

骨缺损材料临床应用进展

孙科¹, 单中书²

¹青海大学, 青海 西宁

²青海省人民医院, 青海 西宁

收稿日期: 2022年10月21日; 录用日期: 2022年11月15日; 发布日期: 2022年11月24日

摘要

骨缺损是骨性疾病造成的危害较大的临床表现, 填补及修复骨缺损是临床应用难题, 故研究骨生物材料是治疗骨缺损的基础性研究, 通过论述不同骨材料的研究进展, 为目前骨缺损的修复提供进一步的临床思维和研究方向。

关键词

骨缺损, 生物材料, 骨修复, 研究进展

Progress in Clinical Application of Bone Defect Materials

Ke Sun¹, Zhongshu Shan²

¹Qinghai University, Xining Qinghai

²People's Hospital of Qinghai Province, Xining Qinghai

Received: Oct. 21st, 2022; accepted: Nov. 15th, 2022; published: Nov. 24th, 2022

Abstract

Bone defects are the clinical appearance of great harm caused by bone diseases, and filling and repairing bone defects is a difficult problem in clinical application. Therefore, the study of bone biomaterials is the basic research for the treatment of bone defects. By discussing the research progress of different bone materials, further clinical thinking and research direction for the repair of bone defects are provided.

Keywords

Bone Defect, Biological Materials, Bone Repair, Research Progress

Copyright © 2022 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

骨缺损在骨科临床上十分常见, 多由外界损伤、肿瘤病变等引起[1], 人体骨组织具有一定的自发愈合功能, 即只要骨组织的裂缝或缺损不大, 均可不通过手术自然恢复。而当达到约为骨干直径的 1.5 倍, 超出了自体修复能力, 常常会出现骨吸收和骨不愈合的情况, 骨缺损无法自行愈合, 将严重影响患者生活质量。如何修复骨缺损一直是临床上面临的巨大挑战。随着医学的发展, 目前临床对于骨缺损的治疗方法主要是: 髂骨、腓骨等自体骨移植、同种异体骨移植、Masquelet 技术[2]、Ilizarov 骨延长技术[3]等。TE (Tissue Engineering, 组织工程)被认为是一种解决超过临界缺损值的骨缺损修复的一种可行的方法[4]。骨修复支架可被用作自体骨移植的辅助物或替代物, 特别是对于需要大量移植材料的大段骨缺损的再生, 目前骨修复支架研究仍然存在许多争议, 包括材料的选择、3D 打印方法的选择、孔隙率、孔隙几何形状的选择等, 因此需要进一步的研究。

2. 骨缺损修复材料的认识

对于各种类型的创伤、意外事故以及骨科疾病等导致的骨缺损, 其修复骨缺损的材料一直是临床难题[5]。目前在临床上应用的材料基本上是自体骨、同种异体骨、人造骨, 而自体骨是治疗骨缺损的“金标准”, 缺点是供区骨量有限, 二次伤害、感染等问题[6] [7] [8]。随着生物技术的发展, 聚合骨材料称为新的研究热点, 包括金属材料、生物陶瓷、高分子合成材料, 而复合材料是集合多种材料制备而成, 虽部分取得了良好的效果, 但获取理想的骨修复材料仍困难重重[9] [10]。理想的骨修复材料需要具备以下条件: 1) 生物相容性: 机体不产生免疫排斥及炎症反应, 分解产物无毒无害; 2) 生物降解性能: 材料降解速度匹配, 均衡状态; 3) 生物活性: 具有骨诱导和骨传导性, 促进细胞黏附、增殖、分化; 4) 孔隙率及渗透性能: 适当的孔隙度和渗透性利于体内物质交换, 提供增殖空间; 5) 良好的机械耐受性: 具有与正常骨组织相近的结构、成分和机械性能[11]-[16]。所以对于人工修复材料的生物相容性和成骨性能仍是目前组织工程中骨修复材料领域中的重要内容。

