DOI：10.3969/j.issn.1004-4949.2026.16.016　　•口颌美学整复•

纳米氧化锌对热凝义齿基托树脂抗菌性能及力学性能的影响

孟宇鹏

（苏州卫生职业技术学院附属口腔医院/苏州市华夏口腔医院口腔修复科，江苏　苏州　215002）

[摘　要]**目的**　探究纳米氧化锌对热凝义齿基托树脂抗菌性能及力学性能的影响。**方法**　本研究以热凝义齿基托树脂为研究对象、纳米氧化锌为改性填料，设置抗菌实验梯度分组：纳米氧化锌质量分数0%（空白对照）、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%；设置力学实验梯度分组：纳米氧化锌质量分数0%（空白对照）、1%、3%、5%，统一热固化工艺制备标准树脂试件，各组均设置6个平行试件。实验首先配置梯度浓度纳米氧化锌悬液测定最小杀菌浓度（MBC）；体外培养变形链球菌并对不同改性树脂试件进行抗菌实验，计算各组树脂抗菌率；采用万能试验机三点弯曲试验测试不同填料含量树脂试件的挠曲强度，对比分析改性树脂抗菌与力学性能变化。**结果**　纳米氧化锌对变形链球菌最小杀菌浓度为0.3125 mg/ml；树脂抗菌率随纳米氧化锌添加量升高逐步提升，0.4%添加量时抗菌率达100%并进入饱和平台期；树脂挠曲强度随填料添加呈先升后降趋势，3%添加组挠曲强度为（126.86±7.07）MPa，达到峰值，显著高于对照组的（96.38±8.75）MPa（$P<0.01$），5%组强度有所回落但仍优于空白对照组（$P<0.05$）。**结论**　纳米氧化锌可显著提升热凝基托树脂抗变形链球菌能力，0.4%质量分数即可实现完全抑菌；3%添加量可最大化改善树脂挠曲强度，过量填料会破坏树脂基质连续性降低力学性能；临床可根据修复需求选择适配添加比例，优化义齿抗菌耐久度与力学美学表现。

[关键词] 纳米氧化锌；热凝基托树脂；变形链球菌；抗菌率；挠曲强度；口腔美容修复

[中图分类号] R783.1　　[文献标识码] A　　[文章编号] 1004-4949（2026）16-0064-05

Effects of Nano-zinc Oxide on Antibacterial and Mechanical Properties of Heat-curing Denture Base Resin

MENG Yupeng

(Department of Prosthodontics, Affiliated Stomatological Hospital of Suzhou Vocational Health College/Suzhou Huaxia Stomatological Hospital, Suzhou 215002, Jiangsu, China)

[Abstract]Objective　To explore the effects of nano-zinc oxide on the antibacterial performance and mechanical properties of heat-curing denture base resin. **Methods**　In this study, heat-curing denture base resin was taken as the research subject, and nano-zinc oxide was used as the modified filler. Gradient groups were set for antibacterial tests with mass fractions of nano-zinc oxide at 0% (blank control), 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% and 0.5%. Gradient groups for mechanical tests were set at 0% (blank control), 1%, 3% and 5%. Standard resin specimens were prepared via unified thermal curing process, with six parallel specimens in each group. The minimum bactericidal concentration (MBC) of gradient nano-zinc oxide suspensions was determined. Streptococcus mutans was cultured in vitro, and antibacterial experiments were performed on modified resin specimens to calculate the antibacterial rate of each group. The flexural strength of resin specimens with different filler contents was tested by a three-point bending test using a universal testing machine, and the changes in antibacterial and mechanical properties of the modified resin were compared and analyzed. **Results**　The minimum bactericidal concentration of nano-zinc oxide against Streptococcus mutans was 0.3125 mg/ml. The antibacterial rate of resin increased gradually with the rising addition of nano-zinc oxide, reaching 100%

