

纳米颗粒在预防正畸釉质脱矿中的应用进展

屈玥 姜欢 孙月 徐丞靖 胡敏

吉林大学口腔医院正畸科 长春 130021

[摘要] 釉质脱矿是正畸治疗中最常见的并发症之一,如未及时干预和处理,可进展形成龋齿,进而影响口腔健康和功能。因此,釉质脱矿是正畸治疗过程中亟待解决的问题。纳米颗粒(NPs)因体积小,表面积比大,可与釉质充分接触,从而高效地发挥作用,在釉质脱矿的预防中具有显著优势,成为近年来的研究热点。NPs预防釉质脱矿的作用原理主要为抗菌或再矿化,其应用形式包括以混合、涂覆或载体等形式与正畸矫治器结合。不同类型的NPs在预防釉质脱矿方面的应用潜力已得到证实,但仍需进一步研究以明确其生物安全性、长期稳定性等问题。本研究从NPs的分类、应用形式等方面展开介绍,以梳理NPs在预防釉质脱矿方面的研究进展,探讨后续的研究方向。

[关键词] 纳米颗粒; 釉质脱矿; 白垩斑; 正畸治疗; 正畸矫治器

[中图分类号] R783.5 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026602



本文链接

OSID 码

Research progress of nanoparticles in the prevention of enamel demineralization during orthodontics

Qu Yue, Jiang Huan, Sun Yue, Xu Chengjing, Hu Min

Dept. of Orthodontics, Hospital of Stomatology, Jilin University, Changchun 130021, China

Supported by: Industry Technology Research and Development Project of Jilin Province (2022C043-3)

Correspondence: Hu Min, Email: humin@jlu.edu.cn

[Abstract] Enamel demineralization is a prevalent complication in orthodontic treatment. If not addressed and treated promptly, it will progress to caries formation and negatively affect oral health and function. Therefore, enamel demineralization is an urgent problem that needs to be addressed during orthodontic treatment. Nanoparticles (NPs), with their small size and large surface-to-volume ratio, can achieve complete contact with enamel and function effectively, offering advantages in the prevention of enamel demineralization. Therefore, it has become a hot spot in recent years. The mechanism of action of NPs applied to prevent enamel demineralization is either antimicrobial or remineralization, whereas the forms of application include combination with orthodontic devices in the forms of blends, coatings, and carriers. The potential application of different types of NPs in preventing enamel demineralization has been demonstrated widely, but further studies are needed to prove their biosafety and long-term stability. In this paper, we will introduce the classification and application forms of NPs to clarify the existing research results and subsequent research directions of NPs in preventing enamel demineralization.

[Key words] nanoparticles; enamel demineralization; white spot lesions; orthodontic treatment; orthodontic appliances

正畸治疗借助各种矫治器对不同种类的错殆

畸形进行矫治,不仅能够改善口腔功能、提升颜面美观,还有助于维护口腔卫生,进而对口腔健康产生积极影响^[1]。然而,在治疗过程中,口腔内的各种矫治装置,不利于患者进行口腔卫生维护,牙面菌斑堆积,如未能及时清洁,存在釉质脱矿的可能。釉质脱矿表现为釉质表面的白垩色病损,

[收稿日期] 2025-03-26; [修回日期] 2026-01-14

[基金项目] 吉林省产业技术研究与开发项目(2022C043-3)

[第一作者] 屈玥, 硕士, Email: quyue23@mails.jlu.edu.cn

[通信作者] 胡敏, 教授, 博士, Email: humin@jlu.edu.cn

即白垩色斑 (white spot lesions, WSLs)^[2-4]。若不进行有效的干预, WSLs可能进一步病变, 发展为龋齿, 进而危害口腔健康。因此, 对 WSLs的预防在矫治过程中尤为重要, 如何预防釉质脱矿是正畸治疗过程中亟待解决的问题。

正常情况下, 牙釉质的矿物质含量在口腔环境中处于动态平衡, 脱矿和再矿化在自然状态下持续发生。当牙菌斑在釉质表面形成后, 以变异链球菌为主的致龋菌分解碳水化合物产酸, 降低口腔环境的pH值。当pH值低于5.5时, 脱矿和再矿化的平衡被打破, 羟磷灰石分解成钙、磷离子, 最终引发釉质脱矿。现有的预防 WSLs的方法主要包括开展口腔卫生宣教, 引导患者进行有效的口腔卫生保健, 给予饮食指导, 以及使用氯己定类药物等^[5]。但良好的口腔卫生习惯需要患者的依从性, 氯己定则存在味觉障碍、口腔黏膜染色等副作用, 需慎重使用。因此, 需要探寻一种更为安全有效的方法, 以应用于釉质脱矿的预防。

纳米颗粒 (nanoparticles, NPs) 是尺寸小于100 nm的固体颗粒。因其体积小, 具有抗菌、抗炎、抗氧化和低摩擦力等特性, 且表面体积比大, 能与微生物膜密切作用, 故而在抗菌及再矿化方

面效果更佳。研究^[6-8]显示, 纳米颗粒可以应用到正畸矫治器中, 在釉质脱矿的预防方面存在一定优势。根据材料功能, 纳米颗粒可以分为抗菌、再矿化和兼具两种功能的三种类型。根据与正畸矫治器结合的方法, 纳米颗粒可以分为混合、涂覆和载体类型, 通过与正畸材料结合, 从而在正畸治疗的过程中发挥预防釉质脱矿的作用。本研究对不同类型纳米颗粒的作用原理和在正畸治疗过程中的应用形式进行总结, 以阐释其在正畸治疗过程中用于预防釉质脱矿的潜力。

1 纳米颗粒的分类

纳米颗粒预防釉质脱矿的作用主要体现在抗菌和再矿化两个方面。基于其功能特性, 纳米颗粒主要可分为以下几类 (表1): 具有抗菌作用的金属纳米颗粒、金属氧化物纳米颗粒、天然材料纳米颗粒; 具有再矿化作用的矿化前体纳米颗粒; 兼具抗菌和再矿化双重作用的氟化物纳米颗粒和生物活性玻璃纳米颗粒。此外, 近年来, 兼具抗菌和再矿化两种功能的复合材料逐渐被研究合成, 是一种更加高效的纳米颗粒。

表 1 纳米颗粒按功能分类及其特性、应用形式

Tab 1 Classifications of NPs by function and their characteristics, application forms

