

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.09.046

牙体硬组织力学性能及口腔全冠修复材料研究进展

朱文翠, 陈 蓓

(石家庄医学高等专科学校口腔修复教研室, 河北 石家庄 050500)

[摘要] 牙体硬组织作为人体最坚硬的组织之一, 承担着咀嚼、发音和美观等重要功能。随着口腔修复学的不断发展, 对牙体硬组织力学性能的深入研究以及与之相匹配的全冠修复材料的研究已成为当前口腔医学领域的热点。若牙组织结构缺损, 需要根据牙齿缺损情况进行全冠修复, 目前用于全冠修复的材料包括金属、陶瓷、聚醚酮等。金属材料能保证硬度但不能满足患者的美学需求, 而陶瓷材料成分不同, 种类较多, 弹性模量、硬度也有差异, 临床可根据患者牙齿实际情况合理选择相应的陶瓷材料。近年来关于口腔全冠修复的报道较多, 业内学者普遍认为口腔全冠修复必须考虑修复材料与牙体硬组织力学性能的适配性, 这样才能保证修复后的牙齿长期稳定。因此, 本研究围绕牙体硬组织力学性能、全冠修复材料展开讨论, 总结近年来的相关研究进展, 旨在为临床修复材料选择与新型材料研发提供理论依据。

[关键词] 口腔全冠修复; 牙体硬组织力学性能; 修复材料; 弹性模量

[中图分类号] R783.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949 (2025) 09-0187-04

Research Progress on the Mechanical Properties of Dental Hard Tissues and Oral Full Crown Restoration Materials

ZHU Wencui, CHEN Bei

(Prosthodontics Teaching and Research Section, Shijiazhuang Medical College, Shijiazhuang 050500, Hebei, China)

[Abstract] Dental hard tissues, as one of the hardest tissues in the human body, play important roles in chewing, pronunciation and aesthetics. With the continuous development of oral prosthetics, in-depth research on the mechanical properties of dental hard tissues and the matching full crown restorative materials have become the current hotspot in the field of dentistry. If the dental tissue is structurally deficient, full crown restoration is required depending on teeth defect. Materials currently used for full crown restorations include metal, ceramics, and polyetherketone, etc. Metal materials can ensure hardness but cannot meet the aesthetic needs of patients. Ceramic materials have different compositions, a wide variety of types, and differences in elastic modulus and hardness. Clinically, appropriate ceramic materials can be reasonably selected according to the actual situation of patients' teeth. In recent years, there have been many reports on oral full crown restoration. Industry scholars generally believe that when performing oral full crown restoration, the adaptability of the restoration material to the mechanical properties of dental hard tissues must be considered to ensure the long-term stability of the restored teeth. Therefore, this research focuses on the mechanical properties of dental hard tissues and full crown restoration materials, summarizes the relevant research progress in recent years, and aims to provide a theoretical basis for the selection of clinical restoration materials and the research and development of new materials.

[Key words] Oral full crown restoration; Mechanical properties of dental hard tissues; Restoration materials; Elastic modulus

由于龋病、外伤、磨耗、发育畸形等因素的影响, 导致牙体组织缺损发生率偏高^[1]。全冠修复目的在于通过人工修复体替代缺损的牙体

组织, 重建牙齿的解剖形态、生理功能以及美观效果, 然而传统修复材料与天然牙体组织在力学性能上存在差异, 在力学适配性较低时, 会导致

第一作者: 朱文翠 (1991.4-), 女, 河北灵寿县人, 本科, 助教, 主要从事口腔修复教学研究工作

通讯作者: 陈蓓 (1979.6-), 女, 河北唐山市人, 本科, 讲师, 主要从事口腔修复教学研究工作

修复体脱落、饰面瓷崩裂、过度磨损颌牙等一系列问题^[2, 3]。近年来,随着材料科学与生物力学的快速发展,口腔修复材料从金属合金到全瓷再到高分子复合材料的演变过程,特别是聚醚醚酮(PEEK)等高性能聚合物的引入,为全冠修复提供新的可能^[4]。本研究旨在系统梳理牙体硬组织(牙釉质、牙本质)的多尺度力学性能及其组织结构基础,全面评述当前主流全冠修复材料的力学特性与临床适配性,重点分析新型仿生材料的研发进展与改性策略,并探讨未来口腔修复材料的发展方向,为口腔修复临床实践与材料研发提供理论参考。

