

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.14.046

## 玻璃陶瓷在口腔修复学中的应用进展

李一凡<sup>1,2</sup>, 胡杨<sup>1,2</sup>

[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]** 口腔修复学是通过人工修复体恢复缺损或缺失牙的形态、功能及美观的学科。目前临床常用材料包括金属合金、树脂复合材料及玻璃陶瓷等。玻璃陶瓷具有美观、生物相容性良好、可调控的力学性能等优点, 在临床广泛应用。然而, 其脆性高、易折裂, 且存在热失配与加工难度大的问题, 仍需临床进一步探究。本文综述了玻璃陶瓷在口腔修复学中的应用进展, 涵盖材料分类、临床应用现状及其性能改进技术, 旨在系统分析现有研究的不足, 为开发高可靠性玻璃陶瓷修复体提供理论参考。

**[关键词]** 玻璃陶瓷; 口腔修复学; 金属合金; 树脂复合材料

**[中图分类号]** R783.1

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1004-4949 (2025) 14-0186-05

### Application Progress of Glass-ceramic in Prosthodontics

LI Yifan<sup>1,2</sup>, HU Yang<sup>1,2</sup>

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

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

**[Abstract]** Prosthodontics is a discipline that restores the shape, function and aesthetics of defective or missing teeth through artificial prostheses. Currently, commonly used clinical materials include metal alloy, resin composite and glass-ceramic. Glass-ceramic has the advantages of aesthetics, good biocompatibility and adjustable mechanical properties, and is widely used in clinical practice. However, its high brittleness and fracture susceptibility, together with thermal mismatch and processing challenges, warrant further clinical investigation. This article reviews the application progress of glass-ceramic in prosthodontics, covering material classification, current clinical application status and performance improvement technologies, aiming to systematically analyze the deficiencies of existing research and provide a theoretical reference for the development of highly reliable glass-ceramic prostheses.

**[Key words]** Glass-ceramic; Prosthodontics; Metal alloys; Resin composites

口腔修复学 (prosthodontics) 旨在通过人工修复体恢复牙齿缺损或缺失牙形态、功能及美观, 修复材料是影响其修复效果的关键因素。牙体修复材料主要包括金属、复合树脂、陶瓷等<sup>[1]</sup>。其中陶瓷材料凭借其卓越的美学表现、可靠的机械性能以及优异的化学稳定性, 已成为当前口腔修复领域备受关注的核心修复材料之一。玻璃陶瓷

作为重要的全瓷修复材料, 美学效果较为理想, 并具备良好的生物相容性及可调控的物理机械性能<sup>[2, 3]</sup>。然而, 该材料固有的脆性使其在复杂生物力学环境中易发生折裂, 同时存在热失配及加工难度大等问题。如何解决上述问题成为当前临床研究的热点。本文综述了玻璃陶瓷的分类、临床应用及其性能改进方法技术, 并对其发展前景

第一作者: 李一凡 (1999.2-), 男, 湖北孝感人, 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, 副主任医师, 副教授, 主要从事骨组织工程及口腔修复材料学方面研究

进行了展望,旨在系统梳理玻璃陶瓷在口腔修复领域的研究现状与进展,分析现存问题,为开发高可靠性、高性能的玻璃陶瓷修复体提供一定参考。

## 1 玻璃陶瓷分类

玻璃陶瓷是一种由无机复合材料通过受控结晶过程制备而成的材料,主要由大量尺寸通常小于1  $\mu\text{m}$ 的微小晶体以及少量残留玻璃相组成<sup>[4]</sup>。临床常用的玻璃陶瓷包括云母基玻璃陶瓷、磷灰石基玻璃陶瓷、白榴石基玻璃陶瓷、二硅酸锂玻璃陶瓷等<sup>[5]</sup>。

