·综述·

玻璃离子水门汀的临床应用与展望

张楚晗[1] 王淑君[1] 韦孟廷[1] 蒋欣怡[1] 苏冠宇[1] 战德松[2] 付佳乐[2]
[1]中国医科大学口腔医学院,沈阳 110002;[2]中国医科大学口腔医学院口腔材料学教研室,中国医科大学附属口腔医院修复二科,沈阳 110002
通信作者:付佳乐,Email:fullers@126.com

【摘要】 玻璃离子水门汀(GIC)是一种传统牙科修复材料,因其良好的生物相容性、粘接性和氟释放性等优点,临床应用非常广泛,有巨大发展前景。本文归纳了GIC的化学成分、性质分类及优缺点,系统地总结了GIC的临床应用与注意事项,并对现阶段GIC存在的问题与相关改性研究进行了探讨,以期为未来GIC更好地发展和临床应用提供参考依据。

【关键词】 玻璃离子水门汀; 牙科材料; 粘固; 抗龋; 氟离子释放
基金项目:中国医科大学大学生创新创业训练计划项目(202310159028)
引用著录格式:张楚晗,王淑君,韦孟廷,等.玻璃离子水门汀的临床应用与展望[J/OL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2023,17(4):299-308.
DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2023.04.011

Clinical application and prospect of glass ionomer cements

Zhang Chuhan[1], Wang Shujun[1], Wei Mengting[1], Jiang Xinyi[1], Su Guanyu[1], Zhan Desong[2], Fu Jiale[2]
[1]School of Stomatology, China Medical University, Shenyang 110002, China; [2]Department of Dental Materials, the Second Department of Prosthodontics, School and Hospital of Stomatology, China Medical University, Shenyang 110002, China
Corresponding author: Fu Jiale, Email: fullers@126.com

【**Abstract**】 As a conventional dental restorative material, glass ionomer cement (GIC) has been widely used in clinical practice because of its outstanding properties, such as biocompatibility, adhesion and fluoride release ability, and it has a great development prospect. In this review, the chemical composition, classification, advantages and disadvantages, and the clinical application of glass ionomer cement were systematically summarized. The existing problems and modification researches of GIC were discussed in order to provide a reference for its better development and clinical application.

【**Key words**】 Glass ionomer cement; Dental materials; Cementation; Anti-caries; Fluoride release
Fund program: China Medical University College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program (202310159028)
DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2023.04.011

随着口腔材料的不断发展和进步,玻璃离子水门汀(glass ionomer cement,GIC)由于其释氟性能、微吸水性、半透明性、生物相容性、可操作性及良好的牙体组织粘接性被广泛应用于充填修复、窝洞垫底及衬层、窝沟封闭、桩核制作、固定修复体的粘固及正畸托槽的粘接[1]。在GIC的发展过程中,得益于配方的不断优化与改进,各种水门汀的性能得到显著提高,顺应了口腔临床迫切需求的趋势。然而,由于市售GIC的组成、固化模式和临床应用范围不尽相同,可能会对不熟悉产品特性的临床医生造成不便。因此,本文就GIC的临床应用与进展作一综述,总结GIC的性能特点,归纳使用过程中的注意事项,并对GIC存在的问题进行探讨,为临床医生提供参考。

一、玻璃离子水门汀的发展历史

GIC发明于20世纪60年代末。1975年,首个商业化GIC由Amalgamated Dental公司(登士柏德特瑞,德国)推出,商品名为ASPA——聚丙烯酸铝硅酸盐(aluminosilicate polyacrylate)的缩写[2]。然而,在临床使用过程中,由于操作者的主观因素,粉液比通常难以控制,导致材料的机械性能及粘接性显著降低[3]。于是1978年,该公司又推出了封装版本的GIC,以消除不同粉液比所造成的负面影响[4]。尽管如此,因其易产生白垩色外观和裂缝[5]、机械强度较低,且对牙颈部楔状缺损的粘接效果不理想[6]等问题,GIC仍未被广泛接受。直至20世纪80年代,加入了甲基丙烯酸乙酯的树脂改性玻璃离子水门汀(resin modified glass ionomer cement,RMGIC)推出,其与牙本质的粘接强度明显增加,有效减少了微渗漏的发生,在美观方面也有不小的进步[7],同时机械强度也得到了显著提高[8]。

GIC从发明至今,成分和性能不断改进,因其具有良好的生物相容性、粘接性、美观性、可操作性及释氟性[7,9-11],已广泛应用于临床[1]。但是仍存在耐磨性差、机械强度低的问题。因此,许多研究人员尝试将纤维、金属、羟基磷灰石和生物活性玻璃等材料加入传统GIC以改善其力学性能。目前,较为成熟的改性GIC有树脂增强GIC和金属增强GIC。

二、玻璃离子水门汀的分类及特点

1. 根据组成分类:(1)传统GIC(conventional glass ionomer cements):主要由玻璃粉、多元酸及水三种成分构成[12]。玻璃粉的基本成分为SiO_2-Al_2O_3-AlF_3-CaF_2-NaF-$AlPO_4$[13]。仅基于二氧化硅的玻璃结构为相互连接的SiO_4四面体,缺乏碱性与反应性;加入铝后,碱性增加,利于反应进行。Al^{3+}被迫形成与SiO_4相同的四面体结构,为平衡负电荷,又需额外加入阳离子,如Ca^{2+}和Na^+[14]。氟化物的存在,不仅通过破坏玻璃的网格结构降低粉剂的烧结温度[15],还为GIC固化后氟的释放提供底物,从而发挥抗龋作用[16]。多元酸为聚丙烯酸或丙烯酸与马来酸或衣康酸的共聚物。其中还加入了酒石酸,能够延长GIC的工作时间,从而提高其临床上的可操作性[3]。剂型上分为由玻璃粉和多元酸溶液构成的粉液型,以及由玻璃粉和多元酸固体粉末构成的单粉剂型[17]。(2)金属增强GIC(metal reinforced glass ionomer cements):在传统GIC的基础上加入一定量的金属粉末,如Sn、Ag、Au、Ti、Pd、Ba、Sr、La及不锈钢粉粒[18],改善抗压强度、弯曲强度和耐磨性。其中以加入银合金粉最为常见,如GC公司的银粉加强型玻璃离子桩核修复材料(Miracle Mix,GC,日本),由于加入了银粉,提高了物理性能,可以用于𬌗面充填和桩核制作,是银汞合金的理想替代材料。(3)树脂增强GIC(resin reinforced glass ionomer cements):通过添加少量树脂基质成分,如甲基丙烯酸乙酯、双酚A双甲基丙烯酸缩水甘油酯(Bis-GMA)从而增强其机械强度,同时还加入了促进聚合反应的相应引发剂体系[1]。有粉液型和双糊型两种剂型,固化后材料性能如氟离子释放量等与粉液比例密切相关[19],而双糊剂型符合精准控制粉液比这一要求。GC公司的树脂加强GIC(一代产品Fuji CEM、二代产品Fuji Luting EX)是世界上第一款双膏剂型GIC,操作方便,可达到理想的流动性。(4)其他改良GIC:羟基磷灰石改性型GIC即在传统GIC粉剂的基础上加入羟基磷灰石粉末,并与衣康酸、聚丙烯酸调和而成,可提高GIC的弯曲强度及断裂韧性[20]。氧化锆加强型GIC,在抗张强度上有显著提高,但水分敏感性强[21]。加入了纳米填料和生物活性纳米陶瓷的改性型GIC,可以减少凝固时间,改善机械性能[22-23]。以活性玻璃纤维作为GIC的增强剂,其抗压强度和断裂韧性明显提高[24-25]。氨基酸改性GIC,用N-甲基丙烯酰-谷氨酸等丙烯酸共聚物取代不饱和羧酸共聚物可提高断裂韧性[26]。

