

牙体硬组织粘接界面抗酸碱层的研究进展

陈睿桢 姜醒 沈纪元 林玲 郑志强 林捷

福建医科大学口腔医学院/附属口腔医院特诊科 福州 350002

[摘要] 扫描电子显微镜观察证实牙体粘接界面的混合层之下存在抗酸碱层 (ABRZ), 其形成与酸性功能性单体与牙体中的羟磷灰石发生化学反应有关。与传统混合层不同, ABRZ以树脂包裹的部分脱矿羟磷灰石为特征, 可提升粘接界面的抗酸碱侵蚀能力及长期粘接耐久性。ABRZ在自酸蚀粘接系统中更易形成, 其结构与粘接剂的化学组成密切相关。本文对ABRZ的微观结构、影响因素及形成机制作一综述, 为牙体粘接的临床和科研提供参考。

[关键词] 牙体粘接; 抗酸碱层; 牙本质; 牙釉质; 功能性单体; 自酸蚀粘接系统

[中图分类号] R781.05 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2025092



开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)

Research progress of acid-base resistant zone for dental hard tissue bonding interface

Chen Ruizhen, Jiang Xing, Shen Jiyuan, Lin Ling, Zheng Zhiqiang, Lin Jie

Dept. of VIP Dental Service, School and Hospital of Stomatology, Fujian Medical University, Fuzhou 350002, China

Supported by: Natural Science Foundation of Fujian Province (2023J01701)

Correspondence: Lin Jie, Email: linjie.dds@gmail.com

[Abstract] Observation by scanning electron microscopy confirmed the existence of an acid-base resistant zone (ABRZ) beneath the hybrid layer at the dental bonding interface. The formation of this zone is related to the chemical reaction between acidic functional monomers and hydroxyapatite in dentin. Unlike the traditional hybrid layer, ABRZ is characterized by resin-encapsulated partially demineralized hydroxyapatite. This formation enhances the resistance of the bond interface to acid-base degradation and long-term bonding durability. Recent studies suggest that ABRZ forms more readily in self-etch adhesive systems. The structure of this zone is closely related to the chemical composition of the adhesive. In this review, the microstructure, influencing factors, and formation mechanism of ABRZ are summarized to provide insights for clinical and scientific research on dental bonding.

[Key words] dental adhesion; acid-base resistant zone; dentin; enamel; functional monomer; self-etching adhesive system

牙科粘接的发展是从宏观到微观的过程, 实验仪器和粘接理念都在不断深入和进步。1955年 Buonocore发现了牙釉质酸蚀粘接方法; 1982年 Nakabayashi在牙本质的粘接机制方面有重要发现: 牙本质主要依靠树脂单体与胶原纤维网的包裹结合, 在粘接界面形成混合层 (hybrid layer, HL) 达到粘接效果^[1]。随着抗酸碱层 (acid-base resis-

tant zone, ABRZ)^[2]、纳米层 (nano-layering)^[3-4]、黏附脱钙概念 (adhesion decalcification concept, AD-concept)^[5-6]等新理念的提出, 对牙体粘接的认识逐渐加深。本文对ABRZ的微观结构、影响因素及形成机制作一综述, 为牙体粘接的临床和科研提供参考。

1 ABRZ的发现

2004年 Tsuchiya等^[2]发现: 自酸蚀粘接剂处理后的牙本质粘接界面, 在HL的底部存在一个新结构层, 因其具有抵抗酸碱侵蚀的特性, 被命名为

[收稿日期] 2024-08-16; **[修回日期]** 2024-10-04

[基金项目] 福建省自然科学基金 (2023J01701)

[作者简介] 陈睿桢, 硕士, Email: crzwwdka@163.com

[通信作者] 林捷, 副主任医师, 博士, Email: linjie.dds@gmail.com

ABRZ,也称为超级牙本质(super dentin)。由于该结构层能够抵御酸碱的侵蚀,ABRZ在防止继发龋、维持修复体边缘封闭性及提高粘接持久性等方面具有重要的意义。

1.1 ABRZ的试样制备及组成结构

Inoue等^[7]建立了ABRZ粘接剂-牙本质界面酸碱处理后的试样制备程序。用复合树脂和各类粘接系统粘接切割过的牙体(牙本质片或牙釉质片),浸入pH值为4.5的人工脱矿酸性溶液内90 min,接着浸入5%的次氯酸钠(NaOCl)溶液20 min,然后进行扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察,将牙本质粘接界面截取进行可视化研究。在SEM和透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)下,ABRZ通常表现为电子致密层,由紧密排列的颗粒状晶体组成。ABRZ的SEM特征具有材料依赖性,根据实验设置和实验材料不同,其形态也不同。图1显示了酸碱侵蚀ABRZ在SEM下的典型结构,观察内容包括:1) ABRZ和HL的关系,ABRZ可以作为独立的结构进行研究,不包含在HL内;2) ABRZ的厚薄程度,因粘接系统的步骤、成分不同,ABRZ的厚薄程度各异;3) 酸碱侵蚀牙体后形成的被侵蚀空间大小;4) ABRZ、被侵蚀空间与剩余牙体组织之间的侵蚀区,即易受酸碱侵蚀的薄弱区,部分粘接系统会产生图中箭头所示的漏斗状区域。

