DOI：10.3969/j.issn.1004-4949.2026.17.047

纳米羟基磷灰石在口腔种植中的研究进展

袁鸿飞[1, 2]，胡 杨[1, 2]

[1.新疆医科大学第一附属医院（附属口腔医院）口腔修复种植科，新疆 乌鲁木齐 830054；

2.新疆维吾尔自治区口腔医学研究所，新疆 乌鲁木齐 830054]

[摘 要] 纳米羟基磷灰石（nHAp）因具有良好的生物相容性、骨传导性和表面活性，已成为口腔种植材料领域的重要研究对象。nHAp可促进成骨细胞黏附与分化、改善早期成骨反应，并作为复合支架的无机组分发挥空间维持和骨传导作用。现有证据以临床前研究为主，各研究在材料组成、制备工艺、模型及评价指标上差异较大；部分临床研究采用多组分复合体系，疗效难以单独归因于nHAp，且不同体系与对照材料在新骨形成及种植体稳定性方面结果尚不一致。本文重点分析nHAp在种植体表面改性、种植相关骨缺损修复、上颌窦提升中的应用情况，以期为nHAp材料的优化设计、临床应用及后续研究提供参考。

[关键词] 纳米羟基磷灰石；口腔种植；种植体表面；骨缺损修复；上颌窦提升

[中图分类号] R783.6 [文献标识码] A [文章编号] 1004-4949（2026）17-0195-04

Research Progress of Nano-hydroxyapatite in Oral Implantology

YUAN Hongfei[1, 2], HU Yang[1, 2]

[1.Department of Prosthodontics and Implantology, the First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University (Affiliated Stomatological Hospital), Urumqi 830054, Xinjiang, China;

2.Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Stomatology, Urumqi 830054, Xinjiang, China]

[Abstract] Nano-hydroxyapatite (nHAp) has become an important research subject in the field of oral implant materials owing to its favorable biocompatibility, osteoconductivity and surface activity. nHAp can promote the adhesion and differentiation of osteoblasts and improve early osteogenic response, and act as the inorganic component of composite scaffolds to perform space maintenance and osteoconduction. Current evidence is mainly derived from preclinical studies, and there are substantial differences among studies in material composition, preparation technology, models and evaluation indicators. Some clinical studies adopt multi-component composite systems, making it difficult to attribute therapeutic effects solely to nHAp. In addition, inconsistent results are reported regarding new bone formation and implant stability between different systems and control materials. This paper mainly analyzes the application of nHAp in implant surface modification, repair of implant-related bone defects and maxillary sinus elevation, so as to provide references for the optimized design, clinical application and further research of nHAp materials.

[Key words] Nano-hydroxyapatite; Oral implantology; Implant surface; Bone defect repair; Maxillary sinus elevation

口腔种植学（oral implantology）是利用种植体支持修复重建缺失牙功能与形态的重要领域，其核心目标是在获得稳定骨结合的基础上恢复咀嚼功能，并维持种植体周围软硬组织健康。随着患者对修复效率、舒适度和长期稳定性的要求不断提高，如何促进早期骨形成、改善骨量不足区域的再生条件并提高复杂骨缺损的修复质量，已成为种植材料研究的重要方向。近年来，纳米羟基磷灰石（nano-hydroxyapatite, nHAp）因与人体骨组织的化学组成和纳米结构高度相似而受到广泛关注[1]。与普通HAp相比，nHAp具有更大的比表面积、更高的表面能及更强的吸附能力，有利于促进成骨细胞黏附、增殖与成骨分化，并可增强骨-种植体界面的生物活性[2]。现有临床研究多

第一作者：袁鸿飞（1999.3-），男，安徽合肥人，硕士研究生，主要从事口腔修复材料学方面研究

通讯作者：胡杨（1983.4-），男，湖北黄冈人，硕士，主任医师，副教授，主要从事骨组织工程及口腔

医学美学美容

围绕nHAp及相关HA纳米材料在种植体表面功能化、牙槽嵴保存与上颌窦提升中的临床研究[3-5]，但证据仍有限，nHAp的独立作用及临床适用范围尚无一致结论。本文就nHAp在种植体表面功能化、种植相关骨缺损修复及上颌窦骨增量中的研究证据作一综述，以期为相关材料设计和临床方案选择提供依据。