2. 按照固化方式分类:(1)传统酸碱反应固化GIC:传统GIC的固化反应属于酸碱反应。多元酸使玻璃粉中的Na^+、Ca^{2+}和Al^{3+}被释放,并与聚酸分子的—COOH基团形成配位键或离子键,相互交联构成网状结构,使未反应的玻璃粉结合,由糊状转变为聚羧酸水凝胶从而实现固化。因Ca^{2+}活性较高,所以反应一般分为两步,第一步为Ca^{2+}反应,第二步为Al^{3+}反应。第一步反应较快,使材料立即开始固化,但此时材料强度较低;第二步反应较慢,往往要持续48 h以上,反应完成后材料变得更加坚硬[1]。固化过程中酒石酸起重要作用[27]。(2)光固化GIC(light-curing glass ionomer cements)和化学固化GIC(chemical-curing glass ionomers cements):在传统GIC的酸碱反应基础上,能发生光固化树脂自由基聚合反应的为光固化GIC,能发生氧化还原引发树脂自由基聚合反应的为化学固化GIC。光固化GIC粉剂中含有光聚合反应引发剂,液剂中含有各种交联的水溶性乙烯单体及光敏剂。而化学固化GIC中粉剂含有化学固化引发剂(过氧化苯),液剂含有促进剂(甲酰叔胺)。这二者多为双重固化材料,固化反应包括酸碱反应和聚合反应。其中,酸碱反应与传统GIC基本相同,但反应较慢。同时,在化学或光引发的作用下,树脂自由基发生聚合反应,聚合产物与聚羧酸水凝胶相互缠绕形成互穿聚合物网络结构(IPN)[28]。

3. 根据用途分类:(1)Ⅰ型GIC为粘固水门汀,可以用于冠、桥和嵌体等固定修复体的粘固,具有快速固化和膜厚度薄的特点[1]。(2)Ⅱ型GIC用于牙体缺损的修复,又分为具有适当的颜色和半透明的美学GIC和耐磨性强、抗早期吸水的金属增强型GIC两种亚型[1]。(3)Ⅲ型可以用于洞衬或垫基底,这取决于所使用的粉液比。当粉液比为1.5∶1时,可用作洞衬材料;当粉液比为3∶1或高达6.8∶1时,可用作垫底或牙本质替代物[1]。

三、玻璃离子水门汀的临床应用

随着性能的不断改善,GIC已广泛地应用于粘固修复体及粘接正畸附件、乳牙及恒前牙充填修复、窝沟封闭、洞衬层及垫底等方面[1,16,29]。其与牙体硬组织及修复体粘接的机制除机械嵌合外,还可以通过自身羧基[30]与基牙表面的钙质产生化学结合力[31],且与胶原等有机物质结合形成保护层,从而阻断来自外界的刺激[32]。

1. 粘固与正畸粘接:粘固(cementation)是用水门汀将修复体固定在基牙上的过程。树脂改性GIC结合了复合树脂的优点,在降低传统GIC水溶解性的同时,其粘固力、机械强度与边缘封闭性也得到显著的提高,且由于不需要额外使用酸蚀冲洗粘接系统或者自酸蚀粘接系统,更广泛地适用于粘固[33-34]。

粘接(bonding)是指两个同种或异种固体物质,通过第三种有黏性的材料作用而产生牢固结合的动作或状态。在正畸治疗的粘接中,托槽、带环是暂时性粘接,既要有足够的粘接强度,又要能较容易地去除托槽及牙面上的粘接剂,同时还要求在矫治时要防止牙釉质脱矿和龋齿发生[35]。在粘接正畸托槽时,光固化树脂增强型GIC组牙釉质脱矿率、脱粘接率与光固化复合树脂对照组差异无统计学意义($P<0.05$),且使用树脂增强型GIC还有其他潜在优势,如降低湿度敏感性,对牙齿的损伤程度相对较小,以及较低的细胞毒性等[36]。树脂增强型GIC可被推荐作为临床正畸常规粘固剂,但其粘接强度不如复合树脂高,在如下颌磨牙等创伤性咬合或重度咬合区域粘接时应格外小心[37]。尽管GIC可以与牙齿结构发生化学结合,但它们对带环本身的粘接性不如对牙齿表面强,可以通过处理带环表面来获得额外的机械保留,其中喷砂最有效[38]。在处理带环表面方面,比起喷砂后使用GIC粘接,在喷砂后使用含有10-MDP(磷酸酯类单体)

等成分的多功能处理剂(G-Multi PRIMER,GC,日本)处理带环后,再用树脂水门汀(G-CEM ONE,GC,日本)进行粘接,可以获得更好的粘接力。

2. 牙体修复

(1)修复龋损:复合树脂和GIC是临床实践中使用最广泛的材料,尽管复合树脂具有良好的美学和机械性能,但修复技术相对于GIC的使用更为敏感,因为它涉及更多的操作步骤,再加上这种材料对水分的更高敏感性。因此,在橡皮障的使用不可行和(或)患者依从性有限的情况下,GIC是首选材料[39]。传统GIC由于存在机械强度低和耐磨性差等缺点,一般仅适用于乳牙所有洞形和恒牙Ⅲ类、Ⅴ类洞及小型Ⅰ类洞修复[38,40]。在乳磨牙Ⅱ类修复中,GIC与复合树脂的临床性能、边缘变色、边缘适应、修复体保留和修复材料磨损等大多数临床参数是相似的,而关于继发性龋病的发生,GIC修复体的临床表现明显优于复合树脂[39]。在充填治疗学龄前儿童乳牙龋蚀方面,与使用光固化复合树脂相比,使用GIC作为充填材料,更有利于保证患儿治疗配合度,减少不良事件发生,保证填充成功率[41]。此外,在修复治疗老年根面龋患者的过程中,GIC能够更好降低微渗漏,抑制修复操作之后的牙周炎性反应,降低龈沟液的炎性因子水平[42]。在恒磨牙邻面龋患者治疗中,银粉增强型GIC凝固后可持续释放氟离子、防止微渗漏的发生[43],相比于银汞合金,更能改善患者牙周指数,促进牙体健康,且填充密合度较高,修复后并发症发生率低[44]。树脂改性GIC被用于Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类洞修复,主要用于Ⅴ类洞的充填及乳牙脱落前的短期修复,还可用于固定修复前的窝洞充填修复,特别适用于乳牙龋治疗[1,40]。长久以来,由微渗漏导致的牙体硬组织或牙髓问题在临床治疗中频繁发生。有研究提示,在乳牙修复中的微渗漏性能方面,新型卡波姆/氟磷灰石增强GIC表现优异[45]。

(2)修复非龋性缺损:在复合树脂下使用GIC,即所谓的夹层修复技术充分利用了GIC与牙本质的良好粘接力、复合树脂与牙釉质的良好粘接性和高机械强度等优点,在非龋性牙颈部缺损修复中非常有效[46]。GIC的应用既能与牙本质形成紧密的化学性结合,又能与复合树脂形成牢固的机械嵌合,与单纯复合树脂修复相比,夹层修复技术的边缘密合性显著增强[28]。在为期3年的随机临床试验中,GIC和复合树脂相比,在恢复非龋性牙颈部缺损中的生存率差异没有统计学意义,由于GIC在初始和长期成本上均明显低于复合树脂,因此具有较高的成本效益[47]。此外,与通用纳米树脂材料相比,玻璃离子表面更不利于牙龈卟啉单胞菌生物膜的形成,在牙周健康方面,玻璃离子更适用于龈下楔状缺损的充填治疗[48]。

(3)非创伤性修复:非创伤性修复治疗(atraumatic restorative treatment,ART)技术不同于高速涡轮手机制备洞型,其很少需要局部麻醉仅使用手动器械且疼痛程度轻,儿童接受度高,因此被认为是治疗乳牙龋有效可行的方法[49]。此外,ART在老年人修复龋洞治疗中也越来越受欢迎。在ART技术中,高黏度GIC可以安全地用于修复乳牙和恒后牙的单面洞[49-50]。其在乳牙Ⅰ类和Ⅴ类单面洞修复中1年后的成功率约为80%~95%,在恒牙Ⅰ类和Ⅴ类单面洞修复中2~3年后成功率约为90%[51]。同时,ART治疗老年患者龋病5年后存活率与传统技术相当且具有可在非临床环境下进行等独特优势[52]。在材料改性方面,Ratnayake等[53]的研究表明,氯己定修饰的GIC在治疗老年人根龋1个月时具有更好的抗菌效果,且6个月内的存活率高于常规GIC修复体。