功能	种类	特性	应用形式
抗菌	金属 (银、金) 纳米颗粒	抗菌性强, 但对人体存在潜在的毒副作用	混合、涂覆
	金属氧化物 (氧化锌、二氧化钛) 纳米颗粒	可介导抗菌光动力疗法	混合、涂覆
	天然材料 (香草醛、壳聚糖) 纳米颗粒	来源广, 毒性低, 但易受环境影响, 个体间存在差异	混合
再矿化	羟磷灰石、无定形磷酸钙	参与仿生矿化, 生物相容性好, 但无定形磷酸钙单独存在时不稳定	混合
双功能	氟化物纳米颗粒	预防釉质脱矿的金标准, 但可能产生急性慢性氟中毒等不良反应	混合
	生物活性玻璃纳米颗粒	单独添加到正畸粘接材料时抗菌效果不明显	混合
	双功能复合材料	合成较复杂, 成本高	混合、载体

1.1 抗菌纳米颗粒

1.1.1 金属纳米颗粒

金属纳米颗粒凭借独特的抗菌性能, 在预防正畸釉质脱矿领域备受关注。其中, 对银纳米颗粒 (AgNPs) 和金纳米颗粒 (AuNPs) 的研究较多。

AgNPs是最常应用的抗菌材料。抗菌机制主要表现为: 1) Ag⁺直接作用于细菌的细胞膜上, 与构成大多数膜蛋白的硫发生反应, 引起蛋白质沉淀, 影响细胞的渗透性和细菌的生存能力, 起到杀菌和抑菌作用; 2) 与DNA片段相互作用, 阻止其复制和表达, 抑制呼吸链, 增加活性氧的产生, 导致细胞死亡^[9-10]。AgNPs对变异链球菌、

血链球菌和嗜酸乳杆菌等致龋微生物的强抗菌活性已被证实^[11]。

然而, 银作为重金属材料, 对人体存在潜在的副作用, 需要确定 AgNPs的生物相容性。研究^[12]表明, AgNPs可穿透细胞膜和线粒体, 在human牙龈成纤维细胞中引发氧化应激、炎症和凋亡。这种毒性与AgNPs的浓度、颗粒大小、应用部位、作用时间等因素关系密切。AgNPs的浓度大于1 μg/mL时, 即可出现对人肝癌细胞系的细胞毒性, 表现为细胞形态异常。小尺寸的AgNPs更易从天然屏障中转移, 诱发急性慢性毒性效应^[13]。现阶段尚无法明确对AgNPs进行毒性评估, 需要更多研究以确定其长期使用的安全性。在AgNPs表

面添加涂层材料、使用更安全可靠的“绿色合成”方法,可以降低AgNPs对人体的毒副作用^[14-15]。从应用形式来看,由于AgNPs良好的抗菌性,常被考虑以混合形式添加到正畸材料中,如正畸粘接剂,期望在粘接过程中抑制细菌生长,预防釉质脱矿。

AuNPs具有低毒性、抗氧化性、稳定性等优良性能,在抗菌材料领域中展现出独特的优势^[16-17]。植物合成AuNPs的方法更加经济和环保,为AuNPs的广泛应用提供了可能^[18]。研究^[19]将绿色合成的AuNPs加入到漱口水中,评估AuNPs在正畸患者中使用的安全性,结果表明,加入AuNPs的漱口水在较低浓度时表现出优异的相容性,而较高浓度时则出现轻微的毒性作用。因此,控制纳米颗粒的浓度,在提供抗菌性能的同时保证应用的安全性尤为重要。在正畸应用中,AuNPs除了以混合形式添加到正畸材料中外,其良好的生物相容性和独特性能也为其在涂覆等应用形式上提供了潜在可能。

1.1.2 金属氧化物纳米颗粒

金属氧化物纳米颗粒在预防正畸釉质脱矿中也发挥重要作用,下面以氧化锌纳米颗粒(ZnO-NPs)和二氧化钛纳米颗粒(TiO₂NPs)为例详细介绍。

ZnONPs对革兰阳性菌和革兰阴性菌具有显著的抗菌特性,特定浓度下对人安全不产生显著影响,且具有更高的透明度和美观性^[20]。ZnONPs可以作为光敏剂介导抗菌光动力疗法,具有抗菌和抗脱矿性能^[21]。鉴于这些特性,ZnONPs在正畸应用中既可以混合在正畸材料(如隐形矫治器的制作材料)中;也可以通过涂覆的方式应用于弓丝、托槽表面,利用其抗菌光动力疗法性能,在光照条件下增强抗菌和抗脱矿效果。

TiO₂NPs在紫外线照射后产生活性氧,诱导细菌细胞壁的氧化损伤,进而发挥杀菌作用,抑制变异链球菌生长^[22]。这提示可以将TiO₂NPs添加到粘接剂等材料中,通过特定波长的光敏灯使粘接剂发生光固化,托槽粘接在牙齿表面的同时高效地发挥杀菌作用。TiO₂NPs在正畸领域,更倾向于以混合形式添加到与釉质直接接触的材料中,如粘接剂、口腔护理液等,在日常口腔环境或特定光照条件下发挥抗菌作用,预防釉质脱矿。

1.1.3 天然材料纳米颗粒

天然纳米颗粒也具有抗菌性能。纳米香草醛

通过干扰细菌的代谢过程抑制细菌生长^[23];壳聚糖凭借其带正电荷的特性,与带负电荷的细菌细胞膜相互作用,破坏细胞膜的完整性,发挥抗菌作用^[24]。添加纳米香草醛^[23]、壳聚糖^[24]、蜂胶^[25]、大黄素^[26]等天然物质的正畸材料已被证实具有潜在的抗菌效果,同时力学性能可,并具有来源广泛、生物相容性好等优势。这些天然材料纳米颗粒在正畸应用中,无论是以混合形式添加到正畸材料中,还是尝试开发新的涂覆方式应用于矫治器表面,都具有较大的研究价值和临床应用潜力。但也具有一定的局限性,如部分天然材料纳米颗粒的抗菌效果可能受环境因素影响较大。

1.2 再矿化纳米颗粒

近年来,以非经典结晶理论为指导的釉质仿生再矿化预防与治疗策略被提出。非经典结晶理论认为原生釉质的结晶过程如下(图1):首先,将钙磷离子聚集成无定形磷酸钙(amorphous calcium phosphate, ACP);然后,釉原蛋白利用氨基酸中的羧基稳定钙磷离子为团簇状结构;最后,ACP相互融合并且定向有序排列形成束状羟磷灰石,再逐步形成釉质晶体,最终形成釉柱。根据仿生矿化的原理在已脱矿釉质上实现类釉质晶体沉积,可以达到与天然釉质相似的形态及功能,是一种更为安全有效的促进釉质再矿化的治疗方法^[27-28]。