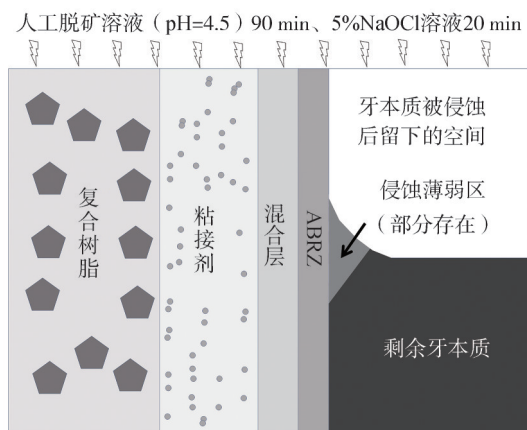


图1 牙本质ABRZ在SEM下的典型结构示意图

Fig 1 Schematic of the typical ABRZ microstructure in dentin (SEM)

1.2 ABRZ的形成机制

ABRZ的形成与多种因素有关,包括牙体组织状况、粘接材料的种类及粘接技术,以及样本制备过程中人工酸碱侵蚀的条件等。通过SEM和TEM观察ABRZ的超微结构,可以进一步理解其

形成机制,揭示ABRZ的形成过程。ABRZ位于HL和牙本质间,主要由羟磷灰石(hydroxyapatite, HA)晶体组成。在自酸蚀粘接系统处理的牙本质中产生了ABRZ,相比之下,酸蚀-冲洗粘接系统没有产生ABRZ,推测ABRZ可能源于自酸蚀粘接剂功能性单体渗入部分脱矿牙本质中和脱矿游离的钙离子结合而形成^[8]。功能性单体对ABRZ的影响研究进一步验证了这一观点^[9-12]。

ABRZ的确切形成机制尚未完全明确,目前已知的是,功能性单体与HA的化学反应是ABRZ形成的关键^[13-14],这为提高粘接修复体的持久性提供了理论依据。后续通过酸碱处理的试样制备以及SEM和TEM观察,使得化学粘接结构达到可视化,进一步支持了化学粘接机制,为后续的牙体粘接研究提供了指导。

2 牙本质ABRZ的研究

牙本质ABRZ已经成为牙科粘接领域的研究热点问题。牙釉质和牙本质的组成成分和HA晶体的大小、排列都有很大差异。牙本质的HA晶体较牙釉质小,且与有机基质交错,建立微机械嵌合更为困难。通过TEM观察酸碱处理后的粘接剂-牙本质界面,发现在HL下方仍有被树脂单体包裹的HA晶体,且HA晶体比HL中的相对致密^[15-16]。ABRZ的发现使学者们进一步认识了HL的结构,有学者^[17]建议:通过自酸蚀粘接技术形成ABRZ,以增强牙本质对酸碱的抵抗力,维持修复体边缘良好的封闭性,从而减少继发龋的形成并提高粘接持久性。

2.1 对粘接强度的影响

从总体上看,ABRZ存在与否和粘接强度没有绝对的相关性,但存在ABRZ结构的粘接界面耐久性更高^[8]。粘接剂中的功能性单体10-甲基丙烯酸酞氧癸基磷酸二氢(10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate, MDP)已被证明可以提高与牙本质的即刻粘接强度,并在HL下方产生ABRZ^[18]。Vicheva等^[19]的研究发现:硅烷偶联剂处理组HL和ABRZ较薄,对粘接强度有一定的负面影响。由于粘接中使用的金属底涂剂含有MDP和丙酮溶剂,可以实现对牙本质良好的粘接,因此金属底涂剂污染对牙本质粘接强度的影响很小。

释氟粘接系统能够促进修复体周围牙本质的矿化作用,氟化物的存在会影响ABRZ的形成,增

加ABRZ的厚度,也可以影响牙本质粘接强度。Ko等^[20]的研究发现:释氟粘接剂对牙本质表现出更稳定的粘接性能,并具有浓度依赖性;与不含氟粘接剂所形成的ABRZ相比,释氟粘接剂形成的ABRZ更能抵抗酸的侵蚀。Ochiai等^[21]的研究表明:在两步法自酸蚀粘接系统中,实验性含钙底漆配合释氟粘接剂可在不降低粘接强度的情况下提高粘接界面的耐酸性。由这些研究可以看出,含钙底漆配合含氟的粘接剂有望作为新的粘接体系以改善粘接剂的化学性能。

