

长骨恶性肿瘤切除后重建方式的研究进展

陈致远¹, 艾希林², 张茂林², 余冬梅^{2*}

¹西安医学院研究生工作部, 陕西 西安

²空军军医大学第二附属医院骨科, 陕西 西安

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月5日; 发布日期: 2025年12月11日

摘要

在新辅助化疗、放疗及影像学技术不断进步的背景下, 四肢长骨恶性肿瘤保肢治疗已取得显著成效, 在病人条件许可的情况下, 保肢手术与截肢手术的5年生存率无区别。长骨恶性肿瘤切除后残留的大段骨缺损(长度 > 5 cm)难以自行修复, 需要进行人工重建, 当前重建方法可大致分为生物重建与机械重建两大类。3D打印假体作为机械重建方式之一, 可实现高精度适配与瞬时稳定, 具备骨长入能力的多孔设计, 同步实现生物学整合与力学支撑, 但临床实践案例相对匮乏。生物医用材料, 融合新型生物材料的创新修复技术, 针对骨缺损的治疗展现出突出的临床潜力。Masquelet与Ilizarov技术展现出突出的临床潜力。该文概括了现阶段长骨肿瘤切除后重建方法的研究现状, 汇总了3D打印假体与新材料的应用, 剖析了各项技术的强项与短板, 同时展望了研究方向。长骨恶性肿瘤切除后大段骨缺损重建方式多种多样, 每种方式都有其优缺点, 重建方式的选择主要依赖医师的经验, 本文就分析各种重建方式, 以期临床提供参考。

关键词

骨肿瘤, 骨缺损重建, 3D打印假体, 同种异体骨, 自体腓骨

Research Progress on Reconstruction Methods after Resection of Malignant Tumors of Long Bones

Zhiyuan Chen¹, Xilin Ai², Maolin Zhang², Dongmei Yu^{2*}

¹Office of Graduate Student Affairs, Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Department of Orthopedics, Tangdu Hospital, Air Force Medical University, Xi'an Shaanxi

Received: November 11, 2025; accepted: December 5, 2025; published: December 11, 2025

*通讯作者。

文章引用: 陈致远, 艾希林, 张茂林, 余冬梅. 长骨恶性肿瘤切除后重建方式的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(12): 1617-1623. DOI: 10.12677/acm.2025.15123572

Abstract

Amid ongoing advancements in neoadjuvant chemotherapy, radiotherapy, and imaging techniques, limb salvage treatment for malignant tumors of the long bones has yielded significant outcomes. When patient conditions allow, the 5-year survival rates for limb salvage surgery and amputation surgery are comparable. Large bone defects (length > 5 cm) that persist following the resection of malignant long bone tumors are challenging to repair autonomously and necessitate artificial reconstruction. Presently, reconstruction methods can be broadly categorized into two primary types: biological reconstruction and mechanical reconstruction. 3D printed prostheses represent a notable mechanical reconstruction method that offers high-precision adaptation and immediate stability. These prostheses feature a porous design conducive to bone growth and facilitate both biological integration and mechanical support. Despite their advantages, clinical applications remain limited. Innovative repair technologies that incorporate new biomaterials have shown significant clinical promise in addressing bone defects. The Masquelet and Ilizarov techniques also exhibit considerable potential in clinical settings. This article reviews the current state of research on post-resection reconstruction methods for long bone tumors, compiles the applications of 3D printed prostheses and novel materials, and analyzes the strengths and weaknesses of each technology while anticipating future research directions. Various methods exist for reconstructing large bone defects following the resection of malignant long bone tumors, each presenting distinct advantages and disadvantages. The selection of a reconstruction method primarily relies on the physician's experience. This article aims to analyze these reconstruction methods to serve as a reference for clinical practice.