3. 洞衬垫底:在深窝洞中,通常建议在修复体下方使用GIC作为衬洞(≤0.5 mm厚)或垫底(≥0.5 mm厚),以保护牙髓[54]。Ribeiro等[55]所研究的传统和树脂改性GIC在Ⅴ类洞中作为衬层使用时,不会引起术后敏感或持续性牙髓损伤,表明它们具有良好的生物相容性。以复合树脂进行充填时用GIC垫底的夹层修复术,对充填体的牢固程度和颜色协调优于以氢氧化钙作垫底[56-57]。但当牙本质剩余厚度小于0.5 mm时,由于GIC对牙髓的轻微刺激性,应当用氢氧化钙水门汀衬洞垫底,以免对牙髓造成伤害。此外,由于成分与复合材料相似,与牙本质的粘接强度明显更高,树脂增强型GIC在夹层技术中比传统GIC更适用于垫底材料[58]。

4. 桩核制作:与汞合金和复合材料一样,GIC也被用作桩核制作。由于GIC具有与牙齿结构化学黏附的特性,因此曾是首选的桩核制作材料[59],而金属增强GIC的强度和耐磨性明显高于传统GIC,更具临床优势。值得注意的是,口腔中不同金属产生的电位差会对桩核制作材料的远期修复效果产生影响,因此,应避免使用不同类型的合金进行口腔修复治疗措施,以尽量减少GIC的溶解[60]。树脂类粘接材料有较高的机械性能及即刻粘接强度等优点,但是由于其聚合后收缩大、在水环境下易发生降解等缺点,造成纤维桩的粘接耐久性较差[61]。为了筛选更加持久的纤维桩粘接技术,研究发现虽然在即刻粘接强度方面,树脂改性GIC低于树脂水门汀,但经冷热-机械加载处理后,树脂水门汀的纤维桩粘接固位力明显下降,而树脂改性GIC的纤维桩粘接固位力则表现出增高趋势[62]。在1年的随访观察期内,树脂改性GIC粘接纤维桩的成功率和存留率为100%,证明其在短期内粘固纤维桩是可靠的,且有理由推断随着时间的延长,树脂改性GIC粘接纤维桩可预期获得更好的粘接效果[63]。

5. 窝沟封闭:GIC具有出色的释氟特性和直接封闭效果,是一种预防窝沟龋发生的可靠窝沟封闭剂[64]。当比较两种封闭剂保护无龋恒牙情况时,合并优势比(OR:0.96,95% CI:0.62~1.49;P=0.87)表明,GIC与目前的“金标准”酸蚀-冲洗类树脂基窝沟封闭剂一样有效地封闭点隙裂沟[65]。Markovic等[66]在长达13年的临床随访中观察到,使用GIC型窝沟封闭剂后,65%的新生恒磨牙窝沟面无龋损,效果较明显。此外,由于玻璃离子成本低,使用操作简便,更适合基层推广。

四、玻璃离子水门汀临床应用的注意事项

1. 调拌器械:在调拌GIC时应注意选用树脂调拌刀进行调和,金属调拌刀会导致调和物颜色变灰[67]。且有研究表明,使用硅胶调拌板可能获得更高的抗压强度和更低的粗糙

程度,较玻璃调拌板更优[68]。

2. 调拌温度:调拌时应根据地区及季节的不同情况来控制调拌的时间及粉液比例[69]。材料的凝固时间随温度的变化而变化,温度升高则凝固时间缩短,反之则延长。在夏季室温过高时应适当增大液体的比例,适当缩短调拌时间,以预留充足的操作时间。反之在冬季室温过低时应适当增加粉剂比例和延长调拌时间。

3. 调拌方式:不同的调拌方式可能通过影响材料的粉液接触面积、气泡率等途径,影响聚合反应速率和程度。临床上使用GIC材料时,建议采用单向顺时针旋转法、单向逆时针旋转法和正反双向交替旋转法,同时需进一步严格调拌要求,以提高调制出的玻璃离子充填体的抗压强度[70]。同时,建议采用正反双向交替旋转法,而不推荐使用上下提拉折叠法,以减少充填体边缘微渗漏的发生[71]。

4. 隔湿处理:早期水接触及唾液污染会大大降低GIC的粘接强度及固位效果[72-73]。传统GIC充填后会出现早期溶解现象,在表面需要涂防护漆或凡士林,若需要进一步的边缘修整和抛光,最好在24 h后进行[74]。树脂增强GIC光照固化后即可打磨抛光,然后再进行隔湿处理。此外,操作时橡皮障的使用也可以充分隔离唾液,增强GIC的固位力[39]。

5. 粉液比:粉液型产品应当按照说明书推荐的粉液比准确取量,不当的粉液比将降低材料的性能且容易在口腔环境中发生分解[67]。粉少液多会导致凝固时间延长、粘接性降低和溶解性升高[75]。值得注意的是,粉液取用方法不当会导致比例不当。对于粉剂,使用前建议将粉瓶晃匀,保证取出的量为标准值。对于液剂,取液前应排除气泡并在取液时保持垂直。一旦量取好粉、液,应当尽快调和,以免液剂中水分挥发。此外,粘固修复体时,应在保证适宜稠度的前提下,尽量多加粉剂,以减少液剂的含量,从而减少牙髓刺激性。

五、玻璃离子水门汀的优缺点分析

1. 优点

(1)良好的粘接性能:GIC良好的粘接性能是一项重要的临床优势,其因为能直接与牙齿和金属材料结合从而具有良好的粘接性能。在与树脂水门汀对比的实验数据中显示,树脂改性GIC的平均剪切结合力(49.3 N)与树脂水门汀(51.1 N)差异无统计学意义[76]。良好的粘接性能有助于GIC在牙表面的存留,同时也能一定程度地减少或消除边缘微渗漏,从而阻断有害微生物进入修复材料下的空间进行生长繁殖,减少了龋病的发生[1]。总的来说,GIC的黏附作用可以归结为三个相互关联的现象。一是微机械锁结作用,是由GIC中的酸性成分在牙或修复金属表面发生自酸蚀而引起的[77];二是化学键的连接作用,GIC中酸性成分(聚丙烯酸)上的羧酸基团和牙体硬组织表面的钙离子之间产生的螯合作用;三是聚丙烯酸分子链上的羧基与牙本质中的胶原蛋白形成氢键,使水门汀和牙齿之间产生牢固的附着力[78-80]。

(2)氟化物释放:释放氟化物是GIC的一大重要优势[81],且相关研究表明GIC相较于其他含氟的口腔修复材料有着出色的释氟能力[82]。氟释放包括两个阶段:第一阶段是相对快速且短暂的,在几天内发生,因此被称为"早期爆发";第二阶段则是以扩散为主要方式的持续较低水平的释放,能够维持数年[81,83]。在GIC中加入氟化物有很多的优势,氟离子可通过参与牙釉质去矿化和再矿化的过程[84-86],以及抑制口腔微生物中酶的活性,进而干扰细菌和菌斑在牙面上的堆积和黏附来预防龋齿的发生[87]。除此之外,氟化物的加入降低了GIC的熔点,减少了制造过程中的能源消耗,从而降低了制造成本。氟离子还能够通过在原子水平稳定水门汀基质来增强GIC的强度[88-89]。GIC在释放氟化物的同时,也能吸收氟化物[82],重新吸收的氟化物又可以再次释放到水中,这种现象被称为"重吸收再释放"(release and recharge)。且与没有再充氟的样本相比,重吸收氟的GIC的释氟能力更强[90-92]。

(3)生物活性和生物相容性:GIC具有天然的生物活性,生物活性离子(氟化物、钠、钙、锶、磷酸盐和硅酸盐等)的释放是材料具有生物活性的前提[93]。释放的离子具有多种生物作用。磷酸盐存在于唾液中,与牙齿的矿物相平衡。硅酸盐可以与牙齿的羟基磷灰石结合而不会对晶体几何形状产生不利影响[94]。钙是一种重要的矿物元素,有许多生物用途,在口腔内轻度酸性条件下的溶液中促进牙齿的再矿化。同时,GIC也能吸收离子。在唾液中,GIC会吸收钙离子和磷酸盐离子,从而增强其硬度[95]。GIC除了具有的生物活性,还与牙髓有良好的生物相容性,对牙髓刺激性小,可作为间接盖髓剂使用。为进一步提高GIC的生物相容性,可以在GIC中添加生物活性玻璃[27,96],或加入在结构上与牙釉质或牙本质的主要成分高度相似的羟基磷灰石[97],还可以加入合成无定形磷酸钙纳米颗粒以促进PO_4^{3-}/Ca^{2+}的释放、提高碱性磷酸酶活性并刺激间充质干细胞的成骨分化以促进牙髓再生[98]。