3. 天然骨材料

天然骨材料指来源于机体, 主要是两大类: 自体骨和同种异体骨。因各种成分与机体组分相同, 临床应用的主要材料, 安全性高。**自体骨**: 是目前骨修复材料中最为传统的且疗效较好的一种材料, 而且作为临床骨缺损修复手术中修复材料的首选[17] [18]。其主要来源于患者本身的髂骨、胫骨、腓骨等含有活性造血骨髓部位, 且患者自身易于接受, 自身免疫排斥及炎症反应低, 生物相容性好, 成骨能力强, 骨诱导、传导性好等优点, 还可以根据缺损情况选择皮质骨、松质骨、整体骨、吻合血管骨、带肌带骨瓣等形式, 被普遍认为是骨修复材料的“金标准” [19] [20] [21] [22] [23]。虽然为修复的理想材料, 但其应用也有一些缺点: 手术时间长, 手术创伤明显, 供区血肿、疼痛等并发症以及最主要的是患者体验差 [24] [25]。**异体骨**: 异体骨本身具有良好的骨传导和骨诱导性, 不受形态、大小限制, 使用方便, 来源相

对丰富, 具有较好的强度和结构性能, 经冻干、辐射或化学处理后降低免疫原性, 相对于自体骨不存在供区损伤等问题, 所以在填充骨缺损方面也是较为广泛应用。异体骨的植入较自体骨更容易引起免疫排斥反应、感染、骨延迟愈合、骨吸收以及疾病传播, 疾病传播的最高风险来自于康复后 4 天内植入的新鲜同种异体移植。在这种情况下, 没有时间进行全面的供体筛选和之前的血清学或细菌检测, 而且在创伤手术中使用新鲜异体移植物的适应症还不清楚。第二高的风险来自冷冻和未加工的移植物[26]。再者因需要降低免疫原性又同时影响到生物活性, 改变材料的理化性质, 达不到满意的临床疗效。并且异体骨材料获取方式较为困难, 价格较高, 患者心理接受程度低[27] [28]。

4. 人工骨材料

人工骨材料又可以成为骨移植替代材料, 想要达到具有好的生物相容性、骨传导、骨诱导, 降解率与成骨匹配度相似等条件, 目前仍处于初始阶段。目前的替代材料主要包括生物惰性金属材料、高分子材料(天然高分子、人工合成高分子)和生物活性陶瓷材料等[29] [30]。

4.1. 生物惰性金属材料

惰性金属材料是骨科应用最多的移植物, 主要包含钽、钴铬镍合金、钛合金等均取得了良好成效。近些年, 骨小梁钽金属具有多孔表面涂层, 良好的生物相容性、机械性、耐腐蚀性, 在临床上取得了良好的效果。惰性金属材料在植入后能保证稳定的力学性能支撑组织修复, 但长期存在于机体内将会造成松动、损坏、炎症反应以及潜在的毒副作用等问题[31] [32] [33]。

4.2. 高分子材料

分子材料包括天然和人工合成高分子材料, 天然高分子包括胶原、丝素蛋白、壳聚糖等, 这些材料具有较好的生物相容性、细胞毒性低、促进细胞黏附性、免疫反应少等优势, 例如丝素蛋白作为一种从蚕丝中提取的天然高分子纤维蛋白, 具有良好的柔韧性、抗拉伸强度和生物活性, 有良好的细胞黏附率和促成骨性能, 降解速度与骨缺损修复周期相匹配, 其降解产生的氨基酸和多肽对周围组织还有营养和修复作用, 因此在骨缺损修复上展现出巨大优势[34] [35] [36], 人工合成材料包括聚乳酸、聚乙二醇、聚乳酸-羟基乙酸等材料, 美国 FDA 批准为部分材料为生物降解性医用材料, 其具有材料来源不受限以及可制备出不同孔隙率和渗透率, 降解性能优势。尽管作为应用最为广泛的组织工程细胞基质材料, 在实际应用中发现具有亲水性差, 细胞吸附力弱, 机械强度不足, 可引起无菌性炎症等缺点, 通过将碳酸钙、羟基磷灰石、明胶、惰性金属等引入聚合物, 有助于防止无菌性炎症, 提高抗压能力和生物活性[37] [38] [39]。

