Low-Dose rhBMP-2 on Peri-Implant Ridge Augmentation in a Canine Model. *Journal of Clinical Periodontology*, **48**, 734-744. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13440>
- [46] Quinlan, E., López-Noriega, A., Thompson, E., Kelly, H.M., Cryan, S.A. and O'Brien, F.J. (2015) Development of Collagen-Hydroxyapatite Scaffolds Incorporating PLGA and Alginate Microparticles for the Controlled Delivery of rhBMP-2 for Bone Tissue Engineering. *Journal of Controlled Release*, **198**, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.11.021>
- [47] Zwingenberger, S., Langanke, R., Vater, C., Lee, G., Niederlohm, E., Sensenschmidt, M., et al. (2016) The Effect of Sdf-1 α on Low Dose BMP-2 Mediated Bone Regeneration by Release from Heparinized Mineralized Collagen Type I Matrix Scaffolds in a Murine Critical Size Bone Defect Model. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, **104**, 2126-2134. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35744>
- [48] 闫钧. anti-miR-138 修饰的 rBMSCs 膜片的构建及其与种植体复合后的体内外生物学研究[D]: [博士学位论文].

- 西安: 第四军医大学, 2014.
- [49] Lim, J. and Park, E.K. (2016) Effect of Fibroblast Growth Factor-2 and Retinoic Acid on Lineage Commitment of Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, **13**, 47-56. <https://doi.org/10.1007/s13770-016-9102-0>
- [50] D'Mello, S., Elangovan, S. and Salem, A.K. (2015) FGF2 Gene Activated Matrices Promote Proliferation of Bone Marrow Stromal Cells. *Archives of Oral Biology*, **60**, 1742-1749. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2015.09.005>
- [51] 周琦琪, 韩祥祯, 张文静, 等. 碱性成纤维细胞生长因子诱导大鼠骨髓间充质干细胞膜片及成血管分化[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(1): 1-5.
- [52] 张文静, 王佳, 田梦婷, 等. 骨形态发生蛋白 2 及碱性成纤维生长因子 2 对大鼠骨髓间充质干细胞膜片增殖和成骨分化的影响[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(1): 65.
- [53] Jorba-Garcia, A., Figueiredo, R., Gonzalez-Barnadas, A., Camps-Font, O. and Valmaseda-Castellon, E. (2018) Accuracy and the Role of Experience in Dynamic Computer Guided Dental Implant Surgery: An *In-Vitro* Study. *Medicina Oral Patología Oral y Cirugía Bucal*, **24**, e76. <https://doi.org/10.4317/medoral.22785>
- [54] Hamzah, B., Mounir, R., Ali, S. and Mounir, M. (2021) Maxillary Horizontal Alveolar Ridge Augmentation Using Computer Guided Ridge Splitting with Simultaneous Implant Placement versus Conventional Technique: A Randomized Clinical Trial. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, **23**, 555-561. <https://doi.org/10.1111/cid.13015>
- [55] 王莉莉. 胶原蛋白仿生支架材料的制备及其在骨和软骨组织再生中的应用[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [56] Salem, K.H. and Schmelz, A. (2014) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Shortens the Treatment Time in Tibial Distraction Osteogenesis. *International Orthopaedics*, **38**, 1477-1482. <https://doi.org/10.1007/s00264-013-2254-1>
- [57] 晏殊瑾, 杨珂, 王河, 等. 低强度脉冲超声靶向纳米粒控释 SDF-1 及 BMP-2 调节 hPDLcs 迁移和成骨分化[J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(2): 222-226.
- [58] 易雪婷, 张俊. 低强度脉冲超声促进 MC3T3-E1 成骨分化的机制研究[J]. 生物医学工程与临床, 2021, 25(6): 663-668.