1 牙体硬组织力学性能与口腔全冠修复材料

1.1 口腔全冠修复材料 近年来随着口腔研究技术的不断深入,口腔全冠修复材料也逐渐多样化,金属全冠、烤瓷熔附金属全冠(PFM)、全瓷冠、树脂全冠及其他新型材料都被用于口腔全冠修复,并获得比较理想的效果^[5]。金属内冠+外层瓷面为PFM的结构,兼顾强度与美观特点,但金属基底可能导致牙龈边缘透黑,瓷层崩裂,所以需少量磨牙。长石质瓷、二硅酸锂等常用的全瓷冠修复材料具有透光性好、美观度高的优势,是前牙修复的最佳材料;氧化铝、氧化锆陶瓷等高强度材料适用于后牙;全瓷冠修复材料具有良好的生物相容性且美观度高、无过敏风险等优点,但使用成本高。由于陶瓷材料与牙齿颜色相近,且具有耐腐蚀性、耐磨损等优势,因此成为口腔全冠修复材料优选材料。近年来,随着国内陶瓷牙技术的发展,牙科陶瓷材料种类与全冠修复技术呈多元化发展趋势,全冠修复后牙齿的强度、韧性均有较大的提升^[6]。树脂全冠常用材料为复合树脂,具有成本低、制作快的优势,可用于临时修复,但耐磨性差,且易老化变色。此外,CAD/CAM高透氧化锆、多层氧化锆、聚合物渗透陶瓷等新型材料也逐步用于全冠修复。

1.2 牙体硬组织力学性能与口腔全冠修复材料的内在联系 牙本质、釉质等牙体硬组织的力学特性直接影响全冠修复的设计。釉质硬度及弹性模量高,但脆性大,抗拉强度低;牙本质弹性模量较低,韧性更高,具有粘弹性。牙本质小管结构导致力学性能具有方向性差异,天然牙通过釉质-牙本质交界(DEJ)的梯度结构能够分散咬合力,这些都会直接影响全冠修复的设计方案。其

次,全冠修复材料应当满足牙列组织的关键力学要求,修复材料的弹性模量应尽量接近牙本质,避免刚性材料导致牙体折裂。例如高硬度釉质需修复体表面具备足够耐磨性,常选用氧化锆饰面瓷、金属咬合面等修复材料;牙本质的黏弹性要求修复材料具备良好的粘结性能,常选择树脂粘结剂如树脂改良玻璃离子对牙本质进行修复,避免金属材料修复导致的边缘微渗漏;全冠修复材料应选择氧化锆、瓷贴面等具有高循环荷载耐受性为特点的材料,其兼具美观性高、韧性高等特点,且与牙体硬组织的疲劳抗力特性相适配;口腔全冠修复材料应当遵循生物学仿生设计原则,例如采用“氧化锆基底+饰面瓷”结构进行修复,既能分散应力、平衡强度,又能模拟釉质-牙本质梯度结构。

2 牙体硬组织力学性能

2.1 弹性模量及硬度 牙釉质是由羟基磷灰石晶体组成的釉柱组织,牙齿表面的弹性模量、硬度较高,从牙齿表面深入釉牙本质界面,弹性模量与硬度降低。万冕等^[7]在报道中对牙釉质形成进行表观遗传学机制进行分析,牙釉质部分使用纳米压痕法从表及里进行硬度、弹性模量检测,硬度从5 GPa下降至3 GPa,弹性模量从97 GPa下降至76 GPa,证实牙釉质表面硬度与弹性模量最高,随着釉质深入弹性模量与硬度随之下降,这种变化趋势与牙釉质内部结构有关。牙本质小管、管周牙本质、管间牙本质是牙本质的重要组成部分,牙齿由外向牙髓处方向发展,牙本质的弹性模量、硬度也逐渐减少。梁韩莹等^[8]研究结果与之相同。由此可见,保持牙本质水平能有效维持其弹性模量及硬度。