Keywords

Bone Tumor, Bone Defect Reconstruction, 3D Printed Prosthesis, Allograft, Fibula

Copyright © 2025 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. 生物重建技术

生物重建方式主要包含：自体血管化腓骨移植、同种异体骨移植或复合骨移植方案，突出优势为拥有良好的骨传导及骨诱导性，其缺陷表现为初期并发症发生率较高，包括：免疫排斥反应、骨不连、骨折、感染等。

(一) 自体血管化腓骨移植术

自体血管化腓骨移植术(VFG)是指将患者自身的腓骨连同营养血管一起移植到骨缺损部位。此种方式兼具取材便利与抗感染的天然特性，具有理想的生物相容性与愈合潜能。自体血管化腓骨可提供极佳的骨传导和骨诱导性，且没有病毒传播的风险，其在连接长骨缺损时表现出更强的骨整合能力，超过 90% 的患者骨愈合良好，尤其适合修复 10 厘米以上的骨缺损，在青年患者骨修复中表现尤为显著[1] [2]。张聘等[3]基于 13 例病例数据研究了自体血管化腓骨移植(VFG)的临床效果，结果显示大部分患者功能恢复良好；在 Pietro Feltri 等[4]的分析中，110 篇文献 2226 例样本被纳入，四肢骨肿瘤切除术后采用带血管腓骨移植，分析得出 80.1% 的愈合率。以上数据说明血管化腓骨移植术(VFG)有极佳的愈合潜能。但这种技术会导致供区损伤；此外在骨重塑过程中机械性能强度不足，易导致骨折[4]，为了解决机械强度不足这个问题，自体血管化腓骨移植多用于上肢非承重骨缺损；或用于下肢承重部位骨缺损时，与同种异体骨

合用形成复合骨。

(二) 大块同种异体骨移植术

大块同种异体骨移植术是指将来自捐献者的骨组织在无菌条件下取骨、去除软组织和骨髓、灭菌和保存后移植到患者体内，用以修复骨缺损部位或提供结构支撑的临床外科技术。以同种异体骨为材料进行长骨干缺损重建，远期骨愈合后可达成永久性重建，术后早期即实现结构性支撑效果，所以传统观点将其列为移植首选方法[5]。郑小飞[6]指出，在以往的研究中，大块异体骨移植的存活率为 60%~89%，其回顾性分析 78 例骨肿瘤切除后大段骨缺损采用同种异体骨重建患者，随访 2 年行功能评分优 36 例，良 29 例，中 4 例，差 9 例，优良率 83%；骨不连的发生率为 6.4%。Liu 等[7]回顾分析了 38 例采用大段同种异体骨重建骨干恶性骨肿瘤切除后骨缺损病例，发现同种异体骨总存活率为 81.6%，MSTS 评分为 27 分，较术前功能明显改善。相较于带血管自体腓骨移植(VFG)大块同种异体骨最突出的优势为足够的机械强度。其不足为术后并发症发病率较高，如：骨不连、免疫排斥反应、感染等[6]；且来源受限，有疾病传播风险。考虑到来源受限，结合目前材料学、机械加工的发展，医师们越来越偏向假体重建方式。

