

种植体表面改性研究进展：抗菌、成骨与生物应用

王起¹，崔秀伟²，杨飞洋¹，尹贻鑫³

1. 山东医药大学口腔医学院，山东烟台 264003；2. 济宁口腔医院牙周黏膜一科，山东济宁 272004；3. 济南市口腔医院山北门诊部，山东济南 250100

【摘要】 种植体已成为口腔种植科和骨科修复治疗中的核心植入物，但种植体周围炎和骨结合不良仍是导致种植失败的主要诱因，严重限制临床疗效。种植体表面改性通过调控表面物理形貌与化学组成，协同实现抗菌与成骨功能的优化，提升种植成功率。本文系统梳理了近年来种植体表面改性技术的研究进展，从抗菌改性、成骨改性及抗菌-成骨协同改性三个方面阐述技术分类和作用机制，归纳改性表面在种植体周围感染、骨缺损修复、骨质疏松及糖尿病等特殊宿主条件下的应用效果。分析了当前存在的功能协同性不足、长效稳定性欠佳等核心挑战，并对未来多功能协同、智能响应型改性技术的发展方向进行了展望，为后续研究与临床应用提供参考。

【关键词】 种植体；表面改性；抗菌；成骨；骨结合；生物相容性

【中图分类号】 R783.1 **【文献标志码】** A

1 引言

钛及钛合金种植体已广泛应用于口腔修复、骨科骨缺损重建等领域，但种植体周围炎和骨结合不良是导致种植失败的核心原因，数据显示种植体植入后5年失败率为9.7%，10年后上升至19.2%^[1]。主要归因于两方面：一是细菌黏附定植形成生物膜，诱发慢性炎症、进行性骨吸收，最终导致种植体松动脱落^[2]；二是钛材料本身生物惰性，导致植入物与周围骨组织之间的整合不良^[3]。

种植体表面改性可通过调控表面的物理形貌、化学组成等特性，实现抗菌-成骨的双协同优化。早期喷砂酸蚀（sandblasted, large-grit, acid-etched, SLA）、阳极氧化等简单改性技术可以优化种植体表面的粗糙度和生物相容性，但存在功能单一、稳定性不足等缺陷。随着材料科学的发展，纳米拓扑结构构建及生物活性智能涂层等技术相继涌现并逐步成熟，推动表面改性技术从单一功能向多功能整合跨越^[4]。

现有综述多单独论述抗菌或成骨改性，缺少对协同改性策略的分析。本文从抗菌改性、成骨改性、抗菌-成骨协同改性及生物应用四个维度展开综述，总结各类技术的作用机制与应用效果，分析当前瓶颈并展望发展方向，为相关基础研究与临床转化提供参考。

2 种植体表面抗菌改性

种植体周围炎是临床种植失败的首要原因，细菌黏附定植并形成生物膜是感染发生的核心环节。抗菌改性旨在通过表面设计抑制细菌黏附、破坏生物膜、杀灭致病菌，同时保障宿主细胞的安全性^[4]。

2.1 抗菌物质负载型表面改性

抗菌物质负载是最常用的改性方式。通过表面负载不同类型抗菌剂实现抑菌效果：抗生素类以万古霉素载胶原蛋白/羟基磷灰石涂层为例，可兼顾骨感染预防与骨结合促进，但万古霉素存在肾毒性风险^[5]。抗生素的过度使用或不当使用会加速宿主对抗菌药物的耐药性^[6]。银、锌等金属离子具备广谱抗菌、不易耐药的优势，可通过沉积或掺杂实现抑菌，但长期蓄积易产生细胞毒性，负载时应精准控释^[7]。壳聚糖等天然抗菌剂具有良好的生物相容性和低毒性，且具有良好的抗菌抗炎效果，在钛表面涂层中附着力优异^[8]。通过聚多巴胺在种植体表面接枝 N-卤胺涂层（即 N-Cl），可通过 N-H 与 N-Cl 的可逆转化实现高效杀菌，不易诱发细菌耐药且生物相容性良好^[9]。

2.2 表面形貌与拓扑结构调控

通过优化种植体表面的物理形貌、粗糙度、亲疏水性，可减少细菌黏附位点，抑制生物膜形成，且不存在诱导细菌耐药的风险。

纳米结构表面可作为抗菌载体抑制细菌的定殖。阳极氧化法制备的二氧化钛纳米管阵列，其表面粗糙度为成骨细胞提供良好的附着位点，同时又能够作为抗菌药物载体来减少细菌附着^[10]。