第一作者：孟宇鹏（1996.10-），男，江苏扬中人，硕士，医师，主要从事在抗菌材料口腔修复中的应用研究

医学美学美容

at the mass fraction of 0.4% and entering a saturated plateau stage. The flexural strength of resin increased first and then decreased with the increase of filler content. The 3% group achieved the peak flexural strength of (126.86±7.07)MPa, which was significantly higher than (96.38±8.75)MPa of the blank control group (P<0.01). The strength of the 5% group decreased but was still better than that of the blank control group (P<0.05). **Conclusion** Nano-zinc oxide can significantly enhance the resistance of heat-curing denture base resin against Streptococcus mutans, and complete antibacterial effect can be achieved at a mass fraction of 0.4%. The addition of 3% nano-zinc oxide maximizes the flexural strength of resin, while excessive filler destroys the continuity of the resin matrix and reduces mechanical properties. Clinically, appropriate addition ratios can be selected according to restorative needs to optimize the antibacterial durability, mechanical performance and aesthetic performance of dentures.

[Key words] Nano-zinc oxide; Heat-curing denture base resin; Streptococcus mutans; Antibacterial rate; Flexural strength; Oral aesthetic restoration

随着人口老龄化加剧，牙列缺损、牙缺失患者逐年增多。在口腔修复美容临床中，可摘局部义齿与全口义齿应用最为广泛。热固化甲基丙烯酸甲酯（PMMA）因色泽接近天然牙、工艺简单、成本低廉、打磨修补便捷等优势，是目前义齿基托的核心制备材料。纯PMMA树脂本体孔隙多、结构松散，使用过程中表面会吸附唾液蛋白，逐步形成菌斑生物膜。变形链球菌是诱发龋齿的关键细菌，长期附着在基托表面后，会诱发基牙继发龋、义齿性口炎，还会造成口腔黏膜充血、糜烂，不仅达不到预期的美观修复效果，还会大幅缩短义齿使用年限[1，2]。普通热凝树脂挠曲强度有限，长期承受咀嚼带来的循环外力，容易出现断裂、形变，提高修复失效的可能性。为同步解决树脂抗菌能力不足与力学性能短板这两项瓶颈问题，无机纳米抗菌填料成为口腔材料改良研究的研究热点。纳米氧化锌已通过美国FDA医用安全认证，无毒性，拥有广谱抑菌能力，生物相容性良好，同时耐热、抗菌效果持久稳定。和常规氧化锌粉体对比，纳米粒径带来的量子尺寸效应、表面效应可以明显增强抑菌效果；同时纳米颗粒能够填充树脂内部微孔，充当无机增强组分，优化复合树脂整体力学架构[3-5]。现有研究显示[4-6]，四针状氧化锌晶须可以减少细菌在树脂表面附着；而载银类抗菌材料会提升树脂表面粗糙程度，反而更利于细菌附着繁殖；纳米氧化锌同时兼顾低细菌黏附、强效抑菌两大特点，更适合需要长期佩戴的美容修复义齿。目前关于纳米氧化锌改性基托树脂的研究多单独聚焦抗菌或力学单一维度，缺少同一体系下梯度添加量对两项性能分析。基于此，本研究旨在探究不同添加比例纳米氧化锌对热凝义齿基托树脂抗菌性能及力学性能的影响，现报道如下。

1 材料与方法

1.1 实验仪器与材料

1.1.1仪器 电热恒温培养箱（DNP-9052Y，上海精宏实验设备有限公司）；紫外可见分光光度计（UV-4802H，上海尤尼柯仪器有限公司）；自动三重纯水蒸馏器（SZ-97，上海贤德实验仪器有限公司）；MLS-3751L-PC高温蒸汽灭菌器（YM100A，上海岛韩实业有限公司）；万能材料试验机（TY8000-A 20N-50N，江苏天源试验设备有限公司）；超净工作台（Heraguard™ ECO，赛默飞世尔科技实验室产品）；超声波清洗机（KQ-500V，昆山市超声仪器有限公司）。

1.1.2材料 日进Ⅱ型热凝义齿基托树脂（上海二医张江生物材料有限公司，国械注准20143172318）；纳米氧化锌[粒径＜100 nm，中科金研（北京）科技有限公司]；变形链球菌标准菌株（Streptococcus mutans ATCC®25175™，杭州宝赛生物）；无菌生理盐水（BZW21232，南京乐诊生物技术有限公司）；脑心浸液培养基（HB8297-5，青岛高科技工业园海博生物技术有限公司）；硅烷偶联剂（KH-550，南京创世化工助剂有限公司）；聚乙烯薄膜（厚度0.05 mm，上海海兴塑胶有限公司）。