粘接强度也与牙本质状态有关。尽管受龋坏组织的影响,使用两步法自酸蚀粘接剂时牙本质可产生较厚的ABRZ,但受龋影响的牙本质脱矿较深,较厚的玷污层也阻碍了树脂的渗透,这导致与健康牙本质相比,自酸蚀粘接剂对患龋牙本质的粘接强度较低^[7]。

2.2 对粘接耐久性的影响

热循环是模拟口腔环境中温度变化对粘接耐久性影响的常用方法。Guan等^[8]的研究中,通过热循环测试发现:经过一定次数的热循环后,牙本质自酸蚀粘接的粘接强度保持稳定,而酸蚀-冲洗条件下的粘接强度有所下降,且仅在自酸蚀组观察到了ABRZ的存在,酸蚀-冲洗组未观察到ABRZ结构,这可能是影响牙本质粘接耐久性的原因。此外,释氟粘接系统可形成较厚的ABRZ,有效地增强牙本质的粘接耐久性,从而提高修复体的临床成功率^[22]。

树脂水门汀的种类也会影响粘接耐久性^[23]。Aung等^[23]通过对3种双重固化树脂水门汀PANAVIA V5、ESTECCEM II和Rely X Ultimate的粘接强度和ABRZ的形成进行研究,结果发现:热循环后,带有预处理剂的PANAVIA V5系统的粘接强度最强,抵抗酸碱侵蚀的能力也最强。预处理剂中含有MDP,能够在粘接过程中酸蚀牙本质,增加PANAVIA V5的牙本质结合强度^[24]。

在牙本质因酸性磨损脱矿的情况下,其粘接耐久性会受到影响。为了改善这一问题,可通过特定的预处理方法改善粘接性能。脱矿过程导致粘接表面的矿物质含量降低,胶原网暴露,不利于粘接。使用NaOCl和次氯酸(HOCl)作为预处理剂可以溶解牙本质表面暴露的胶原网,从而提高酸性单体与HA的化学相互作用,增强粘接剂的渗透性。NaOCl处理可能会干扰粘接剂的聚合过程,为了解决这一问题,可以使用含有芳基硫

酸盐的试剂(Clearfil DC Activator, DCA)代替NaOCl, DCA能够形成更稳定的ABRZ,提高粘接耐久性^[25]。

2.3 纳米渗漏

Nikaido等^[16]的研究中,使用硝酸银溶液和人工脱矿溶液对一步法和两步法自酸蚀粘接界面进行酸碱侵蚀,通过TEM观察自酸蚀粘接系统在牙本质粘接界面的纳米渗漏情况,发现所有粘接系统ABRZ中的纳米渗漏水平均低于HL,提示ABRZ可有效减少粘接界面的纳米渗漏。两步法自酸蚀粘接剂比一步法自酸蚀粘接剂的界面质量更好,ABRZ更厚,纳米渗漏水平也更低。从粘接剂-牙本质界面的质量考虑,两步法自酸蚀粘接是较好的选择。

有研究^[15]认为牙本质全酸蚀处理无法形成ABRZ结构;也有研究^[19]通过缩短酸蚀时间以及反复涂布预处理剂和粘接剂,在全酸蚀处理的牙本质中也观察到了ABRZ,但在ABRZ下方观察到漏斗状侵蚀形态(图1),这是由于树脂单体无法完全渗透到磷酸酸蚀深度,在ABRZ区的下方形成了薄弱区。

3 牙釉质 ABRZ 的研究

在牙本质ABRZ研究的基础上, Li等^[26]在牙釉质中也发现了ABRZ,并建立了牙釉质ABRZ制备和观察体系。由于人工酸碱侵蚀是观察ABRZ的重要步骤,牙釉质与牙本质的组成和结构不同,通常需要增强溶液的酸性并延长侵蚀时间,以达到合适的侵蚀区,以便于观察ABRZ。

ABRZ的形成与粘接剂中的功能性单体和牙体组织中HA之间的化学反应密切相关。对于牙本质来说,自酸蚀处理剂去除玷污层并使底层牙本质轻度脱矿,留下部分HA附着在牙本质胶原上,单体渗透到HL以下的牙体中,因此牙本质ABRZ形成于HL之下;然而牙釉质的矿物质含量较高,具有不同于牙本质胶原网络的基质结构,HA分布在整个脱矿层中,因此,牙釉质经处理后形成的ABRZ不在粘接界面下方,而是在界面^[26]。

氟化物除了能影响牙本质ABRZ的形成,同样可以影响牙釉质。在两步法自酸蚀粘接剂中加入氟化钠,可增强牙釉质的粘接耐久性和酸抵抗性^[11]。不同于牙本质粘接流程的是,预酸蚀处理对牙釉质ABRZ的形成有显著影响,尤其是使用磷