2. 缺点

(1)机械性能较差:由于GIC其弹性模量较低,机械性能不如树脂水门汀[99]。而不同GIC的强度有所不同,银粉增强型GIC机械性能略强于传统型GIC,而树脂增强GIC由于含有树脂成分而强于二者。研究中表明,树脂水门汀的弯曲强度[(66.7 ± 5.26) MPa]显著优于传统GIC[(11.65 ± 5.63) MPa],且树脂改性GIC较传统GIC有明显改善,其弯曲强度[(41.07 ± 11.5) MPa]介于两者之间[99]。此外在一项评估传统GIC和玻璃混合型GIC的抗压强度(compressive strength, CS)和径向拉伸强度(diametral tensile strength, DTS)的实验中,表明玻璃混合型GIC(CS = 112.48, DTS = 12.43)的机械性能显著优于传统型GIC(CS = 108.59, DTS = 10.09)[100]。相关研究表明,在GIC中加入羟基磷灰石[23,101-102]、氟化石墨烯[103]、氯化钙溶液处理[104]和纳米颗粒等其他填充颗粒,会使得GIC抗压、抗拉伸强度和剪切粘接强度等机械性能显著改善。

(2)在凝固早期对唾液和水敏感:传统GIC在固化初期(10 h内)对水敏感,吸水会导致材料表面软化、粗糙并且呈白垩状,这会极大地影响其固化效果并且会降低其机械性能。因此,在固化初期应注意做好隔湿处理来避免其与水分的接触。相比之下,金属增强型GIC由于含有细微金属颗粒而降低了早期对水的敏感度,具有一定耐磨性能。

(3)溶解性大:当GIC作为修复材料应用于口腔中时,难以避免地暴露于口腔的酸性环境中而发生溶解[105]。在酸性环境中,GIC会发生酸蚀,其表面被部分溶解,交联阳离子被去除,导致表面硬度下降,耐磨性能降低。传统GIC溶解率较大,而树脂增强GIC由于树脂成分的存在,增强了其对酸溶解的抵抗性,使得溶解率大的问题有所改善[105]。在一项关于GIC的溶解度研究数据显示,树脂改良型GIC[SL =(25.67 ± 0.54)μg/mm³]较传统GIC[SL =(154.83 ± 1.88)μg/mm³]更优[106]。

(4)美学性能欠佳:GIC虽然具有一定的半透明度,但其美观性与复合树脂材料相比,仍有一定差距[107]。因此口腔医生更倾向于将GIC的应用限制在乳牙、老年牙体修复及患者口腔卫生状况不佳需要大量氟化物释放的情况[107]。由于树脂增强GIC粉剂和液剂中的单体折射指数相近,树脂增强GIC的半透明性能优于传统型GIC[108]。为使修复体颜色与患者牙齿本身颜色更加匹配,生产商多会设计生产多种不同色号及不同透明度的产品以供挑选,以达到美观修复的目的。GC公司的富士Ⅱ LC光固化树脂改良型GIC,具有多达10种的比色板(VITAPAN classical,德国)颜色,可以提供给临床更多的病例颜色的选择。

具体GIC的性能、临床应用与代表产品总结见表1。

六、玻璃离子水门汀的展望与总结

GIC是Wilson等[13]在1971年发明的一种口腔修复材料。半个世纪以来,其各类优点已被充分阐明。与传统树脂相比,GIC在氟释放性、生物相容性、与牙齿硬组织间形成化学黏附等方面有诸多优势[109],目前广泛应用于粘固、粘接正畸附件、牙体修复、窝沟封闭、桩核制作以及洞垫衬底等临床治疗,高黏度的GIC在ART技术中也发挥了巨大的作用[50]。在短期的临床应用中,GIC多数呈现出令人满意的结果[47,110],也有临床随访4年和6年的结果表明,GIC修复系统与微混合复合材料临床表现无明显差异且临床性能十分优秀[111-112]。但更长期的临床评估仍较为缺乏,其耐久性和寿命的评估有待进一步验证,对于ART技术中GIC应用的探索也有待深入研究。

但另一方面,GIC较低的机械性能,如低断裂强度、韧性和高磨损率等局限性,限制了其作为应力承受区填充材料的广泛应用。在承重区如恒磨牙后腔修复中,GIC的应用较少或仅用于临时充填,在临床研究中,疲劳断裂也是导致GIC修复体损伤失败的主要原因[113]。此外,尽管GIC具有释放氟离子的能力,但其释氟量并不足以抑制致龋细菌的生长,继发性龋齿仍有发生的可能[114-115]。

因此,针对改善这些缺陷的改性研究成为现阶段的热点。改善粉剂和液剂的成分、调整粉液比、预处理操作和加入增强填料等手段有效提高了GIC的机械性能和抗菌性能。在机械性能方面,传统的方法是通过加入树脂单体和引发剂组分来获得树脂改性GIC,银、二氧化钛、氧化锌和铜等金属材料也被用于优化GIC的性能。近年来,羟基磷灰石由于其加入后引发的GIC凝固反应而被广泛用于提升其机械强度[20]。随着纳米技术的应用[116],纳米材料如镁橄榄石、蒙脱石粘土、纳米纤维、生物活性玻璃和纤维素纳米晶体等,包括纳米羟基磷灰石颗粒都取得了良好的优化效果[117]。抗菌性能方面,主要通过添加抗菌化合物来提升其抗菌性,常用的包括氯己定、季铵盐和壳聚糖等抗菌剂及其聚合物[115,118]。为兼顾机械性能和抗菌性能,很多研究将这两类增强填料结合起来加入GIC中,进一步探究最合适的组合、比例及粉末大小。但这些添加物多数对GIC的生物相容性有影响,会引发细胞毒性、微渗漏和粘接不良等一系列问题[119]。因此,改性研究的重点一方面在于继续探究最优的填料组合及纳米技术的开发,另一方面在于探索具有良好生物相容性的新型物质。如能开发出机械、抗菌性能优良且不会引发细胞毒性等不良反应的新一代改性GIC,将极大地拓展其临床应用。

此外,由于GIC品种、用途的多样使得临床医生的选择复杂化,近年来临床医生对GIC的应用效果高度关注。因此,很多临床试验对不同的应用情景下GIC与其他材料的使用效果进行了对比[120-121]。本文主要总结了传统GIC、树脂改性GIC、复合树脂及树脂水门汀几种材料的性能及用途比较

表1 玻璃离子水门汀(GIC)的性能、临床应用与代表产品

分类	主要特点	临床应用	代表产品
Ⅰ型	粘接性能良好;流动性好,薄膜厚度小;粘接牙面无须酸蚀	粘固、正畸附件粘接	富士Ⅰ(GC,日本) Rely Luting树脂加强型玻璃离子水门汀(3M,美国) Rely Luting 2树脂加强型玻璃离子水门汀(3M,美国) Ketac Cem Easymix速调灵(3M,美国) CX粘接型玻璃离子水门汀(Shofu,日本) 美益汀粘接型玻璃离子水门汀(上海沪鸽医疗器械有限公司)
Ⅱ型	氟释放性:防龋抑龋作用;有一定机械强度;无聚合收缩	乳牙窝洞充填、恒牙非承力区充填、恒牙暂时充填、桩核制作、ART技术、窝沟封闭、夹层修复技术等	富士Ⅱ(GC,日本) Ketac Molar玻璃离子水门汀(3M,美国) Ketac Universal玻璃离子水门汀(3M,美国) FX-Ⅱ充填型玻璃离子水门汀(Shofu,日本) 美益汀充填型玻璃离子水门汀(上海沪鸽医疗器械有限公司)
Ⅲ型	生物相容性:释放吸收生物活性离子,对牙髓刺激性小	洞衬垫底、窝沟封闭	富士Ⅶ(GC,日本) Vitrebond光固化垫底用玻璃离子(3M,美国)