1 nHAp在种植体表面改性中的应用

1.1 nHAp涂层与早期成骨反应 种植体骨结合是种植修复获得长期稳定性、实现功能负荷传递并维持种植体周围组织健康的生物学基础。而种植体表面改性可直接调控骨种植体界面的早期细胞反应，是提高骨结合质量的重要策略。有研究在大鼠股骨模型中比较约20 nm nHAp涂层表面与双酸蚀（DAE）表面，与DAE组相比，nHAp组术后1周骨桥蛋白（Opn）和骨钙素（Ocn）表达显著升高，术后2周Ⅰ型胶原和成骨特异性转录因子表达显著升高[6]。提示nHAp涂层可影响植入早期的成骨相关分子表达，但是，两组的骨种植体接触率、骨面积分数及新骨纳米力学指标均无显著差异，说明分子水平的变化尚未转化为相应的组织学和力学优势。因此，现有结果更适合将nHAp涂层的作用理解为对早期成骨微环境的调节，而不能仅根据成骨相关基因表达升高认定其已经改善骨结合。后续研究应延长观察时间，并结合组织学、力学及功能负荷评价，明确早期分子反应与长期骨结合之间的关系。

1.2 nHAp涂层与早期界面骨形成 早期界面骨形成是决定种植体初期稳定性和长期骨结合的关键环节。Almeida D等[7]从组织学层面评价了nHAp表面的早期骨结合表现。植入28 d时，nHAp组骨种植体接触率（BIC）及螺纹区骨面积分数均高于双酸蚀组，提示nHAp表面有助于促进低密度骨区域的早期界面骨形成。但该研究证据仅来自绵羊髂嵴低密度骨模型，观察时点仅28 d，尚不足以判断界面骨的后续成熟及功能负荷下的稳定性。评价nHAp涂层的早期界面成骨作用，除BIC和骨面积分数外，还应结合新生骨成熟度、种植体稳定性及界面力学性能综合判断。未来研究可设置连续观察时点，并在低密度颌骨及功能负荷模型中进一步验证，以明确nHAp涂层对早期界面骨形成的实际作用。

1.3 nHAp构建种植体表面复合体系 以nHAp为核心构建种植体表面复合体系，可通过多组分协同弥补单一涂层的性能不足，构建兼具成骨促进、血管相关调控和抗菌潜力的复合表面体系。Liao Z等[8]在钛表面原位形成磷酸钛层，再以水热法生长nHAp晶体。所得TiP/nHAp复合涂层可促进MC3T3-E1细胞黏附以及OCN、Runx2和ALP表达，动物实验亦显示骨结合改善；提示磷酸钛中间层可增强nHAp涂层与钛基底的结合，同时保留其成骨活性，为兼顾界面稳定性与生物学功能提供了材料设计思路。Bonato RS等[9]比较HA纳米薄层涂层植体联合或不联合rhBMP-7在常规备洞和过度备洞条件下的成骨表现，发现联合rhBMP-7可促进过度备洞位点的新骨形成，而常规备洞位点的组间差异未达到统计学意义。Pinto TS等[10]将不同种植体表面的条件培养基作用于人脐静脉内皮细胞，发现10 nm nHAp表面相关条件培养基可上调VEGF、eNOS和AKT表达，并促进内皮细胞迁移，提示其可能影响血管形成相关的细胞反应。Singh MR等[11]对Sr/Zn掺杂nHAp的生物学作用进行评价，结果提示其具有成骨和抗菌潜力。但rhBMP-7联合涂层和Sr/Zn掺杂均属于复合功能化体系，相关作用是多种成分共同作用的结果；内皮细胞研究提供的则是体外机制线索，不能直接等同于体内血管形成。现阶段，nHAp作为可负载生物活性分子和功能性离子的界面平台。未来还需进一步明确不同组分的协同作用及长期安全性，并结合规范的动物和临床研究，推动多功能nHAp种植体表面由实验研究逐步向临床应用转化。