1.2 实验分组与试件制备

1.2.1抗菌性能实验组 将经过干燥处理的纳米氧化锌粉体与牙托粉进行充分混合，按照质量分数配置六组复合粉料，梯度分别为0%空白对照组、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%。各组粉料参照临床标准粉液比例调拌，采用热固化工艺成型，制备平板试样规格控制为长与宽（50±2）mm、

厚度（2±0.5）mm。全部试样打磨、抛光处理后，用无菌去离子水多次冲洗，烘干备用，各组均设置6个试件。

1.2.2力学性能实验组 纳米氧化锌添加质量分数0%、1%、3%、5%，参照抗菌性能组一致的制备流程：将干燥后的纳米氧化锌粉体与牙托粉充分混匀，按临床标准粉液比例调拌，采用相同热固化工艺成型，制备规格为2 mm×2 mm×25 mm的标准挠曲测试试件。固化完成后经逐级砂纸打磨、抛光处理，无菌去离子水反复冲洗后烘干备用，每组设置6个平行试件，使用精度0.01 mm的游标卡尺精准测量各试件的长、宽、高尺寸并记录。

1.2.3菌悬液制备 活化变形链球菌标准菌株，分光光度计校正菌液浓度，稀释至（1~3）×10^5 CFU/ml标准菌悬液备用。

1.3 实验检测方法

1.3.1最小杀菌浓度（MBC）测定 将纳米氧化锌粉体放入120 ℃烘箱持续干燥24 h；取用无菌生理盐水配制浓度40 mg/ml的储备原液，再逐级稀释得到梯度混悬液，对应浓度分别为10、5、2.5、1.25、0.625、0.3125、0.156 25、0.078 125、0.039 mg/ml。实验同步设置阳性对照组（生理盐水+等量菌悬液）与阴性对照组（最高浓度纳米氧化锌混悬液+等量无菌生理盐水），用于验证实验体系的有效性。将不同浓度样品分别与菌液混匀，放置37 ℃恒温环境孵育24 h，之后采用平板涂布法观测菌落增殖情况。能够完全抑制细菌繁殖的最低样品浓度，即为该材料最低杀菌浓度MBC，整套实验重复开展3组平行试验。

1.3.2树脂抗菌率检测 取定量标准菌悬液100 μl滴敷在每一组试样表面，置于37 ℃厌氧环境下孵育24 h；随后使用无菌冲洗液冲下试样表面附着的活菌，对洗脱液做梯度稀释后涂布琼脂平板，统计平板上长出的菌落数量。抗菌率计算方式如下：R（%）=（B–C）/B×100%。公式中B代表空白组菌落统计数值，C为各实验组菌落数；每组实验重复操作3次，最终采用平均值参与计算。

1.3.3挠曲强度三点弯曲测试 采用万能材料试验机开展力学测试，设备设定参数如下：压头半径2.0 mm，支座跨距20 mm，统一加载速率1 mm/min；试验环境维持室温22 ℃，环境相对湿度控制在50%。材料挠曲强度采用公式FS=3FL/2WH^2计算，式中F代表试件断裂时的载荷数值，L为试验跨距，W、H分别对应试样宽度与厚度；试验结束后统计并整理各组试样的平均挠曲强度数值。

1.4 统计学方法 采用SPSS 27.0统计学软件进行数据分析，计量资料以（$\bar{x}\pm s$）形式表示，多组间计量资料比较采用单因素方差分析，组间两两比较采用LSD–t检验，检验水准α=0.05，P<0.05为差异有统计学意义，P<0.01为差异有显著统计学意义。

2 结果

2.1 纳米氧化锌最小杀菌浓度 梯度悬液培养24 h菌落生长结果显示：0.3125 mg/ml及以上浓度无变形链球菌生长，低于该浓度可见明显菌落，确定纳米氧化锌对变形链球菌MBC=0.3125 mg/ml，见图1。