在 37°C 体外静态培养条件下，超疏水微纳米结构钛表面（接触角约 160°）可使金黄色葡萄球菌与大肠杆菌的 24 h 附着力降低 >90%，并有效阻止生物膜形成^[11]。经紫外线照射和等离子体处理等获得的超亲水表面（接触角 <5°），可通过氢键作用减少细菌活力^[12]。

2.3 光动力与光热抗菌技术

光动力疗法（photodynamic therapy, PDT）是指通过光敏剂被特定光谱波长的光激活，产生活性氧和单重态氧实现灭菌。通过运用亚甲蓝光动力疗法（methylene blue-mediated photodynamic therapy, MB-PDT）可以有效清除种植体表面的生物膜，且不会造成表面形貌改变，体内应用安全性良好^[13]。

光热抗菌技术通过近红外光（near-infrared light, NIR）照射使表面材料产热，通过高温破坏细菌结构。例如稀土离子和金纳米粒子涂层在 NIR 作用下可快速升温，破坏生物膜并杀灭致病菌，临床应用时需控制光照温度阈值，避免周围骨与软组织热损伤^[14]。

2.4 智能响应型抗菌表面

智能响应型涂层通过感知种植体周围 pH、酶浓度等信号的变化，实现抗菌物质的靶向释放，在提升灭菌效率的同时降低对正常组织的毒性，且具有长效稳定性。

pH 响应型涂层利用感染局部微环境 pH 下降的特点触发释药，如 pH 响应的银纳米粒子负载 TiO₂ 纳米管种植体，在酸性感染环境下加速银纳米粒子释放，广谱杀灭致病菌^[15]。

酶响应型涂层则通过感染部位高表达的酶降解载体触发释药，如 TiO₂ 纳米管表面构建透明质酸酶响应多层膜，可精准触发抗生素释放，避免药物突释带来的毒副作用^[16]。

3 种植体表面成骨改性

骨结合是种植成功的关键，种植体表面的成骨改性通过改善表面性能，促进成骨细胞黏附、增殖、分化，加速新骨形成。

3.1 生物活性陶瓷涂层

羟基磷灰石（hydroxyapatite,HA）、磷酸钙（calcium phosphate,CaP）等生物活性陶瓷生物相容性优异，可有效刺激成骨细胞增殖分化。

修饰在钛种植体表面的羟基磷灰石涂层钛纳米管，拥有良好的耐腐蚀性和成骨活性^[17]。仿生 CaP 涂层具有良好的成骨性能并能减少促炎因子的释放，抑制破骨细胞活化从而减少骨吸收^[18]。在钛表面构建的 Gel-CaP 涂层可持续释放 Ca^{2+} ，通过维持局部钙过载效应调控细胞行为，可显著促进 MC3T3-E1 细胞的黏附、增殖，上调成骨基因表达并增强 ALP 活性^[19]。

3.2 生物分子固定

细胞因子、多肽等生物分子可以调控成骨细胞的生物学行为，是优化骨结合效率的重要改性介质。

骨形态发生蛋白（bone morphogenetic proteins,BMPs）是应用最广泛的骨诱导因子，负载于 TiO_2 纳米管阵列的 rhBMP-2 可以加强骨一种植体接触率，促进骨重塑与骨结合^[20]。多肽分子稳定性高、成本低，RGD 肽与成骨生长肽 OGP 协同修饰的钛种植体表面，成骨细胞的黏附量增加，ALP 活性提高^[1]。

3.3 表面形貌调控

微纳米结构能够优化钛表面的生物学与力学性能，提升其生物相容性与骨结合能力。 TiO_2 纳米管层可以促进细胞成骨基因表达、提高矿化程度和碱性磷酸酶活性^[21]。蜂窝状 TiO_2 结构的缩小尺度能够激活抗炎巨噬细胞表型向 M2 极化，上调抗炎因子，并提高 BMP-2 的分泌，通过免疫调控间接促进骨结合^[22]。