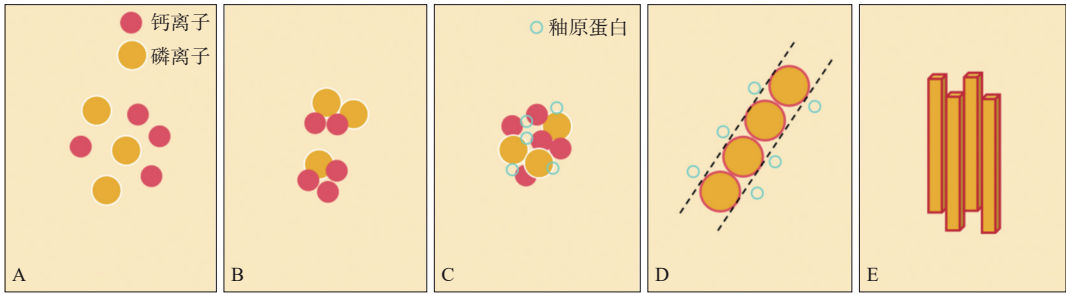
羟磷灰石是牙齿和骨骼的主要矿物成分的结构原型,也是釉质结构的主要成分。在正畸粘接剂中加入不同比例的纳米羟磷灰石颗粒,可以提供钙、磷的储存库,促进釉质表面的再矿化,提高牙釉质的矿物质含量和显微硬度^[29]。作为羟磷灰石的前体,ACP能够在釉原蛋白或类釉原蛋白的调控下相互融合,并且定向有序排列形成束状羟磷灰石,进一步形成釉质。但ACP的热力学稳定性差,单独存在时不稳定,容易聚集。因此,需要使用稳定剂将ACP稳定在无定形态^[30-31]。酪氨酸磷酸肽稳定的无定形磷酸钙(casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate, CPP-ACP)作为一种预防釉质脱矿的商品化试剂^[32],已被广为应用。矿化前体纳米颗粒多以混合形式添加到正畸粘接剂等材料中,为釉质脱矿的预防和修复提供钙、磷来源,促进再矿化过程。

1.3 双功能纳米颗粒

抗菌和再矿化作用可以相辅相成。单独应用抗菌材料可以控制菌斑形成,但无法实现已脱矿

釉质的再矿化; 单独应用再矿化材料可以提供钙、磷, 形成类釉质结构, 但菌斑未得到控制会导致

釉质脱矿的持续发生。因此, 兼具抗菌和再矿化性能的双功能复合材料逐渐被探索。



A、B: 钙磷离子聚集形成ACP; C: 釉原蛋白稳定钙磷离子成簇状结构; D: 釉原蛋白引导 ACP 定向形成束状羟磷灰石; E: 成熟后形成釉柱。

图 1 非经典结晶理论指导的釉质结晶过程

Fig 1 Enamel crystallization processes guided by non-classical crystallization theory

1.3.1 氟化物纳米颗粒

长期以来, 氟化物被应用于釉质脱矿的预防, 并被认为是金标准。局部使用氟化物后, 进入釉质的氟离子可以与羟磷灰石反应, 形成氟磷灰石, 具有更好的抗酸性, 同时, 氟化物的抗菌性能可以抑制致龋菌^[33-34]。有研究^[35]制备了无定形氟化钙纳米颗粒, 将其与正畸粘接剂混合, 测定 pH 循环刺激时牙釉质颜色变化和矿物质丢失水平, 证明了材料的再矿化潜力。然而, 氟化物的使用容易出现脱矿病损区域因表层过矿化、深层矿化不足而导致釉质着色的情况, 影响美观。此外, 使用氟化物还有可能导致急性与慢性氟中毒等不良反应^[36-37]。在正畸应用中, 氟化物纳米颗粒虽然存在一些问题, 但因其抗菌和再矿化的双重作用, 目前仍常以混合形式添加到正畸粘接剂、口腔护理产品等材料中, 在使用时需谨慎使用频率及用量。

1.3.2 生物活性玻璃纳米颗粒

生物活性玻璃 (bioactive glass, BAG) 是一种硅酸盐基生物活性材料, 主要成分为 SiO_2 、 Na_2O 、 CaO 、 P_2O_5 , 近年来已被证实具有良好的抗菌和再矿化性能。当 BAG 与唾液接触时, 其中的 Na^+ 、 Ca^{2+} 与唾液中的 H^+ 交换, 从而升高 pH 值, 抑制牙菌斑生物膜的形成, 起到抗菌作用。同时, BAG 中过量的 Ca^{2+} 和 PO_4^{3-} 释放, 沉积在釉质表面形成磷酸钙层, 进而结晶成羟磷灰石, 起到再矿化作用^[38-39]。然而, 尽管 BAG 的抗菌效果已被证实, 但将 BAG 加入到粘接剂或玻璃离子水门汀 (glass ionomer cement, GIC) 后, 并未展现出优异的抗菌性能^[40-41]。这可能是由于将 BAG 混入树脂基质后限制了离子释放的浓度和速率, 减弱了抗菌性能。此外, 树脂基质的表面粗糙度和疏水

性可能促进了细菌的黏附, 也抵消了生物活性玻璃的潜在抗菌效果。因此, 考虑 BAG 联合应用其他抗菌材料, 如氟^[42]、 ZnO ^[43]、 MgO ^[44]等, 以解决将 BAG 加入正畸材料后无法提供足够的抗菌性能的问题。BAG 由于其优异的生物相容性、抗菌性和再矿化能力, 主要通过混合的形式整合到粘接剂、GIC 等正畸材料中。

1.3.3 双功能复合材料纳米颗粒

在探索兼具抗菌和再矿化性能的多功能复合材料过程中, 羧甲基壳聚糖 (carboxymethyl chitosan, CMCS) 发挥了重要作用。CMCS 可以稳定 ACP, 形成 CMCS/ACP 纳米复合体。