2.2 不同添加量树脂抗菌率 热凝树脂的抗菌率随纳米氧化锌添加比例升高呈阶梯式上升趋势：0.1%添加组抗菌率为56.75%，0.2%组提升至78.43%，0.3%组可达90.38%；当添加量升至0.4%时，抗菌率达到100%，继续提升至0.5%时抗菌效果不再升高，进入抑菌饱和平台期，见图2。

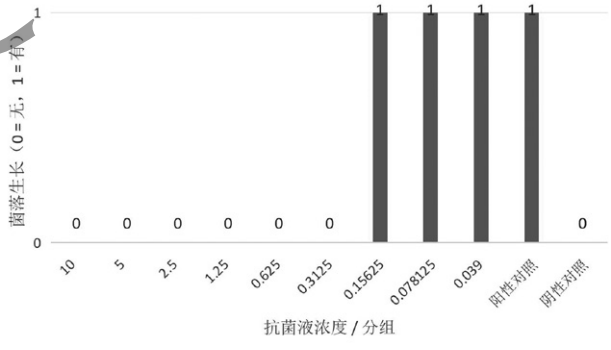

图1 不同浓度纳米氧化锌悬液作用24 h变形链球菌生长情况

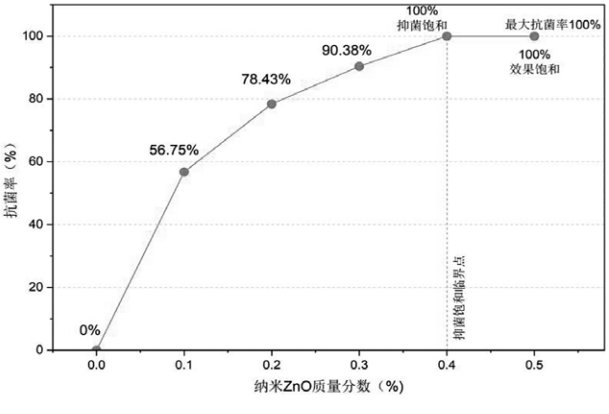

图2 不同添加量树脂抗菌率

医学美学美容

2.3 不同填料添加量树脂挠曲强度 空白对照组挠曲强度为（96.38 ± 8.75）MPa，1%添加组提升至（114.52 ± 6.54）MPa，3%添加组达到峰值（126.86 ± 7.07）MPa，组间比较，差异有统计学意义（t=4.068、6.637，P=0.002、0.001）；当添加量升至5%时，挠曲强度回落至（107.87 ± 6.98）MPa，但仍高于空白对照组，差异有统计学意义（t=2.514，P=0.031）。

3 讨论

变形链球菌是义齿表面最主要的定植致病菌，该菌种可通过产酸代谢侵蚀基托周边基牙，诱发继发龋；同时其形成的生物膜会持续刺激口腔黏膜，诱发义齿性口炎，既损害修复体美观效果，也严重威胁口腔组织健康[7-10]。本实验研究结果显示，纳米氧化锌具备高效抗变形链球菌活性，纯粉体MBC低至0.3125 mg/ml，将其复合入PMMA树脂后，材料抑菌能力随填料占比提升逐步增强，0.4%添加即可实现完全抑菌。分析可知，纳米氧化锌对变形链球菌的抑制作用由多重机制协同实现[11-14]：其一，材料缓释的游离锌离子能够破坏细菌细胞膜的通透结构，干扰菌体内部酶活性与核酸复制过程，从代谢层面阻滞细菌增殖；其二，纳米级颗粒具备极小的粒径尺寸，可通过物理穿刺方式破坏细菌细胞壁，造成菌体机械损伤进而灭活细菌；其三，纳米氧化锌接触口腔环境中的水分后，可生成活性氧自由基，通过氧化作用分解细菌蛋白与多糖基质，从根源阻碍牙菌斑生物膜的成型与定植。与传统载银抗菌填料相比，纳米氧化锌改性不会明显增加树脂材料的表面粗糙度，能够有效减少细菌黏附的附着位点，在实现高效抑菌的同时，保留了义齿基托表面的光滑质感与美学性能，规避了银离子析出导致的基托变色、修复外观受损等弊端[15]。实验发现，当纳米氧化锌添加比例超过0.4%后，材料抗菌率不再持续上升，性能趋于饱和。这一现象主要是由于树脂基质内的抑菌活性释放位点已达到饱和阈值，过量掺杂填料无法进一步提升抗菌效果，反而会增加材料制备成本，还可能对树脂的透光性与色泽稳定性造成负面影响。因此，应用于口腔美容修复的改性基托树脂，0.4%可能为最优掺杂比例，可充分满足临床长效抗菌的使用需求。