2.2 断裂力学行为 雷磊^[9]通过研究发现,牙釉质的磨损或去除需破坏由蛋白质介导形成的羟基磷灰石纳米晶体间界面结合。这将耗散能量,有利于人牙釉质抵抗磨损。随着牙齿咀嚼次数的增多,牙釉质表面会有微裂纹的产生,牙釉质、牙本质之间组织结构的内在关系直接影响裂纹耐受性。牙釉质内部釉柱转化后会形成相互锁合结构,牙齿遭受应力后弹性模量梯度会重新定向应力,应力进入釉柱交叉区后方向改变,最后分散应力直至分叉停止^[10]。若牙齿外部负荷过大或牙釉质磨损严重,会导致应力裂纹延续到牙本质,长此以往导致牙齿劈裂。

3 口腔全冠修复材料

3.1 金属全冠材料 金属材料在全冠修复发展过程中历经时间较长,其发展可溯源到20世纪初期,金、银、钯等贵金属是当时金属全冠修复常用的基础材料。由于贵金属材料成本高,临床一直在研究兼顾良好生物相容性、耐腐蚀性与低成本的全冠金属材料,经过多年研究非贵金属金、钛及钛合金材料逐渐用于全冠修复,逐步降低全冠修复成本。

3.1.1 贵金属合金 贵金属合金在金属全冠材料包括金合金、金钯合金、钯银合金等,金合金通常含有60%~85%的金,并添加铜、铂、钯等元素以调节性能,这类材料具有良好的生物相容性和耐腐蚀性,几乎不会引起过敏反应或牙龈刺激。金合金的延展性较好,易于加工和抛光,能够获得极佳的边缘适合性。黄文博等^[11]在研究中比较四种口腔修复材料的应用效果,其中银钯合金具有良好的强度与生物相容性,但在CT影像中的伪影指数(如伪影直径、伪影面积/像素点)最大。

3.1.2 非贵金属材料 非金属材料常用镍铬合金、钴铬合金等,镍铬合金主要成分为镍(60%~80%)、铬(10%~27%),并添加少量钼、锰等元素以改善性能,机械强度高,其抗拉强度可达580~900 MPa,硬度为250~350 HV,能够满足后牙区承受较大咬合力的需求。但部分患者对镍离子过敏,无法使用镍铬合金进行全冠修复。钴铬合金的主要成分为钴、铬,钴含量30%~60%,铬含量25%~30%,添加钨、钼等元素提高机械性能。与镍铬合金相比,钴铬合金具有更好的生物相容性,镍过敏患者可安全使用,且其耐腐蚀性更优,在口腔环境中更稳定。周美玲等^[12]构建犬牙分析模型,分别使用镍铬合金和钴铬合金两种PFM对12只健康犬进行修复,比较两种金属对犬牙龈组织的影响发现,镍铬合金对犬牙龈组织影响较大,钴铬合金对犬牙龈组织影响相对较小,因此临床上选择钴铬合金作为修复体更有利于维持牙龈组织的健康。

3.1.3 钛及钛合金 钛及钛合金是目前广泛应用的全冠修复材料,具有重量轻、生物相容性良好等优势,为提高钛及钛合金强度,可添加铝、钒、锆、铌等元素,从而提升这类全冠修复材料的机械性能。李芳等^[13]比较镍铬合金与钛合金对老年牙齿缺失烤瓷冠修复效果的影响,结果显示钛合金进行牙齿缺失烤瓷冠修复的效果理想,可有效保障治疗修复强度,满足患者后期使用需求。

3.2 陶瓷材料及技术 陶瓷材料的脆性高、美观,为提高陶瓷材料的强度与硬度,近年来临床常将玻璃、粉浆等材料与陶瓷混合,形成硬度较高的陶瓷牙,常用的陶瓷材料及技术如下。

