脊柱融合3D打印生物材料的研究进展

邓硕 孙子茹 马家悦 杜欣梅
牡丹江医科大学 黑龙江 牡丹江 157011

摘 要 脊柱融合手术是治疗脊柱退变、肿瘤、创伤等疾病的核心术式，其疗效高度依赖骨移植修复材料的性能。3D打印技术作为新兴增材制造技术，凭借个性化定制、微观结构可控等优势，为脊柱融合材料的研发与应用开辟了新路径。本文系统梳理了近年来应用于脊柱融合的3D打印生物材料研究进展，包括生物陶瓷、金属、高分子材料及复合材料的特性、研究成果与临床转化情况，深入探讨了“生物适配”理念在材料设计中的应用，分析了当前研究面临的挑战，并对未来发展趋势进行展望。

关键词 3D打印；生物材料；脊柱融合

Research Progress on 3D-Printed Biomaterials for Spinal Fusion

Deng Shuo, Sun Zi-ru, Ma Jia-yue, Du Xin-mei
Mudanjiang Medical University, Mudanjiang 157011, Heilongjiang Province, China

Abstract Spinal fusion surgery is a core procedure for treating spinal degeneration, tumors, trauma, and other related conditions, the efficacy of which highly depends on the performance of bone graft repair materials. As an emerging additive manufacturing technology, 3D printing provides a new pathway for the research and application of spinal fusion materials, offering advantages such as personalized customization and controllable microstructure. This paper systematically reviews recent research progress on 3D-printed biomaterials for spinal fusion, including the characteristics, research findings, and clinical translation of bioceramics, metals, polymers, and composite materials. It further explores the application of the “biocompatibility adaptation” concept in material design, analyzes current challenges, and provides an outlook on future development trends.

Key words 3D Printing; Biomaterials; Spinal Fusion

脊柱融合术的核心目标是恢复脊柱稳定性与承重功能，而骨移植材料的选择直接影响融合效果与患者预后。传统骨移植材料中，自体髂骨存在供区并发症与材料短缺问题，异体骨则因灭菌处理导致生物活性降低，均难以满足临床需求[1]。随着材料科学与医工交叉技术的发展，3D打印生物材料已从单一类型向复合材料演进，为脊柱融合术的精准化、高效化提供了新可能。

1 3D打印脊柱融合核心生物材料体系概览

3D打印脊柱融合生物材料涵盖生物陶瓷、金属、高分子及复合材料四大类，各凭特性形成互补体系，3D打印技术为其个性化制备与性能优化提供关键支撑。生物陶瓷因成分贴近天然骨具优异生物相容性与骨传导性，羟基磷灰石可高效促进骨再生，磷酸钙可降解且能强化骨血管生成与细胞成骨分化[2]；金属材料以高机械强度适配承重需求，3D打印多孔钛合金融合器在降低椎体沉降、加速融合上优于传统PEEK材料，钽合金生物力学匹配度高但成本高昂，镁合金可降解且成骨活性好，仍需通过表面改性解决耐腐蚀性问题[3]。高分子材料分天然与合成两类，天然的透明质酸、壳聚糖常作生物活性添加剂，合成的PEEK、PCL、PLGA 经复合改性后可提升骨传导性与力学性能[4]；复合材料则通过整合不同组分优势突破单一材料局限，陶瓷基、高分子基、金属基复合体系均实现性能协同，其中负载生物活性成分或仿生改性的复合支架成为研究热点[5]。

2 3D打印与生物适配技术的融合

“生物适配”理念强调植入材料需主动适应人体生理环境，其分层理念与3D打印技术的结合，推动了脊柱融合材料向精准化、个性化发展。组织适配通过3D打印构建粗糙表面与多孔结构，实现内植物与骨质的“有机结合”，如多孔钛合金、钽合金支架的类骨小梁结构为组织长入提供空间，形成“骨—