亲水表面可促进成骨细胞的早期黏附、分化和成熟，超亲水性钛植入物表面可以增强多能间充质干细胞的早期细胞功能和成骨分化，促进植入物处的骨愈合^[12]。

3.4 化学组成与离子调控

种植体表面的化学组成和离子环境可通过改变细胞的微环境影响成骨细胞的代谢和分化。在 TiO_2 表面引入锶、锰、锂等离子，可以增强成骨能力。锶- TiO_2 纳米管涂层以及 Mn- TiO_2 微孔生物涂层可加强 MC3T3-E1 成骨细胞的黏附、增殖和分化，加速早期骨结合^[23, 24]。掺锂 TiO_2 纳米层通过锂离子缓释与纳米拓扑结构的协同效应，加强成骨细胞的黏附与铺展，提升骨整合能力^[25]。

3.5 智能时序缓释成骨涂层

时序缓释载体涂层是具备程序化调控能力的智能成骨功能涂层，可延长活性因子作用周期以持续调控骨修复微环境。构建聚乳酸/聚苹果酸静电纺丝纤维-壳聚糖载外泌体纳米粒双纳米涂层，可实现人脱落乳牙牙髓干细胞来源外泌体 30 天以上持续释放，有效诱导巨噬细胞 M2 极化，兼具优异机械稳定性，为长效免疫调节提供了新策略^[26]。

4 抗菌-成骨双功能协同设计策略

单一功能改性难以满足临床复杂需求。理想的种植体应当能够在早期快速杀菌，在晚期高效成骨。根据协同方式的不同，主要分为离子掺杂协同型、生物分子复合协同型以及

载体负载协同型。

4.1 离子掺杂协同型

离子掺杂协同是指利用某些金属离子自身同时具备抗菌与成骨的双重功能，从而避免引入多种外源物质带来的复杂性与毒性问题。例如，掺入锌的纳米线结构改造的钛表面既可促进成骨细胞的黏附、增殖和分化，又对革兰氏阴性菌及革兰氏阳性菌具有抑菌效果，可提升炎症及无炎症环境下的骨结合率^[27]。锆修饰的钛表面能够诱导巨噬细胞向 M2 型极化，借助免疫吞噬清除残余细菌，同时分泌生长因子促进成骨细胞分化和血管生成，通过免疫调控实现双功能协同^[28]。

离子掺杂协同型的优势为制备简便、涂层稳定；缺点是离子释放难以精准调控，高浓度离子易引发细胞毒性。目前研究多停留在体外实验阶段，长期体内安全性缺乏随访数据。

4.2 生物分子复合协同型

生物分子复合协同是指将抗菌与成骨功能生物分子复合固定在种植体表面。通过生物分子的高特异性来精准调控双功能。

整合靶向肽 minTBP-1、抗菌肽 KR-12 与黏附肽 GFOGER 的融合肽修饰的 3D 打印钛植入物，可实现靶向固定并保留多肽生物活性。该改性植入物生物相容性良好，对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌杀菌率超 90%，还可促进骨髓间充质干细胞成骨分化，上调成骨相关基因与蛋白表达^[29]。

生物分子复合协同型优势是生物相容性优异，劣势为多肽、生长因子易被体内蛋白酶降解失活，长期使用存在筛选耐药菌风险，且多分子共固定易发生活性拮抗、制备成本较高，目前多数研究仅完成临床前动物验证。

4.3 载体负载时空控释协同型

载体负载协同是指利用载体将抗菌剂与成骨因子分别负载，并通过分阶段的控释，早期快速释放抗菌剂消灭细菌；后期缓慢释放成骨因子促进骨再生，更好地契合植入术后的生理过程。

借助可降解的聚电解质构建自组装纳米多层涂层，将庆大霉素负载于涂层外层，而将 BMP-2 负载于涂层内层。植入体内后，外层优先降解释放庆大霉素，彻底清除术区的细菌，抑制生物膜形成；随后内层开始缓慢降解释放 BMP-2，持续诱导干细胞成骨分化，加速骨结合^[30]。

P/Sr@CO 涂层可以在近红外光热下触发杀菌、在 ROS 炎症微环境下响应抗炎，并协同 Sr²⁺促进成骨，精准衔接抗感染与骨再生^[31]。

载体负载时空控释协同型可分阶段时序释药，契合术后早期抗感染、后期促骨结合的生理规律，降低毒副作用；劣势是多层涂层制备工艺复杂，光响应体系依赖额外临床设备，目前研究多处于基础研究阶段。瓶颈是涂层与界面结合强度不足，载体降解周期难以匹配骨愈合速度。