表2 玻璃离子水门汀(GIC)、复合树脂和树脂水门汀的区别

材料种类	性能	用途
传统GIC	氟化物释放性能最佳;细胞毒性低;美学性能差	适用于易发龋患且对美学性能需求小者的牙齿修复,如老年人根面龋的修复
树脂改性GIC	粘接性能好;溶解度降低;美学性能较好;机械性能提高;对水分的早期敏感性降低;牙髓刺激性小	受力不大的恒牙Ⅲ、Ⅴ类洞和楔状缺损的永久性充填修复;乳牙所有窝洞的充填修复;恒牙所有窝洞的暂时性或者短期充填修复
复合树脂	光引发聚合固化;力学性能好,质地坚韧不易折断;耐磨耗性能好;粘接性能差,需与粘接剂配合应用;与牙体线胀系数差距大,易发生微渗漏;有一定细胞毒性;技术敏感性高	较小Ⅲ、Ⅴ类洞修复;后牙中等至较大的Ⅰ、Ⅱ类洞缺损的修复,包括近远中洞的修复,特别是涉及咬合面尖、嵴的缺损;充填窝洞倒凹;用于修复深窝洞时,应当先行垫底保护牙髓
树脂水门汀	粘接性能好;机械性能佳;有细胞毒性与牙髓刺激性	粘接修复单冠及固定桥;瓷贴面及嵌体的粘固;纤维桩修复

(表2),可见树脂改性GIC的性能要显著优于传统GIC[122],在抗龋、低刺激性、简化操作步骤等方面优于其他材料,但易磨耗、耐久度不高的问题亟待解决[39]。

综上所述,GIC独特的组成和性能使之成为口腔临床治疗的常用材料之一,但对其研究仍有待完善。目前与国外多品种、性能良好的GIC产品相比,国内的GIC产品品种较为单一、性能还有较大提高空间[123],需要国内相关企业开拓创新以满足临床市场需求。如果能在颜色协调性、增加耐磨性与材料的抗溶解性方面有所突破,在保持原有优点基础上更好平衡美学与功能、进一步提高机械性能和抗菌性能、降低不良反应,使之能够应用于承担较大咬合力的后牙永久充填,必将极大增加GIC的临床应用适应证。这已成为GIC未来的发展方向。

GIC是非常有临床应用价值的口腔修复材料。本文通过对近年GIC相关的文献进行检索与整理,系统总结了GIC的化学成分、分类、临床应用、注意事项与优缺点,全面地介绍了GIC,以期能为其性能进一步完善和未来发展提供参考。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

[1] Sidhu SK, Nicholson JW. A review of glass-ionomer cements for clinical dentistry [J]. J Funct Biomater, 2016, 7(3): 16. DOI: 10.3390/jfb7030016.

[2] Wilson AD. Glass-ionomer cement—origins, development and future[J]. Clin Mater, 1991, 7(4): 275-282. DOI: 10.1016/0267-6605(91)90070-v.

[3] Mount GJ, Makinson OF. Clinical characteristics of a glass-ionomer cement [J]. Br Dent J, 1978, 145(3): 67-71. DOI: 10.1038/sj.bdj.4804120.

[4] Baig MS, Fleming GJ. Conventional glass-ionomer materials: A review of the developments in glass powder, polyacid liquid and the strategies of reinforcement [J]. J Dent, 2015, 43(8): 897-912. DOI: 10.1016/j.jdent.2015.04.004.

[5] Nicholson JW, Wilson AD. The effect of storage in aqueous solutions on glass-ionomer and zinc polycarboxylate dental cements [J]. J Mater Sci Mater Med, 2000, 11(6): 357-360. DOI: 10.1023/a: 1008929923531.

[6] Frankenberger R, García-Godoy F, Lohbauer U, et al. Evaluation of resin composite materials. Part I: *in vitro* investigations [J]. Am J Dent, 2005, 18(1): 23-27.

[7] Leinfelder KF. Glass ionomers: Current clinical developments [J]. J Am Dent Assoc, 1993, 124(9): 62-64. DOI: 10.14219/jada.archive.1993.0180.

[8] Nicholson JW, Sidhu SK, Czarnecka B. Enhancing the mechanical properties of glass-ionomer dental cements: A review [J]. Materials (Basel), 2020, 13(11): 2510. DOI: 10.3390/ma13112510.

[9] Kampanas NS, Antoniadou M. Glass ionomer cements for the restoration of non-carious cervical lesions in the geriatric patient [J]. J Funct Biomater, 2018, 9(3): 42. DOI: 10.3390/jfb9030042.

[10] Lohbauer U. Dental glass ionomer cements as permanent filling materials? —Properties, limitations and future trends [J]. Materials, 2009, 3(1): 76-96. DOI: 10.3390/ma3010076.

[11] Sidhu SK. Glass-ionomer cement restorative materials: A sticky subject? [J]. Aust Dent J, 2011, 56(Suppl 1): 23-30. DOI: 10.1111/j.1834-7819.2010.01293.x.

[12] McLean JW, Nicholson JW, Wilson AD. Proposed nomenclature for glass-ionomer dental cements and related materials [J]. Quintessence Int, 1994, 25(9): 587-589.

[13] Wilson AD, Kent BE. A new translucent cement for dentistry. The glass ionomer cement [J]. Br Dent J, 1972, 132(4): 133-135. DOI: 10.1038/sj.bdj.4802810.

[14] Nicholson JW. Chemistry of glass-ionomer cements: A review [J]. Biomaterials, 1998, 19(6): 485-494. DOI: 10.1016/s0142-9612(97)00128-2.

[15] de Barra E, Hill RG. Influence of glass composition on the properties of glass polyalkenoate cements. Part Ⅲ: Influence of fluorite content [J]. Biomaterials, 2000, 21(6): 563-569. DOI: 10.1016/s0142-9612(99)00215-x.

[16] Forsten L. Fluoride release and uptake by glass-ionomers and related materials and its clinical effect [J]. Biomaterials, 1998, 19(6): 503-508. DOI: 10.1016/s0142-9612(97)00130-0.

[17] Prosser HJ, Powis DR, Brant P, et al. Characterization of glass-ionomer cements. 7. The physical properties of current materials [J]. J Dent, 1984, 12(3): 231-240. DOI: 10.1016/0300-5712(84)90067-8.