(三) 复合骨移植术

复合骨，即 VFG 与异体骨联合修复的技术。由 Capanna 于 1993 提出，此方案融合了大段同种异体骨与 VFG 的双重优势，复合重建结构的机械稳定性源自异体骨支撑，VFG 显著提高了骨修复的生物活性能力，加速骨骼愈合，明显降低了重建相关的并发症[2]。朱皓东等[2]回顾分析了 18 名骨肿瘤切除后采用复合骨移植的患者，平均随访 46.5 个月，MSTS 评分 26.4 分，1 名出现术后感染，2 名出现骨不连。Sammy Othman 等[8]通过 25 篇研究样本分析指出：VFG 组的骨不愈合率(13%)明显低于单纯同种异体移植组(21.4%)，感染发生率(7.9% VS 9%)和骨折发生率(19.6% VS 19.1%)，MSTS 评分(26.5 分 VS 26.4 分)。从以上数据可以看出，复合骨相较于单纯同种异体骨可以显著降低并发症的发病率，尤其是针对骨不连；相较于单纯血管化腓骨移植有效降低了骨折的发病率。但其技术难度极高，手术复杂；同样受同种异体骨来源限制，为了解决来源有限这个问题，近年来发明了“金属热狗”技术，即将自体腓骨与机械制造外壳相结合，形成类“复合骨”，这种方式的好处是从根本上解决了同种异体骨来源不足问题，且拥有“自体血管化腓骨”良好的成骨能力。但金属外壳也有它的缺陷，如可能导致松动、感染、断裂等。近年热门研究的生物可降解材料很好地解决了这个问题：既有金属假体良好的机械性能，又可以在新骨长好之后降解，从根本上避免了假体相关并发症。

2. 机械重建技术

机械重建主要为组配式假体重建，随着材料学及制造工艺的发展，3D 打印假体因同时具备机械重建和生物重建的双重优势备受关注。机械假体重建术后提供稳定的力学支撑，假体与骨骼通过螺钉、骨水泥固定，能够早期承受体重和活动负荷。不足为假体相关远期并发症较多，如：假体松动、断裂、假体周围骨折及感染。

(一) 组配式假体重建

组配式假体是指一种由多个独立的、可互换的部件组装而成的假体系统。采用模块化设计，术中根据截骨长度快速组装，术后初期即可维持机械稳定，支持术后早期下床活动及功能锻炼，该型假体翻修时仅需对损坏部件进行替换，且能借助部件更替完成假体延长，缓解肢体短缩现象，调整空间较大[9]。陈飏等[9]回顾性分析 38 例采用组配式假体重建的骨肿瘤患者，随访 11~37 个月，无并发症发生：如假体松动、假体周围骨折、假体周围感染；肢体功能优 28 例、良 7 例、可 3 例、MSTS 评分：25 分。Arne streitb 等[10]对 28 例行组配假体重建术的病例开展回顾性研究，统计发现 72.7%的病例实现肢体存活，并发症中假体松动 8 例，感染 3 例，假体周围骨折 1 例。以上证明了组配式假体的有效性，但传统组配

式假体和骨的连接界面无法有效骨整合；因此人们注意到了 3D 打印假体，因其表面多孔结构允许骨长入，可以大大提高骨整合能力。

(二) 3D 打印假体重建

3D 打印也称为增材制造，是一种通过逐层堆叠材料来构建三维实体的数字化制造技术，其核心原理是将数字模型分割成薄层切片，然后通过设备逐层堆积材料(如金属、陶瓷、塑料等)，最终形成实体对象。该技术制造出的假体表面多孔结构允许骨小梁长入，使假体拥有生物重建的优秀骨整合能力[11]。以最常用钛合金为例，表明了 3D 打印假体的最优空隙参量，研究表明 300~600 μm 的直径、60%~80% 的孔隙率是理想的[12]。Wang 等[13]研究显示对钛合金打印支架的孔径 500 μm 、孔隙率 70% 的材料弹性模量接近正常骨，可以有效避免应力遮挡。3D 打印假体另一个特点为个性化，可以做到肿瘤模型个体化、肿瘤假体个体化、导航模版个体化[14]。Luenam [15]等报道 1 例因肱骨远端大节段骨缺损采用 3D 打印假体重建，术后 2 年的随访结果显示患侧肘关节屈伸范围达 -15° 至 150° ，握持力为健侧的 105.7%，未观察到假体相关不良事件，影像学结果展现了良好的骨整合及功能恢复能力。Raffaele Vitiello 等[16]回顾性研究了 8 名骨肿瘤病例，8 例患者均实现满意的功能恢复，2 例在术后 1 月发生浅表切口裂开。牛晓辉等[17]表明，采用 3D 打印技术可针对患者个体差异定制专属假体，由此提高手术质量。郭卫等[18]指出，针对大范围骨与关节缺损，3D 打印金属假体展现出优越的解剖匹配和骨整合效能，可显著提升患者肢体功能水平。根据刘伟建等[19]的研究显示，采用 3D 打印的关节保留术在功能恢复上展现明显优势，且术后不良事件发生率不高。以上说明 3D 打印假体具有良好的骨整合能力和机械强度，满意的肢体功能恢复及较低的并发症发病率。但 3D 打印假体成本高昂、技术门槛高、且尚无大量证据证明其效果。