常规纯热凝PMMA树脂内部存在大量微孔结构，整体结构疏松，在外力负荷作用下裂纹极易快速扩散延展，整体挠曲性能偏弱，长期承担咀嚼应力后容易出现弯折、断裂等失效问题。纳米氧化锌可作为无机补强填料填充树脂内部孔隙，通过多重增韧机制改善树脂基体的力学短板[16-18]：一是提升树脂整体无机填料占比，有效增强材料表面硬度与耐磨性能；二是依托纳米颗粒的载荷传递、裂纹偏转及颗粒拔出效应，均匀分散外部集中应力；三是高效吸收断裂能，抑制裂纹持续拓展，缓解树脂材料的脆性特征，显著提升基体韧性与抗弯折性能。本实验3%添加组挠曲强度达到最大值，较空白组提升约31.6%，改良效果最优；当填料提升至5%时力学性能下降，究其原因，高浓度纳米颗粒难以在树脂基质中均匀分散，极易发生团聚现象，使复合材料内部产生界面缺陷与微细裂隙。材料受力时，颗粒团聚区域会形成应力集中靶点，加速裂纹萌生与扩展，最终导致树脂机械强度下降。该实验结果表明，若临床义齿修复优先考量抗折性与长期耐久性能，3%质量分数为纳米氧化锌改性的最优掺量，可在显著提升力学性能的同时，保留良好的基础抗菌效果，适配临床长期佩戴需求。

结合本次抗菌、力学两项指标数据，针对两种不同临床修复场景可提出差异化选材方案：①前牙美观类局部义齿、短期临时修复体：该类修复优先考量外观效果，同时需要减少细菌附着；选用0.4%掺量纳米氧化锌改性树脂，材料能够完全抑制变形链球菌繁殖；填料占比较低不易出现颗粒团聚，基托透光性与天然牙色泽匹配度高，兼顾美观，还能减少菌斑附着，降低黏膜炎症发生概率；②全口义齿、后牙游离端可摘义齿：这类修复长期承受较大咀嚼力，基托折断风险更高，建议采用3%添加比例，该组别挠曲强度提升幅度最大，能有效降低断裂失效概率；此配比抗菌效果接近90%，可明显减少菌斑堆积，在强化材料耐久性能的同时兼顾基础抑菌作用；③不建议选用0.5%及更高抗菌梯度、5%以上填料配比，前者无法进一步提升抑菌效果，还会增加原料成本，甚至改变树脂原有色泽；后者会造成材料力学性能

医学美学美容

下滑，提升远期修复失败的可能性。

本次实验仅采用体外静态细菌培养模式，未能还原口腔内部唾液持续冲刷、冷热交替、咀嚼摩擦等动态复杂环境。后续可增设材料老化、细胞毒性相关试验，验证改性树脂长期使用的生物安全性能；实验仅针对变形链球菌单一菌种开展抑菌检测，后续可补充白色念珠菌、金黄色葡萄球菌相关抑菌实验，完善材料广谱抗菌相关数据。此外，还可引入硅烷偶联剂对纳米氧化锌进行表面修饰，优化填料与树脂基体的界面结合效果，同步改善材料抑菌、力学与色泽稳定性能，研发更适用于口腔美容修复的专用改性牙托树脂。

综上所述，纳米氧化锌改性处理能够显著增强热凝基托树脂抑制变形链球菌的能力，0.4%质量分数即可实现完全抑菌效果；3%添加比例可最大程度优化树脂挠曲强度，填料添加过量会破坏树脂基体连续结构，造成力学性能下降。临床应用时可结合修复类型与使用需求挑选适宜的填料掺量，同步改善义齿的抗菌能力、耐久性能与外观美学表现。

[参考文献]

[1]汪宇,黄昊文,刘欣,等.口腔环境响应性的银纳米颗粒对变形链球菌的抗菌作用[J].口腔材料器械杂志,2024,33(2):74-81.