酸,可以明显提高牙釉质的粘接强度,并促进ABRZ的形成^[27]。有研究^[28]发现:在牙釉质表面单独使用自酸蚀粘接剂时,粘接界面下方发现了漏斗状缺损,然而使用磷酸预酸蚀时,并没有发现这些缺损。

4 粘接系统对 ABRZ 的影响

4.1 酸蚀-冲洗粘接系统

在牙本质上使用磷酸酸蚀-冲洗系统时,由于牙本质完全脱矿,脱矿深度超过了树脂浸润的深度,因此树脂无法全部浸润HL底部的胶原带,这些不完全被树脂渗透的胶原成为HL底部的纳米多孔区,成为纳米渗漏的途径^[15]。酸蚀-冲洗推荐用于牙釉质粘接,因为牙釉质预酸蚀后可增加功能性单体的渗入深度,从而促进ABRZ的形成,粘接强度也有所提高^[26,28]。选择性酸蚀是一种策略,通过使用磷酸酸蚀剂对牙釉质进行预处理,以优化通用粘接剂的牙釉质粘接强度。

严格的选择性酸蚀在临床实际操作中可能难以实现。有研究^[29,30]发现使用有机酸酸蚀对牙本质粘接耐久性的负面影响小于磷酸酸蚀;但这些不含磷酸的产品对牙本质粘接耐久性的影响需要进一步研究,以确定它们是否能够成为传统磷酸酸蚀剂的安全替代品。

4.2 自酸蚀粘接系统

自酸蚀系统通过酸性单体轻微酸蚀牙本质,这些酸性功能性单体与HA发生化学结合,形成稳定的ABRZ,增强了粘接剂与牙体之间的粘接强度和耐久性;含氟的自酸蚀粘接剂能够释放氟离子,进一步提高ABRZ的抗酸性能力^[24,26,31]。

一步法自酸蚀系统集酸蚀、预处理和粘接为一体,简化了临床操作,降低了技术敏感性;但一步法粘接系统可能会因为同时含有亲水性单体和疏水性单体而影响牙体粘接耐久性和ABRZ的形成^[32]。

Nikaido等^[16]的研究中使用一步法粘接系统(Clearfil SE One),结果发现在ABRZ下方产生了漏斗状缺损。在一步法粘接剂中,疏水性和亲水性单体在聚合之前混合在一起,当溶剂蒸发时,可能会发生相分离。涂布粘接剂后,大部分溶剂通过气吹挥发,但由于甲基丙烯酸羟乙酯(2-hydroxyethyl methacrylate, HEME)降低了水的蒸汽压,仍然会有部分水分残留。由于单体可以比HL

渗入得更深,并且水会抑制粘接剂的聚合,因此推测在HL和ABRZ下方可能会形成一个薄弱区域,该区域被部分脱矿,而由于相分离和水的存在,渗透的单体没有完全聚合。与ABRZ相比,该区域可能更容易受到酸攻击的影响,导致漏斗状缺损的形成。但使用一步法粘接系统前,使用氟化物处理牙本质可以增强粘接界面的耐酸性。Nakamoto等^[32]的研究中,使用氟化物溶液处理牙本质后,采用一步法粘接系统并未在ABRZ下方观察到漏斗状缺损。

两步法自酸蚀粘接剂在底涂剂和粘接剂中都含有功能性单体,并可通过在粘接剂中添加氟化物来提高粘接界面的耐碱性^[11,22],同时两步法中含钙底涂剂的使用可增加粘接面的耐碱性^[21]。在粘接强度方面,一步法和两步法自酸蚀粘接系统均能提供足够的粘接强度以满足临床需求;然而两步法粘接系统在形成ABRZ方面更为有效,在牙釉质上可形成较厚的ABRZ,在牙本质上可形成更稳定的粘接层,有助于提高修复边缘的密封性,减少继发龋的发生^[11,21,26]。底涂剂的应用可能会影响磷酸预酸蚀牙釉质的粘接。有研究^[33]发现:应用底涂剂对磷酸预酸蚀牙釉质ABRZ的形成没有影响,但会增加粘接界面的纳米渗漏。不同粘接系统形成ABRZ的优缺点见表1,不同粘接系统牙本质ABRZ形态学上的差异见图2。