在 CMCS/ACP 纳米复合体基础上添加不同抗菌成分可以进一步提升其性能。如添加具有抗菌性能的 AuNPs, 不仅使该纳米复合体兼具抗菌和再矿化性能, AuNPs 还能作为羟磷灰石合成的模板, 强化再矿化作用。CMCS/AuNPs/ACP 纳米杂化物在微生物水平和微观结构层面, 对致龋微环境的改变和已脱矿釉质的再矿化具有积极作用^[45]。类似地, 在 CMCS/ACP 纳米复合体中加入具有广谱抗菌性能的聚六亚甲基双胍 (polyhexamethylene biguanide, PHMB), 也取得了良好效果。相比于传统使用的氯己定 (chlorhexidine, CHX), 将该复合体应用于漱口水中, 不良反应更少。将 PHMB 加入 CMCS/ACP 纳米复合体, 240 mg/L CMCS/ACP/PHMB 的抗菌效果与 0.12% MCS/ACP/CHX 相当, 兼具抗菌和再矿化效果。这些研究的共性在于都基于 CMCS/ACP 纳米复合体进行构建, 通过添加不同抗菌成分实现多功能性, 为多功能复合材料的研发提供了重要思路, 也为其临床应用奠定了实验基础^[46]。

2 纳米颗粒的应用形式

不同类型的纳米颗粒具有各自独特的性质,这决定了其在正畸矫治过程中有着多样化的应用形式,主要包括以混合、涂覆、载体形式应用于正畸矫治过程中。这些应用形式在发挥纳米颗粒抗菌或再矿化作用的同时,也需要避免对正畸材料的机械和物理性能产生不良影响。

2.1 混合形式

在正畸治疗中粘接托槽或附件等正畸材料时,经过酸蚀处理的牙釉质表面形成蜂窝状结构,这种结构能够与粘接剂形成紧密的机械结合。然而,托槽周围溢出的粘接剂往往难以被完全去除,并且会形成粗糙的表面,不易清洁,为菌斑提供附着条件。同时,粘接剂和釉质交界处的菌斑不仅会影响粘接强度,在口腔卫生清洁不佳的情况下也可能引起牙釉质脱矿^[47]。因此,通过向正畸粘接剂中添加 NPs 填料进行改性,对预防釉质脱矿具有重要的临床意义。

研究^[48]表明,相比于更低浓度的 AgNPs,1%AgNPs 添加到粘接剂后,牙釉质的病变深度更低,且磷酸盐离子保留量大,证明了1%AgNPs 对 WSLs 的形成有显著的预防作用,但该实验缺少 AgNPs 是否对剪切粘接强度 (shear bond strength, SBS) 产生影响的验证。

SBS 是评估粘接剂性能的一项重要指标,在粘接剂中添加填料时,必须确保 SBS 在临床可接受范围内 (6~8 MPa),否则托槽可能易从牙齿表面脱落,影响矫治效果。一项研究检测了添加不同浓度 (1%、0.5%、0.1%、0.05%) AgNPs 粘接剂的 SBS,发现随着 AgNPs 浓度的增加,粘接剂的 SBS 降低,但均在临床可接受范围内^[49]。但另一项研究^[10]发现,将 535 $\mu\text{g/mL}$ AgNPs 添加到商用正畸粘接剂中,经检测,是否添加 AgNPs 对 SBS 无显著改变。导致结果差异的原因可能是 2 组实验的 AgNPs 浓度及粒径有差别。低浓度、小粒径的 AgNPs 能够减少团聚,减弱对粘接剂结构的干扰。此外,没食子酸包裹 AgNPs 减少了与粘接剂分子发生相互作用,避免了粘接强度的降低。然而,需要注意的是,体内外实验条件存在差异,SBS 的标准也会有所不同。所以,后续还需要进一步的体内实验,以明确不同浓度 AgNPs 对粘接剂 SBS 的实际影响。

此外,有研究^[50]分别测定添加 AgNPs 和 ACP 纳米颗粒对正畸粘接剂 SBS 的影响,发现添加 3%ACP 纳米颗粒对正畸复合材料的 SBS 无显著影响,而添加 0.3%AgNPs 会降低正畸复合材料的 SBS。同时,AgNPs 还会导致材料变色。由此可见,仿生矿化材料 ACP 在对粘结剂机械性能影响及美观性方面,可能具有比 AgNPs 更明显的优势。

然而,单独加入 AgNPs 只能产生抗菌效果,联合应用具有再矿化性能的材料,可以形成双重抗菌机制,进一步预防釉质脱矿。将 AgNPs 与 BAG 协同添加到粘接剂,证实了该新型纳米材料具有抗菌和再矿化性能,且生物相容性良好,纳米材料 (nBG@Ag) 的含量增加至 5% 时,未检测到细胞毒性的显著增加^[51]。

在隐形矫治技术中,也有关于纳米颗粒应用的相关研究。研究^[52]将不同浓度的具有抗生物膜性能的壳聚糖纳米颗粒加入到树脂中,测定对树脂的性能是否有影响。结果表明,当树脂中加入 3% 和 5% 的壳聚糖纳米颗粒时,变异链球菌数量显著减少,细胞毒性方面未检测到明显的变化。这表明在特定浓度下,将壳聚糖纳米颗粒应用于无托槽隐形矫治技术中,既可以有效抑制细菌生长,又不会对材料的生物安全性及自身性能产生不良影响。ZnONPs 具有抗菌和抗真菌作用,将其加入到 Invisalign 矫治器中,结果显示,ZnONPs 对于变异链球菌的抗菌效果可以持续 7 d,明显抗菌效果可以达到 2 d。抗菌作用的持续时间与隐形矫治器更换时间接近,可以在治疗中起到持续的抗菌效果^[21]。

压电材料是一种新型材料,具有独特的性质,对机械振动非常敏感,即使轻微的日常活动也会引起电荷。将具有压电性能的钛酸钡 (BaTiO_3) 纳米颗粒加入到聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己烷二甲醇酯中,形成压电复合材料,应用于无托槽隐形矫治器,在机械刺激激活压电材料时产生显著的抗菌效果。随着 BaTiO_3 NPs 浓度的增加,表面抗菌率达到 67.39%^[53],这种新型的压电复合材料为纳米颗粒在隐形矫治器中的应用开辟了新的途径,通过利用材料的压电特性实现抗菌功能,为预防釉质脱矿提供了新的思路。

将使用甲基丙烯酸 3-(三甲氧基硅基)丙酯硅烷化改性的 ZnONPs 加入到丙烯酸树脂中,对黏蛋白和变异链球菌的黏附起到了抑制作用。研究^[54]发现,加入 7.5%ZnONPs 的丙烯酸树脂对黏蛋

白和变异链球菌的黏附率降低效果最佳,表明通过对纳米颗粒进行改性,并优化其在丙烯酸树脂中的浓度,可以有效提高正畸材料的抗菌性能,减少细菌在材料表面的附着,进而降低釉质脱矿的风险。