4.3. 生物陶瓷

主要包括磷酸三钙、羟基磷灰石、生物活性玻璃、碳素材料等, 生物陶瓷是生物相容性很好的骨修复材料, 其修复作用主要体现在骨传导性, 可为新骨的形成提供支架。其中羟基磷灰石在人体中的含量占到 60%, 无毒性, 具有良好的骨传导性, 与骨组织产生稳定的化学反应。缺点也很明显, 材料脆性较大, 机械强度较弱; 降解速率通常很慢或不降解。有研究表明, 纳米级羟基磷灰石力学性能改善, 并与胶原、丝素蛋白、壳聚糖、聚乙烯醇以及微量元素等掺杂, 在生物相容性、生物可降解性、促进细胞增殖能力以及生物耐受性、抗菌性等方面取得了优异的成绩[40]-[47]。

5. 复合材料

复合材料是用材料制备技术将两种或两种以上不同性质材料进行组合而成的新材料。复合材料可以

有效弥补单一的天然或人工材料在生物和理化性质方面的不足,从而显著改善骨再生[48]。上述也提到过多种骨修复复合材料,例如,将丝素蛋白/I型胶原/羟基磷灰石制备支架改善力学性能[49]。又如海藻酸盐水凝胶及其复合体系能够实现临界骨缺损的完全骨桥接[50],以及羟基磷灰石材料的生物相容性和骨整合能力[51][52][53]。那么在复合骨修复材料产品开发和使用时应特别注意的是,复合材料的产品体系相对复杂,需充分考虑不同组分材料间的交互作用,避免对产品的安全性和有效性产生不利影响。

6. 小结

在目前骨生物材料发展及研究中,通过对人骨基础结构、成分、蛋白、基因的探索,使得从不同的角度去寻找更加适合于人体生物移植的材料,逐步研究多方面聚合材料使其能够具备减少免疫反应,提高骨修复的能力,促进生物材料的进一步发展,提升临床治愈效果,提高生活质量。