10.12201/bmr.202608.00028V1

表 1 种植体表面改性分类

10.12201/bmr.202608.00028V1

改性类别	具体技术	作用机制	代表方法	参考文献
抗菌改性	抗生素涂层	抗生素释放	万古霉素涂层	[5]
	金属离子抗菌	破坏细菌细胞膜	银/锌离子涂层	[7]
	天然抗菌剂	吸附细菌膜	壳聚糖涂层	[8]
	合成抗菌聚合物	氧化杀菌	N-卤胺涂层	[9]
	纳米形貌调控	抗菌药物载体	TiO ₂ 纳米管阵列	[10]
	超疏水/超亲水表面	抑制细菌黏附	超疏水/超亲水表面	[11, 12]
	光动力/光热	ROS/高温杀菌	MB-PDT/金纳米颗粒+NIR	[13, 14]
成骨改性	智能抗菌响应	pH/酶触发靶向释药	pH 响应 AgNPs/透明质酸酶降解	[15, 16]
	生物活性陶瓷	促进矿化与成骨基因表达	羟基磷灰石涂层/仿生 CaP 涂层	[17-19]
	生物分子缓释	调控成骨分化	TiO ₂ 结构载 BMP-2	[20]
	微纳米形貌调控	促进成骨基因表达	蜂窝状 TiO ₂ 结构	[22]
	亲水改性	促进成骨细胞黏附与分化	亲水表面	[12]
	离子掺杂	促进成骨细胞黏附与分化	锶-TiO ₂ 纳米管涂层/ Mn-TiO ₂ 微孔生物涂层/掺锂 TiO ₂ 涂层	[23-25]
	智能调控成骨	释放外泌体/诱导巨噬细胞 M2 极化	电纺纤维-壳聚糖载外泌体双纳米涂层	[26]
协同改性	离子掺杂协同	锌离子兼顾抗菌和成骨； 锶诱导巨噬细胞 M2 极化	锌纳米线钛表面/掺锶钛表面	[27, 28]
	生物分子复合	抗菌肽 + 生长因子时空协同	抗菌肽 + 黏附肽共固定	[29]
	载体控释协同	早期释放抗菌因子、后期缓释成骨因子	聚电解质多层膜（外层庆大霉素 + 内层 BMP-2）； P/Sr@CO 光响应涂层	[30, 31]

5 种植体表面改性的生物应用

种植体表面改性技术的核心价值在于优化临床疗效。目前已在即刻种植、感染防治及复杂骨缺损修复中展现出潜力。

5.1 即刻种植与早期负载的改性应用

SLA 表面处理可促进骨组织快速生长，临床研究显示 SLA 表面可将种植体卸载愈合时间从 12 周缩短至 6~8 周，8 周时的 ISQ 值可达 81。亲水改性的 SLA（SLActive）表面在 2 周和 4 周时与骨的接触率比 SLA 表面更大，促使新骨生成量提升约 60%，在植入后的初期阶段表现出更好的稳定性^[32]。