**1.1 云母基玻璃陶瓷** 云母基玻璃陶瓷主要由晶体相的云母和玻璃基质组成<sup>[6]</sup>。云母晶体具有片状和互锁形态,其尺寸和体积分数是调节玻璃陶瓷耐磨性和力学性能的关键。云母基玻璃陶瓷最常见的应用是Dicor<sup>®</sup>,含有55%四硅氟云母和45%玻璃基质,具有优异的半透明性、可加工性与机械性能<sup>[7]</sup>。Dicor<sup>®</sup>云母基玻璃陶瓷广泛用于贴面、嵌体和前牙全冠,其磨损性接近天然牙釉质,与对颌牙同步磨损,不易导致对颌牙过度磨损。云母基玻璃陶瓷的主要缺点是机械强度低,加工条件困难,限制了其临床应用和普及<sup>[8]</sup>。

**1.2 磷灰石基玻璃陶瓷** 磷灰石基玻璃陶瓷以氟磷灰石 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2]$ 为主晶相,含氟玻璃基质,具有较强的化学性能。氟磷灰石赋予高化学稳定性及可控晶体形貌(针状或纳米级),可显著提升半透明性与色散效应。磷灰石基玻璃陶瓷主要用于贴面、嵌体、高嵌体、前牙冠修复,其主要缺点同样是机械强度低,不适用于后牙高应力区如桥体修复或多单位固定桥。

**1.3 白榴石玻璃陶瓷** 白榴石玻璃陶瓷主晶相为白榴石( $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ ),分布于硅酸盐玻璃基质中。白榴石矿物提高了玻璃陶瓷的热膨胀系数以匹配金属基底,纳米晶体提升了玻璃陶瓷的抗弯强度:Chen X等<sup>[9]</sup>通过控制白榴石微晶的成核和晶体生长,生产出了第一批纳米级的白榴石微晶。Theocharopoulos A等<sup>[10]</sup>利用纳米级烧结的商用玻璃颗粒制备了高结晶体、平均尺寸为0.05  $\mu\text{m}$ 、具有较高抗弯强度的纳米级白色花岗岩晶体。上述研究对于减少白榴石晶体的尺寸、牙釉质的磨

损,增强美学特性和提高机械强度方面提至关重要。白榴石玻璃陶瓷常被用作贴面、镶嵌、嵌体和单冠,但强度较弱,无法应用于固定桥。

**1.4 二硅酸锂玻璃陶瓷** 二硅酸锂玻璃陶瓷主要由玻璃基质和棒状互锁的二硅酸锂( $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ )晶体组成,独特的棒状互锁结构可有效阻止微裂纹的扩展,其断裂韧性与抗弯强度为玻璃陶瓷之最,弹性模量高<sup>[11, 12]</sup>。二硅酸锂晶体排列及形态(形状、尺寸和体积分数)对其玻璃陶瓷的性能有显著影响<sup>[13]</sup>。二硅酸锂玻璃陶瓷是目前临床应用最广泛的玻璃陶瓷,广泛用于全冠、部分冠、桩、嵌体、贴面、种植基台等<sup>[14]</sup>。尽管二硅酸锂玻璃陶瓷具有许多优点,但咬合力过大时其必须承受更高的外部压力,可能导致材料出现微裂纹或缺陷,因此不适合用于后牙多颗固定桥。

## 2 玻璃陶瓷在牙科修复中的应用

**2.1 贴面修复体** 瓷贴面修复体中最常用是长石质瓷与玻璃陶瓷两种材料。相较于长石质瓷贴面,玻璃陶瓷贴面的存留率更高,因为其晶体相提高了抗折强度;而长石质瓷中玻璃含量更高,更容易变色<sup>[15]</sup>。除了晶体相外,厚度也对二硅酸锂玻璃陶瓷贴面抗折能力有着显著影响<sup>[16]</sup>。Klein P等<sup>[17]</sup>也报道了白榴石基玻璃陶瓷、二硅酸锂玻璃陶瓷制成的贴面是一种微创且可靠的治疗选择。刘甜等<sup>[18]</sup>对43例行玻璃陶瓷贴面修复体治疗患者随访4~6年,发现其总体修复成功率为88.9%,且咬合力均匀分布,避免了应力集中导致的修复体折裂或基牙折断。由此可知,玻璃陶瓷在贴面修复体中抗折强度、长期存留率和临床成功率表现优异,通过控制贴面厚度与咬合力分布是影响其远期可靠性的重要因素。