2 nHAp在种植相关骨缺损修复中的应用

2.1 nHAp复合修复支架的构建与应用 种植区骨量与骨质量是影响种植体初期稳定性和后续骨结合的重要局部因素。nHAp与天然骨无机相组成相近，可与水凝胶、纤维膜及生物活性成分结合，构建复合修复支架。Zhang L等[12]构建了由骨缺损侧壳聚糖/聚γ-谷氨酸/nHAp水凝胶、中层富血小板纤维蛋白及软组织侧聚己内酯/明胶纳米纤维组成的三层支架，分别发挥缺损填充、活性物质释放和软组织屏障作用，并在兔牙槽骨缺损中促进新骨形成。而多孔气凝胶结构可为细胞黏附、成骨分化和新骨长入提供适宜的三维微环境，进一步拓展了nHAp在骨缺损修复中的应用。Souto-Lopes M等[13]制备的nHAp/壳聚糖生物气凝胶可提高牙囊来源间充质干细胞的SP7和骨桥蛋

医学美学美容

白表达，并在大鼠颅骨临界尺寸缺损模型中增加骨体积和新骨形成。除支架的整体结构外，nHAp的微观形貌也可能影响其成骨活性。Yu F等[14]发现高长径比HAp-100材料在小鼠下颌骨缺损中具有较好的成骨效果，Unnikrishnan PS等[15]以聚L-乳酸纱线增强的硅包覆nHAp/明胶支架修复猪下颌骨缺损，6个月后植入钛种植体，骨修复接近自体骨且骨结合良好，提示其可用于种植前颌骨缺损修复。总体而言，nHAp在复合支架中主要作为骨传导性无机组分，并通过材料复合与结构调控实现缺损填充、空间维持和成骨微环境构建。后续研究应设置各组分的独立对照，并在种植相关颌骨缺损模型中验证其修复效果。

2.2 nHAp复合引导骨再生膜的构建与应用 除作为缺损填充支架外，nHAp还可作为生物活性无机组分用于构建引导骨再生膜，使其有利于缺损区域的骨组织再生。Li B等[16]制备丝素蛋白/甲基丙烯酰化明胶/nHAp复合膜，其中质量比为7∶2∶1的膜断裂伸长率约为110%，能够维持纳米纤维结构28 d，并促进大鼠颅骨缺损的骨再生。与填充型支架相比，引导骨再生膜强调屏障功能和再生空间维持，nHAp在其中主要提供骨传导性和表面生物活性，而膜的力学性能、屏障稳定性及降解行为则由整个复合体系共同决定。

2.3 nHAp复合支架的局部递药与协同修复 种植体周围炎可引起种植体周围软组织炎症和支持骨丧失，降低骨结合及种植体稳定性，甚至导致种植失败，因此，开发兼具局部递药和骨修复功能的材料具有重要意义。有研究[17]在6只比格犬体内构建种植体周围炎伴骨缺损模型，评估载米诺环素纳米羟基磷灰石/壳聚糖（nHA/CS）复合支架的修复效能，证实该支架可调控局部炎症、负载抗菌药物并促进骨缺损修复。相较于无感染骨缺损模型，该研究同步兼顾药物缓释抗菌与骨再生，更贴合种植体周围炎骨缺损的临床治疗需求。后续可优化支架孔隙结构、降解特性与释药行为，并开展长期大动物实验及临床试验，进一步验证其控制炎症、促进骨再生、维持种植体稳定的作用。

3 nHAp在上颌窦提升中的应用

上颌后牙区常因剩余牙槽骨高度不足而影响种植体植入。上颌窦提升后维持稳定的成骨空间并促进新骨形成，是促进种植体骨结合和种植修复稳定的重要条件。nHAp具有良好的生物相容性和骨传导性，且易于复合和结构设计，既可作为颗粒型骨替代材料的无机成分，也可通过3D打印构建多孔支架，还能够与高分子材料及自体血小板浓缩物联合，为上颌窦骨增量提供多种材料选择。