目前常用的 3D 打印假体材料为钛合金，生物惰性金属，使得新生骨与假体之间连接方式为机械锁和，不具有生物活性，这就使得结合不是十分紧密；此外假体不能降解，长时间会导致假体相关并发症。为了解决上述问题，我们注意到了最新研究的生物可降解材料：生物可降解金属材料被设计成在体内腐蚀，以受控的方式释放腐蚀副产物，以引起所需的生物反应。在完成其在组织修复中的作用后，这些材料预计将完全溶解，从根本上避免了与永久性植入物相关的并发症[20][21]。镁(Mg)及其合金为目前研究及应用最多的材料，因为其力学性能与天然骨相似，可以很好地避免传统惰性材料如钛合金导致的应力遮挡[22]；同时 Mg 溶解后产生的 Mg^{2+} 吸引了羟基磷灰石在金属表面沉积，使得表面具有良好的骨传导性，有利于界面整合，过多的 Mg^{2+} 则通过尿液排出人体。Li 等人[23]研究表明，镁合金具有良好的成骨性。另有研究指出镁合金具有抗肿瘤性，使其特别适合作为骨肿瘤切除后重建的材料，可以预防肿瘤的复发及转移[24]。其机制为在降解过程中产生的 H_2 损伤癌细胞[25]。此外， Zn^{2+} 可以诱导细胞周期改变和肿瘤细胞凋亡，Mg-Ca-Sr-Zn 合金已被证实是一种良好的抗肿瘤材料[26]-[28]。要成为合格的骨缺损移植材料，除了与骨组织相似的力学性能，其降解速率还要与骨组织的再生率相匹配。骨重塑期至少为 3 月，因此植入物在 3 月内必须保证足够的机械强度，然而大多数研究指出，镁及其合金植入人体后迅速降解，无法满足临床要求[29]。合金化是改善其高腐蚀性的一个重要方法，研究发现 Mg-5Zn 合金在林格溶液中形成更均匀和稳定的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 保护腐蚀产物层，显著提高了耐腐蚀性[30]。表面改性是另一种很有效的方法，如 HA 涂层不仅可以隔绝腐蚀物质有效降低降解速率，还可以增加骨整合效率。因此，将 3D 打印技术与生物可降解金属相结合可以制造出更复合临床需求的假体。

3. Masquelet 技术

Masquelet 技术，又称膜诱导技术，由法国学者 Masquelet 于 2000 年首次提出。过程分为两步：1) 彻底清创后再将 PMMA 骨水泥填充于骨缺损部位诱导生物活性膜形成；2) 等待诱导膜形成并感染控制后，一般为 6~8 周，切开生物活性膜取出骨水泥进行植骨。临床中在骨水泥里常加入万古霉素等抗生素，可

