

人工骨支架的结构设计与研究进展

武文云 高尔东 谭悦森 赵颐康 戚孟春（通讯作者）

华北理工大学口腔医学院 河北 唐山 063000

【摘要】：人工骨是一种可以激活受损骨组织或生长因子帮助人体骨骼实现自身修复的新型人工生物材料。人工骨支架可以将人工骨植入人体，达到实现患者骨骼恢复的目的。过去的人工骨材料大多采取仿生思想，采取有机物质与无机物质结合的方式进行研究，随着现代医学的发展和新材料的不断发现，人工骨支架也从单一的无机材料和有机材料增加了复合材料，随着现代医学与组织工程学的发展，人工骨材料的研制也进入了新的阶段。本文将就人工骨支架的结构设计发展进行综述，研究人工骨支架材料更新的脉络，对目前人工骨支架的材料研究进行总结，以期望减少骨科疾病患者的痛苦。

【关键词】：生物医学；人工骨支架；结构设计；研究进展；综述

DOI:10.12417/2705-098X.26.01.065

引言

人工骨作为新型人工生物材料，具备激活受损骨组织或生长因子的功能，可有效促进人体骨骼的自身修复。借助人工骨支架，能够将人工骨植入人体，从而实现患者骨骼功能的恢复。既往人工骨材料的研发多遵循仿生理念，采用有机与无机物质相结合的模式。随着现代医学的持续进步以及新型材料的不断涌现，人工骨支架的材料类型已从单纯的无机或有机材料拓展至复合材料，标志着人工骨材料的研制步入新阶段。本文旨在对人工骨支架的结构设计进展予以综述，梳理其材料更新的演进脉络，总结当前人工骨支架材料的研究现状，以期为减轻骨科疾病患者的病痛提供理论依据与技术支撑。

人工骨材料在骨科疾病治疗领域具有独特的优势与特性，与传统其它治疗方法相比：自体移植骨虽被视为骨置换的金标准，但由于其并发症发生率高、手术时间长、可用性差和骨供应有限等问题，使用受到限制^[1]；异体骨移植具有来源广泛和无并发症等特点，但却存在排斥反应、疾病传播和伦理方面等问题^[2]；金属假肢则存在易松动断裂的隐患，且在长期使用过程中会持续释放金属离子，导致患者体内金属离子积聚，诱发不良反应。相较而言，人工骨材料融合了上述治疗方法中的优点，且成本相对低廉。因此，人工骨支架材料已成为骨科治疗体系中不可或缺的材料之一。

1 人工骨支架的概述和应用场景

人工骨支架是由一种或多种材料复合而成，可以用于替代金属假体、异体骨、人体自体骨，修复受损骨组织，实现骨的恢复和重建的人工生物材料。在骨科领域，常有患者因为患有骨科疾病或者身体机能下降而饱受骨缺损的困扰，在骨科临床中骨缺损是一种常见病，主要是指骨的结构完整性被破坏，多

容易发生于遭受过严重创伤、骨髓炎患者、骨肿瘤患者及高龄老人。因此，作为可以修复人体骨组织的人工骨支架材料^[3]存在巨大的发展空间。在人体中人工骨的作用机理可分为成骨作用、骨传导作用、骨诱导作用。临床中骨缺损长度在一定范围内是可自行修复，但当超过该范为后便无法自行愈合^[4]。而临床中因外伤、肿瘤等造成的骨缺损往往超出自行愈合的范畴，在这些疾病的治疗中使用人工骨支架就可以有效地连接患处，充当支架，支撑骨骼需要的促进活细胞分化；随着患者的好转，支架逐渐吸收降解，引导骨与移植材料结合；诱导骨细胞分化为成熟的成骨细胞^[5]，辅助患者恢复正常的身体环境，帮助患者更快恢复健康。

2 人工骨支架的结构特点

人工骨支架主要有无机材料、有机材料和复合材料三种。人工骨支架的结构不仅要①符合人体的力学形态，可以有效承担支撑作用，这就需要优秀的生物支撑强度^[6]；②便于加工，不仅可以制作成多个不同的骨结构，还方便制成多种大小与形状，适应各个年龄段的患者，增加支架的可选择性；③需要具有良好的生物相容性和微孔结构^[7]，以便人体骨细胞可以生长，减少不良反应如感染发生率；④易于吸收降解，不会过快或过慢吸收：吸收过快无法起到连接制的作用，吸收过慢则会阻碍骨的生长；⑤可以通过支架搭载的药物活性^[8]，引导患者的骨保持一定的生长速度，能够有效促进患者骨愈合。