[18] Ching HS, Luddin N, Kannan TP, et al. Modification of glass ionomer cements on their physical-mechanical and antimicrobial properties [J]. J Esthet Restor Dent, 2018, 30(6): 557-571. DOI:10.1111/jerd.12413.
[19] 唐卫东,陈敏,唐立. 玻璃离子水门汀在不同粉液比条件下的氟释放[J]. 大连轻工业学院学报, 2001,20(4):242-244. DOI:10.3969/j.issn.1674-1404.2001.04.003.
[20] Wan Jusoh WN, Matori KA, Mohd Zaid MH, et al. Incorporation of hydroxyapatite into glass ionomer cement (GIC) formulated based on alumino-silicate-fluoride glass ceramics from waste materials [J]. Materials (Basel), 2021, 14(4): 954. DOI: 10.3390/ma14040954.
[21] Wang Y, Darvell BW. Hertzian load-bearing capacity of a ceramic-reinforced glass ionomer cement stored wet and dry [J]. Dent Mater, 2009,25(8):952-955. DOI:10.1016/j.dental.2009.02.006.
[22] Moshaverinia A, Ansari S, Movasaghi Z, et al. Modification of conventional glass-ionomer cements with N-vinylpyrrolidone containing polyacids, nano-hydroxy and fluoroapatite to improve mechanical properties [J]. Dent Mater, 2008, 24(10): 1381-1390. DOI:10.1016/j.dental.2008.03.008.
[23] Najeeb S, Khurshid Z, Zafar MS, et al. Modifications in glass ionomer cements: Nano-sized fillers and bioactive nanoceramics [J]. Int J Mol Sci, 2016, 17(7): 1134. DOI: 10.3390/ijms17071134.
[24] Lohbauer U, Frankenberger R, Clare A, et al. Toughening of dental glass ionomer cements with reactive glass fibres [J]. Biomaterials, 2004, 25(22): 5217-5225. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2003.12.027.
[25] Tanaka CB, Ershad F, Ellakwa A, et al. Fiber reinforcement of a resin modified glass ionomer cement [J]. Dent Mater, 2020, 36(12):1516-1523. DOI:10.1016/j.dental.2020.09.003.
[26] Moshaverinia A, Roohpour N, Rehman IU. Synthesis and characterization of a novel fast-set proline-derivative-containing glass ionomer cement with enhanced mechanical properties [J]. Acta Biomater, 2009, 5(1): 498-507. DOI: 10.1016/j.actbio.2008.06.011.
[27] Khoroushi M, Keshani F. A review of glass-ionomers: From conventional glass-ionomer to bioactive glass-ionomer [J]. Dent Res J (Isfahan), 2013, 10(4): 411-420. DOI: 10.4103/1735-3327.118464.
[28] 崔恺,陈吉华,赵三军. 玻璃离子水门汀的研究进展[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2008,18(11):644-647.
[29] Tyas MJ. Milestones in adhesion: Glass-ionomer cements [J]. J Adhes Dent, 2003,5(4):259-266.
[30] Falsafi A, Mitra SB, Oxman JD, et al. Mechanisms of setting reactions and interfacial behavior of a nano-filled resin-modified glass ionomer [J]. Dent Mater, 2014, 30(6): 632-643. DOI: 10.1016/j.dental.2014.02.025.
[31] Mickenautsch S, Mount G, Yengopal V. Therapeutic effect of glass-ionomers: An overview of evidence [J]. Aust Dent J, 2011, 56(1):10-15. DOI:10.1111/j.1834-7819.2010.01304.x.
[32] Bollen AM, Huang G, King G, et al. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2003,124(5):496-501. DOI:10.1016/s0889-5406(03)00576-6.
[33] Seghi RR, Leyva Del Rio D. Biomaterials: Ceramic and adhesive technologies [J]. Dent Clin North Am, 2019,63(2):233-248. DOI:10.1016/j.cden.2018.11.005.
[34] de Angelis F, D'arcangelo C, Buonvivere M, et al. Shear bond strength of glass ionomer and resin-based cements to different types of zirconia [J]. J Esthet Restor Dent, 2020, 32(8): 806-814. DOI:10.1111/jerd.12638.
[35] Mandall NA, Hickman J, Macfarlane TV, et al. Adhesives for fixed orthodontic brackets [J]. Cochrane Database Syst Rev, 2018, 4(4):CD002282. DOI:10.1002/14651858.CD002282.pub2.
[36] Benson PE, Alexander-Abt J, Cotter S, et al. Resin-modified glass ionomer cement vs composite for orthodontic bonding: A multicenter, single-blind, randomized controlled trial [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2019, 155(1): 10-18. DOI:10.1016/j.ajodo.2018.09.005.
[37] Fricker JP. Therapeutic properties of glass-ionomer cements: Their application to orthodontic treatment [J]. Aust Dent J, 2022,67(1):12-20. DOI:10.1111/adj.12888.
[38] Berg JH. Glass ionomer cements [J]. Pediatr Dent, 2002,24(5):430-438.
[39] Dias AGA, Magno MB, Delbem ACB, et al. Clinical performance of glass ionomer cement and composite resin in Class Ⅱ restorations in primary teeth: A systematic review and meta-analysis [J]. J Dent, 2018, 73: 1-13. DOI:10.1016/j.jdent.2018.04.004.
[40] 王瑾,程为庄. 玻璃离子水门汀的研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2005, 24(2): 139-142. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2005.02.016.
[41] 劳嘉成. 树脂与玻璃离子水门汀充填治疗学龄前儿童乳牙龋蚀的效果[J]. 深圳中西医结合杂志, 2023,33(5):110-112. DOI:10.16458/j.cnki.1007-0893.2023.05.035.
[42] 陈婉璐,李万蒙,李亚琼,等. 玻璃离子水门汀在老年根面龋患者修复中的应用及对龈沟液炎性因子水平的影响[J]. 中国老年学杂志, 2023,43(2):358-361. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9202.2022.02.029.
[43] 尹良胜,池韬,钟素苗. 相邻后牙邻面龋的诊治及其树脂充填效果评价的临床研究[J]. 四川医学, 2019,40(5):487-490. DOI:10.16252/j.cnki.issn1004-0501-2019.05.12.
[44] 李旭. 银粉玻璃离子水门汀填充修复在恒磨牙邻面龋患者中的应用[J]. 医药论坛杂志, 2020,41(8):103-106. DOI:CNKI:SUN:HYYX.0.2020-08-028.
[45] Tolidis K, Boutsiouki C, Gerasimou P. Comparative evaluation of microleakage of a carbomer/fluoroapatite-enhanced glass-ionomer cement on primary teeth restorations [J]. Eur J Paediatr Dent, 2016,17(3):227-233.

[46] Francisconi LF, Scaffa PM, de Barros VR, et al. Glass ionomer cements and their role in the restoration of non-carious cervical lesions [J]. J Appl Oral Sci, 2009, 17(5): 364-369. DOI: 10.1590/s1678-77572009000500003.

[47] Schwendicke F, Müller A, Seifert T, et al. Glass hybrid versus composite for non-carious cervical lesions: Survival, restoration quality and costs in randomized controlled trial after 3 years [J]. J Dent, 2021, 110: 103689. DOI: 10.1016/j.jdent.2021.103689.

[48] 马健,邵强,于毅. 不同龈下楔状缺损充填材料对牙龈卟啉单胞菌生物膜形成的影响[J]. 上海口腔医学, 2020, 29(4): 375-379. DOI: 10.19439/j.sjos.2020.04.008.

[49] Frencken JE, Leal SC, Navarro MF. Twenty-five-year atraumatic restorative treatment(ART) approach: A comprehensive overview [J]. Clin Oral Investig, 2012, 16(5): 1337-1346. DOI: 10.1007/s00784-012-0783-4.

[50] Ruengrungsom C, Palamara JEA, Burrow MF. Comparison of ART and conventional techniques on clinical performance of glass-ionomer cement restorations in load bearing areas of permanent and primary dentitions: A systematic review [J]. J Dent, 2018, 78: 1-21. DOI: 10.1016/j.jdent.2018.07.008.

[51] Smales RJ, Yip HK. The atraumatic restorative treatment (ART) approach for the management of dental caries [J]. Quintessence Int, 2002, 33(6): 427-432.

[52] da Mata C, Mckenna G, Anweigi L, et al. An RCT of atraumatic restorative treatment for older adults: 5 year results [J]. J Dent, 2019, 83: 95-99. DOI: 10.1016/j.jdent.2019.03.003.

[53] Ratnayake J, Veerasamy A, Ahmed H, et al. Clinical and microbiological evaluation of a chlorhexidine-modified glass ionomer cement (GIC-CHX) restoration placed using the atraumatic restorative treatment (ART) technique [J]. Materials (Basel), 2022, 15(14): 5044. DOI: 10.3390/ma15145044.

[54] Chailert O, Banomyong D, Vongphan N, et al. Internal adaptation of resin composite restorations with different thicknesses of glass ionomer cement lining [J]. J Investig Clin Dent, 2018, 9(2): e12308. DOI: 10.1111/jicd.12308.

[55] Ribeiro APD, Sacono NT, Soares DG, et al. Human pulp response to conventional and resin-modified glass ionomer cements applied in very deep cavities [J]. Clin Oral Investig, 2020, 24(5): 1739-1748. DOI: 10.1007/s00784-019-03035-3.

[56] Mount GJ. Esthetics with glass-ionomer cements and the "sandwich" technique [J]. Quintessence Int, 1990, 21(2): 93-101.

[57] 南晓红,寇继寅,李茹. 玻璃离子水门汀的应用及发展[J]. 口腔医学, 2007, 27(6): 323-325. DOI: 10.3969/j.issn.1003-9872.2007.06.016.

[58] Manihani AKDS, Mulay S, Beri L, et al. Effect of total-etch and self-etch adhesives on the bond strength of composite to glass-ionomer cement/resin-modified glass-ionomer cement in the sandwich technique—A systematic review [J]. Dent Res J (Isfahan), 2021, 18: 72. DOI: 10.4103/1735-3327.326645.

[59] Sikka N, Brizuela M. Glass Ionomer Cement [M]. Treasure Island (FL): StatPearls, 2023.