以有效抗感染。诱导膜至关重要,与骨膜相似富含血管,并且可以分泌 BMP、VEGF、TGF- β 1、Cbf α 1 等多种生长因子共同作用促进成骨和血管生长[31][32]。为评价 Masquelet 技术治疗骨肿瘤大段骨缺损的临床疗效,范金柱等[33]回顾分析了 20 例合并干骺端骨缺损的股骨远端病例,随访时间 12~36 个月,病例均达到了骨愈合,愈合时间 7~10 个月。马炬雷等[34]指出 Masquelet 技术加速了骨缺损愈合,效果良好,尤其适合大段骨缺损(缺损 > 5 cm)。目前已经开发出了 Masquelet 技术的替代材料,McBride-Gagyi 等[35]研究发现,钛诱导产生的生物膜与 PMMA 骨水泥诱导产生的生物膜相似度极高。Verboket 等[36]实验发现人脱细胞真皮与 PMMA 骨水泥诱导的生物膜愈合效果相当。Masquelet 技术特别适用于大段骨缺损,甚至超过 10 cm 的缺损;其诱导膜可以提供良好的生物学环境;另外骨水泥中加入抗生素后,抗感染能力极强。但缺点也很明显,需进行 2 次手术,治疗周期长(6~12 个月);愈合速度慢。

4. Ilizarov 技术

Ilizarov 技术,又称骨搬运技术,是苏联医生 Gavriil Abramovich Ilizarov 于 20 世纪 50 年代提出的骨延长和骨缺损修复方法,其核心原理是张力-应力法则,即通过缓慢、稳定的牵张刺激骨与软组织再生。在临床中通过截断病灶远端或近端的骨质,使用外固定器固定并缓慢持续稳定向缺损端牵张截骨断端(牵张期每日 4 次牵拉,每次 0.25 mm,总量 0.5~1 mm/天,持续 1 月余),刺激新骨和软组织生长[37]。在牵张成骨过程中,还可通过外固定器同期逐步矫正畸形问题,目前固定器的选择严重依赖医师个人经验,尚无统一标准。叶琪毅等[38]回顾性分析 32 例胫骨大段骨合并软组织缺损患者,随机分成两组,每组 16 例。A 组采用 Ilizarov 技术联合 VSD、皮瓣修复治疗;B 组清创术后直接采取 Ilizarov 技术治疗。术后随访 18~36 个月,结果骨愈合时间:A 组平均为 8.6 个月,B 组为 11.7 个月;B 组出现并发症的例数明显多于 A 组,尤其在钉道感染及疼痛这两方面上;A 组愈合优良率为 93.75%,明显高于 B 组的 81.25%;A 组患肢功能恢复优良率为 87.50%,明显高于 B 组的 81.25%。得出结论:Ilizarov 技术治疗大段骨合并软组织缺损是一种理想方法,同时重视创面修复,能取得更显著的临床效果。Ilizarov 技术的优势为不受骨缺损长度的限制;适用于复杂骨缺损,能够保持或部分恢复肢体功能,减少肌肉萎缩;而且可同时矫正复杂畸形;但长期佩戴固定架使得并发症发病率高,如:针道感染、关节僵硬、轴向偏移、再生骨矿化不良;长期牵拉疼痛也使得患者心理负担大。

5. 总结与展望

骨肿瘤切除后重建方式多种多样:自体血管化腓骨具有极佳的愈合潜能,且没有免疫排斥等风险;受限于机械强度不足,无法单独用于承重部位,将其与大块同种异体骨复合或金属外壳复合是个优秀的解决方案。但生物重建的重要缺陷就是来源受限,无法大规模临床应用,因此,随着材料学、机械加工工艺的发展,目前假体重建方式越来越受欢迎。组配式假体在术中灵活,可调整程度高,但与骨组织结合不够牢固,因此人们注意到了 3D 打印技术,因其制造出的假体表面具有多孔结构允许骨长入,从而相较传统组配式假体大大增加了界面的稳定性。但受限于材料本身,目前常用为生物惰性金属钛合金,其在人体无法吸收,可能发生假体相关并发症,如:松动、断裂、假体周围感染。为了从根本上解决这个问题,我们注意到了目前热门的生物可降解材料,镁基金属是研究最多的,其在合金化后可以较好地满足临床需求,既提供了良好的机械性可以用于承重部分,又在新骨完成改造重塑后被人体吸收,从根本上避免了假体相关并发症的发生。Masquelet 及 Ilizarov 技术特别适合超大段骨缺损,但治疗周期过长,给患者身心均增加负担。相信将 3D 打印技术与新材料相结合可以制造出更优秀的假体。