5 功能性单体对 ABRZ 的影响

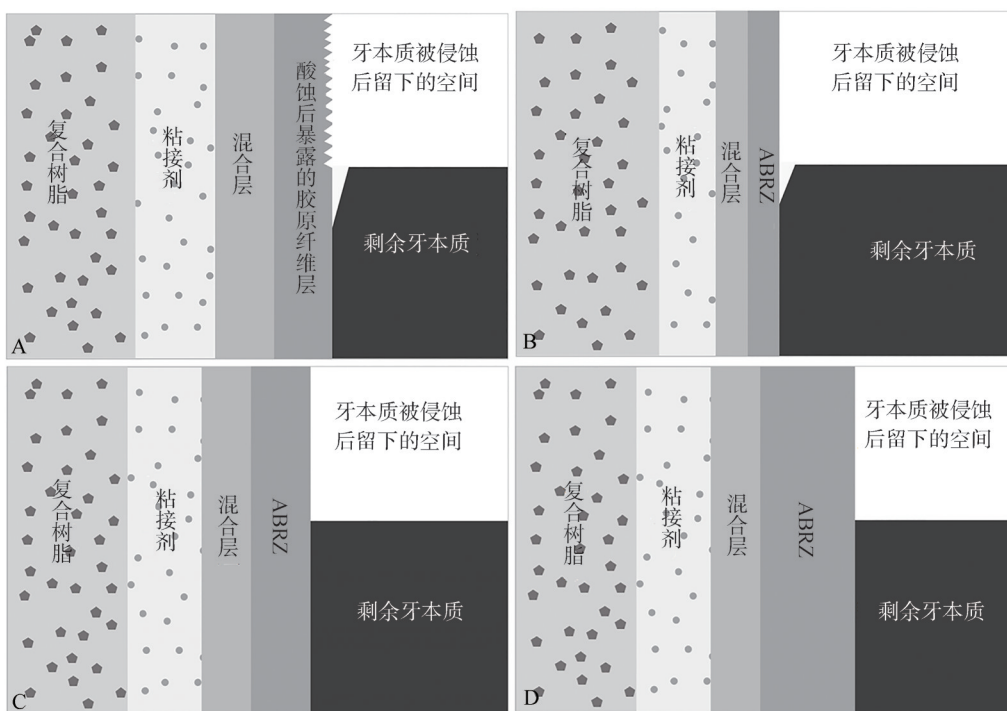
自酸蚀粘接剂中的功能性单体具有酸蚀牙本质,增强单体渗透性,赋予粘接剂化学相互作用的潜力^[9],而且可以影响ABRZ的形态,这与单体和HA反应产物的稳定性有关^[14,26,35]。Yoshida等^[14]比较了3种常用的功能性单体与HA的反应活性和产物的稳定性,以MDP的活性和稳定性最高,其次是4-甲基丙烯酰氧乙基偏苯三酸酐(4-methacryloxyethyl trimellitate anhydride, 4-META)和2-甲基丙烯酰氧乙基苯基磷酸酯(2-methacryloyloxyethyl phenyl phosphate, Phenyl-P)。

在Phenyl-P取代MDP的实验粘接系统中,要么很难观察到ABRZ结构,要么在ABRZ、被侵蚀空间和牙体的交界处观察到一个漏斗状的侵蚀区域,表明在粘接界面下方存在一个易受酸碱侵蚀的薄弱区域^[26],这也直接证明了功能性单体对ABRZ的决定作用。

表 1 不同粘接系统 ABRZ 的优缺点

Tab 1 Advantages and disadvantages of ABRZ in different adhesive systems

粘接系统	优点	缺点
酸蚀-冲洗系统	通过磷酸酸蚀剂预酸蚀牙釉质，增强单体渗透，促进 ABRZ 形成 ^[28]	用于牙本质时无法形成 ABRZ ^[30] ；临床操作难度较高，可能导致邻近牙本质过度脱矿 ^[15]
一步法自酸蚀	形成薄层 ABRZ ^[30] ；简化操作流程	亲水性和疏水性单体的影响可降低粘接耐久性和 ABRZ 的形成 ^[32] ；在 ABRZ 下方形成漏斗状缺损 ^[30]
两步法自酸蚀	形成较厚的 ABRZ ^[10] ；Clearfil SE Bond 作为金标准，提高粘接界面的耐酸性 ^[11]	操作流程相对复杂
实验性释氟粘接系统	增加 ABRZ 厚度，创造高质量的 ABRZ，并有效增强粘接耐久性 ^[11] ；促进牙体硬组织的矿化，提高牙体的抗酸蚀能力 ^[22]	ABRZ 的厚度和粘接强度受氟离子浓度的影响，需要精确控制氟的释放量 ^[34] ；牙体基质的酸抵抗性增加可能会降低自酸蚀粘接系统的效果 ^[32]
实验性含钙底涂剂	增加 ABRZ 厚度，增加粘接界面的耐酸性，提高粘接界面耐久性和稳定性 ^[21]	需要与其他粘接剂或修复材料配合使用，增加了治疗的复杂性 ^[21] ；降低早期粘接强度，特别是当与氟化物粘接剂结合使用时 ^[21] ；仍需更多的临床研究来验证其长期效果和安全性