3.1 3D打印nHAp复合支架 3D打印技术可精确构建具有可控孔隙结构和个体化外形的支架。Thammanoonkul P等[18]将21例患者的22侧上颌窦随机分为牛源骨替代材料组与聚己内酯浸渍3D打印nHAp（3D PHA-PCL）组。植骨6个月后，两组骨增量高度及体积稳定性无显著差异，但3D PHA-PCL组新骨形成比例低于牛源骨组，提示该支架可维持上颌窦提升后的成骨空间，但早期新骨形成效果不及牛源骨材料。综合来看，3D PHA-PCL支架现阶段的优势主要体现在结构可设计性和空间维持能力，但其成骨性能仍需进一步优化。

3.2 nHAp复合骨替代材料 单一nHAp在力学性能、降解速率及成型能力方面存在局限，因此多与天然或合成高分子、无机材料等复合。刘芳等[19]在上颌窦内提升同期种植患者中比较了普通羟基磷灰石复合材料与nHAp复合材料，结果显示，nHAp复合材料组的牙槽骨吸收量较低，骨密度、种植体稳定性及24个月种植体存留率较高。刘秉尧等[20]在上颌窦外提升术中比较了A-PRF、CGF联合nHAp与Bio-Oss，联合组在术后症状、软组织愈合和种植体稳定性方面表现较好，而Bio-Oss组术后6个月的骨密度、骨增量和骨高度较高。由于两项研究使用的均为多组分材料，其临床结果反映的是整体治疗方案的作用，不能单独归因于nHAp。现有证据更适合支持nHAp作为上颌窦提升复合材料中的功能性组分，其骨增量效果是否优于成熟骨替代材料，仍需进一步验证。

总体来看，nHAp复合骨替代材料主要优势在于结构可设计性和复合能力，现阶段更适合作为可根据缺损形态和手术需求优化的复合骨替代成分，未来可优化nHAp复合材料的组成、孔隙结构和降解性能，结合数字化设计与3D打印技术开发个体化支架；并通过多中心、长期临床研究评价新骨形成、种植体存留及增量骨稳定性，明确其适应证和长期效果。

4 总结与展望

nHAp具有良好的生物相容性、骨传导性、界

医学美学美容

面活性和复合性能。目前，nHAp相关研究主要涉及种植体表面改性、种植相关骨缺损修复和上颌窦提升。未来应统一材料制备与评价标准，优化复合体系的组成与性能，并结合3D打印、离子掺杂及局部递药等技术，进一步拓展nHAp的应用功能。同时，还应开展多中心、长期临床研究，明确不同nHAp材料体系的适应证及远期效果。

［参考文献］

[1]Pushpalatha C,Gayathri VS,Sowmya SV,et al.Nanohydroxyapatite in dentistry:A comprehensive review[J].Saudi Dent J,2023,35(6):741-752.

[2]Hoveidaei AH,Sadat-Shojai M,Mosalamiaghili S,et al.Nano-hydroxyapatite structures for bone regenerative medicine: Cell-material interaction[J].Bone,2024,179:116956.

[3]Ko YC,Lee D,Koo KT,et al.A randomized controlled trial of immediate implant placement comparing hydroxyapatite nano-coated and uncoated sandblasted/acid-etched implants using a digital surgical guide[J].Int J Implant Dent,2024,10(1):29.

[4]Kijartorn P,Wongpairojpanich J,Thammarakcharoen F,et al. Clinical evaluation of 3D printed nano-porous hydroxyapatite bone graft for alveolar ridge preservation:A randomized controlled trial[J].J Dent Sci,2022,17(1):194-203.

[5]Nour M,Shawky M,Abaas RA,et al.Two Stage Sinus Lifting Using Nanohydroxyapatite Particles Versus Deproteinized Bovine Bone:Randomized Clinical Trial[J].Clin Implant Dent Relat Res,2025,27(1):e13410.