**2.2 嵌体与高嵌体修复体** 传统的玻璃陶瓷因强度低和脆性高,仅能用于前牙贴面等低应力区修复。后期通过引入40~50 wt%白榴石晶体,利用热压铸技术才首次满足后牙嵌体的强度需求<sup>[19]</sup>。目前,二硅酸锂玻璃陶瓷嵌体或高嵌体10.9年的总留存率已达95.6%,这种高成活率与其高抗弯强度、良好的抗断裂韧性有关<sup>[20]</sup>。数字化技术的应用也可显著提高玻璃陶瓷嵌体/高嵌体的修复效

率和精度,减少就诊次数<sup>[21, 22]</sup>。影响玻璃陶瓷嵌体/高嵌体临床成功率的关键因素包括牙体预备边缘位置、洞型深度、粘接技术、垫底材料、热处理工艺等<sup>[23]</sup>。玻璃陶瓷嵌体/高嵌体具有高力学强度,配合数字化技术,已成为后牙残冠、食物嵌塞等复杂缺损的良好修复方案,但其应用仍需与临床场景严格匹配。

2.3 全冠修复体 临床常用全瓷冠材料为二硅酸锂玻璃陶瓷,机械强度为360~400 MPa,可满足临床修复要求,且具有较高的存留率<sup>[5]</sup>。有研究发现<sup>[24]</sup>,相较于二硅酸锂玻璃陶瓷全冠,二氧化锆全瓷冠对龈沟液标志物的影响较后者更小,更利于牙周健康。也有研究发现<sup>[25]</sup>,二氧化锆陶瓷的效果优于玻璃陶瓷全冠,但玻璃陶瓷仍显示出良好的机械性能。陈月靖等<sup>[26]</sup>对椅旁CAD-CAM二硅酸锂玻璃陶瓷全冠的修复效果进行了评价,进一步验证了二硅酸锂玻璃陶瓷全冠的临床适用性和长期效果。在改善玻璃陶瓷全冠力学性能方面,使用锆增强型的二硅酸锂玻璃陶瓷进行数字化制作的单体冠,发现其具备良好的强度、抛光性能和光学特性,为全瓷冠的制作提供了新的思路和方法<sup>[27]</sup>。玻璃陶瓷全瓷冠在牙科修复中具有广泛的应用前景,但在某些特定情况下,二氧化锆等其他材料可能表现出更优越的性能。

### 3 玻璃陶瓷的力学性能改善方法

3.1 热处理参数调控改性 研究发现<sup>[28]</sup>,改变热处理的时间和温度可影响云母基玻璃陶瓷的微观结构和体外性能。烧结温度和压力对磷灰石基玻璃陶瓷均有一定的影响,使用羟基磷灰石粉体为原料,利用放电等离子体烧结技术,烧结温度为900℃、烧结压力为100 MPa时,所制备的玻璃陶瓷在可见光波长550 nm处的透过率达80%以上<sup>[29]</sup>。研究发现<sup>[30]</sup>,晶化热处理工艺影响石榴石玻璃陶瓷的力学性能,随着石榴石晶体的析出,其力学性能明显提高。Li XC等<sup>[31]</sup>发现,在NaNO<sub>3</sub>盐浴中,将处理温度调至中等水平,玻璃陶瓷的抗弯强度和断裂韧性显著提高。由此可见,热处理参数显著调控玻璃陶瓷微观结构与性能,未来研究可聚焦于多参数协同优化及新烧结技术应用。