随着时代的发展，人工骨支架的材质经历了珊瑚碳酸钙^[9]、羟基磷灰石和磷酸钙骨水泥的迭代后，发现并应用了生物玻璃这一新型材料类别，随着3D打印技术的发展和更新，3D打印材料也成为人工骨支架的备选材料。相对于最开始的珊瑚人造骨，新兴的人工骨支架材料具有更高的强度、更好的生物相容性和更强的韧性，加入的有机质如胶原可以使人工骨的质感更

作者简介：姓名：武文云，男，硕士，研究方向：口腔医学。

通讯作者：戚孟春，男，博士，教授，研究方向：研究方向：口腔医学。

贴近人体骨^[10]，从而进一步减少患者人体对人工骨的排异反应，防止产生后续并发症，增加患者的体感舒适度。

人工骨支架不仅需要连接骨与组织，承担自体骨承受的重量，还是骨细胞生长增殖的“温床”，将骨细胞种植于人工骨支架并进行培育，为了让人工骨更接近人体骨，所设计的微孔结构可以增加骨细胞数量，通畅骨细胞生长路径，骨细胞在适宜生长的环境下可以生长繁殖为有活性的骨细胞，为日后骨的生长和重建提供前提条件和素材^[11]。

但是现有的人造骨材料也有局限性，珊瑚人工骨质地松脆，无法进行骨诱导，而羟基磷灰石和磷酸钙骨水泥强度较低，难以完成承重性的骨科治疗，且因为材料的不安全不易降解，易引发人工关节感染等多种并发症。因此，选择更合适的人工骨材料还是一个有待解决的难题。

3 人工骨支架的进展与挑战

人工骨支架在通过选择生物金属、生物陶瓷、聚合物等材料。采取了多种技术，如3D打印技术、静电纺丝法、冷冻干燥法、相分离法等不同的制备方法^[12]，优化人工骨支架的机械性能，支架的空间分布和结构形态^[13]。通过在骨支架中引入化学药品或活性物质（细胞因子、生成因子等）^[14]，以及对骨支架表面进行改性，促进细胞的粘附、增殖和分化能力，从而提高高骨支架的骨诱导及骨传导能力。

史耕田^[15]等人通过实验设计和实际操作得出一种高温挤压打印的人工骨支架材料配比，经过验证后确认研发的人工骨支架可基本满足一些松质骨的力学性能和骨质恢复，为后续的相关研究提供了实验数据和结论遵循。

Zhang teng^[16]等人通过实验研究了在特制的3D打印多孔椎骨植入物中通过注入rhBMP-2（重组人骨形态发生蛋白-2）对骨整合的改善作用，通过建模、断层扫描、荧光追踪与数据模拟证明了新型植入物中注入rhBMP-2生长因子可以改良人工骨的生物相容性，修复生长因子的缓释和吸收情况，创造了高纯度、高活性的脊柱骨修复体，为有效解决骨损伤相关疾病的现有问题带来希望。

伍家毅^[17]等人就抗菌人工骨支架材料进行了研究进展综述，介绍了抗生素类人工骨支架、无机抗菌剂类人工骨支架和天然抗菌剂类人工骨三类人工骨支架，并提出需要开发出强大、可控的抗菌系统和抗感染、骨传导、骨诱导等多重作用的复合型人工骨支架，为人工骨支架材料的抗菌能力研究奠定了坚实的基础。随着新材料的出现与推广，3D打印材料也进入人工骨支架的选择。

朱禧^[18]等人通过进行动物实验，使用3D打印技术探究了复合型nHA抗结核人工骨支架搭载的药物缓释性能，结果表明搭载了PaMZ（组合抗结核药物）/BMP-2（骨形态发生蛋白-2）的nHA抗结核人工骨支架在动物体内的缓释释药性良好，

相对于单一型的人工骨支架拥有更好的缓释效果，为人工骨支架搭载缓释药物提供新的可能方案。

为了解决现有的骨缺损疾病问题，人工骨支架材料经历了多次迭代。人工骨支架需要植入患者体内，并且需要具备一定的生物强度和人体亲和性，还要能够搭载药品，还需要具备一定的舒适度和经济适用性，克服患者的心理压力，这就使人工骨支架材料直接面临着以下几点问题：

（1）支架搭载生物活性物质的来源和提供稳定生存环境的方法^[19]。

（2）人工骨支架材料的生物相容性和支架与生物活性物质的亲和性。

（3）人工骨支架材料的强度和组成配比，需要筛选最优质、经济的配比组合进行组装并大批量制造。

（4）人工骨支架的材料选择要考虑到与患者缺损骨的适配度，选用适配度更高的人工骨支架能有效减少患者新骨生长时与原生骨的差异化^[20]，患者在使用感受上体感更舒适。