5.2 种植体周围炎的治疗

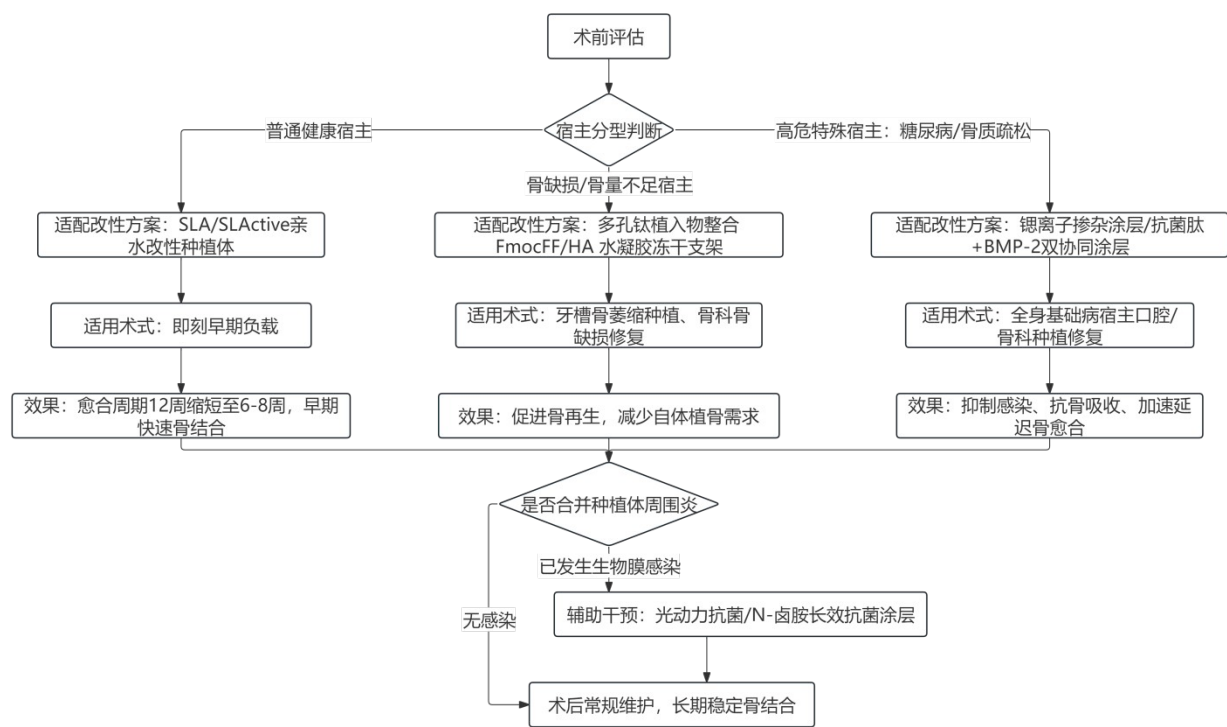
抗菌改性种植体可有效治疗种植体周围炎。光动力抗菌改性种植体对已发生的种植体周围炎，可通过局部光照有效清除生物膜^[33]。钛表面的 N-卤胺聚合物涂层表现出了良好的抗感染性能，在植入后的早期有效治疗种植体周围感染^[34]。

5.3 骨量不足宿主的应用

成骨改性种植体通过促进骨再生可减少植骨需求。负载 BMP-2 的钛种植体在骨缺损模型中可增强骨传导性和成骨作用^[35]。将生物活性 FmocFF/HA 混合水凝胶集成到 3D 打印的多孔钛植入物中，在 8 周内能够增强骨骼再生效果^[36]。

5.4 复杂环境的精准调控应用

骨质疏松、糖尿病等代谢异常宿主，牙槽骨修复能力减弱、感染风险升高，需精准适配体内特殊微环境。锶掺杂生物活性陶瓷涂层的种植体表现出抗骨吸收和促骨形成的双重作用，为骨质疏松宿主的治疗提供了可行性^[37]。糖尿病宿主的高血糖环境易导致感染和愈合延迟，抗菌-成骨双功能改性种植体如抗菌肽与 BMP-2 共固定表面可减少感染风险并加速骨再生^[38]。



10.12201/bmr.202608.00028V1

图 1 改性种植体生物应用流程图

6 挑战与展望

目前种植体表面改性技术在提升抗菌能力、促进成骨及临床转化方面已取得很多突破性进展，但结合临床实际应用来看，仍面临三大核心挑战。一是功能协同性不足：单一功能涂层难以兼顾抗菌与成骨效应；二是长效性与稳定性欠佳，例如抗菌物质的快速释放现象使得抗菌效果难以持续；细胞因子等生物活性分子极易发生降解失活，都会影响种植体长期行使功能；三是临床安全性存疑，金属离子长期蓄积的细胞毒性、抗生素应用诱导的细菌耐药性等风险，均需充分的长期评估与验证。

未来的研究方向应聚焦于多功能协同、长效稳定、安全可控的技术突破，重点发展智能响应和多功能集成的表面设计，构建“早期抗菌防感染-中期成骨促结合-长期稳定保功能”的时序性功能体系，优化牙缺失与骨缺损临床治疗方案。

【参考文献】

[1] Hu S, Shou Z, Xu C, et al. The de novo strategy for bifunctional peptides coating to enhance osteointegration capacity of the implant[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2025, 252:114642.