将不同浓度的姜黄素纳米颗粒添加到丙烯酸树脂中,均产生了对变异链球菌的抗菌作用。随着其浓度的增加,复合材料的弯曲强度降低,但都高于标准值,这意味着添加姜黄素纳米颗粒的丙烯酸树脂在保证机械性能的前提下,具备良好的抗菌性能。大黄素纳米颗粒通过破坏细胞膜来减少变异链球菌的生物膜,并通过抑制 β -1,3-葡聚糖合成酶活性而显示出抗真菌活性,对白色念珠菌有抑制作用^[55]。添加不同浓度的大黄素纳米颗粒作为抗菌剂对丙烯酸树脂的弯曲强度无显著影响,可考虑应用于正畸治疗^[26]。

在正畸治疗过程中,带环、Nance弓、舌弓等装置常被应用于临床,通过GIC等材料粘接于口腔内。由于装置固定在牙面上无法自行摘除,难以对口腔卫生进行彻底清洁,这增加了发生龋齿和牙龈炎的风险。GIC中含有氟化物,具有一定抗菌性能,但这不足以防止生物膜的形成和抑制细胞活性。在一项体内研究中,使用含2%ZnONPs的GIC粘接舌弓,与不含ZnONPs的GIC对照组进行比较。舌弓粘接后16周取龈下微生物标本,比较变异链球菌和乳酸杆菌的菌落计数,结果显示实验组平均菌落数和细菌总数均显著低于对照组,这充分证实了加入ZnONPs的GIC具有对多种细菌的抗菌作用^[56],为改善正畸治疗中固定装置周围的口腔微生态环境提供了新的选择。

将具有抗菌性能的六偏磷酸氯己定纳米颗粒(chlorhexidine hexametaphosphate nanoparticles, CHX-HMPNPs)或AgNPs加入到正畸弹性橡皮链中,未发现其对拉伸强度、极限伸长率或变色性能产生负面影响,这一研究结果为改性橡皮链应用于临床提供了理论依据^[57],有望减少正畸弹性橡皮链在使用过程中因细菌滋生导致的釉质脱矿问题。

2.2 涂覆形式

在固定矫治过程中,弓丝通过结扎或自锁的形式固定在托槽沟内,对牙齿产生作用力,进而发生牙齿移动。随着矫治时间的变长,弓丝和托槽表面的菌斑黏附也逐渐增加,这对预防釉质脱矿极为不利^[58]。

将CHX-HMPNPs沉积并成功覆盖于镍钛弓丝和不锈钢弓丝表面,在人工唾液中持续释放CHX长达28 d,且未达到平台期。CHX的持续释放时间与固定矫治平均4~6周的复诊更换弓丝的频率是匹配的,这为CHX-HMPNPs在固定矫治过程中发挥持续的抗菌效果奠定了基础^[59]。在另一项研究^[60]中,AgNPs和TiO₂NPs修饰的弓丝也表现出了抑制口腔内生物膜形成和对多重耐药细菌的抗菌效果。弓丝和托槽之间的摩擦力要尽可能小,这不仅可以高效、精确地移动牙齿,还可以通过使器械表面平滑阻止细菌黏附。研究^[61]显示,在不锈钢弓丝上沉积了氮化钽(TaN)联合金属铜薄膜,对弓丝进行改性,结果表明该材料兼有Ta₂N膜的耐磨、抗腐蚀性能和Cu的抗菌性能,改性后的弓丝不仅具有抗菌性,还降低了托槽与弓丝间的摩擦力,提高了正畸治疗的速度和效率。虽然该涂层展现出了优异的硬度和耐磨性,但目前尚未明确验证其长期应用的稳定性和耐久性,即在口腔环境中应用的磨损是否会影响涂层的涂覆效果或出现抗菌效果的衰减,这还需要进一步研究加以证实。

托槽通过粘接剂粘接在牙釉质表面,在矫治过程中与牙釉质持续紧密接触。在一项研究^[62]中,将AgNPs和添加壳聚糖的AgNPs分别涂覆于托槽表面,检测其对变异链球菌的抑制情况验证其防龋性,结果表明二者对变异链球菌有明显的抑制作用,为预防托槽周围釉质脱矿提供了新的方法。另一项研究^[63]中,利用嵌入在聚氧硼酸盐基质中的纳米金复合材料处理托槽,可以降低78%的变异链球菌黏附率。

碳量子点作为一种具有低毒性和优异抗菌性能的新型碳基纳米材料,近年来被逐渐关注。在一项研究^[64]中,使用具有抗菌性能的羧甲基壳聚糖和木糖醇形成了复合碳点(CMC-Xy-CDs),并使用多巴胺作为介质,形成聚多巴胺,使CMC-Xy-CDs附着在托槽表面,促进牙齿表面的再矿化。体内外研究证实了这种新材料具有抗菌和再矿化能力,生物相容性良好。这为未来合成新型复合材料提供了新的方向,有望开发出同时具备抗菌和再矿化性能的托槽涂层材料,更好地预防釉质脱矿。

将ZnONPs和AgNPs分别沉积于带环表面,证实了金属纳米颗粒对变异链球菌、嗜酸乳杆菌和白色念珠菌具有抗菌作用^[20],为带环在正畸治

疗中的应用提供了更有效的抗菌保障,有助于减少带环周围细菌滋生,降低釉质脱矿的可能性。

2.3 载体形式

将纳米材料直接以混合或涂覆的形式应用于正畸材料中,可以使药物快速释放,直接作用于釉质表面。但正畸治疗往往长达2~3年,抗菌或再矿化药物持续发挥作用是必要的。具有缓释作用的纳米载体可以负载更多药物,实现药物缓慢而持续地释放,从而维持长期有效浓度^[65]。具有控释作用的纳米载体能够在特定的刺激下响应释放药物,使释放更加精确。考虑到釉质脱矿的形成机制及正畸材料的临床应用特点,pH响应^[66]、温度响应^[67]和光响应^[68]机制的纳米载体更适用于在治疗中应用。

介孔二氧化硅纳米颗粒(MSNs)具有大的表面积和孔径,易于进行表面功能化,可以缓释药物,延长作用时间,被认为是控制药物释放的理想载体^[69]。研究^[70]将AgNPs和CHX纳米颗粒负载到MSNs中,合成了一种兼具抗菌性能和pH响应性能的纳米复合载体,可以在酸性条件下优先释放药剂,高效杀死细菌,从而起到预防釉质脱矿的作用。这种纳米复合载体的设计巧妙地利用了口腔环境的酸性特点,在细菌产酸导致釉质脱矿风险增加时,能够及时释放药物,针对性地抑制细菌生长,为预防釉质脱矿提供了一种智能、高效的解决方案。