参考文献

- [1] Jing, Z., Zhang, T., Xiu, P., Cai, H., Wei, Q., Fan, D., Lin, X., Song, C. and Liu, Z. (2020) Functionalization of 3D-Printed Titanium Alloy Orthopedic Implants: A Literature Review. *Biomedical Materials*, **15**, Article No. 052003. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ab9078>
- [2] 徐建平, 左杨斌, 李妹霞, 王怀云, 林国兵. 载抗生素硫酸钙介导的 Masquelet 技术在骨缺损中的临床应用[J]. 中外医疗, 2021, 40(4): 36-38+42.
- [3] 韩晓飞, 孙振中, 宋升, 刘学光, 张树军, 杜世浩. “手风琴”技术对 Ilizarov 骨搬运治疗骨缺损疗效的影响[J]. 中国临床解剖学杂志, 2021, 39(5): 598-602.
- [4] Deng, F., Liu, L., Li, Z. and Liu, J. (2021) 3D Printed Ti6Al4V Bone Scaffolds with Different Pore Structure Effects on Bone Ingrowth. *Journal of Biological Engineering*, **15**, Article No. 4. <https://doi.org/10.1186/s13036-021-00255-8>
- [5] Parsons, B. and Strauss, E. (2004) Surgical Management of Chronic Osteomyelitis. *The American Journal of Surgery*, **188**, 57-66. [https://doi.org/10.1016/S0002-9610\(03\)00292-7](https://doi.org/10.1016/S0002-9610(03)00292-7)
- [6] Wernike, E., Montjovent, M.O., Liu, Y., Wismeijer, D., Hunziker, E.B., Siebenrock, K.A., Hofstetter, W. and Klenke, F.M. (2010) VEGF Incorporated into Calcium Phosphate Ceramics Promotes Vascularisation and Bone Formation *in Vivo*. *European Cells and Materials*, **19**, 30-40. <https://doi.org/10.22203/eCM.v019a04>
- [7] Mueller, T.L., Wirth, A.J., van Lenthe, G.H., Goldhahn, J., Schense, J., Jamieson, V., Messmer, P., Uebelhart, D., Weishaup, D., Egermann, M. and Müller, R. (2011) Mechanical Stability in a Human Radius Fracture Treated with a Novel Tissue-Engineered Bone Substitute: A Non-Invasive, Longitudinal Assessment Using High-Resolution pQCT in Combination with Finite Element Analysis. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, **5**, 415-420. <https://doi.org/10.1002/term.325>
- [8] Schlumberger, M., Mayr, R., Koidl, C., Eichinger, M. and Roth, T. (2018) Treatment of Tibial Nonunion with Bone Defect Using a Heterotopic Ossification as Autologous Bone Graft: Literature Overview and Case Report. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, **28**, 741-746. <https://doi.org/10.1007/s00590-018-2146-6>
- [9] Chatterjea, A., Meijer, G., van Blitterswijk, C. and de Boer, J. (2010) Clinical Application of Human Mesenchymal Stromal Cells for Bone Tissue Engineering. *Stem Cells International*, **2010**, Article ID: 215625. <https://doi.org/10.4061/2010/215625>
- [10] Nkenke, E. and Neukam, F.W. (2014) Autogenous Bone Harvesting and Grafting in Advanced Jaw Resorption: Morbidity, Resorption and Implant Survival. *European Journal of Oral Implantology*, **7**, S203-S217.
- [11] Thomson, R.C., Yaszemski, M.J., Powers, J.M., *et al.* (1998) Hydroxyapatite Fiber Reinforced Poly(α -Hydroxy Ester) Foams for Bone Regeneration. *Biomaterials*, **19**, 1935-1943. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(98\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(98)00097-0)
- [12] 崔岗, 周岱, 刘义荣, 孙春明. EH 型复合人工骨材料在颅骨修补中的应用[J]. 中国血液流变学杂志, 2001, 11(4): 275-276.
- [13] Dalgic, A.D., Alshemary, A.Z., Tezcaner, A., Keskin, D., *et al.* (2018) Silicate-Doped Nano-Hydroxyapatite/Graphene Oxide Composite Reinforced Fibrous Scaffolds for Bone Tissue Engineering. *Journal of Biomaterials Applications*, **32**, 1392-1405. <https://doi.org/10.1177/0885328218763665>
- [14] Fernandez de Grado, G., Keller, L., Idoux-Gillet, Y., Wagner, Q., Musset, A.M., Benkirane-Jessel, N., Bornert, F. and Offner, D. (2018) Bone Substitutes: A Review of Their Characteristics, Clinical Use, and Perspectives for Large Bone Defects Management. *Journal of Tissue Engineering*, **9**, Article ID: 2041731418776819.