A: 磷酸酸蚀粘接界面；B: 一步法自酸蚀系统；C: 两步法自酸蚀系统；D: 两步法释氟粘接系统。

图 2 不同粘接系统牙本质 ABRZ 的形态学差异

Fig 2 Morphological differences of dentin ABRZ among different adhesive systems

相比于其他单体，MDP与HA反应的产物稳定，不易受酸碱侵蚀溶解，因此MDP有利于牙釉质粘接界面形成稳定的ABRZ^[26]。有研究^[16]发现：含有MDP功能性单体的粘接系统可有效减少粘接树脂-牙本质界面的纳米渗漏，这可能归因于粘接界面高质量ABRZ的形成。Clearfil SE Bond的底涂剂和粘接树脂中均含有MDP。有研究^[18]发现：在粘接树脂中去除MDP，可增加牙体长期粘接的耐久性，但会导致HL下方ABRZ前沿区域抗酸侵蚀

能力下降。在粘接树脂含有MDP的情况下，额外添加氟化钠可以形成较厚的ABRZ，增强牙釉质的粘接耐久性，改善粘接界面耐酸性^[11]。

功能性单体的组合可能会提升粘接界面的质量。粘接剂中存在二季戊四醇五氟丙烯酸酯单磷酸酯（dipentaerythritol pentacrylate monophosphate, PENTA）时，其与牙釉质的粘接强度与使用含MDP的粘接剂相当，这2种单体都能与HA反应形成稳定且难溶的钙盐。Aung等^[36]的研究发现：与

含有单一酸性官能团单体(10-MDP)的自酸蚀粘接剂相比,使用含有多种酸性官能团单体(10-MDP和PENTA)的自酸蚀粘接剂产生了较厚的ABRZ。

总的来说,功能性单体在粘接剂中的作用是多方面的,它们不仅影响粘接剂与牙体组织的化学结合,还影响ABRZ的形成和质量。MDP因具有与HA的强结合能力和促进ABRZ形成的特性而被广泛研究。然而,粘接的最终效果取决于多种因素,包括功能性单体的类型、浓度以及与其他粘接剂成分的相互作用。氟化物释放粘接剂在提高粘接剂耐久性和抗酸性方面具有潜在优势,因而备受关注。未来的研究需要进一步探讨不同功能性单体对粘接剂性能的具体影响,ABRZ模式与牙釉质/牙本质粘接持久性之间的关系以及如何优化粘接剂配方以实现最佳的临床效果。

6 ABRZ与AD-concept和纳米层的关系

AD-concept揭示了酸性物质与牙齿硬组织相互作用导致脱钙的2个阶段。第一阶段,酸性物质的羧基与牙釉质和牙本质中的HA形成离子键;第二阶段,钙-酸复合物溶解,其溶解速率决定了硬组织脱钙程度,慢速溶解导致有限脱钙,而快速溶解则引起显著脱钙^[5]。AD-concept在Yoshio-ka等^[6]的研究中得到进一步证实。通过对AD-concept的研究^[9,14]发现:高粘接强度的粘接剂,其功能性单体钙盐的溶解速率均较低。

MDP能与钙离子形成强离子键,生成低溶解度的钙盐,从而在HL和粘接树脂之间形成连续的层状纳米结构,即所谓的“纳米层”,4-MET和Phenyl-P均未检测到这种结构^[3]。这种结构通过自组装形成有序的纳米级层,增强了粘接剂与牙齿硬组织的化学稳定性和耐久性^[4]。纳米层的强疏水性有助于保护HL免受水解和酸溶解的影响,同时可能使残余的HA更耐酸^[3]。通过先进的表征技术,如TEM、SEM等,观察聚焦离子束(focused-ion-beam, FIB)切削的横截面,可以发现粘接剂-牙本质界面存在纳米层结构,通过扫描探针显微镜(scanning probe microscopy, SPM)检测其力学性能,发现纳米层的弹性模量较周围粘接树脂更高,有助于提高粘接剂的机械强度^[37]。

AD-concept的第二阶段在粘接中起到重要作用,低溶解度钙盐的沉淀是MDP能够形成连续层

状纳米结构以及ABRZ的关键原因^[3,26]。AD-concept和纳米层理论从分子层面解释了ABRZ的形成机制,强调了功能性单体与HA之间分子相互作用的重要性,这对于硬组织重建的粘接剂的耐久性至关重要。总之,AD-concept、纳米层以及ABRZ的概念深化了对牙体化学粘接机制的理解,为设计和开发新型粘接剂提供了科学依据。

7 ABRZ研究展望

ABRZ的存在增强了牙体硬组织的粘接界面,因其耐受酸碱侵蚀从而有助于防止继发龋并可提高修复体的边缘封闭性,可作为预测牙体粘接耐久性的评价指标。此外,ABRZ的形成提高了牙体修复的质量,延长了修复体的使用寿命,可以为临床医生提供更为稳定和持久的治疗方案选择。