另一项研究^[71]中,将载CHX的MSNs与氨基硅烷功能化的ZnO量子点复合添加到复合树脂中,作为附件应用于隐形矫治。结果表明,其具有长期的抗生物被膜活性,抗菌药物成分CHX的持续释放时间长达30 d,可以与隐形矫治器的更换时间相匹配,保证了在治疗期间抗菌效果的持续发挥。同时具有较强的荧光能力,在矫治结束后便于彻底而准确地去除附件,防止在去除附件的过程中过度磨除牙釉质。这不仅解决了药物持续释放的问题,还兼顾了临床操作的便利性,为纳米颗粒在隐形矫治中的应用提供了新的技术支持,有望进一步提升隐形矫治的效果和安全性。

3 展望

釉质脱矿是正畸治疗最常见的并发症之一,WSLs的形成不仅会影响美观,还会进一步造成龋坏等病变。将具有抗菌等性能的纳米颗粒添加到

现有矫治装置中,主动赋予其抗菌及再矿化能力,降低釉质脱矿风险,在预防牙釉质脱矿中具有广泛的应用前景。现阶段,诸多体外研究已经证实了不同种类纳米颗粒应用于正畸矫治器的抗菌及再矿化效果,部分材料的生物相容性也经细胞实验得以验证。然而,由于体内环境差异显著,在实际治疗过程中,纳米颗粒对口腔乃至全身微生态平衡的影响不容忽视,需要重点关注。纳米颗粒应用于人体后通过各种途径进入循环,可能会引起相应的不良反应,因此,仍需进一步的临床试验来验证纳米材料应用于人体的细胞毒性,以确保其临床使用的安全性。此外,纳米颗粒的浓度会对细胞毒性、SBS等性能产生影响,然而,目前尚无标准化评估体系来明确纳米颗粒的应用是否规范,建立此类评估体系对于标准化应用纳米颗粒至关重要。同时,正畸治疗过程往往持续时间长达2~3年,正畸材料随着日常咀嚼运动及刷牙等动作产生机械摩擦,存在磨损、变性、涂层脱落的可能性。且口腔内温度和pH值处在动态变化之中,随饮食等活动有所改变。因此,需要匹配不同正畸器械的使用时长和纳米颗粒发挥疗效的持续时间,以获得更好的治疗效果。同时在今后的实验设计中增加磨损、温度及pH循环实验,模拟口腔环境,以验证纳米颗粒临床应用的长期稳定性。在未来的研究中,进一步开发多功能纳米复合材料,探索更加简便、安全的绿色合成方法,降低纳米颗粒的使用成本,是将纳米颗粒转化应用于临床治疗过程中所必需的。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

4 参考文献

- [1] Sabouni W, Mansour M, Gandedkar NH. Scope of clear aligner therapy (CAT) in phase I (early) orthodontic treatment[J]. *Semin Orthod*, 2023, 29(2): 216-236.
- [2] Sardana D, Schwendicke F, Kosan E, et al. White spot lesions in orthodontics: consensus statements for prevention and management[J]. *Angle Orthod*, 2023, 93(6): 621-628.
- [3] Ludovichetti FS, Stellini E, Zuccon A, et al. Prevention of white spot lesions induced by fixed orthodontic therapy: a literature review[J]. *Dent J*, 2025, 13(3): 103.

- [4] Lamorgese M, Veiga N, Correia MJ, et al. White spot lesion treatment options: a systematic review of different techniques for masking these lesions[J]. *Gels*, 2025, 11(5): 371.
- [5] Xia LG, Zhou CC, Mei P, et al. Expert consensus on the prevention and treatment of enamel demineralization in orthodontic treatment[J]. *Int J Oral Sci*, 2025, 17(1): 13.
- [6] Missier MS. Application of nanoparticles in dentistry[J]. *Bioinformation*, 2023, 19(1): 14-18.
- [7] Padmanabhan S. Nanotechnology in orthodontics [J]. *Semin Orthod*, 2023, 29(1): 79-84.
- [8] Ahuja D, Singh AK, Batra P. Antibacterial efficacy of nanoparticles on orthodontic materials: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Int Orthod*, 2025, 23(1): 100955.
- [9] Dias M, Zhang R, Lammers T, et al. Clinical translation and landscape of silver nanoparticles[J]. *Drug Deliv Transl Res*, 2025, 15(3): 789-797.
- [10] Tristán-López JD, Niño-Martínez N, Kolosovas-Machuca ES, et al. Application of silver nanoparticles to improve the antibacterial activity of orthodontic adhesives: an *in vitro* study[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(2): 1401.
- [11] Bahador A, Ayatollahi B, Akhavan A, et al. Antimicrobial efficacy of silver nanoparticles incorporated in an orthodontic adhesive: an animal study[J]. *Front Dent*, 2020, 17(14): 1-8.
- [12] Noga M, Milan J, Frydrych A, et al. Toxicological aspects, safety assessment, and green toxicology of silver nanoparticles (AgNPs)—critical review: state of the art[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(6): 5133.
- [13] Ferdous Z, Nemmar A. Health impact of silver nanoparticles: a review of the biodistribution and toxicity following various routes of exposure[J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(7): 2375.
- [14] Abdussalam-Mohammed W, Edbey K, Farhat HE, et al. Facile green synthesis of novel AgNPs using *Hyoscyamus* leaf extract as capping agent: characterization and their potential antibacterial activities [J]. *Inorg Chem Commun*, 2025, 173: 113893.
- [15] Rajput SK, Banerjee S, Sharma V, et al. A facile and greener approach for synthesis of lignin capped-silver nanoparticles (LS-AgNPs) and assessment of their antibacterial and antioxidant properties[J]. *J Mol Struct*, 2025, 1322: 140515.
- [16] da Conceição Tavares de Lima MH, Avelino MEL, Cavalcanti MRN, et al. Unraveling applications of gold nanoparticles in dentistry: a scoping review[J]. *J Dent*, 2025, 156: 105685.
- [17] Al-Fahham BM, Mohamed RA, Al-Talqani JMT, et al. Evaluating antimicrobial effectiveness of gold nanoparticles against *Streptococcus oralis*[J]. *Int J Dent*, 2023, 2023: 9935556.
- [18] Ghoreishi SM, Mortazavi-Derazkola S. Eco-friendly synthesis of gold nanoparticles via tangerine peel extract: unveiling their multifaceted biological and catalytic potentials[J]. *Heliyon*, 2025, 11(1): e40104.
- [19] Solanki LA, Sundari KS, Rajeshkumar S. *In-vitro* cytotoxicity evaluation of green synthesized gold nanoparticles and its indigenous mouthwash[J]. *J Pure Appl Microbiol*, 2021, 15(2): 735-742.
- [20] Bahrami R, Pourhajibagher M, Badiei A, et al. Evaluation of the cell viability and antimicrobial effects of orthodontic bands coated with silver or zinc oxide nanoparticles: an *in vitro* study[J]. *Korean J Orthod*, 2023, 53(1): 16-25.
- [21] Anita P, Sathyanarayana HP, Kumar K, et al. Antimicrobial efficacy of zinc oxide nanoparticle-coated aligners on *Streptococcus mutans* and *Candida albicans*[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023, 163(3): 338-346.
- [22] Mollabashi V, Soleymani M, Arabestani MR, et al. Evaluation of nano TiO₂ modified orthodontic composite effects on *S. mutans* population and enamel demineralization in fixed orthodontic patients; a split mouth randomized controlled clinical trial[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2023, 201(10): 4657-4666.
- [23] Ahmed MK, Alsaleem NR, AlSamak S. The effect of vanillin nanoparticles on antimicrobial and mechanical properties of an orthodontic adhesive[J]. *J Orthod Sci*, 2023, 12: 46.
- [24] Mohammed RR, Rafeeq RA. Evaluation of the shear bond strength of chitosan nanoparticles-containing orthodontic primer: an *in vitro* study[J]. *Int J Dent*, 2023: 9246297.
- [25] Imani Z, Sodagar A, Pourhajibagher M, et al. Evaluation of antibacterial effect of the orthodontic