参考文献

- [1] Brown, K.L.B. (1991) Limb Reconstruction with Vascularized Fibular Grafts after Bone Tumor Resection. *Clinical*

- Orthopaedics and Related Research*, **262**, 64-73. <https://doi.org/10.1097/00003086-199101000-00009>
- [2] 朱皓东. 生物复合重建用于肢体肿瘤性大段骨缺损的对比研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 中国人民解放军空军军医大学, 2020.
 - [3] 张聘, 樊根涛, 周幸, 等. 自体腓骨移植重建骨肿瘤患者的骨缺损[J]. 中国骨与关节杂志, 2019, 8(9): 651-655.
 - [4] Feltri, P., Solaro, L., Errani, C., Schiavon, G., Candrian, C. and Filardo, G. (2021) Vascularized Fibular Grafts for the Treatment of Long Bone Defects: Pros and Cons. A Systematic Review and Meta-Analysis. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **143**, 29-48. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-03962-5>
 - [5] 张翼, 张岩, 李甲振, 等. 同种异体骨移植重建四肢恶性骨肿瘤切除后骨缺损[J]. 中国矫形外科杂志, 2019, 27(3): 225-229.
 - [6] 郑小飞, 黄华扬, 丁焕文, 等. 大块同种异体骨移植重建骨肿瘤巨大骨缺损 78 例[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(15): 2978-2983.
 - [7] Liu, Q., Long, F., Zhang, C., Liu, Y., He, H. and Luo, W. (2023) Biological Reconstruction of Bone Defect after Resection of Malignant Bone Tumor by Allograft: A Single-Center Retrospective Cohort Study. *World Journal of Surgical Oncology*, **21**, Article No. 234. <https://doi.org/10.1186/s12957-023-03121-7>
 - [8] Othman, S., Bricker, J.T., Azoury, S.C., Elfanagely, O., Weber, K.L. and Kovach, S.J. (2020) Allograft Alone Vs. Allograft with Intramedullary Vascularized Fibular Graft for Lower Extremity Bone Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, **73**, 1221-1231. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2020.02.030>
 - [9] 陈飏, 杨松巍, 单东力, 等. 组配型假体置换治疗肢体骨肿瘤[J]. 临床骨科杂志, 2019, 22(5): 566-569.
 - [10] Streithürger, A., Harges, J., Nottrott, M. and Guder, W.K. (2020) Reconstruction Survival of Segmental Megaendoprostheses: A Retrospective Analysis of 28 Patients Treated for Intercalary Bone Defects after Musculoskeletal Tumor Resections. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **142**, 41-56. <https://doi.org/10.1007/s00402-020-03583-4>
 - [11] 戚金凤, 张成. 骨肿瘤切除术后骨缺损重建研究进展[J]. 实用骨科杂志, 2022, 28(7): 628-632.
 - [12] Frosch, K., Barvencik, F., Lohmann, C.H., Viereck, V., Siggelkow, H., Breme, J., et al. (2002) Migration, Matrix Production and Lamellar Bone Formation of Human Osteoblast-Like Cells in Porous Titanium Implants. *Cells Tissues Organs*, **170**, 214-227. <https://doi.org/10.1159/000047925>