通过优化粘接剂配方,特别是添加氟化物和选择适当的酸性功能性单体,可以形成更有效的ABRZ,从而提高牙体修复的长期成功率。未来的研究和开发应继续探索这些材料的特性,以实现更持久、更稳定的牙体修复效果。目前的研究主要集中在粘接系统中加入不同的化学元素,如氟和钙等,观察是否会影响ABRZ的形成,或者观察不同的处理方式是否会影响ABRZ的形成。目前对添加物的浓度研究较少,也没有开发出有效的合成的商业性粘接剂,对添加物的浓度以及在哪个步骤中添加需要进一步研究。

8 总结

ABRZ位于混合层和牙本质间,是树脂单体渗入混合层深部的部分脱矿的牙本质结构中形成的树脂-HA-胶原纤维混合层结构,其确切形成机制还不明确。不同于传统的HL,ABRZ层含有较多的被树脂包裹的HA,呈现出一定的抗酸碱性能,多在自酸蚀粘接系统中观察到,牙釉质和牙本质中均可产生。ABRZ的质量与粘接耐久性相关,受粘接流程、功能性单体和释氟性的影响,成为预测牙体粘接耐久性的新指标。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

9 参考文献

- [1] van Meerbeek B, Yoshihara K, van Landuyt K, et al.

- From buonocore's pioneering acid-etch technique to self-adhering restoratives. A status perspective of rapidly advancing dental adhesive technology[J]. *J Adhes Dent*, 2020, 22(1): 7-34.
- [2] Tsuchiya S, Nikaido T, Sonoda H, et al. Ultrastructure of the dentin-adhesive interface after acid-base challenge[J]. *J Adhes Dent*, 2004, 6(3): 183-190.
- [3] Yoshihara K, Yoshida Y, Nagaoka N, et al. Nano-controlled molecular interaction at adhesive interfaces for hard tissue reconstruction[J]. *Acta Biomater*, 2010, 6(9): 3573-3582.
- [4] Yoshihara K, Yoshida Y, Hayakawa S, et al. Nanolayering of phosphoric acid ester monomer on enamel and dentin[J]. *Acta Biomater*, 2011, 7(8): 3187-3195.
- [5] Yoshida Y, Van Meerbeek B, Nakayama Y, et al. Adhesion to and decalcification of hydroxyapatite by carboxylic acids[J]. *J Dent Res*, 2001, 80(6): 1565-1569.
- [6] Yoshioka M, Yoshida Y, Inoue S, et al. Adhesion/decalcification mechanisms of acid interactions with human hard tissues[J]. *J Biomed Mater Res*, 2002, 59(1): 56-62.
- [7] Inoue G, Tsuchiya S, Nikaido T, et al. Morphological and mechanical characterization of the acid-base resistant zone at the adhesive-dentin interface of intact and caries-affected dentin[J]. *Oper Dent*, 2006, 31(4): 466-472.
- [8] Guan R, Takagaki T, Matsui N, et al. Dentin bonding performance using Weibull statistics and evaluation of acid-base resistant zone formation of recently introduced adhesives[J]. *Dent Mater J*, 2016, 35(4): 684-693.
- [9] Van Landuyt KL, Yoshida Y, Hirata I, et al. Influence of the chemical structure of functional monomers on their adhesive performance[J]. *J Dent Res*, 2008, 87(8): 757-761.
- [10] Tichy A, Hosaka K, Yang Y, et al. Can a new HEMA-free two-step self-etch adhesive improve dentin bonding durability and marginal adaptation [J]. *J Adhes Dent*, 2021, 23(6): 505-512.
- [11] Kakiuchi Y, Takagaki T, Ikeda M, et al. Evaluation of MDP and NaF in two-step self-etch adhesives on enamel microshear bond strength and morphology of the adhesive-enamel interface[J]. *J Adhes Dent*, 2018, 20(6): 527-534.
- [12] Carrilho E, Cardoso M, Marques Ferreira M, et al. 10-MDP based dental adhesives: adhesive interface characterization and adhesive stability—a systematic review[J]. *Materials*, 2019, 12(5): 790.
- [13] Nurrohman H, Nikaido T, Takagaki T, et al. Apatite crystal protection against acid-attack beneath resin-dentin interface with four adhesives: TEM and crystallography evidence[J]. *Dent Mater*, 2012, 28(7): e89-e98.
- [14] Yoshida Y, Nagakane K, Fukuda R, et al. Comparative study on adhesive performance of functional monomers[J]. *J Dent Res*, 2004, 83(6): 454-458.
- [15] Waidyasekera K, Nikaido T, Weerasinghe DS, et al. Reinforcement of dentin in self-etch adhesive technology: a new concept[J]. *J Dent*, 2009, 37(8): 604-609.
- [16] Nikaido T, Nurrohman H, Takagaki T, et al. Nanoleakage in hybrid layer and acid-base resistant zone at the adhesive/dentin interface[J]. *Microsc Microanal*, 2015, 21(5): 1271-1277.
- [17] Nikaido T, Inoue G, Takagaki T, et al. New strategy to create “Super Dentin” using adhesive technology: reinforcement of adhesive-dentin interface and protection of tooth structures[J]. *Jpn Dent Sci Rev*, 2011, 47(1): 31-42.
- [18] Matsui N, Takagaki T, Sadr A, et al. The role of MDP in a bonding resin of a two-step self-etching adhesive system[J]. *Dent Mater J*, 2015, 34(2): 227-233.
- [19] Vicheva M, Sato T, Takagaki T, et al. Effect of repair systems on dentin bonding performance[J]. *Dent Mater J*, 2021, 40(4): 903-910.
- [20] Ko AK, Matsui N, Nakamoto A, et al. Effect of silver diammine fluoride application on dentin bonding performance[J]. *Dent Mater J*, 2020, 39(3): 407-414.
- [21] Ochiai Y, Inoue G, Nikaido T, et al. Evaluation of experimental calcium-containing primer in adhesive system on micro-tensile bond strength and acid resistance[J]. *Dent Mater J*, 2019, 38(4): 565-572.
- [22] Nikaido T, Takagaki T, Sato T, et al. Fluoride-releasing self-etch adhesives create thick ABRZ at the in-