- composite containing propolis nanoparticles in rat as an animal model[J]. *Folia Med*, 2023, 65(1): 131-139.
- [26] Bahrami R, Sodagar A, Pourhajibagher M, et al. The effect of different concentration of emodin nanoparticles, as an antibacterial agent, on the flexural resistance of acrylic resin used in orthodontics: an *in vitro* study[J]. *Int Orthod*, 2023, 21(4): 100811.
- [27] 牛丽娜. 牙釉质仿生矿化研究新进展[J]. 口腔材料器械杂志, 2025, 34(1): 5-10.
- Niu LN. Recent advances in biomimetic mineralization of enamel[J]. *Chin J Dent Mater Dev*, 2025, 34(1): 5-10.
- [28] Yan JR, Yang HY, Luo T, et al. Application of amorphous calcium phosphate agents in the prevention and treatment of enamel demineralization[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 853436.
- [29] Rahmanpanah S, Seifi M, Gharavi Z, et al. Evaluation of shear bond strength and enamel remineralizing effect of experimental orthodontic composite containing nano-hydroxyapatite: an *in vitro* study[J]. *Int Orthod*, 2023, 21(1): 100725.
- [30] Madhubala MM, Jayasree R, Kumar TSS, et al. Evaluation of enamel remineralization potential and anticariogenic efficacy of polydopamine coated biogenic amorphous calcium phosphate[J]. *Clin Oral Invest*, 2025, 29(6): 302.
- [31] Golzio Navarro Cavalcante B, Schulze Wenning A, Szabó B, et al. Combined casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate and fluoride is not superior to fluoride alone in early carious lesions: a Meta-analysis[J]. *Caries Res*, 2024, 58(1): 1-16.
- [32] Moslehitabar Z, Bagheri H, Rangrazi A, et al. Efficacy of an experimental CPP-ACP and fluoride toothpaste in prevention of enamel demineralization: an *in vitro* study on bovine enamel[J]. *Int J Dent*, 2025: 5598592.
- [33] 李爽, 胡敏. 关于正畸固定矫治中牙釉质脱矿的研究进展[J]. 口腔医学研究, 2021, 37(8): 685-688.
- Li S, Hu M. A review of enamel demineralization in orthodontic treatment with fixed appliances[J]. *J Oral Sci Res*, 2021, 37(8): 685-688.
- [34] Yan JR, Cao LY, Luo T, et al. *In vitro* evaluation of a novel fluoride-coated clear aligner with antibacterial and enamel remineralization abilities[J]. *Clin Oral Invest*, 2023, 27(10): 6027-6042.
- [35] Xu YD, Sun Y, Liu W, et al. Effects of an orthodontic primer containing amorphous fluorinated calcium phosphate nanoparticles on enamel white spot lesions[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2023, 137: 105567.
- [36] Lazar L, Vlasa A, Beresescu L, et al. White spot lesions (WSLs)-post-orthodontic occurrence, management and treatment alternatives: a narrative review [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(5): 1908.
- [37] Manoharan S, Ashfaq SS, Perumal E. MicroRNAs in fluorosis pathogenesis: impact on dental, skeletal, and soft tissues[J]. *Arch Toxicol*, 2024, 98(12): 3913-3932.
- [38] Hussein AH, Yassir YA. A novel graphite fluoride/bioactive glass-containing orthodontic primer with antibacterial and remineralization properties: an *in vitro* study[J]. *J Adhes Dent*, 2024, 26: 253-262.
- [39] Raszewski Z, Chojnacka K, Mikulewicz M. Investigating bioactive-glass-infused gels for enamel remineralization: an *in vitro* study[J]. *J Funct Biomater*, 2024, 15(5): 119.
- [40] Wanitwisutchai T, Monmaturapoj N, Srisatjaluk R, et al. Buffering capacity and antibacterial properties among bioactive glass-containing orthodontic adhesives[J]. *Dent Mater J*, 2021, 40(5): 1169-1176.
- [41] de Oliveira Roma FRV, de Oliveira TJL, Bauer J, et al. Resin-modified glass ionomer enriched with BIOGLASS: ion-release, bioactivity and antibacterial effect[J]. *J Biomed Mater Res*, 2023, 111(4): 903-911.
- [42] MacIel PP, de Medeiros ELG, Figueiredo LRF, et al. Ion release, cytocompatibility and microbial inhibition of a novel varnish containing fluoride-doped bioactive glass ceramics: an *in vitro* study[J]. *Clin Oral Invest*, 2025, 29(2): 132.
- [43] Nagasaki R, Nagano K, Nezu T, et al. Synthesis and characterization of bioactive glass and zinc oxide nanoparticles with enamel remineralization and antimicrobial capabilities[J]. *Materials (Basel)*, 2023, 16(21): 6878.
- [44] Tian J, Wu ZY, Wang Y, et al. Multifunctional dental resin composite with antibacterial and remineralization abilities[J]. *Clin Oral Invest*, 2023, 27(10): 6027-6042.