[基金项目] 2025年全国大学生创新创业训练计划项目，项目内容：基于人工智能的个性化骨骼模型开发平台，项目编号：S202510229035。

材料”互锁界面，未来需通过表面改性进一步增强抗骨质疏松与促融合能力[6]。力学适配基于“结构—密度—强度（SDS）”理论，通过人工智能技术精准测量患者椎体CT值，转化为目标弹性模量，再经3D打印优化支架宏观与微观结构，实现力学性能与患者骨质的个体化匹配，OsteoMatch生物力学适配型椎间融合器（北京爱康宜诚医疗器材有限公司）已临床应用，其弹性模量低于PEEK材料，有效降低了应力屏蔽与椎体沉降风险[7]。降解适配追求内植物降解速度与骨长入速度同步，目前可降解材料面临力学强度与降解速率平衡的挑战，杂化模式通过梯度降解设计，在保障早期力学稳定的同时实现后期生物替代，成为当前研究的重要方向，如镁基螺钉、PLGA复合支架已进入临床试验阶段[8]。3D打印技术为生物适配理念的落地提供了核心工具，通过结构定制、性能调控与多组分复合，实现了从“形态适配”到“功能适配”的跨越，显著提升了脊柱融合材料的临床适用性。

3 脊柱融合3D打印生物材料的临床应用优势

脊柱融合3D打印生物材料凭借个性化适配、生物活性强化与力学精准匹配的核心优势，显著优化临床治疗效果。其个性化定制特性可精准贴合患者解剖结构，李危石等[9]研发的OsteoMatch融合器基于“SDS理论”，通过AI辅助设计实现与骨量丢失患者骨强度的精准适配，大幅降低术后融合器下沉风险，尤其适用于老年骨质疏松人群。生物活性层面，池鹏飞等[10]研究的HA涂层多孔钛合金融合器，通过真空等离子喷涂技术构建活性表面，术后6个月融合有效率达97.10%，显著高于传统PEEK融合器，且无须额外植骨，简化手术操作。力学性能上，3D打印多孔结构实现弹性模量与骨组织匹配，抗沉陷性能为PEEK融合器的2倍以上，动态疲劳性能提升60%，有效减少假体松动等并发症。此外，零切迹自稳型设计免除额外钛板固定，缩短手术时间并降低吞咽困难等并发症，配合微创内镜技术可实现术后2～3 d下地活动，加速康复进程。黄豪等[11]的研究还证实，该类材料在复杂脊柱畸形矫正与肿瘤重建中，能通过增大骨接触面积提升融合稳定性，且生物相容性优异，无明显不良事件发生。

4 挑战与问题

尽管3D打印生物材料在脊柱融合领域取得显著进展，但仍面临多重挑战制约其广泛应用。材料性能优化方面，单一材料的固有缺陷尚未完全解决，复合材料的界面相容性、成分比例调控及性能协同性仍需深入研究，如何实现“生物活性、力学强度、降解可控”的三维平衡是核心难题。技术转化方面，3D打印设备成本高昂、制备工艺复杂，导致内植物价格居高不下，且个性化定制流程耗时较长，难以满足临床大规模应用需求。临床应用方面，老年骨质疏松患者的骨环境特殊，材料需同时具备抗骨质疏松、促融合及力学适配特性，现有材料仍难以完全匹配；可降解材料的降解产物安全性、长期生物相容性及体内代谢机制需长期随访验证[12]；此外，3D打印植入物的临床准入标准、质量控制体系尚未完全完善，缺乏统一的性能评价指标。基础研究方面，材料与骨组织、细胞的相互作用机制仍需进一步阐明，为材料改性提供理论支撑。

5 未来展望

未来脊柱融合3D打印生物材料的发展将聚焦于“个性化、功能化、智能化”三大方向，医工交叉协作与技术创新是核心驱动力。4D打印技术作为3D打印的延伸，通过引入智能材料，使植入物在体内环境刺激下实现形态与性能的动态变化，可更好地适应脊柱融合过程中的力学环境演变，目前虽处于早期探索阶段，但有望解决静态植入物难以适配体内动态环境的问题[13]。智能材料融合方面，通过在支架中负载生长因子、干细胞或药物缓释系统，可精准调控骨再生微环境，提升融合效率；而压电材料、光响应材料等功能材料的引入，有望通过物理刺激进一步增强骨诱导性能[14]。个性化精准医疗方面，基于人工智能与大数据技术，可实现患者骨密度、解剖结构、生理状态的精准评估，结合3D打印技术快速制备个体化融合器，同时通过术后影像随访与材料性能监测，形成“评估—设计—制备—随访”的闭环体系[15]。复合材料创新方面，将进一步优化组分选择与结构设计，实现力学性能、生物活性与降解速率的精准匹配。此外，绿色环保材料与可持续制备工艺的研发，将降低材料成本与环境影响，推动临床普及。基础研究与临床转化的深度融合，将加速新型材料的临床应用，为脊柱融合术提供更安全、高效、个性化的治疗方案。