<https://doi.org/10.1177/2041731418776819>

- [15] 魏晨旭, 何怡文, 王聘, 侯婧霞, 谢辉, 殷放宙, 陈志鹏, 李伟东. 组织工程学中骨修复材料的研究热点与进展[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(10): 1615-1621.
- [16] 冷一, 李祖浩, 任广凯, 王中汉, 高超华, 史晨玉, 刘贺, 吴丹凯. 生物活性支架在骨组织工程中的应用及进展[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(6): 963-970.
- [17] 邓伟, 巨积辉, 李雷, 周正虎, 李昌松. 胫骨骨不连的原因分析及自体骨移植的治疗进展[J]. 中国临床解剖学杂志, 2019, 37(6): 726-728.
- [18] 马武秀, 程迅生. 自体骨移植修复骨缺损的研究进展[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2011, 26(6): 574-576.
- [19] Campana, V., Milano, G., Pagano, E., Barba, M., Cicione, C., Salonna, G., Lattanzi, W. and Logroscino, G. (2014) Bone Substitutes in Orthopaedic Surgery: From Basic Science to Clinical Practice. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **25**, 2445-2461. <https://doi.org/10.1007/s10856-014-5240-2>
- [20] 王兴, 刘洪臣. 自体骨移植修复种植位点骨缺损的研究进展[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2016, 17(1): 49-52.
- [21] 赵坤, 王延岭, 卢敏勋, 姚凯, 肖聪, 周勇, 闵理, 罗翼, 屠重棋. 胫骨下段大段瘤性骨缺损修复重建的研究进展[J]. 中国修复重建外科杂志, 2018, 32(9): 1211-1217.
- [22] 占华松, 陈跃平, 章晓云. 骨组织工程技术治疗感染性骨缺损: 优势与问题[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(30): 4848-4854.
- [23] 杨思敏, 王新卫. 自体骨移植修复骨缺损的临床研究进展[J]. 中国疗养医学, 2019, 28(9): 945-948.
- [24] Khira, Y.M. and Badawy, H.A. (2013) Pedicled Vascularized Fibular Graft with Ilizarov External Fixator for Reconstructing a Large Bone Defect of the Tibia after Tumor Resection. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, **14**, 91-100. <https://doi.org/10.1007/s10195-013-0225-3>
- [25] Noori, A., Ashrafi, S.J., Vaez-Ghaemi, R., Hatamian-Zaremi, A. and Webster, T.J. (2017) A Review of Fibrin and Fibrin Composites for Bone Tissue Engineering. *International Journal of Nanomedicine*, **12**, 4937-4961. <https://doi.org/10.2147/IJN.S124671>
- [26] Brink, O. (2021) The Choice between Allograft or Demineralized Bone Matrix Is Not Unambiguous in Trauma Surgery. *Injury*, **52**, S23-S28. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.11.013>
- [27] 许文斌, 徐义春, 姚辉, 侯刚, 赵慧清, 吕璐璐. 自固化磷酸钙人工骨与异体骨治疗 Sanders II-IV型跟骨骨折的病例对照研究[J]. 中国骨伤, 2018, 31(7): 594-598.
- [28] 张翼, 张岩, 李甲振, 卢新昌, 张彬, 刘永奎. 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.
- [29] 施翔文, 吴一芑, 徐永清. 生物支架材料修复感染性骨缺损的研究进展[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2022, 19(5): 80-84+89.
- [30] 历龙飞, 张朝旭, 张馨丹, 张立群, 赵宇, 薛佳佳. 先进材料在骨缺损修复中的应用研究进展[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2022, 15(1): 63-69.
- [31] 周思佳, 姜文学, 尤佳. 骨缺损修复材料: 现状与需求和未来[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(14): 2251-2258.
- [32] 黄明智, 庄勇, 张皓, 尚显文. 骨小梁钛金属颈椎间融合器在颈椎病前路融合中的应用及解剖形态学特征[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(31): 4937-4942.
- [33] Nikolaus, O.B., Abdel, M.P., Hanssen, A.D. and Lewallen, D.G. (2017) Porous Tantalum Femoral Metaphyseal Cones for Large Femoral Bone Defects in Revision Total Knee Arthroplasty. *JBJS Essential Surgical Techniques*, **7**, e17. <https://doi.org/10.2106/JBJS.ST.16.00096>
- [34] 陆史俊, 左保齐, 刘洪臣. 丝素蛋白生物支架材料在骨组织工程中的应用进展[J]. 中国修复重建外科杂志, 2014, 28(10): 1307-1310.
- [35] 李莹, 马强, 郭建军, 邓罡, 刘修响, 赵娜, 武国华. 纳米丝素蛋白微球的制备及性能研究[J]. 生物资源, 2021, 43(5): 489-495.
- [36] 李艾元, 施心雨, 岳万福. 丝素支架在肌肉骨骼组织工程的应用及研究进展[J]. 丝绸, 2021, 58(11): 18-22.
- [37] Chen, Y.J., Han, L.J., Chen, H.L., Jia, S.L. and Dong, L.S. (2018) Effect of Nanoscale Dispersed Silica on the Fabrication of Microporous poly(L-Lactic Acid) by Uniaxial Stretching. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **112**, 423-431. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.06.029>
- [38] Ignatius, A.A., Betz, O., Augat, P. and Claes, L.E. (2001) *In Vivo* Investigations on Composites Made of Resorbable ceramics and Poly(Lactide) Used as Bone Graft Substitutes. *Journal of Biomedical Materials Research*, **58**, 701-709. <https://doi.org/10.1002/jbm.10024>