4 人工骨支架的发展方向

目前，人工骨支架已经提出了多种不同的方案，制造出了具有理论效果的人工骨支架成品，但因为生物和经济原因并未有更多的人工骨支架产品投入临床使用^[21]。未来人工骨支架的研究将会聚焦于以下几点。

4.1 材料研究与选择

人工骨支架的材料选择对人工骨支架的性能产生了极大的影响，开发研究新兴的支架材料成为热门的选择。目前材料拥有的问题是优良的生物性能和力学性能无法兼顾^[22]，支架的稳定性无法保证。因此需要研究出更稳定的支架，可以有更好的支撑力和平衡度，同时要拥有优良的生物相容性，在患者体内不会析出毒性物质，可以让患者在体感上更舒适，不会引起患者的排异反应，引发患者产生炎症疾病^[23]。

4.2 支架血管化

目前，如何提高人工骨支架的血管化^[24]也成为了一个热门方向。诸如人工骨、脑器官等在体外进行人体组织培养的“类器官”因为缺乏血管供氧，随着体积的增大和数量的增加，无法有效的进行组织的营养供应和废物代谢，从而导致组织死亡。支架血管化的研究可以有效降低组织的死亡率，提高类器官移植后的组织成活率，延长支架的使用寿命，帮助患者骨细胞与人工骨的整合^[25]。

4.3 预防感染

人工骨支架在患者体内需要留存一定的时间，这段时间内病菌易通过创口进入患者体内，引发细菌感染，患者体内的细菌感染可能会引起患者低烧、发炎，甚至引发患者死亡。因此，亟需要提高人工骨支架材料的抗菌性能和安全性，尽可能地保

护患者的身体健康，保障患者的生命安全。

4.4 个性化需求

患者的年龄、性别、骨损伤部位不同，对人工骨支架的选择不同。面对不同的患者需求，人工骨支架也要提供不同的选择方案来积极应对，以此实现人工骨支架个性化选择和多级孔隙结构可控制化制造，选择合适的材料和结构设计适应合适的价格梯度，人工骨支架治疗方法平民化，让更多的骨缺损患者能够享受到这一新型的治疗手段^[26]。

5 结论

随着新材料的不断出现，新技术的不断完善，人工骨支架

的结构设计脉络逐渐清晰，更多的学者开始注意到这一领域。新型的人工骨支架已经在实验室投入研发，人工骨支架成品已经在进行动物体实验。人工骨支架的方案提出和结构设计探究为骨缺损患者的治疗提供了新的思路和方法。通过筛选支架材料，优化支架结构，提高抗菌能力，进行定制化制造等方向的研究，可以为临床治疗提供有力的理论支持，助力人工骨支架进入临床治疗，为现有的骨缺损患者提供更方便、更优质、更经济的新型治疗方式，为不同患者的骨修复问题提供更加有效的解决方案。