3.2.1 常规粉浆瓷 利用常规涂塑技术可进行全瓷冠制作,把白榴石晶体、长石瓷晶体按照比例调和,加入蒸馏水调拌后形成粉浆,选用耐火材料并将粉浆涂塑到材料上,高温烧结后制作成全瓷冠材料。该项技术形成的全瓷冠既能保证长石瓷色泽及透光性,又能提高全瓷冠硬度,用于全瓷冠修复能快速提升牙齿强度与硬度^[14]。

3.2.2 铸造玻璃陶瓷 铸造玻璃陶瓷可用于牙科贴面、人造牙冠、牙科嵌体的修复操作,以二氧化硅为基体,加入氧化锆、氧化磷等成核剂,高温熔融后析出晶体,形成高强度、半透明的复合结构,即铸造玻璃陶瓷。这类陶瓷具有良好的生物相容性、美学性能、机械性能与精准密合性,铸造的玻璃陶瓷接近天然牙的透光性,尤其适用于前牙修复,并可通过染色或饰面瓷进一步个性化调色,且无金属离子释放,避免牙龈染色或过敏反应,适合生物相容性要求高的患者。有研究发现^[15, 16],玻璃陶瓷辅助全冠修复能够有效提升远期效果,且可减轻对患者龈沟液和牙周组织影响,提升咀嚼功能,改善牙周美学效果。热压铸陶瓷技术具有简单、省时、费用低等优势,因此在临床全冠修复材料中的应用广泛。

3.2.3 渗透陶瓷 渗透陶瓷技术具有操作简便、修复材料强度高、全瓷冠低收缩等特点,代表性材料为氧化铝 Al_2O_3 或氧化锆(ZrO_2)多孔预制品。使用高纯度的 Al_2O_3 粉末制作>65vol%的高体积分数注浆,浆液涂塑于专用的石膏代型上,模型成型后置于1100℃温度下烧结2 h,形成多孔 Al_2O_3 骨架。然后在1150℃高温下将钨硼硅玻璃渗透到 Al_2O_3 骨架中,形成多孔氧化铝结构,进而提高陶瓷材料的强度。渗透陶瓷能达到300~600 MPa的抗弯强度,与金属陶瓷强度相近,机械性能良好,且表面颜色与天然牙相似,能满足患者的美观性需求。同时,渗透陶瓷无金属结构,生物相容性良好,能有效避免过敏、牙龈染色等不良情况的发生。徐晗^[17]研究结果同样表明In-Ceram氧化铝全瓷冠牙齿美容修复效果好,能够有效提高患者咀嚼功能,改善牙周健康状况,减少牙龈炎发生。

3.2.4 可切削陶瓷 这种陶瓷材料用于口腔全冠修

复具有操作简单、成本低、修复时间短等优势,能够稳定地从口腔内或模型上获取牙体预备情况^[18]。还能根据牙体组织修复需求合理切削陶瓷冠,保证全冠修复操作的顺利实施,提高治疗效果。

3.3 聚醚醚酮 聚醚醚酮的力学性能优异,是口腔陶瓷材料最理想的替代品,聚醚醚酮的弹性模量与天然牙骨组织相似,且具有良好生物相容性、化学稳定性、免疫原性与无细胞毒性等优势。目前,口腔颌面外科中的聚醚醚酮应用较为广泛,逐渐成为口腔全冠修复的主要材料,有学者认为聚醚醚酮全冠修复能够提高咀嚼能力、抗折断能力、抗咬合负荷能力等优势,且聚醚醚酮与天然牙弹性模量相似,能最大限度地减少牙齿磨损,提高牙齿的力学性能^[19]。林晨官璐等^[20]也认为PEEK是一种有韧性的高分子材料,不仅被用作脊柱、骨科和运动医学的先驱材料,还可应用于口腔医学领域,作为牙冠材料,其性能优于氧化锆全冠。

4 总结

牙体硬组织的梯度力学性能为口腔全冠修复材料的设计提供重要启示,天然牙齿通过釉质-牙本质的弹性模量梯度、断裂力学行为的分析,实现高强度与高韧性的完美平衡。未来,随着材料科学与口腔医学的不断融合,口腔全冠修复材料将更加多元化、精细化,也能满足不同患者的个性化需求,提高口腔修复的效果与舒适度。