- [39] Song, J.E., Tripathy, N., Shin, J.H., Lee, D.H., *et al.* (2017) *In Vivo* Bone Regeneration Evaluation Of Duck's Feet Collagen/PLGA Scaffolds in Rat Calvarial Defect. *Macromolecular Research*, **25**, 994-999. <https://doi.org/10.1007/s13233-017-5134-5>
- [40] Huang, T., Fan, C., Zhu, M., Zhu, Y., Zhang, W. and Li, L. (2019) 3D-Printed Scaffolds of Biomineralized Hydroxyapatite Nanocomposite on Silk Fibroin for Improving Bone Regeneration. *Applied Surface Science*, **467-468**, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.166>
- [41] Bian, T., Zhang, H. and Xing, H. (2020) Preparation and Biological Properties of Collagen/Nano-Hydroxyapatite Composite Nanofibers Based on Ordered Nano-Hydroxyapatite Ceramic Fibers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **602**, Article ID: 124802. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124802>
- [42] 顾雪梅, 杨红艳, 李玉华, 赵军. 纳米掺锶羟基磷灰石/聚乙烯醇/明胶复合水凝胶的制备及矿化性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(3): 164-167+172.
- [43] 谷敏婧, 赵飞翔, 范苏娜, 马凯, 姚响, 张耀鹏. 丝素/细菌纤维素/羟基磷灰石骨仿生支架的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(6): 6110-6115.
- [44] 赵小琦, 丁刘闯, 韩祥祯, 李俊杰, 周琦琪, 宋艳艳, 何惠宇. 3D 打印鹿角粉/聚乙烯醇支架与纳米级羟基磷灰石/聚乙烯醇支架的性能比较[J]. 口腔医学研究, 2018, 34(9): 1011-1015.
- [45] 洪杰, 卢雅明, 龚春华, 贲永光. 羟基磷灰石/壳聚糖复合微球的制备及其表征[J]. 广东药科大学学报, 2021, 37(5): 1-5.
- [46] 王志英, 杨秋霞, 田新利, 林雪霞. 含硅羟基磷灰石调节巨噬细胞极性促进成骨分化机制研究[J]. 天津医药, 2021, 49(9): 910-916.
- [47] 袁秋华, 石鑫, 梁进仁, 万磊, 简友亮, 杨袁, 李瑞龙, 代小毅, 吴文珊. 铈锌共掺杂 HA-GP 复合物合成及抗菌性研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(3): 280-286.
- [48] Jahan, K. and Tabrizian, M. (2016) Composite Biopolymers for Bone Regeneration Enhancement in Bony Defects. *Biomaterials Science*, **4**, 25-39. <https://doi.org/10.1039/C5BM00163C>
- [49] 孟露露, 刘浩, 刘涵, 张军, 李瑞欣, 高丽兰. 基于低温 3D 打印丝素蛋白/ I 型胶原/羟基磷灰石支架的力学性能[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(22): 3718-3723.
- [50] 范谊, 刘亚东, 崔宇韬, 刘贺, 田宇航, 李少荣, 王淦, 吴丹凯, 彭传刚. 天然及复合海藻酸盐水凝胶改性和构建复合体系修复骨缺损[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(28): 4749-4756.
- [51] 柳志伟, 闫旭瑾, 余梦婷, 刘凡, 鄢国平. 聚乳酸/羟基磷灰石复合材料微球的制备及表征[J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(5): 525-528+533.
- [52] 陈何维, 袁波, 王林楠, 杨曦, 朱向东, 宋跃明, 张兴栋. 羟基磷灰石/氧化石墨烯/氢氧化镁复合涂层镁-钙合金的耐蚀性及骨折修复效果研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3698-3706.
- [53] 李友瑞, 张子晗, 熊世江, 宋花蕾. 聚己内酯/纳米羟基磷灰石静电纺纤维膜的制备及其生物活性[J]. 滨州医学院学报, 2021, 44(4): 287-291.