- lization properties containing nMgO-BAG[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2023, 141: 105783.
- [45] Chen XH, Liu HY, Zhang QQ, et al. Carboxymethyl chitosan stabilized AuNPs/ACP nanohybrids in enamel white spot lesions[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2024, 12: 1421887.
- [46] Guo HL, Wang N, Ye X, et al. Preparation of CMC/ACP/PHMB nanocomposites and preliminary study on their antibacterial and remineralization functions [J]. Dent Mater J, 2025, 44(1): 60-72.
- [47] Garma NMH, Ibrahim AI. Development of a remineralizing calcium phosphate nanoparticle-containing self-etching system for orthodontic bonding[J]. Clin Oral Invest, 2022, 27(4): 1483-1497.
- [48] Sánchez-Tito M, Castañeda-Vía J, Tay L. Raman microscopy evaluation of the preventive effect of a modified orthodontic adhesive with silver nanoparticles on the formation of white spot lesions[J]. J Clin Exp Dent, 2023: e706-e713.
- [49] Sánchez-Tito M, Tay LY. Effect of the addition of silver nanoparticles on the mechanical properties of an orthodontic adhesive[J]. Saudi Dent J, 2024, 36 (2): 359-363.
- [50] Tavakolinejad Z, Mohammadi Kamalabadi Y, Salehi A. Comparison of the shear bond strength of orthodontic composites containing silver and amorphous tricalcium phosphate nanoparticles: an *ex vivo* study [J]. J Dent (Shiraz), 2023, 24(3): 285-292.
- [51] Seifi M, Eskandarloo F, Amdjadi P, et al. Investigation of mechanical properties, remineralization, antibacterial effect, and cellular toxicity of composite orthodontic adhesive combined with silver-containing nanostructured bioactive glass[J]. BMC Oral Heal, 2024, 24: 650.
- [52] Taher BB, Rasheed TA. The impact of adding chitosan nanoparticles on biofilm formation, cytotoxicity, and certain physical and mechanical aspects of directly printed orthodontic clear aligners[J]. Nanomaterials, 2023, 13(19): 2649.
- [53] Shi YY, Zhang NN, Liu JJ, et al. Preparation of nanocomposites for antibacterial orthodontic invisible appliance based on piezoelectric catalysis[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5336.
- [54] Puspitasari R, Irnawati D, Widjijono. The effect of zinc oxide (ZnO) nanoparticle concentration on the adhesion of mucin and *Streptococcus mutans* to heat-cured acrylic resin[J]. Dent Mater J, 2023, 42 (6): 791-799.
- [55] Soleymanijadidi P, Moradi M, Hamedirad F, et al. Nanocurcumin release from self-cured acrylic resins; effects on antimicrobial action and flexural strength[J]. Bioengineering, 2023, 10(5): 559.
- [56] Shirazi M, Qazvini FF, Mohamadrezaie S. Antimicrobial properties of glass-ionomer cement incorporated with zinc oxide nanoparticles against mutans streptococci and lactobacilli under orthodontic bands: an *in vivo* split-mouth study[J]. Dent Res J (Isfahan), 2023, 20: 45.
- [57] Gompers E. A comparison of the effects of chlorhexidine hexametaphosphate and silver nanoparticle antimicrobials on the mechanical and esthetic properties of elastomeric chain[D]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2023.
- [58] Abraham KS, Jagdish N, Kailasam V, et al. *Streptococcus mutans* adhesion on nickel titanium (NiTi) and copper-NiTi archwires: a comparative prospective clinical study[J]. Angle Orthod, 2017, 87(3): 448-454.
- [59] Al-Fadhily ZM, Abdul-Hadi M. A novel coating of orthodontic archwires with chlorhexidine hexametaphosphate nanoparticles[J]. Int J Biomater, 2023, 2023: 9981603.
- [60] Anand BG, Shejale KP, Rajesh Kumar R, et al. Bioactivation of an orthodontic wire using multifunctional nanomaterials to prevent plaque accumulation [J]. Biomater Adv, 2023, 148: 213346.
- [61] Yu DS, Miao KF, Li Y, et al. Sputter-deposited Ta-CuN films: structure, tribological and biomedical properties[J]. Appl Surf Sci, 2021, 567: 150796.
- [62] Tawakal MS, Abdelghany Metwally AM, El-Wassefy NA, et al. Static friction, surface roughness, and antibacterial activity of orthodontic brackets coated with silver and silver chitosan nanoparticles[J]. J World Fed Orthod, 2023, 12(6): 260-268.
- [63] Łyczek J, Bończak B, Krzyńska I, et al. Gold-oxoborate nanocomposite-coated orthodontic brackets gain antibacterial properties while remaining safe for eukaryotic cells[J]. J Biomed Mater Res B

- Appl Biomater, 2023, 111(5): 996-1004.
- [64] Liu JR, Qi J, Li JD, et al. Antimicrobial and remineralization of carboxymethyl chitosan and xylitol functionalized carbon dots coating on orthodontic brackets[J]. *Int J Nanomed*, 2024, 19: 13823-13838.
- [65] Song XW, Ji MZ, Shu XY, et al. Drug delivery systems loaded with plant-derived natural products for dental caries prevention and treatment[J]. *J Mater Chem B*, 2025, 13(6): 1920-1934.
- [66] Jeong GJ, Rather MA, Khan F, et al. pH-responsive polymeric nanomaterials for the treatment of oral biofilm infections[J]. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 2024, 234: 113727.
- [67] Nunziata G, Nava M, Lacroce E, et al. Thermo-responsive polymer-based nanoparticles: from chemical design to advanced applications[J]. *Macromol Rapid Commun*, 2025, 46(9): 2401127.
- [68] Sun GW, Huang S, Wang SF, et al. Nanomaterial-based drug-delivery system as an aid to antimicrobial photodynamic therapy in treating oral biofilm [J]. *Futur Microbiol*, 2024, 19(8): 741-759.
- [69] An JL, Shen X, Peng TH, et al. Formulation of arginine-loaded mesoporous silica nanoparticles (Arg@MSNs) modified orthodontic adhesive[J]. *J Dent*, 2024, 145: 104992.
- [70] Wang SP, Fang LX, Zhou HX, et al. Silica nanoparticles containing nano-silver and chlorhexidine respond to pH to suppress biofilm acids and modulate biofilms toward a non-cariogenic composition[J]. *Dent Mater*, 2024, 40(2): 179-189.
- [71] Cao LY, Yan JR, Luo T, et al. Antibacterial and fluorescent clear aligner attachment resin modified with chlorhexidine loaded mesoporous silica nanoparticles and zinc oxide quantum dots[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2023, 141: 105817.
- (本文编辑 李彩)