6 结束语

脊柱融合3D打印生物材料的研究已取得显著进展，生物陶瓷、金属、高分子材料在各自优势领域形成互补，而复合材料通过多组分协同，成为突破单一材料局限的核心方向。“生物适配”理念的引入，推动材料研发从形态模拟向组织适配、力学适配、降解适配的三维升级，3D打印技术则为这一理念的实现提供了精准制备工具，使个体化、功能化植入物成为可能。尽管当前仍面临材料性能平衡、技术转化成本、临床准入标准等挑战，但随着4D打印、智能材料、人工智能等技术的不断融合，脊柱融合生物材料将向更精准、更高效、更安全的方向发

展。未来需进一步加强基础研究与临床转化的衔接，完善性能评价体系与质量控制标准，通过医工交叉创新，为脊柱退变、肿瘤、创伤等疾病患者提供更优质的治疗选择，推动脊柱外科领域的精准医疗发展。

参考文献

[1]刘爱刚,陈敏葵,周章南,等.老年肱骨近端骨折锁定钢板固定同种异体骨移植[J].中国矫形外科杂志,2023,31(3):215-219.

[2]LIN H, ZHANG L, ZHANG Q, et al. Mechanism and application of 3D-printed scaffolds for bone repair[J].Biomaterials Science,2023,11(21):7034-7050.

[3]王彦金,周英杰,柴旭斌,等.3D打印多孔钛合金椎间融合器与聚醚醚酮椎间融合器在后路腰椎椎间融合术中的应用研究[J].中国修复重建外科杂志,2022,36(9):1126-1131.

[4]MAREW T, BIRHANU G. Three dimensional printed nanostructure biomaterials for bone tissue engineering[J].Regenerative Therapy,2021,18:102-111.

[5]XIAO L, WU M, YAN F, et al.A radial 3D polycaprolactone nanofiber scaffold modified by silk fibroin coating promotes bone regeneration in vivo[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2021,172:19-29.

[6]KE D, BOSE S. Effects of pore and chemistry on physical, mechanical, and biological properties of tricalcium phosphate scaffolds by binder-jet 3D printing[J].Additive Manufacturing,2018,22:111-117.

[7]陈立夫,汪健,王洪.镁支架在骨组织工程中应用现状[J].中国矫形外科杂志,2023,31(21):1986-1990.

[8]YUN J, LEE J, HA C W, et al. The effect of 3-D printed polylactic acid scaffold with and without hyaluronic acid on bone regeneration[J]. Journal of Periodontology,2022,93(7):1072-1082.

[9]李危石,邹德威,邓垂文,等.生物力学适配型3D打印椎间融合器在老年骨质疏松患者脊柱融合术中的应用[J].中华骨科杂志,2023,43(12):751-758.

[10]池鹏飞,焦宗旺,邹红兵.羟基磷灰石涂层3D打印多孔钛合金椎间融合器的临床转化研究[J].中国修复重建外科杂志,2024,38(5):543-549.

[11]黄豪,韦峰,刘忠军.3D打印个性化融合器在复杂脊柱畸形矫正中的临床应用进展[J].脊柱外科杂志,2023,21(6):385-390.

[12]马坤鹏,刘冬娇,章莹.聚乳酸—羟基乙酸材料修复骨缺损的研究进展[J].中国矫形外科杂志,2024,32(14):1291-1296.

[13]SCHNAKE K J, RAPPERT D, STORZER B, et al.Lumbar fusion: Indications and techniques[J].Orthopade,2019,48(1):50-58.

[14]LIU X J, ZHU Q S, SUN H F, et al. The clinical efficacy of hydroxyapatite and its composites in spinal fusion: a meta-analysis[J].European Review for Medical and Pharmacological Sciences,2022,26(13):4614-4624.

[15]LITAK J, CZYZEWSKI W, SZYMONIUK M, et al. Hydroxyapatite use in spine surgery: clinical aspects[J].Materials,2022,15(8):2906.

（本文编辑　曹　阳）