[2] Chouirfa H, Bouloussa H, Migonney V, et al. Review of titanium surface modification techniques and coatings for antibacterial applications[J]. Acta Biomater, 2019, 83:37-54.

[3] Wang Z, Li B, Cai Q, et al. Advances and prospects in antibacterial-osteogenic multifunctional dental implant surface[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10:921338.

[4] Li Y, Stewart CA, Finer Y. Advanced antimicrobial and anti-Infective strategies to manage peri-Implant infection: a narrative review[J]. Dent J (Basel), 2024, 12(5):125.

[5] Suchý T, Višejnová L, Šupová M, et al. Vancomycin-Loaded collagen/hydroxyapatite layers electrospun on 3D printed titanium implants prevent bone destruction associated with S. epidermidis infection and enhance osseointegration[J]. Biomedicines, 2021, 9(5):531.

[6] Huemer M, Mairpady Shambat S, Brugger SD, et al. Antibiotic resistance and persistence-Implications for human health and treatment perspectives[J]. EMBO Rep, 2020, 21(12):e51034.

[7] Chen W, Zhu WQ, Qiu J. Impact of exogenous metal ions on peri-implant bone metabolism: a review[J]. RSC Adv, 2021, 11(22):13152-13163.

[8] López-Valverde N, Aragonese J, López-Valverde A, et al. Role of chitosan in titanium coatings. trends and new generations of coatings[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10:907589.

[9] Lan G, Chu X, Li C, et al. Surface modification of titanium with antibacterial porous N-halamine coating to prevent peri-implant infection[J]. Biomed Mater, 2022, 18(1):10.

[10] Wang K, Jin H, Song Q, et al. Titanium dioxide nanotubes as drug carriers for infection control and osteogenesis of bone implants[J]. Drug Deliv Transl Res, 2021, 11(4):1456-1474.

[11] Manivasagam VK, Perumal G, Arora HS, et al. Enhanced antibacterial properties on superhydrophobic micro-nano structured titanium surface[J]. J Biomed Mater Res A, 2022, 110(7):1314-1328.

[12] Shao H, Ma M, Wang Q, et al. Advances in the superhydrophilicity-modified titanium surfaces with antibacterial and pro-osteogenesis properties: A review[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10:1000401.

[13] Prinz J, Wink M, Neuhaus S, et al. Effective biofilm eradication on orthopedic implants with methylene blue based antimicrobial photodynamic therapy in vitro[J]. Antibiotics (Basel), 2023, 12(1):118.

[14] Tang Y, Wang K, Wu B, et al. Photoelectrons sequentially regulate antibacterial activity and osseointegration of titanium implants[J]. Adv Mater, 2024, 36(2):e2307756.

[15] Dong Y, Ye H, Liu Y, et al. pH dependent silver nanoparticles releasing titanium implant: A novel therapeutic approach to control peri-implant infection[J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2017, 158:127-136.

[16] Yuan Z, Huang S, Lan S, et al. Surface engineering of titanium implants with enzyme-triggered antibacterial properties and enhanced osseointegration in vivo[J]. J Mater Chem B, 2018, 6(48):8090-8104.