[60] Hassani Katehsari V, Niedermeier W. Solubility of dental core build-up materials in electric fields [J]. J Dent Sci, 2019, 14(4): 346-351. DOI: 10.1016/j.jds.2019.04.005.

[61] Souza JCM, Fernandes V, Correia A, et al. Surface modification of glass fiber-reinforced composite posts to enhance their bond strength to resin-matrix cements: An integrative review [J]. Clin Oral Investig, 2022, 26(1): 95-107. DOI: 10.1007/s00784-021-04221-y.

[62] Li XJ, Zhao SJ, Niu LN, et al. Effect of luting cement and thermomechanical loading on retention of glass fibre posts in root canals [J]. J Dent, 2014, 42(1): 75-83. DOI: 10.1016/j.jdent.2013.10.017.

[63] 刘莹,王富,赵三军,等. 3种粘结材料对粘结纤维桩的临床疗效观察[J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2016, 26(2): 110-114. DOI: 10.15956/j.cnki.chin.j.conserv.dent.2016.02.012.

[64] Kantovitz KR, Pascon FM, Nociti FH Jr, et al. Inhibition of enamel mineral loss by fissure sealant: An in situ study [J]. J Dent, 2013, 41(1): 42-50. DOI: 10.1016/j.jdent.2012.09.015.

[65] Yengopal V, Mickenautsch S, Bezerra AC, et al. Caries-preventive effect of glass ionomer and resin-based fissure sealants on permanent teeth: A meta analysis [J]. J Oral Sci, 2009, 51(3): 373-382. DOI: 10.2334/josnusd.51.373.

[66] Markovic D, Peric T, Petrovic B. Glass-ionomer fissure sealants: Clinical observations up to 13 years [J]. J Dent, 2018, 79: 85-89. DOI: 10.1016/j.jdent.2018.10.007.

[67] 李一涵,王菲,吴珺华. 影响玻璃离子水门汀粘接强度的因素[J]. 广东牙病防治, 2015, 23(1): 48-51. DOI: CNKI: SUN: GDYB.0.2015-01-019.

[68] 胡菁颖,李莉,周倩姝,等. 不同调拌板对玻璃离子水门汀物理性能的影响[J]. 北京大学学报(医学版), 2019, 51(5): 964-967. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167x.2019.05.029.

[69] 叶慧铭,朱曼群,林桂珍,等. 玻璃离子水门汀粘固前牙全冠的调拌方法探讨[J]. 广东牙病防治, 2012, 20(8): 441-442. DOI: CNKI: SUN: GDYB.0.2012-08-014.

[70] 邱韬,陈欣蕾,黄娟,等. 调拌方式对玻璃离子水门汀充填体抗压强度的影响[J]. 中国医药导报, 2019, 16(24): 111-114. DOI: CNKI: SUN: YYCY.0.2019-24-030.

[71] 邱韬,毛渤淳,张家愚,等. 调拌方式对玻璃离子水门汀充填体边缘微渗漏的影响[J]. 中国医药导报, 2019, 16(33): 100-102+115. DOI: CNKI: SUN: YYCY.0.2019-33-025.

[72] Mar B, Ekambaram M, Li KC, et al. The influence of saliva and blood contamination on bonding between resin-modified glass ionomer cements and resin composite [J]. Oper Dent, 2023, 48(2): 218-225. DOI: 10.2341/21-173-L.

[73] Shimazu K, Karibe H, Oguchi R, et al. Influence of artificial saliva contamination on adhesion in class V restorations [J]. Dent Mater J, 2020, 39(3): 429-434. DOI: 10.4012/dmj.2019-032.

[74] 赵信义. 口腔材料学[M]. 6版. 北京: 人民卫生出版社, 2020: 66-67.

[75] 黄梓濡,邹华,侯沐明,等.粉液比例对树脂加强型玻璃离子托槽粘接的影响[J/OL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2015,9(4):301-304. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2015.04.008.

[76] Millett DT, Cattanach D, Mcfadzean R, et al. Laboratory evaluation of a compomer and a resin-modified glass ionomer cement for orthodontic bonding [J]. Angle Orthod, 1999,69(1):58-63. DOI: 10.1043/0003-3219(1999)069 < 0058:LEOACA>2.3.CO;2.

[77] Hao Y, Huang X, Zhou X, et al. Influence of dental prosthesis and restorative materials interface on oral biofilms [J]. Int J Mol Sci, 2018,19(10):3157. DOI:10.3390/ijms19103157.

[78] Fukuda R, Yoshida Y, Nakayama Y, et al. Bonding efficacy of polyalkenoic acids to hydroxyapatite, enamel and dentin [J]. Biomaterials, 2003,24(11):1861-1867. DOI: 10.1016/s0142-9612(02)00575-6.

[79] Yoshida Y, Van Meerbeek B, Nakayama Y, et al. Evidence of chemical bonding at biomaterial-hard tissue interfaces [J]. J Dent Res, 2000,79(2):709-714. DOI:10.1177/00220345000790020301.

[80] Yoshihara K, Nagaoka N, Hayakawa S, et al. Chemical interaction of glycero-phosphate dimethacrylate(GPDM) with hydroxyapatite and dentin [J]. Dent Mater, 2018,34(7):1072-1081. DOI: 10.1016/j.dental.2018.04.003.

[81] Hasan AMHR, Sidhu SK, Nicholson JW. Fluoride release and uptake in enhanced bioactivity glass ionomer cement ("glass carbomer™") compared with conventional and resin-modified glass ionomer cements [J]. J Appl Oral Sci, 2019, 27: e20180230. DOI:10.1590/1678-7757-2018-0230.

[82] Patil SS, Kontham UR, Kontham RK, et al. Fluoride release and fluoride-recharging ability of three different sealants [J]. J Indian Soc Pedod Prev Dent, 2020, 38(3): 247-252. DOI: 10.4103/JISPPD.JISPPD_345_19.

[83] Bueno LS, Borges AFS, Navarro MFL, et al. Determination of chemical species of fluoride during uptake mechanism of glass-ionomer cements with NMR spectroscopy [J]. Dent Mater, 2021, 37(7):1176-1182. DOI:10.1016/j.dental.2021.04.011.

[84] Burgess JO, Vaghela PM. Silver diamine fluoride: A successful anticarious solution with limits [J]. Adv Dent Res, 2018,29(1):131-134. DOI:10.1177/0022034517740123.

[85] González-Cabezas C, Fernández CE. Recent advances in remineralization therapies for caries lesions [J]. Adv Dent Res, 2018,29(1):55-59. DOI:10.1177/0022034517740124.

[86] Ten Cate JM, Buzalaf MAR. Fluoride mode of action: Once there was an observant dentist [J]. J Dent Res, 2019,98(7):725-730. DOI:10.1177/0022034519831604.

[87] Walsh T, Worthington HV, Glenny AM, et al. Fluoride toothpastes of different concentrations for preventing dental caries [J]. Cochrane Database Syst Rev, 2019,3(3):CD007868. DOI: 10.1002/14651858.CD007868.pub3.

[88] Tian KV, Chass GA, Di Tommaso D. Simulations reveal the role of composition into the atomic-level flexibility of bioactive glass cements [J]. Phys Chem Chem Phys, 2016,18(2):837-845. DOI:10.1039/c5cp05650k.

[89] Pedone A, Chen X, Hill RG, et al. Molecular Dynamics Investigation of Halide-Containing Phospho-Silicate Bioactive Glasses [J]. J Phys Chem B, 2018,122(11):2940-2948. DOI:10.1021/acs.jpcb.8b00547.

[90] Francois P, Fouquet V, Attal JP, et al. Commercially available fluoride-releasing restorative materials: A review and a proposal for classification [J]. Materials(Basel), 2020, 13(10): 2313. DOI:10.3390/ma13102313.

[91] Dasgupta S, Saraswathi MV, Somayaji K, et al. Comparative evaluation of fluoride release and recharge potential of novel and traditional fluoride-releasing restorative materials: An *in vitro* study [J]. J Conserv Dent, 2018,21(6):622-626. DOI:10.4103/JCD.JCD_338_18.

[92] Garoushi S, Vallittu PK, Lassila L. Characterization of fluoride releasing restorative dental materials [J]. Dent Mater J, 2018,37(2):293-300. DOI:10.4012/dmj.2017-161.