- terface[J]. *Biomed Res Int*, 2021, 2021: 9731280.
- [23] Aung SSMP, Takagaki T, Ko AK, et al. Adhesion durability of dual-cure resin cements and acid-base resistant zone formation on human dentin[J]. *Dent Mater*, 2019, 35(7): 945-952.
- [24] Giannini M, Makishi P, Ayres AP, et al. Self-etch adhesive systems: a literature review[J]. *Braz Dent J*, 2015, 26(1): 3-10.
- [25] Yang Y, Inoue G, Hosaka K, et al. The effect of a deproteinizing pretreatment on the bonding performance and acid resistance of a two-step self-etch adhesive on eroded dentin[J]. *Oper Dent*, 2024, 49(1): 65-75.
- [26] Li N, Nikaido T, Takagaki T, et al. The role of functional monomers in bonding to enamel: acid-base resistant zone and bonding performance[J]. *J Dent*, 2010, 38(9): 722-730.
- [27] Kumagai RY, Takagaki T, Sato T, et al. Resin cement/enamel interface: a morphological evaluation of the acid-base resistant zone, enamel etching pattern, and effect of thermocycling on the microshear bond strength[J]. *J Adhes Dent*, 2023, 25: 71-78.
- [28] Sato T, Takagaki T, Ikeda M, et al. Effects of selective phosphoric acid etching on enamel using "no-wait" self-etching adhesives[J]. *J Adhes Dent*, 2018, 20(5): 407-415.
- [29] Sato A, Sato T, Ikeda M, et al. Influence of different tooth etchants on bur-cut and uncut enamel[J]. *Dent Mater J*, 2023, 42(3): 311-318.
- [30] Sato T, Takagaki T, Baba YT, et al. Effects of different tooth conditioners on the bonding of universal self-etching adhesive to dentin[J]. *J Adhes Dent*, 2019, 21(1): 77-85.
- [31] Nikaido T, Takagaki T, Sato T, et al. The concept of super enamel formation-relationship between chemical interaction and enamel acid-base resistant zone at the self-etch adhesive/enamel interface[J]. *Dent Mater J*, 2020, 39(4): 534-538.
- [32] Nakamoto A, Sato T, Matsui N, et al. Effect of fluoride mouthrinse and fluoride concentration on bonding of a one-step self-etch adhesive to bovine root dentin[J]. *J Oral Sci*, 2019, 61(1): 125-132.
- [33] Sato T, Nikaido T, Takagaki T, et al. Influence of primer contamination on the bonding interface of enamel pre-etched with phosphoric acid[J]. *Dent Mater J*, 2021, 40(5): 1086-1093.
- [34] Kirihara M, Inoue G, Nikaido T, et al. Effect of fluoride concentration in adhesives on morphology of acid-base resistant zones[J]. *Dent Mater J*, 2013, 32(4): 578-584.
- [35] Nikaido T, Ichikawa C, Li N, et al. Effect of functional monomers in all-in-one adhesive systems on formation of enamel/dentin acid-base resistant zone [J]. *Dent Mater J*, 2011, 30(5): 576-582.
- [36] Aung SSMP, Takagaki T, Ikeda M, et al. Ultra-morphological studies on enamel-universal adhesive interface[J]. *J Dent*, 2021, 104: 103527.
- [37] Yoshihara K, Nagaoka N, Nakamura A, et al. Nanolayering adds strength to the adhesive interface[J]. *J Dent Res*, 2021, 100(5): 515-521.

(本文编辑 吴爱华)