[2]Al-Thobity AM,Gad MM.Effect of silicon dioxide nanoparticles on the flexural strength of heat-polymerized acrylic denture base material:A systematic review and meta-analysis[J].Saudi Dent J,2021,33(8):775-783.

[3]周诗雨,杜芹.纳米氧化锌的抗菌活性及其在口腔材料中的研究进展[J].成都医学院学报,2023,18(1):132-136.

[4]Waghmare A,Nair C,Shukla AK,et al.Flexural strength and surface hardness of nanocomposite denture base resins[J].Heliyon,2024,10(22):e40442.

[5]Pai E,Nayak A,Hallikerimath RB,et al.Comparison of titanium dioxide nanoparticles and silver nanoparticles for flexural strength once incorporated in heat-cure acrylic denture base resin:An in vitro Study[J].J Indian Prosthodont Soc,2023,23(2):127-134.

[6]张嘉俊,李鹰,赵宁睿,等.牙科植入体表面常见纳米金属及其氧化物抗菌材料新进展[J].北京口腔医学,2026,34(1):69-76.

[7]陈泽源,张旭.口腔微生物组:稳态维持、疾病关联及致病机制[J].四川大学学报(医学版),2026,57(3):861.

[8]陈荣荣,张修银,杨瑞,等.添加不同抗菌剂的纳米增强义齿基托树脂对变形链球菌黏附性能的影响[J].口腔材料器械杂志,2013,22(3):126-130.

[9]吴冠希,聂华,朱雅男.口腔致龋生物膜中白色念珠菌与变异链球菌交互作用机制研究进展[J].北京口腔医学,2023,31(6):440-443.

[10]徐梓阳,王若琳,郭一凡,等.纳米氧化锌的抗菌作用机制及其影响因素的研究进展[J].吉林大学学报(医学版),2025,51(4):1129-1136.

[11]Ruan S,Zhao Y,Chen R,et al.Effect of zinc oxide/graphene oxide nanocomposites on the cytotoxicity,antibacterial and mechanical properties of polymethyl methacrylate[J].BMC Oral Health,2024,24(1):1013.

[12]孙汪心悦,舒菲,张志豪,等.钛表面ALD构建氧化锌纳米薄膜及其性能研究[J].口腔医学,2023,43(2):97-103.

[13]徐丽亚,汪瑱,杨鸿杰,等.氧化锌-银/生物基聚酰胺56纳米纤维膜的制备及其抗菌性能[J].纺织学报,2025,46(7):37-45.

[14]陈耀忠,刘雁军,陈建明,等.氧化锌/银纳米复合物对新型根尖充填材料性能影响的研究[J].实用口腔医学杂志,2022,38(5):583-588.

[15]司银芳,胡语婕,张凡,等.生物合成氧化锌纳米颗粒材料及其抗菌应用[J].化工进展,2023,42(4):2013-2023.

[16]梁蓓蕾,逯宜,李蕴聪,等.纳米氧化锌改性复合树脂即刻抗菌性能及其机制的研究[J].实用口腔医学杂志,2020,36(1):20-23.

[17]韩蓉,张志民,赵远航,等.锌和氮改性二氧化钛纳米粒子/介孔三氧化二铝复合树脂的制备及其性能评价[J].吉林大学学报(医学版),2025,51(4):904-913.

[18]孔莘子,孙浩宸,尚秋颖,等.氮化硼纳米管/氧化锌纳米复合体系改性流体树脂的制备及其性能研究[J].兰州大学学报(医学版),2022,48(10):12-17.

收稿日期：2026-7-23　　编辑：张孟丽

医学美学美容