[93] Hurle K, Oliveira JM, Reis RL, et al. Ion-doped brushite cements for bone regeneration [J]. Acta Biomater, 2021,123:51-71. DOI:10.1016/j.actbio.2021.01.004.

[94] Bermúdez-Reyes B, Del Refugio Lara-Banda M, Reyes-Zarate E, et al. Effect on growth and osteoblast mineralization of hydroxyapatite-zirconia (HA-ZrO_2) obtained by a new low temperature system [J]. Biomed Mater, 2018, 13(3): 035001. DOI:10.1088/1748-605X/aaa3a4.

[95] Van Duinen RN, Davidson CL, De Gee AJ, et al. In situ transformation of glass-ionomer into an enamel-like material [J]. Am J Dent, 2004,17(4):223-227.

[96] De Caluwé T, Vercruysse CWJ, Ladik I, et al. Addition of bioactive glass to glass ionomer cements: Effect on the physico-chemical properties and biocompatibility[J]. Dent Mater, 2017, 33(4):e186-e203. DOI:10.1016/j.dental.2017.01.007.

[97] Bossù M, Saccucci M, Salucci A, et al. Enamel remineralization and repair results of Biomimetic Hydroxyapatite toothpaste on deciduous teeth: An effective option to fluoride toothpaste [J]. J Nanobiotechnology, 2019,17(1):17. DOI:10.1186/s12951-019-0454-6.

[98] Karimi M, Hesaraki S, Alizadeh M, et al. Effect of synthetic amorphous calcium phosphate nanoparticles on the physicochemical and biological properties of resin-modified glass ionomer cements [J]. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl, 2019, 98:227-240. DOI:10.1016/j.msec.2018.12.129.

[99] Kheur M, Kantharia N, Lakha T, et al. Correction To: Evaluation of mechanical and adhesion properties of glass ionomer cement incorporating nano-sized hydroxyapatite particles[J]. Odontology, 2020,108(1):152. DOI:10.1007/s10266-019-00434-6.

[100] Kunte S, Shah SB, Patil S, et al. Comparative evaluation of compressive strength and diametral tensile strength of conventional glass ionomer cement and a glass hybrid glass

ionomer cement [J]. Int J Clin Pediatr Dent, 2022, 15(4): 398-401. DOI: 10.5005/jp-journals-10005-2407.

[101] Kheur M, Kantharia N, Lakha T, et al. Evaluation of mechanical and adhesion properties of glass ionomer cement incorporating nano-sized hydroxyapatite particles [J]. Odontology, 2020, 108(1): 66-73. DOI: 10.1007/s10266-019-00427-5.

[102] Lee JJ, Lee YK, Choi BJ, et al. Physical properties of resin-reinforced glass ionomer cement modified with micro and nano-hydroxyapatite [J]. J Nanosci Nanotechnol, 2010, 10(8): 5270-5276. DOI: 10.1166/jnn.2010.2422.

[103] Sun L, Yan Z, Duan Y, et al. Improvement of the mechanical, tribological and antibacterial properties of glass ionomer cements by fluorinated graphene [J]. Dent Mater, 2018, 34(6): e115-e127. DOI: 10.1016/j.dental.2018.02.006.

[104] Dionysopoulos D, Tolidis K, Tortopidis D, et al. Effect of a calcium chloride solution treatment on physical and mechanical properties of glass ionomer cements [J]. Odontology, 2018, 106(4): 429-438. DOI: 10.1007/s10266-018-0338-5.

[105] Perera D, Yu SCH, Zeng H, et al. Acid resistance of glass ionomer cement restorative materials[J]. Bioengineering(Basel), 2020, 7(4): 150. DOI: 10.3390/bioengineering7040150.

[106] Mustafa R, Alshali RZ, Silikas N. The effect of desiccation on water sorption, solubility and hygroscopic volumetric expansion of dentine replacement materials [J]. Dent Mater, 2018, 34(8): e205-e213. DOI: 10.1016/j.dental.2018.05.012.

[107] Pitel ML. Long-term performance of glass-hybrid restorations in permanent posterior teeth [J]. Compend Contin Educ Dent, 2021, 42(Suppl 1): 6-9.

[108] Scott JM, Mahoney EK. Restoring proximal lesions in the primary dentition: Is glass ionomer cement the material of choice? [J]. N Z Dent J, 2003, 99(3): 65-71.

[109] Almuhaiza M. Glass-ionomer cements in restorative dentistry: A critical appraisal [J]. J Contemp Dent Pract, 2016, 17(4): 331-336. DOI: 10.5005/jp-journals-10024-1850.

[110] Oz FD, Meral E, Ergin E, et al. One-year evaluation of a new restorative glass ionomer cement for the restoration of non-carious cervical lesions in patients with systemic diseases: A randomized, clinical trial [J]. J Appl Oral Sci, 2020, 28: e20200311. DOI: 10.1590/1678-7757-2020-0311.

[111] Gurgan S, Kutuk ZB, Ergin E, et al. Four-year randomized clinical trial to evaluate the clinical performance of a glass ionomer restorative system [J]. Oper Dent, 2015, 40(2): 134-143. DOI: 10.2341/13-239-C.

[112] Gurgan S, Kutuk ZB, Ergin E, et al. Clinical performance of a glass ionomer restorative system: A 6-year evaluation [J]. Clin Oral Investig, 2017, 21(7): 2335-2343. DOI: 10.1007/s00784-016-2028-4.

[113] Hickel R, Kaaden C, Paschos E, et al. Longevity of occlusally-stressed restorations in posterior primary teeth [J]. Am J Dent, 2005, 18(3): 198-211.

[114] Bijle MN, Ekambaram M, Lo ECM, et al. Antibacterial and mechanical properties of arginine-containing glass ionomer cements [J]. Dent Mater, 2020, 36(9): 1226-1240. DOI: 10.1016/j.dental.2020.05.012.

[115] Hafshejani TM, Zamanian A, Venugopal JR, et al. Antibacterial glass-ionomer cement restorative materials: A critical review on the current status of extended release formulations [J]. J Control Release, 2017, 262: 317-328. DOI: 10.1016/j.jconrel.2017.07.041.

[116] 朱可石,任利玲. 纳米填料改性玻璃离子水门汀的研究进展[J]. 口腔医学研究, 2022, 38(1): 13-16. DOI: 10.13701/j.cnki.kqyxyj.2022.01.003.

[117] Zhu K, Zheng L, Xing J, et al. Mechanical, antibacterial, biocompatible and microleakage evaluation of glass ionomer cement modified by nanohydroxyapatite/polyhexamethylene biguanide [J]. Dent Mater J, 2022, 41(2): 197-208. DOI: 10.4012/dmj.2021-096.

[118] 张宜爽,陶地豪,郭安迪,等. 玻璃离子水门汀天然抗菌成分研究进展[J]. 口腔疾病防治, 2022, 30(10): 751-756. DOI: 10.12016/j.issn.2096-1456.2022.10.011.

[119] Yudovin-Farber I, Beyth N, Nyska A, et al. Surface characterization and biocompatibility of restorative resin containing nanoparticles [J]. Biomacromolecules, 2008, 9(11): 3044-3050. DOI: 10.1021/bm8004897.

[120] Saghir A, Rehman T, Irum B, et al. 12 Month's assessment of clinical efficacy of resin modified glass ionomer cement and flowable composites in restoration of non-carious cervical lesions, a randomized clinical trial [J]. J Ayub Med Coll Abbottabad, 2023, 35(1): 7-10. DOI: 10.55519/JAMC-01-10780.

[121] Uzel I, Gurlek C, Kuter B, et al. Caries-preventive effect and retention of glass-ionomer and resin-based sealants: A randomized clinical comparative evaluation [J]. Biomed Res Int, 2022: 7205692. DOI: 10.1155/2022/7205692.

[122] Chadwick BL, Evans DJ. Restoration of class Ⅱ cavities in primary molar teeth with conventional and resin modified glass ionomer cements: A systematic review of the literature [J]. Eur Arch Paediatr Dent, 2007, 8(1): 14-21. DOI: 10.1007/BF03262565.

[123] 巴晓兰,程为庄. 改性玻璃离子水门汀的研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2005, 22(4): 857-859. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-5515.2005.04.049.

(收稿日期:2023-03-19)

(本文编辑:王嫚)