3.2 取代/添加离子、添加剂改性 有研究报道<sup>[32, 33]</sup>,

在云母基玻璃组合物中加入锂、镁、钙和钡会影响其微观结构和性能,添加氟化物也会影响云母基玻璃陶瓷的机械性能、微观结构、细胞粘附性和抗菌性能。另有研究发现<sup>[34]</sup>,添加二氧化钛作为成核剂可提高云母基玻璃陶瓷的加工性和耐水性。与含其他阴离子的磷灰石相比,采用氟磷灰石作为玻璃陶瓷的晶相,具有较高的耐辐照性<sup>[35]</sup>。此外,用锂代替钾可以形成热学性能和力学性能更好的含锂四硅氟云母<sup>[36]</sup>。Qin F等<sup>[37]</sup>也发现使用Ba<sup>2+</sup>或Ca<sup>2+</sup>取代K<sup>+</sup>或Na<sup>+</sup>作为云母晶体中的层间离子,可以形成高强度云母基玻璃陶瓷。由此可知,离子、添加剂改性可定向调控玻璃陶瓷的强度、耐辐照性等性能,未来研究应聚焦于开发新型添加剂,深化离子交换机制研究。

3.3 成分比例调控 研究发现<sup>[38]</sup>,当氟磷灰石玻璃陶瓷材料中氟磷灰石组分含量增加时,其抗弯强度、弹性模量、断裂韧性、硬度和密度逐渐提高。傅茂洋等<sup>[39]</sup>研究报道,CaO含量会影响玻璃陶瓷相中晶体的大小、分布、形状和晶相种类,其含量越大,玻璃陶瓷样品的化学稳定性越好,当CaO摩尔分数为15%时,制备的玻璃陶瓷样品具有最优异的化学稳定性。石榴石掺杂也可以有效提高牙科玻璃陶瓷材料的抗折强度和热膨胀系数<sup>[40]</sup>,当掺杂量为50%时,其抗折强度由原来的61.02 MPa提高到127.43 MPa,热膨胀系数由原来的 $7.28 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 提高到 $15.72 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。Kumar PH等<sup>[41]</sup>在石榴石基玻璃陶瓷中加入细氧化铝,可以改善其机械性能。与纯石榴石基玻璃陶瓷相比,添加氧化铝的样品中形成了第二相的霞石,霞石具有较高的热膨胀系数,使得玻璃陶瓷具有较高的抗弯强度。Huang X等<sup>[42]</sup>发现,当ZrO<sub>2</sub>含量为15 wt%时,ZrO<sub>2</sub>增韧的二硅酸锂玻璃陶瓷复合材料的力学性能远高于无ZrO<sub>2</sub>玻璃陶瓷。因此,不同成分含量可直接提升玻璃陶瓷的力学性能与稳定性,未来研究可聚焦于建立定量模型,探索多组分协同效应。

### 4 总结与展望

玻璃陶瓷在口腔修复中已由早期前牙贴面扩展至嵌体、高嵌体、全冠,二硅酸锂体系凭借其兼具高强度与高韧性的优势,成为目前临床应



用的主流材料；云母、磷灰石、白榴石基材料则凭借其在透明性、生物活性及热膨胀匹配性等方面的独特优势，在口腔修复领域各有侧重地发挥作用。温度调控、离子掺杂与成分优化可提升其韧性与抗折强度。但仍有许多问题需要进一步探索，如怎样进一步提高玻璃陶瓷材料的韧性和抗折强度；如何在保证美观性的同时，提高材料的耐磨性和生物相容性等。此外，随着数字化和智能化技术的发展，玻璃陶瓷材料在口腔修复中的应用前景将更加广阔，未来的研究方向也将更加多样化。