 - [13] Wang, H., Su, K., Su, L., Liang, P., Ji, P. and Wang, C. (2019) Comparison of 3D-Printed Porous Tantalum and Titanium Scaffolds on Osteointegration and Osteogenesis. *Materials Science and Engineering: C*, **104**, Article ID: 109908. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109908>
 - [14] 谭海涛, 陈国平, 张其标. 3D 打印技术在骨肿瘤手术应用中的研究进展[J]. 中国癌症防治杂志, 2020, 12(3): 356-360.
 - [15] Luenam, S., Kosiyatrakul, A., Phakdeewisetkul, K. and Puncreobutr, C. (2020) The Patient-Specific Implant Created with 3D Printing Technology in Treatment of a Severe Open Distal Humerus Fracture with Complete Loss of the Lateral Column. *Journal of Orthopaedic Surgery*, **28**. <https://doi.org/10.1177/2309499020960251>
 - [16] Vitiello, R., Matrangolo, M.R., El Motassime, A., Perna, A., Cianni, L., Maccauro, G., et al. (2022) Three-dimension-printed Custom-Made Prosthetic Reconstructions in Bone Tumors: A Single Center Experience. *Current Oncology*, **29**, 4566-4577. <https://doi.org/10.3390/curroncol29070361>
 - [17] 牛晓辉, 金韬, 徐海荣. 3D 打印技术在肢体骨肿瘤切除重建中的应用[J]. 中国修复重建外科杂志, 2022, 36(7): 790-795.
 - [18] 郭卫, 余艳春, 梁海杰. 3D 打印金属假体重建四肢骨肿瘤切除后大段骨关节缺损: 大段骨缺损修复重建的新纪元[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2022, 15(12): 881-888.
 - [19] Liu, W., Shao, Z., Rai, S., Hu, B., Wu, Q., Hu, H., et al. (2020) Three-Dimensional-Printed Intercalary Prosthesis for the Reconstruction of Large Bone Defect after Joint-Preserving Tumor Resection. *Journal of Surgical Oncology*, **121**, 570-577. <https://doi.org/10.1002/jso.25826>
 - [20] Li, H., Zheng, Y. and Qin, L. (2014) Progress of Biodegradable Metals. *Progress in Natural Science: Materials International*, **24**, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.08.014>
 - [21] Kandasamy, J., Arulvel, S., Jeyapandiarajan, P., Murugan, M. and Prayer Riju, R. (2025) Recent Trends and Future Prospects in Metallic Implants for Biomedical Applications. In: Khan M., A., Singh, G. and Sulaiman, S., Eds., *Challenges and Innovations in 3D Printed Bio-Organs and Their Materials*, Springer, 223-253. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90807-1_8
 - [22] Liu, C., Ren, Z., Xu, Y., Pang, S., Zhao, X. and Zhao, Y. (2018) Biodegradable Magnesium Alloys Developed as Bone