[6]Kasai H,Bergamo ET,Balderrama ÍD,et al.The effect of nano hydroxyapatite coating implant surfaces on gene expression and osseointegration[J].Med Oral Patol Oral Cir Bucal,2024,29(3):e326-e333.

[7]Almeida D,Sartoretto SC,Calasans-Maia JA,et al.In vivo osseointegration evaluation of implants coated with nanostructured hydroxyapatite in low density bone[J].PLoS One,2023,18(2):e0282067.

[8]Liao Z,Zhang L,Lan W,et al.In situ titanium phosphate formation on a titanium implant as ultrahigh bonding with nano-hydroxyapatite coating for rapid osseointegration[J]. Biomater Sci,2023,11(6):2230-2242.

[9]Bonato RS,Fernandes GVO,Calasans-Maia MD,et al.The Influence of rhBMP-7 Associated with Nanometric Hydroxyapatite Coatings Titanium Implant on the Osseointegration:A Pre-Clinical Study[J].Polymers (Basel),2022,14(19):4030.

[10]Pinto TS,Martins BR,Ferreira MR,et al.Nanohydroxyapatite-Blasted Bioactive Surface Drives Shear-Stressed Endothelial Cell Growth and Angiogenesis[J].Biomed Res Int,2022,2022:1433221.

[11]Singh MR,Sekaran S,Duraisamy R,et al.Osteogenic Potential of Sr/Zn-Doped Nano Hydroxyapatite Coated Dental Implants:A Systematic Review[J].J Long Term Eff Med Implants,2025,35(4):21-35.

[12]Zhang L,Dong Y,Liu Y,et al.Multifunctional hydrogel/platelet-rich fibrin/nanofibers scaffolds with cell barrier and osteogenesis for guided tissue regeneration/guided bone regeneration applications[J].Int J Biol Macromol,2023,253(Pt 4):126960.

[13]Souto-Lopes M,Grenho L,Manrique Y,et al.Bone regeneration driven by a nano-hydroxyapatite/chitosan composite bioaerogel for periodontal regeneration[J].Front Bioeng Biotechnol,2024,12:1355950.

[14]Yu F,Lian R,Liu L,et al.Biomimetic Hydroxyapatite Nanorods Promote Bone Regeneration via Accelerating Osteogenesis of BMSCs through T Cell-Derived IL-22[J]. ACS Nano,2022,16(1):755-770.

[15]Unnikrishnan PS,Iyer S,Manju V,et al.Nanocomposite fibrous scaffold mediated mandible reconstruction and dental rehabilitation:An experimental study in pig model[J]. Biomater Adv,2022,133:112631.

[16]Li B,Chen Y,He J,et al.Silk fibroin/methacrylated gelatine/hydroxyapatite biomimetic nanofibrous membranes for guided bone regeneration[J].Int J Biol Macromol,2024,263(Pt 2):130380.

[17]李紫含,杨楠,方君怡,等.3D打印载米诺环素nHA/CS复合支架修复犬种植体周围炎伴骨缺损[J].海南医科大学学报,2026,32(8):579-586.

[18]Thammanoonkul P,Limpattamapanee S,Thammarakcharoen F,et al.Polycaprolactone Impregnated 3D Printed Nanohydroxyapatite for Sinus Augmentation:A Randomized Controlled Trial[J].Clin Exp Dent Res,2025,11(5):e70237.

[19]刘芳,李振,谢小飞,等.2种羟基磷灰石复合材料在上颌窦内提升术植骨同期植入种植体中的临床效果[J].上海口腔医学,2022,31(3):265-269.

[20]刘秉尧,虞晓东,李翠梅,等.A-PRF、CGF结合纳米羟基磷灰石在上颌窦外提升种植术中的应用效果[J].上海口腔医学,2025,34(1):43-47.

收稿日期：2026-8-15　　编辑：刘雯

医学美学美容