### [参考文献]

- [1]Huang B,Chen M,Wang J,et al.Advances in zirconia-based dental materials:Properties,classification,applications,and future prospects[J].J Dent,2024,147:105111.
- [2]Warreth A,Elkareimi Y.All-ceramic restorations:A review of the literature[J].Saudi Dent J,2020,32(8):365-372.
- [3]蓝熙,廖健,刘琴,等.玻璃陶瓷全瓷冠与高透氧化锆全瓷冠在前牙美学修复中的应用比较[J].中国美容医学,2023,32(9):148-151.
- [4]Zhao T,Lian MM,Qin Y,et al.Improved performances of lithium disilicate glass-ceramics by seed induced crystallization[J].J Adv Ceram,2021,10(3):614-626.
- [5]Liu X,Yao X,Zhang R,et al.Recent advances in glass-ceramics:Performance and toughening mechanisms in restorative dentistry[J].J Biomed Mater Res B Appl Biomater,2024,112(1):e35334.
- [6]葛舒天,肖卓豪,程灵,等.云母微晶玻璃的切削性能评价及其强度提升研究[J].陶瓷学报,2023,44(2):247-258.
- [7]Denry IL,Holloway JA.Elastic constants,Vickers hardness,and fracture toughness of fluorrichterite-based glass-ceramics[J].Dent Mater,2004,20(3):213-219.
- [8]Montazerian M ,Baino F ,Fiume E,et al.Glass-ceramics in dentistry:Fundamentals,technologies,experimental techniques,applications,and open issues[J].Prog Mater Sci,2023,132:101023.
- [9]Chen X,Chadwick TC,Wilson RM,et al.Crystallization of high-strength fine-sized leucite glass-ceramics[J].J Dent Res,2010,89(12):1510-1516.
- [10]Theocharopoulos A,Chen X,Wilson RM,et al.Crystallization of high-strength nano-scale leucite glass-ceramics[J].Dent Mater,2013,29(11):1149-1157.
- [11]高晨强,邓繁艳,宁聪琴.硅和锂的物质的量之比对二硅酸锂玻璃陶瓷组织结构和抗弯强度的影响[J].上海师范大学学报(自然科学版),2023,52(1):15-22.
- [12]Zhang Z,Yi Y,Wang X,et al.A comparative study of progressive wear of four dental monolithic,veneered glass-ceramics[J].J Mech Behav Biomed Mater,2017,74:111-117.
- [13]Lubauer J,Hurle K,Cicconi MR,et al.Toughening by devitrification of Li<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> crystals in Obsidian® dental glass-ceramic[J].J Mech Behav Biomed Mater,2021,124:104739.
- [14]陈士兵.二硅酸锂玻璃陶瓷在口腔磨损修复中的应用[J].粘接,2022,49(5):131-135.
- [15]Alghazzawi TE.Clinical Survival Rate and Laboratory Failure of Dental Veneers:A Narrative Literature Review[J].J Funct Biomater,2024,15(5):131.
- [16]黄小艳,王培欢,隋晓娜,等.不同厚度二硅酸锂玻璃陶瓷牙合贴面抗折能力实验研究[J].中国美容医学,2023,32(7):78-81.
- [17]Klein P,Spitznagel FA,Zembic A,et al.Survival and Complication Rates of Feldspathic,Leucite-Reinforced,Lithium Disilicate and Zirconia Ceramic Laminate Veneers:A Systematic Review and Meta-Analysis[J].J Esthet Restor Dent,2025,37(3):601-619.
- [18]刘甜,韦健.后牙颊面包绕型玻璃陶瓷牙合贴面的修复效果初探[J].临床口腔医学杂志,2024,40(6):359-362.
- [19]Zürcher AN,Hjerpe J,Studer S,et al.Clinical outcomes of tooth-supported leucite-reinforced glass-ceramic crowns after a follow-up time of 13-15 years[J].J Dent,2021,111:103721.
- [20]Malament KA,Margvelashvili-Malament M,Natto ZS,et al.10.9-year survival of pressed acid etched monolithic e.max lithium disilicate glass-ceramic partial coverage restorations:Performance and outcomes as a function of tooth position,age,sex,and the type of partial coverage restoration (inlay or onlay)[J].J Prosthet Dent,2021,126(4):523-532.
- [21]徐凯丽.数字化椅旁制作玻璃陶瓷高嵌体修复磨牙大面积牙体缺损的临床分析[J].中国社区医师,2022,38(9):54-56.
- [22]田霞,宫文红,张雪健,等.二硅酸锂基玻璃陶瓷高嵌体修