【参考文献】

- [1]黄浩,李雪林,宋飞,等.生物导向型预备技术在口腔修复中的应用[J].昆明医科大学学报,2024,45(1):168-171.
- [2]哈斯达来,田硕,王艳华,等.不同材料全冠修复体边缘适合性的比较研究[J].中国实用口腔科杂志,2022,15(6):699-704.
- [3]张晓磊,陈丽婷,卢嘉蕊,等.Osterix+细胞中Stat3缺失导致牙体硬组织发育异常[C]//中华口腔医学会口腔遗传病与罕见病专业委员会.2023年中华口腔医学会口腔遗传病与罕见病专业委员会第五次学术年会论文汇编.中山大学附属第八医院;深圳市盐田区人民医院;中山大学附属口腔医院,2023:30.
- [4]谢淑娟,王林虎,周荣华.口腔固定修复金属材料对MRI成像伪影及种植体周围组织健康的影响[J].上海口腔医学,2023,32(4):428-431.
- [5]刘峰,詹雅琳,刘欣然.美学区天然基牙二次冠修复中预备体不良边缘的处理策略[J].华西口腔医学杂志,2023,41(6):641-646.
- [6]刘小瑜,陈西文,庄梦瑶,等.IPS e.max press热压铸造陶瓷全冠及二氧化锆全瓷冠对前牙修复患者牙龈健康美观度的影响[J].河北医学,2024,30(7):1140-1145.
- [7]万冕,李怡婷,郑黎薇,等.牙釉质形成中的表观遗传学机制研究[J].中华口腔医学杂志,2023,58(1):68-74.
- [8]梁韩莹,仲维剑,马国武.自体牙本质颗粒联合PRF在拔牙位点保存术中的应用1例[J].实用口腔医学杂志,2024,40(1):128-130.
- [9]雷磊.人牙釉质的耐磨机制及其牙科陶瓷仿生设计研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [10]曹林军.龋牙齿形态结构和早期发育的初步研究[D].上海:上海海洋大学,2022.
- [11]黄文博,杜申钊,曾静,等.四种口腔修复材料在锥形束CT与螺旋CT口腔全冠图像中的伪影对比研究[J].口腔医学研究,2021,37(12):1094-1098.
- [12]周美玲,于晋,屈直,等.不同种植体上部结构对犬牙龈组织的影响[J].锦州医科大学学报,2021,42(1):1-5.
- [13]李芳,李毅,殷秀芹,等.镍铬合金与钛合金对老年牙齿缺失烤瓷冠修复效果及对龈缘的影响比较研究[J].老年医学与保健,2021,27(4):851-854.
- [14]杨蕊,门天剑,李珂奕,等.微观组织结构对纳米氟磷灰石饰瓷磨损行为的影响研究[J].实用口腔医学杂志,2022,38(3):310-316.
- [15]朱政,高姗,庞敏,等.玻璃陶瓷全瓷冠桥联合多根管玻璃纤维桩对前牙大面积缺损的修复效果及美学效果[J].现代生物医学进展,2025,25(3):557-565.
- [16]刘宇,孙华,郭玲.根管治疗后经全冠、高嵌体与部分冠修复的效果及牙体抗折强度对比[J].黑龙江医药,2022,35(4):942-945.
- [17]徐晗.In-Ceram氧化铝全瓷冠在牙齿美容修复中的应用效果及对牙龈炎发生的影响[J].中国医学创新,2021,18(23):64-67.
- [18]王春红,丁伯福,鲍利红,等.高嵌体和全冠修复早期活髓隐裂牙随机对照临床研究[J].蚌埠医学院学报,2022,47(4):466-468.
- [19]韩祥永,鞠雅琼,张琳琳,等.聚醚醚酮用于上颌牙列缺失种植固定修复桥架的三维有限元分析[J].上海口腔医学,2024,33(4):367-372.
- [20]林晨官璐,倪杰,高忆雪.聚醚醚酮粘接桥修复牙周炎患者切牙缺失的临床研究[J].口腔疾病防治,2024,32(4):266-272.