10.12201/bmr.202608.00028V1

- [17] Arumugam P, Princeton B, Yadalam PK, et al. Innovative hydroxyapatite-coated titania nanotubes for dental implant surface enhancement[J]. *J Clin Exp Dent*, 2025, 17(6):e695-e704.
- [18] Kreller T, Sahm F, Bader R, et al. Biomimetic calcium phosphate coatings for bioactivation of titanium implant surfaces: Methodological approach and in vitro evaluation of biocompatibility[J]. *Materials (Basel)*, 2021, 14(13):3516.
- [19] Feng Y, Wu D, Knaus J, et al. A bioinspired gelatin-amorphous calcium phosphate coating on titanium implant for bone regeneration[J]. *Adv Healthc Mater*, 2023, 12(20):e2203411.
- [20] Lee JK, Choi DS, Jang I, et al. Improved osseointegration of dental titanium implants by TiO₂ nanotube arrays with recombinant human bone morphogenetic protein-2: a pilot in vivo study[J]. *Int J Nanomedicine*, 2015, 10:1145-1154.
- [21] Xie Y, Chen X, Zheng X, et al. Beta1-integrin/Hedgehog-Gli1 signaling pathway fuels the diameter-dependent osteoblast differentiation on different TiO₂ nanotubes: The optimal-diameter nanotubes for osteoblast differentiation[J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2021, 137:106026.
- [22] Zhu Y, Liang H, Liu X, et al. Regulation of macrophage polarization through surface topography design to facilitate implant-to-bone osteointegration[J]. *Sci Adv*, 2021, 7(14):eabf6654.
- [23] Zhao QM, Sun YY, Wu CS, et al. Enhanced osteogenic activity and antibacterial ability of manganese-titanium dioxide microporous coating on titanium surfaces[J]. *Nanotoxicology*, 2020, 14(3):289-309.
- [24] Zhu Y, Zheng T, Wen LM, et al. Osteogenic capability of strontium and icariin-loaded TiO₂ nanotube coatings in vitro and in osteoporotic rats[J]. *J Biomater Appl*, 2021, 35(9):1119-1131.
- [25] Park JW, Seo JH, Lee HJ. Enhanced osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells by surface lithium modification in a sandblasted/acid-etched titanium implant[J]. *J Biomater Appl*, 2022, 37(3):447-458.
- [26] Wang R, Cheng Y, Chen H, et al. SHED-exosome-functionalized degradable fibrous coatings: Immunomodulatory engineering of titanium implant interfaces[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2026, 262:115479.
- [27] Shen Z, Xu Y, Qian XN, et al. Enhanced osteogenic and antibacterial properties of titanium implant surface modified with Zn-incorporated nanowires: Preclinical in vitro and in vivo investigations[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2024, 35(4):427-442.
- [28] Lu W, Zhou C, Ma Y, et al. Improved osseointegration of strontium-modified titanium implants by regulating angiogenesis and macrophage polarization[J]. *Biomater Sci*, 2022, 10(9):2198-2214.
- [29] Cui C, Zhao Y, Yan J, et al. Peptide platform for 3D-printed Ti implants with synergistic antibacterial and osteogenic functions to enhance osseointegration[J]. *Mater Today Bio*, 2025, 30:101430.
- [30] Min J, Choi KY, Dreaden EC, et al. Designer dual therapy nanolayered implant coatings eradicate biofilms and accelerate bone tissue repair[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(4):4441-4450.
- [31] Gao P, Cai C, Sun H, et al. Dual-stimuli responsive on-demand CO-releasing coating on titanium dental implants for antibacterial, anti-inflammatory and osteogenic effects[J]. *J Control Release*, 2026, 394:114929.
- [32] Sayin Ozel G, Inan O, Secilmis Acar A, et al. Stability of dental implants with sandblasted and acid-etched (SLA) and modified (SLActive) surfaces during the osseointegration period[J]. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*, 2021, 15(4):226-231.
- [33] AlMubarak AM. Comparison of local minocycline hydrochloride delivery and antimicrobial photodynamic therapy as adjuncts to mechanical debridement for the treatment of peri-implant mucositis: A randomized controlled trial[J]. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2025, 51:104461.
- [34] Wu S, Xu J, Zou L, et al. Long-lasting renewable antibacterial porous polymeric coatings enable titanium biomaterials to prevent and treat peri-implant infection[J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1):3303.
- [35] Popova AD, Sheveyko AN, Kuptsov KA, et al. Osteoconductive, osteogenic, and antipathogenic plasma electrolytic oxidation coatings on titanium implants with BMP-2[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(31):37274-37289.

- [36] Rattner N, Perlis V, Golden E, et al. 3D-Printed titanium implants with bioactive peptide-polysaccharide scaffolds for personalized bone reconstruction[J]. *Adv Healthc Mater*, 2026, 15(12):e05131.
- [37] No YJ, Roohaniesfahani S, Lu Z, et al. Strontium-doped calcium silicate bioceramic with enhanced in vitro osteogenic properties[J]. *Biomed Mater*, 2017, 12(3):035003.
- [38] Chen L, Shao L, Wang F, et al. Enhancement in sustained release of antimicrobial peptide and BMP-2 from degradable three dimensional-printed PLGA scaffold for bone regeneration[J]. *RSC Adv*, 2019, 9(19):10494-10507.