- 复下颌第一磨牙抗折强度的体外研究[J].临床口腔医学杂志,2021,37(6):332-335.
- [23]夏冰冰,周峰.玻璃陶瓷高嵌体在后牙残冠修复治疗中的应用[J].实用中西医结合临床,2025,25(1):78-81.
- [24]王璐,崔玉兰,吴洁,等.不同种类全瓷冠对龈沟液IL-1 $\beta$ 、MMP-8的影响[J].牙体牙髓牙周病学杂志,2024,29(3):147-150,155.
- [25]Adabo GL,Longhini D,Balochi MR,et al.Reliability and lifetime of lithium disilicate,3Y-TZP,and 5Y-TZP zirconia crowns with different occlusal thicknesses[J].Clin Oral Investig,2023,27(7):3827-3838.
- [26]陈月靖,姚瑶,罗傲翔,椅旁CAD-CAM二硅酸锂玻璃陶瓷全冠的修复效果评价[J].上海口腔医学,2021,30(2):191-195.
- [27]Rinke S,Pabel AK,Rödiger M,et al.Chairside Fabrication of an All-Ceramic Partial Crown Using a Zirconia-Reinforced Lithium Silicate Ceramic[J].Case Rep Dent,2016,2016:1354186.
- [28]Roy S,Basu B.On the development of two characteristically different crystal morphology in SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-F glass-ceramic system[J].J Mater Sci Mater Med,2009,20(1):51-66.
- [29]王蒙蒙,黄平,周蓓莹,等.放电等离子体烧结制备高透明羟基磷灰石陶瓷[J].东华大学学报(自然科学版),2022,48(2):25-29.
- [30]张彪,钱法汤,段兴龙,等.白榴石微晶化增强牙科玻璃陶瓷机制的实验研究[J].中华口腔医学杂志,2002,37(4):260-264.
- [31]Li XC,Meng M,Li D,et al.Strengthening and toughening of a multi-component lithium disilicate glass-ceramic by ion-exchange[J].J Eur Ceram Soc,2020,40(13):4635-4646.
- [32]Gali S,K R.Zirconia toughened mica glass ceramics for dental restorations:Wear,thermal,optical and cytocompatibility properties[J].Dent Mater,2019,35(12):1706-1717.
- [33]Taruta S,Watanabe K,Kitajima K,et al.Effect of titania addition on crystallization process and some properties of calcium mica-apatite glass-ceramics[J].J Non Cryst Solids,2003,321(1-2):96-102.
- [34]Garai M,Sasmal N,Molla A R,et al.Effects of nucleating agents on crystallization and microstructure of fluorophlogopite mica-containing glass-ceramics[J].J Mater Sci,2014,49(4):1612-1623.
- [35]Wu CY,Gao TT,Lin ZW,et al.Bubble formation in apatite structures by He-ion irradiation at high temperature[J].Chin Phys Lett,2020,37(5):056101.
- [36]Denry IL,Lejus AM,J Théry,et al.Preparation and characterization of a new lithium-containing glass-ceramic[J].Mater Res Bull,1999,34(10-11):1615-1627.
- [37]Qin F,Zheng S,Luo Z,et al.Evaluation of machinability and flexural strength of a novel dental machinable glass-ceramic[J].J Dent,2009,37(10):776-780.
- [38]Esquivel-Upshaw JF,Clark AE,Shuster J,et al.Randomized clinical trial of implant-supported ceramic-ceramic and metalceramic fixed dental prostheses:preliminary results[J].J Prosthodont,2014,23(2):73-82.
- [39]傅茂洋,廖其龙,王辅,等.CaO含量对镧硼硅酸盐玻璃陶瓷晶相和化学稳定性的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(11):3861-3869.
- [40]张临安,胡志强,聂铭歧,等.不同成分对白榴石合成及性能的影响[J].中国陶瓷,2015,51(1):72-75,83.
- [41]Kumar PH,Singh VK,Kumar P,et al.Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on leucite based bioactive glass ceramic composite for dental veneering[J].Ceram Int,2016,42(2,Part B):3591-3597.
- [42]Huang X,Zheng X,Zhao G,et al.Microstructure and mechanical properties of zirconia-toughened lithium disilicate glass-ceramic composites[J].Mater Chem Phys,2014,143(2):845-852.

收稿日期: 2025-6-30 编辑: 刘雯