参考文献：

- [1] 廖欣宇,王福科,王国梁.骨组织工程支架的进展与挑战[J].中国组织工程研究,2021,25(28):4553-4560.
- [2] Shi W,Zhang X,Bian L,et al.Alendronate crosslinked chitosan/polycaprolactone scaffold for bone defects repairing[J].Int J Biol Macromol,2022,204:441-455.
- [3] Feng P,Liu L,Yang F,et al.Shape/properties collaborative intelligent manufacturing of artificial bone scaffold:structural design and additive manufacturing process[J].Biofabrication,2024,17(1):012005-012005.
- [4] Kumawat V,Bandyopadhyay-Ghosh S,Ghosh S.An overview of translational research in bone graft biomaterials.Journal of Biomaterials Science,Polymer Edition,2023;34(4):497-540.
- [5] 苏鹏,张巍巍,余华伟,等.脂肪干细胞在人工骨支架诱导下的成骨效应[J].中国组织工程研究,2015,19(28):4493-4497.
- [6] Mengguo Ren,Justin Y.Cheng,Siva Priya Jaccani,Saurabh Kapoor,Randall E.Youngman,Liping Huang,Jincheng Du,Ashutosh Goel."Composition–structure–property relationships in alkali aluminosilicate glasses:A combined experimental–computational approach towards designing functional glasses".Journal of Non-Crystalline Solids,2019,505:144-153,ISSN 0022-3093.
- [7] Liu,W.,Zhang,K.,Sun,Y.,Xiao,Z.,Hu,H.,Xiong,X.,&Hu,Y.(2025).Multidimensional treatment of periprosthetic joint infection using fusion peptide-grafted chitosan coated porous tantalum scaffold.Bioactive Materials,44,1532.
- [8] Xu,Y.,Zhang,S.,Ding,W.,Du,H.,Li,M.,Li,Z.,&Chen,M.(2024).Additively-manufactured gradient porous bio-scaffolds:Permeability, cytocompatibility and mechanical properties.Composite Structures,336,118021.
- [9] 黄涛,孟志斌,金大地,等.生物珊瑚人工骨支架材料生物相容性检测[J].中国现代医学杂志,2012,22(11):36-41.
- [10] 王娟,乌日开西·艾依提,滕勇.组织工程化人工骨支架的结构优化设计研究进展[J].实用医学杂志,2014,30(24):4040-4041.
- [11] Yu P,Liang L,Mu J,Hou S,Cheng L.Research progress on biocomposites based on bioactive glass[J].Journal of Biomedical Engineering,2023,40(4):1002-1008.
- [12] 袁询.左旋聚乳酸骨支架的力学强化和功能化设计[D].江西理工大学.2022.
- [13] Yi,H.,Ur Rehman,F.,Zhao,C,et al.Recent advances in nano scaffolds for bone repair.Bone Res 4,16050(2016).
- [14] 唐旭,陈帅,田鹏,等.万古霉素人工骨联合外固定支架治疗慢性胫骨骨髓炎的疗效及其对膝关节功能、踝关节功能和炎性因子的影响[J].临床和实验医学杂志,2019,18(15):1650-1653.
- [15] 史耕田,马志勇,钱正,等.基于高温挤出打印的PLGA/β-TCP人工骨支架制备及其性能研究[J].北京生物医学工程,2020,39(03):264-270+284.
- [16] Zhang,Teng,Wei,Qingguang,Fan,Daoyang,Liu,Xiaoguang,Li,Weishi,Song,Chunli,Tian,Yun,Cai,Hong,Zheng,Yufeng,Liu,Zhongjun.Improved osseointegration with rhBMP-2 intraoperatively loaded in a specifically designed 3D-printed porous Ti6Al4V vertebral implant[J].Biomaterials Science,2020,8(5):1279-1289.

- [17] 伍家毅,李巍明,李夏林,等.抗菌人工骨支架材料研究进展[J].国际骨科学杂志,2021,42(03):162-165.
- [18] 朱禧,李玉,施建党,等.3D 打印载 PaMZ/BMP-2 的 nHA 抗结核人工骨在体内成骨效果及药物缓释性能研究[J].中国脊柱脊髓杂志,2023,33(11):1032-1042.
- [19] 黄江鸿,熊建义,王大平,等.低温快速成型 3D 打印磁性纳米复合人工骨的性能测定[J].海南医学,2017,28(04):525-530.
- [20] 段钢,陈宏亮,郭开今,等.3D 打印 β -磷酸三钙仿生骨支架修复兔股骨髄骨缺损[J].骨科临床与研究杂志,2020,5(04):243-250.
- [21] Liang J,Lian X,Lu Y,et al.Study on the fabrication and performance of hierarchical porous 3D printed PCL-based artificial bone scaffold with anti-bacterial effect[J].Materials Today Communications,2024,39:108637.
- [22] Tian J,Fu C,Li W,et al.Biomimetic tri-layered artificial skin comprising silica gel-collagen membrane-collagen porous scaffold for enhanced full-thickness wound healing[J].International journal of biological macromolecules,2024,266(Pt 1):131233-131233.
- [23] A L,Elsen R,Nayak S.Artificial Intelligence-Based 3D Printing Strategies for Bone Scaffold Fabrication and Its Application in Preclinical and Clinical Investigations[J].ACS biomaterials science&engineering,2024.
- [24] Ming-Zhu P,Yu-Xin C,Jia-Min W,et al.Preparation and properties of K_{0.48}Na_{0.52}NbO₃ ceramics for bone scaffolds via digital light processing[J].Ceramics International,2023,49(23PB):38519-38526.
- [25] Sun J,Qin L,Wang D,et al.Fabrication of novel printable artificial bone composites used as cartilage scaffolds by an additive manufacturing process[J].Journal of Applied Polymer Science,2023,140(43).
- [26] Shuilin Wu,Xiangmei Liu,Kelvin W.K.Yeung,Changsheng Liu,Xianjin Yang.Biomimetic porous scaffolds for bone tissue engineering[J].Materials Science and Engineering:R:Reports,2014,80:1-36.