- Repair Materials: A Review. *Scanning*, **2018**, Article ID: 9216314. <https://doi.org/10.1155/2018/9216314>
- [23] Li, D., Zhang, D., Yuan, Q., Liu, L., Li, H., Xiong, L., *et al.* (2022) *In Vitro* and *in Vivo* Assessment of the Effect of Biodegradable Magnesium Alloys on Osteogenesis. *Acta Biomaterialia*, **141**, 454-465. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.12.032>
- [24] Estrin, Y., Martynenko, N., Anisimova, N., Temralieva, D., Kiselevskiy, M., Serebryany, V., *et al.* (2019) The Effect of Equal-Channel Angular Pressing on the Microstructure, the Mechanical and Corrosion Properties and the Anti-Tumor Activity of Magnesium Alloyed with Silver. *Materials*, **12**, Article 3832. <https://doi.org/10.3390/ma12233832>
- [25] Kiselevsky, M.V., Anisimova, N.Y., Polotsky, B.E., Martynenko, N.S., Lukyanova, E.A., Sitdikova, S.M., *et al.* (2019) Biodegradable Magnesium Alloys as Promising Materials for Medical Applications (Review). *Sovremennye tehnologii v medicine*, **11**, 146-155. <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.3.18>
- [26] Macni, C., Kaissar, F., Hardwigsen, J., Jaloux, C., Mayoly, A., Witters, M., *et al.* (2024) Two-Stage Surgery for Large Sacrococcygeal Chordomas: How I Do It. *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique*, **69**, 434-441. <https://doi.org/10.1016/j.anplas.2024.06.002>
- [27] Fazel Anvari-Yazdi, A., Tahermanesh, K., Hadavi, S.M.M., Talaei-Khozani, T., Razmkhah, M., Abed, S.M., *et al.* (2016) Cytotoxicity Assessment of Adipose-Derived Mesenchymal Stem Cells on Synthesized Biodegradable Mg-Zn-Ca Alloys. *Materials Science and Engineering: C*, **69**, 584-597. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.016>
- [28] Hakimi, O., Ventura, Y., Goldman, J., Vago, R. and Aghion, E. (2016) Porous Biodegradable EW62 Medical Implants Resist Tumor Cell Growth. *Materials Science and Engineering: C*, **61**, 516-525. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.043>
- [29] Wei, S., Ma, J., Xu, L., Gu, X. and Ma, X. (2020) Biodegradable Materials for Bone Defect Repair. *Military Medical Research*, **7**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1186/s40779-020-00280-6>
- [30] Yan, Y., Chu, X., Luo, X., Xu, X., Zhang, Y., Dai, Y., *et al.* (2021) A Homogenous Microstructural Mg-Based Matrix Model for Orthopedic Application with Generating Uniform and Smooth Corrosion Product Layer in Ringer's Solution: Study on Biodegradable Behavior of Mg-Zn Alloys Prepared by Powder Metallurgy as a Case. *Journal of Magnesium and Alloys*, **9**, 225-240. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.03.010>
- [31] Niiikura, T., Oda, T., Jimbo, N., Komatsu, M., Oe, K., Fukui, T., *et al.* (2022) Immunohistochemical Analysis Revealed the Expression of Bone Morphogenetic Proteins-4, 6, 7, and 9 in Human Induced Membrane Samples Treated with the Masquelet Technique. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **17**, Article No. 29. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-02922-y>
- [32] Guimarães, J.A.M., Scorza, B.J.B., Machado, J.A.P., Cavalcanti, A.D.S. and Duarte, M.E.L. (2023) Caracterização da membrana induzida pela técnica de Masquelet em modelo murino de defeito ósseo segmentar. *Revista Brasileira de Ortopedia*, **58**, e798-e807. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1771490>
- [33] 范金柱, 从飞, 任小宇, 等. 膜诱导技术治疗合并骨缺损的股骨远端 Gustilo-Anderson IIIB 型损伤[J]. 中国修复重建外科杂志, 2022, 36(5): 609-613.
- [34] 马炬雷, 王兵, 陈博, 等. Masquelet 技术研究及临床应用进展[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2025, 40(1): 46-52.
- [35] McBride-Gagyi, S., Toth, Z., Kim, D., Ip, V., Evans, E., Watson, J.T., *et al.* (2018) Altering Spacer Material Affects Bone Regeneration in the Masquelet Technique in a Rat Femoral Defect. *Journal of Orthopaedic Research*, **36**, 2228-2238. <https://doi.org/10.1002/jor.23866>
- [36] Verboket, R.D., Leiblein, M., Janko, M., Schaible, A., Brune, J.C., Schröder, K., *et al.* (2020) From Two Stages to One: Acceleration of the Induced Membrane (Masquelet) Technique Using Human Acellular Dermis for the Treatment of Non-Infectious Large Bone Defects. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, **46**, 317-327. <https://doi.org/10.1007/s00068-019-01296-x>
- [37] 杨华清, 曲龙. Ilizarov 骨搬运技术[J]. 中国骨伤, 2022, 35(10): 903-907.
- [38] 叶琪毅, 张文广, 唐亚飞, 等. 两种应用 Ilizarov 技术治疗胫骨大段骨合并软组织缺损的疗效分析[J]. 实用手外科杂志, 2021, 35(2): 194-197.